

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



Mémoire de Fin d'Étude

Présenté à

L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Réseaux électriques

Présenté par

Chabrou Mohammed Faouzi et Debbar Ali

Thème

**l'optimisation de la puissance réactive en présence de
dispositif de compensation dynamique (FACTS)**

Soutenu le 04 /06/2017. Devant le jury composé de :

| | | |
|----------------------|-----------------------|------------|
| Mr. TOUILLE SLIMANE | Maitre de conférences | Président |
| Mr. GACEM ABDELMALEK | Maitre de conférences | Rapporteur |
| Mr. BOUGOUFFA LAZHAR | Maitre de conférences | Examineur |

Année Universitaire 2017/2018

Remerciements

*Avant tout nous remercions dieu de nous avoir donné le courage, la patience et la chance d'étudier et de suivre Le chemine de la science. Et , la force et la patience pour élaborer notre travail. Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur **Mr. GACEM Abdelmalek**, pour avoir d'abord proposée ce thème, pour suivi continuel tout le long de la réalisation de ce mémoire et qui n'a pas cessée de nous donner ses conseils. Nous tenons à remercier vivement toutes personnes qui nous ont aidés à élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à accomplir ce travail. Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants qui de l'électrotechnique ont contribué à notre formation par ailleurs, Nos remerciements à tous les membres du jury qui ont accepté de juger notre travail. En fin, nous tenons à exprimer notre recon naissance à tous nos amis et collègues pour le soutien moral et matériel...*

Chabrou. M.F

Debbar. A.



Dédicaces

Je dédie ce travail à :

A ma chère mère

à mon père qui m'ont toujours soutenu,

et aidé à affronter les difficultés,

pour tous ce qui ont fait pour que je puisse les

honorer, et leur patience durant ma vie.

A mes très chers frères et à mes chères sœurs,

à toute ma famille chabrou

*A mes chers amis Et, tous ceux qui me sont
chers.*

dédicaces

Je dédie 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 DEBAAR.

Tous mes amis.

Et, tous ceux qui me sont chers.

Résumé

Ce mémoire présente une l'optimisation de la puissance réactive dans les réseaux électriques par l'intégration des systèmes FACTS en appliquant plusieurs méthodes méta-heuristiques à savoir les Algorithmes l'optimisation par essais de particules PSO et le méthode Mante Carlo MC

Dans ce travail, notre optimisation sujette de diverses contraintes d'égalité et d'inégalités. Plusieurs fonctions objectifs ont été traitées : la minimisation des pertes actives de transmission et la déviation de tension de jeux de barres de charges, ces deux fonctions objectifs sont optimisées individuellement et simultanément. Afin de démontrer l'impact de la technologie FACTS dans le domaine de la gestion et l'exploitation efficace des réseaux électrique, dispositifs FACTS (SVC) ont été modélisés est intégrés dans des réseaux tests pratiques. Pour renforcer le contenu de notre travail, minimiser en coordination avec les paramètres de compensateur shunt SVC pour améliorer la stabilité de tension dans les réseaux électriques et assurer une exploitation efficace. Les méthodes méta heuristiques proposées ont été validées sur des réseaux tests internationaux typiques: IEEE 30-Bus. Les résultats obtenus montrent clairement l'efficacité d'intégrer ces dispositifs dans les réseaux électriques ainsi une étude comparative entre les méthodes proposées, démontre la supériorité de la variante proposée basé sur le l'ajustement dynamique des paramètres de PSO en terme de qualité de solution et convergence.

Mots clés :

Optimisation de l'écoulement de puissance réactive, compensation de la puissance réactive, contrôle de la tension, systèmes de compensation dynamiques FACTS, SVC. Méthodes d'optimisation classique MC, Méthodes d'optimisation globales : PSO

ملخص

تقدم هذه الأطروحة تحسين القدرة التفاعلية في الشبكات الكهربائية من خلال دمج أنظمة FACTS من خلال تطبيق العديد من أساليب الاستدلال ، وهي الخوارزميات ، التحسين من قبل أسراب الجسيمات PSO وطريقة

Mante Carlo (MC)

في هذا العمل ، يخضع تحسيننا إلى قيود مختلفة للمساواة وعدم المساواة. تمت معالجة عدة وظائف موضوعية: تقليل خسائر الإرسال النشطة وانحراف الجهد لمجموعة من قضبان الحمل ، يتم تحسين هاتين الوظيفتين الموضوعيتين بشكل فردي وفي وقت واحد. من أجل إظهار تأثير تقنية FACTS في مجال الإدارة والتشغيل الفعال لشبكات الطاقة ، تم تصميم نماذج (FACTS) (SVC) ودمجها في شبكات الاختبار العملية. لتعزيز محتوى عملنا ، التقليل بالتنسيق مع معاملات مُعزّز التحويلة SVC لتحسين ثبات الفولطية في شبكات الكهرباء وضمان التشغيل الفعال. وقد تم التحقق من صحة طرق الاستدلال المقترحة على شبكات الاختبار الدولية النموذجية: IEEE 30-Bus. النتائج تظهر بوضوح فعالية دمج هذه الأجهزة في أنظمة الطاقة، ودراسة مقارنة لأساليب المقترحة، يدل على التفوق من التباين الديناميكي مقترح قائم على تعديل المعلمات PSO من حيث نوعية الحل والتقارب

الكلمات المفتاحية : التدفق الأمثل للطاقة الكهربائية، نظام تعويض الطاقة الغير فعالة، التحكم في التوتر، نظم التعويض الديناميكي SVC FACTS، طرق التحسين الكلاسيكية MC ، طرق التحسين العالمية

SOMMAIRE

| | | |
|---|------------------------------------|---|
| ✓ | Remerciements | |
| ✓ | Dédicaces | |
| ✓ | Résumé | |
| ✓ | Sommaire | |
| ✓ | Liste des Figures | |
| ✓ | Liste des Tableaux . | |
| ✓ | Liste des Symboles et abréviations | |
| | Introduction Générale..... | 1 |

Chapitre I : Modélisation et généralités sur les système FACTS

| | | |
|-----------|---|----|
| I.1 | Introduction..... | 4 |
| I.2 | Problème de l'écoulement de puissance..... | 4 |
| I.2.1 | Algorithme de N-R dans un système de dimension n | 6 |
| I.2.2 | Solution de l'écoulement de puissance par l'algorithme de Newton Raphson..... | 8 |
| I.3 | Modélisation des éléments du réseau..... | 8 |
| I.3.1. | Modèle de générateur..... | 8 |
| I.3.2. | Modèle de Charge:..... | 9 |
| I.3.3. | Modèle de l'élément shunt:..... | 10 |
| I.3.4. | Modèle de Ligne..... | 10 |
| I.3.5. | Modèle de Transformateur..... | 11 |
| I.4 | Généralités sur les FACTS:..... | 12 |
| I.5 | Rôle des dispositifs FACTS | 13 |
| I.6 | Les différents types des systèmes FACTS..... | 14 |
| I.7 . | Structure des Principaux Dispositifs FACTS | 15 |
| I.7.1. | dispositifs de compensation dynamique shunts..... | 15 |
| I.7.1 | Compensateurs Parallèles..... | 15 |
| I.7.1.1 | Objectif de compensation Parallèles..... | 15 |
| I.7.1.2 | Compensateur statique de puissance réactive (SVC)..... | 16 |
| I.7.1.2.1 | Définition..... | 16 |

| | |
|--|----|
| I.7.1.2.2 Principe de fonctionnement..... | 17 |
| I.7.1.2.3 Le STATCOM (Static Compensator)..... | 18 |
| I.7.1.2.3.1 Définition..... | 18 |
| I.7.1.2.3.2 Principe de fonctionnement..... | 19 |
| I.7.2 Dispositifs de compensation dynamique série..... | 21 |
| I.7.2.1 La capacité série commandé par thyristor (TCSC) | 21 |
| I.7.2.1.1 Définition..... | 21 |
| I.7.2.1.2 Principe de fonctionnement..... | 21 |
| I.7.2.2 Compensateur statique série synchrone (SSSC) | 23 |
| I.7.2.2.1 Définition..... | 23 |
| I.7.2.2.2 Principe de compensation par SSSC | 23 |
| I.7.3 Dispositifs de compensation dynamique hybrides "série - parallèle | 25 |
| I.7.3.1 Compensateurs hybrides à base de GTO thyristors..... | 25 |
| A . Compensateur universel (UPFC)..... | 25 |
| A .1 Définition..... | 25 |
| A .2 Principe de fonctionnement..... | 25 |
| B . IPFC (Interline Power Flow Controller)..... | 26 |
| I.7.3.3 Transformateur déphaseur commandé par thyristor (TCPST)..... | 27 |
| I.7.3.4 Régulateur d'angle de phase commandé par thyristor (TCPAR)..... | 27 |
| I.7.3.5 Régulateur de tension commandé par thyristor (TCVR)..... | 28 |
| I.8 Propriétés' des dispositifs FACTS..... | 28 |
| I.8.1 Avantages des dispositifs FACTS..... | 28 |
| I.8.2 Inconvénients des dispositifs FACTS..... | 28 |
| I.9 Principaux avantages techniques des différentes technologies de FACTS..... | 29 |
| I.10 Conclusion..... | 30 |

Chapitre II Amélioration des dispositifs FACTS

| | |
|--|----|
| II.1.Introduction..... | 32 |
| II.2 . Modélisation des dispositifs FACTS | 32 |
| II.2.1. Injection de puissance aux extrémités de la ligne..... | 33 |
| II.2 .2 Création d'un nœud fictive | 34 |

| | |
|---|----|
| II.2.3 Modification de la matrice d'admittance nodale..... | 35 |
| II.2.4 Choix des dispositifs..... | 36 |
| II.2.4.1 Dispositifs FACTS shunt..... | 36 |
| II.2.4.1.1 Modèle du compensateur statique de puissance réactive..... | 37 |
| II.1.1.1 SVC placé en un nœud du réseau..... | 38 |
| II.4.4.3. Modèle du compensateur statique de puissance réactive (STATCOM) | 39 |
| II.4.5. Dispositifs de compensation série..... | 41 |
| II.4.5.1. Modélisation de TCSC | 41 |
| II.4.6. Dispositifs de compensation shunt-série..... | 42 |
| II.4.6.1. Modélisation mathématique du compensateur universel 'UPFC' | 42 |
| II.5.Conclusion..... | 45 |

Chapitre III: Les méthodes d'optimisation: méthodes méta-heuristique

| | |
|--|----|
| III.1.Introduction:..... | 47 |
| III.2. Qu'est-ce qu'un problème d'optimisation..... | 47 |
| III.3. Classification des problèmes d'optimisation..... | 47 |
| III.4. Concepts de base et terminologie concernant l'optimisation..... | 48 |
| III.5. Résolution du Problème d'optimisation..... | 50 |
| III.6. Méthodes d'optimisation déterministes..... | 51 |
| III.6.1. Méthode du gradient :..... | 52 |
| III.6.1.1. Formulation mathématiques..... | 52 |
| III.6.1.2. Avantages et inconvénients | 53 |
| III.6.2. Méthode de Newton..... | 53 |
| III.6.3Méthodes stochastiques..... | 53 |
| III.6.3.1 Mante-Carlo..... | 54 |
| III.7. Les méta-heuristiques : | 55 |
| III.7.1. Minimum local et global d'une fonction..... | 56 |
| III.7.2. Optimisation par algorithmes génétiques..... | 57 |
| III.7.2.1. Mécanisme de recherche :..... | 57 |
| III.7.2.2. Codage et population initiale..... | 58 |
| III.7.2.2.1. Codage binaire | 59 |
| III.7.2.2.2. Codage réel..... | 60 |

| | |
|---|----|
| III.7.2.3. Les opérateurs utilisés par les AG:..... | 60 |
| III.7.2.3.1. la sélection:..... | 60 |
| III.7.2.3.2. Le croisement:..... | 60 |
| III.7.2.3.3. L'opérateur de mutation :..... | 61 |
| III.7.3. Optimisation par Essaim de particules..... | 62 |
| III.7.3.1. Principe de fonctionnement | 63 |
| III.7.4. Optimisation par colonies de fourmis..... | 66 |
| III.7.4.1. Analogie biologique..... | 66 |
| III.7.4.2. Formulation mathématique..... | 68 |
| III.8. Adaptation des méthodes méta-heuristiques pour la résolution d'ORPF (optimisation de l'écoulement de puissance réactive)..... | 69 |
| III.9. Formulation Mathématiques :..... | 69 |
| III.9.1 Première fonction objectif (Pertes Actives de Transmission <i>DP</i>)..... | 69 |
| III.9.2 Deuxième fonction objectif (Déviation de Tension <i>DV</i>) : | 70 |
| III.9.2.1 Formulation du problème Multi Objectifs..... | 70 |
| III.9.2.2 Les Contraintes : | 71 |
| III.9.2.2.1 Contraintes d'égalités :..... | 71 |
| III.9.2.2.2 Contraintes d'inégalités :..... | 71 |
| III.10. Algorithme génétique..... | 72 |
| III.11. Algorithme d'essaim de particules..... | 73 |
| III.12. L'algorithme de colonies de fourmis (ACO)..... | 74 |
| III.12.1. Les paramètres optimaux des algorithmes de colonies de fourmis..... | 74 |
| III.12.2. Organigramme de la technique ACO appliquée à l'OPF..... | 75 |
| III.13. Conclusion..... | 77 |

Chapitre 4 : Tests et Application

| | |
|--|----|
| IV.1. Introduction:..... | 79 |
| IV.2 Réseaux test | 80 |
| IV.2.1 Augmentation progressive de la charge..... | 80 |
| IV.2.2. Emplacement optimal des FACTS..... | 84 |
| IV.2.2.1 Optimisation avec considération de SVC..... | 84 |
| ❖ Fonction mono objectif de la déviation de tension DV..... | 84 |
| ❖ Fonction mono objectif de pertes actives de transmission DP..... | 86 |

| | |
|--------------------------------|----|
| Etude comparative..... | 89 |
| Conclusion..... | 90 |
| ❖ Fonction multi objectif..... | 91 |
| Conclusion..... | 95 |
| IV.3 Conclusion..... | 96 |
| Conclusion Générale..... | 97 |
| Bibliographie | |
| Annexe | |

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : Modélisation et généralités sur les système FACTS

| | |
|--|-----------|
| <i>Figure I.1 : Modèles des générateurs: a) symbole, b) modèle PV classique.....</i> | <i>9</i> |
| <i>Figure I.2 : Modèle de charge.....</i> | <i>10</i> |
| <i>Figure I.3 : Modèles des éléments shunt: a) symbole, b) élément inductif, c) élément capacitif.....</i> | <i>10</i> |
| <i>Figure I.4 : Modèles en π des lignes de transport.....</i> | <i>11</i> |
| <i>Figure I.5 : Modèle des transformateurs.....</i> | <i>12</i> |
| <i>Figure. I.6 : Classification des dispositifs de compensation FACTS.....</i> | <i>14</i> |
| <i>Figure. I.7 : Modèle mathématique de SVC.....</i> | <i>16</i> |
| <i>Figure. I.8 : Fonctionnement du compensateur statique.....</i> | <i>18</i> |
| <i>Figure. I.9 : Schéma de base du STATCOM.....</i> | <i>19</i> |
| <i>Figure. I.10 : Présentation d'un compensateur.....</i> | <i>19</i> |
| <i>Figure. I.11 : Diagramme vectoriel de STATCOM.....</i> | <i>20</i> |
| <i>Figure. I.12 : Caractéristique statique du STATCOM.....</i> | <i>20</i> |
| <i>Figure. I.13: Insertion d'un TCSC sur une ligne.....</i> | <i>22</i> |
| <i>Figure I.14: Impédance du TCSC en fonction de l'angle.....</i> | <i>22</i> |
| <i>Figure I.15: Schéma de base du SSSC.....</i> | <i>24</i> |
| <i>Figure I.16: Statique du SSSC.....</i> | <i>24</i> |
| <i>Figure . I.17: Schéma simplifié d'un UPFC connecté au réseau électrique.....</i> | <i>25</i> |
| <i>Figure I.18: Schéma du contrôleur de transit de puissance entre lignes.....</i> | <i>26</i> |
| <i>Figure I.19: Schéma de base d'un IPFC.....</i> | <i>27</i> |

Chapitre II Amélioration des dispositifs FACTS

| | |
|---|-----------|
| <i>Figure. II .1 :Modélisation par injection de puissances: a) ligne avec FACTS, b) ligne avec injections équivalentes.....</i> | <i>33</i> |
| <i>Figure. II .2 : Modélisation avec nœud fictif : a) ligne avec FACTS, b) représentation équivalente.....</i> | <i>34</i> |
| <i>Figure. II . 3 : Intégration du dispositif FACTS dans une ligne.....</i> | <i>35</i> |
| <i>Figure. II.4 : Modélisation du SVC : a) symbole, b) modèle.....</i> | <i>37</i> |
| <i>Figure . II.5 : Variation de la puissance réactive absorbée par un SVC en fonction de la tension nodale.....</i> | <i>38</i> |
| <i>Figure. II .6 : SVC placé dans un nœud.....</i> | <i>39</i> |
| <i>Figure. II .7: Représentation schématique de STATCOM.....</i> | <i>39</i> |
| <i>Figure. II.8 : modèle mathématiques e de TCSC.....</i> | <i>41</i> |
| <i>Figure. II .9 : Modèle mathématique de l'UPFC et le système de transmission.....</i> | <i>43</i> |

Chapitre III: Les méthodes d'optimisation: méthodes méta-heuristique

| | |
|---|-----------|
| <i>Figure. III.1 : Différents critères du problème.....</i> | <i>48</i> |
| <i>Figure. III .2 : Principe de base d'une méthodologie d'optimisation.....</i> | <i>50</i> |
| <i>Figure. III.3 : Une classification possible des différents types de méthodes d'optimisation.....</i> | <i>51</i> |
| <i>Figure . III.4. Méthodes d'optimisation stochastiques.....</i> | <i>54</i> |
| <i>Figure III-5 : Organigramme de la méthode Mante Carlo.....</i> | <i>55</i> |
| <i>Figure. III.6 : Minimum local et global d'une fonction.....</i> | <i>56</i> |
| <i>Figure. III .7 : Organigramme de l'algorithme génétique.....</i> | <i>58</i> |
| <i>Figure. III .8 : Les quatre niveaux d'organisation des AG.....</i> | <i>59</i> |
| <i>Figure. III.9: Illustration du codage des variables.....</i> | <i>59</i> |
| <i>Figure. III .10. : Le codage réel et le codage binaire.....</i> | <i>60</i> |
| <i>Figure. III .11. : Représentation de l'opération du croisement.....</i> | <i>61</i> |

| | |
|--|------------|
| <i>Figure. III.12. : Représentation de l'opération de mutation.....</i> | <i>62</i> |
| <i>Figure. III .13. : Représentation schématique du déplacement d'une particule.....</i> | <i>64</i> |
| <i>Figure. III .14 : Une colonie de fourmis qui ramène de la.....</i> | <i>67</i> |
| <i>Figure. III .15 Le problème d'optimisation dans les réseaux électriques.....</i> | <i>69</i> |
| <i>Figure. III.16 : Organigramme de l'algorithme génétique.....</i> | <i>73</i> |
| <i>Figure. III.17 Organigramme de l'algorithme de PSO.....</i> | <i>74.</i> |
| <i>Figure. III.18 L'organigramme de l'algorithme d'ACO.....</i> | <i>77</i> |

Chapitre IV : Tests et Application

| | |
|---|-----------|
| <i>Figure IV.1: Schéma unifilaire du réseau électrique à 30 jeux de barres.....</i> | <i>80</i> |
| <i>Figure. IV.2: Amplitude de tensions des jeux de barres (Cas 1 et 2).....</i> | <i>81</i> |
| <i>Figure. IV.3 Déviation de tensions DV. des jeux de barres (Cas 1 et 2).....</i> | <i>81</i> |
| <i>Figure IV.4 : Pertes actives DP de transmission (Cas 1 et 2).....</i> | <i>82</i> |
| <i>Figure IV.5. Caractéristique de convergence de la déviation de tension par MC avec SVC.....</i> | <i>85</i> |
| <i>Figure IV.6. Caractéristique de convergence de la déviation de tension par PSO avec SVC.....</i> | <i>85</i> |
| <i>Figure IV.7. Amplitude de tensions des JDB trouvé par MC avec SVC.....</i> | <i>86</i> |
| <i>Figure IV.8. Amplitude de tensions des JDB trouvé par PSO avec SVC.....</i> | <i>86</i> |
| <i>Figure IV.9. Caractéristique de convergence des pertes lignes par MC avec SVC..</i> | <i>87</i> |
| <i>Figure IV.10. Caractéristique de convergence des pertes lignes PSO avec SVC... </i> | <i>87</i> |
| <i>Figure .IV.11. Pertes Actives des Lignes trouvé par MC avec SVC.....</i> | <i>88</i> |
| <i>Figure .IV.12. Pertes Actives des Lignes trouvé par PSO avec SVC.....</i> | <i>88</i> |
| <i>Figure .IV.13. Convergence de la déviation de la tension par PSO avec SVC de dix essais.....</i> | <i>89</i> |
| <i>Figure. IV.14. Convergence de la déviation de la tension par MC avec SVC de dix essais.</i> | <i>89</i> |

| | |
|---|-----------|
| Figure IV.15 : Convergence de DP Multi-Objectifs par PSO avec SVC..... | 92 |
| Figure IV.16 : Convergence de DV Multi-Objectifs par PSO avec SVC..... | 92 |
| Figure IV.17: Coût d'investissement de SVC trouvé par PSO..... | 94 |
| Figure IV.18: Amplitude de tensions des JDB trouvé par PSO et SVC..... | 94 |
| Figure IV.19 : Coût d'investissement de SVC trouvé par PSO..... | 95 |
| Figure IV.20: Pertes actives de branche trouvé par PSO et SVC..... | 95 |

LISTE DES TABLEAU

Chapitre I : Modélisation et généralités sur les système FACTS

Tableau I.1. Bénéfices techniques des dispositifs FACTS

Chapitre III: Les méthodes d'optimisation: méthodes méta-heuristique

Tableau. III.1. Les variables de décision du problème

Tableau. III.2. Les paramètres de l'algorithme ACO standard

Chapitre IV : Tests et Application

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

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

Tableau IV. 3. Les paramètres des algorithmes MC,PSO

Tableau .IV.4. Optimisation DV par les quatre approches proposées avec SVC.

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

Tableau .IV.6. Comparaison au niveau d'optimalité entre les quatre approches proposées.

Tableau IV. 7 . Comparaison au niveau d'itération entre les quatre approches proposées.

Tableau IV.8. Optimisation simultanément DP-IC par l'approche PSO avec SVC

Tableau IV.9. Optimisation simultanément DV-IC par l'approche PSO avec SVC

LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS

| | |
|---------------------------------|--|
| IEEE | Institute of Electrical and Electronics Engineers |
| FACTS | Flexible alternatif curant transmission systèmes. |
| TSR | Thyristor Switched Reactor. |
| TSC | Thyristor Switched Capacitor. |
| SVC | Static Var Compensator. |
| STATCOM | Static Synchronous Compensator. |
| TCSC | Thyristor Controlled Series Capacitor. |
| SSSC | Static Synchronous Series Compensator. |
| UPFC | Unified Power Flow Controller. |
| VSC | Voltage Source Converter. |
| VG | Tension du jeu de barre de génération (sending voltage). |
| VL | Tension du jeu de barre de charge (receiving voltage). |
| Pg | Puissance active fournie par la source. |
| Qg | Puissance réactive fournie par la source. |
| Pl | Puissance active demandée par la charge. |
| Ql | Puissance réactive demandée par la charge. |
| Pij | Puissance active transportée par la ligne. |
| Qij | Puissance réactive transportée par la ligne. |
| δ_{ij} | Angle de charge entre VRGR et VRL. |
| Rl | Résistance de la ligne de transport. |
| Xl | réactance de la ligne de transport. |
| Vsh | Tension (shunt) injectée par le SVC. |
| Ish | Courant (shunt) injecté par le SVC. |
| Rsh | Résistance du transformateur de couplage shunt du SVC. |
| Xsh | Réactance du transformateur de couplage shunt du SVC. |
| Psh | Puissance active délivrée par le SVC. |
| Qsh | Puissance réactive délivrée par le SVC. |
| AG | Algorithme Génétique . |
| PSO | Essaims de particules (particle swarm optimization). |

| | |
|-----------------------------|--|
| <i>ACO</i> | Algorithmes de colonies de fourmis. |
| <i>N-R</i> | Newton-Raphson. |
| <i>MC</i> | Mante Carlo |
| <i>ORPF</i> | Répartition optimale de la puissance réactive (Optimal Reactive Power Flow). |
| <i>J.d.B</i> | Jeux de barre |
| <i>C_i</i> | Le coût du production de centrale «i » |
| <i>α, β et γ</i> | Les coefficients constant propres du centrale. |
| <i>k</i> | individus. |
| <i>π</i> | modèle la ligne électrique |
| <i>pu</i> | Unité relative |
| <i>DP</i> | Les pertes actives de transmissions. |
| <i>DV</i> | La déviation de tension. |

Introduction générale

Le mécanisme de gestion des systèmes énergétiques de puissance devient de plus en plus compliqué à cause de la croissance continue de la demande de l'électricité d'une part vu l'augmentation quotidienne de nôtres villes et agglomérations urbaines et la mauvaise adaptation d'autre part de quelques grandeurs électriques (à titre d'exemple mauvais profil de tension aux niveaux de jeux de barres de contrôle). Le problème de planification de la puissance réactive occupe une place importante dans la gestion des réseaux électriques et ce pour procurer un approvisionnement efficace en matière d'électricité .

En réalité le problème de l'optimisation de l'énergie réactive optimal (ORPF) dans les réseaux électriques ne peut être prend lieu que par une variation adéquate dite « optimale » de certaines variables à savoir les tensions de jeux de barres de contrôle, rapports de transformateurs et procurer une meilleure compensation statique (batteries de compensation) ou dynamique (incorporation des systèmes FACTS) dont le but d'améliorer l'efficacité des réseaux électriques.

Dans ce mémoire intitulé l'optimisation de la puissance réactive en présence des dispositifs de compensation dynamiques (FACTS) nous nous intéressons d'appliquer les algorithmes méta-heuristiques à la dite optimisation. Beaucoup de techniques d'optimisation conventionnelles (mathématiques) ont été appliquées dans la littérature pour résoudre le problème d'ORPF. Ces méthodes prouvent leurs handicaps lorsque les fonctions objectifs à traiter sont non linéaires ou discrètes, ces dernières sont incapables voire inutilisables d'aboutir la solution optimale dite globale, cependant les techniques d'optimisation stochastiques comme les algorithmes Mante Carlo (MC) , et algorithmes d'essaims de particules (PSO) sont actuellement considérées comme alternatif et démontrent leurs efficacités pour résoudre ce genre de problèmes d'optimisation.

Les dispositifs FACTS peuvent être utilisés dans la compensation de l'énergie réactive, pour augmenter la capacité de transmission, améliorer la stabilité et le comportement dynamique, et assurer une meilleure qualité de puissance dans les systèmes de puissance modernes. Nous nous intéressons dans ce travail à la

modélisation et l'intégration de dispositifs FACTS, shunt (SVC) tout en améliorant le comportement du réseau électrique en minimisant plusieurs objectifs à savoir :

- Minimisation des pertes totales de transmission (DP).
- Minimisation de la déviation de tension (DV).

Le **premier chapitre** intitulé 'Généralité sur les systèmes FACTS', représente une introduction générale au problème de compensation expose d'une manière détaillée le problème de l'écoulement de puissance, il comporte des généralités sur les nouvelles techniques de compensation dynamiques FACTS, des définitions de bases sont expliquées, les différentes classes de la technologie FACTS sont représentés puis les modèles mathématiques de différents éléments du réseau sont bien schématisés, une description des systèmes FACTS les plus populaires (SVC, STATCOM, TCSC, SSSC, et UPFC) sont présentés à la fin de ce chapitre.

Dans le **deuxième chapitre** nommé Amélioration par des systèmes FACTS, Dans ce chapitre on s'intéresse à l'utilisation des systèmes FACTS, particulièrement les deux dispositif SVC pour résoudre le problème de l'optimisation de l'énergie réactive dans les réseaux électriques tout en appliquant plusieurs techniques d'optimisation globales largement exposée dans le chapitre 3 à savoir les algorithmes génétiques (AG), l'algorithme d'optimisation par essaims de particules (PSO) et la méthode de colonie de fourmis (ACO) , et la méthode de Mante Carlo.

Le **troisième chapitre** intitulé 'les méthodes d'optimisation: méthodes méta heuristiques' est composé de deux partie bien coordonnée : la première présente quelques notions de base sur les problèmes d'optimisation, plusieurs méthodes déterministes sont discutées telles que la méthode du gradient, la méthode de newton ,et les méthodes méta heuristiques

Le **quatrième chapitre** est la partie pratique de ce travail il aborde clairement l'application des algorithmes d'optimisation proposés : MC et PSO, pour résoudre le problème multi objective et mono objective de l'optimisation de l'écoulement de la puissance réactive. L'efficacité des méthodes d'optimisation proposées ont été validée sur des réseaux tests standard (IEEE 30-Bus).

Chapitre I :

Modélisation et généralités sur les systèmes FACTS

I.1 Introduction :

dans le chapitre Après une généralité présentée précédant concernant les systèmes de compensation dynamique FACTS dans les réseaux électriques, il est intéressant d'entamer dans ce présent chapitre les différents types FACTS et leurs modélisations qui seront exploités dans nos programmes de calcul permettant par la suite de nous palper leurs effets sur le perfectionnement de nôtres réseaux.

- Dans la première partie une introduction sur le problème de l'écoulement de puissance connue aussi par l'écoulement de charge est exposée. Ces études sont nécessaires pour la planification et les développements futurs des réseaux et aussi pour assurer un fonctionnement fiable de ces systèmes.
- Dans la deuxième partie nous avons introduit en bref la modélisation des éléments du réseau à titre d'exemple les générateurs, les charges, les éléments shunts ainsi que les lignes et les transformateurs...etc.

Enfin, on a proposé quelques modèles de dispositif FACTS largement utilisés dans la littérature tels que SVC, STATCOM, TCSC, SSSC et l'UPFC, IPFC, TCPST, TCPAR, TCVR.

I.2 Problème de l'écoulement de puissance :

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

Nœud de charge (PQ) : c'est un nœud connecté directement avec la charge, il ne possède aucune source d'énergie. Les puissances active et réactive sont considérées connues.

- Nœud générateur (PV) : c'est un nœud connecté directement avec un générateur ou une source d'énergie réactive. la puissance active et la tension

sont considérées connues. La production de l'énergie réactive est limitée par des valeurs inférieures et supérieures, Q_g^{min} et Q_g^{max} respectivement. Si l'une des deux limites est atteinte, la valeur se fixe à cette limite et la tension se libère, le nœud devient alors un nœud (PQ).

- Nœud de référence (Slack bus) : c'est un nœud connecté avec un générateur relativement puissant ; il est considéré dans le calcul d'écoulement de puissance afin de compenser les pertes actives et assurer l'égalité entre la demande et la génération de la puissance active. Dans un nœud de référence, l'amplitude et l'angle de la tension sont supposés connus [1].

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

$$I_{bus} = Y_{bus} \cdot U_{bus} \quad (I.1)$$

où I est le vecteurs $N * 1$ des courants complexes injectés à chaque jeu de barres et U est le vecteurs $N * 1$ des tensions complexes de chaque jeu de barres. Y est une matrice $N * N$, elle contient toutes les informations concernant les lignes, les transformateurs et les condensateurs. Le courant I_i s'écrit:

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} U_j = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| V_j e^{j(\theta_j + \delta_{ij})} \quad (I.2)$$

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

$$S_i = U_i I_i^* \quad (I.3)$$

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

$$P_i = P_{G_i} - P_{D_i} = \sum_{j=1}^n V_i V_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (I.4)$$

$$Q_i = Q_{Gi} - Q_{Di} = \sum_{j=1}^n V_i V_j (g_{ij} \sin \theta_{ij} + b_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (I.5)$$

Avec $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$ est la différence angulaire entre les jeux de barres i et j , θ_i et θ_j sont les angles de tension des jeux de barres i et j , g_{ij} et b_{ij} sont respectivement la partie réelle de l'admittance (conductance) et la partie imaginaire (la susceptance) de la ligne de transmission.

A cause de non linéarité des équations de l'écoulement de puissance, il est très difficile d'avoir des solutions analytiques. Pour cette raison, plusieurs méthodes numériques ont été proposées pour résoudre le problème de l'écoulement de puissance, parmi les quelles on va discuter la méthode de Newton-Raphson

I.2.1 Algorithme de N-R dans un système de dimension n :

La méthode de Newton Raphson est très puissante à cause de sa convergence rapide au voisinage de la solution. Cette propriété est spécialement utile pour les applications du système électrique parce qu'une estimation initiale proche de la solution est facile à obtenir. Elle est basée sur la détermination de la tangente à la courbe $f(x)$ (représentée des équations de l'écoulement de puissance) en chaque point $(x^{(k)}, f(x^{(k)}))$. L'intersection de cette tangente avec l'axe des x fournit le point $x^{(k+1)}$, ($\Delta x^{(k)}$ étant une approximation de l'erreur commise sur x à l'itération (k)). Soit la fonction $f(x) = 0$ de dimension n , tel que :

$$f(x) = \begin{bmatrix} f_1(x) \\ \vdots \\ f_k(x) \\ f_{k+1}(x) \\ \vdots \\ f_n(x) \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} P_1 \\ \vdots \\ P_k \\ Q_{k+1} \\ \vdots \\ Q_n \end{bmatrix} \quad x^{(0)} = \begin{bmatrix} X_2^{(0)} \\ \vdots \\ X_k^{(0)} \\ X_{k+1}^{(0)} \\ \vdots \\ X_n^{(0)} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} V_2^{(0)} \\ \vdots \\ V_k^{(0)} \\ \theta_{k+1}^{(0)} \\ \vdots \\ \theta_n^{(0)} \end{bmatrix} \quad (I.6)$$

En général : $x^{(x+1)} = x^{(k)} - [J^{(k)}]^{-1} f(x^{(k)})$

I.2.2 Solution de l'écoulement de puissance par l'algorithme de Newton

Raphson :

La solution de l'écoulement de puissance peut être accomplie en utilisant l'algorithme de Newton Raphson comme suit :

Etape 1. Choisir un vecteur initial x (les niveaux de tension et l'angles de phase des jeux de barres, les puissances de sortie des générateur où $x = [\theta, V]$).

Etape 2. Calculer les éléments de matrice d'admittance Y_{bus}

Etape 3. Déterminer des fonctions des puissances actives et réactives et calculer $\Delta F(x)$ où $\Delta F(x) = [\Delta P, \Delta Q]$,

Etape 4. Calculer les éléments de la matrice de jacobéenne.

Etape 5. Résoudre l'équation $\Delta x = J^{-1} \Delta F$

Etape 6. Mettre à jour la solution $x^{k+1} = x^k + \Delta x$

Etape 7. Vérifier que $|\Delta F(x)| < \varepsilon$ Si elle est affirmée continues, sinon, aller à l'étape 3

Etape 8. Vérifier que les contraintes des tension ($V^{min} < V < V^{max}$) [2]

I.3 Modélisation des éléments du réseau :

Un réseau de transport ou de distribution électrique contient un ensemble de composants qu'on doit modéliser afin d'établir les équations qui gouvernent le système électrique. Dans les sections qui suivent, on va exposer quelques modèles algébriques de base relatifs aux composants du réseau qui sont nécessaires pour le calcul de l'écoulement de puissance.

I.3.1. Modèle de générateur :

Dans l'analyse de l'écoulement de puissance, les générateurs sont modélisés comme des injecteurs de courants. La puissance active délivrée par le générateur est réglée à travers le contrôle de la turbine, qui doit être dans les limites de la capacité du système turbine – générateur. La tension est liée principalement à l'injection de la puissance réactive au jeu de barres de production, et comme le générateur doit

fonctionner dans les limites de sa courbe de capacité réactive, il n'est pas possible de régler la tension en dehors de certaines limites admissibles .

$$P_{Gi \min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi \max} \quad (I.9)$$

$$Q_{Gi \min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi \max} \quad (I.10)$$

La (figure. I.1 (a)) illustre le symbole utilisé pour représenter les générateurs. La (figure. I.1 (b)) représente un schéma symbolique correspondant au jeu de barres de contrôle(PV).

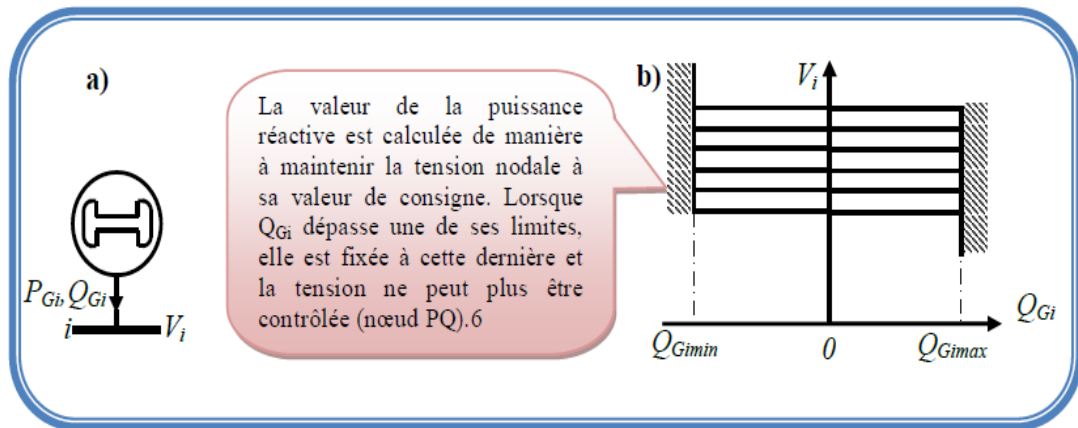


Figure I.1 : Modèles des générateurs: a) symbole, b) modèle PV classique

I.3.2. Modèle de Charge :

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 :

$$S_{Li} = P_{Li} + j Q_{Li} \quad (I.11)$$

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.

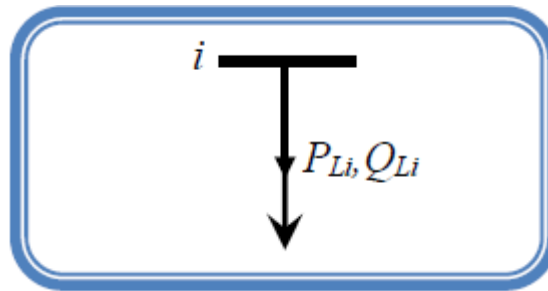


Figure 1.2 : Modèle de charge.

I.3.3. 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 :

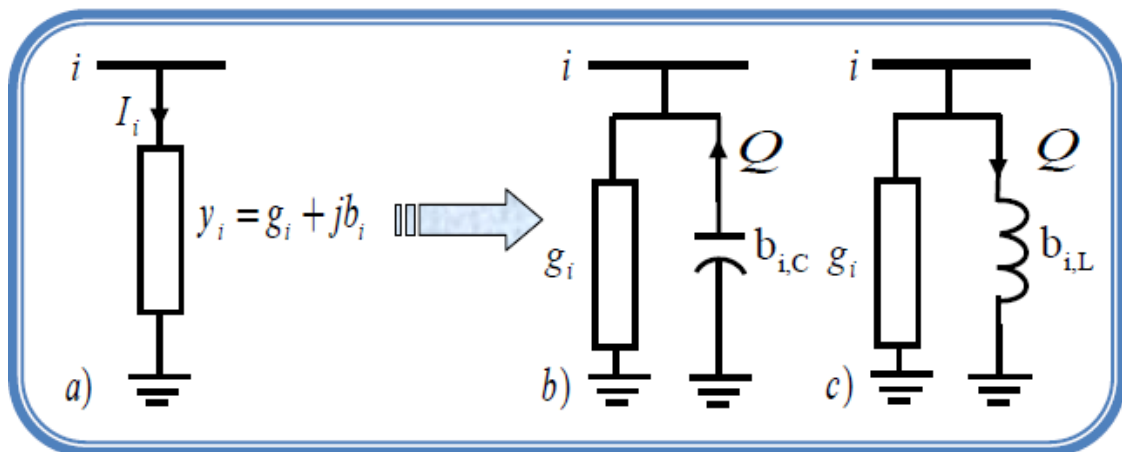


Figure 1.3 : Modèles des éléments shunt: a) symbole, b) élément inductif, c) élément capacitif.

Le symbole général représentant un élément shunt est donné à la (figure. I.3((a)) La susceptance b_{i0} peut être inductive ou capacitive. Dans le premier cas, l'élément consomme de la puissance réactive (figure. I.3 (b)), alors qu'il en fournit au système dans le second (figure. I.3 (c)).

2.3.4. Modèle de Ligne

Généralement la ligne de transport est modélisée par un schéma équivalent en π qui se compose d'une impédance série (résistance R en série avec une réactance inductive X), et une admittance shunt qui consiste en une susceptance capacitive B

(due a l'effet capacitif de la ligne avec la terre) en parallèle avec une conductance d'isolation G . Voir (Figure. I.4).

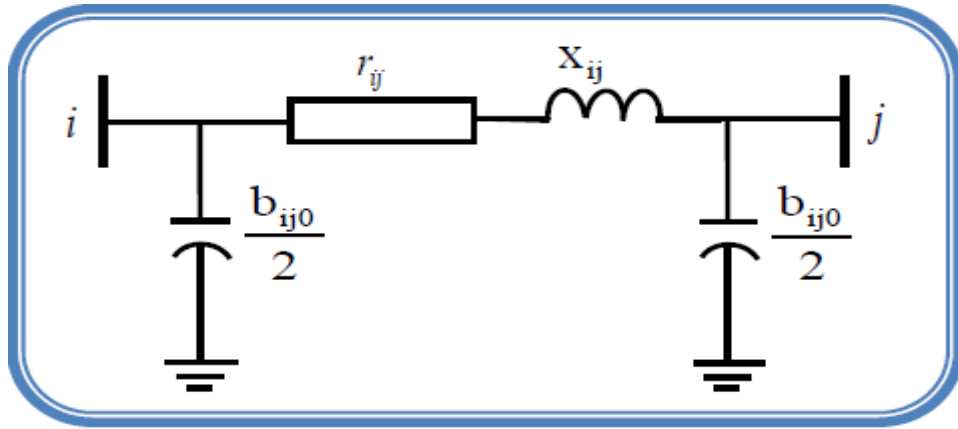


Figure I.4 : Modèles en π des lignes de transport

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

$$Y_{BUS} = \begin{pmatrix} y_{ij} + y_{ij0}/2 & -y_{ij} \\ -y_{ij} & y_{ij} + y_{ij0}/2 \end{pmatrix} \quad (\text{I.12})$$

où l'admittance longitudinale y_{ij} vaut

$$y_{ij} = \frac{1}{r_{ij} + jx_{ij}} = g_{ij} + jb_{ij} \quad (\text{I.13})$$

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

$$y_{ij0} = jb_{ij0} \quad (\text{I.14})$$

Avec :

r_{ij} : Résistance longitudinale ;

x_{ij} : Réactance longitudinale ;

b_{ij} : Susceptance transversale.

I.3.5. Modèle de Transformateur :

Un transformateur de l'énergie électrique est représenté par un quadripôle en π 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 \mathbf{B}_{ij} sont vues comme des fonctions de rapports de transformation a (Figure. I.5).

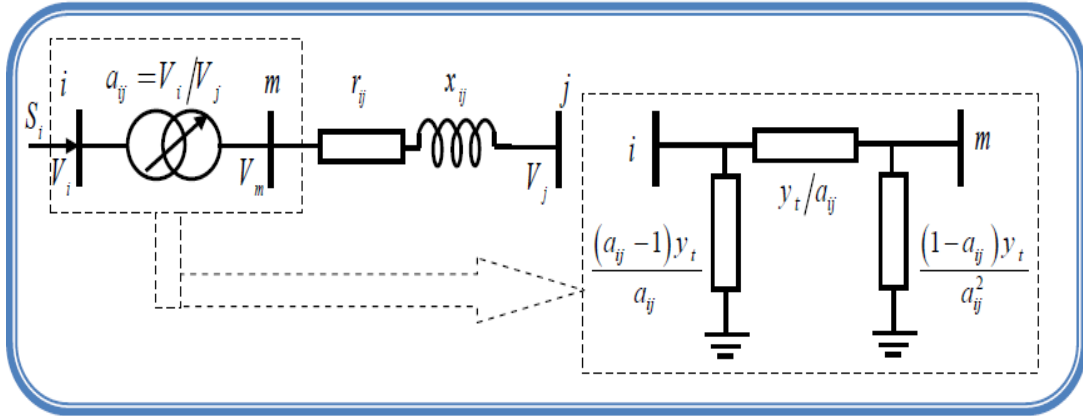


Figure I.5 : Modèle des transformateurs.

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

$$\mathbf{Y}_{trof} = \begin{pmatrix} \mathbf{y}_{ij}/a_{ij}^2 & -\mathbf{y}_{ij}/a \\ -\mathbf{y}_{ij}/a & \mathbf{y}_{ij} \end{pmatrix} \quad (\text{I.15})$$

I.4 Généralités sur les 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 du réseau de puissance

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. Il est donc important de souligner que les dispositifs FACTS

ne peuvent pas augmenter la capacité thermique des lignes de transport. En revanche, ils permettent d'utiliser les lignes plus proches de cette limite en repoussant d'autres limitations, en particulier celles liées à la stabilité. Finalement, il faut noter que les FACTS ne remplacent pas la construction de nouvelles lignes. Ils sont un moyen de différer les investissements en permettant une utilisation efficace du réseau existant.[3]

I.5 Rôle des dispositifs FACTS :

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

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

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

De par leur vitesse de commande élevée, les FACTS possèdent de nombreuses qualités en régime dynamique [4]. Ils permettent en particulier :

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

Les dispositifs FACTS ont également une action bénéfique sur les niveaux des courants de court-circuit ainsi qu'en cas de résonance hypo synchrone.[5]

I.6 Les différents types des systèmes FACTS:

La technologie FACTS n'est pas limitée par un seul dispositif mais elle regroupe une collection de dispositifs à base de l'électronique de puissance implantés dans les réseaux électriques afin de mieux contrôler le flux de puissance et augmenter la capacité de transit de leurs lignes. Par action de contrôle rapide de ces systèmes sur l'ensemble de paramètres du réseau: tension, impédance, déphasage ...etc. ils permettent d'améliorer les marges de stabilité et assurer une meilleure *flexibilité du transfert d'énergie*. La figure I .6 représente la classification des dispositifs de compensation FACTS [6].

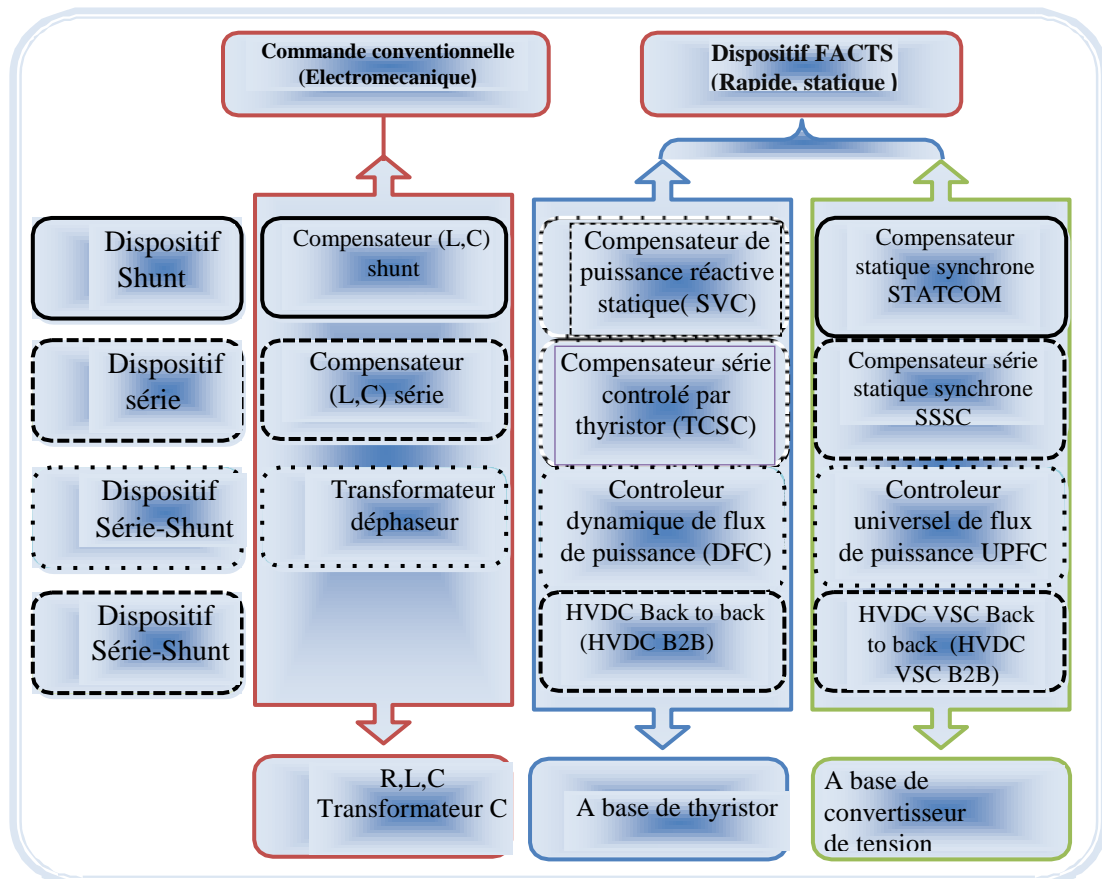


Figure. I .6 : Classification des dispositifs de compensation FACTS.

I. 7 . Structure des Principaux Dispositifs FACTS

I.7.1. Dispositifs de compensation dynamique shunts

Vers la fin des années 60 plusieurs équipements utilisant l'électronique de puissance ont fait leurs apparitions. Ces derniers avaient l'avantage d'éliminer les parties mécaniques et d'avoir un temps de réponse très court. Ces équipements étaient constitués essentiellement d'une inductance en série avec un gradateur. Le retard à l'amorçage des thyristors permet de régler l'énergie réactive absorbée par le dispositif.

En effet tous les compensateurs parallèles injectent du courant au réseau via le point de raccordement. Quand une impédance variable est connectée en parallèle sur un réseau, elle consomme (ou injecte) un courant variable. Cette injection de courant modifie les puissances actives et réactive qui transitent dans la ligne [7].

I.7.1.1. Compensateurs Parallèles :

Les compensateurs parallèles sont utilisés depuis longtemps dans les réseaux électriques principalement pour contrôler les tensions aux niveaux désirés lorsque les conditions du système changent. Des réactances fixes ou mécaniquement commutés sont appliqués pour réduire au minimum les surtensions du système dans des conditions de faible charge et des condensateurs shunt fixés ou mécaniquement commutés sont appliqués afin de maintenir des niveaux de tension dans des conditions de forte charge. Dans les deux cas, les compensateurs shunts produisent une impédance réactive shunt, variable qui est ajustée en fonction des conditions du réseau de transport.

Les commutateurs mécaniques avaient commencé à être remplacés par les commutateurs statiques à base de thyristors vers la fin des années 70 [5]. Actuellement, les compensateurs shunts et notamment le SVC sont largement répandus dans les réseaux électriques.

I.7.1.2 Objectif de compensation Parallèles

Il est reconnu depuis longtemps que la puissance transmissible en régime permanent et le profil de la tension au long de la ligne de transmission peuvent être contrôlés par une compensation shunt appropriée. Le but de cette compensation réactive consiste à modifier les caractéristiques électriques naturelles de la ligne de

transmission pour la rendre plus compatible avec la demande de charge en vigueur. Ainsi les réactances shunts sont appliquées pour minimiser les surtensions pour les lignes dans le cas de faibles charges, cependant, les gradins (capacités) sont appliqués pour maintenir le niveau de tension dans le cas des fortes charges.

L'ultime objectif de l'application de la compensation shunt dans le système de transport est d'augmenter la puissance transmissible et la stabilité du système. La compensation du réactif au point milieu est utilisée pour la régulation de la tension et pour segmentation de la ligne de transmission, et utilisée à la fin des lignes radiales pour empêcher une instabilité de tension, ainsi pour un contrôle dynamique de la tension et augmentation de la stabilité dynamique et la réduction des oscillations de puissance.[3]

I.7.1.3 Compensateur statique de puissance réactive (SVC):

I.7.1.3.1 Définition:

Compensateur statique de puissance réactive (SVC) est un dispositif de compensation shunts de la famille flexible de systèmes de transmission à courant alternatif (FACTS). Il peut fournir en continu la puissance réactive nécessaire pour contrôler les fluctuations dynamiques de la tension sous différents régimes de fonctionnement et ainsi améliorer les performances de réseaux de transport et de distribution d'énergie électrique. L'installation de SVC en un ou plusieurs points spécifiques du réseau peut accroître la capacité de transit et réduire les pertes tout en maintenant un profil de tension régulier sous différents régimes. De surcroît, un compensateur statique sa puissance réactive peut atténuer les oscillations des amplitudes de tension [7].

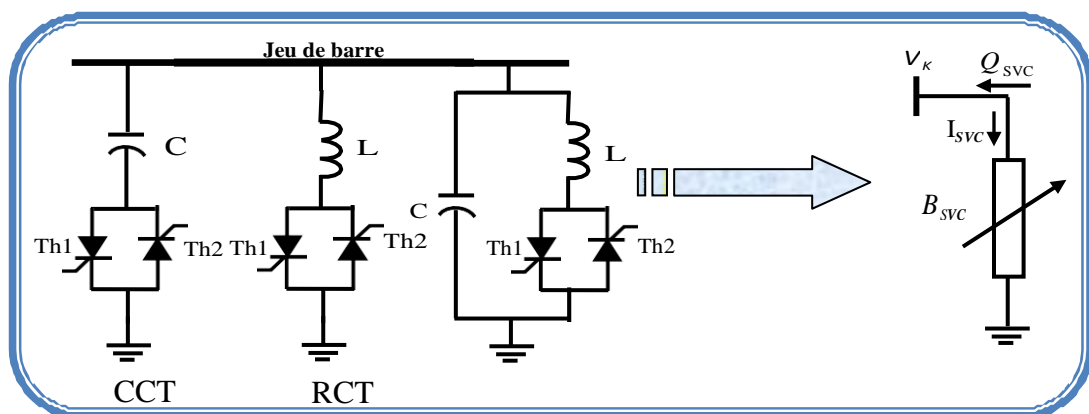


Figure. 1.7 : Modèle mathématique de SVC

I.7.1.3.2 Principe de fonctionnement :

La figure. I .7 donne une représentation schématique monophasée d'un compensateur statique. Il est composé d'un condensateur avec une réactance capacitive CX et d'une bobine d'inductance avec la réactance LX .Ce système utilise l'angle d'amorçage α des thyristors pour contrôler le courant dans la réactance alors que le contrôle de la puissance réactive par cette méthode est rapide et d'une façon continue

Le *RCT* ne peut absorbée que de l'énergie réactive, puisque il est constitue d'élément inductifs. C'est pour cela que l'on associe ses dispositifs avec des bancs de condensateur commandé par thyristor (*CCT*) qui fournit de l'énergie réactive au réseau. Des thyristors fonctionnent cette fois en pleine conduction (une période complète de la pulsation du réseau).

Le réglage de l'énergie absorbée par *RCT*, le bilan global est la somme de deux énergies.

Ce dispositif est associé à des filtres LC accordés pour éliminer les harmoniques de ces dispositifs *RCT*, *CCT*, bancs des capacités fixes et filtres d'harmoniques constitue le compensateur hybride, plus connu sous le nom de *SVC* dont le premier dispositif à été installé en 1979 en Afrique du Sud.

La caractéristique statique de *SVC* est donnée par la (figure. I.8) trois zone sont distinctes :

- Pour $V_{\min} < V < V_{\max}$: est une zone de réglage où l'énergie réactive est une combinaison des *CCT* et *RCT*.
- Pour $V < V_{\max}$: est une zone où le *RCT* donne son énergie maximale (bute de réglage). Les condensateurs sont déconnectés.
- Pour $V > V_{\min}$: est une zone où les seule capacités sont connectées au réseau.

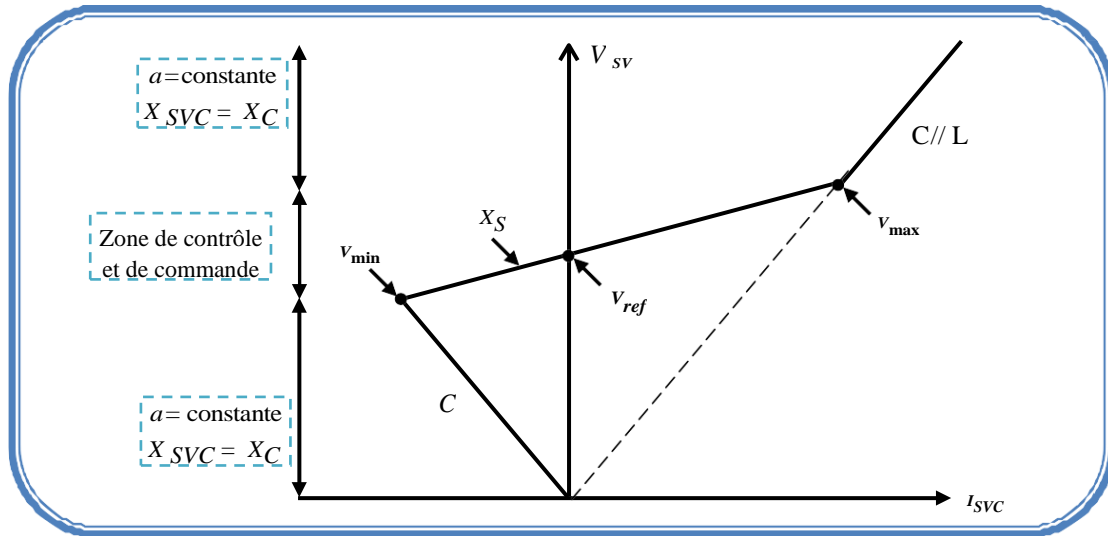


Figure. I.8 : Fonctionnement du compensateur statique

Le SVC présente plusieurs avantages :

- ✓ Stabiliser la tension dans les systèmes faibles.
- ✓ Réduire les pertes de transmission.
- ✓ Augmenter la capacité de transmission.
- ✓ augmenter la limite de stabilité.
- ✓ Améliorer la commande et la stabilité de tension.
- ✓ Atténuer les oscillations de puissance.

I.7.1.4 Le STATCOM (Statique Compensateur) :

I.7.1.4.1 Définition :

Le STATCOM (Statique Compensateur) a connu jusqu'à maintenant différentes appellations, CSERA (Compensateur statique d'énergie réactive de type avancé). ASVC (Advanced Static Var Compensator). SVG (Static Var Generator) et STATCON (Static Condenser).

Un STATCOM est un système d'électronique de puissance connecté en parallèle, qui injecte dans le réseau un courant alternatif contrôlé en phase et en amplitude. Leur topologie est basée sur des convertisseurs de tension. Le schéma de STATCOM est donné par la (figure. I.9).

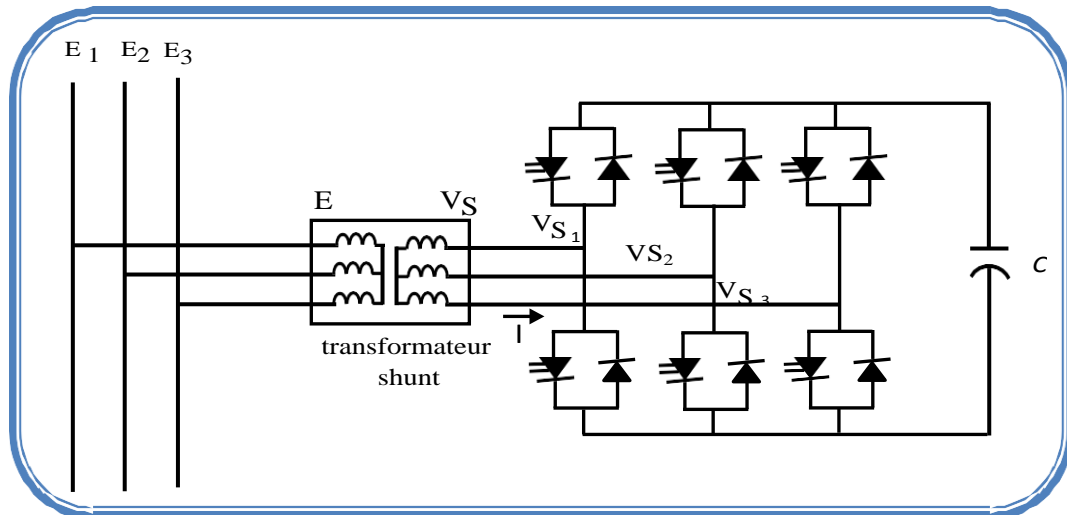


Figure. I.9 : Schéma de base du STATCOM

I.7.1.4.2 Principe de fonctionnement :

Le principe de fonctionnement de STATCOM est similaire à celui du compensateur synchrone. Les tensions de sortie sont générées par un onduleur au lieu d'avoir été créées par un groupe tournant. Ce principe a pu être mis en œuvre grâce à l'évolution des composants de l'électronique de puissance, et surtout grâce à l'apparition des GTO de forte puissance. Les cellules de commutation sont bidirectionnelles, c'est-à-dire formées de GTO et de diodes en antiparallèle. Le rôle de STATCOM est d'échanger l'énergie réactive avec le réseau électrique. L'échange d'énergie réactive se fait par le contrôle de la tension de sortie de l'onduleur V_S laquelle est en phase avec la tension du réseau E .

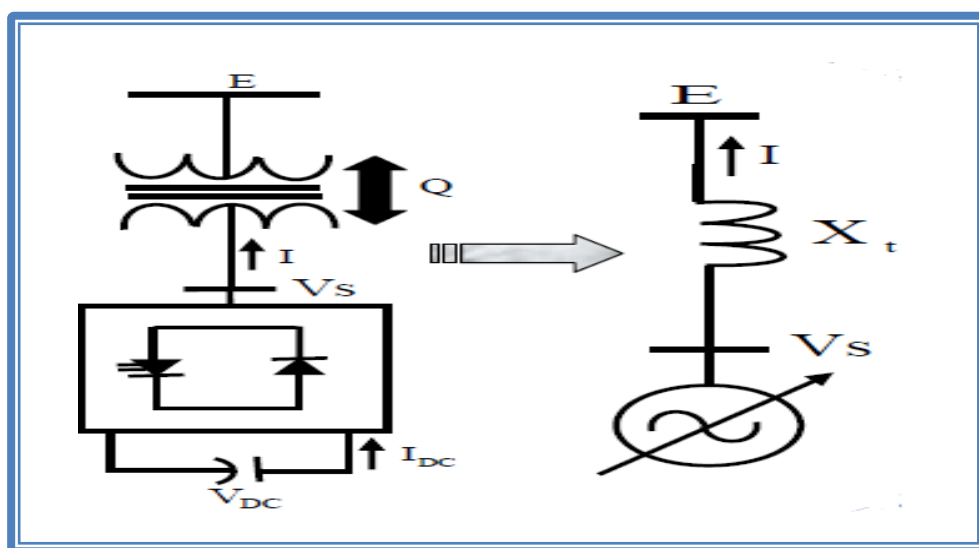


Figure. I.10 : Présentation d'un compensateur

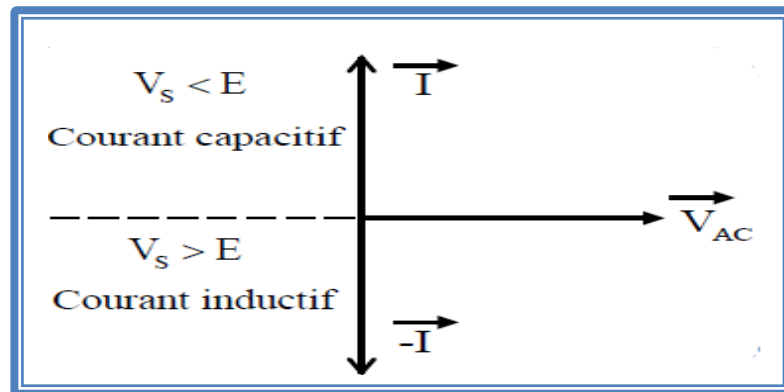


Figure. I.11 : Diagramme vectoriel de STATCOM

Le fonctionnement peut être décrit de façon suivante :

- Si $V_s < E$, le courant circulant dans l'inductance est déphasé de $+\pi/2$ par rapport à la tension E ou le courant est capacitif.
- Si $V_s > E$, le courant circulant dans l'inductance est déphasé de $-\pi/2$ par rapport à la tension E ou le courant est inductif.
- Si $V_s = E$, le courant circulant dans l'inductance est nul, il n'y a pas d'échange d'énergie.

On considère dans ce fonctionnement que les tensions sont triphasées et équilibrées.

Par ailleurs,

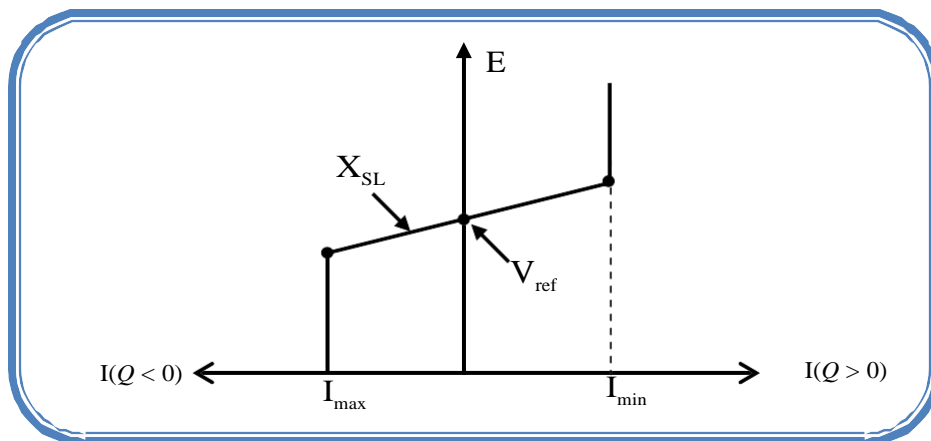


Figure. I.12 : Caractéristique statique du STATCOM.

Le STATCOM présente plusieurs avantages :

- ✓ bonne réponse à faible tension : le STATCOM est capable de fournir son courant nominal, même lorsque la tension est presque nulle.
- ✓ bonne réponse dynamique : Le système répond instantanément.
- ✓ L'étendue de la plage de l'opération est plus large qu'avec un SVC classique.
- ✓ Pour un contrôle optimal de la tension, les phases sont contrôlées séparément pendant les perturbations du système.
- ✓ Un design modulaire du convertisseur permet une adaptation pour une grande plage de puissances nominales.

I.7.2 Dispositifs de compensation dynamique série :

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

I.7.2.1 La capacité série commande par thyristor (TCSC) :

I.7.2.1.1 Définition

La capacité série commande par thyristor (TCSC: Thyristors Controlled Series Compensator) est un dispositif de compensation série, elle utilise l'électronique de puissance comme élément de base. Elle connecte en série avec le réseau pour contrôler le transit de puissance, l'amortissement de résonance subsynchrone et des oscillations de puissance. Ce type de compensateur est apparu au milieu des années 80.

I.7.2.1.2 Principe de fonctionnement :

Le TCSC est composé d'une inductance en série avec un gradateur à thyristor, le tout en parallèle avec un condensateur. Le TCSC est inséré sur la ligne de transmission (Figure. I.13). Où

X_c : est l'impédance du condensateur du TCSC.

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

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

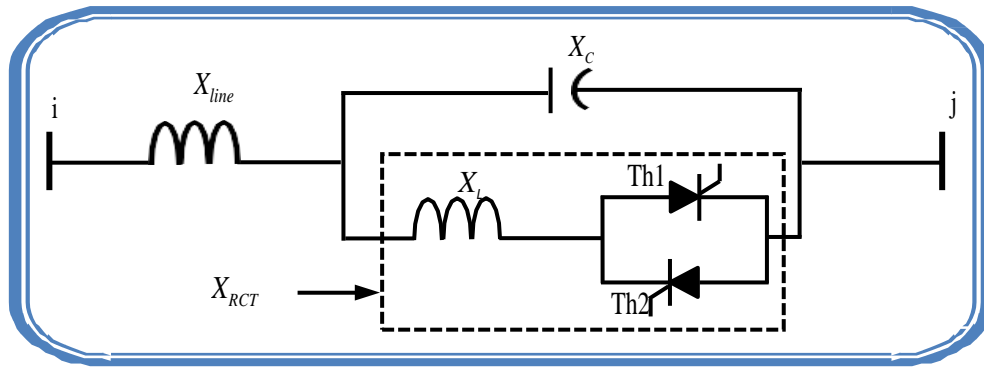


Figure I.13: Insertion d'un TCSC sur une ligne

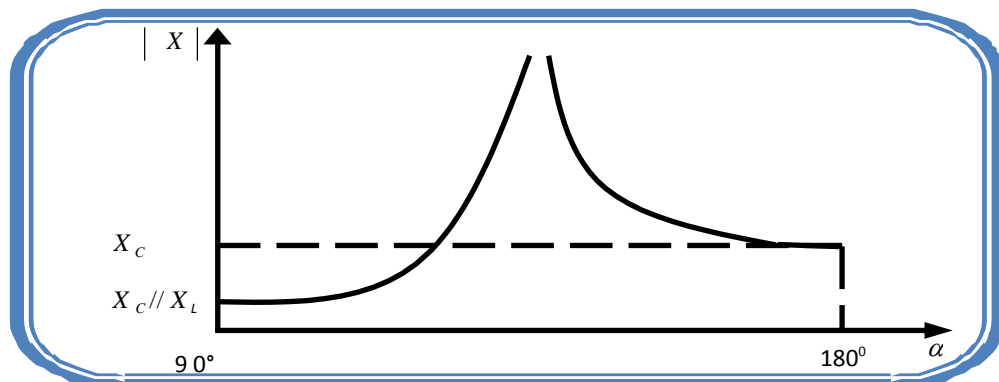


Figure I.14: Impédance du TCSC en fonction de l'angle

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

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

Le dispositif peut opérer en trois modes différents :

- a) **Mode hors circuit** : les thyristors sont en pleine conduction.
- b) **Mode bloqué** : les thyristors sont bloqués.

c) **Mode variable** : la conduction des thyristors est contrôlée par un signal d'amorçage et donc le TCSC a une réactance contrôlables dans les régions inductives et capacitives. Ce dernier cas a un grand intérêt. Les angles d'amorçage des thyristors peuvent changer de 90° jusqu'à une valeur maximale dans une plage de fonctionnement inductif et de fonctionnement capacitif.

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

- ❖ Compensation du déséquilibre des courants de charge.
- ❖ Amélioration de la stabilité dynamique, par l'amortissement des oscillations de puissance et de la stabilité de tension.
- ❖ Réduction des risques de résonance hypo-synchrone.

I.7.2.2 Compensateur statique série synchrone (SSSC) :

I.7.2.2.1 Définition:

Le SSSC est un système d'électronique de puissance connecté en série qui injecte une tension en série avec la ligne de transmission à travers un transformateur série. Le SSSC, a une fonction comparable au TCSC . Mais contrairement à ce dernier qui présente une zone morte à la résonance parallèle, le réglage est continu. De plus, l'introduction d'un stockage d'énergie est possible du fait de la structure des convertisseurs de tension (VSC).

I.7.2.2.2 Principe de compensation par SSSC :

Ce type de compensateur série (Compensateur Synchrone Statique Série) est le plus important dispositif de cette famille. Il est constitué d'un onduleur triphasé couplé en série avec la ligne électrique à l'aide d'un transformateur (Figure. I.15).

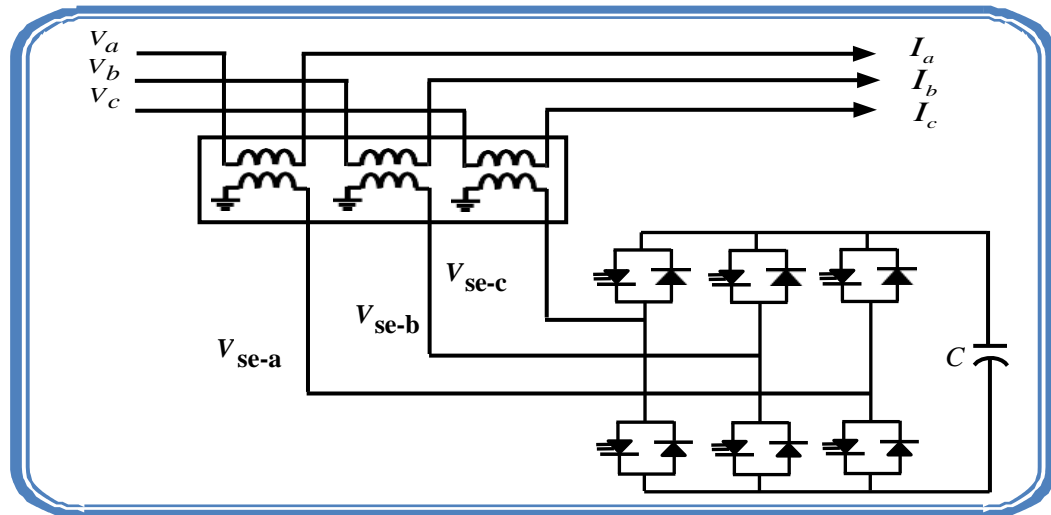


Figure 1.15: Schéma de base du SSSC

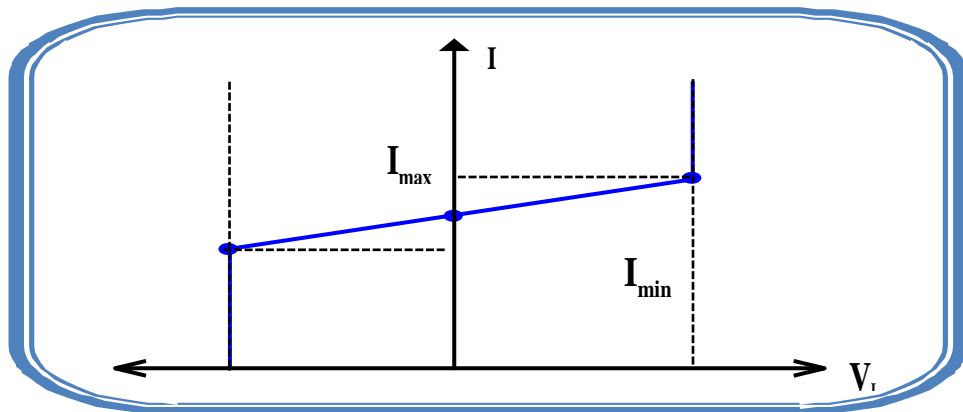


Figure 1.16: Statique du SSSC

Son rôle est d'introduire une tension triphasée, à la fréquence du réseau, en série avec la ligne de transport. Cette tension est en quadrature avec le courant de ligne.

Nous pouvons, dans ce cas, régler continuellement la valeur apparente de la capacité ou de l'inductance ainsi introduite dans la ligne. L'avantage de ce compensateur est de ne pas introduire physiquement un condensateur ou une inductance, mais de simuler leurs fonctions.

Cela évite l'apparition des oscillations dues à la résonance avec les éléments inductifs du réseau.

La caractéristique statique d'un Compensateur Synchron Statik Série est donnée sur la(figure. I.17) .

I.7.3 Dispositifs de compensation dynamique hybrides "série - parallèle "

I.7.3.1 Compensateurs hybrides à base de GTO thyristors

A . Compensateur universel (UPFC)

A.1 Définition

L'UPFC (Unified Power Flow Contrôler), appelé aussi Déphaseur Régulateur Universel (DRU) ou variateur de charge universel, est l'un des plus performants des composants FACTS. Il est capable de contrôler, simultanément et indépendamment, la puissance active et la puissance réactive de la ligne. L'originalité de ce compensateur est de pouvoir contrôler les trois paramètres associés au transit de puissance dans une ligne électrique : la tension, l'impédance de la ligne, le déphasage des tensions aux extrémités de la ligne.

En principe, l'UPFC est capable d'accomplir les fonctions des autres dispositifs FACTS à savoir le réglage de la tension, la répartition de flux d'énergie, l'amélioration de la stabilité et l'atténuation des oscillations de puissance.

A.2 Principe de fonctionnement :

Le dispositif UPFC est constitué de deux onduleurs triphasés de tension à thyristors GTO, l'un connecté en parallèle au réseau par l'intermédiaire d'un transformateur triphasé, l'autre connecté en série avec le réseau via trois transformateurs monophasés dont les primaires sont reliés, entre eux, en étoile.

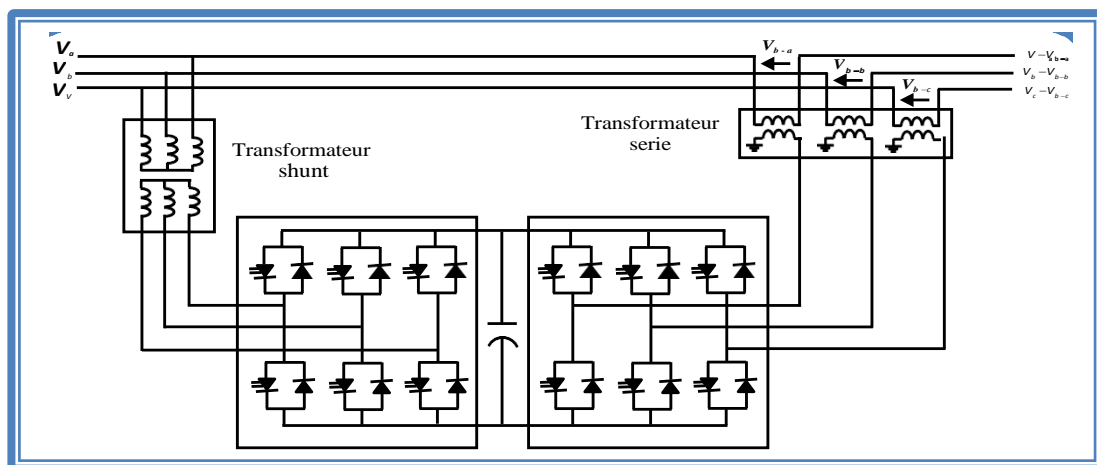


Figure . I.17: Schéma simplifié d'un UPFC connecté au réseau électrique

Les deux onduleurs sont interconnectés par un bus continu et par un condensateur de filtrage comme indiqué sur la (figure. I.18).

L'onduleur série injecte une tension à la même fréquence que celle du réseau et dont l'amplitude et la phase est ajustable. Ce réglage d'amplitude et de phase permet d'obtenir trois modes de fonctionnement de la partie série :

- Contrôle de tension : la tension injectée est en phase avec celle du côté shunt.
- Contrôle de l'impédance de ligne : la tension injectée est en quadrature avec le courant de ligne. Ce mode permet de faire varier l'impédance de la ligne comme un compensateur série.
- Contrôle de phase : l'amplitude et la phase de la tension injectée sont calculées de manière à obtenir le même module de la tension avant et après l'UPFC.

Le but principal de ces trois modes de fonctionnement est le contrôle des puissances actives et réactive qui transitent dans la ligne. De plus, l'UPFC est capable de combiner les différentes compensations et de basculer d'un mode de fonctionnement à un autre.

La partie shunt peut être utilisée afin de compenser la puissance réactive pour le maintien du plan de la tension au nœud S et éventuellement fournir de la puissance active injectée dans le réseau par la partie série.[7]

B . IPFC (Interline Power Flow Controller):

Le contrôleur de transit de puissance entre ligne IPFC (Interline Power Flow Controller) est forme de plusieurs SSSC, chacun fournit une compensation série à une seule ligne. Les SSSC sont raccordes en parallèle du cote continu, permettant le transfert et la compensation entre les lignes. Le principe de l'IPFC est illustre dans la (Figure I.18).

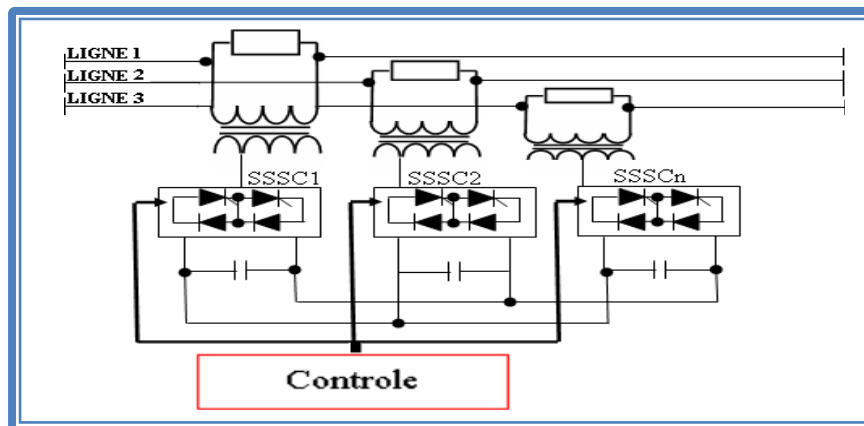


Figure I.18: Schéma du contrôleur de transit de puissance entre lignes.

L'IPFC permet de transférer de la puissance active et réactive entre les lignes compensées pour égaliser les transits de puissances actives et réactive sur les lignes ou pour décharger une ligne surchargée vers une autre moins chargée. Les tensions injectées possèdent une composante en quadrature et une composante en phase avec les courants respectifs des lignes, alors que la composante en phase définit le niveau de puissance active échangée avec les autres lignes. Sur la liaison continue, le bilan est toujours nul [8].

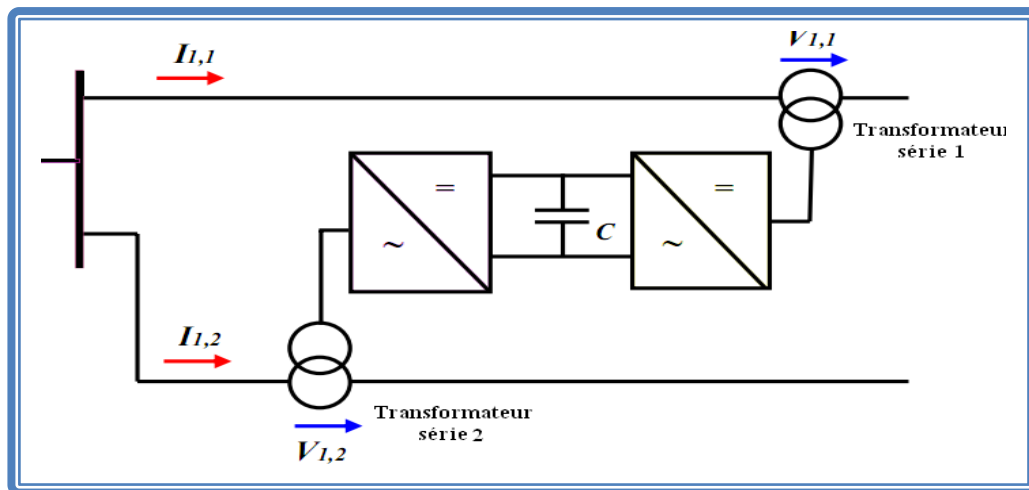


Figure I.19: Schéma de base d'un IPFC.

I.7.3.3 Transformateur déphaseur commandé par thyristor (TCPST) :

IEEE définit le TCPST (Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer) comme étant un transformateur déphaseur ajusté par thyristor afin de fournir un angle de phase rapidement variable.

Transformateur déphaseur commandé par thyristor TCPST, est le premier équipement FACTS combiné .

I.7.3.4 Régulateur d'angle de phase commandé par thyristor (TCPAR) :

IEEE définit le TCPAR (Thyristor Controller Phase Angle Régulation), comme étant un transformateur déphaseur qui permet le contrôle du déphasage entre ses tensions terminales tout en gardant leurs amplitudes invariables .

Le régulateur d'angle de phase commandé par thyristor TCPAR, contrairement au TCPST, est capable de fournir (ou d'absorber) l'énergie réactive au réseau.

I.7.3.5 Régulateur de tension commandé par thyristor (TCVR) :

IEEE définit le TCVR (Thyristor Controlled Voltage Regulator) comme étant un transformateur contrôlé par thyristor qui permet la commande de la phase de tension d'une manière continue .

Le régulateur de tension commandé par thyristor TCVR, est un autre membre de la famille des FACTS combinés. Leur prix relativement réduit, leur confère un avantage certain dans le contrôle de l'écoulement d'énergie réactive.[5]

I.8 Propriétés' des dispositifs FACTS :

L'utilisation de la nouvelle technologie FACTS est un moyen susceptible d'apporter des solutions qui semble meilleurs.

Les systèmes FACTS permettent aux circuits de transmission d'être utilisés à leur capacité thermique maximale et aussi offre au système de puissance une plus grande flexibilité.

I.8.1 Avantages des dispositifs FACTS :

Les avantages apportés aux réseaux électriques sont :

- Grande fiabilité grâce à l'utilisation de contrôleur d'électronique de puissance caractérisée par une grande rapidité de réaction;
- Une grande flexibilité dans le contrôle de la puissance de telle sorte qu'elle s'écoule le long de l'itinéraire de transmission prescrit;
- Amélioration de la stabilité transitoire.

I.8.2 Inconvénients des dispositifs FACTS :

Les dispositifs FACTS sont considérés comme des solutions pour aider les systèmes électriques, mais ils présentent aussi des inconvénients. En plus, qu'ils ne représentent pas une solution universelle, ils existent plusieurs contraintes pour que ces dispositifs soient efficaces et rentables :

- Le choix du FACTS;
- Le choix du modèle du FACTS;
- Le choix de la localisation du FACTS;
- Protection pour les FACTS et pour le réseau;
- Interaction entre les dispositifs FACTS et l'autre élément.[9]

I.9 Principaux avantages techniques des différentes technologies de FACTS:

Les différents dispositifs FACTS présentes dans ce chapitre possèdent tous leurs propres caractéristiques, tant en régime permanent qu'en régime transitoire. Chaque type de dispositif sera donc utilise pour répondre a des objectifs bien définis. Des considérations économiques entreront également dans le choix du type d'installation a utiliser. Le tableau (I.1) synthétise les principaux avantages techniques des différentes technologies de FACTS. Le "+" est proportionnel a l'efficacité du dispositif.

Tableau 1.1. Bénéfices techniques des dispositifs FACTS [10]

| Dispositife | Contrôle du transit de puissance | Controlee de la tension | Stability transitoire | Stability statique |
|-------------|----------------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------|
| SVC | + | +++ | + | ++ |
| STATCOM | + | +++ | ++ | ++ |
| TCSC/GCSC | ++ | + | +++ | ++ |
| SSSC | ++ | + | +++ | ++ |
| UPFC | +++ | +++ | +++ | +++ |
| IPFC | +++ | + | +++ | ++ |

I.10 Conclusion :

Dans ce chapitre on s'intéresse à l'utilisation des systèmes FACTS, particulièrement les deux dispositifs SVC pour résoudre le problème de l'optimisation de l'énergie réactive dans les réseaux électriques tout en appliquant plusieurs techniques d'optimisation globales largement exposées dans le chapitre 3 à savoir les algorithmes génétiques (AG), l'algorithme d'optimisation par essaims de particules (PSO) et la méthode de colonie de fourmis et Monte Carlo (MC).

Nous avons présenté dans ce chapitre, une définition et une classification des divers types de contrôleurs FACTS comme le SVC, STATCOM, TCSC, SSSC, UPFC, IPFC, TCPST, TCPAR, TCVR. Cette classification est adoptée comme classification universelle des systèmes FACTS. La plupart d'entre eux sont déjà en service dans la pratique.

Parmi tous ces nombreux types de compensateurs, on a choisi le compensateur shunt SVC qui peut maintenir la tension à un niveau désiré, qui peut réduire la réactance de la ligne et augmenter la puissance transmise.

Chapitre II:
Amélioration puissance
par des dispositifs FACTS

II .1. Introduction:

L'exploitation d'un réseau électrique est assujettie à quelques règles fondamentales. D'une part, il faut assurer en permanence l'égalité entre la production et la consommation afin de maintenir la fréquence à une valeur constante. D'autre part la répartition de la puissance active entre les générateurs et les charges obéissent aux lois de Kirchhoff ; les transits empruntent les chemins de moindre impédance sans se soucier des capacités de transport des lignes et des problèmes de stabilité. A cela vient s'ajouter la puissance réactive, qui peut être produite ou consommée par les lignes elles-mêmes et qui vient modifier l'état de charge des lignes ainsi que le plan de tension.

La technologie des FACTS présente des solutions efficaces pour l'amélioration du fonctionnement du système de puissance. Leurs capacités de contrôler les différents paramètres électriques agissant sur le flux de puissance dans un réseau permettent un contrôle efficace du transit de puissance et de la tension dans un réseau. Ces dispositifs peuvent aussi augmenter la puissance transmissible et la stabilité du système de puissance. Les avantages des FACTS ne touchent pas uniquement le régime permanent, ils ont aussi des avantages en régime transitoire et dynamique tel que l'amortissement de pompage, le filtrage des harmoniques et la limitation des courants de défaut. Ce chapitre met en évidence les caractéristiques et Modèle du compensateur Modèle du compensateur FACTS développés à ce jour dont chaque famille est décrite de façon plus détaillée.

II .2 . Amélioration puissance par des dispositifs FACTS :

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

II .2.1. Injection de puissance aux extrémités de la ligne :

Une des méthodes les plus répandues consiste à représenter les dispositifs FACTS sous forme d'injections de puissances aux nœuds telles que représentées à la (Figure. II .1) . Le principe consiste à remplacer l'effet dû au dispositif FACTS sur les transits de puissances dans la ligne (Figure. II .1 (a)), par des injections de puissances aux deux extrémités (Figure. II .1 (b)). Celles-ci sont calculées de manière à ce que l'effet produit soit équivalent à celui du dispositif en question [11]. Les injections de puissances active et réactive au nœud i sont donnée par:

$$P_i^F = P_{ij} - P_{ij}^F \tag{II.1}$$

$$Q_i^F = Q_{ij} - Q_{ij}^F \tag{II.2}$$

Avec : P_{ij}^F Q_{ij}^F Injections équivalentes de puissances active et réactive au nœud i

P_{ij} Q_{ij} Transits de puissances active et réactive sans dispositif FACTS

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

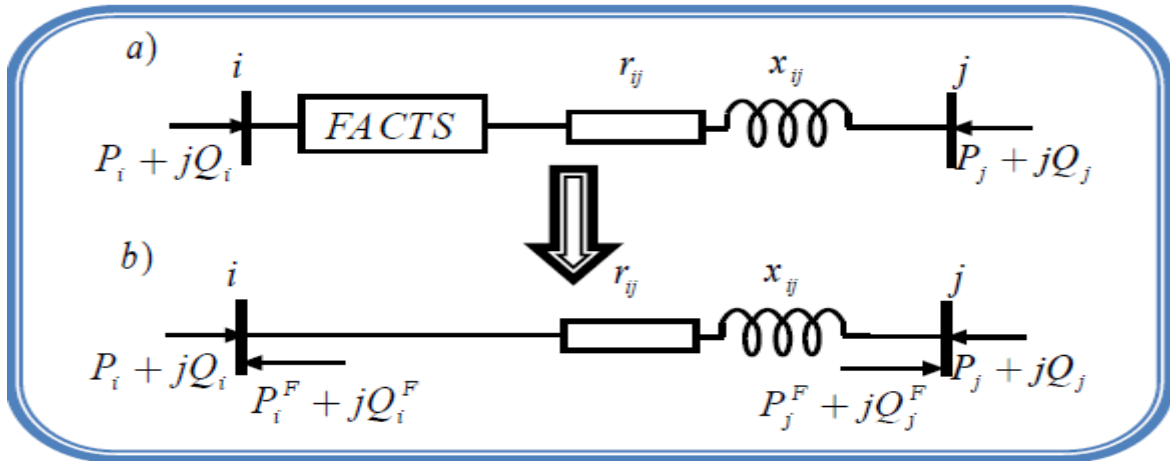


Figure. II .1 :Modélisation par injection de puissances: a) ligne avec FACTS, b) ligne avec injections équivalentes.

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

$$P_i + P_i^F = V_i \sum_{k=1}^n V_j [G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)] \quad (\text{II.3})$$

et les puissances réactives injectées aux nœuds PQ valent :

$$Q_i + Q_i^F = -V_i \sum_{k=1}^n V_j [G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)] \quad (\text{II.4})$$

avec:

- n nombre de nœuds du système.

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

Des variantes de cette modélisation ont été proposées. Dans l'imitateur, un modèle des injections de puissances décomposées est proposé. Les effets des FACTS sur les transits de puissances dans les lignes et ceux sur le contrôle des tensions aux nœuds y sont traités séparément [11]

II .2.2. Création d'un nœud fictive :

Une modélisation de FACTS basée sur la création d'un nœud fictif est présentée dans [2] Le modèle d'un dispositif de type UPFC, permettant de contrôler les transits de puissances active et réactive, est illustré à la figure II.2.

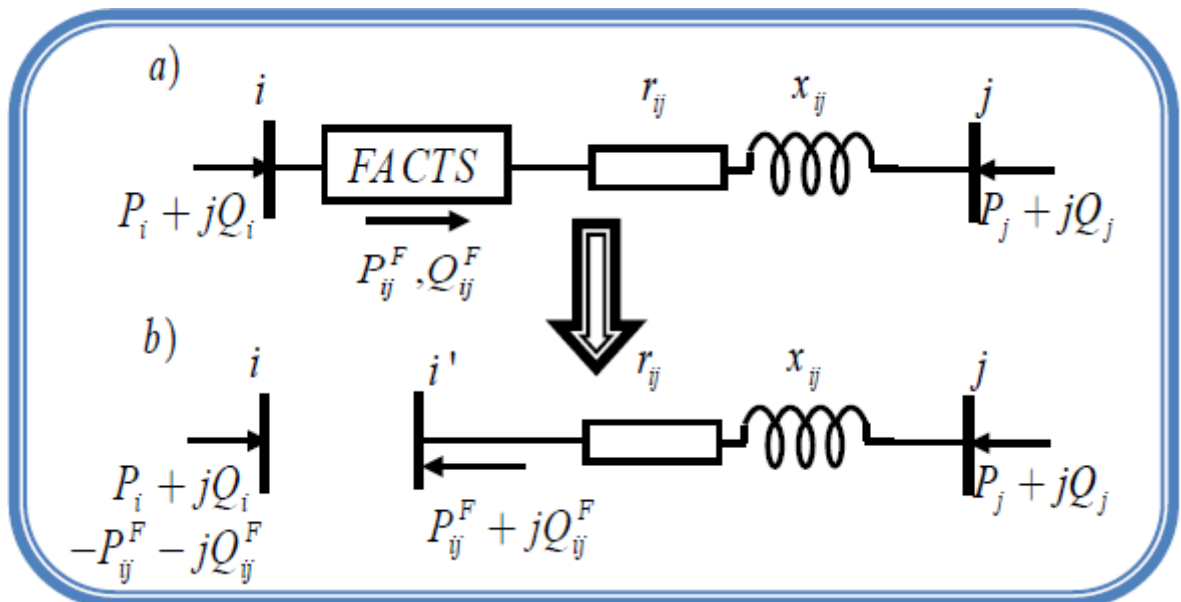


Figure. II .2 : Modélisation avec nœud fictif : a) ligne avec FACTS, b) représentation équivalente.

Les valeurs de consigne des dispositifs sont directement exprimées en termes de puissances circulant dans les lignes ou injectées aux nœuds (Figure. II.2 (a)). Un

nœud fictif i' dans lequel la ou les puissances contrôlées sont injectées, est temporairement créé. Pour conserver le bilan de puissance, la puissance injectée au nœud i' est soustraite au nœud i (Figure. II.2 (b)). Le nouveau nœud est pris en compte dans le calcul de répartition des puissances en modifiant la structure de la matrice jacobéenne.

II .3. Modification de la matrice d'admittance nodale :

Les FACTS sont envisagés comme des éléments venant modifier directement la matrice d'admittance nodale du réseau [11]. Ils sont insérés dans la ligne selon la représentation de la (figure. II.3) Selon le type de FACTS modélisé, le dispositif peut être placé au milieu ou à une extrémité de la ligne.

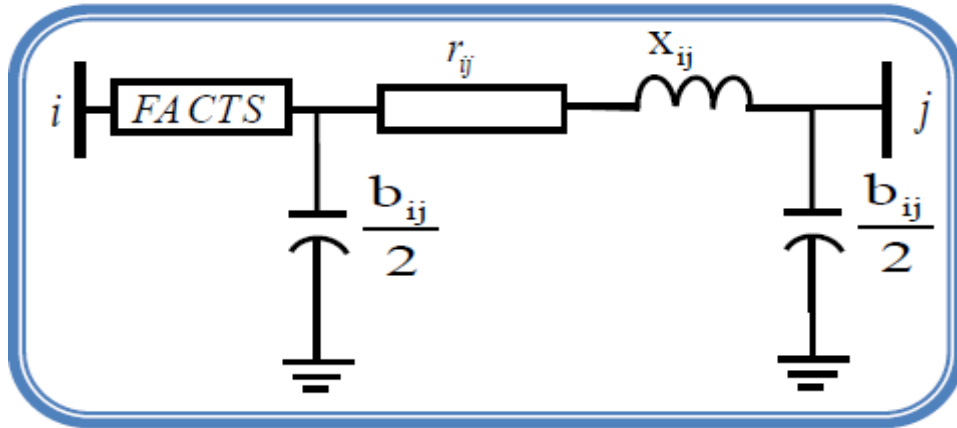


Figure. II . 3 : Intégration du dispositif FACTS dans une ligne.

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

$$Y_{\text{mod}} = \begin{bmatrix} Y_{ii} & Y_{ij} \\ Y_{ji} & Y_{jj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{ii} & Y_{ij} \\ Y_{ji} & Y_{jj} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} y_{ii}^F & y_{ij}^F \\ y_{ji}^F & y_{jj}^F \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

Selon le type de FACTS et sa position dans la ligne, seule une partie des coefficients de la matrice Y subissent des modifications. Cette modélisation est celle utilisée dans le cadre de ce travail de recherche. Elle est présentée de manière plus détaillée pour plusieurs types de FACTS dans les sections qui suivent.

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

II .4 Choix des dispositifs :

Les FACTS sont choisis de manière à pouvoir agir sur les trois paramètres principaux régissant les transits de puissances dans un réseau. Dans cette optique, les dispositifs modélisés sont les suivants :

- Le compensateur de puissance réactive ;
- Les compensateur série à thyristors ;
- Le régulateur de tension ;
- Les dispositifs déphaseurs ;
- Le contrôleur de transit de puissance unifié.

Comme il l'a déjà été mentionné, les FACTS sont modélisés pour des régimes de fonctionnement stationnaires. Ils peuvent prendre un nombre discret de valeurs dans leur gamme de réglage. La méthode utilisée pour déterminer leur valeur de consigne est présentée au chapitre 3.

De manière générale, les FACTS peuvent être insérés soit aux nœuds du réseau, soit en série avec les lignes. En pratique, les dispositifs, qu'ils soient shunt ou série, sont souvent insérés à des postes déjà existants. Bien que parfois cette position ne soit pas la meilleure, elle est justifiable par la réduction des coûts en évitant la création d'un nouveau poste.

II.4.1 Dispositifs FACTS shunt :

Les dispositifs FACTS shunt modélisés sont des compensateurs statiques de puissance réactive tels que le SVC et autres dérivés (TCR, TSC). Bien qu'ils présentent des performances moins bonnes que le compensateur statique synchrone, elles ne sont guère importantes en régime permanent. De plus, les simulations sont réalisées pour des cas où les tensions sont proches de la valeur nominale. Dans cette situation, le SVC et le STATCOM présentent des caractéristiques semblables.

II.4.1.1 Modèle du compensateur statique de puissance réactive :

Le compensateur statique de puissance réactive est modélisé par une admittance shunt Y_{svc} variable (figure II .4.a). Le SVC étant supposé sans pertes, l'admittance est donc purement imaginaire :

$$Y_{svc} = j b_{svc} \quad (\text{II} .6)$$

La susceptance b_{svc} peut être de nature capacitive ou inductive afin de fournir, respectivement d'absorber, de la puissance réactive Q_{svc} (figure. II.4.b). Les valeurs des SVC sont exprimées sous forme de puissance réactive B_{svc} absorbée à la tension nominale U_{ni} . La correspondance avec la susceptance b_{svc} est donnée par la relation (II.7)

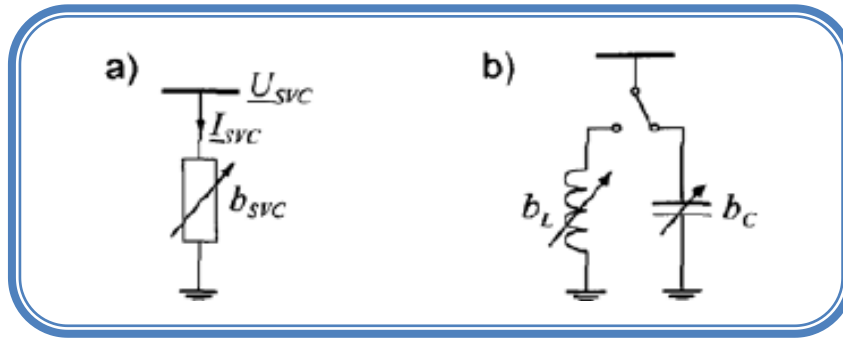


Figure. II.4 : Modélisation du SVC : a) symbole, b) modèle.

$$B_{svc} = - U_n^2 b_{svc} \quad (\text{II} .7)$$

La puissance réactive réellement absorbée par le SVC est donnée par

$$Q_{svc} = - \left(\frac{U}{U_n} \right)^2 B_{svc} \quad (\text{II} .8)$$

Le signe « moins » indique que le SVC fournit de la puissance réactive au système lorsqu'il est capacitive alors qu'il en consomme lorsqu'il est inductif. La variation de la puissance réactive injectée en fonction de la tension est représentée à la (figure II .5) pour plusieurs valeurs de compensation.

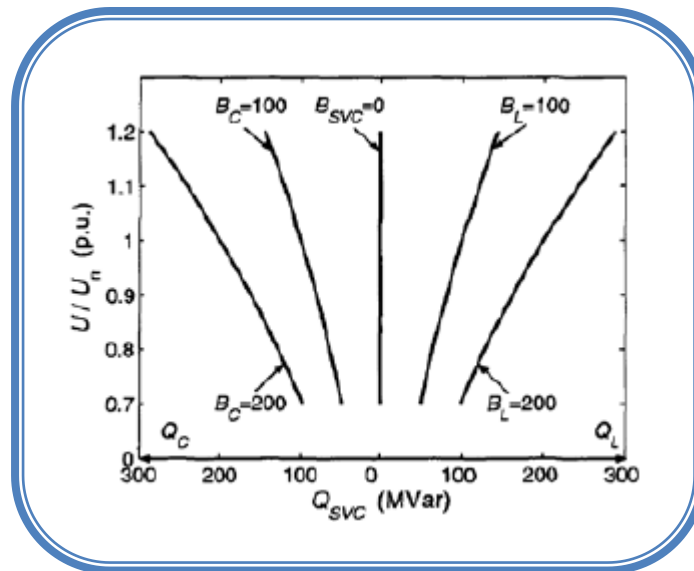


Figure . II.5 : Variation de la puissance réactive absorbée par un SVC en fonction de la tension nodale.

Comme il l'a déjà été mentionné, les installations FACTS sont généralement situées à des postes déjà existants. Toutefois, les cas du placement des FACTS au milieu de la ligne, qui nécessite la construction d'un nouveau poste, ne seront pas traités.

II.4.1.2 SVC placé en un nœud du réseau :

Lorsqu'ils sont connectés aux nœuds du réseau, les SVC sont généralement placés aux endroits où se trouvent des charges importantes ou variant fortement. Ils peuvent également être positionnés à des nœuds où le générateur n'arrive pas à fournir ou absorber suffisamment de puissance réactive pour maintenir le niveau de tension désiré.

Lorsqu'un SVC est présent au nœud i , seul l'élément Y_{ii} de la matrice d'admittance nodale est modifié, l'admittance du SVC lui étant additionnée :

$$Y'_{ii} = Y_{ii} + y_{svc} \quad (\text{II.9})$$

La (figure II.6) illustre le cas d'un SVC placé en un nœud i constituant une des extrémités d'une ligne.[3]

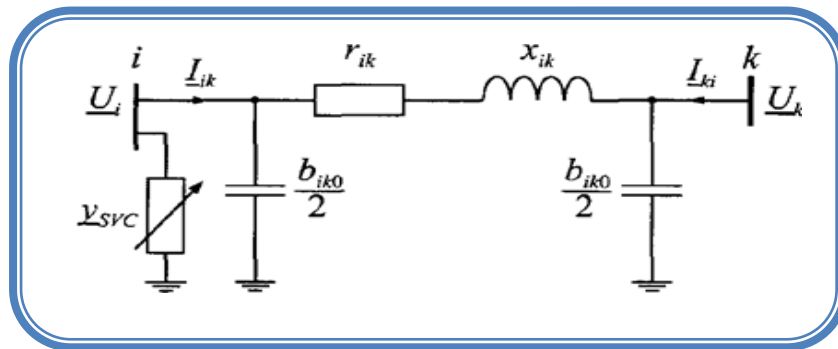


Figure. II .6 : SVC placé dans un nœud.

Dans ce cas, la matrice d'admittance est modifiée de la manière suivante.

$$Y = \begin{pmatrix} y_{ik} + \frac{y_{iko}}{2} + y_{svc} & -y_{ik} \\ -y_{ik} & y_{ik} + \frac{y_{iko}}{2} \end{pmatrix} \quad (II.10)$$

II .4.2 . Modèle du compensateur statique de puissance réactive (STATCOM) :

STATCOM est une deuxième génération de dispositif de FACTS. Selon l'IEEE, Le STATCOM est un moyen de compensation dynamique connecté en parallèle au système électrique, il est basé sur l'injection d'un courant AC contrôlé à travers un transformateur de couplage [12]. La structure de base d'un STATCOM ayant le schéma qui est montré par la (figure. II .7).

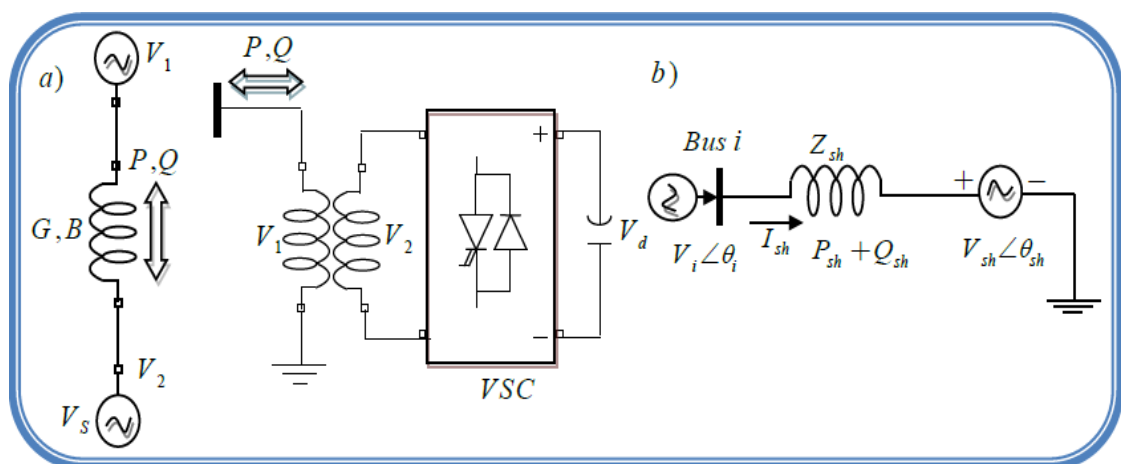


Figure. II .7: Représentation schématique de STATCOM

En général la tension du STATCOM V_{sh} est injectée en phase avec la tension V_t de la ligne et dans ce cas il n'y a pas d'échange de l'énergie active avec le réseau mais seulement la puissance réactive qui sera injectée (ou absorbée) par le STATCOM.

Le STATCOM a le même rôle qu'un SVC mais avec plus de robustesse, ce dispositif capable de délivrer la puissance réactive même si la tension de jeu de barre de connexion est faible. Avec l'hypothèse d'un STATCOM idéal (convertisseur sans pertes), la contrainte de fonctionnement que doit satisfaire le STATCOM est de ne pas échanger la puissance active avec le réseau. Le circuit STATCOM équivalent montré dans (Figure.II.7 (b)) .[5]

La tension de STATCOM est donné par:

$$E_{sh} = V_{sh} (\cos \delta_{sh} + j \sin \delta_{sh}) \quad (\text{II.11})$$

Le courant injecté par le STATCOM est donné par:

$$I_{sh} = \frac{V_{sh} - V_i}{jX_t} \quad (\text{II.12})$$

La puissance transmission entre de deux système peut être représentée par :

La puissance active transmit :

$$P = \frac{V_i V_{sh}}{X} \sin (\delta_i - \delta_{sh}) \quad (\text{II.13})$$

La puissance réactive transmit :

$$Q = \frac{V_i^2}{X} - \frac{V_i V_{sh}}{X} \cos (\delta_i - \delta_{sh}) \quad (\text{II.14})$$

Où V_i , V_{sh} est la tension aux nœuds, $(\delta_i - \delta_{sh})$ l'angle entre la tension et X impédance de la ligne. Après l'exécution de quelques opérations complexes, les équations de puissance actives et réactives sont obtenues comme suit [12] :

$$P_{sh} = V_i^2 g_{sh} - V_i V_{sh} (g_{sh} \cos (\theta_i - \theta_{sh}) + b_{sh} \sin(\theta_i - \theta_{sh})) \quad (\text{II.15})$$

$$Q_{sh} = -V_i^2 b_{sh} - V_i V_{sh} (g_{sh} \sin (\theta_i - \theta_{sh}) + b_{sh} \cos(\theta_i - \theta_{sh})) \quad (\text{II.16})$$

Avec

$$g_{sh} + jb_{sh} = 1/Z_{sh}$$

g_{sh} : Conductance équivalent du STATCOM.

b_{sh} : Susceptance équivalent du STATCOM.

Z_{sh} : Impédance équivalent du STATCOM.

II .4.2 Dispositifs de compensation série

La compensation série est parmi les meilleures techniques actuellement connue pour accroître la capacité de transfert de puissance des lignes de transmission. Les compensateurs série à thyristors utilisés peuvent être de nature capacitive ou inductive. Ils s'apparentent donc à des dispositifs de type TCSC.

II .4.2.1 Modélisation de TCSC :

Les condensateurs séries Ils sont modélisés par des impédances variables insérées en série avec la ligne. Les dispositifs étant considérés comme idéaux, seule la partie réactive de l'impédance est prise en compte. Le modèle est formé de deux branches en parallèles formées respectivement d'une inductance et d'une capacité variable. 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. 8).

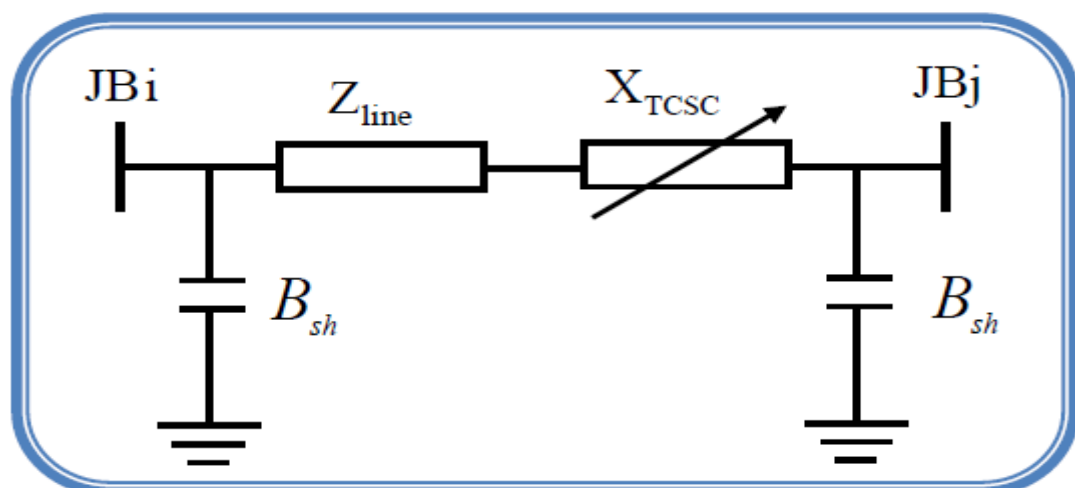


Figure. II.8 : modèle mathématiques e de TCSC

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

$$X_{TCSC}(\alpha) = j \frac{X_C X_L}{\frac{X_C}{\pi} (2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha) - X_L} \quad (\text{II.17})$$

La (figure. II.8) présente l'implantation d'un TCSC dans une ligne électrique. La réactance totale est la somme algébrique de la réactance du TCSC et la réactance réelle de la ligne. Voir l'équation suivant :

$$X_{ij} = X_{line} + X_{TCSC} \quad (\text{II.18})$$

Afin d'éviter la surcompensation dans la ligne, la valeur de la réactance X_{TCSC} dépend de la valeur de la réactance de la ligne X_{line} ; telle que : Les degrés de compensation maximum sont de 80% en mode capacitif et 20% en mode inductif [11] , La valeur de la réactance du TCSC est donc donnée par [13]:

$$-0.8 X_{line} \leq X_{TCSC} \leq 0.2 X_{line} \quad (\text{II.19})$$

La matrice d'admittance de la ligne est modifiée de la manière suivante :

$$Y_{mod} = \begin{bmatrix} Y'_{ii} & Y'_{ij} \\ Y'_{ji} & Y'_{jj} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} y'_{ij} + y_{ij}/2 & -y'_{ij} \\ -y'_{ij} & y'_{ij} + y_{ij}/2 \end{pmatrix} \quad (\text{II.20})$$

Avec :

$$y'_{ij} = \frac{1}{r_{ij} + j(x_{ij} + x_{TCSC})} \quad (\text{II.21})$$

II .4.3 Dispositifs de compensation shunt-série :

Le contrôleur de transit de puissance unifié (UPFC) permet de contrôler simultanément la tension au nœud ainsi que le transit de puissance active comme.

II .4.3.1 Modélisation mathématique du compensateur universel 'UPFC'

Le modèle mathématique de l'UPFC est établi dans le but d'étudier les relations entre le réseau électrique et l'UPFC en régime stationnaire. Le schéma de

base est donné sur la(figure. II.9). Cette figure représente un schéma unifilaire d'un réseau électrique et d'un UPFC installé dans une ligne de transport [13, 12].

Du point de vu puissance, le fonctionnement de l'UPFC basé sur la compensation shunt et série de la puissance réactive et régulation de l'angle de charge.

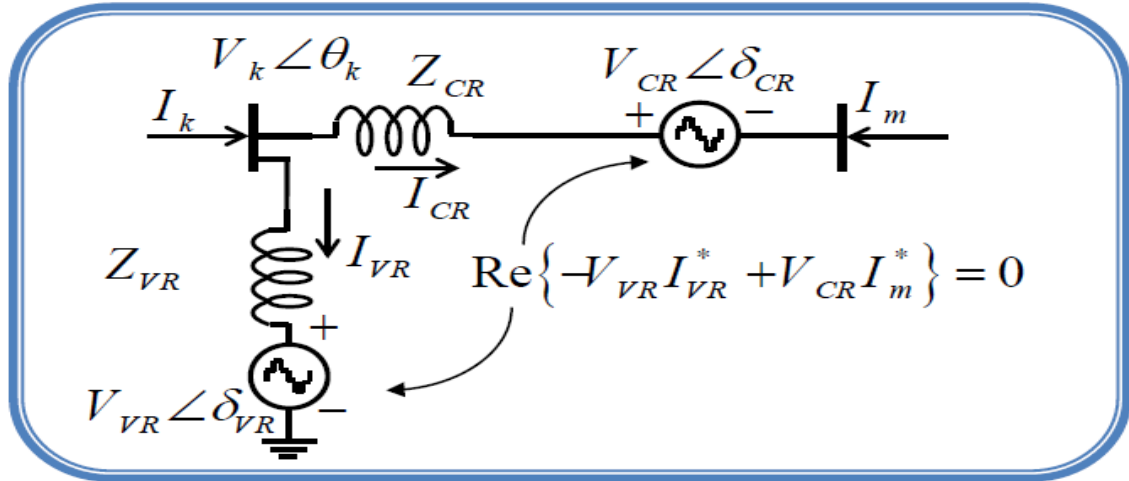


Figure. II.9 : Modèle mathématique de l'UPFC et le système de transmission

Afin de montrer comment les écoulements de puissance en ligne peuvent être affectés et exploités par l'UPFC, ce dernier est placé au début de la ligne de transmission, à la connexion des bus k et m, comme indiqué dans la (figure. II.9) [2]. L'UPFC est représentée par deux sources de tension idéales contrôlables en amplitude et en angle de phase.

La tension de l'UPFC est donnée par :

$$E_{VR} = V_{VR} (\cos \delta_{VR} + j \sin \delta_{VR}) \quad (\text{II.22})$$

$$E_{CR} = V_{CR} (\cos \delta_{CR} + j \sin \delta_{CR}) \quad (\text{II.23})$$

Avec

V_{VR} , δ_{CR} sont l'amplitude contrôlable $V_{VR, \min} \leq V_{VR} \leq V_{VR, \max}$ et l'angle de phase

$0 \leq \delta_{VR} \leq 2\pi$ de tension de la source shunt V_{VR} , δ_{CR} représentent l'amplitude et l'angle de phase de la source série

Pour le jeu de par : k

$$P_k = V_k^2 G_{kk} + V_k V_m [G_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) + B_{km} \sin(\theta_k - \theta_m)] + V_k V_{CR} [G_{km} \cos(\theta_k - \delta_{CR}) + B_{km} \sin(\theta_k - \delta_{CR})] + \quad (\text{II.24})$$

$$\begin{aligned}
& V_k V_{VR} [G_{km} \cos(\theta_k - \delta_{VR}) + B_{km} \sin(\theta_k - \delta_{VR})] \\
& Q_k = -V_k^2 B_{kk} + V_k V_m [G_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) + B_{km} \cos(\theta_k - \theta_m)] + \\
& V_k V_{CR} [G_{km} \sin(\theta_k - \delta_{CR}) + B_{km} \cos(\theta_k - \delta_{CR})] + \quad (II.25) \\
& V_k V_{VR} [G_{km} \sin(\theta_k - \delta_{VR}) + B_{km} \cos(\theta_k - \delta_{VR})]
\end{aligned}$$

Pour le jeu de par : m

$$\begin{aligned}
P_m = & V_m^2 G_{mm} + V_m V_k [G_{mk} \cos(\theta_m - \theta_k) + B_{mk} \sin(\theta_m - \theta_k)] + \\
& V_m V_{CR} [G_{mk} \cos(\theta_m - \delta_{CR}) + B_{mk} \sin(\theta_m - \delta_{CR})] \quad (II.26)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Q_m = & -V_m^2 B_{mm} + V_m V_k [G_{mk} \sin(\theta_m - \theta_k) + B_{mk} \cos(\theta_m - \theta_k)] + \\
& V_m V_{CR} [G_{mk} \sin(\theta_m - \delta_{CR}) + B_{mk} \cos(\theta_m - \delta_{CR})] \quad (II.27)
\end{aligned}$$

Parte séries :

$$\begin{aligned}
P_{CR} = & V_{CR}^2 G_{mm} + V_{CR} V_k [G_{km} \cos(\delta_{CR} - \theta_k) + B_{km} \sin(\delta_{CR} - \\
& \theta_k)] + V_{CR} V_m [G_{mm} \cos(\delta_{CR} - \theta_m) + B_{mm} \sin(\delta_{CR} - \theta_m)] \quad (II.28)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Q_{CR} = & -V_{CR}^2 B_{mm} + V_{CR} V_k [G_{km} \sin(\delta_{CR} - \theta_k) + B_{km} \cos(\delta_{CR} - \\
& \theta_k)] + V_{CR} V_m [G_{mm} \sin(\delta_{CR} - \theta_m) + B_{mm} \cos(\delta_{CR} - \theta_m)] \quad (II.29)
\end{aligned}$$

Parte shunte :

$$\begin{aligned}
P_{VR} = & -V_{CR}^2 G_{VR} + V_{VR} V_k [G_{VR} \cos(\delta_{VR} - \theta_k) + B_{VR} \sin(\delta_{VR} - \theta_k)] \\
& \quad (II.30)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Q_{VR} = & -V_{CR}^2 B_{VR} + V_{VR} V_k [G_{VR} \sin(\delta_{VR} - \theta_k) + B_{VR} \cos(\delta_{VR} - \theta_k)] \\
& \quad (II.31)
\end{aligned}$$

En assumant valves de convertisseur sans perte, la puissance actif fourni au convertisseur shunt, P_{VR} Égale a la puissance actif exigé par le convertisseur de série P_{CR} ; c'est-à-dire :

$$P_{VR} + P_{CR} = 0 \quad (II.32)$$

II .5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une introduction d'une manière générale sur les techniques de compensation conventionnelles (série et shunt), au même temps ce chapitre était une vue globale sur les nouveaux dispositifs de contrôle et de commande des systèmes énergétiques FACTS. Aujourd'hui cette technologie "FACTS" occupe une place privilégiée pour la gestion de systèmes énergétiques

L'optimisation du placement des FACTS est basée sur l'étude statique de l'insertion de FACTS dans un réseau. Cela amène à évaluer les effets des FACTS sur le réseau uniquement en régime permanent. Dans ce cas les autres bénéfices du régime transitoire et dynamique ne seront pas tenus en compte. Entre autre, l'évaluation du fonctionnement d'un système de puissance en régime permanent nécessite une modélisation statique des éléments du réseau et des dispositifs FACTS

Chapitre III :
Les Méthodes
d'optimisation
Méta heuristiques

III .1. Introduction :

Les problèmes d'optimisation occupent actuellement une place importante dans la communauté scientifique. Les problèmes peuvent être combinatoires (discrets) ou à variables continues, avec un seul ou plusieurs objectifs (optimisation multi-objectif), statiques ou dynamiques. Cette liste n'est pas exhaustive et un problème peut être à la fois continu et dynamique. Dans ce chapitre et dans sa première partie nous allons présentés une introduction générale sur le problème de l'optimisation en générale , des définitions de base sont expliquées, la classification des problèmes d'optimisation et aussi abordée , puis nous avons entamé l'étude de deux grandes catégories d'algorithmes d'optimisation qui sont les méthodes déterministes, comme la méthode du gradient, la méthode de Newton et la méthode de programmation dynamique; puis les méthodes méta heuristiques, tels que les algorithmes génétiques, les colonies de fourmis et les essaims de particules et algorithmes Monte Carlo .

III .2 . Qu'est-ce qu'un problème d'optimisation :

Un problème d'optimisation se définit comme la recherche du minimum ou maximum (optimum) d'une fonction donnée. On peut aussi trouver des problèmes d'optimisation pour lesquels les variables de la fonction à optimiser sont soumis à des contraintes qui évoluent dans une certaine partie de l'espace de recherche .dans ce cas, on a une forme particulière de ce que l'on appelle un problème d'optimisation sous contraintes .

III .3. Classification des problèmes d'optimisation:

On peut classer les différents problèmes d'optimisation que l'on rencontre dans la vie courante en fonction de leurs caractéristiques. La(figure. III.1) résume les différents critères qui entrent dans la classification des problèmes d'optimisation:

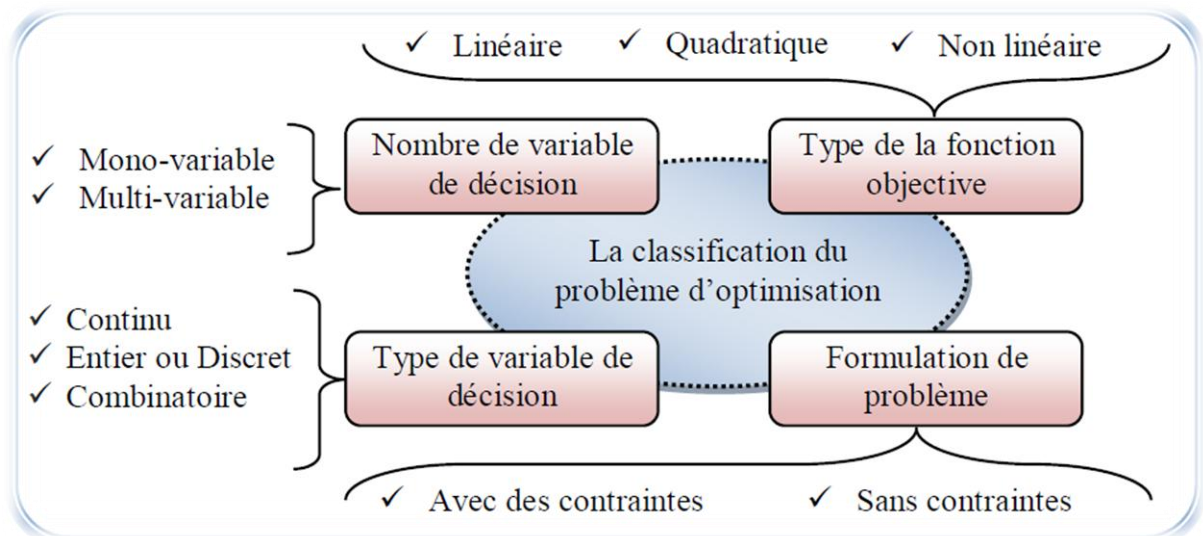


Figure. III.1 : Différents critères du problème

III.4 Concepts de base et terminologie concernant l'optimisation :

Tout d'abord, nous définirons les concepts communs à n'importe quelle méthode d'optimisation :

- **Fonction objectif** : équation mathématique qui représente ce qu'on désire améliorer dans un dispositif. Elle est aussi appelée critère d'optimisation, fonction coût, fonction d'adaptation, ou encore performance (fonction fitness);
- **Problème mono-objective**

Un problème d'optimisation mono-objectif est présenté sous la forme suivante:

Minimiser $f(x, u)$, (fonction à optimiser)

- **Problème multi-objective**

L'optimisation multi-objective est une branche de l'optimisation combinatoire dont la particularité est de chercher à optimiser simultanément plusieurs objectifs d'un même problème.

Minimiser $f_i(x, u)$ $i = 1, \dots, N_{obj}$ (N_{obj} nombre de fonction à optimiser)

- **Paramètres** : correspondent aux variables de la fonction objectif. Ils sont ajustés pendant le processus d'optimisation, pour obtenir les solutions optimales. On les appelle aussi variables d'optimisation, variables de conception ou de projet.

- **Espace de recherche** : défini par l'ensemble des combinaisons des valeurs des paramètres. Il correspond à l'espace des solutions. La dimension de l'espace de recherche est définie par le nombre de paramètres impliqués dans les solutions. On l'appelle aussi espace des paramètres;
- **Espace des objectifs** : ensemble de l'espace de recherche, déterminé par toutes les valeurs possibles des fonctions objectives;
- **Les Contraintes** : sont définies comme des conditions sur l'espace d'état que les variables doivent les satisfaire. Ces contraintes sont souvent des contraintes d'inégalité ou d'égalité et permettent en général de limiter notre espace de recherche.
- $g(x, u) = 0$ Contraintes d'égalité.
- $h(x, u) \leq 0$ Contraintes d'inégalité.
- **Domaine réalisable** : région de l'espace (des paramètres et/ou des objectifs) dans laquelle les contraintes sont respectées. On l'appelle aussi espace admissible.
- **Domaine non-réalisable** : région de l'espace où les contraintes sont violées.

Les mécanismes pour l'exploration de l'espace de recherche, spécifiques à chaque méthodologie d'optimisation, sont conditionnés par des paramètres de contrôle (nombre d'itérations, direction de recherche, vérification de convergence, etc.) et par des conditions initiales (valeurs initiales des paramètres, limites des domaines, etc.). La (figure III .2) suivante représente le principe de base d'une méthodologie d'optimisation [15, 16].

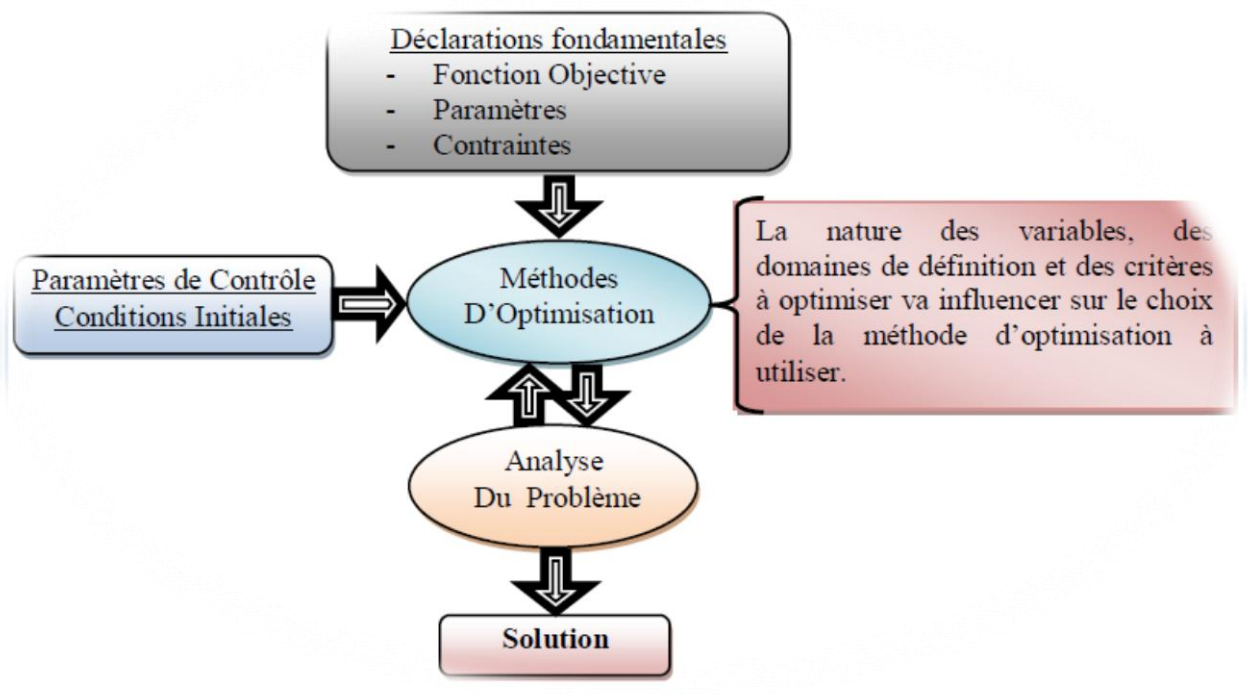


Figure. III .2 : Principe de base d'une méthodologie d'optimisation.

III .5. Résolution du Problème d'optimisation:

La recherche de l'optimum d'un problème est réalisée à l'aide de méthodes d'optimisation qui seront généralement présentés dans deux grandes catégories :

- ❖ Certaines de ces méthodes sont dites déterministes car elles conduisent, pour une solution initiale donnée toujours au même résultat final. Pour trouver l'optimum, elles s'appuient sur une direction de recherche qui peut être fournie par les dérivées de la fonction objectif. Ces méthodes ont la réputation d'être efficaces lorsque la solution initiale est proche de l'optimum recherché. Cette particularité constitue un inconvénient majeur dans le cas d'une fonction objectif possédant plusieurs optimums, elles peuvent en effet, converger vers un optimum local .
- ❖ Les méthodes stochastiques, contrairement à la plupart des méthodes déterministes, ne nécessitent ni point de départ, ni la connaissance de gradient de la fonction objectif pour atteindre la solution optimale. Elles s'appuient sur des mécanismes de transition probabilistes et aléatoires qui explorent efficacement l'espace de recherche et convergent vers l'optimum global. Leur nature aléatoire implique que plusieurs exécutions successives de ces méthodes conduisent à des résultats différents pour une même initialisation du problème d'optimisation. Cependant elles demandent un nombre important d'évaluations de la fonction objectif en

comparaison avec les méthodes déterministes exploitant la dérivée de la fonction objectif. La (figure. III.3) montre comment les différentes méthodes d'optimisation peuvent être classées en fonction du problème posé [17].

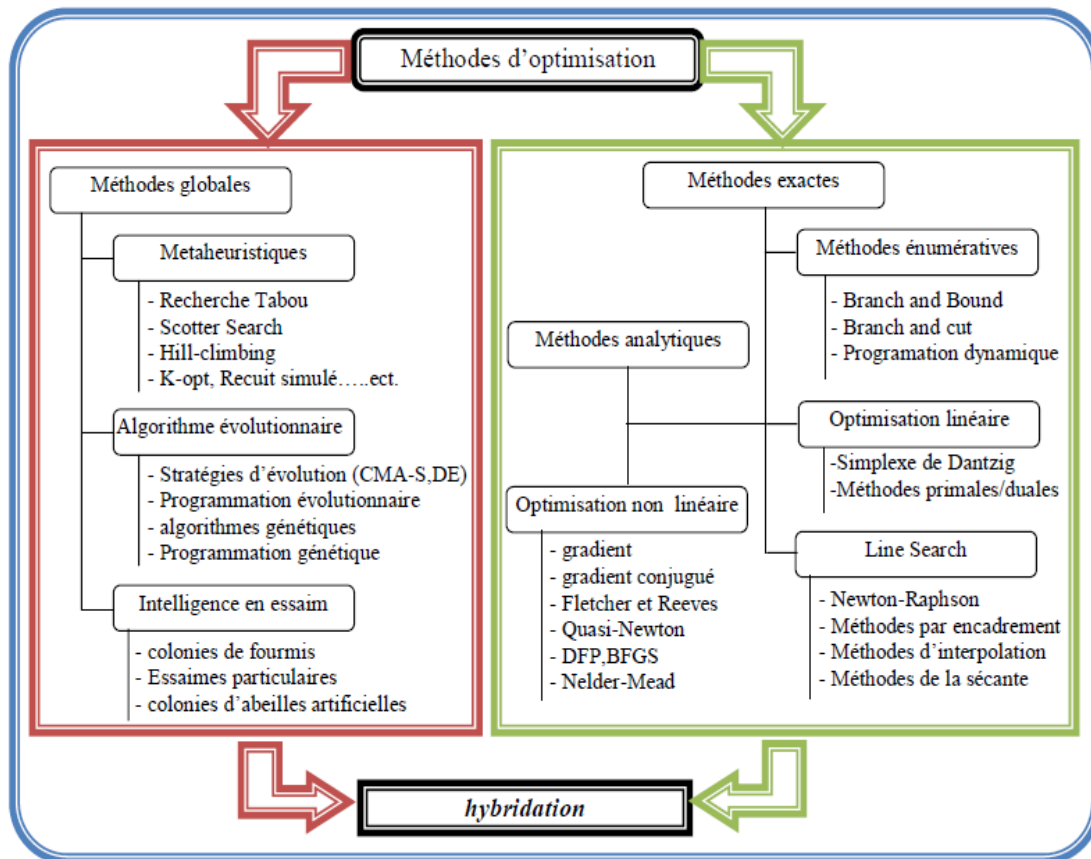


Figure. III.3 : Une classification possible des différents types de méthodes d'optimisation

III .6. Méthodes d'optimisation déterministes:

Dans la littérature, nous trouvons de nombreuses méthodes d'optimisation conventionnelles (déterministes). Il est possible de classer ces méthodes en deux grandes catégories : programmation linéaire et programmation non-linéaire.

Le premier groupe traite de la résolution de problèmes parfaitement représentés par un système d'équations linéaires tandis que la programmation non-linéaire traite les problèmes non-linéaires. Les méthodes déterministes sont basées sur le calcul de la dérivée du problème, ou sur des approximations de cette dernière. Elles nécessitent donc quelques informations sur le vecteur gradient.

Beaucoup de techniques d'optimisation classiques tels la programmation linéaire et non linéaire ,la méthode de gradient, la méthode de newton ,la programmation

quadratique ,et la méthode de point intérieur ont été appliquées pour résoudre le problème d'optimisation liés à la planification et le control des réseaux électriques, en particulier l'optimisation de la puissance réactive. Ces méthodes ayant la propriété de converger vers la solution mathématique exacte « réelle » tout en respectant certaines conditions liées au bon fonctionnement du processus envisagé, ces dernières appelées contraintes d'égalités et d'inégalités.

III.6.1. Méthode du gradient :

Historiquement, les méthodes de gradient sont les plus anciennes. Elles permettent de résoudre des problèmes non linéaires et sont basées sur une hypothèse forte sur la connaissance de la dérivée de la fonction objective en chacun des points de l'espace Cette méthode peut être classer en deux catégorie de premier ordre et de deuxième ordre, le premier ordre basé sur une approximation linière en séries de Taylor avec initialisation de gradient, et le deuxième ordre base sur l'approximation quadratique en séries de Taylor avec initialisation de gradient en utilisant l'Hessien H [16]..

III .6.1.1. Formulation mathématiques:

On choisit un point de départ x_0 et on calcule le gradient $\nabla f (x_0)$ en x_0 . Comme le gradient indique la direction de plus grand augmentation de f , on se déplace d'une quantité λ_0 dans le sens opposé au gradient et on définit le point x_1 :

$$x_1 = x_0 - \lambda_0 \frac{\nabla f (x_0)}{\|\nabla f (x_0)\|} \quad (\text{III.1})$$

Cette procédure est répétée et engendre les points x_1, x_2, \dots, x_k . Ainsi, pas a pas, la distance ente le point d'indice k et l'optimum diminue.

$$x_{k+1} = x_k - \lambda_k \frac{\nabla f(x_k)}{\|\nabla f(x_k)\|} \text{ ou } \nabla k, \lambda_k > 0 \quad (\text{III.2})$$

$\lambda_0 C$ 'est le déplacement à

chaque itération. Si λ_k est fixé, on parle de méthode de gradient à pas prédéterminé. L'inconvénient de cette procédure est que la convergence est très dépendante du choix du pas de déplacement. La convergence peut être très lente si le pas est mal

choisi. L'intérêt principal de cette méthode est de pouvoir se généraliser aux cas de fonctions ne sont pas différentiables.

III .6.1.2. Avantages et inconvénients:

L'inconvénient de ces méthodes est que la convergence est ralentie pour certains types de fonctions : les déplacements successifs sont orthogonaux, donc l'algorithme va être piégé si les vallées (s'il s'agit d'une minimisation) sont étroites. Dans le cas des fonctions non convexes, la méthode risque de converger vers un optimum local dépendant du point de départ choisi. Dans des régions plates, ou raides, la convergence sera fortement ralentie.

III .6.2. Méthode de Newton:

La méthode de Newton est une méthode très puissante à cause de sa convergence rapide, en particulier si l'estimation initiale de la solution $x^{(0)}$ est suffisamment proche de la solution optimale $x^{(*)}$. L'idée de cette méthode est de minimiser, à chaque itération k , une approximation quadratique de la fonction objectif originale ($f(x)$) au voisinage de l'estimation actuelle de la solution $x^{(k)}$. L'approximation quadratique de ($f(x)$) est obtenue à partir du développement en série de Taylor à l'ordre 2 [19].

$$f(x^{(k+1)}) \cong f(x^{(k)}) + [\nabla f(x^{(k)})]^T [\Delta x^{(k+1)}] + \frac{1}{2} [\Delta x^{(k+1)}]^T [\nabla^2 f(x^{(k)})] [\Delta x^{(k+1)}] \quad (\text{III.3})$$

Ou: $F: R^n \rightarrow R^n$ est régulière (au moins différentiable). On cherche donc $x^{(*)}$ tel que

$$F(x) = 0$$

Pour toute $i = 1, \dots, n$.

III.6.3 Methods stochastiques:

Les méthodes d'optimisation stochastiques s'appuient sur des mécanismes de transition probabilistes et aléatoires. Cette caractéristique indique que plusieurs exécutions successives de ces méthodes peuvent conduire à des résultats différents pour une même configuration initiale d'un problème d'optimisation.

Ces méthodes ont une grande capacité à trouver l'optimum global du problème. Contrairement à la plupart des méthodes déterministes, elles ne nécessitent ni point de départ, ni la connaissance du gradient de la fonction objectif pour atteindre la solution optimale. Elles sont d'ordre zéro. Cependant, elles demandent un nombre

important d'évaluations de la fonction objectif. La (figure III .4) présente les méthodes stochastiques les plus utilisées.

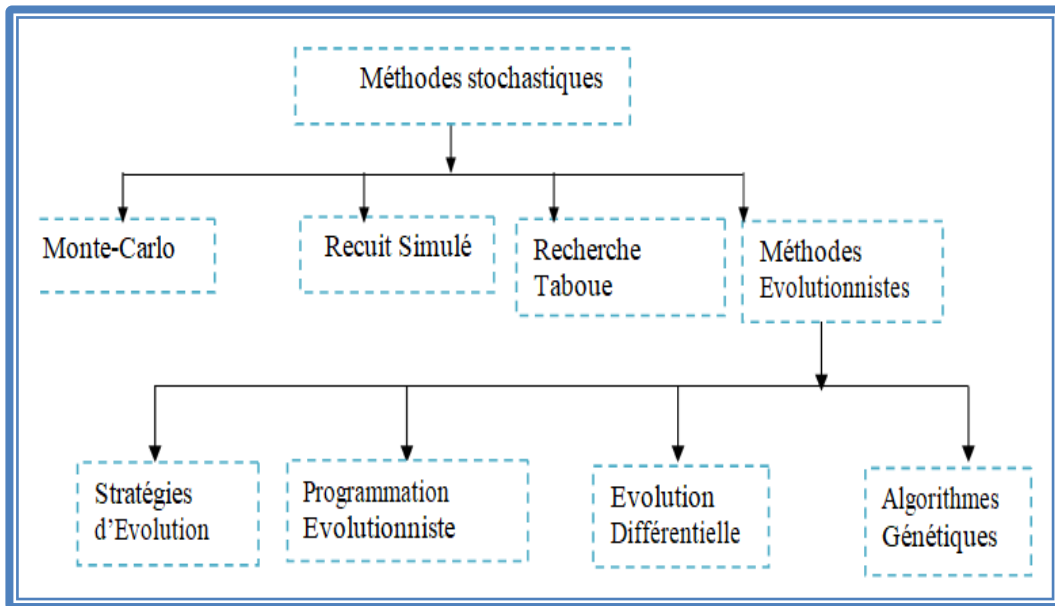


Figure . III.4. Méthodes d'optimisation stochastiques

Parmi ces méthodes stochastiques, les méthodes Mante-carlo

III.6.3.1 Mante-Carlo:

C'est la plus simple des méthodes stochastiques. Elle consiste à tirer une solution au hasard à chaque itération. La fonction objectif est évaluée en ce point. Si elle est meilleure que l'optimum courant, cette valeur est enregistrée, ainsi que la solution correspondante et le processus continue jusqu'à ce que les conditions d'arrêt soient vérifiées. Il s'agit donc d'un processus d'exploration.

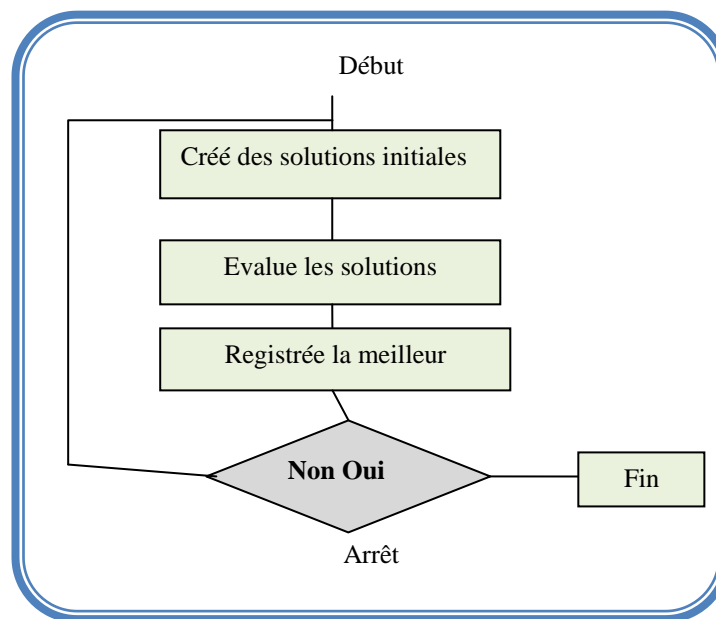


Figure III-5 : Organigramme de la méthode Monte Carlo

Les méthodes Monte-Carlo peuvent être utilisées, en première approche, pour avoir des renseignements utiles sur la forme de la fonction. Elles permettent par exemple de choisir de façon plus appropriée le point de départ d'un algorithme de recherche locale. Toutefois, cette association ne garantit pas la localisation de l'optimum global.[17]

III .7. Les méta-heuristiques :

Les méthodes d'optimisation globales connues souvent par le nom méta-heuristiques sont inspirées parfois de la théorie d'évolution chez les sociétés d'animaux et d'insectes dans laquelle on trouve les algorithmes génétiques (AG), parfois sont inspirées de la théorie d'éthologie de ces sociétés dans laquelle on cite les algorithmes d'optimisation par essais particuliers PSO, les colonies de Fourmies (ACO).etc. Ces algorithmes sont basés sur l'exploration aléatoire probabiliste d'une ou plusieurs régions de l'espace de recherche, cette exploration aléatoire guidée parfois par des fonctions probabiliste permet d'éviter les optimum locaux lors de l'exploration contrairement aux méthodes déterministes qui se bloquent en général dans un optima local ou bien si la fonction objective présente certaine complexité mathématique grandissante. Les premières méta-heuristiques datent des années 1980, et bien qu'elles soient d'origine discrète, on peut les adapter à des problèmes continus. Elles sont utilisées généralement quand les méthodes classiques

(mathématiques) ont échoué de trouver la solution souhaitée, leur efficacité n'est pas toujours garantie, elle dépend, de la nature de problème envisagé et les paramètres de l'algorithme. Ces méthodes sont largement appliquées aux différents domaines notamment dans le domaine de l'optimisation de l'énergie électrique [20].

III .7.1. Minimum local et global d'une fonction:

L'utilisation d'un algorithme de type gradient pour minimiser une fonction f non convexe peut donner des résultats non satisfaisants. Le point de départ pour la recherche de la solution peut beaucoup influencer la convergence de l'algorithme vers le minimum global. En effet, l'algorithme est d'autant plus susceptible de rester bloqué dans un minimum local si la fonction possède plusieurs optima locaux [21]. Cette difficulté est illustrée dans la (figure. III .6).

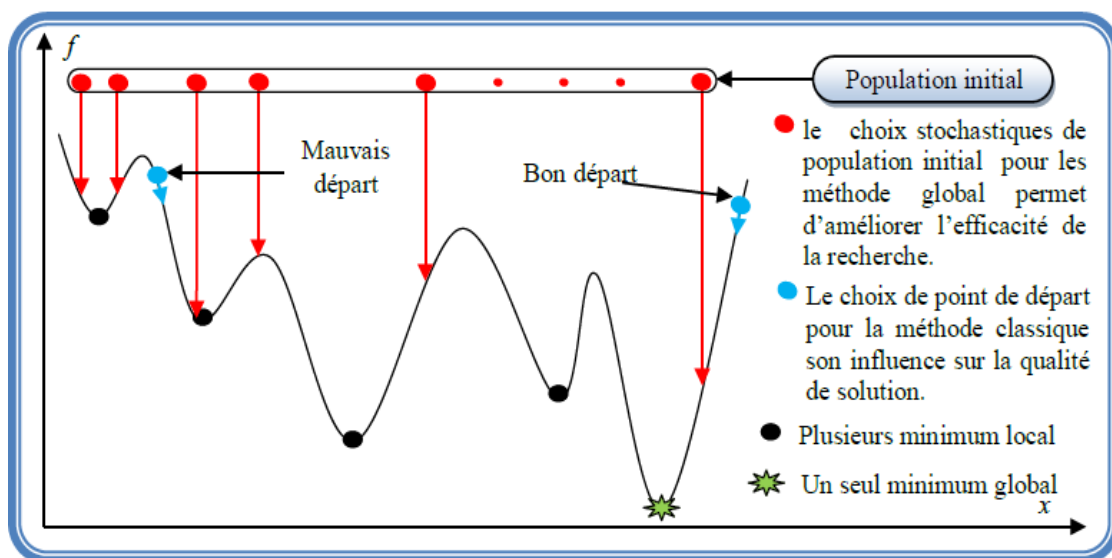


Figure. III.6: Minimum local et global d'une fonction.

Pour éviter de rester bloqué dans un optimum local que présentent les méthodes classiques, les algorithmes d'optimisations globales adoptent une stratégie qui consiste à effectuer une exploration aléatoire de l'espace de recherche de la fonction objectif. Ils sont basés sur les principes de la théorie évolutionnaire. Ils simulent l'évolution naturelle des structures

individuelles afin de trouver une solution optimale. Dans chaque génération, une nouvelle approximation de solution optimale se produit par des processus de sélection des individus selon leurs performances dans le domaine du problème. Les

individus sélectionnés vont être reproduits en utilisant les mécanismes de recherche par exemple des opérateurs empruntés aux génétiques naturelles dans le cas d'un algorithme génétique. Ces processus mènent à l'évolution de la population des individus les mieux adaptés à leur environnement.

Ces méthodes reçoivent de plus en plus d'intérêt en raison de leurs capacités potentielles à résoudre des problèmes complexes. Un des avantages bien connu des méta-heuristiques est leur capacité à résoudre les problèmes sans connaissance a priori des formulations mathématiques de ces derniers.

Les méta-heuristiques sont souvent employées pour leur facilité de programmation et de manipulation. Elles sont en effet facilement adaptables à tout type de problème d'optimisation. Parmi les méta-heuristiques les plus connues on cite :

1. les algorithmes génétiques.
2. Les algorithmes d'optimisation par essaims de particules.
3. les algorithmes de colonies de fourmis.
4. les algorithmes à évolution différentielle.
5. les stratégies d'évolution.

III .7.2. Optimisation par algorithmes génétiques :

Les algorithmes génétiques (AG) sont des méthodes d'optimisation stochastiques maintenant bien connues, sont inspirés des mécanismes de la sélection naturelle et de la génétique. Ils utilisent les principes de survie des individus les mieux adaptés .C'est J. Holland , qui a posé les fondements théorique des algorithme génétique, passant du paradigme darwinien de l'évolution naturelle a celui de l'évolution artificielle. Une nouvelle étape est franchie de lorsque les travaux de G. Goldberg ,vers le milieu des années quatre-vingt, donnent aux algorithmes génétiques leurs lettres de noblesse en tant que méthode d'optimisation viable, efficace et non spécifique [22].

III .7.2.1. Mécanisme de recherche :

Rappelons que la génétique représente un individu par un code, c'est-à-dire un ensemble de données (appelées chromosomes), identifiant complètement l'individu. La reproduction représente dans ce domaine, un mixage aléatoire de chromosomes

de deux individus, donnant naissance à des individus enfants ayant une empreinte génétique nouvelle, héritée des parents. La mutation génétique ensuite est caractérisée dans le code génétique de l'enfant par l'apparition d'un chromosome nouveau, inexistant chez les individus parents.

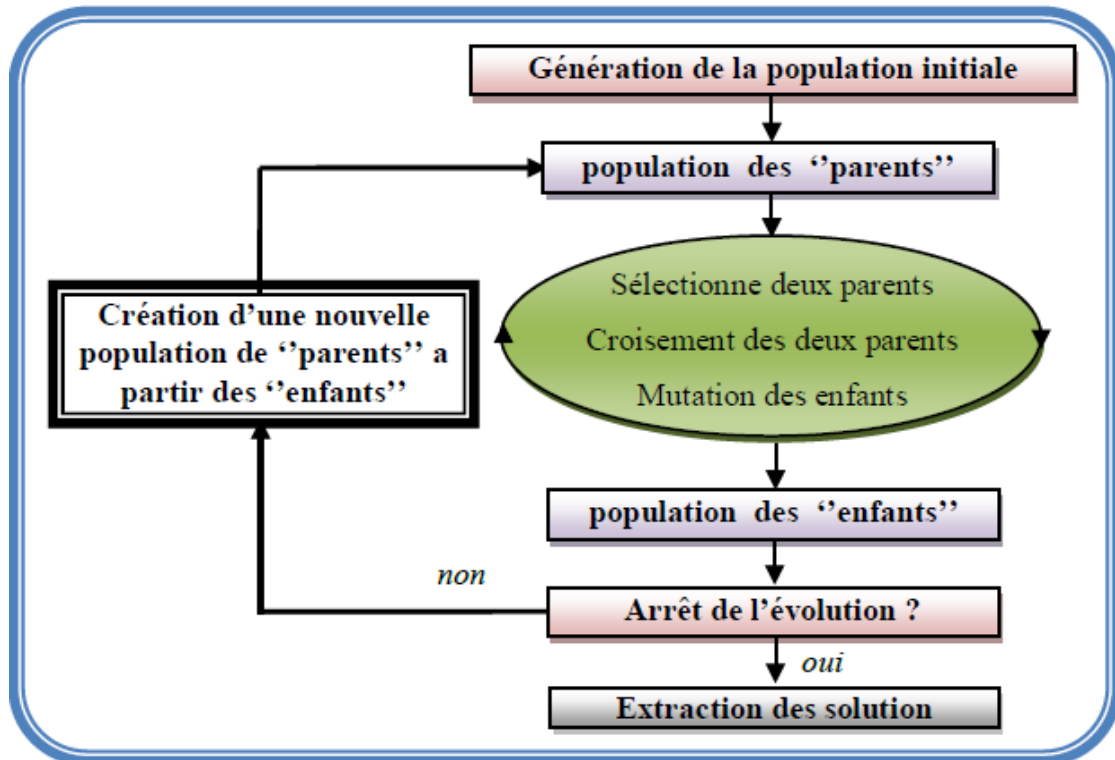


Figure. III .7: Organigramme de l'algorithme génétique

Ce phénomène génétique d'apparition de " mutants" est rare mais permet d'expliquer les changements dans la morphologie des espèces, toujours dans le sens d'une meilleure adaptation au milieu naturel. La disparition de certaines espèces est expliquée par les lois de survie selon lesquelles seuls les individus les mieux adaptés auront une longévité suffisante pour générer une descendance. Les individus peu adaptés auront une tendance à disparaître. C'est une sélection naturelle qui conduit de génération en génération à une population composée d'individus de plus en plus adaptés [23]. On peut conclure que le fonctionnement d'un (AG) est basé sur les phases suivantes:

III .7.2.2. Codage et population initiale:

Premièrement, il faut représenter les différents états possibles de la variable dont on cherche la valeur optimale sous forme utilisable pour un AG: c'est le codage.

Cela permet d'établir une connexion entre la valeur de la variable et les individus de la population, de manière à imiter la transcription génotype-phénotype qui existe dans le monde vivant. Il existe principalement trois types de codage : le codage binaire, le codage réel et le codage en base n.

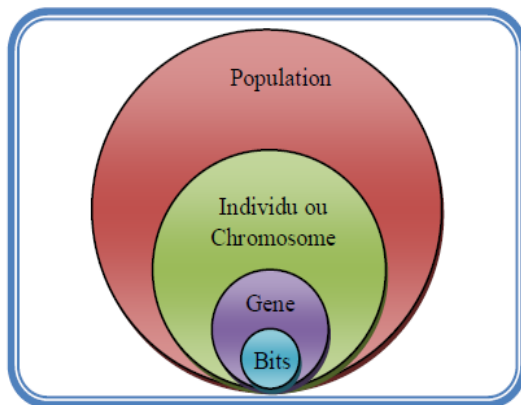


Figure. III .8: Les quatre niveaux d'organisation des AG

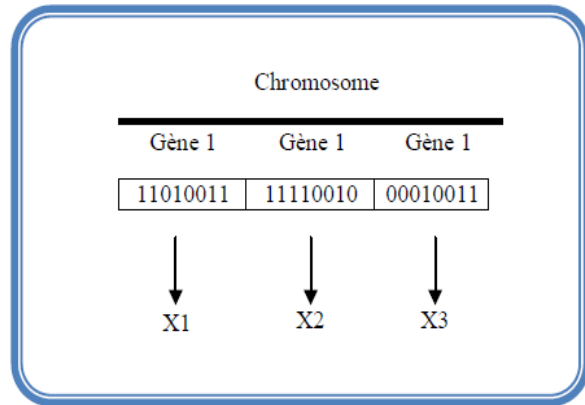


Figure. III.9: Illustration du codage des variables

III .7.2.2.1. Codage binaire:

Ce codage a été le premier à être utilisé dans le domaine des AG. Il présente plusieurs avantages : alphabet minimum $\{0,1\}$, facilité de mise en point d'opérateurs génétiques et existence de fondements théoriques (théorie sur les schémas). Néanmoins ce type de codage présente quelques inconvénients :

1. Les performances de l'algorithme sont dégradées devant les problèmes d'optimisation de grande dimension à haute précision numérique. Pour de tels problèmes, les AG basés sur les chaînes binaires ont de faibles performances comme le montre Michalewicz .
2. La distance de Hamming entre deux nombres voisins (nombre de bits différents) peut être assez grande dans le codage binaire : l'entier 7 correspond à la chaîne 0111 et la chaîne 1000 correspond à l'entier 8. Or la distance de Hamming entre ces deux chaînes est de 4, ce qui crée bien souvent une convergence, et non pas l'obtention de la valeur optimale.

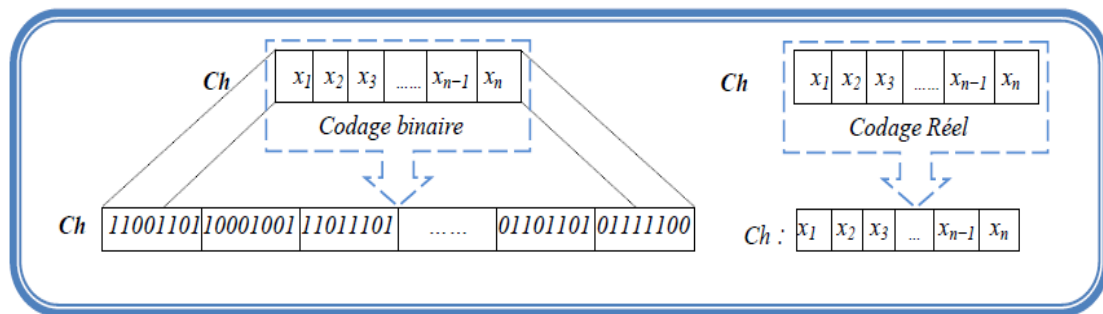


Figure. III .10: Le codage réel et le codage binaire

III .7.2.2.2. Codage réel:

Il a le mérite d'être simple. Chaque chromosome est en fait un vecteur dont les composantes sont les paramètres du processus d'optimisation. Par exemple, si on recherche l'optimum d'une fonction de n variables $f(x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, x_n)$, on peut utiliser tout simplement un chromosome ch contenant les n variables.

Avec ce type de codage, la procédure d'évaluation des chromosomes est plus rapide vu l'absence de l'étape de transcoding (du binaire vers le réel). Les résultats donnés par montrent que la représentation réelle aboutit souvent à une meilleure précision et un gain important en termes de temps d'exécution.

III .7.2.3. Les opérateurs utilisés par les AG:

III .7.2.3.1. la sélection:

Premièrement on génère une population de taille aléatoire avec un codage approprié généralement binaire. Chaque individu (chromosome) désigne par une chaîne de bit codée, qui représente des gènes qui sont les variables de la fonction coût (V_1, V_2, V_3, \dots). Chaque bit est représenté avec deux valeurs 0 ou 1 appelées allèle. Cette opération est inspiré à la fois de la théorie d'évolution des espèces : les individus ayant une meilleure adaptation (fitness) ont plus de la chance de recopier dans la deuxième génération, autrement dit les individus les plus forts se survivent avec une probabilité croissante.

III .7.2.3.2. Le croisement:

En premier lieu le but de cette opération est de créer une diversité dans notre population car l'exploitation (recopiage du meilleur chromosome) ne conduit pas à une exploration optimale de toute l'espace de recherche, en réalité on n'explore

qu'une partie de notre espace si les individus sont similaires l'opérateur de croisement n'est qu'une juxtaposition des meilleures portions des anciens chromosomes dont le but d'arriver à générer de bons nouveaux chromosomes et le processus se répète jusqu'à la convergence vers la solution optimale (meilleure adaptation).

Il existe un grand nombre d'opérateurs de croisement, les plus classiques dans le cadre de l'optimisation stochastique sont (figure. III.11) :

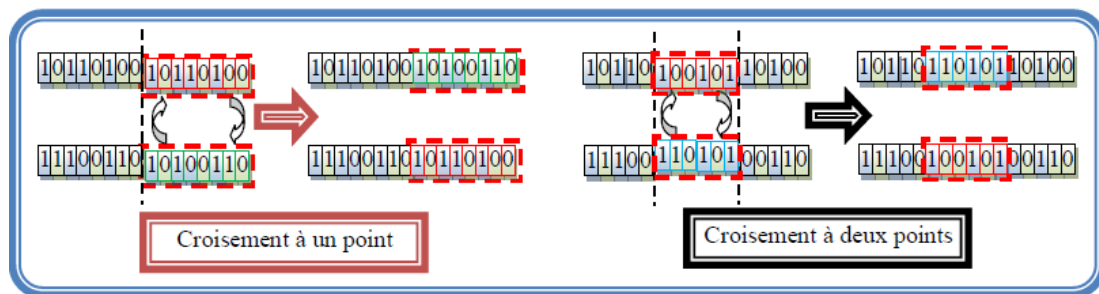


Figure. III .11. : Représentation de l'opération du croisement

- ☒ **le croisement à un point**, où un site de croisement est choisi aléatoirement sur le chromosome, puis les chaînes de code sont échangées autour de ce site
- ☒ **le croisement à deux points**, deux sites de croisement sont choisis, et les portions de code sont échangées alternativement ;
- ☒ **le croisement uniforme**, où chaque gène d'un descendant est choisi aléatoirement parmi les gènes des parents ayant la même position dans le chromosome. Assez souvent le second descendant est construit en prenant les choix complémentaires du premier. D'autres types de croisements existent, comme par exemple le croisement multipoint, ou bien des croisements spécialisés comme dans le cas du problème du voyageur de commerce ou des problèmes d'ordonnancement, qui tiennent compte de la structure particulière du codage employé.

III .7.2.3.3. L'opérateur de mutation :

De façon schématique, la mutation effectue une perturbation mineure du chromosome de l'individu, par exemple dans le cas d'un codage binaire, un site de mutation est choisi

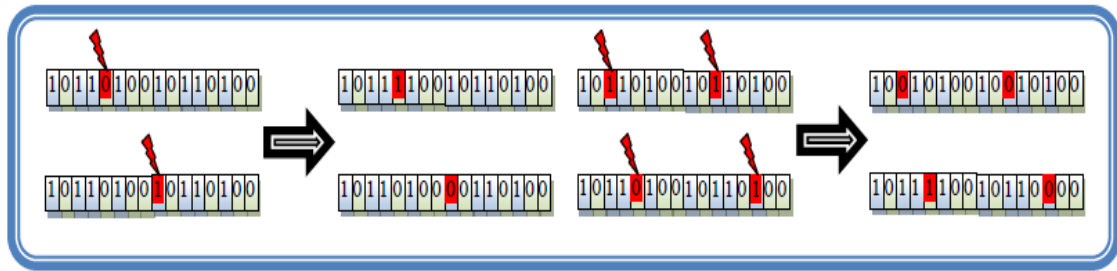


Figure. III.12. : Représentation de l'opération de mutation

aléatoirement, et le bit correspondant est inversé (voir figure. III.12).

L'effet de cet opérateur est de « troubler » la tendance à la concentration induite par la sélection et le croisement, de façon à laisser à la population la possibilité de « visiter » d'autres régions de l'espace de recherche.

La probabilité de mutation reste usuellement très faible et, très souvent, elle est maintenue à une valeur fixée tout au long de l'évolution de l'AG. Des schémas génétiques fondés sur une probabilité de mutation variable, qui décroît au fur et à mesure de l'évolution de l'AG sont aussi utilisés. D'un point de vue théorique, il a été prouvé qu'un tel AG converge vers l'optimum global de son espace de recherche pour une taille de population finie, si sa probabilité de mutation $pm(k)$ décroît à chaque génération en respectant la borne minimale.

III .7.3. Optimisation par Essaims de particules :

L'Optimisation par Essaim Particulaire (OEP) a été proposée par Kennedy et Eberhart en 1995 .Cette méthode est inspirée du comportement social des animaux évoluant en essaim. L'exemple le plus souvent utilisé est le comportement des bancs de poissons. En effet, on peut observer chez ces animaux des dynamiques de déplacement relativement complexes, alors qu'individuellement chaque individu a une intelligence limitée et une connaissance seulement locale de sa situation dans l'essaim. Un individu de l'essaim n'a pour connaissance que la position et la vitesse de ses plus proches voisins. Chaque individu utilise donc, non seulement, sa propre mémoire, mais aussi l'information locale sur ses plus proches voisins pour décider de son propre déplacement. Des règles simples, telles que "aller à la même vitesse que les autres", "se déplacer dans la même direction" ou encore "rester proche de ses voisins" sont des exemples de comportements qui suffisent à maintenir la cohésion de l'essaim, et qui permettent la mise en œuvre de comportements collectifs

complexes et adaptatifs. L'intelligence globale de l'essaim est donc la conséquence directe des interactions locales entre les différentes particules de l'essaim. La performance du système entier est supérieure à la somme des performances de ses parties .

Kennedy et Eberhart se sont inspirés de ces comportements socio-psychologiques pour créer l'OEP. Un essaim de particules, qui sont des solutions potentielles au problème d'optimisation, "survole" l'espace de recherche, en quête de l'optimum global. Le déplacement d'une particule est influencé par les trois composantes suivantes [24].

Pour des systèmes simples les principales caractéristiques sont :

1. L'information locale : Chaque individu ne possède qu'une connaissance partielle de l'environnement et n'a pas conscience de la totalité des éléments qui influencent le groupe,
2. L'ensemble de règles : Chaque individu obéit à un ensemble restreint de règles simples par rapport au comportement du système global,
3. Les interactions multiples : Chaque individu est en relation avec un ou plusieurs autres individus du groupe,
4. La collectivité : les individus trouvent un bénéfice à collaborer (parfois instinctivement) et leur performance est meilleure que s'ils avaient été seuls.

L'intelligence collective est observée notamment chez les insectes sociaux (fourmis, termites et abeilles) et les animaux en mouvement (oiseaux migrateurs, bancs de poissons). En conséquence, plusieurs algorithmes basés sur le principe d'intelligence collective ont été introduits : on peut citer les colonies de fourmis et les essaims particuliers.

III .7.3.1. Principe de fonctionnement

Ainsi, grâce à des règles de déplacement très simples (dans l'espace de solutions), les particules peuvent converger progressivement vers un optimum. Cette méta-heuristique semble cependant mieux fonctionner pour des espaces en variables continues. Au départ de l'algorithme, un essaim est réparti au hasard dans l'espace de recherche de dimension D , chaque particule p est aléatoirement placée dans la

position $X = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$ de l'espace de recherche, chaque particule possède également une vitesse $V = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$ 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 $P = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$: 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 $G = (g_{i1}, g_{i2}, \dots, g_{iD})$ (et la qualité afférente),
- à chaque pas de temps, chaque particule choisit la meilleure des meilleures performances dont elle a connaissance, modifie sa vitesse V en fonction de cette information et de ses propres données et se déplace en conséquence.

La modification de la vitesse est une simple combinaison linéaire de trois tendances, à savoir sa propre vitesse courante, sa propre expérience et la tendance vers la meilleure performance de son essaim. La mise à jour des deux vecteurs vitesse et position, de chaque particule p dans l'essaim, est donnée par les équations (III.4) et (III.5) :

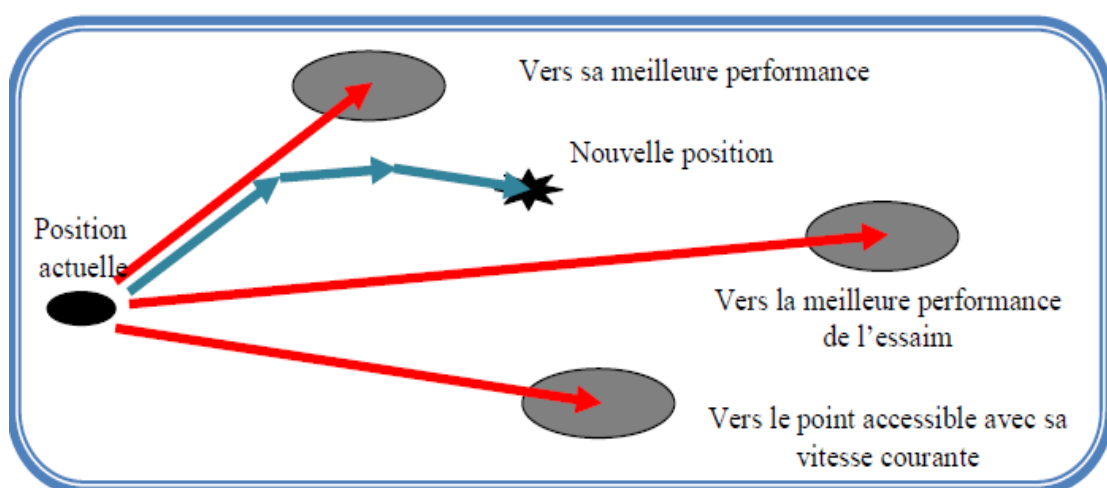


Figure. III .13. : Représentation schématique du déplacement d'une particule

$$V(t + 1) = w * V(t) + C_1 * rand_1 * (Pbest(t) - X(t)) + C_2 * rand_2 * (Gbest(t) - X(t)) \quad (III.4)$$

Avec :

$X(t)$: Position de la particule(Pt).

$V(t)$: Vitesse de la particule(Pt).

$Pbest(t)$: Meilleure fitness obtenue pour la particule(Pt).

$Gbest(t)$: Position de la particule (Pt) pour la meilleure fitness

où w est en général une constante appelée, coefficient d'inertie, C_1 et C_2 sont deux constantes, appelées coefficients d'accélération, $rand_1$, $rand_2$ sont deux nombres aléatoires tirés uniformément de l'intervalle $[0,1]$ à chaque itération et pour chaque dimension.

- $w * V(t)$ correspond à la composante physique du déplacement. Le paramètre w contrôle l'influence de la direction de déplacement sur le déplacement futur. Il est à noter que, dans certaines applications, le paramètre w peut être variable
- $C_1 * rand_1 * (Pbest(t) - X(t))$ correspond à la composante cognitive du déplacement. C_1 contrôle du comportement cognitif de particule.
- $C_2 * rand_1 * (Pbest(t) - X(t))$ correspond à la composante sociale du déplacement. C_2 Contrôle d'aptitude sociale de particule.

La combinaison des paramètres w , C_1 et C_2 permet de régler la balance entre les phases diversification et intensification du processus de recherche .

La position au temps t de la particule i est alors définie par (III.5).

$$X(t + 1) = X(t) + V(t + 1) \quad (III.5)$$

L'OEP (PSO) est un algorithme à population. Il commence par une initialisation aléatoire de l'essaim dans l'espace de recherche. A chaque itération de l'algorithme, chaque particule est déplacée suivant (III .4) et (III.5). Une fois le déplacement des particules effectué, les nouvelles positions sont évaluées. Les $Pbest(t)$ ainsi que $Gbest(t)$ sont alors mis à jour. Cette procédure est résumée par l'Algorithme (figure. III.13). N est le nombre de particules de l'essaim.

Le critère d'arrêt peut être différent suivant le problème posé. Si l'optimum global est connu a priori, on peut définir une "erreur acceptable" comme critère d'arrêt. Sinon, il est commun de fixer un nombre maximum d'évaluations de la fonction objectif ou un nombre maximum d'itérations

III .7.4. Optimisation par colonies de fourmies:

La méta-heuristique d'optimisation par colonies de fourmis a été initialement introduite par Dorigo, Maniezzo et Colomi[25]qui a été inspirée par les études sur le comportement des fourmis réelles effectuées par Deneubourg et al .

A l'origine, l'optimisation par colonie de fourmis a été conçue pour résoudre le problème du voyageur de commerce en proposant le premier algorithme ACO : 'Ant System' (AS) . Par la suite, un nombre considérable d'applications de ACO a été proposé telles que l'affectation quadratique ,le routage des véhicules ,le problème de satisfaction de contraintes .

III .7.4.1. Analogie biologique:

L'algorithme ACO a été inspiré, essentiellement, par les études sur le comportement des fourmis réelles effectuées par Deneubourg et al . L'un des problèmes étudiés était de comprendre comment des insectes ,comme les fourmis, peuvent trouver le chemin le plus court du nid à la source de nourriture et le chemin de retour. Il a été trouvé que le moyen utilisé pour communiquer l'information entre les fourmis qui cherchent des chemins, est le dépôt de traces de phéromone,i.e., une substance chimique que les fourmis arrivent à détecter. En se déplaçant, une fourmi dépose de la phéromone marquant ainsi le chemin par une trace de cette substance.

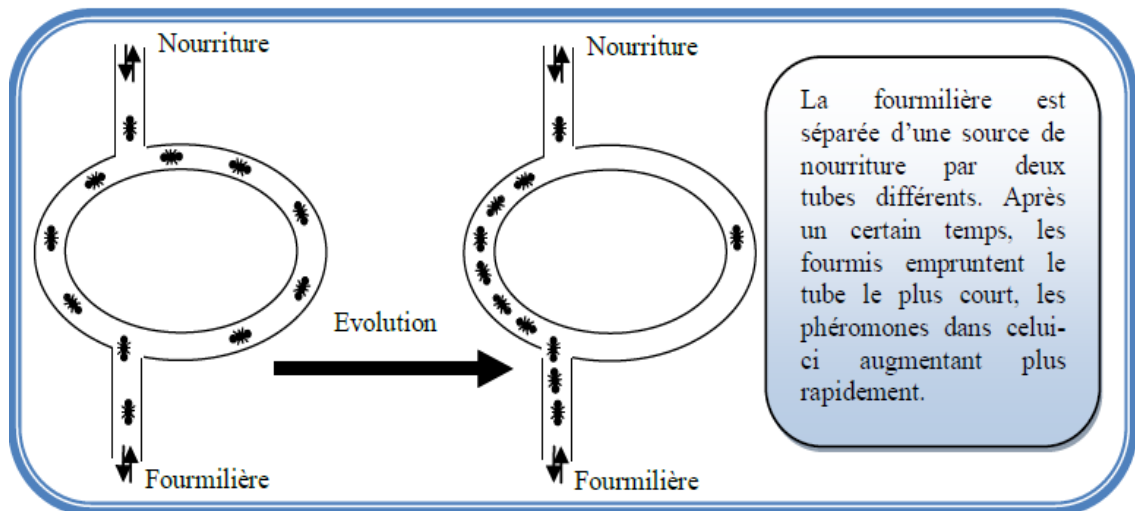


Figure. III .14: Une colonie de fourmis qui ramène de la

Tandis qu'en absence de traces une fourmi se déplace aléatoirement, une fourmi qui rencontre une trace de phéromone déjà déposée peut la détecter et décider de la suivre avec une probabilité proportionnelle à l'intensité de la trace, et renforce ainsi cette trace avec sa propre phéromone. Le comportement collectif émerge d'un processus auto-catalytique où plus les fourmis suivent une trace, plus cette trace devient attirante : c'est le principe de stigmergie [26]. Ce processus peut être illustré par l'exemple de la (Figure. III.14) .

Pour transposer ce comportement à un algorithme général d'optimisation combinatoire, on fait une analogie entre l'environnement dans lequel les fourmis cherchent de la nourriture et l'ensemble des solutions admissibles du problème (l'espace de recherche du problème), entre la quantité ou la qualité de la nourriture et la fonction objective à optimiser et enfin entre les traces et une mémoire adaptative. Les fourmis artificielles dans les algorithmes ACO se comportent de la même manière. Elles diffèrent des fourmis naturelles dans le fait qu'elles ont une sorte de mémoire, pour assurer la génération de solutions faisables. En plus, elles ne sont pas complètement aveugles, elles ont des informations sur leur environnement. Nous allons décrire, dans ce qui suit, le développement historique de l'algorithme colonie de fourmis appliqué au problème de voyageur de commerce, ensuite nous définissons de façon plus générique la méta-heuristique ACO.

III .7.4.2. Formulation mathématique:

Dans l'algorithme colonies de Fourmies chaque fourmi est initialement placée sur une ville choisie aléatoirement, chacune possède une mémoire qui stocke la solution partielle qu'elle a construite auparavant. Initialement, la mémoire contient la ville de départ. Commencant à partir de cette ville, une fourmi se déplace itérativement d'une ville à une autre. Quand elle est à une ville i , une fourmi k choisit d'aller à une ville non encore visitée j avec une probabilité donnée par :

$$P_{ij}^k(t) = \frac{([\tau_{iy}(t)]^\alpha \times [\eta_{iy}(t)]^\beta)}{\sum_{y \in N_i^k} ([\tau_{iy}(t)]^\alpha \times [\eta_{iy}(t)]^\beta)} \quad \text{si } j \in N_j^k ; 0 \quad \text{sin on} \quad (\text{III.6})$$

$\tau_{ij}(t)$: est l'intensité de la trace de phéromone dans l'arête (i, j) à l'instant t .

$\eta_{ij}=1/d_{ij}$: est une information heuristique à priori valable, où d_{ij} est la distance entre la ville i et la ville j ; l'idée étant d'attirer les fourmis vers les villes les plus proches, α, β : sont deux paramètres qui déterminent l'influence relative de la trace de phéromone et de l'information heuristique, N_k : est le voisinage faisable de la fourmi k c'est à dire l'ensemble des villes non encore visitées par la fourmi k .

La construction de solution se termine après que chaque fourmi ait complété un tour. Ensuite, les traces de phéromone sont mises à jour. Dans AS, la mise à jour se fait, d'abord, en réduisant les traces de phéromone avec un facteur constant ρ (c'est l'évaporation de phéromone) et, ensuite, en permettant à chaque fourmi de déposer de la phéromone sur les arêtes qui appartiennent à son tour. Ainsi la formule de mise à jour de phéromone est comme suit :

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho) \times \tau_{ij}(t) + \sum_{k=1}^{nb \text{ Ants}} \Delta \tau_{ij}^k \quad (\text{III.7})$$

Avec $0 \leq \rho \leq 1$ et $nb \text{ Ants}$ le nombre de fourmis.

Le paramètre ρ est ainsi utilisé pour éviter l'accumulation illimitée de phéromone et permet à l'algorithme d'oublier les mauvaises décisions précédemment prises. Sur les arêtes qui n'ont pas été choisies par les fourmis la force associée va décroître rapidement avec le nombre d'itérations. $\Delta \tau_{ij}^k$: est la quantité de phéromone que la fourmi k dépose sur l'arête (i, j) .

Il est défini par :

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{L^k} & \text{si } (i,j) \in \text{Tabou}^k \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

où L^k est la longueur du tour généré par la fourmi k , Q une constante de l'algorithme et Tabou^k est la liste des villes déjà visitées. Avec cette formule, les arêtes du tour le plus court recevront la plus grande quantité de phéromone. En général, les arêtes qui sont utilisées par plusieurs fourmis et qui appartiennent aux tours les plus courts recevront plus de phéromone et en conséquence seront plus favorisés dans les itérations futures de l'algorithme [24].

III .8. Adaptation des méthodes méta-heuristiques pour la résolution d'ORPF

(Optimisation de l'écoulement de puissance réactive):

L'optimisation de l'écoulement de puissance consiste à trouver la répartition optimale de la puissance réactive (ORPF) et active (OPF) dans un réseau électrique, selon une fonction objective prédéfinie comme illustré dans la (figure. III.15) .

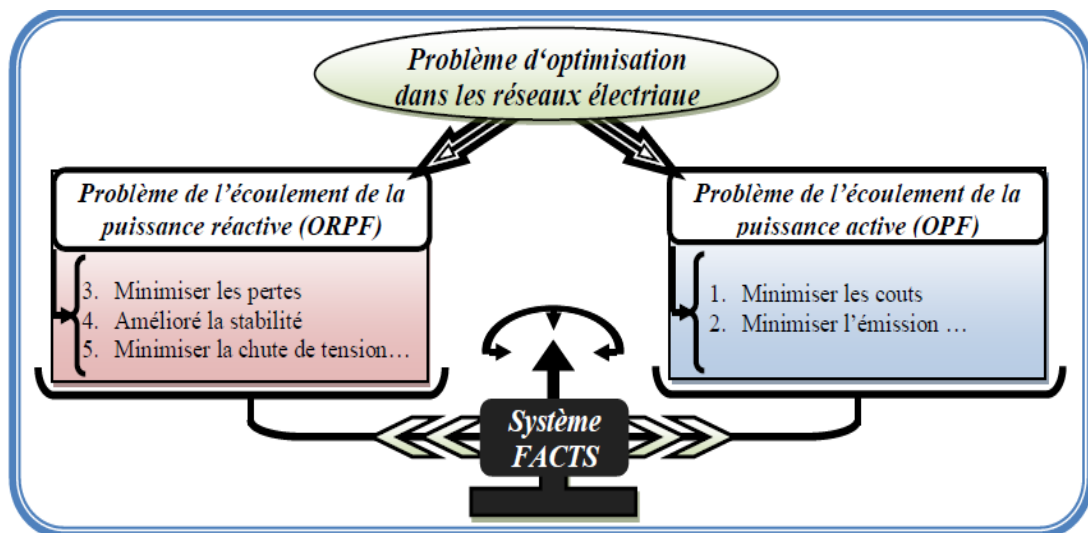


Figure. III .15 Le problème d'optimisation dans les réseaux électriques

III .9. Formulation mathématiques :

Dans ce travail on s'intéresse à optimiser deux fonctions objectives :

III .9.1 Première fonction objective (Pertes Actives de Transmission (DP)) :

La première fonction objective envisagée représente la minimisation des pertes actives de transmission (DP), formulé comme suit :

$$f_1 = \min DP = \min P_{Loss}(x_1, x_2) = \sum_{k=1}^{nl} g_k [V_i^2 + V_j^2 - 2 * V_i V_j \cos \theta_{ij}] \quad (\text{III.9})$$

Avec :

g_k est la conductance de la branche entre les jeux de barres i et j . nl est le nombre total de branches. V_i, V_j Sont les modules de tension de jeux de barres, θ_{ij} est la différence angulaire entre les angles de jeux de barres i et j

III .9.2 Deuxième fonction objective (Déviation de la tension (DV)) :

La deuxième fonction objective s'intéresse à minimiser la déviation de la tension aux jeux de barres de charges et qui peut être formulée comme suit :

$$f_2 = \min DV = \sum_{i=1}^{npq} |V_i - V^{ref}| \quad (\text{III .10})$$

Avec :

npq : Le nombre total de jeux de barres de charge.

V^{ref} : Le module de tension de référence (1.0 pu).

III .9.2.1 Formulation du problème multi-objectif:

Généralement, le problème multi objectif consiste à optimiser les variables de contrôle en termes de deux fonctions objectives ou plus en satisfaisant des contraintes d'égalité et d'inégalité. Le problème d'optimisation de la puissance réactive peut être formulé comme suit:

$$\text{Minimiser } J_i(x, u) \quad i = 1, \dots, N_{obj} \quad (\text{III.11})$$

$$\text{Soumis à: } g(x, u) = 0 \quad (\text{III.12})$$

$$h(x, u) = 0 \quad (\text{III.13})$$

Où J_i est l' i th fonction objective et N_{obj} est le numéro de la fonction objectif, g représente les contraintes d'égalités, h représente les contraintes d'inégalités. Pour deux fonctions objectives à optimiser simultanément le problème se transforme comme suit :

$$F = \min ((1 - U) * f_1 + U * f_2), \quad U \in [0,1] \quad (\text{III.14})$$

Où : f_1, f_2 sont les deux fonctions objectives à optimisés simultanément.

III.9.2.2 Les Contraintes :

L'optimisation de la fonction objective doit respecter certaines contraintes d'égalités et d'inégalités. Ces contraintes sont définies respectivement par :

III.9.2.2.1 Contraintes d'égalités :

Ces contraintes sont l'image des lois physiques gouvernant le système électrique. Elles sont représentées par les équations non linéaires de l'écoulement de puissance. Il faut que la somme des puissances active et réactive injectées dans chaque jeu de barres soit égale à zéro.

$$P_i - V_i \sum_{j=1}^{Nb} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \text{ avec } i = 1:Nb - 1 \quad (\text{III.15})$$

$$Q_i - V_i \sum_{j=1}^{Nb} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \text{ avec } i = 1:Npq \quad (\text{III.16})$$

Sachant qu'est Nb le nombre totale de bus, Npq est le nombre de jeux de barres de charge, G_{ij} et B_{ij} représentent, respectivement, la partie réelle et imaginaire correspondantes aux éléments de la matrice admittance.

III.9.2.2.2 Contraintes d'inégalités :

En pratique, on ne doit pas dépasser les limites des éléments physiques du réseau électrique tels que la puissance active générée par jeu de barre de référence, les tensions de jeux de barres de contrôle et de charge, les transformateurs des lignes, les contraintes sur les puissances réactives générées on peut citer ces contraintes d'inégalités comme suite :

-La puissance active du jeu de barre de référence

$$P_g^{min} \leq P_g \leq P_g^{max} \quad (\text{III.17})$$

-Les tensions aux niveaux des jeux de barres de control

$$V_{g,i}^{min} \leq V_{g,i} \leq V_{g,i}^{max} \quad (\text{III.18})$$

-Les tensions aux niveaux des jeux de barres de charge

$$V_{L,i}^{min} \leq V_{L,i} \leq V_{L,i}^{max} \quad (III.19)$$

-Les puissances réactives générées au niveau des unités de production:

$$Q_{g,i}^{min} \leq Q_{g,i} \leq Q_{g,i}^{max} \quad (III.20)$$

-Les puissances réactives générées ou absorbées par le système de compensation shunt

$$Q_{svc}^{min} \leq Q_{svc} \leq Q_{svc}^{max} \quad (III.21)$$

Les limites des variables de contrôle sont récapitulées dans le tableau III.1

Tableau. III.1. Les variables de décision du problème

| Variables de contrôle | La limite inférieure | La limite supérieure |
|---|----------------------|----------------------|
| Tension du jeu de barre PV | 0.9 (PU) | 1.1 (PU) |
| Réglage de transformateur | 0.9 (PU) | 1.1 (PU) |
| La puissance réactive généré par le SVC | -0.5 (PU) | 0.5 (PU) |

III.10. Algorithme génétique:

Le premier algorithme que nous avons utilisé pour traiter le problème d'optimisation de l'écoulement de puissance réactive est l'algorithme génétique. L'organigramme de base est représenté par la (figure. III.16).

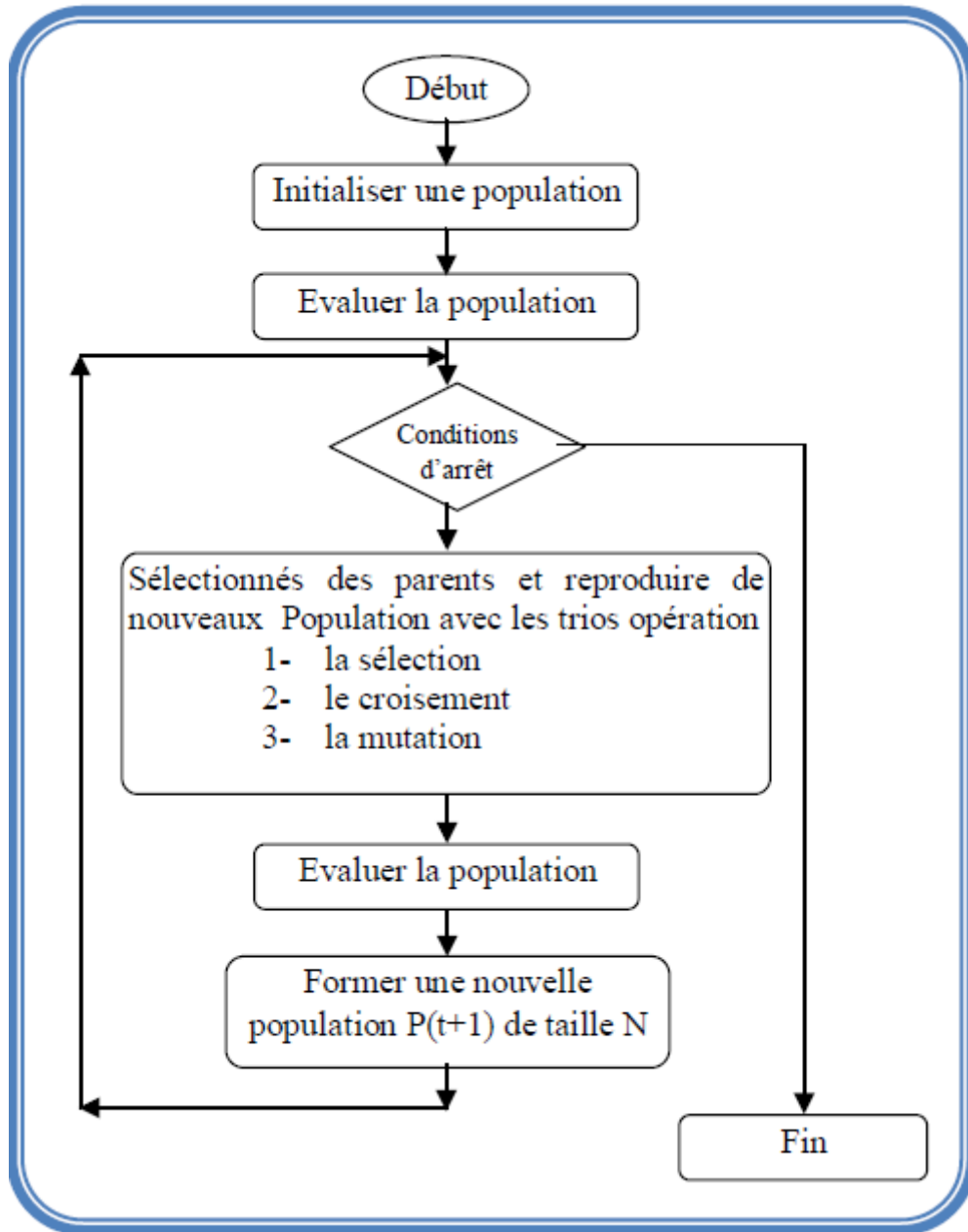


Figure. III.16 : Organigramme de l'algorithme génétique

III .11 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 .17).

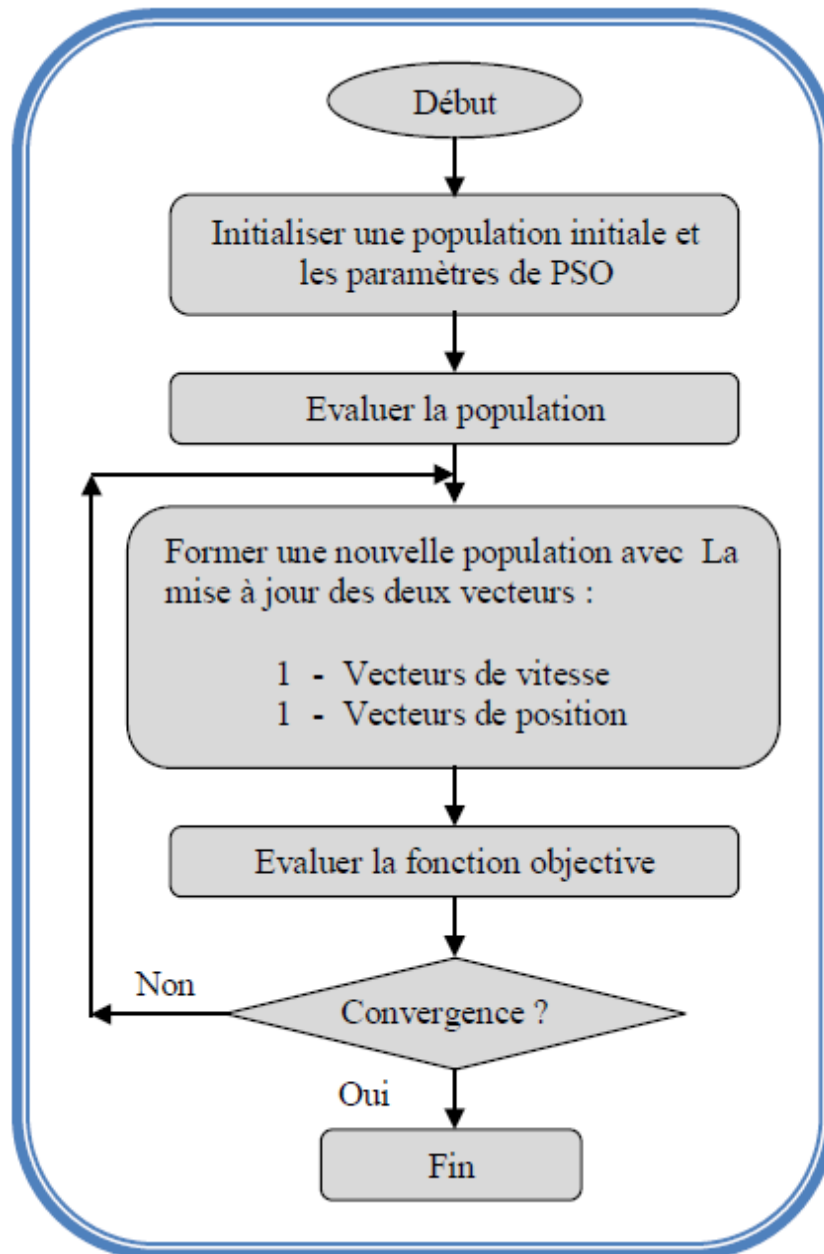


Figure. III.17 Organigramme de l'algorithme de PSO

III . 12 Algorithmes de colonies de fourmis (ACO):

Dans cette partie on a essayé une petite application sur L'algorithmes de colonies de fourmis (ACO) dans le problème de l'optimisation de écoulement de puissance réactive (voire le cinquième teste).

III .12.1. Les paramètres optimaux des algorithmes de colonies de fourmis:

Utilisant des valeurs convenables pour les paramètres des algorithmes de colonies de fourmis est très important. Des valeurs mal choisies vont certainement

données une solution sous-optimale ou décroître la vitesse du processus de découverte de la solution optimale [27]. Dorigo et Stutzle dansa suggéré que souvent les valeurs exactes des paramètres dépendent du problème à résoudre. Partout dans la littérature. Pour résoudre un problème d'optimisation, il faut choisir les huit paramètres de l'algorithme de colonie de fourmis. La moitié de ces paramètres peut être gardés constants (Tableau III.2).

Tableau. III.2. Les paramètres de l'algorithme ACO standard

| Les paramètres constants de l'algorithme ACO | | Gammes des paramètres variables de l'ACO | |
|--|--|--|---|
| A | 1 | β | $0 \leq \beta \leq 15$ |
| Γ | 0 | ρ | $0 \leq \rho \leq 1$ |
| τ_0 | $1/(n * \text{longueur du tour})$ | Q_0 | $0 \leq Q_0 \leq 1$ |
| num_ants | $N = \text{nombre de cités à visiter}$ | NC | $10 \leq NC (\text{max_cycles}) \leq 1000$ |

III .12.2. Organigramme de la technique ACO appliquée à l'ORPF:

L'organigramme de la méthode ACO standard est présenté dans la (figure. III.18), les étapes principales de calcul permettant de résoudre le problème d'ORP par ACO sont présentés comme suit:

a. *Étape 1: Initiation*

La première étape consiste à coder les variables X_i en utilisant les valeurs réels dans l'espace des valeurs permises. Chaque paramètre X_i a une limite supérieure, $X_i \max$ et une limite $X_i \min$. Avant chaque tour, le point initial (nid) de la colonie est généré aléatoirement dans la région faisable. Chaque fourmi est placée sur le point initial pendant que la valeur initiale de la phéromone de 0 est aussi donnée à cette étape

b. *Étape 2 : Evaluation de la fonction objectif*

Dans cette étape, L'influence directe de la valeur de la fonction objectif de l'ORPF dépend du niveau de quantité du phéromone qui s'ajoute aux directions particulières que les fourmis ont sélectionné.

c. *Étape 3: Répartition des fourmis*

Dans cette étape, les fourmis sont réparties en basant sur les niveaux de τ_{ij} . Selon l'équation (III.6) chaque fourmi choisit le prochain point vers le quel elle déplace en pendant en considération les valeurs de τ_{ij} . Maintenant, si $nbant$ est le

nombre de fourmis ($nbant > Ng$), alors pour chaque itération, ces m fourmis exécuteront m mouvements dans l'intervalle du temps $(t, t+1)$.

En construisant une solution au problème, les phéromones des trajectoires visitées peuvent être ajustées dynamiquement par l'équation suivante pour élargir l'espace de recherche.

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \rho \cdot \tau_0 \quad (\text{III.22})$$

Ce processus est appelé « règle de la mise à jour locale » de la phéromone. Après n itérations, toutes les fourmis ont complété une visite. La meilleure piste trouvée par la fourmi est mise à jour par un processus appelé « règle de mise à jour globale » en utilisant l'équation suivante,

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \rho \cdot \Delta \tau_{ij}(t) \quad (\text{III.23})$$

où les arêtes (i,j) appartiennent au meilleur tour T^+ de longueur L^+ et où

$\Delta \tau_{ij}(t) = 1 / L^+$ ce processus participe à une intensification par sélection de la meilleure solution. Cette meilleure solution sera aussi enregistrée dans la table de tabou pour la comparaison plus tardive avec l'itération suivante.

d. Etape 4: Critère d'arrêt

Le processus du calcul continu jusqu'à ce que le nombre d'itérations atteigne la valeur maximale prédéfinie ou qu'une solution de fonction objectif acceptable est trouvée.

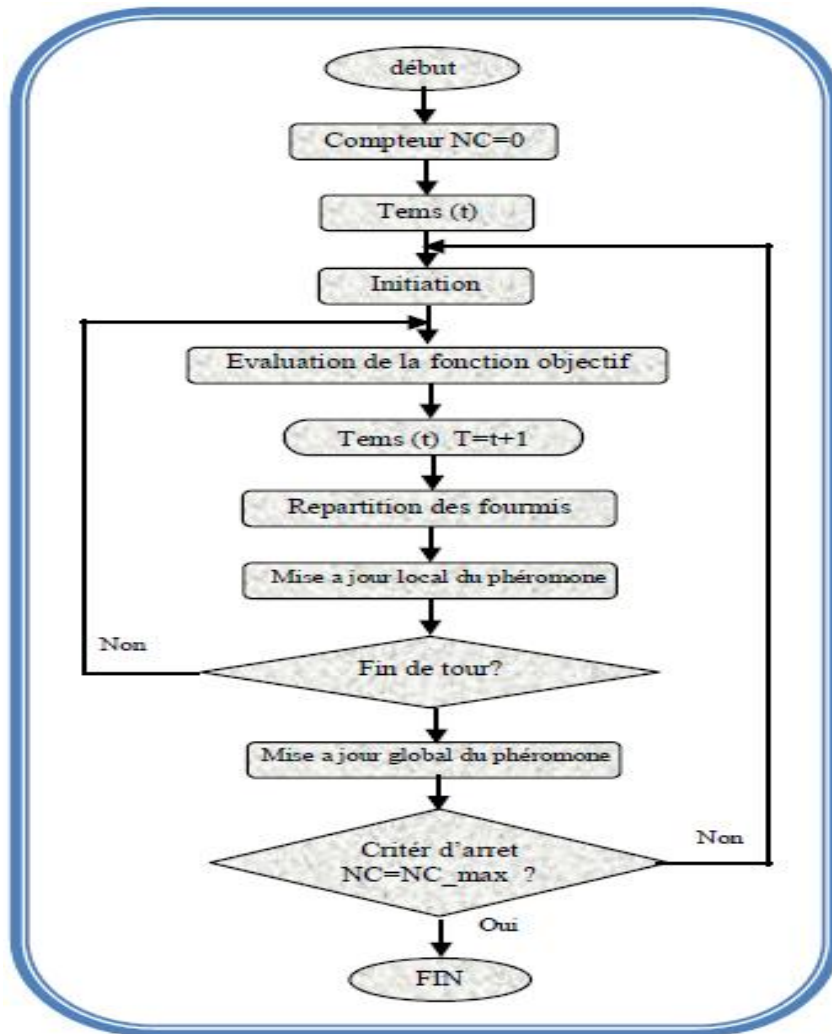


Figure. III.18 L'organigramme de l'algorithme d'ACO

III .13 Conclusion :

Ce chapitre représente une introduction générale aux méthodes d'optimisation déterministes et les techniques d'optimisation globales (met heuristiques) il donne une vue totale sur leurs philosophie, leur implémentation, leurs caractéristiques et avantages. Puis nous avons abordés l'étude des algorithmes génétiques AG, l'optimisation par essaims de particules et les colonies de Fourmies. Le prochain chapitre représente la partie pratique de notre travail, il explique clairement le processus algorithmique de ces méthodes et leur application dans l'optimisation de la puissance réactive avec considération d'un système de compensation dynamique basé sur les systèmes FACTS.

Chapitre IV:

APPLICATION ET RESULTAT DE SIMULATIONS

IV.1 Introduction:

Dans ce chapitre, nous allons procéder à l'implantation des dispositifs SVC dans un réseau électrique et voir leurs influences sur la stabilité de tension et sur les pertes actives. Le nombre des FACTS installé est choisi dès le début par l'utilisateur. Dans notre cas, le choix s'est porté sur un dispositif pour chaque type de FACTS. Par conséquent, nous devons prendre en considération le choix de l'emplacement optimal offrant le meilleur rendement. De ce fait, nous avons utilisé deux indices pour un emplacement optimal. Cette optimisation est le sujet de diverses contraintes et objectifs bien traités et discutés, ces objectifs sont les suivants:

- ✓ Minimisation des pertes actives de transmission (*DP*).
- ✓ Minimisation de la déviation de tension (*DV*).

Parmi ces dernières, les méta heuristiques 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 de Monte Carlo MC.
2. L'algorithme d'optimisation par Essaim Particules PSO.

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

Les résultats obtenus avec les deux techniques proposées sont suffisants, et ensuite sont comparés entre elles en termes d'optimalité et la robustesse pour résoudre le problème d'optimisation. Les tests seront effectués sur des réseaux électriques de moyennes et grandes échelles (IEEE 30-Bus).

Toutes les approches proposées ont été développées sous l'environnement MATLAB version 8.1 et exécutés par un microprocesseur Intel Pentium® CORE i3-2348M, 2.30 GHz et une RAM de 4 GO.. Chaque programme inclut une procédure efficace pour le calcul de l'écoulement de puissance par la l'algorithme de

Newton – Raphson

IV.2 Réseau test :

Test est appliqué sur le réseau test IEEE 30-Bus qui a 06 générateurs de production (installés aux nœuds 1, 2, 5, 8, 11 et 13), ce réseau électrique est constitué de 41 lignes et 04 transformateurs. Les données de ces deux systèmes test sont reportées en annexe (Annexe A). 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). [28]

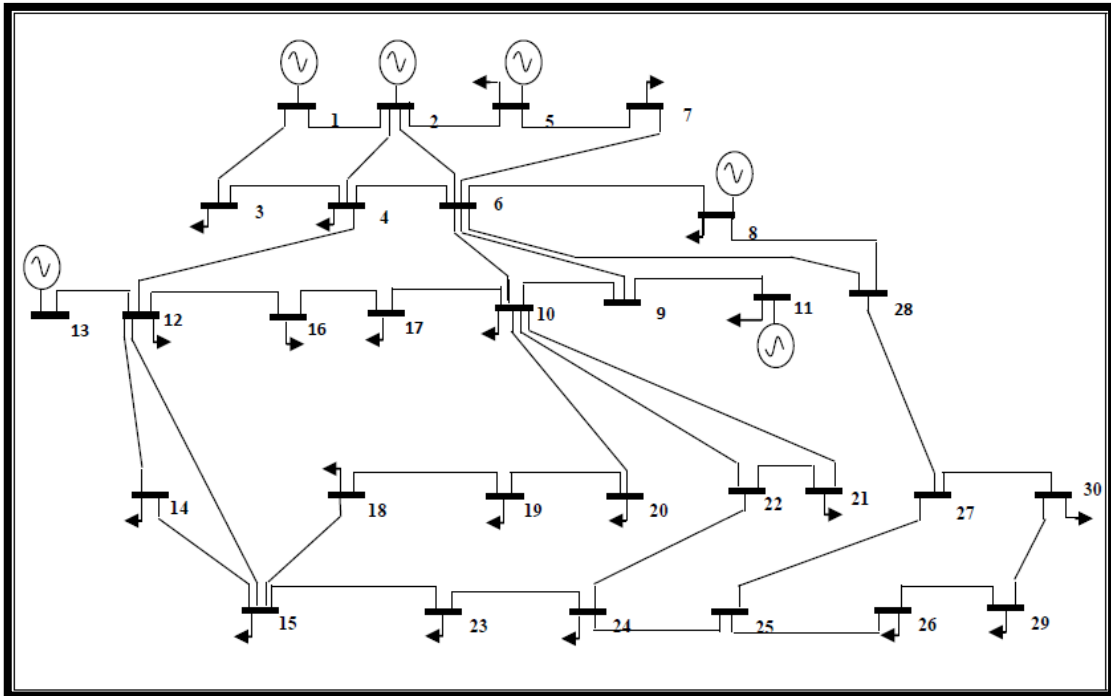


Figure IV.1: Schéma unifilaire du réseau électrique à 30 jeux de barres.

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.

$$[\Delta Q] \approx [J_4][\Delta V]; \quad [j_4] = \text{La matrice jacobéenne} \quad (\text{IV.1})$$

- **Cas 1:** La charge nominale du réseau test IEEE-30-Bus.
- **Cas 2:** Augmentation de la puissance demandée de l'ordre de trois fois appliquée sur la de charge totale du réseau test IEEE-30-Bus.

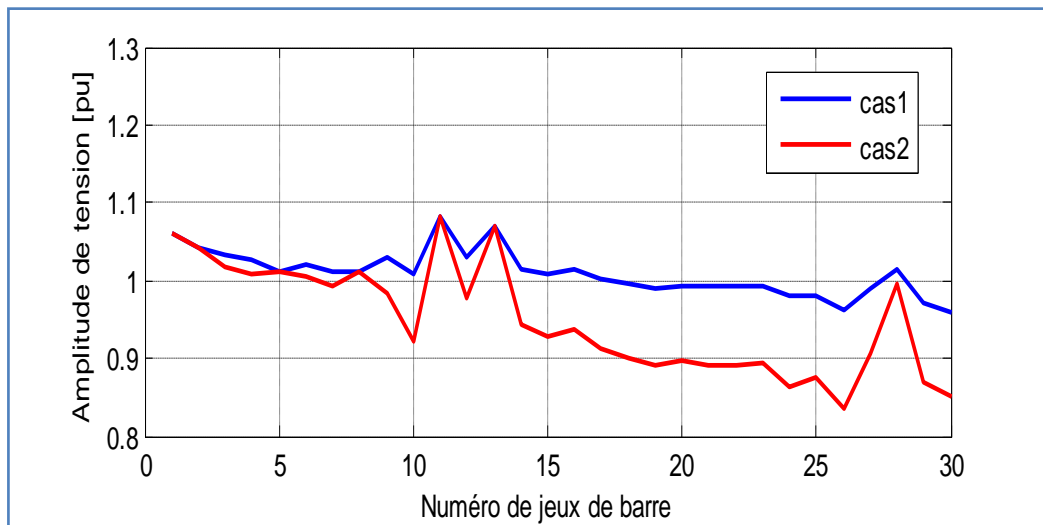


Figure IV.2. Amplitude de tensions des jeux de barres (Cas 1 et 2).

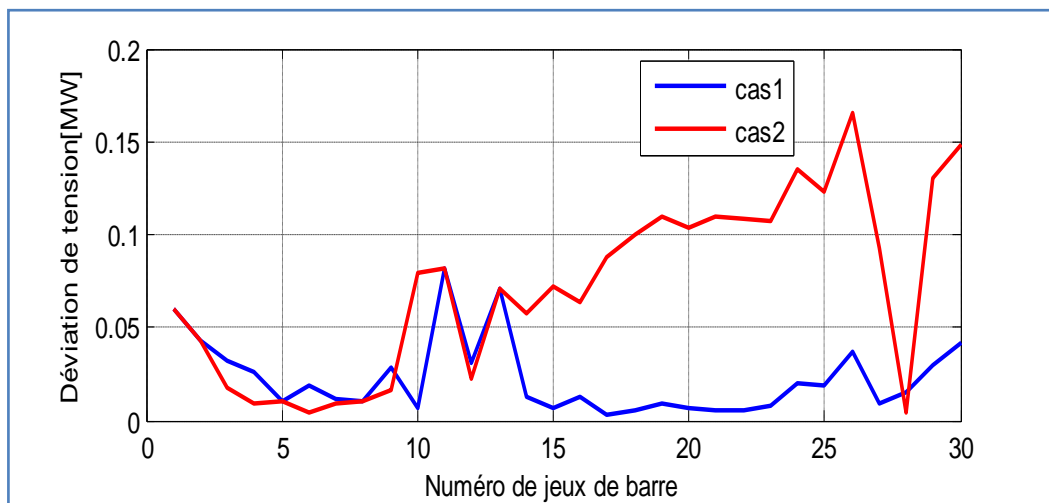


Figure IV.3. Déviation de tensions DV. des jeux de barres (Cas 1 et 2).

D'après les Figures (IV.2) et (IV.3) on constate que les tensions de certains jeux de barres sensibles sont dépassés leurs limites inférieures dans l'état

d'augmentation de charge cas 2. Ainsi, D'après la Figure (IV.4) En remarque une augmentation notable des pertes de transmission de l'ordre de 8.6914 Mw.

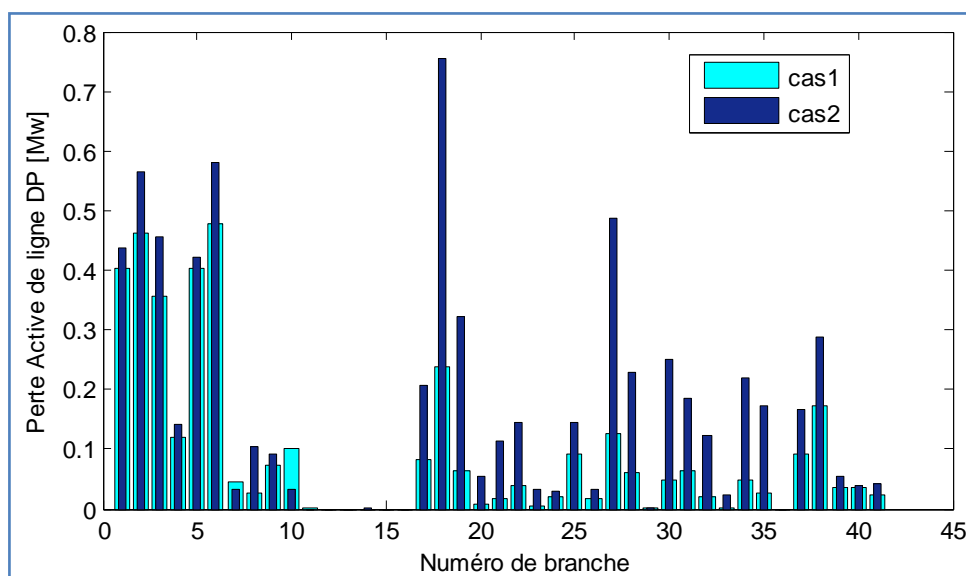


Figure IV.4. Pertes actives DP de transmission (Cas 1 et 2).

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).

| N° JDB | Tension en PU | | N° JDB | Tension en PU | |
|--------|---------------|-------|--------|---------------|-------|
| | Cas 1 | Cas 2 | | Cas 1 | Cas 2 |
| 1 | 1.060 | 1.060 | 16 | 1.013 | 0.936 |
| 2 | 1.043 | 1.043 | 17 | 1.003 | 0.912 |
| 3 | 1.032 | 1.017 | 18 | 0.994 | 0.900 |
| 4 | 1.025 | 1.009 | 19 | 0.990 | 0.890 |
| 5 | 1.010 | 1.010 | 20 | 0.993 | 0.896 |
| 6 | 1.019 | 1.004 | 21 | 0.994 | 0.890 |
| 7 | 1.011 | 0.991 | 22 | 0.994 | 0.891 |
| 8 | 1.010 | 1.010 | 23 | 0.992 | 0.892 |
| 9 | 1.029 | 0.983 | 24 | 0.980 | 0.864 |
| 10 | 1.007 | 0.921 | 25 | 0.981 | 0.877 |
| 11 | 1.082 | 1.082 | 26 | 0.963 | 0.834 |
| 12 | 1.030 | 0.977 | 27 | 0.991 | 0.906 |
| 13 | 1.071 | 1.071 | 28 | 1.015 | 0.996 |
| 14 | 1.013 | 0.942 | 29 | 0.970 | 0.870 |
| 15 | 1.007 | 0.928 | 30 | 0.958 | 0.851 |

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.

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 |
| 1 | 1 | 2 | 0.402 | 0.437 | 22 | 15 | 18 | 0.040 | 0.143 |
| 2 | 1 | 3 | 0.463 | 0.564 | 23 | 18 | 19 | 0.006 | 0.033 |
| 3 | 2 | 4 | 0.356 | 0.455 | 24 | 19 | 20 | 0.020 | 0.028 |
| 4 | 3 | 4 | 0.119 | 0.142 | 25 | 10 | 20 | 0.092 | 0.145 |
| 5 | 2 | 5 | 0.402 | 0.422 | 26 | 10 | 17 | 0.016 | 0.034 |
| 6 | 2 | 6 | 0.478 | 0.581 | 27 | 10 | 21 | 0.128 | 0.488 |
| 7 | 4 | 6 | 0.046 | 0.032 | 28 | 10 | 22 | 0.062 | 0.229 |
| 8 | 5 | 7 | 0.027 | 0.104 | 29 | 21 | 22 | 0.000 | 0.003 |
| 9 | 6 | 7 | 0.073 | 0.093 | 30 | 15 | 23 | 0.048 | 0.251 |
| 10 | 6 | 8 | 0.101 | 0.031 | 31 | 22 | 24 | 0.64 | 0.186 |
| 11 | 6 | 9 | 0.000 | 0.000 | 32 | 23 | 24 | 0.019 | 0.123 |
| 12 | 6 | 10 | -0.000 | 0.000 | 33 | 24 | 25 | 0.002 | 0.022 |
| 13 | 9 | 11 | 0.000 | 0.000 | 34 | 25 | 26 | 0.048 | 0.218 |
| 14 | 9 | 10 | 0.000 | 0.000 | 35 | 25 | 27 | 0.028 | 0.179 |
| 15 | 4 | 12 | 0.000 | -0.000 | 36 | 28 | 27 | 0.000 | 0.000 |
| 16 | 12 | 13 | 0.000 | 0.000 | 37 | 27 | 29 | 0.092 | 0.165 |
| 17 | 12 | 14 | 0.082 | 0.208 | 38 | 27 | 30 | 0.174 | 0.287 |
| 18 | 12 | 15 | 0.238 | 0.754 | 39 | 29 | 30 | 0.036 | 0.053 |
| 19 | 12 | 16 | 0.063 | 0.321 | 40 | 8 | 28 | 0.037 | 0.040 |
| 20 | 14 | 14 | 0.009 | 0.054 | 41 | 6 | 28 | 0.024 | 0.041 |
| 21 | 16 | 17 | 0.018 | 0.114 | | | | | |

IV.2.2. Emplacement optimal des FACTS :

Dans cette partie, on va appliquer les algorithmes **MC** et **PSO** 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 [28] .

IV.2.2.1 Optimisation avec considération de SVC :

L'optimisation par les algorithmes méta heuristiques 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 optimisé, 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.

Les paramètres de simulation des deux algorithmes sont portés de et représentés dans le tableau IV.3.

Tableau IV. 3. Les paramètres des algorithmes MC,PSO

| <i>PSO</i> | <i>MC</i> |
|---|-----------------------------|
| Nbr. des iterations Max 80 | Nbr. des iterations Max 150 |
| Taille de la population 40 | Taille de la population 20 |
| Coefficient d'inertie, w 0.4 - 0.9 | / |
| Coefficient social C_1 et cognitif C_2 $C_1 = 1.5 - C_2 = 1.5$ | / |

❖ Fonction mono objectif de la déviation de tension DV

Les Figures (IV.5) montrent la convergence de fonctions objectives par les algorithmes.

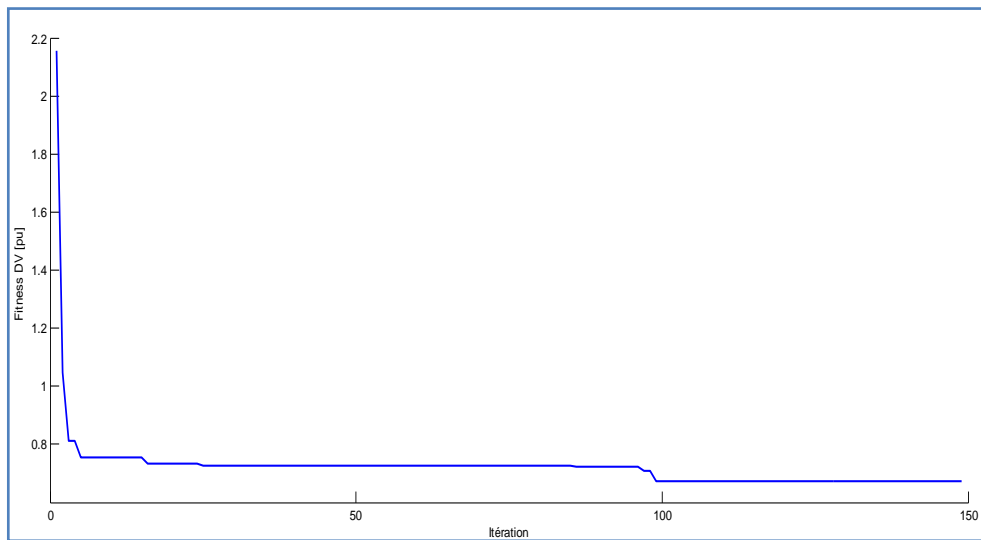


Figure IV.5. Caractéristique de convergence de la déviation de tension par MC avec SVC

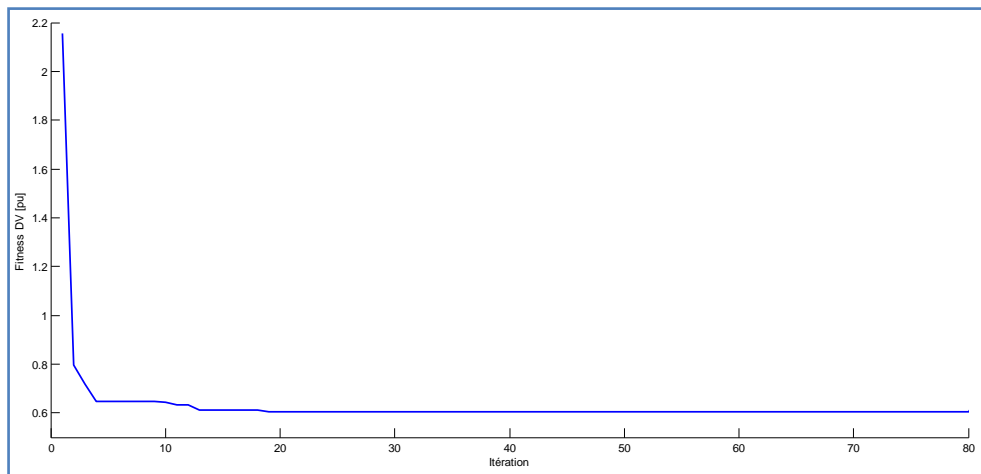


Figure IV.6. Caractéristique de convergence de la déviation de tension par PSO avec SVC

Tableau .IV.4. Optimisation DV par les deux approches proposées avec SVC.

| | Sans SVC | | SVC+MC | | SVC+PSO | |
|------------------------------|----------|----------|--------|----------|---------|----------|
| | JDB | Q [MVAR] | JDB | Q [MVAR] | JDB | Q [MVAR] |
| Placement Optimal de SVC | - | - | 3 | 1.5627 | 10 | 35.9034 |
| | - | - | 6 | 27.6797 | 12 | 24.1821 |
| | - | - | 15 | 43.1667 | 24 | 35.2400 |
| | - | - | 22 | 35.1878 | 30 | 12.9948 |
| | - | - | 25 | 25.7441 | - | - |
| Déviatiion de tension | 2.1562 | | 0.6713 | | 0.6038 | |

Les profils de la tension pour chaque algorithme sont illustrés dans les Figures (IV.7, IV.8)

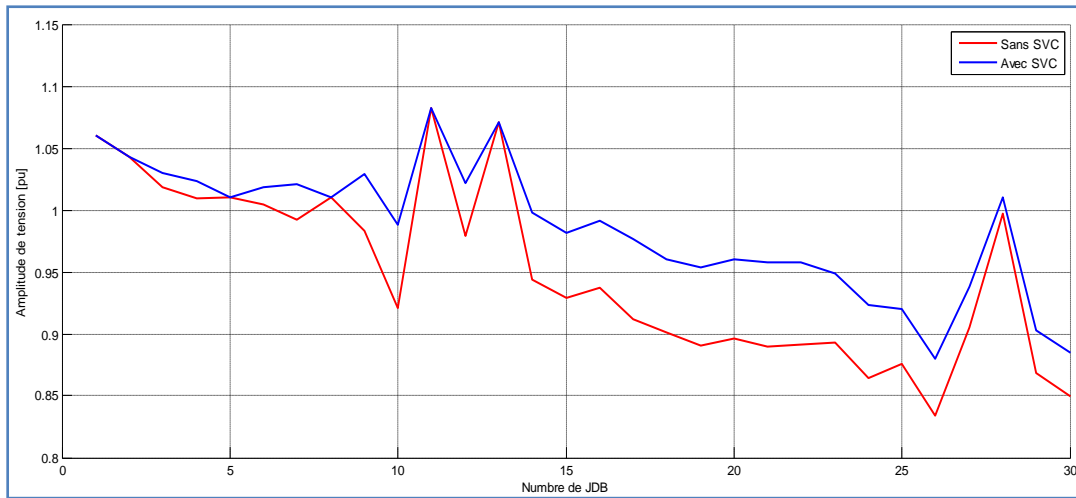


Figure IV.7. Amplitude de tensions des JDB trouvé par MC avec SVC

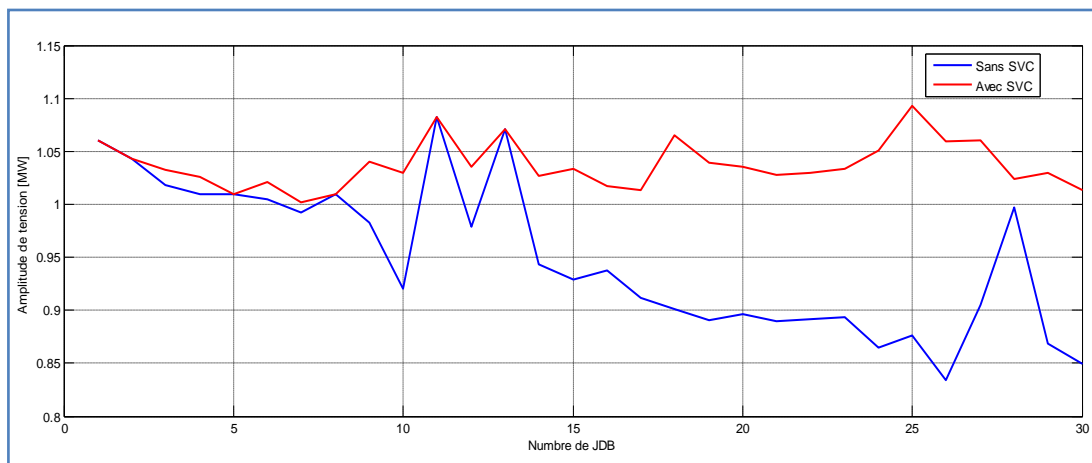


Figure IV.8. Amplitude de tensions des JDB trouvé par PSO avec SVC.

❖ **Fonction mono objectif de pertes actives de transmission DP**

Les Figures (IV.9,IV.10), montrent l'évolution de la fonction objective DP durant le processus d'optimisation par les deux approches proposées.

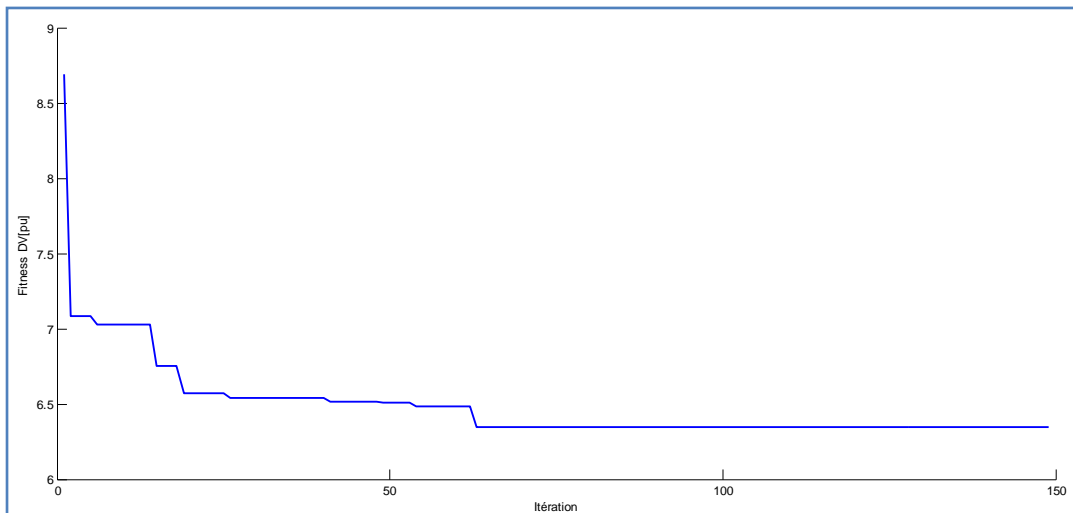


Figure IV.9. Caractéristique de convergence des pertes lignes par MC avec SVC.

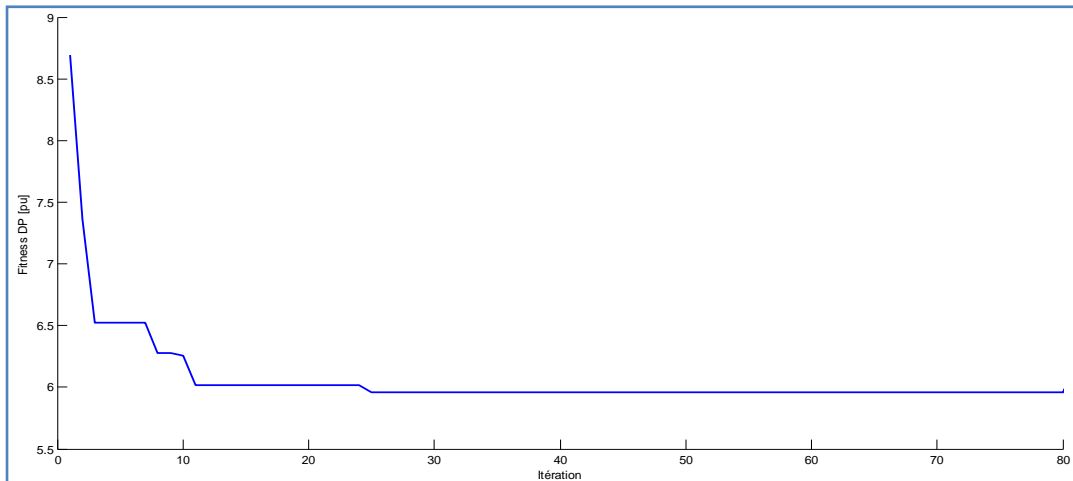


Figure IV.10. Caractéristique de convergence des pertes lignes PSO avec SVC

Ansi les algorithmes adaptés sont appliqués avec succès pour résoudre le problème d'optimisation des pertes DP. Les meilleures solutions calculées par MC et PSO sont respectivement 6.0705 Mw, 5.8039Mw . 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 deux approches proposées avec SVC.

| | Sans SVC | | SVC+MC | | SVC+PSO | |
|--------------------------|----------|----------|--------|----------|---------|----------|
| | JDB | Q [MVAR] | JDB | Q [MVAR] | JDB | Q [MVAR] |
| Placement Optimal de SVC | - | - | 9 | 71.3345 | 18 | 19.3900 |
| | - | - | 21 | 25.2696 | 22 | 27.2229 |
| | - | - | 23 | 18.9618 | 24 | 32.2364 |
| | - | - | 25 | 27.0015 | 26 | 10.6281 |
| Perte Active(MW) | 8.6914 | | 6.0705 | | 5.8039 | |

Les pertes actives de transmission pour chaque algorithme sont illustrées dans les Figures (IV.11.,IV.12)

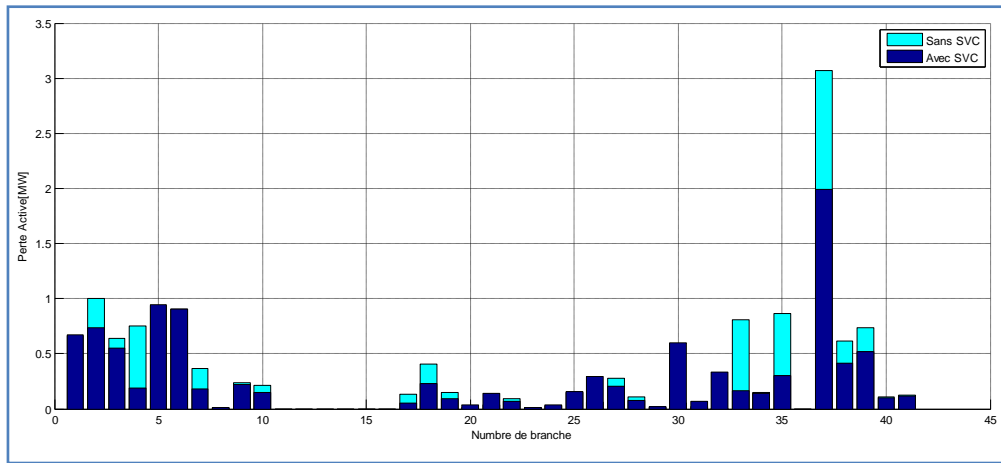


Figure .IV.11. Pertes Actives des Lignes trouvé par MC avec SVC.

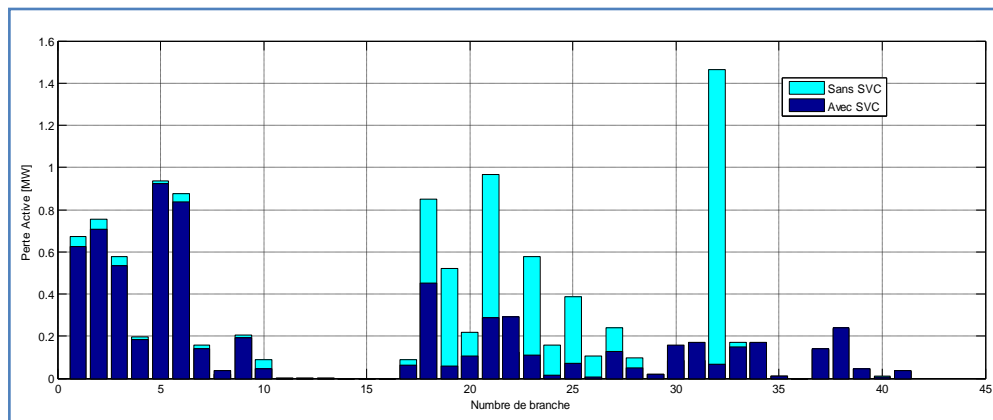


Figure.IV.12. Pertes Actives des Lignes trouvé par PSO avec SVC.

- Etude comparative

Le but principal de cette partie est la comparaison entre les deux approches adaptées pour vérifier leurs performances. Les Figures (IV,13, IV.14), montrent les caractéristiques de convergence de la fonction fitness de la Perte active DP pour dix essais par les deux approches adaptées, avec considération de SVC.

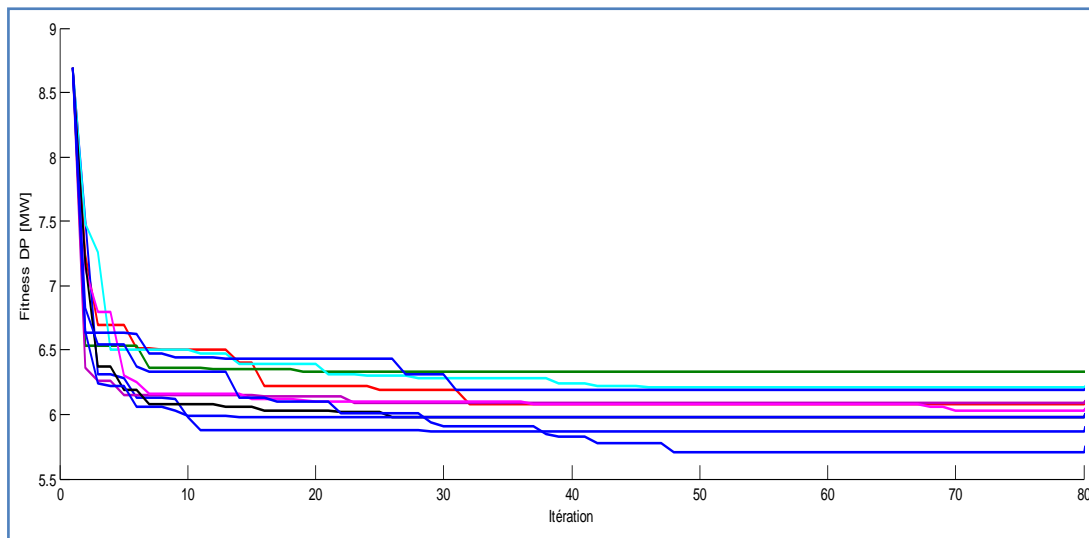


Figure.IV.13. Convergence de la déviation de la tension par PSO avec SVC de dix essais.

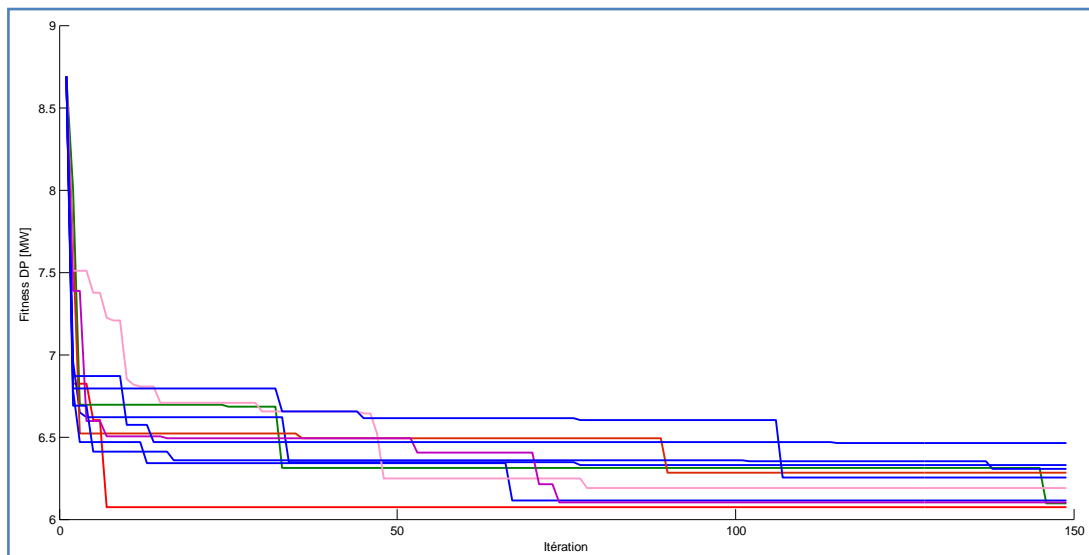


Figure.IV.14. Convergence de la déviation de la tension par MC avec SVC de dix essais.

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 quatrième approche PSO génère la meilleure qualité de solution DP= 5.9617MW. 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 deux approches proposées.

| | MC | PSO |
|------------------------|--------|--------|
| Nombre d'itération Max | 150 | 80 |
| DP valeur Max (MW) | 6.3471 | 6.3281 |
| DP valeur Moyenne (MW) | 6.2209 | 6.0468 |
| DP valeur Min (MW) | 6.1053 | 5.9617 |

De même, le Tableau IV. 7 expose les résultats obtenus par rapport le nombre de génération. PSO converge vers la solution optimale malgré le nombre itérations est petit en le comparant aux autres méthodes qui nécessitent un nombre important de générations 150 itérations pour MC .

Tableau IV. 7 . Comparaison au niveau d'itération entre les deux approches proposées.

| | MC | PSO |
|----------------------------------|--------|--------|
| Nombre d'itération Max | 150 | 80 |
| Itération Max de convergence | 146 | 71 |
| Itération Moyenne de convergence | 77 | 43 |
| Itération Min de convergence | 7 | 14 |
| DP (MW) | 6.1053 | 5.9617 |

Conclusion

Dans cette partie, les résultats obtenus par l'application des algorithmes proposés confirment la robustesse de l'optimisation par particule d'essaims PSO 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 diverse objectifs simultanément par la méthode PSO, il s'agit de minimiser la déviation de la tensions 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.[28]

Les fonctions multi objectifs adaptées sont définit comme suit:

$$Fitness = U \frac{\sum_{i=1}^{n_j} |V_{ref} - V_i|}{V_{base}} + (1 - U) \frac{\sum_{i=1}^{N_{svc}} IC_{svc}}{IC_{bas}} \quad (IV.2)$$

$$Fitness = U \frac{\sum_{i=1}^{n_b} P_{Li}}{P_{L, base}} + (1 - U) \frac{\sum_{i=1}^{N_{svc}} IC_{svc}}{IC_{bas}} \quad (IV.3)$$

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

$$IC_{svc} = C_{svc} \cdot S \cdot 1000 \quad (IV.4)$$

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

$$C_{svc} = 0.0003 \cdot S^2 - 0.3051 \cdot S + 127.38 \quad (IV.5)$$

$$S = |Q_2 - Q_1| \quad (IV.6)$$

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 IEEE 30 bus. Donc les Figures (IV.15 et IV.16) 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.

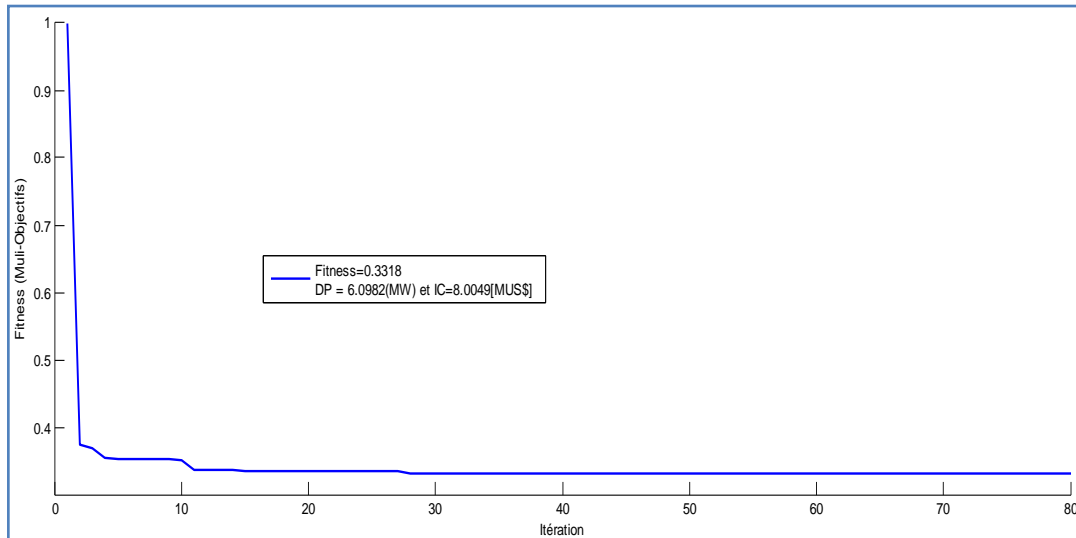


Figure IV.15 : Convergence de DP Multi-Objectifs par PSO avec SVC

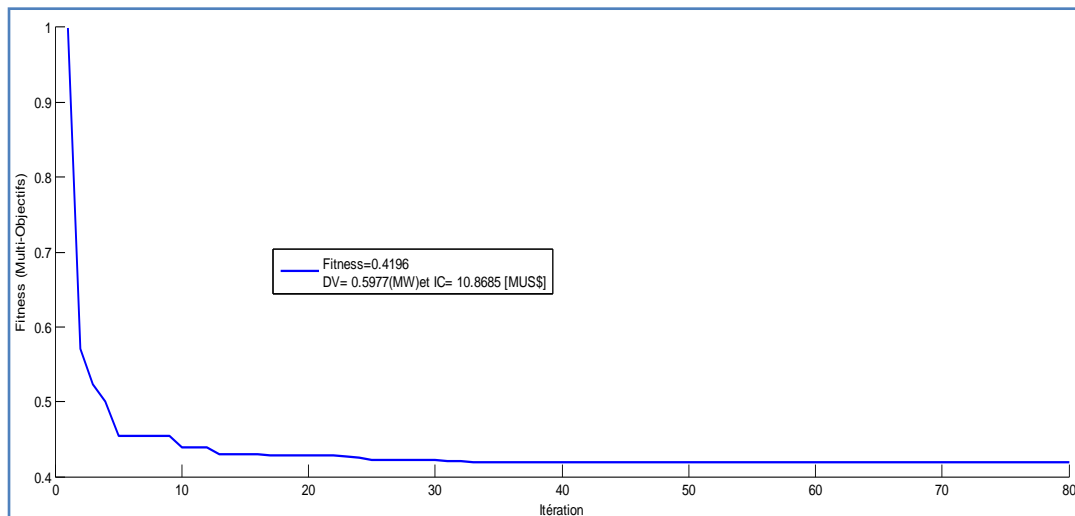


Figure IV.16 : Convergence de DV Multi-Objectifs par PSO avec SVC

Le critère de la déviation de la tension et le critère économique du coût d'investissement du SVC sont respectivement (0.5977 [p.u], 10.8685 [MUS\$]), ainsi le critère de pertes actives dans les lignes et le critère économique d'investissement du SVC sont respectivement de l'ordre (6.0982 [p.u], 8.0049 [MUS\$]). Le deux Tableau (IV.8, IV.9) expose la solution obtenus par l'approche PSO.

Tableau IV.8. Optimisation simultanément DP-IC par l'approche PSO avec SVC

| Placement Optimal | N° JDB | Sans SVC | Avec SVC |
|---|--------|----------|----------|
| | 10 | / | 79.2197 |
| | 24 | / | 28.6427 |
| | 26 | / | 6.4594 |
| | 29 | / | 7.1940 |
| Perte active totale | | 8.6914 | 6.0982 |
| Cout investissement X 10 ⁶ (Max = 49.9350) | | | 8.0049 |
| Fitness F(x)(Max = 1.0000) | | | 0.3318 |

Tableau IV.9. Optimisation simultanément DV-IC par l'approche PSO avec SVC

| Placement Optimal | N° JDB | Sans SVC | Avec SVC |
|---|--------|----------|----------|
| | 15 | / | 5.3138 |
| | 19 | / | 22.8937 |
| | 22 | / | 30.5891 |
| | 25 | / | 32.4346 |
| Déviation de Tension | | 2.1562 | 0.5977 |
| Cout investissement X 10 ⁶ (Max = 49.9350) | | | 10.8685 |
| Fitness F(x)(Max = 1.0000) | | | 0.4196 |

A. Minimisation des pertes totales DV et le cout sans et avec Contrôleur SVC

Résultats de simulations et figure (IV.17) suivants:

D'après la convergence des algorithmes d'optimisation PSO 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 1.08 p.u (Figure IV.11). Ainsi les coûts d'investissements de dispositif SVC trouvés par ce teste est de l'ordre de 11.3039 [MUS\$] ont été réduit respectivement à -22.63% après optimisation par l'algorithme PSO Figure (IV.17,IV.18).

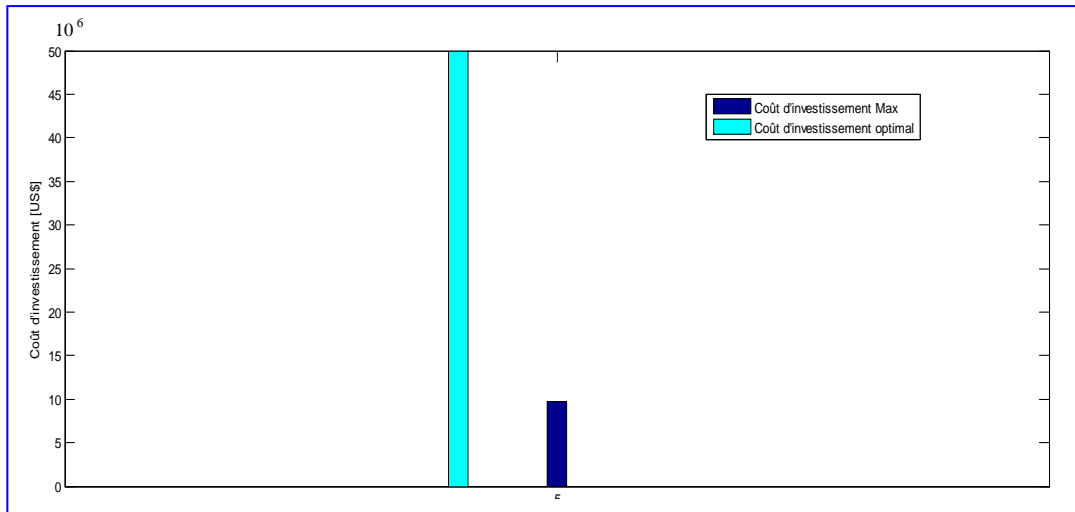


Figure IV.17: Coût d'investissement de SVC trouvé par PSO

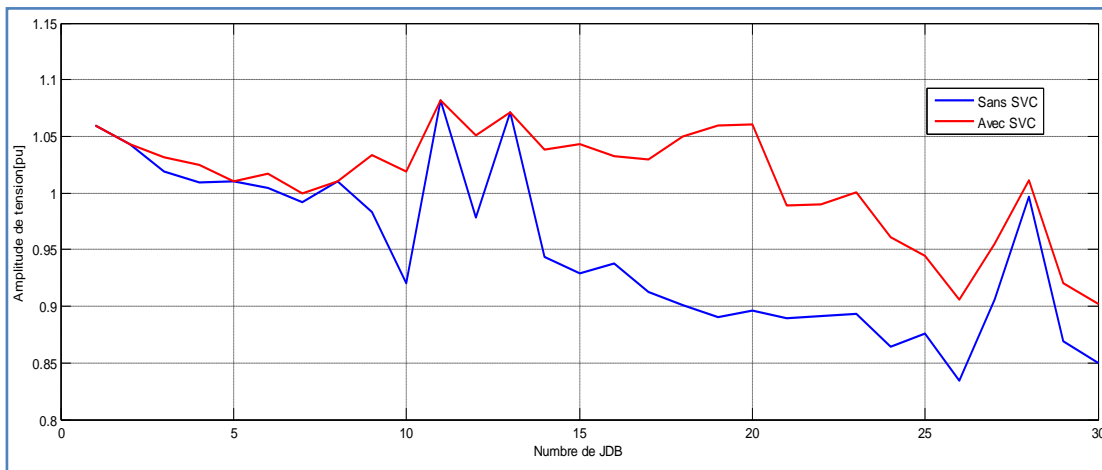


Figure IV.18: Amplitude de tensions des JDB trouvé par PSO et SVC

B. Minimisation des pertes totales DP et le couté sans et avec Contrôleur SVC

Résultats de simulations et figure (IV.19) suivants:

Ansi le critère de pertes actives et le critère économique d'investissement du SVC pour le deuxième test sont respectivement à l'ordre de (6.1373 [p.u], 10.7505[MUS\$]), ont été réduit respectivement à -22.63% et -21.52% après optimisation par l'algorithme PSO. (Figure IV.19 et IV.20).

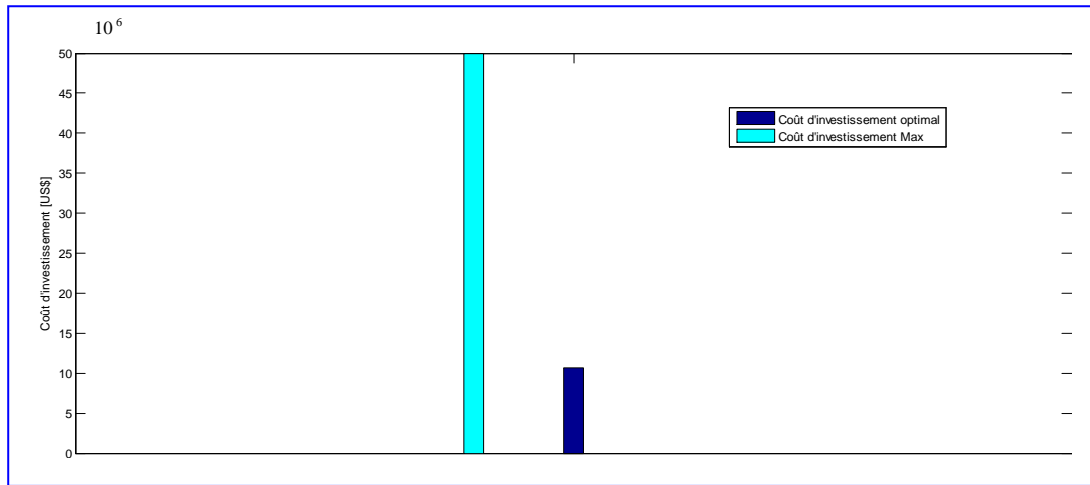


Figure IV.19 :Coût d'investissement de SVC trouvé par PSO

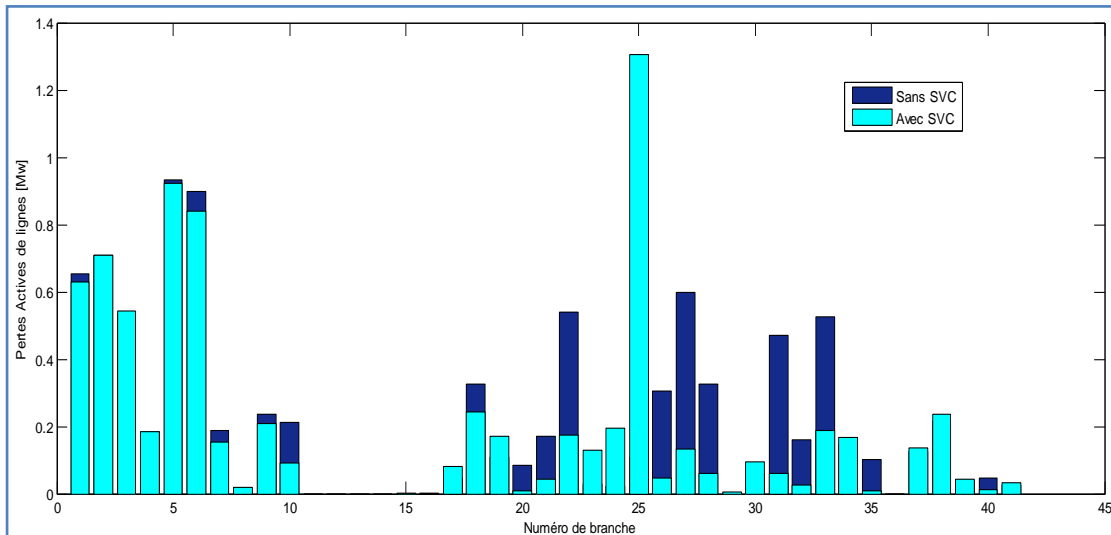


Figure IV.20: Pertes actives de branche trouvé par PSO et SVC

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 SVC permettent de minimiser les pertes actives de transmission.

IV.3 Conclusion

Dans ce chapitre on a proposé deux algorithmes d'optimisation méta heuristiques 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 puissance réactive de réseaux électrique. L'application a été effectuée sur un réseau IEEE 30-bus . Les résultats obtenus confirment la robustesse de ces méthodes à résoudre les problèmes liés à la dimensionnement des systèmes FACTS dans le but le fonctionnement du réseaux électrique d'une manière dynamique.

Conclusion générale

Dans ce mémoire nous avons présentés l'optimisation de l'énergie réactive dans les réseaux électriques par utilisation de la technologie FACTS en appliquant les algorithmes d'optimisation globales.

L'intégration des dispositifs FACTS (Flexible AC Transmission System) ouvre des nouvelles perspectives pour une meilleure exploitation des réseaux. Donc nous avons orienté nos travaux vers l'étude d'optimisation de la puissance réactive en régime statique, spécialement l'emplacement optimal des dispositifs FACTS. Nous avons, dans ce cadre, choisi d'étudier le comportement de dispositifs FACTS qui sont:

- ❖ Compensateur statique d'énergie réactive SVC.

L'impact d'intégration optimale des systèmes FACTS sur l'effondrement de tension a montré une nette amélioration à l'aide d'utilisation les critères de la déviation de la tension, les pertes actives de transmission .

Une étude comparative élaborée entre l'optimisation par algorithmes Monte Carlo (MC), l'optimisation par essaims de particules (PSO),démontrer que la méthode PSO très efficace pour résoudre les problème complexe et la fonctionnement de réseau d'une façon dynamique .

Pour concrétiser l'optimisation envisagée on a traité le problème d'optimisation de la puissance réactive en minimisant deux importantes fonctions objectifs qui ont une influence directe sur ce grandeur électrique, la première représente la minimisation des pertes actives totales dans les lignes de transmission, tandis que la deuxième fonction objectif tient compte de l'effet de la déviation de tension dans les jeux de barres de charge.

En effet dispositifs FACTS sont employés, ce sont les dispositifs shunt SVC qui sont proposés dans ce mémoire pour vérifier leurs effet sur l'optimisation envisagée. deux tests d'application sont alors représentés dans le quatrième chapitre pour bien examiner et contourner le problème proposé : le problème d'optimisation de la puissance réactive est traité avec considération de la compensation shunt (SVC) Une discussion largement détaillée est faite pour comparer les différents résultats

trouvés par ces approches et de valider l'importance d'intégrer ce type de compensateur FACTS dans les réseaux électriques. les deux fonctions objectifs (minimisation des pertes actives et la déviation de tension) sont optimisées individuellement ou simultanément, et le convergence algorithme .

les courbes obtenues expliquent le rôle de l'optimisation multi objectifs

Comme perspective nous proposons:

- ✓ Elargir l'étude du problème d'optimisation de la puissance réactive par l'intégration des dispositifs FACTS Hybrides (UPFC).
- ✓ Introduire les contraintes pratiques associées aux unités de production ainsi que les contraintes de sécurité

Bibliographie

- [1] Mancner N, Aggouni Y «modélisation et intégration des dispositifs de compensation dynamique FACTS», Mémoire de l'ingénieur d'état Juin 2007
- [2] Nabil MANCER, «Contribution à l'optimisation de la puissance réactive en présence de dispositifs de compensation dynamique (FACTS)» mémoire de magister, université de BISKRA, 2016
- [3] MAGNOUN Youness «Placement optimal de dispositif FACTS dans un réseau de puissance» Mémoire d'ingénieur, Centre De Maroc, 2014
- [4] Stéphane GERBEX, «Meta heuristique Appliquées Au Placement Optimal De Dispositifs FACTS dans un Réseau Electrique», thèse PHD, Ecole poly technique de Lausanne, Lausanne 2003.
- [5] Rabah BENABID «Optimisation Multi objectif de la Synthèse des FACTS par les Particules en Essaim pour le Contrôle de la Stabilité de Tension des Réseaux Electriques» Mémoire de Magister, Université Amar Telidji, 2007
- [6] B. Mahdad, « Optimal Power Flow with Consideration of FACTS devices Using Genetic Algorithm: Application to the Algerian Network», Doctorat Thesis, Biskra University Algeria, 2010.
- [7] Abdelaàli ALIBI, «Contrôle des Réseaux Electriques par les Systèmes FACTS: (Flexible AC Transmission Systems)» Magister de l'Université de Batna 2009
- [8] Petitclair P. «Modelisation et Commande de structures FACTS: Application au STATCOM», These de doctorat de l'INPG 16 Juillet 1997
- [9] Gerbex S., «Meta heuristiques appliquees au placement optimal de dispositifs FACTS dans un reseaelectrique», These De Doctorat, Universite de Lausanne, EPLF.2003.

[10] M. ZITOUNI Fares, «Amélioration de la Stabilité Transitoire des Réseaux Electriques par l'utilisation des Systèmes FACTS», Mémoire de Magister, UNIVERSITE FERHAT ABBAS, 2010.

[11] Stéphane Gerbex. "méta heuristiques appliquées au placement optimal de dispositifs FACTS dans un réseau électrique", thèse de doctorat n° 2742 Ecole poly technique fédérale de Lausanne (2003)

[12] Acha, Enrique, et al. FACTS: modelling and simulation in power networks. John Wiley & Sons, 2004.

[13] R.Benabid, M.Boudour,M.A Abido." Optimal location and setting of SVC and TCSC devices using non-dominated sorting particle swaem optimization". , Elect Power and energy syst, 2009, 79,pp.1668-1677

[14] Eskandar G.SH Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques l'université henripoincare, nancy-i 2003

[15] S.L. AVILA, "Optimisation multiobjectif et analyse de sensibilité appliquées à la conception de dispositifs" Thèse de doctorat l'Université Fédérale de Santa Catarina (Brésil)2006

[16] Alain Berro, "Optimisation multi objectif et stratégies d'évolution en environnement dynamique", Thèse présentée à l'Université des Sciences Sociales Toulouse I 2001

[17] Omessaad Hjjj. " Contribution au développement de méthodes d'optimisation stochastiques. Application a la conception des dispositifs électrotechniques ", Thèse présentée à l'Université des Sciences et technologies de Lille 2003.

[18] Vincent GARDEUX," Conception d'heuristiques d'optimisation pour les problèmes de grande dimension. Application à l'analyse e données de puces à ADN", Thèse de doctorat l'université de paris-estcréteil 2011

[19] Mathieu Liedloff," Algorithmes exacts et exponentiels pour les problèmes NP-difficiles :domination, variantes et généralisations", l'université Paul Verlaine – Metz 2007

- [20] Walid Tfaili, "Conception d'un algorithme de colonie de fourmis pour l'optimisation continue dynamique" de l'université paris 12-val de marne 2007
- [21] Jean Dipama, " optimisation multi-objectif des systèmes énergétiques", Université de montréal 2010.
- [22] Belkacem SID, "optimisation topologique de structures par algorithmes génétiques. l'université de technologie de Belfort-Montbéliard 2006
- [23] Ouahib Guenounou" Méthodologie de conception de contrôleur intelligents par l'approche génétique- application à un bioprocédé" l'Université Toulouse III - Paul Sabatier 2009
- [24] Antoine Dutot , "distribution dynamique adaptative à l'aide de mécanismes d'intelligence collective Université du Havre, 2005
- [25] [Dorigo, 1992] Dorigo, M. "Optimization, learning and natural algorithms". PhD thesis, Department of Electronics Politecnico di Milano, Italy. In italian (1992).
- [26] Yann COOREN, " Perfectionnement d'un algorithme adaptatif d'Optimisation par Essaim Particulaire. Applications en génie médical et en électronique" thèse de doctorat de l'université paris 12 val de marne 2008
- [27] Slimani Linda " contribution a l'application de l'optimisation par des méthodes meta heuristiques a l'écoulement de puissance optimal dans un environnement de l'électricité déréglé." thèse de magister l'université de Batna Alger 2009
- [28] 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 en sciences de l'université BISKRA, 2018

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 (mono objective)

| 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 | 00.00 | 00.0 | 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 |

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 | 0.0845 | 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

B. 1 Programme de la méthode Newton Raphson en MATLAB

B. 1.1 Fiche NR programme principale :

```

clear all
clc
DATA1
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%CALCULE LE MATRICE
D' ADMITANCE%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    nj=length(bd(:,1));
    nb=length(ld(:,1));
    Ndb=ld(:,6);
    njdb=bd(:,1);
    n1=ld(:,1);
    n2=ld(:,2);
    R=ld(:,3);
    X=ld(:,4);
    sus=ld(:,5);
    cap=capa(:,2);

    for i=1:nj
        y(i,i)=0;
        for j=1:nj
            if j~=i
                y(i,j)=0;
                for k=1:nb
                    if n1(k)==i & n2(k)==j | n1(k)==j & n2(k)==i
                        y(i,j)=-1/complex(R(k),X(k));
                        y(i,i)=y(i,i)-y(i,j)+complex(0,sus(k));
                    end
                    y(i,i)=y(i,i)+complex(0,cap(k));
                end
            end
        end
    end

```



```

                jac(i2,j3)=0;
                jac(i2,j4)--
2*abs(v(i)*y(i,j))*sin(angle(y(i,j)));
                for k=1:nj
                    if k~=i

jac(i2,j3)=jac(i2,j3)+abs(v(i)*v(k)*y(i,k))*cos(angle(y(i,k))-
angle(v(i))+angle(v(k)));
                jac(i2,j4)=jac(i2,j4)-
abs(v(k)*y(i,k))*sin(angle(y(i,k))-angle(v(i))+angle(v(k)));
                    end
                end
                j3=j3+1;
                j4=j4+1;
            end
            if nat(j)==2
                jac(i2,j3)=0;
                for k=1:nj
                    if k~=i
                        jac(i2,j3)=jac(i2,j3)-
abs(v(i)*v(k)*y(i,k))*cos(angle(y(i,k))-angle(v(i))+angle(v(k)));
                    end
                end
                j3=j3+1;
            end
        end
    end
    i2=i2+1;
end
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%CALCULE DE L'INVERSE De
JACOPI%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
inv_jac=inv(jac);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%CALCULE DELTA VM/VA%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
for i=1:njac
    c(i)=0;
    for j=1:njac
        c(i)=c(i)+inv_jac(i,j)*d(j);
    end
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% CALCULE VA/VM %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
k1=1;
k2=nj;
k11=1;
for i=1:nj
    if nat(i)==3
        va(i)=va(i)+c(k1);
        VQ(k11)=abs(c(k2));
        vm(i)=vm(i)+c(k2);
        k1=k1+1;
        k2=k2+1;
        k11=k11+1;

    end
    if nat(i)==2
        va(i)=va(i)+c(k1);
        k1=k1+1;
    end
    va(i)=va(i)*180/pi;

```

```

end
%%%%%%%%%%%%% CALCULE [PG],[QG] A PARTIR DE [P],[Q]
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%% CALCULE LA PUISSANCE TOTALE GENEREE
[PGtot],[QGtot]%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%% CALCULE LA PUISSANCE TOTALE DEMANDEE
[PDtot],[QDtot]%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

pgtot=0;
qgtot=0;
pdtot=0;
qdtot=0;
for i=1:nj
    if nat(i)==1
        pg(i)=p(i)*sb+pd(i);
        qg(i)=q(i)*sb+qd(i);
    end
    if nat(i)==2
        qg(i)=q(i)*sb+qd(i);
    end
    pgtot=pgtot+pg(i);
    qgtot=qgtot+qg(i);
    pdtot=pdtot+pd(i);
    qdtot=qdtot+qd(i);
    f=pgtot/sqrt(pgtot^2+qgtot^2);
end
%%%%%%%% LES PUISSANCE TRANSITEES ET LES PERTES DANS LES LIGNES
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
pltot=0;
qltot=0;
for i=1:nb
    s1=(conj(v(n1(i)))*(v(n1(i))-
v(n2(i)))/complex(R(i),X(i))+((vm(n1(i)))^2)*complex(0,sus(i)))*sb;
    s2=(conj(v(n2(i)))*(v(n2(i))-
v(n1(i)))/complex(R(i),X(i))+((vm(n2(i)))^2)*complex(0,sus(i)))*sb;
    pij(i)=real(s1);
    pji(i)=real(s2);
    qij(i)=-imag(s1);
    qji(i)=-imag(s2);
    pl(i)=pij(i)+pji(i);
    ql(i)=qij(i)+qji(i);
    pltot=pltot+pl(i);
    qltot=qltot+ql(i);
end

UU=abs(d);
iter2(G)=G;
erreur2(G)=max(UU);
    if max(UU)<=TS
        affichage
        break
    end
end

for j=1:nj
    L(j)=abs(1.00-vm(j));
end

```



```

disp(head1)
for n=1:nb
    fprintf(' %8g', n), fprintf('%5.8g', n1(n)),
    fprintf(' %4.5g', n2(n)),fprintf(' %8.3f', pij(n)),
    fprintf(' %7.3f', qij(n)),fprintf(' %8.3f', pji(n)),
    fprintf(' %8.3f',qji(n)),fprintf(' %8.3f', pl(n)),
    fprintf('%11.3f', ql(n)),

    fprintf(' \n')
disp(' |-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|-----| ')
end
fprintf(' \n')
fprintf(' \n'),
disp('')
*****

fprintf(' la puissance active générée Totale(MW) est: ')
fprintf(' %9.4f', pgtot)
fprintf(' \n'), fprintf(' La puissance réactive
générée Totale(MVAR) est: ')
fprintf(' %9.4f', qgtot ),
fprintf(' \n'), fprintf(' La Puissance active demandée
Totale(MW) est: ')
fprintf(' %9.4f', pdtot),
fprintf(' \n'), fprintf(' La puissance réactive
demandée Totale(MVAR) est: ')
fprintf(' %9.4f', qdtot),
fprintf(' \n'), fprintf(' Les Pertes Actives
Totale(MW) est: ')
fprintf(' %9.4f', pltot)
fprintf(' \n'), fprintf(' Les Pertes Réactives
Totale(MVAR) est: ')
fprintf(' %9.4f', qltot)
fprintf(' \n')
disp(' ')
*****

```