

Université Mohamed Khider – Biskra  
Faculté des Sciences et de la technologie  
Département : Génie Electrique  
Réf :.....



جامعة محمد خيضر بسكرة  
كلية العلوم و التكنولوجيا  
قسم: الهندسة الكهربائية  
المرجع:.....

Mémoire présenté en vue de l'obtention  
du diplôme de  
**Magister en : Electrotechnique**

**Option : Réseaux Electriques**

**Contribution à l'optimisation de la puissance  
réactive en présence de dispositifs de  
compensation dynamique (FACTS)**

Présenté par :  
**Nabil MANCER**

Soutenu publiquement le 28 / 01 / 2012

**Devant le jury composé de :**

|                          |                           |             |                      |
|--------------------------|---------------------------|-------------|----------------------|
| Dr. MIMOUNE Sour Med     | Professeur                | Président   | Université de Biskra |
| Dr. SRAIRI Kamel         | Professeur                | Rapporteurs | Université de Biskra |
| Dr. MAHDAD Belkacem      | Maitre de Conférences 'B' |             | Université de Biskra |
| Dr. BENCHOUIA Med Toufik | Maitre de Conférences 'A' | Examineur   | Université de Biskra |
| Dr. ABOUBOU Abdenacer    | Maitre de Conférences 'A' | Examineur   | Université de Biskra |

---

## REMERCIEMENT

*Tout d'abord je tiens à remercier mon encadreur Prof. SRAIRI Kamel d'avoir m'encadrer et de présider ce travail je veux le remercier très vivement pour ces encouragements illimités et aussi ces conseils précieux durant l'élaboration de ce mémoire.*

*Je tiens à remercier très particulièrement mon Co-encadreur **Dr. MAHDAD Belkacem** pour son aide continue, ses orientations ponctuelles, et ainsi ces encouragements illimités pendant la réalisation de ce travail.*

*J'exprime mes chaleureux remerciements à mon professeur MIMOUNE Soury Mohamed à l'honneur qui m'a porté d'examiner mon mémoire et de présider ce jury.*

*J'adresse mes remerciements à tous les membres du jury d'accepter de juger ce modeste travail.*

---

## DEDICACE

---

*Je dédie ce travail à :*

*Ma Mère,*

*A mon Père,*

*A mes frères*

*Et à tous mes Amis*

NABIL MANCER  
15/10/2012

---

## *Publication Internationals*

- [1] **N. Mancor**, B. Mahdad, K.Srairi. “ Multi Objective Optimal Reactive Power Flow Based STATCOM Using Three variant of PSO” *International Journal of Energy Engineering*, [Published online at http:// journal.sapub.org/ijee](http://journal.sapub.org/ijee), , Vol.2 N°.2, pp 1-7, 2012
- [2] **N. Mancor**, B. Mahdad, K.Srairi, M Hamed. “Multi Objective For Optimal Reactive Power Flow Using Modified PSO Considering TCSC,” *International Journal of Energy Engineering*, [Published online at http:// journal.sapub.org/ijee](http://journal.sapub.org/ijee), Vol.2 N°.4, pp165-170, 2012.
- [3] M. Hamed, B. Mahdad, K. Srairi and **N. Mancor**. “Solving Dynamic Economic Dispatch With Modified PSO Algorithm Considering Valve Points Effect And Ramp Rate generators Limits”, [Has been accepted in journal.sapub.org/ijee](http://journal.sapub.org/ijee).

## *Communications internationals*

- [4] **N. Mancor**, B. Mahdad, K.Srairi, M Hamed. “Multi Objective ORPF Using PSO with Time Varying Acceleration Considering TCSC” *Proceedings of the 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering*, (EEEIC 2012) Venice Italy, 18 - 25 May 2012: 802-807. <http://ieeexplore.ieee.org/>
  - [5] M. Hamed, B. Mahdad, K. Srairi and **N. Mancor**. “Solving Combined Economic Emission Dispatch Problem Using Time Varying Acceleration Based PSO” *Proceedings of the 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering*”, (EEEIC 2012) Venice Italy, 18 - 25 May 2012: pp 764-769. <http://ieeexplore.ieee.org/>
  - [6] M. Hamed, B. Mahdad, K. Srairi and **N. Mancor**. “Solving Multi-objective Economic Dispatch Problem Using Flexible Time Varying Acceleration Based PSO” *.4th international conference on electrical engineering (ICEE'12) 07-09 Algiers 2012*
  - [7] **N. Mancor**, B. Mahdad, K. Srairi and M. Hamed. “Minimisation des Pertes de Transmission d’Energie par Utilisation des AG et PSO”. *7th International Conference on Electrical Engineering CEE'12* Octobre 8 – 10, Batna 2012
-

## Résumé

Ce mémoire présente une contribution à 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 génétiques AG, Algorithme d'optimisation par colonies de Fourmies, l'optimisation par essaims de particules PSO et ses versions modifiées telles que l'algorithme PSO avec facteur intérieur (PSO-CI), PSO avec facteur de constriction PSO-FC, et l'algorithme d'optimisation par essaims de particules avec coefficient d'accélération variable PSO-TVAC.

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, deux dispositifs FACTS (STATCOM et TCSC) ont été modélisés et intégrés dans des réseaux tests pratiques. Pour renforcer le contenu de notre travail, un indice de stabilité de tension nommé 'L\_index' est minimiser en coordination avec les paramètres de compensateur shunt STATCOM 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, IEEE 57-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, STATCOM, TCSC. Méthodes d'optimisation classique, Méthodes d'optimisation globales : GA, PSO, PSO-CI, PSO-FC, PSO-TVAC, ACO. Stabilité de tension, L-index.

---

# SOMMAIRE

|   |    |
|---|----|
| ❖ Remerciements   |    |
| ❖ Dédicaces   |    |
| ❖ Publications  |    |
| ❖ Résumé  |    |
| ❖ Sommaire.....   | i  |
| ❖ Liste des Figures.....  | v  |
| ❖ Liste des Tableaux.....   | ii |
| ❖ Liste des Symboles et abréviations.....                           | v  |
| Introduction Générale.....  | 1  |
| <b>Chapitre 1 Introduction et généralité sur les systèmes FACTS</b> |    |
| 1.1. Introduction:.....   | 3  |
| 1.2. La puissance réactive dans les circuits électriques:.....      | 3  |
| 1.2.1 Sens physique de la « puissance imaginaire».....              | 4  |
| 1.2.2 Le théorème de Boucherot.....                                 | 6  |
| 1.2.3 Puissance transmise par une ligne électrique:.....            | 6  |
| 1.2.4 La chute de tension :.....                                    | 7  |
| 1.2.5 Pertes actives :.....   | 8  |
| 1.3. La compensation :.....   | 8  |
| 1.3.1 Principe de la compensation shunts:.....                      | 9  |
| 1.3.2 Principe de la compensation séries :.....                     | 10 |
| 1.3.3 Principe de la compensation par déphasage :.....              | 11 |
| 1.4. Moyens de compensation réactive :.....                         | 12 |
| 1.4.1 Compensateurs synchrones :.....                               | 12 |
| 1.4.2 Bancs de condensateurs :.....                                 | 12 |
| 1.4.3 Compensateurs statiques de puissance réactive :.....          | 12 |
| 1.5. Les systèmes de transmission flexibles en courant.....         | 13 |
| 1.5.1 Définition :.....   | 13 |
| 1.5.2 Les différents types des systèmes FACTS :.....                | 14 |
| 1.5.3 Les avantages de la technologie des dispositifs FACTS :.....  | 15 |
| 1.6. Structure des Principaux Dispositifs FACTS:.....               | 15 |
| 1.6.1 dispositifs de compensation dynamique shunts :.....           | 15 |
| 1.6.1.1 Compensateur statique de puissance réactive (SVC):.....     | 16 |
| 1.6.1.1.1 Définition :.....   | 16 |
| 1.6.1.2.1 Principe de fonctionnement :.....                         | 16 |
| 1.6.1.2 Le STATCOM (Static Compensator):.....                       | 18 |
| 1.6.1.2.1 Définition :.....   | 18 |
| 1.6.1.2.2 Principe de fonctionnement:.....                          | 18 |
| 1.6.2 Dispositifs de compensation dynamique série :.....            | 20 |
| 1.6.2.1 La capacité série commande par thyristor (TCSC ) :.....     | 20 |
| 1.6.2.1.1 Définition :.....   | 20 |
| 1.6.2.1.2 Principe de fonctionnement:.....                          | 20 |
| 1.6.2.2 Compensateur statique série synchrone (SSSC) :.....         | 22 |

|   |  |    |
|---|--|----|
| 1.6.2.2.1   | Définition:.....   | 22 |
| 1.6.2.2.2   | Principe de fonctionnement:.....   | 22 |
| 1.6.3   | Dispositifs de compensation dynamique hybrides "serie – parallele.....   | 23 |
| 1.6.3.1   | Compensateur universel UPFC : .....                                      | 23 |
| 1.6.3.1.1   | finition:.....   | 23 |
| 1.6.3.1.2   | Principe de fonctionnement :.....  | 23 |
| 1.7.  | Conclusion .....   | 24 |
| <b>Chapitre 2 Modélisation des dispositifs FACTS</b>                                      |  |    |
| 2.1.  | Introduction.....  | 25 |
| 2.2.  | Problème de l'écoulement de puissance :.....                             | 25 |
| 2.2.1.  | Algorithme de N-R dans un système de dimension n :.....                  | 27 |
| 2.2.2.  | Solution de l'écoulement de puissance par l'algorithme de Newton-Raphson | 28 |
| 2.3.  | Modélisation des éléments du réseau.....                                 | 29 |
| 2.3.1.  | Modèles des générateurs.....   | 29 |
| 2.3.2.  | Modèles de charge.....   | 29 |
| 2.3.3.  | Modèles de l'élément shunt.....  | 30 |
| 2.3.4.  | Modèles de ligne.....  | 30 |
| 2.3.5.  | Modèles de transformateurs.....  | 31 |
| 2.4.  | Modélisation des dispositifs FACTS.....                                  | 32 |
| 2.4.1.  | Injection de puissance aux extrémités de la ligne.....                   | 32 |
| 2.4.2.  | Création d'un nœud fictif.....   | 34 |
| 2.4.3.  | Modification de la matrice d'admittance nodale.....                      | 34 |
| 2.4.4.  | Dispositifs FACTS shunt.....   | 35 |
| 2.4.4.1.  | Modèle du compensateur statique de puissance réactive (SVC).....         | 35 |
| 2.4.4.2.  | SVC placé au milieu d'une ligne.....                                     | 37 |
| 2.4.4.3.  | Modèle du compensateur statique de puissance réactive (STATCOM)          | 37 |
| 2.4.5.  | Dispositifs de compensation série.....                                   | 39 |
| 2.4.5.1.  | Modélisation de TCSC :.....  | 39 |
| 2.4.6.  | Dispositifs de compensation shunt-série :.....                           | 40 |
| 2.4.6.1.  | Modélisation mathématique du compensateur universel 'UPFC' .....         | 40 |
| 2.5.  | Conclusion.....  | 42 |
| <b>Chapitre 3 Les méthodes d'optimisation: méthodes déterministes et méta-heuristique</b> |  |    |
| 3.1.  | Introduction:.....   | 43 |
| 3.2.  | Qu'est-ce qu'un problème d'optimisation.....                             | 43 |
| 3.3.  | Classification des problèmes d'optimisation.....                         | 43 |
| 3.4.  | Concepts de base et terminologie concernant l'optimisation.....          | 44 |
| 3.5.  | Résolution du Problème d'optimisation.....                               | 46 |
| 3.6.  | Méthodes d'optimisation déterministes.....                               | 47 |
| 3.6.1.  | Méthode du gradient :.....   | 47 |
| 3.6.1.1.  | Formulation mathématiques.....   | 48 |
| 3.6.1.2.  | Avantages et inconvénients .....   | 48 |
| 3.6.2.  | Méthode de Newton.....   | 48 |
| 3.6.3.  | Programmation dynamique.....   | 49 |
| 3.6.4.  | Les méthodes de points intérieurs .....                                  | 49 |
| 3.6.5.  | La technique de programmation quadratique .....                          | 49 |
| 3.7.  | Les méta-heuristiques : .....  | 50 |
| 3.7.1.  | Minimum local et global d'une fonction.....                              | 50 |
| 3.7.2.  | Optimisation par algorithmes génétiques.....                             | 52 |
| 3.7.2.1.  | Mécanisme de recherche :.....  | 52 |

|  |    |
|--|----|
| 3.7.2.2. Codage et population initiale.....  | 53 |
| 3.7.2.2.1. Codage binaire .....  | 53 |
| 3.7.2.2.2. Codage réel.....  | 54 |
| 3.7.2.3. Les opérateurs utilisés par les AG:.....  | 54 |
| 3.7.2.3.1. la sélection:.....  | 54 |
| 3.7.2.3.2. Le croisement:.....   | 55 |
| 3.7.2.3.3. L'opérateur de mutation : .....   | 55 |
| 3.7.3. Optimisation par Essaim de particules.....  | 56 |
| 3.7.3.1. Principe de fonctionnement .....  | 57 |
| 3.7.4. Optimisation par colonies de fourmis.....   | 59 |
| 3.7.4.1. Analogie biologique.....  | 60 |
| 3.7.4.2. Formulation mathématique.....   | 61 |
| 3.8. Adaptation des méthodes méta-heuristiques pour la résolution d'ORPF (optimisation de l'écoulement de puissance réactive)..... | 62 |
| 3.9. Formulation Mathématiques : .....   | 63 |
| 3.9.1 Première fonction objectif (Pertes Actives de Transmission <i>DP</i> ) : .....   | 63 |
| 3.9.2 Deuxième fonction objectif (Déviation de Tension <i>DV</i> ) : .....   | 63 |
| 3.9.3 Troisième fonction objectif (indice de stabilité de Tension <i>L_index</i> ) : .....   | 63 |
| 3.9.3.1 Formulation de l'index de stabilité de tension ( <i>L_INDEX</i> ) .....  | 64 |
| 3.9.4 Formulation du problème Multi Objectifs .....  | 65 |
| 3.9.5 Les Contraintes : .....  | 65 |
| 3.9.5.1 Contraintes d'égalités : .....   | 66 |
| 3.9.5.2 Contraintes d'inégalités : .....   | 66 |
| 3.10. Algorithme génétique.....  | 67 |
| 3.11. Algorithme d'essaim de particules.....   | 68 |
| 3.11.1. Algorithme de PSO avec coefficient d'inertie (PSO-CI).....   | 68 |
| 3.11.2. Algorithme de PSO avec le facteur de constriction k (PSO-CF).....  | 69 |
| 3.11.3. Algorithme de PSO avec Coefficients d'Accélération variable (PSO-TVAC)..   | 69 |
| 3.12. L'algorithme de colonies de fourmis (ACO).....   | 70 |
| 3.12.1. Les paramètres optimaux des algorithmes de colonies de fourmis.....  | 70 |
| 3.12.2. Organigramme de la technique ACO appliquée à l'OPF.....  | 71 |
| 3.13. Conclusion.....  | 72 |
| <b>Chapitre 4 : Tests et Application</b>   |    |
| 4.1 Introduction:.....   | 73 |
| 4.2 Test d'application 1: Minimisation des Pertes Actives par AG et PSO.....   | 74 |
| 4.2.1 Fonction objectif.....   | 74 |
| 4.2.2 Les Contraintes .....  | 74 |
| 4.2.3 Réseaux test.....  | 74 |
| 4.2.4 Paramètres de simulation.....  | 74 |
| 4.2.5 Résultats de simulations.....  | 75 |
| 4.2.6 Interprétation des résultats : réseau test IEEE 14-Bus.....  | 75 |
| 4.2.7 Interprétation des résultats réseau test IEEE 30-Bus.....  | 75 |
| 4.2.8 Test de la variation de charge: IEEE 30-Bus.....   | 76 |
| 4.2.9 Conclusion.....  | 77 |
| 4.3 Test d'application 2: Optimisation de la Puissance Réactive par utilisation du STATCOM.....                                    | 78 |
| 4.3.1 Le choix de la Position Optimale d'installation du STATCOM.....  | 78 |
| 4.3.2 La fonction objectif .....   | 78 |
| 4.3.3 Les Contraintes .....  | 78 |

|           |   |     |
|-----------|---|-----|
| 4.3.4     | Réseaux test .....  | 79  |
| 4.3.5     | Optimisation de la Puissance Réactive par un Contrôle Flexible du STATCOM en utilisant les Algorithmes Génétiques.....  | 79  |
| 4.3.5.1   | Interprétation des résultats :.....   | 79  |
| 4.3.5.2   | Optimisation mono –objectif : .....   | 80  |
| 4.3.5.3   | Optimisation multi –objectifs : .....   | 81  |
| 4.3.6     | Etude Multi Objectifs de l’Optimisation de la puissance réactive Basée sur l’intégration de STATCOM par utilisation de trois variantes de l’algorithme PSO..... | 82  |
| 4.3.6.1.  | La Stratégies du test.....  | 82  |
| 4.3.6.2.  | Cas 1 : fonction mono-objectif : minimisation de DP sans Contrôleur STATCOM.....  | 82  |
| 4.3.6.3.  | Cas 2 : Fonction mono-objectif : minimisation de DP et DV .considérant le STATCOM.....  | 84  |
| 4.3.6.4.  | Cas 3 : Optimisation multi Objectifs : Minimisation de DP et VT avec l’incorporation du STATCOM.....  | 86  |
| 4.3.7     | Conclusion.....   | 86  |
| 4.4       | Test d’application 3 : Optimisation de la Puissance Réactive par utilisation du TCSC.....   | 87  |
| 4.4.1     | Application sur le réseau test de IEEE 30-JB.....   | 87  |
| 4.4.1.1   | Le choix de la Position optimale d’installation du TCSC.....  | 87  |
| 4.4.1.2   | Cas 1: fonction mono objectif: minimisation <i>DP</i> avec et sans TCSC.....  | 88  |
| 4.4.1.3   | Cas 2: Fonction mono-objectif : minimisation de DV avec et sans TCSC....  | 89  |
| 4.4.1.4   | Case3: optimisation Multi Objectifs: minimisation de DP et VD avec le .TCSC   | 90  |
| 4.4.2     | Application sur réseau test IEEE 57JB.....  | 91  |
| 4.4.2.1   | Les Fonctions Objectifs modifiées.....  | 91  |
| 4.4.2.1.1 | les pertes actives .....  | 91  |
| 4.4.2.1.2 | la Déviation de tension.....  | 92  |
| 4.4.2.2   | Les différents cas de test .....  | 92  |
| 4.4.2.3   | Comparaison entre PSO-TVAC et PSO-FC .....  | 93  |
| 4.4.2.4   | Minimisation de la Déviation de Tension avec et sans TCSC. ....   | 95  |
| 4.4.3     | Conclusion.....   | 95  |
| 4.5       | Test d’application 4 : problème de stabilité de tension .....   | 96  |
| 4.6       | Test d’application 5 : application de l’algorithme de colonie de fourmis .....  | 99  |
| 4.1       | Conclusion.....   | 100 |
|           | Conclusion Générale.....  | 101 |
|           | Bibliographie.....  | 103 |
|           | Annexe.....   | 108 |

# LISTE DES FIGURES

## CHAPITER 1

|  |    |
|--|----|
| <b>Figure. 1.1</b> Association en parallèle d'éléments Résistif, Inductif et Capacitif.....  | 4  |
| <b>Figure. 1.2</b> Puissances instantanées consommées par une résistance, une inductance et un condensateur associés en parallèle..... | 4  |
| <b>Figure. 1.3</b> Modélisation simplifiée du transport d'énergie dans une ligne électrique.....                                       | 6  |
| <b>Figure. 1.4</b> Diagramme traduisant l'échange d'énergie et montrant l'intérêt de la compensation.....                              | 9  |
| <b>Figure. 1.5</b> Principe de compensation shunts.....  | 9  |
| <b>Figure. 1.6</b> Diagramme vectoriel de compensation shunt.....  | 9  |
| <b>Figure. 1.7</b> Courbe de puissance avec et sans compensation shunt en fonction de l'angle de transmission.....                     | 9  |
| <b>Figure. 1.8</b> Principe de compensation série.....   | 10 |
| <b>Figure. 1.9</b> Diagramme vectoriel de compensation série.....  | 10 |
| <b>Figure. 1.10</b> Courbe de puissance avec et sans.....  | 10 |
| <b>Figure. 1.11</b> Principe de compensation par déphasage.....  | 11 |
| <b>Figure. 1.12</b> Compensation par déphasage pour $\alpha = \pi/6$ .....   | 11 |
| <b>Figure. 1.13</b> Schéma de principe d'un FACTS.....   | 13 |
| <b>Figure. 1.14</b> Classification des dispositifs de compensation FACTS.....  | 14 |
| <b>Figure. 1.15</b> Modèle mathématique de SVC .....   | 16 |
| <b>Figure. 1.16</b> Fonctionnement du compensateur statique.....   | 17 |
| <b>Figure. 1.17</b> Schéma de base du STATCOM.....   | 18 |
| <b>Figure. 1.18</b> Présentation d'un compensateur STATCOM.....  | 19 |
| <b>Figure. 1.19</b> Diagramme vectoriel de STATCOM.....  | 19 |
| <b>Figure. 1.20</b> Caractéristique statique du STATCOM.....   | 19 |
| <b>Figure. 1.21</b> Insertion d'un TCSC sur une ligne .....  | 21 |
| <b>Figure. 1.22</b> Impédance du TCSC en fonction de l'angle d'amorçage des thyristors.....  | 21 |
| <b>Figure. 1.23</b> Schéma de base du SSSC.....  | 22 |
| <b>Figure. 1.24</b> Statique du SSSC.....  | 22 |
| <b>Figure. 1.25</b> Schéma simplifié d'un UPFC connecté au réseau électrique.....  | 23 |

## CHAPITER 2

|  |    |
|--|----|
| <b>Figure. 2.1</b> Modèles des générateurs: a) symbole, b) modèle PV classique.....  | 29 |
| <b>Figure. 2.2</b> Modèle des charges. ....  | 30 |
| <b>Figure. 2.3</b> Modèles des éléments shunt: a) symbole, b) élément inductif, c) élément capacitif.....                    | 30 |
| <b>Figure. 2.4</b> Modèles en TT des lignes de transport.....  | 31 |
| <b>Figure. 2.5</b> Modèle des transformateurs.....   | 32 |
| <b>Figure. 2.6</b> Modélisation par injection de puissances: a) ligne avec FACTS, b) ligne avec injections équivalentes..... | 33 |
| <b>Figure. 2.7</b> Modélisation avec nœud fictif : a) ligne avec FACTS, b) représentation équivalente.....                   | 34 |
| <b>Figure. 2.8</b> Intégration du dispositif FACTS dans une ligne.....   | 34 |
| <b>Figure. 2.9</b> Modélisation d'un SVC :a) SVC placé en un nœud; b) symbole, c) modèle.....                                | 36 |
| <b>Figure. 2.10</b> Variation de la puissance réactive absorbée par un SVC en fonction de la tension nodale.....             | 36 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figure. 2.11</b> SVC placé en milieu de ligne.....                                | 37 |
| <b>Figure. 2.12</b> Représentation schématique de STATCOM.....                       | 38 |
| <b>Figure. 2.13</b> Modèle mathématique e de TCSC.....                               | 39 |
| <b>Figure. 2.14</b> Modèle mathématique de l'UPFC et le système de transmission..... | 41 |

### CHAPITER3

|   |    |
|---|----|
| <b>Figure. 3.1</b> Différents critères du problème d'optimisation.....                              | 44 |
| <b>Figure. 3.2</b> Principe de base d'une méthodologie d'optimisation.....                          | 45 |
| <b>Figure. 3.3</b> Une classification possible des différents types de méthodes d'optimisation..... | 46 |
| <b>Figure. 3.4</b> Minimum local et global d'une fonction.....                                      | 51 |
| <b>Figure. 3.5</b> Organigramme de l'algorithme génétique .....                                     | 52 |
| <b>Figure. 3.6</b> Les quatre niveaux d'organisation des AG.....                                    | 53 |
| <b>Figure. 3.7</b> Illustration du codage des variables d'optimisation.....                         | 53 |
| <b>Figure. 3.8</b> Le codage réel et le codage binaire.....   | 54 |
| <b>Figure. 3.9</b> Représentation l'opération de croisement.....                                    | 55 |
| <b>Figure. 3.10</b> Représentation l'opération de mutation.....                                     | 56 |
| <b>Figure. 3.11</b> Représentation schématique du déplacement d'une particule.....                  | 58 |
| <b>Figure. 3.12</b> Une colonie de fourmis qui ramène de la nourriture vers le nie.....             | 60 |
| <b>Figure. 3.13</b> Le problème de l'optimisation dans les réseaux électriques.....                 | 62 |
| <b>Figure. 3.14</b> L'organigramme de l'algorithme génétique .....                                  | 67 |
| <b>Figure. 3.15</b> L'organigramme de l'algorithme PSO .....  | 68 |
| <b>Figure. 3.16</b> L'organigramme de l'algorithme ACO.....   | 72 |

### CHAPITER4

|  |    |
|--|----|
| <b>Figure. 4.1</b> Caractéristiques de convergence de l'AG et de PSO appliquées au réseau test type IEEE 14-bus.....                                     | 75 |
| <b>Figure. 4.2</b> Niveaux de tensions des jeux de barres calculés par les deux méthodes d'optimisation testées sur le Réseau test type IEEE-14 bus..... | 75 |
| <b>Figure. 4.3</b> Caractéristiques de convergence de l'AG et de PSO appliquées au réseau test type IEEE 30-bus.....                                     | 76 |
| <b>Figure. 4.4</b> Niveaux de tensions des jeux de barres calculés par les deux méthodes d'optimisation testées sur le Réseau test type IEEE-30 bus..... | 76 |
| <b>Figure. 4.5</b> Caractéristiques de convergence de DP pour le troisième cas .....   | 77 |
| <b>Figure. 4.6-</b> Variation du niveau de tension de jeux de barres en fonction de la variation de la charge.....                                       | 80 |
| <b>Figure. 4.7-</b> Niveaux de tensions de jeux de barres.....   | 80 |
| <b>Figure. 4.8</b> Evaluations des pertes actives totale .....   | 80 |
| <b>Figure. 4.9</b> Evaluations de la déviation de tension.....   | 80 |
| <b>Figure. 4.10</b> solutions optimales de Pareto DP-DV.....   | 81 |
| <b>Figure. 4.11</b> Représentation des deux fonctions objectifs (DP-DV).....   | 81 |
| <b>Figure. 4.12</b> Caractéristique de Convergence des pertes actives avec PSO-standard.....   | 83 |
| <b>Figure. 4.13</b> Caractéristique de Convergence des pertes actives avec PSO-CI.....   | 83 |
| <b>Figure. 4.14</b> Caractéristique de Convergence des pertes actives avec PSO-FC.....   | 83 |
| <b>Figure. 4.15</b> Caractéristique de convergence de la DV avec Multi STATCOM.....  | 85 |
| <b>Figure. 4.16</b> Caractéristique de convergence des DP avec Multi STATCOM.....  | 85 |
| <b>Figure. 4.17</b> Profil de tension dans tous les jeux de barres avec Multi STATCOM.....   | 85 |
| <b>Figure. 4.18</b> Caractéristique d'évolution de variable De control avec PSO-FC.....  | 85 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Figure. 4.19</b> Solution de Pareto basée sur PSO-FC.....  | 86  |
| <b>Figure. 4.20</b> Caractéristique de convergence de DP Avec PSO.....  | 88  |
| <b>Figure. 4.21</b> Caractéristique de convergence de DP Avec AG.....   | 88  |
| <b>Figure. 4.22</b> Caractéristique de convergence de DP Avec PSO-TVAC.....   | 88  |
| <b>Figure. 4.23</b> Caractéristique de convergence de DV Avec GA, PSO, PSO-TVAC.....                                  | 88  |
| <b>Figure. 4.24</b> Solutions optimales de Pareto de la minimisation de DP et DV.....                                 | 92  |
| <b>Figure. 4.25</b> Caractéristique de Convergence de DP pour le cas N°1. ....  | 94  |
| <b>Figure. 4.26</b> Caractéristique de Convergence de DP pour le cas N°2. ....  | 94  |
| <b>Figure. 4.27</b> Caractéristique de Convergence de DP pour le cas N°3. ....  | 94  |
| <b>Figure. 4.28</b> Caractéristique de Convergence de DP pour le cas N°4. ....  | 94  |
| <b>Figure. 4.29</b> Etude comparative: des caractéristiques de Convergence de DP<br>correspondent les quatre cas..... | 95  |
| <b>Figure. 4.30</b> Caractéristique de convergence de DV trouvée par le cas4.....                                     | 95  |
| <b>Figure. 4.31</b> Représentation Les variable de contrôle $V_i$ , $T_i$ et<br>$V_{sh}$ .....                        | 96  |
| <b>Figure. 4.32</b> Profils de tension dans tous les jeux de barres avec et sans STATCOM.....                         | 98  |
| <b>Figure. 4.33</b> Caractéristique de Convergence de L_index par PSO-TVAC.....                                       | 98  |
| <b>Figure. 4.34</b> Caractéristique de Convergence de DP par PSO-TVAC et ACO pour cas de<br>charge normal.....        | 101 |
| <b>Figure. 4.35</b> Caractéristique de Convergence de DP par PSO-TVAC et ACO pour le cas<br>d'un surcharge .....      | 101 |

# LISTE DES TABLEAUX

|   |    |
|---|----|
| <b>Tableaux. 1.1</b> La puissance active et réactive absorbées par la résistance, inductance et capacité.....   | 5  |
| <b>Tableau. 3.1</b> Les variables de décision du problème.....  | 67 |
| <b>Tableau. 3.2</b> Les paramètre de l'algorithme ACO standard.....   | 70 |
| <b>Tableau. 4.1</b> Paramètres de simulation adoptés pour les deux méthodes.....  | 74 |
| <b>Tableau. 4.2</b> Résultats obtenus par application des deux approches PSO et GA.....   | 75 |
| <b>Tableau. 4.3</b> Comparaison des pertes évaluées par la PSO et l'AG dans le cas d'une augmentation de la charge nominale de 20% de sa valeur nominale au réseau test type IEEE-30-bus..... | 77 |
| <b>Tableau. 4.4</b> résultats d simulations.....  | 79 |
| <b>Tableau. 4.5</b> paramètres des l'algorithme PSO .....   | 82 |
| <b>Tableau. 4.6</b> Résultats de Simulation pour les trois variantes PSO.....   | 84 |
| <b>Tableau. 4.7</b> Résultats de nombre de générations et le temps d'exécution concernant les trois variantes de PSO. ....  | 84 |
| <b>Tableau. 4.8</b> Résultats de simulation pour minimiser les pertes de puissances actives et la déviation de tension avec multi STATCOM.....  | 85 |
| <b>Tableau. 4.9</b> Les paramètres des variables de contrôles.....  | 86 |
| <b>Tableau. 4.10</b> Paramètres des trois algorithmes utilisés.....   | 87 |
| <b>Tableau 4.11</b> Résultats de DP calculées par PSO-TVAC, GA, PSO, avec et sans TCSC.   | 89 |
| <b>Tableau 4.12</b> Les meilleurs résultats de DV par PSO-TVAC , GA, PSO avec et sans TCSC  | 89 |
| <b>Tableau 4.13</b> Résultats de l'optimisation multi objectif trouvés par GA, PSO, PSO_TVAC avec considération de TCSC.  | 90 |
| <b>Tableau. 4.14</b> Résultats des pertes actives par PSO-TVAC .....  | 91 |
| <b>Tableau 4.15</b> paramètres de l'algorithme proposé .....  | 93 |
| <b>Tableau. 4.16</b> Résultats de simulations de DP et DV correspondant au cas 4 avec et sans utilisation de TCSC.....  | 94 |
| <b>Tableau.4. 17</b> Résultats de l'écoulement de puissance basé sur l'optimisation de L_index par PSO-TVAC.....  | 97 |
| <b>Tableau.4.18</b> Puissances réactives produites par STATCOM et les centrales électriques   | 98 |
| <b>Tableau. 4.19</b> résultats des pertes actives par PSO-TVAC, ACO.....  | 99 |

## Liste des Symboles et abréviations

|                                 |  |
|---------------------------------|--|
| <b><i>FACTS</i></b>             | Flexible alternatif curant transmission systèmes.          |
| <b><i>TSR</i></b>               | Thyristor Switched Reactor.                                |
| <b><i>TSC</i></b>               | Thyristor Switched Capacitor.                              |
| <b><i>SVC</i></b>               | Static Var Compensator.                                    |
| <b><i>STATCOM</i></b>           | Static Synchronous Compensator.                            |
| <b><i>TCSC</i></b>              | Thyristor Controlled Series Capacitor.                     |
| <b><i>SSSC</i></b>              | Static Synchronous Series Compensator.                     |
| <b><i>UPFC</i></b>              | Unified Power Flow Controller.                             |
| <b><i>VSC</i></b>               | Voltage Source Converter.                                  |
| <b><math>V_G</math></b>         | Tension du jeu de barre de génération (sending voltage).   |
| <b><math>V_L</math></b>         | Tension du jeu de barre de charge (receiving voltage).     |
| <b><math>P_g</math></b>         | Puissance active fournie par la source.                    |
| <b><math>Q_g</math></b>         | Puissance réactive fournie par la source.                  |
| <b><math>P_l</math></b>         | Puissance active demandée par la charge.                   |
| <b><math>Q_l</math></b>         | Puissance réactive demandée par la charge.                 |
| <b><math>P_{ij}</math></b>      | Puissance active transportée par la ligne.                 |
| <b><math>Q_{ij}</math></b>      | Puissance réactive transportée par la ligne.               |
| <b><math>\delta_{ij}</math></b> | Angle de charge entre $V_G$ et $V_L$ .                     |
| <b><math>R_l</math></b>         | Résistance de la ligne de transport.                       |
| <b><math>X_l</math></b>         | réactance de la ligne de transport.                        |
| <b><math>\theta_{ij}</math></b> | Déphasage du courant de al ligne.                          |
| <b><math>V_{sh}</math></b>      | Tension (shunt) injectée par le STATCOM.                   |
| <b><math>I_{sh}</math></b>      | Courant (shunt) injecté par le STATCOM.                    |
| <b><math>R_{sh}</math></b>      | Résistance du transformateur de couplage shunt du STATCOM. |
| <b><math>X_{sh}</math></b>      | Réactance du transformateur de couplage shunt du STATCOM.  |
| <b><math>P_{sh}</math></b>      | Puissance active délivrée par le STATCOM.                  |
| <b><math>Q_{sh}</math></b>      | Puissance réactive délivrée par le STATCOM.                |
| <b><i>AG</i></b>                | Algorithme Génétique .                                     |

|                        |  |
|------------------------|--|
| <b><i>PSO</i></b>      | Essaims de particules (particle swarm optimization).                         |
| <b><i>PSO-IC</i></b>   | Essaims de particules avec le coefficient d'inertie.                         |
| <b><i>PSO-FC</i></b>   | Essaims de particules avec le facteur de constriction.                       |
| <b><i>PSO-TVAC</i></b> | Essaims de particules avec Coefficients d'Accélération variable.             |
| <b><i>ACO</i></b>      | Algorithmes de colonies de fourmis.  |
| <b><i>ORPF</i></b>     | Répartition optimale de la puissance réactive (Optimal Reactive Power Flow). |
| <b><i>DP</i></b>       | Les pertes actives de transmissions.   |
| <b><i>DV</i></b>       | La déviation de tension.   |
| <b><i>L_index</i></b>  | Indice de stabilité de tension.  |

---

*Introduction  
Générale*

---

# 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 Contribution à 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 génétiques (AG), algorithmes d'essaims de particules (PSO) , et les colonies de Fourmies (CAO) 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 deux dispositifs FACTS, série (TCSC) et shunt (STATCOM) tout en améliorant le comportement du réseau électrique en minimisant plusieurs objectifs à savoir :

- Minimisation des pertes totales de transmission.
- Minimisation de la déviation de tension.
- Amélioration de la stabilité de tension.

Le premier chapitre intitulé ‘Généralité sur les systèmes de compensation dynamique’, représente une introduction générale au problème de compensation, 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.

Dans le deuxième chapitre nommé modélisation des systèmes FACTS expose d’une manière détaillée le problème de l’écoulement de puissance, la méthode de Newton-Raphson avec son algorithme sont bien discutés par la suite, 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.

Le troisième chapitre intitulé ‘les méthodes d’optimisation: méthodes déterministes et 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, la programmation dynamique ...etc.

La deuxième partie traite brièvement les méthodes globales telles que les algorithmes génétiques AG, optimisation par essais de particules PSO, l’algorithme d’optimisation par colonies de Fourmies ainsi que les différentes variantes basé sur PSO.

Le quatrième chapitre est la partie pratique de ce travail il aborde clairement l’application des algorithmes d’optimisation proposés :GA, PSO, ACO et les variantes de PSO pour résoudre le problème multi 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, IEEE 57-Bus).

---

***Chapitre 1 :***

**Introduction et généralités  
sur les systèmes FACTS**

---

# Chapitre 1

## Introduction et généralités sur les systèmes FACTS

### 1.1. Introduction

Les moyens classiques de contrôle ou l'amélioration du comportement d'un réseaux électrique (transformateur à prises réglables en charge, transformateurs déphaseurs, compensateurs série ou parallèle commutés par disjoncteurs, modification des consignes de production, changement de topologie du réseau et action sur l'excitation des générateurs) pourraient dans l'avenir s'avérer trop lents et insuffisants pour répondre efficacement aux perturbations du réseau, compte tenu notamment des nouvelles contraintes.

Il faudra vraisemblablement, dans l'avenir, compléter leur action en mettant en œuvre des dispositifs électroniques de puissance à grande vitesse de réponse, récemment développés et connus sous l'appellation FACTS (Flexible Alternative Current Transmission System) pour le contrôle des réseaux . Le développement récent des dispositifs FACTS ouvre de nouvelles perspectives pour une exploitation plus efficace des réseaux par action continue et rapide sur les différents paramètres du réseau (déphasage, tension, impédance). Ainsi, les transits de puissance seront mieux contrôlés et les tensions mieux tenues, ce qui permettra d'augmenter les marges de stabilité ou de tendre vers les limites thermiques des lignes.

### 1.2. La puissance réactive dans les circuits électriques

Le transport de la puissance réactive à longue distance présente une série d'inconvénients tels-que les chutes de tension considérables, les pertes de ligne par effet joule et moins de capacité pour transporter la puissance active. A l'exception de ces aspects purement statiques, la puissance réactive peut jouer un grand rôle dans d'autres aspects dynamiques, tels-que les fluctuations de tension produites par les variations soudaines des charges, et pour l'amélioration de la marge de stabilité.

Actuellement, avec la complexité des réseaux électriques, la participation des générateurs dans la production de l'énergie réactive est devenue insuffisante. Elle est générée en grande partie par les moyens de compensation existant dans les lignes de transport. Afin de garantir une bonne qualité d'énergie il est nécessaire de satisfaire l'équilibre offre demande de l'énergie réactive, de fournir une tension aussi régulière que possible et de respecter un certain nombre de contraintes techniques.

### 1.2.1 Sens physique de la « puissance imaginaire »

La nature de la puissance réactive doit être prise en compte pour sa valorisation. Pour cela il est nécessaire de revenir sur sa définition et son interprétation physique. La puissance instantanée d'un système électrique monophasé est définie par :

$$P(t) = v(t)i(t) \quad (1.1)$$

$$v(t) = V_{eff} \sqrt{2} \sin(\omega t) \quad (1.2)$$

$$i(t) = I_{eff} \sqrt{2} \sin(\omega t - \varphi) \quad (1.3)$$

où  $V_{eff}$  et  $I_{eff}$  sont les valeurs efficaces de la tension et du courant,  $\omega$  la pulsation, et  $\varphi$  le déphasage du courant par rapport à la tension prise comme référence de phase.

Si l'on considère une charge R L C connectée en parallèle et alimentée par une source de tension sinusoïdale de fréquence 50 Hz (Figure. 1.1), les différents éléments vont absorber des courants dépendant de leurs impédances.

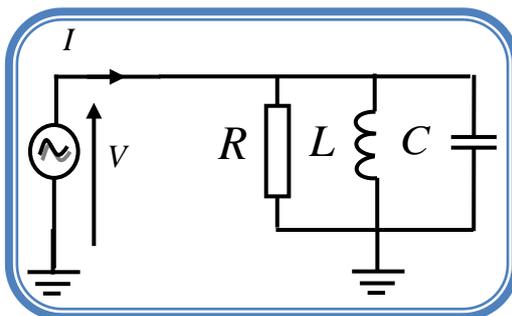


Figure. 1.1: Association en parallèle d'éléments Résistif, inductif et capacitif

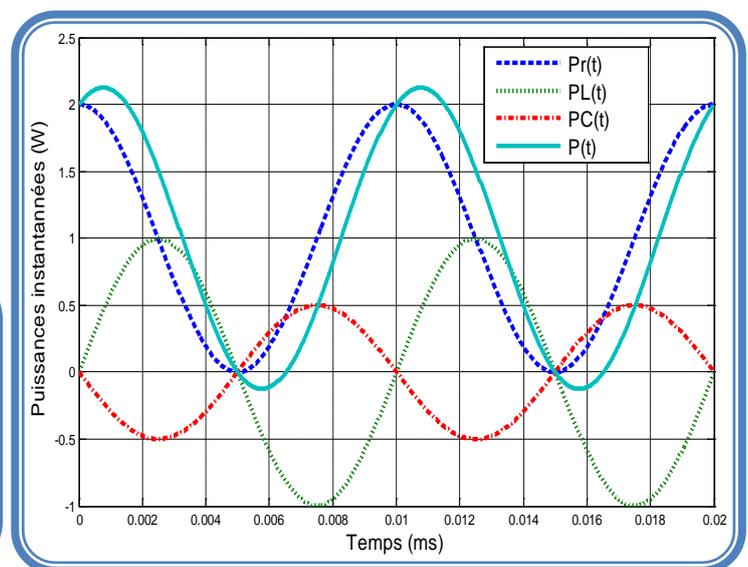


Figure. 1.2 : Puissances instantanées consommées par une résistance, une inductance et un condensateur associés en parallèle

Chaque élément va absorber la puissance active et réactive suivantes :

**Tableaux 1.1.** La puissance active et réactive absorbées par la résistance, inductance et capacité

| Charge     | Impédance | Courant | Déphasage I/V | P                 | Q                  |
|------------|-----------|---------|---------------|-------------------|--------------------|
| Résistance | R         | V/R     | 0             | V <sup>2</sup> /R | 0                  |
| Inductance | jLw       | V/Lw    | +90°          | 0                 | V <sup>2</sup> /Lw |
| Capacité   | 1/jCw     | CwV     | -90°          | 0                 | -CwV <sup>2</sup>  |

La puissance instantanée consommée par chacun de ces éléments est sinusoïdale et d'une fréquence double de celle de la source d'alimentation. La puissance instantanée de chaque élément peut être résumée par les expressions suivantes :

$$P_R(t) = v_R(t) \cdot i_R(t) = \frac{V^2}{R} \cos^2(\omega t) = \frac{V^2}{2R} (1 + \cos(2\omega t)) \quad (1.4)$$

$$P_L(t) = v_L(t) \cdot i_L(t) = V \cos(\omega t) \frac{V}{L\omega} \cos(\omega t - \frac{\pi}{2}) = \frac{V^2}{2L\omega} \sin(2\omega t) \quad (1.5)$$

$$P_C(t) = v_C(t) \cdot i_C(t) = V \cos(\omega t) \cdot C\omega V \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}) = \frac{C\omega V^2}{2} \sin(2\omega t) \quad (1.6)$$

Nous pouvons ensuite représenter les puissances instantanées absorbées par chacun de ces éléments (Figure. 1.2). La puissance active P est par définition la moyenne de la puissance instantanée. La puissance instantanée absorbée par un élément résistif  $P_{R(t)}$  oscille ainsi à une fréquence égale à 100 Hz. Avec une valeur moyenne non nulle. :

$$\langle P_R(t) \rangle = \frac{V^2}{2R} = \frac{V_{eff}^2}{2R} = P \quad (1.7)$$

La puissance instantanée appelée par une inductance ou un condensateur a des propriétés différentes. Cette puissance instantanée est encore sinusoïdale de fréquence 100 Hz. De plus elle est en opposition de phase avec celle absorbée par l'inductance. La quadrature de phase entre la tension et le courant dans les dipôles inductifs ou capacitifs se traduit par une puissance instantanée de moyenne nulle. La puissance réactive Q désigne alors l'amplitude de cette puissance instantanée pour l'inductance.

$$Q = \frac{V^2}{2L\omega} = \frac{V_{eff}^2}{L\omega} \quad (1.8)$$

pour le condensateur. :

$$Q = \frac{C\omega V^2}{2} = -C\omega V_{eff}^2 \quad (1.9)$$

Lorsque les dipôles sont en convention récepteur, la puissance réactive absorbée par l'inductance est positive, et on considère que l'inductance consomme de la puissance réactive. Quant au condensateur, la puissance réactive est négative et on considère qu'elle est fournie par le dipôle.

### 1.2.2 Le théorème de Boucherot

Le théorème de Boucherot permet de faire le bilan des puissances entre les différents éléments d'un circuit:

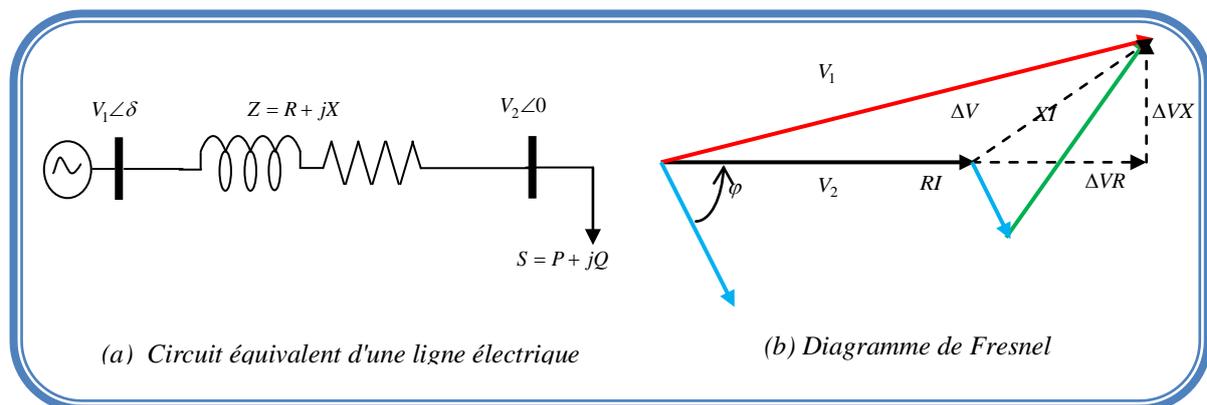
« La puissance active consommée dans un dipôle linéaire est la somme des puissances actives consommées par chacun des éléments composant ce dipôle. »

« La puissance réactive d'un dipôle linéaire est la somme algébrique des puissances réactives consommées par chacun des éléments de ce dipôle. »

Ce théorème met en évidence le découplage entre les éléments consommant la puissance active, qui peut être transformée en puissance utilisable (thermique, mécanique, chimique...) et ceux consommant ou produisant de la puissance réactive, qui n'est qu'échange entre ces éléments [1].

### 1.2.3 Puissance transmise par une ligne électrique

La sûreté du système, le bon fonctionnement des installations raccordées et la réduction des pertes en lignes rendent nécessaire de garder la tension à chaque nœud du réseau dans une plage contractuelle de tension.



**Figure. 1.3 :** Modélisation simplifiée du transport d'énergie dans une ligne

Pour simplifier, considérons le schéma de la figure 1.3, qui représente une ligne électrique  $Z=R+jX$  alimentant une charge  $(P + jQ)$ . Ce modèle est simple, mais il permet d'expliquer qualitativement le lien entre les modules et phases des tensions à chaque extrémité de la ligne d'une part, et les transits de puissance active et de puissance réactive d'autre part  $S=P+jQ$ .

### 1.2.4 La chute de tension

la circulation du courant dans la ligne provoque une chute de tension. La tension est alors plus basse au bout de ligne que son origine, et plus la ligne est chargée en transit de puissance, plus la chute de tension sera importante. La chute de tension  $\Delta V$ , à partir du schéma équivalent et du diagramme des tensions de la figure. 1.3 (b) est donnée par la formulation suivante:

$$\Delta V = V_1 - V_2 = Z * I \quad (1.10)$$

La relation vectorielle s'écrit alors :

$$\bar{V}_1 = \bar{V}_2 + R\bar{I} + jL\omega\bar{I} = \bar{V}_2 + R\bar{I} + jX\bar{I} \quad (1.11)$$

Par projection selon les axes horizontal et vertical, nous obtenons deux équations réelles :

$$V_1 \cos \delta = V_2 + RI \cos \varphi + XI \sin \varphi \quad (1.12)$$

$$V_1 \sin \delta = -RI \sin \varphi + XI \cos \varphi \quad (1.13)$$

En élevant au carré puis en sommant ces deux expressions, nous obtenons :

$$V_1^2 = V_2^2 + R^2 I^2 + X^2 I^2 + 2(RV_2 I \cos \varphi + XV_2 I \sin \varphi) \quad (1.14)$$

Il est possible alors de remplacer les différents termes de cette expression en faisant intervenir les puissances :

Avec  $P = V_2 I \cos \varphi$  la puissance active monophasée consommée par la charge,  $Q = V_2 I \sin \varphi$  la puissance réactive monophasée appelée par la charge,  $P_J = RI^2$  les pertes par effet Joule dans la ligne et  $Q_L = XI^2$  la puissance réactive consommée par la réactance de ligne, il vient

$$V_1^2 - V_2^2 = RP_J + XQ_L + 2(RP + XQ) \quad (1.15)$$

$$(V_1 - V_2)(V_1 + V_2) = RP_J + XQ_L + 2(RP + XQ) \quad (1.16)$$

En notant :  $V = (V_1 + V_2)/2$  et  $\Delta V = V_1 - V_2$  la chute de tension, nous obtenons :

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\frac{1}{2}RP_J + \frac{1}{2}XQ_L + RP + XQ}{V^2} \quad (1.17)$$

Dans un réseau de transport d'énergie bien dimensionné, les pertes par effet Joule dans les lignes représentent habituellement quelques pour-cent de la puissance totale transitée. Si l'on considère un cas où la consommation de puissance réactive de la ligne par rapport à la puissance transitée est faible, nous obtenons la relation simplifiée suivante [2]:

$$\frac{\Delta V}{V} \cong \frac{RP + XQ}{V^2} \quad (1.18)$$

### 1.2.5 Pertes actives

Les pertes de puissance active sont calculées d'après la formule :

$$\Delta P = 3RI^2 \quad (1.19)$$

Le courant qui circule dans cet élément est :

$$I = S / \sqrt{3}U \quad (1.20)$$

$$\Delta U = \frac{R \cdot (P^2 + Q^2)}{(U^e)^2} = \frac{R \cdot P^2 \left(1 + \left(\frac{Q}{P}\right)^2\right)}{(U^e)^2} \Rightarrow \Delta P = \frac{R \cdot P^2 (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi)}{(U^e)^2} \quad (1.21)$$

$\varphi$ : Angle de déphase entre la puissance active et la puissance apparente, alors  $\operatorname{tg} \varphi = Q/P$

**Remarque** : le transit de puissance réactive entraîne une augmentation des pertes actives.

### 1.3. La compensation

Les réseaux électriques à pour but de véhiculer de la puissance depuis la source jusqu'aux centres de consommation dans un réseau à courant alternatif. La puissance apparente  $S$  à deux composantes :

la puissance  $P$  et la puissance  $Q$  liées par le déphasage.

$$S = P + jQ = UI [\cos \varphi + j \sin \varphi] \quad (1.22)$$

En général, l'écart de tension entre deux extrémités d'une ligne est lié au transit de la puissance réactive consommée par la charge. Pour obtenir une tension identique (ou proche) aux deux bouts de la ligne, il faut donc pouvoir produire localement de la puissance réactive.

$$\frac{\Delta V}{V} \cong \frac{RP + XQ}{V^2} \quad (1.23)$$

La répartition des moyens de production d'énergie réactive (alternateurs, bancs de condensateurs ou compensateurs statiques) à proximité des zones de consommation contribue donc à maintenir la tension constante sur le réseau. Il est à noter que les solutions peuvent reposer sur des moyens de compensation de puissance réactive statiques (bancs de condensateurs, bancs de bobines) ou dynamiques (alternateurs, FACTS) [1].

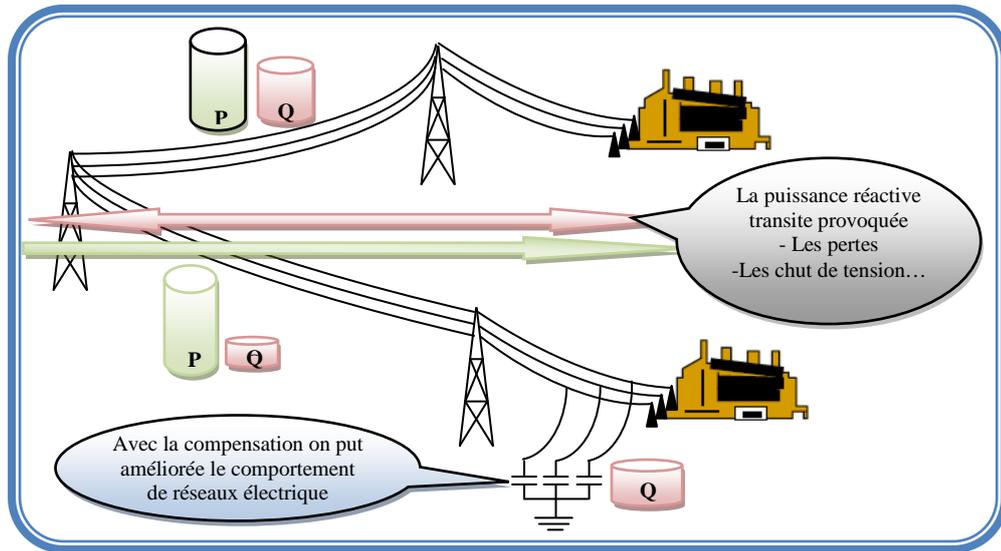


Figure. 1.4 : Diagramme traduisant l'échange d'énergie et montrant l'intérêt de la compensation.

### 1.3.1 Principe de la compensation shunts

On insère maintenant au milieu de la ligne un compensateur d'énergie réactive idéal. Ce dispositif permet de maintenir la tension  $V_M$  à la tension  $V_s$ , en contrôlant le flux de puissance réactive (Figure. 1.5). En effet, la chute de la tension à travers une ligne est donnée par la relation en négligeant le terme résistif de la ligne.

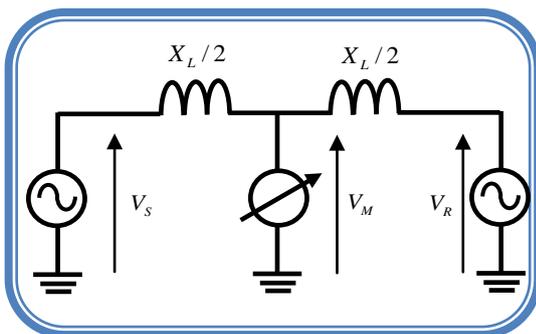


Figure. 1.5 : Principe de compensation shunts

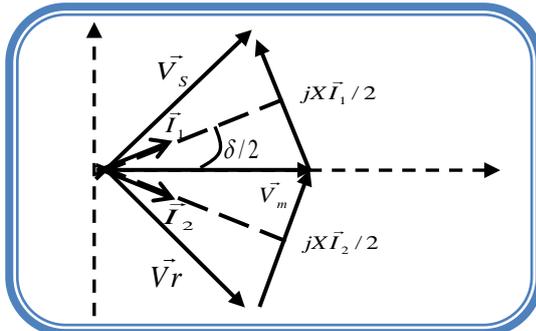


Figure. 1.6 : Diagramme vectoriel de compensation shunt

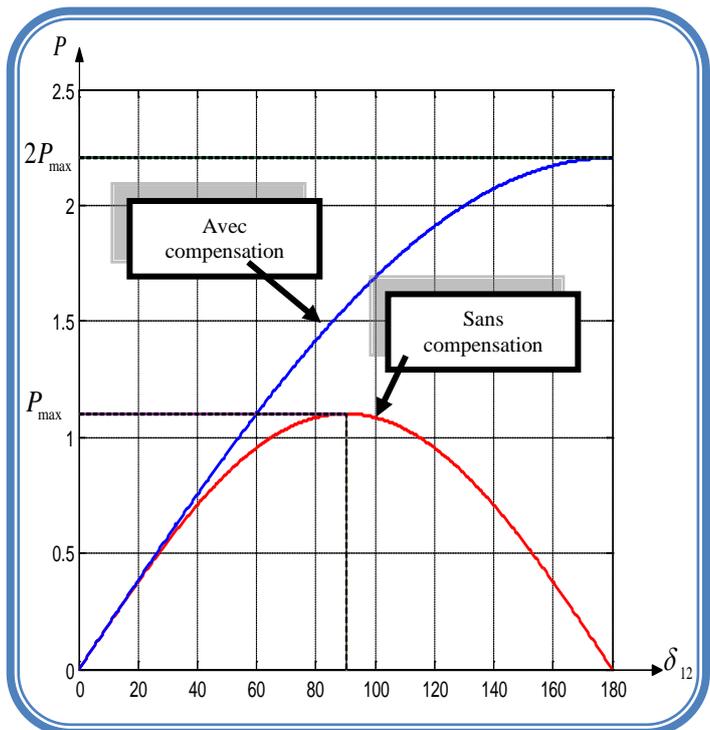


Figure. 1.7 : Courbe de puissance avec et sans compensation shunt en fonction de l'angle de transmission

$$\Delta V = \frac{X_L Q}{V} \tag{1.24}$$

L'équation (1.25) donne l'expression de la puissance transmise par la ligne compensée. On remarque que la puissance maximale transmise est doublée et est obtenue pour un déphasage  $\delta_{12} = 180^\circ$  (Figure. 1.7). Une compensation shunts permet donc de doubler le transit de puissance maximal d'une ligne par la formule:

$$P = \frac{2V^2}{X_L} \sin \frac{\delta_{12}}{2} \tag{1.25}$$

### 1.3.2 Principe de la compensation séries

Cette compensation a pour principe d'insérer une réactance capacitive sur la ligne toujours dans le but d'en augmenter la puissance transmissible. La ligne étant modélisée par une réactance de type inductive, on comprend aisément que l'on diminue cette réactance en ajoutant une réactance de type capacitive. En conservant le même modèle de ligne. On obtient la compensation série donnée par la (Figure 1.8)

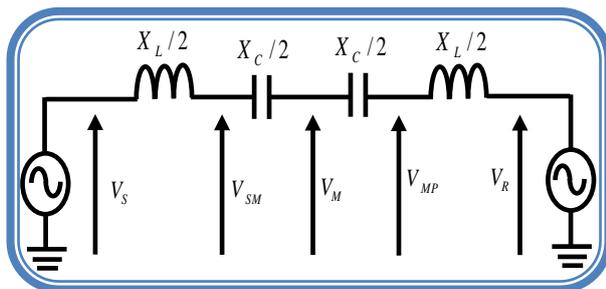


Figure. 1.8 : Principe de compensation série

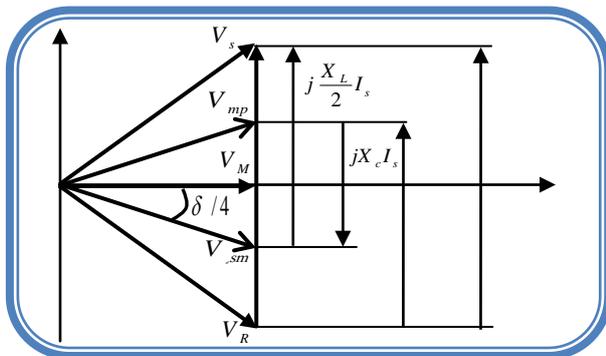


Figure. 1.9: Diagramme vectoriel de compensation série

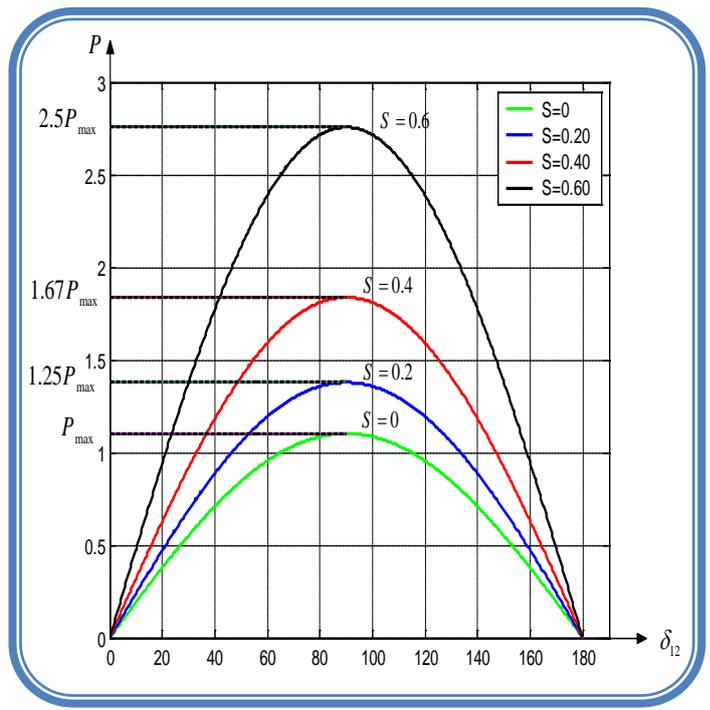


Figure. 1.10 : Courbe de puissance avec et sans compensation

Une modification de  $X_L$  augmentera ou diminuera le flux de puissance active pour un angle de phase fixe. De même, la puissance réactive sera modifiée suite à une modification de  $X_L$ . La réactance introduite aura la valeur  $X_C$ , donnée par l'équation :  $X_C = SX_L$

$S$  est le degré de compensation  $y$  compris entre  $0 \leq S \leq 1$

Avec ce type de compensation, les condensateurs doivent échanger de l'énergie réactive en quantité importante. Les propriétés sont similaires à celles des compensateurs d'énergie réactive [3].

### 1.3.3 Principe de la compensation par déphasage

Le principe de cette compensation est basé sur l'insertion d'un déphaseur sur la ligne. Ce dispositif est modélisé par une source de tension, d'amplitude et de phase variables. On peut alors avoir à la sortie du déphaseur une tension  $V_S$  de même amplitude qu'à l'entrée  $V_G$  mais déphasée d'un angle  $\alpha$  (Figure. 1.11).

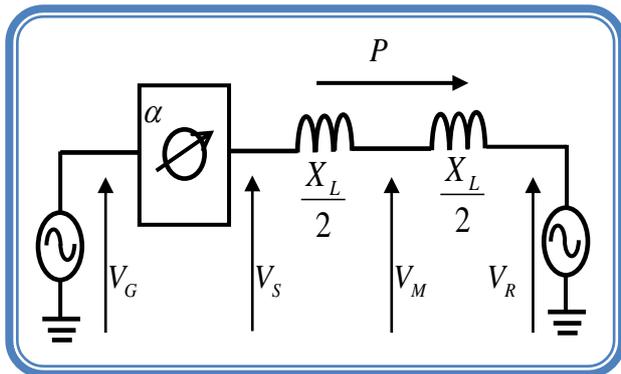


Figure. 1.11 : Principe de compensation par déphasage

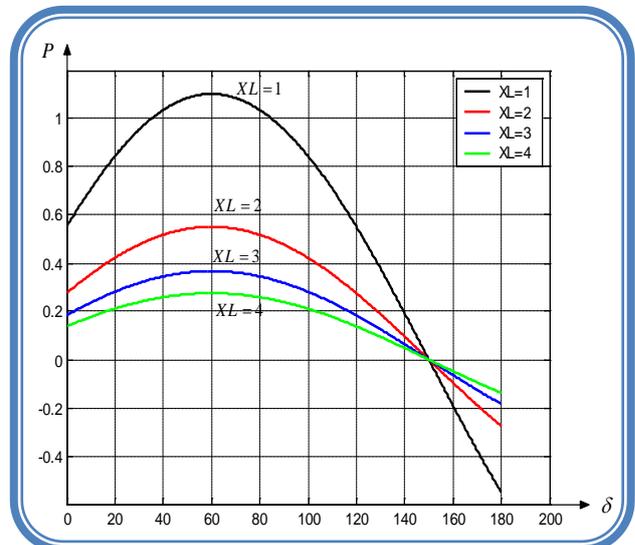


Figure. 1.12 : Compensation par déphasage pour  $\alpha = \pi/6$

La puissance transmissible est alors fonction de l'angle déphasage

$$P = V^2 \sin(\delta + \alpha) / X_L$$

Pour ce type de compensation, la puissance maximale n'est pas augmentée, mais le réglage de  $\alpha$  permet de régler l'acheminement de puissance. Ce dispositif fonctionne finalement comme une vanne électronique.

## 1.4. Moyens de compensation réactive

Il existe plusieurs catégories de dispositifs de production de puissance réactive : compensateurs synchrones, les bancs de condensateurs et les compensateurs statiques de puissance réactive.

### 1.4.1 Compensateurs synchrones

Les compensateurs synchrones sont des alternateurs synchrones connectés au réseau, mais ils ne sont pas entraînés par une turbine et ne fournissent donc pas de puissance active. Comme ils fonctionnent en moteur, ils consomment la puissance active correspondant à la compensation de ces pertes mécaniques et électriques. A l'instar des générateurs synchrones, leur courant d'excitation est réglable, permettant ainsi de contrôler la tension à leur nœud de connexion.

### 1.4.2 Bancs de condensateurs

Les bancs de condensateurs sont des dispositifs statiques de compensation de puissance réactive. Leur connexion sur les systèmes énergétiques permet d'injecter de la puissance réactive. Néanmoins leur fonctionnement en tout ou rien ne permet pas un pilotage de la tension, même s'ils peuvent être connectés par gradins. Les connexions ou déconnexions de condensateurs entraînent une diminution de leur durée de vie. Un inconvénient supplémentaire de ces dispositifs est que la puissance réactive générée diminue avec le carré de la tension ; en effet la puissance réactive générée par un banc de condensateur triphasé de capacité par phase  $C$  sous la tension composée  $U$  vaut  $Q_c = -C w U^2$ .

Une tension basse diminue l'efficacité du condensateur alors qu'il est nécessaire d'injecter plus de puissance réactive. Un autre paramètre important à prendre en compte pour les bancs de condensateur est le niveau de tension auxquels ils sont connectés. Le coût de ces appareils dépend en partie de la qualité du diélectrique utilisé. Les condensateurs sont plus économiques pour des niveaux de tension de l'ordre de 20 kV, c'est-à-dire adaptés aux réseaux de distribution.

### 1.4.3 Compensateurs statiques de puissance réactive

Les compensateurs statiques de puissance réactive, ou FACTS (de l'anglais Flexible Alternative Current Transmission System) sont des dispositifs plus récents qui associent des bancs de condensateurs et de bobines à des convertisseurs d'électronique de puissance permettant de régler la puissance réactive délivrée et ainsi la tension du nœud de connexion. Ces appareils ont un temps de réponse très court, de l'ordre de quelques dizaines de millisecondes.

### 1.5. Les systèmes de transmission flexibles en courant

Avec le développement rapide de l'électronique de puissance, les Systèmes Flexibles de Transport AC ont été créés et implémentés dans les réseaux électriques [4-6]. Les FACTS peuvent être utilisés pour contrôler l'écoulement de puissance et améliorer la stabilité du système. Particulièrement, avec le nouveau système de dérégulation du marché de l'énergie, il y a une augmentation de l'intérêt accordé aux FACTS dans l'exploitation et le contrôle des réseaux électriques et ceci est dû aux nouvelles contraintes de charge et aux nouvelles contingences. L'installation des FACTS est devenue indispensable pour augmenter la capacité et la contrôlabilité d'un réseau électrique.

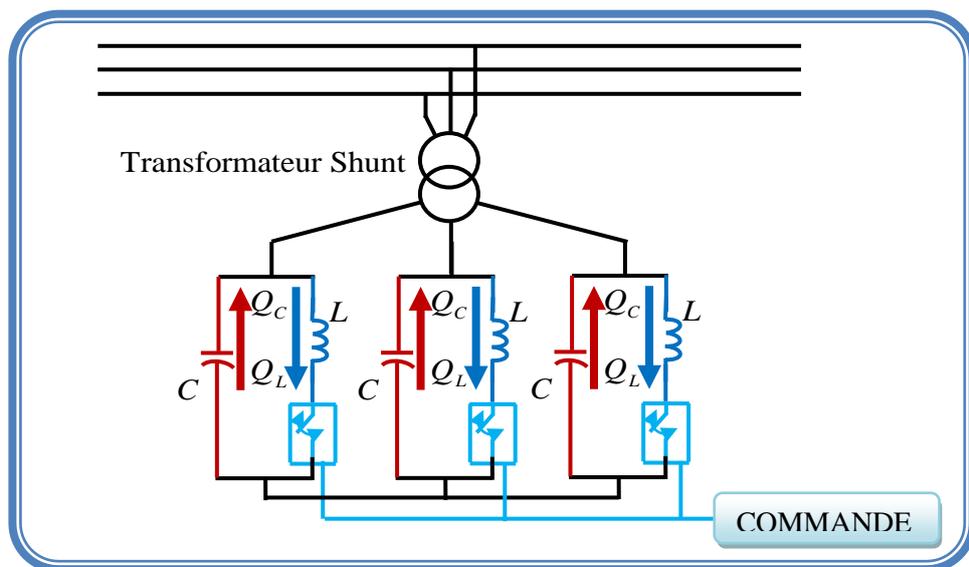


Figure. 1.13 : Schéma de principe d'un FACTS

#### 1.5.1 Définition

les systèmes de dispositifs FACTS sont employés pour le contrôle dynamique de tension, impédance et angle de phase de tension afin d'améliorer le comportement dynamique des réseaux ainsi que la répartition et l'écoulement des puissance dans les réseaux. Selon *IEEE*, les FACTS, sont définis comme suit:

Ce sont des systèmes à courant alternatif incorporant des éléments d'électronique de puissance et d'autres contrôleurs statiques pour l'amélioration de la contrôlabilité et la capacité du transit de la puissance [7].

### 1.5.2 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 1.14 représente la classification des dispositifs de compensation FACTS [2].

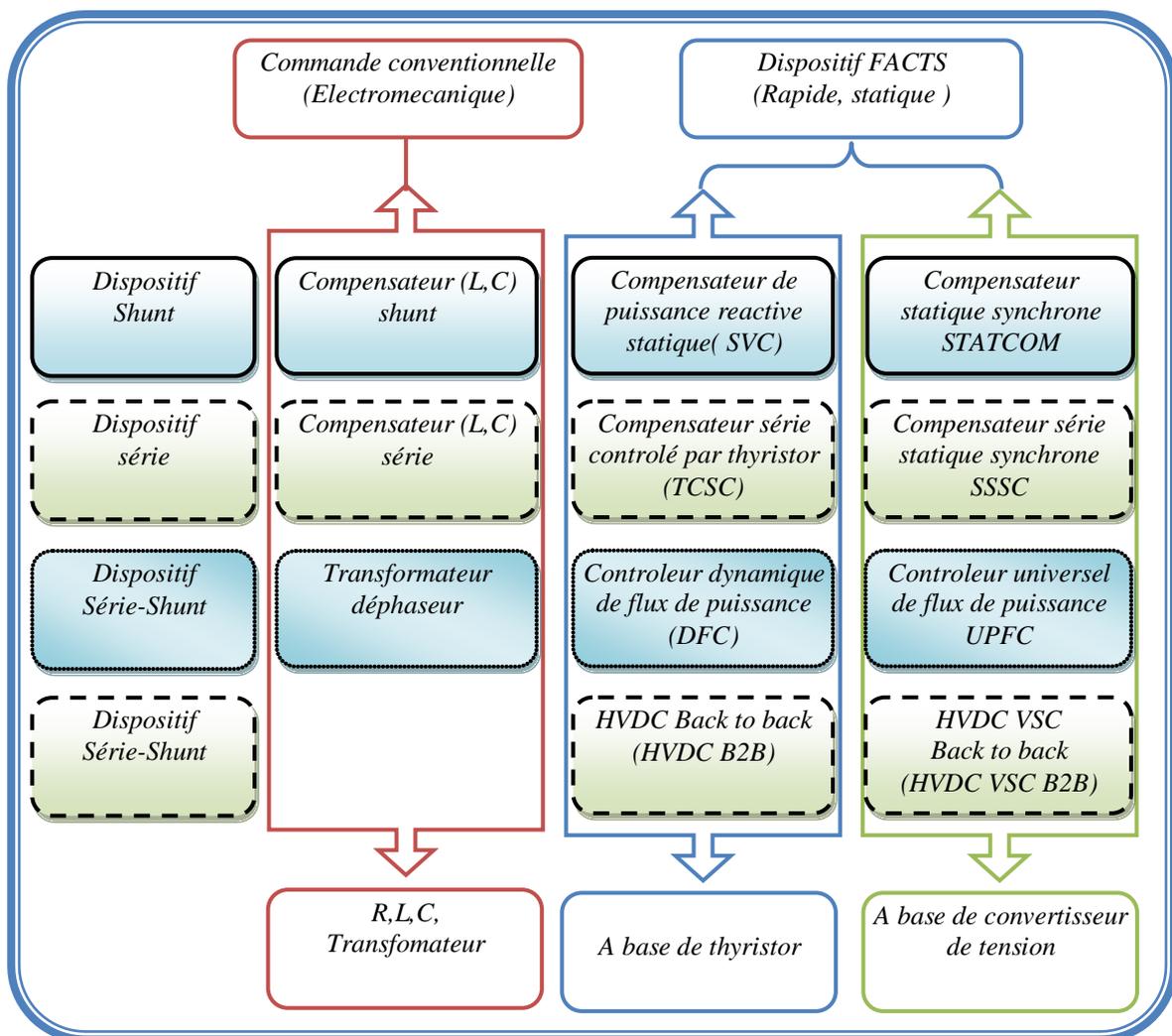


Figure. 1.14 : Classification des dispositifs de compensation FACTS.

### 1.5.3 Les avantages de la technologie des dispositifs FACTS

- ✓ Contrôle de l'écoulement de puissance : c'est la fonction principale des FACTS. L'utilisation du contrôle de l'écoulement de puissance peut satisfaire les demandes de charge, atteindre un fonctionnement optimal, et surmonter les conditions d'urgence.
- ✓ Amélioration de la stabilité dynamique. Cette fonction supplémentaire des FACTS comprend l'amélioration de la stabilité transitoire, l'amortissement des oscillations de puissance et le contrôle de stabilité de la tension.
- ✓ Augmenter la capacité de transport de lignes à leurs capacités thermiques, y compris les demandes à court terme et saisonnière.
- ✓ Fournir des connections sécurisées entre les compagnies de production et les régions par la diminution de la réserve de la puissance à générer requise par les deux zones.
- ✓ Réduction de l'écoulement de la puissance réactive, ce qui permettra ainsi à la ligne de transporter plus de puissance active.
- ✓ Contrôle de la boucle de l'écoulement de puissance

### 1.5.4 Les inconvénients de la technologie des dispositifs FACTS

## 1.6. Structure des Principaux Dispositifs FACTS:

### 1.6.1 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 [3].

### 1.6.1.1 Compensateur statique de puissance réactive (SVC)

#### 1.6.1.1.1 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 [3, 8].

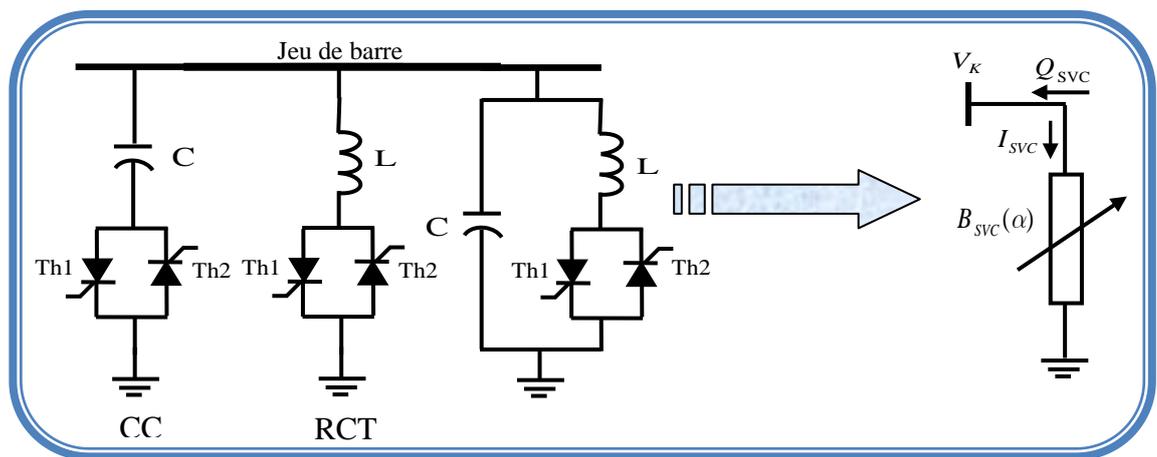


Figure. 1.15 : Modèle mathématique de SVC

#### 1.6.1.1.2 Principe de fonctionnement

La figure. 1.5 donne une représentation schématique monophasée d'un compensateur statique. Il est composé d'un condensateur avec une réactance capacitive  $X_C$  et d'une bobine d'inductance avec la réactance  $X_L$ . Ce système utilise l'angle d'amorçage  $\alpha$  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 absorber que de l'énergie réactive, puisque il est constitué d'éléments 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. 1.16 trois zone sont distinctes :

- Pour  $V_{\min} \leq V \leq V_{\max}$  : 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.

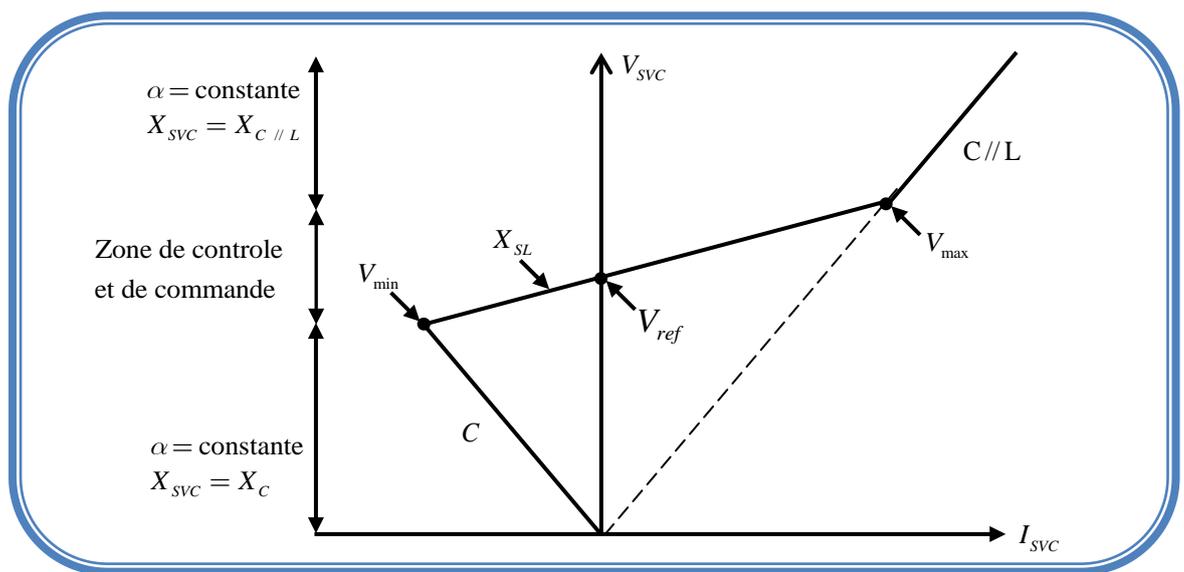


Figure. 1.16 : Fonctionnement du compensateur statique

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.

### 1.6.1.2 Le STATCOM (Static Compensator)

#### 1.6.1.2.1 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. 1.17.

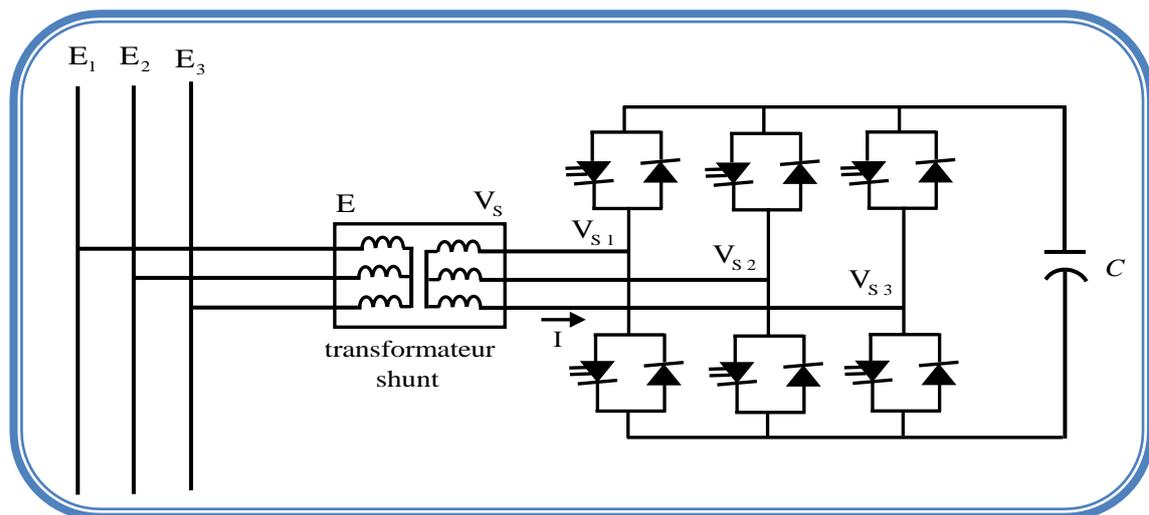


Figure. 1.17: Schéma de base du STATCOM

#### 1.6.1.2.2 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 [3, 9 et 10].

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  $E$ .

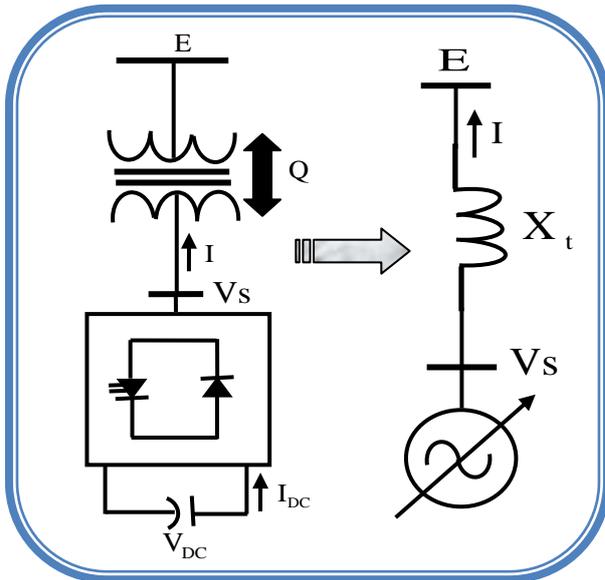


Figure. 1.18 : Présentation d'un compensateur

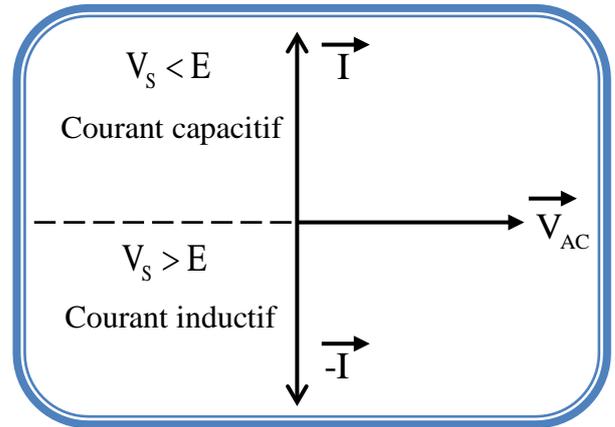


Figure. 1.19 : Diagramme vectoriel de STATCOM

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, l'amplitude de la tension de sortie  $V_s$  est proportionnelle à la tension continue aux bornes du condensateur.

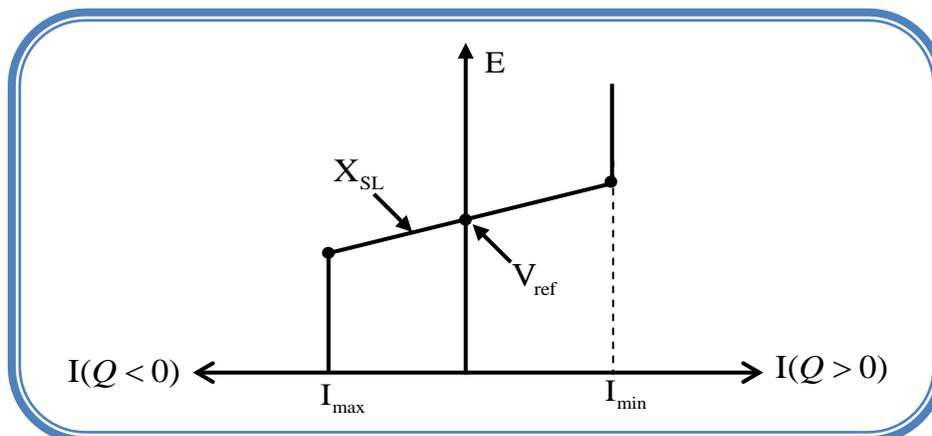


Figure. 1.20: Caractéristique statique du STATCOM.

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.

### **1.6.2 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.

#### **1.6.2.1 La capacité série commande par thyristor (TCSC)**

##### **1.6.2.1.1 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 [11].

##### **1.6.2.1.2 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. 1.21).

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.

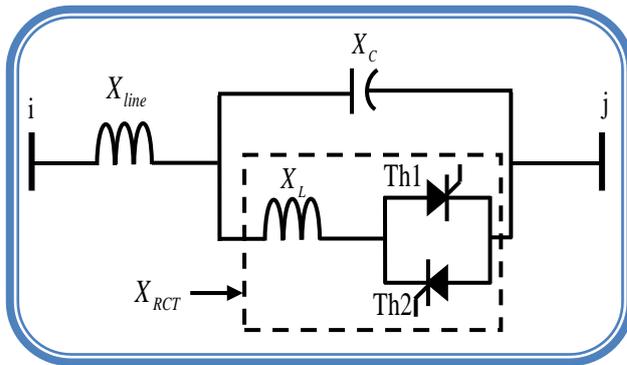


Figure. 1.21: Insertion d'un TCSC sur une ligne

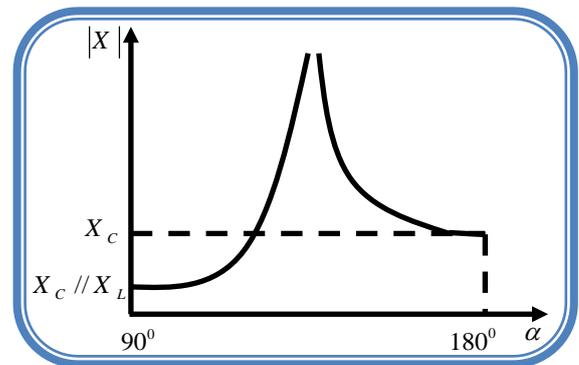


Figure. 1.22 : Impédance du TCSC en fonction de l'angle

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 devienne 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 :

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

### 1.6.2.2 Compensateur statique série synchrone (SSSC)

#### 1.6.2.2.1 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 [9, 11]. 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).

#### 1.6.2.2.2 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. 1.23).

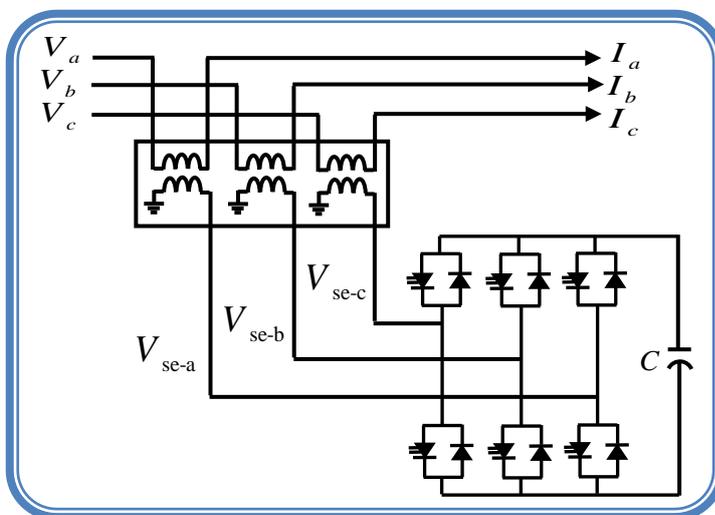


Figure. 1.23: Schéma de base du SSSC

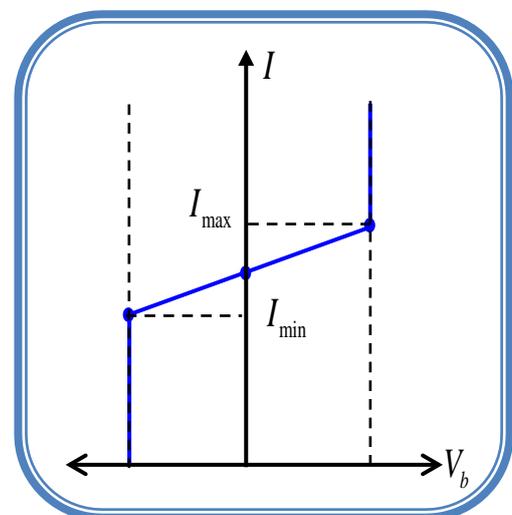


Figure. 1.24 : Statique du SSSC

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 Synchrone Statique Série est donnée sur la figure.

1.24

### 1.6.3 Dispositifs de compensation dynamique hybrides "série - parallèle "

#### 1.6.3.1 Compensateur universel

##### 1.6.3.1.1 Définition

L'UPFC (Unified Power Flow Controller), 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.

##### 1.6.3.1.2 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 [12].

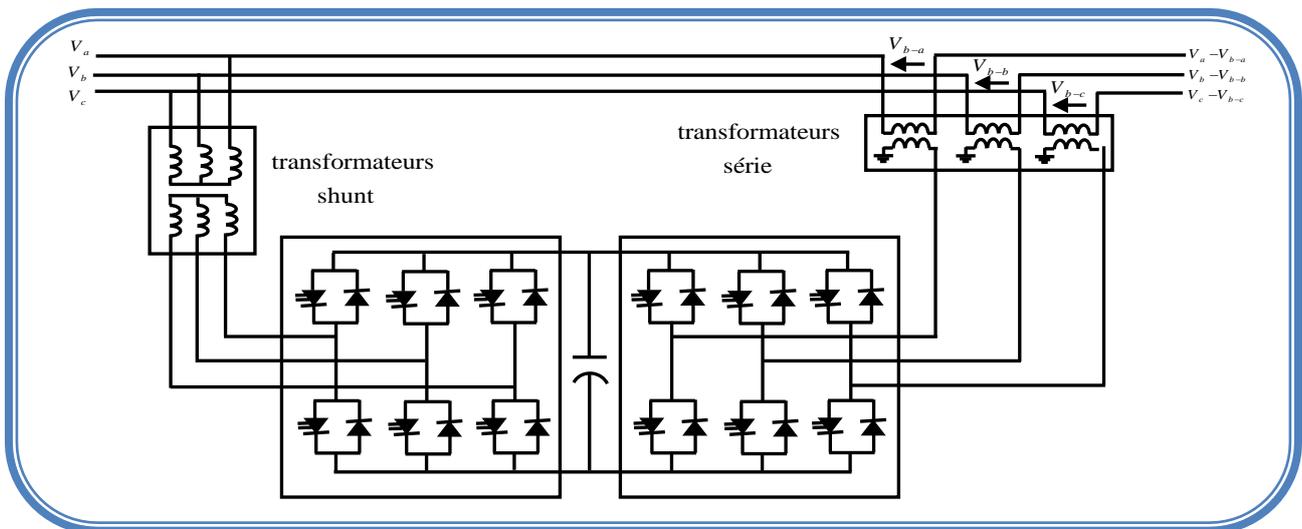


Figure. 1.25: Schéma simplifié d'un UPFC connecté au réseau électrique

Les deux onduleurs sont interconnectés par un bus continu et par un condensateur de filtrage comme indiqué sur la figure. 1.25.

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.

## **1.7. 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 vis-à-vis ces atouts qu'elle offre tout en augmentant la capacité de transport, renforcement de stabilité de tension et le maintien d'une qualité meilleure de l'énergie produite tout ces avantages ne peut être prend lieu que par un réglage adéquat des paramètres de ces dispositifs qui sera l'objectif et le sujet des chapitres qui suivent.

---

***Chapitre 2 :***

**Modélisation des dispositifs**

**FACTS**

---

## Chapitre 2

# Modélisation des dispositifs FACTS

### 2.1. Introduction

Après une généralité présentée dans le chapitre 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.

### 2.2. 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 :

- Noeud 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.
- Noeud 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 [3].

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 :

$$I_{bus} = Y_{bus} \bullet U_{bus} \quad (2.1)$$

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

Le courant  $I_i$  s'écrit:

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} U_j = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| V_j e^{j(\theta_j + \phi_{ij})} \quad (2.2)$$

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

$$S_i = U_i I_i^* \quad (2.3)$$

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:

$$P_i = P_{Gi} - P_{Di} = \sum_{j=1}^n V_i V_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (2.4)$$

$$Q_i = Q_{Gi} - Q_{Di} = \sum_{j=1}^n V_i V_j (g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (2.5)$$



On désigne par  $\Delta x_1^{(0)}, \Delta x_2^{(0)}, \dots, \Delta x_n^{(0)}$  les valeurs à ajouter à  $x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}$  pour trouver les solutions correctes. Lorsqu'on développe toutes les fonctions en série de Taylor au voisinage du point d'estimation initiale on aura [14, 15]:

On peut écrire le système de n équations linéaires comme suit :

$$\begin{bmatrix} f_1(x^{(0)}) \\ f_2(x^{(0)}) \\ \vdots \\ f_n(x^{(0)}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right)_0 & \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_2}\right)_0 & \dots & \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_n}\right)_0 \\ \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_1}\right)_0 & \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_2}\right)_0 & \dots & \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_n}\right)_0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_1}\right)_0 & \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_2}\right)_0 & \dots & \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_n}\right)_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(0)} \\ \Delta x_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta x_n^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Les termes  $\left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right)_0, \dots, \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_n}\right)_0$  correspond a la dérivée partielle évaluée avec les valeurs  $x_1^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}$

Ou dans une notation compacte :  $f(x^{(0)}) + j^{(0)} \Delta x^{(0)} \approx 0$

La matrice carrée dite Jacobienne :  $[J^{(0)}]$

De cette dernière équation on tire ensuite le vecteur erreur  $\Delta x^{(0)} = -[j^{(0)}]^{-1} f(x^{(0)})$

Mais  $\Delta x^{(0)} = x^{(1)} - x^{(0)}$  donc  $x^{(1)} = x^{(0)} - [j^{(0)}]^{-1} f(x^{(0)})$

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

### 2.2.2. 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 tensions ( $V^{\min} < V < V^{\max}$ ).

### 2.3. 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.

#### 2.3.1. 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 [16].

$$P_{Gi\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi\max} \quad (2.9)$$

$$Q_{Gi\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi\max} \quad (2.10)$$

La figure. 2.1 (a) illustre le symbole utilisé pour représenter les générateurs. La figure. 2.1 (b) représente un schéma symbolique correspondant au jeu de barres de contrôle (PV).

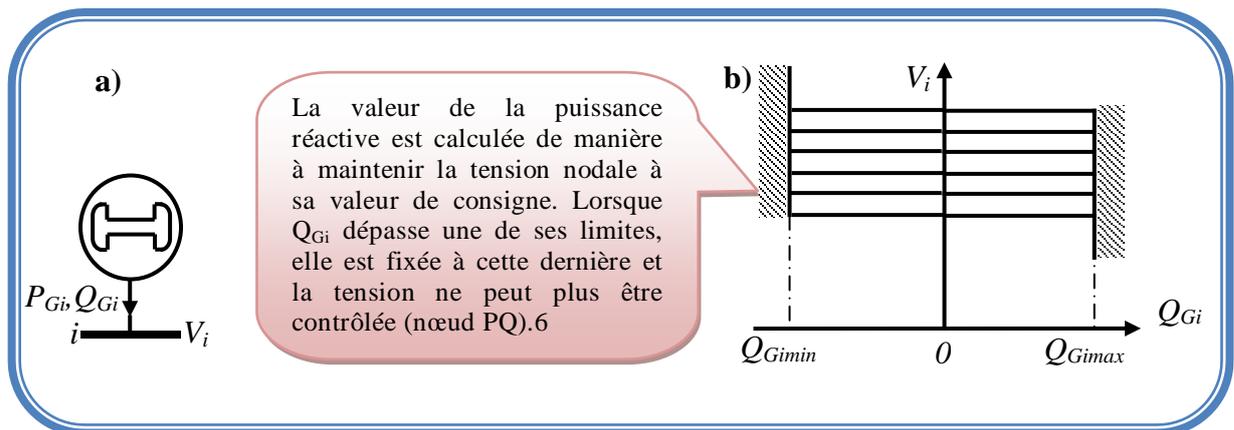


Figure. 2.1 : Modèles des générateurs: a) symbole, b) modèle PV classique

#### 2.3.2. 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 :

$$S_{Li} = P_{Li} + jQ_{Li} \quad (2.11)$$

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.

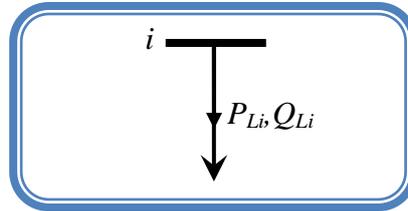


Figure. 2.2 : Modèle de charge.

### 2.3.3. 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 :

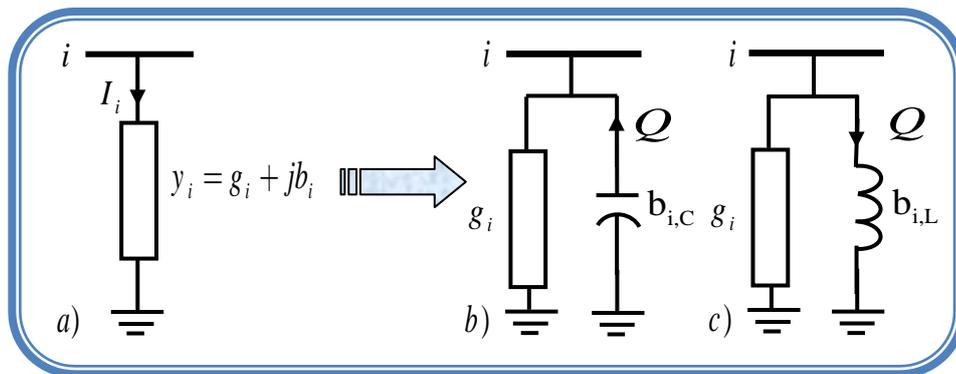


Figure. 2.3 : Modèles des éléments shunt: a) symbole, b) élément inductif, c) élément capacitif.

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

### 2.3.4. Modèle de Ligne

Généralement la ligne de transport est modélisée par un schéma équivalent en  $\pi$  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 à l'effet capacitif de la ligne avec la terre) en parallèle avec une conductance d'isolation  $G$ . Voir (Figure. 2.4).

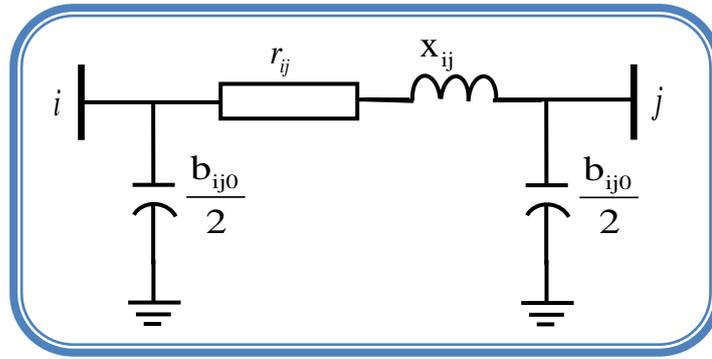


Figure. 2.4 : Modèles en  $\pi$  des lignes de transport

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

$$Y_{Bus} = \begin{pmatrix} y_{ij} + y_{ij0}/2 & -y_{ij} \\ -y_{ij} & y_{ij} + y_{ij0}/2 \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

où l'admittance longitudinale  $y_{ij}$  vaut

$$y_{ij} = \frac{1}{r_{ij} + jx_{ij}} = g_{ij} + jb_{ij} \quad (2.13)$$

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

$$y_{ij0} = jb_{ij0} \quad (2.14)$$

Avec :

$r_{ij}$  Résistance longitudinale ;

$x_{ij}$  Réactance longitudinale ;

$b_{ij}$  Susceptance transversale.

### 2.3.5. Modèle de Transformateur

Un transformateur de l'énergie électrique est représenté par un quadripôle en  $\pi$  non symétrique. Les grandeurs associées sont le rapport de transformation  $a$  et l'impédance de fuite. Les rapports  $a_{ij}$  sont inclus dans les éléments de la matrice d'admittance, c'est-à-dire que les susceptances de la matrice d'admittance  $B_{ij}$  sont vues comme des fonctions de rapports de transformation  $a$  (Figure. 2.5).

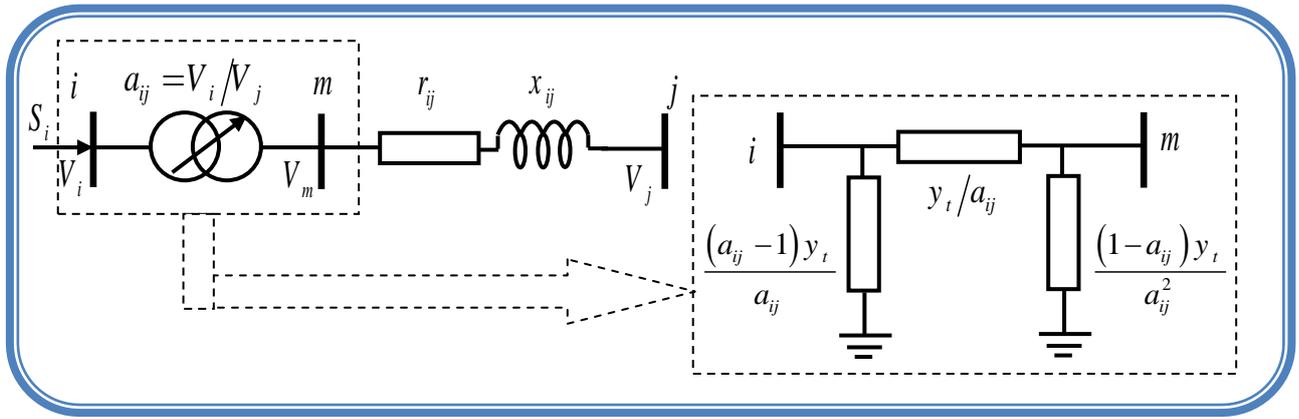


Figure. 2.5 : Modèle des transformateurs.

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

$$Y_{trof} = \begin{pmatrix} y_{ij}/a_{ij}^2 & -y_{ij}/a_{ij} \\ -y_{ij}/a_{ij} & y_{ij} \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

## 2.4. Modélisation des dispositifs FACTS

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

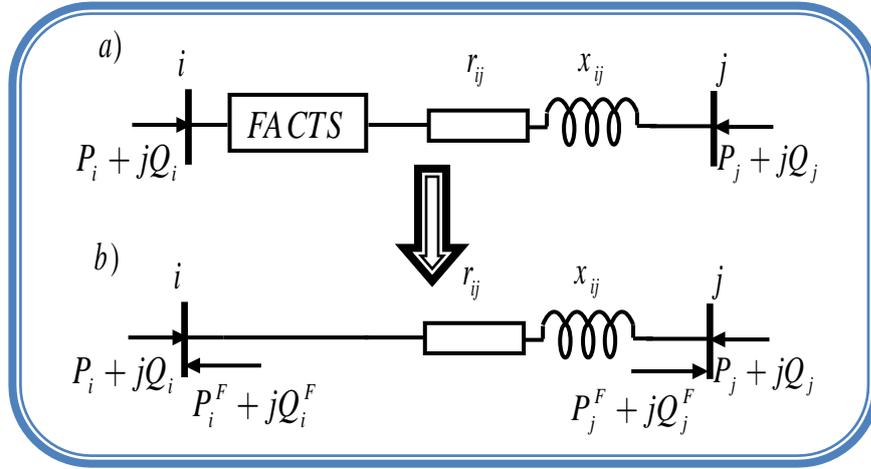
### 2.4.1. Injection de puissance aux extrémités de la ligne

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. 2.6. Le principe consiste à remplacer l'effet dû au dispositif FACTS sur les transits de puissances dans la ligne (Figure. 2.6 (a)), par des injections de puissances aux deux extrémités (Figure. 2.6 (b)). Celles-ci sont calculées de manière à ce que l'effet produit soit équivalent à celui du dispositif en question [17]. Les injections de puissances active et réactive au nœud  $i$  sont données par :

$$P_i^F = P_{ij} - P_{ij}^F \quad (2.16)$$

$$Q_i^F = Q_{ij} - Q_{ij}^F \quad (2.17)$$

Avec :  $P_i^F, Q_i^F$  Injections équivalentes de puissances active et réactive au nœud  $i$ .  
 $P_{ij}, Q_{ij}$  Transits de puissances active et réactive sans dispositif FACTS ;  
 $P_{ij}^F, Q_{ij}^F$  Transits de puissances active et réactive avec le FACTS dans la ligne.



**Figure. 2.6 :** Modélisation par injection de puissances: **a)** ligne avec FACTS, **b)** ligne avec injections équivalentes.

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

$$P_i + P_i^F = V_i \sum_{k=1}^n V_j [G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)] \quad (2.18)$$

et les puissances réactives injectées aux nœuds  $PQ$  valent :

$$Q_i + Q_i^F = -V_i \sum_{k=1}^n V_j [G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)] \quad (2.19)$$

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 jacobienne.

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 [17].

### 2.4.2. Création d'un nœud fictif

Une modélisation de FACTS basée sur la création d'un nœud fictif est présentée dans [18]. Le modèle d'un dispositif de type UPFC, permettant de contrôler les transits de puissances active et réactive, est illustré à la figure. 2.7.

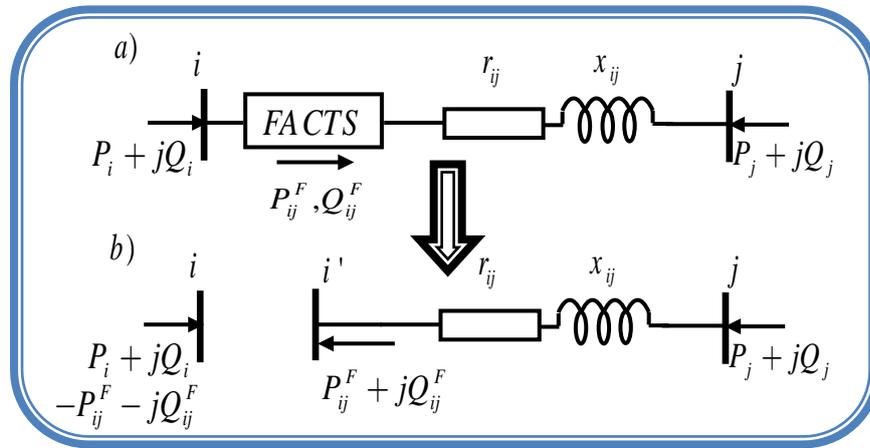


Figure. 2.7 : Modélisation avec nœud fictif : a) ligne avec FACTS, b) représentation équivalente.

Les valeurs de consigne des dispositifs sont directement exprimées en terme de puissances circulant dans les lignes ou injectées aux nœuds (Figure. 2.7 (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. 2.7 (b)). Le nouveau nœud est pris en compte dans le calcul de répartition des puissances en modifiant la structure de la matrice jacobienne.

### 2.4.3. Modification de la matrice d'admittance nodale

Les FACTS sont envisagés comme des éléments venant modifier directement la matrice d'admittance nodale du réseau [17]. Ils sont insérés dans la ligne selon la représentation de la figure. 2.8 Selon le type de FACTS modélisé, le dispositif peut être placé au milieu ou à une extrémité de la ligne.

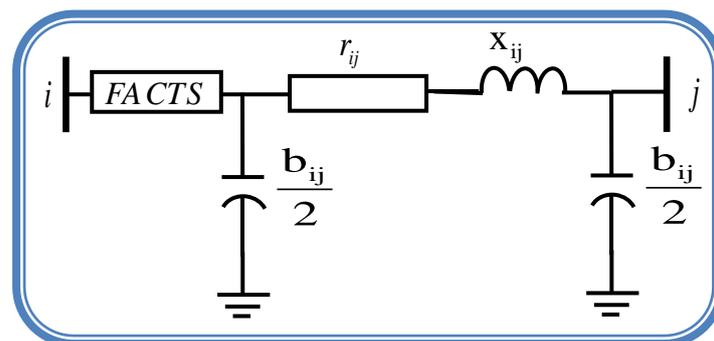


Figure. 2.8 : Intégration du dispositif FACTS dans une ligne.

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:

$$Y_{\text{mod}} = \begin{bmatrix} Y'_{ii} & Y'_{ij} \\ Y'_{ji} & Y'_{jj} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} Y_{ii} & Y_{ij} \\ Y_{ji} & Y_{jj} \end{bmatrix}}_{\text{ligne}} + \underbrace{\begin{bmatrix} y_{ii}^F & y_{ij}^F \\ y_{ji}^F & y_{jj}^F \end{bmatrix}}_{\text{FACTS}} \quad (2.20)$$

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.

#### 2.4.4. Dispositifs FACTS shunt

Plusieurs modèles de dispositifs FACTS shunt ont été développés, tant pour des régimes de fonctionnement statique (qui est notre cas) que dynamique. Certains modèles sont spécifiques à un type de dispositif alors que d'autres, plus généraux, sont utilisés pour présenter plusieurs FACTS.

Nombreux modèles mathématiques du SVC et du STATCOM en régime permanent ont été proposés dans la littérature. Dans [9,11 et 19], la méthode de la puissance injectée est proposée. Les caractéristiques électriques des équipements sont traduites et remplacées par des puissances injectées. Cette modélisation est appliquée dans notre étude pour le STATCOM. Une autre méthode consiste à modéliser le SVC comme des réactances variables dont valeurs dépendent de l'angle d'amorçage des thyristors [13].

##### 2.4.4.1. Modèle du compensateur statique de puissance réactive (SVC)

La figure. 2.9 représente la modélisation d'un SVC par une admittance shunt variable  $Y_{\text{SVC}}$  dont la valeur est limitée selon l'équation (2.22). L'énergie réactive fournie (ou absorbée) par le SVC au nœud  $i$  est donnée par l'équation (2.23).

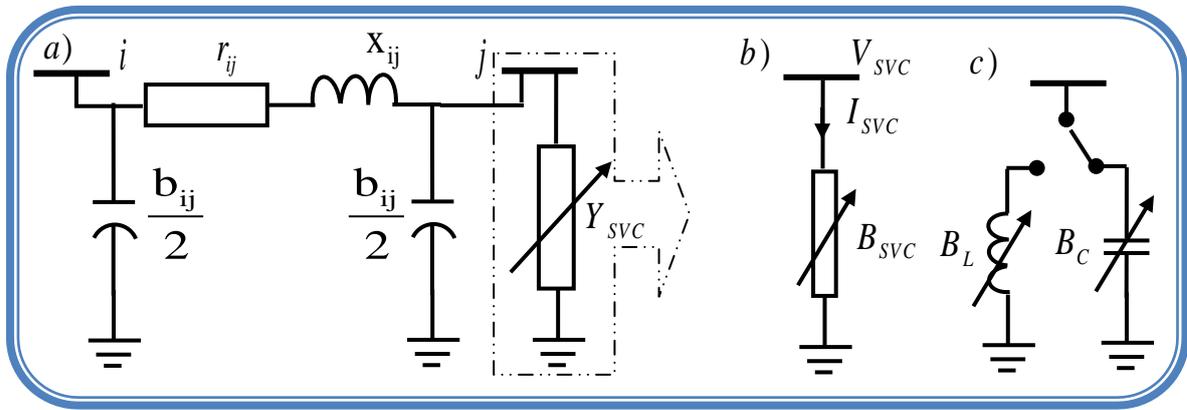


Figure. 2.9 : Modélisation d'un SVC :a) SVC placé en un nœud: b) symbole, c) modèle.

$$Y_{SVC} = jB_{SVC} \quad (2.21)$$

$$B_{SVC}^{\min} \leq B_{SVC} \leq B_{SVC}^{\max} \quad (2.22)$$

$$Q_{SVC} = -V_i^2 * B_{SVC} \quad (2.23)$$

Le signe "moins" indique que le SVC fournit de la puissance réactive au système lorsqu'il est capacitif 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. 2.10 pour plusieurs valeurs de compensation.

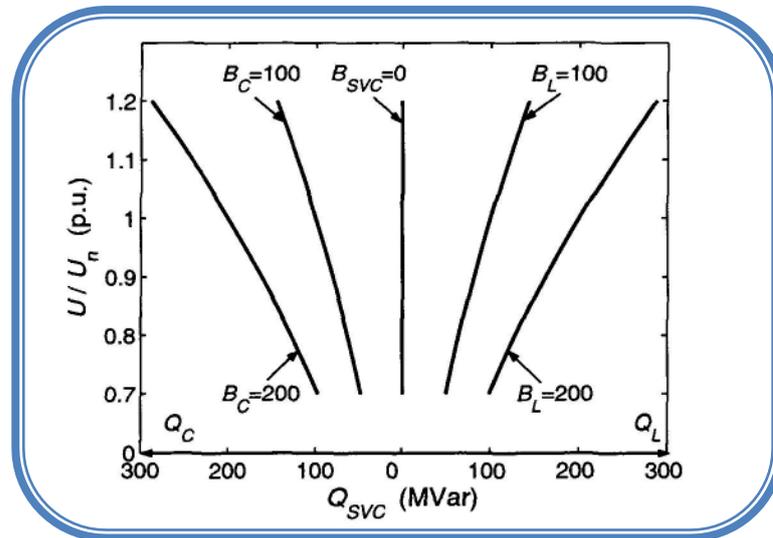


Figure. 2.10 : Variation de la puissance réactive absorbée par un SVC en fonction de la tension nodale.

Lorsqu'ils sont connectés aux nœuds du réseau, les SVC sont généralement placés aux endroits où se trouvent des charges importantes ou varient 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  $j$ , seul l'élément  $Y_{jj}$  de la matrice d'admittance nodale est modifié, l'admittance du SVC lui étant additionnée :

$$Y'_{jj} = Y_{jj} + Y_{SVC} \quad (2.24)$$

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

$$Y_{\text{mod}} = \begin{bmatrix} Y'_{ii} & Y'_{ij} \\ Y'_{ji} & Y'_{jj} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} y_{ij} + y_{ij0}/2 & -y_{ij} \\ -y_{ij} & y_{ij} + y_{SVC} + y_{ij0}/2 \end{pmatrix} \quad (2.25)$$

#### 2.4.4.2. SVC placé au milieu d'une ligne

Lorsque le compensateur statique est inséré au milieu d'une ligne, cette dernière est divisée en deux tronçons identiques. Le SVC est relié au nœud médian additionnel m. Pour éviter d'avoir à changer le nombre de nœuds du réseau et donc la taille de la matrice d'admittance, une transformation étoile-triangle permet de réduire le système en supprimant le nœud m et en calculant les paramètres d'une ligne équivalente. La figure. 2.11 illustre les étapes pour obtenir cette ligne équivalente

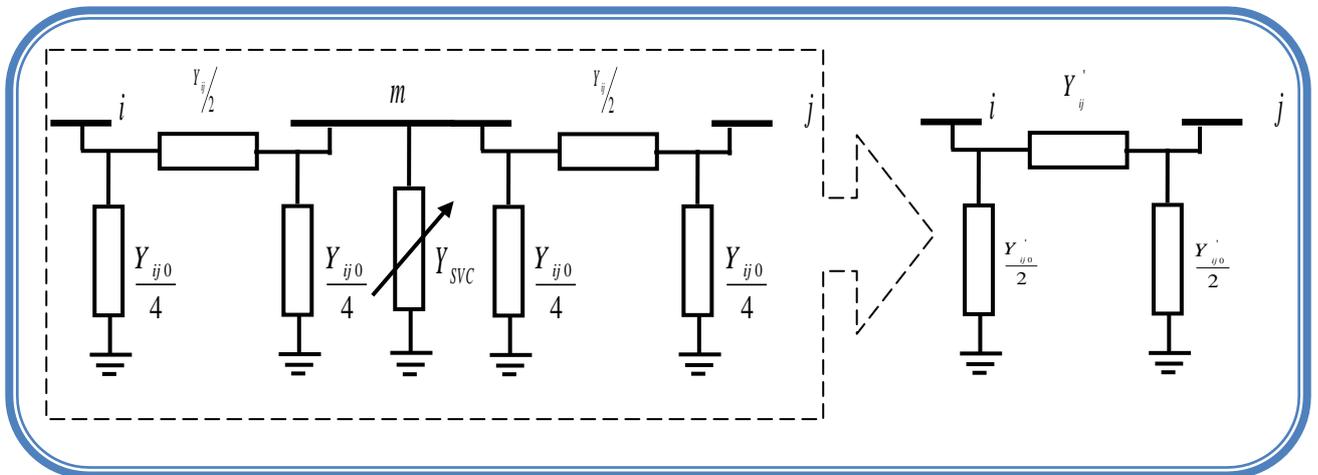


Figure. 2.11 : SVC placé en milieu de ligne.

Tous les éléments de la matrice d'admittance d'une ligne avec un SVC en son milieu sont modifiés :

$$Y_{\text{mod}} = \begin{bmatrix} Y'_{ii} & Y'_{ij} \\ Y'_{ji} & Y'_{jj} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} y'_{ij} + y'_{ij0}/2 & -y'_{ij} \\ -y'_{ij} & y'_{ij} + y'_{ij0}/2 \end{pmatrix} \quad (2.26)$$

#### 2.4.4.3. 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 [ 20]. La structure de base d'un STATCOM ayant le schéma qui est montré par la figure. 2.12.

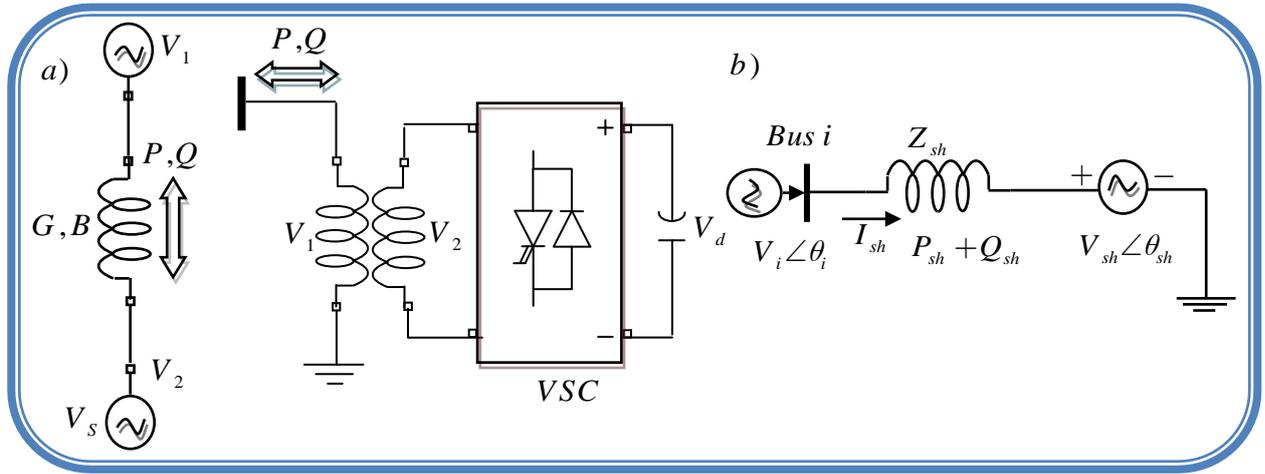


Figure. 2.12 : Représentation schématique de STATCOM

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. 2.12 (b)) [13].

La tension de STATCOM est donné par:

$$E_{sh} = V_{sh} (\cos \delta_{sh} + j \sin \delta_{sh}) \quad (2.27)$$

Le courant injecté par le STATCOM est donné par:

$$I_{sh} = \frac{V_{sh} - V_i}{jX_t} \quad (2.28)$$

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

La puissance active transmis :

$$P = \frac{V_i V_{sh}}{X} \sin(\delta_i - \delta_{sh}) \quad (2.29)$$

La puissance réactive transmis :

$$Q = \frac{V_i^2}{X} - \frac{V_i V_{sh}}{X} \cos(\delta_i - \delta_{sh}) \quad (2.30)$$

Où  $V_i, V_{sh}$  est la tension aux noeuds,  $(\delta_i - \delta_{sh})$  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 [7, 20] :

$$P_{sh} = V_i^2 g_{sh} - V_i V_{sh} (g_{sh} \cos(\theta_i - \theta_{sh}) + b_{sh} \sin(\theta_i - \theta_{sh})) \quad (2.31)$$

$$Q_{sh} = -V_i^2 b_{sh} - V_i V_{sh} (g_{sh} \sin(\theta_i - \theta_{sh}) - b_{sh} \cos(\theta_i - \theta_{sh})) \quad (2.32)$$

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.

#### 2.4.5. 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.

##### 2.4.5.1. 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. 2.13.

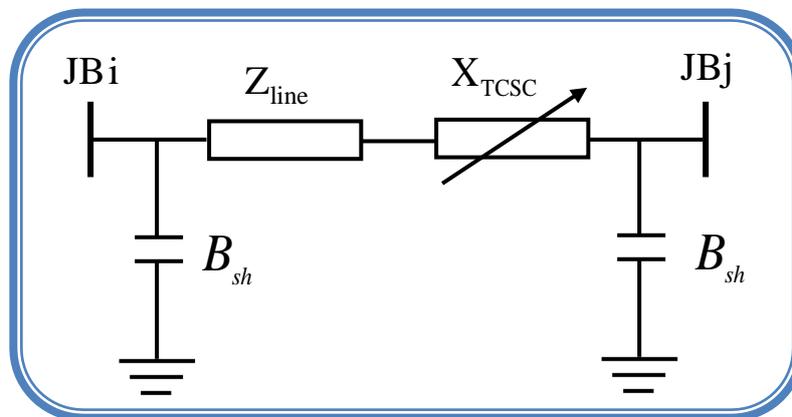


Figure. 2.13 : modèle mathématiques e de TCSC

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.

$$X_{TCSC}(\alpha) = j \frac{X_C X_L}{\frac{X_C}{\pi} (2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha) - X_L} \quad (2.33)$$

La figure. 2.13 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 :

$$X_{ij} = X_{line} + X_{TCSC} \quad (2.34)$$

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 [17] , La valeur de la réactance du TCSC est donc donnée par [19]:

$$-0.8X_{line} \leq X_{TCSC} \leq 0.2X_{line} \quad (2.35)$$

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

$$Y_{mod} = \begin{bmatrix} Y'_{ii} & Y'_{ij} \\ Y'_{ji} & Y'_{jj} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} y'_{ij} + y'_{ij0}/2 & -y'_{ij} \\ -y'_{ij} & y'_{ij} + y'_{ij0}/2 \end{pmatrix} \quad (2.36)$$

Avec :

$$y'_{ij} = \frac{1}{r_{ij} + j(x_{ij} + x_{TCSC})} \quad (2.37)$$

#### 2.4.6. 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.

##### 2.4.6.1. 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. 2.14. Cette figure représente un schéma unifilaire d'un réseau électrique et d'un UPFC installé dans une ligne de transport [12, 20].

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.

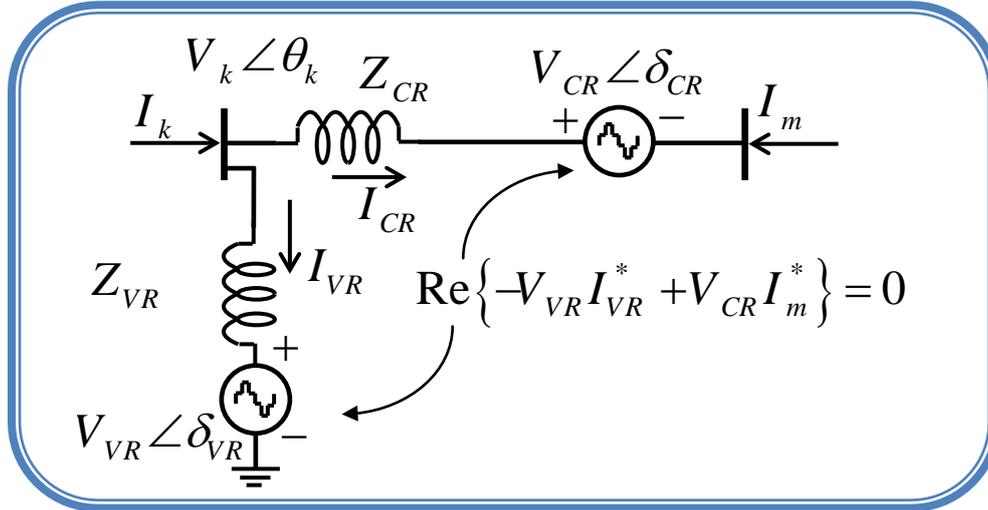


Figure. 2.14 : Modèle mathématique de l'UPFC et le système de transmission

Afin de montrer comment les écoulements de puissance en ligne peuvent être affectés et exploité par l'UPFC est placé au début de la ligne de transmission connexion bus k et m, comme indiqué dans la figure. 2.14 [4-7]. UPFC est représentée par deux sources de tension idéale est contrôlable les l'amplitude et angle de phase.

La tension de le UPFC donne par :

$$E_{VR} = V_{VR} (\cos \delta_{VR} + j \sin \delta_{VR}) \quad (2.38)$$

$$E_{CR} = V_{CR} (\cos \delta_{CR} + j \sin \delta_{CR}) \quad (2.39)$$

Avec

$V_{VR}, \delta_{CR}$  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 du source de tension du partie shunte.  $V_{VR}, \delta_{CR}$  represent l'amplitude et l'angle de phase de tension du partie série

Pour le jeu de par  $k$  :

$$\begin{aligned} P_k = & V_k^2 G_{kk} + V_k V_m [G_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) + B_{km} \sin(\theta_k - \theta_m)] \\ & + V_k V_{CR} [G_{km} \cos(\theta_k - \delta_{CR}) + B_{km} \sin(\theta_k - \delta_{CR})] \\ & + V_k V_{VR} [G_{km} \cos(\theta_k - \delta_{VR}) + B_{km} \sin(\theta_k - \delta_{VR})] \end{aligned} \quad (2.40)$$

$$\begin{aligned}
Q_k = & -V_k^2 B_{kk} + V_k V_m [G_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) - B_{km} \cos(\theta_k - \theta_m)] \\
& + V_k V_{CR} [G_{km} \sin(\theta_k - \delta_{CR}) - B_{km} \cos(\theta_k - \delta_{CR})] \\
& + V_k V_{VR} [G_{km} \sin(\theta_k - \delta_{VR}) - B_{km} \cos(\theta_k - \delta_{VR})]
\end{aligned} \tag{2.41}$$

Pour le jeu de par  $m$  :

$$\begin{aligned}
P_m = & V_m^2 G_{mm} + V_m V_k [G_{mk} \cos(\theta_m - \theta_k) + B_{mk} \sin(\theta_m - \theta_k)] \\
& + V_m V_{CR} [G_{mm} \cos(\theta_m - \delta_{CR}) + B_{mm} \sin(\theta_m - \delta_{CR})]
\end{aligned} \tag{2.42}$$

$$\begin{aligned}
Q_m = & -V_m^2 B_{mm} + V_m V_k [G_{mk} \sin(\theta_m - \theta_k) - B_{mk} \cos(\theta_m - \theta_k)] \\
& + V_m V_{CR} [G_{mk} \sin(\theta_m - \delta_{CR}) - B_{mk} \cos(\theta_m - \delta_{CR})]
\end{aligned} \tag{2.43}$$

Parte séries :

$$\begin{aligned}
P_{CR} = & V_{CR}^2 G_{mm} + V_{CR} V_k [G_{km} \cos(\delta_{CR} - \theta_k) + B_{km} \sin(\delta_{CR} - \theta_k)] \\
& + V_{CR} V_m [G_{mm} \cos(\delta_{CR} - \theta_m) + B_{mm} \sin(\delta_{CR} - \theta_m)]
\end{aligned} \tag{2.44}$$

$$\begin{aligned}
Q_{CR} = & -V_{CR}^2 B_{mm} + V_{CR} V_k [G_{km} \sin(\delta_{CR} - \theta_k) - B_{km} \cos(\delta_{CR} - \theta_k)] \\
& + V_{CR} V_m [G_{mm} \sin(\delta_{CR} - \theta_m) - B_{mm} \cos(\delta_{CR} - \theta_m)]
\end{aligned} \tag{2.45}$$

Parte shunte :

$$P_{VR} = -V_{VR}^2 G_{VR} + V_{VR} V_k [G_{VR} \cos(\delta_{VR} - \theta_k) + B_{VR} \sin(\delta_{VR} - \theta_k)] \tag{2.46}$$

$$Q_{VR} = -V_{VR}^2 B_{VR} + V_{VR} V_k [G_{VR} \sin(\delta_{VR} - \theta_k) + B_{VR} \cos(\delta_{VR} - \theta_k)] \tag{2.47}$$

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

$$P_{VR} + P_{CR} = 0 \tag{2.48}$$

## 2.5. Conclusion

Dans ce mémoire on s'intéresse à l'utilisation des systèmes FACTS, particulièrement les deux dispositifs STATCOM et TCSC 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 futur chapitre à savoir les algorithmes génétiques (AG), l'algorithme d'optimisation par essais de particules (PSO) et la méthode de colonie de fourmis (ACO).

---

*Chapitre 3 :*

**Les méthodes d'optimisation:  
méthodes déterministes et  
méta-heuristique**

---

## Chapitre 3

# Les méthodes d'optimisation: déterministes et méta-heuristiques

### 3.1. 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 présenter 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.

### 3.2. 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 soumises 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 [21].

### 3.3. 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. 3.1 résume les différents critères qui entrent dans la classification des problèmes d'optimisation:

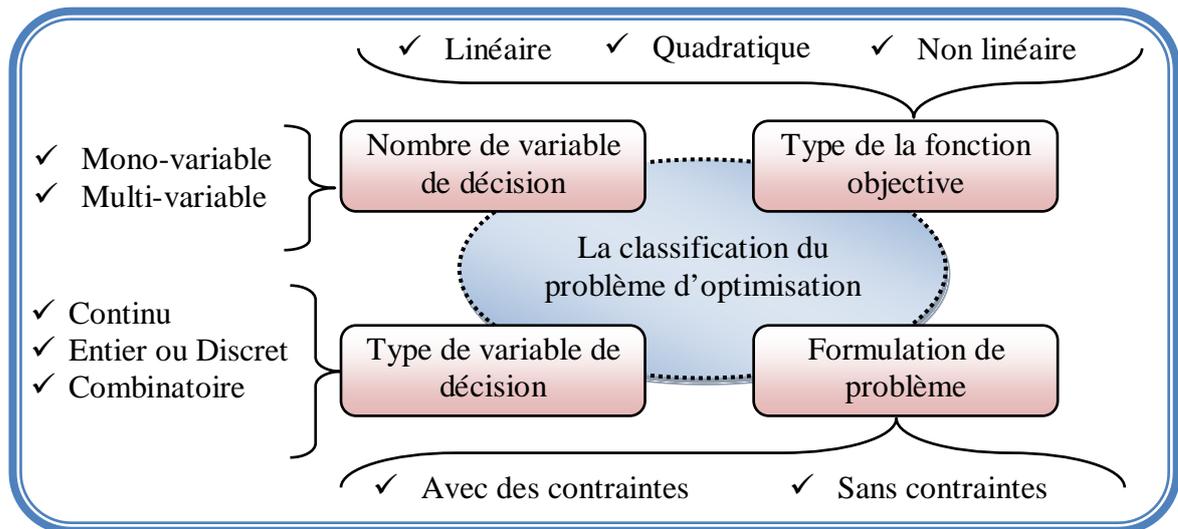


Figure. 3.1 : Différents critères du problème

### 3.4. 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 :

$$\text{Minimiser } f(x, u) \quad (\text{fonction à optimiser})$$

➤ *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.

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

- ❖ **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 suivante représente le principe de base d'une méthodologie d'optimisation [22, 23].

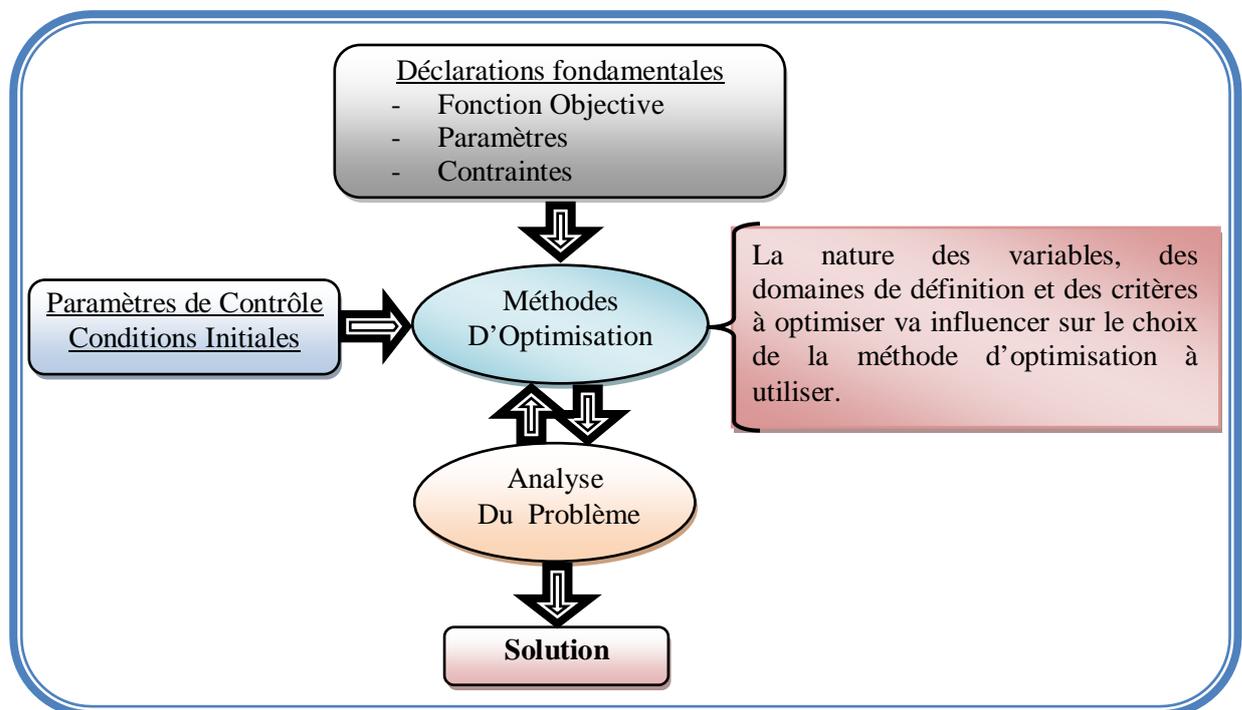


Figure. 3.2 : Principe de base d'une méthodologie d'optimisation.

### 3.5. 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 présentées 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, convergées vers un optimum local [24].

❖ Les méthodes stochastiques, contrairement à la plupart des méthodes déterministe, 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

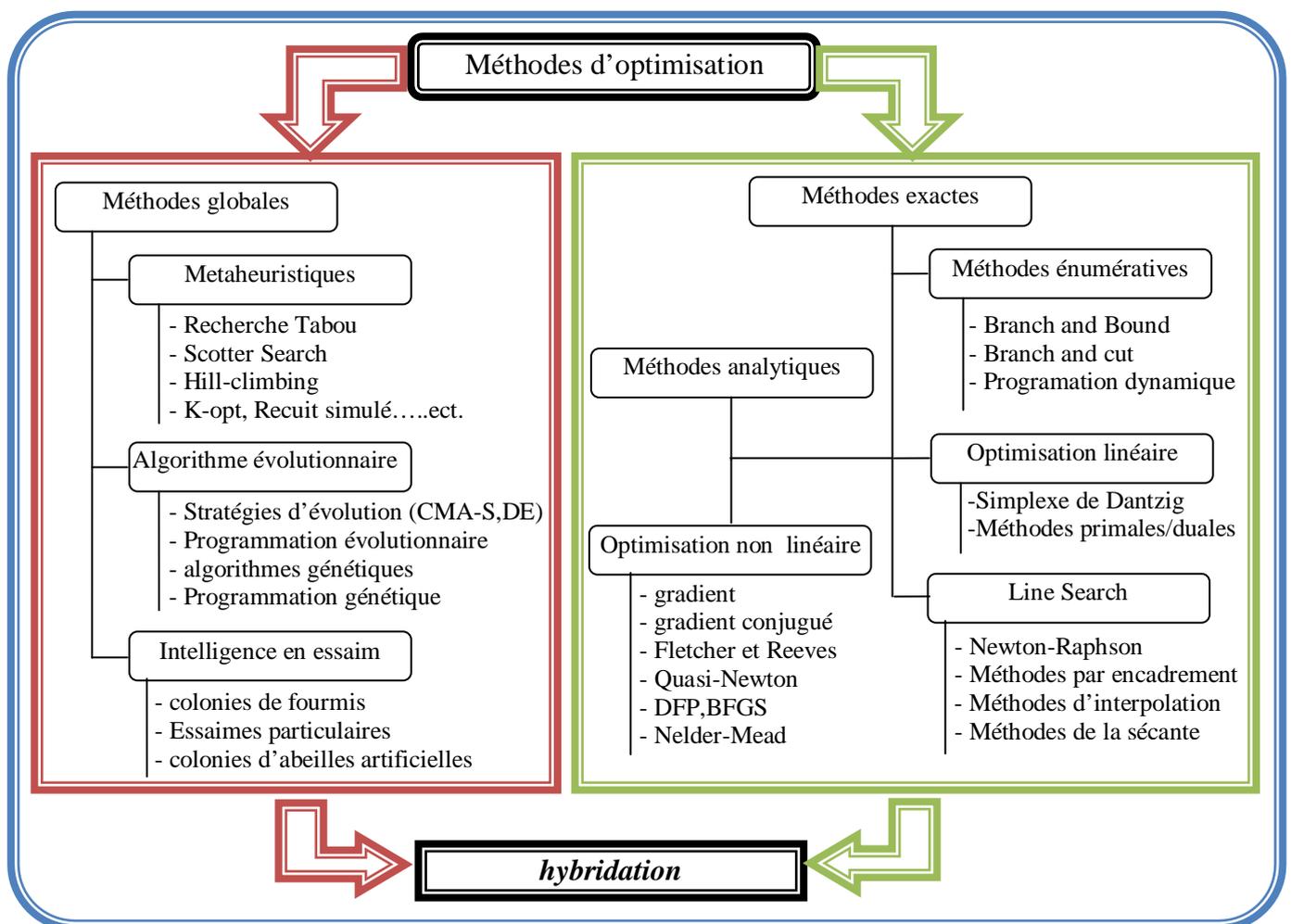


Figure. 3.3 : Une classification possible des différents types de méthodes d'optimisation.

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. 3.3 montre comment les différentes méthodes d'optimisation peuvent être classées en fonction du problème posé [25].

### 3.6. 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 [26], la méthode de gradient [23], la méthode de Newton [28], la programmation quadratique [29, 30], et la méthode de point intérieur [30, 31] 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.

#### 3.6.1. 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 [23].

Cette méthode peut être classer en deux catégorie de premier ordre et de deuxième ordre, le premier ordre basé sur une approximation linéaire en séries de Taylor avec initialisation de gradient, et le deuxième ordre basé sur l'approximation quadratique en séries de Taylor avec initialisation de gradient en utilisant l'Hessien  $H$ .

##### 3.6.1.1. 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 grande augmentation de  $f$ , on se déplace d'une quantité  $\lambda_0$  dans le sens opposé au gradient et on définit le point  $x_1$  :

$$x_1 = x_0 - \lambda_0 \frac{\nabla f(x_0)}{\|\nabla f(x_0)\|} \quad (3.1)$$

Cette procédure est répétée et engendre les points  $x_0, x_1, \dots, x_k$ . Ainsi, pas à pas, la distance entre le point d'indice  $k$  et l'optimum diminue.

$$x_{k+1} = x_k - \lambda_k \frac{\nabla f(x_k)}{\|\nabla f(x_k)\|} \quad \text{ou} \quad \forall k, \lambda_k > 0 \quad (3.2)$$

$\lambda_0$  C'est le déplacement à chaque itération.

Si  $\lambda_k$  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.

### 3.6.1.2. 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.

### 3.6.2. 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 [28, 32].

$$f(x^{(k+1)}) \cong f(x^{(k)}) + \left[ \nabla f(x^{(k)}) \right]^T \left[ \Delta x^{(k+1)} \right] + \frac{1}{2} \left[ \Delta x^{(k+1)} \right]^T \left[ \nabla^2 f(x^{(k)}) \right] \left[ \Delta x^{(k+1)} \right] \quad (3.3)$$

Ou:  $F: R^n \rightarrow R^n$  est régulière (au moins différentiable). On cherche donc  $x^{(*)}$  tel que  $F(x) = 0$

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

### 3.6.3. Programmation dynamique

La programmation dynamique est une technique classique de conception d'algorithmes pour résoudre des problèmes en temps polynomial. L'idée générale est de résoudre un problème en utilisant des solutions à des sous-problèmes précédemment résolus. Pour ce faire, la programmation dynamique applique une approche dite « du bas vers le haut », c'est-à-dire qu'on commence par résoudre les sous-problèmes les plus petits, et donc les plus faciles, pour ensuite résoudre des problèmes de plus en plus grands, jusqu'à finalement déterminer une solution du problème initial. Bien souvent, comme la programmation dynamique nécessite de stocker les solutions de tous les sous-problèmes résolus, il est également nécessaire de disposer d'un espace exponentiel [33].

### 3.6.4. La méthode du point intérieur

Une caractéristique intéressante des méthodes du point intérieur est leur faculté à traiter les inégalités non linéaires sans recourir à une identification de l'ensemble des contraintes actives, comme dans les méthodes de Newton. L'expérience a montré que cette technique est efficace pour les problèmes de grande taille comme ceux de l'OPF cependant, si le pas n'est pas correctement choisi, le sous problème linéaire peut avoir une solution non réalisable dans le domaine non linéaire original. En plus, cette méthode présente une sensibilité aux conditions initiales et dans la plupart des cas, elle est incapable de résoudre les problèmes fortement non linéaires [28].

### 3.6.5. La technique de programmation quadratique

Cette technique est une classe spéciale de la programmation non linéaire où la fonction objective est une approximation quadratique avec des contraintes linéaires. Ces techniques utilisent les dérivées du deuxième ordre pour améliorer la vitesse de convergence ainsi que la procédure quasi-Newtonienne, ou une approximation du Hessien est faite. Cependant, dans les méthodes quasi-Newtoniennes la matrice Hessienne réduite construite itérativement est une matrice pleine, ce qui peut rendre ces méthodes trop lentes si le nombre de variables est important [27].

## 3.7. 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 [33].

### 3.7.1. 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 [34]. Cette difficulté est illustrée dans la figure. 3.4.

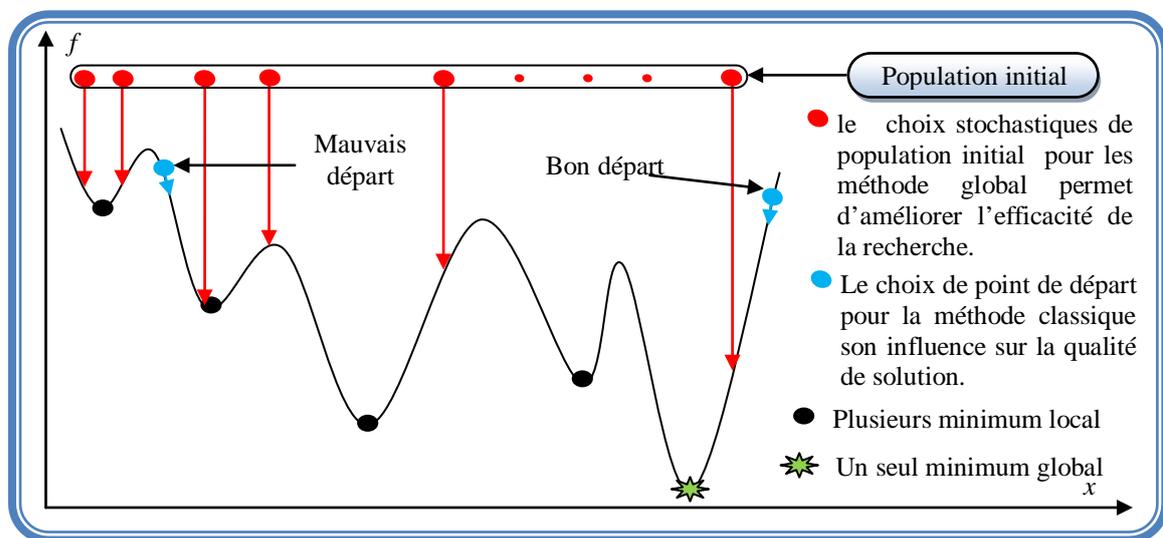


Figure. 3.4 : Minimum local et global d'une fonction.

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.

### **3.7.2. 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 [35], qui a posé les fondements théorique des algorithme génétique, passant du paradigme darwinien de l'évolution naturelle à celui de l'évolution artificielle. Une nouvelle étape est franchie de lorsque les travaux de G. Goldberg [36], 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 [37].

#### **3.7.2.1. 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.

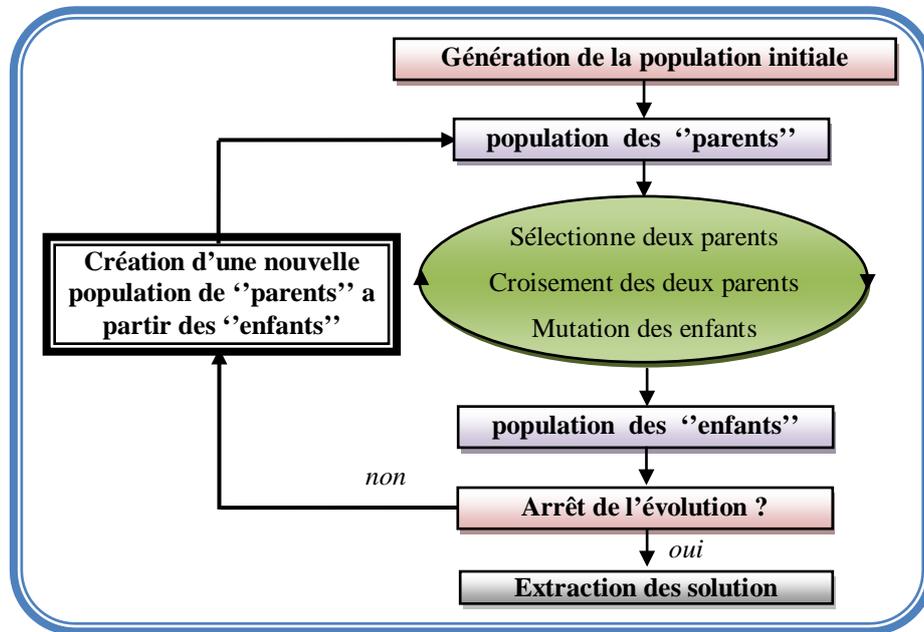


Figure. 3.5 : Organigramme de l'algorithme génétique

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 [38]. On peut conclure que le fonctionnement d'un (AG) est basé sur les phases suivantes:

### 3.7.2.2. 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.

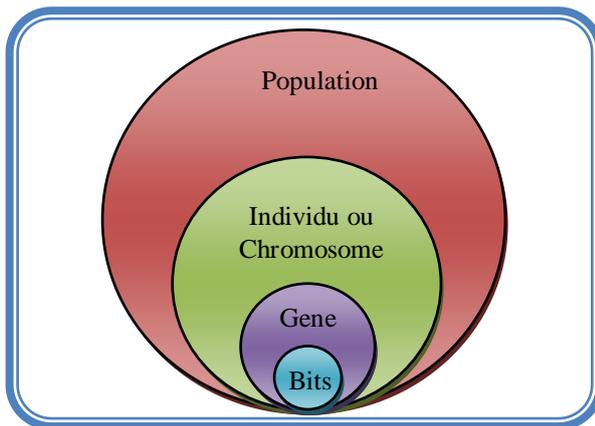


Figure. 3.6 : Les quatre niveaux d'organisation des AG

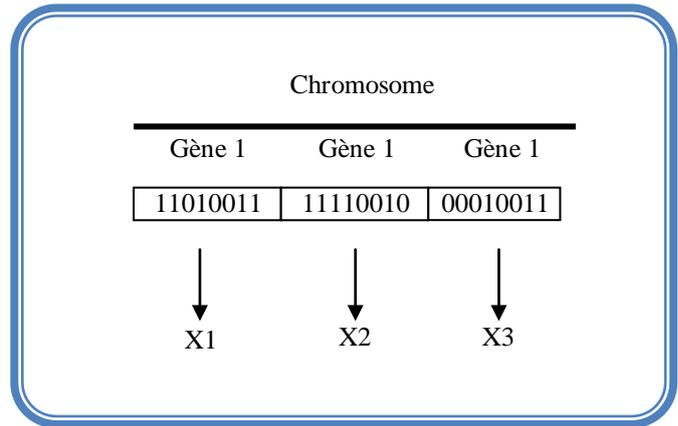


Figure. 3.7 : Illustration du codage des variables

### 3.7.2.1. 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 [39].
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.

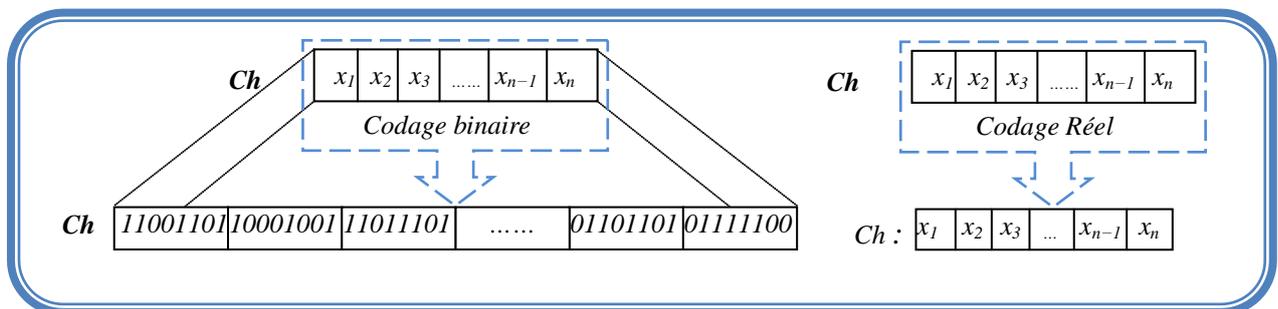


Figure. 3.8. : Le codage réel et le codage binaire

### 3.7.2.2. 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 transcodage (du binaire vers le réel). Les résultats donnés par [39] montrent que la représentation réelle aboutit souvent à une meilleure précision et un gain important en termes de temps d'exécution.

### 3.7.2.3. Les opérateurs utilisés par les AG

#### 3.7.2.3.1. 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 fort se survivent avec une probabilité croissante.

#### 3.7.2.3.2. Le croisement:

E 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. 3.9) :

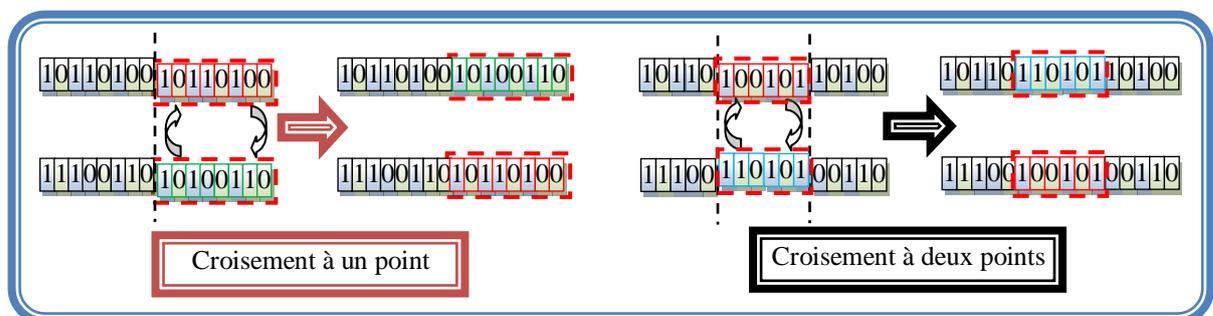


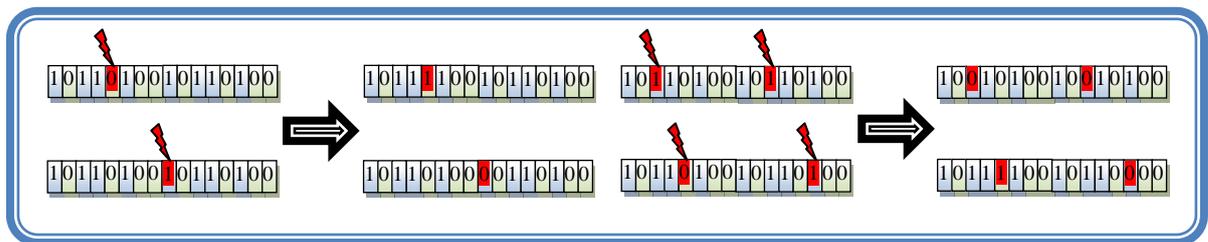
Figure. 3.9. : Représentation de l'opération du croisement

- 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.

### 3.7.2.3.3. 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. 3.10. : Représentation de l'opération de mutation*

aléatoirement, et le bit correspondant est inversé (voir figure. 3.10).

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  $p_m(k)$  décroît à chaque génération en respectant la borne minimale.

### 3.7.3. Optimisation par Essaims de particules

L'Optimisation par Essaim Particulaire (OEP) a été proposée par Kennedy et Eberhart en 1995 [40]. 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 [41].

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 [41].

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 particulaires.

### 3.7.3.1. 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  $\vec{X}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$  de l'espace de recherche, chaque particule possède également une vitesse  $\vec{V}_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$  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  $\vec{P}_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$  : 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  $\vec{G}_i = (g_{i1}, g_{i2}, \dots, g_{iD})$  (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 (3.4) et (3.5) :

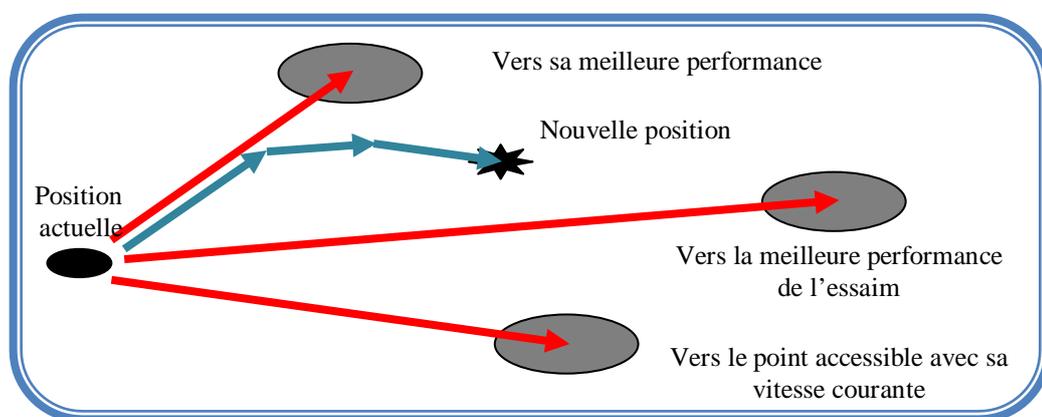


Figure. 3.11. : Représentation schématique du déplacement d'une particule

$$V(t+1) = w*V(t) + C_1 * rand_1 * (Pbest(t) - X(t)) + C_2 * rand_2 * (Gbest(t) - X(t)) \quad (3.4)$$

Avec :

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

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

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

$Gbest(t)$  : Position de la particule  $P(t)$  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.
- ❖  $C_2 * rand_2 * (Gbest(t) - X(t))$  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 [42, 43].

La position au temps  $t$  de la particule  $i$  est alors définie par (3.5).

$$X(t+1) = X(t) + V(t+1) \quad (3.5)$$

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 (3.4) et (3.5). 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. 3.11).  $N$  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"  $\varepsilon$  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

### 3.7.4. Optimisation par colonies de fourmis

La méta-heuristique d'optimisation par colonies de fourmis a été initialement introduite par Dorigo, Maniezzo et Coloni [44, 45] qui a été inspirée par les études sur le comportement des fourmis réelles effectuées par Deneubourg et al [46].

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) [47]. Par la suite, un nombre considérable d'applications de ACO a été proposé telles que l'affectation quadratique [48], le routage des véhicules [49], le problème de satisfaction de contraintes [50].

#### 3.7.4.1. Analogie biologique

L'algorithme ACO a été inspiré, essentiellement, par les études sur le comportement des fourmis réelles effectuées par Deneubourg et al [46]. 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.

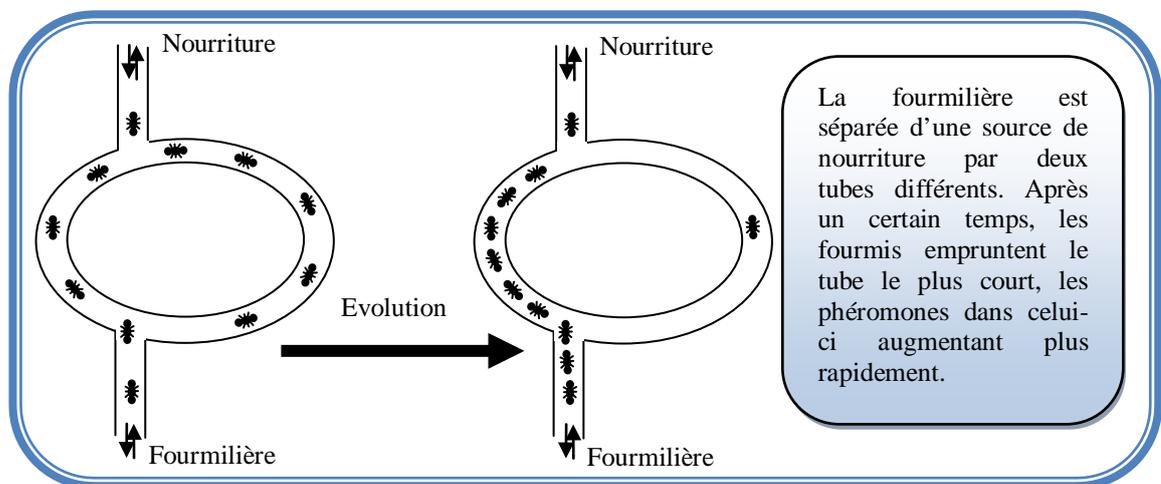


Figure. 3.12. : Une colonie de fourmis qui ramène de la

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 [51]. Ce processus peut être illustré par l'exemple de la (Figure. 3.12) [52].

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.

#### 3.7.4.2. Formulation mathématique

Dans l'algorithme colonies de Fourmis 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. Commenant 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 :

$$P_{ij}^k(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \times [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{y \in N_j^k} ([\tau_{iy}(t)]^\alpha \times [\eta_{iy}(t)]^\beta)} \text{ si } j \in N_j^k; 0 \text{ sinon} \quad (3.6)$$

$\tau_{ij}(t)$  : 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 a 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,  $\alpha, \beta$  : sont deux paramètres qui déterminent l'influence relative de la trace de phéromone et de l'information heuristique,  $N_j^k$  : 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  $\rho$  (c'est l'évaporation de phéromone) et, ensuite, en permettant à chaque fourmi doit déposer de la phéromone sur les arêtes qui appartiennent à son tour. Ainsi la formule de mise à jour de phéromone est comme suit :

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho) \times \tau_{ij}(t) + \sum_{k=1}^{nbAnts} \Delta\tau_{ij}^k \quad (3.7)$$

Avec  $0 \leq \rho \leq 1$  et  $nbAnts$  le nombre de fourmis.

Le paramètre  $\rho$  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 :

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{L^k} & \text{si } (i, j) \in Tabou^k \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.8)$$

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 [41].

### 3.8. 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. 3.13 [53-56].

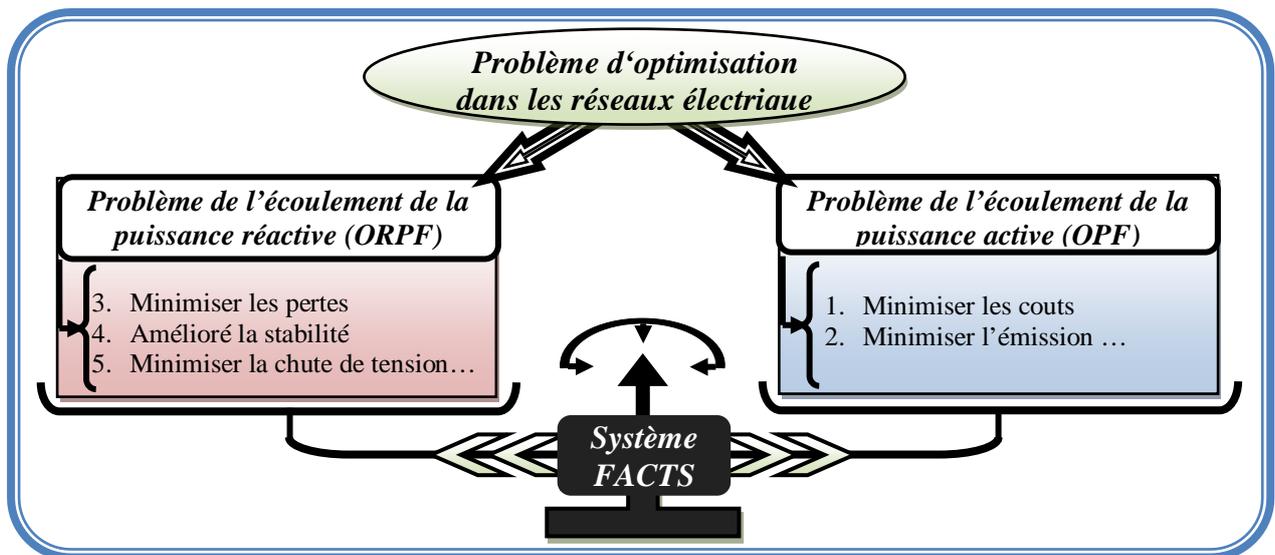


Figure. 3.13 Le problème d'optimisation dans les réseaux électriques

### 3.9. Formulation mathématiques :

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

#### 4.3.1 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 :

$$f_1 = \min DP = \min P_{Loss}(x_1, x_2) = \sum_{k=1}^{nl} g_k [V_i^2 + V_j^2 - 2*V_i V_j \cos \theta_{ij}] \quad (3.9)$$

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,  $\theta_{ij}$  est la différence angulaire entre les angles de jeux de barres  $i$  et  $j$

#### 4.3.2 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 :

$$f_2 = \min DV = \sum_{i=1}^{npq} |V_i - V^{ref}| \quad (3.10)$$

Avec :

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

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

#### 4.3.3 Troisième fonction objective (indice de stabilité de tension $L\_index$ ) :

La stabilité de tension, par définition, se rapporte à la capacité d'un système énergétique, de conserver son régime établie (équilibrer permanent) suite à une perturbation donnée, un point de fonctionnement stable se manifeste, par le maintien des valeurs de tensions acceptables à tous les jeux de barres du système [57]. La stabilité de tension dépend donc de la capacité de maintenir/restaurer l'équilibre de ce système entre la demande de la charge et la fourniture de la puissance à celle-ci. L'instabilité résultante se produit très souvent sous forme de décroissance progressive de tensions dans quelques jeux de barres.

Enfin, la stabilité de tension peut être classée en deux catégories; la stabilité de tension aux grandes et aux petites perturbations:

- ❖ Stabilité de tension aux grandes perturbations. Le souci dans ce cas est de maintenir des tensions normales aux jeux de barres après avoir subi une grande perturbation. La stabilité

est déterminée ici par les caractéristiques du système et de la charge, et par les interactions entre les différents dispositifs de commande de tension dans ce système [58-59].

❖ Stabilité de tension aux petites perturbations. Dans ce cas, les caractéristiques de la charge et des dispositifs de commande déterminent la capacité du système à maintenir les tensions équilibrées.

Beaucoup de critères ont été développés pour étudier le problème de stabilité de tension qui correspond à un point d'équilibre stable dans les réseaux électriques. Le critère de stabilité de tension classique le plus connue est celui de rapport de dérivée de la puissance réactive générée par rapport au niveau de tension aux jeux de barre de contrôle ( $\partial Q/\partial V$ ). Un autre critère ( $\partial Q_G/\partial Q_L$ ) qui est basé sur la relation entre la puissance réactive générée  $Q_G(V)$  et la puissance réactive demandée  $Q_L(V)$  est utilisé souvent pour envisager ce problème [60-64].

Dans notre travail, on s'intéresse à étudier la stabilité de tension en appliquant l'indice appelé L-index proposé dans la référence [60].  $L\_index$  donne une image totale de tensions au niveaux des jeux de barres de charges, ces valeurs varient dans l'intervalle [0,1], la valeur 0 indique qu'aucune charge n'est connectée, tandis que la valeur 1 indique qu'il ya lieu d'un écroulement de tension, le jeux de barre avec la valeur de L-index la plus haute sera le jeu de barre le plus critique dans ce système.

#### 4.3.3.1 Formulation de l'index de stabilité de tension ( $L\_index$ )

Considérons un réseau électrique de N jeux de barres. Le rapport entre tension et le courant peut être exprimé par l'expression suivante:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_G \\ \bar{I}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{GG} & \bar{Y}_{GL} \\ \bar{Y}_{LG} & \bar{Y}_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_G \\ \bar{V}_L \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

On peut écrire cette relation avec une autre formulation comme suit :

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_L \\ \bar{I}_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{LL} & \bar{F}_{LG} \\ \bar{K}_{GL} & \bar{Y}_{GG} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_L \\ \bar{V}_G \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

avec:

$$\bar{F}_{LG} = -[\bar{Y}_{LL}]^{-1}[\bar{Y}_{LG}] \quad (3.13)$$

L'indice de stabilité de tension  $L\_index$  peut être donné par l'équation sous dessous:

$$L\_index = \max(L_j) \quad (3.14)$$

$L_j$  se calcule avec la manière suivante :

$$L_j = \left| 1 - \sum_{i=1}^{Ng} \overline{F}_{ji} \frac{\overline{V}_i}{\overline{V}_j} \angle(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \right| \quad (3.15)$$

Avec :  $V_i, V_j$  sont les tensions de jeux de barres de contrôle et de charge respectivement,  $\delta_i, \delta_j$  sont les angles de phase de tension; les valeurs de  $\overline{F}_{ji}$  sont ainsi obtenues de la matrice  $\overline{F}_{LG}$ .

L'indice ( $L\_index$ ) est utilisé pour l'évaluation de la distance de l'état réel du système à la limite de stabilité. Pour qu'une amélioration de la stabilité de tension est faite, une minimisation de ce facteur est introduit suivant le critère sous dessous:

$$f_3 = \min(L\_index) = \min(\max(L_j)) \quad (3.16)$$

#### 4.3.4 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:

$$\text{Minimiser } J_i(x, u) \quad i = 1, \dots, N_{obj} \quad (3.17)$$

$$\text{Soumis à: } g(x, u) = 0 \quad (3.18)$$

$$h(x, u) = 0 \quad (3.19)$$

Où  $J_i$  est l'ith 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 [65-66] :

$$F = \min((1-U) * f_1 + U * f_2), \quad U \in [0,1] \quad (3.20)$$

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

#### 4.3.5 Les Contraintes :

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

##### 4.3.5.1 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.

$$P_i - V_i \sum_j^{Nb} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \quad \text{avec } i = 1:Nb - 1 \quad (3.21)$$

$$Q_i - V_i \sum_{j=1}^{Nb} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \quad \text{avec } i = 1:Npq \quad (3.22)$$

Sachant qu'est  $Nb$  le nombre totale de bus,  $N_{pq}$  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.

#### 4.3.5.2 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 [67]:

-La puissance active du jeu de barre de référence

$$P_{g,slack}^{\min} \leq P_{g,slack} \leq P_{g,slack}^{\max} \quad (3.23)$$

-Les tensions aux niveaux des jeux de barres de control

$$V_{g,i}^{\min} \leq V_{g,i} \leq V_{g,i}^{\max} \quad (3.24)$$

-Les tensions aux niveaux des jeux de barres de charge

$$V_{L,i}^{\min} \leq V_{L,i} \leq V_{L,i}^{\max} \quad (3.25)$$

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

$$Q_{g,i}^{\min} \leq Q_{g,i} \leq Q_{g,i}^{\max} \quad (3.26)$$

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

$$Q_{STATCOM}^{\min} \leq Q_{STATCOM} \leq Q_{STATCOM}^{\max} \quad (3.27)$$

Les limites des variables de contrôle sont récapitulées dans le tableau 3.1

**Tableau. 3.1.** Les variables de décision du problème

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

### 3.10. 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 [68-70]. L'organigramme de base est représenté par la figure. 3.14.

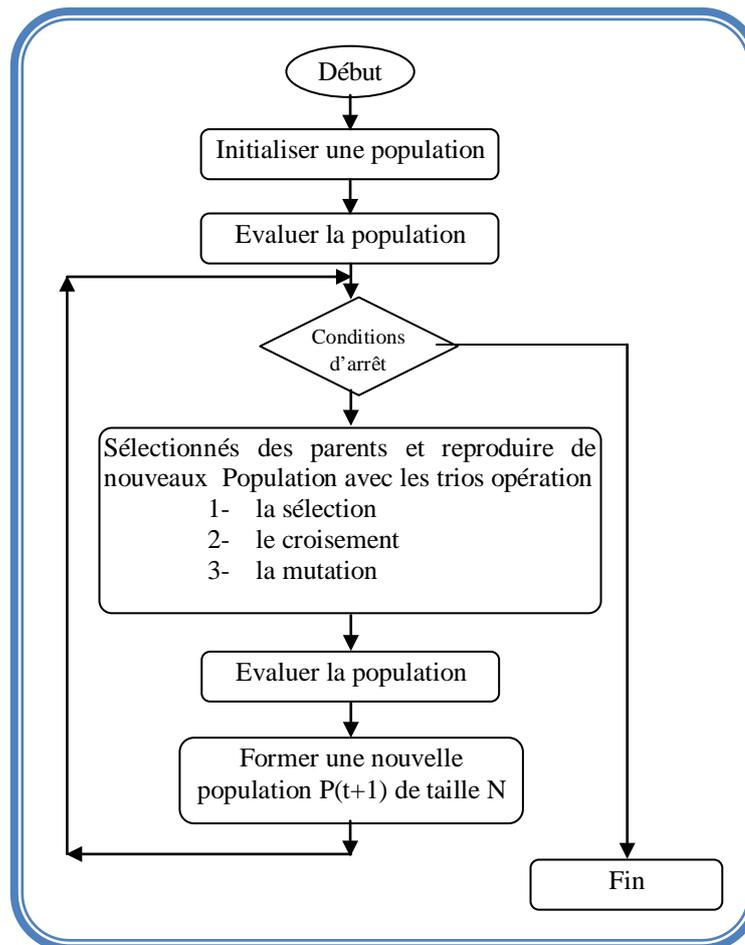


Figure. 3.14 : Organigramme de l'algorithme génétique

### 3.11. Algorithme d'essais de particules

Dans cette partie nous avons utilisés l'algorithme standard de PSO ainsi que trois variantes [71-73] pour optimiser la puissance réactive avec considération des systèmes FACTS. L'organigramme de PSO standard est présenté dans la figure. 3.15.

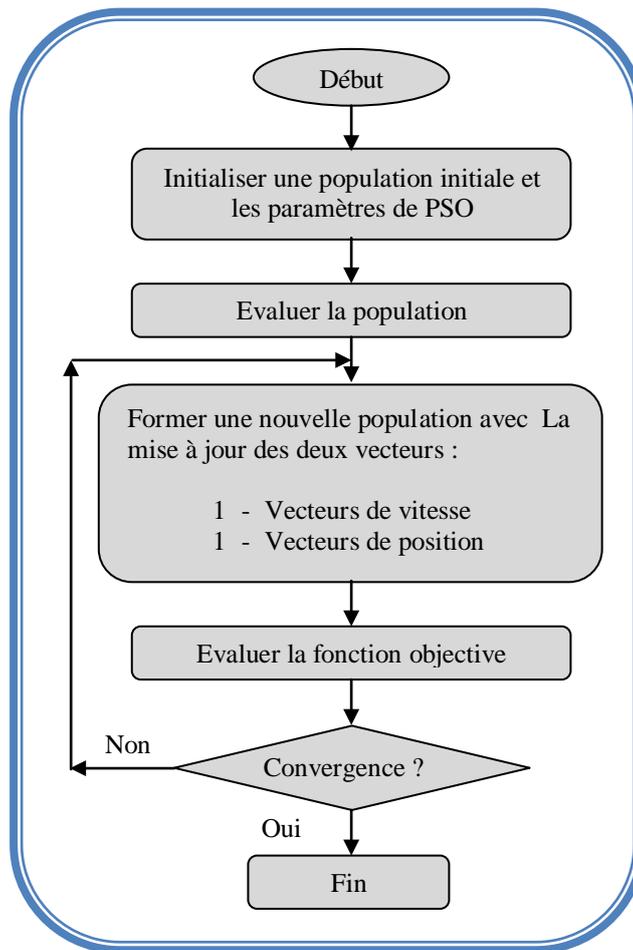


Figure. 3.15 Organigramme de l'algorithme de PSO

#### 4.4.2.1. Algorithme de PSO avec le coefficient d'inertie (PSO-CI)

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

$$V(t+1) = w * V(t) + C_1 rand_1 * (Pbest_i - X(t)) + C_2 rand_2 * (Gbest_i - X(t)) \quad (3.28)$$

La combinaison des paramètres du coefficient d'inertie ( $w$ ) et l'intensité d'attraction ( $C_1$  et  $C_2$ ) permet de régler l'équilibre entre les phases de diversification et d'intensification du processus de recherche. [43] ont démontré qu'une bonne convergence peut être obtenue en rendant dépendants ces paramètres.

$$w = (w_{\max} - w_{\min}) * \frac{(iter_{\max} - iter)}{iter_{\max}} + w_{\min} \quad (3.29)$$

Avec

$w$  : sont coefficient d'inertie,  $w_{\min}$  est la valeur initiale de coefficient d'inertie et  $w_{\max}$  sont la valeur finale de ce coefficient. Avec  $iter$  représente l'itération courante et  $iter_{\max}$  sont le nombre maximale de l'itération.

#### 4.4.2.2. Algorithme de PSO avec le facteur de constriction $K$ (PSO-FC)

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

$$\begin{cases} V(t+1) = K(V(t) + C_1 rand_1 * (Pbest_i - X(t)) + C_2 rand_2 * (Gbest_i - X(t))) \\ X(t+1) = X(t) + V(t+1) \end{cases} \quad (3.30)$$

Avec

$$K = \frac{2}{|2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}|} \quad (3.31)$$

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

Dans [43], de nombreux tests sont menés pour déterminer les valeurs optimales de  $C_1$  et  $C_2$ . Dans la majorité des cas, on utilise  $\varphi = 4.1$  et  $C_1 = C_2 = 2.05$ ; ce qui donne un coefficient  $K$  approximativement égal à  $K = 0.729$ .

#### 4.4.2.3. Algorithme de PSO avec Coefficients d'Accélération variable PSO-TVAC

Dans ce cas, les coefficients cognitif et social  $C_1, C_2$  ne sont plus constants mais variables en fonction de génération (itération), autrement dit dans le temps dont le but est de guider l'exploration tantôt vers la direction de l'expérience de l'individu (coefficient cognitif dominant) tantôt vers la direction de l'expérience de groupe (coefficient social dominant). Enfin l'interaction de ces deux facteurs dirige l'exploration vers la solution voulue [73].

$$\begin{cases} V(t+1) = w * V(t) + C_1 * rand_1 * (Pbest_i - X(t)) + C_2 * rand_2 * (Gbest_i - X(t)) \\ X(t+1) = X(t) + V(t+1) \end{cases} \quad (3.32)$$

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

$$\begin{cases} C_1 = (C_{1f} - C_{1i}) \frac{iter}{iter_{max}} + C_{1i} \\ C_2 = (C_{2f} - C_{2i}) \frac{iter}{iter_{max}} + C_{2i} \end{cases} \quad (3.33)$$

Avec  $C_{1f}$ ,  $C_{1i}$ ,  $C_{2f}$  et  $C_{2i}$  sont les coefficients sociale cognitive respectivement d'accélération initial et final [73]. Pour le coefficient d'inertie sont donné par l'équation (3.29)

### 3.12. 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).

#### 4.4.3.1. 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 [74]. Dorigo et Stutzle dans [75] a 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 3.2).

**Tableau. 3.2.** Les paramètres de l'algorithme ACO standard

| Les paramètres constants de l'algorithme ACO |                             | Gammes des paramètres variables de l'ACO |                                      |
|--|-----------------------------|--|--------------------------------------|
| $\alpha$                                     | 1                           | $\beta$                                  | $0 \leq \beta \leq 15$               |
| $\gamma$                                     | 0                           | $\rho$                                   | $0 \leq \rho \leq 1$                 |
| $\tau_0$                                     | 1/(n* longueur du tour)     | $Q_0$                                    | $0 \leq Q_0 \leq 1$                  |
| $num\_ants$                                  | N=nombre de cités a visiter | $NC$                                     | $10 \leq NC (max\_cycles) \leq 1000$ |

#### 4.4.3.2. Organigramme de la technique ACO appliquée à l'ORPF

L'organigramme de la méthode ACO standard est présenté dans la figure. 3.16, 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  $\tau_0$  est aussi donnée à cette étape

**b. Etape2 : 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. Etape 3: Répartition des fourmis**

Dans cette étape, les fourmis sont réparties en basant sur les niveaux de  $\tau$  et  $\eta$ . Selon l'équation (3.6) chaque fourmi choisit le prochain point vers le quel elle déplace en prenant en considération les valeurs de  $\tau$  et  $\eta$ . 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.

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \rho \cdot \tau_0 \quad (3.34)$$

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,

$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \rho \cdot \Delta \tau_{ij}(t)$ , 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 atteint la valeur maximale prédéfinie ou qu'une solution de fonction objectif acceptable est trouvée.

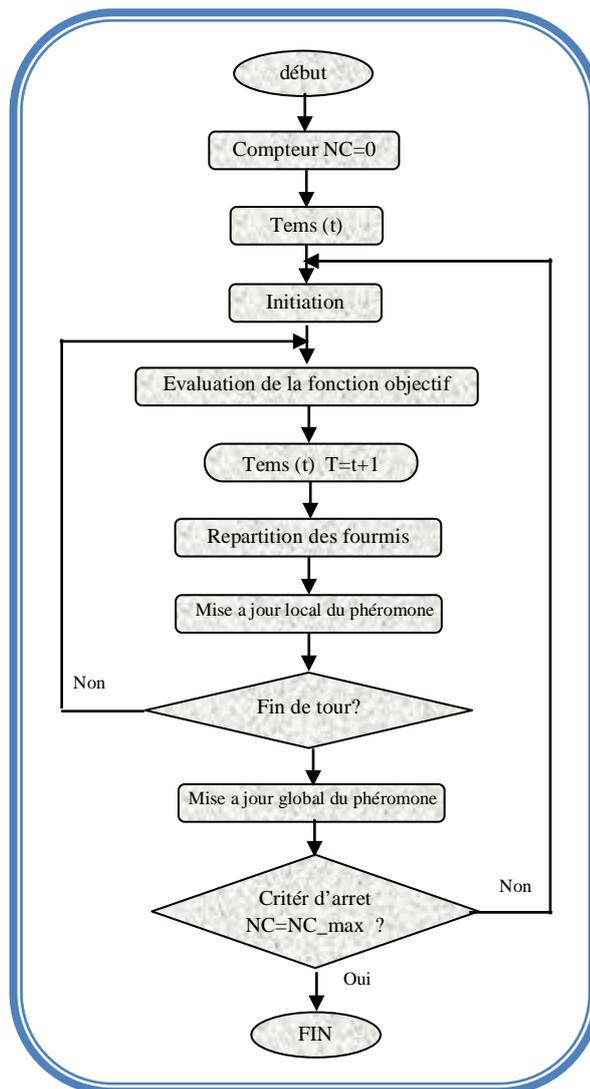


Figure. 3.16 L'organigramme de l'algorithme d'ACO

### Conclusion :

Ce chapitre représente une introduction générale aux méthodes d'optimisation déterministes et les techniques d'optimisation globales (métaheuristiques) 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 4:**

**Tests et Application**

---

# Chapitre 4

## Tests et Application

### 4.1 Introduction:

Dans ce chapitre nous nous intéressons à résoudre le problème de l'optimisation de l'énergie réactive et ce par l'intégration et l'optimisation des paramètres de deux dispositifs FACTS, le premier dispositif est un compensateur shunt STATCOM, tandis que le deuxième dispositif est un contrôleur série TCSC et ce par utilisation des méthodes d'optimisation globales expliquées dans le troisième chapitre. A cet effet nous avons appliqué les algorithmes génétiques, l'optimisation par essais de particules, l'algorithme de colonie de fourmi, l'algorithme d'optimisation par essais de particules, et ses trois versions modifiées à savoir : Algorithme d'optimisation par essais de particules avec coefficient intérieur PSO-IC, algorithme d'optimisation par essais de particules avec facteur de construction PSO-FC, algorithme d'optimisation par essais de particules avec coefficient de distriiction et celle par coefficient d'accélération variable PSO-TVAC. 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 ( $DV$ ).
- ✓ Amélioration de la stabilité de tension en utilisant l'indice ( $L\_index$ ).

Toutes les approches proposées ont été développées sous l'environnement MATLAB version 7.1 et ce par utilisation d'un ordinateur doté d'un processeur Intel Pentium® Dual-Core, 2.50 GHz et une mémoire vive de 2 GO. Chaque programme inclut une procédure efficace pour le calcul de l'écoulement de puissance par la l'algorithme de Newton – Raphson .

## 4.2 Test d'application 1: Minimisation des Pertes Actives par AG et PSO.

Ce premier test est consacré d'appliquer l'algorithme génétique et l'essaim de particules à la minimisation des pertes actives de transmission tout en améliorant la planification de l'écoulement de la puissance réactive, en effet les résultats obtenus représentent une meilleure configuration des niveaux de tensions des jeux de barres de contrôles qui conduisent à une minimisation drastique de ces pertes. Les algorithmes élaborés sont testés sur les réseaux électriques types IEEE14-Bus et IEEE30-Bus, les résultats trouvés confirment le rôle de l'optimisation de point de vue qualité de solution et robustesse des approches proposées.

### 4.2.1 Fonction objectif

La fonction objective à minimiser représente les pertes actives de transport  $DP$ . Cette fonction est modélisée par l'équation (3.9) :

### 4.2.2 Les Contraintes

Les contraintes de sécurité considérées dans notre optimisation sont les limites des modules et phases de tensions ainsi que les puissances actives et réactives des générateurs de production. Ces contraintes sont définies respectivement par les équations (3.23-3.26) :

### 4.2.3 Réseaux test

Le premier test est effectué sur le réseau IEEE 14-Bus ayant les caractéristiques suivantes (5 générateurs aux nœuds 1,2, 3, 6 et 8 avec 20 branches et 03 transformateurs (Annexe A).

Un second test est appliqué sur le réseau test IEEE 30-Bus qui a 06 générateurs de production (installés aux nœuds 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 B).

Paramètres de simulation de deux algorithmes:

### 4.2.4 Paramètres de simulation

Les paramètres de simulation des deux algorithmes sont portés de [76] et représentés dans le tableau 4.1.

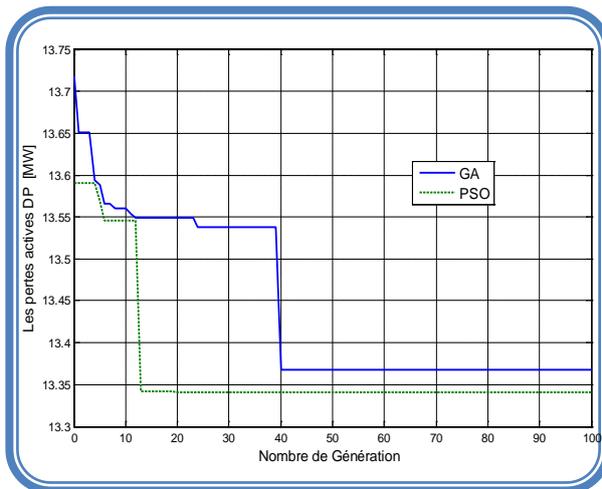
**Tableau. 4.1** Paramètres de simulation adoptés pour les deux méthodes

| GA                         | PSO                       |
|----------------------------|---------------------------|
| Taille de la population 20 | Population size 20        |
| Max. N. de générations 100 | Max. N.de générations 100 |
| Sélection 0.5              | $C_1 = C_3 = 1$           |
| Croisement (CR) 0.5        | $C_2 = 3$                 |
| Mutation 0.15              | $W_{min} = 0.4$           |
| -                          | $W_{max} = 0.9$           |

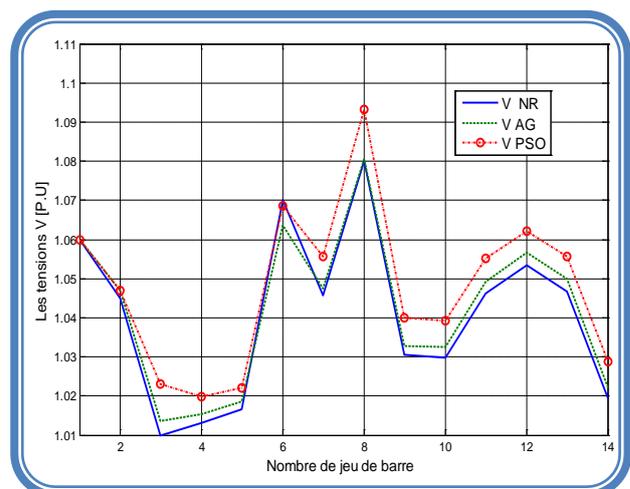
### 4.2.5 Résultats de simulations

**Tableau. 4.2** Résultats obtenus par application des deux approches: PSO et GA

|              | IEEE 14-Bus |        |        | IEEE 30-Bus |        |        |
|--------------|-------------|--------|--------|-------------|--------|--------|
|              | NR          | GA     | PSO    | NR          | GA     | PSO    |
| V-min (P.U)  | 1.01        | 1.0137 | 1.0199 | 0.995       | 1.008  | 1.009  |
| V-max (P.U)  | 1.080       | 1.0814 | 1.1    | 1.082       | 1.1    | 1.1    |
| DP(MW)       | 13.593      | 13.368 | 13.341 | 17.528      | 17.455 | 17.385 |
| N° Itération | -           | 42     | 12     | -           | 43     | 35     |
| Temps (s)    |             | 17.017 | 10     |             | 43.560 | 36.40  |



**Figure. 4.1** : Caractéristiques de convergence de l'AG et de la PSO testée sur le réseau IEEE 14-Bus.



**Figure. 4.2** : Niveaux de tensions des jeux de barres calculés par les deux méthodes d'optimisation est testées sur le Réseau test type IEEE14-Bus.

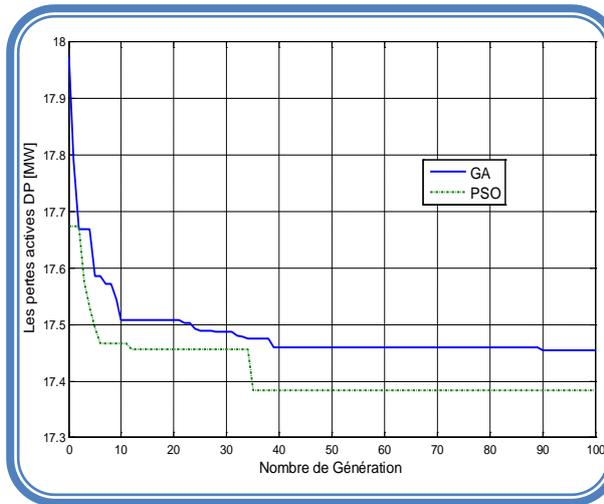
### 4.2.6 Interprétation des résultats : réseau test IEEE 14-Bus

La figure. 4.1, nous permet de constater, en premier lieu que l'algorithme PSO converge vers l'optimum globale dès la douzième itération (**12**) tandis que la convergence de l'algorithme GA est atteinte à l'itération (**42**) avec une valeur optimal inférieur par rapport à l'algorithme PSO. Ceci prouve que le pouvoir de convergence vers l'optimum globale par la méthode PSO dépasse celui de la méthode des algorithmes génétiques (GA), ceci aura un impact direct sur le temps nécessaire à la convergence des deux méthodes. Notons que le temps nécessaire à la convergence de PSO, est de l'ordre de **10s** alors que celui nécessaire à la convergence de la méthode (AG) approche les **17s**. Dans un second lieu, les pertes actives de transmission évaluées par la méthode PSO vaut **13.341 MW** alors que celles calculées par la méthode AG sont égales à **13.368 MW**.

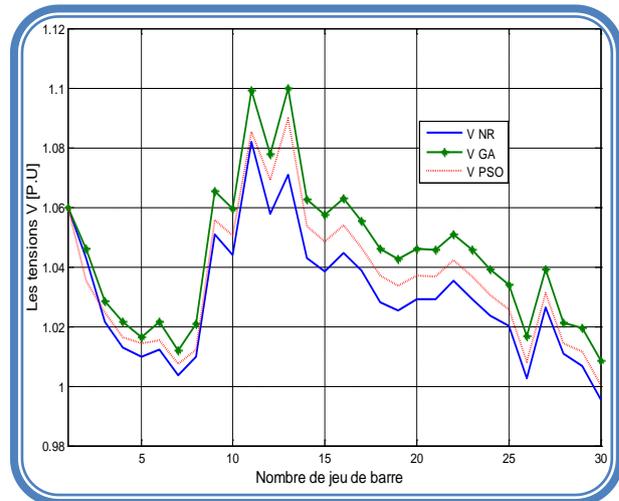
### 4.2.7 Interprétation des résultats: réseau test IEEE 30-Bus

Dans ce test, la robustesse de l'algorithme PSO est plus remarquable. L'optimum globale est atteint dès la dixième (**35**) itération inversement à ce qui est obtenu par la méthode AG. Une

légère différence de l'ordre de **0.07 MW** entre les pertes calculées par les deux méthodes, est à signaler.



**Figure. 4.3 :** Caractéristiques de convergence de l'AG et de PSO appliquées au réseau test type IEEE 30-Bus.



**Figure. 4.4 :** Niveaux de tensions des jeux de barres calculés par les deux méthodes d'optimisation testées sur le Réseau test type IEEE30-Bus.

Les niveaux de tensions des jeux de barres trouvés par l'algorithme PSO testé sur le réseau IEEE 14-Bus sont dans l'intervalle [0.9, 1.1] pu, adoptée initialement pour l'algorithme. Cette nouvelle caractéristique ne fera que confirmer et renforcer fortement nos précédentes constatations en matière de robustesse de la méthode utilisée. Il est important de noter qu'aucune violation des contraintes n'est à signaler ce cas précis. Outre ce qui a été constaté jusqu'à présent, la figure. 4.3 indique que la caractéristique de convergence calculée par l'algorithme PSO est très proche à ceux obtenus par la méthode AG. La figure. 4.4 montre clairement l'évolution des tensions aux niveaux des jeux de barres trouvées par les deux méthodes d'optimisation, PSO et GA, les tensions obtenues sont dans leurs limites admissibles.

Une comparaison entre les tensions de jeux de barres évaluées Par la PSO et l'AG et celles données par la méthode de Newton-Raphson (NR) prouve grandement le rôle de l'optimisation.

#### 4.2.8 Test de la variation de charge: IEEE 30-Bus

Pour illustrer et mettre en évidence l'effet de la variation de la charge sur la qualité des résultats ainsi obtenus par application des deux algorithmes PSO et AG, une variation de la charge au niveau de puissance de la demande est introduit comme suit.

**Cas 1 :** La charge nominale du réseau test IEEE-30-Bus.

**Cas 2 :** Réduction de la puissance demandée de l'ordre 10% appliquée sur la charge totale du réseau test IEEE-30-Bus.

**Cas 3:** Augmentation de la puissance demandée de l'ordre de 20% appliquée sur la charge totale du réseau test IEEE-30-Bus.

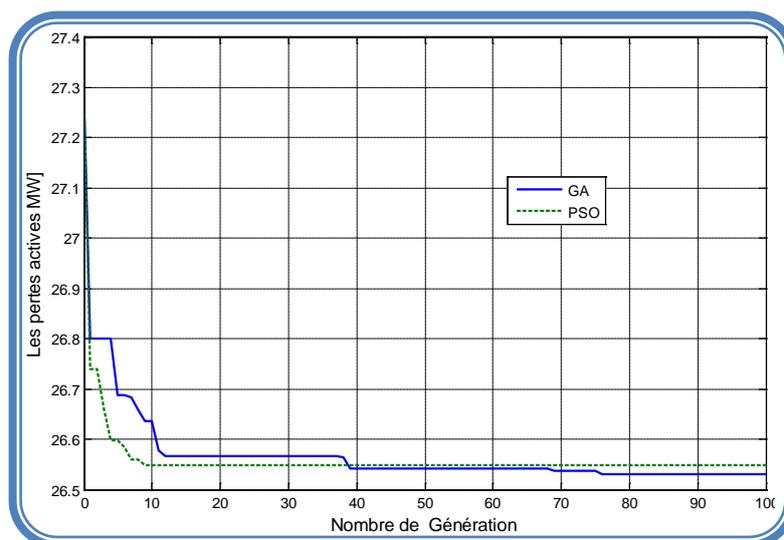


Figure. 4.5 : Caractéristiques de convergence de DP pour le troisième cas

La figure. 4.9 représente la convergence de la fonction objective (minimisation des pertes totales  $DP$ ) pour un coefficient de surcharge égale à 20% par rapport à la charge nominale.

Tableau. 4.3 Comparaison des pertes évaluées par la PSO et l'AG dans le cas d'une augmentation de la charge nominale de 20% de sa valeur nominale: réseau test type IEEE-30-Bus.

|                       | Cas 1 (MW) | Cas 2 (MW) | Cas 3 (MW) |
|-----------------------|------------|------------|------------|
| NR                    | 17.528     | 13.788     | 27.163     |
| Optimisation avec GA  | 17.455     | 13.718     | 26.530     |
| Optimisation avec PSO | 17.384     | 13.724     | 26.548     |

La différence des pertes entre les deux méthodes d'optimisation est pratiquement insignifiante, voire négligeable. Ceci ne fera que confirmer une autre fois nos constatations en matière de robustesse de la convergence de PSO.

#### 4.2.9 Conclusion

Dans cette première phase nous avons introduit les méthodes d'optimisation globales en vue de minimiser les pertes actives de transmission afin d'assurer une meilleure planification des puissances réactives. L'objectif principal est d'augmenter la capacité de transport tout en gardant une sécurité totale sur les éléments de notre réseau, notamment, les lignes de transmission, les générateurs de production et aussi l'obtention d'une meilleure garantie en matière d'une continuité de service d'une manière permanente dans le temps. Pour cela deux méthodes d'optimisation stochastique sont utilisées :

- 1- Optimisation par Essaim de Particules (PSO),
- 2- Optimisation par algorithmes génétiques (AG).

Une étude comparative entre les deux algorithmes PSO et AG a été proposée. Les résultats obtenus permettent de conclure que :

- 1- L'algorithme d'optimisation par PSO prouve sa qualité de convergence sur plusieurs tests effectués.
- 2- La différence sur les pertes estimées par les deux méthodes reste très minime voire négligeable ce qui suggère la convergence simultanée vers la même solution quasi-optimale.
- 3- Une remarquable robustesse de PSO est vérifiée sur la variation des tensions des jeux de barres de contrôle lors des générations est à signaler.

### **4.3 Test d'application 2: Optimisation de la Puissance Réactive par utilisation du STATCOM.**

Ce test représente l'utilisation du compensateur statique synchrone (STATCOM), comme un moyen de compensation dont le but est de minimiser les pertes actives dans les lignes de transport d'une part et de contrôler les déviations de tension d'autre part, cela est réalisé par l'ajustement flexible des paramètres de STATCOM et les niveaux de tension de jeux de barres de contrôle simultanément [77].

Ce cas d'étude comporte deux parties, la première représente l'application des algorithmes génétiques, la deuxième utilise l'algorithme d'optimisation par essaims de particules avec trois variantes d'optimisation.

#### **4.3.1 Choix de la Position Optimale d'installation du STATCOM.**

Dans ce test nous avons utilisé l'indice de stabilité de tension basé sur l'augmentation continue de la charge (Continuation power flow) pour l'installation des Contrôleurs STATCOM.

#### **4.3.2 La fonction objective**

La fonction objective à minimiser dans ce test représente les pertes actives de transport  $DP$  qui est modélisée par l'équation (3.9), et la déviation de tension  $DV$  par l'équation (3.10).

#### **4.3.3 Les Contraintes**

Les contraintes de sécurité considérées sont les limites des modules et phases des tensions ainsi que les puissances actives et réactives des générateurs. Ces contraintes sont définies respectivement par les équations (3.23-3.27) :

#### 4.3.4 Réseau test

Nous avons procédé d'étudier l'optimisation mono-objectifs et multi-objectifs qui traite à la fois la minimisation des pertes de transmission et la déviation de tension via la recherche du meilleur emplacement de dispositif Shunt STATCOM, en appliquant notre algorithme sur le réseau test IEEE 30-Bus (MATPOWER 3.0).

#### 4.3.5 Optimisation de la Puissance Réactive par un Contrôle Flexible du STATCOM en utilisant les Algorithmes Génétiques.

L'algorithme élaboré dans ce test repose sur l'utilisation des algorithmes génétiques qui font une recherche stochastique pour atteindre les paramètres optimaux du vecteur de control, ce vecteur est composé des tensions de jeux de barres de control ainsi les paramètres d'ajustement de ce dispositif de compensation (STATCOM) [67]. Le tableau sous dessous présente les résultats de calcul pour les trois cas suivants :

- ❖ **Cas 1** : sans optimisation des paramètres du STATCOM.
- ❖ **Cas 2** : avec optimisation des paramètres du STATCOM pour minimiser les pertes  $DP$ .
- ❖ **Cas 3** : avec optimisation des paramètres du STATCOM pour minimiser les déviations de tensions  $DV$ .

*Tableau. 4.4 Résultats de simulations*

| Placement<br>du STATCOM | Nbr STATCOM | Case1  |        | Case2  |         | Case3  |        |
|-------------------------|-------------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|
|                         |             | DP     | DV     | DP     | DV      | DP     | DV     |
| -                       | -           | 5.8330 | 1.1663 | 5.833  | 1.1663  | 5.833  | 1.1663 |
| JB 30                   | 1           | 6.0260 | 0.7657 | 5.7287 | 1.0176  | 6.7286 | 0.7206 |
| JB 30 et 26             | 2           | 5.9655 | 0.6068 | 5.6446 | 0.92295 | 6.4556 | 0.5755 |
| JB 30, 26 et 24         | 3           | 5.7929 | 0.3341 | 5.4831 | 0.72664 | 6.5347 | 0.2707 |

##### 4.3.5.1 Interprétation des résultats

Pour trouver le placement souhaité on a réalisé un test d'augmentation de la charge sur le réseau standard IEEE 30-Bus avec un facteur d'augmentation compris entre [1 :1,5] d'après la figure. 4.6 on constate que les jeux de barres les plus sensibles sont les jeux de barres 30, 26, 29, 25, 24 (MATPOWER 3.0).

En remarque que les tensions de ces jeux de barres ont dépassé leurs limites inferieures. Pour éviter ce problème on a choisie les jeux de barres 30,26 et 24 comme des lieux de renforcement en installant dans ces points les dispositifs STATCOM.

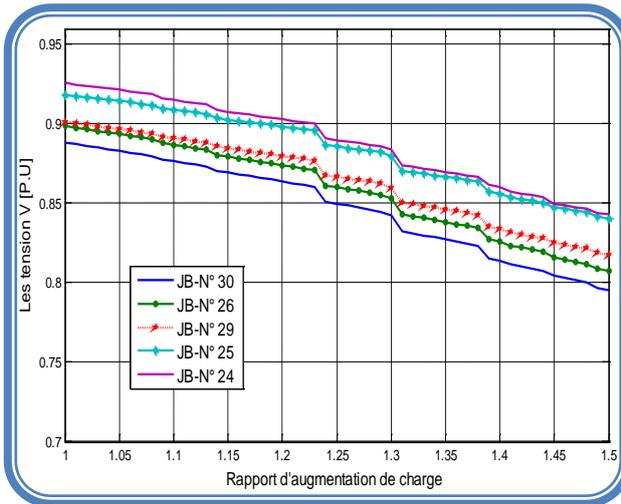


Figure. 4.6 : Variation du niveau de tension de jeux de barres en fonction de la variation de la charge

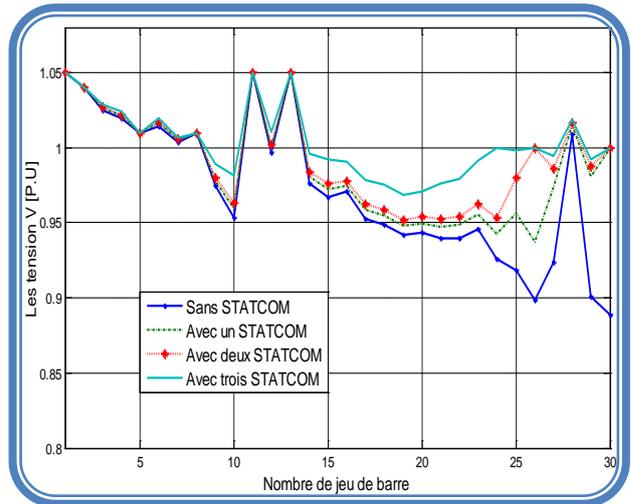


Figure. 4.7 : Niveaux de tensions des jeux de barres.

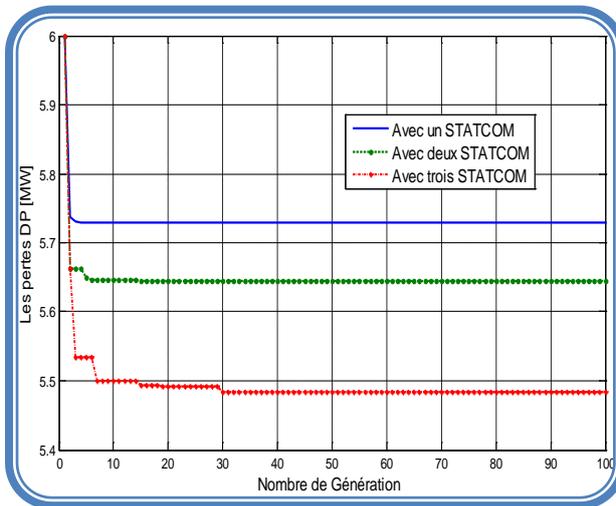


Figure. 4.8 : Evaluations des pertes actives totale.

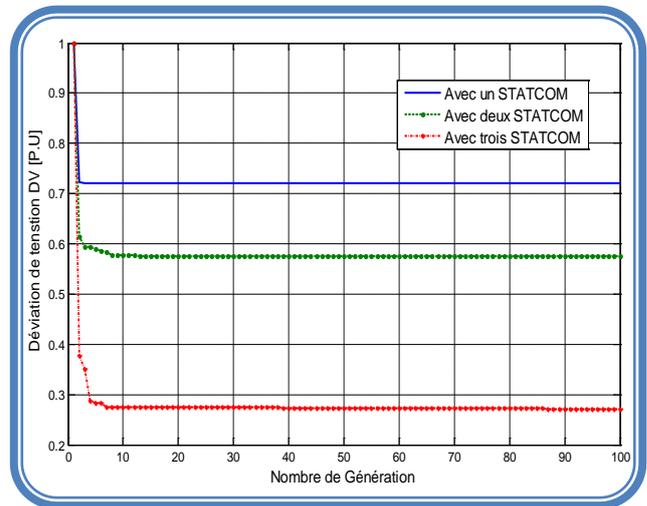


Figure. 4.9 : Evaluations de la déviation de tension.

### 4.3.5.2 Optimisation mono objectif

D'après le tableau 4.4 on constate qu'une diminution notable des pertes de transmission (**5.7287 MW**) et cela après l'optimisation des paramètres du STATCOM par rapport à celle sans optimisation **6.0260 MW**, par contre une augmentation de la déviation de tension est remarquée suite à cette optimisation. [**0.7657 P.U jusqu'à 1.0176 P.U**]. Les résultats récapitulés dans le tableau 4.4 et présentés dans les figures 4.8 et 4.9 nous permettent de déduire aussi que les pertes totales de transport sont réduites chaque fois que le nombre de STATCOM utilisés augmente.

Les résultats obtenus montrent que l'ajustement des paramètres de STATCOM améliore le l'exploitation des réseaux qui reflète ainsi le rôle de l'optimisation.

Une autre constatation est bien remarquée d'après la figure. 4.7 concernant l'amélioration des profils de tension de jeux de barres de charges en fonction du nombre des dispositifs incorporés.

### 4.3.5.3 Optimisation multi objectifs

Maintenant on va traiter l'optimisation de divers objectifs simultanément, il s'agit de minimiser les pertes actives et la déviation de tension en même temps c'est la notion Multi-objectif discutée au chapitre 3.

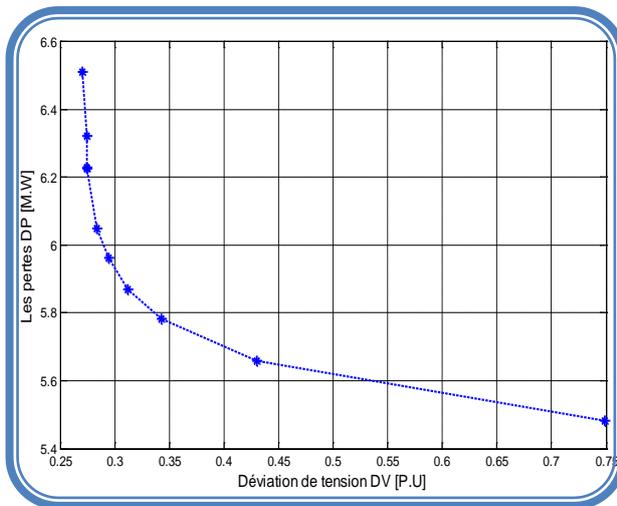


Figure. 4.10 : Solutions optimales de Pareto DP-DV

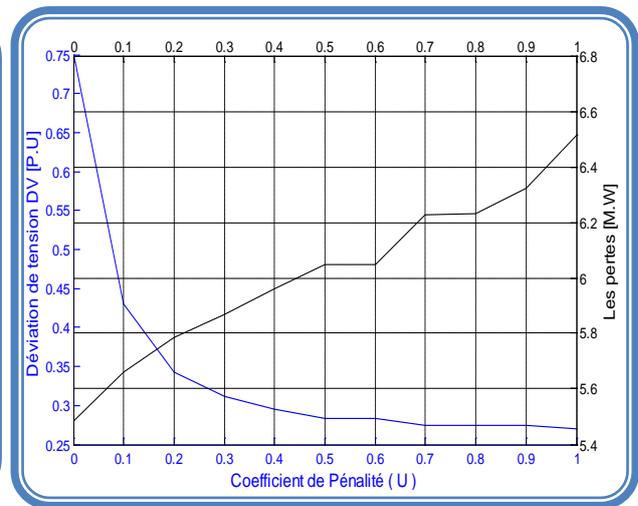


Figure. 4.11 : Représentation des deux fonctions objectifs (DP, DV)

L'optimisation aura lieu selon le critère sous dessous :

$$F = \min((1-U) * f_1 + U * f_2), \quad U \in [0,1] \quad (4.1)$$

$f_1$  : représente la première fonction objective à optimisée qui correspond aux pertes totales  $DP$ , tandis que  $f_2$  indique la deuxième fonction objective liée à la déviation de la tension  $DV$ . La solution trouvée représente un compromis entre ces deux fonctions objectives, le choix de la valeur de ce critère  $U$  se rend au choix de l'opérateur et qui est choisi pour ce test ( $U=0.6$ ), le compromis trouvé par l'algorithme génétique est de **5.5832 MW** pour les pertes active totales et de **0.5543 P.U** pour la déviation de tension. La figure. 4.10 représente le front de Pareto qui correspond aux solutions optimales calculées.

### 4.3.6 Optimisation Multi objective de la puissance réactive Basée sur l'intégration de STATCOM par utilisation de trois variantes de l'algorithme PSO.

Ce test est consacré à démontré l'efficacité de l'algorithme PSO standard ainsi que trois autres variantes pour une optimisation multi objectives avec considération du STATCOM. Le réseau test IEEE 30-Bus est utilisé pour valider l'efficacité des trois variantes (Annexe B).

Le tableau suivant récapitule les paramètres de contrôle des trois variantes proposées.

**Tableau. 4.5** Paramètres des algorithmes PSO

|  | les variant de PSO |                |                      |
|--|--------------------|----------------|----------------------|
|  | PSO-Standard       | PSO-CI         | PSO3-FC              |
| Nbr. des itérations Max                    | 100                | 100            | 100                  |
| Taille de la population                    | 20                 | 20             | 20                   |
| Coefficient d'inertie, w                   | 1                  | 0.9-0.4        | -                    |
| Coefficient social $C_1$ et cognitif $C_2$ | $C_1=1, C_2=1$     | $C_1=1, C_2=1$ | $C_1=2.05, C_2=2.05$ |
| Coefficient de constriction $K$            | -                  | -              | 0.729                |

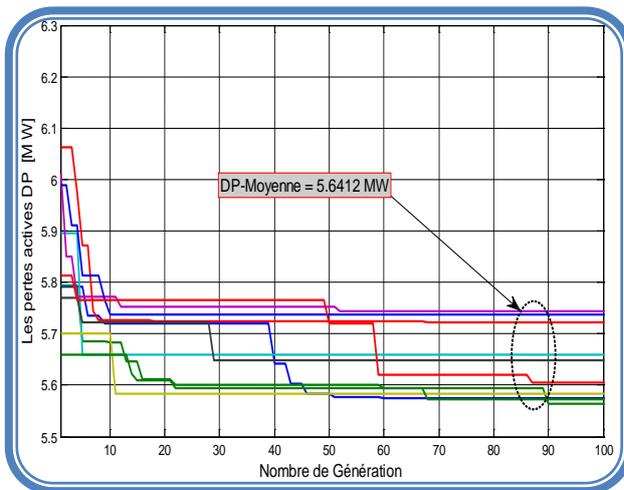
#### 4.3.6.1. La Stratégies de test

Trois cas d'études différentes ont été considérées, le premier cas est considéré pour vérifier l'efficacité de trois variantes PSO sans considérer les Contrôleurs STATCOM et ce pour trouver la meilleure variantes parmi elles pour l'étudier dans le deuxième test afin de résoudre le problème mono-objectif à savoir minimisation des pertes ou la déviation de tension en se basant sur l'intégration du dispositif shunt (STATCOM), le troisième test tient compte cette meilleure variante PSO mais cette fois ci pour solutionner le problème multi-objectifs traitant les pertes et la déviation de tension simultanément.

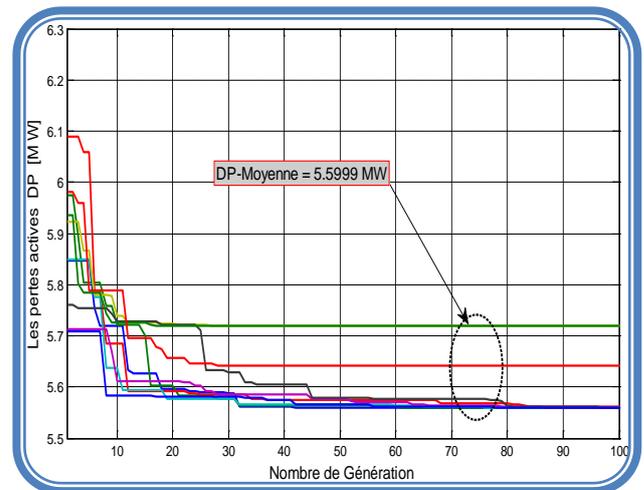
#### 4.3.6.2. Cas 1 : Fonction mono objectif: minimisation des pertes totales sans Contrôleur STATCOM.

Le but principal de ce premier cas est la comparaison entre les trois variantes PSO pour vérifier leurs performances. Les figures. 4.12-4.14 montrent les caractéristiques de convergence des pertes de puissance active totale  $DP$ , le tableau 4.6 illustre les valeurs minimales, maximales et la valeur moyenne pour dix essais par les trois variantes proposées. On peut voire que le coût minimal obtenu et sa valeur moyenne correspondant à la troisième variante **PSO-FC** génère la meilleure qualité de solution (faible pertes **5.5518 MW**). La figure. 4.14 et le tableau 4.6 indiquent clairement que la solution optimale achevée par l'algorithme **PSO-FC** est nettement meilleure par rapport aux résultats trouvés par les autres algorithmes pré-mentionnée. Les résultats de simulation confirment que cette version est capable de chercher la solution globale

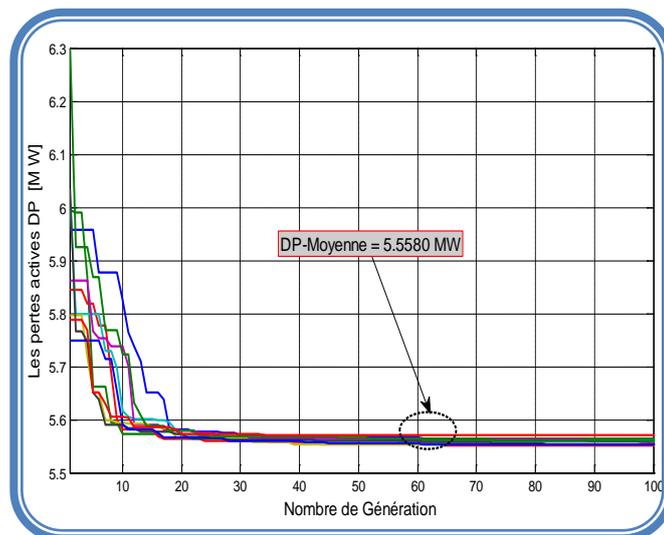
ou la solution quasi optimale. En plus, ces résultats prouvent que cette variante est très stable de point de vue précision et qualité de convergence. La solution moyenne des pertes de puissance actives calculée par **PSO-FC** vaut **5.558 MW** est plus minime par rapport à **PSO-standard** et **PSO-CI** (**5.6412 MW**, **5.5999 MW**) respectivement. De même, le tableau 4.7 expose les résultats obtenus par utilisation d'un nombre de génération différent. **PSO-FC** converge vers la solution optimale malgré le nombre petit de génération (**50 itérations**) en le comparant aux autres méthodes qui nécessitent un nombre important de générations (**100 générations** pour **PSO-standard**, **70 générations** pour **PSO-CI**).



*Figure. 4.12 : Caractéristique de Convergence des pertes actives avec **PSO-standard**.*



*Figure. 4.13 : Caractéristique de Convergence des pertes actives avec **PSO-CI**.*



*Figure. 4.14 : Caractéristique de Convergence des pertes actives avec **PSO-FC**.*

**Tableau. 4.6** Résultats de Simulation pour les trois variantes PSO.

|                                      | The variant of PSO algorithm |        |         |
|--------------------------------------|------------------------------|--------|---------|
|                                      | PSO-Standard                 | PSO-CI | PSO3-FC |
| Nombre des itérations de convergence | 80-100                       | 60-80  | 30-40   |
| Temps (sec)                          | 39.44                        | 37.17  | 36.18   |
| DP- valeur Max (MW)                  | 5.7370                       | 5.7188 | 5.5700  |
| DP - valeur moyenne (MW)             | 5.6412                       | 5.5999 | 5.5580  |
| DP - valeur min (MW)                 | 5.5645                       | 5.5595 | 5.5518  |

*Effet de nombre de génération*

**Tableau. 4.7** Résultats de nombre de générations et le temps d'exécution concernant les trois variantes de PSO

|                          | variantes PSO |        |         |
|--------------------------|---------------|--------|---------|
|                          | PSO-Standard  | PSO-CI | PSO3-FC |
| Nombre d'itérations Max  | 100           | 70     | 50      |
| Temps (sec)              | 39.44         | 25.75  | 18.29   |
| Itération de convergence | 90            | 69     | 49      |
| DP (MW)                  | 5.5645        | 5.5589 | 5.5539  |

#### 4.3.6.3. Cas 2 : Fonction mono-objectif : minimisation des pertes et DV considérant le STATCOM.

Dans cette section deux fonctions objectifs à optimiser individuellement (la réduction de pertes de puissance active et la déviation de tension) avec utilisation de STATCOM. Pour vérifier cette optimisation on va jouer cette fois sur le vecteur de tension de jeux de barres de contrôle et les paramètres de STATCOM en utilisant les variantes PSO expliquées dans le cas N° 1.

Les meilleures solutions calculées par ces trois approches PSO minimisant les pertes de transmission *DP* et la déviation de tension *DV* sont portées dans le tableau 4.8, les figures (4.15 et 4.16) nous montre les caractéristiques de convergence de deux fonctions objectifs envisagés, la figure. 4.17 représente le profil de tension dans tous les jeux de barres de charge et de contrôle, la figure. 4.18 illustre les caractéristiques de convergence de variable de contrôle basées sur la troisième variante (PSO-FC). Les résultats de simulation dans lesquelles les pertes de puissance active et la déviation de tension sont minimisées avec utilisation de multi-STATCOM sont portés au tableau 4.8. Il est clair d'après ce tableau que les résultats précédents trouvés par l'approche PSO-FC confirment une fois de plus la qualité de cette algorithme en matière de robustesse et qualité de solution calculée, de plus en peut conclure en se basant sur les figures (4.15 et 4.16) que l'intégration du STATCOM a une influence sur la minimisation des critères traités.

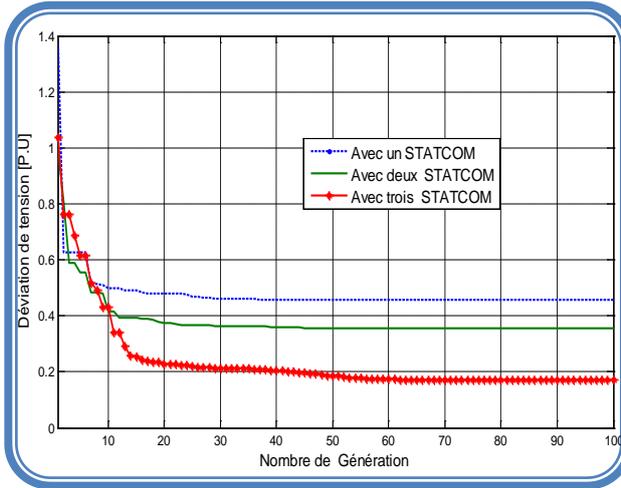


Figure. 4.15 Caractéristique de convergence de DV avec Multi STATCOM

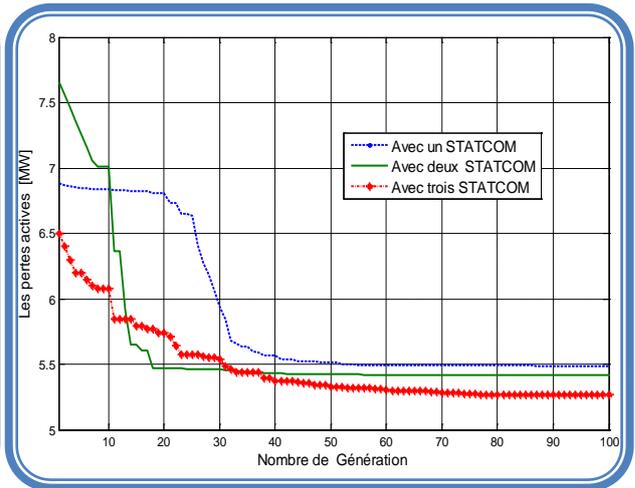


Figure. 4.16 : Caractéristique de convergence de DP avec Multi STATCOM.

Tableau. 4.8 Résultats de simulation pour minimiser les pertes de puissances actives et la déviation de tension avec multi-STATCOM.

|                   |          | Min perte de la puissance active |        |        | Min déviation de tension |        |        |
|-------------------|----------|----------------------------------|--------|--------|--------------------------|--------|--------|
|                   |          | PSO-standard                     | PSO-CI | PSO-FC | SO1-standard             | PSO-CI | PSO-FC |
| Avec un STATCOM   | DP (MW)  | 5.6680                           | 5.4978 | 5.4882 | 7.2199                   | 7.2131 | 7.4872 |
|                   | DV (P.U) | 1.0765                           | 0.9605 | 1.0731 | 0.5533                   | 0.4595 | 0.4576 |
| Avec deux STATCOM | DP (MW)  | 5.5750                           | 5.4440 | 5.1435 | 6.5358                   | 7.4813 | 7.0482 |
|                   | DV(P.U)  | 1.2688                           | 0.7201 | 0.9366 | 0.4703                   | 0.3590 | 0.3542 |
| Avec trio STATCOM | DP (MW)  | 5.5253                           | 5.4172 | 5.2650 | 8.6825                   | 7.9893 | 6.9881 |
|                   | DV(P.U)  | 1.1696                           | 1.1120 | 0.7230 | 0.4012                   | 0.2077 | 0.1717 |

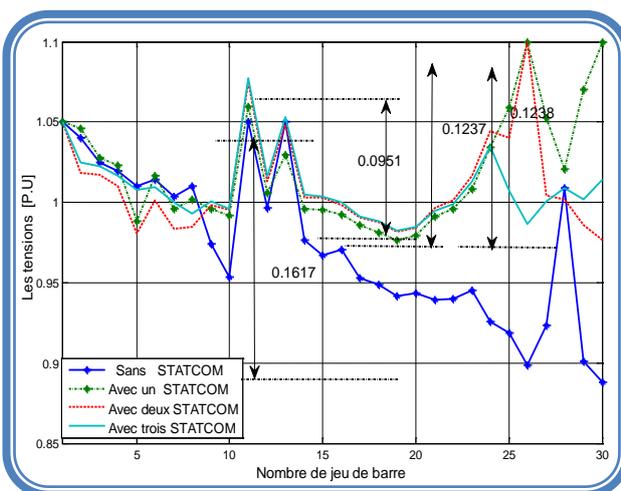


Figure. 4.17 : Profil de tension dans tous les jeux de barres avec Multi STATCOM

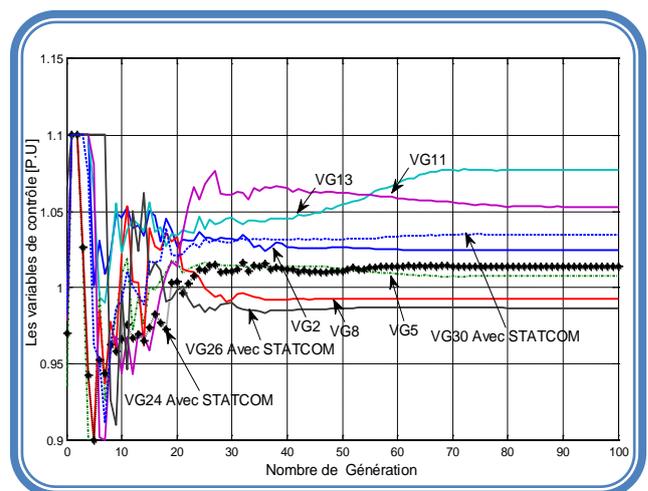


Figure. 4.18 : Caractéristique d'évolution des variables de contrôle avec PSO-FC

#### 4.3.6.4. Cas 3 : Optimisation multi Objectifs : Minimisation des pertes et déviation de la tension avec considération du STATCOM.

Nous appliquons cette fois l'algorithme d'optimisation PSO-FC à la minimisation des diverses critères simultanément (Optimisation Multi-objectifs). La figure 4.19 présente les résultats des solutions de Pareto optimales pour la minimisation ( $DP$ ) de la déviation de tension ( $DV$ ) et les pertes active totales dans les lignes, les résultats obtenus récapitulés dans le tableau montrent le compromis des résultats obtenus tout en minimisant deux fonctions objectifs simultanément par l'utilisation de la variante **PSO-FC**. Pour ce cas les pertes actives totales et la déviation de tension sont **5.3751 MW**, **0.3651 P.U** respectivement. Le vecteur de control optimal est présenté

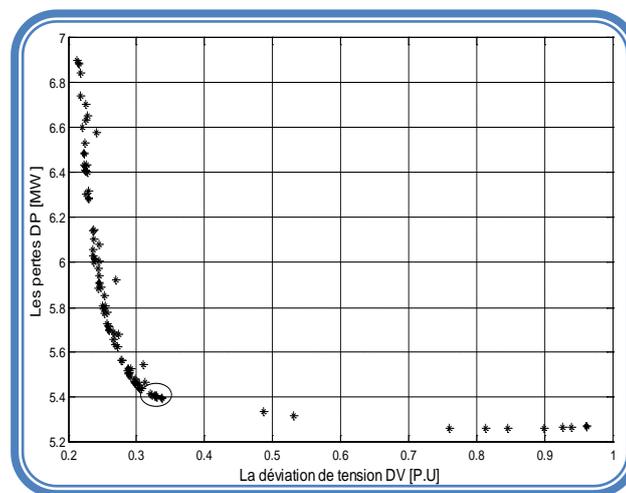


Figure. 4.19 : Solution de Pareto basée sur PSO-FC.

dans ce même tableau 4.9.

Tableau 4.9 Les paramètres des variables de contrôles

|                 |               |                         |               |
|-----------------|---------------|-------------------------|---------------|
| $V_{G2}$ (P.U)  | 1.0477        | $V_{G13}$ (P.U)         | 1.0563        |
| $V_{G5}$ (P.U)  | 1.0301        | $V_{G24-STATCOM}$ (P.U) | 0.9847        |
| $V_{G8}$ (P.U)  | 1.0349        | $V_{G26-STATCOM}$ (P.U) | 0.9914        |
| $V_{G11}$ (P.U) | 1.0841        | $V_{G30-STATCOM}$ (P.U) | 0.9977        |
| <b>DV (P.U)</b> | <b>0.3665</b> | <b>DP (MW)</b>          | <b>5.3751</b> |

#### 4.3.7 Conclusion

Ce test d'application montre l'efficacité de la variante modifiée de PSO et ce pour ajuster d'une manière dynamique les variables de contrôle qui se composent des tensions de jeux de barres de contrôle et les paramètres du STATCOM installés à des jeux de barres bien déterminé dont l'objectif visé est toujours l'amélioration du comportement et le bon fonctionnement du système énergétique c'est-à-dire assurer une qualité d'énergie aux consommateurs. L'approche proposée **PSO-FC** prouve sa qualité de convergence et sa robustesse via les résultats obtenus.

#### 4.4 Test d'application 3 : Optimisation de la Puissance Réactive par utilisation d'un compensateur série TCSC.

Ce test présente l'utilisation de l'algorithme d'essaims de particules dans sa version modifiée avec coefficient d'accélération variable PSO-TVAC [73 et 77-80], pour l'optimisation du problème multi objectif de l'écoulement de puissance réactive (MO-ORPF). Dans cette étude deux fonctions objectifs sont envisagées tel que les pertes de puissance active  $DP$  et la déviation de tension  $DV$  qui sont traitées séparément et simultanément. Cet algorithme d'optimisation traite ce problème par l'ajustement dynamique des paramètres de control représentés par les tensions de jeux de barres de control et la réactance de (TCSC) [11, 78]. La stratégie proposée est testée sur les deux réseaux test IEEE 30-Bus et IEEE 57-Bus, les résultats trouvés sont comparés avec d'autres variantes de PSO pour confirmer l'efficacité de cette approche étudiée en termes de qualité de solution et caractéristique de convergence [77].

##### 4.4.1 Application sur le réseau test IEEE 30-Bus.

le réseau test IEEE 30-Bus; a 6 générateurs placés dans les nœuds 1, 2, 3, 5, 8, 11 et 13, 41 branches (des lignes) et quatre transformateurs entre les lignes 6-9, 6-10, 4-12 et 28-27 (MATPOWER 3.0) .

##### 4.4.1.1 Le choix de la position optimale d'installation du TCSC.

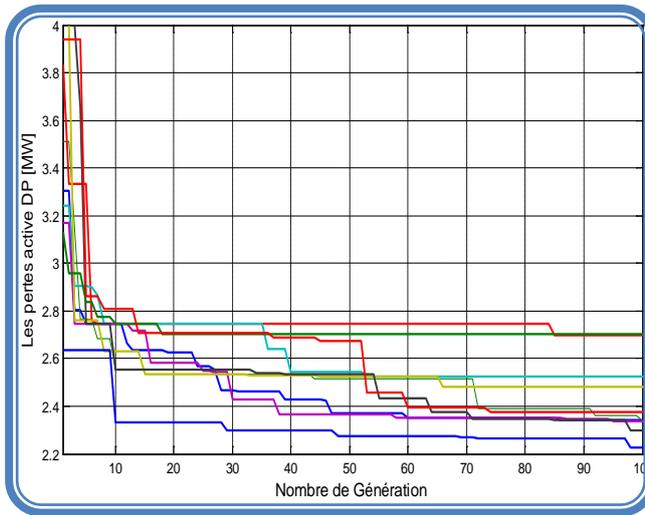
Dans cette étude nous avons fait une recherche de la position optimale de l'installation de ce dispositif, tout en essayant l'incorporation du TCSC dans toutes les lignes afin de trouver le meilleur site d'installation qui reflète les pertes de transmission les plus minimales celle correspond à la branche 27-28. Les paramètres des algorithmes élaborés sont montrés dans le tableau 4.10.

**Tableau. 4.10** Paramètres des trois algorithmes utilisés

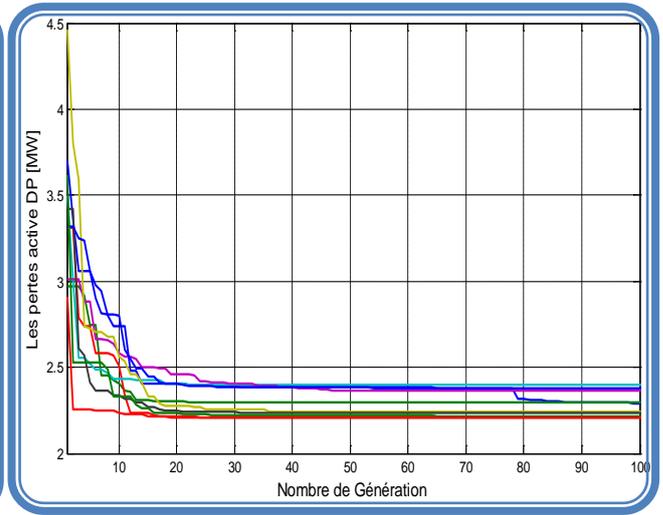
| GA                      | PSO                     | PSO-TVAC                   |
|-------------------------|-------------------------|----------------------------|
| Taille de Population 20 | Taille de Population 20 | Taille de Population 20    |
| générations Max- 100    | générations Max- 100    | générations Max- 100       |
| Sélection 0.5           | $C_1 = 1$               | $C_{1f}=0.2, C_{1i}=2.5$   |
| croisement 0.5          | $C_2=3$                 | $C_{2f}=2.2, C_{2i}=0.2$   |
| Mutation 0.15           | -                       | $w_{min}=0.4, w_{max}=0.9$ |

**4.4.1.2 Cas 1: Fonction mono objectif: minimisation des pertes avec et sans TCSC.**

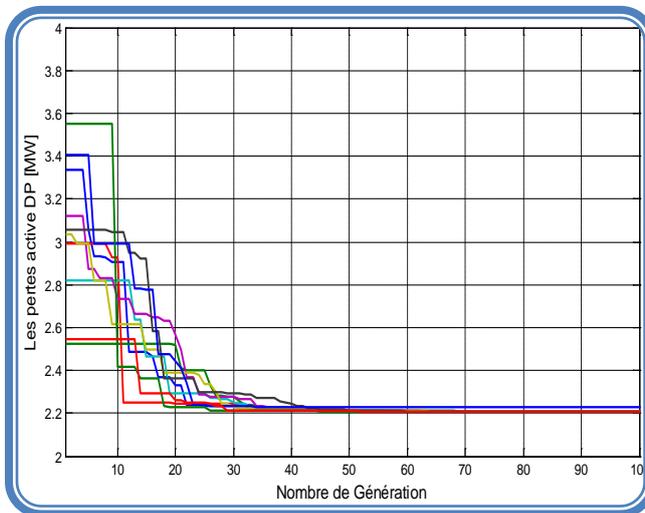
Le but principal de ce premier cas est de vérifier la faisabilité et la performance de l’algorithme proposé PSO-TVAC pour solutionner le problème ORPF. Le tableau 14.10 montre les paramètres des algorithmes utilisés: AG, PSO et PSO-TVAC. Les figures (4.20-4.22) reflètent les caractéristiques de convergence des pertes de la puissance active correspond aux trois algorithmes proposés. Le tableau 4.11 illustre les meilleurs résultats calculés.



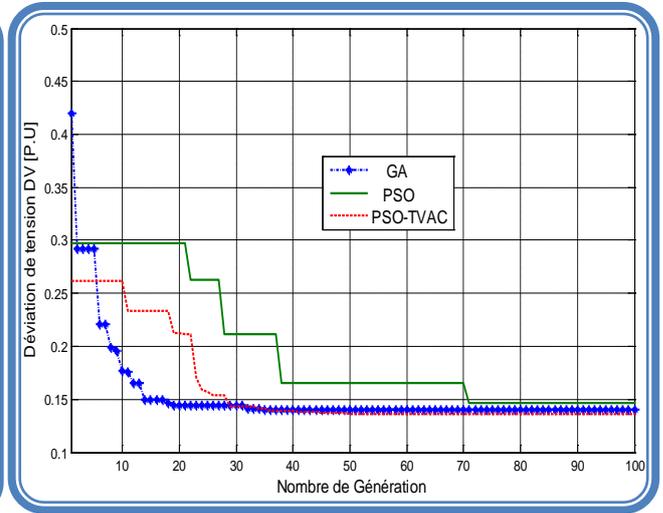
**Figure. 4.20 :** Caractéristique de convergence de DP Avec PSO



**Figure. 4.21 :** Caractéristique de convergence de DP Avec AG



**Figure. 4.22 :** Caractéristique de convergence de DP Avec PSO-TVAC



**Figure. 4.23 :** Caractéristique de convergence de DV Avec GA, PSO, PSO-TVAC.

On peut déduire selon les résultats figurant dans le tableau 4.11 que l’algorithme PSO-TVAC converge vers la meilleure solution avec un minimum de pertes **2.2091 MW** en la comparant avec les autres solutions **2.2100 MW**, **2.2266 MW** respectivement trouvées par les AG, et la version standard de PSO. Ces pertes seront plus faibles quand on installe le dispositif série TCSC au jeu de barres sensible, les meilleures résultats restent toujours celles trouvés par PSO-TVAC.

**Tableau 4.11** Résultats des pertes calculées par PSO-TVAC, GA, PSO, avec et sans TCSC.

|             | Min DP sans TCSC |        |          | Min DP avec TCSC |        |          |
|-------------|------------------|--------|----------|------------------|--------|----------|
|             | GA               | PSO    | PSO-TVAC | SGA              | SPSO   | PSO-TVAC |
| V1(P.U)     | 1.0000           | 1.0000 | 1.0000   | 1.0000           | 1.0000 | 1.0000   |
| V2(P.U)     | 1.0012           | 1.0008 | 1.0011   | 1.0012           | 1.0078 | 1.0011   |
| V5(P.U)     | 1.0757           | 1.0850 | 1.0746   | 1.0749           | 1.1000 | 1.0718   |
| V8(P.U)     | 1.0176           | 1.0307 | 1.0186   | 1.0192           | 1.0295 | 1.0168   |
| V11(P.U)    | 1.0310           | 1.0396 | 1.0329   | 1.0333           | 1.0503 | 1.0309   |
| V13(P.U)    | 1.0365           | 1.0416 | 1.0377   | 1.0357           | 1.0359 | 1.0340   |
| X_TCSC(P.U) | -                | -      | -        | 0.0800           | 0.0800 | 0.0800   |
| DP-max(MW)  | 2.3987           | 2.7006 | 2.2280   | 2.2857           | 2.6559 | 2.2398   |
| DP-moyenne  | 2.2835           | 2.4333 | 2.2110   | 2.2154           | 2.4172 | 2.2070   |
| DP-min (MW) | 2.2100           | 2.2266 | 2.2091   | 2.1944           | 2.2538 | 2.1939   |
| DV (P.U)    | 0.2706           | 0.3713 | 0.2774   | 0.2658           | 0.3834 | 0.2518   |
| Temps (S)   | 0.0249           | 0.0214 | 0.0202   | 0.0252           | 0.0224 | 0.0210   |

#### 4.4.1.3 Cas 2: Fonction mono-objectif : minimisation de DV avec et sans TCSC.

Dans ce deuxième cas la fonction objectif considérée est la déviation de tension sans et avec considération du TCSC. Le TCSC est installé toujours dans la branche 27-28, la réactance de ce contrôleur série TCSC est ajusté dynamiquement avec la tension de jeux de barres de control pour optimiser la déviation de tension.

**Tableau 4.12** Les meilleurs résultats de DV par PSO-TVAC, GA, PSO avec et sans TCSC.

|             | Min DV sans TCSC |        |          | Min DV avec TCSC |        |          |
|-------------|------------------|--------|----------|------------------|--------|----------|
|             | GA               | PSO    | PSO-TVAC | GA               | PSO    | PSO-TVAC |
| V1(P.U)     | 1.0000           | 1.0000 | 1.0000   | 1.0000           | 1.0000 | 1.0000   |
| V2(P.U)     | 1.0302           | 1.0358 | 1.0351   | 1.0380           | 1.0297 | 1.0357   |
| V5(P.U)     | 1.0475           | 1.0154 | 1.0409   | 1.0357           | 0.9823 | 1.0414   |
| V8(P.U)     | 1.0129           | 1.0115 | 1.0118   | 1.0114           | 1.0310 | 1.0116   |
| V11(P.U)    | 0.9996           | 1.0418 | 1.0063   | 1.0114           | 1.0666 | 1.0059   |
| V13(P.U)    | 1.0310           | 1.0278 | 1.0200   | 1.0200           | 1.0198 | 1.0212   |
| X_TCSC(P.U) | -                | -      | -        | 0.0800           | -0.018 | 0.0800   |
| DV max (MW) | 0.1807           | 0.2605 | 0.1639   | 0.2845           | 0.2587 | 0.1375   |
| DV_ moyenne | 0.1510           | 0.1776 | 0.1401   | 0.1661           | 0.2052 | 0.1364   |
| DV min(MW)  | 0.1399           | 0.1468 | 0.1360   | 0.1376           | 0.1751 | 0.1356   |
| DP(MW)      | 3.0493           | 3.3875 | 3.2090   | 3.3484           | 3.9210 | 3.2538   |
| Temps (S)   | 0.0093           | 0.0221 | 0.0199   | 0.0247           | 0.0212 | 0.0223   |

Le tableau 4.12 représente les faibles déviations de tension par les mêmes algorithmes d'optimisation du cas précédent, il est clair une fois de plus que l'algorithme PSO-TVAC prouve sa qualité de convergence (figure. 4.23) vis-à-vis les résultats obtenus par les autres algorithmes. La déviation de tension optimale trouvée par PSO-TVAC sans considération de TCSC est de **0.1360 P.U** et de **0.1356 P.U** avec installation d'un TCSC.

#### 4.4.1.4 Case 3: Optimisation Multi Objectifs: minimisation des pertes et la déviation de tension avec considération d'un TCSC.

Pour vérifier l'efficacité de la variante proposée PSO-TVAC, dans ce cas les deux fonctions objectifs sont optimisées simultanément avec considération du TCSC. Il faut noter que le TCSC est installé dans la même branche.

La courbe de Pareto optimal est présentée dans la figure 4.24 En se basant sur les résultats obtenus récapitulés dans tableau 4.13, Il est clair que le PSO-TVAC engendre des faibles pertes (**2.2096 MW**) et déviation de tension (**0.2414 P.U**) par rapport ceux obtenues par d'autres approches.

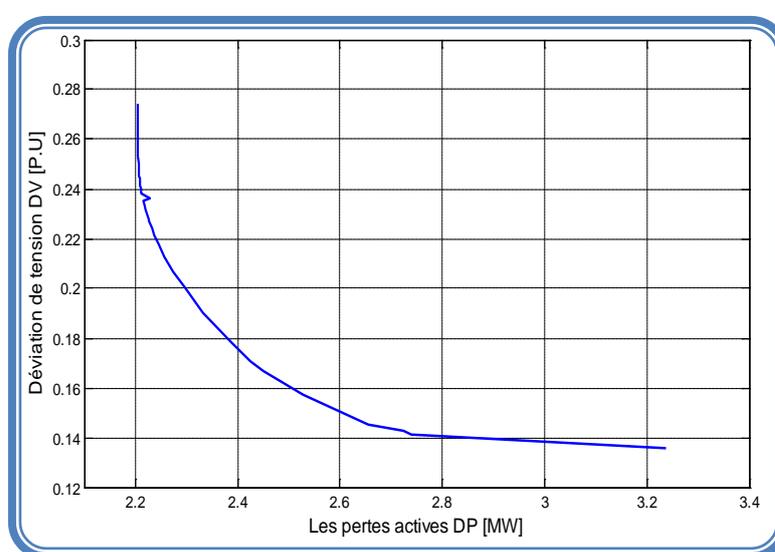


Figure. 4.24 : Solutions optimales de Pareto de la minimisation de DP et DV

Tableau 4.13 Résultats de l'optimisation multi objectif trouvés par GA, PSO, PSO\_TVAC avec considération de TCSC.

|              | Min DP & Min DV avec TCSC |        |          |
|--------------|---------------------------|--------|----------|
|              | AG                        | PSO    | PSO_TVAC |
| V1 (P.U)     | 1.0000                    | 1.0000 | 1.0000   |
| V2 (P.U)     | 0.9996                    | 0.9980 | 1.0027   |
| V5 (P.U)     | 1.0624                    | 1.0581 | 1.0676   |
| V8 (P.U)     | 1.0122                    | 1.0129 | 1.0152   |
| V11 (P.U)    | 1.0247                    | 1.0245 | 1.0280   |
| V13 (P.U)    | 1.0318                    | 1.0327 | 1.0310   |
| X_TCSC (P.U) | 0.0800                    | 0.0668 | 0.0800   |
| DP (MW)      | 2.2088                    | 2.2167 | 2.2096   |
| DV (P.U)     | 0.2563                    | 0.2638 | 0.2414   |

#### 4.4.2 Application sur réseau test IEEE 57-Bus.

Cette fois on va vérifier l'efficacité de l'algorithme proposé sur un autre réseau test qui est IEEE 57-Bus, ce réseau comporte 7 générateurs placés dans les nœuds: 1, 2, 3, 6, 8, 9 et 12 avec 80 branches (lignes) et 17 transformateurs de ligne (Annexe C). Dans cette étude le TCSC est installé toujours dans la branche 1-2. Il est intéressant de noter que des violations de contraintes concernant la puissance réactive fournie par les générateurs de production sont apparues dans ce test et ce en raison de la taille du réseau traité d'une part, et les marges étroites des unités de production de l'énergie réactive  $Q_{min}$  et  $Q_{max}$ . Le tableau suivant illustre ces violations de contraintes [78].

**Tableau. 4.14** Résultats des pertes actives par PSO-TVAC

|                   |         |                |                |         |                |         |                                |
|-------------------|---------|----------------|----------------|---------|----------------|---------|--------------------------------|
| $Q_{g-min}$ (p.u) | -0.1700 | -0.1000        | -0.0800        | -1.4000 | -0.0300        | -1.5000 | <b>Les pertes =20.6601(MW)</b> |
| $Q_g$ (p.u)       | -0.1195 | <b>-0.2750</b> | <b>-0.1347</b> | 0.7072  | <b>-0.4215</b> | 1.1379  |                                |
| $Q_{g-max}$ (p.u) | 0.5000  | 0.6000         | 0.2500         | 2.0000  | 0.0900         | 1.5500  |                                |

La section suivante illustre la méthode permettant de corriger et d'éliminer les violations de contraintes des puissances réactives. L'idée consiste à inclure les contraintes d'inégalité dans la fonction objective par l'utilisation de la méthode de poids en la multipliant par un coefficient de pénalité choisi  $R=1000$ . La fonction objective modifiée est présentée par l'équation (4.2).

##### 4.4.2.1 Les Fonctions Objectifs modifiées

###### 4.4.2.1.1 les pertes actives

La fonction objective modifiée associée à la minimisation des pertes actives totales est exprimée par:

$$f_1 = \min DP = \sum_{k=1}^{nl} g_k [V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij}] + \sum_{i \in npv} R (Q_{gi} - Q_{gi}^{\lim})^2 \quad (4.2)$$

Avec  $DP$  : les pertes actives,  $g_k$  la conductance de la branche entre les jeux de barres  $i$ , et  $j$ ,  $V_i, V_j$  la tension de jeu de barre  $i$  et  $j$ .  $R$  coefficient de pénalité,  $Q_{gi}$ , la puissance réactive générée,  $Q_{gi}^{\lim}$  est la limite de la puissance réactive générée par les centrales de production qui s'écrit comme suit :

$$Q_{gi}^{\lim} = \begin{cases} Q_{gi} \geq Q_{gi}^{\max} \Rightarrow Q_{gi}^{\lim} = Q_{gi}^{\max} \\ Q_{gi}^{\min} \leq Q_{gi} \leq Q_{gi}^{\max} \Rightarrow Q_{gi}^{\lim} = Q_{gi} \\ Q_{gi} \leq Q_{gi}^{\min} \Rightarrow Q_{gi}^{\lim} = Q_{gi}^{\min} \end{cases} \quad (4.3)$$

#### 4.4.2.1.2 la Déviation de tension

La fonction objective modifiée associée à la minimisation de déviation de tension est exprimée par l'équation (4.4) formulée comme suit:

$$f_2 = \min DV = \sum_{i=1}^{npq} |V_i - V_{ref}| + \sum_{i \in npv} R(Q_{gi} - Q_{gi}^{lim})^2 \quad (4.4)$$

$npq$  : le nombre totale de jeux de barres de charge.

$V_{ref}$  : la tension de référence (1.0 p.u).

#### 4.4.2.2 Les différents cas de test

Les variantes proposées par la suite sont basées sur l'algorithme d'essaims de particules PSO, ce test a quatre cas d'essais qui sont les suivant :

**Cas 1 : PSO-TVAC-1** : dans cette variante les deux coefficients  $C_1$  et  $C_2$  formulés par l'équation (3.36) sont variés dans le temps, la population initiale est choisie aléatoirement, le mécanisme d'évolution de l'algorithme est basé sur variation de ces deux facteurs au cours des générations.

**Cas 2 : PSO-TVAC-2** : contrairement à la variante précédente celle ci a une population initiale fixée à une valeur bien déterminée.

Dans les cas1, 2 et 3 l'algorithme minimise les pertes totales ( $DP$ ) sans tenir en considération l'effet de TCSC.

**Cas 3 : PSO-FC** : traite l'algorithme d'optimisation (PSO-FC) variante de PSO avec facteur de constriction, ses paramètres sont indiqués au Table 1 notant que sa population initiale est fixée à une valeur précise.

**Case4 : PSO-FC/PSO-TVAC-2** : Cette variante est fondée sur la coordination entre le premier cas et le troisième cas pour améliorer la convergence de l'algorithme PSO.

Dans la première étape le **PSO-FC** prend en charge l'évolution de l'optimisation et ce jusqu'à l'itération (**iter\_spec=100**) à partir de ce seuil la troisième variante nommée **PSO-TVCA-2** complète la procédure de cette optimisation et ce jusqu'à la fin de la convergence (**ite\_rmax=2000**).

Dans ce quatrième cas la variante proposée **PSO-FC/PSO-TVAC-2** est appliquée pour optimiser les fonctions suivantes.

1. Fonction mono-objectif : Minimiser les pertes de puissance active avec et sans TCSC.
2. Fonction mono-objectif : Minimiser la déviation de tension avec et sans TCSC.

**Tableau 4.15** Paramètres de l'algorithme proposé

|                             | Cas de test               |                           |                           |                           |
|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
|                             | Cas 1                     | Cas 2                     | Cas 3                     | Cas 4                     |
| Nbr. des itérations         | 2000                      | 2000                      | 2000                      | 2000                      |
| Taille de population        | 20                        | 20                        | 20                        | 20                        |
| Facteur de poids w          | 0.9-0.4                   | 0.9-0.4                   | 1                         | 1, 0.9-0.4                |
| Facteurs social et cognitif | $C_1=2.05,$<br>$C_2=2.05$ | $C_1=2.05,$<br>$C_2=2.05$ | $C_1=2.05,$<br>$C_2=2.05$ | $C_1=2.05,$<br>$C_2=2.05$ |
| Coefficient de constriction | 1                         | 1                         | 0.729                     | 0.729,1                   |

#### 4.4.2.3 Comparaison entre PSO-TVAC et PSO-FC

Dans le premier cas, notre objectif est de vérifier l'efficacité et la performance de chaque variante PSO pour traiter le problème ORPD. La fonction objectif est la minimisation des pertes de transport. Le tableau 4.16 résume tous les résultats ainsi obtenus. Les figures (4.25-4.27) montrent les caractéristiques de convergence de trois cas étudiés en faisant 10 répétitions successives pour atteindre la meilleure solution et ce vu de la nature stochastiques que présente ces algorithmes (voir chapitre trois), la figure 4.28 illustre les meilleures optimum globaux atteints par ces trois cas de test. Les résultats réalisés prouvent que la variante **PSO-TVAC-1** qui correspond au deuxième cas dont sa population initiale est générée aléatoirement donne des pertes de transmission égale **25.6708 MW** trouvées après **1000 itérations**, cette valeur comparée à celle calculée par le troisième cas. **25.6524 MW** obtenue dès la **600<sup>ième</sup>** génération et qui présente une population initiale fixe **PSO-TVAC-2**. L'algorithme **PSO-FC** a une qualité de convergence rapide comparée à **PSO-TVAC** mais présente une valeur de pertes supérieure (**25.7823 MW**) par rapport à celle trouvée par **PSO-TVAC-2 (25.6524 MW)**. Dans le cas N°4, une coordination entre les deux algorithmes **PSO-FC** et **PSO-TVAC-2** est proposée pour faire exploiter leurs caractéristiques pré mentionnées (rapidité de convergence de **PSO-FC**, qualité de solution **PSO-TVAC-2**). Les résultats obtenus sont indiqués dans le tableau 4.16, une comparaison des caractéristiques de convergence des quatre cas est présenté dans de la figure 4.29.

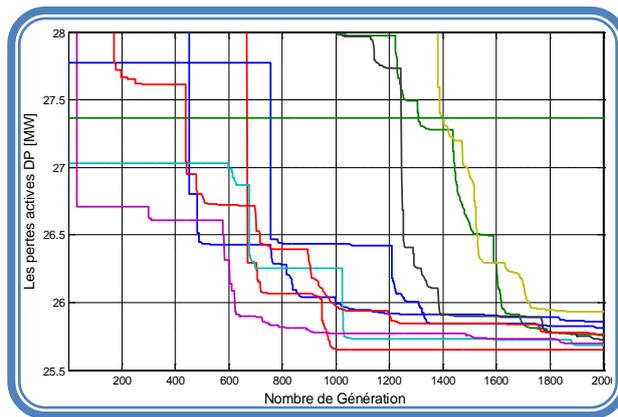


Figure. 4.25 : Caractéristique de Convergence de DP pour le cas N°1.

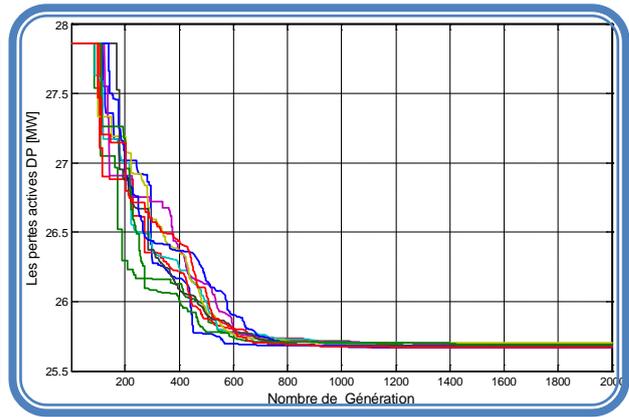


Figure. 4.26 : Caractéristique de Convergence de DP pour le cas N°2.

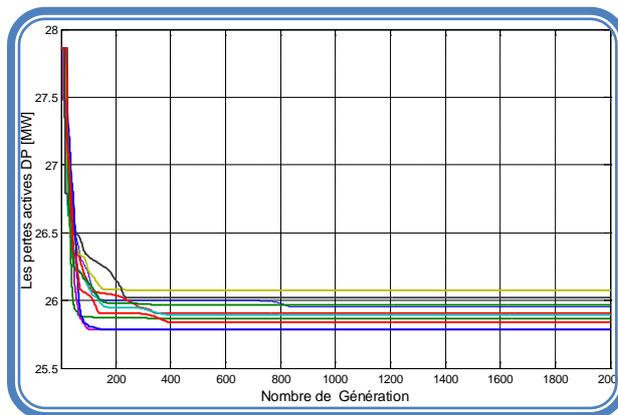


Figure. 4.27 : Caractéristique de Convergence de DP pour le cas N°3.

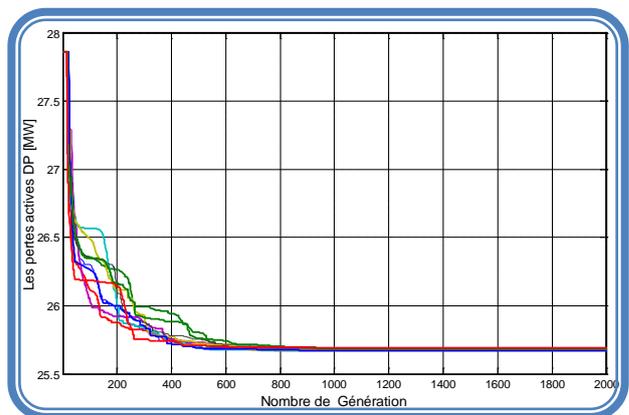


Figure. 4.28 : Caractéristique de Convergence de DP pour le cas N°4.

Tableau. 4.16 Résultats de simulations de DP et DV correspondant au cas 4 avec et sans utilisation de TCSC

| Fonction Objectif | Minimisation des pertes actives |         |         |           |           | Minimisation de la déviation de tension |           |           |
|-------------------|---------------------------------|---------|---------|-----------|-----------|---|-----------|-----------|
|                   | sans TCSC                       |         |         | Sans TCSC | Avec TCSC |   | Sans TCSC | Avec TCSC |
| Algorithme        | Case1                           | Case2   | Case3   | Case4     | Case4     |   | Case4     | Case4     |
| V1 (P.U)          | 1.0000                          | 1.0000  | 1.0000  | 1.0000    | 1.0000    | V1 (P.U)                                | 1.0000    | 1.0000    |
| V2 (P.U)          | 1.0297                          | 1.0316  | 1.0321  | 1.0317    | 1.0317    | V2 (P.U)                                | 1.0124    | 1.0094    |
| V3 (P.U)          | 1.0216                          | 1.0294  | 1.0314  | 1.0300    | 1.0301    | V3 (P.U)                                | 1.0086    | 1.0076    |
| V5 (P.U)          | 1.0152                          | 1.0276  | 1.0304  | 1.0281    | 1.0279    | V5 (P.U)                                | 1.0032    | 1.0035    |
| V8 (P.U)          | 1.0399                          | 1.0494  | 1.0530  | 1.0496    | 1.0506    | V8 (P.U)                                | 1.0221    | 1.0218    |
| V11 (P.U)         | 1.0055                          | 1.0133  | 1.0165  | 1.0135    | 1.0143    | V11 (P.U)                               | 0.9933    | 0.9935    |
| V13 (P.U)         | 1.0145                          | 1.0190  | 1.0221  | 1.0192    | 1.0197    | V13 (P.U)                               | 1.0128    | 1.0138    |
| X_TCSC(P.U)       | 0                               | 0       | 0       | 0         | 0.0056    | X_TCSC(P.U)                             | 0         | 0.0056    |
| DV (P.U)          | 1.2007                          | 1.3763  | 1.4754  | 1.3881    | 1.4024    | DP (MW)                                 | 26.7688   | 26.7179   |
| DP min (MW)       | 25.7823                         | 25.6708 | 25.6524 | 25.6678   | 25.5828   | DV min (P.U)                            | 1.0732    | 1.0728    |
| DP moyenne (P.U)  | 25.9081                         | 25.6810 | 25.9237 | 25.6777   | 25.6024   | DV moyenne (P.U)                        | 1.0740    | 1.0729    |
| DP max            | 26.0748                         | 25.7006 | 27.3669 | 25.6923   | 25.6346   | DV max (P.U)                            | 1.0744    | 1.0730    |

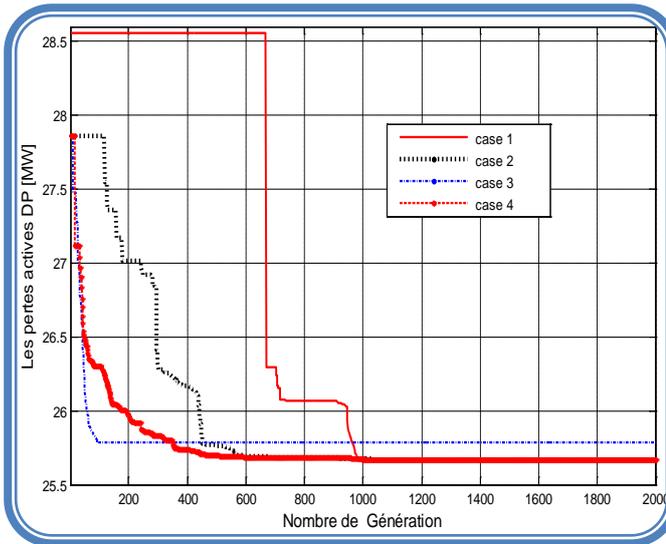


Figure. 4.29 : Etude comparative: Caractéristiques de Convergence de DP correspondant aux quatre cas.

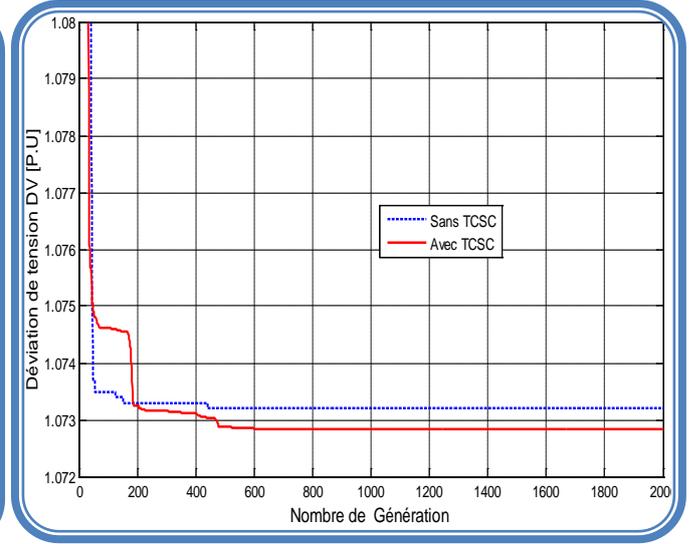


Figure. 4.30 : Caractéristique de convergence de DV trouvée par le cas 4.

#### 4.4.2.4 Minimisation de la Déviation de Tension avec et sans TCSC.

L'objectif visé dans ce paragraphe est d'évaluer la déviation de tension en appliquant la coordination précitée entre les deux algorithmes la PSO-TVAC et PSO-FC. Dans cette optimisation le TCSC est installé dans la branche 1-2, sa réactance sera contrôlée en même temps avec la tension de générateurs pour aboutir à une meilleure minimisation comme il est clairement indiqué dans la figure 4.30 illustre. On peut voir que la déviation de tension optimisée a subi une légère amélioration quand on utilise ce dispositif **1.0728 pu** en la compare par la même valeur sans incorporation de ce dernier (**1.0732 pu**).

#### 4.4.3 Conclusion

Cette étude présente l'efficacité de l'algorithme d'optimisation par essaims de particules dans sa version modifiée avec coefficient d'accélération variable **PSO-TVAC-2** pour résoudre le problème multi objectif optimal de la puissance réactive. Deux fonctions objectifs sont considérées (la minimisation de pertes de la puissance active  $DP$  et la déviation de tension  $DV$ ) qui sont optimisées individuellement et simultanément avec et sans installation du dispositif série (**TCSC**).

Les résultats de simulation trouvées démontrent clairement l'efficacité de l'approche proposée **PSO-TVAC-2** en terme de qualité de solution et caractéristique de convergence comparée à deux autres variantes celles de **PSO-FC** et le **PSO** standard.

#### 4.5 Test d'application 4 : Problème de stabilité de tension

Dans cette étude, le programme développé a été validé sur le réseau test IEEE-JB-57 jeux de barres dont les caractéristiques sont : 57 nœuds, 63 branches, 15 transformateurs et sept jeux de barres de contrôle. Dans cette optimisation on a procédé à l'installation d'un compensateur de type shunt celui du STATCOM qui est installé au jeu de barre qui reflète le plus faible niveau de tension. Pour tous les essais qui suit, les limites maximales de puissances réactives injectées sont dans la marge  $\pm 50$  Mvar , les limites de transformateurs de charge et les tension de jeux de barres de contrôle sont compris entre 0.90 et 1.10p.u. Le problème d'optimisation traite dans cette application le problème mono-objective et ce pour améliorer la stabilité de tension, a cet effet plusieurs indices proposées dans la littérature sont bien expliquées dans [60], pour notre test nous avons choisi l'indice de stabilité de tension (voltage stability index **L-index**).

Les variables de control qui seront optimisées sont de trois types :

- Les tensions de jeux de contrôle
- Les rapports de transformateurs de lignes de transport.
- Les paramètres du STATCOM.

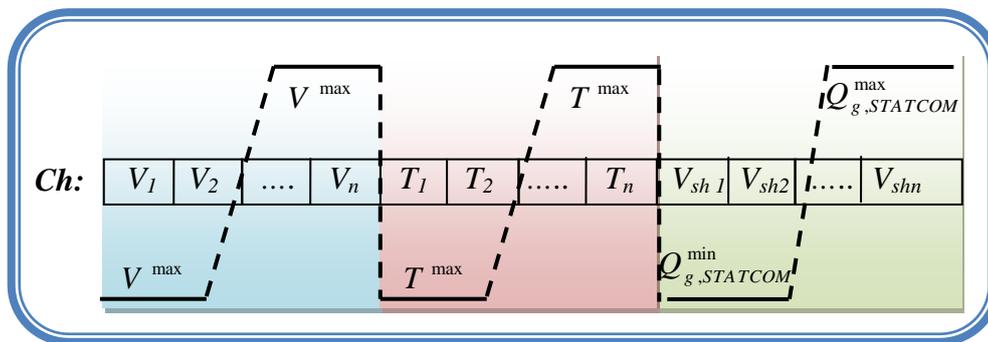


Figure. 4.31 : Représentation des variables de contrôle  $V_i, T_i$  et  $V_{sh}$

Le vecteur des variables de contrôle est présenté la figure 4.31 avec :  $V_1, V_2, \dots, V_n$  : Les tensions de jeux de barres de contrôle;  $T_1, T_2, \dots, T_n$  : sont les rapports de transformateurs et  $V_{sh1}, V_{sh2}, \dots, V_{shn}$  sont les tensions de contrôle du STATCOM. Les trois variables sont ajustés dynamiquement pour réduire l'indice de stabilité de tension. Les différents cas d'étude sont considérés comme suit :

- ❖ Cas 1. C'est le cas général : écoulement de puissance dans les conditions normales.
- ❖ Cas 2. Solution de l'écoulement de puissance avec une augmentation de la charge de 20 %.
- ❖ Cas 3. Optimisation sans STATCOM avec une augmentation de la charge de 20%.

❖ Cas 4. Optimisation avec STATCOM avec une augmentation de 20%.

Dans cette section l'objectif souhaité est de renforcer la stabilité de tension par installation d'un compensateur synchrone (STATCOM) en se basant sur la minimisation de l'indice de stabilité ( $L\_index$ ) discuté dans le troisième chapitre, dont l'optimisation des ces essais est effectuée par l'algorithme PSO-TVAC.

Il est clair une fois de plus que cette approche (PSO-TVAC) montre son efficacité dans notre travail (test d'application N 3) et qui a générée les meilleurs résultats, les solutions des 4 cas sont récapitulées dans le tableau 4.17.

**Tableau. 4.17** Résultats de l'écoulement de puissance basé sur l'optimisation de  $L\_index$  par PSO-TVAC.

|                         | Cas 1   | Cas 2   | Cas 3   | Cas 4  |
|-------------------------|---------|---------|---------|--------|
| $V_{G1}$ (P.U)          | 1.0400  | 1.0400  | 1.0513  | 1.0881 |
| $V_{G2}$ (P.U)          | 1.0100  | 1.0100  | 1.0447  | 1.0076 |
| $V_{G3}$ (P.U)          | 0.9850  | 0.9850  | 1.0161  | 1.0341 |
| $V_{G6}$ (P.U)          | 0.9800  | 0.9800  | 1.0115  | 1.0063 |
| $V_{G8}$ (P.U)          | 1.0050  | 1.0050  | 1.0881  | 1.0322 |
| $V_{G9}$ (P.U)          | 0.9800  | 0.9800  | 0.9803  | 0.9953 |
| $V_{G12}$ (P.U)         | 1.0150  | 1.0150  | 1.0504  | 1.0147 |
| $V_{G25-STATCOM}$ (P.U) | 0.0000  | 0.0000  | 0.0000  | 0.9988 |
| $V_{G31-STATCOM}$ (P.U) | 0.0000  | 0.0000  | 0.0000  | 0.9408 |
| $V_{G33-STATCOM}$ (P.U) | 0.0000  | 0.0000  | 0.0000  | 1.0359 |
| $T_{4-18}$ (P.U)        | 0.9700  | 0.9700  | 0.9595  | 0.9615 |
| $T_{4-18}$ (P.U)        | 0.9780  | 0.9780  | 0.9336  | 1.0009 |
| $T_{21-20}$ (P.U)       | 1.0430  | 1.0430  | 1.0421  | 0.9926 |
| $T_{24-26}$ (P.U)       | 1.0430  | 1.0430  | 1.0963  | 0.9020 |
| $T_{7-29}$ (P.U)        | 0.9670  | 0.9670  | 1.0025  | 0.9797 |
| $T_{34-32}$ (P.U)       | 0.9750  | 0.9750  | 0.9514  | 0.9731 |
| $T_{11-41}$ (P.U)       | 0.9550  | 0.9550  | 0.9611  | 0.9662 |
| $T_{15-45}$ (P.U)       | 0.9550  | 0.9550  | 0.9345  | 0.9369 |
| $T_{14-46}$ (P.U)       | 0.9000  | 0.9000  | 0.9033  | 1.0021 |
| $T_{10-51}$ (P.U)       | 0.9300  | 0.9300  | 1.0384  | 0.9672 |
| $T_{13-49}$ (P.U)       | 0.8950  | 0.8950  | 0.9134  | 0.9946 |
| $T_{11-43}$ (P.U)       | 0.9580  | 0.9580  | 0.9650  | 0.9635 |
| $T_{40-56}$ (P.U)       | 0.9580  | 0.9580  | 0.9642  | 0.9431 |
| $T_{39-57}$ (P.U)       | 0.9800  | 0.9800  | 0.9386  | 0.9807 |
| $T_{9-55}$ (P.U)        | 0.9400  | 0.9400  | 0.9373  | 0.9945 |
| $Min(V)$ (P.U)          | 0.9001  | 0.8248  | 0.8851  | 0.9256 |
| $Max(V)$ (P.U)          | 1.0571  | 1.0400  | 1.0681  | 1.0881 |
| $DP(MW)$                | 28.4550 | 61.6580 | 60.6240 | 57.42  |
| $L\_index$ (P.U)        | 0.3217  | 0.4478  | 0.4022  | 0.2903 |

La figure 4.32 expose les profils de tension de tous les jeux de barres en envisageant les trois cas 2, 3, et 4, la figure 4.33 représente les caractéristiques de convergence de l'indice de stabilité 'L-index' basé sur la variante proposée PSOTVAC, d'après le tableau 4.17 on remarque en premier lieu que la solution optimale atteinte avec utilisation du STATCOM est **0.2903 p.u** meilleure par rapport celle calculée par le même algorithme sans installation de celui-ci et qui vaut **0.4022 p.u**, cette différence notable explique le rôle de l'incorporation de ce dispositif. En deuxième lieu on peut conclure que l'emplacement de ce STATCOM a pour effet de générer un faible indice de stabilité avec considération de toutes les contraintes. Le tableau 4.18 présente les puissances réactives optimisées aux niveaux des unités de production et celles injectées par le STATCOM pour tous les cas abordés, il est clair que les puissances réactives produites de toutes les unités sont dans leurs limites admissibles.

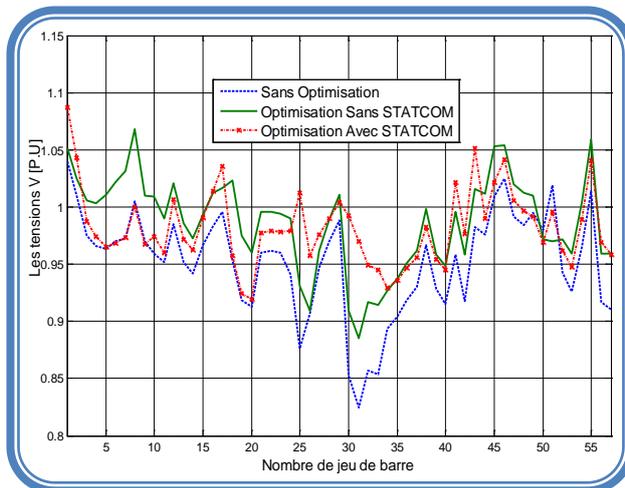


Figure. 4.32 : Profils de tension dans tous les jeux de barres avec et sans STATCOM

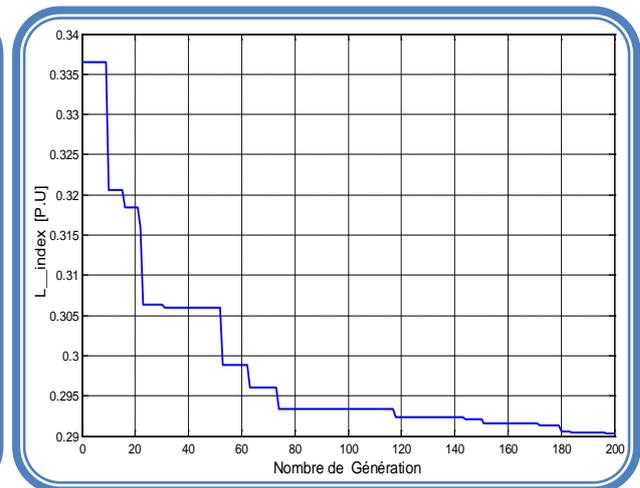


Figure. 4.33 : Caractéristique de Convergence de L\_index par PSO-TVAC.

Tableau. 4.18 Puissances réactives produites par STATCOM et les centrales électriques

|                   | QG-1    | QG-2          | QG-3    | QG-6    | QG-8    | QG-9          | QG-12   | QG-25<br>STATCOM | QG-30<br>STATCOM | QG-33<br>STATCOM |
|-------------------|---------|---------------|---------|---------|---------|---------------|---------|------------------|------------------|------------------|
| QG <sub>MIN</sub> | -2.0000 | -0.1700       | -0.1000 | -0.0800 | -1.4000 | -0.0300       | -1.5000 | -0.5000          | -0.5000          | -0.5000          |
| QG <sub>max</sub> | 3.0000  | 0.5000        | 0.6000  | 0.2500  | 2.0000  | 0.0900        | 1.5500  | 0.5000           | 0.5000           | 0.5000           |
| Case 2            | 1.6441  | 0.3609        | 0.4132  | 0.1459  | 1.1140  | <b>0.4249</b> | 1.3921  | 0.0000           | 0.0000           | 0.0000           |
| Case 3            | 1.1566  | <b>0.5021</b> | 0.3084  | 0.0782  | 1.7916  | <b>0.1515</b> | 1.4802  | 0.0000           | 0.0000           | 0.0000           |
| Case 4            | 2.2997  | -0.1015       | 0.3964  | 0.1391  | 0.97814 | 0.0799        | 1.0672  | 0.2211           | -0.0946          | 0.2219           |

#### 4.6 Test d'application 5 : application de l'algorithme de colonie de fourmis

Cette section est consacré à voir la contribution d'une méthode d'optimisation nommée colonie de Fourmis ACO discutée au chapitre 3 pour minimiser les pertes de transmission actives, dont les paramètres de cet algorithme sont illustrés dans le chapitre 3.

Il s'agit d'inclure deux tests, le premier vise la minimisation de ces pertes dans le cas normal sans aucune surcharge, (Figure. 4.34), dans le deuxième cas un surcharge de 20 % est introduit (Figure. 4.35) et ce pour tester la robustesse de la dite approche.

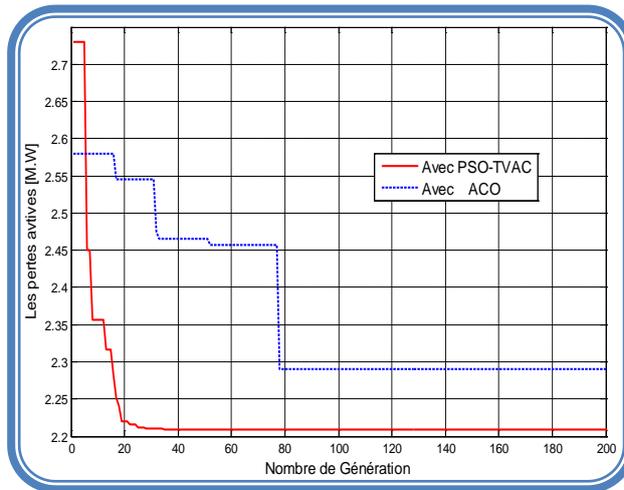


Figure. 4.34 : Caractéristique de Convergence de DP par PSO-TVAC et ACO pour cas de charge normal.

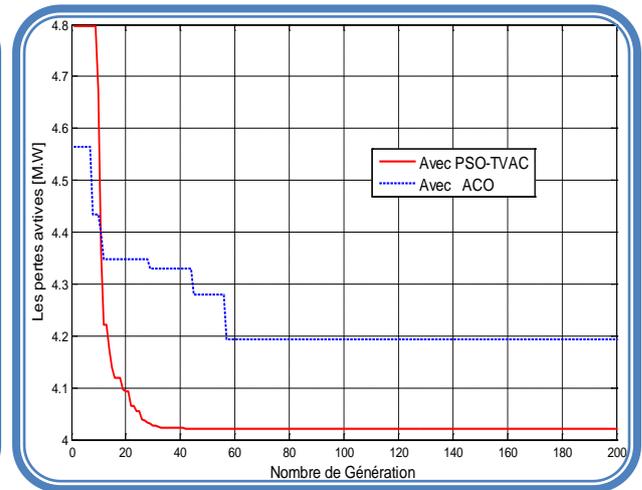


Figure. 4.35 : Caractéristique de Convergence de DP par PSO-TVAC et ACO pour le cas d'une surcharge.

Tableau. 4.19 Résultats des pertes actives par PSO-TVAC, ACO

|             | Cas normal    |               | Cas de surcharge |               |
|-------------|---------------|---------------|------------------|---------------|
|             | ACO           | PSO-TVAC      | ACO              | PSO-TVAC      |
| V2 (P.U)    | 1.0105        | 1.0011        | 1.0105           | 0.9983        |
| V3 (P.U)    | 1.0623        | 1.0746        | 1.0820           | 1.0913        |
| V5 (P.U)    | 1.0230        | 1.0186        | 0.9690           | 1.0214        |
| V8 (P.U)    | 1.0360        | 1.0329        | 0.9931           | 1.0355        |
| V13 (P.U)   | 1.0535        | 1.0377        | 1.0746           | 1.0442        |
| DP (MW)     | <b>2.2906</b> | <b>2.2091</b> | <b>4.1942</b>    | <b>4.0215</b> |
| Temps (sec) | <b>0.0110</b> | <b>0.0284</b> | <b>0.0141</b>    | <b>0.0275</b> |

La figure 4.34 compare la convergence de ces deux approches, la solution quasi globale réalisée par cette nouvelle variante vaut **2.2906 MW** calculée après 200 itérations. La différence entre les deux solutions trouvées (**2.2906 MW par ACO, 2.2091 MW par PSO-TVAC**) se rend au mauvais choix des paramètres de cette nouvelle variante. Ces discussions restent valables pour le deuxième test qui présente une augmentation de la charge.

## 4.7 Conclusion

Dans ce chapitre on a essayé d'appliquer les méthodes d'optimisation globales à la résolution du problème d'optimisation de la puissance réactive par utilisation des systèmes FACTS, pour cela 5 tests d'application ont été traités d'une manière détaillée.

Le premier cas d'application présente une introduction à la résolution de notre problème par minimisation des pertes actives totales et ce en appliquant les algorithmes génétiques AG et essaims de particules dans sa version standard.

Dans le deuxième test on a introduit le dispositif schunt STATCOM pour perfectionner notre optimisation par application de trois variantes de PSO à savoir PSO standard, PSO-IC avec coefficient intérieur ; PSO-FC qui présente le facteur de distiction.

Le test d'application N°3 a été consacré pour étudier l'effet de l'intégration de dispositif FACTS de type série celui de TCSC pour voir son impact sur la minimisation de pertes totales et la déviation de tension, une autre variante de PSO celle avec coefficient d'accélération variable PSO-TVAC est aussi employée pour minimiser les différents critères étudiés.

Dans le quatrième test d'application on procédé à l'amélioration de la stabilité de tension 'L\_index' et ce par l'application de l'approche PSO-TVAC.

Le cinquième test d'application représente un essai d'appliquer une nouvelle technique d'optimisation méta-heuristique celle de colonies de Fourmies ACO.

---

# *Conclusion Générale*

---

## Conclusion générale

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

Il s'agit d'une étude comparative élaborée entre l'optimisation par algorithmes génétiques AG, l'algorithme d'optimisation par essaims de particules standard et ses versions modifiées tels que :

- PSO avec coefficient intérieur PSO-CI.
- PSO avec coefficient constriction PSO-FC.
- PSO avec coefficient d'accélération variable PSO-TVAC.

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 deux dispositifs FACTS sont employés, ce sont les dispositifs série TCSC et shunt STATCOM qui sont proposés dans ce mémoire pour vérifier leurs effet sur l'optimisation envisagée. Cinq tests d'application sont alors représentés dans le quatrième chapitre pour bien examiner et contourner le problème proposé :

Premièrement nous avons commencé par le premier test d'application intitulé minimisation des pertes actives par AG et PSO qui est dédié à vérifier la robustesse de ces deux algorithmes sur l'optimisation de l'énergie réactive via la minimisation de la fonction mono objectif celle des pertes actives, les résultats trouvés concernant les réseaux tests IEEE 14-Bus et IEEE 30-Bus expliquent l'importance d'appliquer ces algorithmes à ce genre de problème.

Dans le deuxième test d'application, le problème d'optimisation de la puissance réactive est traité avec considération de la compensation shunt (STATCOM). 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.

Le troisième test d'application nommé "Optimisation de la Puissance Réactive par utilisation du TCSC" est consacré à analyser l'impact d'intégrer le TCSC dans les réseaux électriques, les deux fonctions objectifs (minimisation des pertes actives et la déviation de tension) sont optimisées individuellement ou simultanément, les courbes de Pareto obtenues expliquent le rôle de l'optimisation multi objectifs. La robustesse de l'approche proposée PSO-TVAC est démontrée sur deux réseaux IEEE 30-Bus, et IEEE 57-Bus, les résultats obtenus sont comparés avec ceux des autres algorithmes : PSO standard, PSO-CI, et PSO-CF.

Le quatrième test est consacré à l'optimisation d'un indice très important qui est l'indice de stabilité de tension. Le compensateur shunt STATCOM est installé dans les jeux de barres les plus sensibles. Les résultats obtenus par l'approche PSO-TVAC ne peut que confirmer une autre fois nos remarques concernant la caractéristique de convergence et la qualité de solution que présente cette variante.

Finalement, la méthode de colonie de fourmi dans sa version de base est adapté pour l'optimisation de la puissance réactive, une seule fonction objective est traitée qui est la minimisation de pertes totales. Les résultats obtenus par cette technique sont encourageants.

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 sécurités.

---

# *Bibliographies*

---

# *Bibliographies*

- [1] Martin Hennebel, "valorisation des services système sur un réseau de transport d'électricité en environnement concurrentiel thèse de doctorat de l'université paris 11 2009
- [2] Abdelaàli ALIBI, "Contrôle des Réseaux Electriques par les Systèmes FACTS: (Flexible AC Transmission Systems)" Magister de l'Université de Batna 2009
- [3] Mancer N, Aggouni Y "modélisation et integration des dispositifs de compensation dynamique FACT", Mémoire de l'ingénieur d'état Juin 2007
- [4] Hingorani NG ,Gygyi L. understanding FACTS : concepts and technology of flexible AC transmission systems .New York : IEEE Press;1999.
- [5] N.G. Hingorani, L. Gyugyi, "Understanding FACTS – Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems", *IEEE Press*, New York, 2000.
- [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] K. R. Padiyar . "FACTS controllers in power transmission and distribution ", New age international publishers, 2007.
- [8] B. Mahdad "Contribution to the improvement of power quality using multi hybrid model based Wind-Shunt FACTS," *10<sup>th</sup> IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering*, Italy, 2011.
- [9] Alireza Seifi, Ph.D. Sasan Gholami, M.S.; and Amin Shabanpour, M.S. Power Flow Study and Comparison of FACTS: Series (SSSC), Shunt (STATCOM), and Shunt-Series (UPFC). *The Pacific Journal of Science and Technology*, Volume 11. Number 1. May 2010 (Spring)
- [10] X.-P. Zhang , E. Handschin , M. Yao, Multi-control functional static synchronous compensator (STATCOM) in power system steady-state operations, *Electric Power Systems Research* 72 (2004) 269–278
- [11] P. L. So, Y. C. Chu, T. Yu, "Coordinated control of TCSC and SVC for system damping enhancement", *International Journal of Control, Automation, and Systems*, June 2005 Vol. 3, No. 2, pp 322-33,.
- [12] Eskandar G.SH Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques l'universite henri poincare, nancy-i 2003
- [13] Rabah Benabid " Optimisation Multiobjectif de la Synthèse des FACTS par les Particules en Essaim pour le Contrôle de la Stabilité de Tension des Réseaux Electriques" Université Amar Telidji, Laghouat 2007
- [14] JC Sabonnadière, N Hadjaïd, "Lignes et réseaux électriques", Lavoisier 11 rus Lavoisier 7500 Paris 2008.
- [15] H. Saadat, Power system analysis, Second Edition, McGraw Hill International Editions, 2004.

- [16] SAYAH Samir, “ Application de l’Intelligence Artificielle pour le Fonctionnement Optimal des Systèmes Electriques Université Ferhat Abbas Sétif
- [17] Stéphane Gerbex. “métaheuristiques appliquées au placement optimal de dispositifs FACTS dans un réseau électrique”, thèse de doctorat n° 2742 Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (2003)
- [18] D.J. Gotham, G.T. Heydt. Power flow control and power loss studies for Systems with FACTS devices”. *IEEE Tran. Power System*, 13(1):60-65 February 1998.
- [19] R.Benabid, M.Boudour, M.A Abido. “Optimal location and setting of SVC and TCSC devices using non-dominated sorting particle swarm optimization”. , *Elect Power and energy syst*, 2009, 79, pp.1668-1677
- [20] Enrique Acha, Claudio R. Fuerte-Esquivel, Hugo Ambriz-Pérez, César Angeles-Camacho *FACTS Modelling and Simulation in Power Networks*. John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England 2004
- [21] Yann Collette - Patrick Siarry, “Optimisation multiobjectif”, éditions eyrolles 61, bld saint-germain 75240 Paris Cedex 05 [www.editions-eyrolles.com](http://www.editions-eyrolles.com)
- [22] 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
- [23] Alain Berro, “Optimisation multiobjectif et stratégies d’évolution en environnement dynamique”, Thèse présentée à l’Université des Sciences Sociales Toulouse I 2001
- [24] Omessaad Hji. “ 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.
- [25] 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-est créteil 2011
- [26] N. Deeb, S.M. Shahidepour, “Linear reactive power optimization in a large power network using the decomposition approach”, *IEEE Trans. Power Syst.* 5 (2) (1990) 428–435.
- [27] Momoh JA, Adapa R, El-Hawary ME. “A review of selected optimal power flow literature to 1993. I. Nonlinear and quadratic programming approaches”. *IEEE Trans Power Syst* 1999,14(1),pp96–104.
- [28] Momoh JA, El-Hawary ME, Adapa R. “A review of selected optimal power flow literature to 1993. II. Newton, linear programming and interior point methods” *IEEE Trans Power Syst*1999, 14(1),pp.105–111.
- [29] Quitana VH, Santos-Nieto M. , “Reactive-power dispatch by successive quadratic programming”, *IEEE Trans Energy convers* 1989;4(3), pp.425-435.
- [30] J.A. Momoh, S.X. Guo, E.C. Ogbuobiri, R. Adapa, “The quadratic interior point method solving power system optimization problems”, *IEEE Trans. Power Syst.* 9 (3) (1994) 1327–1336.
- [31] S. Granville, Optimal reactive dispatch through interior point methods, *IEEE Trans. Power Syst.* 9 (1) (1994) 136–146.
- [32] Mathieu Liedloff, “ Algorithmes exacts et exponentiels pour les problèmes NP-difficiles : domination, variantes et généralisations”, l’université Paul Verlaine – Metz 2007

- [33] Walid Tfaili, "Conception d'un algorithme de colonie de fourmis pour l'optimisation continue dynamique" de l'université paris 12-val de marne 2007
- [34] Jean Dipama, " optimisation multi-objectif des systèmes énergétiques", Université de montréal 2010.
- [35] J. Holland," adaptation in natural and artificial systems university of Michigan Press, Ann Arbor, 1975
- [36] D .E. Goldberg "genetic algorithm optimization and Machine learning" Addison Wesley publishing company, Ind .USA,1989.
- [37] Belkacem SID, "optimisation topologique de structures par algorithmes génétiques. l'université de technologie de Belfort-Montbéliard 2006
- [38] Ouahib Guenounou" Méthodologie de conception de contrôleurs intelligents par l'approche génétique- application à un bioprocédé" l'Université Toulouse III - Paul Sabatier 2009
- [39] Michalewicz, Z. Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs. Springer-Verlag 1992.
- [40] Kennedy J, Eberhart R., "Particle swarm optimization" *In: Proceedings of the IEEE conference on neural networks (ICNN'95)*, vol. IV. Perth, Australia; 1995. pp.1942–1948.
- [41] Antoine Dutot ,"distribution dynamique adaptative à l'aide de mécanismes d'intelligence collective Université du Havre, 2005
- [42] Shi Y, Eberhart RC. "Empirical study of particle swarm optimization". *Proc IEEE Int Congr Evol Comput* 1999,(3),pp101–106.
- [43] Eberhart RC, Shi Y. "Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization". *Proc Congr Evol Comput* 2000;1,pp 84-88.
- [44] [Dorigo, 1992] Dorigo, M. "Optimization, learning and natural algorithms". PhD thesis, Department of Electronics Politecnico di Milano, Italy. In italian (1992).
- [45] [Dorigo, 1996] Dorigo, M., Maniezzo, V., and Colorni, A. "The ant system : optimization by a colony of cooperating agents". *IEEE Trans. Systems Man Cybernet.*, Vol. 26, p. 29–41 (1996).
- [46] Deneubourg, J.L, Goss, S, & Verhaeghe, J.C.. Probabilistic behaviour in ants. *Journal of Theoretical Biology.* 1983, 105, 259\_271.
- [47] [Dorigo, 1997] Dorigo, M. and Gambardella, L. "Has-sop : An hybrid ant system for the sequential ordering problem". Technical report, IDSIA, Lugano, Switzerland (1997).
- [48] Gambardella, L., Taillard, E., & Dorigo, M. Ant Colonies for the Quadratic Assignment Problem. *Journal of the Operational Research Society*, 1999, 50, 167\_176.
- [49] Bullnheimer, B., Hartl, R.F., & Strauss, C. An Improved Ant system Algorithm for the Vehicule Routing Problem. *Annals of Operations Research*, . 1999 89, 319\_328.
- [50] Solnon, C. "Ants can Solve Constraint Satisfaction Problems", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002 6(4), 347\_357.
- [51] 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
- [52] Éric Taillard, " introduction aux méta-heuristiques", coure 3e Cycle romand en informatique Haute ecole d'ingénierie et de gestion de canton de vaud 2007

- [53] Dai, C., Chen, W., Zhu, Y.; Zhang, X. "Seeker optimization algorithm for optimal reactive power dispatch," *IEEE Trans power syst.* 2009, 1(2), pp. 1218-1231
- [54] Wang, H., Xiong, X., Wu, Y., "power system reactive power optimization based on modified tabu search algorithm", *power system technology* 2002. 1, pp15-18
- [55] Zhang X, Chen W, Dai C, Cai W. "Dynamic multi-group self-adaptive differential evolution algorithm for reactive power optimization", *Elect Power and energy syst*, 2010, 32, pp.351–357.
- [56] A. khorsandi, A alimardani, B. Vahidi, SH. Hosseinian." hybride shuffled frog leaping algorithm and Nelder-Mead simples search for optimal reactive power dispatch". *IET Gener transm distrib.* 2011 vol 5 lss2 pp 249-156
- [57] P. Kundur and a. al., "Definition and classification of power system stability," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19 No.2, Mai 2004.
- [58] Lu Wei, "délestage optimal pour la prévention des grandes pannes d'électricité" thèse de doctorat de institut polytechnique de Grenoble 2009
- [59] Varadarajan M, Swarup KS. "Network loss minimization with voltage security using differential evolution", *Elect Power Sys* 2008, 78(5), pp.815–823
- [60] P Kessel and H Glavitsch." Estimation the voltage stability of a power system". *IEEE Trans. PWRD Vol 1 No3* 1986 pp 346-354
- [61] V. Jayasankara, N.Kamaraj b, N.Vanaja. " Estimation of voltage stability index for power system employing artificial neural network technique and TCSC placement". *Neurocomputing* 73 (2010) 3005–3011
- [62] Y Chien-Feng, Gordon G. Lai, Chia-Hau Lee, Ching-Tzong Su, Gary W. Chang. "Optimal setting of reactive compensation devices with an improved voltage stability index for voltage stability enhancement". *Electrical Power and Energy Systems* 37 (2012) 50–57.
- [63] Bansilal A, Thukaram D, Parthasarathy K. Optimal reactive power dispatch algorithm for voltage stability improvement. *Electr Power Energy Syst* 1996;18 pp 461–8.
- [64] D. Devaraj, J. Preetha Roselyn." Genetic algorithm based reactive power dispatch for voltage stability improvement". *Electrical Power and Energy Systems* 32 (2010) 1151–1156
- [65] M.A. Abido. "A novel multiobjective evolutionary algorithm for environmental/economic power dispatch" *Elect Power Syst Res*, 2003, 65, pp 71-81.
- [66] D.W. Gong, Y Zhang, C.L Qi. "Environmental/economic power dispatch using a hybrid multi-objective optimization algorithm". *Elect Power and energy syst*, 2010 ,32, pp,607–614.
- [67] N. Mancor, B. Mahdad, K.Srairi. " Multi Objective Optimal Reactive Power Flow Based STATCOM Using Three variant of PSO" *international journal of energy engineering* Published online at [http:// journal.sapub.org/ijee](http://journal.sapub.org/ijee) 2012,2(2) :pp 1-7
- [68] Liu K., Sheng W., and Y.Li. "research on reactive power optimization based on immunity genetic algorithm," *Springer, ICIC 2006, LNCS 4113*, 2006, pp.600-611.
- [69] Anastasios G.Bakirtzis, Pandel N. biskas, Christoforos E.zoumas, vasilios Petriddis, "optimal power flow by enhanced Genetic Algorithm", *IEEE transactions om Power System* ,Vol.17 No.2,May 2002
- [70] M.S Osman, M.A Abo-Sinna, A .A.Moussa,"A solution to the optimal power flow using genetic algorithm ", *Appl.Math.Comput* .2003.

- [71] Yoshida H, Fukuyama Y, Kawata K, Takayama S, Nakanishi Y. “A particle swarm optimization for reactive power and voltage control considering voltage security assessment,” *IEEE Trans Power Syst* 2001,15(4),pp1232–1239.
- [72] M.A Abido,”Optimal Power Flow using Particle warm Optimisation” *Electric Power and energy systems* ,2002.
- [73] TC Krishna, P Manjaree, S Laxmi.” Particle swarm optimization with time varying acceleration coefficients for non-convex economic power dispatch”. , *Elect Power and energy syst*, 2009, 31,pp.249-257.
- [74] Slimani Linda “ contribution a l’application de l’optimisation par des méthodes metaheuristiques a l’écoulement de puissance optimal dans un environnement de l’électricité dérégulé.” thèse de magister l’université de Batna Alger 2009
- [75] M. Dorigo, T. Stützle. *Ant Colony Optimization*. MIT Press, Cambridge, MA, 2004.
- [76] N. Mancor, B. Mahdad, K. Srairi and M. Hamed. “Minimisation des Pertes de Transmission d’Energie par Utilisation des AG et PSO”. 7th International Conference on Electrical Engineering CEE’12 Octobre 8 – 10, Batna 2012
- [77] N. Mancor, B. Mahdad, K.Srairi, M Hamed. “Multi Objective For Optimal Reactive Power Flow Using Modified PSO Considering TCSC” *international journal of energy engineering* Published online at [http:// journal.sapub.org/ijee](http://journal.sapub.org/ijee) 2012, 2(4): pp165-170
- [78] N. Mancor, B. Mahdad, K.Srairi, M Hamed. “Multi Objective ORPF Using PSO with Time Varying Acceleration Considering TCSC” *Proceedings of the 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering, (EEEIC 2012) Venice Italy, 18 - 25 May 2012*: 802-807.
- [79] M. Hamed, B. Mahdad, K. Srairi and N. Mancor. “Solving Combined Economic Emission Dispatch Problem Using Time Varying Acceleration Based PSO” *Proceedings of the 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering”, (EEEIC 2012) Venice Italy, 18 - 25 May 2012*: 764-769.
- [80] M. Hamed, B. Mahdad, K. Srairi and N. Mancor. “Solving Multi-objective Economic Dispatch Problem Using Flexible Time Varying Acceleration Based PSO” *.4th international conference on electrical engineering (ICEE’12) 07-09 Algiers 2012*

---

# *Annexe*

---

## ANNEX : A

Tableau A.1 : Données des jeux de barres du réseau IEEE 14-Bus

| %          | Bus | Type | Vsp   | theta | PGi | QGi  | PLi  | QLi  | Qmin | Qmax |
|------------|-----|------|-------|-------|-----|------|------|------|------|------|
| busdat14 = | [1  | 1    | 1.060 | 0     | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0;   |
|            | 2   | 2    | 1.045 | 0     | 40  | 42.4 | 21.7 | 12.7 | -40  | 50;  |
|            | 3   | 2    | 1.01  | 0     | 0   | 23.4 | 94.2 | 19.0 | 0    | 40;  |
|            | 4   | 3    | 1.0   | 0     | 0   | 0    | 47.8 | -3.9 | 0    | 0;   |
|            | 5   | 3    | 1.0   | 0     | 0   | 0    | 7.6  | 1.6  | 0    | 0;   |
|            | 6   | 2    | 1.070 | 0     | 0   | 12.2 | 11.2 | 7.5  | -6   | 24;  |
|            | 7   | 3    | 1.0   | 0     | 0   | 0    | 0.0  | 0.0  | 0    | 0;   |
|            | 8   | 2    | 1.090 | 0     | 0   | 17.4 | 0.0  | 0.0  | -6   | 24;  |
|            | 9   | 3    | 1.0   | 0     | 0   | 0    | 29.5 | 16.6 | 0    | 0;   |
|            | 10  | 3    | 1.0   | 0     | 0   | 0    | 9.0  | 5.8  | 0    | 0;   |
|            | 11  | 3    | 1.0   | 0     | 0   | 0    | 3.5  | 1.8  | 0    | 0;   |
|            | 12  | 3    | 1.0   | 0     | 0   | 0    | 6.1  | 1.6  | 0    | 0;   |
|            | 13  | 3    | 1.0   | 0     | 0   | 0    | 13.5 | 5.8  | 0    | 0;   |
|            | 14  | 3    | 1.0   | 0     | 0   | 0    | 14.9 | 5.0  | 0    | 0;]; |

Tableau A.2 : Données des lignes de transport du réseau IEEE 14-Bus

| %           | From | To  | R       | X       | B/2    | X'mer   |
|-------------|------|-----|---------|---------|--------|---------|
| %           | Bus  | Bus | pu      | pu      | pu     | TAP (a) |
| linedat14 = | [1   | 2   | 0.01938 | 0.05917 | 0.0264 | 1       |
|             | 1    | 5   | 0.05403 | 0.22304 | 0.0246 | 1       |
|             | 2    | 3   | 0.04699 | 0.19797 | 0.0219 | 1       |
|             | 2    | 4   | 0.05811 | 0.17632 | 0.0170 | 1       |
|             | 2    | 5   | 0.05695 | 0.17388 | 0.0173 | 1       |
|             | 3    | 4   | 0.06701 | 0.17103 | 0.0064 | 1       |
|             | 4    | 5   | 0.01335 | 0.04211 | 0.0    | 1       |
|             | 4    | 7   | 0.0     | 0.20912 | 0.0    | 0.978   |
|             | 4    | 9   | 0.0     | 0.55618 | 0.0    | 0.969   |
|             | 5    | 6   | 0.0     | 0.25202 | 0.0    | 0.932   |
|             | 6    | 11  | 0.09498 | 0.19890 | 0.0    | 1       |
|             | 6    | 12  | 0.12291 | 0.25581 | 0.0    | 1       |
|             | 6    | 13  | 0.06615 | 0.13027 | 0.0    | 1       |
|             | 7    | 8   | 0.0     | 0.17615 | 0.0    | 1       |
|             | 7    | 9   | 0.0     | 0.11001 | 0.0    | 1       |
|             | 9    | 10  | 0.03181 | 0.08450 | 0.0    | 1       |
|             | 9    | 14  | 0.12711 | 0.27038 | 0.0    | 1       |
|             | 10   | 11  | 0.08205 | 0.19207 | 0.0    | 1       |
|             | 12   | 13  | 0.22092 | 0.19988 | 0.0    | 1       |
|             | 13   | 14  | 0.17093 | 0.34802 | 0.0    | 1];     |

## ANNEX : B

**Tableau B.1 :** Données des jeux de barres du réseau IEEE 30-Bus

| %             | Bus | Type | Vsp   | theta | PGi | QGi  | PLi  | QLi  | Qmin | Qmax |
|---------------|-----|------|-------|-------|-----|------|------|------|------|------|
| busdat30 = [1 | 1   | 1    | 1.06  | 0     | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0;   |
|               | 2   | 2    | 1.043 | 0     | 40  | 50.0 | 21.7 | 12.7 | -40  | 50;  |
|               | 3   | 3    | 1.0   | 0     | 0   | 0    | 2.4  | 1.2  | 0    | 0;   |
|               | 4   | 3    | 1.06  | 0     | 0   | 0    | 7.6  | 1.6  | 0    | 0;   |
|               | 5   | 2    | 1.01  | 0     | 0   | 37.0 | 94.2 | 19.0 | -40  | 40;  |
|               | 6   | 3    | 1.0   | 0     | 0   | 0    | 0.0  | 0.0  | 0    | 0;   |
|               | 7   | 3    | 1.0   | 0     | 0   | 0    | 22.8 | 10.9 | 0    | 0;   |
|               | 8   | 2    | 1.01  | 0     | 0   | 37.3 | 30.0 | 30.0 | -10  | 40;  |
|               | 9   | 3    | 1.0   | 0     | 0   | 0    | 0.0  | 0.0  | 0    | 0;   |
|               | 10  | 3    | 1.0   | 0     | 0   | 19.0 | 5.8  | 2.0  | 0    | 0;   |
|               | 11  | 2    | 1.082 | 0     | 0   | 16.2 | 0.0  | 0.0  | -6   | 24;  |
|               | 12  | 3    | 1.0   | 0     | 0   | 0    | 11.2 | 7.5  | 0    | 0;   |
|               | 13  | 2    | 1.071 | 0     | 0   | 10.6 | 0.0  | 0.0  | -6   | 24;  |
|               | 14  | 3    | 1.0   | 0     | 0   | 0    | 6.2  | 1.6  | 0    | 0;   |
|               | 15  | 3    | 1.0   | 0     | 0   | 0    | 8.2  | 2.5  | 0    | 0;   |
|               | 16  | 3    | 1.0   | 0     | 0   | 0    | 3.5  | 1.8  | 0    | 0;   |
|               | 17  | 3    | 1.0   | 0     | 0   | 0    | 9.0  | 5.8  | 0    | 0;   |
|               | 18  | 3    | 1.0   | 0     | 0   | 0    | 3.2  | 0.9  | 0    | 0;   |
|               | 19  | 3    | 1.0   | 0     | 0   | 0    | 9.5  | 3.4  | 0    | 0;   |
|               | 20  | 3    | 1.0   | 0     | 0   | 0    | 2.2  | 0.7  | 0    | 0;   |
|               | 21  | 3    | 1.0   | 0     | 0   | 0    | 17.5 | 11.2 | 0    | 0;   |
|               | 22  | 3    | 1.0   | 0     | 0   | 0    | 0.0  | 0.0  | 0    | 0;   |
|               | 23  | 3    | 1.0   | 0     | 0   | 0    | 3.2  | 1.6  | 0    | 0;   |
|               | 24  | 3    | 1.0   | 0     | 0   | 4.3  | 8.7  | 6.7  | 0    | 0;   |
|               | 25  | 3    | 1.0   | 0     | 0   | 0    | 0.0  | 0.0  | 0    | 0;   |
|               | 26  | 3    | 1.0   | 0     | 0   | 0    | 3.5  | 2.3  | 0    | 0;   |
|               | 27  | 3    | 1.0   | 0     | 0   | 0    | 0.0  | 0.0  | 0    | 0;   |
|               | 28  | 3    | 1.0   | 0     | 0   | 0    | 0.0  | 0.0  | 0    | 0;   |
|               | 29  | 3    | 1.0   | 0     | 0   | 0    | 2.4  | 0.9  | 0    | 0;   |
|               | 30  | 3    | 1.0   | 0     | 0   | 0    | 10.6 | 1.9  | 0    | 0 ]; |

**Tableau B.2 :** Données des lignes de transport du réseau IEEE 30-Bus

| %              | From | To  | R      | X      | B/2    | X'mer   |
|----------------|------|-----|--------|--------|--------|---------|
| %              | Bus  | Bus | pu     | pu     | pu     | TAP (a) |
| linedat30 = [1 | 2    |     | 0.0192 | 0.0575 | 0.0264 | 1       |
|                | 1    | 3   | 0.0452 | 0.1652 | 0.0204 | 1       |
|                | 2    | 4   | 0.0570 | 0.1737 | 0.0184 | 1       |
|                | 3    | 4   | 0.0132 | 0.0379 | 0.0042 | 1       |
|                | 2    | 5   | 0.0472 | 0.1983 | 0.0209 | 1       |
|                | 2    | 6   | 0.0581 | 0.1763 | 0.0187 | 1       |
|                | 4    | 6   | 0.0119 | 0.0414 | 0.0045 | 1       |
|                | 5    | 7   | 0.0460 | 0.1160 | 0.0102 | 1       |
|                | 6    | 7   | 0.0267 | 0.0820 | 0.0085 | 1       |
|                | 6    | 8   | 0.0120 | 0.0420 | 0.0045 | 1       |
|                | 6    | 9   | 0.0    | 0.2080 | 0.0    | 0.978   |

|    |    |        |        |        |       |
|----|----|--------|--------|--------|-------|
| 6  | 10 | 0.0    | 0.5560 | 0.0    | 0.969 |
| 9  | 11 | 0.0    | 0.2080 | 0.0    | 1     |
| 9  | 10 | 0.0    | 0.1100 | 0.0    | 1     |
| 4  | 12 | 0.0    | 0.2560 | 0.0    | 0.932 |
| 12 | 13 | 0.0    | 0.1400 | 0.0    | 1     |
| 12 | 14 | 0.1231 | 0.2559 | 0.0    | 1     |
| 12 | 15 | 0.0662 | 0.1304 | 0.0    | 1     |
| 12 | 16 | 0.0945 | 0.1987 | 0.0    | 1     |
| 14 | 15 | 0.2210 | 0.1997 | 0.0    | 1     |
| 16 | 17 | 0.0824 | 0.1923 | 0.0    | 1     |
| 15 | 18 | 0.1073 | 0.2185 | 0.0    | 1     |
| 18 | 19 | 0.0639 | 0.1292 | 0.0    | 1     |
| 19 | 20 | 0.0340 | 0.0680 | 0.0    | 1     |
| 10 | 20 | 0.0936 | 0.2090 | 0.0    | 1     |
| 10 | 17 | 0.0324 | 0.0845 | 0.0    | 1     |
| 10 | 21 | 0.0348 | 0.0749 | 0.0    | 1     |
| 10 | 22 | 0.0727 | 0.1499 | 0.0    | 1     |
| 21 | 23 | 0.0116 | 0.0236 | 0.0    | 1     |
| 15 | 23 | 0.1000 | 0.2020 | 0.0    | 1     |
| 22 | 24 | 0.1150 | 0.1790 | 0.0    | 1     |
| 23 | 24 | 0.1320 | 0.2700 | 0.0    | 1     |
| 24 | 25 | 0.1885 | 0.3292 | 0.0    | 1     |
| 25 | 26 | 0.2544 | 0.3800 | 0.0    | 1     |
| 25 | 27 | 0.1093 | 0.2087 | 0.0    | 1     |
| 28 | 27 | 0.0    | 0.3960 | 0.0    | 0.968 |
| 27 | 29 | 0.2198 | 0.4153 | 0.0    | 1     |
| 27 | 30 | 0.3202 | 0.6027 | 0.0    | 1     |
| 29 | 30 | 0.2399 | 0.4533 | 0.0    | 1     |
| 8  | 28 | 0.0636 | 0.2000 | 0.0214 | 1     |
| 6  | 28 | 0.0169 | 0.0599 | 0.065  | 1 ];  |

## ANNEX : C

Tableau C.1 : Données des jeux de barres du réseau IEEE 57-Bus

| %          | Bus | Type | Vsp   | theta | PGi  | QGi  | PLi   | QLi   | Qmin  | Qmax    |
|------------|-----|------|-------|-------|------|------|-------|-------|-------|---------|
| busdat57 = | [1  | 1    | 1.040 | 0     | 0.0  | 0.0  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0;    |
|            | 2   | 2    | 1.010 | 0     | 3.0  | 88.0 | 0.0   | -0.8  | 50.0  | -17.0;  |
|            | 3   | 2    | 0.99  | 0     | 41.0 | 21.0 | 40.0  | -1.0  | 60.0  | -10.0;  |
|            | 4   | 3    | 1.000 | 0     | 0.0  | 0.0  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0;    |
|            | 5   | 3    | 1.000 | 0     | 13.0 | 4.0  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0;    |
|            | 6   | 2    | 0.980 | 0     | 75.0 | 2.0  | 0.0   | 0.8   | 25.0  | -8.0;   |
|            | 7   | 3    | 1.000 | 0     | 0.0  | 0.0  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0;    |
|            | 8   | 2    | 1.01  | 0     | 50.0 | 22.0 | 450.0 | 62.1  | 200.0 | -140.0; |
|            | 9   | 2    | 0.980 | 0     | 21.0 | 26.0 | 0.0   | 2.2   | 9.0   | -3.0;   |
|            | 10  | 3    | 1.000 | 0     | 5.0  | 2.0  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0;    |
|            | 11  | 3    | 1.000 | 0     | 0.0  | 0.0  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0;    |
|            | 12  | 2    | 1.02  | 0     | 77.0 | 24.0 | 310.0 | 128.5 | 155.0 | -150.0; |
|            | 13  | 3    | 1.000 | 0     | 18.0 | 2.3  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0;    |
|            | 14  | 3    | 1.000 | 0     | 10.5 | 5.3  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0;    |
|            | 15  | 3    | 1.000 | 0     | 22.0 | 5.0  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0;    |
|            | 16  | 3    | 1.000 | 0     | 43.0 | 3.0  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0;    |
|            | 17  | 3    | 1.000 | 0     | 42.0 | 8.0  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0;    |
|            | 18  | 3    | 1.000 | 0     | 27.2 | 9.8  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0;    |
|            | 19  | 3    | 1.000 | 0     | 3.3  | 0.6  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0;    |
|            | 20  | 3    | 1.000 | 0     | 2.3  | 1.0  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0;    |
|            | 21  | 3    | 1.000 | 0     | 0.0  | 0.0  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0;    |
|            | 22  | 3    | 1.000 | 0     | 0.0  | 0.0  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0;    |
|            | 23  | 3    | 1.000 | 0     | 6.3  | 2.1  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0;    |
|            | 24  | 3    | 1.000 | 0     | 0.0  | 0.0  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0;    |
|            | 25  | 3    | 1.000 | 0     | 6.3  | 3.2  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0;    |
|            | 26  | 3    | 1.000 | 0     | 0.0  | 0.0  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0;    |
|            | 27  | 3    | 1.000 | 0     | 9.3  | 0.5  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0;    |
|            | 28  | 3    | 1.000 | 0     | 4.6  | 2.3  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0;    |
|            | 29  | 3    | 1.000 | 0     | 17.0 | 2.6  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0;    |
|            | 30  | 3    | 1.000 | 0     | 3.6  | 1.8  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0;    |
|            | 31  | 3    | 1.000 | 0     | 5.8  | 2.9  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0;    |
|            | 32  | 3    | 1.000 | 0     | 1.6  | 0.8  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0;    |
|            | 33  | 3    | 1.000 | 0     | 3.8  | 1.9  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0;    |
|            | 34  | 3    | 1.000 | 0     | 0.0  | 0.0  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0;    |
|            | 35  | 3    | 1.000 | 0     | 6.0  | 3.0  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0;    |
|            | 36  | 3    | 1.000 | 0     | 0.0  | 0.0  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0;    |
|            | 37  | 3    | 1.000 | 0     | 0.0  | 0.0  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0;    |
|            | 38  | 3    | 1.000 | 0     | 14.0 | 7.0  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0;    |
|            | 39  | 3    | 1.000 | 0     | 0.0  | 0.0  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0;    |
|            | 40  | 3    | 1.000 | 0     | 0.0  | 0.0  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0;    |
|            | 41  | 3    | 1.000 | 0     | 6.3  | 3.0  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0;    |
|            | 42  | 3    | 1.000 | 0     | 7.1  | 4.4  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0;    |
|            | 43  | 3    | 1.000 | 0     | 2.0  | 1.0  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0;    |
|            | 44  | 3    | 1.000 | 0     | 12.0 | 1.8  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0;    |
|            | 45  | 3    | 1.000 | 0     | 0.0  | 0.0  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0;    |
|            | 46  | 3    | 1.000 | 0     | 0.0  | 0.0  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0;    |
|            | 47  | 3    | 1.000 | 0     | 29.7 | 11.6 | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0;    |
|            | 48  | 3    | 1.000 | 0     | 0.0  | 0.0  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0;    |

|    |   |       |   |      |      |     |     |     |       |
|----|---|-------|---|------|------|-----|-----|-----|-------|
| 49 | 3 | 1.000 | 0 | 18.0 | 8.5  | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0;  |
| 50 | 3 | 1.000 | 0 | 21.0 | 10.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0;  |
| 51 | 3 | 1.000 | 0 | 18.0 | 5.3  | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0;  |
| 52 | 3 | 1.000 | 0 | 4.9  | 2.2  | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0;  |
| 53 | 3 | 1.000 | 0 | 20.0 | 10.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0;  |
| 54 | 3 | 1.000 | 0 | 4.1  | 1.4  | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0;  |
| 55 | 3 | 1.000 | 0 | 6.8  | 3.4  | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0;  |
| 56 | 3 | 1.000 | 0 | 7.6  | 2.2  | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0;  |
| 57 | 3 | 1.000 | 0 | 6.7  | 2.0  | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0]; |

Tableau C.2 : Données des lignes de transport du réseau IEEE 57-Bus

| %             | From | To  | R      | X      | B/2    | X'mer   |  |
|---------------|------|-----|--------|--------|--------|---------|--|
| %             | Bus  | Bus | pu     | pu     | pu     | TAP (a) |  |
| linedat57 = [ | 1    | 2   | 0.0083 | 0.0280 | 0.0645 | 1       |  |
|               | 2    | 3   | 0.0298 | 0.0850 | 0.0409 | 1       |  |
|               | 3    | 4   | 0.0112 | 0.0366 | 0.0190 | 1       |  |
|               | 4    | 5   | 0.0625 | 0.1320 | 0.0129 | 1       |  |
|               | 4    | 6   | 0.0430 | 0.1480 | 0.0174 | 1       |  |
|               | 6    | 7   | 0.0200 | 0.1020 | 0.0138 | 1       |  |
|               | 6    | 8   | 0.0339 | 0.1730 | 0.0235 | 1       |  |
|               | 8    | 9   | 0.0099 | 0.0505 | 0.0274 | 1       |  |
|               | 9    | 10  | 0.0369 | 0.1679 | 0.0220 | 1       |  |
|               | 9    | 11  | 0.0258 | 0.0848 | 0.0109 | 1       |  |
|               | 9    | 12  | 0.0648 | 0.2950 | 0.0386 | 1       |  |
|               | 9    | 13  | 0.0481 | 0.1580 | 0.0203 | 1       |  |
|               | 13   | 14  | 0.0132 | 0.0434 | 0.0055 | 1       |  |
|               | 13   | 15  | 0.0269 | 0.0869 | 0.0115 | 1       |  |
|               | 1    | 15  | 0.0178 | 0.0910 | 0.0494 | 1       |  |
|               | 1    | 16  | 0.0454 | 0.2060 | 0.0273 | 1       |  |
|               | 1    | 17  | 0.0238 | 0.1080 | 0.0143 | 1       |  |
|               | 3    | 15  | 0.0162 | 0.0530 | 0.0272 | 1       |  |
|               | 4    | 18  | 0.0    | 0.5550 | 0.0    | 0.970   |  |
|               | 4    | 18  | 0.0    | 0.4300 | 0.0    | 0.978   |  |
|               | 5    | 6   | 0.0302 | 0.0641 | 0.0062 | 1       |  |
|               | 7    | 8   | 0.0139 | 0.0712 | 0.0097 | 1       |  |
|               | 10   | 12  | 0.0277 | 0.1262 | 0.0164 | 1       |  |
|               | 11   | 13  | 0.0223 | 0.0732 | 0.0094 | 1       |  |
|               | 12   | 13  | 0.0178 | 0.0580 | 0.0302 | 1       |  |
|               | 12   | 16  | 0.0180 | 0.0813 | 0.0108 | 1       |  |
|               | 12   | 17  | 0.0397 | 0.1790 | 0.0238 | 1       |  |
|               | 14   | 15  | 0.0171 | 0.0547 | 0.0074 | 1       |  |
|               | 18   | 19  | 0.4610 | 0.6850 | 0.0    | 1       |  |
|               | 19   | 20  | 0.2830 | 0.4340 | 0.0    | 1       |  |
|               | 21   | 20  | 0.0    | 0.7767 | 0.0    | 1.043   |  |
|               | 21   | 22  | 0.0736 | 0.1170 | 0.0    | 1       |  |
|               | 22   | 23  | 0.0099 | 0.0152 | 0.0    | 1       |  |
|               | 23   | 24  | 0.1660 | 0.2560 | 0.0042 | 1       |  |
|               | 24   | 25  | 0.0    | 1.1820 | 0.0    | 1       |  |
|               | 24   | 25  | 0.0    | 1.2300 | 0.0    | 1       |  |
|               | 24   | 26  | 0.0    | 0.0473 | 0.0    | 1.043   |  |
|               | 26   | 27  | 0.1650 | 0.2540 | 0.0    | 1       |  |
|               | 27   | 28  | 0.0618 | 0.0954 | 0.0    | 1       |  |
|               | 28   | 29  | 0.0418 | 0.0587 | 0.0    | 1       |  |
|               | 7    | 29  | 0.0    | 0.0648 | 0.0    | 0.967   |  |
|               | 25   | 30  | 0.1350 | 0.2020 | 0.0    | 1       |  |

|    |    |        |        |        |         |
|----|----|--------|--------|--------|---------|
| 30 | 31 | 0.3260 | 0.4970 | 0.0    | 1       |
| 31 | 32 | 0.5070 | 0.7550 | 0.0    | 1       |
| 32 | 33 | 0.0392 | 0.0360 | 0.0    | 1       |
| 34 | 32 | 0.0    | 0.9530 | 0.0    | 0.975   |
| 34 | 35 | 0.0520 | 0.0780 | 0.0016 | 1       |
| 35 | 36 | 0.0430 | 0.0537 | 0.0008 | 1       |
| 36 | 37 | 0.0290 | 0.0366 | 0.0    | 1       |
| 37 | 38 | 0.0651 | 0.1009 | 0.0010 | 1       |
| 37 | 39 | 0.0239 | 0.0379 | 0.0    | 1       |
| 36 | 40 | 0.0300 | 0.0466 | 0.0    | 1       |
| 22 | 38 | 0.0192 | 0.0295 | 0.0    | 1       |
| 11 | 41 | 0.0    | 0.7490 | 0.0    | 0.955   |
| 41 | 42 | 0.2070 | 0.3520 | 0.0    | 1       |
| 41 | 43 | 0.0    | 0.4120 | 0.0    | 1       |
| 38 | 44 | 0.0289 | 0.0585 | 0.0010 | 1       |
| 15 | 45 | 0.0    | 0.1042 | 0.0    | 0.955   |
| 14 | 46 | 0.0    | 0.0735 | 0.0    | 0.900   |
| 46 | 47 | 0.0230 | 0.0680 | 0.0016 | 1       |
| 47 | 48 | 0.0182 | 0.0233 | 0.0    | 1       |
| 48 | 49 | 0.0834 | 0.1290 | 0.0024 | 1       |
| 49 | 50 | 0.0801 | 0.1280 | 0.0    | 1       |
| 50 | 51 | 0.1386 | 0.2200 | 0.0    | 1       |
| 10 | 51 | 0.0    | 0.0712 | 0.0    | 0.930   |
| 13 | 49 | 0.0    | 0.1910 | 0.0    | 0.895   |
| 29 | 52 | 0.1442 | 0.1870 | 0.0    | 1       |
| 52 | 53 | 0.0762 | 0.0984 | 0.0    | 1       |
| 53 | 54 | 0.1878 | 0.2320 | 0.0    | 1       |
| 54 | 55 | 0.1732 | 0.2265 | 0.0    | 1       |
| 11 | 43 | 0.0    | 0.1530 | 0.0    | 0.958   |
| 44 | 45 | 0.0624 | 0.1242 | 0.0020 | 1       |
| 40 | 56 | 0.0    | 1.1950 | 0.0    | 0.958   |
| 56 | 41 | 0.5530 | 0.5490 | 0.0    | 1       |
| 56 | 42 | 0.2125 | 0.3540 | 0.0    | 1       |
| 39 | 57 | 0.0    | 1.3550 | 0.0    | 0.980   |
| 57 | 56 | 0.1740 | 0.2600 | 0.0    | 1       |
| 38 | 49 | 0.1150 | 0.1770 | 0.0015 | 1       |
| 38 | 48 | 0.0312 | 0.0482 | 0.0    | 1       |
| 9  | 55 | 0.0    | 0.1205 | 0.0    | 0.940]; |

## Résumé

Ce mémoire présente une contribution à 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 génétiques AG, Algorithme d'optimisation par colonies de Fourmies, l'optimisation par essaims de particules PSO et ses versions modifiées telles que l'algorithme PSO avec facteur intérieur (PSO-CI), PSO avec facteur de constriction PSO-FC, et l'algorithme d'optimisation par essaims de particules avec coefficient d'accélération variable PSO-TVAC.

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, deux dispositifs FACTS (STATCOM et TCSC) ont été modélisés et intégrés dans des réseaux tests pratiques. Pour renforcer le contenu de notre travail, un indice de stabilité de tension nommé 'L\_index' est minimiser en coordination avec les paramètres de compensateur shunt STATCOM pour améliorer la stabilité de tension dans les réseaux électriques et assurer une exploitation efficace. Les méthodes metaheuristiques proposées ont été validées sur des réseaux tests internationaux typiques: IEEE 30-Bus, IEEE 57-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, STATCOM, TCSC. Méthodes d'optimisation classique, Méthodes d'optimisation globales : GA, PSO, PSO-CI, PSO-FC, PSO-TVAC, ACO. Stabilité de tension, L-index.

### ملخص

تعرض هذه المذكرة مساهمة لتحسين التوزيع الأمثل للطاقة الغير فعالة من خلال دمج تكنولوجيا الأنظمة المطواعة FACTS وذلك بتطبيق عدة طرق مستمدة من الطبيعة كالخوارزميات الجينية GA والأسراب الجزئية PSO ونسخ معدلة من هذه الأخيرة مثل خوارزمية (PSO-IC) ، (PSO-FC) ، (PSO-TVAC) وكذا طريقة النمل (ACO). ويستند موضوعنا على تحقيق السبر الأمثل لمختلف قيود المساواة وعدم المساواة للتقليل من الضياع في الطاقة وانحراف الجهد على مستوى قضبان التجميع. ويتم تحليل هذه النتائج لدراسة أثر استخدام نوعين من الأجهزة وهما STATCOM و TCSC لدعم التقليل من الخسائر في الطاقة وانحراف الجهد كل على حدى (أي هدف واحد لتقليل من خسائر الطاقة أو التقليل من انحراف الجهد) والاثنتين معا (متعددة الأهداف: الضياع في الطاقة والانحراف في الجهد). لتعزير هذا العمل الحالي، يتم التعامل أيضا مع هدف آخر لتحقيق التحسين المطلوب ولكن هذه المرة من خلال تحسين الاستقرار في الجهد من خلال التقليل من مؤشر استقرار الجهد (L\_index) وهذا بدراسة و مقارنة النتائج مع وبدون إدخال جهاز STATCOM. لاختبار مدى متانة هذا النوع من الخوارزميات قمنا باختبار هذه الطرق على شبكات اختبار قياسية (IEEE 30-Bus, IEEE 57-Bus). النتائج المتحصل عليها تؤكد مدى فعالية الطريقة المعدلة TVAC-PSO من ضمان حل أمثل وتقارب محسن.

### الكلمات المفتاحية

التدفق الأمثل للطاقة الكهربائية، نظام تعويض الطاقة الغير فعالة، أنظمة خطوط النقل المطواعة المعوض المتوازي للطاقة الغير فعالة ، (STATCOM)المعوض التسلسلي المتحكم فيه بواسطة الثيريستور (TCSC) ، الخوارزميات الجينية (AG)، طريقة الأسراب الجزئية (PSO) ، طريقة النمل (ACO).

### Abstract

This thesis presents a contribution to the optimization of reactive power flow considering new technology FACTS using several methods based meta-heuristics: Genetic algorithms GA optimization, particle swarm optimization (PSO) and many modified versions such as: PSO algorithm with interior coefficient (PSOIC), PSO with constriction factor PSOFC, the PSO algorithm with time varying acceleration PSO-TVAC and the Ant Colony Optimization technique.

In this work, many objective functions are considered: total active power loss, voltage deviation, these two objective functions are treated individually and simultaneously using multi objective formulation. Two FACTS devices (STATCOM and TCSC) are installed at critical buses to reduce the total power losses and voltage deviation.

To reinforce this present work, another objective is also treated to achieve the desired optimization by improving voltage stability through minimizing the voltage stability index known as (L\_index). The proposed optimization methods are applied to many practical electrical network (IEEE 14-Bus; IEEE 30-Bus and IEEE 57-Bus), combative study between many standard optimization techniques shows clearly the robustness of the TVAC-PSO variant in term of solution quality and convergence characteristics.

**Keywords:** Optimal Reactive Power flow, Multi Objective, Flexible AC Transmission Systems FACTS, STATCOM, Thyristor controlled series compensators (TCSC), Particle Swarm Optimization (PSO), PSO with time varying acceleration PSO-TVAC, Genetic algorithm AG, Ant Colony Optimization ACO,