

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

Ecole Nationale Polytechnique



Département d'Electrotechnique

Laboratoire de recherche en Electrotechnique

Mémoire de Projet de Fin d'Etudes pour l'obtention du diplôme
d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique

Intitulé :

**Emplacement Optimal Multi-objectif des
Compensateurs Shunts dans les Réseaux
Electriques de Distribution**

Etudié par

REBHAOUI Abderrahmane

Sous la direction du **Pr. A. HELLAL**

Présenté et soutenu le 19 juin 2018

Membres de jury :

Président :	T. ZEBBADJI	Docteur, ENP
Rapporteur :	A. HELLAL	Professeur, ENP
Examineur :	A. CHAOU	Docteur, ENP

ENP 2018

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



Département d'Electrotechnique

Laboratoire de recherche en Electrotechnique

Mémoire de Projet de Fin d'Etudes pour l'obtention du diplôme
d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique

Intitulé :

**Emplacement Optimal Multi-objectif des
Compensateurs Shunts dans les Réseaux
Electriques de Distribution**

Etudié par

REBHAOUI Abderrahmane

Sous la direction du **Pr. A. HELLAL**

Présenté et soutenu le 19 juin 2018

Membres de jury :

Président :	T. ZEBBADJI	Docteur, ENP
Rapporteur :	A. HELLAL	Professeur, ENP
Examineur :	A. CHAOU	Docteur, ENP

ENP 2018

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Professeur Abdelhafid HELLAL qui m'a offert la possibilité de réaliser ce projet de fin d'étude sous sa direction. Je lui suis reconnaissant de la liberté et de la confiance qu'il m'a témoignée le long de ce travail. Aussi pour son support technique, ces conseils et pour les orientations qu'il m'a données.

Je tiens à remercier mes parents de tous les sacrifices qu'ils ont consentis pour me permettre de suivre mes études dans les meilleures conditions possibles et n'avoir jamais cessé de m'encourager tout au long de mes années d'étude.

Mes remerciements vont aussi au Dr. ZEBBADJI de l'ENP pour avoir accepté de présider ce jury de soutenance, ainsi qu'à Mr. CHAOU qui m'a honoré en acceptant d'examiner ce projet.

Je remercie tous les enseignants qui ont contribué à notre formation à l'Ecole Nationale Polytechnique et à l'Ecole Préparatoire des Sciences et Techniques d'Alger, pour qui, notre gratitude et reconnaissance sont éternelles.

REBHAOUI Abderrahmane

Juin 2018

ملخص

الغرض من هذا المشروع هو تحديد الموقع الأمثل متعدد الأهداف لمعوض متصل بالتوازي في شبكات التوزيع الكهربائية، حيث المعوض هو SVC الذي ينتمي إلى مجموعة FACTS. طريقة التحسين المستخدمة هي سرب الجسيم (PSO)، و عن طريقة أخرى تتكيف مع المشاكل متعددة الأهداف (MOPSO). هذا التحسين يخضع لقيود مختلفة لغرض : أمن تشغيل الشبكة، نوعية جيدة من الطاقة و حجم SVC قابل للتحقيق. تتمثل الأهداف المختارة في تقليل الخسائر الكهربائية وتحسين الجهد الكهربائي، وهي أهم المعايير في شبكة توزيع الكهرباء، يتم تحسين هذين الهدفين بشكل فردي ومعافي نفس الوقت. يستند العمل على مقارنة تأثير إدخال SVC في عدة مواقع، ثم اختيار الموقع الأمثل الذي يعطي أفضل عائد وفقاً للهدف المختار. تم التحقق من صحة الحسابات على شبكات اختبار IEEE.

Abstract

The purpose of this project is to determine the optimal multi-objective location of a shunt compensator in electrical distribution networks; the compensator is an SVC that belongs to the FACTS group. The optimization method used is that of the particle swarm (PSO), as well as another method that is inspired from the first and adapted to multi-objective problems (MOPSO). This optimization is subject to different constraints for the purpose of: safety of the operation of the network, good quality of energy and achievable SVC powers for these networks. The objectives chosen are the minimization of losses and the improvement of the voltage profile, which are the most important parameters in the distribution of electricity; these two objectives are optimized individually and simultaneously. The work is based on comparing the impact of SVC insertion in multiple locations, then selecting the optimal location that gives the best return according to the chosen objective. The calculations were validated on IEEE test networks.

Résumé

Ce projet a pour but de déterminer l'emplacement optimal multi-objectif d'un compensateur shunt dans les réseaux électriques de distribution, où le compensateur est un SVC qui appartient au groupe de FACTS. La méthode d'optimisation utilisée est celle d'essaim de particules (OEP-PSO), ainsi qu'une autre méthode : MOPSO, inspirée de la première et adaptée aux problèmes multi-objectifs. Cette optimisation soumise à différentes contraintes, vise : la sûreté du fonctionnement du réseau, une bonne qualité de l'énergie fournie et des puissances du SVC réalisables pour ces réseaux. Les objectifs choisis sont la minimisation des pertes et l'amélioration du profil de tension, paramètres très importants dans la distribution électrique, ces deux objectifs étant optimisés individuellement et simultanément. Ce travail est basé sur la comparaison de l'impact de l'insertion des SVCs selon différents emplacements, puis l'emplacement optimal donnant la meilleure performance selon l'objectif choisi et sélectionné. Les calculs ont été validés sur des réseaux de test IEEE.

Table des matières

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

INTRODUCTION GENERALE.....	10
----------------------------	----

CHAPITRE 1 : RESEAUX ELECTRIQUES DE DISTRIBUTION

1.1 INTRODUCTION.....	12
1.2 STRUCTURES TOPOLOGIQUES DES RESEAUX.....	13
1.3 FONCTIONS DES RESEAUX ELECTRIQUES.....	13
1.4 SPECIFICITES DES RESEAUX DE DISTRIBUTION	14
1.4.1 CARACTERISTIQUES TECHNIQUES	14
1.4.2 POSTES SOURCES	14
1.4.3 LIGNES DE DISTRIBUTION.....	15
1.4.4 QUALITE DE SERVICE	15
1.5 MODELISATION MATHEMATIQUE DES ELEMENTS.....	16
1.5.1 CHARGES	16
1.5.2 LIGNES DE TRANSPORT	16
1.5.3 TRANSFORMATEURS	17
1.6 ANALYSE MATHEMATIQUE DES RESEAUX ELECTRIQUES.....	17
1.6.1 CLASSIFICATION DES NŒUDS DU RESEAU.....	17
1.6.2 MATRICE ADMITTANCE.....	18
1.7 CALCUL DE L'ÉCOULEMENT DE PUISSANCE POUR LES RESEAUX DE DISTRIBUTION.....	19
1.7.1 HYPOTHESES DE CALCUL	19
1.7.2 METHODE ITERATIVE (GAUSS-SEIDEL).....	20
1.7.3 METHODE « BACKWARD-FORWARD ».....	20
1.8 APPLICATION : CALCUL D'ÉCOULEMENT DE PUISSANCE	21
1.9 CONCLUSION	22

CHAPITRE 2 : COMPENSATION DE L'ENERGIE REACTIVE DANS LES RESEAUX ELECTRIQUES DE DISTRIBUTION

2.1 COMPENSATION DE L'ENERGIE REACTIVE.....	23
2.1.1 GENERALITES SUR L'ENERGIE ELECTRIQUE	23
2.1.2 GENERALITES SUR L'ENERGIE REACTIVE	24
2.1.2.1 Propriétés de l'énergie réactive.....	24
2.1.2.2 Energie réactive et les éléments du réseau	25
2.1.2.3 Circulation de la puissance réactive dans les réseaux électriques.....	25
2.1.3 COMPENSATION DE L'ENERGIE REACTIVE.....	25
2.1.3.1 Principe de la compensation.....	25
2.1.3.2 Moyens de compensation de l'énergie réactive	26

2.2	COMPENSATEUR STATIQUE DE PUISSANCE REACTIVE	27
2.2.1	CONSTITUTION D'UN SVC	27
2.2.2	CARACTERISTIQUES D'UN SVC	29
2.2.3	MODELISATION D'UN SVC	30
2.3	ROLES ET FONCTIONS D'UN SVC	31
2.3.1	CONTROLE DE LA PUISSANCE REACTIVE	32
2.3.2	CONTROLE DE LA TENSION AUX NŒUDS DU RESEAU	32
2.3.3	AMELIORATION DE LA STABILITE DE TENSION	34
2.3.4	EQUILIBRAGE DES CHARGES	35
2.3.5	DIMINUTION DES PERTES ACTIVES	35
2.3.6	AUGMENTATION DE LA PUISSANCE ACTIVE TRANSMISE PAR LA LIGNE	35
2.3.7	AMELIORATION DE LA STABILITE ANGULAIRE	38
2.4	EMPLACEMENT OPTIMAL DES SVC	39
2.5	APPLICATION : CALCUL D'ECOULEMENT DE PUISSANCE AVEC SVC	39
2.6	CONCLUSION	41
CHAPITRE 3 : OPTIMISATION PAR ESSAIM DE PARTICULES (MONO ET MULTI-OBJECTIF)		
3.1	INTRODUCTION	42
3.2	CONCEPT DE BASE D'UN PROBLEME D'OPTIMISATION	42
3.2.1	FONCTION OBJECTIVE	42
3.2.2	PARAMETRES	43
3.2.3	ESPACE DE RECHERCHE ET DES OBJECTIFS	43
3.2.4	CONTRAINTES	43
3.2.5	DOMAINES (REALISABLE ET NON-REALISABLE)	43
3.3	PROBLEME D'OPTIMISATION MULTI-OBJECTIF	44
	OPTIMISATION AU SENS DE PARETO	44
3.4	RESOLUTION DU PROBLEME D'OPTIMISATION	45
3.5	OPTIMISATION PAR ESSAIM DE PARTICULES (OEP)	46
3.5.1	METHODE DE BASE	46
3.5.2	ORGANIGRAMME DE LA METHODE PSO	48
3.6	OPTIMISATION MULTI-OBJECTIF BASE SUR L'ESSAIM DE PARTICULES ..	50
	MOPSO DE COELLO & LENSHUNGA	50
	ALGORITHME DU MOPSO	51
3.7	EXEMPLES D'APPLICATION	52
3.7.1	OPTIMISATION MONO-OBJECTIF	52
3.7.1.1	Test numéro 1	52
3.7.1.2	Test numéro 2	53
3.7.2	OPTIMISATION MULTI-OBJECTIF (TEST NUMERO 3)	54
3.8	CONCLUSION	55

CHAPITRE 4 : RESULTATS DE SIMULATION ET DISCUSSIONS

4.1	INTRODUCTION.....	56
4.2	FORMULATION DU PROBLEME D’OPTIMISATION.....	57
4.2.1	FONCTIONS OBJECTIVES.....	57
4.2.1.1	<i>Minimisation des déviations des tensions</i>	57
4.2.1.2	<i>Minimisation des pertes</i>	58
4.2.2	CONTRAINTES UTILISEES.....	58
4.3	ADAPTATION DE LA PSO AU PROBLEME D’EMPLACEMENT OPTIMAL DU SVC.....	59
4.4	PROGRAMME DE SIMULATION.....	61
4.5	APPLICATION SUR RESEAU STANDARD ‘IEEE-15-BUS’.....	62
4.5.1	RESULTATS DE L’ECOULEMENT DE PUISSANCE SANS SVC.....	62
4.5.2	MINIMISATION DES DEVIATIONS DES TENSIONS.....	63
4.5.2.1	<i>Comparaison entre les nœuds candidats</i>	63
4.5.2.2	<i>Sélection de l’emplacement optimal du SVC</i>	65
4.5.3	MINIMISATION DES PERTES ACTIVES DANS LES LIGNES.....	66
4.5.3.1	<i>Comparaison entre les nœuds candidats</i>	67
4.5.3.2	<i>Sélection de l’emplacement optimal</i>	68
4.5.4	OPTIMISATION MULTI-OBJECTIF : PERTES ET DEVIATION DES TENSIONS SIMULTANEMENT.....	69
4.5.4.1	<i>Comparaison entre les nœuds candidats</i>	70
4.5.4.2	<i>Sélection de l’emplacement optimal multi-objectif</i>	70
4.6	APPLICATION SUR RESEAU STANDARD ‘IEEE-33-BUS’.....	72
4.6.1	RESULTAT DE L’ECOULEMENT DE PUISSANCE SANS SVC.....	72
4.6.2	MINIMISATION DES DEVIATIONS DES TENSIONS.....	73
4.6.2.1	<i>Comparaison entre les nœuds candidats</i>	73
4.6.2.2	<i>Sélection de l’emplacement optimal du SVC</i>	74
4.6.3	MINIMISATION DES PERTES ACTIVES.....	75
4.6.3.1	<i>Comparaison entre les nœuds candidats</i>	75
4.6.3.2	<i>Sélection de l’emplacement optimal du SVC</i>	76
4.6.4	OPTIMISATION MULTI-OBJECTIF : PERTES ET DEVIATIONS DES TENSIONS SIMULTANEMENT.....	77
4.6.4.1	<i>Comparaison entre les nœuds candidats</i>	77
4.6.4.2	<i>Sélection de l’emplacement optimal du SVC</i>	77
4.7	CONCLUSION.....	78
	CONCLUSION GENERALE.....	79
	BIBLIOGRAPHIE.....	81
	ANNEXES.....	83

Liste des figures

Figure 1.1 : Classement normalisé des niveaux de tensions	13
Figure 1.2 : Schéma des différentes fonctions d'un réseau électrique	14
Figure 1.3 : Schéma de principe d'un poste source.....	15
Figure 1.4 : Symbole du modèle d'une charge.....	16
Figure 1.5 : Symbole du modèle d'une ligne.....	16
Figure 1.6 : Symbole du modèle d'un transformateur.....	17
Figure 2.1 : Représentation vectorielle des puissances.....	23
Figure 2.2 : Principe de compensation de l'énergie réactive.....	26
Figure 2.3 : Schéma de base d'un SVC.....	27
Figure 2.4 : Schéma de base d'un FC.....	27
Figure 2.5 : Schéma de base d'un TCR.....	28
Figure 2.6 : Schéma de base d'un TSC.....	28
Figure 2.7 : Caractéristique V-I du SVC.....	29
Figure 2.8 : Modélisation des SVC par injection de puissance équivalente.....	30
Figure 2.9 : Modélisation des SVC par la création d'un nœud fictif.....	30
Figure 2.10 : Modélisation des SVC par la modification de l'admittance.....	31
Figure 2.11 : Diagramme de Fresnel pour les tensions des nœuds de la ligne.....	33
Figure 2.12 : Amélioration de la stabilité de tension par les SVC par l'injection de la puissance réactive	34
Figure 2.13 : Modèle unifilaire simplifié d'une ligne de transport d'énergie électrique entre deux nœuds sans SVC.....	35
Figure 2.14 : Puissance transmise dans une ligne en fonction de l'angle de transport (δ)	37
Figure 2.15 : Modèle unifilaire simplifier d'une ligne avec un dispositif FACTS shunt (SVC) installé au milieu.....	37
Figure 2.16 : Comparaison de la puissance active transmise ; sans et avec dispositif FACTS shunt (SVC) dans plusieurs positions dans la ligne.....	38
Figure 3.1 : Illustration des optimums locaux et l'optimum global.....	43
Figure 3.2 : Solutions dans la frontières de Pareto pour un problème bi-objectif.....	45
Figure 3.3 : Frontières de Pareto d'un problème d'optimisation bi-objectif.....	45
Figure 3.4 : Principe de déplacement d'une particule par la PSO.....	47
Figure 3.5 : Principe de la PSO du base.....	49
Figure 3.6 : Technique des grilles du MOPSO.....	50
Figure 3.7 : Résultat d'optimisation de la fonction test-1.....	53
Figure 3.8 : Résultat d'optimisation de la fonction test-2.....	53
Figure 3.9 : Résultat d'optimisation multi objectif (test-3)	54
Figure 4.1 : Organigramme d'adaptation du PSO au problème d'emplacement du SVC.....	60

Figure 4.2 : Interface du programme (choix du réseau)	61
Figure 4.3 : Interface du choix de la fonction à calculer pour le réseau choisi.....	61
Figure 4.4 : Profil de tensions sans SVC (avant compensation)	62
Figure 4.5 : Optimisation des déviations des tensions par PSO avec différentes positions du SVC (graphe de convergence)	63
Figure 4.6 : Profil de tension avec différentes positions du SVC dans l'optimisation des déviations des tensions.....	64
Figure 4.7 : Solutions de compromis : puissance du SVC (au nœud optimal) et la somme des déviations des tensions.....	66
Figure 4.8 : Optimisation des pertes actives par PSO avec différentes positions du SVC (graphe de convergence)	67
Figure 4.9 : Profil de tension pour différentes positions du SVC dans l'optimisation des pertes.....	67
Figure 4.10 : Solutions de compromis : puissance du SVC (au nœud optimal) et pertes actives dans les lignes.....	69
Figure 4.11 : Comparaison entre les solutions de l'optimisation multi-objectif avec différents emplacements du SVC.....	70
Figure 4.12 : Optimisation à trois objectifs du SVC dans son emplacement optimal (nœud-4) : pertes, déviation des tensions et puissance injectée.....	71
Figure 4.13 : Profil de tensions sans SVC pour réseau (réseau 33 nœuds).....	72
Figure 4.14 : Profil de tension avec différentes positions du SVC dans l'optimisation des déviations des tensions (réseau 33 nœuds)	73
Figure 4.15 : Solutions de compromis : puissance du SVC (au nœud optimal) et la somme des déviations des tensions (réseau 33 nœuds)	74
Figure 4.16 : Optimisation des pertes actives par PSO avec différentes positions du SVC (graphe de convergence pour réseau 33 nœuds)	75
Figure 4.17 : Solutions de compromis : puissance du SVC (au nœud optimal) et la somme des pertes actives (réseau 33 nœuds)	76
Figure 4.18 : Compromis avec différents emplacements du SVC.....	77
Figure 4.19 : Optimisation à trois objectifs du SVC dans son emplacement optimal (nœud-10) : pertes, déviation des tensions et puissance du SVC.....	77

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Classification des nœuds avec leurs paramètres.....	17
Tableau 1.2 : Résultat de l'écoulement de puissance sans compensation.....	21
Tableau 2.1 : Résultat de l'écoulement de puissance avec compensation.....	40
Tableau 4.1 : Résultats d'optimisation des déviations des tensions avec différentes positions du SVC.....	64
Tableau 4.2 : Résultats d'optimisation des pertes actives dans les lignes avec différentes positions du SVC.....	68
Tableau 4.3 : Résultats de calcul de l'écoulement de puissance avant compensation (réseau 33 nœuds).....	72
Tableau 4.4 : Résultats d'optimisation des déviations des tensions avec différentes positions du SVC (réseau 33 nœuds)	73
Tableau 4.5 : Performances de l'emplacement d'un SVC au nœud optimal (nœud-18) pour l'amélioration du profil de tension (réseau 33 nœuds)	74
Tableau 4.6 : Résultats d'optimisation des pertes actives avec différentes positions du SVC (réseau 33 nœuds)	75

Introduction Générale

La fonction principale d'un système énergétique de production-transport-distribution de l'électricité est de satisfaire la demande en énergie électrique n'importe où et n'importe quand, tout en assurant la continuité de la fourniture de l'énergie dans les limites de puissance demandée, et le maintien de la tension et de la fréquence dans les limites correspondants aux besoins des consommateurs.

L'augmentation de la population et le développement économique et industriel ont besoin de plus en plus d'énergie électrique, donc les réseaux électriques en se développant deviennent plus maillés, et leur gestion devient plus compliquée à cause de la croissance continue de la demande. Donc le problème est de trouver des moyens adéquats pour une exploitation optimale de ces réseaux dans leurs limites thermiques et dynamiques, afin d'éviter l'addition de nouvelles lignes et de nouveaux postes de transformation qui est un choix défavorable de point de vue technique et économique, ainsi qu'il est devenue difficile à cause de la pression des écologistes.

Les réseaux électriques de distribution forment le dernier maillon du système énergétique, d'où ils constituent la structure la plus importante de la boucle ; car ils alimentent directement les consommateurs. De ce fait le problème majeur de ces réseaux est la qualité de l'énergie fournit, qui est présentée dans ce cas par le profil de tension , car d'autres paramètres de la qualité (comme la fréquence) sont liés aux grandes réseaux de transport. Un autre problème rencontré dans les réseaux de distribution est les importantes pertes dans les lignes à cause du bas niveau de la tension utilisée et les fortes impédances de ces lignes.

La gestion de la puissance réactive dans les réseaux de distribution occupe une place importante dans l'exploitation de ces réseaux, parmi ces objectives :

- Maintenir la tension dans des marges admissibles
- Prévention de l'écroulement de tension et minimisé leur déviations
- Minimiser les pertes
- Augmenter la capacité de transfert d'énergie des lignes

La résolution des problèmes d'amélioration de la qualité de l'énergie, augmentation de la capacité de transfert et la minimisation des pertes peut être obtenue grâce à la mise en place des nouvelles technologies pour la compensation.

Les technologies des FACTS (Flexible Alternative Current Transmission Systems) à base d'électronique de puissance apport des solutions dynamiques, efficaces et éprouvées à la conduite des réseaux électriques. Elles permettent d'améliorer le fonctionnement du système de transport et distribution d'énergie avec un investissement minimal d'infrastructures, en répandant aux contraintes environnementales et les impacts économiques.

Dans les réseaux de distribution, le compensateur statique de puissance réactive (SVC) ; qui est un dispositif du groupe FACTS connecté en parallèle avec le réseau, est un dispositif très utilisé à cause de ces performances ; il est capable d'augmenter la capacité de transfert des lignes, d'améliorer le profil de tension ainsi que de minimisé les pertes.

L'installation d'un SVC dans un réseau demande une étude d'optimisation technico-économique, pour que ce dispositif donne de meilleurs résultats et aide à l'exploitation optimale du réseau. Cette optimisation sera faite sur son emplacement, sa taille, ainsi que son temps de mise en service.

Dans le cadre de ce projet, l'approche adoptée est d'étudier l'impact de la compensation shunt dans les réseaux de distribution basé sur les systèmes FACTS. Le problème est de chercher un emplacement optimal multi-objectif d'un SVC dans le réseau, où les objectifs sont : la minimisation des déviations des tensions (amélioration du profil de tension) et la minimisation des pertes actives dans les lignes. Cette recherche est basée sur une comparaison de l'impact de plusieurs emplacements de SVC selon l'objectif choisi.

L'étude et les calculs sont faits avec une méthode d'optimisation métaheuristique ; optimisation par l'essaim de particules (OEP) adaptée aux problèmes mono et multi-objectifs. Cette optimisation est soumise à des contraintes exigées par le réseau : la sûreté de fonctionnement du réseau, la qualité de l'énergie fournit aux consommateurs, ainsi que des puissances du compensateur réalisables pour les réseaux de distribution.

Les réseaux électriques standards "IEEE 15 nœuds" et "IEEE 33 nœuds" sont utilisés pour valider la méthode proposée.

Chapitre 1

Réseaux électriques de distribution et modélisation

1.1 Introduction

Un réseau électrique est un ensemble d'infrastructures énergétiques qui permettent le transport de l'énergie électrique des centrales de production vers les consommateurs. Les différentes composantes du système énergétique sont :

- Les centrales de production d'énergie
- Le système de transport d'énergie
- Le système de distribution d'énergie
- Les consommations (les charges)

Le réseau électrique est constitué principalement de :

- Postes électriques : qui permettent l'électricité de passer d'un niveau de tension à un autre grâce aux transformateurs.
- Lignes électriques : connectées entre elles dans des postes électriques, c'est le moyen de transport d'électricité.

Le réseau électrique doit assurer la gestion dynamique de l'ensemble « Production, transport et consommation », mettant en œuvre des réglages pour assurer la stabilité du système [1]. Donc, il devrait :

- Satisfaire la demande d'énergie partout et n'importe quand
- Régler la fourniture d'énergie active et réactive en fonction de la demande
- Assurer la continuité et la qualité du service (fréquence et tension)
- Maintenir des normes de sécurité rigoureuses
- Respecter les conditions économiques, écologiques et environnementales

Les réseaux électriques opèrent à des différents niveaux de tension, ce qui amène à distinguer 3 types de réseaux :

- Réseau de haute tension (HT, THT : très haute tension)
- Réseaux de moyenne tension (MT)
- Réseaux de basse tension (BT)

On trouve aussi dans les appellations (francophones) des niveaux de tension : HTA qui correspond à la moyenne tension, et la HTB qui correspond à la haute tension.

Le classement des niveaux de tension se diffère d'un pays à autre ; selon le niveau maximal utilisé et la technologie du pays, mais généralement on trouve l'appellation normalisée suivante [1] :

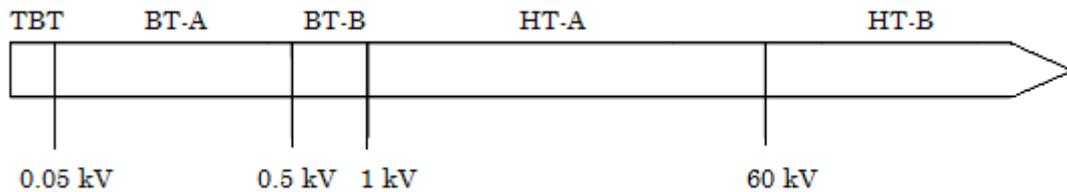


Figure 1.1 : Classement normalisé des niveaux de tensions

1.2 Structures topologiques des réseaux

Réseaux radiaux : Constitué de plusieurs artères qui prolongent, sans avoir un point commun ; c'est la structure d'un arbre qui est la plus simple et la moins onéreuse [1].

Réseaux bouclés : Ils sont alimentés à la fois par plusieurs sources, pour augmenter la sécurité d'alimentation [1].

Réseaux maillés : Ils sont des réseaux où toutes les lignes sont bouclées et le nombre de sources débitants en parallèle est très grand (plusieurs dizaines). C'est la structure des mailles d'un filet qui donne la meilleur sécurité, mais avec un prix très élevé [1].

1.3 Fonctions des réseaux électriques

Réseaux d'utilisation : ils alimentent directement les appareils domestiques et les petits moteurs de faibles puissances. Ces réseaux utilisent la très basse tension.

Réseaux industriels : C'est des réseaux d'utilisation nécessitent des puissances élevées, ils sont utilisés aux usines. Ils utilisent la basse et la moyenne tension.

Réseaux de distribution : Leurs taches est de fournir l'énergie aux réseaux industriels et d'utilisations, ils sont généralement radiaux et ils utilisent la moyenne et la basse tension. Ils peuvent être considérés comme des réseaux de sous-répartition.

Réseaux de répartition : Fournies l'énergie électrique aux réseaux de distribution à des faibles distance, ils utilisent généralement la haute tension ; car ils transitent de grandes quantités d'énergie.

Réseaux de transport : Leurs tâches sont le transit de grandes puissances à des grandes distances et assurer la sécurité du fonctionnement, avec l'utilisation de la haute et la très haute tension, ainsi qu'ils sont de structure bouclés et maillés.

Réseaux d'interconnexions : C'est des liaisons entre les réseaux de transport. Ils ont un double rôle ; la sécurité en permettant le secours réciproque des réseaux interconnectés, ainsi qu'un rôle économique qui permet d'optimiser le cout total de la production. Ils sont généralement de structure maillés [1].

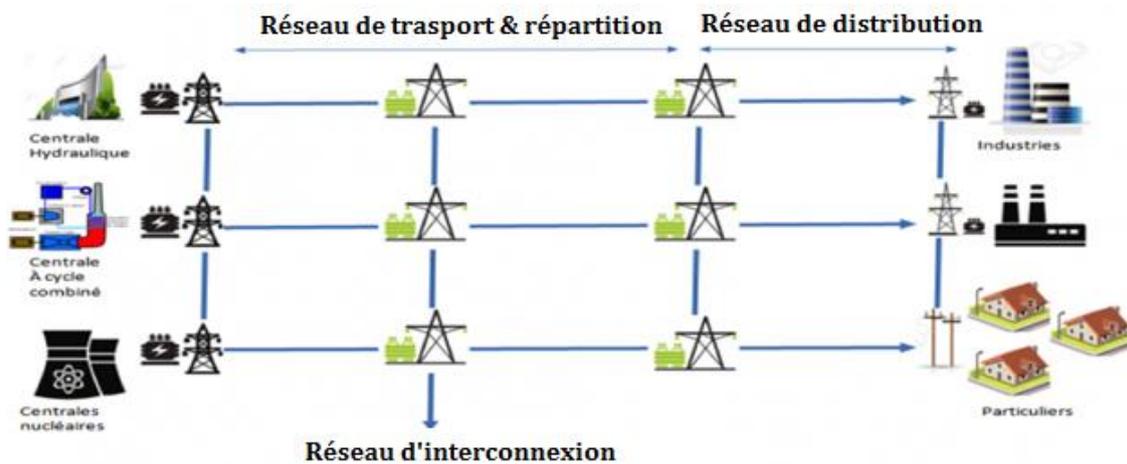


Figure 1.2 : Schéma des différentes fonctions d'un réseau électrique

1.4 Spécificités des réseaux de distribution

1.4.1 Caractéristiques techniques

Les réseaux de distribution assurent la distribution de l'énergie électrique au niveau local et régional, (leurs tensions sont généralement inférieures ou égales à 60 kV -HTA-). Ils sont constitués de deux types de réseaux : le réseau de moyenne tension (MT) ; connecté au réseau de transport, et le réseau de basse tension (BT) ; pour alimenter les consommateurs. Donc ils constituent l'architecture et l'infrastructure la plus importante du système électrique. Le réseau BT forme le dernier maillon du système électrique ; ses tronçons sont raccordés au réseau MT dans des postes de transformation HTA/BT. Ces niveaux de tension offrent un compromis technico-économique ; qui permet à la fois de diminuer les chutes de tension, et de minimiser le nombre de postes source (HTA), mais également de limiter les contraintes techniques et économiques inhérentes aux hautes tensions (coûts des investissements, protection du matériels et des personnes) [2].

Les réseaux de distribution sont, dans la très grande majorité des cas, exploités d'une manière radiale. Cette structure permet facilement d'assurer la maintenance du réseau, notamment pour la détection et l'élimination rapide des défauts. Des schémas d'exploitation de secours entre postes sources sont bien entendu prévus et permettent de minimiser le nombre de clients coupés en cas de défaillances [2].

1.4.2 Postes sources

Les réseaux de distribution sont alimentés par un poste source HTB/HTA. Classiquement un jeu de barres connecté à une ou plusieurs arrivées HTB alimente deux transformateurs appelés transformateurs demi-rame. Côté HTA, un autre jeu de barres alimente les différents départs du réseau de distribution. Les transformateurs fonctionnent en régime radial mais en cas de défaillances, il est possible d'isoler un des transformateurs et de répartir la charge sur celui qui reste. En régime nominal, la charge associée à un transformateur ne dépasse donc pas normalement 50% de sa capacité maximale [2] [3].

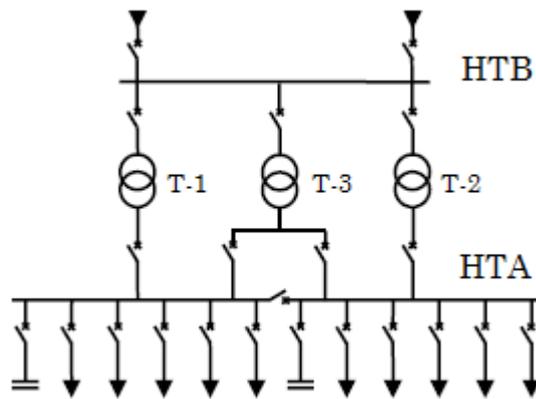


Figure 1.3 : Schéma de principe d'un poste source

1.4.3 Lignes de distribution

Les réseaux de distribution sont principalement constitués de lignes aériennes (généralement en milieu rural). Le dimensionnement du réseau est réalisé de manière à avoir une chute de tension admissible sur toute la longueur des départs, car la tension décroît progressivement en fonction de l'impédance des lignes (selon les longueurs) et des charges [2].

Les réseaux de distribution en zones urbaines ou mixtes de forte densité de charge sont constitués principalement par des câbles souterrains. Du fait de leur forte capacité homopolaire (jusqu'à 311 nFarad/km contre 5 nFarad/km pour les lignes aériennes) et de leur plus petite longueur, les départs souterrains urbains sont moins sensibles aux chutes de tension. Le facteur impactant sur le dimensionnement sera plutôt, dans le cas présent, le courant maximum admissible dans les câbles du fait de la forte densité de charges à alimenter [2].

1.4.4 Qualité de service

L'objectif des réseaux de distribution est de fournir de l'énergie électrique aux clients raccordés en HTA ou en BT, avec une bonne qualité qui doit être conforme à des caractéristiques définies par les normes. La qualité du service est déterminée par les paramètres qui doivent être à des valeurs admissibles [2] [3] :

- La fréquence : $\pm 1 \%$ pour la BT, et $\pm 4 \%$ pour la HTA
- La tension : $\pm 10 \%$ pour la BT, et $\pm 5 \%$ pour la HTA
- Taux d'harmoniques : distorsion inférieure à 8% de la tension nominal
- Déséquilibre de tension : (tension inverse inférieure à 2% de la tension directe)

Les problèmes majeurs des réseaux de distribution sont le réglage de la tension et la minimisation des pertes, ce qui conduit à une exploitation optimale de ces réseaux ; en satisfaisant les utilisateurs du réseau, respectant les contraintes de fonctionnement des matériels et avec un coût minimal. Ces deux problèmes sont résolus par la mise en service des transformateurs régleurs en charge, ou par la compensation de l'énergie réactive ; qui est effectuée par des SVC (du groupe FACTS) dans les réseaux modernes, car ils sont les dispositifs les plus simple à l'installation et à l'utilisation avec un bas coût.

- ❖ Dans ce projet nous nous intéressons de la détermination de l'emplacement optimal de ces SVC dans les réseaux de distribution ; pour un problème multi-objectifs : réglage de la tension et minimisation des pertes (deux objectives contradictoires) en même temps.

1.5 Modélisation mathématique des éléments

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

1.5.1 Charges

Les charges représentent les consommateurs connectés au réseau, elles sont modélisées par une injection négative (consommation) du courant, en connaissant les puissances active et réactive demandées par la prévision de charge [4].

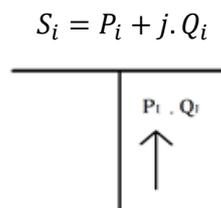


Figure 1.4 : Symbole du modèle d'une charge

1.5.2 Lignes de transport

Généralement la ligne de transport d'énergie électrique est modélisée par un schéma équivalent classique en « π », il se compose d'une impédance série ; qui contient une résistance (qui correspond au effet joule) et une inductance, ainsi qu'une admittance shunt (susceptance capacitive) ; à l'effet capacitif de la ligne et la terre [4].

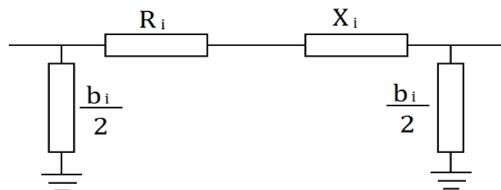


Figure 1.5 : Symbole du modèle d'une ligne

- ❖ Généralement dans les lignes de distribution, la susceptance shunt (capacitive) est négligeable, à cause de leur faible capacité (moyenne tension) et les courtes longueurs des lignes.

1.5.3 Transformateurs

Un transformateur d'énergie électrique est représenté par son schéma équivalent ; un quadripôle en « π », non symétrique. Les grandeurs associées sont : le rapport de transformation « a » et l'impédance de fuite « y », qui sont les plus importants dans le calcul et l'analyse des réseaux électriques [4].

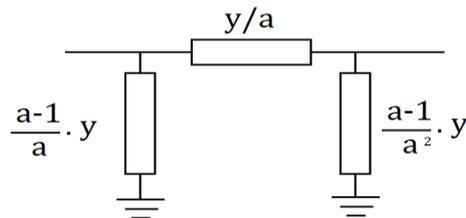


Figure 1.6 : Symbole du modèle d'un transformateur

1.6 Analyse mathématique des réseaux électriques

Les réseaux électriques sont constitués par des lignes et des nœuds, et pour les analyser il faut utiliser la modélisation mathématique vue précédemment qui nous permettra de simuler ces réseaux. Deux étapes très importantes dans l'étude des réseaux électriques sont la classification des nœuds et la création de la matrice admittance [4].

1.6.1 Classification des nœuds du réseau

Après avoir les données numériques des réseaux électriques, on constate qu'il existe plusieurs types des nœuds, selon les puissances fournies ou transmises [3] :

- **Nœud de source** : C'est les nœuds de source d'énergie pour les réseaux de distribution, ils sont liés aux grands réseaux de transport. Ces nœuds sont considérés comme des nœuds infinis : la tension égale à la référence.
- **Nœud de consommation** : C'est les nœuds qui sont associés aux charges où la puissance active est réactive sont connues par des prévisions.
- **Nœuds de contrôles** : Ils correspondent aux nœuds qui sont des régulateurs de charge (transformateur avec pas variable), qui varient l'amplitude de tension à une valeur acceptable.

Tableau 1.1 : Classification des nœuds avec leurs paramètres

Type de nœud	Paramètres connus	Paramètres inconnus
Nœud de génération	V, δ	P, Q
Nœud de consommation	P, Q	V, δ
Nœud de contrôles	V, P, Q	δ, a

1.6.2 Matrice admittance

L'étude des réseaux électriques nécessite la création de la matrice d'admittance correspondante, qui est basée sur la modélisation des éléments du réseau. Cette matrice représente toutes les admittances des lignes (leurs caractéristiques électriques), ainsi que l'admittance vue par chaque nœud [4].

La matrice admittance est une matrice carrée d'ordre $n \times n$; où « n » est le nombre de nœud du réseau. Les éléments de cette matrice sont calculés par :

$$Y_{ij} = -y_{ij}$$

$$Y_{ii} = \sum_{j \neq i}^n (y_{ij} + \frac{b_{ij}}{2} + y_{ii}^{shunt})$$

- y_{ij} est l'admittance série de la ligne
- b_{ij} est la susceptance shunt de la ligne
- y_{ii}^{shunt} est la susceptance d'un dispositif shunt (compensateur)
- Y_{ij} sont les éléments de la matrice

Cette matrice est apte à être modifier en modifiant la structure du réseau [4].

- Addition d'une ligne :

Les équations utilisées pour l'addition d'une ligne sont :

$$Y_{ij}^{new} = Y_{ij}^{old} - y_{ij}^{add}$$

$$Y_{ii}^{new} = Y_{ii}^{old} + \left(y_{ij}^{add} + \frac{b_{ij}^{add}}{2} \right)$$

La suppression d'une ligne est faite de la même façon que l'addition, sauf qu'on utilise le signe différent (positif pour l'élément : y_{ij}^{add}), ainsi que : $Y_{ij}^{new} = 0$.

- Addition d'un nœud :

L'addition d'un nœud conduit à l'addition d'une ligne et une colonne dans la matrice d'admittance ($n+1$) ; les équations utilisées sont :

$$Y_{ii}^{new} = Y_{ii}^{old} + \left(y_{i,n+1}^{add} + \frac{b_{i,n+1}^{add}}{2} \right)$$

$$Y_{n+1,n+1}^{new} = \sum_{j=1}^{n+1} (y_{n+1,j} + \frac{b_{n+1,j}}{2} + y_{n+1}^{shunt})$$

$$Y_{i,n+1}^{new} = Y_{n+1,j}^{new} = -y_{i,n+1}^{add}$$

La suppression d'un nœud consiste à éliminer une ligne et une colonne de la matrice d'admittance en utilisant les même équations précédentes sauf qu'avec un signe différent.

1.7 Calcul de l'écoulement de puissance pour les réseaux de distribution

L'un des états les plus importants d'un réseau électrique est son mode d'opération en régime permanent. Afin d'obtenir des informations sur le réseau et d'être en mesure de les gérer pour des raisons de sécurité, de fiabilité ou d'économie. On introduit le concept de calcul de la répartition de la charge ou l'écoulement de puissance qui donne une information sur l'état de fonctionnement complet du réseau. Les études de cet écoulement sont faites après une prévision de charge, et elles sont nécessaires pour la planification et le dispatching [4].

Le calcul de l'écoulement de puissance dans une ligne de distribution radiale comportant ou non des ramifications peut être fait en utilisant des méthodes adaptée et basée sur les lois des circuits électrique et apte à mettre en œuvre, avec une vitesse de convergence plus élevée [5].

Pour un réseau électrique, les équations des tensions nodales et des courants du système sont exprimées par la relation matricielle suivante [4] :

$$I_{bus} = Y_{bus} \cdot V_{bus}$$

- Y_{bus} : est la matrice admittance d'ordre (n*n)
- V_{bus} : est le vecteur des tensions nodales, d'ordre (n*1)
- I_{bus} : est le vecteur des courants nodaux, d'ordre (n*1)
- n : est le nombre des nœuds du réseau

Les équations des puissances utilisées pour le calcul d'écoulement de puissance sont :

$$S_i = P_i + j \cdot Q_i = V_i \cdot I_i^*$$

Les équations précédentes montrent que les puissances actives et réactives dans un nœud sont en fonction des tensions des nœuds du réseau (amplitudes et arguments) :

$$S_i = |V_i| \cdot e^{j\delta_i} * \sum_{j=1}^n (Y_{i,j} * |V_j| \cdot e^{j\delta_j})^*$$

En raison de la nature non linéaire de ce problème, des méthodes numériques : itérative et d'optimisation sont utilisées pour obtenir une solution avec une très grande précision.

1.7.1 Hypothèses de calcul [5] [6]

- Les charges sont considérées comme étant des puissances constantes.
- Les lignes de distributions étudiées sont des systèmes équilibrés. Ce qui nous permet de les représenter par leurs schémas unifilaires.
- Les lignes de distributions sont de moyennes tensions et de courtes longueurs. Par conséquent, les admittances shunts du schéma équivalent sont négligées.
- Le premier nœud (le poste source) est considéré comme un nœud infini ; où : $V_p = (1 + 0.j) pu$.

1.7.2 Méthode itérative (Gauss-Seidel)

La méthode de GAUSS-SEIDEL est l'une des plus simples méthodes itératives utilisées pour la résolution du problème de l'écoulement de puissance ou généralement pour la résolution d'un ensemble très large d'équations algébriques non linéaires. Cette méthode consiste à enlever séquentiellement chaque nœud et actualiser sa tension en fonction des valeurs disponibles de toutes les tensions des autres nœuds. Pour le cas de l'étude de l'écoulement de puissance des réseaux de distribution, les solutions recherchées sont déduites de la résolution des équations nodales, ainsi que de sommer les puissances derrière chaque nœud [4] [5].

Le courant des branches donné par :

$$I_{ij} = \frac{V_i - V_j}{R_{ij} + j \cdot X_{ij}} = \frac{Pl_j - Ql_j}{V_j}$$

avec :

Pl_j : est la somme des puissances actives de tous les nœuds derrière le nœud « j »

Ql_j : est la somme des puissances réactives de tous les nœuds derrière le nœud « j »

$$V_i^{(k+1)} = \frac{1}{Y_{ii}} * \left(\frac{Pl_i - j \cdot Ql_i}{V_i^{(k)*}} - \sum_{j \neq i}^n Y_{ij} \cdot V_j \right)$$

$$P_i^{(k)} = \text{Re} \left(V_i^{(k)*} * \sum_{j \neq i}^n Y_{ij} \cdot V_j \right)$$

$$Q_i^{(k)} = -\text{Im} \left(V_i^{(k)*} * \sum_{j \neq i}^n Y_{ij} \cdot V_j \right)$$

La convergence est atteinte lorsque : $\max |V^{(k+1)} - V^{(k)}| < \epsilon$

Dans cette méthode, on peut appliquer le facteur d'accélération ; où la valeur de la tension sera accélérer avant d'être introduire dans la prochaine itération [4] :

$$V_i^{(k+1)} = V_i^{(k)} + \alpha \cdot (V_i^{(k+1)} - V_i^{(k)})$$

Les valeurs du facteur d'accélération sont : $\alpha \in]1; 2[$, mais les valeurs optimales par expérience sont entre 1.4 et 1.6

1.7.3 Méthode « Backward-Forward »

La méthode backward-forward est une méthode itérative utilisant deux systèmes d'équation. Le premier système a pour but la détermination des puissances s'écoulant dans chacune des branches de la ligne ainsi que les courants qui les circulent. Et ceci se réalise en balayant en montée la ligne du nœud terminal au nœud de source (backward sweep). Tandis que le second système d'équations permet de déterminer les chutes de tensions et les profils de tensions aux différents nœuds ainsi que leurs phases à l'origine en faisant balayer la ligne en descente ; en démarrant par le nœud de source (forward sweep). Le processus de balayage en montée et en descente n'est arrêté que si la tolérance de convergence est atteinte. Dans notre

cas, nous utilisons la méthode de sommation des puissances derrière chaque branche, en résolvant les équations suivantes [5] [6] :

$$I_{ij} = \frac{Pl_j - Ql_j}{V_i}$$

$$\Delta V_{ij} = Z_{ij} * I_{ij}^*$$

$$V_j = V_i - \Delta V_{ij}$$

1.8 Application : calcul d'écoulement de puissance

Dans cette partie, nous avons élaboré un programme de calcul de l'écoulement de puissance pour les réseaux de distribution radiaux basé sur la méthode itérative de **Gauss-Seidel**. Nous testons ce programme avec un réseau de test : IEEE-15-Bus et nous confirmons nos résultats avec les résultats de référence [5].

La configuration du réseau de test IEEE 15 nœuds est présentée dans l'annexe, ainsi que tous ses paramètres (puissances planifiées, tension et les données des lignes).

Après le calcul de l'écoulement de puissance, les résultats des tensions aux nœuds et des pertes dans les branches du réseau sont montrés dans le tableau suivant :

Tableau 1.2 : Résultat de l'écoulement de puissance sans compensation

Profil de tension			Pertes dans les lignes		
Nœud	Amplitude de tension (pu)	Angle de tension (degré°)	Ligne	Pertes actives (kW)	Pertes réactives (kVAr)
1	1.000	0.000	1	41.072	40.174
2	0.9677	-0.0066	2	9.135	8.935
3	0.9535	-0.0095	3	1.431	1.399
4	0.9488	-0.0107	4	0.094	0.063
5	0.9501	-0.0111	5	0.668	0.451
6	0.9592	-0.0084	6	0.058	0.039
7	0.9595	-0.0087	7	1.993	1.344
8	0.9583	-0.0086	8	0.009	0.006
9	0.9633	-0.0071	9	0.049	0.033
10	0.9621	-0.0072	10	0.225	0.152
11	0.9512	-0.0104	11	0.335	0.226
12	0.9478	-0.0110	12	0.026	0.018
13	0.9469	-0.0112	13	0.007	0.004
14	0.9491	-0.0110	14	0.024	0.016
15	0.9493	-0.0111	Total	55.1243	52.8597

Nous comparons nos résultats avec celles de référence IEEE-15-bus [5], nous trouvons que les valeurs de l'amplitude de tension dans tous les nœuds sont identiques.

Les nœuds fragiles en tension sont les nœuds : **4, 5, 12, 13, 14, 15** ; qui ont une amplitude de tension hors limites admissibles ($\pm 5\%$). Ces nœuds sont candidats pour être compensés et pour améliorer leur profil de tension.

Nous observons aussi que les pertes dans les deux premières branches ont une grande valeur par rapport aux autres branches ; ceci est expliqué par : ces branches transportent le totale de la puissance du réseau, ce qui est un des inconvénients des réseaux radiaux.

1.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur les réseaux électriques avec leurs différentes composantes et les différents niveaux de tensions utilisées. Ainsi qu'un bref paragraphe sur les objectifs des différents réseaux, les différentes structures topologiques des réseaux existants et les différents types des réseaux selon la fonction.

Nous avons montré particulièrement, les spécificités les plus importantes des réseaux de distribution ; caractéristiques techniques, postes et lignes. Ainsi que les différents problèmes rencontrés ; comme la qualité de l'énergie et la minimisation des pertes.

Comme deuxième partie, nous avons présenté les modèles mathématiques des composantes du réseau. Cette modélisation nous permet d'étudier et simuler ces réseaux en utilisant des différentes méthodes. Puis, nous avons vu les différentes méthodes de calcul de l'écoulement de puissance pour les réseaux de distribution : la méthode itérative de Gauss-Seidel et la méthode de Backward-Forward.

Dans la dernière partie, nous avons testé notre programme de calcul d'écoulement de puissance pour les réseaux de distribution (où nous avons met en œuvre les modélisations des éléments) ; basé sur la méthode itérative de Gauss-Seidel, sur un réseau de test IEEE-15-Bus, et nous avons comparé nos résultats avec les résultats de références. Aussi, nous avons montré que la chute de tension est considérable dans les réseaux de distribution à cause de la forte impédance série de ces lignes, ainsi que la grande quantité de puissance perdue.

Chapitre 2

Compensation de l'énergie réactive dans les réseaux électriques de distribution

2.1 Compensation de l'énergie réactive

2.1.1 Généralités sur l'énergie électrique

Tout système électrique utilisant le courant alternatif absorbe (ou génère) une énergie totale que l'on appelle énergie apparente, qui s'exprime généralement en Volt-Ampère-Heure (VAh). Elle correspond à la puissance apparente S (en Voltampère), et se répartit comme suit [7] :

- **Energie active** : s'exprime en Wattheure (Wh), elle est produite par les générateurs, transporté et distribué aux utilisateurs, et se transforme en énergie mécanique, calorifique ou lumineuse.
- **Energie réactive** : s'exprime en Volt-Ampère-Réactif-heure (Var-h), elle sert à la création du champ magnétique et la magnétisation.

Relation entre les différentes puissances :

$$\vec{S} = \vec{P} + \vec{Q}$$

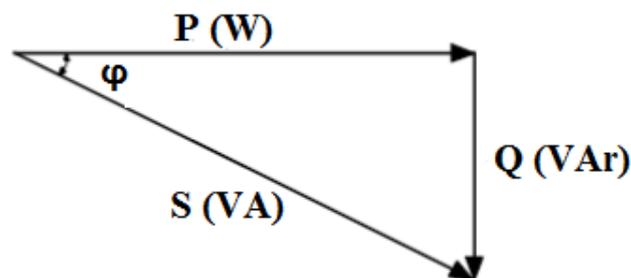


Figure 2.1 : Représentation vectorielle des puissances

avec :

P : est la puissance active en Watt

Q : est la puissance réactive en Voltampère réactive

S : est la puissance totale apparente en Voltampère

φ : est l'angle entre la puissance apparente et la puissance active

Les expressions électriques des puissances en monophasé (en absence d'harmoniques) :

$$\bar{S} = P + j * Q$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = V * I$$

$$P = V * I * \cos(\varphi)$$

$$Q = V * I * \sin(\varphi)$$

avec :

V : est la tension simple aux bornes du récepteur (en Volt)

I : est le courant absorbé par le récepteur (en Ampère)

On définit aussi le facteur de puissance (en absence d'harmoniques) :

$$F = \frac{P}{S} = \cos(\varphi)$$

En présence d'harmonique, ce facteur de puissance est différent de « $\cos(\varphi)$ », sa valeur est représentée comme suit : $F = F_d * \cos(\varphi)$; où F_d est le facteur de déformation lié aux harmoniques [7].

On utilise souvent dans les calculs des réseaux électriques la valeur de tangent de l'angle φ :

$$Tg(\varphi) = \frac{Q}{P}$$

Les facteurs $\cos(\varphi)$ et $Tg(\varphi)$ sont des coefficients importants pour mesurer la consommation d'énergie active et réactive [7].

2.1.2 Généralités sur l'énergie réactive

L'énergie réactive se transforme en puissance magnétisante et sert à la magnétisation des circuits (comme celle des moteurs électriques et transformateurs), elle est échangée en permanence dans les réseaux entre les générateurs de puissance réactive et les équipements ayant des circuits magnétiques. Elle est dite « improductive » [7].

2.1.2.1 Propriétés de l'énergie réactive

La puissance réactive a des propriétés de conservation dans le réseau. Par convention, tout élément inductif du réseau ($\varphi > 0$) consomme de l'énergie réactive, et tout élément capacitif ($\varphi < 0$) en produit.

La puissance réactive **consommée** par une inductance « L » parcouru par un courant « I » :

$$Q_L = - L. \omega. I^2$$

La puissance réactive **produite** par un condensateur de capacité « C » soumis à une tension « V » :

$$Q_C = + C. \omega. V^2$$

avec : « ω » est la pulsation du réseau ; $\omega = 2. \pi. f$; où « f » est la fréquence du réseau.

2.1.2.2 Energie réactive et les éléments du réseau

Comme pour la puissance active, on peut établir aux nœuds du réseau les bilans de puissance réactive par le calcul de l'écoulement de puissance. Le bilan global est le suivant [8] :

- Les récepteurs (charges) sont généralement inductives (les moteurs électriques), donc c'est des consommateurs de l'énergie réactive
- Les transformateurs consomment de l'énergie réactive (puissance magnétisante et la réactance de fuite)
- Les lignes aériennes consomment de l'énergie réactive, et elles la produisent lorsqu'elles sont peu chargées (pour les longues lignes)
- Les câbles souterrains la produisent du fait de leurs fortes capacités
- Les machines synchrones ont la faculté de produire ou de consommer l'énergie réactive selon l'excitation (sous ou sur-excité)

2.1.2.3 Circulation de la puissance réactive dans les réseaux électriques

Le transport et la distribution de l'énergie électrique par le courant alternatif conduit à transporter de l'énergie réactive qui s'échange, ce n'est pas une perte ; mais elle peut provoquer des pertes. Le transport de cette énergie conduit à surdimensionner les lignes, donc à augmenter le coût ou à les faire fonctionner à leurs limites, ce qui peut conduire à plusieurs inconvénients [7] [8] :

- Pertes dans les lignes
 - Chutes de tension considérables
 - Diminution de la capacité de transport de puissance dans les lignes
 - Diminution du rendement
- ❖ En ajoutant à ces inconvénients statiques, le transport de cette énergie peut avoir des inconvénients d'aspect dynamique tel que les limites de stabilité angulaire (dynamique et transitoire) des rotors des alternateurs du réseau [9].
- ❖ Le transit par le réseau de transport et de distribution de l'énergie réactive appelée par la charge est une gêne importante pour une exploitation efficace de ces réseaux, non seulement par ses conséquences techniques mais aussi par son coût [7] [8].

2.1.3 Compensation de l'énergie réactive

2.1.3.1 Principe de la compensation

La solution optimale pour le transport et la distribution de l'énergie réactive de point de vue technique et économique, est de la produire près des zones de consommation, ainsi que de consommer l'excès de cette énergie près des zones de surproduction. Celle-ci n'aura plus à circuler dans ces réseaux [8]. Cette technique permet d'éviter les inconvénients de la circulation de l'énergie réactive, et elle s'appelle « **La compensation de l'énergie réactive** ».

La compensation de l'énergie réactive permet de réduire la puissance totale transmise dans les lignes, ainsi que la puissance réactive qui circule dans le réseau ; car cette compensation s'occupe de fourniture de la puissance réactive donc elle réduit les pertes totales dues au transport de cette puissance, ainsi qu'elle peut régler le profil de la tension (couplage direct entre la puissance réactive et la tension) [8].

Le graphe suivant montre clairement le principe de la compensation de l'énergie réactive :

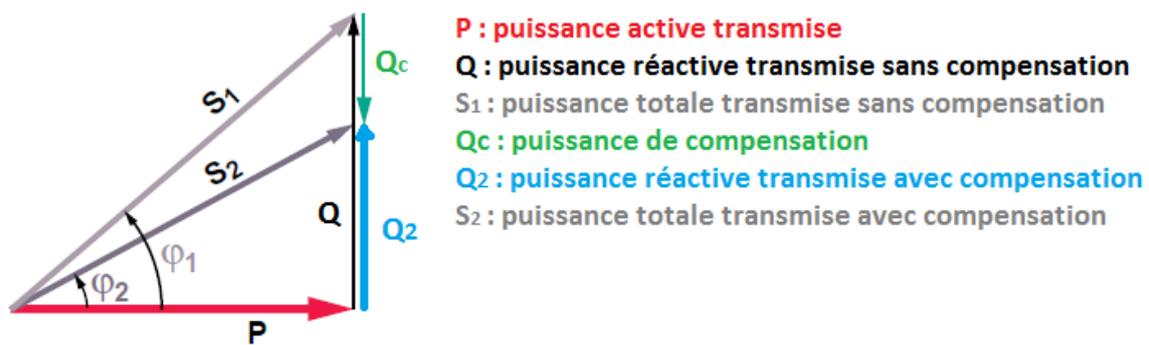


Figure 2.2 : Principe de compensation de l'énergie réactive

2.1.3.2 Moyens de compensation de l'énergie réactive

La compensation de l'énergie réactive dans les réseaux de distribution est sous forme de compensation shunt ; où le dispositif de compensation est raccordé en parallèle avec son emplacement dans le réseau.

Les dispositifs de compensation dans les réseaux de distribution sont :

- Les batteries de condensateurs et les selfs de compensation
- Les compensateurs statiques de puissance réactive

Dans les réseaux modernes, le dispositif le plus utilisé est le compensateur statique de puissance réactive (présenté par la suite), car ils augmentent la contrôlabilité du réseau. Par contre les batteries de condensateurs fonctionnent en tout ou rien avec une puissance réactive constante [8].

- ❖ Lors de l'installation de ces dispositifs, il faut prendre en considération le niveau de tension auxquels ils sont connectés, ainsi que le niveau du courant qu'il l'a parcouru, pour faire un dimensionnement optimal technico-économique ainsi qu'une protection adéquate [7].

Cette compensation peut être réalisée en plusieurs types [8] :

- Compensation globale : impact sur tout le réseau
- Compensation partielle : pour un secteur de forte consommation
- Compensation locale : pour une consommation importante d'un récepteur
- ❖ Par la suite du projet, nous nous intéressons de l'étude du compensateur statique de puissance réactive.

2.2 Compensateur statique de puissance réactive

Le compensateur statique de puissance réactive (SVC : ‘‘Static Var Compensator’’) est un générateur ou absorbeur statique shunt d'énergie réactive utilisé dans les réseaux de transport et de distribution (pour une compensation globale). C'est un moyen de contrôle rapide et flexible de la puissance réactive ; il appartient au groupe des FACTS (système flexible de transmission en courant alternatif) qui sont des dispositifs basé sur l'électronique de puissance et d'autres dispositifs statiques utilisés pour accroître la contrôlabilité des réseaux. Le SVC est un dispositif de la première génération des FACTS, il est basé sur des thyristors classiques et des dispositifs électromécaniques, ceux-ci sont utilisés pour réglage de la puissance réactive selon le besoin [9] [10].

Tous les types des SVC existants ont les mêmes éléments de base : une inductance ou/et un condensateur commandé par une valve de thyristors [10].

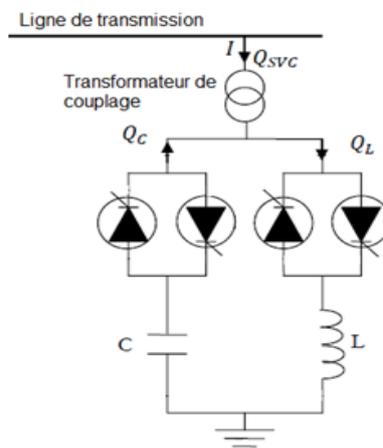


Figure 2.3 : Schéma de base d'un SVC

2.2.1 Constitution d'un SVC

Un SVC est généralement construit en groupant plusieurs compensateurs statiques élémentaires pour une plus grande efficacité. Nous citons [9] [10]:

- Condensateur fixe (FC) : est un banc de condensateurs qui fournit une énergie réactive fixe au réseau, il est connecté au réseau avec un contrôle mécanique. Il s'appelle aussi des capacités à réglage mécanique (MSC : mechanic switched capacitor).

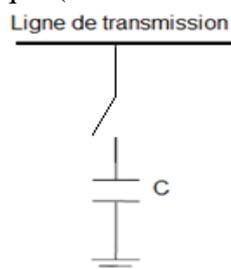


Figure 2.4 : Schéma de base d'un FC

- Réactance commandée par thyristors (TCR) : une bobine d'inductance fixe 'L' branchée en série avec une valve à thyristors bidirectionnelle. Elle permet un contrôle plus fin de la puissance réactive car elle donne un contrôle continu du courant de compensation. Les thyristors sont amorcés symétriquement avec un certain angle d'amorçage.

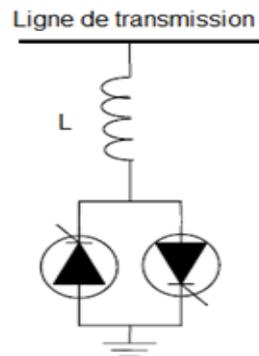


Figure 2.5 : Schéma de base d'un TCR

- Condensateur commuté par thyristors (TSC) : un condensateur fixe 'C' branché en série avec une valve à thyristors bidirectionnelle et une bobine d'inductance d'atténuation qui sert à limiter les courants d'enclenchement transitoire, à amortir les courants d'appel et former un filtre pour les harmoniques provenant du reste du réseau.

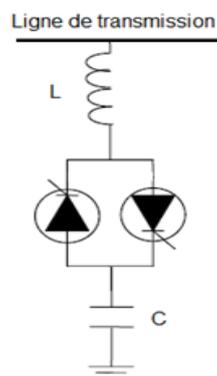


Figure 2.6 : Schéma de base d'un TSC

- ❖ Il existe d'autres types d'éléments de base pour les SVC qui sont moins utilisés, nous citons :
 - TSR : Réactance commutée par thyristors
 - TCT : Transformateur commandé par thyristors
- ❖ Une constitution pratique d'un SVC comprend un ou plusieurs éléments de base décrits précédemment, mais les plus utilisés sont : FC-TCR, TSC-TCR, TSC-TCR-MSVC [9] [10].

2.2.2 Caractéristiques d'un SVC

La puissance réactive injectée ou absorbée par le dispositif ainsi que son admittance sont contrôlées par l'angle d'amorçage des thyristors [10].

Le courant du SVC en plein conduction :

$$I_{SVC} = \frac{V_{SVC}}{X_{SVC}}$$

avec :

$$X_{SVC} = X_L // X_C$$

La puissance réactive est donnée par la formule :

$$Q_{SVC} = \frac{V_{SVC}^2}{X_L} - \frac{V_{SVC}^2}{X_C}$$

Le signe de courant est positif lorsque le courant est inductif, et négatif lorsqu'il est capacitif.

L'angle d'amorçage des thyristors est calculé pour que le courant suive la caractéristique V-I du dispositif. Cette caractéristique est donnée par l'équation suivante [10] :

$$V_{SVC} = V_{ref} + X_{SVC} * I_{SVC}$$

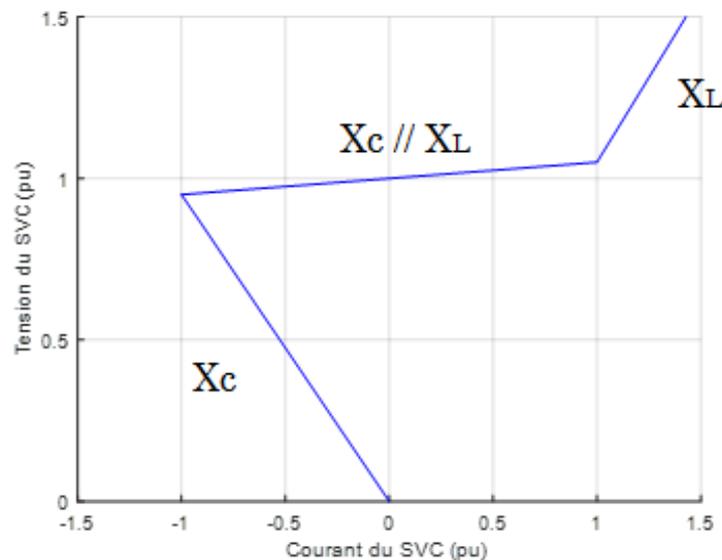


Figure 2.7 : Caractéristique V-I du SVC

Dans ce cas, la marge du réglage est lorsque la tension du SVC égale à “± 5 %” de la tension de référence : où les parties inductive et capacitive du SVC fonctionnent en même temps pour le réglage de la tension. Si la tension est inférieure à cette marge, le SVC fonctionne en régime capacitif pour accroître la tension par l'injection de la puissance réactive. Si la tension est supérieure à cette marge, le SVC fonctionne en régime inductif pour diminuer la tension par l'absorption de l'énergie réactive.

- ❖ La commande du SVC est relativement simple ce qui permet de réaliser ce dispositif. Néanmoins, il présente plusieurs inconvénients tels que la teneur élevée en harmonique, ce qui exige l'utilisation des filtres [9].

2.2.3 Modélisation d'un SVC

Différentes façons de modéliser les SVC ont été développées pour l'étude des régimes stationnaires. Elles se différencient principalement par la méthode utilisée pour intégrer le SVC dans l'analyse du réseau ainsi que leur mode de fonctionnement. Les trois modélisations rencontrées le plus souvent dans la littérature sont [11] [12] :

- a) Injection de la puissance équivalente : Une des méthodes les plus répandues consiste à représenter les SVC (remplacer son effet) sous forme d'injections de puissances réactive aux nœuds (ou dans lignes). Celles-ci sont calculées de manière à ce que l'effet produit soit équivalent à celui du dispositif. Les injections de puissances active et réactive en un nœud sont données par :

$$Q_{noeud} = Q_{transmise} + Q_{SVC}$$

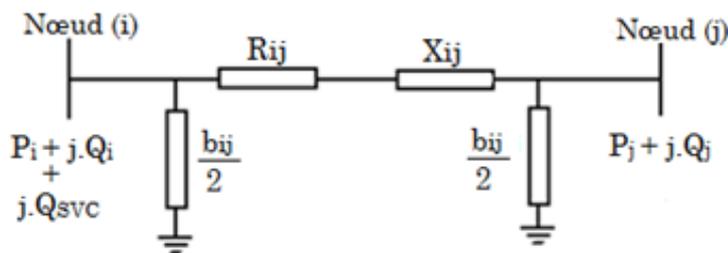


Figure 2.8 : Modélisation d'un SVC par injection de puissance équivalente

- b) Création d'un nœud fictif : Une modélisation des SVC basée sur la création d'un nœud fictif permet de l'analyse du contrôle des transits de puissances réactive. Le principe consiste à exprimer l'effet du dispositif par une puissance qui est injectée en un nouveau nœud ; c'est le nœud fictif, il est créé temporairement pour conserver le bilan de puissance et le calcul de l'écoulement de puissance. La puissance équivalente injecter par ce dispositif est soustraite de la puissance du nœud original.

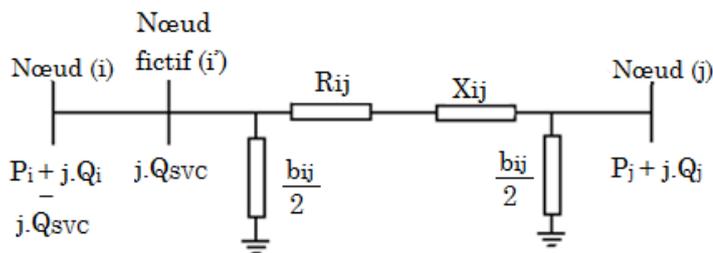


Figure 2.9 : Modélisation d'un SVC par la création d'un nœud fictif

- c) Modification de l'admittance : Les SVC peuvent être modélisés comme des éléments qui modifient directement l'admittance d'un nœud ou d'une ligne du réseau ; selon l'emplacement. Ce modèle est utilisé généralement pour la répartition optimale des puissances. L'équation du modèle est représentée par :

$$Y_{new} = Y_{old} + Y_{SVC}$$

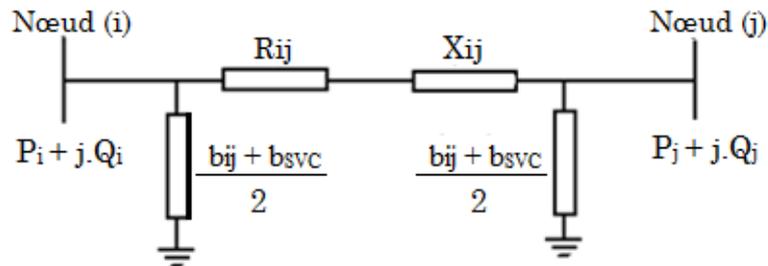


Figure 2.10 : Modélisation d'un SVC par la modification de l'admittance

Le modèle d'un SVC est une admittance shunt variable : Y_{SVC} ; qui peut être inductive ou capacitive, dont la valeur est limitée selon les caractéristiques électriques. L'énergie réactive fournie ou absorbée par le SVC en un nœud et son admittance sont données par les équations suivantes [10] [11] :

$$Y_{SVC} = j \cdot b_{SVC}$$

$$b_{SVC_{min}} < b_{SVC} < b_{SVC_{max}}$$

$$Q_{SVC} = -b_{SVC} * V^2$$

Le signe moins indique que le SVC fournit de la puissance réactive lorsqu'il est capacitif, alors qu'il la consomme lorsqu'il est inductif (selon la valeur de b_{SVC}).

Lorsqu'un SVC est présent dans un nœud, seul l'admittance de ce nœud est modifiée en ajoutant l'admittance du compensateur. Lorsqu'un SVC est présent dans une ligne, seul l'admittance de cette ligne est modifiée en calculant les paramètres de la ligne équivalente après l'ajout du compensateur [9].

- ❖ Le modèle utilisé pour notre étude est celle de la puissance équivalente injectée au nœud d'emplacement du SVC.

2.3 Rôles et fonctions d'un SVC

Il est reconnu depuis longtemps que le profil de la tension en régime permanent et la puissance transmissible peuvent être contrôlé aux niveaux désirés lorsque les conditions du système changent par la compensation shunt. Le SVC injecte ou absorbe le courants de réseau via le point de raccordement, ce courant est variable selon la commande des convertisseurs, donc cette injection ou absorption du courant modifie la puissance active et réactive du réseau transmise dans la ligne. Dans les deux cas, la compensation shunt ajuste le fonctionnement du réseau par un contrôle de l'énergie réactive, selon les conditions de la charge [9] [13].

2.3.1 Contrôle de la puissance réactive

Les dispositifs FACTS shunt et particulièrement les SVC ont comme principale fonction ; le contrôle de la puissance réactive dans les réseaux de transport et de distribution. Cela est effectué par l'injection ou l'absorption du courant réactive. Ce processus est réalisé suivant les équations suivantes :

- Puissance réactive injecté au réseau : $Q_C = + C. \omega. V^2$
- Puissance réactive consommé à partir du réseau : $Q_L = - L. \omega. I^2$

avec :

C : la valeur du condensateur du SVC en Farad.

L : La valeur de l'inductance du SVC en Henry.

V : La valeur de la tension aux bornes du dispositif shunt.

I : La valeur du courant parcouru dans le dispositif shunt.

ω : La pulsation du réseau : $\omega = 2. \pi. f$, où f est la fréquence du réseau.

2.3.2 Contrôle de la tension aux nœuds du réseau

Une autre fonction principale des SVC est le maintien de la tension aux nœuds du réseau à des valeurs acceptables (+/- 5%). Ce contrôle de tension est lié au contrôle de la puissance réactive ; l'injection de cette puissance augmente la tension, et l'absorption de la puissance le fait abaisser. Donc ce rôle est adéquat pour le réglage de la chute de tension et la surtension [1] [9] :

- La surcharge des lignes cause des chutes de tensions, qui dégradent les performances de certains types de charges (les moteurs). Plus la ligne est chargée, plus la chute de tension est importante. La chute de tension entre deux nœuds due à la surcharge s'écrit (selon la loi des mailles) :

$$V_1 = V_2 + Z_{\text{ligne}} * I$$

$$\Delta V = Z_{\text{ligne}} * I$$

avec :

La chute de tension : $\Delta V = V_1 - V_2$

L'impédance série de la ligne : $Z_{\text{ligne}} = R + j. L. \omega = R + j. X_L$

(En négligeant la capacité de la ligne quand elle est chargée)

Le courant de la ligne : I

- Le fonctionnement des lignes à vide (ou la charge est presque nulle) cause des surtensions à cause des capacités shunt des longues lignes (entre ligne et terre), qui saturent les circuits magnétique de certains charges (transformateurs, moteurs), ainsi qu'elle cause des contournements des isolateurs (des courts circuits néfastes). L'augmentation de la tension pour une ligne à vide s'écrit (courant presque nul) :

$$V_2 = V_1 * ch(\gamma * l)$$

avec :

La longueur de la ligne : l

La constante de propagation de la ligne : $\gamma = \sqrt{Z_{ligne} * j.C.w}$

La relation vectorielle entre les tensions des nœuds de la ligne :

$$\vec{V}_1 = \vec{V}_2 + R.\vec{I} + j.X_L.\vec{I}$$

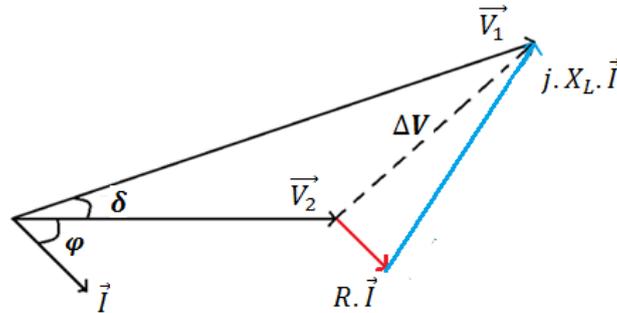


Figure 2.11 : Diagramme de Fresnel pour les tensions des nœuds de la ligne

Par la projection des vecteurs de tensions selon les deux axes ; horizontal et vertical, nous obtenons :

$$V_1 * \cos(\delta) = V_2 + R.I * \cos(\varphi) + X_L.I * \sin(\varphi)$$

$$V_1 * \sin(\delta) = -R.I * \sin(\varphi) + X_L.I * \cos(\varphi)$$

$$\delta = \delta_1 - \delta_2$$

$$\varphi = (\vec{V}_2, \vec{I})$$

En élevant au carré et en sommant les deux équations de tension, nous obtenons :

$$V_1^2 = V_2^2 + 2.V_2 * (R.I.\cos(\varphi) + X_L.I.\sin(\varphi)) + (R.I)^2 + (X_L.I)^2$$

En remplaçant les termes de l'équation précédente par l'intervention des expressions de puissance, avec :

- La puissance active consommée par la charge : $P = V_2.I.\cos(\varphi)$
- La puissance réactive consommée par la charge : $Q = V_2.I.\sin(\varphi)$
- Les pertes par effet de joule dans la ligne : $P_j = R.I^2$
- Les pertes réactives consommées par la réactance de la ligne : $Q_L = X_L.I^2$

La relation des tensions de la ligne devient :

$$V_1^2 - V_2^2 = 2 * (R.P + X_L.Q) + R.P_j + X_L.Q_L$$

$$(V_1 - V_2).(V_1 + V_2) = 2 * (R.P + X_L.Q) + R.P_j + X_L.Q_L$$

A partir de cette équation, nous déduisons :

$$\text{La déviation de tension : } \Delta V = V_1 - V_2$$

$$\text{La tension moyenne de la ligne : } V = \frac{V_1 + V_2}{2}$$

Nous obtenons après ces deux simplifications :

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{R \cdot P + X_L \cdot Q + \frac{1}{2}(R \cdot P_j + X_L \cdot Q_L)}{V^2}$$

Dans les réseaux électriques bien dimensionnés, les pertes par effet joule et la puissance réactive consommée par la ligne présentent quelque pourcentage de la puissance totale transmise. Nous écrivons après simplification :

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{R \cdot P + X_L \cdot Q}{V^2}$$

Généralement pour les lignes de transmission de grandes distances, nous trouvons que la résistance est très inférieure à la réactance ($R \ll X_L$), donc nous simplifions encore, et nous obtenons :

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{X_L \cdot Q}{V^2}$$

- ❖ C'est l'équation qui représente le couplage entre la puissance réactive transmise et l'amplitude de la tension. Par cette équation nous pouvons régler la déviation de tension en agissant sur la puissance réactive dans la ligne par les SVC.

2.3.3 Amélioration de la stabilité de tension

Un autre rôle très important des SVC est de contrarier toute possibilité d'effondrements de tension qui peut conduire à un black-out, donc ils améliorent la stabilité de tension. Ce processus est effectué par une injection rapide de puissance réactive aux nœuds de charges les plus fragiles après une surcharge (grande demande de puissance active). Le but de l'injection de puissance réactive est de manipuler et d'avancer le facteur de puissance ($\cos(\varphi)$). En représentant ce procès par la figure suivante [11] :

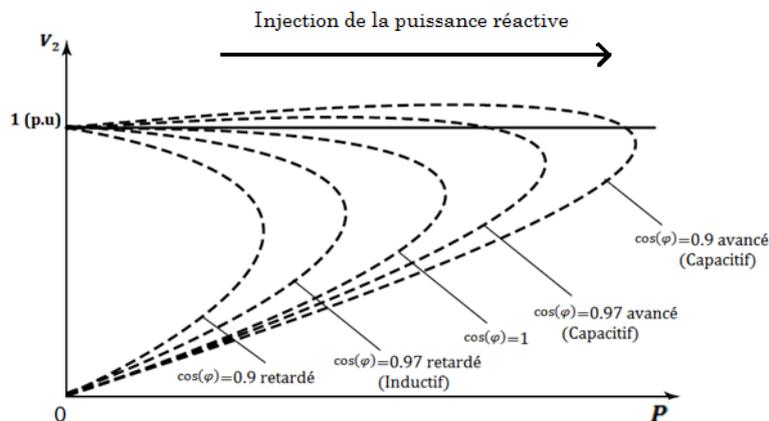


Figure 2.12 : Amélioration de la stabilité de tension par l'injection de la puissance réactive

2.3.4 Equilibrage des charges

Dans les réseaux de distribution, les charges sont souvent déséquilibrées ; à cause de la variation des consommations (notamment celle de l'industrie). Les SVC peuvent être la solution de ce déséquilibre par leurs disposition en pont monophasé, ce qui permettra le maintien des tensions aux nœuds de charges et améliore le facteur de puissance, ainsi que d'équilibrer les charges [9].

2.3.5 Diminution des pertes actives

Les pertes actives dans une ligne de transmission sont calculées par la formule suivante (pour le cas un système monophasé) :

$$\Delta P = R. I^2$$

L'expression du courant de la ligne est comme suit :

$$I = \frac{S^*}{V^*} = \frac{P - j.Q}{V^*}$$

Donc les pertes correspondent :

$$\Delta P = R. \frac{P^2 + Q^2}{V^2}$$

Alors, les pertes active (ohmique ou pertes joule) dépendent de la puissance transmise dans la ligne. Si nous utilisons un SVC dans un nœud de charge qui demande de l'énergie réactive, il s'occupe de l'injection de la puissance réactive en se nœud et les nœuds proches, ce qui diminue la puissance totale transmise par les lignes et donc la diminution des pertes (principe de la compensation shunt).

2.3.6 Augmentation de la puissance active transmise par la ligne

Les dispositifs FACTS sont souvent utilisés pour augmenter la capacité de transfert des lignes de transport d'énergie. Une simple compréhension de cet aspect peut être achevée en considérant les courbes de puissance transmise d'un système mono machine sans et avec SVC [9].



Figure 2.13 : Modèle unifilaire simplifié d'une ligne de transport d'énergie électrique entre deux nœuds sans SVC

Nous désignons par S_{12} la puissance transitée de nœud de génération vers le nœud de charge, pour le calcul de cette puissance, nous notons :

Les amplitudes de tensions de chaque nœud : V_1 et V_2

Les angles de tensions de chaque nœud : δ_1 et δ_2

Le courant de la ligne : I_{12}

L'impédance de la ligne : $Z_{ligne} = R + j.L.\omega = R + j.X_L$

La puissance totale transitée : $S_{12} = P_{12} + j.Q_{12} = V_1 * I_{12}^*$

La puissance active transitée : P_{12}

La puissance réactive transitée : Q_{12}

Selon la loi des mailles : $I_{12} = \frac{1}{Z_{ligne}} * (V_1 - V_2)$

Alors, nous écrivons :

$$\overline{S_{12}} = \overline{V_1} * \overline{I_{12}^*} = \overline{V_1} * \frac{\overline{V_1^*} - \overline{V_2^*}}{\overline{Z_{ligne}^*}}$$

$$\overline{S_{12}} = \frac{V_1^2 - |V_1| \cdot |V_2| \cdot e^{j(\delta_1 - \delta_2)}}{R - j.X_L}$$

En posant : $\delta = \delta_1 - \delta_2$. Avec δ est l'angle de transport

Nous aurions :

$$P_{12} = \frac{1}{R^2 + X_L^2} * [R.V_1^2 - R.|V_1| \cdot |V_2| \cdot \cos(\delta) + X_L \cdot |V_1| \cdot |V_2| \cdot \sin(\delta)]$$

$$Q_{12} = \frac{1}{R^2 + X_L^2} * [X_L.V_1^2 - X_L \cdot |V_1| \cdot |V_2| \cdot \cos(\delta) - R \cdot |V_1| \cdot |V_2| \cdot \sin(\delta)]$$

En considérant pour une longue ligne que la résistance est très inférieure à la réactance ; ($R \ll X_L$), donc les puissances transitées dans la ligne sont :

$$P_{12} = \frac{|V_1| \cdot |V_2| \cdot \sin(\delta)}{X_L}$$

$$Q_{12} = \frac{X_L.V_1^2 - X_L \cdot |V_1| \cdot |V_2| \cdot \cos(\delta)}{X_L^2}$$

Si les tensions des nœuds de la ligne sont maintenues constantes en module, donc nous obtenons pour la puissance active transmise :

$$P_{12} = P_{max} \sin(\delta)$$

Cette équation montre que la seule manière de faire varier la puissance transmise dans une ligne est de varier l'angle de transport. Nous montrons cette variation par la figure suivante :

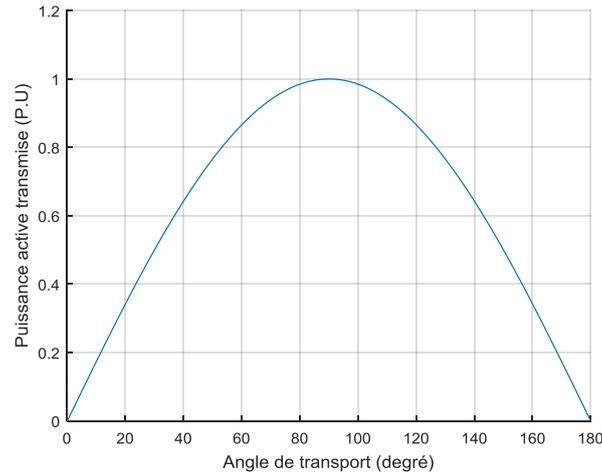


Figure 2.14 : Puissance transmise dans une ligne en fonction de l'angle de transport (δ)

L'insertion d'un dispositif FACTS shunt dans le système précédent modifie les caractéristiques de transit de la puissance active dans la ligne. Nous installons un dispositif au milieu de la ligne (c'est l'emplacement favorable) et étudions leur impact sur la puissance active transmise. En représentant le système par la figure suivante :

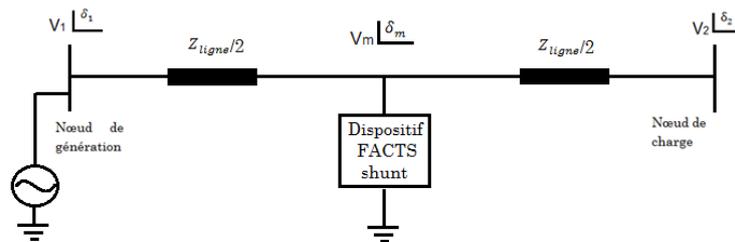


Figure 2.15 : Modèle unifilaire simplifier d'une ligne avec un SVC installé au milieu

En utilisant les mêmes équations pour le système sans dispositif FACTS avec ce système, nous obtenons :

- Pour le premier tronçon : $P'_{12} = \frac{|V_1| \cdot |V_m| \cdot \sin(\delta/2)}{X_L/2}$
- Pour le deuxième tronçon : $P'_{12} = \frac{|V_m| \cdot |V_2| \cdot \sin(\delta/2)}{X_L/2}$

Donc la puissance active transmise dans la ligne avec dispositifs FACTS shunt au milieu de la ligne s'écrit :

$$P'_{12} = \frac{|V_1| \cdot |V_2| \cdot \sin(\delta/2)}{X_L/2} = 2 * \frac{|V_1| \cdot |V_2|}{X_L} * \sin(\delta/2)$$

En comparant cette équation avec celle sans dispositif FACTS, nous trouvons :

$$P_{12} = 2 * P_{max} * \sin(\delta/2)$$

Pour l'emplacement du compensateur dans la ligne où ses deux tronçons sont inégaux, la puissance active transmise sera déterminée en fonction de la puissance transmise du segment le plus long.

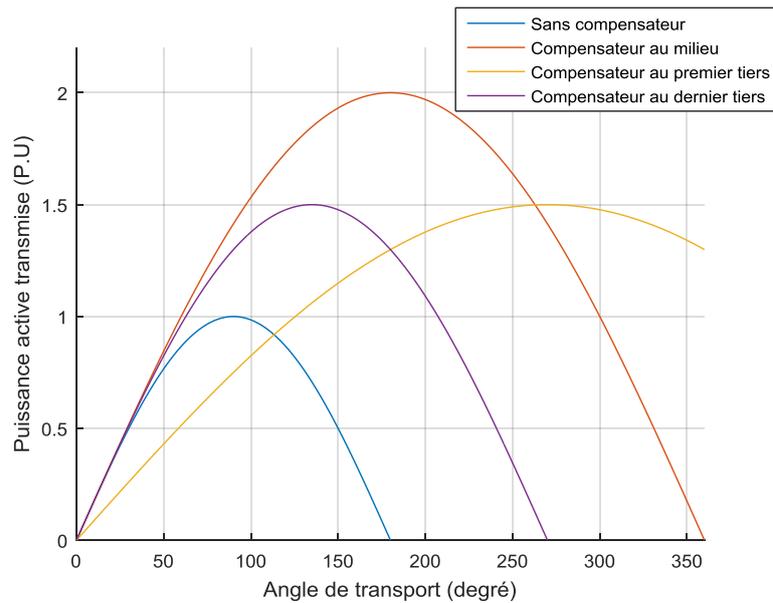


Figure 2.16 : Comparaison de la puissance active transmise ; sans et avec SVC dans plusieurs positions dans la ligne

Si nous disposons le long d'une ligne de transmission « n » dispositifs FACTS shunt dans différentes positions et avec une répartition homogène, la puissance active transmise est donnée par :

$$P_{12} = (n + 1) * \frac{|V_1| \cdot |V_2|}{X_L} * \sin\left(\frac{\delta}{n + 1}\right)$$

Nous constatons par cette comparaison que pour améliorer le transit de puissance dans une ligne, un dispositif FACTS shunt peut remplir cette fonction. Le point milieu de la ligne peut être satisfaisant comme emplacement optimal pour l'installation de ces systèmes dans les lignes, car la plus grande chute de tension est au milieu de la ligne.

Nous déduisons aussi que l'insertion de ce dispositif augmente la limite de stabilité de la ligne.

2.3.7 Amélioration de la stabilité angulaire

- a) Stabilité dynamique (aux petites perturbations) : L'amélioration de cette stabilité se fait par le contrôle de la puissance réactive qui varie la tension proportionnellement avec la variation du couple de synchronisme et de l'angle du rotor, ce qui implique l'amélioration de la stabilité aux petites perturbations [9] [11].
- b) Stabilité transitoire (aux grandes perturbations) : L'augmentation de la marge de stabilité transitoire est obtenue par l'augmentation de la limite de transfert d'énergie qui est assuré par le contrôle de la tension et de la puissance réactive. Cette évaluation peut être facilement observée par le critère d'égalité des aires dans les calculs de la stabilité transitoire [9] [14].

❖ D'autre part, l'installation des SVC possède plusieurs avantages économiques pour le gestionnaire du réseau, tel que [9] :

- Réduire les couts financiers et l'impact sur l'environnement en évitant la construction de nouvelles lignes d'extension.
- Ventes supplémentaires d'énergie dues à l'augmentation de la capacité de transfert.
- Un faible coût d'entretien.

2.4 Emplacement optimal des SVC

Pour qu'un compensateur shunt fonctionne correctement, il faut qu'il soit judicieusement installé dans le réseau. Pour des raisons économiques, il est impossible d'installer des SVC en chaque nœud et ligne dans un réseau électrique, le choix du site dépend de plusieurs paramètres. L'emplacement optimal de ces dispositifs est un sujet très vaste, Un grand nombre de travaux de recherche ont été réalisé sur la détermination de cet emplacement optimal de ces dispositifs dans un réseau électrique. Ces études sont différentes entres elles par rapport à [15] :

- Les contraintes d'emplacement
- La taille et la topologie des réseaux
- les critères et les méthodes d'optimisation utilisées

Nous déduisons de ces études d'emplacement des dispositifs FACTS shunt dans les réseaux électriques que trois emplacements sont favorables [2] [9] :

- Les nœuds de concentration de charge : pour raison de minimiser les pertes des lignes et de garder la tension aux limites admissibles ainsi d'isoler la charge des effets des défauts qui apparaissent dans le réseau.
- Les nœuds critiques du réseau : afin d'amortir les oscillations de puissance et permet d'augmenter la capacité de transfert des lignes ainsi que d'améliorer le profil de tension.
- Les charges industrielles et de traction : pour assurer que les nœuds du réseau ne subissent pas une détérioration de tension, de facteur de puissance ou une dissymétrie des charges à cause des charges inductives.

Pour l'étude de l'emplacement de ces compensateurs, nous trouvons deux types de connexion de ces dispositifs dans le réseau [16] : emplacement dans un nœud faible, ou dans une ligne faible (avec la création d'un nœud fictif).

2.5 Application : calcul d'écoulement de puissance avec SVC

Dans cette partie, nous recalculons l'écoulement de puissance pour le réseau "IEEE-15-Bus" (présenté et calculé dans le chapitre précédent) avec l'insertion d'un SVC au nœud numéro « 2 » (avec le modèle de l'injection de la puissance équivalente) et avec différents valeurs de puissance réactive injectées. Puis nous observons l'impact de ce SVC sur les résultats d'écoulement de puissance, plus particulièrement : le profil de tension et les pertes totales du réseau, qui sont les paramètres les plus importants dans ces réseaux distribution. Aussi pour confirmer les avantages des SVC décrit dans ce chapitre.

Tableau 2.1 : Résultat de l'écoulement de puissance avec compensation

Taille du Nœud \ SVC	100 k-Var	200 k-Var	300 k-Var
1	1.0000	1.0000	1.0000
2	0.9701	0.9726	0.9751
3	0.9558	0.9582	0.9605
4	0.9511	0.9534	0.9557
5	0.9524	0.9547	0.9570
6	0.9616	0.9640	0.9663
7	0.9618	0.9642	0.9665
8	0.9607	0.9630	0.9654
9	0.9657	0.9681	0.9706
10	0.9645	0.9669	0.9694
11	0.9535	0.9558	0.9581
12	0.9501	0.9523	0.9546
13	0.9492	0.9515	0.9537
14	0.9514	0.9537	0.9560
15	0.9516	0.9539	0.9562
Pertes actives (kW)	51.2466	48.4400	46.7084
Pertes réactives (kVAr)	49.0462	46.2803	44.5657

L'insertion d'un seul SVC au nœud numéro « 2 » du réseau et l'injection d'une puissance réactive améliore le profil de tension de tous les nœuds du réseau (ainsi que les nœuds fragiles : 4, 12, 13, 14, 15). Nous observons que l'augmentation de la puissance réactive injectée améliore plus en plus le profil de tension ; où sans compensation, nous avons cinq nœuds fragiles en tension (selon le critère de $\pm 5\%$ de la référence), et après l'insertion d'un SVC avec 100 kVAr de puissance, il reste un seul nœud (numéro 13) fragile, puis après l'injection de 200 kVAr et plus, il ne reste aucun nœud fragile en tension. Ainsi que le profil de tension de tous les nœuds du réseau s'améliore en injectant plus de puissance réactive. Ceci est expliqué par le couplage direct entre les amplitudes de tension et la puissance réactive, où ce compensateur diminue la circulation de cette puissance dans le réseau.

Nous observons aussi que les pertes actives et réactives dans les lignes se diminuent en insérant un SVC. Plus la puissance réactive injectée est grande (de 100 kVAr jusqu'à 300 kVAr), plus les pertes se diminuent. Nous expliquons ce procès par la diminution de l'amplitude du courant total dans les lignes, plus précisément ; diminution d'amplitude de la composante réactive du courant. Où ce compensateur s'occupe de la fourniture de la puissance réactive aux nœuds proches. Donc diminution de la circulation de cette puissance dans le réseau, dont le principe de la compensation shunt.

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté des généralités sur l'énergie réactive et leur inconvenants, ainsi qu'une introduction d'une manière générale sur les techniques de compensation de cette énergie dans les réseaux électriques.

Nous avons exposé une vue globale sur les compensateurs statiques de puissance réactive (le SVC), qui est le dispositif le plus utilisé dans les réseaux modernes. Nous avons montré leurs constitutions de base, leurs caractéristiques, ainsi que les différentes modèles mathématiques associés à ces dispositifs. Les SVC occupent une place privilégiée pour la gestion de systèmes énergétiques vis-à-vis des avantages qu'ils offrent : augmentation de la capacité de transport, renforcement de la stabilité de tension et le maintien d'une qualité meilleure de l'énergie produite ainsi que d'autres atouts décrit précédemment. Tous ces avantages ne peuvent avoir lieu que par un réglage adéquat des paramètres de ces dispositifs ainsi que leurs emplacements optimaux qui sont présentés dans la partie de l'état de l'art. Ainsi qu'ils seront l'objectif et le sujet de notre travail.

Dans la dernière partie, nous avons calculé l'écoulement de puissance avec insertion d'un SVC, puis nous avons vu l'impact de ce dispositif, particulièrement : le profil de tension des nœuds et les pertes active et réactive dans les branches du réseau, ce qui montre clairement les avantages de ces dispositifs décrit dans ce chapitre.

Chapitre 3

Optimisation par Essaim de Particules *- mono et multi-objectif -*

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 ou plusieurs objectifs (optimisation mono ou multi-objectifs), statiques ou dynamiques. Cette liste n'est pas exhaustive ; car un problème peut avoir plusieurs caractéristiques à la fois (être à la fois continu et dynamique).

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

On peut classer les différents problèmes d'optimisation que l'on rencontre dans la vie courante en fonction de leurs caractéristiques [12].

- Nombre et types de variables
- Formulation de problème (avec ou sans contraintes)
- Nombre d'objectifs (mono ou multi-objectif)
- Type de la fonction objectif (linéaire ou non)

3.2 Concept de base d'un problème d'optimisation

Le concept de base d'un problème d'optimisation est une généralité de base commune utilisée dans toutes les méthodes d'optimisation. Il est constitué de [12] :

3.2.1 Fonction objective

La fonction objective est une équation mathématique qui représente ce qu'on désire optimiser. Elle est aussi appelée critère d'optimisation, fonction d'adaptation, ou encore performance (fonction fitness). Elle est présentée par :

$$\text{Optimisation de : } f(x, u)$$

On peut avoir un problème qui contient plusieurs optimums locaux pour chaque partie de la fonction, mais il existe toujours un optimum global pour tout le domaine de la fonction objective.

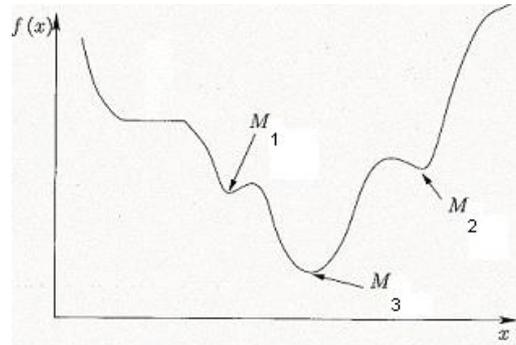


Figure 3.1 : Illustration des optimums locaux (M_1 ; M_2) et l'optimum global (M_3)

3.2.2 Paramètres

Ils correspondent aux variables d'optimisation de la fonction objective. Ils sont ajustés pendant le processus d'optimisation, pour obtenir les solutions optimales.

3.2.3 Espace de recherche et des objectifs

L'espace de recherche est 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.

L'espace des objectifs est un ensemble de l'espace de recherche, déterminé par toutes les valeurs possibles des fonctions objectives.

3.2.4 Contraintes

Ils sont définis comme des conditions sur l'espace d'état que les variables doivent les satisfaire. Ces contraintes sont souvent des contraintes d'égalité ou d'inégalité, et permettent en général de limiter notre espace de recherche :

$$\text{Contraintes d'égalités : } g(x, u) = 0$$

$$\text{Contraintes d'inégalités : } h(x, u) < 0$$

3.2.5 Domaines (réalisable et non-réalisable)

Domaine réalisable est une région de l'espace (des paramètres, des objectifs) dans laquelle les contraintes sont respectées. On l'appelle aussi espace admissible.

Domaine non-réalisable est une région de l'espace où les contraintes ne sont pas satisfaites.

3.3 Problème d'optimisation multi-objectif

Les problèmes réels extraient souvent de multiples objectifs, qui doivent être optimisés simultanément. En pratique, ceci n'est pas toujours possible car les objectifs peuvent être contradictoires (conflictuels). Dans ce cas, la qualité d'un individu est décrite non pas par un scalaire mais par un vecteur des optimums. La performance, la fiabilité et le coût sont des exemples d'objectifs conflictuels [15].

Un problème d'optimisation multi-objectif peut se définir comme suit :

$$\text{Optimisé } F(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_N(x)]$$

$$\text{En respectant les conditions suivantes: } g_i(x) \leq 0$$

où :

$F(x)$: représente l'ensemble des fonctions objectives

g_i : représente les contraintes

x : représente le vecteur des variables de décision dans l'espace de recherche

Les problèmes d'optimisations multi-objectifs n'ont pas une seule solution mais un ensemble de solutions dites solutions de compromis (les solutions non dominées ; pour lesquels une fonction ne peut pas être améliorée sans dégrader au moins une autre équation). Généralement, il n'existe aucune solution pour laquelle tous les objectifs sont optimisés, dû au fait que les objectifs sont souvent conflictuels. Un produit, par exemple, ne peut pas être très performant au plus bas prix. Dans ce cas, plusieurs compromis sont possibles et souvent c'est le facteur humain qui décide de l'optimalité d'une solution [11] [15].

Optimisation au sens de Pareto

Afin de comparer les solutions dans un problème d'optimisation multi-objectif, le concept de dominance du Pareto est utilisé. Ce concept est initialement proposé par Francis Ysidro, puis généralisé par l'économiste Italien Vilfredo Pareto. Une solution appartient à l'ensemble de Pareto, si et seulement si, il n'existe pas une autre solution qui améliore au moins une fonction et ne dégrade pas les autres fonctions objectives [11] [15].

Dans le processus d'optimisation multi-objectifs, le concept de dominance du Pareto est utilisé afin de comparer et ranger le vecteur de variables des décisions : ' u ' domine ' v ' dans le sens du Pareto, signifie que $F(u)$ est mieux que $F(v)$ pour tous les objectifs, et il y a au moins une fonction objective pour laquelle $F(u)$ est strictement meilleure que $F(v)$.

On dit que le vecteur de décision $u = [u_1, u_2, u_3, \dots, u_k]$ domine le vecteur v :

$$v = [v_1, v_2, v_3, \dots, v_k], (u < v) \text{ si et seulement si : } \forall i, F_i(u) < F_i(v)$$

L'ensemble de toutes les solutions optimales de Pareto s'appelle l'ensemble optimal de Pareto. Les vecteurs objectifs correspondants s'appelle les solutions non-dominées, et seraient sur le Front du Pareto (11) (15).

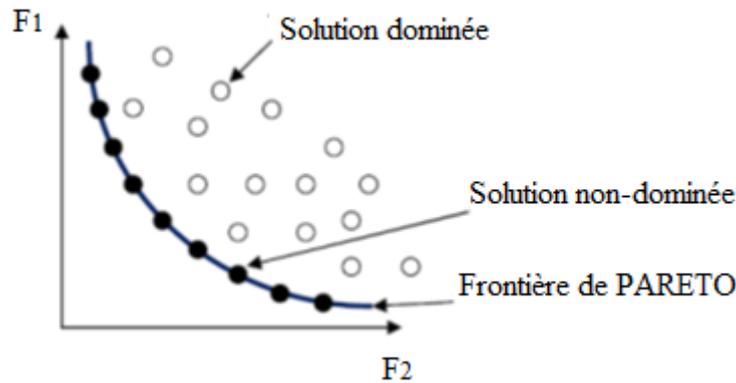


Figure 3.2 : Solutions dans la frontière de Pareto pour un problème bi-objectif

On représente par la figure suivante ; le Front du Pareto pour un problème de minimisation et maximisation deux fonctions objectives [11].

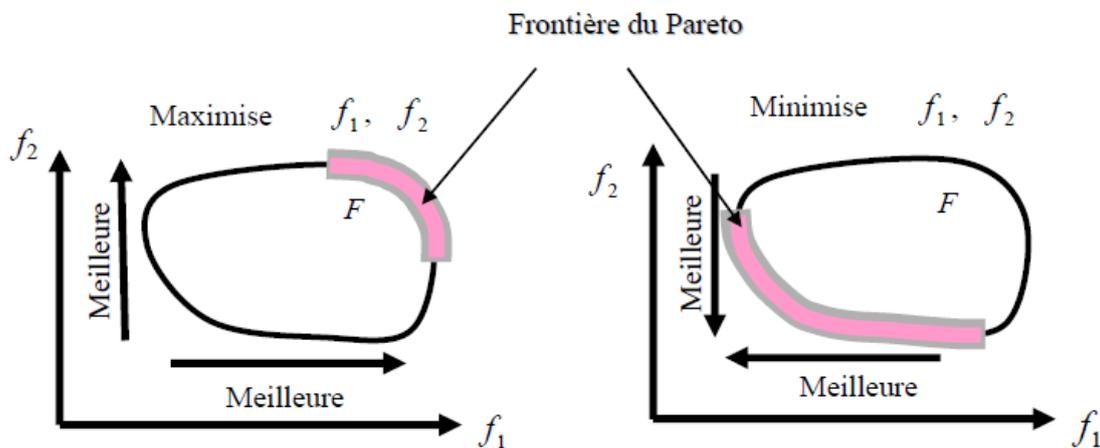


Figure 3.3 : Frontière de Pareto d'un problème d'optimisation bi-objectif

3.4 Résolution du problème d'optimisation

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

- Les méthodes déterministes (méthodes exactes) : Elles conduisent pour une solution initiale donnée toujours au même résultat final. Elles sont efficaces lorsque la solution initiale est proche de l'optimum recherché. Parmi elles, on cite : méthode de Simplexe, Quasi-Newton, la sécante... [12] [15] [17].
- Les méthodes stochastiques (globales) : Elles s'appuient sur des mécanismes de transition probabilistes et aléatoires qui parcourent efficacement l'espace de recherche et convergent vers l'optimum global. Ces méthodes englobent les méthodes métaheuristiques, les algorithmes évolutionnaires, l'intelligence en essaim... [12] [15] [17].

3.5 Optimisation par Essaim de Particules (OEP)

L'optimisation par l'essaim des particules (Particle Swarm Optimisation, PSO) est une technique stochastique et globale d'optimisation, basée sur une population des particules, développée par Eberhart et Kennedy en 1995 et ensuite en 2001. Cette méthode est inspirée du comportement social des oiseaux s'assemblant en nuées, par les bancs de poissons sous l'eau ou encore par les essaims d'abeilles dans leur déplacement [18].

L'OEP présente beaucoup de similitudes avec les techniques de calcul évolutionnaire comme les algorithmes génétiques (GA). Le système est initialisé avec une population de solutions aléatoires et recherche des optimums en mettant à jour des générations (et des déplacements). Cependant, à la différence des algorithmes génétiques, l'OEP ne comporte aucun opérateur d'évolution tel que le croisement ou la mutation. Dans l'OEP, les solutions potentielles appelées particules, se déplacent dans l'espace défini du problème étudié en suivant les particules optimales existantes [15].

Chaque particule maintient ses coordonnées dans l'espace de recherche où les coordonnées correspondantes à la meilleure solution (position) atteinte jusqu'ici sont stockées, cette valeur s'appelle **pbest**. Quand une particule prend toute la population comme ses voisins topologiques, la meilleure valeur globale s'appelle **gbest** (18). Le concept d'optimisation d'essaim de particules change chaque fois que les particules font un pas et change leur vitesse (accélération) vers les meilleurs endroits **gbest de pbest** [11] [15] [18].

Durant plusieurs années passées, l'OEP a été appliqué avec succès à de nombreux problèmes d'optimisation. Ils ont démontrés que l'utilisation de cette méthode conduit à l'obtention des meilleurs résultats d'une manière plus rapide et plus efficace, comparativement à d'autres méthodes. Une autre raison pour laquelle L'OEP est attrayante, elle a peu de paramètres à ajuster [15] [18].

3.5.1 Méthode de base

La méthode PSO Démarre le processus d'optimisation par une population des solutions aléatoires qui se déplacent dans l'espace de recherche. La position de chaque particule est représentée par ses coordonnées et par sa vitesse [15] [18].

Chaque particule dans l'essaim, change sa vitesse suivant deux informations essentielles. La première est liée à son expérience personnelle, qui est la meilleure position trouvée par la particule durant le processus de recherche **pbest**. La deuxième information, concernant la meilleure position trouvée par tout l'essaim, dans la version globale de l'algorithme **gbest** [15].

Le déplacement de chaque particule dans l'espace de recherche, est basé sur sa position actuelle et la mise à jour de sa vitesse.

$$s_i^{k+1} = s_i^k + v_i^{k+1}$$

- s_i^{k+1} et s_i^k : Position de la particule « i » à l'itération « k+1 » et « k »
- v_i^{k+1} : Vitesse de la particule « i » à l'itération « k+1 »

Le principe de changement de la vitesse est défini par l'équation suivante :

$$v_i^{k+1} = w * v_i^k + c_1 * rand_1 * (pbest_i - s_i^k) + c_2 * rand_2 * (gbest - s_i^k)$$

- v_i^{k+1} : Vitesse de la particule « i » à l'itération « k+1 »
- w : La fonction du poids (pondération)
- c_1 & c_2 : Les facteurs de pondération (généralement entre [1.4 et 2])
- $rand_1$ & $rand_2$: Nombres aléatoires (entre 0 et 1)
- s_i^k : Position de la particule « i » à l'itération « k »
- $pbest_i$: Meilleure position trouvée par la particule « i » jusque
- $gbest$: Meilleure position trouvée par l'essaim

L'équation de pondération est donnée par l'équation suivante :

$$w_i = w_{max} - \frac{w_{max} - w_{min}}{iter_{max}} * iter$$

- w_{max} : Poids initial
- w_{min} : Poids final
- $iter_{max}$: Nombre d'itérations maximal
- $iter$: Itération courante

La fonction de pondération « w » joue un rôle important dans la procédure de recherche. Elle garantit un équilibre entre la recherche locale et la recherche globale. L'expérience a montré que la diminution linéaire de la valeur de « w » de 0.9 à 0.4 au cours de la procédure de recherche donne des meilleurs résultats [11].

Chaque particule change sa position actuelle via l'intégration de trois vecteurs V_{best} , V_{gbest} et V , qui est le principe de déplacement des particules dans l'espace de recherche [11] [12].

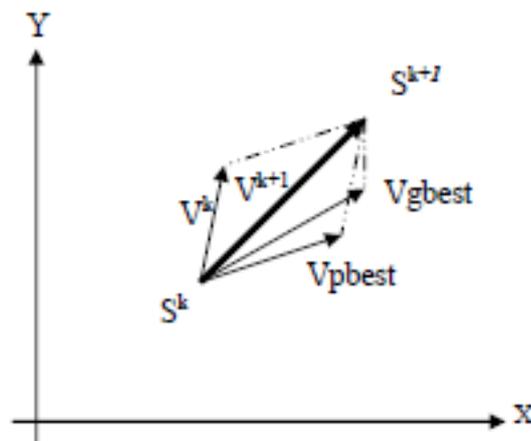


Figure 3.4 : Principe de déplacement d'une particule par la PSO

3.5.2 Organigramme de la méthode PSO

- **Etape1** : Initialisation des paramètres du PSO

Dans cette première étape, on initialise le nombre de particules utilisé pour cette optimisation (nombre de population) ainsi que les limites des ensembles, puis on donne des valeurs aux facteurs de pondérations et les poids (initial et final).

- **Etape2** : Génération d'un état initial de chaque particule

Les points de recherche initiaux, position (s_i^0) et vitesse (v_i^0) de chaque particule sont habituellement générés aléatoirement dans l'espace de recherche. Le point de recherche courant est placé à **pbest** pour chaque agent. La meilleure valeur évaluée de **pbest** est placée à **gbest**.

- **Etape3** : Recherche d'une nouvelle position de chaque agent

La valeur de la fonction objective est calculée pour chacun des agents. Si la valeur d'un agent est meilleure que son **pbest** courant, **pbest** prend cette nouvelle valeur. Si la meilleure valeur de **pbest** est meilleure que **gbest** courant, **gbest** est remplacé par celle-ci, et l'agent qui correspond à cette valeur est ainsi stocké.

- **Etape4** : Modification de chaque point de recherche

Le point de recherche courant de chaque agent est changé en utilisant les équations des fonctions objectives. On appelle cette étape par l'évaluation.

- **Etape5** : Vérification de l'état de sortie

Si le nombre courant d'itération atteint le nombre maximum d'itération, ou la valeur optimal final sera répétée (plus de dix fois) ; alors fin du programme, sinon, retourner à l'étape 3.

- ❖ L'organigramme général de la méthode de base du PSO est illustré par la figure suivante [11] [12] [18] :

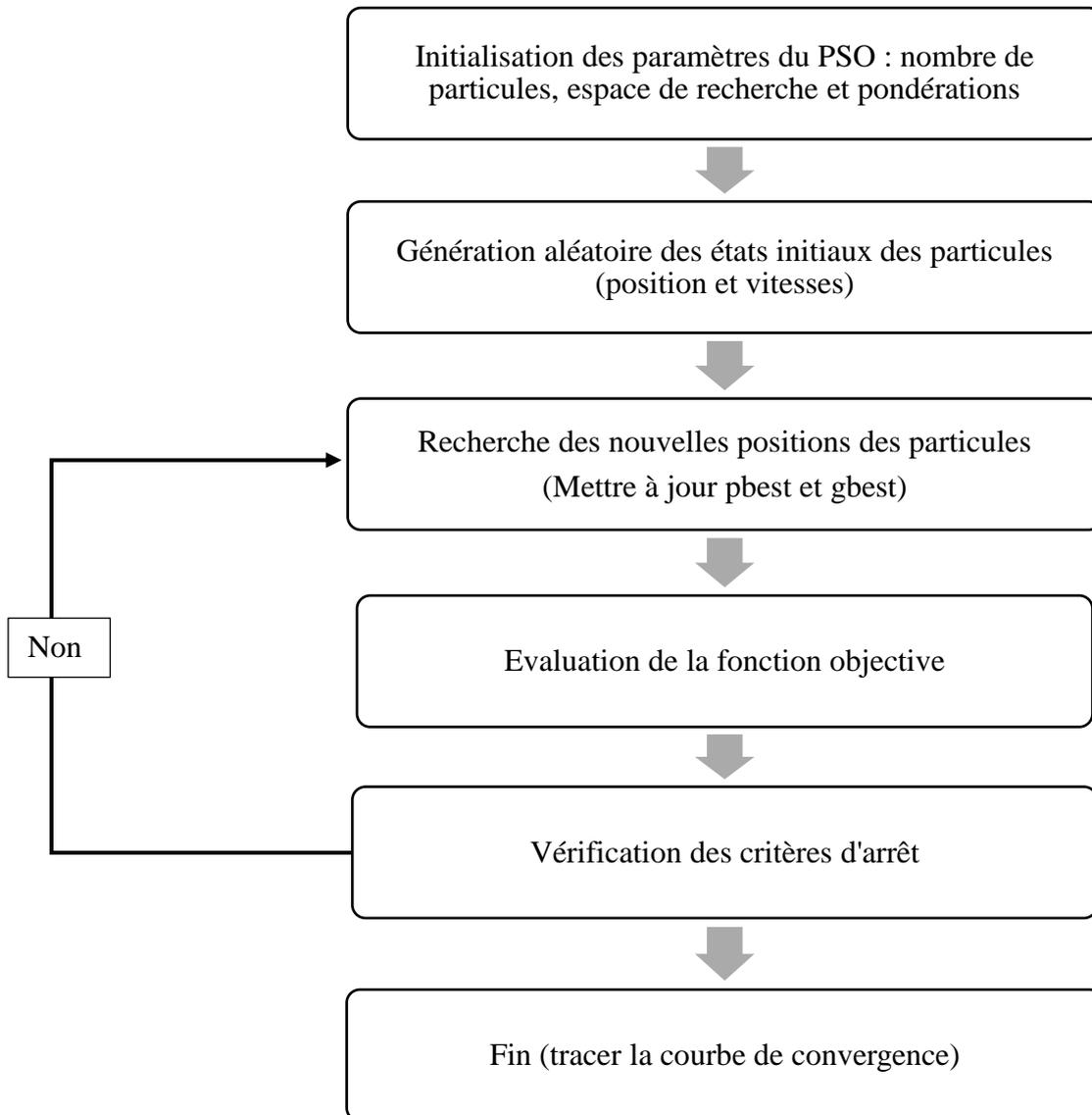


Figure 3.5 : Principe de la PSO du base

3.6 Optimisation multi-objectif basée sur essaim de particules

L'optimisation par la méthode des essaims de particules est développée pour qu'elle puisse résoudre des problèmes multi-objectifs. Parmi ces méthodes [11] [15] :

- PSO avec voisinage dynamique
- MOPSO (multi-objective)
- NSPSO (Non-dominated Sorting)
- PSO et la méthode de niche

❖ Dans notre projet, nous intéressons à la méthode MOPSO ; qui est présenté par la suite du chapitre.

MOPSO de Coello & Lenshunga

Coello et Lechunga proposent une méthode nommé MOSPSO (Multi objective Particle Swarm Optimization). La méthode était inspirée des derniers développements dans les algorithmes évolutionnaires. Deux mémoires sont utilisées ; une pour stocker les **gbest** et l'autre pour les **pbest** de chaque particule de l'essaim. Un archivage est aussi utilisé pour stocker les particules non dominées de l'essaim [11] [19].

Cet archive étant séparé par des carrés (grilles), si l'archive des particules non dominées dépasse sa limite spécifiée, le carré qui possède le grand nombre des particules sera supprimé de l'archive. L'archive facilite aussi le choix de **gbest** pour chaque particule, de telle sorte que chaque carré de la grille doit être évalué par une fonction fitness. La fitness utilisée par cet algorithme est le résultat de la division de 10 par le nombre des particules résidant dans le carré en question. Pour cela, le carré qui possède le plus de particules, est moins intéressant [11] [19].

Ensuite, on applique la technique de la roulette sur les carrés selon leurs fitness. Le **gbest** est choisi d'une manière aléatoire à partir de carré choisi par la technique de roulette. Le but de cette technique est d'assurer la diversité dans la frontière du Pareto [11] [19]. La technique de la grille est illustrée dans la figure suivante :

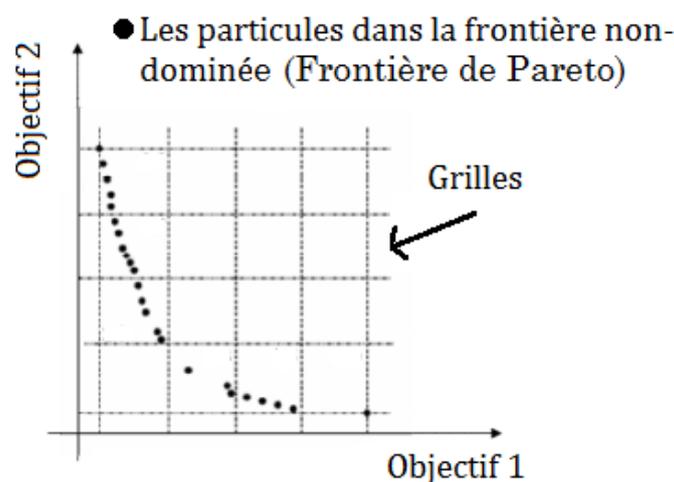


Figure 3.6 : Technique des grilles du MOPSO

La mise à jour du **pbest** est basée sur la notion de dominance au sens de Pareto. Si la nouvelle solution domine **pbest** donc il prend la valeur de cette solution. Le cas où les deux sont non dominés, la nouvelle valeur de **pbest** est choisie aléatoirement entre le **pbest** courant et celui de l'itération suivante.

Algorithme du MOPSO

L'algorithme MOPSO peut être résumé comme suit [15] [19] :

1) Initialisation de la population (*POP*)

Pour $i=1$: *MAX* (*MAX* nombre de particule)

- Initialiser aléatoirement des positions des particules *POP* (i)
- Approximer les variables discrètes à la valeur assignée la plus proche.

2) Initialisation de la vitesse de chaque particule :

Pour $i=1$: *MAX*

- $V(i) = 0$

3) Evaluation des objectifs pour chaque particule dans *POP*

4) Stocker les particules non dominées dans *REP*

5) Générer les hyper-cubes (grilles) dans l'espace de recherche exploré

6) Initialisation du **pbest**

Pour $i=1$: *MAX*

- $PBEST(i) = POP(i)$

7) Tant que le nombre d'itération n'est pas encore atteint.

- Calculer le **gbest** par la technique présentée précédemment (l'archivage)
- Calculer la vitesse de chaque particule à partir de l'équation de PSO (décrit précédemment)
- Calculer les nouvelles positions des particules par l'équation de PSO
- Maintenir les particules dans l'espace de recherche (contraintes)
- Approximer la valeur continue des variables discrètes à la valeur discrète la plus proche
- Evaluer les nouvelles particules dans l'espace de recherche
- Mettre à jour le contenu du *REP* en insérant les nouvelles particules non dominées en même temps que l'on élimine les particules dominées du *REP*. Dans le cas où la mémoire *REP* excède une limite spécifiée, on élimine les particules qui ont la fonction fitness la plus basse.

8) Tracer la frontière du Pareto

3.7 Exemples d'application

Pour tester le comportement de la méthode d'optimisation par l'essaim de particule, nous l'appliquons sur différents problèmes ; mono-variable, multi-variable, mono-objectif et multi-objectifs.

Cette méthode contient plusieurs paramètres explicites, tel que :

- Nombre de la population
- Les facteurs de pondérations (C_1 & C_2)
- Les poids de la fonction (w_{\max} & w_{\min})
- Le nombre d'itération maximal

Ces paramètres jouent un rôle très important dans la recherche du point optimum. Par l'expérience, nous avons pu avoir de bonnes valeurs qui donnent de bons résultats pour la méthode qui sont démontrées par la suite.

3.7.1 Optimisation mono-objectif

Nous appliquons la méthode d'optimisation PSO mono-objectif pour deux fonctions de test ; la première avec un seul variable, et la deuxième avec deux (2) variables. Puis nous comparons les résultats obtenus par la PSO avec la détermination graphique de l'optimum.

3.7.1.1 Test numéro 1

L'objectif de ce premier test est d'avoir le minimum (optimum) de la fonction objective suivante :

$$F(x) = x + 20 * \sin(5.x)$$

Sous les contraintes suivantes :

$$-4 \leq x \leq +4$$

Les paramètres du PSO utilisés sont :

- Nombre de population : 200 Agents
- Les facteurs de pondération : $C_1 = C_2 = 1.4$
- Les poids de la fonction : $w_{\max} = 0.9$ & $w_{\min} = 0.4$
- Nombre d'itération maximal : 200
- Nombre maximum d'itération pour une valeur optimale répétée : 10

Les résultats de l'optimisation de la fonction test-1 sont présentés par les figures suivantes :

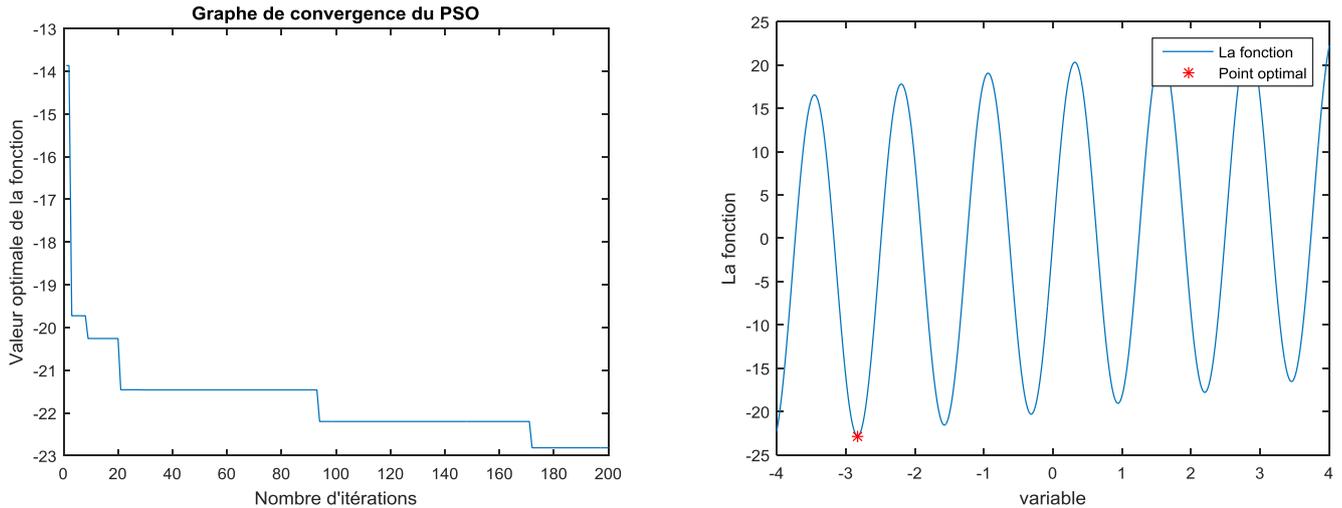


Figure 3.7 : Résultat d’optimisation de la fonction test-1

Gauche : La valeur optimale en fonction du nombre d’itération. Droite : graphe de la fonction à optimiser et le point optimal

3.7.1.2 Test numéro 2

L’objectif de ce test est d’avoir l’optimum (minimum) de la fonction multi-variable suivante (avec les mêmes paramètres du PSO utilisé dans test-1) :

$$F(x, y) = x \cdot e^{(-x^2 - y^2)}$$

Sous les contraintes suivantes :

$$-4 \leq x \leq +4$$

$$-4 \leq y \leq +4$$

Les résultats de cette optimisation sont présentés par les figures suivantes :

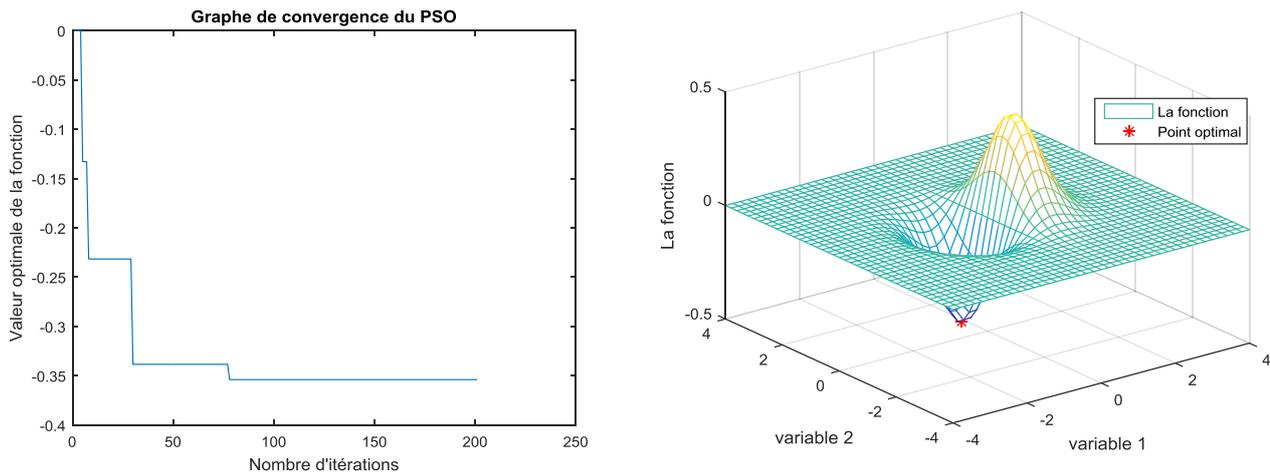


Figure 3.8 : Résultat d’optimisation de la fonction test-2

Gauche : La valeur optimale en fonction du nombre d’itération. Droite : graphe de la fonction à optimiser et le point optimal

Nous constatons pour les deux premiers tests mono-objectifs que la PSO donne de bons résultats. Nous confirmons ces résultats avec les graphes des fonctions et la détermination des points optimums. Ceci est effectué en utilisant de bons paramètres, où cette méthode évite de donner des optimums locaux.

3.7.2 Optimisation multi-objectif (test numéro 3)

Nous appliquons la méthode MO-PSO de Coello & Lenchunga sur un problème de deux objectifs (bi-objectifs) de test présenté par la suite.

Maximisation du système :

$$\text{Objectif 1 : } F(x) = -10 * e^{-0.2*x^X}$$

$$\text{Objectif 2 : } G(x) = x^x + 5 * \sin(x^3)$$

Sous les contraintes suivantes :

$$0 \leq x \leq +2.5$$

Les paramètres du PSO utilisés sont :

- Nombre de population : 25 Agents
- Les facteurs de pondération : $C_1 = C_2 = 2$
- Les poids de la fonction : $w_{\max} = 0.9$ & $w_{\min} = 0.4$
- Nombre des hyper-cubes : 36
- Nombre d'itération maximal : 30

Les résultats de l'optimisation multi-objectifs sont représentés par la figure suivante :

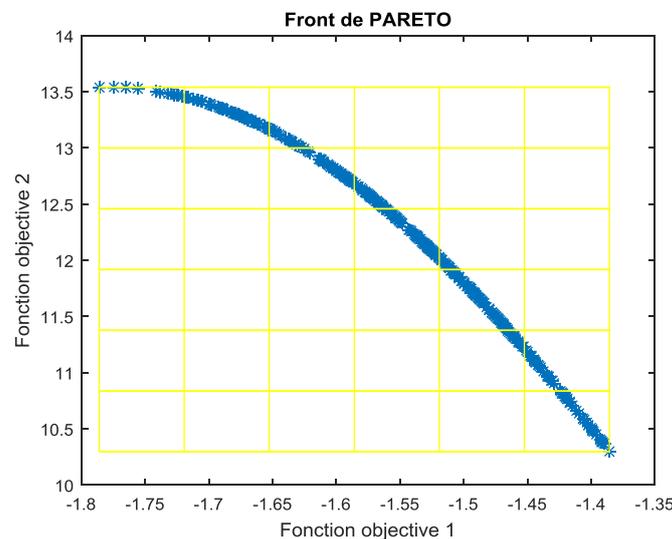


Figure 3.9 : Résultat d'optimisation multi objectif (test-3), avec : les hyper-cubes et les valeurs non-dominées qui construisent le front de Pareto

Nous constatons par l'optimisation multi-objective, que le résultat est présenté par plusieurs points optimaux ; qui ne sont pas dominés par autre points de chaque équation, et qui construisent le front de Pareto. Donc le choix du point idéal pour le système dépend d'autres paramètres, où nous pouvons appliquer d'autres méthodes pour la sélection de la solution de compromis, comme le réseau de neurones [10].

3.8 Conclusion

Nous avons présentés, dans ce chapitre, des connaissances de base sur les problèmes d'optimisation mono et multi-objectifs, ainsi, les différentes méthodes de résolution les plus utilisées dans la littérature. Par la suite, nous nous sommes intéressés à la méthode d'Optimisation par Essaim de Particules (OEP, PSO en anglais) à travers différentes définitions et notions élémentaires présentées dans les références de base. Où nous avons décrit son principe de base et sa formulation mathématique. Aussi, nous avons présenté l'état de l'art sur les différentes méthodes d'optimisation multi-objectif basée sur la PSO, ainsi qu'une brève introduction de son algorithme.

Dans une deuxième partie, nous avons montré par des simulations sur des exemples de test de fonctions simples avant de nous pencher et de l'appliquer à un problème physique plus important ; qui est les réseaux électrique dans notre cas, où nous avons trouvé de bons résultats en basant sur les graphes des fonctions pour les problèmes mono-objectif. Ainsi que pour les problèmes multi-objectifs, où les résultats obtenus sont confirmés dans les ouvrages cités en références.

Chapitre 4

Résultats de simulation et discussions

4.1 Introduction

Dans ce chapitre nous nous intéressons à résoudre le problème de l'emplacement optimal multi-objectif des dispositifs FACTS shunt dans un réseau électrique de distribution. Pour notre simulation, le dispositif FACTS shunt utilisé est : un seul SVC (compensateur statique d'énergie réactive) implanté dans un nœud du réseau ; les nœuds candidats pour l'emplacement de ce dispositif sont choisis avec des critères précis (pour notre cas, les nœuds fragiles en amplitude de tension). En balayant ces nœuds nous trouvons le nœud optimal.

Puis, nous observons son impact sur tous les autres nœuds dans l'amélioration du profil de tension, et la minimisation des pertes dans les lignes (pertes joules et pertes réactives). Ensuite, nous choisissons un emplacement qui donne un compromis optimal selon plusieurs paramètres.

Nous devons prendre en considération le choix de l'emplacement optimal de ce dispositif qui offre le meilleur rendement en termes d'objectifs choisis. De ce fait, nous utilisons la méthode d'optimisation par essaim de particules (OEO ou PSO en anglais) comme outil de calcul, avec des paramètres choisis (nombre de particules, pondération et poids) et les contraintes de l'objectif.

Les objectifs de notre étude et simulations sont :

- Minimisation des déviations de tensions
- Minimisation des pertes actives
- Minimisation des pertes actives et déviations de tensions simultanément

Chacun des deux premiers objectifs sera traité comme un problème d'optimisation mono-objectif par la méthode PSO de base, en déterminant l'emplacement optimal du SVC ainsi que sa taille optimale. Donc nous retenons un emplacement pour chaque objectif ; emplacements différents (généralement), car les deux objectifs sont contradictoires. Par la suite, nous optimisons les deux objectifs simultanément (ce qui est plus pratique sur le terrain), avec une optimisation multi-objectifs basée sur la méthode MO-PSO présentée dans le chapitre précédent.

L'étude d'optimisation sera basée sur des contraintes opérationnelles qui déterminent l'espace de recherche. Les contraintes utilisées ont pour but de garder la sûreté de fonctionnement du réseau ; des profils de tensions admissibles et des puissances transmises compatibles à la capacité de transfert des lignes, ainsi que limiter les tailles du SVC dans des marges plausibles et réalisables.

Comparée aux problèmes d'optimisation mono-objectif, l'optimisation multi-objectif de l'emplacement d'un SVC dans le réseau est difficile à résoudre ; car elle ne possède pas une seule solution, mais sera présentée en termes d'optimalité de front de Pareto (présenté dans le précédent chapitre) ; ce qui offre plusieurs solutions optimales, représentant un compromis entre les différents objectifs : pertes actives, déviation des tensions, taille du SVC.

Il reste aux décideurs (le gestionnaire du réseau) à choisir la solution qui répond le plus à ses exigences, avec l'introduction d'autres objectifs et l'utilisation d'autres méthodes d'optimisation (stratégie d'aide à la décision).

Les réseaux électriques 'IEEE 15 nœuds' et 'IEEE 33 nœuds' sont utilisés pour valider la méthode proposée, et les résultats obtenus par PSO et MOPSO montrent l'efficacité de l'emplacement optimal du compensateur SVC.

4.2 Formulation du problème d'optimisation

4.2.1 Fonctions objectives

Dans ce travail, nous nous intéressons à optimiser les pertes dans les lignes et la déviation des tensions des nœuds, ainsi que la taille du SVC utilisé. Ces objectifs peuvent être décrits par les formulations mathématiques suivantes :

4.2.1.1 Minimisation des déviations des tensions

Comme première fonction objective, nous évaluons la minimisation des déviations des amplitudes de tensions des nœuds du réseau par rapport à l'amplitude de référence (1 pu). Cet objectif peut être formulé par plusieurs formules mathématiques. Pour notre cas nous utilisons les fonctions suivantes :

- Somme des déviations des tensions :

$$f_{1_1} = \min \left(\sum_{i=1}^{Nbus} \left| |V_i| - |V_{ref}| \right| \right)$$

- Intégral de la déviation du profil de tension (aire entre profil de tension et la référence) :

$$f_{1_2} = \min \left(\int_1^{Nbus} \left| |V_i| - |V_{ref}| \right| * d(i) \right)$$

A l'aide de ces deux critères utilisés, nous déterminant aussi : la tension moyenne aux nœuds du réseau (V_{moy}), la tension maximale (V_{max}) et la tension minimale (V_{min}) ; qui sont des paramètres d'aide pour l'évaluation du profil de tension.

avec :

N_{bus} : Nombre des nœuds du réseau

V_i : Tension du nœud ‘‘i’’

V_{ref} : Tension de référence du réseau (1 pu)

V_{moy} : Amplitude de tension moyenne des nœuds du réseau :

$$V_{moy} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{bus}} |V_i|}{N_{bus}}$$

4.2.1.2 Minimisation des pertes

La fonction objective envisagée est la minimisation des pertes actives de transmission dans les lignes, elle est formulée comme suit :

$$f_2 = \min \left(\sum_{i=1}^{Nbr} P_{loss_i} \right)$$

$$P_{loss_i} = r_i * \left(\frac{V_{si} - V_{ri}}{r_i + j \cdot x_i} \right)^2$$

avec :

Nbr : Nombre de branches (lignes) du réseau

P_{loss_i} : Pertes de puissance active dans la ligne ‘‘i’’

r_i : Résistance de la ligne électrique ‘‘i’’

x_i : Réactance de la ligne électrique ‘‘i’’

V_{si} et V_{ri} : Tension des nœuds dont la ligne ‘‘i’’ est connectée

- ❖ Pour l’optimisation multi-objectif : pertes actives et déviation des tensions, la fonction objective utilisée est :

$$\min(F) = \min(f_{1_1}, f_2)$$

avec :

Somme des déviations des tensions : $f_{1_1} = \min \left(\sum_{i=1}^{N_{bus}} \left| |V_i| - |V_{ref}| \right| \right)$

Somme des pertes actives : $f_2 = \min \left(\sum_{i=1}^{Nbr} P_{loss_i} \right)$

4.2.2 Contraintes utilisées

L’optimisation d’une des fonctions objectives décrites précédemment (ou les deux simultanément) doit respecter certaines contraintes ; pour assurer une bonne qualité de l’énergie électrique, la sûreté du fonctionnement du réseau, ainsi la taille du SVC réalisable pour les réseaux de distribution. Ces contraintes sont définis par :

- La puissance apparente maximale transmise dans les lignes :

$$S_{Li} < S_{Li}^{max}$$

- La puissance apparente maximale du poste source :

$$S_{sub} = \sum_{i=1}^{Nbus} S_i + \sum_{i=1}^{Nbr} S_{loss_i}$$

$$S_{sub} \leq S_{sub}^{max}$$

- Les amplitudes des tensions acceptables aux nœuds du réseau :

$$|V_i^{min}| \leq |V_i| \leq |V_i^{max}|$$

- La taille du SVC réalisable pour les réseaux de distribution :

$$b_{SVC}^{min} \leq b_{SVC} \leq b_{SVC}^{max}$$

avec :

S_{Li} : Puissance totale transmise dans la branche ‘i’

S_{sub} : Puissance totale du poste source

b_{SVC} : Susceptance d’un SVC

- ❖ Les valeurs des paramètres utilisés dans les contraintes sont présentées dans l’annexe.

4.3 Adaptation de la PSO au problème d’emplacement optimal du SVC

L’organigramme du balayage et de la recherche de l’emplacement optimal d’un SVC pour un objectif précis est représenté par la figure suivante :

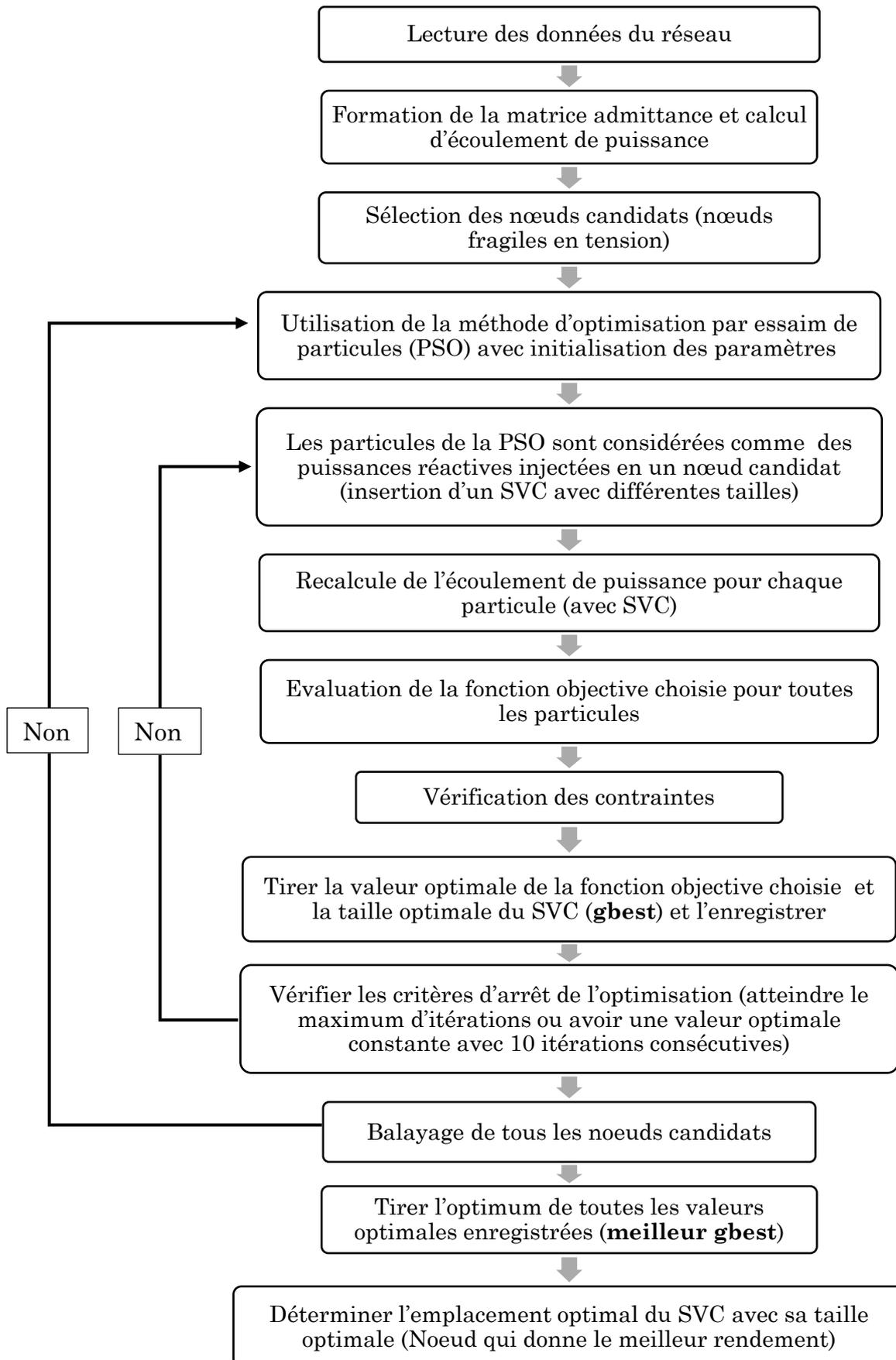


Figure 4.1 : Organigramme d'adaptation du PSO au problème d'emplacement du SVC

4.4 Programme de simulation

Nous avons élaboré un programme de calcul basé et écrit entièrement en langage Matlab, pour l'utiliser dans notre étude et simulation. Nous présentons l'interface graphique du programme élaboré ainsi que ses fonctions par les figures suivantes :

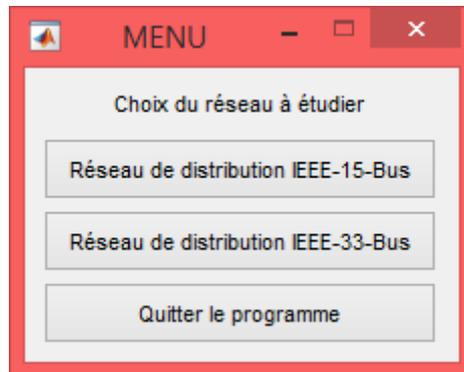


Figure 4.2 : Interface du programme (choix du réseau)

En choisissant le réseau à étudier ou à tester, puis il apparaît un autre menu qui donne la main pour choisir la fonction souhaitable :

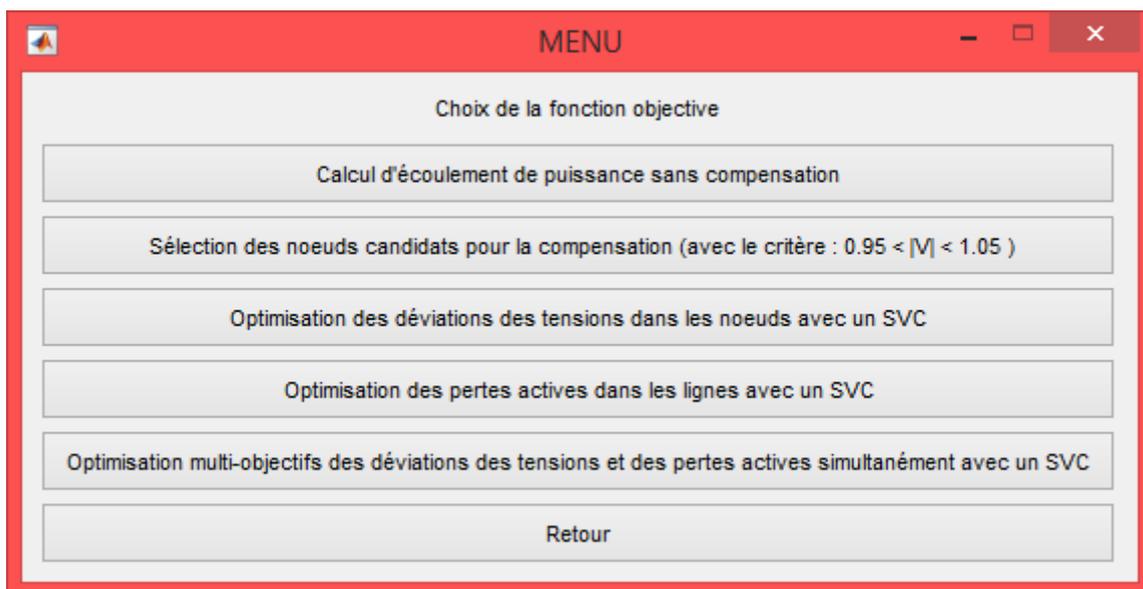


Figure 4.3 : Interface du choix de la fonction à calculer pour le réseau choisi

Par le choix de la fonction à calculer, les résultats sont représentés par des figures et tableaux, qu'ils sont illustrés par la suite dans la simulation des réseaux et les optimisations des objectifs.

4.5 Application sur réseau standard ‘IEEE-15-Bus’

Le réseau standard ‘IEEE-15-Bus’ est un réseau de distribution radial de 15 nœuds ; où le premier nœud est un nœud de source (nœud infini), avec 14 branches de liaison (voir annexe). Ce réseau est tiré des articles de ‘IEEE’[20], avec leur résultats de référence de calcul de l’écoulement de puissance (confirmé dans le chapitre 2).

4.5.1 Résultats de l’écoulement de puissance sans SVC

Dans cette partie, nous nous intéressons à voir le profil de tension et les pertes (active et réactive) du réseau avant l’insertion d’un SVC, et comparer ensuite au cas du réseau avec insertion d’un SVC pour analyser son impact selon la fonction objective choisie.

La figure suivante présente le profil de tension (les amplitudes) des nœuds du réseau sans compensation :

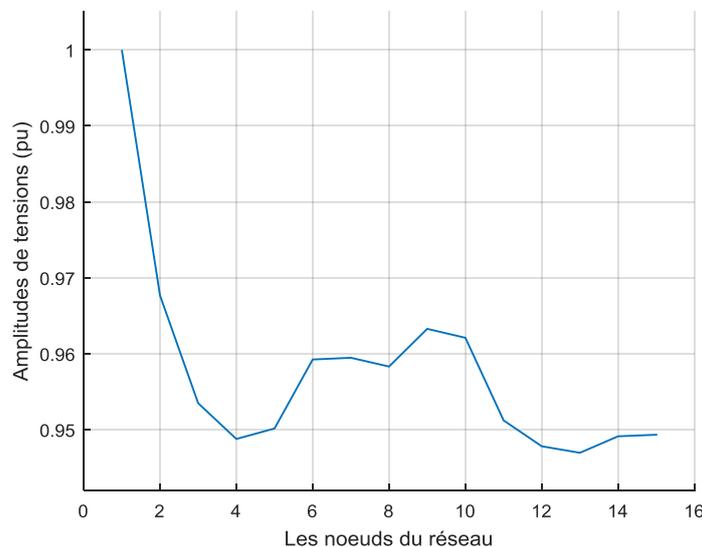


Figure 4.4 : Profil de tensions sans SVC (avant compensation)

Nous présentons le profil de tension aussi par d’autres critères, qui sont des paramètres à optimisés par la suite :

- La somme des déviations des tensions (critère-1) : **0.6332 pu**
- L’aire entre le profil de tension et la référence (critère-2) : **1.6079 pu**
- La tension moyenne des nœuds : **0.9578 pu**
- La tension maximale des nœuds : **1.0000 pu**
- La tension minimale des nœuds : **0.9469 pu**

Nous déduisons après ce calcul, qu’il y’a cinq (5) nœuds fragiles en amplitude de tension ; qui ont des tensions hors limites admissibles ($\pm 5\%$ selon notre critère).

Ces nœuds délicats sont considérés comme des nœuds candidats pour être compensés ; donc ils sont candidats pour l'emplacement d'un SVC. Ces nœuds sont : "Le **nœud-4**, **nœud-12**, **nœud-13**, **nœud-14** et le **nœud-15**"

Après le calcul de l'écoulement de puissance sans dispositif de compensation, nous présentons les pertes de puissance active et réactive, qui sont aussi des paramètres à optimiser par la suite :

- La somme des pertes actives dans les lignes : **55.1243 kW**
- La somme des pertes réactives dans les lignes : **52.8597 kVAr**

4.5.2 Minimisation des déviations des tensions

Le premier objectif de cette étude est de trouver l'emplacement optimal d'un "SVC" dans le réseau pour améliorer le profil de tension. Ceci est traité comme un problème d'optimisation mono-objectif, avec la fonction objective citée précédemment (titre-4.2.1.1) : nous posons plusieurs critères pour évaluer la tension (nous nous intéressons le plus sur la somme des déviations), ainsi que nous utilisons les contraintes du réseau (citées en : titre-4.2.2). La méthode du "PSO" est utilisée comme outil de calcul et d'optimisation.

4.5.2.1 Comparaison entre les nœuds candidats

Le travail effectué est une comparaison entre les différents emplacements du SVC dans les nœuds candidats avec l'évaluation de la fonction objective : l'amélioration de profil de tension (optimisation de la somme des déviations des tensions).

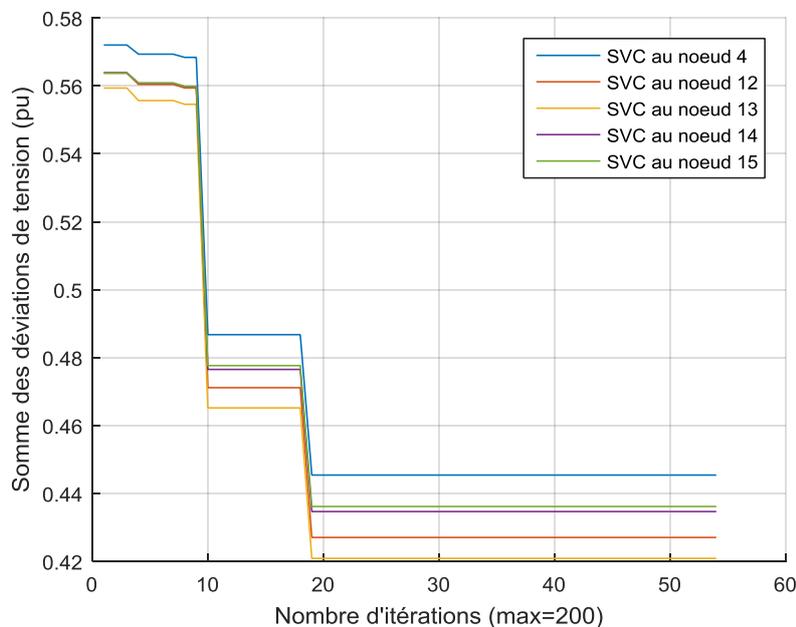


Figure 4.5 : Optimisation des déviations des tensions par PSO avec différentes positions du SVC (graphe de convergence)

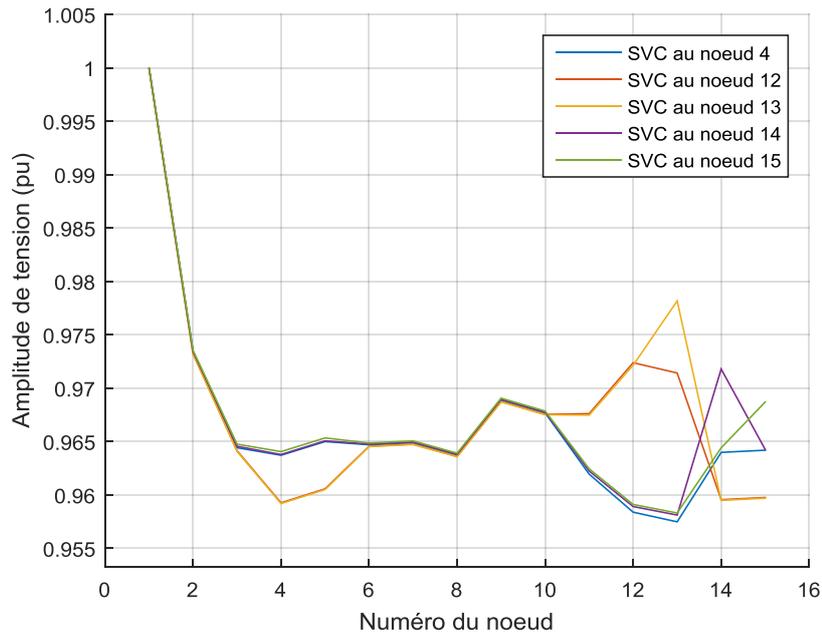


Figure 4.6 : Profil de tension avec différentes positions du SVC dans l'optimisation des déviations des tensions

Tableau 4.1 : Résultats d'optimisation des déviations des tensions avec différentes positions du SVC

Nœud du SVC	Pertes actives (kW)	Critère-1 de tension (somme en pu)	Critère-2 de tension (aire en pu)	Tension moyenne (pu)	Tension maximale (pu)	Tension minimale (pu)
4	46.39	0.445	1.480	0.967	1.000	0.957
12	56.16	0.427	1.463	0.968	1.000	0.959
13	61.83	0.421	1.457	0.968	1.000	0.959
14	53.13	0.435	1.470	0.967	1.000	0.958
15	50.29	0.436	1.473	0.967	1.000	0.958

Nous observons par l'insertion d'un "SVC" en chaque position que le profil de tension s'améliore par rapport au profil de tension sans compensation (suivant les différents critères), où toutes les tensions sont dans les marges admissibles, mais cette amélioration est faite avec différents degrés.

Nous déduisons d'après les figures de convergence et du profil de tension ainsi que le tableau récapitulatif que le nœud numéro "13" est le nœud optimal pour l'emplacement d'un "SVC", pour but d'améliorer le profil de tension. Ce choix donne le minimum des déviations des tensions, la meilleure tension moyenne et la plus grande tension minimale aux nœuds par rapport aux autres emplacements.

Par contre ce nœud présente le mauvais profil des pertes actives, où les pertes sont les plus importantes par rapport aux autres nœuds.

Le mauvais emplacement du SVC pour améliorer le profil de tension est le nœud numéro ‘4’.

Les pertes actives sont diminuées par l’insertion du SVC, mais pour le cas de l’emplacement du SVC aux nœuds 12 et 13 : les pertes actives sont augmentées par rapport aux pertes avant compensation. Nous expliquons ce procès par la grande quantité de puissance réactive injectée par le compensateur dans les lignes pour satisfaire l’objectif sélectionné (minimisation des déviations des tensions).

- ❖ Avec cette étude, nous confirmons que les objectifs : la minimisation des pertes et la minimisation des déviations des tensions sont des objectifs contradictoires. Où le nœud optimal pour l’amélioration du profil de tension donne le mauvais profil des pertes.

4.5.2.2 Sélection de l’emplacement optimal du SVC

Le nœud numéro ‘13’ est l’emplacement optimal du SVC dans le réseau pour l’amélioration du profil de tension et la minimisation des déviations, car il présente les meilleurs résultats d’optimisation par rapport aux autres nœuds :

- Somme des déviations des tensions : **0.421 pu** (amélioration de 33.51 %)
- Aire des déviations des tensions : **1.457 pu** (amélioration de 9.38 %)

Ces deux critères sont les plus importants pour l’évaluation de l’amélioration du profil de tension. Nous pouvons également présenter la tension moyenne aux nœuds (0.968 pu avec amélioration de 1.1 %) et la tension minimale des nœuds du réseau (0.959 pu avec amélioration de 1.3 %) ; qui sont les meilleures par rapport aux autres nœuds.

L’installation d’un SVC dans son emplacement optimal pour l’amélioration du profil de tension (nœud-13) demande une autre étude d’optimisation multi-objective (basée sur la MO-PSO) de la somme des déviations des tensions et les tailles (puissances) du SVC utilisées dans les marges de réalisabilité. La figure suivante présente ce compromis :

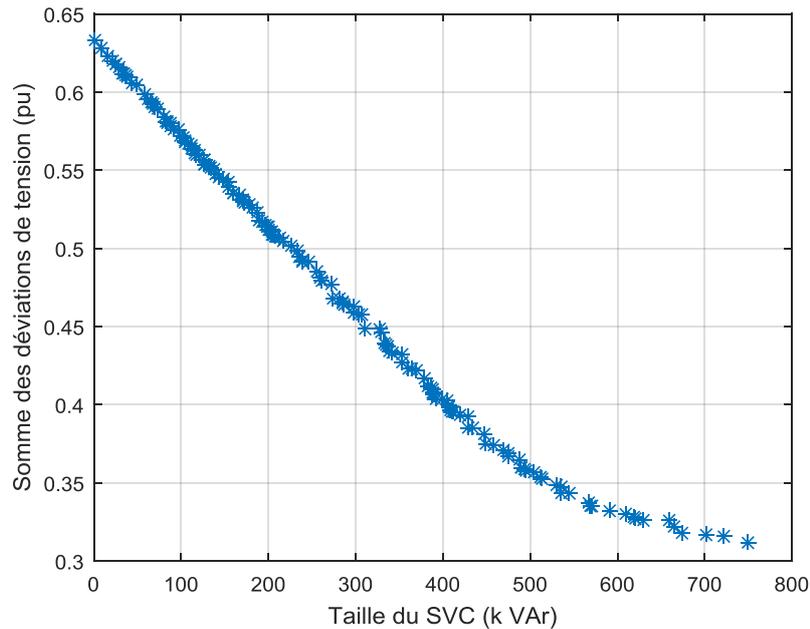


Figure 4.7 : Solutions de compromis : puissance du SVC (au nœud optimal) et la somme des déviations des tensions

Cette étude donne plusieurs résultats qui forment un front de compromis ; et qui sont des solutions optimales entre les deux objectifs, pour le choix de la taille du SVC dans son emplacement optimal.

Nous déduisons par cette optimisation bi-objective du SVC en son emplacement optimal que la somme des déviations des tensions dans les nœuds diminue (de 0.63 pu à 0.3 pu) par l'augmentation de la puissance (taille) du compensateur de « 0 à 800 kVAr » (le signe positif de la puissance explique que cette puissance est injectée au réseau).

Nous expliquons cette diminution des déviations des tensions par le couplage direct entre les amplitudes de tension et la puissance réactive dans le réseau, présenté précédemment (chapitre-2, titre-3.2), où le SVC fournit de la puissance réactive au nœud compensé et les nœuds proches, ce qui diminue la circulation de cette puissance dans le réseau.

4.5.3 Minimisation des pertes actives dans les lignes

Le deuxième objectif de cette étude est de minimiser les pertes actives transmises dans les lignes, pertes égales à **55.1243 kW** sans compensation. Pour avoir une minimisation optimale des pertes, il faut choisir un emplacement optimal du compensateur. Ceci est fait par l'utilisation de la méthode du "PSO" adaptée à ce problème.

La fonction objective utilisée est mentionnée précédemment (titre : 4.2.1.2), ainsi que les contraintes de bon fonctionnement du réseau (titre : 4.2.2).

4.5.3.1 Comparaison entre les nœuds candidats

Nous présentons une comparaison de l'impact des différentes positions du "SVC" dans les nœuds candidats pour la minimisation des pertes dans les lignes du réseau :

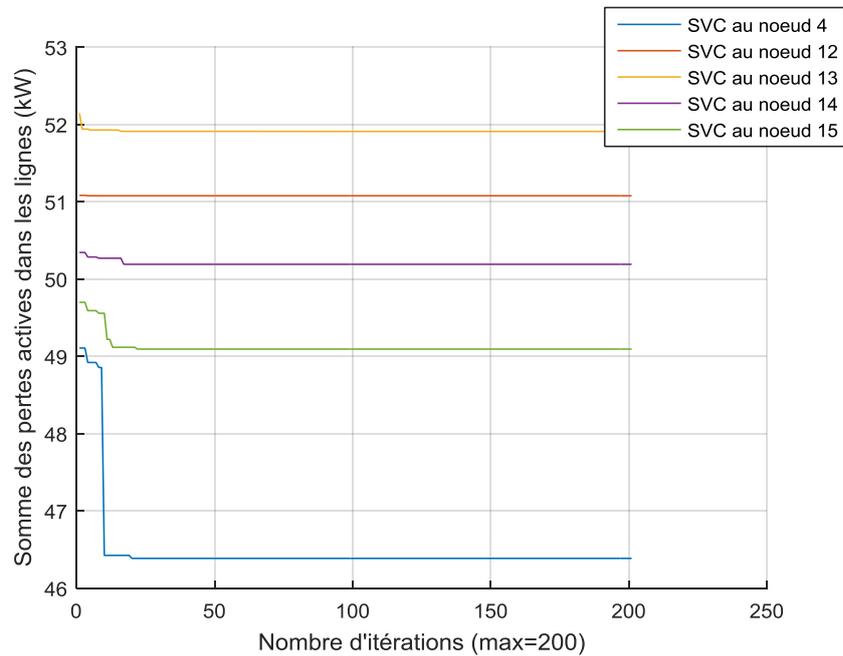


Figure 4.8 : Optimisation des pertes actives par PSO avec différentes positions du SVC (graphe de convergence)

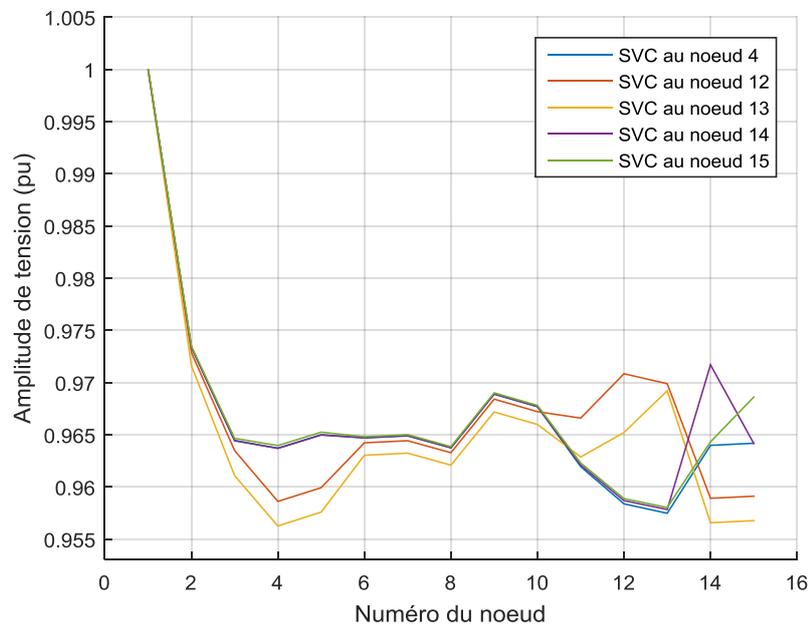


Figure 4.9 : Profil de tension pour différentes positions du SVC dans l'optimisation des pertes

Tableau 4.2 : Résultats d'optimisation des pertes actives dans les lignes avec différentes positions du SVC

Nœud du SVC	Pertes actives (kW)	Critère-1 de tension (somme en pu)	Critère-2 de tension (aire en pu)	Tension moyenne (pu)	Tension maximale (pu)	Tension minimale (pu)
4	46.38	0.498	1.480	0.967	1.000	0.957
12	51.08	0.492	1.472	0.967	1.000	0.959
13	51.91	0.521	1.500	0.965	1.000	0.956
14	50.19	0.489	1.471	0.967	1.000	0.958
15	49.09	0.490	1.474	0.967	1.000	0.958

Nous observons pour les différents emplacements du SVC que les pertes actives diminuent par rapport aux pertes sans compensation pour toutes les positions du compensateur, mais avec différentes valeurs.

Par la comparaison, nous déduisons d'après la figure (graphe de la convergence) et le tableau 4.2 que le nœud numéro '4' est l'emplacement optimal du SVC pour but de minimiser les pertes actives, car il donne la valeur minimale de la fonction objective (somme des pertes) par rapport aux autres emplacements. En parallèle, cet emplacement présente des tensions acceptables aux nœuds, mais avec un mauvais profil de tension par rapport aux autres positions du SVC.

Nous constatons aussi que l'insertion d'un SVC dans différents positions pour la minimisation des pertes améliore le profil de tension (dans ce cas), où toutes les tensions sont dans les marges admissibles.

Le mauvais emplacement du SVC pour l'optimisation des pertes est le nœud-13, car il présente la plus faible diminution des pertes actives, alors qu'il est l'emplacement optimal dans le cas d'optimisation des déviations des tensions. Ceci confirme que les deux fonctions objectives choisies (pertes et profil de tension) sont contradictoires.

4.5.3.2 Sélection de l'emplacement optimal

Comme nous l'avons mentionné dans le paragraphe précédent, le nœud numéro '4' est l'emplacement optimal du 'SVC' pour la minimisation des pertes ; car il présente le meilleur profil des pertes par rapport aux autres emplacements : une diminution de **8.74 kW** (15.86 %) des pertes. L'insertion de ce dispositif dans cet emplacement donne également des tensions avec des marges admissibles.

Nous présentons par la figure suivante des solutions de compromis (optimisation multi-objectifs) entre les pertes actives dans les lignes et la taille du SVC dans son emplacement optimal (nœud-4).

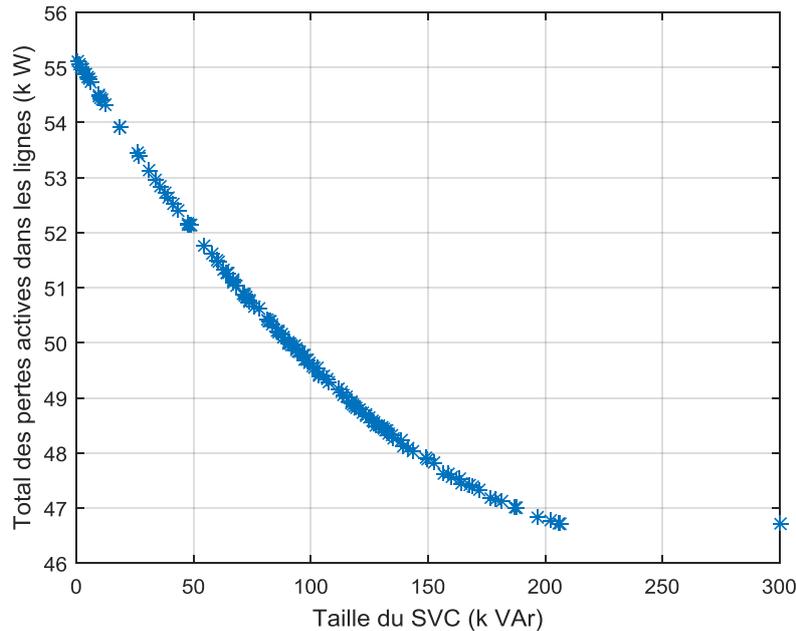


Figure 4.10 : Solutions de compromis : puissance du SVC (au nœud optimal) et pertes actives dans les lignes

Les résultats de cette optimisation donnent un front de compromis ; qui sont des solutions optimales entre les deux objectives, pour le choix de la taille du SVC dans son emplacement optimal.

Nous déduisons par cette optimisation bi-objective du SVC à l'emplacement optimal que les pertes actives de transmission dans les lignes diminuent par l'augmentation de la puissance (taille) du compensateur (de 0 à 300 kVAr) ; où le signe positif de la puissance explique que cette puissance est injectée au réseau. Nous expliquons la diminution des pertes par la diminution des amplitudes des courants transmis dans les lignes (courant réactif), et donc, la diminution de la puissance réactive circulant dans le réseau ; où ce compensateur fournit cette puissance pour les nœuds proches à son emplacement (principe de la compensation shunt).

4.5.4 Optimisation multi-objectif : pertes et déviation des tensions simultanément

L'objectif de cette partie est de chercher la solution pour un problème multi-objectif : minimisation des pertes actives dans les lignes et l'amélioration du profil de tension des nœuds (minimisation des déviations). Cette étude est plus pratique sur le terrain ; où dans les réseaux de distribution, les pertes et le profil de tension sont les problèmes majeurs pour les gestionnaires de réseaux.

Les fonctions objectives et les contraintes utilisées sont présentées précédemment, et la méthode "MO-PSO" est utilisée pour résoudre ce problème.

Nous sélectionnons le nœud optimal pour l'emplacement du compensateur, ainsi qu'une autre étude de la puissance injectée du SVC installé au nœud optimal.

4.5.4.1 Comparaison entre les nœuds candidats

Le travail effectué est une comparaison entre les différents emplacements du SVC dans les nœuds candidats avec l'évaluation des fonctions objectives : pertes actives et déviation de tension. Les résultats seront exposés par la figure suivante en forme des fronts de compromis de chaque emplacement :

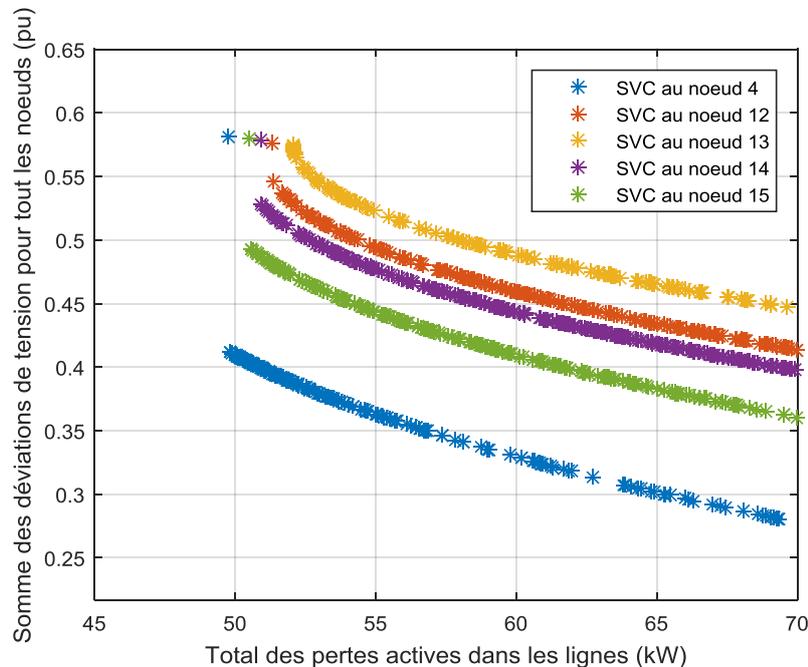


Figure 4.11 : Comparaison entre les solutions de l'optimisation multi-objectif avec différents emplacements du SVC

La figure de comparaison entre les positions du SVC présente des courbes de compromis pour chaque nœud candidat. Elle montre aussi la contradiction entre les deux objectifs choisis : pertes actives de lignes et déviations de tensions. Les profils de tension s'améliorent avec l'augmentation des pertes actives.

Nous observons aussi que l'installation d'un SVC dans un réseau (en différentes positions) donne une diminution des déviations des tensions par rapport au réseau sans compensation (0.6332 pu), donc il améliore le profil de tension dans tous les cas. Par contre cette installation peut diminuer les pertes comme elle peut les augmenter par rapport au réseau sans compensation (55.1243 kW), dépendamment de la puissance réactive injectée par le SVC.

Nous déduisons par cette comparaison que la courbe de compromis pour le cas du SVC installé au nœud-4 donne les meilleurs résultats par rapport aux autres emplacements du compensateur ; elle est en dessous de tous les autres compromis.

4.5.4.2 Sélection de l'emplacement optimal multi-objectif

Les résultats de compromis du SVC au nœud-4 présente les meilleurs profils de tensions par rapport aux autres emplacements, ainsi que de faibles pertes actives. Donc le nœud-4 est l'emplacement optimal du SVC pour le problème multi-objectif.

Nous notons que le nœud-4 a été l'emplacement optimal pour la minimisation des pertes active (mono-objectif), ce qui est un cas spécial de ce réseau.

Nous présentons par la suite les solutions optimales (compromis) entre trois objectifs : minimisation des pertes, minimisation des déviations des tensions et puissance du SVC (taille) utilisée dans son emplacement optimal :

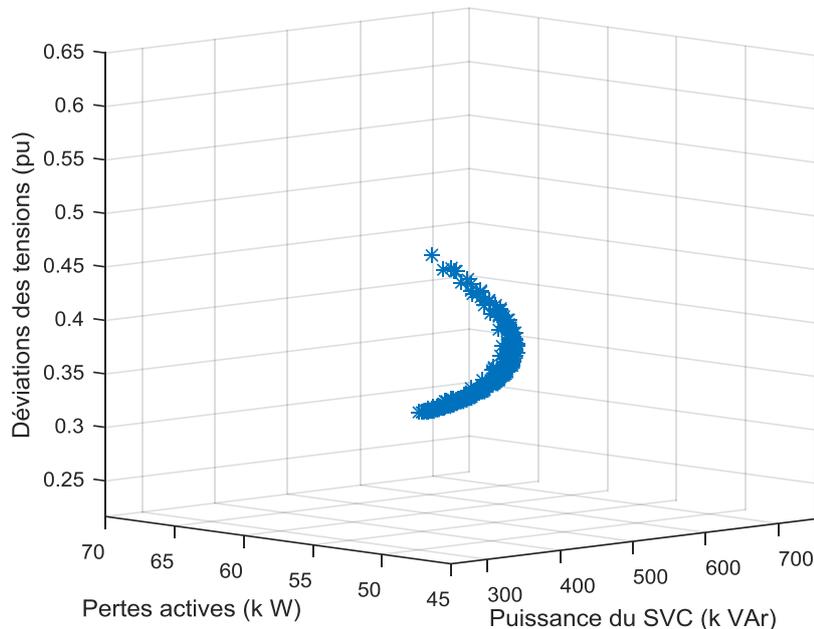


Figure 4.12 : Optimisation à trois objectifs du SVC dans son emplacement optimal (nœud-4) : pertes, déviation des tensions et puissance injectée

Nous déduisons par l'optimisation à trois objectifs que l'algorithme d'optimisation multi-objectif a bien exploré le front de Pareto dans le cas d'optimisation à trois objectifs, à travers les résultats suivants :

- Amélioration du profil des tensions par l'augmentation de la taille du SVC
- Augmentation des pertes par l'augmentation de la taille du SVC
- Amélioration du profil des tensions par l'augmentation des pertes

❖ Nous présentons par cette étude plusieurs solutions optimales, mais il reste au gestionnaire de ce réseau à choisir la solution optimale qui correspond le plus à ses exigences.

4.6 Application sur réseau standard ‘IEEE-33-Bus’

Nous appliquons notre programme sur un autre réseau pour confirmer les résultats. Le réseau standard ‘IEEE-33-Bus’ est présenté dans l’annexe.

4.6.1 Résultat de l’écoulement de puissance sans SVC

Nous nous intéressons à voir le profil de tension et les pertes (active et réactive) du réseau avant l’insertion d’un SVC, pour que nous pouvons par la suite comparer les résultats après l’insertion d’un SVC.

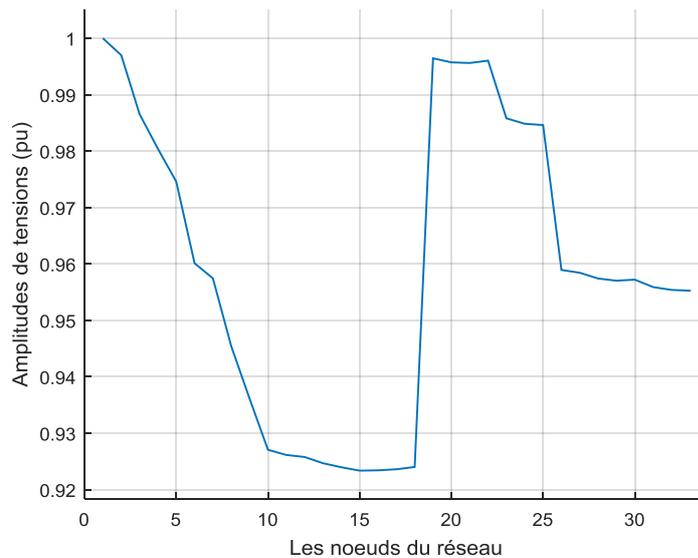


Figure 4.13 : Profil de tensions sans SVC pour réseau (réseau 33 nœuds)

Tableau 4.3 : Résultats de calcul de l’écoulement de puissance avant compensation

Pertes actives (kW)	Pertes réactives (kVAr)	Somme des déviations des tensions (pu)	Aire des déviations des tensions (pu)	Tension moyenne (pu)	Tension maximale (pu)	Tension minimale (pu)
82.8310	53.2912	1.3457	2.3234	0.9592	1.0000	0.9234

Nous tirons après ce calcul, qu’il y’a onze (11) nœuds fragiles en amplitude de tension (tensions hors limites : $\pm 5\%$). Ces nœuds sont : 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18.

Ces nœuds délicats sont considérés comme des nœuds candidats pour l’emplacement d’un SVC.

4.6.2 Minimisation des déviations des tensions

4.6.2.1 Comparaison entre les nœuds candidats

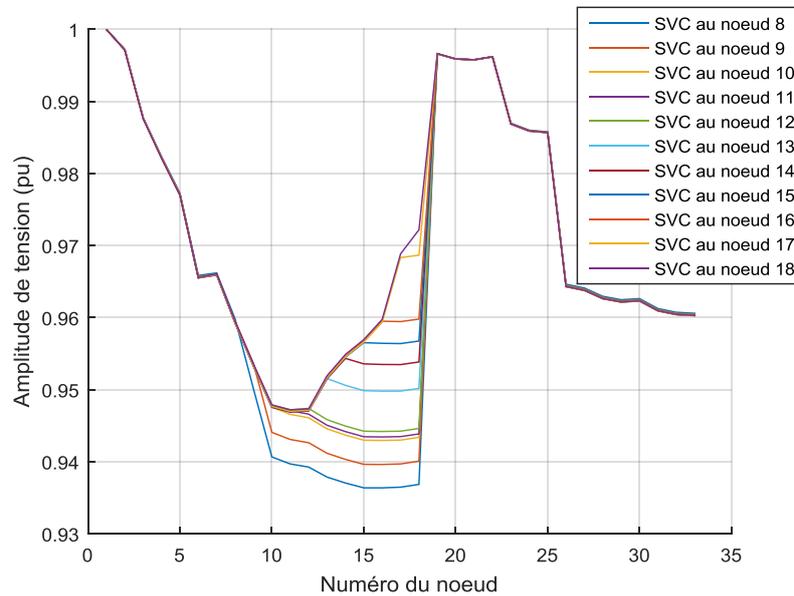


Figure 4.14 : Profil de tension avec différentes positions du SVC dans l'optimisation des déviations des tensions (réseau 33 nœuds)

Tableau 4.4 : Résultats d'optimisation des déviations des tensions avec différentes positions du SVC (réseau 33 nœuds)

Nœud du SVC	Pertes actives (kW)	Critère-1 de tension (somme en pu)	Critère-2 de tension (aire en pu)	Tension moyenne (pu)	Tension maximale (pu)	Tension minimale (pu)
8	64.456	1.048	2.110	0.966	1.000	0.936
9	63.389	1.006	2.079	0.967	1.000	0.940
10	62.593	0.969	2.051	0.968	1.000	0.943
11	62.509	0.964	2.046	0.968	1.000	0.943
12	62.776	0.957	2.040	0.968	1.000	0.944
13	64.515	0.917	2.009	0.969	1.000	0.947
14	65.464	0.894	1.991	0.969	1.000	0.947
15	66.515	0.879	1.978	0.970	1.000	0.947
16	68.415	0.868	1.968	0.970	1.000	0.947
17	72.112	0.849	1.951	0.971	1.000	0.947
18	74.816	0.844	1.945	0.971	1.000	0.947

D'après cette comparaison, nous déduisons que le profil de tension est amélioré pour tous les emplacements du SVC, ainsi que les pertes actives par rapport au système sans compensation.

L'emplacement qui présente le meilleur profil de tension est le nœud-18, mais il présente le mauvais profil des pertes par rapport aux autres emplacements.

4.6.2.2 Sélection de l'emplacement optimal du SVC

Le nœud numéro "18" est l'emplacement optimal du SVC dans le réseau pour l'amélioration du profil de tension et la minimisation des déviations, car il présente les meilleurs résultats d'optimisation par rapport aux autres nœuds :

Tableau 4.5 : Performances de l'emplacement d'un SVC au nœud optimal (nœud-18) pour l'amélioration du profil de tension (réseau 33 nœuds)

Critère	Somme des déviations (pu)	Aire des déviations (pu)	Tension moyenne (pu)	Tension minimale (pu)
Amélioration	37.28 %	16.29 %	1.23 %	2.56 %

Nous présentons par la figure suivante une solution de compromis (optimisation multi-objectifs) entre les déviations des tensions et la taille du SVC dans son emplacement optimal (nœud-18) :

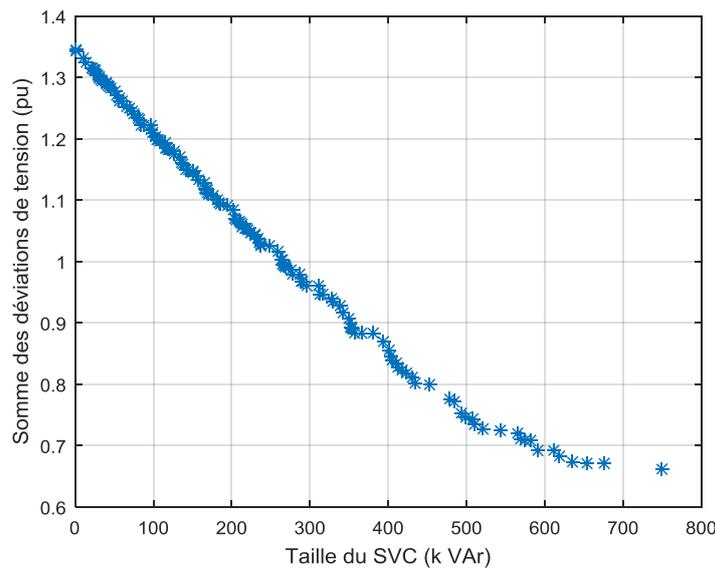


Figure 4.15 : Solutions de compromis : puissance du SVC (au nœud optimal) et la somme des déviations des tensions (réseau 33 nœuds)

4.6.3 Minimisation des pertes actives

4.6.3.1 Comparaison entre les nœuds candidats

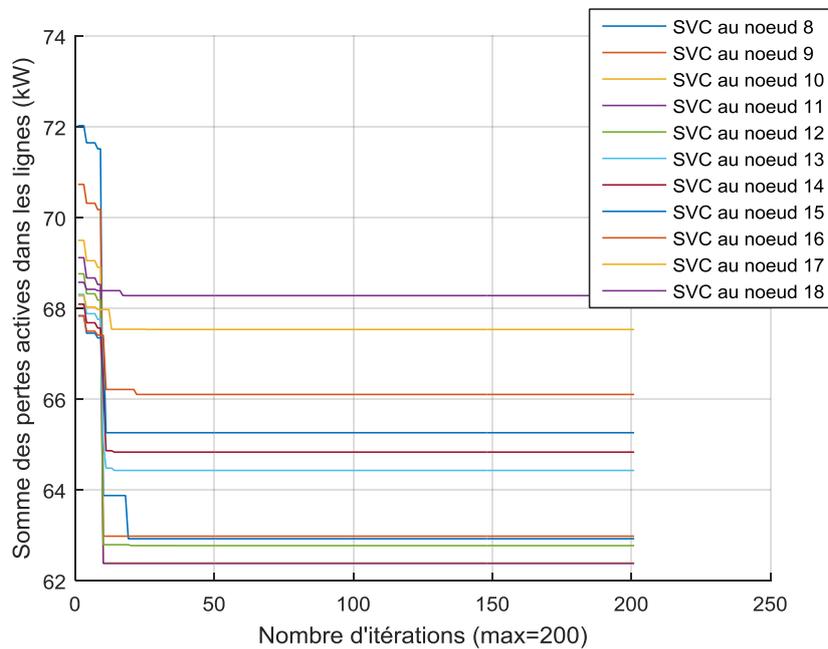


Figure 4.16 : Optimisation des pertes actives par PSO avec différentes positions du SVC (graphe de convergence pour réseau 33 nœuds)

Tableau 4.6 : Résultats d'optimisation des pertes avec différentes positions du SVC

Nœud du SVC	Pertes actives (kW)	Critère-1 de tension (somme en pu)	Critère-2 de tension (aire en pu)	Tension moyenne (pu)	Tension maximale (pu)	Tension minimale (pu)
8	62.928	1.130	2.110	0.966	1.000	0.936
9	62.984	1.099	2.079	0.967	1.000	0.940
10	62.396	1.071	2.051	0.968	1.000	0.943
11	62.383	1.066	2.046	0.968	1.000	0.943
12	62.776	1.060	2.040	0.968	1.000	0.944
13	64.433	1.029	2.009	0.969	1.000	0.947
14	64.836	1.010	1.991	0.969	1.000	0.947
15	65.264	0.998	1.978	0.970	1.000	0.947
16	66.106	0.987	1.968	0.970	1.000	0.947
17	67.537	0.971	1.951	0.971	1.000	0.947
18	68.284	0.964	1.945	0.971	1.000	0.947

D'après cette comparaison, nous déduisons que les pertes actives sont diminuées pour tous les emplacements du SVC, ainsi que le profil de tension est amélioré par rapport au système sans compensation.

L'emplacement qui présente le meilleur profil de pertes (minimum des pertes actives) est le nœud-11, mais il présente un mauvais profil des pertes par rapport aux autres emplacements.

4.6.3.2 Sélection de l'emplacement optimal du SVC

Le nœud numéro "11" est l'emplacement optimal du SVC dans le réseau pour la minimisation des pertes actives, car il présente les meilleurs résultats d'optimisation par rapport aux autres nœuds : diminution de 24.69 % par rapport au système sans compensation.

Nous présentons par la figure suivante une solution de compromis (optimisation multi-objectifs) entre les pertes actives et la taille du SVC dans son emplacement optimal (nœud-11) :

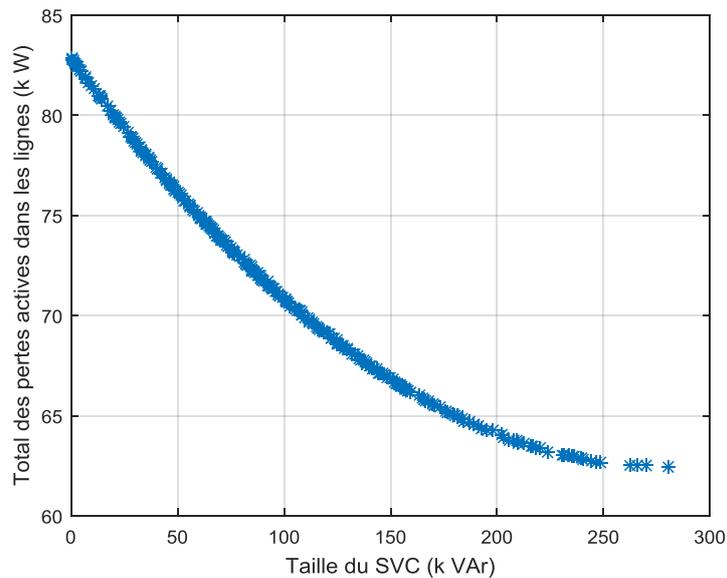


Figure 4.17 : Solutions de compromis : puissance du SVC (au nœud optimal) et la somme des pertes actives (réseau 33 nœuds)

4.6.4 Optimisation multi-objectif : pertes et déviations des tensions simultanément

4.6.4.1 Comparaison entre les nœuds candidats

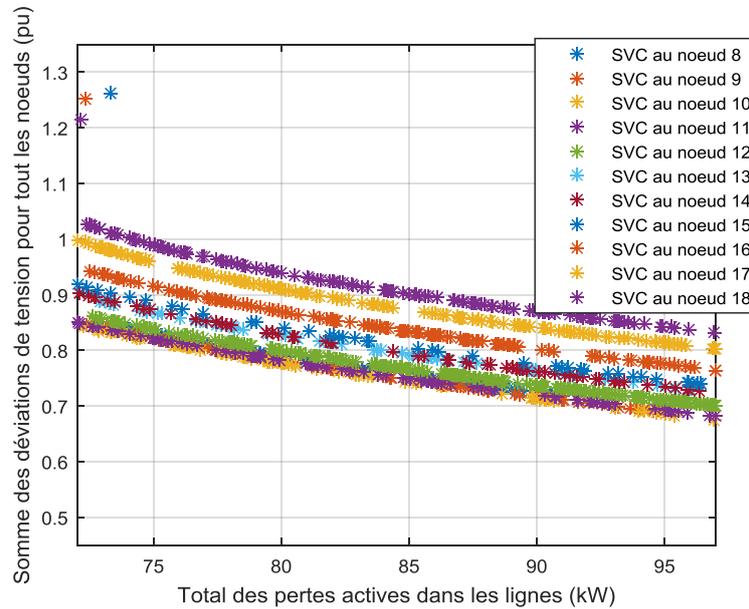


Figure 4.18 : Compromis avec différents emplacement du SVC (réseau 33 noeuds)

4.6.4.2 Sélection de l'emplacement optimal du SVC

Par la comparaison, la courbe de compromis pour le cas du SVC installé au nœud-10 donne les meilleurs résultats par rapport aux autres emplacements du compensateur (elle est en dessous de tous les autres compromis). Pour le réglage de la puissance du SVC, nous présentons le compromis entre : minimisation des pertes, minimisation des déviations des tensions et la puissance du SVC utilisée.

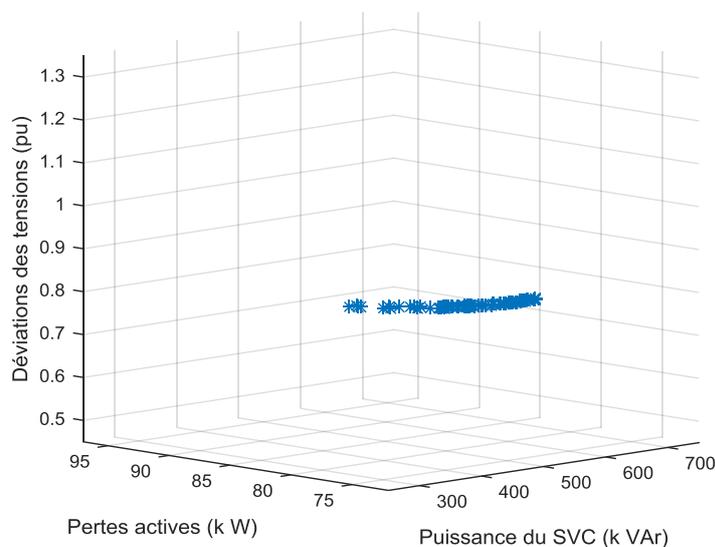


Figure 4.19 : Optimisation à trois objectifs du SVC dans son emplacement optimal (nœud-10) : pertes, déviation des tensions et puissance du SVC

L'optimisation de trois objectifs donne un front de Pareto en trois dimensions : les pertes actives, les déviations des tensions et la puissance injectée par le SVC. Ce front présente plusieurs solutions optimales, pour choisir une seule solution il faut introduire d'autres critères que le gestionnaire du réseau les exige.

4.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté et discuté les problèmes majeurs des réseaux de distribution : l'amélioration de la qualité de l'énergie distribuée qui est présentée par le profil de tension des nœuds, ainsi que la minimisation des pertes dans les lignes qui ont un taux élevé dans ces réseaux. Ceci est fait par l'insertion d'un SVC dans un emplacement optimal.

Nous avons étudié ces problèmes par une formulation mathématique présentée en forme de fonctions objectives des déviations de tensions par rapport à une référence et de la somme des pertes des lignes, avec comme contraintes : la sûreté de fonctionnement du réseau, la qualité de l'énergie et sa réalisabilité.

L'étude est faite avec l'adaptation de la méthode d'optimisation par essaim de particules de base et une méthode modifiée à notre problème, ce qui est présenté par un organigramme dans ce chapitre. Nous avons élaboré un programme écrit en langage Matlab pour le calcul et l'optimisation. Les tests de la méthode et du programme ont été effectués sur les réseaux standard 'IEEE-15-Bus' et 'IEEE-30-Bus'.

Les calculs de ce chapitre sont basés sur le choix de l'emplacement optimal du SVC après comparaison de différentes positions pour les problèmes mono-objectif de minimisation des déviations de tensions, puis minimisation des pertes actives. Pour résoudre le problème multi-objectif, nous minimisons les deux objectifs simultanément, avec comparaison des compromis entre les objectifs à optimiser selon différents emplacements du compensateur, cette optimisation multi-objectif offrant plusieurs solutions optimales qui représentent le compromis entre les différents objectifs.

Après le choix de l'emplacement optimal du SVC, une autre étude multi-objectif entre la puissance de ce dispositif et les objectifs à optimiser, a été effectuée pour déterminer un compromis entre la taille du SVC utilisé et l'objectif choisi.

Conclusion Générale

Dans ce travail, nous avons traité le problème du choix de l'emplacement optimal multi-objectif d'un compensateur shunt dans un réseau électrique de distribution. Les objectifs de notre étude sont respectivement:

- Minimisation des déviations de tensions (amélioration du profil de tension)
- Minimisation des pertes actives de lignes

Le compensateur utilisé pour les réseaux de distribution est le compensateur statique de puissance réactive (SVC), qui est un dispositif du groupe des FACTS shunt. Ce dispositif est flexible et contrôlable par rapport aux batteries de condensateurs.

L'étude d'optimisation est faite en utilisant la méthode d'essaim de particules, et une autre méthode inspirée de la première pour traiter les problèmes multi-objectifs.

Le principe de cette étude est de comparer l'impact de l'installation d'un SVC dans le réseau selon plusieurs emplacements, en fonction d'un objectif donné. Les positions candidates pour l'emplacement du SVC sont les nœuds fragiles qui ont un mauvais profil de tension (amplitude de tension hors marges admissibles). Puis par comparaison des impacts, nous choisissons l'emplacement optimal de ce compensateur.

L'étude de l'insertion d'un SVC et de l'optimisation est soumise à des contraintes de sûreté de fonctionnement du réseau, de la qualité de l'énergie fournie, ainsi que de la réalisabilité (taille du SVC réalisable pour ces réseaux).

Nous avons appliqué cette optimisation sur deux (2) réseaux standard : "IEEE-15-Bus" et "IEEE-33-Bus" pour confirmer les résultats et voir l'efficacité de l'installation d'un SVC dans un emplacement optimal.

La première application est de sélectionner l'emplacement optimal d'un SVC dans le réseau pour un problème mono-objectif (minimisation des pertes ou amélioration du profil de tension), puis la détermination du compromis entre la taille (puissance) de ce dispositif et l'objectif choisi.

Une constatation pour l'optimisation mono-objective : les déviations des tensions diminuent par l'insertion d'un SVC, mais les pertes dans les lignes peuvent diminuer comme elles peuvent augmenter, selon le réglage du compensateur (puissance injectée). Aussi nous avons constaté que la minimisation des pertes et l'amélioration du profil de tension sont des objectifs contradictoires, ce qui mène à une étude d'optimisation multi-objectif.

La deuxième application est de sélectionner l'emplacement optimal du SVC dans le réseau pour le problème multi-objectif : minimiser les pertes et minimiser les déviations de tensions simultanément, ce qui n'est pas simple par rapport à la première application, car dans ce cas l'optimisation présente plusieurs solutions optimales.

Après la détermination de l'emplacement optimal multi-objectif ; par la comparaison des impacts de différentes positions du SVC, un compromis entre trois objectifs est présenté : pertes, profil de tension et taille du SVC. Le réglage et la puissance de ce compensateur et un facteur très important dans l'étude d'optimisation.

Nous constatons par ce travail que l'emplacement optimal du SVC pour un objectif peut être le mauvais choix pour un autre objectif donné, comme dans notre cas, car la minimisation des pertes et l'amélioration de profil de tension sont des objectifs contradictoires. Donc l'étude de l'emplacement optimal d'un SVC pour plusieurs objectifs est obligatoire et plus pratique sur le terrain, car elle présente un compromis entre ces objectifs contradictoires. Cette optimisation multi-objectif présente plusieurs solutions non-dominées (optimales), mais le choix de la solution optimale adéquate dépend d'autres paramètres que le gestionnaire les exige.

Bibliographie

- [1] L. Nezli. *Cours sur des généralités sur les réseaux électriques*. Alger : Ecole Nationale Polytechnique, 2016.
- [2] Berseneff Boris. *Réglage de la tension dans les réseaux de distribution du futur*. Grenoble : thèse de doctorat. Institut Polytechnique de Grenoble, 2010.
- [3] Gain Emile. *Conception et dimensionnement des réseaux de distribution. Technique de l'ingénieur, traité Génie électrique D 4 220*.
- [4] A. Hellal. *Cours d'analyse numérique des réseaux électriques*. Alger : Ecole Nationale Polytechnique, 2017.
- [5] S. Taibaoui. *Les techniques de calcul d'écoulement de puissance dans les réseaux de distribution*. Laghouat : Projet de fin d'étude. Université Amar Telidji, 2011.
- [6] Y. Amrane. *Optimisation de la compensation d'énergie réactive dans les réseaux de transport et de distribution*. Alger : Thèse de doctorat. Université des sciences et de technologie "Houari Boumediene" , 2014.
- [7] S. Kiche, H. Mabrouk. *Optimisation de la compensation de l'énergie réactive*. Alger : Projet de fin d'étude. Ecole Nationale Polytechnique, 2010.
- [8] *Améliorer le facteur de puissance pour une installation électrique*. Groupe Schneider, Partenaire MT, 1998.
- [9] L. Ladjici, A. Barrar. *Introduction aux FACTS*. Alger : Projet de fin d'étude. Ecole Nationale Polytechnique, 2002.
- [10] G. Drouin. *Compensateur statique de puissance réactive*. Technique de l'ingénieur, traité Génie électrique D 4 315.
- [11] R. Benabid. *Optimisation multi-objectif des FACTS pour le contrôle de la stabilité des réseaux*. Laghouat : Thèse de magister. Université Amar Telidji, 2007.
- [12] N. Mancor. *Contribution à l'optimisation de la puissance réactive en présence des FACTS*. Biskra : Thèse de magister. Université Mohamed Khider, 2012.
- [13] N. Abdulwahab, S. Musa, J. A. Rebaz & H. Rusli. *Optimisation Techniques for Location of Flexible AC Transmission System Devices in*. s.l. : University Putra Malaysia, JESTR, 2013.
- [14] L. Kortobi. *Optimisation de la Synthèse des FACTS pour le contrôle des réseaux électriques*. Alger : Thèse de magister. Ecole Nationale Polytechnique, 2006.
- [15] R. Benabid. *Optimisation des systèmes FACTS pour l'amélioration de la stabilité de tension*. Alger : Thèse de doctorat. Université des sciences et technologie 'Houari Boumediene', 2012.

- [16] A. Blal. *Placement optimal d'un SVC dans un réseau électrique*. Oran : Thèse de magister. Université des sciences et technologie ' Mohamed Boudiaf', 2011.
- [17] M. Belazzoug. *Optimisation multi-objectif de la compensation de l'énergie réactive dans les réseaux électriques*. Alger : Thèse de doctorat. Université des sciences et de technologie 'Houari Boumediene', 2011.
- [18] R. Eberhart & J.Kennedy. *Swarm intelligence* . Proceeding of the IEEE conference on neural networks (ICNN), vol IV. Australia 1995, pp.1942 - 1948.
- [19] C. A. Coello Coello & M. S. Lechuga. *MOPSO: A proposal for multiple objective particle swarm optimization*. Congress on Evolutionary Computation IEEE Service Center, Piscataway, New Jersey 2002, pp. 1051-1056.

Annexes

Données du réseau ‘IEEE-15-Bus’

La configuration du réseau standard IEEE 15 nœuds ; qui est un réseau radial, montré par la figure ci-dessous :

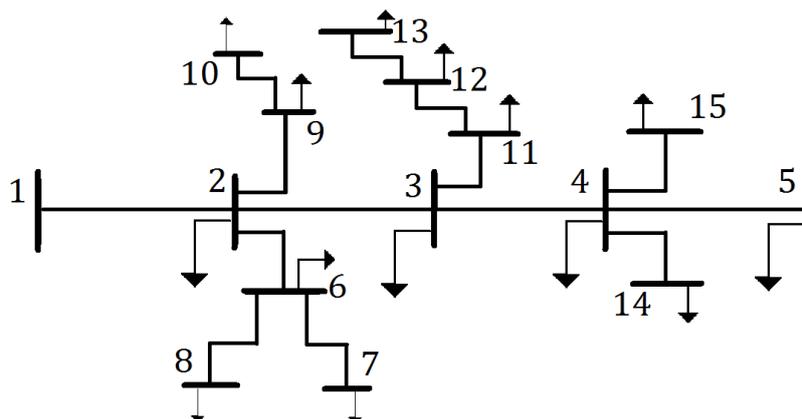


Figure : Réseau standard IEEE 15 nœuds

Tableau : Puissance planifiée et données initiales pour le réseau standard IEEE-15 nœuds (puissance de base égale à 100 MVA)

Numéro de nœud	Tension initiales (p.u)	Angles de tension (degré°)	Puissance apparente de la charge (kVA)	Facteur de puissance ($\cos(\varphi)$)
1	1	0	000	0.7
2	1	0	063	0.7
3	1	0	100	0.7
4	1	0	063	0.7
5	1	0	200	0.7
6	1	0	200	0.7
7	1	0	200	0.7
8	1	0	100	0.7
9	1	0	100	0.7
10	1	0	063	0.7
11	1	0	200	0.7
12	1	0	100	0.7
13	1	0	063	0.7
14	1	0	100	0.7
15	1	0	200	0.7

Tableau : Paramètres des branches du réseau standard IEEE-15 nœuds

Numéro de ligne	Nœud de départ	Nœud d'arrivé	Résistance (Ohm)	Réactance (Ohm)
1	1	2	1.35309	1.32349
2	2	3	1.17024	1.14464
3	3	4	0.84111	0.82271
4	4	5	1.52348	1.02760
5	2	9	2.01317	1.35790
6	9	10	1.68671	1.13770
7	2	6	2.55727	1.72490
8	6	7	1.08820	0.73400
9	6	8	1.25143	0.84410
10	3	11	1.79553	1.21110
11	11	12	2.44845	1.65150
12	12	13	2.01317	1.35790
13	4	14	2.23081	1.50470
14	4	15	1.19702	0.80740

Données du réseau ‘IEEE-33-Bus’

L'architecture du réseau standard IEEE – 33 nœuds est montrée sur la figure suivante :

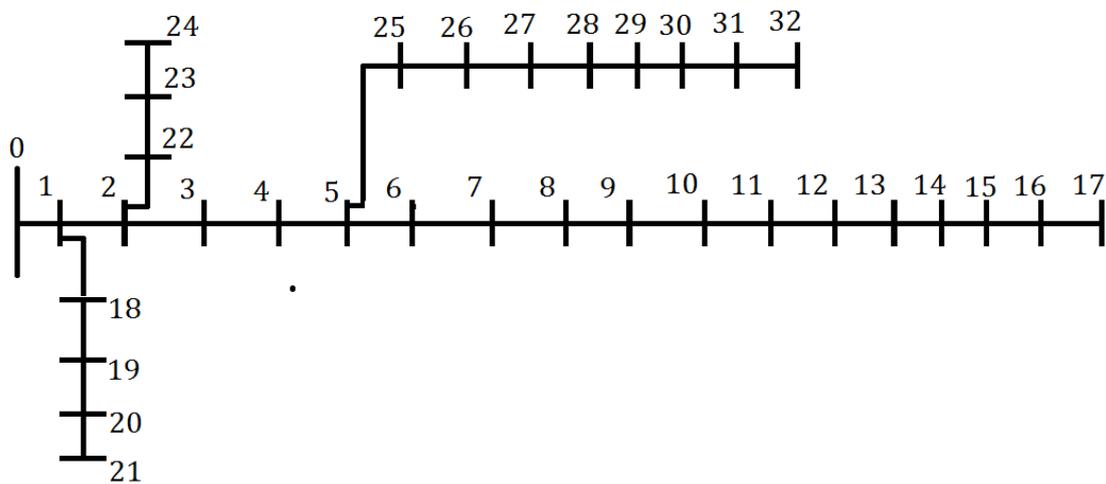


Figure : Architecture du réseau standard IEEE 33 nœuds

Les données initiales des nœuds ainsi que les puissances planifiées sont présentées dans le tableau suivant (puissance de base égale à 100 MVA) :

Tableau : Puissances planifiées pour le réseau standard IEEE-33 nœuds

nœud	$ V_0 $ (p.u)	$\delta_0(^{\circ})$	P (kW)	Q (kVAr)	Nœud	$ V_0 $ (p.u)	$\delta_0(^{\circ})$	P (kW)	Q (kVAr)
1	1	0	000.0	000.0	18	1	0	090.0	040.0
2	1	0	100.0	060.0	19	1	0	090.0	040.0
3	1	0	090.0	040.0	20	1	0	090.0	040.0
4	1	0	120.0	080.0	21	1	0	090.0	040.0
5	1	0	060.0	030.0	22	1	0	090.0	040.0
6	1	0	060.0	020.0	23	1	0	090.0	050.0
7	1	0	200.0	100.0	24	1	0	520.0	020.0
8	1	0	200.0	100.0	25	1	0	320.0	020.0
9	1	0	060.0	020.0	26	1	0	060.0	025.0
10	1	0	060.0	020.0	27	1	0	060.0	025.0
11	1	0	045.0	030.0	28	1	0	060.0	020.0
12	1	0	060.0	035.0	29	1	0	120.0	070.0
13	1	0	060.0	035.0	30	1	0	200.0	300.0
14	1	0	120.0	080.0	31	1	0	250.0	070.0
15	1	0	060.0	010.0	32	1	0	210.0	010.0
16	1	0	060.0	020.0	33	1	0	060.0	040.0
17	1	0	060.0	020.0					

Tableau : Paramètres des branches du réseau standard IEEE-33 nœuds

ligne	Nœud de départ	Nœud d'arrivé	R (Ohm)	X (Ohm)	ligne	Nœud de départ	Nœud d'arrivé	R (Ohm)	X (Ohm)
1	1	2	0.0922	0.0477	17	17	18	0.7320	0.5740
2	2	3	0.4930	0.2511	18	2	19	0.1640	0.1565
3	3	4	0.3660	0.1864	19	19	20	1.5042	1.3554
4	4	5	0.3811	0.1941	20	20	21	0.4095	0.4784
5	5	6	0.8190	0.7070	21	21	22	0.7089	0.9373
6	6	7	0.1872	0.6188	22	3	23	0.4512	0.3083
7	7	8	1.7114	1.2351	23	23	24	0.8980	0.7091
8	8	9	1.0300	0.7400	24	24	25	0.6960	0.7011
9	9	10	1.0400	0.7400	25	6	26	0.2030	0.1034
10	10	11	0.1966	0.0650	26	26	27	0.2842	0.1447
11	11	12	0.3744	0.1238	27	27	28	1.0590	0.9337
12	12	13	1.4680	1.1550	28	28	29	0.8042	0.7006
13	13	14	0.5416	0.7129	29	29	30	0.5075	0.2585
14	14	15	0.5910	0.5260	30	30	31	0.9744	0.9630
15	15	16	0.7463	0.5450	31	31	32	0.3105	0.3619
16	16	17	1.2890	1.7210	32	32	33	0.3410	0.5302

Les paramètres du PSO utilisés pour la recherche de l'emplacement optimal mono-objectif

Nombre de particules (population)	10 agents
Facteurs de pondération	$C_1 = 1.4$ & $C_2 = 1.4$
Poids de la fonction pondération	$w_{\max} = 0.9$ & $w_{\min} = 0.4$
Nombre d'itérations maximal	200
Nombre de répétitions pour une valeur optimale	20

Les paramètres du MOPSO utilisés pour la recherche de l'emplacement optimal multi-objectif

Nombre de particules (population)	25 agents
Facteurs de pondération	$C_1 = 2$ & $C_2 = 2$
Poids de la fonction pondération	$w_{\max} = 0.9$ & $w_{\min} = 0.4$
Nombre d'itérations maximal	30
Nombre des hyper-cubes	36

❖ Ces paramètres sont déterminés par des expériences (étude paramétriques).

Les valeurs des paramètres utilisés dans les contraintes des réseaux :

Puissance maximale du poste source	$S_{sub}^{max} = 100 \text{ MVA}$
Puissance maximale transmise dans les lignes	$S_{Li}^{max} = 100 \text{ MVA}$
Limites des amplitudes des tensions	$ V_i^{min} = 0.9 \text{ pu}$ $ V_i^{max} = 1.1 \text{ pu}$
Limites des puissance du SVC	$b_{SVC}^{min} = -150 \text{ kVAr}$ (inductive) $b_{SVC}^{max} = 750 \text{ kVAr}$ (capacitive)