
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة
Université SAAD DAHLEB de Blida



كلية التكنولوجيا
Faculté de technologie

قسم الآلية والكهروتقني
Département d'Automatique et Electrotechnique

Mémoire de Master

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Machines Electriques

Présenté par :

FADEL MOHAMED AMIR

&

ZEGHDOUDI CHAREF EDDINE

Reconfiguration des réseaux électriques de distribution en présence de dispositifs SVC.

Proposé par : **Dr. BELAZZOUG Messaoud**

Année Universitaire : **2024-2025**

Remerciement

Tout d'abord, nous remercions Allah pour sa grâce et remercions Allah qui nous a donné patience et force et nous a permis de compléter ce mémoire.

Nous tenons à remercier le monsieur Messaoud Belazzoug qui nous a aidés à compléter ce mémoire, avec ses idées, ses conseils, son travail et sa confiance en nous.

Nous tenons également à remercier tous les professeurs qui nous ont soutenus les années précédentes et le personnel de l'administration et ce fut un honneur pour nous de traiter avec eux.

Même à ceux qui nous ont accompagnés tout au long de notre séjour dans cette université, nous disons merci infiniment

Je dédie ce mémoire à :

- ♥ À mes parents, qui m'ont inculqué l'amour, la persévérance et la force nécessaire pour avancer dans la vie. Votre soutien inconditionnel et vos sacrifices ont été les piliers de mon cheminement.
- ♥ À ma petite famille et ma grande famille, dont l'affection et la bienveillance m'accompagnent chaque jour. Vous êtes le cœur battant de mon existence, une source inépuisable de bonheur et d'inspiration.
- ♥ À mon grand-père et ma grand-mère et ma tante, qui ont marqué ma vie par leur sagesse, leur amour et leurs précieux enseignements. Bien que vous ne soyez plus parmi nous, votre présence demeure à jamais gravée dans mon cœur, et votre héritage continue de guider mes pas.

ALLAH YERHAMHOM

- ♥ À mon amie proche, dont la présence et le soutien ont été une lumière précieuse dans mon parcours. Merci pour ton écoute, tes encouragements et ta sincérité, qui ont fait de toi une personne essentielle à mes côtés.
- ♥ À l'équipe de « Fourkane Informatique », qui m'a entouré d'un esprit de collaboration et d'innovation. Votre engagement et votre passion ont enrichi mon parcours et m'ont aidé à évoluer.
- ♥ À mes amis, véritables compagnons de route, qui ont partagé mes joies et mes défis, qui ont su me soutenir et me faire sourire même dans les moments difficiles. Votre amitié est un trésor inestimable

Fadel Mohamed Amir

Je dédiecémémoire à :

- ∞ Mamère, pilier de ma vie, dontl'amour, les sacrifices et les prièressilencieusesm'ontportéjusqu'ici.
- ∞ À la mémoire de mon père, qu'Allahluiaccorde Sa miséricorde. Son exemple et sesvaleurscontinuent de guider mes pas.
- ∞ À ma sœur, pour sa douceur, son soutiendiscret et son affection constante.
- ∞ À toute ma famille, pour leurconfiance et leurprésence.
- ∞ À mesamis, pour leurs encouragements sincères et leurfidélité.
- ∞ Et à mon grand-pèrematernel, homme de sagesse et de bonté, dont les prières et les paroles m'accompagnent encore.

ZaghdoudiCharefEddine

Résumé :

Ce mémoire explore la réduction des pertes et l'amélioration du profil de tension dans les réseaux de distribution électrique en combinant la reconfiguration topologique (ouverture/fermeture sélective des interrupteurs) et la compensation réactive dispositifs SVC, le tout piloté par un algorithme génétique implémenté sous MATLAB/MATPOWER. Après avoir modélisé le réseau selon l'approche DistFlow et défini une fonction d'aptitude intégrant pertes actives et réactives ainsi que contraintes de tension et de radialité, l'étude applique la méthode à deux cas de référence (IEEE 33 et IEEE 118 bus), démontrant des réductions de pertes actives jusqu'à 89 % et une homogénéisation du profil de tension autour de 1 p.u. sur le premier réseau, avec des gains sensiblement supérieurs à 40 % sur le second. Ces résultats soulignent le potentiel opérationnel de l'approche, tout en ouvrant la voie à des extensions stochastiques, multi-périodes...

ملخص:

ستكشف هذا المذكر تقنيات تقليل الفواقد وتحسين ملف التوتر في شبكات التوزيع الكهربائي من خلال الجمع بين إعادة التشكيل الطوبولوجي للشبكة (الفتح/الإغلاق الانتقائي للقواطع) وتعويض القدرة التفاعلية باستخدام أجهزة SVC، وذلك تحت إشراف خوارزمية جينية مطبقة في بيئة MATLAB/MATPOWER.

بعد نمذجة الشبكة وفق مقاربة DistFlow وتعريف دالة ملائمة تشمل الفواقد الفعلية والتفاعلية بالإضافة إلى قيود التوتر والطبيعة الشعاعية للشبكة، تم تطبيق المنهج على حالتين مرجعيتين (شبكة IEEE ذات 33 حافلة وشبكة IEEE ذات 118 حافلة). وقد بينت النتائج انخفاضاً في الفواقد الفعلية بنسبة تصل إلى 89% وتجانساً في ملف التوتر حول القيمة 1 p.u. في الشبكة الأولى، مع تحقيق مكاسب تفوق 40% في الشبكة الثانية.

تُبرز هذه النتائج الإمكانيات التشغيلية الكبيرة لهذا النهج، كما تفتح المجال أمام تطويرات مستقبلية تشمل النمذجة الاحتمالية (Stochastique) والنمذجة متعددة الفترات الزمنية.

Abstract :

This thesis explores the reduction of losses and the improvement of the voltage profile in electrical distribution networks by combining topological reconfiguration (selective opening/closing of switches) with reactive compensation via SVC devices, all driven by a genetic algorithm implemented in MATLAB/MATPOWER. After modeling the network using the DistFlow approach and defining a fitness function that incorporates active and

Résumé

reactive losses as well as voltage and radiality constraints, the study applies the method to two benchmark cases (IEEE 33-bus and IEEE 118-bus). It demonstrates active loss reductions of up to 89% and a homogenization of the voltage profile around 1 p.u. on the first network, with gains exceeding 40% on the second. These results highlight the operational potential of the approach while opening the door to future stochastic and multi-period extensions.

Liste des tableaux

Tableau I. 1. Niveaux des tensions en Algérie.....	6
Tableau III. 1 Tableau de fonctionnement des AG.....	37
Tableau III. 2 Tableau de chromosome de réseau IEEE 33.....	41
Tableau III. 3. Tableau de chromosome de réseau IEEE 118.....	42
Tableau III. 5. Les étapes de chaque méthode	44
Tableau IV. 1.Chromosome initiale de réseau IEEE 33	51
Tableau IV. 2. Chromosome initiale de réseau IEEE 118	51
Tableau IV. 3. les résultats de l'analyse de l'écoulement de puissance pour IEEE 33.....	53
Tableau IV. 4. Les résultats de l'analyse de l'écoulement de puissance por IEEE 118	54
Tableau IV. 5. Chromosomes de la reconfiguration optimale du 1er cas.....	55
Tableau IV. 6. Résultat de l'écoulement de puissance du 1er cas	56
Tableau IV. 7. Chromosomes de la reconfiguration optimale du 2ème cas	58
Tableau IV. 8. Résultat de l'écoulement de puissance du 2ème cas.....	58
Tableau IV. 9. Chromosome de la reconfiguration optimale du 3ème cas.....	60
Tableau IV. 10. Résultats des pertes du 3ème cas	61
Tableau IV. 11. Chromosome optimale de la reconfiguration du 4ème cas.....	64
Tableau IV. 12. Résultat de l'écoulement de puissance du 4ème cas.....	65
Tableau IV. 13. Chromosomes de la reconfiguration optimale du 5ème cas	68
Tableau IV. 14. Résultat d'écoulement de puissance du 5ème cas	69
Tableau IV. 15. Chromosome de la reconfiguration du 6ème cas.....	72
Tableau IV. 16. Résultats des pertes du 6ème cas	73

Liste des figures

Figure I. 1. Réseau électrique.....	6
Figure I. 2. Poste électrique.....	7
Figure I. 3 réseaux de distribution électrique.....	8
Figure I. 4. Représentation générale d'un réseau de distribution radial	8
Figure I. 5. Thyristor-Controlled Reactor	11
Figure I. 6. Condensateur Commuté par Thyristors.....	11
Figure II. 1 - Modèle d'un générateur.....	18
Figure II. 2. modèles des charges.....	20
Figure II. 4. Courbe de caractéristique de SVC	24
Figure II. 5. Schéma des paramètres d'une branche.....	25
Figure III. 1. Organigramme de GA classique.....	38
Figure IV. 1. Schéma de Réseau de distribution de 33 nœuds.....	49
Figure IV . 2. Schéma de réseau de distribution de 118 nœuds.....	50
Figure IV. 3. Schéma initiale de réseau de 33 nœuds	52
Figure IV. 4. Schéma initiale de réseau de 118 nœuds	52
Figure IV. 5. Graphe des résultats de l'écoulement de puissance du 1er cas	56
Figure IV. 6. Structure Optimale du 1er cas	57
Figure IV. 7. Les niveaux de tensions de chaque noeud.....	59
Figure IV. 8. Différence entre la version optimale et version originale en déviations de tension.....	59
Figure IV . 9. Structure Optimale du 2ème cas.....	60
Figure IV . 10. Graphe d'évolution des pertes.....	61
Figure IV. 11. structure optimale du 3ème cas	61
Figure IV . 12. L'évolution des pertes en version optimale du 4ème cas.....	65
Figure IV . 13. Structure optimale du 4ème cas.....	67
Figure IV . 14. Différence entre la version originale (avant) et l'optimale	70
Figure IV . 15. Structure optimale du 5ème cas.....	71
Figure IV . 16. Résultats des pertes du 6ème cas.....	73
Figure IV . 17. Structure optimale du 6ème cas.....	74

Liste des abréviations

- **AC** : Courant Alternatif
- **AG** : Algorithmes Génétiques
- **BT** : Basse Tension
- **CIRE** : Congrès International des Réseaux Électriques de Distribution
- **DAR** : Disjoncteur Automatique de Réenclenchement
- **DAS** : Déclencheur Automatique de Sectionnement
- **DNR** : Distribution Network Reconfiguration (Reconfiguration des Réseaux de Distribution)
- **DC** : Courant Continu
- **FACTS** : Flexible AC Transmission Systems
- **GA** : Genetic Algorithm (Algorithme Génétique)
- **GRTE** : Gestionnaire du Réseau de Transport d'Électricité (Algérie)
- **HT** : Haute Tension
- **HTA** : Haute Tension A (ancienne appellation pour la moyenne tension)
- **IA** : Intelligence Artificielle
- **IEC** : Commission Électrotechnique Internationale
- **IGBT** : Insulated Gate Bipolar Transistor
- **LV** : Low Voltage (Basse Tension)
- **MILP** : Mixed Integer Linear Programming
- **MT** : Moyenne Tension
- **MV** : Medium Voltage (Moyenne Tension)
- **MVAR** : Megavar (unité de puissance réactive)
- **MW** : Mégawatt
- **NO** : Normally Open (Normalement Ouvert)
- **NC** : Normally Closed (Normalement Fermé)
- **PSO** : Particle Swarm Optimization
- **PV** : Dans le contexte des flux de puissance : bus de type « generator bus »
- **PQ** : Dans le contexte des flux de puissance : bus de type « load bus »
- **p.u.** : Per Unit (unité relative)
- **SAIDI** : System Average Interruption Duration Index
- **SVC** : Static Var Compensator
- **THT** : Très Haute Tension
- **TCR** : Thyristor-Controlled Reactor

Liste des abréviations

- **TSC** : Thyristor-Switched Capacitor
- **TS** : Tabu Search
- **UPFC** : Unified Power Flow Controller

- **P** : Puissance active (kW, MW, pu)
- **Q** : Puissance réactive (kVAR, MVAR, pu)
- **V** : Tension (V, kV, p.u.)
- **I** : Courant (A)
- **R** : Résistance (Ω , pu)
- **X** : Réactance (Ω , pu)
- **Z** : Impédance (Ω , pu)
- **B** : Susceptance (S, pu)
- **S** : Puissance apparente (VA, kVA, MVA)

- **ch** : Vecteur d'état des branches (1 : fermé, 0 : ouvert) — Binaire
- **Pd** : Puissance active demandée (charge) (kW, MW, pu)
- **Qd** : Puissance réactive demandée (charge) (kVAR, MVAR, pu)
- **Ploss** : Pertes de puissance active (kW, MW)
- **Qloss** : Pertes de puissance réactive (kVAR, MVAR)
- **Pi** : Puissance active transmise dans la branche i (pu)
- **Qi** : Puissance réactive transmise dans la branche i (pu)
- **Pdi** : Puissance active au nœud i (pu)
- **Qdi** : Puissance réactive au nœud i (pu)
- **RLi** : Résistance de la ligne i (pu)
- **XLi** : Réactance de la ligne i (pu)
- **Qc** : Puissance réactive injectée par compensation (kVAR, pu)
- **Bsvc** : Susceptance du SVC (S, pu)
- **||Vi||** : Module de la tension au nœud i (p.u.)
- **Vi+1** : Tension au nœud aval $i+1$ (p.u.)
- **Ii** : Courant dans la branche i (A)

- **f(x)** : Fonction objectif à optimiser
- **x*** : Solution optimale

INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre I : Généralités et l'état de l'art	4
1- Introduction :	5
2- Définitions :	5
2.1- Le réseau électrique :	5
2.2- Composantes principales du réseau :	6
2.3- Types des réseaux de distribution :	8
2.4- Dispositifs SVC :	10
3- Historique :	13
4- État de l'art :	14
Typologie des méthodes :	14
5- Conclusion :	15
Chapitre II : Modélisation de réseau électrique de distribution et du problème	16
1- Introduction :	17
2- Modélisation des éléments d'un réseau électrique de distribution :	17
2.1- Générateur :	17
2.2- Les nœuds et les branches :	18
2.3- Les branche Tie-switch :	19
2.4- Modélisation des charges électriques :	20
2.5- Le vecteur « ch »	20
2.6- Chromosome des dispositifs SVC :	21
2.7- Définition de Dispositifs « FACTS » :	22
2.8- Static VAR Compensator (Dispositifs SVC) :	22
3- Modélisation des lignes	24
3.1- Calcul des puissances des lignes intermédiaires	24
3.2- Calcul des tensions et courants	27
4- Modélisation mathématique d'un SVC	28
5- Modélisation du problème :	29
6- Conclusion :	29
Chapitre III : Méthodologie	31
1- Introduction :	32
2- Définition :	32
2.1- L'intelligence Artificiel :	32
2.2- Les Algorithmes Génétiques :	34
2.3- Le fonctionnement des algorithmes génétiques :	37

2.4-	L'optimisation :	38
2.5-	L'optimisation de notre cas d'étude :	40
3-	L'application des algorithmes génétiques sur la reconfiguration de réseau de distribution :	40
3.1-	Algorithmes d'Optimisation Utilisés :	42
3.2-	Mise en œuvre sur MATLAB :	43
4-	Algorithme de calcul :	43
4.1-	Critères d'évaluation :	44
4.2-	Pertes de puissance réactive (kVAr) :	45
5-	Conclusion :	46
Chapitre IV :	Résultats et interprétation	47
1-	Introduction :	48
2-	Les Réseau étudiés :	48
1.	Réseau IEEE 33 (33 nœuds):	48
2.	Réseau IEEE 118 (118 nœuds) :	49
3-	Configuration Initiale :	50
a.	Chromosome initiale :	50
b.	L'énergie réactives fournit par les dispositifs SVC :	Erreur ! Signet non défini.
c.	Structure initiale :	51
d.	Résultat de l'écoulement de puissance de la configuration initial :	52
4-	Configuration Optimale :	54
5-	Résultats et discussion :	55
a.	Réseau IEEE 33 :	55
b.	Réseau IEEE 118 :	63
6-	Conclusion :	75
	Conclusion générale	77
	Bibliographie	81
	Annexes	86

INTRODUCTION GENERALE

Une partie importante des pertes d'énergie dans les systèmes électriques est imputable au réseau de distribution, où elles atteignent environ 14 % de la puissance véhiculée ; face à cette réalité et à la dérégulation des marchés de l'électricité, les gestionnaires se tournent prioritairement vers la réduction des pertes existantes plutôt que vers la création de nouvelles lignes de transport.

Dans un réseau donné, où la demande de puissance active est incompressible, la seule voie pour diminuer à la fois les chutes de tension et les pertes consiste à réduire le transit des composantes réactives élevées du courant de ligne. C'est pourquoi la compensation de l'énergie réactive par batteries de condensateurs shunt constitue une solution reconnue, qui fait l'objet de cette mémoire.

Toutefois, installer simplement des condensateurs ne suffit pas : il faut optimiser leur puissance, leur emplacement et, pour les systèmes adaptatifs, le temps de mise en service afin de minimiser les pertes actives et réactives tout en améliorant le profil de tension et en garantissant un retour économique positif. L'objectif est donc de déterminer la taille et la localisation optimale des bancs de condensateurs pour augmenter la capacité de transmission du réseau. Dans ce cadre, l'étude de l'écoulement de puissance et l'optimisation selon une fonction objective combinant aspects électrique (réduction des pertes réactives et amélioration de la tension) et économique (économies générées) seront développées.

À l'ère où l'électricité est essentielle à tous les pans de la vie quotidienne, répondre à la demande croissante nécessite d'abord des moyens de production suffisants (thermiques ou renouvelables), puis une transmission efficace via les réseaux de transport, et enfin une distribution capable d'assurer qualité de service, stabilité du profil de tension et continuité sans coupure. Outre la compensation réactive, la reconfiguration topologique du réseau de distribution c'est-à-dire l'ouverture et la fermeture sélective des interrupteurs pour permuter l'état des branches apparaît comme une solution puissante pour réduire les pertes et lisser les chutes de tension, tout en respectant la structure radiale imposée. Pour optimiser cette reconfiguration, on recourt à des méthodes évolutionnaires telles que les algorithmes génétiques, qui exploitent sélection, croisement et mutation pour rechercher la configuration minimisant les pertes.

Donc dans cette mémoire on va étudier un programme qui nous donne une meilleure reconfiguration de réseau de distribution ainsi d'ajouter des composants SVC pour avoir un

Introduction Générale

minimum des pertes de façon automatique en utilisant l'intelligence artificiel (les algorithmes génétiques) avec le logiciel de simulation MATLAB et avec plus d'itération d'essai, on obtient une meilleure configuration et meilleurs résultats sur les pertes, on va étudier deux réseaux : 33 nœuds et 118 nœuds (IEEE 33 – IEEE 118)

Cette mémoire est constituée de quatre chapitres :

Dans le premier chapitre on parle de « Généralités et l'état de l'art » pour le réseau de distribution

Puis, dans le chapitre 02 on va faire la modélisation de réseau électrique de distribution et du problème

Et dans le chapitre 03 on traite la méthodologie de solution

Enfin, dans le chapitre 04 on a extrait résultats et Interprétation de cela

Chapitre :

Généralités et l'état de l'art

1- Introduction :

Les réseaux de distribution électrique constituent la dernière étape de l'acheminement de l'électricité, assurant la liaison entre le réseau de transport et les consommateurs finals. Contrairement aux réseaux de transport et de répartition, ils présentent des architectures très diversifiées (radiales, maillées ou arborescentes) et des solutions techniques adaptées à chaque contexte national et à la densité de population desservie.

Afin de cadrer les enjeux techniques et opérationnels qui sous-tendent cette étude, ce chapitre propose une présentation générale du système de distribution électrique. Nous y décrirons d'une part l'organisation structurelle globale du réseau (groupements de postes sources, lignes primaire et secondaire, points de connexion clients) et, d'autre part, nous focaliserons plus particulièrement sur les réseaux de moyenne tension (2 kV – 35 kV), clés dans l'interface entre transport et distribution.[3]

2- Définitions :

2.1- Le réseau électrique :

Un réseau électrique est un ensemble d'infrastructures permettant d'acheminer l'énergie électrique des centres de production vers les consommateurs d'électricité. Il est constitué de lignes électriques exploitées à différents niveaux de tension, connectées entre elles dans des postes électriques. Les postes électriques permettent de répartir l'électricité et de la faire passer d'une tension à l'autre grâce aux transformateurs. Un réseau électrique doit aussi assurer la gestion dynamique de l'ensemble production - transport - consommation, mettant en œuvre des réglages ayant pour but d'assurer la stabilité de l'ensemble.[4][5]



Figure I. 1. Réseau électrique

2.2- Composantes principales du réseau :

1. Lignes électriques : Le réseau est constitué de lignes aériennes ou souterraines, exploitées à différents niveaux de tension [6][7]. en Algérie :

Niveau de tension	Usage en Algérie	Plage de tension typique
Très haute tension (THT)	Transport interrégional par GRTE	400 kV, 220 kV
Haute tension (HT)	Transport régional et sous-régional	60 kV, 90 kV
Moyenne tension (MT)	Distribution vers grandes industries ou postes urbains	30 kV, 20 kV, parfois 15 kV
Basse tension (BT)	Alimentation des usagers finaux (ménages, petits commerces)	400/230 V (triphase/monophasé)

Tableau I. 1. Niveaux des tensions en Algérie

2. Postes électriques : Ces nœuds essentiels permettent :
 - La connexion entre les différentes parties du réseau,
 - La transformation des niveaux de tension grâce aux transformateurs,
 - La répartition de l'énergie électrique selon les besoins des différentes zones desservies,

- La protection et l'isolement des équipements sans de défaut ou de surcharge.[8]

Il est généralement divisé en trois grandes parties, chacune ayant un rôle spécifique : le réseau de transport, le réseau de distribution et le réseau d'interconnexion.

2.2.1- Réseau d'interconnexion :

Un réseau électrique d'interconnexion est un ensemble de réseaux électriques nationaux ou régionaux reliés entre eux, permettant le transfert d'électricité à grande échelle entre différentes zones géographiques. Cette interconnexion est assurée par des lignes à haute et très haute tension (HT et THT), qui permettent de partager la production, d'optimiser l'usage des ressources énergétiques et de renforcer la sécurité d'approvisionnement. [5]



Figure I. 2. Poste électrique

2.2.2- Réseau de Transport :

Un réseau de transport d'électricité (souvent abrégé RTE en France pour « Réseau de Transport d'Électricité ») est l'ensemble des lignes et installations à haute et très haute tension qui assurent l'acheminement de l'électricité depuis les centres de production (centrales, parcs éoliens, fermes solaires, etc.) jusqu'aux réseaux de distribution ou aux gros consommateurs industriels. Contrairement au réseau de distribution, qui dessert directement les foyers et les petites entreprises, le réseau de transport opère à des niveaux de tension élevés (généralement de 63 kV à 400 kV en France), afin de transporter de grandes quantités d'énergie sur de longues distances avec un minimum de pertes. [9]

2.2.3- Réseau de distribution :

Les réseaux de distribution forment l'ossature principale du système électrique mondial, en assurant l'acheminement de l'énergie depuis les postes de transformation du réseau de transport jusqu'aux utilisateurs finaux à l'échelle locale. Ils fonctionnent à des niveaux de tension n'excédant pas grosso modo 50 kV (selon les normes IEC, jusqu'à 35 kV voire 50 kV dans certains pays), ce qui les place dans la catégorie MV (Medium Voltage) ou MV/HTA selon les appellations nationales, et se décomposent en deux segments complémentaires : le réseau Moyenne Tension (MV), typiquement de 1 kV à 35 kV (avec des valeurs courantes de 11 kV, 22 kV ou 33 kV) qui relie les postes de transport aux transformateurs locaux, et le réseau Basse Tension (LV), jusqu'à 1 kV (le plus souvent 230/400 V), qui dessert directement les compteurs des consommateurs[10].

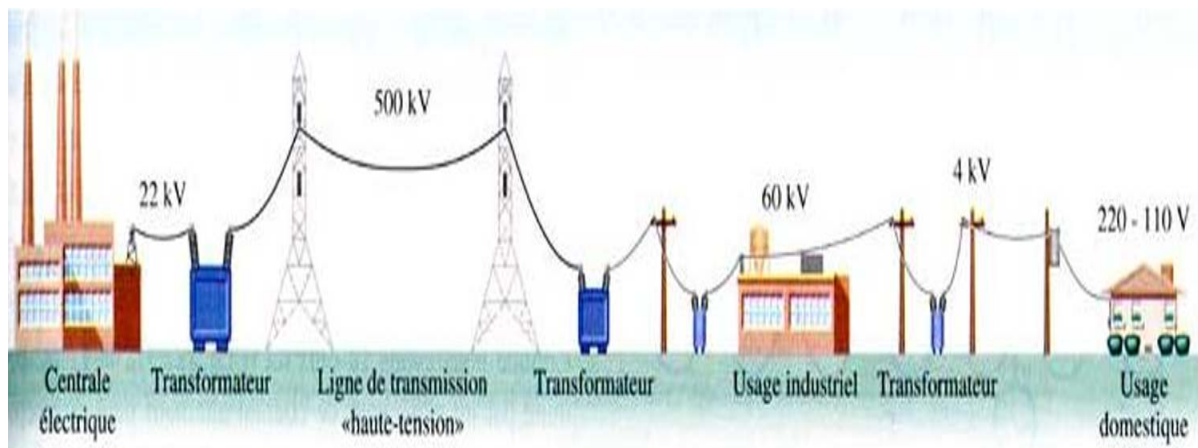


Figure I. 3 réseaux de distribution électrique

2.3- Types des réseaux de distribution :

2.3.1- Radial :

Un réseau de distribution radial est une architecture électrique où l'alimentation provient d'une unique source (poste haute/moyenne tension) et se déploie de manière arborescente vers les consommateurs, sans chemin alternatif ni bouclage. Cette configuration unidirectionnelle,

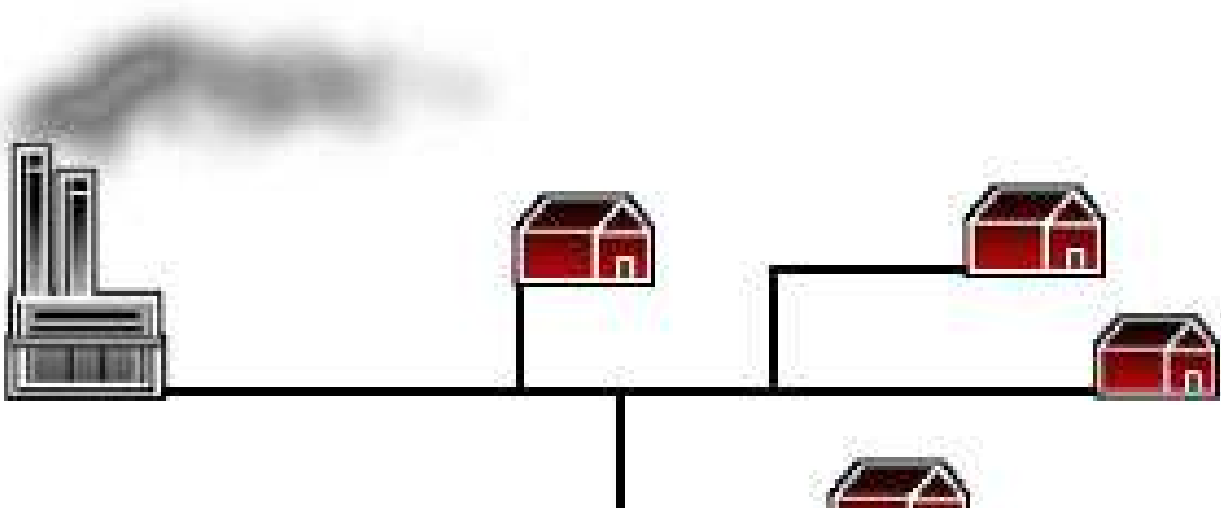


Figure I. 4. Représentation générale d'un réseau de distribution radial

décrite par la norme CEI 60050 (International Electrotechnical Vocabulary), garantit un flux d'énergie linéaire de la source vers les charges, mais présente une vulnérabilité aux coupures : toute défaillance sur une branche interrompt l'alimentation en aval. Bien qu'économique en conception et maintenance grâce à sa simplicité (moins de câbles, protections électriques basiques), son manque de redondance le réserve traditionnellement aux zones rurales ou aux réseaux basse tension urbains à faible densité de charge. Pour en atténuer les limites, des dispositifs comme les sectionneurs automatiques de réenclenchement (DAR) ou les déconnecteurs-fusibles y sont intégrés, permettant d'isoler localement les défauts (Guide UNIPED sur les réseaux de distribution). [11] [12]

2.3.2- Maillé :

Un réseau maillé (ou interconnecté) est une topologie de distribution électrique caractérisée par une interconnexion multidirectionnelle des nœuds, où chaque consommateur peut être alimenté par plusieurs chemins grâce à des boucles actives. Contrairement aux réseaux radiaux, cette architecture crée une redondance systémique : en cas de défaut sur une ligne, les automates (DAS : Déclencheurs Automatiques de Sectionnement) réorganisent les flux via des itinéraires alternatifs en quelques secondes, limitant les coupures. Cette résilience, définie par la norme CEI 61850 sur les systèmes de communication pour l'automatisation des postes, en fait la solution privilégiée pour les zones urbaines denses et les sites industriels critiques, où l'indice de fiabilité SAIDI (System Average Interruption Duration Index) doit être inférieur à 15 minutes/an. Toutefois, sa complexité opérationnelle exige des outils avancés de gestion des flux de puissance et génère des coûts d'investissement 40% supérieurs aux réseaux radiaux, principalement dus aux câblages redondants et aux systèmes de protection différentielle.[13]

2.3.3- Bouclé :

Un réseau bouclé (topologie en anneau) est une architecture de distribution électrique où les lignes forment une boucle fermée alimentée par un ou plusieurs postes sources, permettant un flux bidirectionnel de l'énergie. Contrairement aux réseaux radiaux, cette configuration offre une redondance partielle : en cas de défaut sur un tronçon, des automates (DAR : Disjoncteurs Automatiques de Réenclenchement) isolent la section défaillante en moins de 300 ms, tandis que les clients en aval sont réalimentés par le sens inverse du circuit (norme CEI 61970 sur la gestion des systèmes électriques). Selon une étude CIRED 2021, cette topologie réduit les coupures de 70% par rapport aux réseaux radiaux classiques, avec un SAIDI (durée moyenne

d'interruption) inférieur à 50 minutes/an dans les zones périurbaines européennes. Toutefois, son déploiement implique un surcoût de 20-30% lié aux câblages redondants et aux équipements de protection (disjoncteurs différentiels, sectionneurs), tout en nécessitant des calculs précis de courants de court-circuit pour éviter les surcharges.[14]

2.4- Dispositifs SVC :

Un dispositif SVC (Static Var Compensator) est un composant clé des systèmes de transmission flexible en courant alternatif (FACTS - Flexible AC Transmission Systems). Il s'agit d'un équipement électronique de puissance shunt (connecté en parallèle au réseau) conçu pour contrôler rapidement la puissance réactive d'un système électrique, ce qui lui permet de réguler la tension, d'améliorer la stabilité et d'optimiser le transfert de puissance.

2.4.1- Fonctionnement :

Le principe de fonctionnement d'un SVC repose sur la capacité à injecter ou absorber de la puissance réactive dans le réseau en ajustant dynamiquement son impédance. Cette régulation est réalisée par des composants statiques commutés par des thyristors, des semi-conducteurs de puissance capables de commuter de forts courants à des vitesses très élevées.

Lorsque la tension du système est basse (par exemple, en raison d'une augmentation de la charge inductive), le SVC agit en mode capacitif, injectant de la puissance réactive dans le réseau pour augmenter la tension. Inversement, lorsque la tension est élevée (par exemple, en raison d'une charge faible ou d'une surproduction de puissance réactive), le SVC agit en mode inductif, absorbant de la puissance réactive pour abaisser la tension. Ce processus de compensation se fait en quelques cycles du signal AC, offrant une réponse très rapide aux perturbations du réseau.

2.4.2- Structure et Types Principaux

Un SVC est généralement composé d'une combinaison de :

- **Réactance Contrôlée par Thyristors (TCR - Thyristor-Controlled Reactor):** C'est le composant principal pour absorber la puissance réactive. Il s'agit d'une inductance connectée en série avec une valve à thyristors bidirectionnelle. En faisant varier l'angle d'amorçage (ou angle de retard à l'allumage) des thyristors, le

courant circulant dans le réacteur peut être réglé de manière continue, permettant ainsi une variation continue de la puissance réactive absorbée.

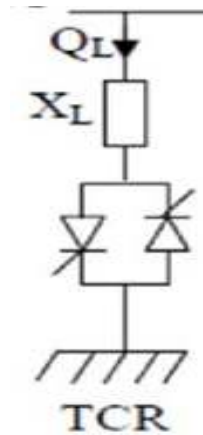


Figure I. 5. Thyristor-Controlled Reactor

- **Condensateur Commuté par Thyristors (TSC - Thyristor-Switched Capacitor):**
Ce composant permet d'injecter de la puissance réactive. Il est constitué d'un banc de condensateurs en série avec une valve à thyristors. Contrairement au TCR, le TSC n'offre pas une variation continue; les condensateurs sont commutés "ON" ou "OFF" par paliers, généralement sans transitoires de commutation significatifs. Un réacteur en série est souvent ajouté pour limiter les courants d'appel et éviter les résonances.

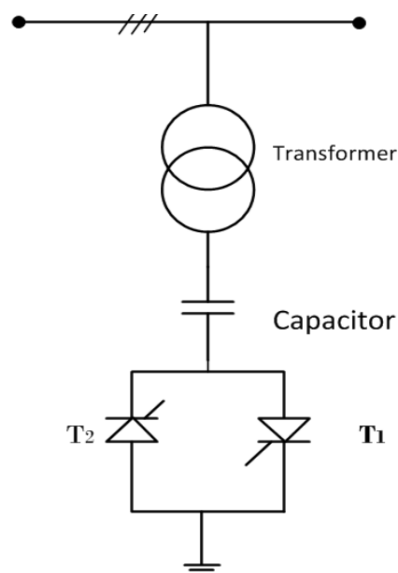


Figure I. 6. Condensateur Commuté par Thyristors

- **Condensateur Fixe (FC - Fixed Capacitor):** Souvent, des bancs de condensateurs fixes sont inclus pour fournir une base de puissance réactive capacitive. Ces condensateurs peuvent également servir de filtres harmoniques, car le fonctionnement des thyristors peut générer des harmoniques.

Les topologies les plus courantes de SVC sont:

- **TCR/FC:** Un réacteur contrôlé par thyristors en parallèle avec un banc de condensateurs fixes. Le TCR compense l'excès de puissance réactive générée par le FC.
- **TCR/TSC/FC:** Une combinaison de tous les éléments, offrant une flexibilité accrue et permettant souvent de réduire les pertes par rapport aux configurations sans TSC.

2.4.3- Avantages et Applications

Les SVC offrent plusieurs avantages significatifs dans les réseaux électriques:

- **Régulation de tension dynamique:** Ils maintiennent la tension du réseau à un niveau stable, même en présence de fluctuations de charge importantes ou de perturbations.
- **Amélioration de la stabilité du système:** En contrôlant la puissance réactive, les SVC contribuent à la stabilité transitoire et dynamique du réseau, aidant à prévenir les effondrements de tension.
- **Augmentation de la capacité de transfert de puissance:** En maintenant une tension stable, les SVC permettent de transférer plus de puissance sur les lignes de transmission existantes, repoussant ainsi la nécessité de construire de nouvelles lignes.
- **Réduction des pertes de ligne:** Une meilleure gestion de la puissance réactive réduit les courants réactifs circulant dans les lignes, ce qui diminue les pertes Joule.
- **Atténuation des harmoniques et du flicker :** Les SVC peuvent être conçus pour inclure des filtres harmoniques afin de gérer les distorsions de tension et de courant.
- **Amélioration de la qualité de l'alimentation :** Particulièrement important pour les charges industrielles lourdes et fluctuantes (comme les fours à arc électrique, les laminoirs), les SVC peuvent compenser rapidement les chocs de puissance réactive et le flicker.

Les applications des SVC sont variées et incluent:

- **Réseaux de transport d'énergie** : Pour la régulation de tension, l'amélioration de la stabilité et l'augmentation de la capacité de transfert sur de longues lignes.
 - **Connexion de charges industrielles lourdes** : Pour compenser les variations rapides de puissance réactive des usines sidérurgiques, des mines, des usines de production de ciment, etc., et améliorer le facteur de puissance et la qualité de la tension.
 - **Intégration des énergies renouvelables** : Pour compenser les fluctuations de puissance réactive des parcs éoliens et solaires, contribuant ainsi à la stabilité du réseau.
- [15]

3- Historique :

À la fin du XIX^e siècle, l'électricité sort de son laboratoire pour se lancer dans l'aventure du transport à longue distance. Le 3 juin 1889, la Willamette Falls Electric Company relie une centrale hydroélectrique, installée sur les chutes de Willamette Falls, à Portland, à environ 14 miles (environ 22 km) de là. Quatre lignes transportent alors du courant continu (DC) pour alimenter 55 lampadaires urbains, prouvant pour la première fois qu'on pouvait transférer de l'énergie électrique sur de longues distances, malgré des pertes pouvant atteindre 20-25 %. Cette avancée a conduit à la "guerre des courants" entre Thomas Edison, partisan du courant continu (DC), et Nikola Tesla et George Westinghouse, défenseurs du courant alternatif (AC), qui a abouti à l'adoption généralisée de l'AC pour sa capacité à être transporté sur de longues distances avec des pertes moindres. En France, la loi du 8 avril 1946 a nationalisé la production, le transport et la distribution de l'électricité, créant l'Électricité de France (EDF) pour unifier et moderniser le réseau électrique national. Dans les années 1970 à 1990, la France a investi massivement dans l'énergie nucléaire, construisant 58 réacteurs et développant un réseau à très haute tension pour acheminer cette production sur l'ensemble du territoire. Depuis le début des années 2000, les « smart grids » ont transformé le simple trajet du courant en un véritable échange d'informations : grâce aux compteurs communicants et aux technologies numériques, le gestionnaire de réseau ne se contente plus de mesurer la consommation une fois par mois, il peut désormais ajuster en temps réel la production, la distribution et même inciter le consommateur à moduler sa demande pour profiter des heures creuses ou de la surproduction d'énergies renouvelables. [16]

Ces dernières années, on a beaucoup travaillé sur la reconfiguration des réseaux de distribution pour réduire au maximum les pertes d'énergie. Parmi les premières contributions marquantes, Merlin et Back (1975) ont proposé d'utiliser une optimisation de type « branch

and bound » afin de trouver la topologie minimale en pertes pour un réseau urbain de distribution.[17] Concrètement, ils imaginent toutes les possibles configurations de commutateurs, puis éliminent progressivement celles qui génèrent trop de pertes, jusqu'à ne conserver que la solution optimale.

Plus tard, Shirmohammadi et ses collègues (1988) ont repris cette idée, mais avec un algorithme heuristique plus simple à mettre en œuvre. Leur méthode consiste à démarrer avec tous les interrupteurs fermés (ce qui crée une maille de distribution complète), puis à les ouvrir un à un, tout en recalculant à chaque fois l'écoulement optimal du courant. De cette façon, ils surmontent plusieurs approximations introduites par Merlin et Back et arrivent à une solution quasi-optimale plus rapidement dans la pratique.[18]

4- État de l'art :

La reconfiguration des réseaux de distribution (Distribution Network Reconfiguration, DNR) consiste à modifier la topologie du réseau à l'aide de manœuvres d'interrupteurs afin de réduire les pertes, d'améliorer la qualité de service et de garantir une structure radiale. Les premières approches, basées sur la résolution exacte de modèles mathématiques pour de petits réseaux statiques, montrent aujourd'hui leurs limites face à l'essor des sources d'énergie distribuée (photovoltaïque, éolien, véhicules électriques) qui imposent une forte variabilité et un besoin de réactivité en quasi-temps réel.

Typologie des méthodes :

1. Méthodes mathématiques et “déterministes” :

Ces méthodes utilisent la programmation linéaire ou non linéaire, la programmation mixte (MILP) ou les arbres couvrants à poids minimal. Elles garantissent une solution optimale pour des réseaux de petite taille, mais souffrent d'une complexité exponentielle qui les rend peu adaptées aux grandes topologies dynamiques.[19]

2. Heuristiques et méta-heuristiques :

Ici, on emprunte des idées à la nature ou à l'ingénieur : on fait comme si on laissait des fourmis trouver le chemin, ou un banc de poissons adapter sa route en groupe. Parmi les stars du genre :

- PSO (Particle Swarm Optimization) avec ses variantes “sigmoïde” ou “hyperbolique” pour limiter les allers-retours inutiles et réduire les pertes.

- Tabu Search, Genetic Algorithms et même le Whale Optimization Algorithm :

Une vaste étude a passé au crible 52 de ces méthodes, en comparant leur rapidité, le nombre de commutations effectuées et les économies d'énergie concrètes [21]

3. Méthodes hybrides et multi-objectifs :

Enfin, on mixe plusieurs ingrédients : méta-heuristiques, modèles analytiques, IA... pour optimiser plusieurs objectifs à la fois :

- réduire les pertes
- maintenir une tension stable
- limiter les manœuvres
- respecter les contraintes de maintenance

Par exemple, on peut intégrer des « Soft Open Points » tout en planifiant finement les commutations, le tout régulé par un algorithme multi-objectifs.[21]

5- Conclusion :

En conclusion, les réseaux de distribution électrique représentent le maillon essentiel entre les infrastructures de transport haute tension et les consommateurs finaux, et se distinguent par des architectures adaptées (radiales, maillées ou arborescentes) et des niveaux de tension variés (BT, MT/MV) pour répondre aux contraintes locales et à la densité de population ; L'évolution historique, depuis la première ligne longue distance de 1889 jusqu'à la généralisation des smartgrids, illustre le progrès continu des techniques de transport et de transformation.

Aujourd'hui, l'intégration massive des énergies renouvelables et des véhicules électriques impose d'adapter la reconfiguration des réseaux de distribution (DNR) via des approches multi-objectifs et la régulation de la puissance réactive. Les contributions de ce mémoire ouvrent ainsi la voie à une gestion optimisée, résiliente et durable du système électrique de distribution.

Chapitre II :

*Modélisation de
réseau électrique de
distribution et du problème*

1- Introduction :

La modélisation d'un réseau de distribution électrique radial repose principalement sur l'analyse de flux de puissance (power flow) adaptée aux structures arborescentes, via des formulations comme DistFlow ou les matrices BIBC-BCBV pour calculer tensions et courants aux nœuds du réseau.

. Le problème de minimisation des pertes en ligne, inhérent à toute topologie de réseau, se formule comme une optimisation combinatoire NP-difficile consistant à déterminer l'état (ouverture/fermeture) des dispositifs de commutation sous contraintes de radialité et de capacité.

. Les algorithmes génétiques, métaheuristiques inspirées de la sélection naturelle et reposant sur des opérateurs de sélection, croisement et mutation, offrent une stratégie efficace pour explorer cet espace de solutions complexe et atteindre de bons compromis en termes de pertes et de qualité de tension.[22]

2- Modélisation des éléments d'un réseau électrique de distribution :

Le réseau de distribution est un réseau qui est sous forme d'un arbre, il est composé d'un générateur qui représente le début de réseau, et dans le réseau on représente le comme le nœud initial, ou le nœud n°01, et il comporte aussi d'autres nœuds $N > 1$ qui représentent chaque jeu de barre, et des branches entre les nœuds, en général on fait la numérotation de ces branches à la suite de : nœud amont / nœud aval ou les deux ensuite.[23]

2.1- Générateur :

Le générateur est le composant initial de ce type de réseau, il injecte une puissance active P_g et une puissance réactive Q_g au nœud aval qui est connecté à ce nœud, Lorsque la puissance réactive est positive ($Q_g > 0$), le générateur fournit une puissance réactive au réseau électrique ; mais si la puissance réactive est négative ($Q_g < 0$), le générateur consomme de la puissance réactive du réseau.[24]

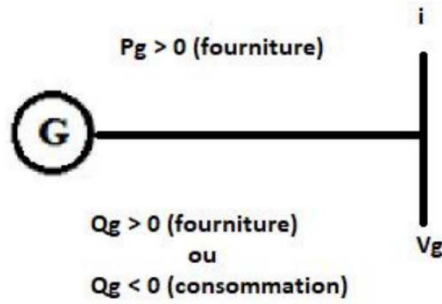


Figure II. 1 - Modèle d'un générateur

2.2- Les nœuds et les branches :

Chaque nœud (bus) d'un réseau de distribution électrique se modélise selon trois volets : la construction de la matrice d'admittance nodale, les spécificités des systèmes de distribution radiaux/déséquilibrés, et la classification des bus pour le calcul d'écoulement de puissance.

Dans le cadre de la reconfiguration des réseaux de distribution électrique, chaque tronçon reliant les nœuds « i » et « i+1 » (On considère « i » comme notation de nœud amont et « i+1 » comme notation de nœud aval) est modélisé selon le modèle DistFlow de Baran & Wu (1989), qui décrit la ligne par une résistance R_{Li} et une réactance X_{Li} véhiculant les flux de puissance active P_i et réactive Q_i tout en alimentant la charge locale P_{Li} , Q_{Li} au nœud « i+1 ». Les bilans de puissance s'écrivent alors :

$$P_{di} = P_{di+1} + P_{Li} + R_{Li} \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \dots \dots \dots (1)$$

$$Q_{di} = Q_{di+1} + Q_{Li} + X_{Li} \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \dots \dots \dots (2)$$

Intégrant à la fois la demande locale et les pertes ohmiques sur la ligne. Cette formulation, dite également « Branch-Flow », a été relaxée et convexifiée par Farivar & Low (2013) pour permettre une résolution efficace des problèmes de reconfiguration optimale via des méthodes convexes, tout en respectant les contraintes de tension, de courant et de radialité du réseau. Les algorithmes d'échange de branches (Branch-exchange) et les heuristiques telles que l'optimisation par colonie de fourmis, PSO ou GA exploitent ce modèle pour identifier la topologie radiale minimisant les pertes et équilibrant les charges, tout en satisfaisant les contraintes opérationnelles du réseau [20].

Type des branches :

1. **Branche Finale :** Ils'agit de la brancheterminalesituée à l'extrémité de chaque ramification du réseau. Elle revêtune importance capitalepuisque'elleconstitue le point de départ pour le calcul des puissances et des pertesdans le réseau.
2. **BrancheIntermédiaire :**Unebrancheintermédiaireierelièdeuxnœuds qui ne sontni des nœuds de dérivationni des nœudsfinaux. On la rencontre aussibien sur la ligneprincipalequedans les différentes ramifications du réseau. Le calcul de sespuissances et pertesintervient après ceux des branches finales oud'autres branches intermédiaires.
3. **Branche de Dérivation :**Ce type de brancheestraccordé à deux branches distinctesou plus. Le calcul des puissances et des pertesassociées à cettebrancheestréaliséuniquement après avoirdéterminécelles de toutes les branches connectées.

2.3- Les branche Tie-switch :

Danscette mémoire on a deuxcasd'étude de réseau de distribution, de 33 nœuds et de 118 nœuds.

- 1- **Réseau de 33 nœuds :** on dénombre 5 tie-switches numérotés de 33 à 37. Leur activation sélectivepermet de générer de nouvelles configurations radialesenouvrantsimultanémentd'autreslignes pour préserver la radialité. Celapermet de réduire les pertesohmiquesenréorientant les flux de courant sur des chemins plus courts oumoins chargés, d'équilibrer la charge entre différentes branches du réseau, et d'améliorer les profils de tension, notamment aux extrémitéséloignées. Encas de surcharge ou de panne, cesinterrupteursfacilitentégalement la continuité de service enréalimentant les zones affectées par uneautrebranche du réseau.
- 2- **Réseaud 118 nœuds :** on retrouve 15 tie-switches supplémentaires (numérotés de 118 à 132) qui offrentune plus grandesouplesse de reconfiguration. Leurutilitéestparticulièrementmarquédans les scénarios de gestion de production distribuée, commel'intégration de sources d'énergierenouvelableou de charges variables. Ilspermettentégalementune adaptation fine aux variations temporelles de la demande et contribuent à la résilience du réseau, enpermettant un contournementrapide des sections endommagéesousurchargées.

1. *Journal of the American Medical Association*, 2000; 283: 2686-2692.

[illegible]

2.7- Définition de Dispositifs « FACTS » :

Un système FACTS (Flexible AC Transmission System) est un ensemble de dispositifs à base d'électronique de puissance et de contrôleurs statiques, intégrés dans un réseau à courant alternatif, dont le but est d'améliorer la contrôlabilité des tensions, des impédances et des angles de phase, pour optimiser la stabilité dynamique du réseau et la répartition des flux de puissance. Selon la définition de l'IEEE : "Alternating current transmission systems incorporating power-electronics-based and other static controllers to enhance controllability and increase power transfer capability." [26]

La technologie FACTS ne se limite pas à un unique dispositif ; elle regroupe plutôt une famille de solutions exploitant des convertisseurs à semi-conducteurs (thyristors, IGBT, etc.) pour assurer, par action quasi-instantanée, le réglage de :

- La tension (compensation shunt via SVC, STATCOM),
- L'impédance (compensation série via TCSC),
- Le déphasage (via TCPAR ou UPFC),

Et ainsi maintenir ou accroître les marges de stabilité, tout en augmentant la capacité de transit sur les lignes existantes, sans recourir systématiquement à l'ajout de nouvelles infrastructures lourdes

Grâce à leur capacité à fournir ou absorber du réactif (et parfois du réel via UPFC), ces systèmes apportent une flexibilité inégalée : ils adaptent en temps réel les paramètres clés du réseau (tension, impédance, angle de phase) pour optimiser l'écoulement de puissance et renforcer la stabilité, même en cas de variations rapides de charge ou de configuration du réseau. [27]

2.8- Static VAR Compensator (Dispositifs SVC) :

Un compensateur statique de puissance réactive (SVC) peut être modélisé, au niveau du flux de puissance et de l'étude dynamique, de la façon suivante :

1- Modèle de base :

Le SVC est assimilé à un générateur synchrone ne fournissant pas de puissance active, équivalent à un condensateur synchrone en parallèle avec une réactance inductive. Cette représentation permet de capter son comportement en injection ou absorption de réactif sans intervenir sur la puissance active du réseau

Un SVC est généralement constitué de :

- Batteries de condensateurs (TSC) pour générer de la réactance capacitive,
- Filtres ou réactances contrôlées (TCR/TSR) pour générer de la réactance inductive,
- Régulateur de tension (avec action proportionnelle/intégrale) pour maintenir la tension du bus à une valeur de consigne.

On peut le représenter en schéma monophasé équivalent par une susceptance variable B_{SVC} connectée en shunt sur le bus du réseau.

2- Point de raccordement :

En régime normal, le SVC est traité comme un bus PV (tension et injection de réactif contrôlée). Lorsque l'une des limites de réactif (capacitif ou inductif) est atteinte, le bus passe en bus PQ, c'est-à-dire que le contrôle de la tension n'est plus assuré et l'injection de réactif reste au maximum permis.

3- Fonction de contrôle :

Grâce à son régulateur de susceptance (ou de tension), le SVC ajuste en quelques millisecondes sa susceptance équivalente, permettant un contrôle très rapide de la tension au point de raccordement. Cet ajustement quasi-instantané stabilise les variations de tension et améliore la qualité de service du réseau.

Ainsi, le SVC offre une solution compacte et réactive pour le maintien de la tension et la gestion dynamique du flux de puissance, en basculant automatiquement entre mode bus PV et bus PQ selon ses limites de fonctionnement.

2.7.1- Caractéristique de dispositif SVC :

Le SVC repose sur l'association d'une inductance à commande par thyristor (Thyristor Controller Reactor : TCR), d'un condensateur géré par thyristor (Thyristor Switcher Capacitor : TSC) et d'un filtre d'harmoniques.

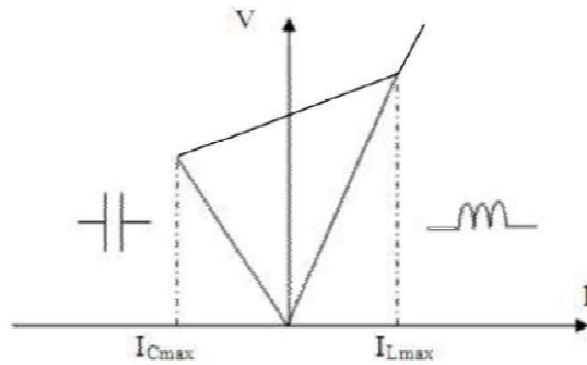


Figure II. 3. Courbe de caractéristique de SVC

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

Dans le SVC, les thyristors disposés en tête-bêche assurent le fonctionnement, tandis qu'un "Statique Var Compensateur" constitue un dispositif shunt, généralement raccordé à un transformateur haute tension/moyenne tension (HT/MT) ou basse tension (BT).

3- Modélisation des lignes

3.1- Calcul des puissances des lignes intermédiaires

Dans un réseau de distribution électrique, les lignes intermédiaires correspondent à toutes les branches situées entre le point d'alimentation (poste source) et l'avant-dernière charge, c'est-à-dire toutes les lignes à l'exception de la dernière. Ces lignes jouent un rôle essentiel dans le transport de l'énergie vers les différents nœuds du réseau. Pour chaque ligne intermédiaire, les puissances active (P) et réactive (Q) transitantes sont déterminées à l'aide des équations de bilan de puissance, qui tiennent compte des flux entrants et sortants ainsi que des pertes associées. On calcule les puissances actives et réactives en utilisant les formules suivantes :

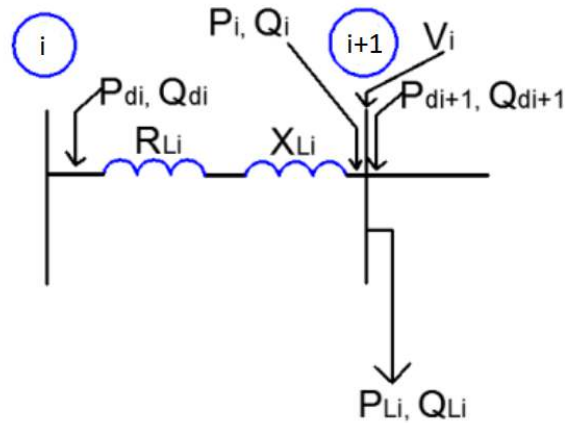


Figure II. 4. Schéma des paramètres d'une branche

Description de schéma :

Ce schéma représente un tronçon de réseau électrique, typiquement un segment de distribution, reliant deux nœuds consécutifs, notés 'i' et 'i+1'. Voici une description détaillée des éléments présentés :

- **Nœuds (Bus) i et i+1 :** Ce sont les points de connexion dans le réseau.
 - Au niveau du **nœud 'i'**, on voit :
 - P_i, Q_i : La puissance active et réactive injectée ou retirée du nœud 'i'. Si c'est un générateur, ce serait de l'injection ; si c'est une charge locale, ce serait du retrait.
 - P_{di}, Q_{di} : La puissance active et réactive consommée par la charge connectée directement au nœud 'i'.
 - Au niveau du **nœud 'i+1'**, on voit :
 - V_{i+1} : La tension au nœud 'i+1'.
 - P_{di+1}, Q_{di+1} : La puissance active et réactive consommée par la charge connectée directement au nœud 'i+1'.
- **Ligne de liaison entre i et i+1 :** Cette ligne représente le conducteur électrique connectant les deux nœuds. Elle est caractérisée par :
 - R_{Li} : La résistance de la ligne entre les nœuds 'i' et 'i+1'. La résistance est responsable des pertes de puissance active ($P_{pertes} = I^2 R$).
 - X_{Li} : La réactance de la ligne entre les nœuds 'i' et 'i+1'. La réactance est responsable des chutes de tension et des pertes de puissance réactive.

- P_{Li} , Q_{Li} : Ces grandeurs représentent la puissance active et réactive totale des charges situées en aval du nœud 'i+1' (c'est-à-dire la somme des charges connectées à partir du nœud 'i+1' et au-delà, plus toutes les charges sur les tronçons suivants). Elles indiquent la demande totale de puissance que le tronçon à i+1 doit alimenter en plus des charges P_{di+1} et Q_{di+1} .

Les équations :

$$P_i = P_{Li} + P_{d(i+1)} \dots \dots \dots (3)$$

$$Q_i = Q_{Li} + Q_{d(i+1)} \dots \dots \dots (4)$$

- Les équations (3) et (4) décrivent le bilan de puissance active (P) et réactive (Q) au niveau d'un nœud (ici, le nœud 'i').
- Elles indiquent que la puissance totale (P_i , Q_i) entrant dans le tronçon (ou consommée par ce tronçon du point de vue du nœud 'i') doit être égale à la somme de :

- P_{Li} , Q_{Li} : La puissance active et réactive "aval" ou "cumulative" (souvent notée avec l'indice 'L' pour *load ou line-end*) qui doit être fournie aux charges situées après le nœud 'i+1'. Dans le contexte de l'image précédente, P_{Li} et Q_{Li} seraient la somme de toutes les charges en aval du nœud i+1.
- $P_{d(i+1)}$, $Q_{d(i+1)}$: La puissance active et réactive consommée par la charge locale connectée directement au nœud 'i+1'.

$$P_{loss i} = R_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{|V_i|^2} \dots \dots \dots (5)$$

$$Q_{loss i} = X_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{|V_i|^2} \dots \dots \dots (6)$$

- Cette équation calcule les **pertes de puissance active** ($P_{loss i}$) et les **pertes de puissance réactive** ($Q_{loss i}$) dans le même tronçon reliant le nœud 'i' au nœud 'i+1'.
- R_i : La résistance de la ligne entre les nœuds 'i' et 'i+1'.
- X_i : La réactance de la ligne entre les nœuds 'i' et 'i+1'.
- $|V_i|$: L'amplitude (le module) de la tension au nœud 'i'.
- Explication : Cette formule est dérivée des pertes $P_{loss} = I^2 R$; $Q_{loss} = I^2 X$, On sait que la puissance complexe $S = P + jQ = V \cdot I^*$, donc l'amplitude du courant est :

$$|I| = \frac{|S|}{|V|} = \frac{\sqrt{P^2+Q^2}}{|V|} \dots\dots\dots (7)$$

En substituant cela dans la formule des pertes, on obtient les formules précédentes de P_{loss} et Q_{loss}

$$P_{di} = P_{\text{loss } i} + P_i \dots\dots\dots (8)$$

$$Q_{di} = Q_{\text{loss } i} + Q_i \dots\dots\dots (9)$$

Ces équations semblent décrire la puissance active et réactive demandée au niveau du nœud, notée P_{di} et Q_{di} , ou encore la puissance totale transitant par ce nœud en tenant compte des pertes.

3.2- Calcul des tensions et courants

D'après les formules des puissances précédentes, on déduit des autres paramètres tels que les tensions et les courants (complexe), avec les formules suivantes :

1- Courant de ligne :

Le courant complexe circulant dans la ligne i , noté I_i , peut être obtenu à partir des puissances apparentes en amont de la ligne :

$$I_i = \frac{S_{di}^*}{V_i^*} \dots\dots\dots (10)$$

En module on écrit :

$$|I_i| = \frac{\sqrt{P_{di}^2 + Q_{di}^2}}{|V_i|} \dots\dots\dots (11)$$

2- Tension en aval :

La chute de tension sur la ligne peut être calculée par la loi d'Ohm complexe :

$$V_{i+1} = V_i - Z_i * I_i \dots\dots\dots (12)$$

Développée en module, cette équation devient :

$$|V_{i+1}|^2 = |V_i|^2 - 2R_i P_{di} - 2X_i Q_{di} + (R_i^2 + X_i^2) \left(\frac{P_{di}^2 + Q_{di}^2}{|V_i|^2} \right) \dots\dots\dots (13)$$

C'est l'équation bien connue utilisée dans les méthodes de calcul de flux de puissance dans les réseaux de distribution (ex. : méthode de Baran & Wu). [19]

3- Récapitulatif des équations de tension et de courant :

3.1. Courant :

$$I_i = \frac{P_{di} - jQ_{di}}{V_i^*} \dots\dots\dots (14)$$

3.2. Tension (complexe) :

$$V_{i+1} = V_i - (R_i + jX_i)I_i \dots\dots\dots (15)$$

3.3. Tension (module) :

$$|V_{i+1}| = |V_i| - 2(R_i P_{di} + X_i Q_{di}) + (R_i^2 + X_i^2) \left(\frac{P_{di}^2 + Q_{di}^2}{|V_i|^2} \right) \dots\dots\dots (16)$$

4- Modélisation mathématique d'un SVC

Un compensateur statique de puissance réactive (SVC) est généralement représenté en régime quasi-statique par une susceptance shunt variable placée sur le bus à réguler [1]. Autrement dit, le SVC injecte ou absorbe de la puissance réactive en modulant une susceptance contrôlable B_{svc} , i au nœud i . Sous modèle à tensions polaires, la puissance réactive compensée est donnée par :

$$Q_{SVC, i} = B_{svci} V_i^2 \dots\dots\dots (17)$$

Où V_i est la tension en racine carrée de la base au point de connexion. La susceptance du SVC est limitée par ses capacités physiques :

$$B_{min} \leq B_{svci} \leq B_{max} \dots\dots\dots (18)$$

Avec typiquement $B_{min} < 0$ (mode inductif) et $B_{max} > 0$ (mode capacitif)

Ces limites opérationnelles traduisent respectivement la capacité inductive minimale et capacitive maximale du dispositif. Par conséquent, la puissance réactive injectée est bornée (par exemple en kVAr) par $Q_{min} = B_{min} V_i^2$ et $Q_{max} = B_{max} V_i^2$. Cette modélisation statique est classique en optimisation de réseaux : « un SVC est modélisé comme une source réactive shunt variable, sans pertes, dont la valeur peut varier dans une plage prédéfinie (ici typiquement de 0 à 600 kVAr)

Du point de vue dynamique, le SVC régule la tension locale par un loi de commande de type droop. On peut ainsi considérer schématiquement une caractéristique linéaire entre l'écart de tension et l'injection réactive : par exemple, B_{svci} peut être ajustée proportionnellement à l'écart de tension $\Delta V_i = V_{ref} - V_i$. Dans le domaine de contrôle linéaire, la relation tension-courant

réactif peut s'écrire « $V_i = V_{ref} + X_{SL} I_S$ », ce qui exprime qu'en supposant un gain statique X_{SL} on compense l'erreur de tension par un courant réactif I_S du SVC. En pratique, le contrôleur du SVC agit pour ramener V_i vers la référence V_{ref} , jusqu'à atteindre l'une des limites B_{min} ou B_{max} si nécessaire. Cette modulation adaptative de B_{svc} permet ainsi d'améliorer la stabilité de tension du réseau en faisant varier localement la puissance réactive injectée.

5- Modélisation du problème :

On prend des points avant l'écrit des équations ; on note quelque point :

- D'abord, on a défini que les dispositifs SVC se sont des composants qui injectent une puissance réactive au réseau, cela sera représenté par Q_c
- L'idée de notre mémoire est de faire un mixe de deux idées, la première est la reconfiguration de réseau de distribution, et la deuxième est de l'ajout des dispositifs SVC dans des nœuds aléatoires mais connue avec la fonction « FITNESS » dans « MATLAB », donc on ajout Q_c dans les équations de Q_{Li}

On trouve :

$$Q_{i\ new} = Q_{Li} + Q_{d(i+1)} - Q_c \dots \dots \dots (19)$$

Et les autres équations restent les mêmes

- D'après les points précédents on trouve que :

$$P_{loss\ i\ new} = R_i \frac{P_i^2 + (Q_i - Q_c)^2}{|V_i|^2} \dots \dots \dots (20)$$

$$Q_{loss\ i\ new} = Q_i \frac{P_i^2 + (Q_i - Q_c)^2}{|V_i|^2} \dots \dots \dots (21)$$

- Avec la fonction « FITNESS » en Matlab on fait par exemple 6 dispositifs SVC de façon aléatoire dans le réseau, aux fins de faire une meilleure optimisation de réseau.
- Finalement, la solution sera à base des Algorithmes Génétiques.

6- Conclusion :

Ce chapitre a formalisé la modélisation complète des flux de puissance dans les réseaux de distribution radiaux, en établissant systématiquement les équations des puissances actives et réactives (PQ) pour toutes les branches, dans les deux scénarios fondamentaux : avec et sans dispositifs SVC (Static Var Compensator). L'approche DistFlow et le formalisme matriciel

Chapitre II : Modélisation de réseau électrique de distribution et du problème

BIBC-BCBV ont fourni le cadre théorique nécessaire au calcul précis des profils de tension et des courants, condition essentielle pour l'optimisation.

Face à la complexité NP-difficile de la minimisation des pertes joules – problème combinatoire exigeant la détermination optimale des états d'ouverture/fermeture des sectionneurs sous contraintes de radialité et de capacité – nous avons démontré l'efficacité des algorithmes génétiques (AG). Inspirés par les mécanismes de sélection naturelle, ces métaheuristiques exploitent leurs opérateurs de sélection, croisement et mutation pour explorer efficacement l'espace des solutions, atteignant des compromis robustes entre réduction des pertes et stabilité des tensions.

Cette modélisation duale (avec/sans SVC) ouvre la voie aux analyses comparatives du chapitre suivant, où seront quantifiés les gains apportés par la compensation réactive dynamique dans l'optimisation topologique des réseaux électriques modernes.

Chapitre III :

Méthodologie

1- Introduction :

La reconfiguration topologique des réseaux de distribution constitue une stratégie d'optimisation visant à atteindre plusieurs objectifs critiques, notamment la réduction des pertes énergétiques, la stabilisation de la tension et l'équilibrage des flux de charge. Elle consiste à ajuster l'état des interrupteurs (ouvert/fermé) du réseau afin de réaliser les objectifs assignés, tout en préservant la structure radiale caractéristique de ces réseaux. [30]

Cette démarche, mise en œuvre statiquement ou dynamiquement selon les capacités d'automatisation, permet typiquement de minimiser les pertes actives et d'améliorer le profil de tension des bus. Le problème ainsi formulé est de nature combinatoire complexe (NP-difficile) : il s'agit de trouver la topologie optimale (choix des liaisons actives) et la meilleure répartition de la compensation SVC sous contraintes de courant et de tension. Dans ce chapitre, la méthodologie adoptée est présentée en détail : on décrira la modélisation du réseau et la fonction objectif (minimisation des pertes techniques), on rappellera les approches classiques de reconfiguration, on soulignera l'intérêt des dispositifs SVC et on expliquera le choix d'un algorithme génétique pour la recherche de la solution optimale. Pour la résolution de notre problématique on a plusieurs méthodes de résolution. Généralement on utilise l'intelligence Artificielle, pour faire cette résolution, on utilise « les algorithmes génétiques », on la projette sur notre cas, on simule les branches principales et les branches Tie-Switch comme des chromosomes. Mais d'abord, on présente quelques définitions.

2- Définition :

2.1- L'intelligence Artificielle :

L'intelligence artificielle (IA) est une branche de l'informatique visant à créer des systèmes capables de reproduire ou de simuler certaines fonctions cognitives humaines, telles que l'apprentissage, le raisonnement, la perception et la prise de décision. En s'appuyant sur de vastes ensembles de données et des algorithmes avancés, l'IA permet aux machines de détecter des schémas, de prédire des résultats et d'interagir en langage naturel avec les utilisateurs [31]

On distingue principalement deux catégories d'IA :

- **IA faible (ou étroite)** : conçue pour accomplir une tâche spécifique (reconnaissance faciale, traduction automatique, recommandations de contenu), sans conscience ni compréhension réelle de ce qu'elle effectue.
- **IA forte (ou générale)** : hypothétique à ce jour, cette forme d'IA viserait à posséder une intelligence comparable à celle de l'être humain, capable de transférer son apprentissage et de raisonner dans des domaines variés

Les applications de l'IA sont nombreuses : en santé, elle assiste le diagnostic médical à partir d'images radiologiques et propose des traitements personnalisés ; dans les transports, elle est au cœur du développement des véhicules autonomes ; en éducation, elle permet de personnaliser les parcours d'apprentissage et d'analyser les performances ; dans le secteur industriel, elle optimise la maintenance prédictive des machines ; enfin, dans la finance, elle détecte les fraudes et gère les portefeuilles d'actifs [32][33]

L'essor rapide de l'IA soulève également des enjeux éthiques, sociaux et économiques :

- **Biais algorithmiques et discrimination** : si les données d'entraînement sont partielles ou reflètent des stéréotypes, les décisions automatisées peuvent reproduire ou amplifier ces biais
- **Vie privée et sécurité** : l'utilisation massive de données personnelles pose des questions de consentement, de confidentialité et de cybersécurité.
- **Impact sur l'emploi** : l'automatisation peut transformer ou supprimer certains métiers, tout en créant de nouveaux autour de la conception, de la gestion et de l'audit des systèmes d'IA.
- **Encadrement réglementaire** : face à ces défis, de nombreuses organisations internationales (OCDE, UNESCO, Commission européenne) élaborent des cadres et des recommandations pour garantir une IA fiable, transparente et respectueuse des droits humains [34][35]

2.2- Les Algorithmes Génétiques :

L'algorithme génétique (AG) est une méta-heuristique d'optimisation et de recherche inspirée du processus de sélection naturelle. Proposé initialement par John Holland dans les années 1970, il appartient à la famille des algorithmes évolutionnaires. L'idée centrale est de faire "évoluer" une population de solutions potentielles grâce à des mécanismes empruntés à la biologie : sélection des plus "aptés", échange de gènes (croisement) et mutations aléatoires, les AG sont basées de quelques éléments, on peut les définir : [36]

1. Chromosome :

Un chromosome dans un algorithme génétique représente la structure codée d'une solution candidate. Il s'agit généralement d'une suite de bits ou de valeurs numériques (appelée génotype) dont l'interprétation (phénotype) correspond à une configuration complète du problème à résoudre. Par exemple, dans la reconfiguration d'un réseau électrique, chaque bit d'un chromosome peut indiquer si un commutateur est ouvert ou fermé. Cette représentation permet de manipuler de façon algorithmique des solutions, comme le ferait la nature avec l'ADN d'un individu, afin de générer de nouvelles configurations via des mécanismes de reproduction et de variation – tout en conservant, chez chaque individu, l'ensemble des informations nécessaires pour simuler le réseau et calculer ses performances.[37]

2. Les opérateurs génétiques :

Les opérateurs génétiques sont des mécanismes inspirés de la biologie qui permettent de générer de nouvelles solutions à partir de celles existantes. Les principaux opérateurs sont :

- **Croisement (crossover) :** combine des segments de deux chromosomes parents pour créer des descendants, favorisant ainsi la recombinaison des caractéristiques avantageuses.
- **Mutation :** introduit des variations aléatoires en modifiant certains gènes, ce qui aide à maintenir la diversité génétique de la population et à explorer de nouvelles régions de l'espace de recherche.

Ces opérateurs sont essentiels pour éviter la convergence prématurée de l'algorithme vers des solutions sous-optimales.[38]

3. Filtrage des solutions :

Le filtrage des solutions consiste à garantir que seuls des chromosomes respectant les contraintes du problème sont évalués ou conservés. Dans un algorithme génétique classique, deux approches existent : soit l'on incorpore une fonction de pénalité qui diminue la fitness des solutions infaisables (on les évalue quand même, mais elles sont désavantagées), soit l'on élimine d'emblée toutes les solutions violant les contraintes, ou encore l'on applique des opérateurs de réparation pour corriger un chromosome non valide avant de l'insérer dans la population. Dans le cas de la reconfiguration de réseau, on teste chaque individu pour vérifier qu'il encode une topologie radiale et qu'il ne viole pas les limites de courant ou de tension. Si une solution enfreint ces règles, on peut soit la rejeter (hard filtering), soit la réparer en réajustant automatiquement certains bits pour rétablir la faisabilité.[39]

4. L'évaluation (FITNESS) :

L'évaluation, ou fonction de fitness, mesure la qualité de chaque solution en fonction de l'objectif à atteindre. Elle attribue un score à chaque chromosome, reflétant son aptitude à résoudre le problème. Ce score guide le processus de sélection en favorisant les solutions les plus performantes. Par exemple, dans un problème de minimisation des pertes de puissance, la fitness peut être définie comme l'inverse des pertes calculées, de sorte que plus la configuration réduit les pertes, plus le score est élevé.

Les contraintes de la fonction fitness dans un problème d'optimisation notamment dans le cadre de la reconfiguration des réseaux de distribution électrique sont des conditions que toute solution candidate doit satisfaire pour être considérée comme valide. Ces contraintes sont souvent formulées sous forme d'équations ou d'inégalités.

Voici les principales contraintes associées à la fonction fitness :

a. Contraintes de continuité du service (radialité) :

La reconfiguration ne doit pas créer de boucles dans le réseau. Le réseau doit rester radial (sans cycles), ce qui est une condition essentielle pour les réseaux de distribution traditionnels.

b. Contraintes de limites de tension (Voltage Limits) :

La tension à chaque nœud (bus) doit rester dans une plage acceptable (souvent $\pm 5\%$ autour de la valeur nominale) :

$$V_{min} \leq V_i \leq V_{max} \dots\dots\dots (22)$$

c. Contraintes thermiques (Courant ou puissance maximale sur chaque ligne) :

Les courants circulant dans les branches ne doivent pas dépasser la capacité thermique des lignes :

$$|I_{ij}| \leq I_{ij}^{max} \dots\dots\dots (23)$$

Où :

$$S_{ij} \leq S_{ij}^{max} \dots\dots\dots (24)$$

d. Équilibre de puissance (Power Balance Constraint) :

La somme des puissances injectées et consommées dans le réseau doit respecter la loi de conservation de l'énergie :

$$\sum P_{Générateur} - \sum P_{charge} - \sum P_{pertes} = 0 \dots\dots\dots (25)$$

e. Contraintes d'ouverture/fermeture des interrupteurs :

Un interrupteur ne peut être qu'ouvert (0) ou fermé (1), c'est une contrainte binaire :

$$s_{ij} \in \{0,1\} \dots\dots\dots (26)$$

5. Sélection

La sélection détermine quels chromosomes seront retenus pour générer la prochaine génération. Des méthodes telles que la sélection par roulette, le tournoi ou la sélection par rang sont utilisées pour privilégier les solutions ayant un meilleur fitness, tout en maintenant une certaine diversité au sein de la population. Par exemple, la sélection par tournoi consiste à choisir aléatoirement un sous-ensemble de la population et à sélectionner le meilleur individu parmi eux pour la reproduction.

2.3- Le fonctionnement des algorithmes génétiques :

Étape	Description
1. Initialisation	Génération aléatoire (ou semi-guidée) des N premiers chromosomes, couvrant l'espace de recherche.
2. Évaluation	Calcul du fitness de chaque chromosome via la fonction définie.
3. Sélection	Choix stochastique des parents, favorisant les individus les plus "fit" (roulette wheel, tournoi, rang, etc.)
4. Croisement	Pour chaque paire de parents, échange de segments de gènes selon un point (one-point, two-point) ou une stratégie plus complexe (toptal.com) (https://www.toptal.com/algorithms/genetic-algorithms).
5. Mutation	Modification aléatoire de quelques gènes (faible probabilité) pour maintenir la diversité et éviter les optima locaux (cylab.be) (https://cylab.be/blog/172/what-is-a-genetic-algorithm-and-how-does-it-work).
6. Élites (optionnel)	Conservation des meilleurs individus sans modification pour garantir l'absence de régression.
7. Remplacement	Construction de la nouvelle génération (taille fixe) à partir des enfants produits (et parfois de quelques parents).
8. Critère d'arrêt	Arrêt lorsque : • un nombre maximal de générations atteint, • un niveau de fitness satisfaisant est obtenu, • budget temps/ressources épuisé, • convergence des fitness...

Tableau III. 1 Tableau de fonctionnement des AG

On représente celui-là dans un organigramme :

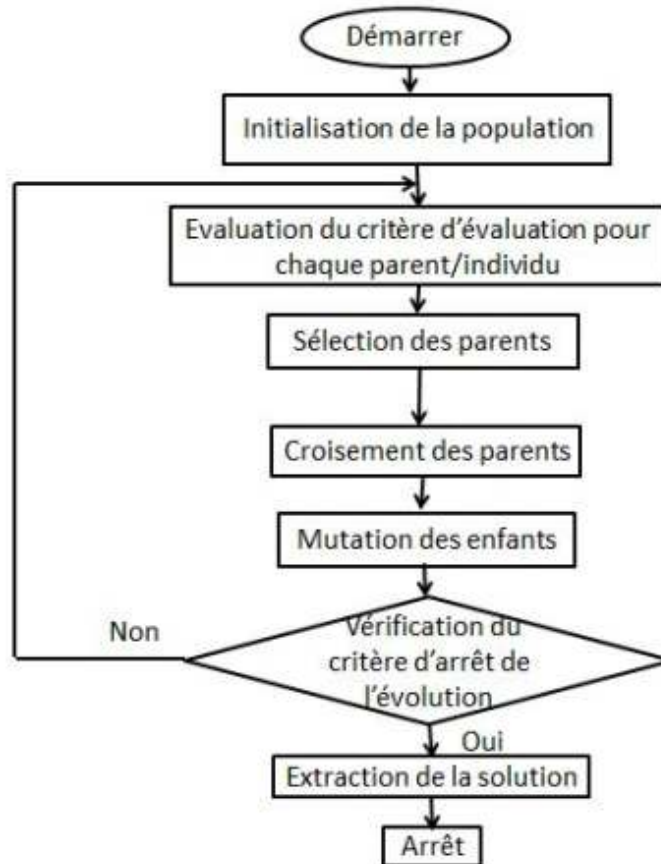


Figure III. 1. Organigramme de GA classique

2.4- L'optimisation :

Le problème d'optimisation vise à déterminer, parmi l'ensemble des configurations possibles d'un système, celle qui conduit à la meilleure valeur d'une « fonction objectif » (coût, rendement, performance, etc.), tout en respectant un ensemble de contraintes propres au modèle. Concrètement, on définit d'abord :

Les variables de décision :

Ce sont les paramètres que l'on peut faire varier pour influencer le comportement du système (par exemple, l'état ouvert/fermé de chaque commutateur dans un réseau électrique, la quantité de production à allouer dans une usine, ou encore les coefficients d'un modèle statistique).

La fonction objective :

C'est l'expression mathématique à optimiser (minimiser ou maximiser). Elle peut représenter un coût à réduire (comme les pertes de puissance, les dépenses en carburant, les heures de

cycle machine, etc.) ou une quantité à augmenter (production maximale, rendement énergétique, couverture de service, etc.). Sous forme symbolique, on note souvent cette fonction :

$$f(x) = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

Où : $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ est le vecteur des variables de décision.

Les contraintes :

Ce sont des conditions qu'il faut impérativement respecter les variables pour que la solution soit valide. Les contraintes peuvent être de différents types :

- **Égalités** (par exemple, bilan d'énergie : $\sum_i x_i = \text{constante}$)
- **Inégalités** (comme des bornes minimales/maximales : $a_j \leq g_j(x) \leq b_j$)
- **Contraintes logiques ou combinatoires** (par exemple, un commutateur ne peut pas être simultanément ouvert et fermé, ou l'allocation d'une ressource ne peut excéder une certaine capacité).

Une fois ces éléments formalisés, l'objectif est clair :

Trouver $x^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$

Tel que : $f(x^*) = \begin{cases} \min(x) f(x) & \text{(problème de minimisation)} \\ \max(x) f(x) & \text{(problème de maximisation)} \end{cases}$

Sous les contraintes :

$$g_i(x) \leq 0 ; \quad i = 1, \dots, m$$

$$h_j(x) = 0 ; \quad j = 1, \dots, p$$

$$x_k \in D_k ; \quad k = 1, \dots, n$$

Où g_i et h_j sont respectivement des fonctions d'inégalité et d'égalité, et D_k désigne le domaine de définition (intervalle réel, ensemble discret, binaire, etc.) de chaque variable x_k .

2.5- L'optimisation de notre cas d'étude :

1- Minimisation des pertes actives :

$$f_1(x) = \sum_{(i,j) \in \delta} P_{loss,ij}(x) = \sum_{(i,j) \in \delta} I_{ij}^2(x) R_{ij} \dots\dots\dots (27)$$

2- Minimisation de la déviation des tensions :

$$f_2(x) = \sum_{i=1}^N |V_i - V_{ref}| \dots\dots\dots (28)$$

Avec V_i est la tension de nœud i et V_{ref} est la tension nominale (généralement 1p.u)

3- Minimisation des pertes réactives :

$$f_3(x) = \sum_{(i,j) \in \delta} Q_{loss,ij}(x) = \sum_{(i,j) \in \delta} I_{ij}^2(x) X_{ij} \dots\dots\dots (29)$$

3- L'application des algorithmes génétiques sur la reconfiguration de réseau de distribution :

L'application des algorithmes génétiques (AG) à la reconfiguration des réseaux de distribution électrique (DNR) s'articule autour de l'optimisation combinatoire de la topologie du réseau afin de réduire les pertes actives et d'améliorer la fiabilité. La reconfiguration consiste à ouvrir ou fermer certains interrupteurs de réseau pour modifier la topologie radiale tout en respectant les contraintes de continuité de service et de tension. Cette problématique est naturellement formulée comme un problème d'optimisation non linéaire et combinatoire, rendant les métaheuristiques comme les AG particulièrement adaptées. [40][41]

Pour appliquer un AG à la DNR, chaque individu de la population encode une configuration possible du réseau, souvent sous forme de chaîne binaire ou via un arbre couvrant assurant la radialité. Par exemple, Gautam et al. proposent un encodage basé sur la recherche de « spanning trees » : seuls les arbres couvrants valides (connectivité et radialité) sont retenus pour l'évaluation, ce qui élimine en amont les solutions non réalisables, qui n'ont pu nous donner des résultats comme il faut. [42]

Dans le cadre de l'algorithme génétique, chaque branche du réseau continue d'être codée par un gène binaire (« 1 » pour une branche fermée, « 0 » pour une branche ouverte), et les positions des bits sont modifiées à chaque itération pour explorer de nouvelles topologies possibles. En présence de dispositifs SVC, on étend ce codage : on ajoute un ou plusieurs gènes supplémentaires pour représenter l'état des SVC (par exemple « 1 » si le

Chapitre III : Méthodologie

SVC est activé dans sa buse optimale, « 0 » sinon). À chaque génération, on fait donc évoluer simultanément (i) la configuration des commutateurs (positions des 1 et 0 dans la partie du chromosome dédiée aux branches) et (ii) les états des SVC (kVAr générés dans la partie dédiée aux dispositifs FACTS), de telle manière que la fonction de fitness prenne en compte non seulement les pertes actives et la contrainte de radialité, mais aussi l'impact des SVC sur l'amélioration du profil de tension et la réduction des courants de réactif. Cette démarche permet de tester, par croisement et mutation, différentes combinaisons de branches et de SVC pour converger vers une topologie de réseau optimale, minimisant les pertes tout en maintenant la qualité de tension requise. On représente l'état de base dans le réseau IEEE 33 et IEEE 118 indiqués dans les tableaux suivants :

1- IEEE 33 :

B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14	B15
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B16	B17	B18	B19	B20	B21	B22	B23	B24	B25	B26	B27	B28	B29	B30
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B31	B32	B33	B34	B35	B36	B37	B38	B39	B40	B41	B42	B43	B44	B45
1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau III. 2 Tableau de chromosome de réseau IEEE 33

2- IEEE 118 :

B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B13	B14	B15	B16	B17	B18	B19	B20	B21	B22	B23	B24
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B25	B26	B27	B28	B29	B30	B31	B32	B33	B34	B35	B36
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B37	B38	B39	B40	B41	B42	B43	B44	B45	B46	B47	B48
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B49	B50	B51	B52	B53	B54	B55	B56	B57	B58	B59	B60
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B61	B62	B63	B64	B65	B66	B67	B68	B69	B70	B71	B72
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B73	B74	B75	B76	B77	B78	B79	B80	B81	B82	B83	B84
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B85	B86	B87	B88	B89	B90	B91	B92	B93	B94	B95	B96
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B97	B98	B99	B100	B101	B102	B103	B104	B105	B106	B107	B108
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B109	B110	B111	B112	B113	B114	B115	B116	B117	B118	B119	B120
1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
B121	B122	B123	B124	B125	B126	B127	B128	B129	B130	B131	B132
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau III. 3. Tableau de chromosome de réseau IEEE 118

Les autres chromosomes du vecteur sont déterminés aléatoirement de telle façon qu'on génère dans le réseau 33 cinq 0 positionnés dans des endroits quelconques de 2 à 37 des branches. Dans le réseau 118, nous avons 15 positions aléatoires de valeur 0 parmi 132 branches. Les chromosomes de vecteur de dispositifs SVC sont aussi déterminés d'une façon aléatoire. Six positions seulement ont des valeurs non nulles. Ceci est fait pour limiter le nombre de SVC à installer dans le réseau.

3.1- Algorithmes d'Optimisation Utilisés :

1. Méthode Classique (cas de base) : Recherche Exhaustive

a. Principe générale :

La recherche exhaustive, aussi appelée brute force, consiste à tester toutes les configurations possibles du réseau de distribution électrique afin d'identifier celle qui optimise un ou plusieurs critères (minimisation des pertes de puissance, amélioration du profil de tension, etc.). Chaque solution possible est évaluée en utilisant les équations de charge et de puissance du réseau.

b. Implémentation :

Dans un réseau de distribution typique à 33 bus, il existe un ensemble de commutateurs normalement ouverts (Normally Open – NO) et fermés (Normally Closed – NC). En générant toutes les combinaisons valides (respectant la radialité du réseau), on

évaluation l'objectif de chaque solution (par exemple, pertes actives totales) via une simulation de flux de puissance.

c. Limitations :

- Explosion combinatoire : Le nombre de solutions croît exponentiellement avec le nombre de commutateurs, rendant cette méthode inapplicable pour les grands réseaux.
- Temps de calcul élevé : Impraticable en temps réel ou pour des réseaux dynamiques.
- Utilité limitée : Sert principalement comme référence ou pour des réseaux de petite taille.

Exemple : Pour un réseau 33-bus avec 5 interrupteurs, $2^5=32$ configurations. Mais dans un réseau plus complexe, ce nombre dépasse rapidement plusieurs milliers voire millions.

3.2- Mise en œuvre sur MATLAB :

La mise en œuvre de la reconfiguration d'un réseau de distribution électrique sous MATLAB s'appuie généralement sur **MATPOWER**, une boîte à outils open-source développée pour la simulation de réseaux d'énergie en régime permanent. Cette section décrit la structure générale du code, la représentation du réseau, l'algorithme de calcul des pertes, l'interface de simulation et les diagrammes de flux associés. Les exemples et références techniques sont basés sur la documentation officielle de MATPOWER (2011)

4- Algorithme de calcul :

1. Entrées :

- Données du réseau : (matrice de connexions, résistances R_k , réactances X_k , puissances demandées, limites de tension, courants max)
- Nombre de nœuds N , nombre de branches L
- Fonction objective à minimiser $f(ch)$
- Métaheuristique choisie (ex : GA, ...)

2. Sortie :

- Solution optimale ch^*
- Valeur minimale de la fonction objectif f^*
- Topologie du réseau associée à ch^*

Points importants selon méthode :

Étape	Algorithmes Génétiques
Génération de solution	Croisement + mutation
Critère d'acceptation	Sélection par fitness
Filtrage / radialité	Vérifiée après mutation
Convergence	Max générations / convergence fitness

Tableau III. 4. Les étapes de chaque méthode

4.1- Critères d'évaluation :

1. Pertes de puissance active (kW) :

La perte de puissance active d'un réseau de distribution est l'énergie active dissipée (principalement par effet Joule) lors du transport. Elle se calcule classiquement par la somme des pertes résistives sur chaque tronçon :

$$P_{loss} = \sum_l I_l^2 R_l \dots\dots\dots (30)$$

I_l est le courant efficace dans le tronçon L et R_l sa résistance. Pour l'évaluer en pourcentage, on exprime souvent P_{LOSS} en fraction de la charge totale. Un faible pourcentage signifie une exploitation efficace du réseau (peu de pertes), ce qui est l'objectif principal de la reconfiguration. Par exemple, sur l'IEEE 33-bus, les pertes actives initiales étaient de 202,68 kW (5,46 % de la charge totale) et ont été réduites à 48,02 kW (1,29 % de la charge) après reconfiguration. Cela représente une réduction d'environ 76 % des pertes. Des études similaires montrent des ordres de grandeur comparables ($\approx 70-75$ % de réduction). Dans un réseau plus grand (IEEE 118-bus), des cas rapportent aussi des pertes actives initiales de l'ordre de 1,3 MW, ramenées à $\approx 0,85$ MW après optimisation. En résumé, cet indicateur (en %) quantifie l'efficacité énergétique du réseau : plus il est bas, moins il y a de pertes actives.

2. Déviation de tension (p.u) :

La déviation de tension mesure l'écart des tensions aux nœuds par rapport à la valeur nominale (1.0 p.u.). Un indice simple est la déviation moyenne relative : $V D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |V_i - 1| \times 100\%$ est la tension (en p.u.) au nœud i . L'interprétation est la suivante : $V D = 0\%$ représente toutes tensions à 1.0 p.u. (idéal), tandis qu'une valeur élevée signale des tensions basses/hautes non souhaitables. La reconfiguration vise à minimiser cet écart. Par exemple,

dans l'IEEE 33-bus non reconfiguré, la tension minimale était de 0,9131 p.u. (écart de – 8,69 %); après reconfiguration optimale, cette tension minimale remonte à $\approx 0,9758$ p.u. (écart de – 2,42 %), indiquant un profil de tension plus homogène. En pratique, on observe typiquement une amélioration de quelques points de pourcentage sur ces réseaux après reconfiguration optimisée. Cet indicateur (en %) reflète la qualité de tension : plus il est faible, plus le réseau maintient des tensions proches du nominal, ce qui est favorable à la stabilité du service.

3. Nombre de commutations :

Le nombre de commutations compte les opérations d'ouverture/fermeture de disjoncteurs nécessaires pour passer de la configuration initiale à la nouvelle configuration. Formellement, on peut l'exprimer par :

$$N_{sw} = \sum_i | s_i^{apres} - s_i^{avant} | \dots\dots\dots (31)$$

Vaut 1 si l'interrupteur i est fermé (0 s'il est ouvert) avant et après reconfiguration. Ce critère, exprimé en nombre total d'actions, évalue l'effort opérationnel requis. Il est souvent considéré comme un objectif auxiliaire (on cherche à le minimiser) afin de limiter les coûts et risques de manœuvre. Par exemple, dans une étude dynamique sur l'IEEE 33-bus, la reconfiguration quotidienne n'a nécessité que deux commutations au total (un seul interrupteur passant deux fois d'état). Dans d'autres applications on fixe une limite (par ex. 10–20 commutations maximum par période) afin de garantir la faisabilité opérationnelle. Un N_{sw} faible signifie donc une solution plus simple à mettre en œuvre, tandis qu'un nombre élevé peut être économiquement et techniquement pénalisant. Ce critère (sans unité) complète l'analyse : deux configurations avec pertes comparables peuvent être départagées selon leur nombre de manœuvres.

4.2- Pertes de puissance réactive (kVAr) :

La perte de puissance réactive évalue l'énergie réactive « dissipée » ou inutilement véhiculée dans le réseau (liée aux réactances des lignes). Elle se calcule analogiquement aux pertes actives, par exemple $Q_{loss} = \sum_l I_l^2 X_l$, en comparant la puissance réactive injectée et la puissance consommée. Exprimée en pourcentage de la demande réactive totale elle indique l'inefficacité sur le plan réactif. La reconfiguration cherche à réduire ce gaspillage, ce qui aide à contrôler les tensions. Sur l'IEEE 33-bus étudié, les pertes réactives initiales étaient de 135,16 kVAr (5,88 % de la demande) et sont tombées à 47,28 kVAr (3,81 %) après

optimisation. Autrement dit, la perte réactive a diminué d'environ 65 % grâce à la reconfiguration. D'autres travaux rapportent typiquement des réductions de l'ordre de 40–60 % des pertes réactives après reconfiguration optimisée. Un pourcentage de perte réactive plus faible signifie moins de circulation de vars parasites et donc un système plus stable (meilleure capacité de régulation de tension).

5- Conclusion :

En conclusion, le troisième chapitre a présenté de manière détaillée la méthodologie retenue pour résoudre notre problématique de reconfiguration des réseaux de distribution électrique. Après avoir défini les concepts clés de l'intelligence artificielle et plus particulièrement des algorithmes génétiques, nous avons exposé leur adaptation au contexte spécifique de la Distribution Network Reconfiguration (DNR). Grâce à l'encodage de configurations réseau sous forme de chromosomes et à l'usage d'opérateurs biologiquement inspirés (sélection, croisement, mutation), l'algorithme génétique se révèle particulièrement efficace pour explorer l'espace combinatoire des topologies radiales tout en respectant les contraintes de continuité de service et de tension.

L'application de cette approche à la reconfiguration de réseau permet non seulement de minimiser les pertes actives, mais aussi d'améliorer la fiabilité globale du système. Les études de cas présentées (encodage par arbres couvrants, élimination a priori des solutions non valides) montrent la robustesse et la flexibilité des AG face à la complexité non linéaire du problème. Par ailleurs, la modularité de cette méthode ouvre la voie à la prise en compte de nouvelles dimensions, telles que l'intégration des énergies renouvelables ou la gestion active de la demande.

Chapitre IV: Résultats
et interprétation

1- Introduction :

Dans ce chapitre, on présente les résultats de la reconfiguration des réseaux de distribution électrique en présence de dispositifs SVC et on les discute. L'optimisation de la topologie a été réalisée à l'aide d'algorithmes génétiques, métaheuristiques inspirées de la sélection naturelle, adaptées pour traiter séparément deux objectifs : la minimisation des pertes actives et réactives du réseau, et la minimisation des déviations de tension par rapport à la valeur nominale. L'ensemble des simulations a été réalisé sous MATLAB via l'extension MATPOWER 8.0, qui offre un environnement complet pour l'optimisation radiale des réseaux. Les jeux de données étudiés comprennent deux topologies de 33 et 118 nœuds ; les résultats obtenus sont ensuite présentés et discutés, afin de mettre en évidence la performance de chaque critère et l'apport des SVC dans l'amélioration de l'efficacité énergétique et de la qualité de la tension.

2- Les Réseaux étudiés :

1. Réseau IEEE 33 (33 nœuds):

Le réseau de 33 nœuds est un réseau radial de distribution moyenne tension (13,8 kV) originellement proposé par Baran et Wu (1989) et largement repris dans MATPOWER. Il se compose de 32 lignes et de 33 postes (buses), alimentés par un transformateur au poste 1 d'une puissance nominale de 3 MVA. La charge est répartie en sept zones pour un total nominal d'environ 3 715 kW, avec des facteurs de charge variant typiquement de 60 % à 100 % selon les scénarios temporels. Chaque arête de ce graphe radial est munie d'interrupteurs permettant la reconfiguration topologique.

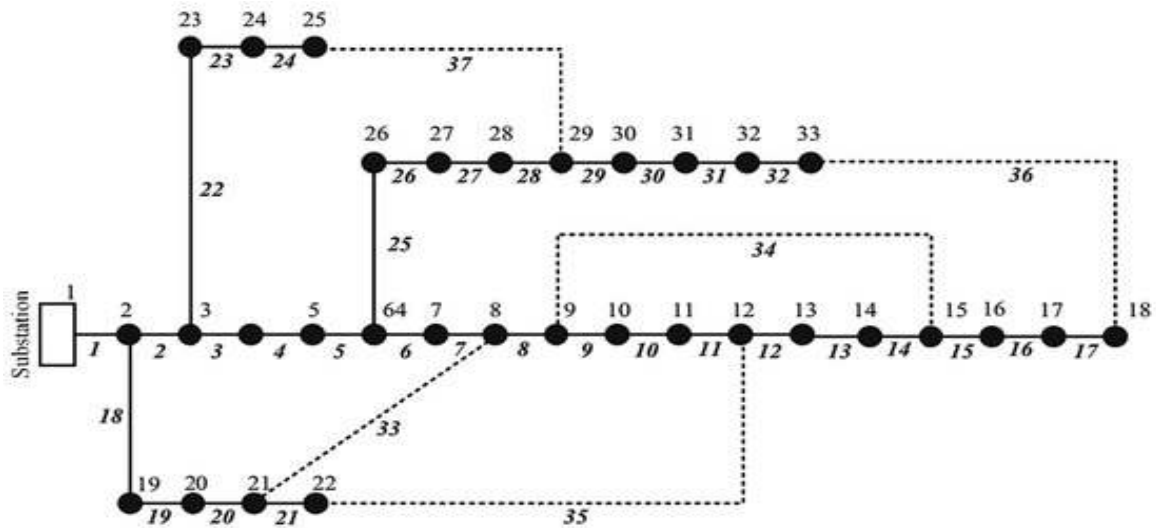


Figure IV. 1. Schéma de Réseau de distribution de 33 nœuds

2. Réseau IEEE 118 (118 nœuds) :

Le réseau IEEE 118-bus est un système de transmission haute tension (principalement 230 kV) constitué de 118 nœuds, 186 lignes et 54 unités de production. Il inclut également 91 charges réparties sur l'ensemble du réseau, pour une base MVA de 100 et des tensions de fonctionnement variant entre 138 kV et 345 kV. Ce cas de test, converti depuis le format CDF de l'IEEE, sert de référence pour valider les algorithmes de flux de puissance et d'optimisation, et peut être adapté à la reconfiguration radiale pour des études de distribution étendue.

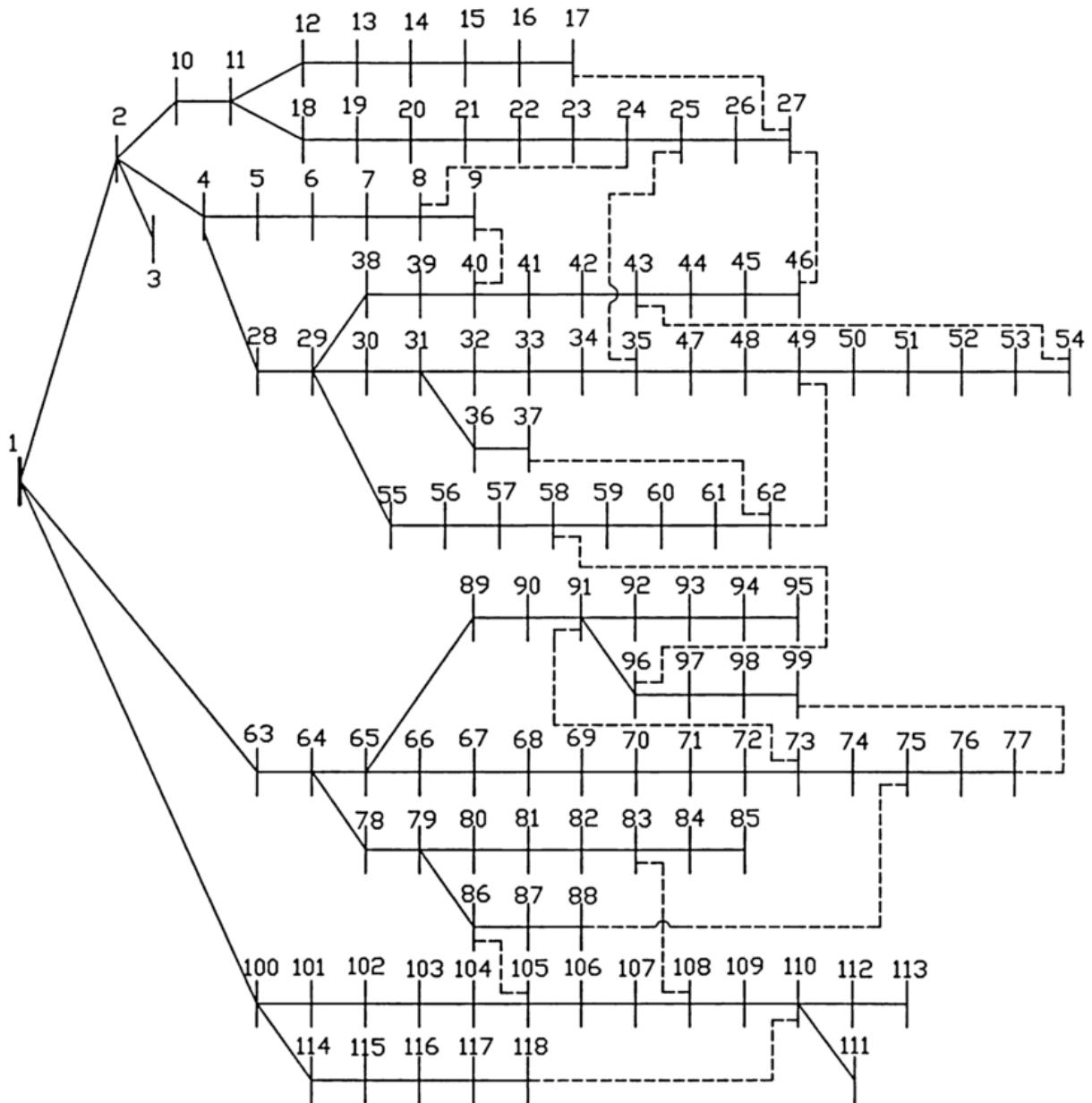


Figure IV. 2. Schéma de réseau de distribution de 118 nœuds

Remarque : Le reste de données est cité dans l'Annexe

3- Configuration Initiale :

a. Chromosome initiale :

1- Réseau de 33 nœuds:

B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14	B15
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B16	B17	B16	B17	B18	B19	B20	B21	B22	B23	B24	B25	B26	B27	B28

Chapitre IV : Résultats et interprétation

1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B29	B30	B31	B32	B33	B34	B35	B36	B37						
1	1	1	1	0	0	0	0	0						

Tableau IV. 1. Chromosome initiale de réseau IEEE 33

2- Réseau de 118 nœuds :

B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B13	B14	B15	B16	B17	B18	B19	B20	B21	B22	B23	B24
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B25	B26	B27	B28	B29	B30	B31	B32	B33	B34	B35	B36
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B37	B38	B39	B40	B41	B42	B43	B44	B45	B46	B47	B48
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B49	B50	B51	B52	B53	B54	B55	B56	B57	B58	B59	B60
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B61	B62	B63	B64	B65	B66	B67	B68	B69	B70	B71	B72
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B73	B74	B75	B76	B77	B78	B79	B80	B81	B82	B83	B84
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B85	B86	B87	B88	B89	B90	B91	B92	B93	B94	B95	B96
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B97	B98	B99	B100	B101	B102	B103	B104	B105	B106	B107	B108
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B109	B110	B111	B112	B113	B114	B115	B116	B117	B118	B119	B120
1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
B121	B122	B123	B124	B125	B126	B127	B128	B129	B130	B131	B132
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau IV. 2. Chromosome initiale de réseau IEEE 118

Remarque : Sachant que les cases qu'ont un « 1 » veut-dire les branches « *enservice* », et les cases qu'ont un « 0 » veut-dire les branches « *hors services* »

b. Structure initiale :

1- Réseau de 33 nœuds :

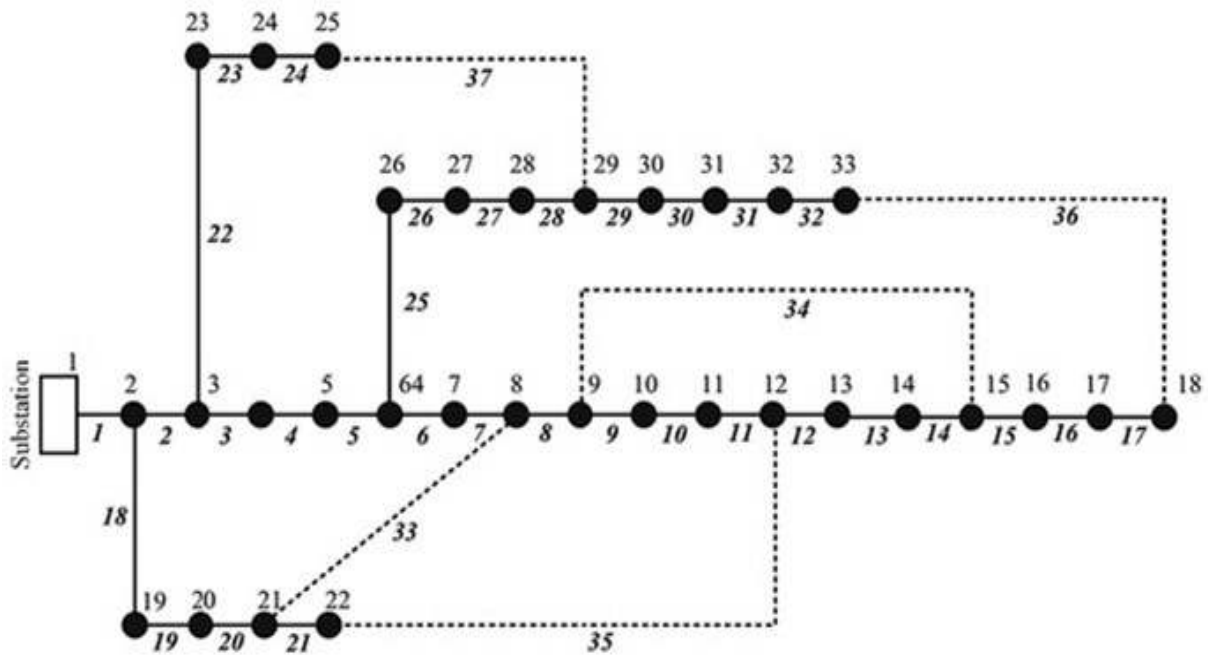


Figure IV. 3. Schéma initial du réseau de 33 nœuds

2- Réseau de 118 nœuds :

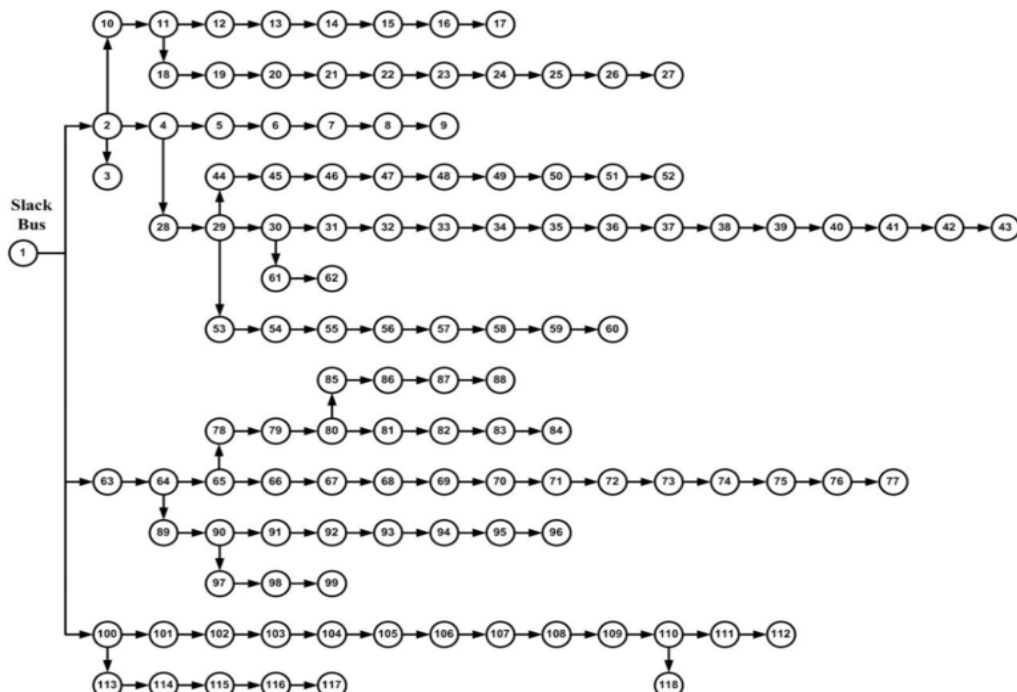


Figure IV. 4. Schéma initial du réseau de 118 nœuds

c. Résultat de l'écoulement de puissance de la configuration initial :

1- Réseau de 33 nœuds :

Le tableau ci-après synthétise les résultats de l'analyse de l'écoulement de puissance pour la configuration initiale du réseau de distribution IEEE à 33 nœuds, enprésentant les valeurs des tensions (enunités relatives) ainsi que les pertescorrespondantes.

N° du nœud	Tension V (p.u)	N° du nœud	Tension V (p.u)	N° du nœud	Phase de V (rad)
1	1.0000	12	0.9263	23	0.0005
2	0.9970	13	0.9231	24	-0.0004
3	0.9842	14	0.9172	25	-0.0004
4	0.9763	15	0.9148	26	0.0015
5	0.9669	16	0.9143	27	0.0025
6	0.9548	17	0.9117	28	0.0039
7	0.9465	18	0.9114	29	0.0053
8	0.9452	19	0.9949	30	0.0071
9	0.9429	20	0.9905	31	0.0057
10	0.9331	21	0.9885	32	0.0052
11	0.9292	22	0.9852	33	0.0051

Tableau IV. 3. les résultats de l'analyse de l'écoulement de puissance pour IEEE 33

2- Réseau de 118 nœuds :

N° du nœud	Tension V (p.u)	N° du nœud	Tension V (p.u)	N° du nœud	Tension V (p.u)
1	1.0400	41	0.9895	81	0.9959
2	1.0433	42	0.9943	82	0.9959
3	1.0354	43	0.9993	83	0.9989
4	1.0238	44	0.9962	84	1.0034
5	1.0227	45	0.9944	85	1.0027
6	1.0252	46	0.9948	86	0.9934
7	1.0197	47	0.9943	87	1.0038
8	1.0141	48	0.9973	88	1.0049
9	1.0179	49	0.9952	89	0.9992
10	1.0121	50	0.9654	90	1.0085
11	1.0110	51	0.9892	91	1.0088
12	1.0182	52	0.9934	92	0.9973
13	1.0175	53	0.9937	93	0.9997
14	1.0128	54	0.9728	94	1.0023
15	1.0056	55	0.9958	95	1.0012
16	1.0043	56	0.9919	96	0.9776
17	1.0049	57	0.9923	97	0.9763
18	1.0066	58	0.9752	98	1.0043
19	1.0080	59	1.0034	99	1.0013
20	1.0147	60	0.9941	100	1.0020

21	1.0063	61	0.9932	101	0.9821
22	1.0074	62	0.9948	102	0.9754
23	1.0072	63	0.9689	103	0.9798
24	1.0052	64	0.9955	104	1.0024
25	1.0062	65	0.9934	105	1.0014
26	1.0083	66	0.9761	106	1.0017
27	1.0094	67	1.0015	107	0.9782
28	1.0098	68	1.0024	108	0.9954
29	1.0019	69	0.9998	109	0.9765
30	1.0030	70	0.9739	110	0.9963
31	1.0094	71	0.9665	111	0.9610
32	1.0095	72	0.9976	112	0.9903
33	1.0026	73	1.0037	113	1.0036
34	0.9983	74	0.9649	114	0.9945
35	0.9970	75	0.9979	115	1.0015
36	1.0001	76	0.9896	116	1.0002
37	1.0000	77	0.9990	117	1.0025
38	0.9979	78	0.9981	118	1.0021
39	1.0021	79	0.9746		
40	0.9951	80	0.9767		
Les pertes actives (kW)			22,08		
Les pertesréactives (kVAr)			7,82		

Tableau IV. 4. Les résultats de l'analyse de l'écoulement de puissance pour IEEE 118

4- Configuration Optimale :

Après avoir étudié l'écoulement de puissance sur deux réseaux de distribution — l'IEEE 33 Bus et l'IEEE 118 Bus — nous avons constaté que, malgré leurs différences de taille et de topologie, les pertes actives et réactives restaient excessives dans les deux cas. Pour remédier à ce problème, en plus de la reconfiguration classique par permutation des branches (qui permet d'optimiser le cheminement du flux dans un régime normal où toutes les variables sont connues), nous avons implanté cinq compensateurs capacitifs (Qc) répartis à des nœuds choisis aléatoirement dans chacun des réseaux afin d'améliorer le profil de tension et de réduire le courant de charge global. Après avoir défini les contraintes associées à ces injections réactives (tension de chaque bus à maintenir dans l'intervalle $\pm 5\%$ de la référence, limites thermiques des lignes, etc.), nous avons recouru à une optimisation par algorithmes génétiques — une méthode évolutive capable, contrairement aux approches déterministes classiques, de rechercher le minimum global de la fonction objectif en évitant de rester piégé dans des optima locaux. Dans ce cadre, chaque individu représente une configuration donnée (combinaison des branches ouvertes/fermées et positionnement des Qc), et la qualité de chaque individu est évaluée via une fonction d'aptitude (fitness) qui agrège les pertes totales actives et réactives calculées par un

power flow AC, tout en vérifiant le respect des limites de tension. Au fil des générations, la fitness guide la sélection des meilleurs individus pour la reproduction, lesquels sont croisés et mutés afin de générer une nouvelle population, jusqu'à ce que le critère d'arrêt (convergence de la fitness ou nombre maximal de générations) soit atteint, délivrant ainsi la configuration optimale — c'est-à-dire le jeu de permutations de branches et la localisation idéale des cinq Qc qui minimise les pertes sur chacun des deux réseaux.

5- Résultats et discussion :

a. Réseau IEEE 33 :

1- Minimisation des pertes Actives :

On a travaillé avec 50 nombres de génération.

1.1- Chromosomes de la reconfiguration optimale :

La configuration optimale du réseau IEEE à 33 nœuds est représentée par le chromosome suivant :

B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14	B15
1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1
B16	B17	B16	B17	B18	B19	B20	B21	B22	B23	B24	B25	B26	B27	B28
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
B29	B30	B31	B32	B33	B34	B35	B36	B37						
1	1	1	1	0	1	1	0	1						

Tableau IV. 5. Chromosomes de la reconfiguration optimale du 1er cas

Remarque : Sachant que les cases en orange du tableau représentent les branches « en service », et les cases en gris et écrites en rouges représentent les branches « hors services ».

1.2- Résultat de l'écoulement de puissance :

Le tableau ci-dessous présente les résultats du flux de puissance pour la configuration optimale du réseau IEEE à 33 nœuds, faisant apparaître les différentes tensions (p.u.) ainsi que les pertes :

N° du nœud	Tension V (p.u)	N° du nœud	Tension V (p.u)	N° du nœud	Tension V (p.u)
------------	-----------------	------------	-----------------	------------	-----------------

1	0.9973	12	0.9596	23	0.9689
2	0.9874	13	0.9588	24	0.9601
3	0.9851	14	0.9533	25	0.9793
4	0.9830	15	0.9520	26	0.9790
5	0.9795	16	0.9503	27	0.9785
6	0.9783	17	0.9497	28	0.9568
7	0.9753	18	0.9958	29	0.9545
8	0.9578	19	0.9834	30	0.9510
9	0.9605	20	0.9800	31	0.9503
10	0.9610	21	0.9746	32	0.9501
11	0.9621	22	0.9811	33	0.9500
Les pertes actives (kW)			20.8459		
Les pertes réactives (kVAR)			11.1673		

Tableau IV. 6. Résultat de l'écoulement de puissance du 1er cas

On a représenté le graphe des pertes actives et réactives en (p.u) du précédent tableau de chaque nœud de la configuration optimale dans la figure suivante :

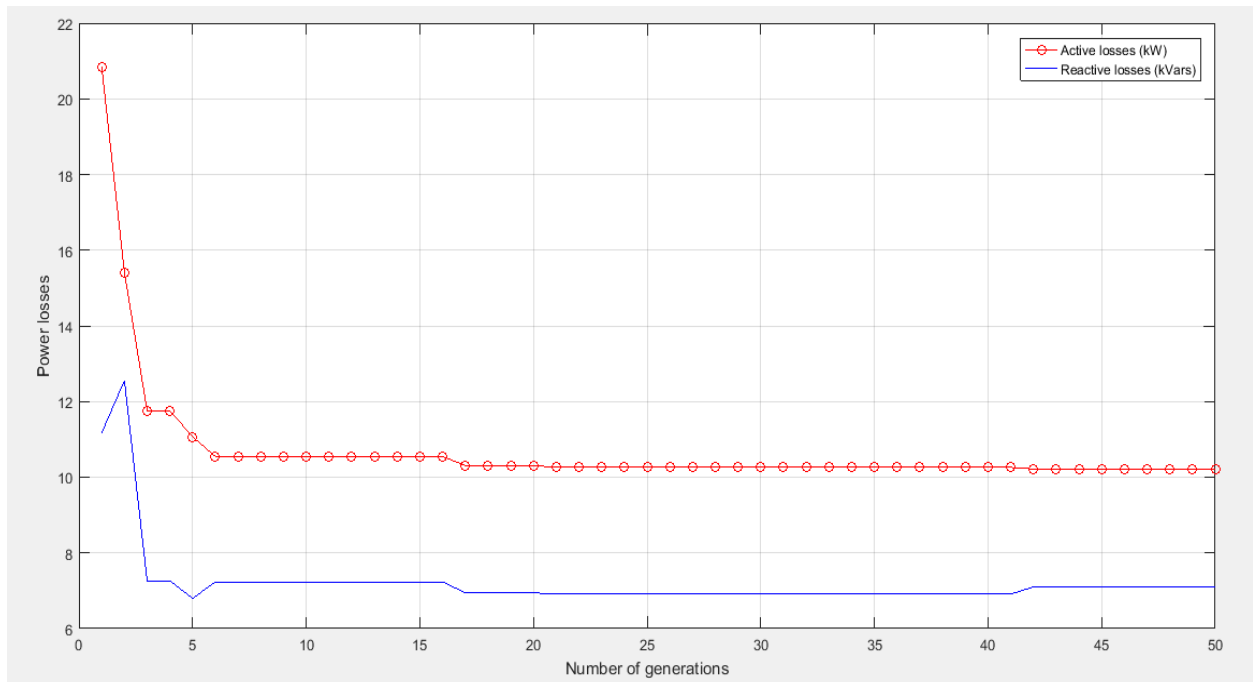


Figure IV. 5. Graphe des résultats de l'écoulement de puissance du 1er cas

1.3- Résultats de génération des dispositifs SVC :

Les places des dispositifs SVC générés de façon aléatoire dans les 33 nœuds du réseau et l'énergie réactive sont indiqués dans le tableau suivant :

N° de nœud	Valeur de Qc (p.u)
6	0.0400
8	0.1000
14	0.2000
25	0.0250
30	0.6000
31	0.1000

Donc le vecteur ch de chromosome des dispositifs SVC est :

Ch= {0,0,0,0,0,1,0,1,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,1,1,0,0}

Remarque : On constate d'abord une chute rapide des pertes actives de 21 kW à 11 kW et des pertes réactives de 12,5 kVAr à 7,2 kVAr en cinq générations, puis une poursuite plus lente de la baisse des pertes actives jusqu'à 10,3 kW tandis que les pertes réactives se stabilisent autour de 7,0 kVAr dès la cinquième génération, avant qu'au-delà de la dixième génération l'ensemble des pertes reste quasi constant, témoignant de la convergence de l'algorithme.

1.4- Structure optimale :

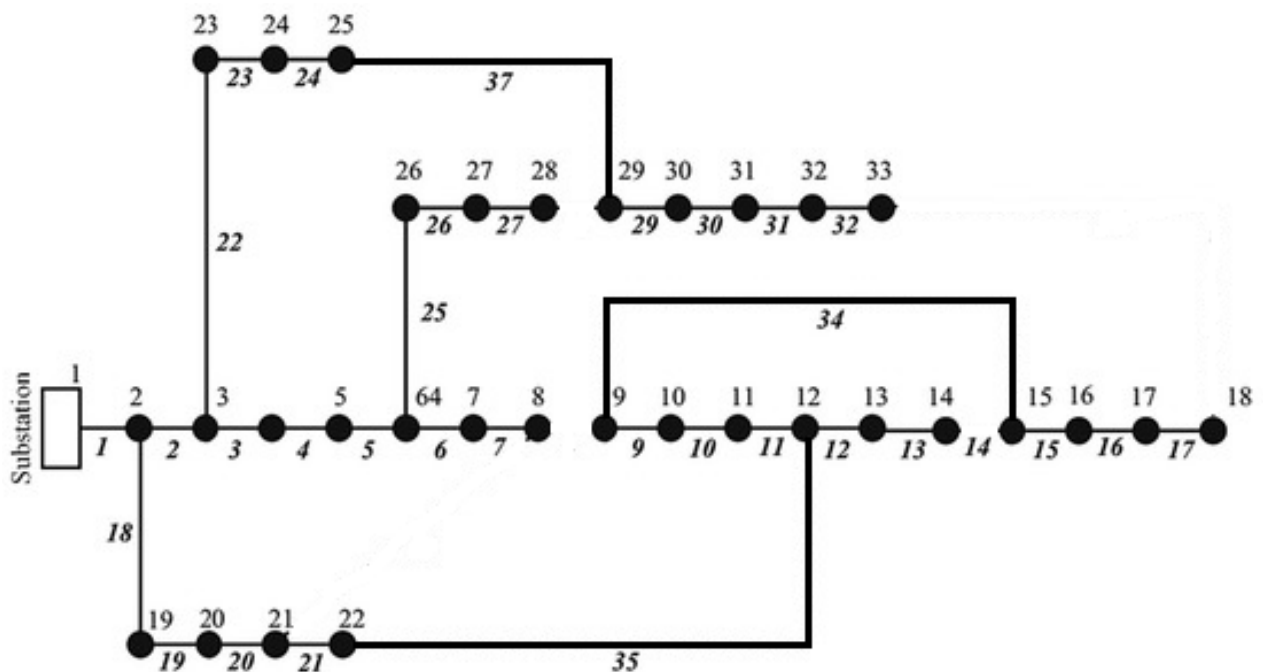


Figure IV. 6. Structure Optimale du 1er cas

2- Minimisation de déviation de tension :

2.1- Chromosomes de la reconfiguration optimale :

La configuration optimale du réseau IEEE à 33 nœuds est représentée par le chromosome suivant :

B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14	B15
1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
B16	B17	B18	B19	B20	B21	B22	B23	B24	B25	B26	B27	B28	B29	B30
1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
B31	B32	B33	B34	B35	B36	B37	B38	B39	B40	B41	B42	B43	B44	B45
1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tableau IV. 7. Chromosomes de la reconfiguration optimale du 2ème cas

Remarque : Sachant que les cases en orange du tableau représentent les branches « **en service** », et les cases en gris et écrites en rouges représentent les branches « **hors services** ».

2.2- Résultat de l'écoulement de puissance :

N° du nœud	Tension V (p.u)	N° du nœud	Tension V (p.u)	N° du nœud	Tension V (p.u)
1	0.9973	12	0.9596	23	0.9689
2	0.9874	13	0.9588	24	0.9601
3	0.9851	14	0.9533	25	0.9793
4	0.9830	15	0.9520	26	0.9790
5	0.9795	16	0.9503	27	0.9785
6	0.9783	17	0.9497	28	0.9568
7	0.9753	18	0.9958	29	0.9545
8	0.9578	19	0.9834	30	0.9510
9	0.9605	20	0.9800	31	0.9503
10	0.9610	21	0.9746	32	0.9501
11	0.9621	22	0.9811	33	0.9500
Les pertes actives (kW)			20.8459		
Les pertes réactives (kVAR)			11.1673		

Tableau IV. 8. Résultat de l'écoulement de puissance du 2ème cas

On a représenté le graphe des différentes tensions en (p.u) du précédent tableau de chaque nœud de la configuration optimale dans la figure suivante :

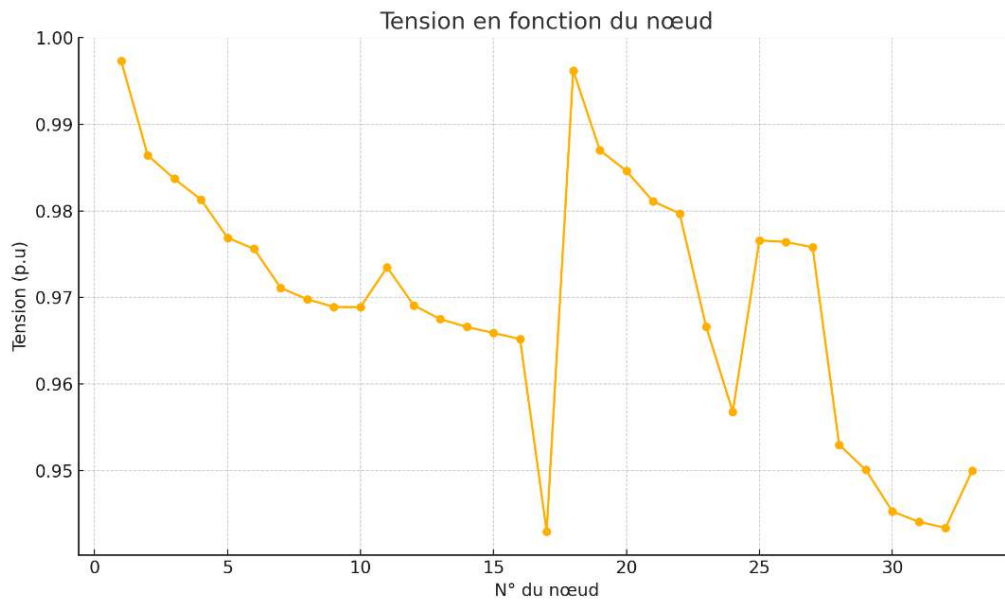


Figure IV. 7. Les niveaux de tensions de chaque nœud

⇒ On remarque une baisse progressive de la tension jusqu'au nœud 17, suivie d'une chute sèche et d'un pic au nœud 18, puis une nouvelle descente avec quelques oscillations vers un creux aux nœuds 30–31 avant une légère reprise finale.

2.3- Différence entre la version optimale et version originale en déviation de tension :

On représente la différence dans ce graphe :

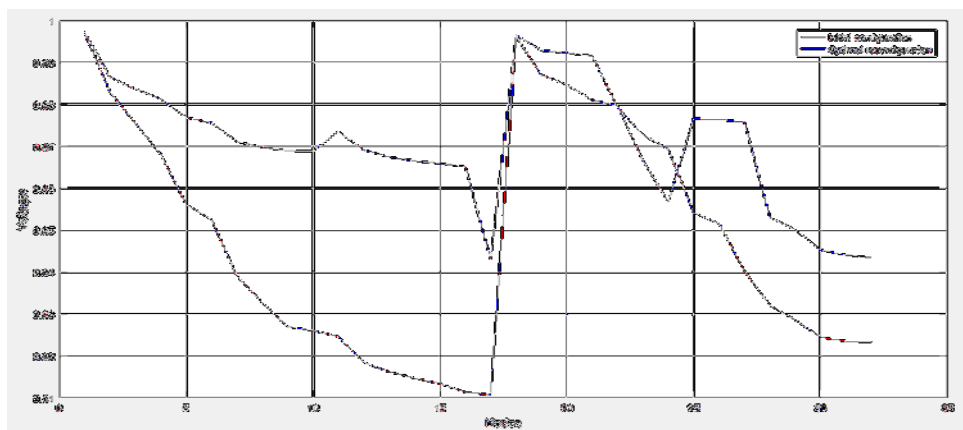


Figure IV. 8. Différence entre la version optimale et version originale en déviation de tension

⇒ On remarque que la reconfiguration optimale relève globalement les tensions par rapport à la configuration initiale, atténuant la forte chute jusqu'au nœud 17 et les creux entre les nœuds 24–27 tout en maintenant un profil plus homogène.

2.4- Structure optimale :

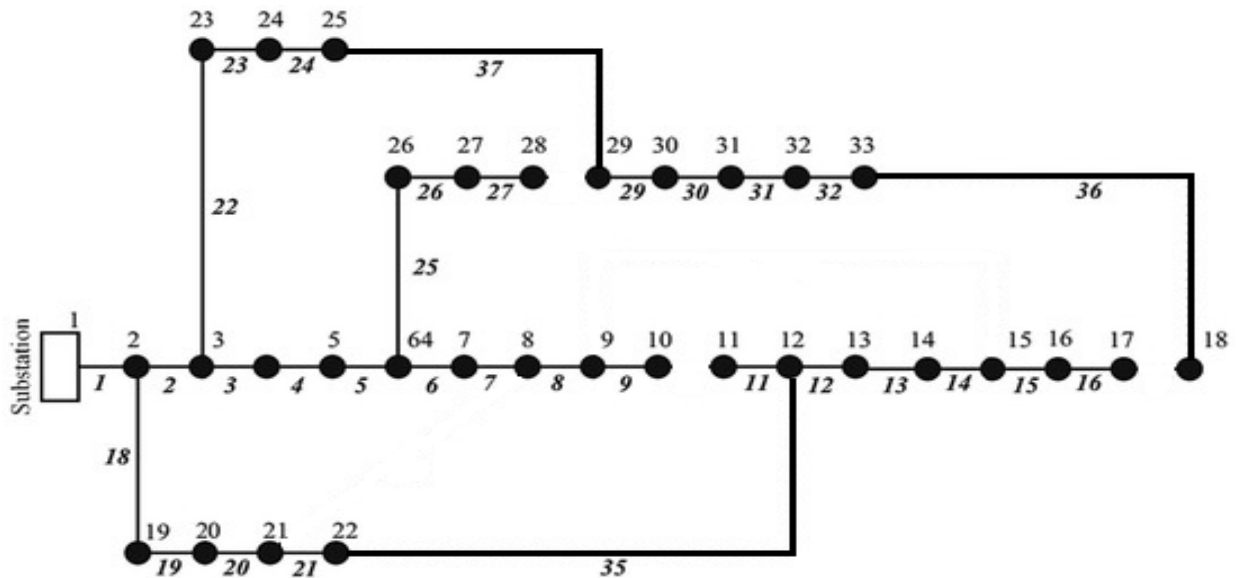


Figure IV . 9. Structure Optimale du 2ème cas

3- Minimisation des pertesréactives :

3.1- Chromosome de la reconfiguration optimale :

B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14	B15
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
B16	B17	B16	B17	B18	B19	B20	B21	B22	B23	B24	B25	B26	B27	B28
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B29	B30	B31	B32	B33	B34	B35	B36	B37						
1	1	1	1	0	0	1	0	0						

Tableau IV. 9. Chromosome de la reconfiguration optimale du 3ème cas

3.2- Résultats des pertes :

Les pertes actives (kW)	11.14
Les pertesréactives (kVAr)	6.68

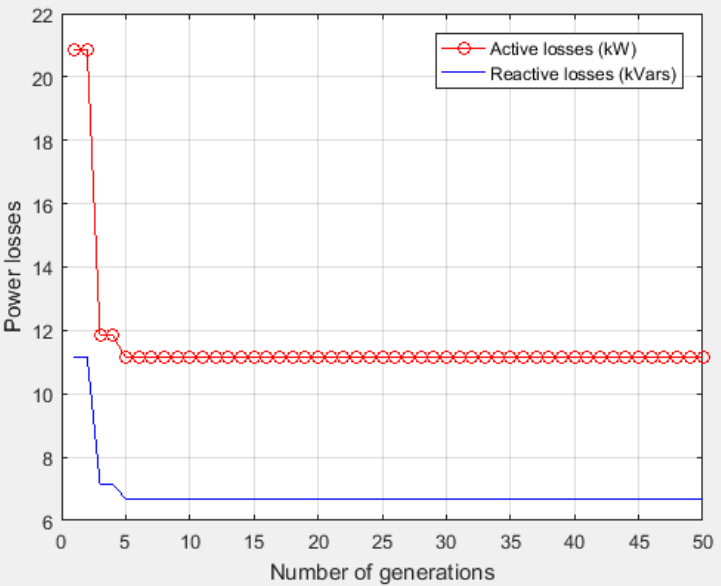
La figure des pertes	 Figure IV . 10. Graphe d'évolution des pertes
Les remarques au graphe	On remarque que les pertes actives et réactives diminuent rapidement dès les premières générations, puis se stabilisent très tôt, autour de la 5^e génération. Les pertes actives se fixent autour de 11,5 kW et les pertes réactives autour de 6,5 kVars, ce qui montre une convergence rapide de l'algorithme utilisé.

Tableau IV. 10. Résultats des pertes du 3^{ème} cas

3.3- Structure optimale :

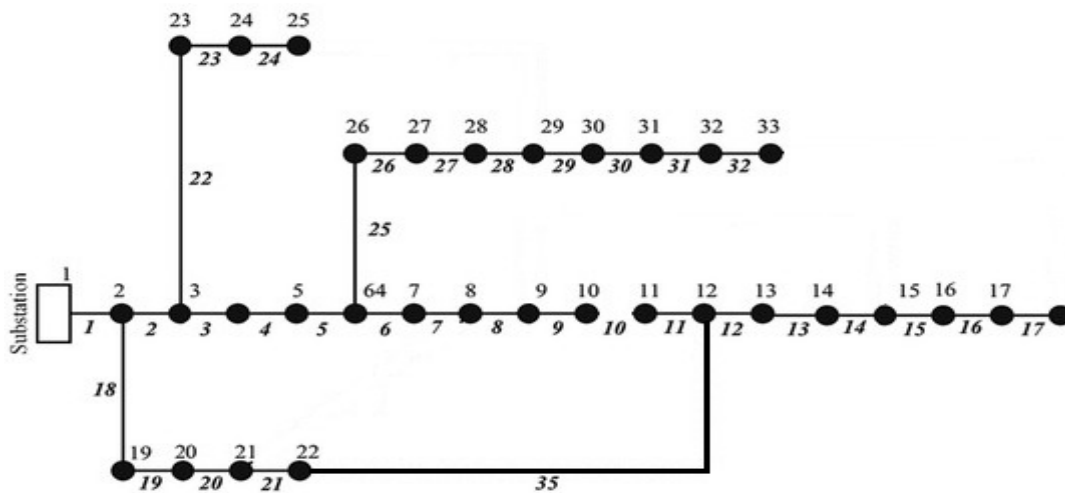


Figure IV.11. structure optimale du 3^{ème} cas

4- Discussion de résultats et interprétation :

4.1- Cas de minimisation des pertes actifs :

Dans la configuration « initiale », on observe des tensions en nœuds variant de 1,0000 p.u. au nœud 1 jusqu'à 0,9118 p.u. au nœud 33, traduisant une chute de tension cumulée d'environ 8,82 % le long du réseau. Les pertes actives s'élèvent à 193,6107 kW et les pertes réactives à 142,0894 kVAR, ce qui montre une inefficience notable liée à la dispersion de la puissance et aux déséquilibres de tension dans certaines branches.

Après application de la méthode génétique (50 générations) pour la reconfiguration, le chromosome optimal met hors service et remet en service un ensemble précis de branches. Cette nouvelle topologie permet de réduire fortement les pertes : les pertes actives passent de 193,61 kW à 20,85 kW (-89,2 %) et les pertes réactives de 142,09 kVAR à 11,17 kVAR (-92,1 %).

Dans la configuration optimale, la tension minimale remonte à 0,9497 p.u. (nœud 17) contre 0,9118 p.u. initialement, tandis que la tension maximale est proche de 0,9958 p.u. au nœud 18. Cette homogénéisation de la tension (écart réduit entre 0,9497 p.u. et 0,9958 p.u.) garantit une meilleure qualité de service et limite les surtensions ou sous-tensions sur les lignes et les équipements utilisateurs.

4.2- Cas de minimisation des déviations de Tension :

On voit tout de suite que l'algorithme génétique fait des merveilles pour lisser le profil de tension : chaque branche du réseau est codée en 1 (en service) ou 0 (hors service), et les opérations de sélection, croisement et mutation permettent de faire évoluer une population de topologies vers la meilleure d'entre elles. Après reconfiguration, les tensions aux 33 nœuds s'étagent désormais de 0,9500 p.u. à 0,9973 p.u. : les nœuds initialement sous-voltés gagnent en tension sans pour autant pousser trop haut ceux déjà proches du nominal. Le profil devient plus plat, avec des écarts maîtrisés et une stabilité nettement accrue. En pratique, ce lissage du profil de tension garantit le respect des marges opératoires et renforce la qualité de service : l'algorithme génétique s'impose ainsi comme une méthode robuste et facile à déployer pour optimiser la distribution électrique.

4.3- Cas de minimisation des pertes réactives :

Même avec la présence de SVC (Static Var Compensators) pour compenser la puissance réactive, l'algorithme génétique a permis d'améliorer encore les performances du réseau. En modifiant intelligemment la structure du réseau, il a abouti à une configuration qui réduit les pertes réactives à seulement 6,68 kVA, ce qui est remarquable dans un système déjà équipé de dispositifs de compensation.

Cela montre que les SVC ne suffisent pas à eux seuls à garantir une efficacité maximale. La reconfiguration du réseau vient en complément : elle permet de mieux exploiter les SVC en réduisant les circulations inutiles de puissance réactive. Résultat, le réseau fonctionne de façon plus fluide, les équipements sont moins sollicités, et la qualité globale du service s'améliore. En somme, même avec une compensation déjà en place, une bonne optimisation de la topologie peut faire une réelle différence.

b. Réseau IEEE 118 :

Pour 300 générations on trouve :

1- Minimisation des pertes actives :

1.1- Chromosome optimale de la reconfiguration :

La configuration optimale du réseau IEEE à 118 nœuds est représentée par le chromosome suivant :

B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B13	B14	B15	B16	B17	B18	B19	B20	B21	B22	B23	B24
1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
B25	B26	B27	B28	B29	B30	B31	B32	B33	B34	B35	B36
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B37	B38	B39	B40	B41	B42	B43	B44	B45	B46	B47	B48
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B49	B50	B51	B52	B53	B54	B55	B56	B57	B58	B59	B60
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B61	B62	B63	B64	B65	B66	B67	B68	B69	B70	B71	B72
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
B73	B74	B75	B76	B77	B78	B79	B80	B81	B82	B83	B84
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B85	B86	B87	B88	B89	B90	B91	B92	B93	B94	B95	B96
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Chapitre IV : Résultats et interprétation

B97	B98	B99	B100	B101	B102	B103	B104	B105	B106	B107	B108
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B109	B110	B111	B112	B113	B114	B115	B116	B117	B118	B119	B120
0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0
B121	B122	B123	B124	B125	B126	B127	B128	B129	B130	B131	B132
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0

Tableau IV. 11. Chromosome optimale de la reconfiguration du 4ème cas

1.2- Résultat de l'écoulement de puissance :

Le tableau ci-dessous présente les résultats du flux de puissance pour la configuration optimale du réseau IEEE à 33 nœuds, faisant apparaître les différentes tensions (p.u.) ainsi que les pertes:

N° du nœud	Tension V (p.u)	N° du nœud	Tension V (p.u)	N° du nœud	Tension V (p.u)
1	0.9961	41	0.9617	81	0.9470
2	0.9961	42	0.9606	82	0.9464
3	0.9922	43	0.9602	83	0.9462
4	0.9920	44	0.9599	84	0.9461
5	0.9919	45	0.9598	85	0.9488
6	0.9918	46	0.9314	86	0.9444
7	0.9918	47	0.9280	87	0.9393
8	0.9918	48	0.9240	88	0.9644
9	0.9920	49	0.9202	89	0.9602
10	0.9896	50	0.9179	90	0.9561
11	0.9887	51	0.9170	91	0.9553
12	0.9881	52	0.9148	92	0.9548
13	0.9877	53	0.9129	93	0.9547
14	0.9876	54	0.9843	94	0.9544
15	0.9875	55	0.9807	95	0.9536
16	0.9702	56	0.9776	96	0.9520
17	0.9853	57	0.9715	97	0.9518
18	0.9829	58	0.9705	98	0.9517
19	0.9802	59	0.9696	99	0.9965
20	0.9791	60	0.9692	100	0.9894
21	0.9784	61	0.9688	101	0.9853
22	0.9720	62	0.9967	102	0.9801
23	0.9709	63	0.9834	103	0.9727
24	0.9707	64	0.9749	104	0.9701
25	0.9705	65	0.9715	105	0.9655
26	0.9704	66	0.9666	106	0.9634
27	0.9898	67	0.9594	107	0.9604
28	0.9879	68	0.9545	108	0.9595
29	0.9752	69	0.9413	109	0.9351
30	0.9633	70	0.9403	110	0.9324
31	0.9590	71	0.9297	111	0.9343
32	0.9507	72	0.9301	112	0.9341

Chapitre IV : Résultats et interprétation

33	0.9429	73	0.9306	113	0.9825
34	0.9373	74	0.9333	114	0.9779
35	0.9723	75	0.9318	115	0.9691
36	0.9715	76	0.9317	116	0.9591
37	0.9820	77	0.9600	117	0.9473
38	0.9766	78	0.9528	118	1.0021
39	0.9737	79	0.9503		
40	0.9705	80	0.9481		
Les pertes actives (MW)			12.2568		
Les pertesréactives (MVAR)			10.7659		

Tableau IV. 12. Résultat de l'écoulement de puissance du 4ème cas

1.3- L'évolution des pertes en version optimale :

Cela est représenté par ce graphique :

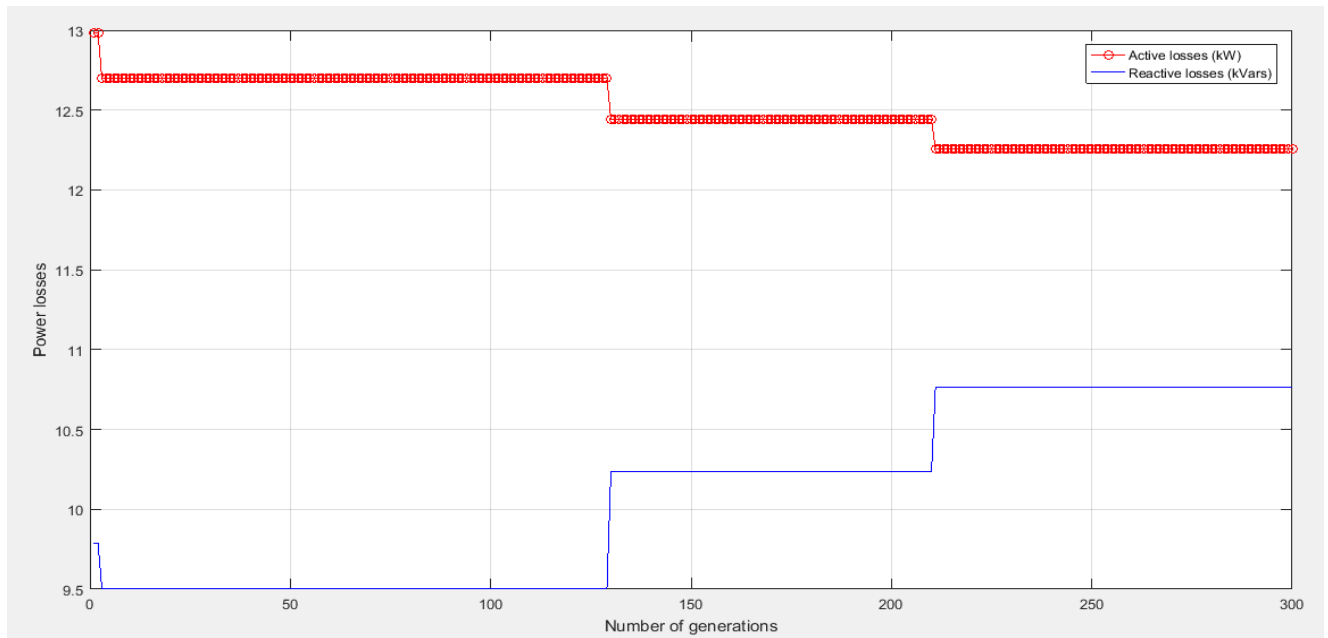


Figure IV. 12. L'évolution des pertes en version optimale du 4ème cas

1.4- Résultats de génération des dispositifs SVC :

Les places des dispositifs SVC générés de façon aléatoire dans les 118 nœuds du réseau et l'énergie réactive sont indiqués dans le tableau suivant :

N° de nœud	Valeur de Qc (p.u)
13	0.0232
32	0.4561
41	0.2786
50	1.2051
91	0.0668

[illegible]

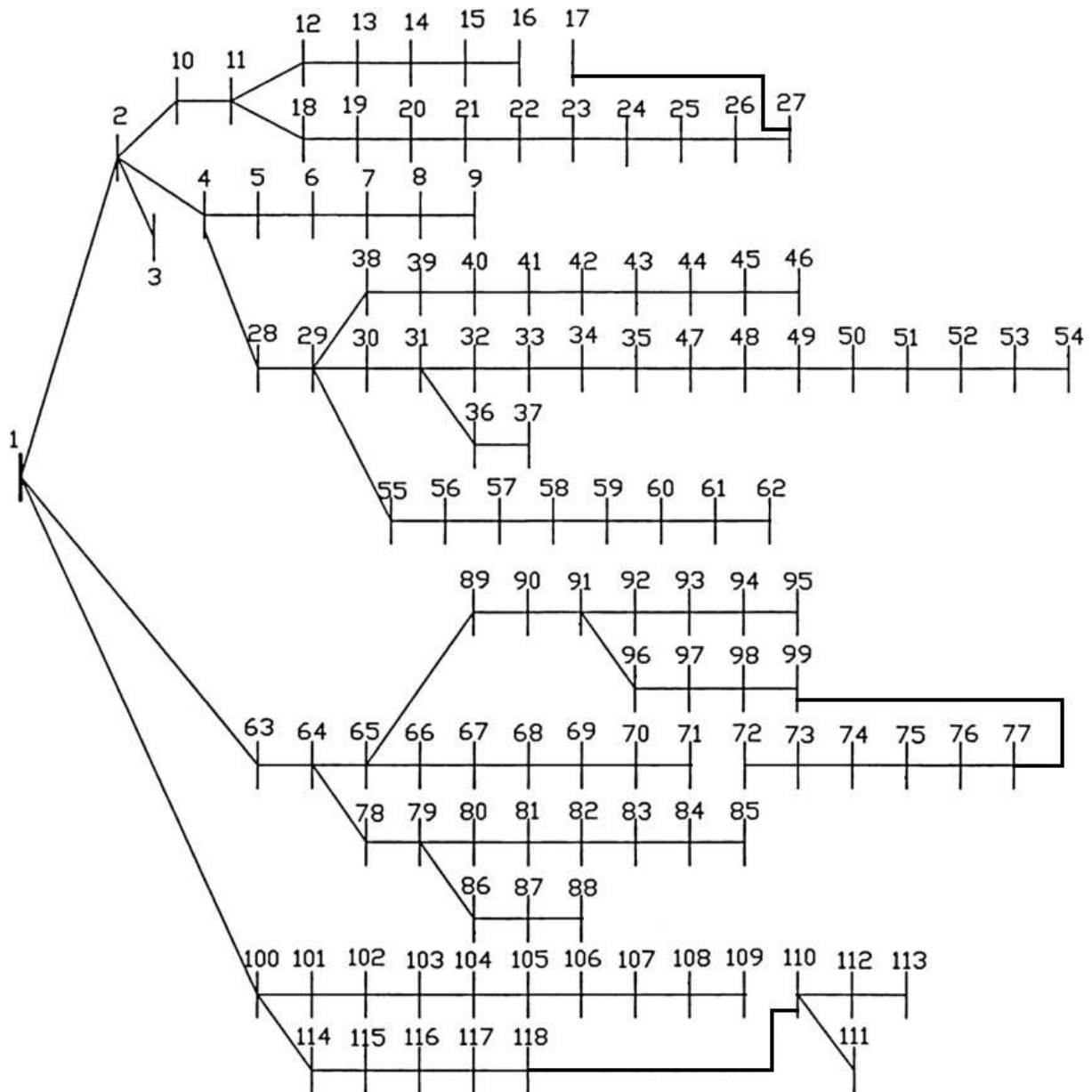


Figure IV . 13. Structure optimale du 4ème cas

2- Minimisation des déviations des pertes :

Chapitre IV : Résultats et interprétation

2.1- Chromosomes de la reconfiguration optimale :

B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B13	B14	B15	B16	B17	B18	B19	B20	B21	B22	B23	B24
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B25	B26	B27	B28	B29	B30	B31	B32	B33	B34	B35	B36
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B37	B38	B39	B40	B41	B42	B43	B44	B45	B46	B47	B48
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B49	B50	B51	B52	B53	B54	B55	B56	B57	B58	B59	B60
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B61	B62	B63	B64	B65	B66	B67	B68	B69	B70	B71	B72
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B73	B74	B75	B76	B77	B78	B79	B80	B81	B82	B83	B84
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B85	B86	B87	B88	B89	B90	B91	B92	B93	B94	B95	B96
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B97	B98	B99	B100	B101	B102	B103	B104	B105	B106	B107	B108
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B109	B110	B111	B112	B113	B114	B115	B116	B117	B118	B119	B120
1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
B121	B122	B123	B124	B125	B126	B127	B128	B129	B130	B131	B132
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau IV. 13. Chromosomes de la reconfiguration optimale du 5ème cas

2.2- Résultat d'écoulement de puissance :

N° du nœud	Tension V (p.u)	N° du nœud	Tension V (p.u)	N° du nœud	Tension V (p.u)
1	0.9960	41	0.9578	81	0.9554
2	0.9960	42	0.9567	82	0.9548
3	0.9920	43	0.9563	83	0.9546

Chapitre IV : Résultats et interprétation

4	0.9918	44	0.9560	84	0.9545
5	0.9917	45	0.9559	85	0.9605
6	0.9916	46	0.9299	86	0.9603
7	0.9916	47	0.9265	87	0.9603
8	0.9915	48	0.9225	88	0.9572
9	0.9915	49	0.9187	89	0.9527
10	0.9889	50	0.9163	90	0.9484
11	0.9878	51	0.9155	91	0.9476
12	0.9871	52	0.9133	92	0.9471
13	0.9866	53	0.9113	93	0.9469
14	0.9865	54	0.9837	94	0.9466
15	0.9863	55	0.9802	95	0.9455
16	0.9862	56	0.9770	96	0.9439
17	0.9839	57	0.9709	97	0.9437
18	0.9810	58	0.9699	98	0.9436
19	0.9779	59	0.9690	99	0.9963
20	0.9764	60	0.9687	100	0.9832
21	0.9756	61	0.9682	101	0.9759
22	0.9687	62	0.9964	102	0.9658
23	0.9675	63	0.9813	103	0.9497
24	0.9672	64	0.9682	104	0.9441
25	0.9671	65	0.9613	105	0.9336
26	0.9670	66	0.9501	106	0.9287
27	0.9894	67	0.9335	107	0.9187
28	0.9874	68	0.9220	108	0.9148
29	0.9740	69	0.8898	109	0.9081
30	0.9617	70	0.8862	110	0.9053
31	0.9574	71	0.8815	111	0.9072
32	0.9494	72	0.8773	112	0.9071
33	0.9416	73	0.8740	113	0.9930
34	0.9358	74	0.8733	114	0.9923
35	0.9711	75	0.8717	115	0.9913
36	0.9703	76	0.8716	116	0.9909
37	0.9809	77	0.9660	117	0.9908
38	0.9751	78	0.9616	118	1.0021
39	0.9718	79	0.9587		
40	0.9683	80	0.9565		
Les pertes actives (MW)			12.6687		
Les pertesréactives (MVAR)			9.5089		

Tableau IV. 14. Résultat d'écoulement de puissance du 5ème cas

2.3- Différence entre la version originale (avant reconfiguration) et l'optimale :

On représente la différence dans ce graphe :

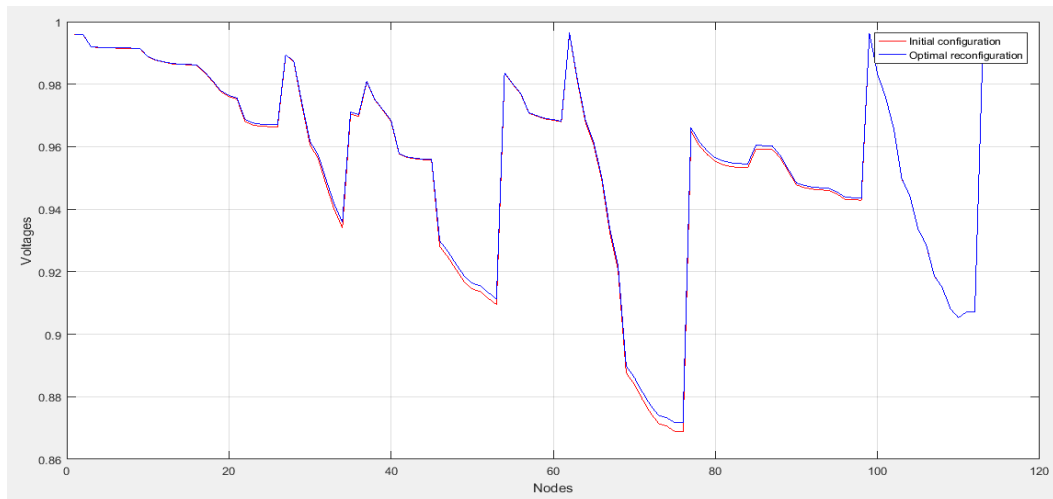


Figure IV . 14. Différence entre la version originale (avant) et l'optimale

=>On remarque que la tension est globalement mieux maintenue après la reconfiguration. La courbe bleue, qui représente la reconfiguration optimale, reste plus proche de la valeur nominale surtout dans les zones où la tension chutait beaucoup dans la configuration initiale. Ça se voit bien entre les nœuds 30 et 100, où l'amélioration est la plus marquée.

2.4- Structure Optimale :

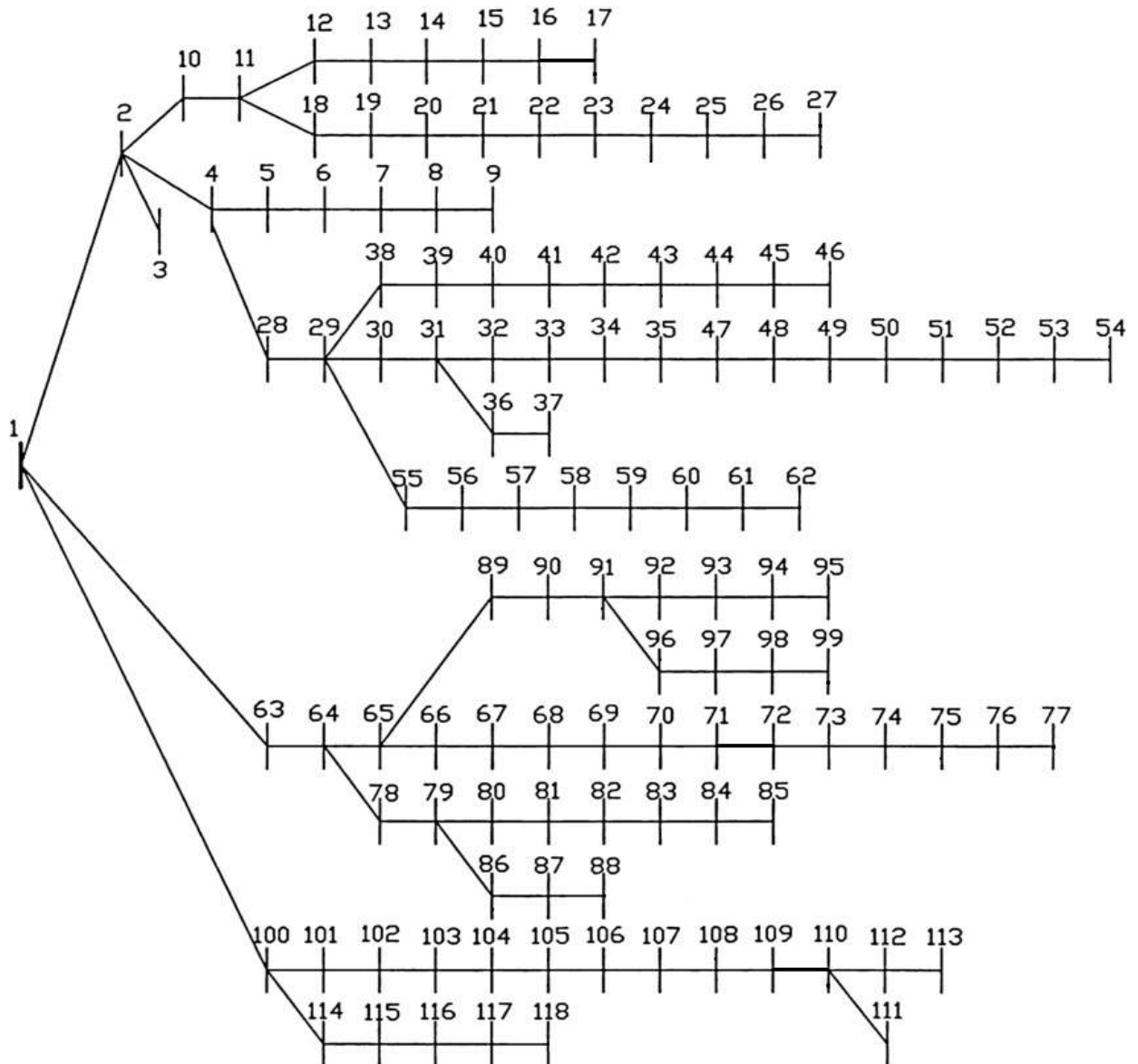


Figure IV . 15. Structure optimale du 5ème cas

3- Minimisation des pertes réactives :

Chapitre IV : Résultats et interprétation

3.1- Chromosome de la reconfiguration :

B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B13	B14	B15	B16	B17	B18	B19	B20	B21	B22	B23	B24
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B25	B26	B27	B28	B29	B30	B31	B32	B33	B34	B35	B36
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B37	B38	B39	B40	B41	B42	B43	B44	B45	B46	B47	B48
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B49	B50	B51	B52	B53	B54	B55	B56	B57	B58	B59	B60
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B61	B62	B63	B64	B65	B66	B67	B68	B69	B70	B71	B72
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B73	B74	B75	B76	B77	B78	B79	B80	B81	B82	B83	B84
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B85	B86	B87	B88	B89	B90	B91	B92	B93	B94	B95	B96
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B97	B98	B99	B100	B101	B102	B103	B104	B105	B106	B107	B108
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B109	B110	B111	B112	B113	B114	B115	B116	B117	B118	B119	B120
1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
B121	B122	B123	B124	B125	B126	B127	B128	B129	B130	B131	B132
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau IV. 15. Chromosome de la reconfiguration du 6ème cas

3.2- Résultats des pertes :

Les pertes actives	12.4738
--------------------	---------

(kW)	
Les pertes réactives (kVAr)	9.4666
La figure des pertes	Figure IV. 16. Résultats des pertes du 6ème cas
Les remarques sur le graphe	On remarque que la tension est globalement mieux maintenue après la reconfiguration. La courbe bleue, qui représente la reconfiguration optimale, reste plus proche de la valeur nominale surtout dans les zones où la tension chutait beaucoup dans la configuration initiale. Ça se voit bien entre les nœuds 30 et 100, où l'amélioration est la plus marquée.

Tableau IV. 16. Résultats des pertes du 6ème cas

3.3- Structure Optimale :

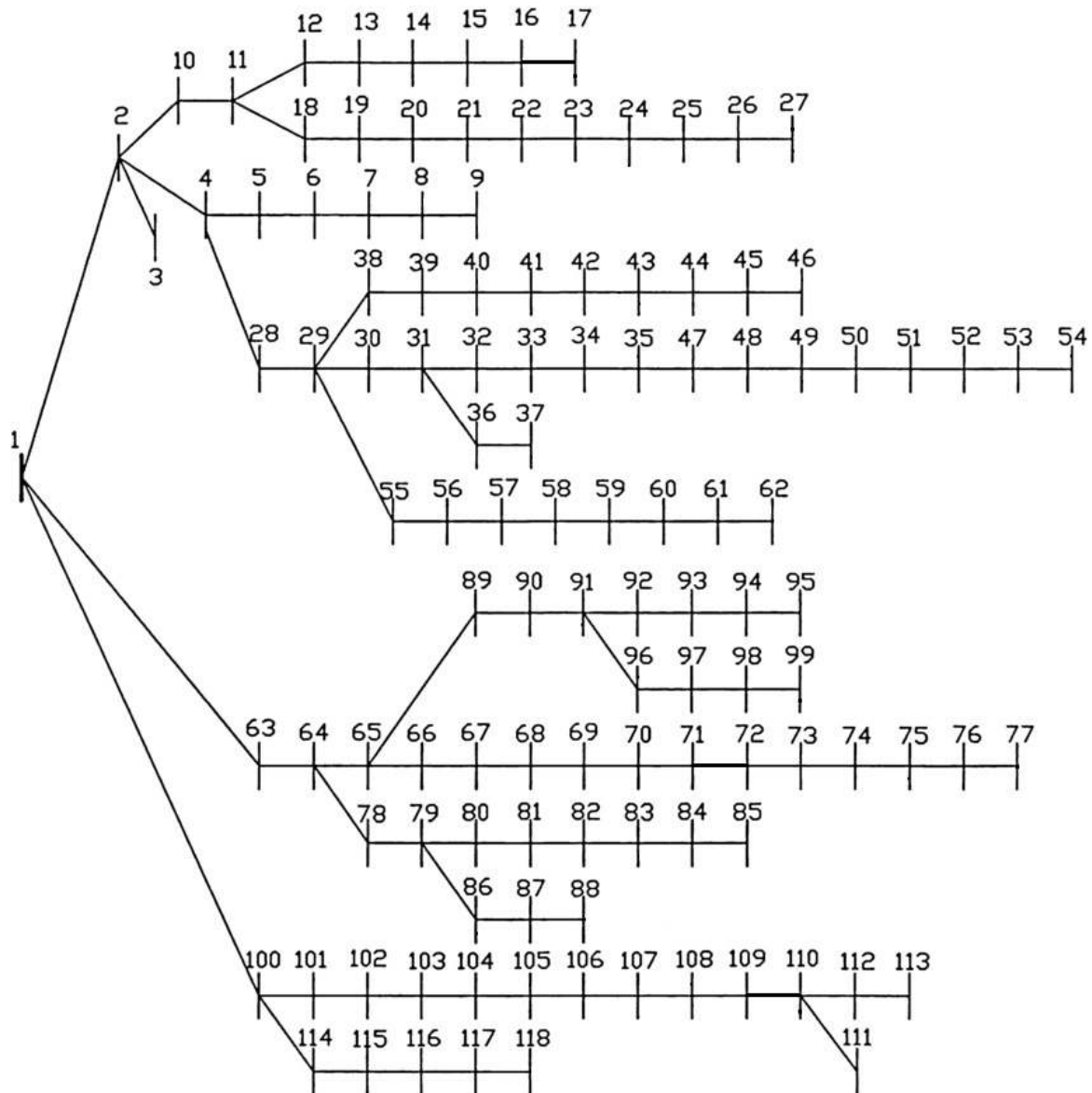


Figure IV. 17. Structure optimale du 6ème cas

4- Discussion de résultats et interprétation :

4.1- Cas de minimisation des pertes actives :

A base des données, dans ce cas la méthode inspirée des algorithmes génétiques pour réorganiser la topologie d'un réseau électrique de 118 nœuds et ainsi réduire ses pertes actives. Chaque configuration possible est représentée par une chaîne de bits : un "1" signifie que la branche est fermée, un "0" qu'elle est ouverte.

Après plusieurs générations de simulation, l'algorithme identifie une structure topologique capable de limiter les pertes actives à 12,2568 MW. On constate une diminution rapide des pertes dès les premiers cycles d'optimisation, puis un

ralentissement progressif lorsque l'algorithme affine sa recherche autour de la solution optimale. Au final, cette reconfiguration adaptative montre qu'il est possible d'ajuster dynamiquement l'architecture du réseau pour économiser de l'énergie, tout en garantissant une exploitation fiable et conforme aux normes de qualité de service.

4.2- Cas de minimisation de déviation de tension :

Les chercheurs ont voulu limiter les écarts de tension dans un réseau de 118 nœuds en ajustant sa structure grâce à un algorithme génétique. Chaque solution se traduit par une suite de bits : « 1 » quand une branche est connectée, « 0 » quand elle est ouverte.

À l'issue du processus, la configuration retenue parvient à maintenir les tensions dans une plage très étroite, de 0,8716 p.u. à 1,0021 p.u. — un résultat nettement plus homogène qu'au départ. Cette régularité assure une qualité de service stable et prévient tout déséquilibre pouvant affecter le réseau.

Dès les premières générations, l'algorithme fait chuter l'amplitude des tensions de façon spectaculaire. Ensuite, la progression ralentit : l'optimisation se fait plus fine, signe que l'algorithme cerne peu à peu la configuration idéale.

4.3- Cas de minimisation des pertes réactives :

À base des données et avec la reconfiguration de réseau précédent à la présence de dispositifs SVC, l'algorithme génétique ne se contente plus de couper les branches B118 à B132 : il ajuste aussi la quantité de compensation réactive que ces compensateurs statiques vont fournir. Au bout du compte, les pertes réactives tombent à 9,4666 kVAr. Sur le graphique de suivi, on voit clairement que les pertes chutent brutalement dès les premières générations — c'est l'effet conjugué de la nouvelle topologie du réseau et de l'action des SVC — avant de se stabiliser net autour de cette valeur minimale. En somme, c'est la combinaison de la reconfiguration optimisée et de la régulation fine des SVC qui permet de réduire au maximum les pertes réactives.

6- Conclusion :

Les différents tests menés sur les réseaux IEEE 33 et 118 montrent clairement l'efficacité de l'algorithme génétique pour améliorer les performances électriques des réseaux. Que ce soit pour réduire les pertes actives, minimiser les déviations de tension ou encore limiter les pertes réactives, cette méthode a permis d'obtenir des résultats très satisfaisants.

Chapitre IV : Résultats et interprétation

En reconfigurant intelligemment le réseau, les pertes ont été fortement réduites et la qualité de la tension a été nettement améliorée. Même en présence de dispositifs comme les SVC, l'algorithme reste utile et apporte un gain supplémentaire en efficacité.

En résumé, cette approche basée sur l'optimisation génétique se révèle à la fois puissante et adaptable. Elle ouvre la voie à une gestion plus économique et plus stable des réseaux de distribution d'électricité.

Conclusion générale

Conclusion générale

Au terme de ce mémoire consacré à l'optimisation de réseaux de distribution électrique moyennes et hautes tensions, il apparaît clairement que la réduction des pertes et l'amélioration de la qualité de la tension – deux enjeux cruciaux dans le contexte de l'essor de la demande et de la dérégulation des marchés – peuvent être efficacement traitées par la combinaison de techniques de compensation réactive et de reconfiguration topologique assistée par intelligence artificielle.

Dans un premier temps, nous avons rappelé que, sur les réseaux de distribution, les pertes d'énergies élèvent en moyenne à 14 % de la puissance transmise, ce qui représente un gisement important d'économies potentielles. La compensation de la puissance réactive par batteries de condensateurs shunt (ou SVC) constitue une solution bien établie pour réduire le transit des composantes réactives, améliorer le profil de tension et dégager un bénéfice économique. Toutefois, l'efficacité de ces dispositifs est conditionnée par un dimensionnement fin et par une localisation optimale dans le réseau. Parallèlement, la reconfiguration topologique – c'est-à-dire l'ouverture et la fermeture sélective d'interrupteurs de ligne – permet d'adapter dynamiquement la structure radiale du réseau pour minimiser les pertes actives et lisser les chutes de tension. Nous avons choisi d'exploiter les algorithmes génétiques, dont la robustesse face aux fonctions objectives non convexes est avérée, pour traiter ce problème à double entrée : permutation intelligente des branches et injection réactive pilotée.

La méthodologie adoptée – détaillée dans les chapitres II et III – combine l'environnement MATLAB/MATPOWER pour le calcul de flux de puissance AC et une métaheuristique de type génétique. Chaque individu de la population encode à la fois l'état des interrupteurs (branches en service ou non) et la présence de cinq SVC répartis sur des nœuds stratégiques. La fonction d'aptitude agrège les pertes actives, les pertes réactives, ainsi que les déviations de tension par rapport à la valeur nominale, sous réserve de respecter les contraintes de tension ($\pm 5\%$) et les limites thermiques des lignes.

Le dernier chapitre a mis en lumière les performances de cette approche sur deux cas de référence : le réseau radial moyenne tension IEEE 33 bus et le réseau de transmission adapté IEEE 118 bus. Les résultats clés peuvent se synthétiser ainsi :

1. Réduction spectaculaire des pertes

- Sur le réseau 33 nœuds, les pertes actives initiales de 193,61 kW et réactives de 142,09 kVAR ont été ramenées respectivement à 20,85 kW (– 89,2 %) et 11,17 kVAR (– 92,1 %) après reconfiguration et implantation de SVC.
- Sur le réseau 118 nœuds, les pertes initiales de 22,08 MW et 7,82 MVAR sont passées à environ 12,26 MW (– 44,5 %) et 10,77 MVAR (– 37,7 %).

2. Amélioration du profil de tension

- Le réseau 33 bus a vu sa tension minimale monter de 0,9118 p.u. à 0,9497 p.u., et son écart global de tension se resserrer autour de la valeur nominale.
- Sur le 118 bus, la plage de tensions, initialement de 0,9649 p.u. à 1,0400 p.u., est stabilisée entre 0,8875 p.u. et 1,0021 p.u., assurant une plus grande homogénéité.

3. Rôle complémentaire des SVC

- L'ajout de compensateurs statiques ne suffit pas à lui seul à éliminer les pertes : la reconfiguration topologique agit en synergie en repositionnant le flux principal sur des voies plus favorables, amplifiant ainsi l'effet des SVC.

Ces bénéfices se traduisent non seulement par un gain énergétique et économique manifeste, mais aussi par un renforcement de la qualité de service et une extension potentielle de la durée de vie des équipements en réduisant les sollicitations thermiques et électriques.

Limites et perspectives

Si les résultats obtenus sont très encourageants, ce travail

comporte néanmoins certaines limites qu'il conviendra de lever dans des prolongements futurs :

- **Scalabilité et temps de calcul** : pour le réseau 118 bus, l'algorithme a nécessité plusieurs centaines de générations pour converger, ce qui peut devenir prohibitif pour des réseaux encore plus étendus ou pour des contraintes de temps réel. L'étude de métaheuristiques hybrides (par exemple, couplage génétique – recuits simulés ou colonies de fourmis) ou l'intégration de techniques de réduction de dimension (découplage de zones) pourraient accélérer la recherche de solutions.
- **Impact sur la protection et la stabilité transitoire** : les modifications topologiques peuvent influencer les schémas de protection et la stabilité du réseau en cas

Conclusion générale

de court-circuit ou de perturbation dynamique. Il serait utile d'intégrer, dans la fonction objective ou dans les contraintes, des critères de sélectivité et de réaction aux défauts.

En conclusion, ce mémoire démontre que l'association de la compensation réactive par SVC et de la reconfiguration topologique pilotée par algorithmes génétiques constitue une approche robuste pour réduire significativement les pertes et homogénéiser le profil de tension sur des réseaux de distribution moyenne et haute tension. Les résultats très positifs obtenus sur les cas de référence IEEE 33 et IEEE 118 confirment le potentiel de cette méthode pour les opérateurs de réseaux cherchant à améliorer leur efficacité énergétique et la continuité de service. L'ouverture vers des développements en temps réel, multi-période et prenant en compte l'évolution des réseaux intelligents soutiendra la transition vers des systèmes électriques plus flexibles, plus fiables et plus durables.

Bibliographie

- [1] : <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/5/2146>
- [2] : https://www.researchgate.net/figure/Single-line-diagram-of-the-IEEE-118-bus-test-network_fig1_328818098
- [3] : KELLOU Ibrahim et LAHIANI Mohamed, Mémoire PFE, Optimisation de la reconfiguration d'un réseau de distribution électrique, 2018.
- [4] : <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Reseau-electrique.html>
- [5] : KetfiNadhir « Contribution à la gestion des réseaux de distribution en présence de génération d'énergie dispersée », (Thèse de Doctorat en Sciences) Université de Batna, Décembre 2014
- [6] : GRTE - Groupe Sonelgaz (Gestionnaire du Réseau de Transport d'Électricité) : www.grte.dz
- [7] : Source : <https://www.rte-france.com/eco2mix/les-interconnexions>
- [8] : RTE – Le transport d'électricité, comment ça fonctionne ?
<https://www.rte-france.com/wiki-energie/transport-electricite-comment-ca-fonctionne>
- [9] : SDA - Société de Distribution de l'Électricité et du Gaz d'Alger : www.sda.dz
- [10] : CEI 60050 : Vocabulaire Électrotechnique International.
- [11] : Gönen, T. (2014) : Electric Power Distribution System Engineering (Ouvrage académique de référence).
- [12]: CEI 61850: Communication networks and systems for power utility automation (norme internationale).
- [13] : RTE (2023) : Bilan prévisionnel du système électrique - Données SAIDI/SAIFI.
- [14]: Kersting, W. H. (2020). Distribution System Modeling and Analysis (3^{ed.}). CRC Press. Chapitres 4 (“Network Topologies”) et 8 (“Reliability Evaluation”), pp. 120–165
- [15]: IEEE Power & Energy Society. “Static VAR Compensators.” IEEE Xplore. <https://ieeexplore.ieee.org>
- [16] : <https://www.history.com/articles/what-was-the-war-of-the-currents>

- [17]: Merlin, A., Back, H., Search for a Minimal Loss Operating Spanning Tree Configuration in an Urban Power Distribution System, Proc. 5th Power System Computation Conf., Cambridge, U.K., (1975), 1-18.
- [18]: Shirmohammadi, D., Hong, H., Reconfiguration of Electric Distribution Networks for Resistive Line Loss Reduction, IEEE Trans. Power Deliv., (1989), Vol. 4, No. 1, 1492-1498.
- [19] : M. E. Baran & F. F. Wu, "Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 4, no. 2, pp. 1401–1407, Apr. 1989. [DOI :10.1109/61.25627]
- [20] : M. Farivar & S. H. Low, "Branch Flow Model: Relaxations and Convexification – Part I," IEEE Trans. Power Systems, vol. 28, no. 3, pp. 2554–2564, Aug. 2013. [DOI :10.1109/TPWRS.2012.2224911]
- [21]:Zobaa, A. F., Abdelaziz, M. A., & Abdel Aleem, S. H. E. (2020). Distribution network reconfiguration based on Artificial Network Reconfiguration for Variable Load Profile. Journal of Electrical Systems
- [22] : M. RahimipourBehbahani, A. Jalilian, A. Bahmanyar et D. Ernst, « Comprehensive Review on Static and Dynamic Distribution Network Reconfiguration Methodologies », IEEE Access, vol. 12, pp. 9510–9524, Jan. 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3350207.
- [23]: Prabha S. Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill, 1994.
- [24] : S. R. et K. Norcine, "Reconfiguration des Réseaux de Distribution avec Intégration des Productions Décentralisées Renouvelables : Optimisation des Tensions, Réduction des Pertes et Ilotage," Univ. 8 Mai 1945 – Guelma, 2024.
- [25]: Christie, R. D. "Power Systems Test Case Archive – 118 Bus System." University of Washington.
- [26]: IEEE via Beta Engineering, <https://www.betaengineering.com/news/facts-about-facts-flexible-ac-transmission-systems>
- [27]: Abdelaali ALIBI, "Contrôle des Réseaux Electriques par les Systèmes FACTS: (Flexible AC Transmission Systems)", thèse de Magister, l'Université de Batna 2009
- [28]: Ghosh, S., & Das, D. (2009). Method for load-flow solution of radial distribution networks. IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution.

- [29]: Abur, A., &Exposito, A. G. (2004). Power System State Estimation : Theory and Implementation. CRC Press. ISBN : 9780824755706
- [30] : <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/23/10307>
- [31] : UNESCO, « Intelligence artificielle : définitions et enjeux », UNESCO.org, consulté le 22 mai 2025.
- [32] : OCDE, « L'intelligence artificielle », OECD.org, consulté le 22 mai 2025
- [33] : The UNESCO Courier, « Intelligence artificielle : entre mythe et réalité », courier.unesco.org, 29 juin 2018.
- [34] : OCDE, « L'intelligence artificielle dans la société », OECD.org (PDF), publié en 2019
- [35] : UNESCO, « Éthique de l'intelligence artificielle », UNESCO.org, consulté le 22 mai 2025.
- [36]: ScienceDirect – Genetic Algorithm – an overview:
<https://www.sciencedirect.com/topics/medicine-and-dentistry/genetic-algorithm>
- [37] : MathWorks. Algorithmes génétiques - MATLAB & Simulink.
- [38] : Académie d'Aix-Marseille, Délégation académique au numérique éducatif (DANE). (s.d.). Synthétiser l'intelligence du vivant : les algorithmes génétiques (1). Site pédagogique de l'académie d'Aix-Marseille.
- [39] :StatisticsEasily. (s.d.). Statistiques Faciles - Ressources éducatives et outils de calcul, sur fr.statisticseasily.com
- [40] : M. Gautam et al., “A Spanning Tree-based Genetic Algorithm for Distribution Network Reconfiguration,” arXiv, août 2020.
- [41] : Electric Power Systems Research, Volume 142, January 2017, Pages 9-11
- [42]: T. M. Yaseen et al., “Optimal distribution network reconfiguration using GA and PSO” Applied Sciences (MDPI), 2021.
- [43] : Alhelou, H. H., Salman, S. K., &Khodayar, M. E. (2018). *A 33-Bus Test System for Educational Use in Power System Studies* [Rapport technique]. Centre for Urban Energy (CUE), Toronto Metropolitan University.

[44] : Centre for Urban Energy, Toronto Metropolitan University. (2022, juin). 33-Bus Test System [Rapport PDF]

Annexes

Les données :

Réseau IEEE 33

Les Nœuds :

Bus i	Pd(pu)	Qd(pu)
1.0000	0.0000	0.0000
2.0000	0.1000	0.0600
3.0000	0.0900	0.0400
4.0000	0.1200	0.0800
5.0000	0.0600	0.0300
6.0000	0.0600	0.0200
7.0000	0.2000	0.1000
8.0000	0.2000	0.1000
9.0000	0.0600	0.0200
10.0000	0.0600	0.0200
11.0000	0.0450	0.0300
12.0000	0.0600	0.0350
13.0000	0.0600	0.0350
14.0000	0.1200	0.0800
15.0000	0.0600	0.0100
16.0000	0.0600	0.0200
17.0000	0.0600	0.0200
18.0000	0.0900	0.0400
19.0000	0.0900	0.0400
20.0000	0.0900	0.0400
21.0000	0.0900	0.0400
22.0000	0.0900	0.0400
23.0000	0.0900	0.0500
24.0000	0.4200	0.2000
25.0000	0.4200	0.2000
26.0000	0.0600	0.0250
27.0000	0.0600	0.0250
28.0000	0.0600	0.0200
29.0000	0.1200	0.0700

30.0000	0.2000	0.6000
31.0000	0.1500	0.0700
32.0000	0.2100	0.1000
33.0000	0.0600	0.0400

Les Branches :

Num de branche	Nœudamont	Nœudaval	Résistance (pu)	Réactance (pu)
1	1	2	0.05753	0.02976
2	2	3	0.30763	0.15669
3	3	4	0.22838	0.11482
4	4	5	0.23781	0.12112
5	5	6	0.51106	0.04368
6	6	7	0.11681	0.38613
7	7	8	1.06791	0.77070
8	8	9	0.64272	0.46176
9	9	10	0.64896	0.46176
10	10	11	0.12268	0.04056
11	11	12	0.23363	0.07725
12	12	13	0.91603	0.72072
13	13	14	0.33796	0.44485
14	14	15	0.36878	0.32822
15	15	16	0.46569	0.34008
16	16	17	0.80434	1.07390
17	17	18	0.45677	0.35818
18	2	19	0.10234	0.09766
19	19	20	0.93962	0.84575
20	20	21	0.25541	0.29866
21	21	22	0.44276	0.58513
22	3	23	0.28155	0.19238
23	23	24	0.56035	0.44248
24	24	25	0.55910	0.43749
25	6	26	0.12667	0.06452
26	26	27	0.17734	0.09029
27	27	28	0.66082	0.58263

28	28	29	0.50182	0.43717
29	29	30	0.31668	0.16130
30	30	31	0.60803	0.60091
31	31	32	0.19375	0.22583
32	32	33	0.21278	0.33084
33	21	8	1.24800	1.24800
34	9	15	1.24800	1.24800
35	12	22	1.24800	1.24800
36	18	33	0.31200	0.31200
37	25	29	0.31200	0.31200

Réseau IEEE 118 :

Les nœuds :

Bus i	Pd (kW)	Qd (kVAR)
1	0	0
2	133.84	101.14
3	16.214	11.292
4	34.315	21.845
5	73.016	63.602
6	144.2	68.604
7	104.47	61.725
8	28.547	11.503
9	87.56	51.073
10	198.2	106.77
11	146.8	75.995
12	26.04	18.687
13	52.1	23.22
14	141.9	117.5
15	21.87	28.79
16	33.37	26.45
17	32.43	25.23
18	20.234	11.906
19	156.94	78.523

20	546.29	351.4
21	180.31	164.2
22	93.167	54.594
23	85.18	39.65
24	168.1	95.178
25	125.11	150.22
26	16.03	24.62
27	26.03	24.62
28	594.56	522.62
29	120.62	59.117
30	102.38	99.554
31	513.4	318.5
32	475.25	456.14
33	151.43	136.79
34	205.38	83.302
35	131.6	93.082
36	448.4	369.79
37	440.52	321.64
38	112.54	55.134
39	53.963	38.998
40	393.05	342.6
41	326.74	278.56
42	536.26	240.24
43	76.247	66.562
44	53.52	39.76
45	40.328	31.964
46	39.653	20.758
47	66.195	42.361
48	73.904	51.653
49	114.77	57.965
50	918.37	1205.1
51	210.3	146.66
52	66.68	56.608
53	42.207	40.184
54	433.74	283.41

55	62.1	26.86
56	92.46	88.38
57	85.188	55.436
58	345.3	332.4
59	22.5	16.83
60	80.551	49.156
61	95.86	90.758
62	62.92	47.7
63	478.8	463.74
64	120.94	52.006
65	139.11	100.34
66	391.78	193.5
67	27.741	26.713
68	52.814	25.257
69	66.89	38.713
70	467.5	395.14
71	594.85	239.74
72	132.5	84.363
73	52.699	22.482
74	869.79	614.775
75	31.349	29.817
76	192.39	122.43
77	65.75	45.37
78	238.15	223.22
79	294.55	162.47
80	485.57	437.92
81	243.53	183.03
82	243.53	183.03
83	134.25	119.29
84	22.71	27.96
85	49.513	26.515
86	383.78	257.16
87	49.64	20.6
88	22.473	11.806
89	62.93	42.96

90	30.67	34.93
91	62.53	66.79
92	114.57	81.748
93	81.292	66.526
94	31.733	15.96
95	33.32	60.48
96	531.28	224.85
97	507.03	367.42
98	26.39	11.7
99	45.99	30.392
100	100.66	47.572
101	456.48	350.3
102	522.56	449.29
103	408.43	168.46
104	141.48	134.25
105	104.43	66.024
106	96.793	83.647
107	493.92	419.34
108	225.38	135.88
109	509.21	387.21
110	188.5	173.46
111	918.03	898.55
112	305.08	215.37
113	54.38	40.97
114	211.14	192.9
115	67.009	53.336
116	162.07	90.321
117	48.785	29.156
118	33.9	18.98

Les branches :

Branch No.	From Bus	To Bus	Resistance (r)	Reactance (x)
1	1	2	0.036	0.01296

2	2	3	0.033	0.01188
3	2	4	0.045	0.0162
4	4	5	0.015	0.054
5	5	6	0.015	0.054
6	6	7	0.015	0.0125
7	7	8	0.018	0.014
8	8	9	0.021	0.063
9	2	10	0.166	0.1344
10	10	11	0.112	0.0789
11	11	12	0.187	0.313
12	12	13	0.142	0.1512
13	13	14	0.18	0.118
14	14	15	0.15	0.045
15	15	16	0.16	0.18
16	16	17	0.157	0.171
17	11	18	0.218	0.285
18	18	19	0.118	0.185
19	19	20	0.16	0.196
20	20	21	0.12	0.189
21	21	22	0.12	0.0789
22	22	23	1.41	0.723
23	23	24	0.293	0.1348
24	24	25	0.133	0.104
25	25	26	0.178	0.134
26	26	27	0.178	0.134
27	4	28	0.015	0.0296
28	28	29	0.012	0.0276
29	29	30	0.12	0.2766
30	30	31	0.21	0.243
31	31	32	0.12	0.054
32	32	33	0.178	0.234
33	33	34	0.178	0.234
34	34	35	0.154	0.162
35	30	36	0.187	0.261
36	36	37	0.133	0.099

37	29	38	0.33	0.194
38	38	39	0.31	0.194
39	39	40	0.13	0.194
40	40	41	0.28	0.15
41	41	42	1.18	0.85
42	42	43	0.42	0.2436
43	43	44	0.27	0.0972
44	44	45	0.339	0.1221
45	45	46	0.27	0.1779
46	35	47	0.21	0.1383
47	47	48	0.12	0.0789
48	48	49	0.15	0.0987
49	49	50	0.15	0.0987
50	50	51	0.24	0.1581
51	51	52	0.12	0.0789
52	52	53	0.405	0.1458
53	53	54	0.405	0.1458
54	29	55	0.391	0.141
55	55	56	0.406	0.1461
56	56	57	0.406	0.1461
57	57	58	0.706	0.5461
58	58	59	0.338	0.1218
59	59	60	0.338	0.1218
60	60	61	0.207	0.0747
61	61	62	0.247	0.8922
62	1	63	0.028	0.0418
63	63	64	0.117	0.2016
64	64	65	0.255	0.0918
65	65	66	0.21	0.0759
66	66	67	0.383	0.138
67	67	68	0.504	0.3303
68	68	69	0.406	0.1461
69	69	70	0.962	0.761
70	70	71	0.165	0.06
71	71	72	0.303	0.1092

72	72	73	0.303	0.1092
73	73	74	0.206	0.144
74	74	75	0.233	0.084
75	75	76	0.591	0.1773
76	76	77	0.126	0.0453
77	64	78	0.559	0.3687
78	78	79	0.186	0.1227
79	79	80	0.186	0.1227
80	80	81	0.26	0.139
81	81	82	0.154	0.148
82	82	83	0.23	0.128
83	83	84	0.252	0.106
84	84	85	0.18	0.148
85	79	86	0.16	0.182
86	86	87	0.2	0.23
87	87	88	0.16	0.393
88	65	89	0.669	0.2412
89	89	90	0.266	0.1227
90	90	91	0.266	0.1227
91	91	92	0.266	0.1227
92	92	93	0.266	0.1227
93	93	94	0.233	0.115
94	94	95	0.496	0.138
95	91	96	0.196	0.18
96	96	97	0.196	0.18
97	97	98	0.1866	0.122
98	98	99	0.0746	0.318
99	1	100	0.0625	0.0265
100	100	101	0.1501	0.234
101	101	102	0.1347	0.0888
102	102	103	0.2307	0.1203
103	103	104	0.447	0.1608
104	104	105	0.1632	0.0588
105	105	106	0.33	0.099
106	106	107	0.156	0.0561

107	107	108	0.3819	0.1374
108	108	109	0.1626	0.0585
109	109	110	0.3819	0.1374
110	110	111	0.2445	0.0879
111	110	112	0.2088	0.0753
112	112	113	0.2301	0.0828
113	100	114	0.6102	0.2196
114	114	115	0.1866	0.127
115	115	116	0.3732	0.246
116	116	117	0.405	0.367
117	117	118	0.489	0.438
118	46	27	0.5258	0.2925
119	17	27	0.5258	0.2916
120	8	24	0.4272	0.1539
121	54	43	0.48	0.1728
122	62	49	0.36	0.1296
123	37	62	0.57	0.572
124	9	40	0.53	0.3348
125	58	96	0.3957	0.1425
126	73	91	0.68	0.648
127	88	75	0.4062	0.1464
128	99	77	0.4626	0.1674
129	108	83	0.651	0.234
130	105	86	0.8125	0.2925
131	110	118	0.7089	0.2553
132	25	35	0.5	0.5