

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 DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الآلية والالكترونقني
Département d'automatique et électrotechnique



Mémoire de Master

Filière : électrotechnique
Spécialité : Machines électriques

Présenté par

REMMIDE Ali Abd errahmen

&

FERHAT Mohamed Amine

Étude de la répartition optimale des puissances dans les réseaux de transport de d'énergie électrique pour un écoulement de puissance optimal

Proposé par : Dr. CHANANE Abdallah

Année Universitaire 2022-2023

Dédicace

Je dédie ce travail à mes chers parents, qui m'ont toujours entouré de leur amour et se sont sacrifiés pour me donner le meilleur. Leur soutien inconditionnel et leurs encouragements constants ont été essentiels pour m'aider à avancer. J'espère avoir été à la hauteur de tout ce qu'ils m'ont apporté.

Je souhaite également dédier ce travail à mon frère, dont la présence et le soutien ont été une source d'inspiration et de motivation tout au long de ce parcours.

À ma famille dans son ensemble et à mes amis, je leur exprime ma profonde gratitude pour leur présence et tous les moments de bonheur partagés ensemble. Leur soutien et leurs encouragements ont été précieux et ont contribué à rendre cette expérience encore plus significative.

Je suis reconnaissant envers tous ceux qui ont été là pour moi et qui ont contribué de différentes manières à la réalisation de ce travail.

Ali Abderhamen

Je tiens à dédier ce mémoire avec une mention spéciale à ma mère, qui a été la force motrice derrière ma réussite. Tes sacrifices, ton amour inconditionnel et ton soutien constant ont été les fondements de mes réalisations. Je ne pourrai jamais assez te remercier pour tout ce que tu as fait pour moi. Un grand merci à mes deux sœurs, Hadjer et Amira, qui ont été mes compagnes de voyage tout au long de ce parcours. Je suis reconnaissant d'avoir des sœurs aussi formidables.

À mon frère Oussama, merci pour ton soutien constant et tes conseils avisés. Tu as été un modèle de réussite et de persévérance, et je suis honoré de t'avoir comme frère.

Un merci tout particulier à mon neveu Iyad, le bébé de la famille, qui a apporté une dose de joie et d'inspiration à ma vie. Ta présence joyeuse et ta pureté d'esprit ont été une source d'énergie positive pour moi pendant cette période.

Un merci chaleureux à mon père, dont la sagesse, les encouragements et les enseignements ont été inestimables.

Et enfin, je souhaite exprimer ma profonde gratitude à tous mes amis qui ont été à mes côtés.

Mohamed Amine, Merci.

Remerciement

Nous exprimons notre profonde gratitude envers **ALLAH** qui, non seulement a exaucé nos prières, mais nous a également comblés de courage, de force et de patience nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nos sincères remerciements vont à notre promoteur, Monsieur **CHANANE Abdallah**, pour son soutien constant, son aide précieuse et ses conseils éclairés tout au long du processus de recherche. Nous lui sommes reconnaissants pour sa patience et son dévouement infailibles.

Nous tenons à exprimer notre chaleureuse gratitude envers les membres du jury qui ont généreusement consacré leur précieux temps à évaluer notre travail. Nous leur sommes reconnaissants pour l'honneur qu'ils nous ont fait.

Enfin, nous souhaitons exprimer notre profonde reconnaissance à Monsieur **BELAZOUG Messaoud**, le chef de spécialité, ainsi qu'à l'ensemble des enseignants du département d'automatique et électrotechnique de notre université, qui ont joué un rôle essentiel dans notre formation au cours de ces cinq années d'études. Leur expertise et leur générosité dans le partage des connaissances ont été d'une valeur inestimable.

ملخص

الشبكة الكهربائية هي نظام معقد ومترابط يتكون من خطوط نقل ومحطات فرعية ومحولات. هدفها نقل الكهرباء من محطات توليد الطاقة إلى المستخدمين النهائيين مثل الأسر والشركات والصناعات. ومع ذلك ، تواجه الشبكات الكهربائية تحديات بسبب فقدان الطاقة وتسببها في تبيد الموارد. تركز هذه البحث على تحسين تدفق الطاقة لتقليل الخسائر النشطة ، باستخدام نماذج رياضية لتمثيل خصائص الشبكة وتوزيع الطاقة. الهدف هو العثور على تكوينات شبكة مثلى تضمن الاستقرار والموثوقية وفي الوقت نفسه تقليل الخسائر النشطة. على وجه التحديد ، يستكشف الدراسة خوارزمية التعلم المعدلة (م-ت-ل-ا) كطريقة تحسين ذاتية للتدريس وخوارزمية ك-متوسطة للتجميع في تحسين تدفق الطاقة في الشبكات الكهربائية. من خلال استغلال هذه النهج ، تهدف البحث إلى تقليل الخسائر النشطة التي تسببها مقاومة مكونات الشبكة. تحسن هذه الخفض ليس فقط كفاءة الشبكة بشكل عام ، ولكن له أيضاً آثار مالية هامة على شركات الكهرباء. تحلل الدراسة التقنيات الحديثة في مجال الذكاء الاصطناعي وتعلم الآلة للتخفيف من الخسائر النشطة ، مما يساهم في تطوير أنظمة كهربائية أكثر كفاءة واستدامة.

الكلمات المفتاحية: الشبكات الكهربائية، تدفق الطاقة، التدفق الامثال للطاقة ، الخوارزمية التعليم والتعلم معدلة ، الخوارزمية التجميع ك-متوسطة

Abstract

The electrical network is a complex and interconnected system comprising transmission lines, substations, and transformers. Its purpose is to transport electricity from power plants to end users, such as households, businesses, and industries. However, energy losses within the network pose challenges and lead to inefficiencies in resource utilization. This research focuses on optimizing power flow to minimize active losses, using mathematical models to represent network characteristics and power distribution. The goal is to find optimal network configurations that ensure stability and reliability while minimizing active losses. Specifically, the study explores the Modified Teaching Learning Algorithm (MTLA) as a meta-heuristic optimization method and the K-means algorithm for clustering in power flow optimization (OPF) of electrical networks. By leveraging these approaches, the research aims to reduce active losses caused by resistance in network components. This reduction not only enhances overall network efficiency but also has significant financial implications for electricity companies. The study analyzes modern artificial intelligence and machine learning techniques to mitigate active losses, contributing to the development of more efficient and sustainable electrical systems.

Keywords: electrical network, Power Flow (PF), Optimal Power Flow (OPF), TLBO, MTLA, K-means.

Résumé

Le réseau électrique est un système complexe et interconnecté comprenant des lignes de transmission, des sous-stations et des transformateurs. Son objectif est de transporter l'électricité des centrales électriques vers les utilisateurs finaux tels que les ménages, les entreprises et les industries. Cependant, les pertes d'énergie dans le réseau posent des défis et entraînent des inefficacités dans l'utilisation des ressources. Cette recherche se concentre sur la répartition optimale de puissance pour minimiser les pertes actives, en utilisant des modèles mathématiques pour représenter les caractéristiques du réseau et la distribution de puissance. L'objectif est de trouver des configurations optimales du réseau qui garantissent la stabilité et la fiabilité tout en minimisant les pertes actives. Plus précisément, l'étude explore l'algorithme d'apprentissage d'enseignement modifié (MTLA) en tant que méthode d'optimisation métaheuristique et l'algorithme de K-means pour le regroupement dans l'écoulement de puissance optimal des réseaux électriques. En exploitant ces approches, la recherche vise à réduire les pertes actives causées par la résistance des composants du réseau. Cette réduction améliore non seulement l'efficacité globale du réseau, mais a également des implications financières significatives pour les compagnies d'électricité. L'étude analyse des techniques modernes d'intelligence artificielle et d'apprentissage automatique pour atténuer les pertes actives, contribuant ainsi au développement de systèmes électriques plus efficaces et durables.

Mots Clée : Réseau électrique, répartition de puissance ,répartition de puissance optimal,algorithme d'enseignement et d'apprentissage modifier , K-moyenne

Table des matières

Table des figures	i
Liste des tableaux	iv
Introduction Générale	1
1 Présentation Générale Du réseau électrique, Terminologie Et Concept De Base	3
1.1 Introduction	3
1.2 Description du réseau électrique	3
1.3 Historique des réseaux électriques :	5
1.4 Domaines de tension de réseau électrique :	5
1.5 Hiérarchisation du réseau électrique :	6
1.5.1 Centrales de production de l'énergie électrique :	7
1.5.2 Le réseau de transport d'électricité :	8
1.5.3 Le réseau de répartition :	10
1.5.4 Le réseau de distribution :	10
1.5.5 Consommation (charge) :	11
1.6 Structure topologiques des réseaux électriques :	12
1.6.1 Réseau maillé :	13
1.6.2 Réseau bouclé :	14
1.6.3 Réseau radiale :	15
1.6.4 Réseau arborescent :	15
1.7 Configuration de base d'un réseau électrique :	16
1.7.1 Les équipements de puissances de la réseau électrique :	16
1.7.2 Les systèmes de commande et de surveillance dans un réseau électrique (Téléconduite des réseaux électriques)	22
1.8 Représentation et analyse des réseaux électriques	24
1.8.1 Représentation des réseaux électriques :	24

1.8.2	Analyse des réseaux électriques :	25
1.9	Conclusion	28
2	Modélisation des Réseaux électriques, Problème de Répartition de puissance (PF) et de répartition optimal de puissance (OPF)	29
2.1	Introduction	29
2.2	Description et modélisation des éléments de puissances du réseau électrique	30
2.2.1	Modélisation de la génératrice :	30
2.2.2	Modélisation des Systèmes de transmission de l'énergie (lignes, transformateur) :	31
2.3	Étude de répartition de puissance dans un réseau électrique :	37
2.3.1	L'objectif de l'étude la répartition de puissance (Power Flow) :	37
2.3.2	Analyse le problème de répartition de puissance :	38
2.3.3	Formulation d'équations de base de répartition de puissance :	41
2.3.4	Formulation des équations de tension	44
2.3.5	Formulation des équations des puissances actives et réactives :	45
2.3.6	Les Méthodes numériques appliquées pour la résolution du problème de répartition de puissance :	47
2.4	La Répartition optimal de puissance (OPF)	47
2.4.1	Les domaines d'application de répartition optimal de puissance (OPF)	48
2.4.2	Formulation mathématique du problème de répartition optimal de puissance :	48
2.5	La résolution de l'écoulement de puissance optimal par les méthodes d'optimisation méta-heuristiques	52
2.6	Conclusion :	53
3	La méthode d'optimisation méta-heuristique et l'algorithme de clustering applicables au problème de répartition optimal de puissance (OPF)	54
3.1	Introduction	54
3.2	L'optimisation	55
3.3	Problème d'optimisation	56
3.3.1	Classification des problèmes d'optimisation	57
3.3.2	Les méthodes de résolution d'un problème d'optimisation :	58
3.4	Optimisation Combinatoire	60
3.4.1	Les méthodes exactes	61
3.4.2	Les Méthodes approchées	61

3.5	L'optimisation basée sur l'apprentissage et l'enseignement (TLBO : Teaching Learning Based Optimization) :	64
3.5.1	Modèle mathématique de l'algorithme TLBO	65
3.5.2	Les étapes principales de TLBO pour l'optimisation	66
3.5.3	Organigramme (flowchart) de l'algorithme basée sur l'apprentissage et l'enseignement (TLBO)	67
3.6	L'algorithme d'enseignement et d'apprentissage modifier(MTLA)	69
3.6.1	Les étapes de l'algorithme d'enseignement et d'apprentissage Modifier (MTLA)	69
3.6.2	Organigramme (flowchart) de l'algorithme d'enseignement et d'apprentissage modifier (MTLA)	69
3.7	L'algorithme de Clustering K-Means	71
3.7.1	Les étapes principales de l'algorithme de K-means	72
3.7.2	Oranigramme (flowchart) de l'algorithme de clustering K-means	72
3.8	Conclusion	74
4	Application Numérique, Résultats de la Simulation et Interprétation	75
4.1	Introduction	75
4.2	Environnement de travail	75
4.3	Aperçu sur le matpower	76
4.3.1	Réseau électrique testé pour le système IEEE 14-bus	76
4.4	Application 01 : Optimisation par l'algorithme d'enseignement et d'Apprentissage modifier(MTLA)	77
4.4.1	Les puissances actives générer PG au jeux de barres du générateur	78
4.4.2	Les figures des pertes de puissance active (réelle)	81
4.4.3	Classifications et traitement des donnés du système	84
4.5	Application 02 : Optimisation par la méthode k-means	84
4.5.1	Les pertes de la puissance active	84
4.6	Conclusion	88
	Conclusion Générale	90
	Bibliographie	91

Table des figures

- 1.1 Voyage de l'électricité à travers les réseaux électriques de la centrale qui la produit à l'endroit où on l'utilise. 4
- 1.2 Différents domaines de tension alternative normalisée [1]. 6
- 1.3 Hiérarchisation du réseau électrique 7
- 1.4 différentes sources d'énergie utiliser en Algérie (ministère de l'énergie). . . 8
- 1.5 Exemple d'une partie d'un réseau de transport de l'électricité. 9
- 1.6 Réseau de répartition de l'électricité. 10
- 1.7 Réseau de distribution de l'électricité. 11
- 1.8 Répartition des ventes d'électricité en Algérie pour l'année 2017 (ministères de l'énergie). 11
- 1.9 Les structures topologique dans les différentes parties du réseau électrique (transport, répartition et distribution). 13
- 1.10 schéma simplifiée de structure maillé. 14
- 1.11 Schéma simplifiée de Structure bouclé. 14
- 1.12 Schéma simplifiée de Structure radiale. 15
- 1.13 Schéma simplifiée de structure arborescente. 16
- 1.14 Le principe de fonctionnement de générateur. 17
- 1.15 Les câbles électriques souterrains [2]. 18
- 1.16 Le poste de transformation de haute tension (HTA). 19
- 1.17 Les différents types des postes dans un réseau électrique. 19
- 1.18 Éléments de sous-station à haute tension. 20
- 1.19 Différents types de transformateurs sont utilisés dans les postes électriques. 21
- 1.20 Les jeux de barres à HT 110kV. 22
- 1.21 Exemple d'un système SCADA (service téléconduite SCADA Sonelgaz Blida). 23
- 1.22 Le schéma unifilaire de réseau électrique. 25
- 1.23 Exemple de représentation triphasé d'un réseau électrique à 4 accès avec son circuit équivalent en monophasé. 26

2.1	Modèle du générateur dans le système pu.	30
2.2	Représentation schématique d'une ligne de transmission uniforme	31
2.3	Modèle de circuit équivalent d'une Ligne courte.	32
2.4	Le Modèle en π (pi) nominal d'une ligne de transmission moyenne	33
2.5	Le modèle en T nominal d'une ligne de transmission moyenne.	34
2.6	Le modèle d'une Ligne de transmission longue (long transmission lines).	35
2.7	Le Modèle du transformateur [3].	35
2.8	le modèle d'une charge électrique.	36
2.9	Le modèle de l'élément shunt.	37
2.10	schéma unifilaire avec trois jeux de barre (bus).	40
2.11	schéma unifilaire d'un réseau électrique à 4 nœuds.	42
2.12	Les méthodes numérique appliquées plus utilisée pour résoudre le problème de répartition de puissance.	47
2.13	Les domaines qui utilisent dans la répartition de puissance (OPF).	48
3.1	Différence entre un optimum global et des optimum locaux.	56
3.2	Classification générale des méthodes d'optimisation	59
3.3	Classification les méthodes de résolution de problème d'optimisation combinatoire	60
3.4	Classification des méthodes méta-heuristiques	63
3.5	Organigramme (flowchart) de l'algorithme basée sur l'apprentissage et l'enseignement (TLBO)	68
3.6	Oranigramme général de l'algorithme MTLA pour la solution de l'écoulement de puissance optimal (OPF)	70
3.7	Le fonctionnement de l'algorithme de clustering K-means	71
3.8	Organigramme (flowchart) de l'algorithme K-means	73
4.1	Schéma unifilaire du réseau électrique IEEE (14-bus system)	77
4.2	Les pertes de puissance active obtenues après l'application des équations proposées	78
4.3	les puissances actives PG au jeux de barres du générateur de proposition 1	79
4.4	Les puissances actives générer PG au jeux de barres du générateur de proposition 2	79
4.5	Les puissances actives générer PG au jeux de barres du générateur de proposition 3	80
4.6	Les puissances actives générer PG au jeux de barres du générateur de proposition 4	80

4.7	Les puissances actives générer PG au jeux de barres du générateur de proposition 5	81
4.8	Le graphe est représente la première proposition	81
4.9	le graphe est représente la deuxième proposition	82
4.10	Le graphe est représente la troisième proposition	82
4.11	Le graphe est représente la quatrième proposition	83
4.12	Le graphe est représente la cinquième proposition	83
4.13	Les données des propositions avec OPF	86
4.14	Présentation des groupes	87
4.15	présentation des groupes	88

Liste des tableaux

2.1	Classification des jeux de barres (nœuds) d'un réseau électrique.	41
4.1	Les caractéristiques de l'environnement de simulation.	75
4.2	Les résultats obtenues de la minimisation des pertes active pour 5 propositions par l'algorithme (MTLA).	77
4.3	Les résultats obtenues par l'algorithme de K-means dans les cinq propositions	85

Liste des symboles et abréviation

OPF	l'écoulement de puissance optimal.
P_i	Puissance active et réactive triphasée injectée au nœud i .
Q_i	Puissance réactive triphasée injectée au nœud i .
P_{Gi}	Puissance active de génération triphasée injectée au nœud i .
Q_{Gi}	Puissance réactive de génération triphasée injectée au nœud i .
P_{Di}	Puissance active demandée au jeu de barres i .
Q_{Di}	Puissance réactive demandée au jeu de barres i .
S_{ij}	La puissance apparente complexe triphasée injectée au nœud ij .
V_i	Tension complexe au nœud i .
δ_i	Déphasage de la tension au nœud i .
T^{min}, T^{max}	Limites minimale et maximale sur la variable du rapport de transformateurs.
$\overline{V}_s, \overline{I}_s$	Tension et courant à la source respectivement.
$\overline{V}_R, \overline{I}_R$	Tension et courant de charge respectivement.
A, B, C et D	Les paramètres constants de la ligne de transmission.
\overline{Z}	Impédance de la ligne.
R, X	Résistance et réactance de la ligne respectivement.
\overline{Y}	Admittance shunt de la ligne.
h	Contrainte d'égalités.
g	Contrainte d'inégalités.
X	Le vecteur des variables d'état.
U	Le vecteur des variables de contrôle.
F	Fonction objective.
F_2	Fonction de perte.
P_r	Puissance délivrée à la réception.
P_s	Puissance envoyée depuis l'extrémité émettrice.
S_i^*	Le conjugué de la puissance apparente injectée au nœud i .

V_s^*	Le conjugué de la tension au nœud i.
V_L	amplitude de la tension au bus
T	rapport de régulateur de charge de transformateurs ;
G_{ij}	Conductance entre le JDBi et JDBj.
B_{ij}	Susceptance entre le JDBi et JDBj.
V_{max} , V_{min}	Limites max et min de la tension au nœud i.
S_{max} , S_{min}	Limites max et min de la puissance apparente injectée au nœud i.
$P_{Gi}^{max} , P_{Gi}^{min}$	Limites min.et max de puissance active du générateur i.
SCADA	Système de contrôle et d'acquisition de données
PF	Power Flow
OPF	Optimal Power Flow
TLBO	L'optimisation basée sur l'apprentissage et l'enseignement
MTLA	algorithme d'enseignement et d'apprentissage modifié
K-means	Méthode de classification vectoriel
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers

Introduction Générale

Le réseau électrique est un système complexe et inter-connecté de lignes de transmission, de sous-stations et de transformateurs qui permet de transporter l'électricité depuis les centrales électriques jusqu'aux utilisateurs finaux tels que les ménages, les entreprises et les industries. Les réseaux électriques jouent un rôle vital dans notre société moderne en assurant la distribution efficace et fiable de l'électricité. Cependant, ces réseaux sont soumis à diverses contraintes et défis, notamment la présence de pertes d'énergie qui peuvent entraîner des inefficacités et une utilisation inefficace des ressources électriques. Afin de remédier à cette situation, l'optimisation de l'écoulement de puissance, en particulier pour minimiser les pertes actives, est devenue une préoccupation majeure dans le domaine de l'ingénierie électrique.

Au cours de cette étude, des modèles mathématiques seront utilisés pour représenter les caractéristiques du réseau électrique et la répartition de puissance. Ces modèles permettront de formuler des problèmes d'optimisation qui visent à trouver les configurations optimales du réseau pour minimiser les pertes actives. Les contraintes physiques et opérationnelles seront également prises en compte pour garantir la stabilité et la fiabilité du réseau.

L'objectif principal de ce mémoire est d'explorer la méthode d'optimisation méta-heuristique à base de population est appelée Algorithme d'apprentissage d'enseignement Modifié (MTLA : Modified Teaching Learning Algorithm) et une méthode de clustering est appelée l'algorithme de K-means utilisées pour optimiser l'écoulement de puissance (OPF) dans les réseaux électriques en vue de minimiser les pertes actives.

Les pertes actives se produisent principalement en raison de la résistance des composants du réseau, notamment les câbles de transmission et les transformateurs. Elles entraînent une diminution de l'efficacité globale du réseau et peuvent avoir un impact financier significatif pour les compagnies d'électricité.

Dans ce contexte, cette thèse propose d'analyser les méthodes modernes basées sur l'intelligence artificielle et machine learning pour réduire les pertes actives dans les réseaux électriques.

ce mémoire est organisée par quatre chapitre :

Le premier chapitre présente une vue d'ensemble du réseau électrique, introduisant les concepts et la terminologie de base associés pour établir une base de connaissances sur les réseaux électriques.

Le deuxième chapitre se concentre sur la modélisation des réseaux électriques et aborde les problèmes de base liés à la répartition de la puissance (PF) et au Problème de Répartition Optimal de Puissance (OPF).

Le troisième chapitre est consacré aux méthodes d'optimisation méta-heuristique, en mettant en évidence l'algorithme d'apprentissage et d'enseignement Modifié (MTLA) et l'algorithme de clustering k-means, une technique de clustering largement utilisée dans le domaine de l'optimisation.

Le quatrième chapitre se concentre sur l'application numérique des méthodes d'optimisation MTLA et de l'algorithme de Clustering K-Means pour l'optimisation de l'écoulement de puissance dans le réseau de test IEEE à 14 jeux de barres bus. Il présente les résultats de simulation obtenus et leur interprétation, notamment en termes de minimisation des pertes actives.

Enfin, on termine notre mémoire par une conclusion générale présentant les perspectives

Chapitre 1

Présentation Générale Du réseau électrique, Terminologie Et Concept De Base

1.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous aborderons de manière générale sur le réseau électrique et on va réviser brièvement d'historique des réseaux électriques et on rappelé aussi quelques les notions de bases de ce système (Hiérarchisation, structure, construction, représentation et analyse des Réseaux électriques).

L'objectif de ce chapitre est donner une base de connaissances sur les réseaux électriques et d'établir les concepts et la terminologie de base qui seront utilisés tout au long de l'étude du sujet.

1.2 Description du réseau électrique

Le réseau électrique est un système qui relie le centre de production d'énergie aux consommateurs d'électricité tels que les villes et les usines. Il est composé d'infrastructures inter-connectées telles que des générateurs, des transformateurs, des lignes de transmission, des réseaux de distribution, des transformateurs de distribution, des disjoncteurs, des appareils de mesure et de contrôle, ainsi que des dispositifs de protection contre la foudre et les courts-circuits. Il peut être géré par des entités publiques ou privées et est souvent réglementé par les gouvernements.

Le but premier d'un réseau d'énergie est de pouvoir alimenter la demande des consommateurs. Comme on ne peut encore stocker économiquement et en grande quantité l'énergie électrique il faut pouvoir maintenir en permanence l'égalité :

$$Production = Consommation + pertes \quad (1.1)$$

Le réseau électrique doit permettre de livrer aux utilisateurs un bien de consommation adapté à leurs besoins, caractérisé par :

- Une puissance (P) disponible, fonction des besoins quantitatifs du client.
- Une tension (V) constante, fonction de cette puissance et du type de clientèle.
- Une fréquence (F) constante.
- Une qualité traduisant la capacité à respecter les valeurs et la forme prévues de ces deux paramètres et à les maintenir dans le temps.
- Fournir l'énergie avec prix acceptable.
- Veiller à la protection de l'environnement.

Dans la figure (1.1) ci dessous est représenté le voyage de l'électricité à travers les réseaux électriques.

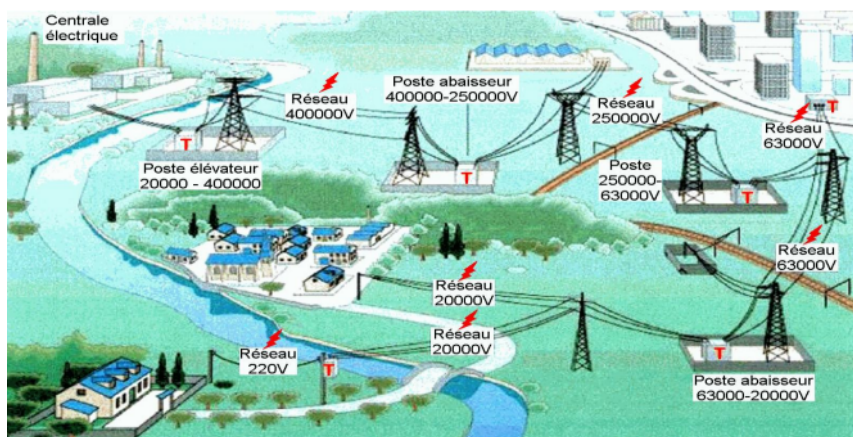


FIGURE 1.1 – Voyage de l'électricité à travers les réseaux électriques de la centrale qui la produit à l'endroit où on l'utilise.

- Le centrale électrique (production) : contiennent des moteurs, des turbines et des générateurs qui convertissent l'énergie mécanique en énergie électrique.
- Les postes électriques (éleveur et abaisseur) : c'est celui qui permet d'élever et d'abaisser le niveau de conversion d'énergie selon les usages au moyen de transformateurs électriques.
- Réseau de Transport et de distribution : Il contient des lignes électriques avec différents niveaux de tension connectés les uns aux autres pour transférer de l'énergie au moyen de poteaux électriques.

1.3 Historique des réseaux électriques :

Historiquement, les réseaux électriques sont apparus vers la fin XIXe siècle avec Thomas Edison qui a réalisé un réseau de distribution en courant continu. Lucien Gaulard et John Gibbs ont mis au point en 1884 un transformateur de forte puissance utilisant du courant alternatif triphasé, permettant de changer facilement le niveau de tension. George Westinghouse, ingénieur et entrepreneur américain, a acheté en 1887 les brevets du transformateur de Gaulard et embauché Nikola Tesla qui inventa l'alternateur triphasé en 1891.

A cette période, aux états unis, un conflit a opposé Thomas Edison à Nikola Tesla. Edison a développé des systèmes en courant continu à 110 V qu'il estimait être plus sûr que l'alternatif. Tesla, défenseur du courant alternatif, a préféré la tension de 240 V, meilleur pour le transport sur de longues distances. Il a aussi estimé que la fréquence de 60 Hz était celle qui permettait d'obtenir le meilleur rendement pour les générateurs de courant alternatif. En Europe, la compagnie allemande AEG qui a mis en place le premier service de production d'électricité a opté pour le 50 Hz. Bénéficiant du monopole, elle a diffusé ce standard sur tout continent. Et jusqu'à la deuxième guerre mondiale on utilisait le 110 V en Europe, au Japon et aux États-Unis.

Depuis les années 1960, les pays européens utilisent le 220V sous 50Hz, alors qu'aux états unis, c'est toujours le 110V à 60Hz qui est en service. Ainsi, il apparaît que les valeurs de la tension et de la fréquence de distribution de l'électricité sont dues davantage à la tradition qu'à des considérations techniques.

1.4 Domaines de tension de réseau électrique :

Les domaines de tension de réseau électrique sont définis par la tension nominale, qui est la valeur de la tension par laquelle l'installation électrique ou une partie de l'installation électrique est désignée et identifiée.

Les domaines de tension sont classés en fonction du type de courant (alternatif ou continu) et du type de tension (haute ou basse). Les domaines de tension dans un réseau électrique peuvent varier en fonction des pays et des normes en vigueur.

D'après la nouvelle norme française (NFC 18-510) définit les domaines de Tension alternants comme suit :

- Très Basse Tension (Domaines TBT) des tensions composées est comprises entre :
 $0 < U_n \leq 50V$.

- Basse tension A (Domaines BTA) des tensions composées est comprises entre : $50v < U_n \leq 500V$.
- Basse Tension B (domaine BTB) des tensions composées est comprises entre : $500v < U_n \leq 1000V$.
- Haute Tension A (domaine HTA) des tensions composées est comprises entre : $1kV < U_n \leq 50kV$.
- Haute Tension B (domaine HTB) des tensions composées est supérieure à 50 KV : $U_n > 50kV$.

Dans la figure (1.2) ci-dessous est représenté les domaines de tension alternative normalisée.

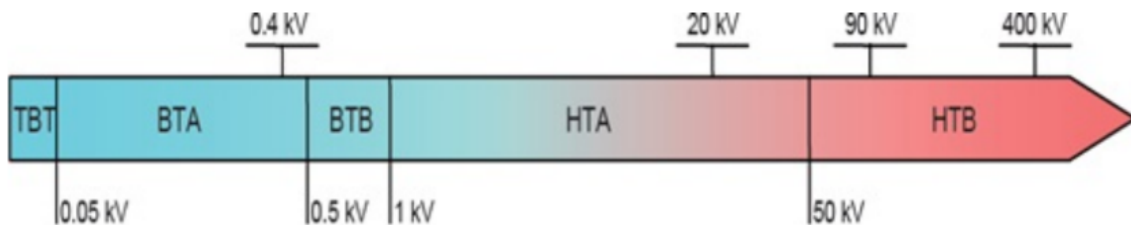


FIGURE 1.2 – Différents domaines de tension alternative normalisée [1].

Les niveaux de tension sont déterminés en fonction de la puissance électrique transportée et de la distance entre les points de production et de consommation.

1.5 Hiérarchisation du réseau électrique :

Le réseau électrique peut être hiérarchisé en différents niveaux selon le niveau de tension et le rôle des différents éléments du système. Le Hiérarchisation du réseau électrique est :

- Stations de production ou centrales électriques.
- Réseau de transport et d'interconnexion.
- Réseau de répartition.
- Réseau de distribution.
- Consommation.

Dans la figure (1.3) est montrée la hiérarchisation du réseau électrique.

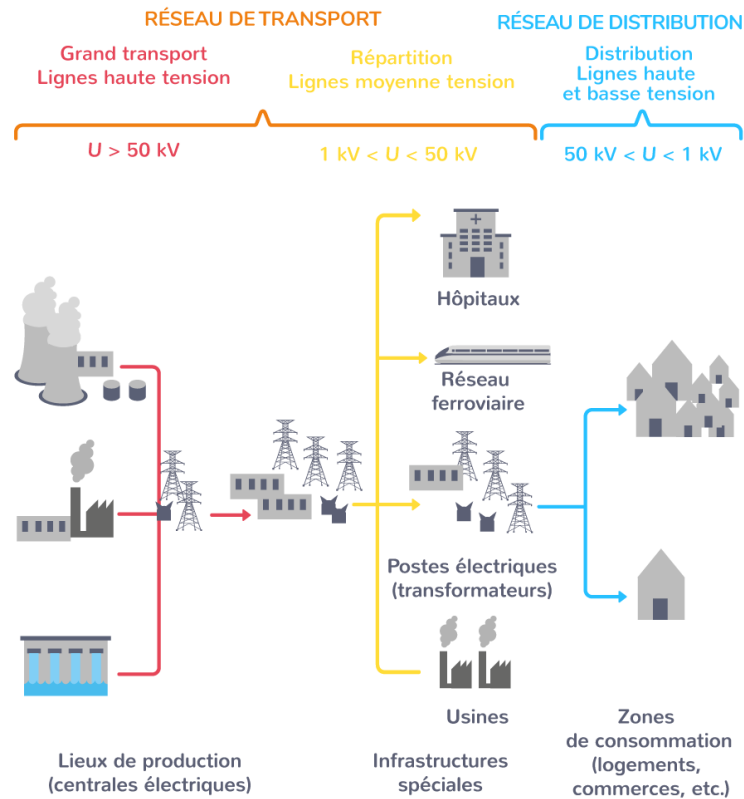


FIGURE 1.3 – Hiérarchisation du réseau électrique

1.5.1 Centrales de production de l'énergie électrique :

La production d'électricité est la première étape dans le réseau électrique, L'énergie électrique est produite par des usines spéciales connues sous le nom de centrales électriques. Une centrale électrique utilise essentiellement un moteur primaire couplé à un alternateur pour la production d'énergie électrique. Il est connecté sur le réseau de transport via un transformateur de groupe. [4]

Les centrales électriques c'est une installation industrielle destinée à la production d'électricité à partir d'une source d'énergie primaire. Les centrales électriques alimentent en électricité, au moyen du réseau électrique, les consommateurs, particuliers ou industriels éloignés de la centrale. La production d'électricité y est assurée par la conversion de l'énergie primaire en énergie électrique, qui est ensuite transportée sur le réseau électrique.

Les centrales de production peuvent utiliser différentes sources d'énergie, telles que l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne, l'énergie solaire, l'énergie nucléaire, l'énergie ther-

mique, ou encore l'énergie fossile (charbon, pétrole, gaz).

Dans la figure (1.4) ci-dessous est représentée les différentes sources d'énergie utilisées en Algérie.

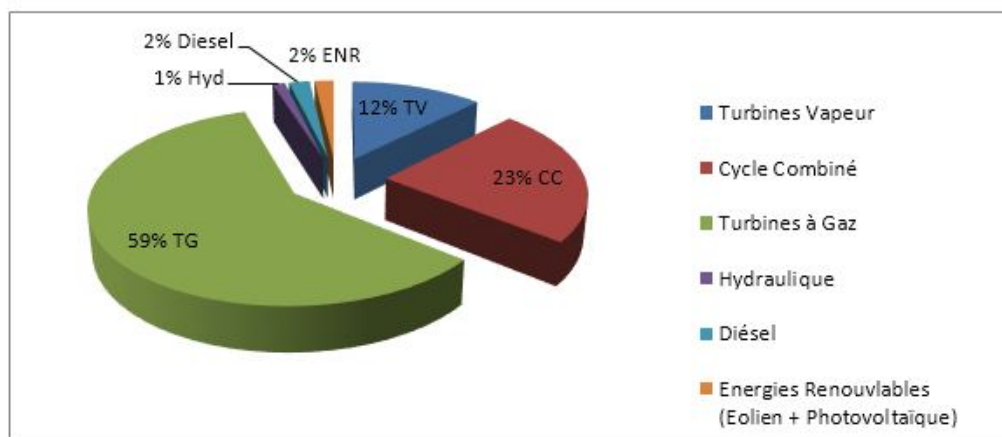


FIGURE 1.4 – différentes sources d'énergie utilisées en Algérie (ministère de l'énergie).

1.5.2 Le réseau de transport d'électricité :

Le réseau de transport d'électricité permet le transport à très haute tension de l'énergie sur de longues distances, reliant les centres de production aux centres de consommation. Il est composé de lignes aériennes et triphasées à haute et très haute tension, de pylônes électriques et de postes électriques. Ces infrastructures permettent de modifier la tension en fonction des besoins du réseau et de maintenir l'équilibre entre l'offre et la demande d'électricité. La haute tension est utilisée pour réduire les pertes d'énergie lors du transfert sur de longues distances. Elle est généralement comprise entre 225 kV et 400 kV dans ce réseau, car une tension plus élevée entraîne un courant plus faible, réduisant ainsi les pertes dues à la résistance des câbles. La valeur optimale de la tension de transmission dépend de facteurs tels que la quantité d'énergie transmise et la distance de transmission. L'utilisation de la haute tension présente également un avantage économique en permettant l'utilisation de lignes plus fines et légères, évitant ainsi la nécessité de structures massives pour supporter des fils lourds, réduisant ainsi les coûts de transport de l'électricité.

La puissance transportée par une ligne électrique est Proportionnelle au courant électrique et à la tension :

$$P = U.I \quad (1.2)$$

Les lignes s'échauffent sous l'action du courant qui les traverse et de la résistance des

câbles. La puissance de la chaleur P_c produite par effet Joule vaut :

$$P_j = R.I^2 \quad (1.3)$$

Exemple : Dans l'exemple suivant est montré pourquoi on utilise des lignes à très haute tension (400.000 Volts) reliées entre elles pour former le réseau de transport d'électricité qui couvre tout le pays.

Si on considère le transport de 200 MW requis pour alimenter une ville de 100 000 foyers, il faudrait pour une ligne de très haute tension à 400 kV un courant de 500A. Pour une ligne de moyenne tension à 20 kV, il aurait fallu un courant de 10 000 A.

Les câbles métalliques utilisés dans les lignes haute tension ont une résistance d'environ $0.05 \Omega/\text{km}$, soit 5Ω pour 100 km. La puissance dissipée sous forme de chaleur au bout de 100 km serait donc :

À très haute tension :

$$P_j = R.I^2 = 5(500)^2 = 1,25\text{MW}$$

À moyenne tension :

$$P_j = R.I^2 = 510^8 = 500\text{MW}$$

Les protections de ces réseaux doivent être très performantes. Quant à leur exploitation, elle est assurée au niveau national par un centre de conduite ou dispatching à partir duquel l'énergie électrique est surveillée et gérée en permanence. [5]

Dans la figure (1.5) ci-dessous est représenté un exemple d'une partie d'un réseau de transport de l'électricité.



FIGURE 1.5 – Exemple d'une partie d'un réseau de transport de l'électricité.

1.5.3 Le réseau de répartition :

Le réseau de répartition c'est une partie du réseau électrique et a pour objectif de transférer l'électricité à haute tension (environ 60 à 90 kV) du réseau de transport vers les principaux centres de distribution. Il permet le transport à l'échelle régionale ou locale. Le réseau de répartition comprend des lignes électriques à haute tension, généralement aériennes et parfois souterraines près des zones urbaines, ainsi que des transformateurs, des postes sources, des postes de transformation et des dispositifs de protection et de contrôle.

Le but de réseau de répartition est de fournir de l'électricité à l'échelle régionale, en transportant l'électricité vers les installations de moyenne ou haute tension et vers les gros consommateurs tels que les réseaux de transport ferroviaire.

La protection du réseau de répartition est similaire à celle utilisée dans les réseaux de transport, et les centres de contrôle sont généralement régionaux pour superviser et contrôler le réseau [6].

Dans la figure (1.6) ci-dessous est représenté le schéma simplifié du réseau de répartition.

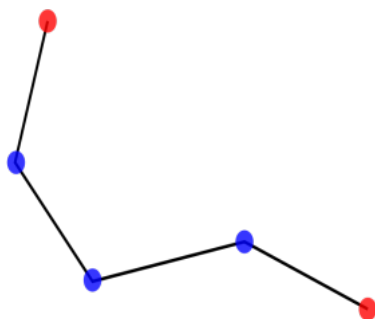


FIGURE 1.6 – Réseau de répartition de l'électricité.

1.5.4 Le réseau de distribution :

Le réseau de distribution assure la livraison d'électricité à haut tension et basse tension (30kV, 400V) depuis le réseau de répartition jusqu'aux consommateurs finaux. ce réseau son exploitation est gérée par un Gestionnaire de Réseau de Distribution (GRD).

Le réseau de distribution se compose de plusieurs éléments principaux, notamment : les postes de distribution, les transformateurs de distribution, les compteurs électriques et les lignes de distribution (aérienne et souterraine).

Dans la figure (1.7) ci-dessous est représenté un exemple du réseau de distribution .



FIGURE 1.7 – Réseau de distribution de l'électricité.

Les réseaux de Distribution en Algérie est alimentent : 9.164.334 clients [7].

La figure (1.8) ci-dessous est représentée la répartition des ventes d'électricité en Algérie pour l'année 2017.

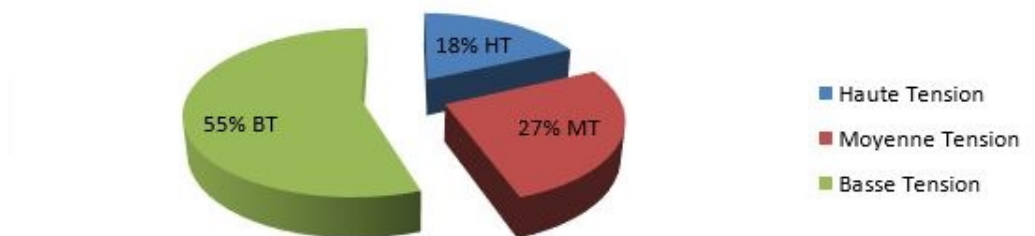


FIGURE 1.8 – Répartition des ventes d'électricité en Algérie pour l'année 2017 (ministères de l'énergie).

1.5.5 Consommation (charge) :

La consommation est représentée la charge (load) dans le réseau électrique correspond à l'utilisation de l'électricité par les consommateurs finaux, Ce niveau comprend les compteurs, les disjoncteurs et les équipements électriques utilisés par les consommateurs, tels que les ménages, les entreprises, les industries, les services publics, etc. La consommation électrique est mesurée en kilowattheures (kWh) et dépend des besoins en électricité des utilisateurs, ainsi que de leur comportement en matière d'utilisation de l'énergie.

Dans un réseau électrique, la consommation d'électricité varie en fonction de plusieurs facteurs, tels que la période de l'année, le moment de la journée, la météo, l'activité économique, etc.

1.6 Structure topologiques des réseaux électriques :

Les réseaux électriques sont des systèmes complexes qui sont conçus pour fournir de l'énergie électrique aux consommateurs finaux. La structure topologique des réseaux électriques décrit la façon dont les composants du réseau sont connectés les uns aux autres tels que des générateurs, des transformateurs, des lignes de transmission, des sous-stations et des postes de distribution.

Les topologies diffèrent d'un type de réseau à l'autre, où chaque réseau a une structure particulière, et cette structure est déterminée par les caractéristiques des sources de production, les besoins des utilisateurs, l'expérience d'exploitation, en plus des facteurs économiques des coûts qui conduisent au choix de la structure topologique des réseaux, et les réseaux électriques peuvent être organisés selon plusieurs types de structures à savoir : Réseau maillé, Réseau bouclé, Réseau radiale et Réseau arborescent.

Dans la figure (1.9) est montrée la structure topologique dans les différentes parties du réseau électrique.

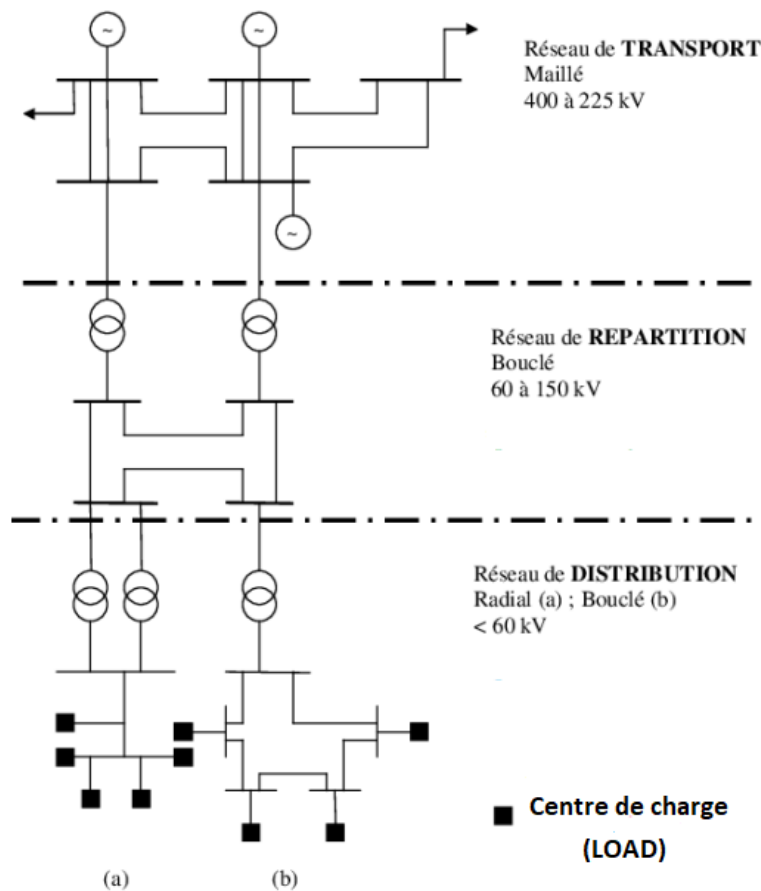


FIGURE 1.9 – Les structures topologique dans les différentes parties du réseau électrique (transport, répartition et distribution).

1.6.1 Réseau maillé :

Les réseaux maillés sont des réseaux où toutes les lignes sont bouclées formant ainsi une structure analogue à la maille d'un filet. Cette topologie maillée est plus utilisée pour la conception des réseaux de transport.

Les avantages de ce réseau sont une bonne continuité de service, de bonnes performances et une chute de tension réduite.

Les inconvénients dans une réalisation coûteuse proviennent d'une étude très complexe, et d'un fort courant de court-circuit.

Dans la figure (1.10) ci-dessous est représenté le schéma simplifié de structure maillée.

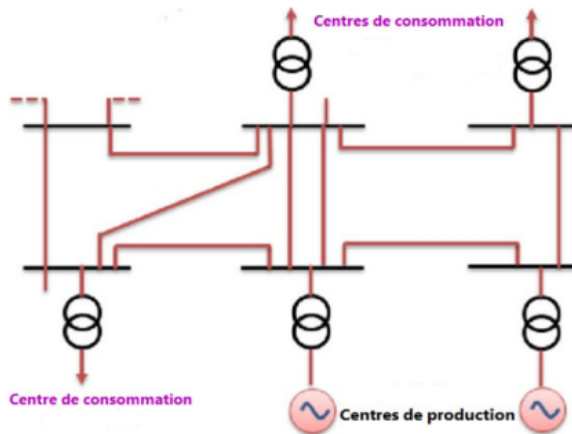


FIGURE 1.10 – schéma simplifiée de structure maillé.

1.6.2 Réseau bouclé :

Un réseau bouclé est un type de réseau électrique maillé qui présente des boucles fermées. Ce type de réseau permet d'assurer la fourniture électrique même si une ligne est coupée, car l'électricité peut emprunter un autre chemin pour atteindre sa destination. Le réseau de transport est toujours bouclé ou maillé, ce qui permet d'assurer la fourniture électrique même si une ligne est coupée.

Les réseaux bouclés présentent des avantages tels que la résilience, la fiabilité et la sécurité et les inconvénients de réseau bouclé un courant de court-circuit très élevé, une réalisation coûteuse, une difficulté d'exploitation et une connexion spéciale aux dérivations.

Dans la figure (1.11) ci-dessous est représentée le schéma simplifiée de structure bouclé.

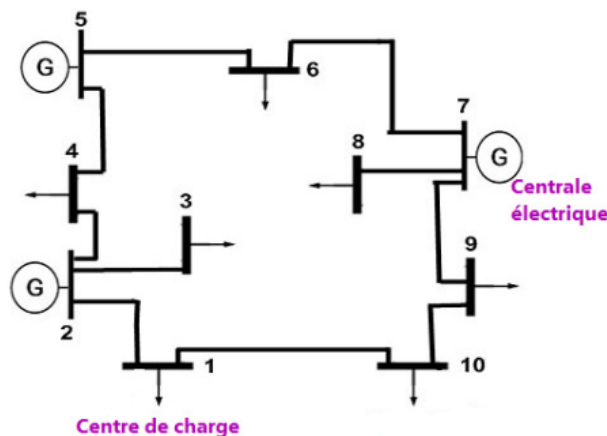


FIGURE 1.11 – Schéma simplifiée de Structure bouclé.

1.6.3 Réseau radiale :

Un réseau radial est un type de réseau électrique qui se compose d'une source d'alimentation unique et de plusieurs branches qui s'étendent vers les consommateurs. Les branches ne sont pas connectées entre elles, ce qui signifie que si une ligne est coupée, les consommateurs situés en aval de cette ligne ne peuvent plus être alimentés en électricité. Ce type de réseau est souvent utilisé dans les zones rurales où la densité de population est faible et où les distances entre les consommateurs sont importantes.

Les réseaux radiaux sont moins coûteux à construire et à entretenir que les réseaux maillés, mais ils sont également moins fiables et moins résilients en cas de panne. Les réseaux de distribution sont destinés à acheminer l'électricité à l'échelle locale, c'est-à-dire directement vers les consommateurs de plus faible puissance.

Dans la figure (1.12) ci-dessous est représenté le schéma de structure radiale.

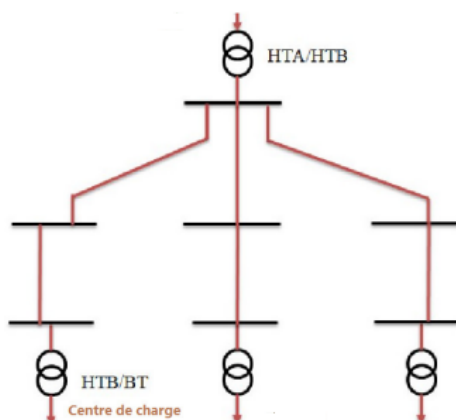


FIGURE 1.12 – Schéma simplifiée de Structure radiale.

1.6.4 Réseau arborescent :

Cette structure est utilisée dans les petites installations à faible consommation d'énergie, où il n'y a pas de grande consommation, très sensible aux interruptions, et les avantages de cette structure sont de faibles chutes de tension et une bonne sécurité de fonctionnement, quant aux inconvénients d'avoir un fort courant de court-circuit et fabrication coûteuse.

Dans la figure (1.13) ci-dessous est montré le schéma simplifié de structure arborescente.

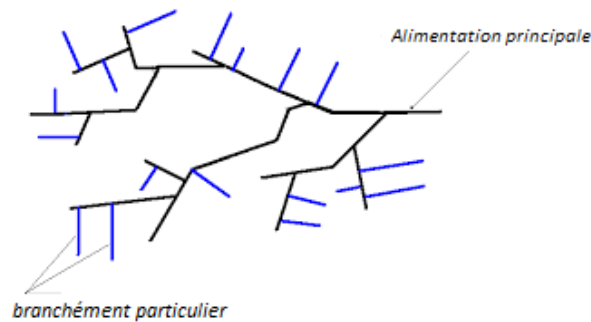


FIGURE 1.13 – Schéma simplifié de structure arborescente.

1.7 Configuration de base d'un réseau électrique :

Le réseau électrique est constitué d'équipements à haute tension, appelés équipements de puissance, chargés de diriger l'énergie du centre de production vers les consommateurs, ainsi que d'équipements et de systèmes de protection et de télécommande, dans lesquels il est facile d'identifier tout défaut du réseau électrique et le traiter rapidement.

La constitution d'un réseau électrique peut varier selon le pays et la région, mais ces éléments constituent les éléments de base d'un réseau électrique typique.

1.7.1 Les équipements de puissances de la réseau électrique :

C'est un ensemble d'équipements qui permettant de transport d'énergie haute tension sur de longues distances de milliers de kilomètres et qui est configuré pour la conversion, la distribution et la gestion de l'énergie électrique et assurer un fonctionnement efficace, sûr et fiable du système électrique.

Nous allons expliquer quelques éléments essentiels des équipements de puissances dans les réseaux électriques.

Générateur (alternateur) :

Un générateur est une machine électrique qui convertit différentes formes d'énergie en énergie électrique. Il utilise diverses sources d'énergie telles que thermique, hydraulique, nucléaire et les énergies renouvelables pour produire de l'électricité.

Ces générateurs sont essentiels pour fournir de l'électricité au réseau électrique, qui est ensuite distribuée aux consommateurs. Ils contribuent à la production d'énergie électrique dans le but de répondre à la demande croissante en électricité.

La figure (1.14) suivante est montrée le principe de fonctionnement de générateur.

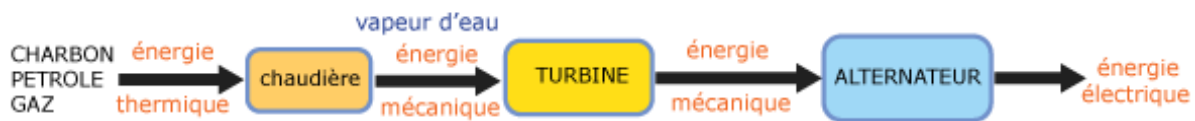


FIGURE 1.14 – Le principe de fonctionnement de générateur.

Les lignes électriques aériennes et souterraines :

Les lignes électriques aériennes et souterraines sont deux types de réseaux utilisés pour le transport et distribuée de l'électricité.

Le choix entre lignes électriques aériennes et souterraines dépend de nombreux facteurs, tels que les contraintes environnementales, les coûts, les exigences de fiabilité du réseau, les réglementations locales et les préférences esthétiques. Dans les zones densément peuplées ou dans les zones où l'esthétique visuelle est une préoccupation majeure, les lignes souterraines peuvent être privilégiées. En revanche, dans les zones rurales ou les régions où l'installation rapide et économique d'un réseau électrique est essentielle, les lignes aériennes sont souvent préférées.

Les lignes électriques aériennes :

Les lignes aériennes sont des infrastructures utilisées pour le transport de l'électricité à travers de longues distances que ce soit pour la distribution d'énergie aux zones résidentielles, commerciales et industrielles, ou pour l'interconnexion des réseaux électriques entre différents pays ou régions. Elles consistent en un réseau de câbles conducteurs qui sont soutenus par des pylônes ou des tours en métal.

Les lignes aériennes peuvent être classées suivant les fonctions qu'elles assurent dans le réseau.

On distingue quatre types de lignes : les lignes de transport HTB ,les lignes de transport HTA ,les Lignes de distribution HTA,les Ligne de distribution BTA.

Les câbles souterrains :

Les câbles souterrains sont une alternative aux lignes aériennes pour transporter l'électricité dans les réseaux de distribution. Ils sont utilisés lorsque les lignes aériennes ne sont pas pratiques ou possibles, par exemple dans les zones densément peuplées, les zones de faible altitude ou les zones où la sécurité est une préoccupation majeure. Les câbles souterrains peuvent également être utilisés pour éviter les interférences électromagnétiques avec les équipements électroniques sensibles.

Ces câbles sont constitués d'un conducteur qui permet la transmission de l'électricité et d'un isolant électrique pour empêcher le courant de circuler vers le sol pour confiner le champ électrique à l'intérieur du câble et protection externe qui garantit de bonnes propriétés mécaniques et le protège des agressions extérieures [8].

La figure (1.15) ci-dessous est représentée les câbles électriques souterrains.



FIGURE 1.15 – Les câbles électriques souterrains [2].

Les postes de transformation (Soustations) :

Les postes de transformation connus aussi sous le nom de sous-stations électriques sont des installations électriques qui permettent de modifier les caractéristiques de l'énergie électrique afin de l'adapter aux besoins des consommateurs. Ils sont utilisés pour transformer la tension, la fréquence et la nature du courant électrique.

L'aspect des postes électriques varie fortement suivant leurs fonctions. Les postes peuvent être en surface à l'intérieur d'une enceinte, souterrains, dans des bâtiments qu'ils desservent [9].

La figure (1.16) suivante est représentée un poste de transformation HTA.



FIGURE 1.16 – Le poste de transformation de haute tension (HTA).

On distingue les postes électriques, suivant les fonctions qu'ils assurent, On trouve 5 types de sous-stations comme schématisé sur la figure (1.17) ci-dessous [10]

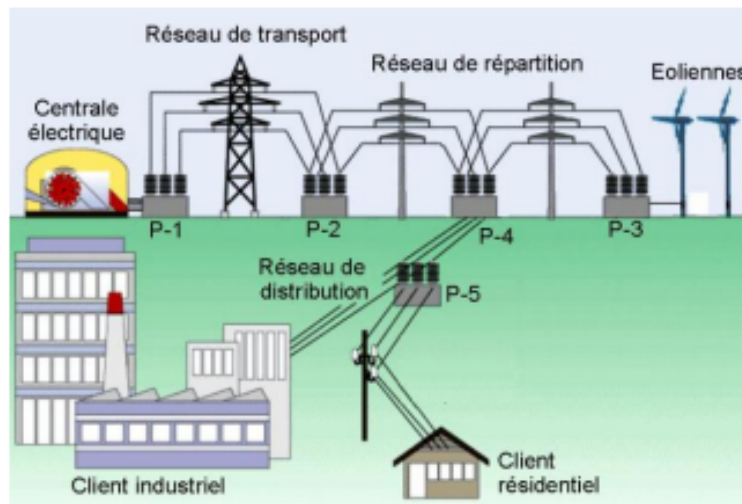


FIGURE 1.17 – Les différents types des postes dans un réseau électrique.

- Postes de sortie de centrale (P1) : le but de ces postes est de connecter la centrale électrique au réseau (la tension passe d'environ 20 à 400 kV pour être injectée sur le réseau de transport d'électricité).

- Postes d'interconnexion (P2) : le but est de connecter plusieurs lignes électriques les unes aux autres.
- Postes éleveurs (P3) : Le but est d'augmenter le niveau de tension à l'aide d'un transformateur.
- Les Postes de répartition et les postes de distribution (P4 et P5) : le but est réduire le niveau de tension pour distribuer l'énergie électrique aux clients (domestiques, industriels...).

Les postes de transformation sont conçus pour être robustes et durables, car ils doivent fonctionner de manière fiable pendant de nombreuses années. La conception précise d'un poste de transformation dépend des exigences spécifiques du réseau électrique et des besoins des clients qui y sont connectés.

Les éléments constitutants d'un poste de transformation :

Un poste de transformation est généralement composé de plusieurs éléments qui permettent de transformer l'énergie électrique et de la distribuer.

La figure (1.18) ci-dessous est montre les éléments principale de sous-station à haute tension.

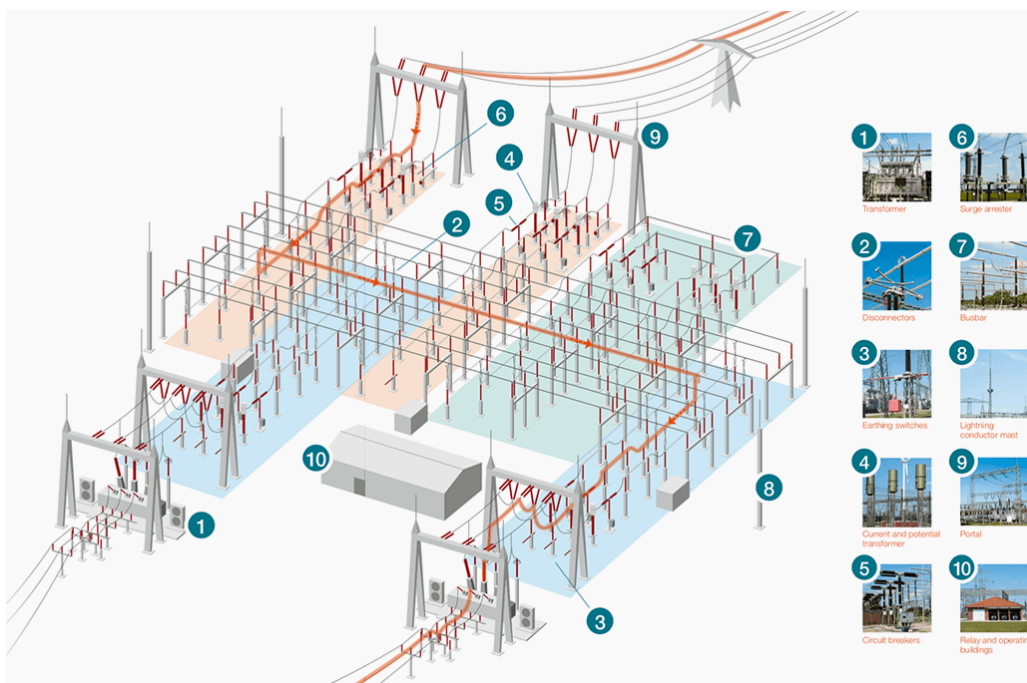


FIGURE 1.18 – Éléments de sous-station à haute tension.

Les principaux éléments constitutifs d'un poste de transformation sont les suivants :

1. transformateurs électriques de puissance ; 2. sectionneurs ; 3. Commutateurs de mise à la terre ; 4. Transformateurs de courant et potentiels ; 5. Disjoncteurs ; 6. Parafoudre ; 7. Jeux de barres ; 8. Mât paratonnerre ; 9. Portail ; 10. Relais et bâtiments d'exploitation.

Transformateur électrique : Un transformateur électrique est une machine électrique permettant de modifier les valeurs de tension et d'intensité du courant délivrées par une source d'énergie électrique alternative, en un système de tension et de courant de valeurs différentes, mais de même fréquence et de même forme [11].

Les transformateurs c'est l'élément principal dans un poste de transformation. Il permet de transformer la tension électrique du réseau de transport ou de distribution en une tension adaptée aux besoins des consommateurs.

Suivant le poste électrique, le transformateur sera :

- Élévateur, la tension au secondaire(en sortie) sera plus élevée que la tension primaire (en entrée), généralement en sortie de centrale.
- Abaisseur, la tension au secondaire(en sortie) sera moins élevée que la tension primaire (en entrée), utilisé pour l'adaptation à l'utilisation.

On a plusieurs types des transformateurs dans un poste électrique : Transformateur de puissance (TP), transformateur de mesure de courant (TC) et de tension (TT).

La figure (1.19) ci-dessous est représentée les différents types de transformateurs sont utilisés dans les postes électriques.



FIGURE 1.19 – Différents types de transformateurs sont utilisés dans les postes électriques.

Jeux de barres (Busbar en anglais) : D'après la définition de la Commission électrotechnique internationale Le jeu de barres est un système de conducteurs en cuivre ou en aluminium utilisé pour distribuer efficacement le courant électrique à différents

équipements du poste. Il se compose de barres métalliques isolées connectées entre elles, permettant le transport du courant électrique à travers le poste. Le jeu de barres est utilisé pour connecter les transformateurs, disjoncteurs, sectionneurs, fusibles, relais, etc. Il comprend généralement une barre principale reliée à la source d'alimentation principale et des barres secondaires pour alimenter les équipements du poste. Le jeu de barres est dimensionné pour supporter des courants importants et utilise des isolateurs et des dispositifs de connexion pour assurer l'isolation et la connexion sécurisée des barres.

La figure (1.20) ci-dessous est représentée les jeux de barres à HT.



FIGURE 1.20 – Les jeux de barres à HT 110kV.

1.7.2 Les systèmes de commande et de surveillance dans un réseau électrique (Téléconduite des réseaux électriques)

Dans un réseau électrique, les systèmes de commande et de surveillance sont essentiels pour garantir un fonctionnement fiable, sûr et efficace. Ces systèmes utilisent des équipements et des logiciels spécialisés pour superviser, contrôler et gérer les opérations du réseau

Ces systèmes permettent la collecte et la surveillance des données et le contrôle à distance du réseau électrique et sont réalisés dans des centres de commande régionaux ou nationaux. Ces systèmes sont devenus indispensables dans le réseau, notamment avec le développement de la technologie dans le monde, car ces systèmes contiennent des équipements pouvant être contrôlés à distance. Ils permettent d'optimiser la performance du réseau, d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique et de garantir la sécurité des opérateurs et des usagers, en particulier le système SCADA, qui est un résumé des mots anglais (Supervisory Control and data Acquisition).

Les systèmes de téléconduite décentralisée MICRO-SCADA en Algérie ont été acquis au début des années 2000 pour les Directions de Distribution de Blida, Sétif, Annaba,

Batna et Tiaret. A partir de 2007, d'autres systèmes SCADA ont été mis en service progressivement pour la télé conduite des réseaux moyenne tension des concessions de Bejaia et Skikda à l'Est, de Biskra, Djelfa, Ouargla et Tizi Ouzou au Centre et de Bechar, Chlef, Mostaganem, Saida, Naâma et El Bayadh à l'Ouest du territoire national [7].

Le système SCADA est un système de contrôle et de gestion essentiel pour les réseaux électriques modernes. Il permet aux opérateurs de surveiller, contrôler et réguler le réseau pour assurer une alimentation électrique sûre, fiable et efficace. Les SCADA utilisent des capteurs et des automates programmables pour surveiller l'état des équipements, recueillir des données et effectuer des commandes. Il est utilisé dans les stations de production, de transmission et de distribution d'électricité.

La figure (1.21) ci-dessous est représentée un système SCADA (service téléconduite SCADA Sonelgaz Blida).

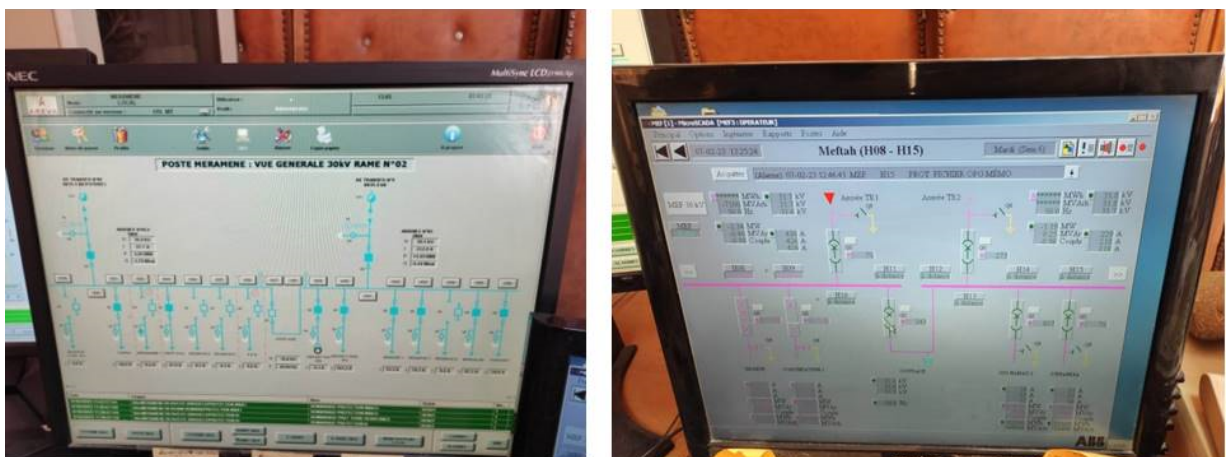


FIGURE 1.21 – Exemple d'un système SCADA (service téléconduite SCADA Sonelgaz Blida).

Les fonctions de base des systèmes SCADA dans un réseau électrique sont :

- Commande des processus de production d'énergie.
- Contrôler à distance les équipements électriques, tels que les disjoncteurs, les transformateurs, les régulateurs de tension, etc.
- Surveillance, collecte et traitement des données.
- Il surveille les variables clés telles que la tension, la fréquence, le courant et la puissance.
- Le système SCADA enregistre tous les événements et les enregistre dans un fichier stocké sur un disque dur ou les envoie à une imprimante.
- Le système SCADA émettait des alarmes lorsque les conditions devenaient dangereuses.

1.8 Représentation et analyse des réseaux électriques

La représentation et l'analyse des réseaux électriques sont des domaines importants dans l'étude des systèmes électriques et peut être effectuée à l'aide des modèles de circuits ces modèles sont complexes, car les réseaux électriques sont en général multiphases et contiennent un nombre élevé de composants (les sources d'alimentation, les transformateurs, les lignes de transmission, les interrupteurs, les disjoncteurs, les générateurs, les moteurs électriques, les transformateurs de puissance et les équipements de contrôle et de protection).

1.8.1 Représentation des réseaux électriques :

Les réseaux électriques sont généralement représentés sous forme de schémas unifilaires ou de schémas multifilaires. Ces représentations fournissent des informations sur la configuration et la connexion des différents composants du réseau électrique.

Les éléments essentiels représentés dans les schémas de réseaux électriques sont : les générateurs, les transformateurs, les lignes de transmission, les jeux de barres (Bus), les charges.

Schéma unifilaire (Single line diagram en anglais) : ce type de schéma est une représentation graphique qui montre la connexion entre les différents éléments du réseau électrique en utilisant une seule ligne. Ce schéma permet de représenter facilement la topologie du réseau et de comprendre la connexion des différents éléments électriques (générateur, transformateur, lignes et charges).

Dans la figure (1.22) ci dessous est représenté le schéma unifilaire du réseau électrique.

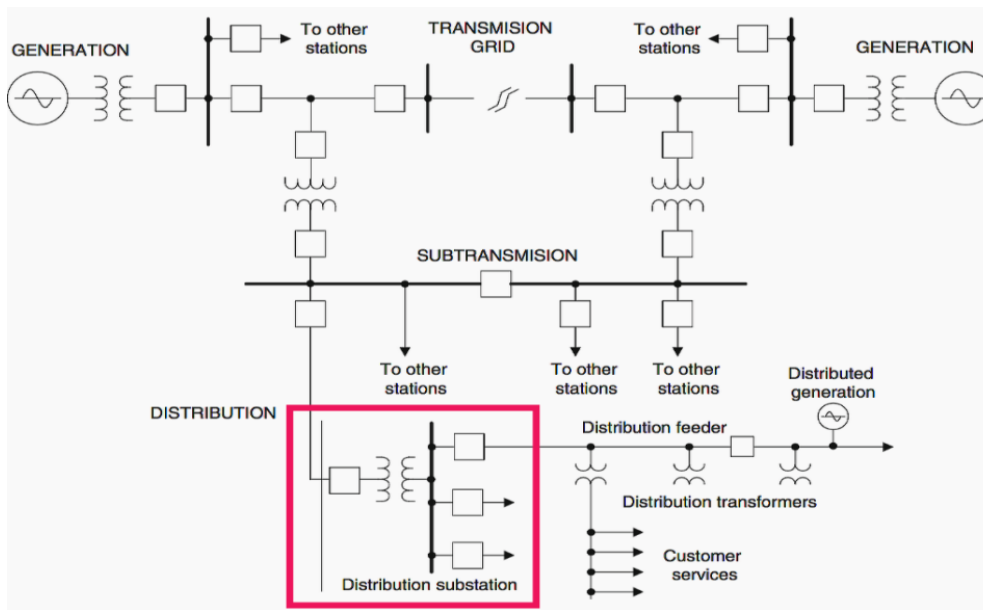


FIGURE 1.22 – Le schéma unifilaire de réseau électrique.

Schéma multifilaire (multi-wire diagram en anglais) : Ce type de schéma utilise plusieurs lignes pour représenter chaque conducteur, ce qui permet de représenter plus précisément la disposition des éléments électriques dans le réseau et une interprétation et une analyse claire des schémas de puissance et de commande. Ce type de schéma est souvent utilisé pour représenter des installations électriques complexes ou de grande taille.

1.8.2 Analyse des réseaux électriques :

L'analyse des réseaux électriques comprend plusieurs aspects tels que l'analyse de la tension, de l'intensité, de la puissance, de l'impédance, de la réactance et de la résistance.

L'analyse des réseaux électriques peut également inclure des techniques telles que l'analyse nodale, l'analyse des courants et des tensions, l'analyse de la matrice d'admittance, l'analyse par phase (en utilisant le circuit monophasé équivalent) et le système d'unité relative (per unit PU).

Analyse de courant et de tension : L'analyse des courants et des tensions dans le réseau électrique est essentielle pour déterminer la qualité de l'électricité distribuée. Les mesures de courant et de tension peuvent être utilisées pour identifier les pertes d'énergie, les chutes de tension, les surcharges et les déséquilibres de charge, ce qui permet de prendre des mesures pour optimiser les performances du réseau.

Analyse de puissance : L'analyse de puissance s'intéresse à la répartition de puissance dans le réseau électrique. Elle comprend l'évaluation des pertes de puissance, des congestions de réseau et des capacités de transport. L'analyse de la puissance permet d'optimiser la répartition des charges, de planifier les investissements en infrastructure et d'améliorer l'efficacité énergétique.

Analyse de charge : L'analyse de charge est utilisée pour déterminer la quantité d'énergie électrique consommée par les différents nœuds de charge dans le réseau. Les données de charge peuvent être utilisées pour planifier et dimensionner les capacités de production et de répartition de puissance, ainsi que pour prévoir les futurs besoins énergétiques.

L'analyse par phase (le circuit monophasé équivalent) : L'analyse par phase, également connue sous le nom de conversion en circuit monophasé équivalent, est une technique couramment utilisée pour simplifier les calculs et les analyses dans les systèmes triphasés. Cette approche consiste à considérer chaque phase d'un système triphasé comme un circuit monophasé distinct, puis à combiner les résultats obtenus pour obtenir l'équivalent monophasé.

Dans la figure (1.23) est représenté un exemple de représentation triphasé d'un réseau électrique à 4 accès avec son circuit équivalent en monophasé.

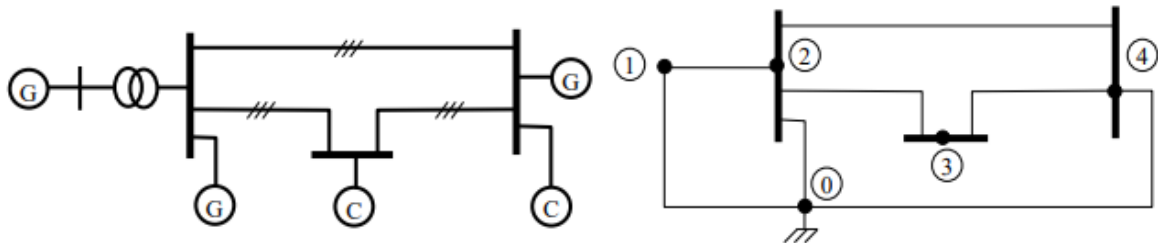


FIGURE 1.23 – Exemple de représentation triphasé d'un réseau électrique à 4 accès avec son circuit équivalent en monophasé.

Le système d'unité relative (system per unit pu en anglais) : le système pu est une système de mesure couramment utilisée pour exprimer les grandeurs électriques en termes de pourcentages ou de fractions par rapport à une valeur de référence. Il est largement utilisé dans l'industrie de l'électricité pour simplifier les calculs et les comparaisons dans les réseaux électriques.

Dans le système pu, une grandeur électrique est divisée par une valeur de référence appropriée, généralement sa valeur nominale ou sa valeur de base. Cette division normalise

les grandeurs et les rend adimensionnelles. La valeur de référence est souvent choisie de manière à simplifier les calculs et à rendre les résultats plus significatifs.

Le système pu est particulièrement utile pour les analyses de répartition de puissance et de stabilité des systèmes électriques. Il permet de représenter les grandeurs telles que les tensions, les courants, les puissances et les impédances sous forme de nombres sans dimension, ce qui facilite les comparaisons et les calculs.

Les grandeurs en unités relatives (pu) sont calculées de la manière suivante :

$$\text{valeur en (pu)} = \frac{(\text{valeur réelle})}{(\text{valeur de base choisie})} \quad (1.4)$$

Dans le système pu, toutes les relations entre tension, puissance, impédance et admittance sont vérifiées et doivent être utilisées :

$$I_{base} = \frac{S_{base}}{U_{base}} \quad (1.5)$$

$$Z_{base} = \frac{U_{base}}{I_{base}} = \frac{(U_{base}^2)}{S_{base}} \quad (1.6)$$

Les formules de conversion pour les grandeurs électriques les plus couramment utilisées en système per unit (pu) :

$$\text{Tension : } U \text{ (pu)} = \frac{U}{U_{base}} \quad (1.7)$$

$$\text{Courant : } I \text{ (pu)} = \frac{I}{I_{base}} \quad (1.8)$$

$$\text{Puissance active : } P \text{ (pu)} = \frac{P}{S_{base}} \quad (1.9)$$

$$\text{Puissance réactive : } Q \text{ (pu)} = \frac{Q}{S_{base}} \quad (1.10)$$

$$\text{Puissance apparente : } S \text{ (pu)} = \frac{S}{S_{base}} \quad (1.11)$$

Où :

U : est la tension réelle en volts (V), I : est le courant réel en ampères (A), P : est la puissance active réelle en watts (W), Q : est la puissance réactive réelle en voltampères réactifs (VAR) et S : est la puissance apparente réelle en voltampères (VA).

U base, I base et S base sont les valeurs nominales de la tension, du courant et de la puissance apparente respectivement.

Les avantages de système d'unités relatives (pu) sont : l'indépendance des unités, la généralisation des résultats, la simplification des équations, la rapidité des calculs, faciliter l'interprétation des résultats de calcul, la compatibilité avec les analyses dimensionnelles et faciliter de l'étude des réseaux importants comportant un grand nombre de transformateurs [12].

1.9 Conclusion

On a fait dans ce chapitre une étude générale du réseau électrique, avec l'étude de ses différents composants nécessaire à la production, au transport, à la distribution et nous avons parlons en générale la configuration des éléments de base du réseau électrique, comme les transformateurs, les générateurs, les postes électriques et les lignes électriques pour comprendre le fonctionnement le réseau électrique.

En outre, ce chapitre a également abordé les représentations et les analyses des réseaux électriques sont des domaines importants de l'ingénierie électrique qui permettent de comprendre le comportement des systèmes électriques et de déterminer et de faciliter les calculs et les caractéristiques des différents éléments du réseau électrique.

Chapitre 2

Modélisation des Réseaux électriques, Problème de Répartition de puissance (PF) et de répartition optimal de puissance (OPF)

2.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de donner une compréhension de modélisation utilisées pour représenter et analyser les réseaux électriques, ainsi que les principes fondamentaux de la répartition et la répartition optimale de puissance .

Dans la première partie de ce chapitre, nous présenterons tout d'abord la modélisation des différents composants d'un réseau électrique (les générateurs, les transformateurs les lignes de transmission et les charges) pour comprendre le fonctionnement et la planification efficace de ces systèmes complexes . Ensuite, nous décrirons mathématiquement le problème de répartition de puissance. Ce problème est résolu à l'aide de méthodes numériques appliquées à un système d'équations non linéaires tels que les méthodes de Newton-Raphson et les méthodes de Gauss-Seidel.

Dans le dernier partie de ce chapitre, nous explorerons les principes fondamentaux de la répartition optimale de puissance, les contraintes, les objectifs, les Domaines d'application de l'écoulement de puissance optimal (OPF) et les méthodes utilisées pour la résolution de ce problème .

2.2 Description et modélisation des éléments de puissances du réseau électrique

Comme nous l'avons mentionné dans la première chapitre, le réseau électrique se compose de plusieurs éléments de base, tels que les générateurs (alternateurs), les lignes de transmission et de distribution, les transformateurs et les consommateurs qui représentent les charges du réseau. De plus, il comprend des dispositifs de surveillance, de protection et de régulation de la tension et de la fréquence.

Lorsque nous effectuons des calculs pour la répartition de puissance dans le réseau électrique, il est essentiel de prendre en compte la modélisation de ces éléments de base qui sont impliqués dans le problème de répartition de charge et qui sont soumis à des tensions élevées. Ces modèles décrivent le comportement de ces éléments afin de réaliser des calculs liés à l'énergie du réseau.

Les modèles des éléments principaux sont les suivants :

2.2.1 Modélisation de la génératrice :

Dans l'analyse de l'écoulement de puissance Les générateurs sont modélisés comme des injecteurs de courants et un source de tension constante V_g qui injecte de la puissance active P_g et réactive Q_g dans certaines limites pour respecter les contraintes avec le maintien à leurs bornes un niveau de tension donné.

Dans la figure (2.1) suivante est montre le modèle du générateur..

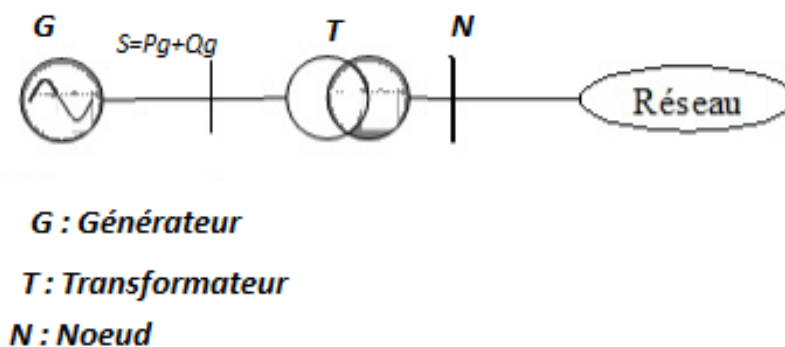


FIGURE 2.1 – Modèle du générateur dans le système pu.

La puissance apparente délivrée par le générateur donnée par :

$$S = P_g + jQ_g \quad (2.1)$$

Avec : P_g : Puissance active générées au nœud i .

Q_g : Puissance réactive générées au nœud i .

V_g : Tension au nœud i .

S : Puissance apparente délivrée par le générateur.

La puissance active gènère P_g sont limités :

$$P_{gmin} \leq P_g \leq P_{gmax} \quad (2.2)$$

La puissance réactive gènère Q_g sont limités :

$$Q_{gmin} \leq Q_g \leq Q_{gmax} \quad (2.3)$$

2.2.2 Modélisation des Systèmes de transmission de l'énergie (lignes, transformateur) :

Les systèmes de transmission de l'énergie électrique est un ensemble d'équipements qui permet de transporter l'énergie électrique sur de longues distances afin de répondre aux besoins en énergie des consommateurs finaux (les charges).

Modélisation de la Ligne de transmission :

Les lignes de transmission des réseaux électriques comprennent la résistance et une inductance série et une capacité et conductance parallèle.

Dans la figure (2.2) ci-dessous est montre la représentation schématique d'une ligne de transmission uniforme.

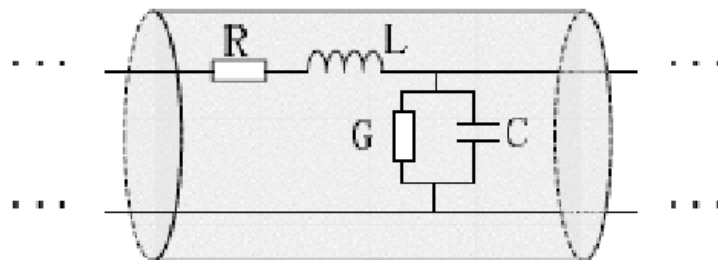


FIGURE 2.2 – Représentation schématique d'une ligne de transmission uniforme

Les modèles des lignes de transmission utilisés dans des réseaux électriques Sont habituellement classés en trois groupes en fonction des longueurs des lignes (longues,moyennes, courtes) [1].

- Les lignes courtes dont la longueur est inférieure à 80Km.
- Les lignes moyennes dont la longueur est entre 80Km et 250Km.
- Les lignes longues dont la longueur est supérieure à 250Km.

Les lignes de transmission courtes (Modèle RL) : La capacité de la ligne de transmission est négligée à cause d'un faible courant de fuite et d'autres paramètres (résistance R et inductance L) sont localisés dans la ligne de transmission.

La figure (2.3) ci-dessous est représentée le modèle de circuit équivalent d'une ligne courte.

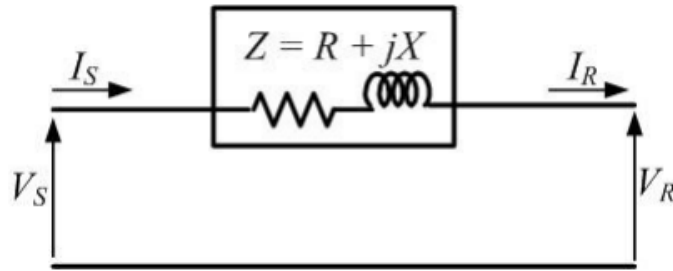


FIGURE 2.3 – Modèle de circuit équivalent d'une Ligne courte.

L'impédance série des lignes est donnée par :

$$Z = R + jX \quad (2.4)$$

Avec : Z : impédance (ohm)

R : résistance (ohm)

X : réactance (ohm)

L'équation générale des lignes pour représenter la tension et le courant à la borne de sortie des lignes est suivante :

$$V_s = AV_r + BI_r \quad (2.5)$$

$$I_s = CV_r + DI_r \quad (2.6)$$

Les constantes ABCD pour une ligne courte sont données comme suit :

A=1, B=Z, C=0, D=1

Donc les équations générale des lignes courtes est devenue comme suit :

$$V_s = V_r + Z \cdot I_r \quad (2.7)$$

$$I_s = I_r \quad (2.8)$$

Les Lignes de transmission moyennes : Les paramètres (résistance R, inductance L et capacité C) sont répartis uniformément le long de la ligne.

Les lignes de transport de longueur moyenne représentées soit par un schéma en π ou par un schéma en T [1].

Le modèle en π (pi) nominal d'une ligne de transmission moyenne : Dans cette représentation, l'impédance est placée au milieu de la ligne et l'admittance shunt est divisée en deux et sont placées aux deux extrémités.

Cette représentation est utilisée dans l'étude de l'écoulement de puissance.

Dans la figure (2.4) est montré le modèle en (pi) nominal d'une ligne de transmission moyenne.

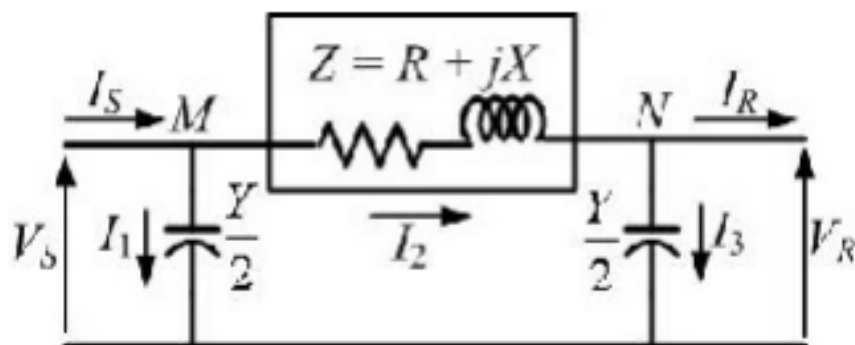


FIGURE 2.4 – Le Modèle en π (pi) nominal d'une ligne de transmission moyenne .

D'après la loi de nœud on a :

$$I_S = I_1 + I_2 = I_1 + I_2 + I_R \quad (2.9)$$

et

$$I_S = V_S \cdot \frac{Y}{2} + V_R \cdot \frac{Y}{2} + I_R \quad (2.10)$$

D'après la loi des mailles on a :

$$V_S = Z \cdot I_2 + V_R = Z \cdot \left(V_R \cdot \frac{Y}{2} + I_R \right) + V_R \quad (2.11)$$

$$V_S = \left(Y \cdot \frac{Z}{2} + 1 \right) \cdot V_R + Z \cdot I_R \quad (2.12)$$

En remplaçant 2.11 dans 2.12, on trouve :

$$I_S = Y \left(Y \cdot \frac{Z}{4} + 1 \right) \cdot V_R + \left(Y \cdot \frac{Z}{2} + 1 \right) \cdot I_R \quad (2.13)$$

Le modèle en T nominal d'une ligne de transmission moyenne : Dans un modèle en T nominal d'une transmission moyenne ligne, l'impédance série est divisée en deux parties égales, tandis que l'admittance shunt est répartie au centre de la ligne comme le montre dans la figure (2.5)

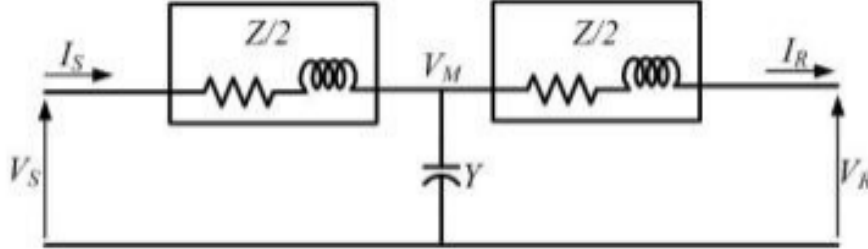


FIGURE 2.5 – Le modèle en T nominal d'une ligne de transmission moyenne.

D'après la loi de noeud on a :

$$I_s = I_M + I_R \quad (2.14)$$

Donc :

$$\frac{V_s - V_M}{\frac{Z}{2}} = Y \cdot V_M + \frac{V_M - V_R}{\frac{Z}{2}} \quad (2.15)$$

La tension V_M est donc :

$$V_M = \frac{2}{Y \cdot Z + 4} \cdot (V_S - V_R) \quad (2.16)$$

Le courant I_R est :

$$I_R = \frac{V_M - V_R}{\frac{Z}{2}} \quad (2.17)$$

En remplaçant V_M dans les équations 2.16 et 2.17 on obtient :

$$V_S = \left(\frac{Y \cdot Z}{2} + 1 \right) \cdot V_R + Z \left(\frac{Y \cdot Z}{4} + 1 \right) \cdot I_R \quad (2.18)$$

$$I_S = Y \cdot V_M + I_R \quad (2.19)$$

Donc :

$$I_S = Y \cdot V_R + \left(\frac{Y \cdot Z}{2} + 1 \right) \cdot I_R \quad (2.20)$$

Les Lignes de transmission longues (long transmission lines) : Dans une longue ligne de transmission, les paramètres sont uniformément répartis sur toute la longueur de la ligne. Pour une longue ligne de transmission, on considère que la ligne peut être divisée en différentes sections, chaque section comprenant une inductance, capacité, résistance et

conductance.

la représentation d'une ligne longue de transport est illustré à la Figure (2.6)

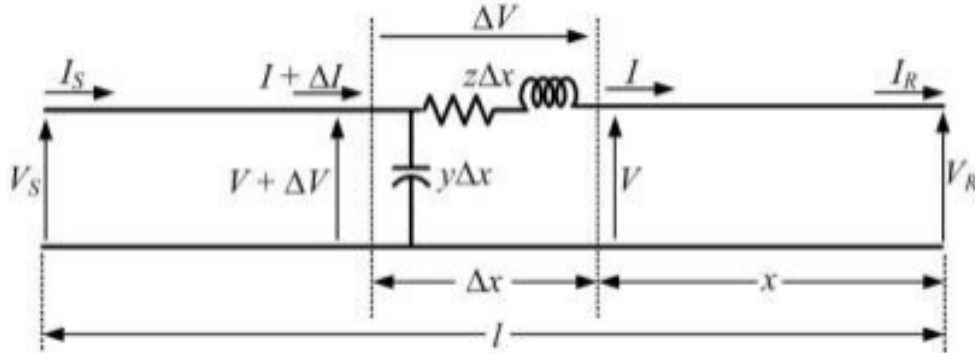


FIGURE 2.6 – Le modèle d'une Ligne de transmission longue (long transmission lines).

Modélisation de transformateur :

Le modèle du transformateur d'énergie électrique est présenté sur la figure (2.7) suivante.

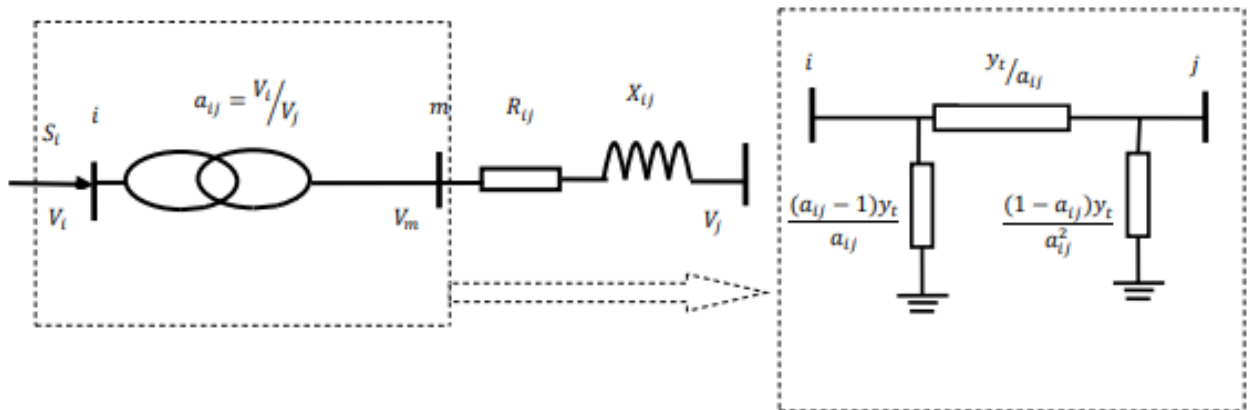


FIGURE 2.7 – Le Modèle du transformateur [3].

L'admittance du transformateur est exprimée par :

$$Y_{ij} = \frac{1}{(R_{ij} + jX_{ij})} \quad (2.21)$$

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

$$Y = \begin{bmatrix} \frac{1}{a^2}y_{ij} & -\frac{1}{a}y_{ij} \\ -\frac{1}{a}y_{ij} & y_{ij} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Avec : a_{ij} : Le rapport de régleur de charge.
 y_{ij} : l'admittance de la branche i-j.

Modélisation de la charge électrique :

Dans le réseau électrique, les charges représentant les consommateurs, peuvent être modélisées Individuellement, chaque nœud représente un groupement de consommateurs. La charge électrique est souvent modélisée sous forme d'une puissance constante, qui Consomme de la puissance active P_L et réactive Q_L constantes par la relation suivante :

$$S_L = P_L + jQ_L \quad (2.23)$$

Avec :

S_L : est la puissance complexe de la charge, P_L : la puissance active et Q_L : la puissance réactive.

La connaissance de la nature des consommations est un des problèmes fondamentaux de la représentation des charges. A défaut d'informations précises, en première approximation, on assimile les charges à des impédances constantes Z raccordées entre les nœuds consommateurs et la terre, déterminées à partir du résultat du calcul de répartition initial par : [19]

$$Z = \frac{V_L^2}{P_L - jQ_L} \quad (2.24)$$

Et aussi le modèle équivalent d'une charge est représenté par une admittance Y est définie par :

$$Y = \frac{1}{Z} = \frac{P_L - jQ_L}{V_L^2} \quad (2.25)$$

Avec : Y : admittance de la charge, V : Tension aux bornes de la charge et P_L, Q_L : Puissances active et réactive consommées par la charge.

La figure (2.8) ci-dessous est montre le modèle d'une charge électrique.

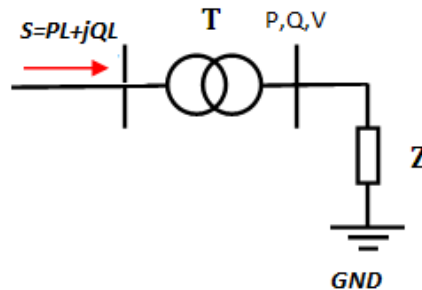


FIGURE 2.8 – le modèle d'une charge électrique.

Elément shunt (batterie de condensateur) :

Les éléments shunt sont les batteries de condensateurs et les réactances qui sont utilisés pour fournir ou absorber la puissance réactive afin d'obtenir un meilleur profil de tension.

Dans la figure (2.9) ci-dessous est montré le modèle de l'élément shunt.

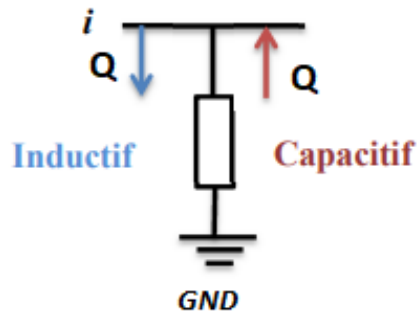


FIGURE 2.9 – Le modèle de l'élément shunt.

2.3 Étude de répartition de puissance dans un réseau électrique :

La répartition de puissances est appelé l'écoulement de puissance (Power Flow or Load Flow en anglais) est une analyse mathématique utilisée dans les réseaux électriques pour déterminer la répartition des flux de puissance électrique dans un système de transmission ou de distribution d'énergie électrique au niveau des jeux de barres du réseau. Il s'agit d'une simulation de l'état stationnaire (Régime permanent) du système électrique, où les courants, les tensions, les charges, les pertes et les capacités de transport de puissance dans chaque ligne et transformateur sont calculés en fonction des paramètres physiques et des contraintes du réseau, tels que les limites de capacité de transmission, les contraintes de tension et les limites des puissances active P et réactive Q .

2.3.1 L'objectif de l'étude la répartition de puissance (Power Flow) :

Le but principal de l'étude répartition de puissance (Power flow) est pour déterminer les variables électriques (puissance active, réactive, tension et angle de phase) dans un système électrique donné, en utilisant des équations mathématiques qui modélisent le comportement des différents composants du réseau électrique (les générateurs, les transformateurs, les lignes de transmission, les charges).

La répartition de puissance (PF) permet donc de résoudre les équations qui décrivent les conditions de l'état stationnaire du système électrique, en prenant en compte les contraintes physiques et opérationnelles du réseau. Les résultats de l'analyse de (PF) sont utilisés pour déterminer les quantités de puissance électrique qui sont échangées entre les différents nœuds du réseau, pour détecter les éventuels problèmes de congestion, pour prévoir les besoins en capacité de transmission, et pour optimiser l'utilisation des ressources énergétiques.

L'étude de problème de répartition de puissance est nécessaire pour :

- Déterminer les niveaux des tensions et des puissances active et réactive dans les différents éléments du réseau électrique (les générateurs, les transformateurs, les lignes de transmission).
- Calculer les pertes d'énergie dans le réseau, afin de minimiser les pertes et d'améliorer l'efficacité énergétique.
- L'échange de puissance entre les centrales de production et le dispatching économique.
- Identifier les éventuelles congestions dans le réseau, c'est-à-dire les points où la capacité de transport de puissance est limitée, afin de concevoir des solutions pour optimiser l'utilisation de la capacité disponible.
- Donner des informations précieuses pour la planification, l'exploitation et la maintenance du système électrique.
- l'estimation de l'état du réseau ainsi que la prise de mesure adéquate à d'éventuelle imprévue .

2.3.2 Analyse le problème de répartition de puissance :

Dans le réseau électrique il y a quatre variables fondamentales associées à chaque jeu de barres (nœuds) i du réseau, à savoir : puissance active injectée ou soutirée P_i , puissance réactive injectée ou soutirée Q_i , module de la tension V_i et déphasage (angle de phase) de la tension δ_i .

- Puissance active (P) : C'est la quantité d'énergie active, exprimée en watts (W), injectée ou soutirée par le nœud. Elle représente la composante de la puissance qui effectue un travail réel dans le système.
- Puissance réactive (Q) : Il s'agit de la quantité d'énergie réactive, exprimée en voltampères réactifs (VAR), injectée ou soutirée par le nœud. La puissance réactive est liée à la composante réactive du courant et est utilisée pour maintenir la tension dans le système.

-
- Module de tension (V) : C'est la valeur de la tension au nœud, exprimée en volts (V). Le module de tension représente l'amplitude de la tension électrique présente au nœud.
 - Déphasage de tension (δ) : Il s'agit de l'angle de phase de la tension au nœud, exprimé en degrés ou en radians. Il indique le décalage temporel entre la tension et le courant dans un circuit alternatif.

Pour chaque nœud, deux variables doivent être spécifiées au préalable et les deux autres sont à calculer. Les modules et les phases des tensions inconnues sont appelés variables d'état. L'état du système n'est déterminé qu'après avoir calculé ces valeurs [13].

Classification des jeux de barres ou nœuds (Busbar) :

Dans l'analyse de l'écoulement de puissance on peut classer les jeux de barres (Bus) en trois Catégories selon les variables (P, Q, V, δ) et des spécifications des variables utilisées. Si on connaît deux des quatre variables nous pouvons déterminer les deux autres à partir des équations principales de répartition de puissance.

Les jeux de barres (Bus) sont classés comme suit :

Les Jeux de barres de producteur PV (CONTROL BUS) : Les Jeux de barres de producteurs est appelée aussi nœuds à tension contrôlée ces nœuds sont associés aux centrales de production, pour ce type des jeux de barre (nœuds) sont associés aux centrales de production. Dans ce type de nœuds les variables (P, V) la puissance active 'P' et le module de la tension 'V' sont spécifiés, les grandeurs inconnus (Q, δ) à déterminer pour ce type de nœud est la phase de la tension " δ " et la puissance réactive générée " Q " [14].

Les Jeux de barres de charge PQ (LOAD BUS) : Les jeux de barres de charge PQ est appelée aussi nœuds de charge (nœuds consommateurs) ces nœuds sont associés aux charges, pour ce type de jeux de barres sont associés directement aux charges. Dans ce type de nœuds de charge les variables sont considérées connues (P, Q) Les puissances active P et les puissances réactive Q, les grandeurs inconnus (V, δ) à déterminer pour ce type de nœud est le module V et la phase δ de la tension [14].

Les Jeux de barre de référence (SLACK BUS) : Les Jeux de barre de référence Connue aussi par le jeu de barres bilan (nœud de bilan) le nœud de bilan est associé à la centrale de production la plus puissante, pour ce type de jeux de barres est associé

à une des centrales généralement la plus puissance. Dans un jeu de barre de référence les variables sont considérées connues (δ, V) la phase δ et le module de la tension V , les grandeurs inconnus (P, Q) à déterminer pour ce type de nœud de bilan est la puissance active P et réactive Q [14].

Ce jeu de barre bilan doit toujours assuré équilibre :

-Le bilan de puissance active du réseau s'écrit :

$$\sum P_G = \sum P_L + \sum P_{pertes} \quad (2.26)$$

Avec :

P_G : puissance active générée (production), P_L : puissance demandée ou Load (consommation) , P_{pertes} : Pertes de puissance actives du réseau.

-Le bilan de puissance réactive du réseau s'écrit :

$$\sum Q_G = \sum Q_L + \sum Q_{pertes} \quad (2.27)$$

Q_G : Puissance réactive générée ou consommée du réseau , Q_L :puissance demandée, Q_{pertes} :Pertes de puissance réactive du réseau.

Dans la figure (2.10) ci-dessous est montre le schéma unifilaire avec trois jeu de barre (bus).

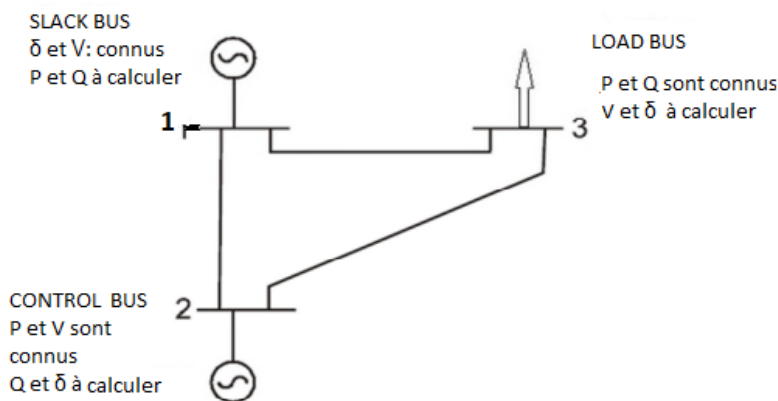


FIGURE 2.10 – schéma unifilaire avec trois jeux de barre (bus).

Ce tableau ci-dessous il définit les Classification des jeux de barres d'un réseau électrique et définit aussi les grandeurs connues et inconnues pour chaque type de jeu de barres.

Types de jeux de barres (nœud)	Grandeurs connues spécifiés	Grandeurs inconnues à déterminer
Jeux de barres de producteur PV (CONTROL BUS)	(P, V) : la puissance active et le module de la tension.	(Q, δ) : la phase de la tension et la puissance réactive générée.
Jeux de barres de charge PQ (LOAD BUS)	(P, Q) : la puissance active P et la puissance réactive.	(V, δ) : le module et la phase de la tension.
Jeu de barre de référence (SLACK BUS)	(δ, V) : la phase et le module de la tension.	(P, Q) : la puissance active et réactive.

TABLEAU 2.1 – Classification des jeux de barres (nœuds) d'un réseau électrique.

2.3.3 Formulation d'équations de base de répartition de puissance :

Les équations de réseau électrique peuvent être exprimées sous de nombreuses formes, mais la méthode de tension de nœud est la plus couramment utilisée. Les équations de courant à chaque nœud nous donnent la matrice d'admittance qui est ensuite utilisée pour déterminer les tensions aux différents bus (jeux de barres) sous la forme d'équations non linéaires qui peuvent être résolues de plusieurs façons. Les puissances active et réactive sont déduites depuis les résultats de tension obtenus .

Formulation de la matrice admittance nodale :

Les équations de l'écoulement de puissance, utilisant la formulation des admittances nodales pour un système à 4 nœuds, sont d'abord développées, puis elles sont généralisées pour un système à n nœuds.

Dans la figure (2.11) ci-dessous est représenté le schéma unifilaire d'un réseau électrique à 4 nœuds.

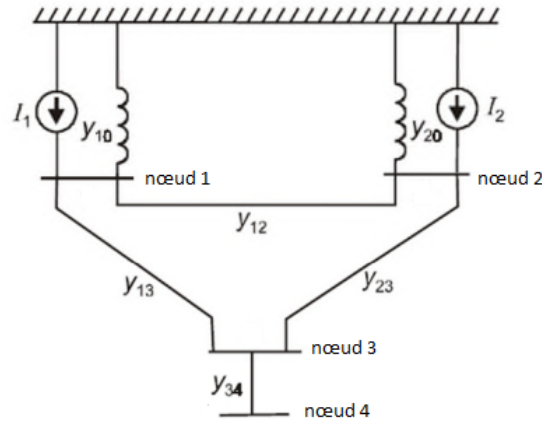


FIGURE 2.11 – schéma unifilaire d'un réseau électrique à 4 nœuds.

Cette matrice est obtenue en utilisant les équations de courant obtenues dans les nœuds constituant le circuit du réseau comme suit :

En appliquant la loi de Kirchhoff dans les quatre nœuds (jeux de barre), on obtient les équations suivantes :

$$I_1 = Y_{10}V_1 + Y_{12}(V_1 - V_2) + Y_{13}(V_1 - V_3) \quad (2.28)$$

$$I_2 = Y_{20}V_2 + Y_{12}(V_2 - V_1) + Y_{23}(V_2 - V_3) \quad (2.29)$$

$$0 = Y_{23}(V_3 - V_2) + Y_{12}(V_3 - V_1) + Y_{23}(V_3 - V_4) \quad (2.30)$$

$$0 = Y_{34}(V_4 - V_3) \quad (2.31)$$

D'après les équations précédentes, on obtient :

$$I_1 = (Y_{10} + Y_{12} + Y_{13})V_1 + Y_{12}V_2 - Y_{13}V_3 \quad (2.32)$$

$$I_2 = -Y_{12}V_1 + (Y_{20} + Y_{12} + Y_{23})V_2 - Y_{23}V_3 \quad (2.33)$$

$$0 = -Y_{13}V_3 - Y_{23}V_2 + (Y_{13} + Y_{23} + Y_{34})V_3 - Y_{34}V_4 \quad (2.34)$$

$$0 = -Y_{34}V_3 + Y_{34}V_4 \quad (2.35)$$

Alors on obtient les éléments de la matrice admittance est comme suit :

$$Y_{11} = Y_{10} + Y_{12} + Y_{13} \quad (2.36)$$

$$Y_{22} = Y_{20} + Y_{12} + Y_{23} \quad (2.37)$$

$$Y_{33} = Y_{13} + Y_{23} + Y_{34} \quad (2.38)$$

$$I_3 = Y_{31}V_1 + Y_{32}V_2 + Y_{33}V_3 + Y_{24}V_4 \quad (2.39)$$

$$Y_{12} = Y_{21} = -Y_{12}; Y_{13} = Y_{31} = -Y_{13}; Y_{23} = Y_{32} = -Y_{23}; Y_{34} = Y_{43} = -Y_{34} \quad (2.40)$$

Donc les équations finales est comme suit :

$$I_1 = Y_{11}V_1 + Y_{12}V_2 + Y_{13}V_3 + Y_{14}V_4 \quad (2.41)$$

$$I_2 = Y_{21}V_1 + Y_{22}V_2 + Y_{23}V_3 + Y_{24}V_4 \quad (2.42)$$

$$I_3 = Y_{31}V_1 + Y_{32}V_2 + Y_{33}V_3 + Y_{24}V_4 \quad (2.43)$$

$$I_4 = Y_{41}V_1 + Y_{42}V_2 + Y_{43}V_3 + Y_{44}V_4 \quad (2.44)$$

Ces équations peuvent être écrites sous la forme matricielle ci-dessous :

$$[I] = [Y].[V] \quad (2.45)$$

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

Le courant injecté au jeu de barres i peut se mettre sous la forme :

$$I_i = \sum_{j=1}^3 Y_{im}.V_j \quad i = 1, 2 \text{ et } 3 \quad (2.47)$$

Cette dernière équation, qui traite un système à 4 nœuds, peut être généralisée pour un système à n nœuds est définie comme suit :

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{im}.V_j \quad i = 1, 2 \dots n \quad (2.48)$$

Pour un réseau électrique avec N jeux de barres, les équations des tensions nodales du système sont exprimées par la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

En général, on peut écrire :

$$I_{bus} = Y_{bus} \cdot V_{bus} \quad (2.50)$$

Avec : $I_{bus} = [I_1 \dots I_N]^T$ est le vecteur $N \times 1$ des courants complexes injectés à chaque jeu de barres, $V_{bus} = [V_1 \dots V_N]^T$ est le vecteur $N \times 1$ des tensions complexes injectés à chaque jeu de barres et Y_{bus} est la matrice admittance du système de taille $(N \times N)$.

2.3.4 Formulation des équations de tension

D'après l'équation précédente 2.50 :

$$I_i = Y_{ii}V_i + \sum_{k=1, k \neq i}^n Y_{ik}V_k \quad (2.51)$$

La puissance apparente S_i injectée au jeu de barres i est donnée par l'équation :

$$S_i^* = P_i - jQ_i = V_i^* \cdot I_i \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2.52)$$

Donc :

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad (2.53)$$

Où :

- n : Désigne le nombre de nœuds dans le réseau.
- S_i^* : Le conjugué de la puissance apparente injectée au nœud i .
- V_i^* : Le conjugué de la tension au nœud i .
- P_i : La puissance active injectée au nœud i .
- Q_i : La puissance réactive injectée au nœud i .

En remplaçant l'équation 2.51 dans 2.52 on obtient :

$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = Y_{ii}V_i + \sum_{k=1, k \neq i}^n Y_{ik}V_k \quad (2.54)$$

Alors :

$$Y_{ii}V_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} - \sum_{k=1, k \neq i}^n Y_{ik}V_k \quad (2.55)$$

Et finalement l'équation 2.55 s'écrira :

$$V_i = \frac{1}{Y_{ii}} \left[\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} - \sum_{k=1, k \neq i}^n Y_{ik}V_k \right] \quad (2.56)$$

2.3.5 Formulation des équations des puissances actives et réactives :

Avec les mêmes étapes qu'avec les équations de tensions, on parvient aux équations des puissances actives et réactives comme suit : [15]

$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = Y_{ii}V_i + \sum_{k=1, k \neq i}^n Y_{ik}V_k \quad (2.57)$$

$$P_i - jQ_i = V_i^* \left[Y_{ii}V_i + \sum_{k=1, k \neq i}^n Y_{ik}V_k \right] \quad (2.58)$$

Où : $Y_{ii} = |Y_{ii}|^{L^{\theta_{ii}}}$, $Y_{ik} = |Y_{ik}|^{L^{\theta_{ik}}}$, $V_i^* = |V_i^*|^{L^{-\delta_i}}$, $V_k = |V_k|^{L^{-\delta_k}}$, $V_i = |V_i^*|^{L^{\delta_i}}$ Donc on obtient :

$$P_i - jQ_i = |V_i|^2 |Y_{ii}|^{L^{\theta_{ii}}} + \sum_{k=1, k \neq i}^n |Y_{ik}| |V_i| |V_k|^{L^{\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i}} \quad (2.59)$$

En séparant la partie réelle et la partie imaginaire de l'équation on aura les équations des puissances actives et réactives au jeu de barres i est comme suit :

$$P_i = \sum_{k=1}^n |Y_{ik}| |V_i| |V_k| \cos \theta_{ik} + \delta_k - \delta_i \quad (2.60)$$

$$Q_i = - \sum_{k=1}^n |Y_{ik}| |V_i| |V_k| \sin \theta_{ik} + \delta_k - \delta_i \quad (2.61)$$

Les équations 2.60, 2.61 représentent les équations de l'écoulement de puissance tels que :

$$P_i = P_{Gi} - P_{Di} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2.62)$$

$$Q_i = Q_{Gi} - Q_{Di} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2.63)$$

Avec :

P_{Gi}, Q_{Gi} :La puissances active et réactive générées.

P_{Di}, Q_{Di} :La puissances active et réactive demandée au jeu de barre i.

Finalement, les équations d'équilibre de puissance est comme de suit :

$$P_{Gi} = P_{Di} + \sum_{m=1}^N V_i \cdot V_m \cdot Y_{im} \cdot \text{Cos}(\delta_i - \delta_m - \theta_{im}) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2.64)$$

$$Q_{Gi} = Q_{Di} + \sum_{m=1}^N V_i \cdot V_m \cdot Y_{im} \cdot \text{Sin}(\delta_i - \delta_m - \theta_{im}) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2.65)$$

Formulation de l'équation de Puissances transitées dans les lignes et les pertes

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

Le courant circulant entre les deux jeux de barres i et k est considéré positif lorsqu'il est dirigé devers K et son expression est la suivante :

$$I_{ik} = y_{ik}(V_i - V_k) + V_i \cdot y_{iko} \quad (2.66)$$

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

y_{iko} : L'admittance shunt de la branche i k.

De la même manière, le courant qui circule du nœud k vers le nœud i est donné par :

$$I_{ki} = y_{ki}(V_k - V_i) + V_k \cdot y_{iko} \quad (2.67)$$

$$P_{ik} - jQ_{ik} = V_i^* \cdot I_{ik} \quad (2.68)$$

$$P_{ik} - jQ_{ik} = V_i^*(V_i - V_k) \cdot y_{ik} + V_i^* \cdot V_i \cdot y_{iko} \quad (2.69)$$

$$P_{ki} - jQ_{ki} = V_k^*(V_k - V_i) \cdot y_{ik} + V_k^* \cdot V_k \cdot y_{iko} \quad (2.70)$$

La valeur des pertes de puissance active et réactive dans la ligne entre les deux jeux de barres i et k est la somme algébrique de répartition des puissances déterminée à partir des équations (2.72) et (2.73).

$$P_{loss_{ik}} = P_{ik} + P_{ki} \quad (2.71)$$

$$Q_{loss_{ik}} = Q_{ik} + Q_{ki} \quad (2.72)$$

2.3.6 Les Méthodes numériques appliquées pour la résolution du problème de répartition de puissance :

La résolution du problème de la répartition des puissances nous permet de déterminer, les valeurs des modules de la phase de la tension en chaque nœud du réseau pour des conditions de fonctionnement données, ce qui permettra de calculer les valeurs des puissances actives et réactives qui transitent dans chaque ligne. Le bilan des puissances injectées en chaque nœud peut donc être établi, ce qui nous fournit la valeur des pertes actives et réactives de réseau électrique [16], [17] et [3].

Il existe plusieurs méthodes numériques sont utilisée pour résoudre les équations d'écoulement de puissance, les méthodes numériques couramment utilisées pour résoudre ce problème la méthode de Gauss-Seidel, la méthode de Newton-Raphson et la méthode de N-R découplée et découplée rapide.

Dans la figure (2.12) ci-dessous est représentée les méthodes numériques plus utilisées pour résoudre le problème de l'écoulement de puissance (PF).

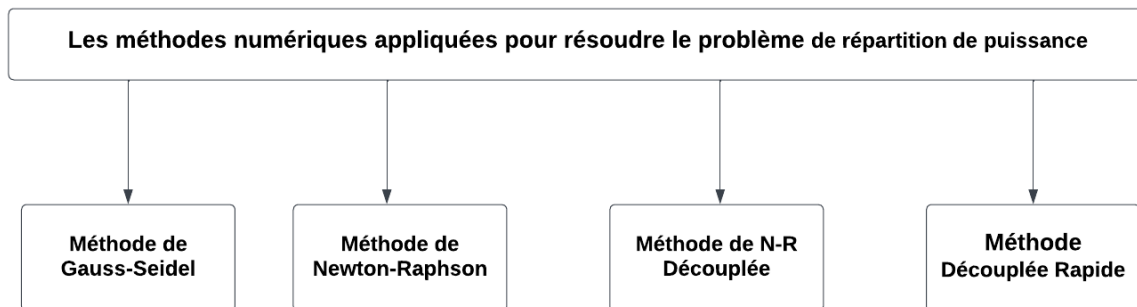


FIGURE 2.12 – Les méthodes numériques appliquées plus utilisées pour résoudre le problème de répartition de puissance.

2.4 La Répartition optimal de puissance (OPF)

Le problème du répartition de puissance optimal (OPF) a été largement étudié depuis les années 1960. Il a été introduit pour la première fois par Carpentier en 1962 [18].

La répartition de puissance optimal (OPF) est un outil mathématique fondamental utilisé pour le fonctionnement des systèmes électriques. Le problème OPF cherche à contrôler la production et la consommation pour optimiser certains objectifs tels que la minimisation du coût de production ou des pertes d'énergie, avec respecter les contraintes de capacité du réseau.

C'est un domaine important dans la planification et l'exploitation des systèmes électriques pour garantir un approvisionnement énergétique efficace, fiable et durable.

2.4.1 Les domaines d'application de répartition optimal de puissance (OPF)

La répartition optimal de puissance (OPF) est utilisé dans de nombreux domaines pour optimiser l'exploitation des réseaux électriques, planifier l'expansion du réseau, intégrer les énergies renouvelables, Analyse de la stabilité du système électrique et gérer la demande d'électricité.

Dans la figure (2.13) suivante est représenté les domaines qui utilisent dans la répartition de puissance (OPF).

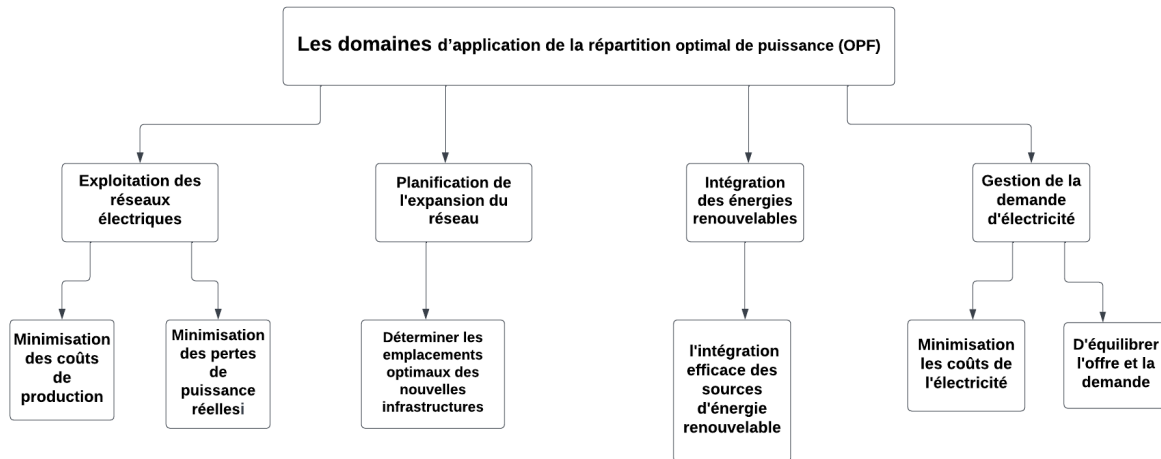


FIGURE 2.13 – Les domaines qui utilisent dans la répartition de puissance (OPF).

2.4.2 Formulation mathématique du problème de répartition optimal de puissance :

Le problème de l'écoulement de puissance optimal (OPF) peut être formulé comme un problème d'optimisation non linéaire avec des contraintes non linéaires. La formulation mathématique du problème de l'OPF peut varier légèrement en fonction de la complexité du système électrique et des objectifs spécifiques de l'optimisation.

Cependant, une formulation générale du problème de l'OPF est la suivante :

Fonction objective : le but principal de la solution de l'OPF est de déterminer les arrangements des variables de contrôle et d'état du système qui optimisent la valeur de

la fonction objective.

Le choix de la fonction objective devrait être basé sur de meilleures analyses de la sécurité et de l'économie du système d'alimentation. Généralement, elle est représentée par une fonction non linéaire du 2eme ordre [19].

Selon [20, 21] , l'optimisation OPF non linéaire vise un compromis d'objectifs dans le réseau électrique soumis à diverses contraintes d'inégalité et d'égalité exprimées comme suit.

$$J = MinF(X, U) \quad (2.73)$$

$$g(X, U) = 0 \quad (2.74)$$

$$h(X, U) \leq 0 \quad (2.75)$$

Avec : $F(X, U)$: représente la fonction objectif à optimiser ;

$g(X, U)$: contraintes d'égalités ;

$h(X, U)$: contraintes d'inégalités ;

X : Vecteur des variables dépendantes ou variables d'état ;

U : Vecteur des variables indépendantes ou des variables de contrôle ;

Classification des variables et des contraintes du système :

Classification des variables : Généralement, le fonctionnement d'un réseau électrique peut être décrit en fonction de 6 variables ($P_{Gi}, Q_{Gi}, P_{chi}, Q_{chi}, V_i, \delta_i$), pour chaque nœud considéré :

- P_{chi}, Q_{chi} : Puissances actives et réactives consommée au nœud i.
- P_{Gi}, Q_{Gi} : Puissances actives et réactives générée au nœud i.
- V_i : Module de tension au nœud i.
- δ_i : Angle de phase au nœud i.

Ces variables sont généralement divisées en trois catégories :

-Variables incontrôlables : Ces variables peuvent être considérées comme des valeurs numériques constantes ou comme des paramètres. Les puissances active et réactive (P_{chi}, Q_{chi}).

-Variables de contrôle : Les variables de contrôle sont en général les modules des tensions ou les puissances réactives générées aux jeux de barres générateurs, les rapports de

transformation des régleurs en charge, les phases des transformateurs déphaseurs, et les puissances réactives générées par les différents compensateurs d'énergie réactive.

Le vecteur des variables de contrôle U comme peut être exprimé :

$$U^T = [P_{G2}, \dots, P_{GNG}, V_{G1}, \dots, V_{GNG}, T_1, \dots, T_{NT}, Q_{Ci}, \dots, Q_{CNc}] \quad (2.76)$$

-Variables d'état : Sont les modules des tensions des jeux de barres charges et les angles de toutes les tensions sauf le jeu de barres de référence.

Le vecteur des variables d'état X peut être exprimé comme : [22]

$$X^T = [P_{G1}, V_{L1}, \dots, V_{LNPQ}, Q_{G1}, \dots, Q_{G_{NPQ}}, \delta_2, \dots, \delta_{NB}] \quad (2.77)$$

Où : P_{G1} : puissance active sur le slack bus ;

V_{L1} : amplitude de la tension au bus PQ, les bus de charge ;

Q_G : puissance réactive des générateurs ;

δ : l'angle de phase de la tension au nœud ;

NB : nombre de Bus ;

NT : nombre de transformateurs de réglage de dérivation ;

Nc : nombre de compensateurs ;

NPQ : nombre des bus de charge (Load bus) ;

NG : nombre des générateurs ;

T : rapport de régleur de charge de transformateurs ;

Classification des Contraintes :

Les contraintes imposées sur la fonction objective à optimiser peuvent être classés en contraintes d'égalité et en contraintes d'inégalité.

La formulation des contraintes en peut écrire comme suivante :

$$G(X, U) = 0$$

$$H(X, U) \leq 0$$

Où : G : ensemble des contraintes d'égalités.

H : ensemble des contraintes d'inégalités.

Contraintes de type égalité :

Il existe deux types de contraintes d'alimentation applicables aux bus système : active et réactive [20].

Contraintes de la puissance active P :

$$P_{Gi} - P_{Di} = V_i \cdot \sum_{j=1}^{NB} V_j (G_{ij} \cdot \cos \delta_{ij} + B_{ij} \cdot \sin \delta_{ij}) \quad (2.78)$$

Contraintes de la puissance réactive Q :

$$Q_{Gi} - Q_{Di} = V_i \cdot \sum_{j=1}^{NB} V_j (G_{ij} \cdot \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cdot \cos \delta_{ij}) \quad (2.79)$$

V_i et V_j représentent les grandeurs des tensions, tandis que i et j sont les indices de bus. P_{Gi} et Q_{Gi} sont respectivement les puissances réelles et réactives des unités générées. La demande de charge réelle est représentée par P_{Di} et la demande de charge réactive par Q_{Di} . δ_{ij} est la différence d'angle de phase de tension entre les noeuds i et j . G_{ij} et B_{ij} sont la conductance et susceptance de la ligne ij , respectivement. NB est le nombre de bus.

Contraintes de type inégalité :

Le vecteur $h(x, u)$ comprend ensemble de contraintes d'inégalité .

Ces contraintes représentent les limites de fonctionnement du système (groupe de production, lignes de transport, transformateurs...) comme suit :

Contraintes de génération : les tensions du générateur, les sorties de puissance active (réelle) et les sorties de puissance réactive sont limitées par leurs limites inférieure et supérieure comme suit : [20]

$$V_{Gi}^{min} \leq V_{Gi} \leq V_{Gi}^{max} \quad i = 1 \dots N_G \quad (2.80)$$

$$Q_{Gi}^{min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{max} \quad i = 1 \dots N_G \quad (2.81)$$

$$P_{Gi}^{min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{max} \quad i = 1 \dots N_G \quad (2.82)$$

Contraintes du transformateur : les paramètres de prise du transformateur sont limités par leurs limites minimales et maximales comme suit : [20]

$$T_i^{min} \leq T_i \leq T_i^{max} \quad i = 1 \dots nt \quad (2.83)$$

Où : $T_{max} i$ et $T_{min} i$ est représente les valeurs supérieures et inférieures.

Contraintes Compensations shunt (VAR Shunt) : Comme indiqué dans [20], la génération d'unités de compensation en voltampère réactif (VAR) est contrainte de la manière suivante.

$$Q_{ci}^{min} \leq Q_{ci} \leq Q_{ci}^{max} \quad i = 1 \dots nc \quad (2.84)$$

Où Q_{ci}^{min} et Q_{ci}^{max} représentent la plage admissible d'injection en VAR de la i ème unité de compensation, et NC est le nombre total d'unités de compensation en VAR dans le réseau.

Contraintes de sécurité : Celles-ci incluent les contraintes d'amplitudes de tension au niveau des bus de charge et des charges de ligne de transmission est comme suit : [20]

$$V_{Li}^{min} \leq V_{Li} \leq V_{Li}^{max} \quad i = 1 \dots N_{PQ} \quad (2.85)$$

$$S_{li} \leq S_{li}^{max} \quad i = 1 \dots nl \quad (2.86)$$

2.5 La résolution de l'écoulement de puissance optimal par les méthodes d'optimisation méta-heuristiques

Les méthodes méta-heuristiques sont des techniques d'optimisation flexibles et puissantes pour résoudre le problème complexe de l'écoulement de puissance optimal dans les réseaux électriques. Elles offrent une approche efficace pour explorer l'espace des solutions et trouver des configurations optimales, en prenant en compte les contraintes et les objectifs spécifiques du système.

Les méthodes méta-heuristiques, telles que les algorithmes génétiques (AG), les algorithmes d'essaim de particules (PSO), la recherche tabou (RT), la recherche locale itérée, les colonies de fourmis (ACO) et les algorithmes évolutifs, sont largement utilisées pour résoudre ce problème. Bien qu'elles ne garantissent pas la solution optimale, elles fournissent généralement de bonnes solutions dans des délais raisonnables. Les méthodes méta-heuristiques sont adaptées aux réseaux électriques de différentes tailles et complexités, et elles peuvent être utilisées pour la planification à long terme et l'exploitation en temps réel. En combinant leur flexibilité avec d'autres techniques d'optimisation, telles que l'intelligence artificielle et l'apprentissage automatique, de nouvelles avancées peuvent être réalisées pour améliorer l'efficacité et la précision de la résolution de l'écoulement de puissance optimal.

2.6 Conclusion :

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons étudié la modélisation et les schémas équivalents des éléments de base du réseau électrique (générateurs, transformateurs, lignes, charge) sont présentés pour faciliter la formulation d'équations précises pour décrire leur comportement dans le réseau électrique. Ensuite, nous avons donné la définition et les objectifs de répartition de puissance (PF) et présenté sa formule d'équations, ainsi qu'un rappel des méthodes numériques couramment utilisées pour résoudre le problème de l'écoulement de puissance, telles que les méthodes de Gauss-Seidel et de Newton-Raphson.

Dans la dernière partie de ce chapitre, nous avons examiné la répartition optimale de puissance, en abordant ses domaines d'application et la formulation mathématique des équations du problème de répartition optimale de puissance. Cela inclut la définition de la fonction objectif, des variables et des contraintes du système.

Chapitre 3

La méthode d'optimisation méta-heuristique et l'algorithme de clustering applicables au problème de répartition optimal de puissance (OPF)

3.1 Introduction

L'optimisation est généralement l'étude de la maximisation ou de la minimisation d'une fonction soumise à des contraintes, essentiellement la recherche de la solution la plus efficace et la plus fonctionnelle à un problème. Dans ce chapitre se concentre sur l'application de techniques d'optimisation avancées pour résoudre un problème crucial dans le domaine de l'énergie et des réseaux électriques. La répartition optimale de puissance vise à trouver la meilleure allocation de puissance entre les différentes sources d'énergie, les générateurs, les transformateurs, les charges et les lignes de transmission dans réseau électrique. Les méthodes d'optimisation méta-heuristiques offrent une approche puissante pour résoudre ce problème complexe, qui implique de nombreux paramètres et contraintes.

Ce chapitre explore en général les différentes méta-heuristiques largement utilisées à le problème (OPF) telles que les algorithmes génétiques (GA), les colonies de fourmis (ACO), les algorithmes d'optimisation par essaim (PSO), teaching-Learning Based Optimization (TLBO et les algorithmes de recherche tabou (RT). Ces algorithmes peuvent être utilisés pour résoudre des problèmes de répartition de puissance dans les réseaux électriques pour minimisant la fonction objectif qui peut être la perte de puissance ou le coût de production d'énergie électrique. Chacune de ces méthodes offre des avantages et des caractéristiques

uniques qui les rendent adaptées à la résolution de problèmes complexes d'optimisation de la répartition de puissance.

Le chapitre se termine par une introduction à l'optimisation basée sur l'apprentissage et l'enseignement (TLBO). Le modèle mathématique de l'algorithme TLBO est présenté, ainsi que les principales étapes pour l'optimisation. De plus, l'algorithme de regroupement K-Means est abordé, en décrivant ses principales étapes et en fournissant un organigramme correspondant.

3.2 L'optimisation

L'optimisation peut être définie comme le processus de maximisation ou de minimisation d'une fonction objective sous des contraintes données. En d'autres termes, il s'agit de trouver la meilleure solution possible à un problème donné dans un environnement contraint.

L'optimisation peut être utilisée dans de nombreux domaines, tels que les mathématiques, la physique, l'ingénierie, l'informatique et bien d'autres encore. Elle permet de résoudre des problèmes complexes qui peuvent être difficiles, voire impossibles à résoudre de manière analytique.

L'optimisation peut être effectuée à l'aide de différentes méthodes, telles que les méthodes heuristiques, les algorithmes génétiques, les méthodes d'optimisation linéaire ou non linéaire, etc. Le choix de la méthode d'optimisation dépend du problème à résoudre et des contraintes associées.

Dans l'analyse de réseaux électrique plusieurs fonctions peuvent être optimisées (coût de Production, les pertes de transmission, . . . etc.). Avec considération les Contraintes d'égalité et d'inégalité pour obtient des solutions optimales acceptable [23].

Dans la figure 3.1 est représenté la minimum et maximum local et global.

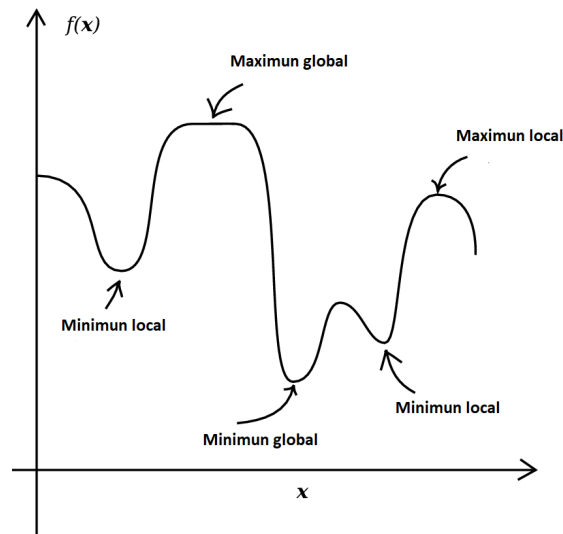


FIGURE 3.1 – Différence entre un optimum global et des optimum locaux.

3.3 Problème d'optimisation

Un problème d'optimisation est des problèmes qui consistent à trouver la meilleure solution possible parmi un ensemble de solutions possibles. L'objectif de l'optimisation est de trouver les valeurs des variables qui minimisent ou maximisent la fonction objectif, tout en respectant les contraintes spécifiées. Les problèmes d'optimisation peuvent être observés dans divers domaines.

Un problème d'optimisation est généralement défini par un espace de recherche (les variables de décision), une ou plusieurs fonction(s) objectif(s), un ensemble de contraintes à respecter et un espace objectif [24].

Espace de recherche (variables de décision) : ce sont les paramètres que l'on peut ajuster pour trouver la meilleure solution. Ces variables peuvent être continues tel que des valeurs réelles ou discrètes tel que des entiers.

La fonction objective : $F(f_1, f_2, \dots, f_p)$, modélisent le but à atteindre utilisée pour évaluer la qualité d'une solution. L'objectif peut être de maximiser ou de minimiser cette fonction, en fonction des besoins du problème. Une fonction objective associe une valeur (un score) à une instance (une solution) d'un problème pour déterminer la meilleure solution.

Ensemble de contraintes : ce sont des conditions que la solution doit respecter. Les contraintes peuvent être des équations ou des inégalités qui limitent les valeurs possibles

des variables de décision (espace de recherche).

L'espace des solutions (espace objectif) : L'espace objectif est l'image de l'espace de recherche, c'est l'ensemble des solutions possibles qui satisfont les contraintes du problème. Il peut être discret ou continu, et peut avoir une structure complexe. La valeur dans l'espace objectif d'une solution est appelée coût, ou fitness.

3.3.1 Classification des problèmes d'optimisation

Les problèmes d'optimisation peuvent être classés de différentes manières en fonction de divers critères sont :

La nature et le domaine de définitions des variables de décision, le nombre de critères à optimiser, la taille du problème à résoudre, etc. Il est donc important de bien identifier à quelle catégorie le problème appartient, afin de choisir la méthode appropriée pour le résoudre [24].

Problème d'optimisation combinatoire ou continue : Problème d'optimisation combinatoire est un cas particulier d'un problème d'optimisation donc déjà comme son nom l'indique c'est un problème d'optimisation mais avec un espace de recherche discret et fini.

Discret le vecteur $X \in \mathbb{N}$ (ensemble des entiers naturels) ou \mathbb{Z} (ensemble des entiers relatifs).

Et c'est un ensemble fini : $X = \min \dots \max$; Min et max $X \in \mathbb{N}$ ou \mathbb{Z} .

Il est combinatoire car il combine entre les différentes possibilités X ou combinaisons pour la variable X dans son domaine.

-Problème d'Optimisation continue c'est un problème d'optimisation avec un espace de recherche et les contraintes sont continuées. Les variables de décision peuvent prendre des valeurs réelles.

Problème linéaire ou non-linéaire : Basée sur la nature des expressions pour la fonction objective et les contraintes.

-Problèmes d'optimisation linéaire : la fonction objective et les contraintes sont linéaires par rapport aux variables de décision.

-Problèmes d'optimisation non linéaire : la fonction objective et/ou les contraintes sont non linéaires.

Problème mono-objectif ou multi-objectif : On classée selon le nombre d'objectifs.

-Problèmes d'optimisation mono-objective : il y a un seul objectif à optimiser.

-Problèmes d'optimisation multi-objectifs : il y a plusieurs objectifs à optimiser simultanément.

Problème avec contrainte ou sans contrainte : Selon la présence ou non des contraintes sur les variables de décision.

-Problèmes d'optimisation sans contraintes : il n'y a pas de contraintes sur les variables de décision.

-Problèmes d'optimisation avec contraintes : les variables de décision doivent satisfaire un ensemble de contraintes.

Problème statique ou dynamique : Un problème d'optimisation dynamique est un problème dont la/les fonction(s) objectif change au cours du temps. Ce changement implique une autre problématique pour les méthodes d'optimisation (par rapport aux problèmes statiques). La robustesse de ces méthodes sera évaluée par rapport à leur capacité à détecter un changement et de fournir une réponse appropriée.

Problème déterministe ou stochastique : on classée selon la solution dans un espace de recherche déterministe ou stochastique.

-Problèmes d'optimisation déterministes : les solutions optimales peuvent être déterminées avec certitude.

-Problèmes d'optimisation stochastiques : les solutions optimales sont recherchées dans un espace de recherche probabiliste.

3.3.2 Les méthodes de résolution d'un problème d'optimisation :

Il existe différentes méthodes de résolution d'un problème d'optimisation, chacune adaptée à des types de problèmes spécifiques.

Les méthodes d'optimisation peuvent être classées en plusieurs catégories en fonction de leur approche et de leur objectif. il existe plusieurs manières de classer ces méthodes d'optimisation :

- classification basée sur les origines d'inspiration de la méthode (méthodes inspirées des Principes physiques, méthodes inspirées par des comportements biologiques, méthodes Évolutionnaires, ...)

- classification basée sur le nombre de solutions manipulées par la méthode (méthodes à Solution unique versus méthodes à population de solutions).

- classification basée sur la garantie ou non de la solution optimal (méthodes exacte versus Méthodes approchées).

- classification basée sur la présence ou non d'un processus stochastique dans la méthode (méthodes stochastiques versus méthodes déterministes).

Dans la figure (3.2) est représentée la classification globale des méthodes d'optimisation.

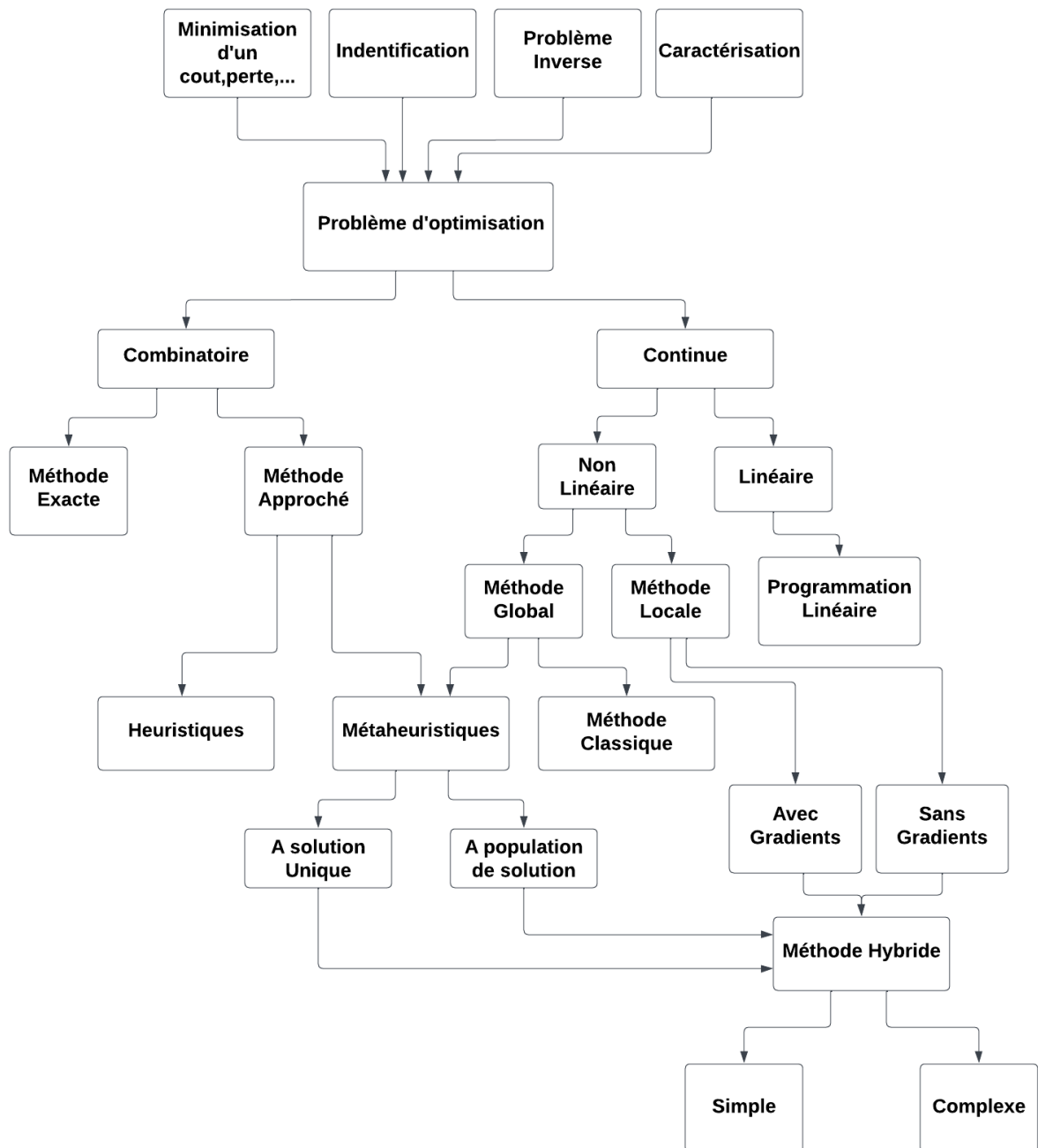


FIGURE 3.2 – Classification générale des méthodes d'optimisation

3.4 Optimisation Combinatoire

L'optimisation combinatoire, (sous ensemble à nombre de solution finie de l'optimisation discrète) est une branche de l'optimisation des mathématiques qui consiste à trouver la meilleure solution à partir d'un nombre fini (mais souvent très grand) de choix.

Le but d'optimisation combinatoire est de minimiser ou maximiser une fonction objectif (Coût, pertes, temps, distance, etc.) et de rechercher et définir une solution optimale la plus appropriée pour l'optimisation à partir d'un ensemble de solutions possible [25].

La résolution d'un problème d'optimisation combinatoire nécessite d'abord sa formulation mathématique qui consiste à bien définir : [26]

- L'espace de solutions ou la variable balayant cet espace.
- La fonction objective à optimiser.
- Les contraintes que devraient satisfaire les solutions à explorer.
- Les paramètres éventuels du modèle à utiliser pour la résolution du problème.

Les problèmes d'optimisation combinatoire peuvent être résolus à l'aide de diverses méthodes, notamment des méthodes exactes, des méthodes approchées (heuristiques et des méthodes méta-heuristiques).

Les méthodes de résolution de problèmes d'optimisation combinatoire en classé par trois méthode principales : les méthodes exactes, les méthodes approchées et les méthodes hybride comme se définir dans la Figure (3.3) ci-dessous est représenté la classification les méthodes de résolution de problème d'optimisation combinatoire.

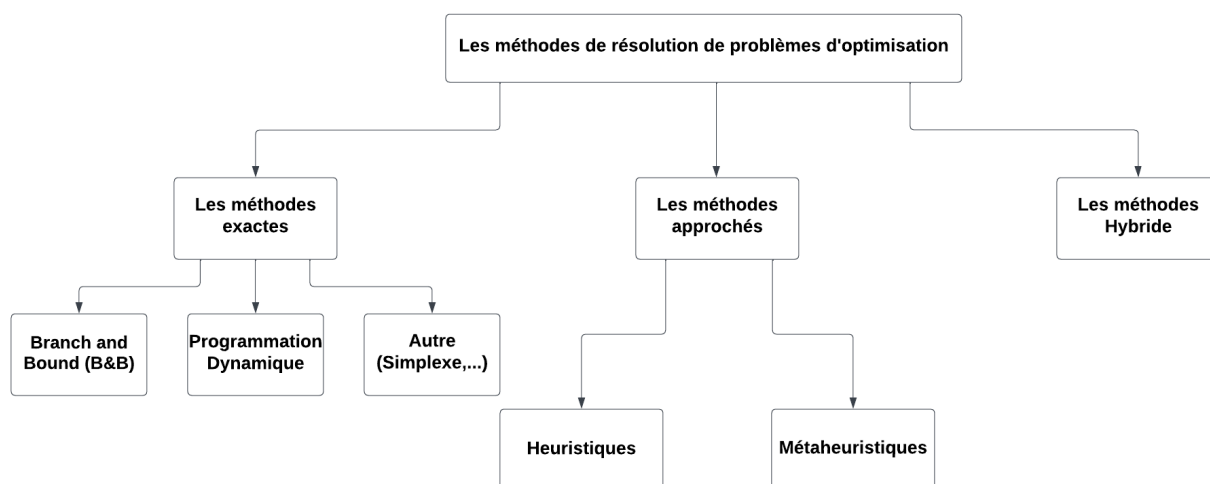


FIGURE 3.3 – Classification les méthodes de résolution de problème d'optimisation combinatoire

3.4.1 Les méthodes exactes

Les méthodes exactes sont généralement préconisées pour résoudre les problèmes de petites tailles pour demander le nombre de combinaisons possibles est suffisamment faible pour pouvoir explorer l'espace de solutions dans un temps raisonnable.

Les méthodes exactes visent à trouver de manière certaine la solution optimale en examinant de manière explicite ou implicite la totalité de l'espace de recherche. Elles ont l'avantage de garantir la solution optimale néanmoins le temps de calcul nécessaire pour atteindre cette solution peut devenir très excessif en fonction de la taille du problème (explosion combinatoire) et le nombre d'objectifs à optimiser. Ce qui limite l'utilisation de ce type de méthodes aux problèmes bi-objectifs de petites tailles [26].

Parmi les méthodes exactes, les méthodes génériques sont : Branch Bound, Branch Cut, Branch Price, Branch, Cut Price. D'autres méthodes sont moins générales, comme : La programmation dynamique, simplexe, la programmation linéaire en nombre entiers, Programmation par contraintes, l'algorithme A^* .

3.4.2 Les Méthodes approchées

Les méthodes approchées permettent de trouver de manière rapide une solution réalisable à un problème donné. Cependant cette solution n'est pas forcément la solution optimale. L'objectif de ces méthodes est donc de trouver une solution la plus proche possible de celle d'une méthode exacte tout en étant plus rapide. La qualité d'une méthode approchée va donc se calculer par rapport à l'écart obtenu entre sa solution et l'optimale. Plus ce résultat est proche de la solution optimale, meilleure est l'heuristique [27].

L'avantage principal de ces méthodes est qu'elles peuvent s'appliquer à n'importe quelle classe de problèmes, faciles ou très difficiles. Ils peuvent être classés en deux catégories : les heuristiques et les méta-heuristiques.

Heuristique : Le terme heuristique vient du verbe grec *heuriskein* signifiant trouver. Une heuristique permet de trouver une "bonne" solution, en un temps raisonnable, seulement elle n'offre aucune garantie sur l'optimalité de la solution trouvée [28].

Définition1 : En (1963) Feignebaum et Feldman « Une méthode heuristique (ou simplement une heuristique) est une méthode qui aide à découvrir la solution d'un problème en faisant des conjectures plausibles mais faillible de ce qui est la meilleure chose à faire » [29].

Définition2 : En (1980) Newell, « Les heuristiques sont des règles empiriques et des morceaux de connaissances, utiles (mais non garanties) pour effectuer des sélections différentes et des évaluations » [30].

Méta-heuristique : Le mot méta-heuristique est dérivé de la composition de deux mots grecs : méta signifiant « au-delà » ou «à un plus haut niveau » et heuristique. Un méta-heuristique est un algorithme heuristique de haut niveau qui peut être adapté à divers problèmes.

Les méthodes méta-heuristiques apparues à partir des années 1980 , Elles permettent de trouver un optimum, sans garantir l’optimalité de la solution obtenue. Les méthodes heuristiques peuvent être divisées en deux classes. Il y a, d’une part, les algorithmes spécifiques à un problème donné qui utilisent des connaissances du domaine, et d’autre part les algorithmes généraux qui peuvent être utilisés pour une grande variété de problèmes [19].

Les méta-heuristiques sont un ensemble d’algorithmes d’optimisation visant à résoudre les problèmes d’optimisation difficiles. Elles sont souvent inspirées par des systèmes naturels, qu’ils soient pris en physique (Recuit simulé), ou en éthologie (Algorithmes de colonies de fourmis ou l’optimisation par essais particuliers).

Ces techniques peuvent être classées en deux groupes : les méthodes à population de solutions connues sous le nom d’algorithmes évolutionnaires comme les algorithmes génétique, et les méthodes à solution unique comme le recuit simulé (RS). Les méthodes méta-heuristiques ont prouvé leurs efficacités dans le domaine de l’optimisation mono-objectif [19].

Dans la figure (3.4) suivante est représentée la classification des méthodes méta-heuristiques.

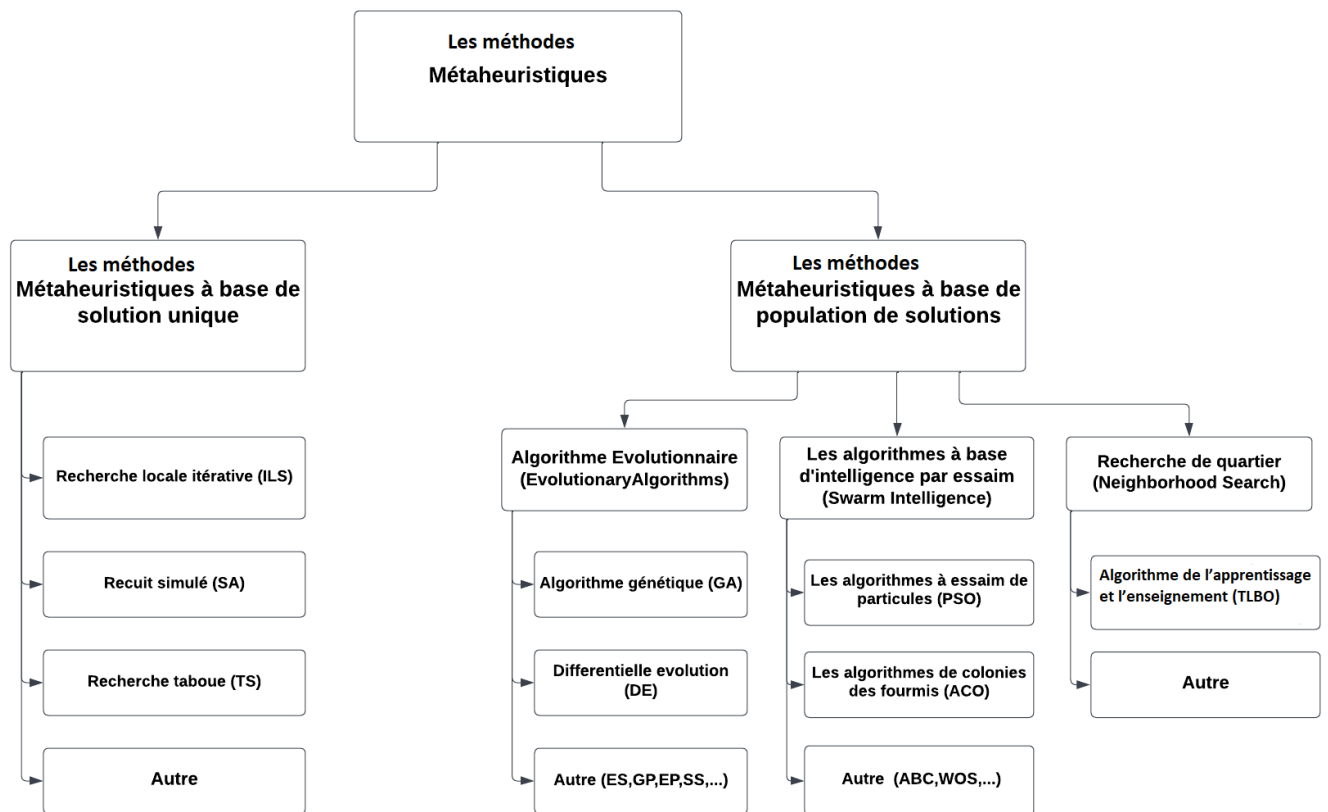


FIGURE 3.4 – Classification des méthodes méta-heuristiques

Méta-heuristiques à base de solution unique :

Les méta-heuristiques à solution unique sont connues sous différents noms tels que les méthodes de recherche locale ou les méthodes de trajectoire. Leur principe repose sur une évolution itérative d'une solution dans l'espace de recherche afin de se rapprocher de l'optimum global. Parmi les méthodes les plus populaires, nous pouvons citer la recherche locale itérative (ILS), le recuit simulé (RS) et la recherche tabou (RT) [31].

Méta-heuristiques à base de population de solutions :

Les méta-heuristiques à population sont des techniques de résolution de problèmes d'optimisation qui utilisent un ensemble de solutions plutôt qu'une seule solution. Elles explorent l'espace de recherche en générant une population de solutions et en appliquant des opérateurs de recherche sur celles-ci. Ces méta-heuristiques permettent d'explorer plus largement l'espace des solutions, d'éviter les optima locaux et d'obtenir des solutions de haute qualité.

Les méta-heuristiques à population sont utilisées pour résoudre des problèmes d'optimisation combinatoire (OPF). Il existe plusieurs méthodes méta heuristiques à population couramment utilisées telles que les algorithmes génétiques (GA), les colonies de fourmis (ACO), les algorithmes à essaims de particules (PSO) et L'optimisation basée sur l'apprentissage et l'enseignement (TLBO)

-Dans cette thèse, nous intéressons principalement sur les algorithmes méta-heuristiques basés sur la population, en particulier sur un algorithme appelé l'algorithme basée sur l'apprentissage et l'enseignement (TLBO : Teaching-Learning Based Optimization) pour analyser la répartition optimal de puissance sur un système d'alimentation électrique en minimisant les coûts d'exploitation, en réduisant les pertes et en améliorant la fiabilité.

3.5 L'optimisation basée sur l'apprentissage et l'enseignement (TLBO : Teaching Learning Based Optimization) :

L'optimisation basée sur l'apprentissage et l'enseignement (TLBO) est une technique d'optimisation méta-heuristique basée sur la population qui simule l'environnement d'une salle de classe pour optimiser une fonction objective donnée, et elle a été proposée pour la première fois en 2011 par R.V. Rao et al [32]. Le TLBO est basé sur la relation entre un enseignant et les apprenants d'une classe. L'algorithme TLBO se compose de deux phases : la phase de l'enseignant (teacher phase) et la phase de l'apprenant (learner phase).

-Dans la phase d'enseignant (teacher phase), Tous les étudiants apprennent de l'enseignant et acquièrent des connaissances.

-Dans la phase d'apprentissage (learner phase), les apprenants interagissent entre eux pour améliorer leurs connaissances.

Dans cet algorithme d'optimisation, un groupe d'étudiants est considéré comme un groupe, les différents sujets proposés aux étudiants sont considérés comme les variables du problème d'optimisation (impliquant les paramètres de la fonction objectif), et les résultats des étudiants sont considérés comme les valeurs de la fonction de fitness (fonction) [33].

Ce processus d'apprentissage et d'enseignement se répète de manière itérative jusqu'à ce qu'une solution optimale soit trouvée ou qu'un critère d'arrêt prédéfini soit atteint.

Cet algorithme peut être appliqué sur le problème de répartition de puissance dans les systèmes électriques pour minimiser la fonction objectif (minimiser les pertes de puissance active).

3.5.1 Modèle mathématique de l'algorithme TLBO

L'algorithme de TLBO se compose de deux phases : la phase de l'enseignant (teaching phase) et la phase d'apprentissage (learning phase).ces deux phases seront expliquées mathématiquement dans la partie suivantes.

Phase d'enseignement (Teaching phase) : Comme mentionné, l'enseignement par un enseignant vise à augmenter la connaissance moyenne des membres de la classe (Moyenne). Par conséquent, ce processus est modélisé par la relation suivante : [32]

$$X_{new} = X_i + rand * (X_{teacher} - TF * X_{mean}) \quad (3.1)$$

où X_i et X_{new} désignent maintenant le statut du i élève avant et après l'enseignement, Enseignant est le statut de l'enseignant, Moyenne est le statut moyen de la classe et $rand$ représente un nombre aléatoire uniformément distribué dans la plage $[0, 1]$. De plus, TF est un nombre aléatoire qui peut être 1 ou 2 et indique le taux d'apprentissage de l'élève. TF peut être obtenu par l'équation suivante :

$$TF = round(rand) + 1 \quad (3.2)$$

où $rand$ désigne un nombre aléatoire compris entre $[0, 1]$.

Phase d'apprentissage (learning phase) : Les étudiants choisissent un étudiant au hasard pour partager leurs connaissances pendant le processus d'apprentissage. L'élève avec moins de connaissances apprend de l'autre. Mathématiquement, cette phase est définie comme suit : [32]

$$X_{new} = \begin{cases} X_i + rand * (X_j - X_i); si F(X_j) < F(X_i) \\ X_i + rand * (X_i - X_j); sinon \end{cases} \quad (3.3)$$

L'indice j dans 3.3 décrit l'étudiant sélectionné de manière aléatoire, et $rand$ est un nombre aléatoire dans l'intervalle $[0, 1]$. Pour un problème de minimisation, plus la fonction de coût de l'étudiant, c'est-à-dire $F(X_i)$, est petite, plus il possède d'informations. Si la solution est meilleure, un nouveau point est convenu lors des processus d'enseignement

et d'apprentissage.

3.5.2 Les étapes principales de TLBO pour l'optimisation

1. Initialisation : Générer une population initiale de solutions candidates de manière aléatoire dans l'espace de recherche.

2. Évaluation : Évaluer la qualité de chaque solution candidate en utilisant la fonction objectif à optimiser.

3. Phase de l'enseignant (Teacher Phase) : Sélectionner le meilleur individu de la population (l'enseignant) qui a la meilleure qualité (la meilleure valeur de la fonction objectif). L'enseignant partage ses connaissances avec les autres individus de la population en ajustant leur position vers la sienne. Cela permet aux autres individus d'apprendre des informations utiles pour améliorer leur qualité.

4. Phase de l'apprenant (Learner Phase) : Chaque individu (apprenant) de la population examine les autres individus de manière aléatoire. S'il trouve un individu avec une meilleure qualité que lui, il ajuste sa position vers celle de l'individu trouvé. Cela permet à chaque individu d'apprendre des informations des autres individus et de se déplacer vers de meilleures positions.

5. Mise à jour de la population : Après la phase de l'enseignant et la phase de l'apprenant, la population est mise à jour avec les nouvelles positions des individus. Les solutions moins performantes peuvent être éliminées ou remplacées par de nouvelles solutions générées aléatoirement.

6. Critère d'arrêt : Répéter les phases de l'enseignant et de l'apprenant jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt prédéfini soit atteint. Ce critère peut être un nombre maximal d'itérations, une convergence suffisante de la qualité des solutions, ou toute autre condition définie par l'utilisateur.

7. Solution optimale (résultats final) : La meilleure solution obtenue après la fin de l'algorithme est considérée comme la solution optimale (ou une approximation de celle-ci) pour le problème d'optimisation donné.

3.5.3 Organigramme (flowchart) de l'algorithme basée sur l'apprentissage et l'enseignement (TLBO)

Dans la figure (3.5) est représenté l'organigramme (flowchart) de l'algorithme TLBO.

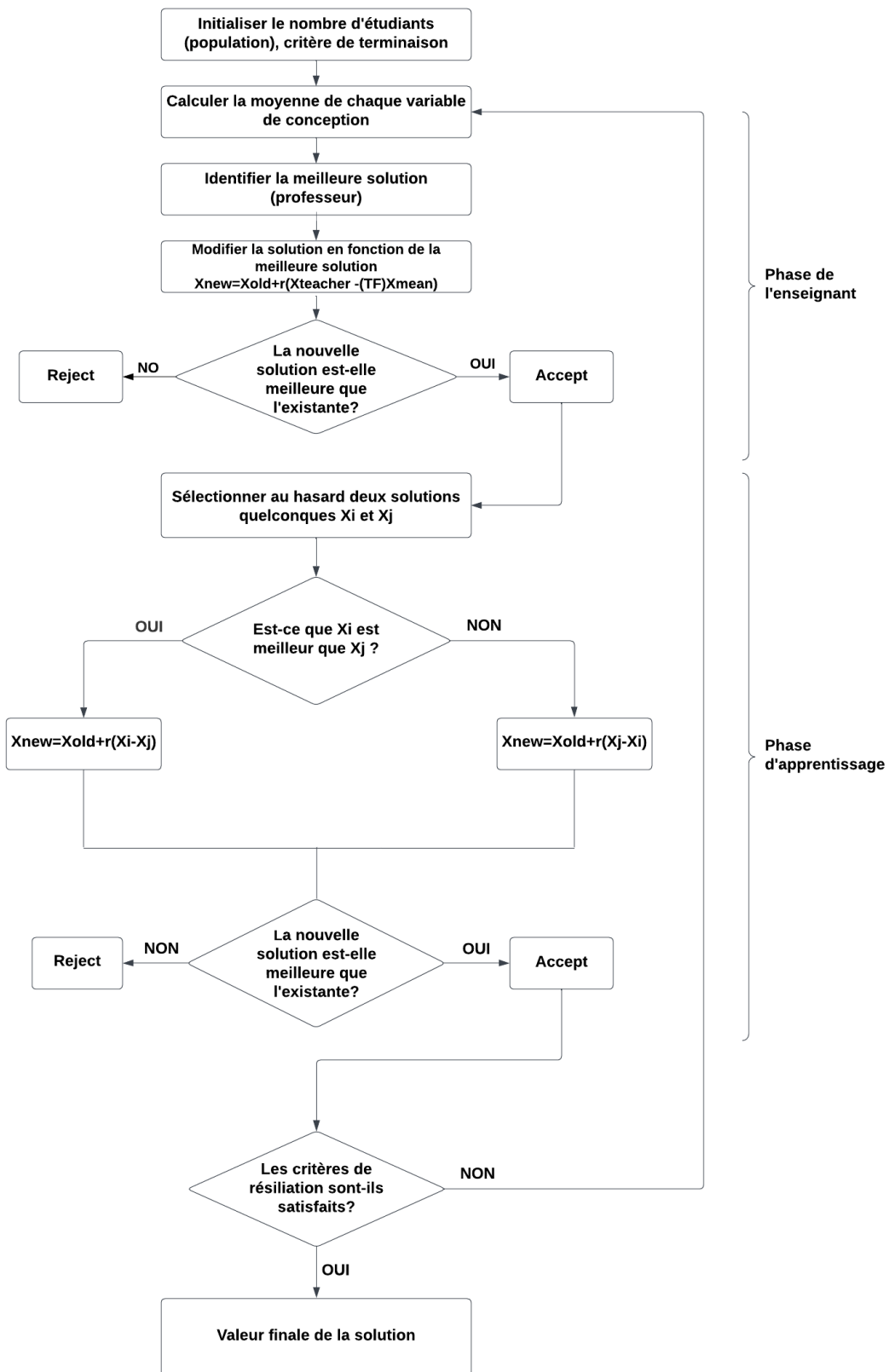


FIGURE 3.5 – Organigramme (flowchart) de l’algorithme basée sur l’apprentissage et l’enseignement (TLBO)

3.6 L'algorithme d'enseignement et d'apprentissage modifier(MTLA)

Nous utilisons l'algorithme TLBO avec la modification des points et cette algorithme appelé l'enseignement et l'Apprentissage modifier (MTLA : Modified Teaching-Learning Algorithm) pour résoudre le problème de l'écoulement de puissance optimal (OPF) et minimiser la fonction objectif représentant les pertes de puissances actives P.

3.6.1 Les étapes de l'algorithme d'enseignement et d'apprentissage Modifier (MTLA)

1. Initialisation : Enter toutes les paramètres du réseau électrique et les contraintes (les limites du générateur, les limites du transformateur) et déclaration aussi les paramètres de l'algorithme MTLA La taille de la population et le nombre de générations et Initialisez les variables de contrôle.

2. Exécution : exécution l'écoulement de puissance (PF) par la méthode de Newton-Raphson .

3. Evaluation : Évaluez chaque solution candidate en utilisant la fonction objectif (les pertes de puissance active) qui mesure la qualité de la solution et Les contraintes du problème d'optimisation .

4. Modification des points de recherche : À cette étape, il s'agit de modifier les propositions existantes. Cela peut impliquer des ajustements, des adaptations ou des transformations des propositions initiales en fonction des valeurs de x , X_{gbest} , $gbest$ et $pbest$.

5. condition d'arrêt : Répétez les étapes 3 à 5 jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt prédéfini soit atteint. Cela peut être un nombre maximum d'itérations, une convergence de la population ou une amélioration suffisamment petite de la fonction objectif.

6. Solution optimale : La meilleure solution obtenue après la fin de l'algorithme est considérée comme la solution optimale (ou une approximation de celle-ci) pour le problème de l'écoulement de puissance optimal (OPF).

7. Fin : Cette étape marque la fin de l'algorithme. À ce phases, toutes les étapes et les objectifs de l'algorithme ont été atteints.

3.6.2 Organigramme (flowchart) de l'algorithme d'enseignement et d'apprentissage modifier (MTLA)

Dans la figure (3.6) ci-dessous est représenté l'organigramme de l'algorithme MTLA.

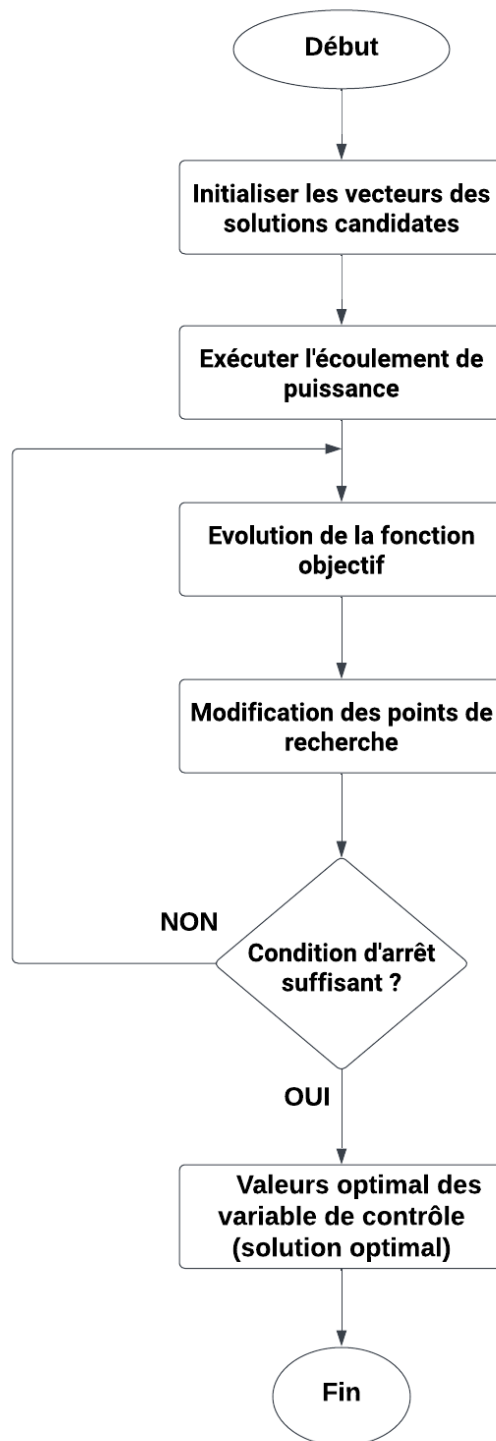


FIGURE 3.6 – Oranigramme général de l’algorithme MTLA pour la solution de l’écoulement de puissance optimal (OPF)

3.7 L'algorithme de Clustering K-Means

L'algorithme k-means (k-moyenne) a été introduit par J. MacQueen, 1967 [34]. L'algorithme K-means est une méthode de regroupement non supervisée utilisée dans l'apprentissage automatique et l'exploration de données. Son objectif est de diviser un ensemble de données en plusieurs groupes distincts (appelés clusters). Il s'agit d'un algorithme itératif qui vise à minimiser la variance intra-cluster, c'est-à-dire la somme des carrés des distances entre les points de chaque cluster et leur centre de gravité, appelé centroïde.

K : définit le nombre de clusters prédéfinis qui doivent être créés dans le processus, comme si $K=2$, il y aura deux clusters, et pour $K=3$, il y aura trois clusters, et ainsi de suite.

L'algorithme de clustering à k moyennes effectue principalement deux tâches :

-Détermination de la meilleure valeur pour K centroïdes : L'algorithme commence par initialiser aléatoirement K centroïdes dans l'espace des entités. La valeur de K représente le nombre de clusters souhaité. L'algorithme affine ensuite de manière itérative les positions des centroïdes pour minimiser la variance intra-cluster.

-Affectation de chaque point de données à son centre de gravité le plus proche : Dans cette étape, chaque point de données est affecté au centre de gravité qui lui est le plus proche en termes de distance euclidienne ou de toute autre métrique de distance. Cette affectation crée des clusters dans lesquels les points de données de chaque cluster présentent des similitudes et sont relativement éloignés des points de données des autres clusters.

Le diagramme ci-dessous explique le fonctionnement de l'algorithme de clustering à K means :

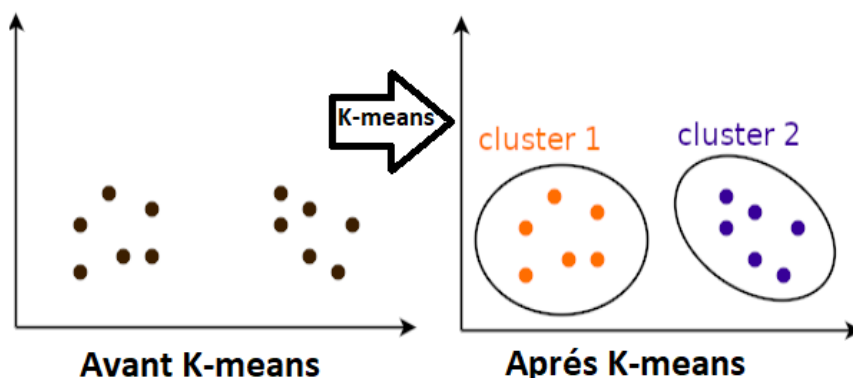


FIGURE 3.7 – Le fonctionnement de l'algorithme de clustering K-means

3.7.1 Les étapes principales de l'algorithme de K-means

1. Ensemble de données en entrée n , nombre de clusters : Cela fait référence à un ensemble de données donné en entrée, où " n " représente le nombre d'observations ou d'éléments dans l'ensemble de données, et "number of clusters" fait référence au nombre de groupes ou de clusters dans lesquels les données doivent être regroupées ou partitionnées.

2. Initialisation des centres des k clusters : Spécifiez le nombre de clusters K que vous souhaitez obtenir. Sélectionnez K points dans l'ensemble de données comme centroïdes initiaux. Cela peut être fait de différentes manières, comme la sélection aléatoire de points ou en utilisant une heuristique spécifique.

3. Attribution des points aux clusters : Pour chaque point de l'ensemble de données, calculez la distance par rapport à chaque centroïde et attribuez-le au cluster dont le centroïde est le plus proche.

4. Mise à jour des centroïdes : Calculez le nouveau centroïde pour chaque cluster en prenant la moyenne des points qui lui sont attribués. Cela déplace le centroïde vers le centre des points du cluster.

5. Répétez les étapes 3 et 4 : Répétez les étapes d'attribution des points aux clusters et de mise à jour des centroïdes jusqu'à ce qu'il y ait convergence. La convergence se produit lorsque les centroïdes ne se déplacent plus ou que la variation intra-cluster est suffisamment réduite.

6. Les Résultats finaux : Une fois que l'algorithme a convergé, vous obtenez K clusters avec leurs centroïdes respectifs.

3.7.2 Organigramme (flowchart) de l'algorithme de clustering K-means

Dans la figure (3.8) est représenté un organigramme de l'algorithme K-means.

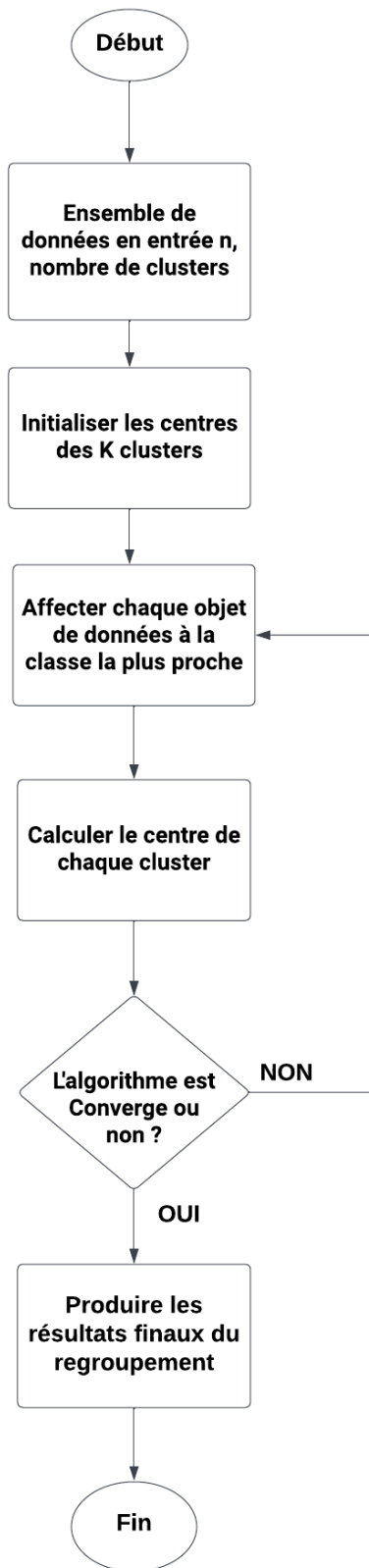


FIGURE 3.8 – Organigramme (flowchart) de l’algorithme K-means

3.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons exploré les méthodes d'optimisation méta-heuristiques et l'algorithme de clustering K-Means. Nous avons souligné l'importance de l'optimisation pour résoudre des problèmes variés et avons examiné différentes approches pour trouver des solutions optimales ou proches de l'optimalité. Nous avons discuté des méthodes exactes et approximatives pour l'optimisation combinatoire, ainsi que de l'optimisation basée sur l'apprentissage et l'enseignement (TLBO).

Enfin, nous avons examiné l'algorithme de clustering K-Means et leur les étapes clés, ce méthode qui permet de regrouper les données en fonction de leurs similarités.

Ces méthodes et l'algorithme K-Means offrent des outils puissants pour résoudre des problèmes d'optimisation et de clustering.

Chapitre 4

Application Numérique, Résultats de la Simulation et Interprétation

4.1 Introduction

Après avoir terminé la partie théorique dans les chapitres précédents, dans ce chapitre, nous aborderons l'application et la validation en simulation.

On présentera les courbes et les résultats de l'algorithme MTLA que nous avons utilisé pour minimiser les pertes de la puissance active et les commenterons afin de résoudre le problème de l'écoulement de puissance optimal (OPF). Après avoir ressortir les résultats, nous les classons à l'aide de l'algorithme de k-means pour améliorer les résultats.

4.2 Environnement de travail

Le tableau ci-dessous représente la configuration qui a été utilisée pour la mise en œuvre de la solution :

Système d'exploitation	Windows 10
Mémoire	8Go
Processeur	2.7GHz 4 core
Stockage	HDD 1To
Langage de programmation	Matlab 2015b
extension	Matpower

TABLEAU 4.1 – Les caractéristiques de l'environnement de simulation.

4.3 Aperçu sur le matpower

Le matpower est une application open source largement utilisée pour l'analyse et l'optimisation des systèmes d'alimentation. Il fournit une collection de fonctions MATLAB qui permettent aux utilisateurs de modéliser, simuler et résoudre divers problèmes de système d'alimentation, y compris l'écoulement de puissance optimal (OPF).

Le matpower "Case 14" fait référence à un cas de test de système d'alimentation spécifique inclus dans le matpower. Il est basé sur le système de bus IEEE 14. Le matpower 14 est fourni sous la forme d'un fichier de données qui contient les paramètres et contraintes du système pour le système d'alimentation à 14 bus, y compris les limites du générateur, les données de charge, les paramètres de ligne et les données de bus.

Le cas de système 14-bus est souvent utilisé comme cas de test de référence pour évaluer et comparer différents algorithmes (OPF) et techniques d'optimisation. ce système 14-bus est utilisé pour tester les différents algorithmes, comparer les résultats et vérifier l'exactitude et l'efficacité des méthodes d'optimisation.

En utilisant le logiciel matpower et en chargeant le fichier de données du cas 14, il peut être facilité les différentes analyses du système d'alimentation, la résolution du problème d'optimisation de la puissance (OPF), l'évaluation de la stabilité du système.

4.3.1 Réseau électrique testé pour le système IEEE 14-bus

Le système IEEE 14-bus est un réseau électrique simplifié composé de 14 bus (jeu barre ou nœuds) et 20 branche (lignes). Il est largement utilisé comme cas de test pour l'évaluation des performances des algorithmes de résolution de l'écoulement de puissance optimal (OPF).

La topologie unifilaire du réseau électrique IEEE (14-bus system) est représentée par la figure (4.1).

Les caractéristiques du réseau sont les suivantes :

- 5 générateurs d'énergie au niveau de bus 1, 2, 3,6 et 8.
- 9 charges (Load) au niveau de bus 4, 5, 7, 9, 10, 11, 12, 13, et 14.
- 20 ligne de transmission (Branche) connectent les différents bus.
- 3 Transformateur entre deux Bus T1 (4 -7) et T2 (4-9) et T3 (5-6).
- 2 batteries de condensateurs implantés au niveau de jeux de barre 9 et 14.

Les données associées comprennent les limites de puissance des générateurs, les limites de tension, les coefficients de coût des générateurs, les charges actives et réactives, les pertes de ligne, etc.

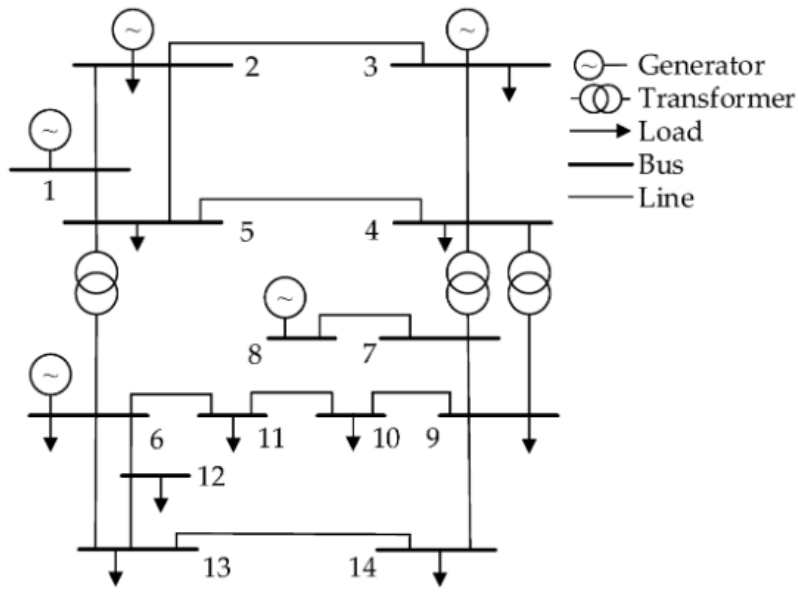


FIGURE 4.1 – Schéma unifilaire du réseau électrique IEEE (14-bus system)

4.4 Application 01 : Optimisation par l’algorithme d’enseignement et d’Apprentissage modifier(MTLA)

Dans cette application nous afficherons tous les résultats obtenus à partir des propositions dans ce tableau, où nous mettrons les puissances actives P_G des bus de génération, les tensions des bus de génération V_G , les puissances réactives injectées Q_c par les condensateurs shunts et les transformateurs T et les pertes de puissance active de chaque proposition.

Variables	Inférieur	Supérieure	OPF	Proposition1	Proposition2	Proposition3	Proposition4	Proposition5
$P_{G1}(MW)$	0	332.4	196.72	196.72	196.72	196.72	196.72	196.72
$P_{G2}(MW)$	0	140	36.92	44,8422	20,6688	63,6644	11,4018	44,4032
$P_{G3}(MW)$	0	100	27.27	97,1925	99,7271	67,2399	52,9569	64,2778
$P_{G6}(MW)$	0	100	0	48,2234	73,5881	21,6094	75,4099	62,7109
$P_{G8}(MW)$	0	100	7.08	57,5259	52,875	99,8268	92,3184	88,8958
$V_{G1}(pu)$	0.98	1.1	1.1	1,058	0,99756	1,0398	1,0302	1,00312
$V_{G2}(pu)$	0.98	1.1	1,081	1,0682	0,98932	1,05	1,0262	0,99368
$V_{G3}(pu)$	0.98	1.1	1,054	1,0922	0,99171	1,0558	0,993	0,98076
$V_{G6}(pu)$	0.98	1.1	1,079	0,9897	0,99523	0,9838	1,0347	1,04662
$V_{G8}(pu)$	0.98	1.1	1,069	1,006	1,07475	0,98	0,9868	1,08277
$T_{1(4-7)}$	0.9	1.1	0,978	1,0202	1,08876	1,0232	0,9901	0,94892
$T_{2(4-9)}$	0.9	1.1	0,969	1,0625	0,95943	0,944	0,9533	0,92497
$T_{3(5-6)}$	0.9	1.1	0,932	1,0153	0,9698	1,094	0,9976	1,00943
Q_{c1}	0	20	19	9,2483	6,7702	0,0736	19,679	8,5187
Q_{c2}	0	20	19	7,4666	2,6566	2,2348	0,4171	0,9504
Pertes (MW)	2.71	1.72	1.56	1.45	1.62	1.39
$\sum P_g(MW)$	/	/	261.23	480,284	479,359	484,8405	464,587	492,7877

TABLEAU 4.2 – Les résultats obtenus de la minimisation des pertes active pour 5 proposition par l'algorithme (MTLA).

- Dans ce tableau, on remarque que toutes les valeurs ne dépassent pas les limites, ce qui confirme l'exactitude des équations proposées.
- Nous notons également que nous avons pu augmenter la puissance active. Plus nous minimisons les pertes, plus nous augmentons la puissance active.
- Les équations proposées remplissent leur rôle en réduisant les pertes. Les résultats obtenus avec ces équations sont meilleurs que ceux obtenus avec le "PF" et l'"OPF".
- La deuxième équation est la meilleure car elle présente la plus faible perte. Les pertes étaient plus importantes pour les première, troisième et cinquième équations.

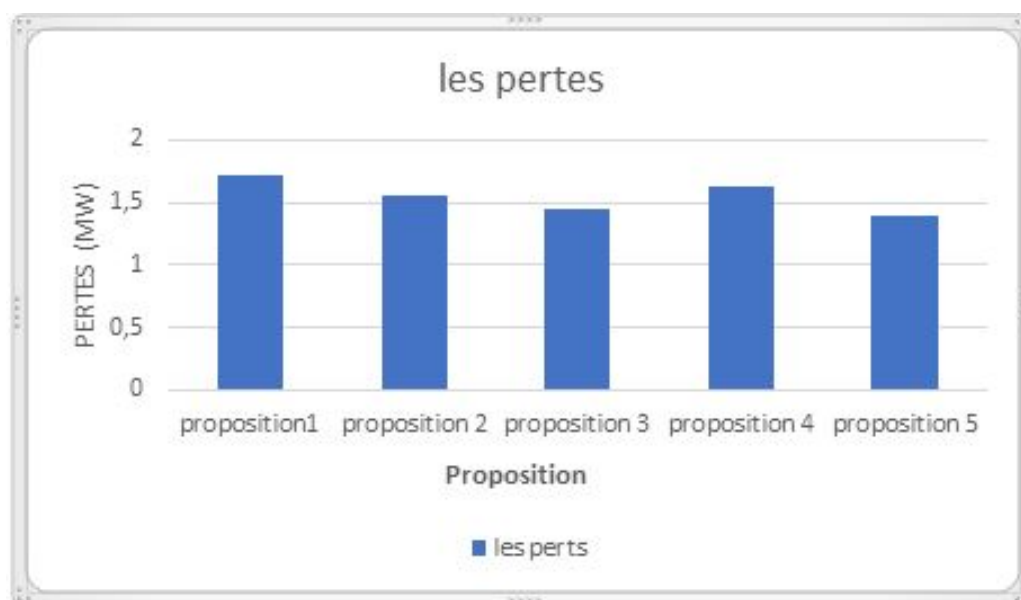


FIGURE 4.2 – Les pertes de puissance active obtenues après l'application des équations proposées .

La figure illustre les résultats obtenus en utilisant les équations proposées, où la cinquième équation s'est avérée être la meilleure.

4.4.1 Les puissances actives générer PG au jeux de barres du générateur

Dans les figures suivantes, nous avons représenté les propositions en termes de puissance active.

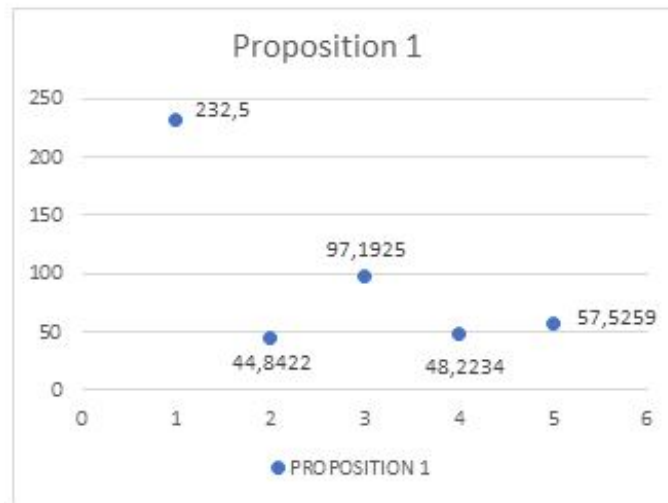


FIGURE 4.3 – les puissances actives PG au jeux de barres du générateur de proposition 1

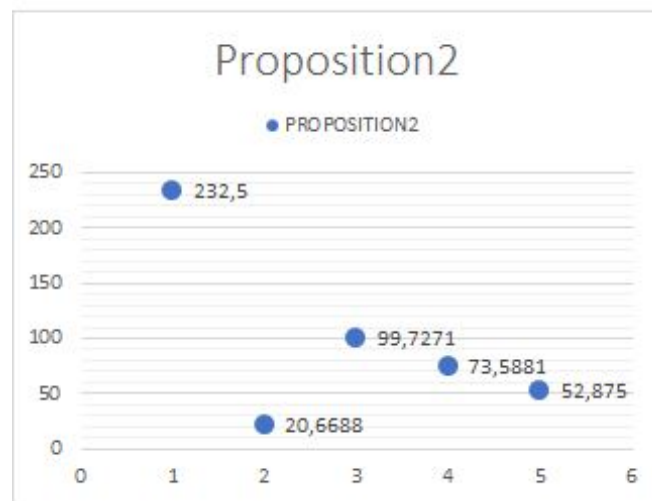


FIGURE 4.4 – Les puissances actives générées PG au jeux de barres du générateur de proposition 2

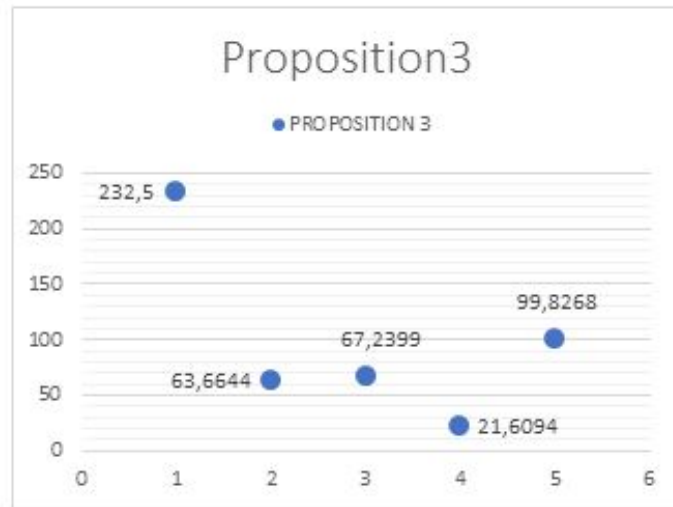


FIGURE 4.5 – Les puissances actives générées PG au jeu de barres du générateur de proposition 3

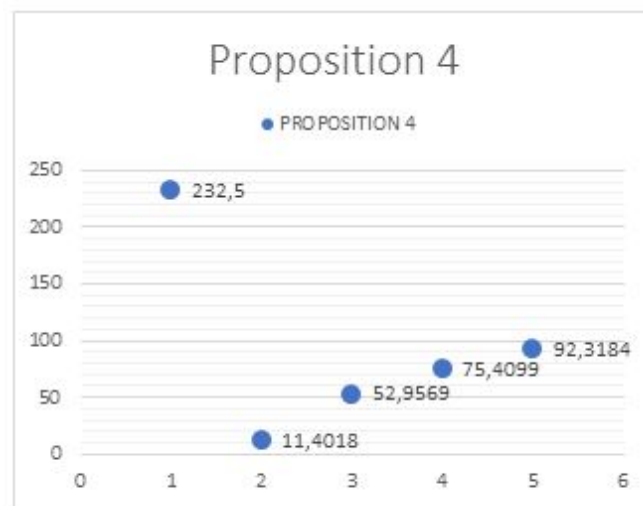


FIGURE 4.6 – Les puissances actives générées PG au jeu de barres du générateur de proposition 4

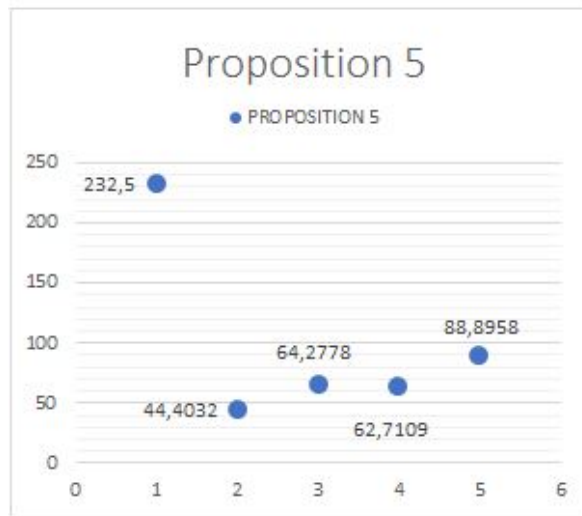


FIGURE 4.7 – Les puissances actives générées PG au jeu de barres du générateur de proposition 5

Ces courbes illustrent la relation entre les pertes et la puissance. On remarque que la valeur de la puissance dans la cinquième proposition est supérieure à celle des autres propositions, ce qui reflète le succès de cette proposition. Elle a réussi à réduire les pertes et à augmenter la puissance.

4.4.2 Les figures des pertes de puissance active (réelle)

Dans cette partie, nous présenterons les graphiques correspondant à chaque proposition.

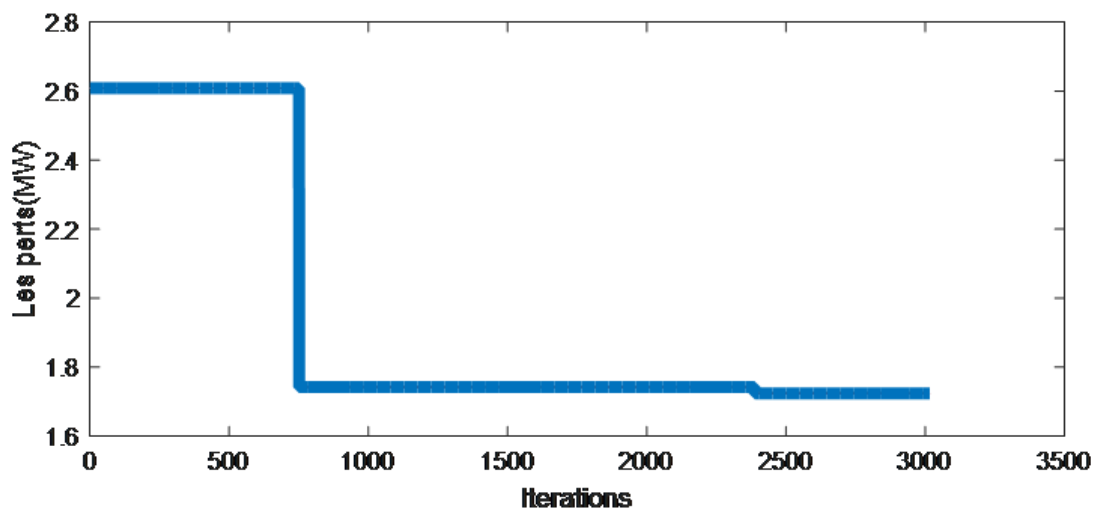


FIGURE 4.8 – Le graphique représente la première proposition

Il est observé que le programme a débuté à partir de 2,6 MW et a convergé après 700 itérations, atteignant une valeur de 1,72 MW. Cela indique que l'équation est fonctionnelle, mais elle n'a pas produit le meilleur résultat.

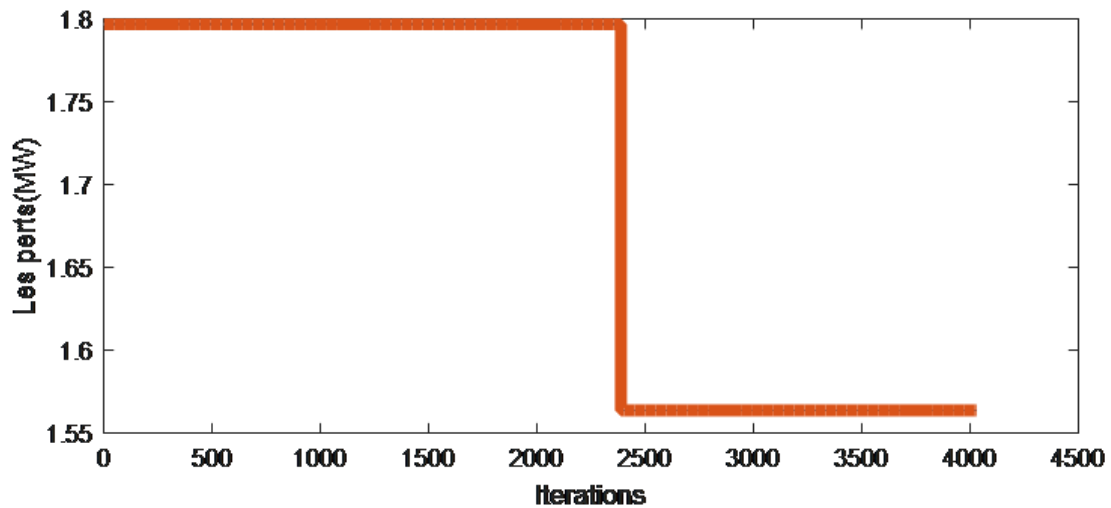


FIGURE 4.9 – le graphe est représente la deuxième proposition

Le programme a convergé après 2400 itérations, passant de 1,8 MW à 1,56 MW. Bien que le résultat se soit amélioré par rapport à la première proposition, il reste insatisfaisant.

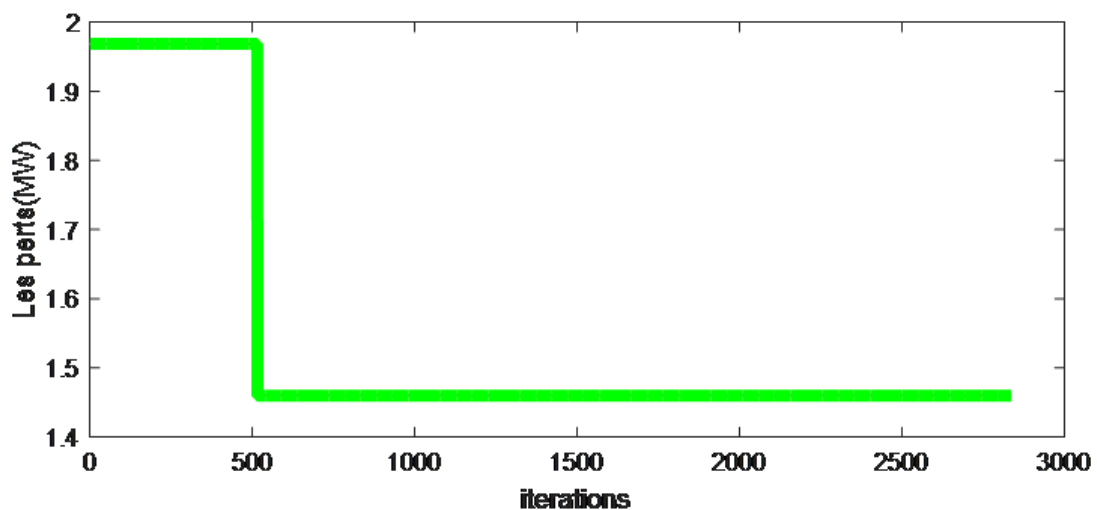


FIGURE 4.10 – Le graphe est représente la troisième proposition

Le programme a convergé après 500 itérations, ce qui est plus rapide que les autres propositions, et a donné un bon résultat. Il a débuté à 1,97 et est parvenu à atteindre 1,45.

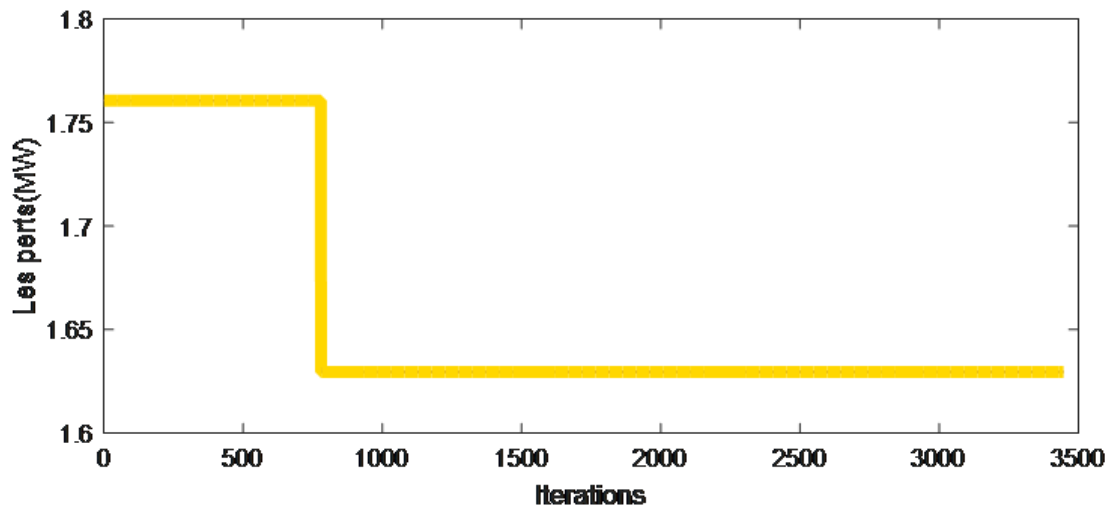


FIGURE 4.11 – Le graphe est représenté la quatrième proposition

Après 700 itérations, le programme a atteint une valeur de 1,63 MW, ce qui représente une convergence à partir de 1,76 MW. Malheureusement, le résultat obtenu n'a pas répondu à nos attentes.

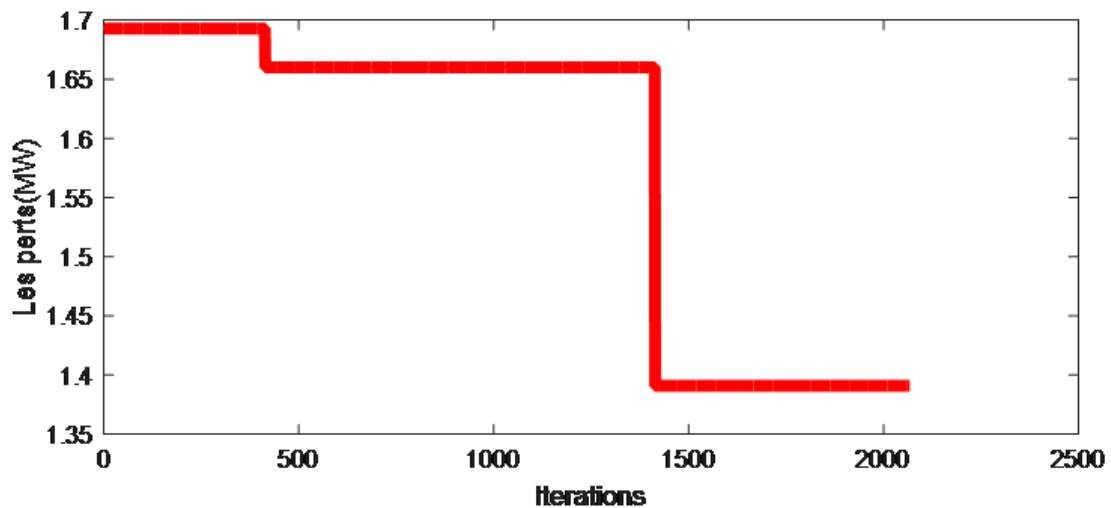


FIGURE 4.12 – Le graphe est représenté la cinquième proposition

Ce programme est le seul à avoir convergé deux fois. La première fois, il a convergé après 400 itérations, partant de 1,7 MW pour atteindre 1,6 MW. La deuxième fois, après 1400 itérations, il a convergé vers 1,39 MW, ce qui est considéré comme le meilleur résultat parmi les cinq propositions.

4.4.3 Classifications et traitement des données du système

Après avoir obtenu les résultats de l'algorithme MTLA, nous avons remarqué que les pertes n'avaient pas connu d'amélioration significative. Pour remédier à cela, nous avons suggéré d'appliquer un autre algorithme, à savoir l'algorithme k-means.

4.5 Application 02 : Optimisation par la méthode k-means

Dans cette section, nous expliquerons les résultats obtenues par l'algorithme de cluster K-means en utilisant

4.5.1 Les pertes de la puissance active

Nous allons utiliser l'algorithme K-means pour analyser les cinq propositions obtenues à partir de l'algorithme MTLA et des résultats de l'écoulement de puissance optimal (OPF). L'objectif est d'organiser et d'améliorer les résultats.

Nous commencerons par entrer les données dans l'algorithme K-means. Nous choisirons deux centres, représentés par les lignes 2 et 5, pour former deux groupes (G1 et G2).

Ensuite, nous effectuerons une comparaison entre les résultats des deux centroïdes en utilisant la valeur minimale. Si la valeur minimale correspond au centroïde 1, nous désignerons cette proposition comme étant dans le groupe G1, tandis que les autres propositions seront dans le groupe G2.

Nous répéterons cette étape jusqu'à ce que les groupes ne changent plus, ce qui indiquera la convergence de l'algorithme K-means. Ensuite, nous calculons le cluster en comparant les deux groupes et en sélectionnant le minimum. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Variables	OPF	Proposition1	Proposition2	Proposition3	Proposition4	Proposition5	k-means		
							G1	G2	Cluster
$P_{G1}(MW)$	196.72	196.72	196.72	196.72	196.72	196.72	174.375	348.750	174.375
$P_{G2}(MW)$	36.92	44,8422	20,6688	63,6644	11,4018	44,4032	32.2938	50.3236	32.2938
$P_{G3}(MW)$	27.27	97,1925	99,7271	67,2399	52,9569	64,2778	66.0399	107.2136	66.0399
$P_{G6}(MW)$	0	48,2234	73,5881	21,6094	75,4099	62,7109	35.8552	93.1721	35.8552
$P_{G8}(MW)$	7.08	57,5259	52,875	99,8268	92,3184	88,8958	52.5569	119.3700	52.5569
$V_{G1}(pu)$	1.1	1,058	0,99756	1,0398	1,0302	1,00312	0.7738	1.5457	0.7738
$V_{G2}(pu)$	1,081	1,0682	0,98932	1,05	1,0262	0,99368	0.7769	1.5440	0.7769
$V_{G3}(pu)$	1,054	1,0922	0,99171	1,0558	0,993	0,98076	0.7849	1.5330	0.7849
$V_{G6}(pu)$	1,079	0,9897	0,99523	0,9838	1,0347	1,04662	0.7422	1.5355	0.7422
$V_{G8}(pu)$	1,069	1,006	1,07475	0,98	0,9868	1,08277	0.7652	1.5378	0.7652
$T_{1(4-7)}$	0,978	1,0202	1,08876	1,0232	0,9901	0,94892	0.7830	1.4796	0.7830
$T_{1(4-9)}$	0,969	1,0625	0,95943	0,944	0,9533	0,92497	0.7415	1.4704	0.7415
$T_{1(5-6)}$	0,932	1,0153	0,9698	1,094	0,9976	1,00943	0.7698	1.5112	0.7698
$Qc1$	19	9,2483	6,7702	0,0736	19,679	8,5187	4.0230	18.7230	4.0230
$Qc2$	19	7,4666	2,6566	2,2348	0,4171	0,9504	3.0895	4.4170	3.0895
Perte (MW)	2.71	1.72	1.56	1.45	1.62	1.39			
$\sum P_g(Mw)$	261.23	480,284	479,359	484,8405	464,587	492,7877			

TABLEAU 4.3 – Les résultats obtenues par l’algorithme de K-means dans les cinq propositions

Les résultats obtenus sont tous dans les limites spécifiées, ce qui indique que l’algorithme K-means fonctionne correctement. L’algorithme K-means a réussi à organiser les cinq propositions et à calculer la meilleure valeur.

Les propositions et les résultats de l’écoulement de puissance optimal ont été correctement organisés en deux groupes distincts par l’algorithme K-means.

Les valeurs de puissance active dans le groupe G1 semblent généralement plus élevées que dans le groupe G2, indiquant une meilleure performance en termes de puissance active

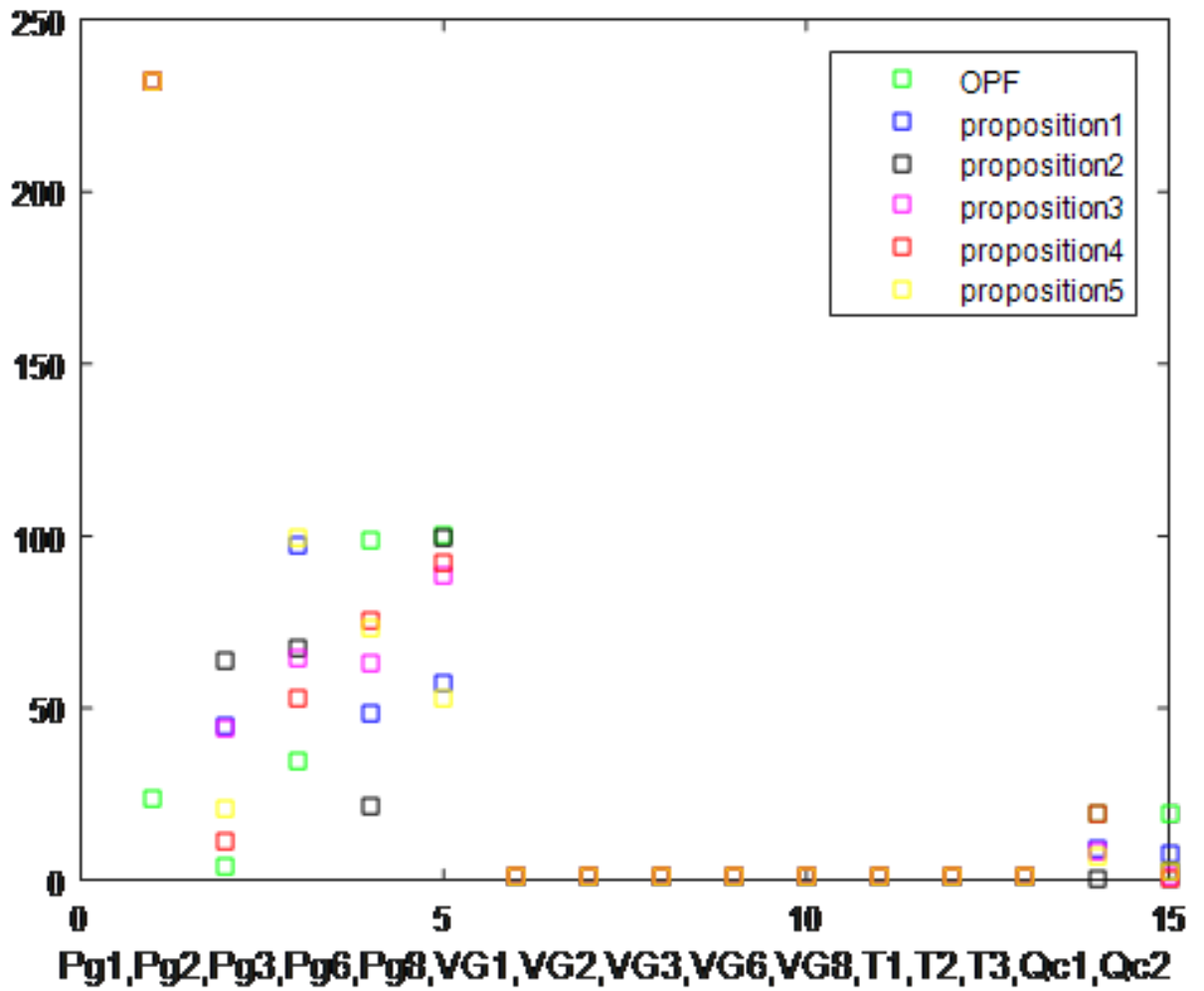


FIGURE 4.13 – Les données des propositions avec OPF

La figure représente les données que nous avons entrées dans le programme K-means, comprenant les variables de contrôle (P_G , V_G , T , Q_C). Chaque proposition de l'algorithme MTLA et l'écoulement de puissance optimal (OPF) sont affichées avec une couleur différente pour une meilleure visualisation.

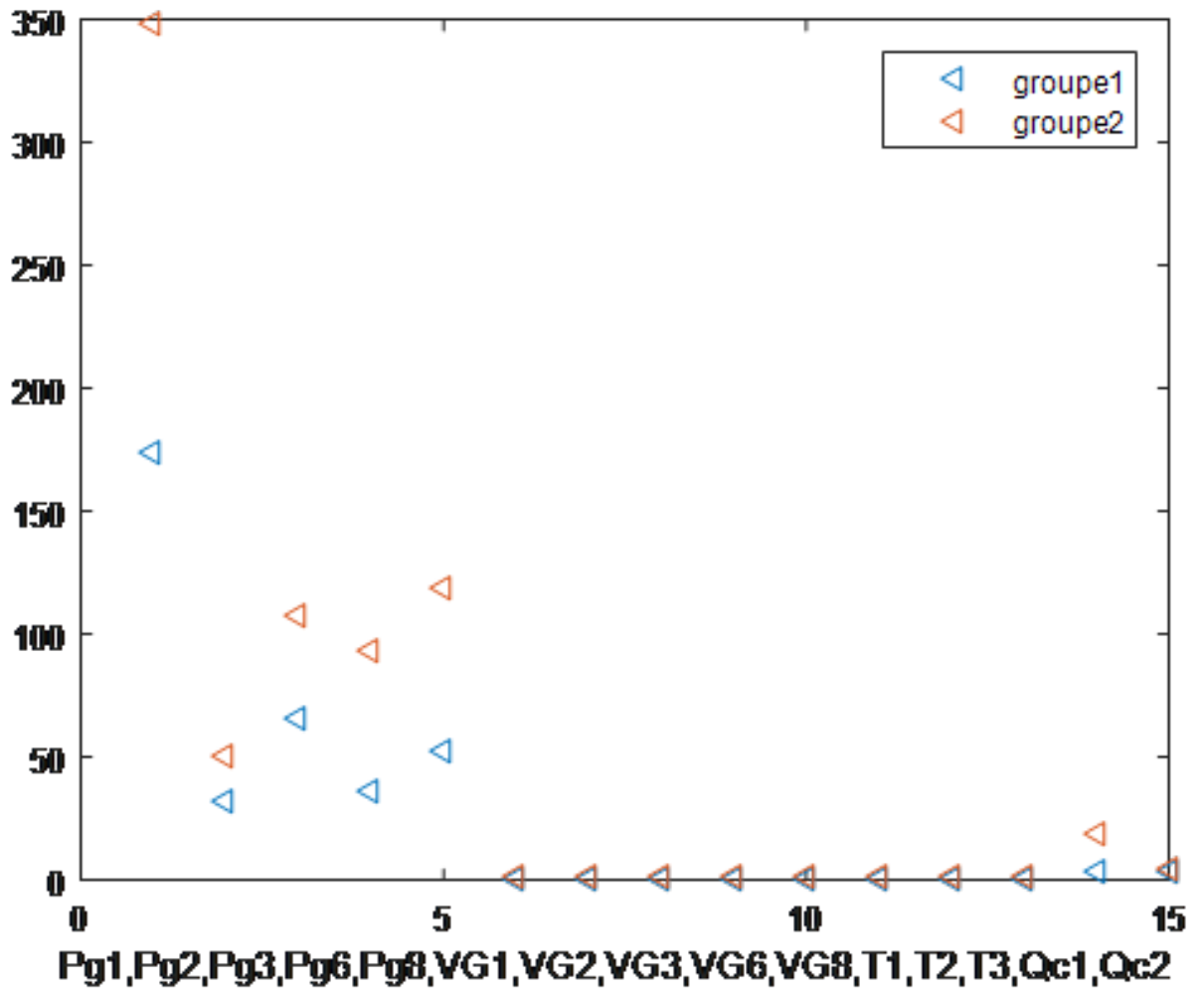


FIGURE 4.14 – Présentation des groupes

C'est la deuxième étape, où deux groupes ont été formés après le calcul. Les données représentées dans la figure 4.13 ont été assignées à l'un des deux groupes en fonction de la distance qui les sépare

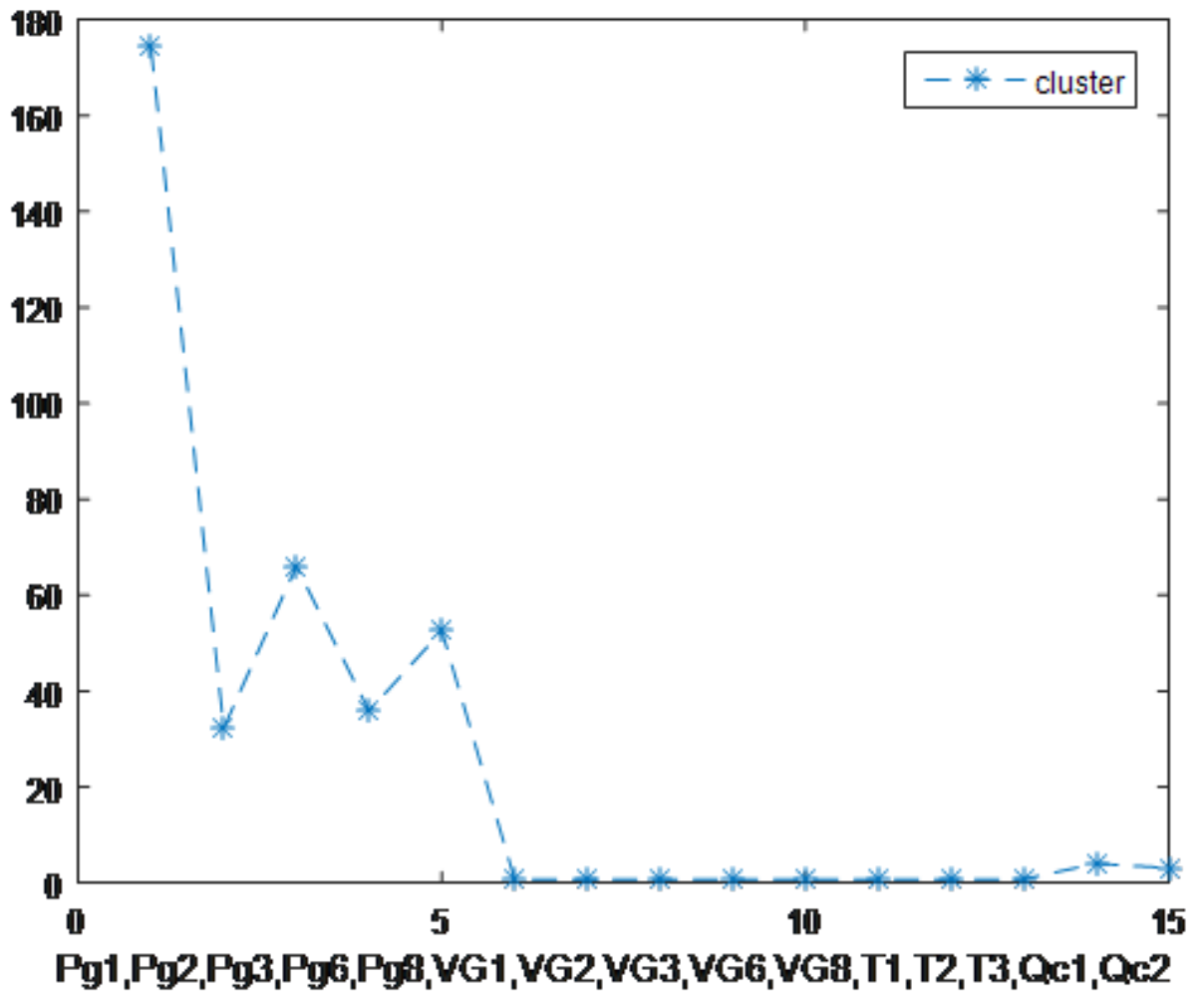


FIGURE 4.15 – présentation des groupes

La dernière étape consiste à former un cluster, où le minimum est choisi parmi les deux groupes.

4.6 Conclusion

Dans le contexte de l'optimisation du réseau électrique, l'algorithme MTLA a été utilisé pour trouver les meilleurs paramètres. Cependant, les résultats obtenus ont montré le respect des limites inférieures et supérieure et la possibilité de l'amélioration des résultats obtenus. Pour surmonter ces limitations, nous avons suggéré l'utilisation de l'algorithme K-means pour regrouper et classer les données obtenues à partir de l'algorithme MTLA et de l'écoulement de puissance optimal (OPF).

L'algorithme K-means a permis de regrouper les propositions et les résultats de l'écoulement de puissance optimal (OPF) en fonction de leurs caractéristiques électriques. En

utilisant des techniques de clustering, nous avons pu identifier les groupes qui présentent des performances similaires et les distinguer des autres groupes.

Cela nous a permis de mieux comprendre les différentes caractéristiques des propositions et d'identifier les domaines dans lesquels des améliorations sont nécessaires. De plus, le processus de classification nous a permis de mieux évaluer les performances des propositions en fonction de critères spécifiques tels que la puissance active, la tension, la réactance, etc.

En conclusion, l'utilisation de l'algorithme K-means a permis de mieux organiser et classer les données obtenues à partir de l'algorithme MTLA et de l'écoulement de puissance optimal, ouvrant ainsi la voie à une analyse plus approfondie et à des améliorations ciblées dans le cadre de l'optimisation du réseau électrique.

Conclusion Générale

La mémoire présente une analyse approfondie du réseau électrique, en mettant l'accent sur la présentation générale, la modélisation des réseaux électriques et les problèmes de répartition et d'optimisation de puissance. Elle explore également les méthodes d'optimisation méta-heuristiques et l'algorithme de clustering K-Means. Enfin, elle propose une application numérique avec des résultats de simulation et leur interprétation.

Nous avons utilisé l'algorithme MTLA (Modified Teaching-Learning Algorithm) pour exécuter cinq propositions afin d'obtenir les meilleurs résultats possibles. Toutes ces propositions ont donné de bons résultats, car elles ont toutes convergé et leurs résultats se situaient dans les limites. Cependant, la meilleure de ces propositions était la cinquième.

Dans la fonction objective, nous avons travaillé sur les pertes d'énergie, qui ont un impact considérable sur la gestion optimale du réseau électrique. L'objectif principal était de réduire ces pertes afin d'améliorer la structure globale du réseau et garantir des valeurs électriques optimales.

Nous avons choisi de nous concentrer sur les pertes car elles ont une perspective plus pratique et concrète.

Après avoir obtenu les résultats des propositions, nous les avons classés et améliorés, et c'est le travail que nous avons décidé de réaliser avec l'algorithme K-means. Cet algorithme est capable de traiter de grandes quantités de données et de les regrouper en clusters, puis de choisir le cluster qui représente le meilleur résultat possible.

En conclusion, cette mémoire offre une analyse approfondie du réseau électrique, de sa modélisation et des problèmes d'optimisation associés. Elle présente également des méthodes d'optimisation méta-heuristiques et l'algorithme de clustering K-Means. L'application numérique démontre l'efficacité de ces approches dans l'optimisation de la répartition de puissance.

Bibliographie

- [1] S. Bouri, *Réseaux et Transport d'Electricité Cours*. 07 2021.
- [2] “Enfouissement des réseaux câblés..” http://yamachiche.ca/diaporama-enfouissement_cables/diaporama-enfouissement_cables.pdf. Accessed : 02 June 2023.
- [3] R. H. Miller and J. H. Malinowski, *Power system operation*. McGraw-Hill Education, 1994.
- [4] B. Berseneff, *Réglage de la tension dans les réseaux de distribution du futur*. Theses, Université de Grenoble, Dec. 2010.
- [5] M. Zellagui, *Étude des Protections des Réseaux Électriques Moyenne Tension (30 et 10 kV)*. PhD thesis, 07 2010.
- [6] C. Puret, “Les réseaux de distribution publique mt dans le monde,” *Cahiers Techniques de Merlin-Gérin*, no. 155, 1991.
- [7] A. Energie, “Une croissance importante et soutenue.” https://www.energy.gov.dz/Media/galerie/algerie_energie_nd_11_5d25f8bf7da8e.pdf. Accessed : 01 June 2023.
- [8] H. Lyazid and H. Khodir, “Calcul des paramètres et caractéristiques des lignes électriques triphasées,” *Mémoire de Master*, vol. 2, 2015.
- [9] B. Samir, *Technologies Des Équipements Electriques Des Postes HTB*. PhD thesis, 2017.
- [10] E. becherif lakhdar and H. amour, *Analyse de fonctionnement des sous-stations dans le réseau électrique :nbsp; cas de la sous station de Sidi Benhaoua*. PhD thesis, 2022.
- [11] C. Harel, *Machines électriques et essais de machines*. Ecole supérieure d'électricité, 1960.
- [12] B. Athmane, “cours modélisation et simulation des réseaux électriques.” https://elearning.univ-bejaia.dz/pluginfile.php/206818/mod_resource/content/0/Cours%20Mod%C3%A9lisation%20et%20Simulation%20des%20R%C3%A9seaux%20Electriques.pdf. Accessed : 02 June 2023.

-
- [13] S. Sayah, *Étude des Archaea halophiles extrêmes isolées d'environnements hypersalins algériens et caractérisation de leurs caroténoïdes*. PhD thesis, Université Ferhat Abbas-Setif, 2018.
- [14] S. M. BOUCHERIT Yassmine, “Analyse et amélioration de la stabilité des réseaux électriques sous l’environnement psat,”
- [15] D. DAS, “Electrical power systems.” http://blog.espol.edu.ec/econde/files/2012/08/Electrical-Power-Systems-D.Das_.pdf. Accessed : 02 June 2023.
- [16] P. Jeannin and J. Carpentier, “Réseaux de puissance : Méthodes de résolution des équations,” *Techniques de l’ingénieur. Génie électrique*, vol. 1, no. D1120, pp. D1120–1, 1994.
- [17] B. Stott and O. Alsac, “Fast decoupled load flow,” *IEEE transactions on power apparatus and systems*, no. 3, pp. 859–869, 1974.
- [18] J. Carpentier, “Contribution a l’étude du dispatching économique,” *Bulletin de la Société Française des électriciens*, vol. 3, no. 1, pp. 431–447, 1962.
- [19] A. Laïb, *Écoulement de Puissance Optimal Intelligent d’un Système de Puissance Multi-Sources*. PhD thesis, 2022.
- [20] N. Daryani, M. T. Hagh, and S. Teimourzadeh, “Adaptive group search optimization algorithm for multi-objective optimal power flow problem,” *Applied Soft Computing*, vol. 38, pp. 1012–1024, 2016.
- [21] A.-A. A. Mohamed, Y. S. Mohamed, A. A. El-Gaafary, and A. M. Hemeida, “Optimal power flow using moth swarm algorithm,” *Electric Power Systems Research*, vol. 142, pp. 190–206, 2017.
- [22] M. A. Abido, “Optimal power flow using particle swarm optimization,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 24, no. 7, pp. 563–571, 2002.
- [23] Z. et Zarouga, “Répartition optimale des puissances dans un réseau électrique par l’intelligence artificielle,” 2021.
- [24] S. Mahdi and F. Boutekkouk, “Optimisation multiobjectif et son application aux problèmes bioinformatique,” 2021.
- [25] H. Bara, *Développement et implémentation d’une méthode hybride pour la résolution du problème d’assignation quadratique*. PhD thesis, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M’SILA FACULTE DES MATHEMATIQUES ET DE L . . . , 2019.
- [26] H. Allaoua, “Support de cours d’optimisation combinatoire focus sur les méthodes de résolution approchée.” <http://dspace.univ-msila.dz:8080/xmlui/handle/123456789/3885>. Accessed : 02 June 2023.

-
- [27] F. Sadi, A. Soukhal, and B. Mille, “Méthodes approchées pour la résolution d’un problème d’ordonnancement avec travaux interférants,”
- [28] A. Gherboudj, “Méthodes de résolution de problèmes difficiles académiques,” *Université de Constantine2*, 2013.
- [29] E. A. Feigenbaum, J. Feldman, *et al.*, *Computers and thought*, vol. 7. New York McGraw-Hill, 1963.
- [30] S. BENAMARA and A. HAMDANI, *Résolution d’un problème d’ordonnancement dans un atelier flexible de production avec une méthode hybride*. PhD thesis.
- [31] A. Ghoumari, *Métaheuristiques adaptatives d’optimisation continue basées sur des méthodes d’apprentissage*. PhD thesis, Université Paris-Est, 2018.
- [32] R. Rao, V. Savsani, and D. Vakharia, “Teaching–learning-based optimization : A novel method for constrained mechanical design optimization problems,” *Computer-Aided Design*, vol. 43, no. 3, pp. 303–315, 2011.
- [33] R. V. Rao, V. J. Savsani, and D. Vakharia, “Teaching–learning-based optimization : a novel method for constrained mechanical design optimization problems,” *Computer-aided design*, vol. 43, no. 3, pp. 303–315, 2011.
- [34] K. Wagstaff, C. Cardie, S. Rogers, S. Schrödl, *et al.*, “Constrained k-means clustering with background knowledge,” in *Icml*, vol. 1, pp. 577–584, 2001.