RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ YAHYA FARES DE MEDEA

جامعة يحيى فارس المدية

FACULTÉ DE TECHNOLOGIE

كلية التكنولوجيا



THÈSE DE **MASTER**

En : Electrotechnique

Spécialité : Réseaux Electriques

Thème

Calcul D'écoulement De Puissance Par La Méthode De *Baran Distflow*

Présenté par :

- **ETTOUHARI Aya**
- **MESSILI Ibtihal**

Encadré par :

M. **SEBAA** Karim **Professeur** à UNIV-MEDEA

Année universitaire 2023/2024

DEDICACE

À ma chère famille,

Vous êtes ma source de soutien, d'amour et de bonheur. Ce mémoire est dédié à chacun de vous, pour votre constante encouragement, vos précieux conseils et votre présence inconditionnelle. Vous êtes mes piliers et ma force. Merci d'être toujours là pour moi.

À mes chers amis,

Votre soutien, votre encouragement et votre présence ont rendu ce parcours plus joyeux et significatif. Merci d'avoir été mes compagnons de route, de partager mes rires et mes larmes, et de toujours croire en moi.

DEDICACE

J'ai l'honneur de dédier ce modeste travail :

À mes très chers parents pour leur patience, leur soutien, leur amour.

À mes très chères sœurs Samah et Basma.

À mon frère Mohamed.

À mes fidèles amies.

À toute ma famille.

Aya.

Remerciement

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu tout puissant qui nous a donné la santé, le courage et la patience pour mener à bien ce modeste travail.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon promoteur Mr SEBAA KARIM, je le remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé conseillé.

J'adresse mes sincères remercîments à tous mes professeurs et toutes les personnes qui m'ont enseigné durant mon parcours.

Un grand merci à Mme BOUKIRAT SAMIA pour ses conseils, son aide et pour son temps qui nous l'a consacré afin de réaliser se mémoire de fin d'étude.

A tous ces intervenants je présente mes remercîments, mon respect et ma gratitude.

ملخص

في سياق دراسة تدفق الطاقة في الشبكات الكهربائية الشعاعية حيث يتم حساب ثلاث كميات أساسية وهي الطاقة النشطة والطاقة اللاشعاعية والجهد. قمنا باختيار استخدام طريقة باران تدفق التوزيع التي تتناول هذه المسألة في الشبكات الكهربائية الشعاعية.
هذه الطريقة، التي طورها باران، هي نهج تكراري لحل معادلات توازن الطاقة في شبكة كهربائية معينة. لغرض المقارنة، يتم استخدام ثلاث تقنيات لحساب المشتقات: وظيفة (ْآف.سلوفْ) المدمجة في برنامج المطلاب، حساب المشتقات الجاكوبية تحليلياًا، واستخدام التقنيات العددية. وأخيراً، يتم تطبيق هذه التقنيات لاختبار شبكات التوزيع مثل شبكات ١٢- عقدة و١٥- عقدة و٣٣- عقدة.

الكلمات المفتاحية: الشبكات الشعاعية، طريقة تدفق باران، النهج التكراري.

Abstract

In the context of the study of the power flow in radial networks where the three essential quantities to be calculated are active power, reactive power, and voltage. We have chosen to use the Baran Distflow method which addresses this issue in radial electrical networks.
This method, developed by Baran, is an iterative approach to solving the power balance equations in a given electrical network. For comparison purposes, three derivative calculation techniques are used : the fsolve function integrated in MATLAB, calculating Jacobian derivatives analytically, and using numerical techniques. Finally, these techniques are applied to test distribution networks such as the 12-node, 15-node, and 33-node networks.

Keywords: Radial Networks, Baran's DistFlow Method, Iterative Approach.

Résumé

Dans le cadre de l'etude de l'écoulement de puissance dans des réseaux radiaux où les trois grandeurs essentielles suivantes doivent être calculées : la puissance active, la puissance réactive et la tension. Nous avons choisi d'utiliser la méthode de Baran Distflow qui traite ce problème dans les réseaux électriques radiaux.
Cette méthode, développée par Baran, est une approche itérative pour la résolution des équations d'équilibre de puissance dans un réseau électrique donné. Pour des fins de comparaison, trois techniques de calcul de dérivées sont utilisées à savoir : la fonction fsolve intégrée dans MATLAB, le calcul des dérivées de Jacobien de manière analytique puis par la technique numérique. Enfin, ces techniques sont appliquées sur les réseaux de distribution testes comme les réseaux 12 nœuds, 15 nœuds et 33 nœuds.

Mots Clée : Réseaux radiaux, Méthode de Baran distflow, Approche itérative.

Table des matières

Table des figures **i**

Liste des tableaux **ii**

Introduction Générale **1**

1 Généralités sur les réseaux électriques **2**

1.1 Introduction . . . 3
1.2 Objectif générale : . . . 3
1.3 Historique des réseaux électriques : . . . 3
1.4 Réseaux électrique : . . . 4
1.4.1 Définition : . . . 4
1.4.2 Principe de fonctionnement d'un réseau électrique : . . . 4
1.4.3 Organisation d'un réseau électrique : . . . 5
1.5 Réseaux de transport et d'interconnexion : . . . 6
1.5.1 Réseaux de répartition : . . . 7
1.5.2 Réseaux de distribution : . . . 7
1.6 Topologie des réseaux électriques : . . . 8
1.6.1 Réseau maillé : . . . 8
1.6.2 Réseau radial : . . . 8
1.6.3 Réseau en boucle : . . . 9
1.6.4 Réseau arborescent : . . . 10
1.7 Problème d'optimisation de la topologie des réseaux : . . . 10
1.7.1 Définition : . . . 11
1.7.2 Comparaison entre les lignes aériennes et les câbles : . . . 11
1.7.3 Ligne aérienne : . . . 12
1.7.4 Linges souterrains : . . . 12
1.8 Principes fondateurs des réseaux électriques : . . . 13
1.8.1 Transport en haute tension, facteur de puissance quasi unitaire : . . . 13

1.8.2 Utilisation du régime alternatif sinusoïdal : . . . 14
1.8.3 Choix entre un système monophasé et triphasé : . . . 15
1.9 Modélisation des composants du réseau électrique : . . . 16
1.9.1 générateur : . . . 16
1.9.2 Lignes de transmission : . . . 16
1.10 Charge électrique : . . . 17
1.10.1 Éléments shunts : . . . 17
1.10.2 Transformateur : . . . 18
1.11 L'effet de réseau de transport sur la qualité du service : . . . 18
1.12 Conclusion . . . 19

2 Écoulement de puissance 20
2.1 Introduction . . . 21
2.2 Objectifs : . . . 21
2.3 But d'écoulement de puissance : . . . 21
2.4 Classification des nœuds (Jeux de barres) . . . 21
2.4.1 LES JEUX DE BARRES DE CONTROLE (CONTROL BUS) . . . 22
2.4.2 LES JEUX DE BARRES DE CHARGE (LOAD BUS) . . . 22
2.4.3 LE JEU D E BARRES D E REFERENCE (SLACK BUS) . . . 23
2.5 Écoulement de puissance : . . . 23
2.6 Concept général de l'écoulement de puissance : . . . 23
2.7 Les domaines d'applications : . . . 24
2.7.1 Minimisation du coût de combustible : . . . 24
2.7.2 Minimisation des pertes : . . . 24
2.7.3 Amélioration du profil de tension : . . . 24
2.7.4 Maximisation de la puissance transmissible : . . . 24
2.8 Gestion des réseaux de distribution : . . . 25
2.8.1 Les pertes d'énergie dans le réseau de distribution : . . . 25
2.9 Formulation des équations de l'écoulement de puissance : . . . 26
2.10 Modélisation des branches et des charges : . . . 28
2.10.1 Modélisation des branches : . . . 28
2.10.2 Modélisation des charges : . . . 28
2.10.3 Équations de base : . . . 29
2.11 Résolution des équations d'écoulement des puissances en AC : . . . 29
2.11.1 Méthode De Gauss- Seidal : . . . 30
2.11.2 Méthode de Newton-Raphson : . . . 30
2.11.3 Méthode Découplée Rapide : . . . 32

2.12 Conclusion 34

3 Le principe de la méthode de *Baran Distflow* 35

3.1 Introduction 36
3.2 Objectif 36
3.3 But de la méthode de Baran Distflow 36
3.4 Les avantages de la méthode de Baran 36
3.5 Les limites de la méthode de Baran Distflow 37
3.6 Méthode de Baran 38
3.6.1 Les équations Distflow (Distflow Equations) 38
3.7 Newthon -Raphson 39
3.7.1 Algorithme de Newthon-Raphson 39
3.7.2 Méthode de Newton-Raphson (scalaire) 39
3.7.3 Exemple de l'application de la méthode de Newthon-Raphson 39
3.7.4 Interprétation sur Newton-Raphson 41
3.7.5 Newthon-Raphson à plusieurs variables 41
3.8 Conclusion 44

4 Simulation et analyse des résultats 45

4.1 Introduction 46
4.2 But général : 46
4.3 Présentation des réseaux : 46
4.3.1 Réseau de 12 nœuds : 46
4.3.2 Réseau de 15 nœuds : 47
4.3.3 Réseau de 33 nœuds : 48
4.4 Partie De Simulation : 50
4.4.1 Résultats de simulation : 51
4.5 Comparaison entre les trois techniques : 57
4.6 Conclusion : 57

Bibliographie 59

Table des figures

1.1 Exemple d'un système de transport 5
1.2 Exemple d'un système de transport 5
1.3 Organisation d'un réseau électrique 6
1.4 Réseau maillé 8
1.5 Réseau radial 9
1.6 Réseau boucle 9
1.7 Réseau arborescent 10
1.8 les lignes aériennes 12
1.9 Transport simplifié de l'énergie électrique 14
1.10 Modèle d'un générateur 16
1.11 Schéma d'une ligne de transmission. 16
1.12 la charge électrique 17
1.13 Éléments shunts 17
1.14 Transformateur électrique 18

2.1 Modèle d'une ligne de transmission 28

3.1 Schéma unifilaire d'un réseau radial. 38
3.2 Graphique de la fonction 40

4.1 Diagramme unifilaire du système radial à 12 nœuds 46
4.2 Diagramme unifilaire du système radial à 15 nœuds 47
4.3 Diagramme unifilaire du système radial à 33 nœuds 48

Liste des tableaux

1.1 Avantages et inconvénients des lignes aériennes. 12
1.2 Avantages et inconvénients des lignes souterraines. 13
1.3 Avantages et inconvénients des régimes alternatifs dans le transport de l'énergie électrique. 14
1.4 Avantages et inconvénients des régimes continus dans le transport de l'énergie électrique 15

2.1 Les types de nœuds des réseaux éclectiques. 22

3.1 Tableau des données 40

4.1 Données pour le système radial à 12 nœuds. 47
4.2 Données pour le système radial à 15 nœuds. 48
4.3 Données pour le système radial à 33 nœuds. 49
4.4 Résultats de système de 12 nœuds 54
4.5 Résultats de système de 15 nœuds 55
4.6 Résultats de système de 33 nœuds 56
4.7 Temps de simulation de réseau 12 nœuds. 57
4.8 Temps de simulation de réseau 15 nœuds. 57

Symboles

Liste des Symboles

P_i, Q_i sont respectivement les puissances active et réactive au jeu de barres i.

P_{Gi}, Q_{Gi} sont respectivement les puissances active et réactive générées.

P_{Di}, Q_{Di} Sont respectivement les puissances active et réactive demandées au jeu de barres i.

P puissance active de la ligne.

V, I tension et courant de la ligne.

I vecteur complexe des courants nodaux injectée dans le réseau.

Y matrice complexe des admittances nodales complexes.

V vecteur complexe des tensions nodales.

V_i Amplitude de la tension quadratique au bus i.

V_j Amplitude de la tension quadratique au bus j.

r_{ij} Résistance de la ligne du bus i à j.

x_{ij} Réactance de la ligne du bus i à j.

p_i, p_j Puissance active au nœud i et au nœud j.

q_i, q_j Puissance réactive au nœud i et au nœud j.

P_{oi}, Q_{oi} sont les puissances actives et réactives nominales.

V_o la tension nominale.

P_i, Q_i sont la puissance active et réactive de la charge au noeud « i » pour une tension égale à V_i.

S_i^* Le conjugué de la puissance apparente injectée au nœud i.

V_i^* Le conjugué de la tension au nœud i.

I_i^* Le conjugué de courant au nœud i.

θ_k La phase de la tension au jeu de barres k.

θ_{ik} La phase de l'élément ik.

$\Delta P, \Delta Q$ Représentent respectivement les écarts entre les puissances actives spécifiées et calculées et les écarts entre les puissances réactives spécifiées et calculées.

$\Delta\theta, \Delta V$ Représentent respectivement les écarts entre les angles spécifiés et calculés et les écarts entre les tensions spécifiées et calculées.

J La matrice Jacobienne.

r_i, x_i Résistance et réactance de la branche i.

P_i, Q_i Puissances active et réactive écoulées dans la branche i.

V_i Module de la tension au nœud de départ de la branche i.

P_{Li}, Q_{Li} Charges active et réactive écoulées dans la branche.

Introduction Générale

Les réseaux de distribution électrique constituent une composante essentielle des systèmes énergétiques modernes, assurant la livraison fiable et efficace de l'énergie électrique des sources de production aux consommateurs finaux. À mesure que la demande en électricité augmente et que les infrastructures vieillissent, les défis liés aux pertes de puissance et d'énergie deviennent de plus en plus préoccupants. Ces pertes non seulement réduisent l'efficacité des réseaux, mais entraînent également des coûts économiques et environnementaux significatifs. [1]

Afin de répondre à ces défis, des techniques avancées d'écoulement de puissance ont été développées pour modéliser et analyser la distribution de l'électricité dans les réseaux. Ces techniques permettent de mieux comprendre les dynamiques du réseau et d'optimiser son fonctionnement. Dans le cadre de ce mémoire, nous nous pencherons sur ces nouvelles méthodes de calcul d'écoulement de puissance, en particulier celles applicables aux réseaux radiaux.

Notre étude débute par une présentation générale des réseaux électriques, couvrant les concepts de base ainsi que les différentes structures et topologies qui les caractérisent. Nous approfondirons ensuite le sujet de l'écoulement de puissance, en examinant les méthodes couramment utilisées pour analyser la manière dont l'électricité circule dans un réseau.

Nous porterons une attention particulière à la méthode de Baran, largement reconnue pour son efficacité dans le calcul de l'écoulement de puissance dans les réseaux radiaux. Basée sur les équations Distflow, cette méthode permet de déterminer les grandeurs essentielles telles que la puissance active (P), la puissance réactive (Q) et la tension (V). [2]

Dans ce travail, nous mettrons en œuvre trois techniques de calcul pour résoudre ces équations : l'utilisation de la fonction fsolve intégrée dans MATLAB, la méthode de Newton-Raphson avec calcul des dérivées jacobienne par des techniques analytiques et numériques. Ces techniques seront appliquées sur des réseaux test comprenant 12, 15 et 33 nœuds pour identifier la méthode permettant d'obtenir des résultats de manière plus rapide.

Chapitre 1

Généralités sur les réseaux électriques

1.1 Introduction

L'énergie électrique est largement utilisée dans divers secteurs tels que l'industrie, L'électrotechnique, qui englobe la génération, le transport, la distribution et l'utilisation de cette énergie, est une discipline clé dans ce domaine. Les réseaux électriques sont parmi les systèmes les plus complexes en raison du grand nombre et de la diversité des composants impliqués, ainsi que de leur ampleur physique.
Dans ce chapitre, on va réviser brièvement d'historique des réseaux électriques aussi on va présenter les différents types de réseaux (transport et distribution) et aux rappels de quelques notions de base.et on va explorer les différentes topologies de réseau électrique qui influent sur leur efficacité et leur fiabilité.
Enfin, on va étudier aussi les défauts qui peuvent survenir dans les réseaux électriques et les différentes formes qu'ils peuvent prendre.

1.2 Objectif générale :

L'objectif général de ce chapitre est de fournir une vue d'ensemble complète des réseaux électriques, en mettant en lumière leur fonctionnement, leur topologie et les défauts possibles.

1.3 Historique des réseaux électriques :

Le concept de réseaux électriques a été introduit par Thomas Edison en 1878 qui chercher à générer de l'énergie électrique et à la distribuer par un réseau d'éclairage. L'industrie de réseau électrique a commencé réellement en 1882 où Thomas Edison inaugurait sa centrale Pearl Street à New York. Cette première centrale fonctionne avec des machines à vapeur qui entraînent des génératrices à courant continu pour fournir une puissance électrique de 30 KW à une tension de 110 V pour l'éclairage (avec lampes incandescentes) de 59 maisons. Et depuis le réseau électrique ne cesse pas de se développer : [3]

- • 1882 : Installation d'un générateur CC entraîné par roue hydraulique à Appleton, Wisconsin et installation de la première ligne de transport (2400 VCC, 59 KM) en Allemagne.
- • 1884 : Frank J. Sprague produit des moteurs CC pour les utiliser dans les réseaux CC d'Edison et développement des systèmes CC à trois fils 220 V.
- • 1885 : Développement par William Stanley d'un transformateur pratique permettant le transport à courant alternatif à des tensions plus élevées et à plus grandes distances.

— • 1888 : Nikola Tesla présente un article sur les moteurs d'induction et synchrones biphasés mettant en évidence les avantages des systèmes polyphasés par rapport au monophasé.

— • 1889 : Installation de la première ligne monophasée au E.U à Oregon (4 KV, 21 Km).

— • 1891 : Installation de la première ligne triphasée en Allemagne (12 KV, 179 Km).

— • 1893 : Installation de la première ligne triphasée aux E.U en Californie (2.3 KV, 12 Km).

1.4 Réseaux électrique :

1.4.1 Définition :

Un réseau électrique est un ensemble d'outils destiné à produire, transporter, distribuer l'énergie électrique et veiller sur la qualité de cette énergie, notamment la continuité de service et la qualité de la tension. L'architecture ou le design du réseau est un facteur clé pour assurer ces objectifs. Cette architecture peut être divisée en deux parties : D'une part, l'architecture du poste, et de l'autre part l'architecture de la distribution. [4]

1.4.2 Principe de fonctionnement d'un réseau électrique :

Pour mieux comprendre le principe de fonctionnement, considérons le système de transport à deux barres de la figure 1.1. Les barres sont alimentées par des unités de production qui génèrent respectivement les puissances SG1, et SG2. Les demandes se définissent à chaque barre comme étant SD1 et SD2. Les deux barres sont connectées par une ligne de transmission Fig.1.2. Celle-ci est représentée par son modèle en π caractérisé par une impédance série Z, et deux admittances shunt (Ysh_i) . Les deux tensions de barres sont symbolisées respectivement par V1 et V2. Dans la formulation du modèle, on combine les puissances générées et demandées à chaque barre pour obtenir une puissance nette. Si définie comme la différence entre la production et la consommation de puissance de la barre i en question. Cette puissance nette est considérée comme injectée dans la barre par une "source de puissance de barre" dont le symbole est introduit dans la Fig.1.1. [4]



Figure 1.1: Exemple d'un système de transport

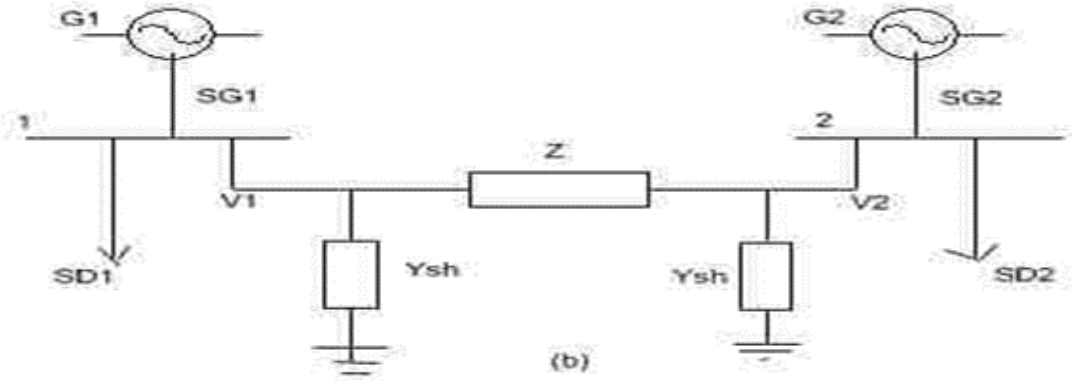


Figure 1.2: Exemple d'un système de transport

1.4.3 Organisation d'un réseau électrique :

Les réseaux électriques ont pour fonction d'interconnecter les centres de production tels que les centrales hydrauliques, thermiques...etc. avec les centres de consommation (villes, usines...etc.). L'énergie électrique est transportée en haute tension et/ou très haute tension pour limiter les pertes à effet Joule (les pertes étant proportionnelles au carré de l'intensité du courant électrique), puis progressivement abaissées au niveau de la tension de l'utilisateur final. Les réseaux électriques sont constitués par l'ensemble des appareils destinés à la production, au transport, à la distribution et à l'utilisation de l'électricité depuis les centrales de génération jusqu'aux maisons de campagne les plus éloignées figure :**1.3**.

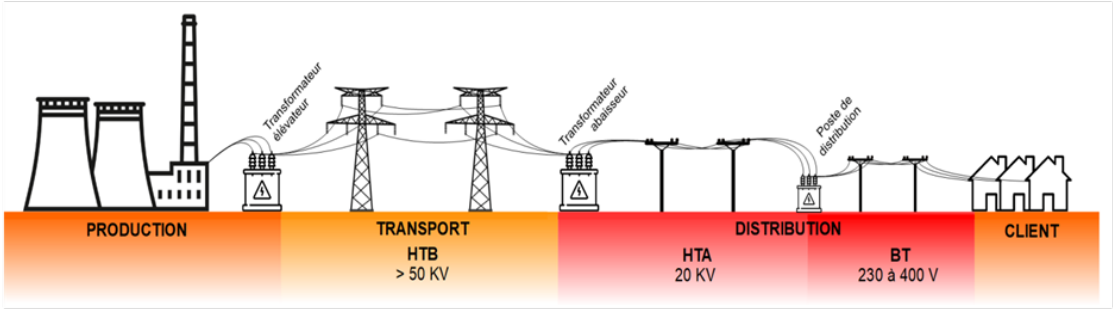


Figure 1.3: Organisation d'un réseau électrique

Pour que l'énergie électrique soit utilisable, le réseau doit satisfaire les exigences suivantes :

— • Assurer au client la puissance dont il a besoin.

— • Fournir une tension stable dont les variations n'excèdent pas $\pm 10\%$ de la tension nominale.

— • Fournir une fréquence stable dont les variations n'excèdent pas $\pm 0,1\%$Hz.

— • Fournir l'énergie à un prix acceptable.

— • Maintenir les normes de sécurité rigoureuses.

— • Veuillez à la protection de l'environnement.

Comme on montre sur la figure **1.3**. Il est composé de trois parties : la production, le transport , la répartition et la distribution. [5]

1.5 Réseaux de transport et d'interconnexion :

Les réseaux de transport à très haute tension (THT) transportent l'énergie des gros centres de production vers les régions consommatrices (400 kV et 225 kV). Ces réseaux sont souvent interconnectés, réalisant la mise en commun de l'ensemble des moyens de production à disposition de tous les consommateurs. Dans ce cadre, les réseaux de transport et d'interconnexion ont principalement les caractéristiques suivantes : [6]

▷ Permettre à une exploitation économique.

▷ Permettre et sûre des moyens de production en assurant une compensation des différents aléas.

▷ La tension est 150 kV, 220 kV et dernièrement 420 kV.

▷ Neutre directement mis à la terre.

▷ Réseau maillé.

1.5.1 Réseaux de répartition :

Les réseaux de répartition à haute tension (HT) assurent, à l'échelle régionale, la desserte des points de livraison à la distribution. Leur tension est supérieure à 63 kV selon les régions.

Ces réseaux sont, en grande part, constitués de lignes aériennes, dont chacune peut transiter plus de 60 MVA sur des distances de quelques dizaines de kilomètres. Leur structure est, soit en boucle fermée, soit le plus souvent en boucle ouverte, mais peut aussi se terminer en antenne au niveau de certains postes de transformation. En zone urbaine dense, ces réseaux peuvent être souterrains sur des longueurs n'excédant pas quelques kilomètres. [7]

Ces réseaux alimentent d'une part les réseaux de distribution à travers des postes de transformation HT/MT et, d'autre part, les utilisateurs industriels dont la taille (supérieure à 60 MVA) nécessite un raccordement à cette tension, (La tension est 90 kV ou 63 kV), Neutre à la terre par réactance ou transformateur de point neutre.

1. Limitation courant neutre à 1500 A pour les 90 kV.
2. Limitation courant neutre à 1000 A pour les 63 kV.

(Réseaux en boucle ouverte ou fermée).

1.5.2 Réseaux de distribution :

Les réseaux de distribution sont les réseaux d'alimentation de l'ensemble de la clientèle, à l'exception de quelques gros clients industriels alimentes directement par les réseaux THT et HT.

Les réseaux de distribution commencent à partir des tensions inférieures à 63 kV et des postes de transformation HTB/HTA avec l'aide des lignes ou des câbles moyenne tension jusqu'aux postes de répartition HTA/HTA. [7]

Les caractéristiques de ces réseaux sont succinctement résumées ci-dessous :

A. Pour les réseaux de distribution à moyenne tension HTA :

→ 10 et 30 kV le plus répandu.

→ Neutre à la terre par une résistance.

→ Limitation du courant neutre à 300 A pour les réseaux aériens.

→ Limitation du courant neutre à 1000 A pour les réseaux souterrains.

→ Réseaux souterrains en boucle ouverte.

B. Pour les réseaux de distribution à basse tension BTA :

→ 230 / 400 V,

→ Neutre directement à la terre.

→ Réseaux de type radial, maillé et bouclé.

1.6 Topologie des réseaux électriques :

Les différentes topologies varient en fonction du type de réseau. Elles sont déterminées par plusieurs facteurs tels que le niveau de fiabilité recherché, la flexibilité et la maintenance, ainsi que les coûts d'investissement et d'exploitation. [8]

1.6.1 Réseau maillé :

Sont des réseaux où toutes les lignes sont bouclées. Cette structure figure 1.4 nécessite que tous les tronçons de lignes soient capables de surcharges permanentes, et qu'il soit muni, a leurs deux extrémités, d'appareils de coupure. On obtient ainsi la meilleure sécurité, mais au prix le plus élevé.

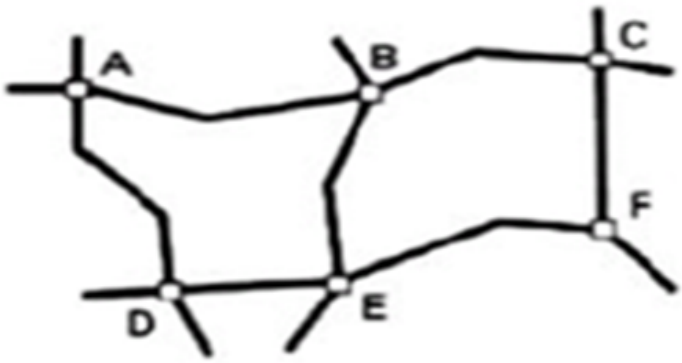


Figure 1.4: Réseau maillé

1.6.2 Réseau radial :

Il est constitué de plusieurs artères 1.4. En pratique si l'on regarde une carte de tel réseau, on aperçoit des points communs. Ces points sont toujours placés un appareil de coupure, ouvert en exploitation normale. Cette disposition, permet en cas d'incident sur une artère de reprendre l'alimentation de certaines dérivations par les artères voisines.

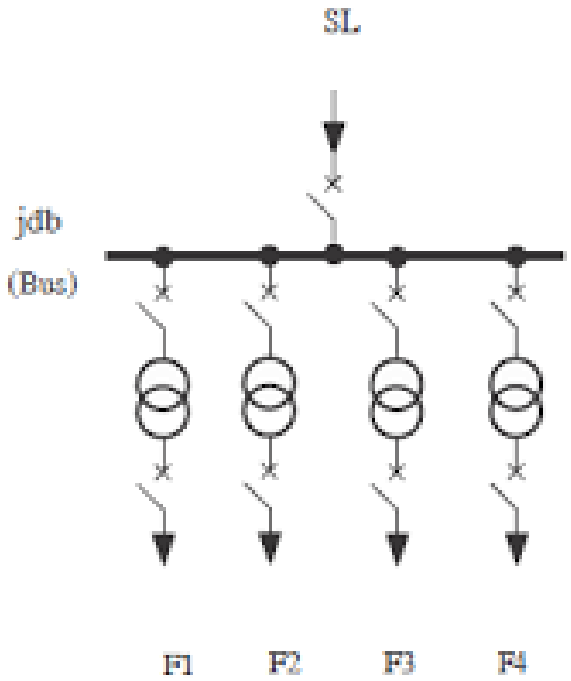


Figure 1.5: Réseau radial

1.6.3 Réseau en boucle :

L'assemblage en boucle des lignes permet d'alimenté à la fois par plusieurs source (en général 2 ou 3 rarement plus) ainsi que de mettre hors circuit une partie de la ligne défectueuse grâce à ses points de séparation. L'existence de plusieurs sources en parallèle figure1.6 augmente la sécurité d'alimentation, en cas d'avarie de l'une d'elles (transformateur) ou sur une boucle.

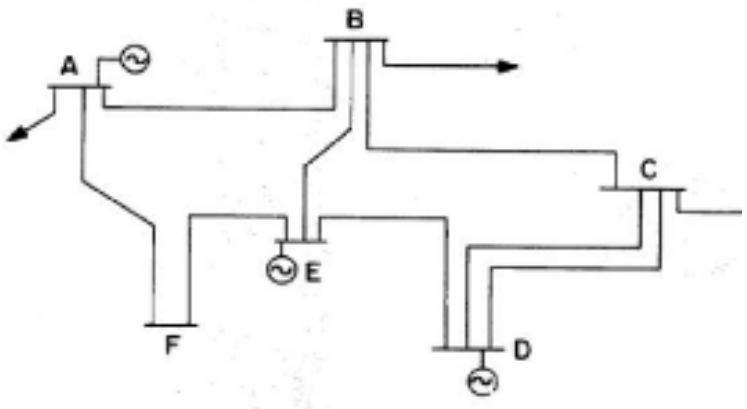


Figure 1.6: Réseau boucle

1.6.4 Réseau arborescent :

Le réseau arborescent c'est un type de réseau dans lequel les éléments du réseau sont connectés de manière à former une structure en forme d'arbre.

Dans ce type de réseau, il y a un nœud central à partir duquel des branches se ramifient pour se connecter à d'autres nœuds ou sous-réseaux. Chaque nœud peut à son tour se ramifier pour créer une structure en forme d'arbre avec plusieurs niveaux de hiérarchie. Les réseaux arborescents sont souvent utilisés dans les systèmes de télécommunication, les réseaux informatiques et les réseaux électriques pour organiser et gérer la distribution des données, des signaux ou de l'électricité de manière efficace.

Cette structure hiérarchique permet de faciliter la gestion et la maintenance du réseau, ainsi que d'assurer une certaine redondance pour améliorer la fiabilité et la résilience du système en cas de panne ou de dysfonctionnement sur une partie du réseau. [8]

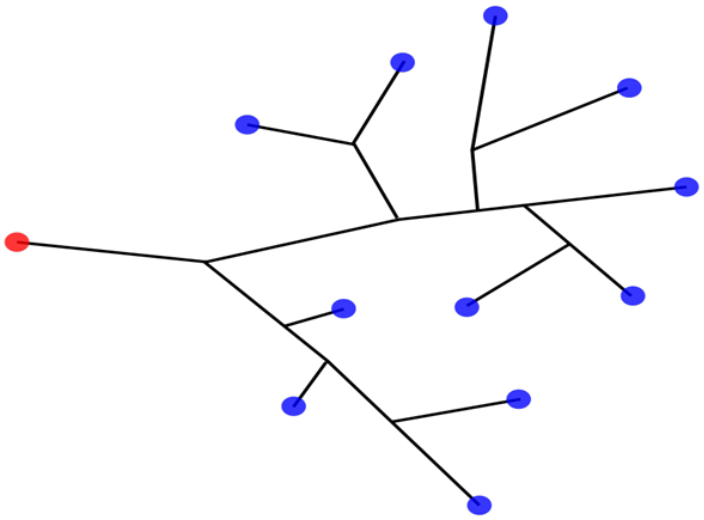


Figure 1.7: Réseau arborescent

1.7 Problème d'optimisation de la topologie des réseaux :

L'analyse de la structure des réseaux électriques et les problèmes des configurations optimales est l'un des soucis majeurs de certains chercheurs, la relation qui existe entre les éléments d'un système Serveur - Abonnés ou bien la connexion du système principal, sa conduite en temps réel et la garantie de la continuité de service repose sur des théories fondamentales.

Dans cette étude, nous allons aborder les problèmes d'optimisation en utilisant la théorie de la recherche opérationnelle. Pour structurer une configuration optimale parmi plusieurs

configurations, nous devons représenter cette structure par un graphe, puis la modéliser par une matrice.

La structure d'un réseau touche profondément le problème de transit de puissance (transport de puissance, la fiabilité du système, la perte d'énergie et de tension, la stabilité du réseau et essentiellement l'investissement de la réalisation du projet). Ces derniers restent des problèmes fondamentaux qu'on doit résoudre. Le compromis entre ces divers indices économiques, d'échange entre la station (Dépôts ou centrales) et la réception (Puits) restent des questions concernant le plan d'exploitation et de la planification à affronter et à résoudre. [9]

1.7.1 Définition :

Une Structure représente l'ensemble de tous les éléments constituant un réseau indépendamment de leur état (en service / hors service). Une configuration ou topologie représente un état 'un d réseau dans laquelle chaque élément à un état défini : en service ou en hors service. [9]

1.7.2 Comparaison entre les lignes aériennes et les câbles :

Les lignes aériennes sont constituées de conducteurs nus en aluminium (souvent un alliage pour renforcer les propriétés mécaniques), parfois avec une âme en acier. [9]

— **1-) En regard avec la planification :**

Les lignes sont soumises plus fréquemment que les câbles à des interruptions de courte durée. Cependant les câbles nécessitent une durée de réparation plus longue que les lignes, ce qui peut avoir un effet préjudiciable sur la sécurité du système. Des surcharges de longue durée sont plus critiques en souterrain qu'en aérien. Le vieillissement des câbles risque d'être fortement affecté. Par contre les surcharges de courte durée sont plus facilement supportées par les câbles. Les câbles souterrains ont une impédance plus faible que leur équivalent aérien, ce qui donne des courants de défaut plus élevés et une rétrogradation de la sélectivité des protections. La répartition de charge est également fortement modifiée. Les contraintes environnementales et de coûts, ainsi que la sécurité et la fiabilité de l'alimentation doivent être parallèlement envisagés lors d'une comparaison souterraine aérienne.

— **2-) Aspects techniques :**

Le courant capacitif d'un câble souterrain haute tension est significativement plus élevé que celui d'une ligne aérienne. De longs tronçons nécessitent l'installation de compensateurs réactifs onéreux. L'accroissement du transit sur une ligne peut être effectué à bon marché en changeant de conducteurs, ce n'est pas possible en souterrain. La

plupart des défauts en aérien sont fugitifs, tandis qu'ils sont permanents en souterrain. Un réenclencha automatique rapide peut être employé en ligne aérienne pour améliorer la sécurité du système, mais ce n'est plus possible si le circuit comprend une longueur significative de câbles souterrains. Il est possible de transiter plus de puissance en hiver sur les lignes.

1.7.3 Ligne aérienne :

Une ligne aérienne est composée de pylônes, de câbles conducteurs, de câbles de garde et d'isolateurs.

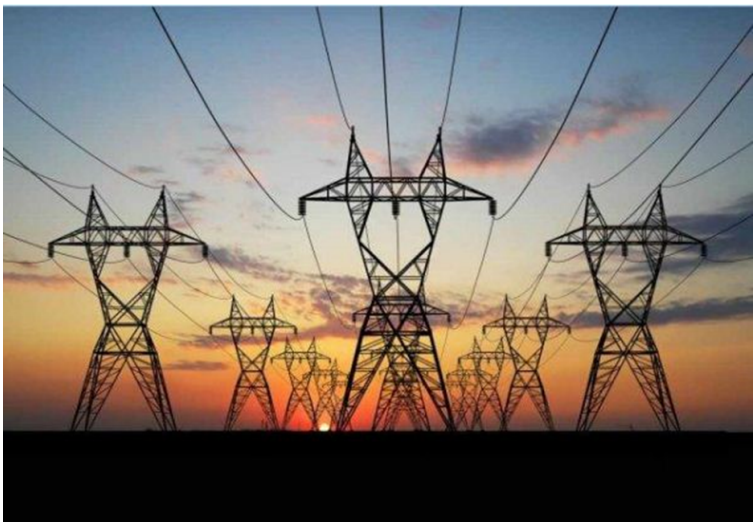


Figure 1.8: les lignes aériennes

Tableau 1.1: Avantages et inconvénients des lignes aériennes.

Avantages	**Inconvénients**
. Construction économique	. Pannes plus fréquentes (dépend du temps)
. Défaillances décelables	. Répercussion sur le paysage
. Problème plus rapidement résolu	. Sensible aux intempéries

1.7.4 Linges souterrains :

Elles sont constituées de câbles protégés par un fourreau enfoui dans le sol. Il est techniquement très complexe et très coûteux d'enfouir les lignes 400kV L'enfouissement entraîne une déperdition de l'énergie transportée. Pour y remédier, Il faudrait construire tous les 15 à 20 kilomètres des postes compensant cette perte d'énergie, qui couvriraient chacun une superficie de plusieurs hectares. [10]

Tableau 1.2: Avantages et inconvénients des lignes souterraines.

Avantages	**Inconvénients**
. Meilleure acceptation auprès de la population	. Travaux de réparation coûteux (sous-terre)
. Contribuer à la qualité du cadre de vie	. Prix de pose élevé
. Utilisable en milieu urbain	. Réparation longue

1.8 Principes fondateurs des réseaux électriques :

En règle générale, les grands réseaux électriques du monde se ressemblent, cette similitude s'explique par l'existence de grands principes, de grandes contraintes, qui justifient les structures et la nature des installations propres au transport et à la distribution de l'énergie électrique. [11]

1.8.1 Transport en haute tension, facteur de puissance quasi unitaire :

De façon absolument générale, il n'est concevable de transporter l'énergie électrique sur de grandes distances qu'à partir d'une tension relativement élevée. Il suffit, pour s'en convaincre, de considérer le schéma simplifié d'un transport d'énergie électrique représenté sur la figure 1.9, et de noter les points suivants :

* Tout conducteur électrique possède une certaine impédance. Transporter l'énergie électrique sur de longues distances revient à utiliser des conducteurs très longs dont l'impédance équivalente n'est absolument pas négligeable.
* Le transport de l'énergie électrique revient, de façon générale, à la liaison par une ligne (ou un câble) d'une source vers un récepteur [12].

  L'objectif principal de cette liaison est la fourniture de la puissance :

$$P = V \cdot I \cdot \cos\phi \tag{1.1}$$

  Avec :

* La puissance perdue par effet Joule dans la ligne s'écrit ainsi :

$$P_R = R \cdot I^2 = R \cdot \left(\frac{P^2}{V^2 \cdot \cos^2\phi} \right) \tag{1.2}$$

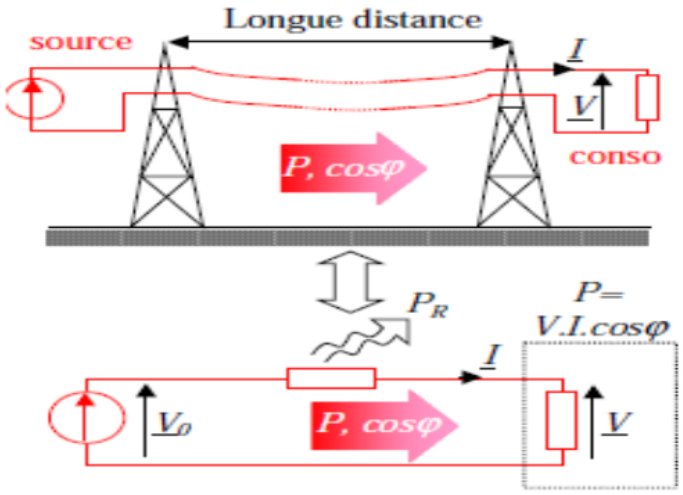


Figure 1.9: Transport simplifié de l'énergie électrique

1.8.2 Utilisation du régime alternatif sinusoïdal :

A cet égard, il est possible de comparer les avantages et les inconvénients des régimes alternatifs et continus, ceux-ci sont énoncés dans les tableaux suivants :

A)- Régime alternatif :

Tableau 1.3: Avantages et inconvénients des régimes alternatifs dans le transport de l'énergie électrique.

Avantages	**Inconvénients**
. Permet l'utilisation des transformateurs pour élever et abaisser la tension.	. Difficultés d'interconnexion de plusieurs Réseaux (il faut avoir la même fréquence, la Même tension de la phase)
. Facilite la coupure des courants par le passage naturel deux fois par période	. Implique des effets inductifs et capacitifs
. Production directe par alternateur	.Implique un effet de peau

B)- Régime continu :

Tableau 1.4: Avantages et inconvénients des régimes continus dans le transport de l'énergie électrique

Avantages	**Inconvénients**
Pas d'effet réactif	Difficulté de couper les courants continus, d'où des dispositifs de coupure plus performants et plus chers
Facilite l'interconnexion des réseaux	Terminaisons très coûteuses
Pas d'effet de peau (les câbles et les lignes sont plus simples et moins chers	Impossibilités de produire et d'élever la tension dans les très hautes tensions d'où des pertes importantes sur les lignes... etc

1.8.3 Choix entre un système monophasé et triphasé :

Il est tout à fait possible de réaliser un réseau uniquement en courant monophasé. Les raisons qui ont conduit à adopter le réseau triphasé sont les avantages techniques et économiques importants qu'il présente :

∴ Un alternateur de très forte puissance ne peut pas fonctionner en produisant un courant monophasé car la puissance fluctuante qui en résulte provoque une destruction de l'arbre de liaison entre l'alternateur et la source d'énergie mécanique qui le met en rotation. En effet, un système monophasé voit sa puissance instantanée passer par une valeur nulle à chaque oscillation de l'onde de tension (lorsque la tension ou l'intensité passe par zéro). La puissance instantanée est donc variable. Au contraire, les systèmes triphasés équilibrés assurent une puissance instantanée constante, c'est-à-dire "sans à-coup", ce qui est important en électromécanique. [12]

∴ Le transport d'une même puissance électrique en triphasé (sans neutre) nécessite une section de câbles conducteurs deux fois plus faible qu'en monophasé. L'économie qui en découle sur le coût de réalisation des lignes est notable.

∴ Les courants triphasés peuvent produire des champs magnétiques tournants en répartissant d'une manière spécifique les bobinages sur un rotor. Or les machines électriques qui produisent et utilisent ces courants fonctionnent de manière optimale en régime triphasé.

∴ Une distribution de l'électricité en courant triphasé avec fil de neutre permet de proposer pour un même réseau deux tensions d'utilisation différentes :

- Soit entre une phase et le neutre.
- Soit entre deux phases.

1.9 Modélisation des composants du réseau électrique :

Les éléments qui interviennent dans le problème de répartition des charges sont ceux qui sont exposés à des hautes tensions et à des forts courants, à savoir : générateurs de puissance (machine synchrone), charges électriques, lignes de transports, transformateurs de puissances et compensateurs statiques. [8]

1.9.1 générateur :

Le générateur est considéré comme le cœur du réseau électrique. Il assure la production de l'énergie électrique demandée par le consommateur.[9] Dans l'analyse de l'écoulement de puissance, le générateur est modélisé comme une source de tension constante qui injecte de la puissance active P_g et réactive Q_g figure1.10. La puissance réactive du générateur s'adapte de façon à maintenir la tension au nœud i constante. Aussi, le générateur est caractérisé par deux limites de puissance réactive $Q_g max$ et $Q_g min$ .Lorsque l'une de ces limites est atteinte, la puissance reste inchangée et la tension au nœud n'est plus fixe [8].

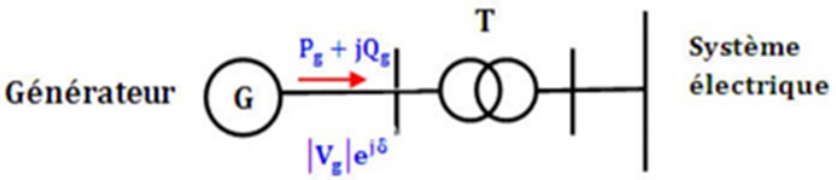


Figure 1.10: Modèle d'un générateur

1.9.2 Lignes de transmission :

La ligne de transmission [8] de l'énergie électrique située entre les nœuds i et m est généralement représentée par le schéma équivalent par phase de type (π) comme indiqué sur la figure 1.11

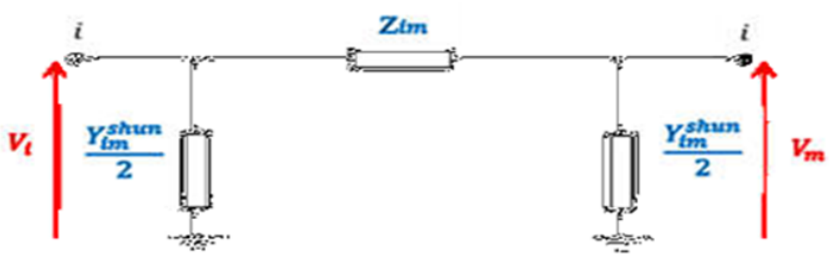


Figure 1.11: Schéma d'une ligne de transmission.

$$Z_{im} = R + jX \tag{1.3}$$

Z_{im} : Impédance série par phase.
R et X sont respectivement, la résistance et la réactance série de la ligne entre les Jeux de barres i et m.
Y_{im}^{shunt} : L'admittance shunt.

1.10 Charge électrique :

La charge électrique est souvent modélisée sous forme d'une impédance Z_{charge} qui consomme de la puissance active P_L et réactive Q_L constantes figure 1.12. Cette charge représente souvent des postes de répartition (sous stations) qui alimentent des réseaux de distribution. [8]

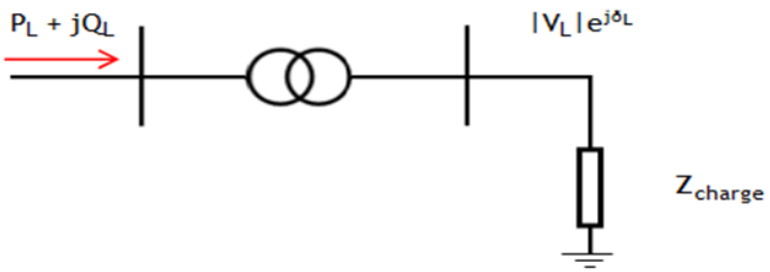


Figure 1.12: la charge électrique

1.10.1 Éléments shunts :

Dans la plupart des cas, des éléments shunt sont des dispositifs (batteries de condensateurs ou réactances) sont insérés dans le réseau électrique pour fournir ou absorber de la puissance réactive afin d'obtenir un meilleur profil de tension. [8]

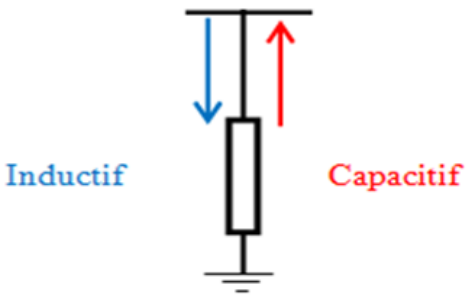


Figure 1.13: Éléments shunts

1.10.2 Transformateur :

Le transformateur est une machine électrique statique destinée à transformer une tension (courant) alternative en une autre tension (courant) alternative de même fréquence, et d'amplitudes généralement différentes afin de l'adapter aux différents besoins d'utilisation [8].

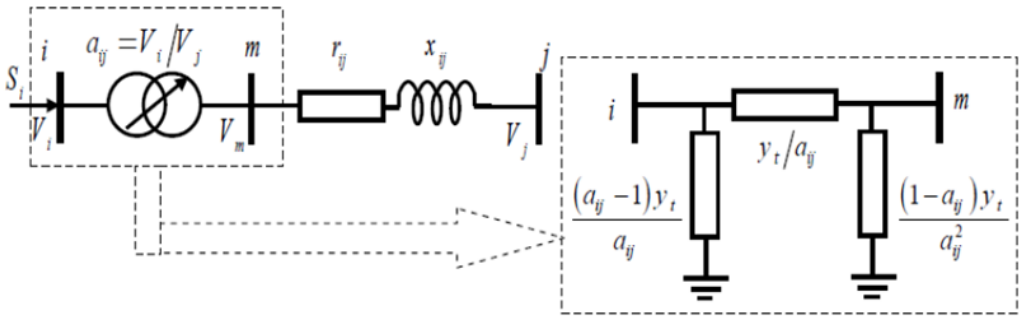


Figure 1.14: Transformateur électrique

a_i : le rapport de transformation.
Y_ij : l'admittance de la branche ij

1.11 L'effet de réseau de transport sur la qualité du service :

Les réseaux THT contribuent donc de façon déterminante au maintien de l'équilibre entre la demande et l'offre, ainsi qu'à la sécurité d'alimentation et à l'économie de l'exploitation. Par ailleurs, la qualité du service est également nu souci majeur de l'exploitant. Sur le plan pratique, cette qualité nécessite :
De maintenir les caractéristiques du produit (tension, fréquence) dans les limites très précises du cahier des charges : de limiter, autant que faire se peut, les interruptions de service. Les réseaux THT jouent aussi un rôle très important pour respecter ces contraintes car :

- Les références de tension qui vont conditionner l'ensemble du plan de tension dans le réseau sont fixées, pour l'essentiel, par les groupes de production raccordés aux réseaux THT.
- La fréquence est de même, fixée par les groupes de production qui doivent rester synchrones en régime permanent.
- La sécurité d'alimentation des grands centres de consommation dépend très fortement de la structure des réseaux de transport [8].

1.12 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un aperçu du fonctionnement des réseaux d'énergie électrique, soulignant leur importance cruciale dans notre société moderne pour assurer la distribution efficace de l'énergie électrique. Nous avons débuté par une définition des réseaux, en identifiant leurs types, en examinant la modélisation de leurs composants et en explorant leurs topologies.

L'écoulement de puissance, une étude en régime permanent du réseau électrique, a été abordé en détail. Cette analyse vise à déterminer, pour chaque jeu de barres, l'amplitude et la phase de la tension, ainsi que la puissance active et réactive injectées. À partir de là, il devient possible de calculer les courants et les puissances dans les lignes, ainsi que celles fournies par les sources.

Chapitre 2

Écoulement de puissance

2.1 Introduction

L'étude de l'écoulement de puissance vise à déterminer les caractéristiques électriques d'un réseau en fonctionnement normal et perturbé, assurant ainsi une exploitation conforme aux normes techniques. Ces caractéristiques comprennent les tensions aux nœuds, les puissances injectées et transitant dans les lignes, ainsi que les pertes et les courants associés. Cette analyse permet de planifier la construction, l'extension, la gestion et le contrôle efficaces des réseaux électriques.

Dans ce chapitre, nous aborderons l'analyse de l'écoulement de puissance dans les réseaux électriques en utilisant des méthodes classiques. Nous commencerons par une introduction générale à l'écoulement de puissance, puis nous présenterons les équations associées à ce phénomène, suivies par des suggestions de méthodes de résolution.

2.2 Objectifs :

L'objectif général de ce chapitre est de souligner l'importance de l'étude de l'écoulement de puissance dans les réseaux électriques pour assurer un fonctionnement optimal et conforme aux normes techniques, nous introduirons les méthodes classiques d'analyse de l'écoulement de puissance pour fournir une base solide à notre étude.

2.3 But d'écoulement de puissance :

peut être résumé comme suit :

— Maintenir l'équilibre entre la production et la demande d'énergie électrique (améliorer l'efficacité de la consommation d'électricité, produire de l'énergie en fonction des besoins).

— Respecter les valeurs limites (garantir la stabilité théorique en fonction de la durée d'utilisation).

— Maintenir les tensions des barres dans les limites théoriques.

— Planifier le réseau (en se basant sur le calcul de la charge).

— Renforcer la sécurité de fonctionnement des réseaux grâce à une stratégie efficace d'écoulement de puissance avant les perturbations. [13]

2.4 Classification des nœuds (Jeux de barres)

À chaque jeu de barre (noeud), sont définis les 4 paramètres :

— P : puissance active injectée ou soutirée

— Q : puissance réactive injectée ou soutirée

— V : module de la tension

— δ : déphasage de la tension.

Dans l'analyse de l'écoulement de puissance, les jeux de barres du système sont classés en trois catégories : [6]

2.4.1 LES JEUX DE BARRES DE CONTROLE (CONTROL BUS)

Appelés aussi les jeux de barres (P V), pour ce type de jeux de barre, on associe les centrales de production. On spécifie la puissance active et le module de la tension. Les variables à déterminer sont la phase de la tension et la puissance réactive. [6]

2.4.2 LES JEUX DE BARRES DE CHARGE (LOAD BUS)

Appelés aussi les jeux de barres (P Q), pour ce type de jeux de barre, on associe généralement les charges. Ces dernières sont caractérisées par la consommation des puissances active et réactive. On peut aussi associer des générateurs avec des puissances active et réactive fixées. Les variables à déterminer sont le module et la phase de la tension.Ce jeu de barres, connu aussi sous le nom de jeu de barres balancier ou bilan, est choisi parmi ceux où un générateur est connecté. Le rôle de ce jeu de barres est de fournir la puissance supplémentaire nécessaire pour compenser les pertes de transmission, car celles-ci ne sont pas connues d'avance. De plus, ce jeu de barres sert de référence pour les phases des tensions. Par convention, ce jeu de barre est identifié par le jeu de barres n 1, dont le module et la phase de tension sont toujours spécifiés ($V^1 = 1$ pu et $\delta^1 = 0°$). Ainsi, les puissances P^1 et Q^1 sont inconnues, car θ_G^1 et θ_B^1 ne sont pas spécifiées d'avance. Par conséquent, les équations d'équilibre des puissances pour le jeu de barres de référence ne sont pas explicitement incluses dans la formulation du problème de l'écoulement de puissance. Cependant, P^1 et Q^1 peuvent être calculées après avoir obtenu la solution du problème. [6]

Tableau 2.1: Les types de nœuds des réseaux éclectiques.

Type de nœuds	**Variables connus**	**Variables inconnus**
. P Q	. (P et Q)	. V et δ
. P V	. P et V	. Q et δ
. Référence	. V et δ	. P et Q

2.4.3 LE JEU D E BARRES D E REFERENCE (SLACK BUS)

Ce jeu de barres, connu aussi sous le nom de jeu de barres balancier ou bilan, est choisi parmi ceux où un générateur est connecté. Le rôle de ce jeu de barres est de fournir la puissance supplémentaire nécessaire pour compenser les pertes de transmission, car celles-ci ne sont pas connues d'avance. De plus, ce jeu de barres sert de référence pour les phases des tensions. Par convention, ce jeu de barre est identifié par le jeu de barres n 1, dont le module et la phase de tension sont toujours spécifiés ($V^1 = 1$ pu et $\delta^1 = 0°$). Ainsi, les puissances P^1 et Q^1 sont inconnues, car θ_G^1 et θ_B^1 ne sont pas spécifiées d'avance. Par conséquent, les équations d'équilibre des puissances pour le jeu de barres de référence ne sont pas explicitement incluses dans la formulation du problème de l'écoulement de puissance. Cependant, P^1 et Q^1 peuvent être calculées après avoir obtenu la solution du problème.

2.5 Écoulement de puissance :

Le calcul de la répartition des puissances (écoulement des puissances ou load flow Ou encore power flow) consiste à déterminer l'ensemble des transits de puissances et distensions dans le réseau pour un cas de charge donné. Quatre grandeurs sont associées à chaque nœud du système :

- ✓ Les puissances active P et réactive Q.
- ✓ Le module V et la phase de la tension ϕ.

Seules deux de ces quatre variables sont connues en un nœud, les deux autres étant déterminées lors du calcul. [13]

2.6 Concept général de l'écoulement de puissance :

Dans les réseaux électriques, il existe de nombreux problèmes qui ont des effets sur le but principal qui est, le maintien du système de puissance fonctionnel dans son état normal. Parmi ces problèmes, on trouve celui de l'écoulement de puissance.

L'étude de l'écoulement de puissance permet d'avoir la solution des grandeurs d'un réseau électrique en fonctionnement normal, équilibré en régime permanent. Ces grandeurs sont les tensions aux nœuds, les puissances injectées aux nœuds et celles qui transitent dans les lignes. Les pertes et les courants s'en déduisent.

Le problème de l'écoulement de puissance est résolu pour la détermination en régime permanent des tensions complexes au niveau des jeux barres du réseau, à partir de lesquelles les transits des puissances actives et réactives dans chaque ligne et transformateur sont calculés. L'ensemble des équations représente le réseau électrique et de nature non linéaire.

Pratiquement, dans les méthodes de calcul d'écoulement de puissance, on exploite la configuration du réseau et les propriétés de ses équipements pour déterminer la tension complexe au niveau de chaque nœud. D'autre part, on parfaite symétrie entre les trois phases du système triphasés du réseau électrique. [8]

2.7 Les domaines d'applications :

Les applications de la fonction écoulement de puissance optimal peuvent être classées en applications d'exploitation et celles de planification [14]. Dans le domaine d'exploitation, on distingue les applications d'ordre économiques et celles d'ordre technique. Dans chaque catégorie on trouve plusieurs applications, dont les plus courantes sont :

2.7.1 Minimisation du coût de combustible :

L'intérêt étant la minimisation des coûts d'exploitation des réseaux électriques. La minimisation du coût du combustible est le souci primordial. Le but étant de trouver les puissances optimales à générer par les centrales de façon à minimiser le coût total du combustible. [15]

2.7.2 Minimisation des pertes :

La minimisation des pertes de transmission est considérée comme l'un des objectifs les plus importants.

2.7.3 Amélioration du profil de tension :

En général, les tensions sont bornées entre des limites supérieures et inférieures dans les contraintes d'inégalité. Cependant, il existe d'autres formulations où le but est de déterminer les paramètres de contrôle pour minimiser la somme des déviations de tension au niveau des jeux de barres de charge. [14]

2.7.4 Maximisation de la puissance transmissible :

Maximiser le transfert de puissance est un objectif appréciable pour les systèmes interconnectés. Il peut aider à minimiser les coûts d'exploitation des systèmes électriques en plus d'autres avantages tel que l'amélioration de la fiabilité. Cet objectif est mieux géré par un ajustement optimal des sources de puissance réactive. [16]

2.8 Gestion des réseaux de distribution :

La gestion d'un réseau de distribution regroupe les deux fonctions suivantes :

- l'exploitation et la planification : L'exploitation est responsable de gérer un système existant selon des critères techniques et économiques en satisfaisant la demande actuelle.
- La planification est responsable d'adapter le système existant (renforcements et extensions) selon des critères économiques et techniques afin que l'exploitation on puisse satisfaire la demande future selon ses propres critères. [17]

2.8.1 Les pertes d'énergie dans le réseau de distribution :

2.8.1.1 Les types des pertes dans le réseau de distribution :

Les pertes d'énergie dans un réseau de distribution d'électricité sont de deux types : les pertes techniques et les pertes non-techniques. Les pertes non-techniques proviennent de consommations d'énergie non enregistrées. Ces pertes résultent de vols d'énergie ou d'erreurs de comptage et/ou de profilage. Dans certains pays en voie de développement, ces pertes peuvent représenter jusqu'à 50% de la quantité d'électricité injectée dans le réseau notamment en raison de problème de corruption [18].

Les pertes techniques ont, elles aussi, des origines diverses. Elles peuvent provenir de pertes en ligne (développées plus bas) mais aussi de pertes liées à la transformation entre haute tension (HT)/basse tension (BT). Ces pertes apparaissent dans les transformateurs HT/BT et proviennent de « pertes par effet Joule » et de « pertes fer ». Les « pertes fer » dépendent de la tension et de la fréquence d'alimentation, des matériaux utilisés et sont décomposées en pertes par courants de Foucault et pertes par hystérésis Comme les pertes présentes dans les transformateurs, les pertes en ligne sont à mettre en relation avec des phénomènes physiques des réseaux de distribution et plus particulièrement avec les pertes thermiques dues à l'effet Joule. Il convient de noter ici que les pertes liées à la distribution d'électricité sont plus importantes que celles constatées lors du transport de l'électricité. En effet, la tension est plus faible au sein d'un réseau de distribution, or le phénomène de pertes thermiques est une fonction décroissante de la tension à laquelle le courant circule.

[18]

2.8.1.2 La problématique des pertes de puissance :

Les pertes de puissances, dues au passage d'un courant dans un conducteur électrique, Constituent une préoccupation des exploitants des réseaux électriques. Ces pertes font partie des coûts d'exploitation de réseaux. L'énergie perdue dans l'ensemble des lignes et transformateurs électriques n'est pas une quantité négligeable par rapport à la quantité d'énergie consommée. Une quantité supplémentaire d'énergie doit donc être produite afin de compenser le déficit engendré par les pertes. Il est évident que, d'une certaine manière, le coût des pertes se retrouve finalement sur la facture d'électricité des consommateurs finaux. [18] Les distributeurs d'électricité assurent la compensation des pertes sur leurs réseaux par l'achat de l'énergie auprès des fournisseurs. Ce sont donc les gestionnaires de réseau qui voient apparaître, dans leur bilan financier, les pertes au sein de leur réseau. Les recettes qui permettent de couvrir ces dépenses sont inclues dans les charges d'exploitation du réseau.

2.9 Formulation des équations de l'écoulement de puissance :

L'étude de l'écoulement de puissance consiste à calculer les tensions du réseau électrique pour des extrémités spécifiées, et des conditions données aux jeux de barres, telles que les charges capacitives ou inductives qui doivent être alimentées, les puissances générées et les modules de tensions dans tous les jeux de barres, qui à partir desquelles les courants dans les lignes de transport, les puissances et les pertes de puissances peuvent être obtenus .Les équations des tensions nodales d'un réseau électrique de N jeux de barres sont écrites sous la forme matricielle suivante : [19]

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{N1} & Y_{N2} & \cdots & Y_{Nn} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_N \end{pmatrix} \tag{2.1}$$

Où :

$$I_{\text{bus}} = Y_{\text{bus}} \times V_{\text{bus}} \tag{2.2}$$

→ $\begin{bmatrix} I_1 & I_2 & \cdots & I_N \end{bmatrix}^T$: Le vecteur des courants injectés dans chaque jeu de barres (courant de source extérieur). Le courant écoulé du jeu de barres i vers le jeu de barres j est positif et négatif dans le sens inverse.

→ $\begin{bmatrix} V_1 & V_2 & \cdots & V_N \end{bmatrix}^T$: Le vecteur des tensions complexes de chaque jeu de barres.

→ Y_{bus} : C'est la matrice d'admittance nodale du système de taille $N \times N$.

→ Y_{ii} : L'élément diagonal de la matrice d'admittance. C'est la somme de tous les composants connectés à ce jeu de barres, traduit par l'équation mathématique suivante :

$$Y_{ii} = \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq k}}^{N} Y_{ik} \tag{2.3}$$

→ Y_{ik} : L'élément hors diagonal $(i,)$. C'est la somme négative de tous les composants connectés entre les jeux de barres i et j. C'est-à-dire :

$$Y_{ik} = \sum_{i=0}^{N} Y_{ik} \tag{2.4}$$

D'après l'équation 2.1, le courant net à injecter à un jeu de barres i est écrit comme suit :

$$Y_i = \sum_{k=1}^{N} Y_{ik} \times V_k \quad (i = 1, 2, .., N) \tag{2.5}$$

Où :

$$\bar{Y}_{ik} = G_{ik} + j \times B_{ik} = Y_{ik}(\cos(\theta_{ik}) + j \sin(\theta_{ik})) \tag{2.6}$$

$$\bar{V}_k = Re_k + j \times Im_k = V_k(\cos(\theta_k) + j \sin(\theta_k)) \tag{2.7}$$

L'expression de la puissance apparente $\bar{S}_i$ injectée à un jeu de barres peut s'écrire comme suit :

$$S_i^* = P_i - jQ_i = V_i^* \times I_i = V_i^* \times \sum_{k=1}^{N} (\bar{Y}_{ik} \times \bar{V}_k) \tag{2.8}$$

En remplaçant les équations 2.6 et 2.7 dans l'équation 2.8, on obtient :

$$P_i = \sum_{k=1}^{N} V_i V_k V_{ik} \times (\cos(\theta_{ik} + \theta_k + \theta_i)) \quad (i = 1, 2, .., N) \tag{2.9}$$

$$Q_i = \sum_{k=1}^{N} V_i V_k V_{ik} \times (\sin(\theta_{ik} + \theta_k + \theta_i)) \quad (i = 1, 2, .., N) \tag{2.10}$$

Les équations 2.9, 2.10 représentent les équations de l'écoulement de puissance tels que :

$$P_i = P_{Gi} + P_{Di} \tag{2.11}$$

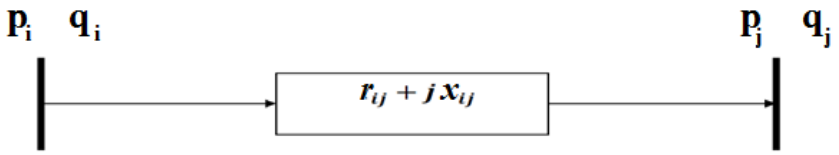


Figure 2.1: Modèle d'une ligne de transmission

$$Q_i = Q_{Gi} + Q_{Di} \tag{2.12}$$

Dans le calcul de l'écoulement de puissance, un jeu de barres est défini par quatre paramètres :

- ▷ Module de tension V_i.
- ▷ Angle de tension θ_i.
- ▷ Puissance active P_i.
- ▷ Puissance réactive Q_i injectée.

Pour chaque jeu de barres deux grandeurs sont spécifiées et les deux autres grandeurs restent à calculer.

2.10 Modélisation des branches et des charges :

2.10.1 Modélisation des branches :

Les réseaux de distribution ont une configuration radiale et sont constitués d'un ensemble de branches. Chaque branche de ce réseau est modélisée comme une résistance en série avec une inductance pure. Il est supposé que le réseau de distribution triphasé soit équilibré et peut être représenté par un schéma équivalent d'une seule ligne(branche). La capacité entre ligne et terre au niveau de tension d'alimentation est faible et donc négligée. Un modèle simple d'une ligne de transmission, qui a été utilisée dans l'algorithme, est montré dans la figure 2.1. [20]

2.10.2 Modélisation des charges :

Les charges sont en général modélisées comme étant dépendantes de la tension. On écrit alors pour les puissances actives et réactives d'une charge placée au nœud « i » les expressions suivantes :

$$P_i = P_{Oi}(V_i/V_{i0})^{\alpha} \tag{2.13}$$

$$Q_i = Q_{Oi}(V_i/V_{i0})^{\beta} \tag{2.14}$$

$$S_L = P_L + jQ_L \tag{2.15}$$

- ✓ Si les coefficients α et β sont tous les deux nuls, la charge est considérée à puissance constante.
- ✓ Si par contre α et β sont égaux à 1, la charge est considérée à courant constant.
- ✓ Lorsqu'ils sont égaux à 2, la charge est considérée à impédance constante. [16]

2.10.3 Équations de base :

Un certain nombre de méthodes de calcul l'écoulement de puissance utilise des équations récursives sous différentes formes considérant d'extrémité d'envoi (i) ou l'extrémité de réception (j). [20] La tension de jeu de barre d'extrémité de réception considérant les puissances d'extrémité d'envoi de la ligne est donnée ci-dessous :

$$V_j^2 = V_i^2 - 2(r_i P_i + x_i Q_i) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2)\left(\frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2}\right) \tag{2.16}$$

2.11 Résolution des équations d'écoulement des puissances en AC :

La résolution du problème de l'écoulement de puissance est basée sur un processus itératif. On utilise des valeurs estimées des tensions des jeux de barres pour calculer un ensemble de nouvelles valeurs, qui sont fonctions des valeurs estimées des tensions, des puissances actives et réactives spécifiées et des admittances du réseau. Chaque fois qu'un ensemble des valeurs de tensions est obtenue, le nombre d'itérations augmente d'une unité.
Depuis longtemps plusieurs méthodes ont été proposées par différents chercheurs pour la résolution des systèmes d'équations modélisant le fonctionnement en régime permanent du Système électrique. Pour calculer les tensions des jeux de barres des réseaux électriques on utilise l'une des méthodes suivantes : [8]

- **01 Méthode de Gauss-Seidel** : Cette méthode itérative est souvent utilisée pour résoudre les équations des réseaux électriques en modifiant les variables du système une à une jusqu'à atteindre une solution convergente.
- **02 Méthode de Newton-Raphson** : Cette méthode numérique utilise des itérations pour trouver les solutions des équations non linéaires en se basant sur le calcul des dérivées partielles des fonctions impliquées.
- **03 Méthode découplée rapide** : Cette méthode est utilisée pour résoudre rapidement les systèmes d'équations non linéaires en les découplant en plusieurs sous-systèmes

plus simples, qui peuvent être résolus séparément puis combinés pour obtenir la solution globale.

2.11.1 Méthode De Gauss- Seidal :

Le calcul de l'écoulement de puissance en régime permanent établi se base sur le système d'équation linéaire suivante : []

$$I = YV \tag{2.17}$$

Il faut mettre les équations en forme correcte :

$$S_i = V_i I_i^* = V_i[\sum_{k=1}^{n} Y_{ik} V_k]^* = V_i \sum_{k=1}^{n} Y_{ik}^* V_k^* \tag{2.18}$$

$$S_i^* = V_i^* I_i = V_i^* \sum_{k=1}^{n} Y_{ik} V_k = V_i^* \sum_{k=1}^{n} Y_{ik} V_k \tag{2.19}$$

$$S_i^*/V_i^* = \sum_{k=i}^{n} Y_{ik} V_k = Y_{ii} V_i + \sum_{k=i,k\neq i}^{n} Y_{ik} V_k \tag{2.20}$$

$$V_i = 1/Y_{ii} = [(S_i^*/V_i^*) - \sum_{k=i,k\neq i}^{n} Y_{ik} V_k] \tag{2.21}$$

Avec plusieurs nœuds nous pouvons calculer les nouvelles v comme suit :

$$V_i^{(v+1)} = \frac{1}{Y_{ii}} \left[\frac{S_i^*}{V_i^{(v)*}} - \sum_{k=i,k\neq i}^{n} Y_{ik} V_k^{(v)} \right] \tag{2.22}$$

2.11.2 Méthode de Newton-Raphson :

Généralement la méthode suivie pour résoudre ce problème est de Newton-Raphson à cause de sa rapidité de convergence et le nombre d'itérations réduit par rapport aux autres méthodes.
Cette approximation linéaire est obtenue par un développement en série de Taylor de ces deux expressions. On est ainsi conduit à formuler le système linéaire : [5]

$$P_i = \sum_{i=1}^{n} Y_{ij} \cdot |V_i| \cdot |V_j| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_i j) \tag{2.23}$$

$$Q_i = \sum_{i=1}^{n} Y_{ij} \cdot |V_i| \cdot |V_j| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_i j) \tag{2.24}$$

Donc on peut écrire le système comme suit :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = J \times \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \tag{2.25}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j_1 & j_2 \\ j_3 & j_4 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \tag{2.26}$$

Tels que :

$$j_1 = \frac{\partial P_i}{\partial \theta_k}, j_2 = \frac{\partial P_i}{\partial V_k}, j_3 = \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_k}, j_4 = \frac{\partial Q_i}{\delta V_k} \tag{2.27}$$

$$\Delta P_i = P_i^{sp} - P_i^{cal} \tag{2.28}$$

$$\Delta Q_i = P_i^{sp} - Q_i^{cal} \tag{2.29}$$

A partir du système d'équations précédent on peut déterminer les éléments de jacobienne comme suit sachant que $k \neq i$:

$\rightarrow$ Les éléments diagonaux et hors diagonal de J_1 :

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j=1} |V_i||V_j||Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} + \delta_i + \delta_j) \tag{2.30}$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -|V_i||V_j||Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} + \delta_i + \delta_j) \tag{2.31}$$

$\rightarrow$ Les éléments diagonaux et hors diagonal de J_2 :

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_i} = 2|V_i||Y_{ii}| \cos\theta_{ii} - \sum_{j=i} |V_j||Y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_i - \theta_i j) \tag{2.32}$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_j} = |V_i||Y_{ij}| \sin(\delta_{ik} - \delta_j - \theta_i j) \tag{2.33}$$

$\rightarrow$ Les éléments diagonaux et hors diagonal de J_3 :

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} = -|V_i||V_j||Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i - \delta_j) \tag{2.34}$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j=i} |V_i||V_j||Y_{ij}| \cos\left(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j\right) \tag{2.35}$$

→ Les éléments diagonaux et hors diagonal de J_4 :

$$\frac{\partial Q_i}{\partial V_i} = -2|V_i||Y_{ij}| \sin\theta_{ij} + \sum_{j=i} |V_i||Y_{ij}| \sin\left(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j\right) \tag{2.36}$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial V_j} = -|V_i||Y_{ij}| \sin\left(\theta_{ij} - \delta_i - \delta_j\right) \tag{2.37}$$

Cette méthode est la plus utilisée pour résoudre les équations non linéaires. Dans les réseaux électriques, elle a été aussi la méthode préférée pour la plupart des logiciels commerciaux. [5]

2.11.3 Méthode Découplée Rapide :

La méthode découplée rapide a été établie en 1973 par B. Scorretet O. Alasc. Elle utilise d'autre simplification par rapport à la méthode découplée. La première étape consiste à découpler l'écoulement de la puissance active et réactive, le module et l'angle de la tension. La méthode découplée rapide est une simplification de la méthode découplée. Les équations d'écoulement de puissance pour un réseau électrique et donnés par :

$$P_i = \sum_{j=1} V_j(G_{ij}\cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij}\sin(\theta_i - \theta_j)) \tag{2.38}$$

$$Q_i = \sum_{j=1} V_j(G_{ij}\sin(\theta_i - \theta_j) + B_{ij}\cos(\theta_i - \theta_j)) \tag{2.39}$$

Les éléments des jacobiens sont obtenus après approximations successives : [6]

$$\left\{\begin{array}{l} \cos\left(\theta_i - \theta_j\right) \approx 1 \\ \sin\left(\theta_i - \theta_j\right) \approx 0 \\ G_{ii}(\theta_i - \theta_j) \ll B_{ij} \end{array}\right\} \tag{2.40}$$

A partir de l'approximation précèdent, les jacobines s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases} J_{ii} = V_i V_j B_j \\ J_{ii} = -V_i^2 B_{ii} \end{cases} \quad (i = 1, 2, .., netj \neq 1) \tag{2.41}$$

pour J_2 :

$$\begin{cases} J_{ij} = -V_i V_j B_{ij} \\ J_{ij} = -V_i^2 B_{ii} \end{cases} \tag{2.42}$$

il vient donc :

$$\begin{cases} [\Delta P^k] = [J_1^k][\Delta\theta] = |V_i V_j| B'_{ij}[\Delta\theta] \\ [\Delta Q^k] = [J_4^k]\left[\dfrac{\Delta V}{V}\right]^k = |V_i| B''_{ij}\left[\dfrac{\Delta V}{V}\right]^k \end{cases} \tag{2.43}$$

$$B''_{ii} = -B_{ii}, B'_{ii} = B_{ij}$$

Les éléments des sous matrices est sont exprimés en fonction de la partie imaginaire des admittances. On pose pu, on obtient un système linéaire :

$$\begin{cases} [\Delta Q] = |B'|[\Delta V] \\ [\dfrac{\Delta p}{V}] = |B''|[\Delta Q] \end{cases} \tag{2.44}$$

Avec : $B''_{ii} = -B_{ii}, B'_{ii} = B_{ij}, B'_{ij} = \frac{-1}{X_{ij}}, B_{ii} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{X}$

Algorithme méthode découplée rapide :

1ère Étape : Introduire les données du réseau et les grandeurs planifiées

2ème Étape : Calcul de la matrice **B**

3ème Étape : Supposons que les tensions initiales sont $V_1 = 1$ pu, $i = 1, \ldots, n$

4ème Étape : Calculons

$$\Delta P : V_i = \frac{|B'|}{\Delta Q}$$

$$\Delta P_1 : P_1 - \sum_{i=2}^{n} V_1 V_i (G_{12}\cos\theta_{12} + B_{12}\sin\theta_{12})$$

5ème Étape : Test de la convergence de la puissance active :

$$\theta_1^{(k)} = \theta_1^{(k-1)} - \Delta\theta_1$$

6ème Étape :

— Si la convergence de la puissance n'est pas obtenue, passer à la résolution d'équations

— Déterminons les nouveaux angles

7ème Étape : Calcul de Q_1 et ΔB avec les nouvelles estimations de θ_i avec les équations :

$$Q_1 : V_1 \sum_{i=2}^{n} V_1 V_i (G_{12}\sin\theta_{12} - B_{12}\cos\theta_{12})$$

$$\Delta Q_1 : Q_1 - \sum_{i=2}^{n} V_1 V_i (G_{12}\sin\theta_{12} - B_{12}\cos\theta_{12})$$

8ème Étape : Testons la convergence de puissance réactive : $\Delta Q \leq \varepsilon$

Cette méthode est extrêmement rapide, puisqu'elle réduit considérablement les efforts de calcul, sans pour autant affecter la précision de calcul. Elle est une variante simplifiée de Newton–Raphson, et elle est basée sur quelques approximations qui sont souvent valides sur le plan pratique. [6]

2.12 Conclusion

En conclusion, l'étude de l'écoulement de puissance dans les réseaux électriques revêt une importance cruciale pour garantir un fonctionnement optimal et conforme En analysant les caractéristiques électriques essentielles telles que les tensions, les puissances et les pertes, il est possible de planifier efficacement la construction, l'extension, la gestion et le contrôle des réseaux électriques.

Ce chapitre se concentrera sur l'analyse de l'écoulement de puissance en utilisant des méthodes classiques, en fournissant une base solide pour une compréhension approfondie de ce phénomène essentiel dans le domaine de l'électrotechnique.

Chapitre 3

Le principe de la méthode de *Baran Distflow*

3.1 Introduction

La méthode de Baran Distflow est une approche essentielle pour analyser la circulation de l'énergie électrique dans les réseaux. Elle repose sur des équations Distflow qui permet de représenter des contraintes de tension et de puissances dans le réseau.

Dans ce chapitre, nous allons étudier cette méthode et comment ses équations sont formulées et comment elles peuvent être résolues de manière efficace à l'aide de l'algorithme de Newton-Raphson par le concept de la matrice jacobienne.

3.2 Objectif

L'objectif général de ce chapitre est d'explorer la méthode de Baran Distflow et la formule de ses équations et leur méthode de résoudre par l'algorithme de Newthon-Raphson avec la matrice jacobienne.

3.3 But de la méthode de Baran Distflow

Effectuer l'écoulement de puissance et les réseaux de distribution radiaux. Où nous calculons les différentes grandeurs des réseaux tels que les tensions (modules et angles) et les écoulements de puissances actives et réactives.

3.4 Les avantages de la méthode de Baran

La méthode Baran Distflow présente plusieurs avantages dans l'analyse de l'écoulement de puissance dans les réseaux électriques, notamment : [20]

1. Simplicité : La méthode Baran Distflow est relativement simple à mettre en œuvre par rapport à d'autres méthodes plus complexes. Elle permet une modélisation efficace de l'écoulement de puissance dans les réseaux électriques.

2. Précision : Bien que simplifiée, la méthode Baran Distflow offre une précision raisonnable pour analyser les flux de puissance dans les réseaux électriques. Elle permet d'obtenir des résultats fiables pour la plupart des applications courantes.

3. Rapidité : La méthode Baran Distflow est rapide à exécuter, ce qui en fait un outil efficace pour effectuer des analyses rapides et des études de sensibilité dans les réseaux électriques.

4. Adaptabilité : La méthode Baran Distflow peut être facilement adaptée pour inclure des éléments supplémentaires tels que des sources d'énergie renouvelable, des charges variables,

ou d'autres caractéristiques spécifiques du réseau électrique.

5. Compréhensibilité : La méthode Baran Distflow est intuitive et facile à comprendre, ce qui en fait un outil pédagogique utile pour l'apprentissage des concepts de base de l'analyse de l'écoulement de puissance dans les réseaux électriques.

En résumé, la méthode Baran Distflow offre une combinaison d'avantages tels que la simplicité, la précision, la rapidité, l'adaptabilité et la compréhensibilité, ce qui en fait un outil précieux pour l'analyse de l'écoulement de puissance dans les réseaux électriques. [20]

3.5 Les limites de la méthode de Baran Distflow

La méthode de Baran Distflow, utilisée dans l'analyse de l'écoulement de puissance des réseaux électriques, présente plusieurs limites importantes, notamment :

1. Approximation linéaire des pertes : La méthode de Baran Distflow utilise une approximation linéaire pour modéliser les pertes de puissance dans le réseau. Cela peut ne pas être précis pour des réseaux avec des conditions de charge variables ou des réseaux très étendus où les pertes non linéaires peuvent être significatives.
2. Définition des matrices d'admittance : La méthode repose sur l'utilisation de matrices d'admittance nodale simplifiées pour représenter le réseau. Ces matrices peuvent ne pas capturer précisément toutes les caractéristiques du réseau, comme les effets de la charge dynamique ou les variations de tension.
3. Assomptions sur la topologie du réseau : La méthode suppose souvent une topologie de réseau radiale ou faiblement meshée, où les chemins entre les nœuds sont relativement simples. Dans les réseaux fortement meshés, cette approximation peut ne pas être valide.
4. Sensibilité aux conditions initiales : Comme toute méthode numérique, la méthode de Baran Distflow peut être sensible aux conditions initiales et aux approximations faites lors de la modélisation des paramètres du réseau. Des erreurs initiales peuvent conduire à des résultats peu fiables.
5. Incapacité à gérer les réseaux non linéaires : La méthode de Baran Distflow est conçue pour des réseaux où les variations de tension sont petites et les non-linéarités du réseau (telles que les effets de saturation des transformateurs ou les effets de courant de charge) peuvent ne pas être correctement représentées.

En résumé, bien que la méthode de Baran Distflow soit efficace pour des réseaux électriques spécifiques et sous certaines conditions simplificatrices, elle présente des limitations qui nécessitent une attention particulière lors de son application à des réseaux plus complexes ou à des analyses nécessitant une précision élevée.

3.6 Méthode de Baran

Ms. Baran a écrit dans son travail que l'écoulement de puissance dans un réseau de distribution radial peut être décrit par un ensemble des équations récursives, appelées les équations Distflow, qui utilisent la puissance active, la puissance réactive et l'amplitude de tension v_i à l'extrémité d'envoi d'une branche (p_i, q_i, v_i) respectivement pour exprimer les mêmes quantités à la réception de l'extrémité de la branche comme suit [20].

3.6.1 Les équations Distflow (Distflow Equations)

On va utiliser essentiellement les équations Distflow pour les réseaux radiaux [2]. Laissez P_{ij} et q_{ij} dénoter la puissance active et réactive au bus i allant à j, v amplitude de tension, et $P_L(i)$ et $Q_L(i)$ charges actives et réactives au bus i. Notez que P_{ij} et q_{ij} ne sont pas égaux à P_{ji} et q_{ji} Puisque v_i n'apparaît jamais dans notre formulation, nous considérons v_i^2 comme une variable elle-même. Soit B l'ensemble des bus, w soit l'ensemble des lignes, et r_{ij} et x_{ij} sont la résistance et la réactance de ligne. Sauf indication contraire, les contraintes à indice unique sont terminées tout i dans B, et les contraintes à double indice sont sur tout (i, j) en w. Les équations Distflow sont données par :

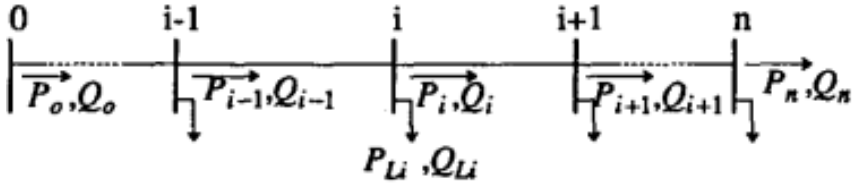


Figure 3.1: Schéma unifilaire d'un réseau radial.

$$P_{i+1} = P_i - r_i((P_i^2 + Q_i^2)/V_i^2) \tag{3.1}$$

$$Q_{i+1} = Q_i - x_i((P_i^2 + Q_i^2)/V_i^2) \tag{3.2}$$

$$V_{i+1} = V_i^2 - 2(r_i P_i + x_i Q_i) + (r_i^2 + x_i^2)((P_i^2 + Q_i^2)/V_i^2) \tag{3.3}$$

Ces équations seront résolues par la méthode de Newthon- Raphson

3.7 Newthon -Raphson

3.7.1 Algorithme de Newthon-Raphson

L'une des méthodes efficaces de résolution des systèmes d'équation non-linéaire est l'algorithme de Newton-Raphson. L'idée de Newton-Raphson est d'utiliser la linéarisation séquentielle. La forme générale du problème : chercher un x tel que [22]

$$f(x) = 0 \tag{3.4}$$

3.7.2 Méthode de Newton-Raphson (scalaire)

Pour chaque estimation de $\hat{x}$, $x^{(v)}$ définir :

$$[\Delta x^{(k)} = \hat{x} - x^{(k)}] \tag{3.5}$$

Représenter f(x) par les séries de Taylor de f(x)

$$f(\hat{x}) = f(x^{(k)}) + \frac{df(x^{(k)})}{dx}\Delta x^{(k)} + \frac{1}{2}\frac{d^2 f(x^{(k)})}{dx^2}(\Delta x^{(k)})^2 \tag{3.6}$$

Approximer $f(\hat{x})$ en négligeant tous les termes sauf les deux premiers.

$$f(\hat{x}) = 0 \approx f(x^{(k)}) + \frac{df(x^{(k)})}{dx}\Delta x^{(k)} \tag{3.7}$$

Utiliser cette approximation linéaire pour calculer $\Delta x^{(v)}$.

$$\Delta x^{(k)} = -\left[\frac{df(x^{(k)})}{dx}\right]^{-1} f(x^{(k)}) \tag{3.8}$$

Résoudre pour une nouvelle estimation de $\hat{x}$.

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \Delta x^{(k)}$$

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} - \left[\frac{df(x^{(k)})}{dx}\right]^{-1} f(x^{(k)}) \tag{3.9}$$

3.7.3 Exemple de l'application de la méthode de Newthon-Raphson

On propose de résoudre

$$f(x) = x^2 - 2 = 0 \tag{3.10}$$

Tableau 3.1: Tableau des données

v	$x^{(k)}$	$f(x^{(k)})$	$\Delta x^{(k)}$
0	1	-1	0.5
1	1.5	0.25	-0.08333
2	1.41667	6.953×10^{-3}	-2.454×10^{-3}
3	1.41422	6.024×10^{-6}	

On propose de résoudre : $f(x) = x^2 - 2 = 0$ par la méthode de Newton-Raphson.

L'équation itérative qui doit être résolue est :

$$\Delta x^{(k)} = -\left[\frac{df(x^{(k)})}{dx}\right]^{-1} f(x^{(k)}) \tag{3.11}$$

$$\Delta x^{(k)} = -\frac{1}{2x^{(v)}}\left(x^{(k)}\right)^2 - 2 \tag{3.12}$$

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \Delta x^{(k)} \tag{3.13}$$

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} - \frac{1}{2x^{(k)}}\left((x^{(k)})^2 - 2\right) \tag{3.14}$$

Estimation $x^{(0)} = 1$. Itérativement, nous obtenons :

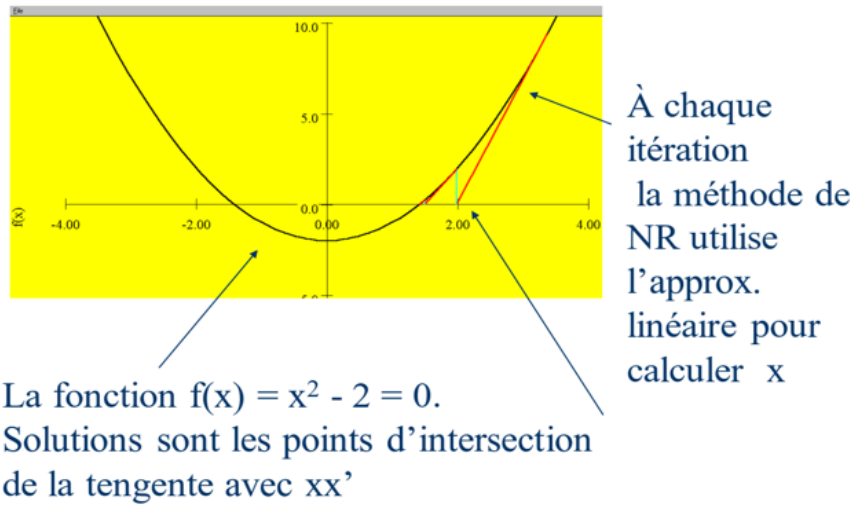


Figure 3.2: Graphique de la fonction

3.7.4 Interprétation sur Newton-Raphson

— Proche de la solution, l'erreur décroit rapidement, la méthode est de convergence quadratique.

— $f(x^{(k)})$ est connu par "mismatch", qui doit être conduit à zéro.

— Critère de convergence quand $\|f(x^{(k)})\| < \varepsilon$.

— Le résultat dépend de la condition initiale. [22]

3.7.5 Newthon-Raphson à plusieurs variables

Nous généralisons au cas où x est un vecteur à n dimensions et $f(x)$ est une fonction à n dimensions :

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}, \quad f(X) = \begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \\ \vdots \\ f_n(x) \end{bmatrix}$$

Aussi définir la solution $\hat{x}$ avec $f(\hat{x}) = 0$ et

$$\Delta x = \hat{x} - x \tag{3.15}$$

$$\begin{aligned} f_1(\hat{x}) = c_1 &= f_1(x) + \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_1}\Delta x_1 + \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_2}\Delta x_2 + \cdots + \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_n}\Delta x_n \\ &\vdots \\ f_n(\hat{x}) = c_n &= f_n(x) + \frac{\partial f_n(x)}{\partial x_1}\Delta x_1 + \frac{\partial f_n(x)}{\partial x_2}\Delta x_2 + \cdots + \frac{\partial f_n(x)}{\partial x_n}\Delta x_n \end{aligned} \tag{3.16}$$

Ceci peut être écrit en forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} c_1 - (f_1)^{(0)} \\ c_2 - (f_2)^{(0)} \\ \vdots \\ c_n - (f_n)^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1}^{(k)} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2}^{(k)} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n}^{(k)} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1}^{(k)} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2}^{(k)} & \cdots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n}^{(k)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1}^{(k)} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2}^{(k)} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n}^{(k)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(0)} \\ \Delta x_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta x_n^{(0)} \end{bmatrix}$$

Sous forme abrégée, cela peut s'écrire :

$$\Delta C^{(k)} = J^{(k)} \Delta x^{(k)} \tag{3.17}$$

L'équation peut être écrite comme suit :

$$\Delta x^{(k)} = \left[J^{(k)}\right]^{-1} \Delta C^{(k)} \tag{3.18}$$

L'algorithme de Newton-Raphson pour le cas à n dimensions devient :

$$X^{(k+1)} = X^{(k)} + \Delta X^{(k)} \tag{3.19}$$

Où :

$$\Delta X = \begin{bmatrix} \Delta X_1^{(k)} \\ \Delta X_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta X_n^{(k)} \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \Delta C = \begin{bmatrix} c_1 - (f_1)^{(k)} \\ c_2 - (f_2)^{(k)} \\ \vdots \\ c_n - (f_n)^{(k)} \end{bmatrix}$$

La matrice $n \times n$ des dérivées partielles est connue par la matrice jacobienne, $J^{(k)}$ [22].

$$J^{(k)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1}(k) & \frac{\partial f_1}{\partial x_2}(k) & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n}(k) \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1}(k) & \frac{\partial f_2}{\partial x_2}(k) & \cdots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n}(k) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1}(k) & \frac{\partial f_n}{\partial x_2}(k) & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n}(k) \end{bmatrix}$$

J est appelée la matrice jacobienne. Les éléments de cette matrice sont les dérivées partielles évaluées en $X^{(k)}$. On suppose que $J^{(k)}$ a un inverse à chaque itération, la méthode de Newton-Raphson, appliquée à un ensemble des équations non linéaires, réduit le problème à la résolution d'un ensemble des équations linéaires afin de déterminer les valeurs qui améliorent la précision des estimations.

La solution de (3.18) par inversion est très inefficace. Il n'est pas nécessaire d'obtenir l'inverse de $J^{(k)}$. Au lieu de cela, une solution directe est obtenue par factorisation triangulaire ordonnée de manière optimale. Dans MATLAB, la solution des équations linéaires simultanées $AC = J\Delta X$ est obtenue en utilisant l'opérateur de division matricielle, c'est-à-dire $\Delta X = J \backslash AC$, qui est basé sur la factorisation triangulaire et l'élimination [22].

Exemple :

En commençant par les valeurs initiales $x_1 = 1.2$, $x_2 = 1$, $x_3 = 1$, résolvez le système d'équations suivant par la méthode de Newton-Raphson :

$$\left\{ \begin{array}{r} x_1^2 - x_2^2 + x_3^2 = 11 \\ x_1 x_2 + x_2^2 - 3x_3 = 3 \\ x_1 - x_1 x_3 + x_2 x_3 = 6 \end{array} \right\} \tag{3.20}$$

Prendre les dérivées partielles des fonctions ci-dessous donne la matrice jacobienne :

$$J = \begin{bmatrix} 2x_1 & -2x_2 & 2x_3 \\ x_2 & x_1 + 2x_2 & -3 \\ 1 - x_3 & x_3 & -x_1 + x_2 \end{bmatrix}$$

Les déclarations suivantes résolvent le système d'équation donné par l'algorithme de Newton-Raphson [22].

```
Dx = [10 ; 10 ; 10] ;
x = [1 ; 3 ; 6] ;
C = [11 ; 3 ; 6] ;
iter = 0 ;
while max (abs (Dx)) >= .0001 & iter < 10;
    iter = iter + 1;
    F = [x(1)^2 - x(2)^2 + x(3)^2 ;
         x(1)*x(2) + x(2)^2 - 3*x(3) ;
         x(1) - x(1)*x(3) + x(2)*x(3)];
    DC = C - F ;
    J = [2*x(1) -2*x(2) 2*x(3) ;
         x(2) x(1)+ 2*x(2) -3 ;
         1-x(3) x(3) -x(1) +x(2)];
    Dx = J\DC ;
    x = x + Dx ;
end
```

les résultats de programme pour la première itération sont :

$$DC = \begin{bmatrix} 10 \\ 4 \\ 5 \end{bmatrix} \qquad J = \begin{bmatrix} 2 & -2 & 2 \\ 1 & 3 & -3 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$Dx = \begin{bmatrix} 4.750 \\ 5.000 \\ 5.250 \end{bmatrix} \qquad x = \begin{bmatrix} 6.750 \\ 6.000 \\ 6.250 \end{bmatrix}$$

Après six itérations, la solution converge vers $x_1 = 2.000$, $x_2 = 3.000$, et $x_3 = 4.000$. La méthode de Newton-Raphson a l'avantage de converger quadratiquement lorsqu'on est

proche d'une racine. Cependant, des évaluations plus fonctionnelles sont nécessaires à chaque itération. Une limitation très importante est qu'elle ne converge généralement pas vers une solution à partir d'un point de départ arbitraire [22].

3.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous explorerons les équations Distflow de la méthode Baran et leur formulation et en étudier leur méthode de résoudre en utilisant la méthode de Newthon-Raphson combinée avec la matrice Jacobienne.

Chapitre 4

Simulation et analyse des résultats

4.1 Introduction

Les équations de Baran sont utilisées pour modéliser les flux de puissance dans les réseaux de distribution électriques.
Les réseaux de distribution : 12,15 et 33 nœuds ont été proposés de notre sujet afin de calculer les tensions par trois techniques : la fonction Fsolve, la méthode de Newthon-Raphson (technique analytique et technique numérique).
Dans cette étude, on va utiliser MATLAB pour exécuter les programmes proposés par les dernières techniques et comparer entre leurs rapidités.

4.2 But général :

L'objectif principale de notre travail consiste à utiliser les équations distflow et les méthodes de résolution dans le but de calculer les tensions dans les réseaux électriques à 12 nœuds, 15 nœuds et 33 nœuds et comparer leurs rapidités par MATLAB.

4.3 Présentation des réseaux :

Pour notre cas d'étude, les réseaux proposés sont des systèmes radiaux de distribution, avec 12 nœuds, 15 nœuds et 33 nœuds. On les réalisés par la méthode de Baran DistFlow.

4.3.1 Réseau de 12 nœuds :

Ce système est composé de 12 nœuds et de 11 branches comme indiqué dans la figure 4.1, Les données des bus, des lignes de ce système sont données dans le tableau 4.1 : [23]

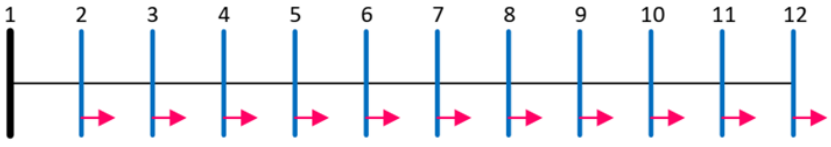


Figure 4.1: Diagramme unifilaire du système radial à 12 nœuds

Tableau 4.1: Données pour le système radial à 12 nœuds.

Branche	***Nœud i***	***Nœud j***	$R(p.u)$	$X(p.u)$	$P_L(KW)$	$Q_L(Kvar)$
1	1	2	0.9033	0.3760	60	60
2	2	3	0.9785	0.4083	40	30
3	3	4	1.7314	0.7215	55	55
4	4	5	2.6347	1.0983	30	30
5	5	6	0.9033	0.3760	20	15
6	6	7	0.8281	0.3446	55	55
7	7	8	3.6388	1.0041	45	45
8	8	9	4.6628	1.3198	40	40
9	9	10	2.3884	0.6760	35	30
10	10	11	1.2512	0.3537	40	30
11	11	12	1.0231	0.2901	15	15

Avec : S base=100 MVA et V base = 11 kV

4.3.2 Réseau de 15 nœuds :

Ce système est composé de 15 nœuds et de 14 branches comme indiqué dans la figure 4.2, Les données des bus, les données des lignes de ce système sont données dans le Tableau 4.2 . [24]

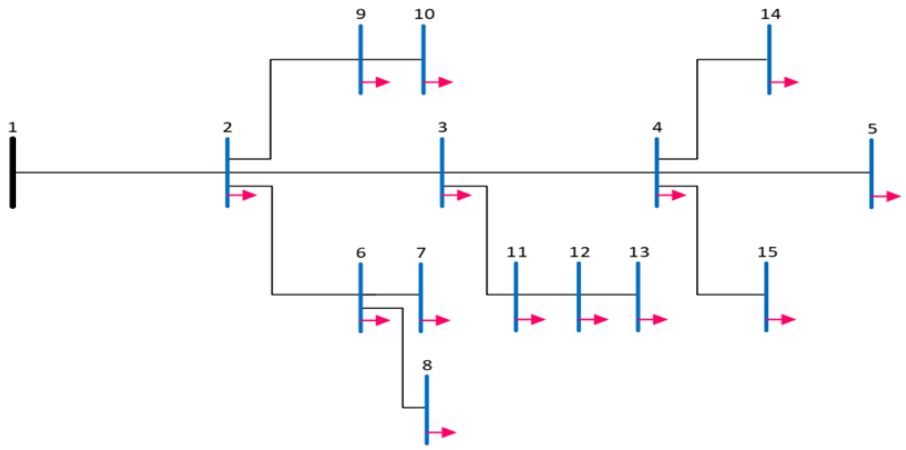


Figure 4.2: Diagramme unifilaire du système radial à 15 nœuds

Tableau 4.2: Données pour le système radial à 15 nœuds.

Branche	***Nœud i***	***Nœud j***	$R(p.u)$	$X(p.u)$	$P_L(KW)$	$Q_L(Kvar)$
1	1	2	1.1183	1.0938	44.1	45.0
2	2	3	0.9671	0.9460	70.0	71.4
3	3	4	0.6951	0.6799	140.0	142.8
4	4	5	1.2591	0.8493	44.1	45.0
5	2	9	1.6638	1.1222	70.0	71.4
6	9	10	1.3940	0.9402	44.1	45.0
7	2	6	2.1134	1.4255	140.0	142.8
8	6	7	0.8993	0.6066	140.0	142.8
9	6	8	1.0342	0.6976	70.0	71.4
10	3	11	1.4839	1.0009	140.0	142.8
11	11	12	2.0235	1.3649	70.0	71.4
12	12	13	1.6638	1.1222	44.1	45.0
13	4	14	1.8436	1.2436	70.0	71.4
14	4	15	0.9893	0.6673	140.0	142.8

Avec : S base=100 MVA et V base = 11kV

4.3.3 Réseau de 33 nœuds :

Ce système est composé de 33 nœuds et 32 branches comme indiqué dans la Figure 4.3, Les données des bus, les données des lignes de ce système sont données dans le Tableau 4.3 : [24]

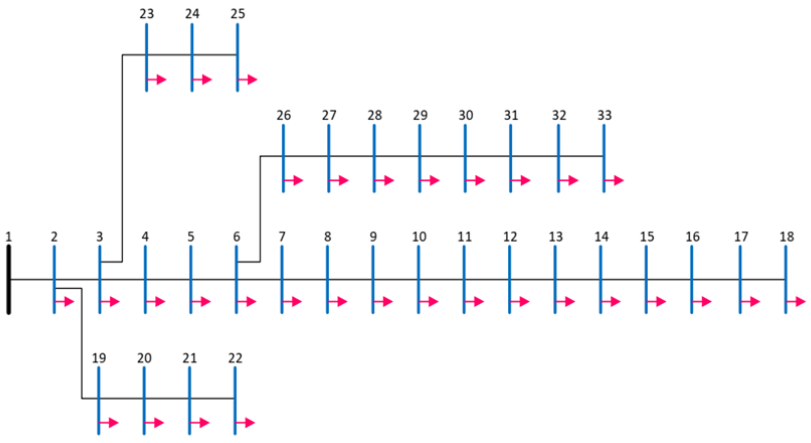


Figure 4.3: Diagramme unifilaire du système radial à 33 nœuds

Tableau 4.3: Données pour le système radial à 33 nœuds.

Branche	***Nœud i***	***Nœud j***	$R(p.u)$	$X(p.u)$	$P_L(KW)$	$Q_L(Kvar)$
1	1	2	0.0575	0.0293	100	60
2	2	3	0.3076	0.1567	90	40
3	3	4	0.2284	0.1163	120	80
4	4	5	0.2378	0.1211	60	30
5	5	6	0.5110	0.4411	60	20
6	6	7	0.1168	0.3861	200	100
7	7	8	0.4439	0.1467	200	100
8	8	9	0.6426	0.4617	60	20
9	9	10	0.6514	0.4617	60	20
10	10	11	0.1227	0.0406	45	30
11	11	12	0.2336	0.0472	60	35
12	12	13	0.9159	0.7206	60	35
13	13	14	0.3379	0.4448	120	80
14	14	15	0.3687	0.3282	60	10
15	15	16	0.4656	0.3400	60	20
16	16	17	0.8042	0.0738	60	20
17	17	18	0.4567	0.3581	90	40
18	2	19	0.1023	0.0976	90	40
19	19	20	0.9385	0.8457	90	40
20	20	21	0.2555	0.2985	90	40
21	21	22	0.4423	0.5848	90	40
22	3	23	0.2815	0.1924	90	50
23	23	24	0.5603	0.4424	420	200
24	24	25	0.5590	0.4374	420	200
25	6	26	0.1267	0.0645	60	25
26	26	27	0.1773	0.0903	60	25
27	27	28	0.6607	0.5826	60	20
28	28	29	0.5018	0.4371	120	70
29	29	30	0.3166	0.1613	200	600
30	30	31	0.6080	0.6008	150	70
31	31	32	0.1937	0.2258	210	100
32	32	33	0.2128	0.3308	60	40

Avec : S base=100 MVA et V base = 12.66 kv

4.4 Partie De Simulation :

Le principe de la méthode des équations Distflow est de résoudre les équations non linéaires suivantes : On a : $F(\hat{x}) = 0$ tel que :

$$F = \left\{ \begin{array}{ll} f(p) & = P_{i+1} - P_i + r_i \left(\frac{P_i^2+Q_i^2}{V_i^2} \right) + P_{Li+1} \\ g(q) & = Q_{i+1} - Q_i + x_i \left(\frac{P_i^2+Q_i^2}{V_i^2} \right) + Q_{Li+1} \\ h(v) & = (V_{i+1}^2 - V_i^2) + 2(r_i P_i + x_i Q_i) - (r_i^2 + x_i^2) \left(\frac{P_i^2+Q_i^2}{V_i^2} \right) \end{array} \right\} = 0 \qquad (4.1)$$

En premier, on a utilisé la fonction fsolve intégrée dans MATLAB. Deuxièmes, on utilise la méthode de Newton-Raphson où les dérivées du Jacobien sont calculées de deux manières, la technique numérique et analytique.

- Pour la technique numérique le principe est simple Pour une fonction f sa dérivée en X_0 est :

$$\left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=x_0} = \frac{f(x_0 + h) - f(x_0)}{h}$$

avec h est le pas (qui est de l'ordre de 0.001)

- Quant aux dérivées analytiques leurs principes est le suivant :

$$J^{(k)} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right)^{(k)} & \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right)^{(k)} & \cdots & \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right)^{(k)} \\ \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_1} \right)^{(k)} & \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_2} \right)^{(k)} & \cdots & \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_n} \right)^{(k)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_1} \right)^{(k)} & \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_2} \right)^{(k)} & \cdots & \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_n} \right)^{(k)} \end{bmatrix}$$

4.4.1 Résultats de simulation :

Le scripte MATLAB de la fonction Distflow et pour le réseau 12 nœuds est donné ci-dessous :
- Pour le système de 12 nœuds : Le système d'équation non linéaire en Matlab est :

F=[...
p(2)-p(1)+pl(2)+(r(1)*(p(1)^2 + $q(1)^2$)/$v(1)^2$)
q(2)-q(1)+ql(2)+(x(1)*(p(1)^2 + $q(1)^2$)/$v(1)^2$)
(v(2)^2 − $v(1)^2$) + 2 ∗ ($r(1) * p(1) + x(1) * q(1)$) − ($r(1)^2 + x(1)^2$) ∗ (($p(1)^2 + q(1)^2$)/$v(1)^2$)

p(3)-p(2)+pl(3)+(r(2)*(p(2)^2 + $q(2)^2$)/$v(2)^2$)
q(3)-q(2)+ql(3)+(x(2)*(p(2)^2 + $q(2)^2$)/$v(2)^2$)
(v(3)^2 − $v(2)^2$) + 2 ∗ ($r(2) * p(2) + x(2) * q(2)$) − ($r(2)^2 + x(2)^2$) ∗ (($p(2)^2 + q(2)^2$)/$v(2)^2$)

p(4)-p(3)+pl(4)+(r(3)*(p(3)^2 + $q(3)^2$)/$v(3)^2$)
q(4)-q(3)+ql(4)+(x(1)*(p(3)^2 + $q(3)^2$)/$v(3)^2$)
(v(4)^2 − $v(3)^2$) + 2 ∗ ($r(3) * p(3) + x(3) * q(3)$) − ($r(3)^2 + x(3)^2$) ∗ (($p(3)^2 + q(3)^2$)/$v(3)^2$)

p(5)-p(4)+pl(5)+(r(4)*(p(4)^2 + $q(4)^2$)/$v(4)^2$)
q(5)-q(4)+ql(5)+(x(4)*(p(4)^2 + $q(5)^2$)/$v(4)^2$)
(v(5)^2 − $v(4)^2$) + 2 ∗ ($r(4) * p(4) + x(4) * q(4)$) − ($r(4)^2 + x(4)^2$) ∗ (($p(4)^2 + q(4)^2$)/$v(4)^2$)

p(6)-p(5)+pl(6)+(r(5)*(p(5)^2 + $q(5)^2$)/$v(5)^2$)
q(6)-q(5)+ql(6)+(x(5)*(p(5)^2 + $q(5)^2$)/$v(5)^2$)
(v(6)^2 − $v(5)^2$) + 2 ∗ ($r(5) * p(5) + x(5) * q(5)$) − ($r(5)^2 + x(5)^2$) ∗ (($p(5)^2 + q(5)^2$)/$v(5)^2$)

p(7)-p(6)+pl(7)+(r(6)*(p(6)^2 + $q(6)^2$)/$v(6)^2$)
q(7)-q(6)+ql(7)+(x(6)*(p(6)^2 + $q(6)^2$)/$v(6)^2$)
(v(7)^2 − $v(6)^2$) + 2 ∗ ($r(6) * p(6) + x(6) * q(6)$) − ($r(6)^2 + x(6)^2$) ∗ (($p(6)^2 + q(6)^2$)/$v(6)^2$)

p(8)-p(7)+pl(8)+(r(7)*(p(7)^2 + $q(7)^2$)/$v(7)^2$)
q(8)-q(7)+ql(8)+(x(7)*(p(7)^2 + $q(7)^2$)/$v(7)^2$)
(v(8)^2 − $v(7)^2$) + 2 ∗ ($r(7) * p(7) + x(7) * q(7)$) − ($r(7)^2 + x(7)^2$) ∗ (($p(7)^2 + q(7)^2$)/$v(7)^2$)

p(9)-p(8)+pl(9)+(r(8)*(p(8)^2 + $q(8)^2$)/$v(8)^2$)
q(9)-q(8)+ql(9)+(x(8)*(p(8)^2 + $q(8)^2$)/$v(8)^2$)
(v(9)^2 − $v(8)^2$) + 2 ∗ ($r(8) * p(8) + x(8) * q(8)$) − ($r(8)^2 + x(8)^2$) ∗ (($p(8)^2 + q(8)^2$)/$v(8)^2$)

p(10)-p(9)+pl(10)+(r(9)*(p(9)^2 + $q(9)^2$)/$v(9)^2$)
q(10)-q(9)+ql(10)+(x(9)*(p(9)^2 + $q(9)^2$)/$v(9)^2$)

$(\mathrm{v}(10)^2 - v(9)^2) + 2 * (r(9) * p(9) + x(9) * q(9)) - (r(9)^2 + x(9)^2) * ((p(9)^2 + q(9)^2)/v(9)^2)$

p(11)-p(10)+pl(11)+(r(10)*(p(10)^2 + $q(10)^2$)/$v(10)^2$)
q(11)-q(10)+ql(11)+(x(10)*(p(10)^2 + $q(10)^2$)/$v(10)^2$)
$(\mathrm{v}(11)^2 - v(10)^2) + 2 * (r(10) * p(10) + x(10) * q(10)) - (r(10)^2 + x(10)^2) * ((p(10)^2 + q(10)^2)/v(10)^2)$

p(11)-pl(12)+(r(11)*(p(11)^2 + $q(11)^2$)/$v(11)^2$)
q(11)-ql(12)+(x(11)*(p(11)^2 + $q(11)^2$)/$v(11)^2$)
$(\mathrm{v}(12)^2 - v(11)^2) + 2 * (r(11) * p(11) + x(11) * q(11)) - (r(11)^2 + x(11)^2) * ((p(11)^2 + q(11)^2)/v(11)^2)$

];

Ensuite, on a résoudre les mêmes équations par la méthode de Newthon-Raphson ou les dérivés de jacobien sont calculés analytiquement (par MATLAB) comme suite :

$$\begin{bmatrix} \left(\frac{\partial f_1}{\partial p_1}\right)\left(\frac{\partial f_1}{\partial p_2}\right)\dots\left(\frac{\partial f_1}{\partial p_n}\right)\left(\frac{\partial f_1}{\partial q_1}\right)\left(\frac{\partial f_1}{\partial q_2}\right)\dots\left(\frac{\partial f_1}{\partial q_n}\right)\left(\frac{\partial f_1}{\partial v_1}\right)\left(\frac{\partial f_1}{\partial v_2}\right)\dots\left(\frac{\partial f_1}{\partial v_n}\right)\dots\left(\frac{\partial f_1}{\partial x_n}\right) \\ \vdots \\ \left(\frac{\partial f_2}{\partial p_1}\right)\left(\frac{\partial f_2}{\partial p_2}\right)\dots\left(\frac{\partial f_2}{\partial p_n}\right)\left(\frac{\partial f_2}{\partial q_1}\right)\left(\frac{\partial f_2}{\partial q_2}\right)\dots\left(\frac{\partial f_2}{\partial q_n}\right)\left(\frac{\partial f_2}{\partial v_1}\right)\left(\frac{\partial f_2}{\partial v_2}\right)\dots\left(\frac{\partial f_2}{\partial v_n}\right)\dots\left(\frac{\partial f_2}{\partial x_n}\right) \\ \vdots \\ \left(\frac{\partial f_n}{\partial p_n}\right)\left(\frac{\partial f_n}{\partial p_n}\right)\dots\left(\frac{\partial f_n}{\partial p_n}\right)\left(\frac{\partial f_n}{\partial q_n}\right)\left(\frac{\partial f_n}{\partial q_n}\right)\dots\left(\frac{\partial f_n}{\partial q_n}\right)\left(\frac{\partial f_n}{\partial v_n}\right)\left(\frac{\partial f_n}{\partial v_n}\right)\dots\left(\frac{\partial f_n}{\partial v_n}\right)\dots\left(\frac{\partial f_n}{\partial x_n}\right) \end{bmatrix}$$

Exemple réseau 12 nœuds :

$$\begin{bmatrix} \left(\frac{\partial f_1}{\partial p_1} = -1 + \frac{2r_i \times p_i}{v_i^2}\right)\left(\frac{\partial f_1}{\partial p_2} = 1\right)\left(\frac{\partial f_1}{\partial q_1} = \frac{2r_1 \times q_1}{v_1^2}\right)\left(\frac{\partial f_1}{\partial v_1} = 0\right) \\ \vdots \\ \left(\frac{\partial f_2}{\partial p_1} = \frac{2x_1 \times p_1}{v_1^2}\right)\left(\frac{\partial f_2}{\partial q_1} = -1 + \frac{2x_1 \times q_1}{v_1^2}\right)\left(\frac{\partial f_2}{\partial q_2} = 1\right)\left(\frac{\partial f_2}{\partial v_1} = 0\right) \\ \left(\frac{\partial f_3}{\partial p_1} = 2r_1 - (r_1^2 + x_1^2) \times \frac{2p_1}{v_1^2}\right)\left(\frac{\partial f_3}{\partial q_1} = 2x_1 - (r_1^2 + x_1^2) \times \frac{2q_1}{v_1^2}\right)\left(\frac{\partial f_3}{\partial v_1} = 0\right)\left(\frac{\partial f_1}{\partial v_2} = 2v_2\right) \\ \vdots \\ \left(\frac{\partial f_n}{\partial p_n}\right)\left(\frac{\partial f_n}{\partial p_n}\right)\dots\left(\frac{\partial f_n}{\partial p_n}\right)\left(\frac{\partial f_n}{\partial q_n}\right)\left(\frac{\partial f_n}{\partial q_n}\right)\dots\left(\frac{\partial f_n}{\partial q_n}\right)\left(\frac{\partial f_n}{\partial v_n}\right)\left(\frac{\partial f_n}{\partial v_n}\right)\dots\left(\frac{\partial f_n}{\partial v_n}\right)\dots\left(\frac{\partial f_n}{\partial x_n}\right) \end{bmatrix}$$

Pour les trois techniques nous obtenus les résultats suivants :

Tableau 4.4: Résultats de système de 12 nœuds

Branche	**Nœud i**	**Nœud j**	**Voltage** (p.u)
1	1	2	0.9943
2	2	3	0.9890
3	3	4	0.9806
4	4	5	0.9698
5	5	6	0.9665
6	6	7	0.9637
7	7	8	0.9653
8	8	9	0.9473
9	9	10	0.9445
10	10	11	0.9436
11	11	12	0.9434

Pour le système de 15 et 33 Nœuds : Puisqu'ils sont des systèmes plus compliqués que le système de 12 nœuds, nous avons utilisés les équations suivantes :

$$P_j = P_i - r_i \left(\frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \right) - P_{Li+1} - \sum_{k \in w_i} p_k \tag{4.2}$$

(w_i est l'indice des Nœud des ligne connectés à la ligne i)

$$f(i) = \sum_{k \in w_i} p_k - P_i - r_i \left(\frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \right) - P_{Li+1} \tag{4.3}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \dfrac{\partial f_i}{\partial p_i} = -1 + \dfrac{2 r_i p_i}{v_i^2} \\ \dfrac{\partial f_i}{\partial p_k} = 1 \\ \dfrac{\partial f_i}{\partial q_i} = -1 + \dfrac{2 r_i q_i}{v_i^2} \\ \dfrac{\partial f_i}{\partial v_i} = -2 r_i \dfrac{p_i^2 + q_i^2}{v_i^3} \end{array} \right\} \quad (k \neq i, k \in w_i) \tag{4.4}$$

Les autres dérivés sont nuls. La fonction $g(i)$ est définie comme suit :

$$g(i) = \sum_{k \in w_i} Q_k - Q_i - x_i \left(\frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \right) - Q_{L(i+1)} \tag{4.5}$$

Les dérivées partielles de $g(i)$ sont :

$$\left\{\begin{array}{l} \dfrac{\partial g_i}{\partial Q_i} = \dfrac{2x_i Q_i}{V_i^2} \\ \dfrac{\partial g_i}{\partial Q_i} = -1 + 2x_i \dfrac{{P_i}^2 + {Q_i}^2}{V_i^2} \\ \dfrac{\partial g_i}{\partial P_i} = 1 \\ \dfrac{\partial g_i}{\partial V_i} = -2x_i \dfrac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^3} \end{array}\right\} \quad (k \neq i, k \in w_i) \tag{4.6}$$

Les autres dérivés sont nuls.

$$h(i) = V_{i+1}^2 - V_i^2 + 2(r_i P_i + x_i Q_i) - (r_i^2 + x_i^2)\left(\frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2}\right) \tag{4.7}$$

$$\left\{\begin{array}{l} \dfrac{\partial h_i}{\partial P_i} = 2r_i - \left(r_i^2 + x_i^2\right)\dfrac{2P_i}{V_i^2} \\ \dfrac{\partial h_i}{\partial Q_i} = 2x_i - \left(r_i^2 + x_i^2\right)\dfrac{2Q_i}{V_i^2} \\ \dfrac{\partial h_i}{\partial V_i} = -2V_i + \left(r_i^2 + x_i^2\right)\dfrac{2(P_i^2 + Q_i^2)}{V_i^3} \\ \dfrac{\partial h_i}{\partial V_{i+1}} = 2V_{i+1} \end{array}\right\} \tag{4.8}$$

Les autres dérivés sont nuls.

Selon ces dernières équations nous obtenus les résultats indiqués ci-dessous :

Tableau 4.5: Résultats de système de 15 nœuds

Branche	**Nœud i**	**Nœud j**	**Voltage** (p.u)
1	1	2	0.9804
2	2	3	0.9704
3	3	4	0.9664
4	4	5	0.9658
5	2	9	0.9781
6	9	10	0.9773
7	2	6	0.9714
8	6	7	0.9699
9	6	8	0.9705
10	3	11	0.9658
11	11	12	0.9630
12	12	13	0.9621
13	4	14	0.9649
14	4	15	0.9648

Tableau 4.6: Résultats de système de 33 nœuds

Branche	**Nœud i**	**Nœud j**	**Voltage** (p.u)
1	1	2	0.9970
2	2	3	0.9829
3	3	4	0.9755
4	4	5	0.9681
5	5	6	0.9497
6	6	7	0.9462
7	7	8	0.9413
8	8	9	0.9351
9	9	10	0.9292
10	10	11	0.9284
11	11	12	0.9269
12	12	13	0.9208
13	13	14	0.9185
14	14	15	0.9171
15	15	16	0.9157
16	16	17	0.9137
17	17	18	0.9131
18	2	19	0.9965
19	19	20	0.9929
20	20	21	0.9922
21	21	22	0.9916
22	3	23	0.9794
23	23	24	0.9727
24	24	25	0.9694
25	6	26	0.9477
26	26	27	0.9452
27	27	28	0.9337
28	28	29	0.9255
29	29	30	0.9220
30	30	31	0.9178
31	31	32	0.9169
32	32	33	0.9166

4.5 Comparaison entre les trois techniques :

A travers les résultats obtenus, on trouve :

Pour le réseau 12 Nœuds :

Tableau 4.7: Temps de simulation de réseau 12 nœuds.

Les techniques de calcule	Fsolve	Technique Analytique	Technique numérique
Temps de simulation	0.233768	0.024724	0.012328

Pour le réseau 15 Nœuds :

Tableau 4.8: Temps de simulation de réseau 15 nœuds.

Les techniques de calcule	Fsolve	Technique Analytique	Technique numérique
Temps de simulation	0.263119	0.198132	0.187221

D'après la comparaison entre les résultats des trois techniques, on conclut qu'il y a une différence de temps de simulation tel que la méthode de Newthon-Raphson été plus rapide que la fonction Fsolve intégrée dans MATLAB, et selon la comparaison entre les deux techniques de la méthode de Newthon-Raphson on trouve que la technique numérique est plus rapide à l'analytique.

4.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, on a présenté les équations Distflow et les techniques de résolution utilisées pour calculer les tensions dans les réseaux de distribution électrique à 12, 15 et 33 nœuds. En utilisant MATLAB, nous allons mettre en œuvre les programmes basés sur la méthode de Newton-Raphson (technique analytique et numérique) pour résoudre ces équations et comparer la rapidité de chaque technique.
Cette étude vise à évaluer l'efficacité des différentes approches de résolution et à fournir des informations précieuses sur la performance de chaque méthode dans le contexte spécifique des réseaux de distribution électrique.

Conclusion Générale

Parmi les solutions qui répandent le problème des pertes de puissance et d'énergie électrique dans les réseaux de distribution nous avons vu des nouvelles techniques de calcule d'écoulement de puissance.

Dans le cadre de notre projet, nous avons tout d'abord présenté une introduction générale aux réseaux électriques, en abordant les concepts de base et les notions liées à leurs différentes structures et topologies.

Ensuite, nous avons abordé le sujet de l'écoulement de puissance, ainsi que ses méthodes qui sont utilisées pour modéliser et analyser la manière dont l'électricité circule à travers un réseau électrique. La méthode du Baran qui largement utilisée dans la modélisation d'écoulement de puissance,

Se base sur les équations Distflow est utilisée pour résoudre les problèmes des réseaux radiaux, ces équations calculent les trois grandeurs essentielles puissance active P, puissance réactive Q et la tension V.

Dans ce travail on la résoudre par trois techniques de calcule :la fonction fsolve intégrée dans Matlab, la méthode de Newthon -Raphson ou les dérivés du jacobien sont calculées de deux manières, la technique analytique et la technique numérique ou on les appliquées sur les réseaux suivants : 12, 15 et 33 nœuds.

Par conséquent, nous avons pu atteindre nos objectifs tracés en trouvant la méthode qui nous permet d'obtenir les résultats plus rapidement manuellement sans utiliser MATLAB. Dans le future, l'utilisation de langage de simulation plus rapide sera proposée tel que C , C++, Python etc.. .

Bibliographie

[1] Bencheikh Abdelhak and Derouiche Abdelghani. Etude de l'écoulement de puissance sur un réseau électrique en présence des systèmes facts. Master académique, Université Kasdi Merbah Ouargla, Juin 2016.

[2] ME Baran and FF Wu. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1989.

[3] Dr. Wael AMOR. *Écoulement de puissance pour les réseaux de grande dimension et mal-conditionnés.* PhD thesis, Université de Montréal, Montréal, LE 1 AOUT 2018, 2018.

[4] Zaouali Sami Chiheb Eddine Rouag Oussama Siradj Eddine. Les méthodes de l'écoulement de puissance, 2020/2021.

[5] Dr. DINE Mohamed. *Cour De Dimensionnement des réseaux électriques industriels.* Université Yahia Fares de Médéa.

[6] Ahmed Ould Nagi. Optimisation de l'écoulement de puissance par algorithmes : Ag et pso-tvac. Mémoire de fin d'etudes, Université Mohamed Khider Biskra, 2014.

[7] Théodore Wildi and Gilbert Sybille. *Électrotechnique.* Hydro-Québec, 3e edition, 2005.

[8] BENZERGA Islam Eddine and BOKHARI Mohamed Elmokhtar. Modélisation et résolution du problème d'écoulement de puissance en (ac) dans un système d'énergie électrique par un processus itératif. Master's thesis, Université de Médéa, 2019/2020.

[9] Thompson Adu. *Design and Implementation of a High Speed and Dependable Microprocessor Based Relay for Transmission Line Protection.* PhD thesis, University of Saskatchewan, Canada, 1993.

[10] Cong Duc PHAM. *Détection et localisation de défauts dans les réseaux de distribution HTA en présence de génération d'énergie dispersée.* PhD thesis, 19 septembre 2005.

[11] Nick Jenkins et coll. *Électrotechnique des énergies renouvelables et de la cogénération.* 2003.

[12] Dr. MERAHI Amir. *Analyse des réseaux de transports et de distribution I.* Université de Médéa, 2018/2019.

[13] TEGANI ILyes et DAHMANE Abdeslam. Optimisation multi objectif à base des algorithmes génétiques appliquée sur un réseau électrique. Mémoire de master, Université de Biskra, Algérie, Juin 2011.

[14] S. SAYAH. *Application de l'Intelligence Artificielle pour le Fonctionnement Optimal des Systèmes Electriques*. PhD thesis, 2000.

[15] M. A. Abo-Sinna et A. A. Mousa M. S. Osman. A solution to the optimal power flow using genetic algorithm. *Applied Mathematics and Computation*, 155(2) :391–405, août 2004.

[16] Y. Zoka et E. E. El-Araby M. Eghbal, N. Yorino. Application of multi-objective evolutionary optimization algorithms to reactive power planning problem. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 4(5) :625–632, 2009.

[17] Besseri Boubaker Achraf et Bentouati Mahfoud. Reconfiguration optimal des réseaux de distribution par l'optimisation convexe. Mémoire de fin d'étude de master, Université de Dr. Yahia Fares Médéa, 2018.

[18] Mathias Laffont. Pertes d'énergie dans les réseaux de distribution d'électricité. Master's thesis, Juin 2009.

[19] Jean-Claude Sabonnadière et Nourdine Hadjsaïd. *Lignes et réseaux électriques 2*. Lavoisier, 2007.

[20] Taibauoi Amel et Mihoub Hasna. La reconfiguration des réseaux électriques de distribution par la méthode de baran. Master's thesis, Université de Médéa, 2019/2020.

[21] Pr. Karim Sebaa. *Cour De Modélisation Et Optimisation Des Réseaux Electrique*. Université Yahia Fares de Médéa.

[22] Hadi Saadat. *Power System Analysis*, volume 1. McGraw-Hill Education, 2004.

[23] D. P. Kothari D. Das and A. Kalam. Simple and efficient method for load flow solution of radial distribution networks. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 1995.

[24] H. S. Nagi D. Das and D. P. Kothari. Novel method for solving radial distribution networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1994.