

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Electrique



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Réseaux électriques

Présenté par :

BEN MOUSSA Mohammed Lamine

LAKHAL Kheir Eddine

Thème :

Analyse de l'écoulement de puissance dans un réseau de distribution

Soumis au jury composé de :

M ^r Guehrrar Youssef	MAA	Président	UKM Ouargla
M ^r SADAOUI Fares	MCA	Encadreur/rapporteur	UKM Ouargla
M ^r BOUHADOUZA Boubekour	MAA	Examineur	UKM Ouargla

Année universitaire 2020/2021

Résumé :

Ce travail présenté l'étude du calcul de l'écoulement de puissance dans les réseaux de distribution qui sont caractérisés par leur taux R/X élevés et leur topologie radiale.

Ce calcul permis d'avoir le courant et la puissance transitée dans chaque jeu de barre, les pertes totales de puissance active et réactive et la tension de chaque jeu de barre.

Les méthodes itératives qu'on a appliquées sont basées sur le concept de balayage avant et arrière "*Backward forward sweep*". On a utilisé deux méthodes et appliqué les deux algorithmes concernés sur un réseau de distribution IEEE 33 bus à partir le logiciel Matlab.

Enfin, on a faire des comparaisons entre les résultats finaux au niveau de temps de calcul et de nombre d'itérations.

Abstract:

This work presented the study of the computation of power flow in distribution networks which are characterized by their high R / X rates and their radial topology.

This calculation made it possible to have the current and the power transmitted in each busbar, the total losses of active and reactive power and the voltage of each busbar.

The iterative methods we have applied are based on the concept of backward forward sweep. Two methods were used and the two algorithms concerned were applied to an IEEE 33 bus distribution network using the Matlab software.

Finally, one has to make comparisons between the final results at the level of computation time and number of iterations.

ملخص:

قدم هذا العمل دراسة حساب تدفق الطاقة في شبكات التوزيع التي تتميز بمعدلات R / X العالية وطوبولوجيتها الشعاعية.

أتاح هذا الحساب إمكانية نقل التيار والطاقة في كل قضيب ناقل، وإجمالي الخسائر في الطاقة النشطة والمتفاعلة والجهد لكل قضيب ناقل.

تعتمد الطرق التكرارية التي طبقتها على مفهوم المسح للأمام للخلف. تم استخدام طريقتين وتم تطبيق الخوارزميتين المعنيتين على شبكة توزيع ناقل IEEE 33 باستخدام برنامج Matlab.

أخيراً، يتعين على المرء إجراء مقارنات بين النتائج النهائية على مستوى وقت الحساب وعدد التكرارات.

Remerciements

Nous Tenons à remercier le bon dieu le tout puissant, qui nous à donner le courage
et la patience à fin de réaliser ce travail

Nous souhaitons de rendre hommage à notre encadreur « Mr SADAOUI Fares »
d'avoir accepté de nous encadrer et nous orienter

Je désire aussi remercier les professeurs de l'université de Kasdi Merbah, qui m'ont
fourni les outils nécessaires à la réussite de mes études universitaires.

DEDICACE

A mes chers parents

A mes chers frères Mounir,

A mes chères sœurs,

A ma famille et à tous mes amis

A mon cher ami Youssef Rehouma et GOUGUI Abdelmoumen

A mon binôme Kheir Eddine

Nomenclature :

JB : ref Jeu de barres de référence

JB : term Jeu de barres terminal

JB : com Jeu de barres commun

JB : inter Jeu de barres intermédiaire

ldata : Données des branche du réseau

busdata : Données des jeux de barres du réseau

P_i Puissance active sortante du jeu de barres i

Q_i Puissance réactive sortante du jeu de barres i

P_{i+1} Puissance active sortante du jeu de barres $i+1$

Q_{i+1} Puissance réactive sortante du jeu de barres $i+1$

PL_i Puissance active de la charge i branchée au jeu de barres i

QL_i Puissance réactive de la charge i branchée au jeu de barres i

JBD : Jeu de barres de départ de la même ligne mineure

JBT : Jeu de barres terminal de la même ligne mineure

JBD_{lsl} : Jeu de barres de départ de la même ligne sous-latérale

JBT_{lsl} : Jeu de barres terminal de la même ligne sous-latérale

JBD_{Ll} : Jeu de barres de départ de la même ligne latérale

JBT_{Ll} : Jeu de barres terminal de la même ligne latérale

JBT_{Pp} : Jeu de barres terminal de la ligne principale

$P_{Loss\ i}$ Pertes de puissance active au niveau de la branche i

$Q_{Loss\ i}$ Pertes de puissance réactive au niveau de la branche i

BIBC : Bus injection to brunch current matrix

BCBV: Branch current to bus voltage

Liste des figures

Chapitre 1 :

Figure 1.1 : Courbe de charge de la journée du 14 juin 2013, source OSE	3
Figure 1.2 : Les réseaux de distribution sont généralement basés sur une structure arborescente de réseau : à partir d'un poste source (en rouge), l'énergie parcourt l'artère ainsi que ses dérivations avant d'arriver aux postes de transformation HTA/BTB.	4
Figure 1.3 : structure générale d'un réseau privé de distribution	5
Figure 1.4 : alimentation simple antenne d'un poste de livraison HTB	7
Figure 1.5 : alimentation double antenne d'un poste de livraison HTB	8
Figure 1.6 : alimentation double antenne-double jeu de barres d'un poste de livraison HTB	9
Figure 1.7: alimentation en simple dérivation d'un poste de livraison HTA à comptage BT	10
Figure 1.8 : alimentation en coupure d'artère d'un poste de livraison HTA à comptage BT	11
Figure 1.9 : alimentation en double dérivation d'un poste de livraison HTA à comptage BT	12
Figure 1.10 : exemple de poste de livraison HTA à comptage HT	13

Chapitre 2 :

Figure 2.1 : Représentation des types des jeux de barres	19
Figure 2.2 : Représentation de deux nœuds d'un réseau de distribution.	21
Figure 2.3 – Réseau de distribution simple.	30

Chapitre 3 :

Figure. 3.1 : Réseau de distribution radial à 33 jeux de barres	36
Figure 3.2 : Pertes de puissance active dans les branches du réseau IEEE33-Bus	39
Figure 3.3: Pertes de puissance réactive dans les branches du réseau IEEE33-bus	39
Figure 3.4 : La tension dans les branches du réseau IEEE33-bus	40
Figure 3.5 : Pertes de puissance active dans les branches du réseau IEEE33-Bus	43
Figure 3.6: Pertes de puissance réactive dans les branches du réseau IEEE33-bus	44
Figure 3.7 : La tension dans les branches du réseau IEEE33-bus	44

Sommaire :

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre 01 : Généralités sur le réseau distribution

I.1 Introduction.....	2
I.2 Réseaux de distribution	2
I.3 Consommation.....	2
I.4 Caractéristiques techniques générales.....	3
I.5 Niveaux de tension.....	4
I.6 Structure générale d'un réseau privé de distribution.....	4
I.7 Architectures des postes.....	6
I.7.1 Les postes de livraison HTB.....	6
I.7.2 Les postes de livraison HTA.....	10
I.7.3 Les postes de livraison HTA à comptage BT.....	10
I.7.4 Les postes de livraison HTA à comptage HT.....	14
I.8 Conclusion.....	15

Chapitre 2 : Analyse d'écoulement de puissance

2.1. Introduction.....	17
2.2. Ecoulement de puissance du réseau de distribution radial.....	17
2.3. Le but de l'écoulement de puissance.....	18
2.4. Définition des types des jeux de barres.....	18
2.4.1. Jeu de barres terminal	19
2.4.2. Jeu de barres commun	19
2.4.3. Jeu de barres intermédiaire	19
2.5. Calcul de l'écoulement de puissance	20
2.5.1. Algorithmes d'écoulement de puissance.....	20

2.5.2. Algorithme de balayage avant et arrière.....	20
2.6. Équations de l'écoulement de puissance	21
2.6.1 Calcul des tensions des nœuds	21
2.6.2. Calcul des courants et des puissances transitées	23
2.6.2.1. Indentification du type des nœuds	23
2.6.2.2. Indentification et formation des lignes	24
2.6.2.3. Courant et puissances transitées dans des branches	25
2.6.3. Méthode directe de calcul d'écoulement de puissance	30
2.6.3.1. Principe de la méthode	30
2.6.3.2. Construction des matrices BIBC et BCBV	33
2.6.3.3. Pertes de puissance	33
2.7. Algorithmes de l'écoulement de puissance.....	34
2.7.1. Algorithme de balayage avant et arrière	34
2.7.2. Algorithme de la méthode direct d'écoulement de puissance.....	35
2.8. Conclusion	35

Chapitre 3 : Calcul de l'écoulement de puissance : Résultats et discussions.

3.1 Introduction.....	36
3.2 Validation de méthode avant et arrière (backward and forward sweep).....	37
3.2.1 Discussion des résultats (backward and forward sweep).....	40
3.3 Validation de la méthode directe	41
3.3.1 Discussion des résultats (direct).....	45
3.4 Conclusion	45
Conclusion Générale	47
ANNEXE	48
Bibliographies.....	50

Introduction Générale

Introduction générale :

L'apparition de grands ordinateurs numériques dans les années 1960 a ouvert la voie à des développements sans précédent dans l'analyse des systèmes électriques et à la disponibilité de l'énergie électrique plus fiable et plus économique avec un contrôle plus strict de la fréquence et de la tension du système.

Le premier objectif de l'analyse du système électrique est l'étude de l'écoulement de puissance qui consiste à déterminer les tensions du réseau de façon à avoir un équilibre entre la génération et la charge.

Ce mémoire sera composé de trois chapitres dans le premier on va donner une recherche bibliographique sur le réseau de distribution contient des définitions, caractéristiques et architectures ...etc. Dans le deuxième chapitre, on va modéliser les composantes du réseau électrique, présenter les méthodes de l'écoulement de puissance, faire deux algorithmes de la méthode balayage avant et arrière « *Backward and forward Sweep* » et la méthode directe de l'écoulement de puissance « *Direct load flow DLF* » successivement. Dans le troisième chapitre on va présenter les résultats de deux simulations des deux méthodes et faire une petite comparaison entre eux.

Généralités sur les réseaux distribution

Sommaire :

I.1 Introduction.....	2
I.2 Réseaux de distribution	2
I.3 Consommation.....	2
I.4 Caractéristiques techniques générales.....	3
I.5 Niveaux de tension.....	4
I.6 Structure générale d'un réseau privé de distribution.....	4
I.7 Architectures des postes.....	6
I.7.1 Les postes de livraison HTB.....	6
I.7.2 Les postes de livraison HTA.....	10
I.7.3 Les postes de livraison HTA à comptage BT.....	10
I.7.4 Les postes de livraison HTA à comptage HT.....	13
I.8 Conclusion.....	14

1.1 Introduction

Un réseau de distribution est généralement organisé radialement, chaque point de connexion au réseau de moyenne tension desservant un « arbre » se subdivisant à plusieurs reprises avant d'atteindre les transformateurs de distribution.

Ces réseaux radiaux se rejoignent en des points d'interconnexion normalement ouverts : ils permettent, au besoin, de fournir une source alternative d'électricité à une partie d'un réseau radial voisin, en cas de panne du tracé de desserte normal.

Dans ce chapitre, nous avons introduit la généralité sur le réseau de distribution, Caractéristiques techniques générales ainsi que les différents types des postes.

1.2 Réseaux de distribution

Les réseaux de distribution constituent l'architecture la plus importante du système électrique. Ils assurent la distribution de l'énergie électrique au niveau local. Leur tension est inférieure ou égale à 50 kV (HTA). Ils sont constitués de deux types de réseaux : le réseau moyen tension (MT) avec un niveau de 10 kV et 30 kV connecté au réseau de transport, et le réseau basse tension (BT) de tension de 0.4 kV [1].

Le réseau BT constitue le dernier maillon du système électrique. Ses tronçons sont raccordés au réseau MT dans des postes de transformation HTA/BT. Ces niveaux de tension offrent un compromis technico-économique qui permet à la fois, de diminuer les chutes de tension, de minimiser le nombre de postes source (poste de connexion HTB/HTA) mais également de limiter les contraintes techniques et économiques inhérentes aux hautes tensions.

1.3 Consommation

La production d'énergie thermique, lumineuse et mécanique sont les trois usages classiques de l'énergie électrique. Elles se retrouvent aussi bien chez les consommateurs résidentiels qu'industriels. Dans les réseaux, les consommateurs appelés charges sont caractérisées par leurs puissances active et réactive consommées. De ces puissances mesurées sur un certain intervalle de temps sont déduites les puissances maximales (de pointe) et moyennes. Par la mesure des courants dans les postes de transformation entre les

réseaux de transport et de distribution, des courbes de consommation appelées courbes de charge sont tracées pour connaître l'évolution des charges au cours du temps (figure 1.1) [2]. Elles permettent aux gestionnaires de réseau de prédire l'évolution de la consommation sur les réseaux et donc, entre autres, de définir les plans prévisionnels de production.

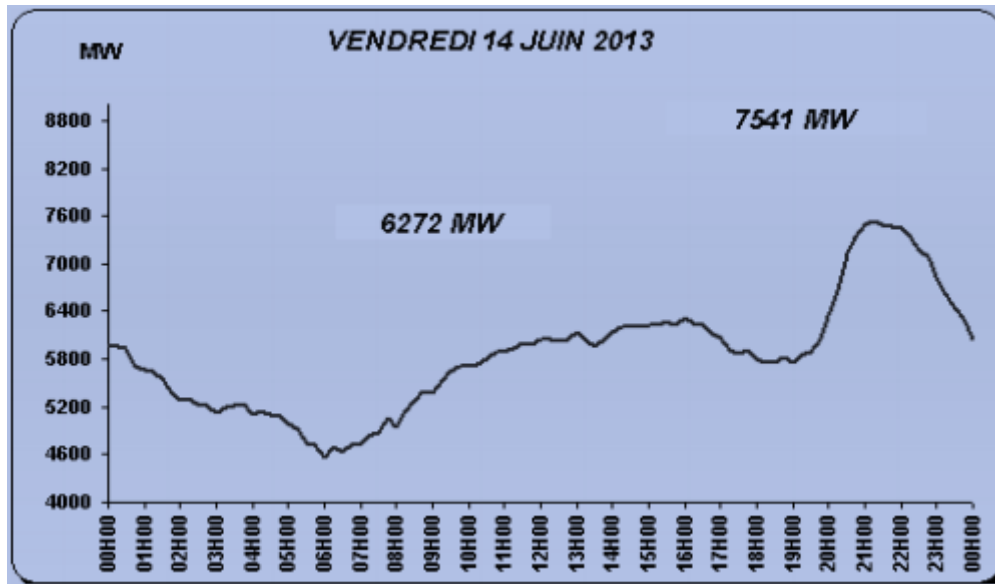


Figure 1.1 : Courbe de charge de la journée du 14 juin 2013, source OSE

1.4 Caractéristiques techniques générales

Les réseaux de distribution constituent l'infrastructure la plus importante du système électrique car c'est l'interface finale qui mène à la plupart des clients. Ils sont exploités dans des gammes de tensions inférieures à 50 kV, soit le domaine de la HTA et de la BT. En Algérie, la tension nominale des réseaux de distribution HTA est de 10 kV et 30 kV [3]. Ces niveaux de tension permettent un bon compromis pour limiter les chutes de tension, minimiser le nombre de postes source (poste de connexion HTB/HTA) et réduire les contraintes inhérentes aux hautes tensions (coûts des investissements, protection des biens et des personnes).

Les réseaux de distribution sont, dans la très grande majorité des cas, exploités de manière radiale. Cette structure simplifie notamment le système de protections puisque le transit de puissance se fait de manière unilatérale du poste source (HTB/HTA) vers les postes HTA/BT et les consommateurs finaux pour la détection et l'élimination rapide des

défauts et permet facilement d'assurer la maintenance du réseau, ainsi que le comptage de l'énergie aux postes sources. Des schémas d'exploitation de secours entre postes sources sont bien entendu prévus et permettent de minimiser le nombre de clients coupés en cas de défaillances.

1.5 Niveaux de tension

Les réseaux de distribution ont pour but d'alimenter l'ensemble des consommateurs. Il existe deux sous niveaux de tension :

- Les réseaux moyenne tension (anciennement MT devenu HTA de 1 à 50 kV) ;
- Les réseaux basse tension (BT de 50 à 1 000 V), sur lesquels sont raccordés les utilisateurs (entreprises et locaux d'habitations) "tarif à puissance limitée 12 kVA maxi en 230 V (60 A) et 36 KVA maxi en $230/400$ V (60 A) ou "tarif à puissance surveillée" en 400 V de 36 à 250 KVA (60 à 400 A)[4].

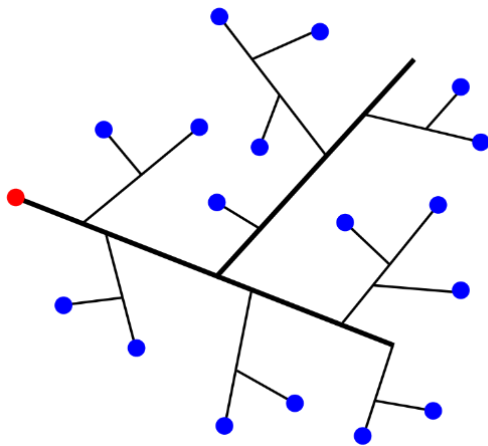


Figure 1.2 Les réseaux de distribution sont généralement basés sur une structure arborescente de réseau : à partir d'un poste source (en rouge), l'énergie parcourt l'artère ainsi que ses dérivations avant d'arriver aux postes de transformation HTA/BTB.

1.6. Structure générale d'un réseau privé de distribution

Dans le cas général avec une alimentation en HTB, un réseau privé de distribution comporte figure .1.3 [5].

- Un poste de livraison HTB alimenté par une ou plusieurs sources, il est composé d'un ou plusieurs jeux de barres et de disjoncteurs de protection
- Une source de production interne
- Un ou plusieurs transformateurs HTB / HTA

- Un tableau principal HTA composé d'un ou plusieurs jeux de barres
- Un réseau de distribution interne en HTA alimentant des tableaux secondaires ou des postes HTA / BT
- Des récepteurs HTA
- Des transformateurs HTA / BT
- Des tableaux et des réseaux basse tension
- Des récepteurs basses tensions.

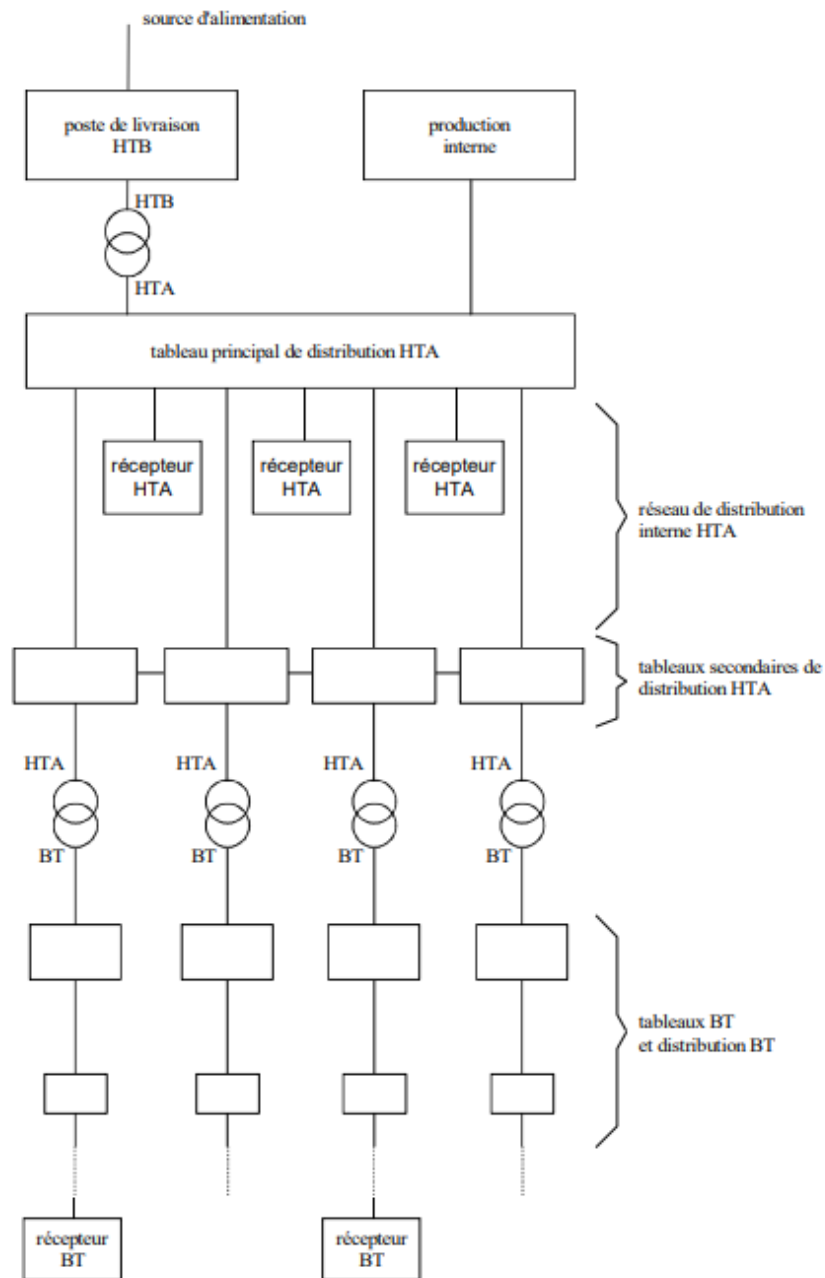


Figure 1-3 : structure générale d'un réseau privé de distribution

1.7. Équipements et architectures des postes

Dans une analyse globale d'un réseau électrique un poste est considéré comme une barre ou tout simplement un nœud où transitent des flux de puissances. Pour le désigne et la planification du réseau, ce poste constitue une pièce majeure dans le système de répartition ou de distribution, dans la mesure où c'est à ce niveau qui est organisée la configuration de la topologie du réseau, et c'est aussi un point de surveillance de contrôle et de protection.

Un poste électrique est un ensemble d'appareillage arrangé de sorte à :

- Faire transiter la puissance d'un niveau de tension à un autre, en général s'il s'agit d'un poste de répartition ou de distribution, le poste sert à baisser la tension ;
- Réglage de la tension, comptage de puissance, surveillance, . . . etc. Cet ensemble d'appareillage comporte :
- Des jeux de barres ;
- Des transformateurs ;
- Des disjoncteurs et sectionneurs (appareillage de coupure) ;
- Des compensateurs ;
- Appareillage de mesure et de comptage de puissance ;
- Autres.

1.7.1. Les postes de livraison HTB

Ils concernent généralement les puissances supérieures à 10 MVA. L'installation du poste de livraison est comprise entre:

- d'une part, le point de raccordement au réseau de distribution HTB
- d'autre part, la borne aval du ou des transformateurs HTB / HTA

Les schémas électriques des postes de livraison HTB les plus couramment rencontrés sont les suivants [5] :

- Simple antenne (voir fig. 1-4)

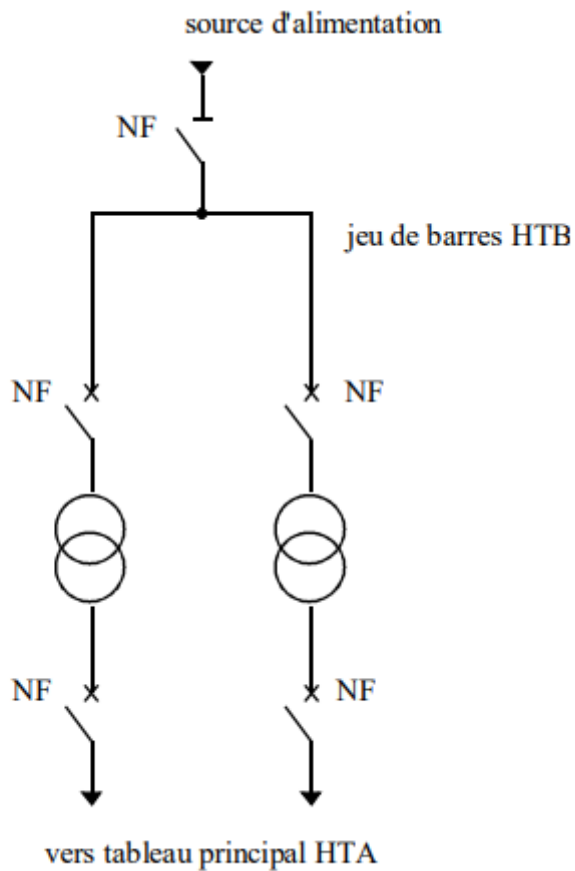


Figure 1.4 : alimentation simple antenne d'un poste de livraison HTB

Avantage : Coût minimal.

Inconvénient : Disponibilité faible.

- Double antenne (voir fig. 1-5)

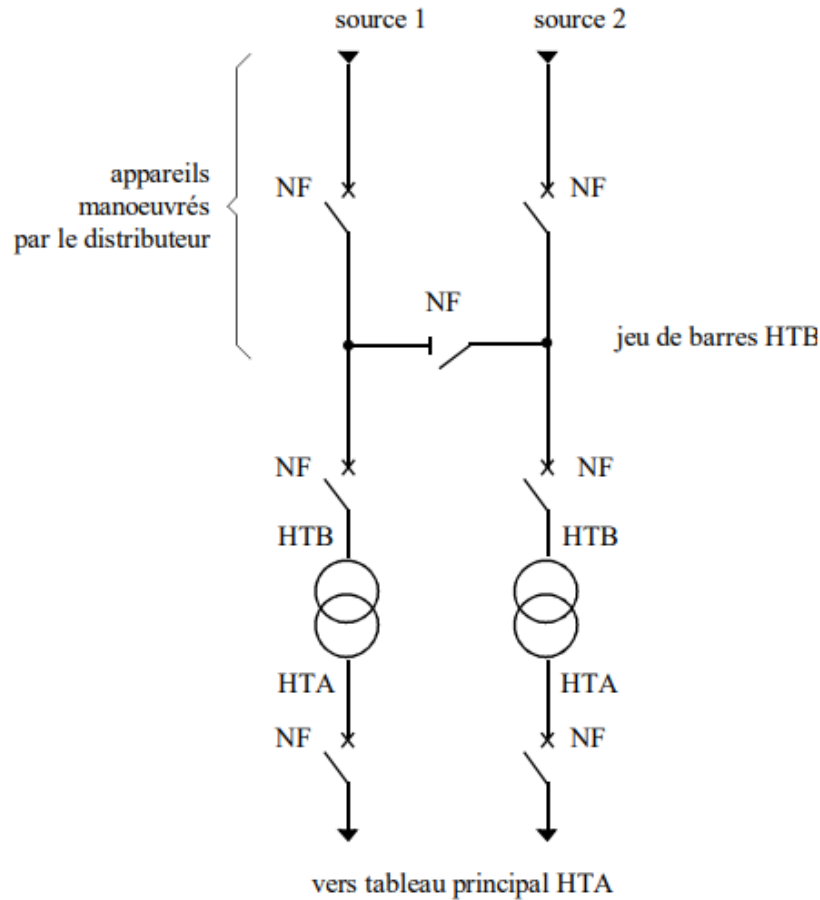


Figure 1.5 : alimentation double antenne d'un poste de livraison HTB

Mode d'exploitation:

- Normal : Les deux disjoncteurs d'arrivée des sources sont fermés, ainsi que le sectionneur de couplage. Les transformateurs sont donc alimentés par les 2 sources simultanément.
- Perturbé : En cas de perte d'une source, l'autre source assure la totalité de l'alimentation.

Avantages:

- Bonne disponibilité, dans la mesure où chaque source peut alimenter la totalité du réseau.
- Maintenance possible du jeu de barres, avec un fonctionnement partiel de celui-ci

Inconvénients:

- Solution plus coûteuse que l'alimentation simple antenne.
- Ne permet qu'un fonctionnement partiel du jeu de barres en cas de maintenance de celui-ci.
- Double antenne - double jeu de barres (voir fig. 1-6)

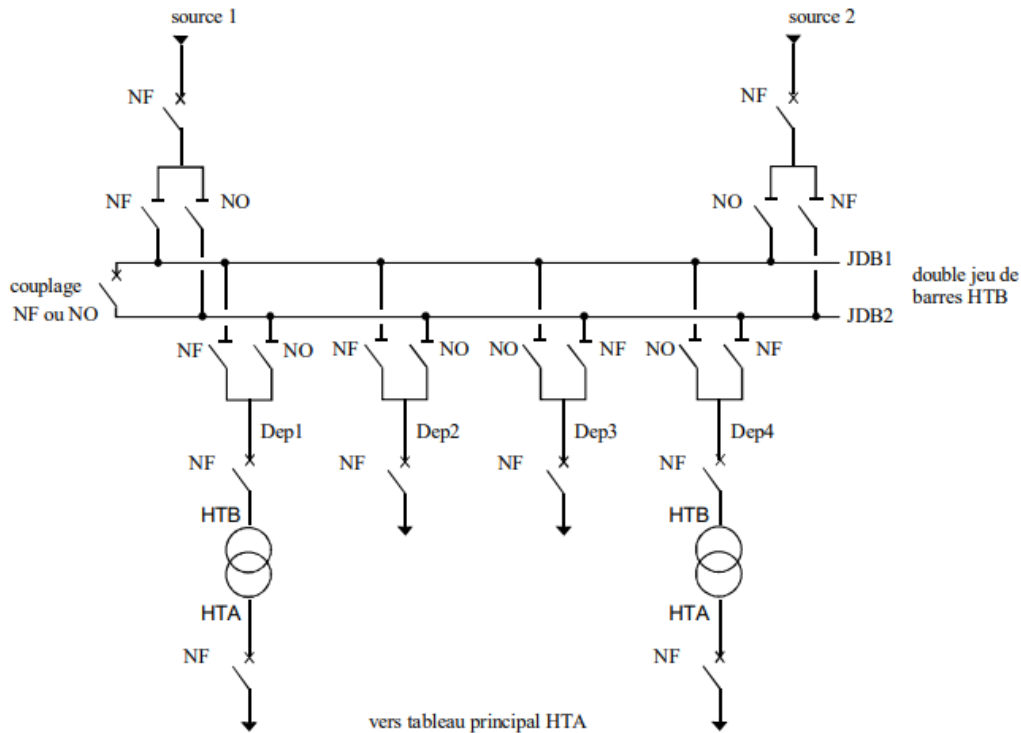


Figure 1.6 : alimentation double antenne - double jeu de barres d'un poste de livraison HTB

Mode d'exploitation:

- Normal : La source 1 alimente, par exemple, le jeu de barres JDB1 et les départs Dep1 et Dep2.
La source 2 alimente, par exemple, le jeu de barres JDB2 et les départs Dep3 et Dep4.
Le disjoncteur de couplage peut être maintenu fermé ou ouvert.
- Perturbé : En cas de perte d'une source, l'autre source assure la totalité de l'alimentation.
- En cas de défaut sur un jeu de barres (ou maintenance de celui-ci), le disjoncteur de couplage est ouvert et l'autre jeu de barres alimente la totalité des départs.

Avantages:

- Bonne disponibilité d'alimentation

- Très grande souplesse d'utilisation pour l'affectation des sources et des charges, et pour la maintenance des jeux de barres
- Possibilité de transfert de jeu de barres sans coupure (lorsque les jeux de barres sont couplés, il est possible de manœuvrer un sectionneur si son sectionneur adjacent est fermé.

Inconvénient:

- Surcoût important par rapport à la solution simple jeu de barres.

1.7.2. Les postes de livraison HTA

Ils concernent généralement les puissances comprises entre 250 kVA et 10 MVA.

En France, deux types de postes de livraison HTA existent selon que le comptage est effectué en BT ou en HTA [2].

1.7.3. Les postes de livraison HTA à comptage BT

En France, ils sont régis par la norme NF C 13-100, ils ne comportent qu'un seul transformateur dont le courant secondaire est inférieur ou égal à 2000 A, soit une puissance inférieure ou égale à 1250 kVA pour une tension composée de 400 V [2].

- *Simple dérivation (voir fig. 1-7)*

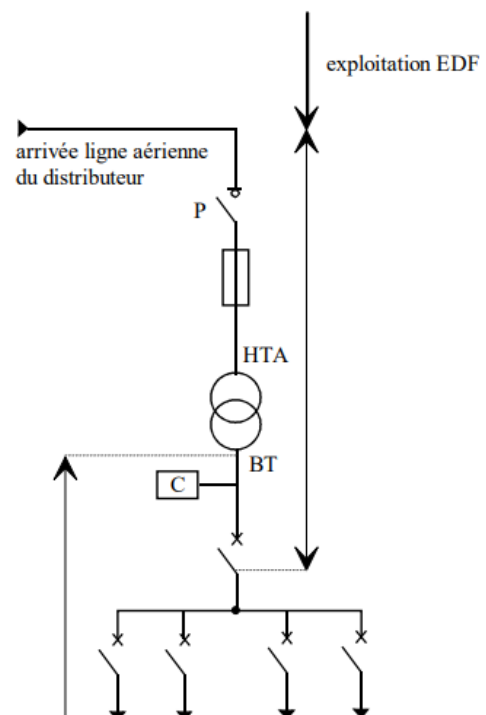


Figure 1.7 : alimentation en simple dérivation d'un poste de livraison HTA à comptage BT

La cellule protection générale P doit être un disjoncteur si le courant nominal est supérieur ou égal à 45 A (voir NF C 13-100 § 433.1). Ce type de poste est utilisé en général pour la distribution publique HTA en lignes aériennes, il comporte une seule source d'alimentation possible par le distributeur.

- *Coupure d'artère (voir fig. 1-8)*

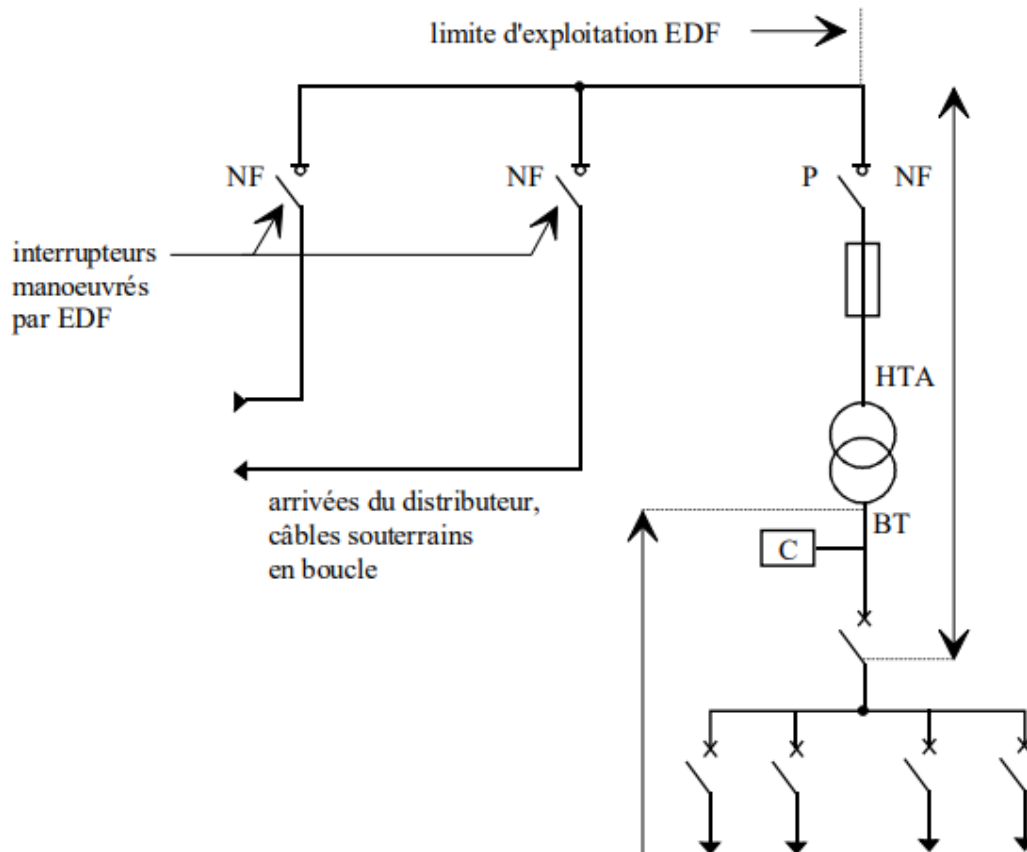


Figure 1.8 : alimentation en coupure d'artère d'un poste de livraison HTA à comptage BT

La cellule protection générale P doit être un disjoncteur si le courant nominal est supérieur ou égal à 45 A (voir NF C 13-100 § 433.1). Ce type de poste est utilisé pour la distribution publique HTA urbaine en réseaux souterrains, il permet à l'utilisateur de bénéficier d'une source d'alimentation fiable à partir de deux postes sources ou 2 départs HTA, ce qui limite les interruptions pour travaux ou en cas de panne.

- Double dérivation (voir fig. 1-9)

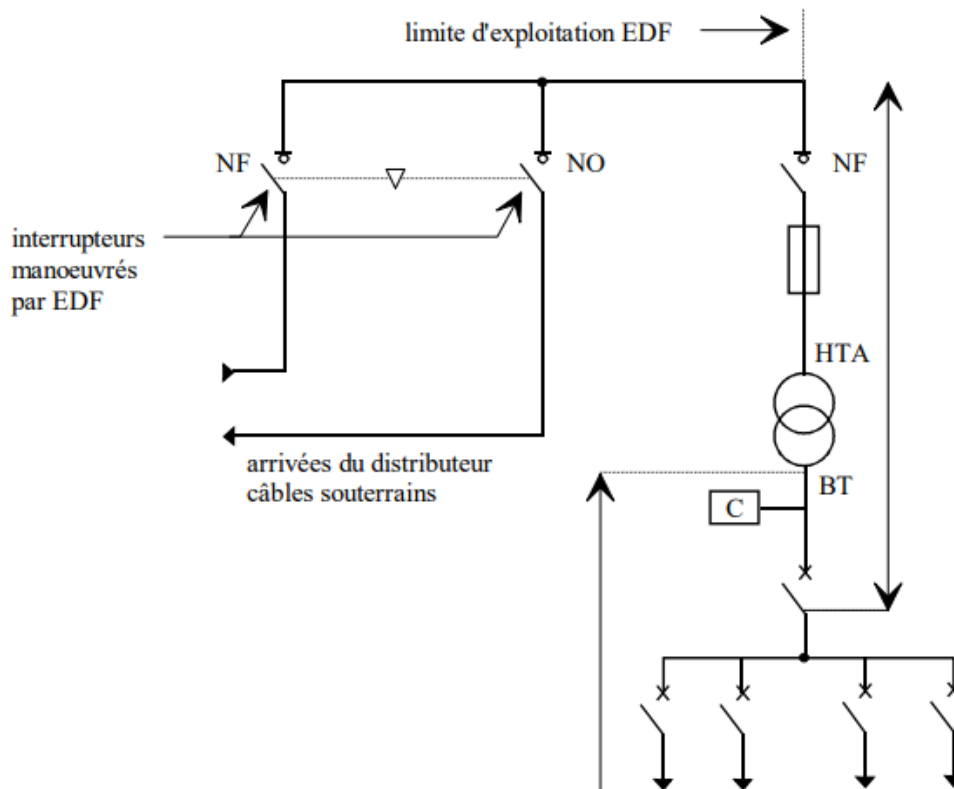


Figure 1.9 : alimentation en double dérivation d'un poste de livraison HTA à comptage BT

La cellule protection générale P doit être un disjoncteur si le courant nominal est supérieur ou égal à 45 A (voir NF C 13-100 § 433.1).

Lorsque le réseau public HTA comporte deux câbles souterrains distincts en parallèle, le poste peut être alimenté par l'une ou l'autre de ces deux dérivation.

La permutation d'une alimentation sur l'autre s'effectue lors de la disparition de la tension sur le câble alimentant le poste. Elle est réalisée soit automatiquement, soit manuellement.

Ce schéma, très coûteux pour le distributeur, est utilisé lorsque les exigences de disponibilité sont importantes (le surcoût est généralement payé par l'utilisateur).

1.7.4. Les postes de livraison HTA à comptage HT

Ils comportent plusieurs transformateurs ou un seul si son courant secondaire est supérieur à 2000A (puissance supérieure à 1250 kVA pour une tension composée de 400 V) et peuvent comporter des départs HTA.

La partie de l'installation allant du point de raccordement au réseau HTA jusqu'au sectionneur d'isolement situé en aval du disjoncteur général est régie par la norme NF C 13-100 ; les jeux de barres, le réseau HTA et les transformateurs sont régis par la norme NF C 13-200.

De façon identique aux postes de livraison à comptage BT, l'alimentation par le distributeur peut être en simple dérivation, coupure d'artère ou double dérivation [5].

- Exemple de schéma (voir fig. 1-10)

Poste de livraison avec une alimentation en coupure d'artère comportant 2 transformateurs et 2 départs HTA.

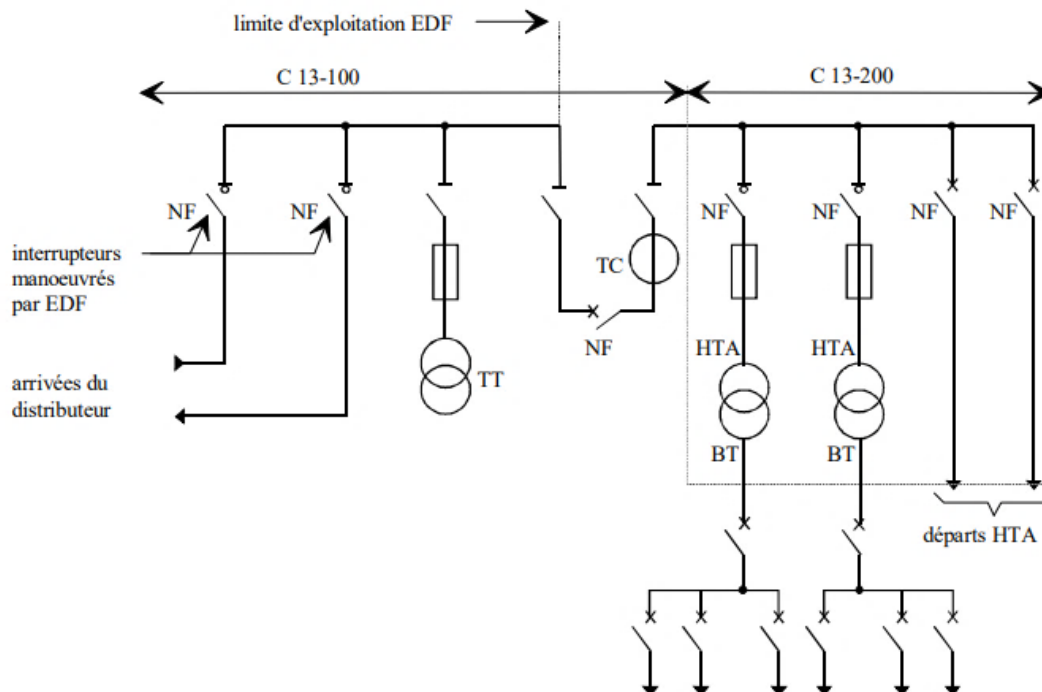


Figure 1.10 : exemple de poste de livraison HTA à comptage HT

Le comptage HT est réalisé grâce au TT (transformateur de tension) et au TC (transformateur de courant).

Le transformateur de courant possède généralement un deuxième secondaire utilisé pour la protection contre les surintensités.

1.8. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de présenter le contexte général de réseaux de distribution. Il s'est agi essentiellement de présenter les notions de base du monde de ces réseaux de distribution.

En particulier la partie opérative qui est caractéristiques techniques et niveau de tension de réseaux de distribution, structure générale et en fin, l'équipement et l'architecture des postes.

Analyse d'écoulement de puissance

Sommaire :

2.1. Introduction.....	17
2.2. Ecoulement de puissance du réseau de distribution radial.....	17
2.3. Le but de l'écoulement de puissance.....	18
2.4. Définition des types des jeux de barres.....	18
2.4.1. Jeu de barres terminal	19
2.4.2. Jeu de barres commun	19
2.4.3. Jeu de barres intermédiaire	19
2.5. Calcul de l'écoulement de puissance	20
2.5.1. Algorithmes d'écoulement de puissance.....	20
2.5.2. Algorithme de balayage avant et arrière.....	20
2.6. Équations de l'écoulement de puissance	21
2.6.1 Calcul des tensions des nœuds	21
2.6.2. Calcul des courants et des puissances transitées	23
2.6.2.1. Identification du type des nœuds	23
2.6.2.2. Identification et formation des lignes	24
2.6.2.3. Courant et puissances transitées dans des branches	25
2.6.3. Méthode directe de calcul d'écoulement de puissance	30
2.6.3.1. Principe de la méthode	30
2.6.3.2. Construction des matrices BIBC et BCBV	33
2.6.3.3. Pertes de puissance	33
2.7. Algorithmes de l'écoulement de puissance.....	34
2.7.1. Algorithme de balayage avant et arrière	34
2.7.2. Algorithme de la méthode direct d'écoulement de puissance.....	35
2.8. Conclusion	35

2.1 Introduction :

Le calcul de répartition de charge (load flow) permet de déterminer, en régime permanent, les variables du réseau comme les tensions nodales avec leurs déphasages, ainsi que les transits de puissance dans les lignes.

Dans un réseau de distribution il y a en général très peu de mesures sont toujours entachées d'erreurs, ce qui ne nous permet pas de les utiliser directement telle qu'elles sont transmises dans les centres de conduite.

Ainsi, la détermination des tensions et courants en d'autres points du réseau doit se faire à l'aide d'un calcul approprié. Il se base sur les données telle que les consommations des clients, les impédances des lignes ainsi que le schéma d'exploitation.

Plusieurs méthodes de résolution existent, nous présenterons deux méthodes. La première est basée sur le concept de balayage avant et arrière. La deuxième méthode est une méthode matricielle basée sur la construction de deux matrices dérivées « BIBC » et « BCBV ». Avant de détailler ces méthodes, nous allons d'abord présenter les éléments d'un réseau de distribution.

2.2 Ecoulement de puissance du réseau de distribution radial

L'identification de la topologie du réseau par la détermination des vecteurs des types des jeux de barres et des lignes est exploitée dans la solution de l'écoulement de puissance pour calculer [6] :

- Le courant dans chaque branche ;
- La puissance transitée dans chaque branche ;
- Les pertes totales de puissance active et réactive dans le réseau ;
- La tension de chaque jeu de barres.

2.3 Le but de l'écoulement de puissance

L'étude de l'écoulement de puissance ou de flux de puissance est une étape essentielle pour l'étude et la conception des réseaux électriques. Cette étude est nécessaire pour la planification, l'échange de puissance entre les centres de production et le dispatching économique. Elle est aussi essentielle pour l'évaluation de la stabilité transitoire, stabilité dynamique et l'estimation de l'état du réseau ainsi que la prise de mesure adéquate à d'éventuelle imprévue. La planification d'une future extension pourrait se baser sur l'étude de l'écoulement de puissance dans ce réseau.

2.4 Définition des types des jeux de barres

Réseau de distribution radial comme a été mentionné auparavant, la technique proposée pour le calcul de l'écoulement de puissance dans le réseau de distribution radial, se base principalement sur la connaissance de la topologie ou l'architecture du réseau. Pour cela, cette technique nécessite uniquement la lecture des données du réseau : le nombre des jeux de barres et les charges branchées au niveau de chacun d'eux, ainsi que les branches qui le forment, jeux de barres de départ, jeux de barres d'arrivée et la caractéristique résistance et réactance de chaque branche [7]. La connaissance de la topologie du réseau se fait par l'identification du type de chaque jeu de barres et de chaque ligne. Généralement, les réseaux de distribution qui ont une forme radiale, comportent un jeu de barres de référence qui est souvent le premier jeu de barres du réseau, et trois autres types de jeux de barres :

- Jeu de barres terminal (JB term)
- Jeu de barres commun (JB com)
- Jeu de barres intermédiaire (JB inter)

Tous ces jeux de barres se lient à travers des branches qui représentent des tronçons de lignes pour former un réseau de distribution radial. En plus et généralement aussi ces réseaux contiennent quatre types de lignes [7] :

- Ligne principale (main line).
- Ligne latérale (lateral line).

- Ligne sous-latérale (sub lateral line).
- Ligne mineure (minor line).

Donc par cette identification, on peut connaître la topologie du réseau quel que soit sa complexité et quel que soit sa taille.

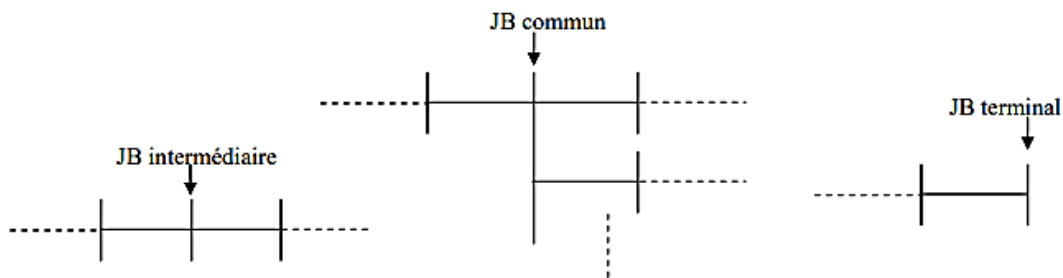


Figure 2.1 : Représentation des types des jeux de barres

2.4.1. Jeu de barres terminal

Un jeu de barre terminal est un jeu de barre qui est lié à une seule branche, on peut dire que c'est le bout des feeders et des ramifications.

2.4.2. Jeu de barres commun

Un jeu de barres commun est un jeu de barres qui lie trois branches ou plus du réseau.

2.4.3. Jeu de barres intermédiaire

Un jeu de barres intermédiaire est un jeu de barres qui lie uniquement deux branches du réseau. Il peut se situer entre :

- Un jeu de barres intermédiaire et un jeu de barres terminal.
- Un jeu de barres commun et un jeu de barres terminal.
- Deux jeux de barres communs.
- Un jeu de barres commun et un jeu de barres intermédiaire.
- Deux jeux de barres intermédiaires.

2.5 Calcul de l'écoulement de puissance

Le calcul de l'écoulement de puissance dans un réseau de distribution permet de déterminer les tensions et angles de l'ensemble des jeux de barres ainsi que les pertes actives et réactives dans toutes les branches du réseau.

En effet, L'étude de l'écoulement de puissance est essentielle dans la gestion d'énergie des réseaux électriques. Elle constitue aussi une étape cruciale lors de la planification d'une éventuelle extension du réseau afin de satisfaire l'augmentation de la demande en énergie [8].

2.5.1 Algorithmes d'écoulement de puissance

Les méthodes classiques de calcul de l'écoulement de puissance des réseaux de transport à savoir Gauss-Seidel, Newton-Raphson et découplée rapide [8, 9] sont inappropriées et inefficaces dans l'étude des réseaux de distribution à cause des caractéristiques spécifiques de ces réseaux qui sont :

- Le rapport entre la résistance et la réactance de lignes R/x est élevé ;
- La configuration radiale des réseaux de distribution ;

Afin de calculer efficacement l'écoulement de puissance dans un réseau de distribution, plusieurs méthodes basées sur le concept de balayage avant et arrière (Backward Forward sweeps) ont été développées [10, 11, 12, 13, 14]

2.5.2 Algorithme de balayage avant et arrière

Le déroulement des algorithmes de balayage avant et arrière se fait en deux phases :

- Un balayage arrière (Backward sweep) est essentiellement appliqué pour déterminer les courants ou les puissances transitées dans les branches ;
- Par contre, un balayage avant (Forward sweep) est effectué pour calculer les tensions des nœuds du réseau à partir de la tension du poste source ; situé généralement au nœud 1 ; jusqu'aux nœuds terminaux de toutes les lignes du réseau.

2.6 Équations de l'écoulement de puissance

On considère deux nœuds i et $i + 1$ d'un réseau de distribution reliés par une branche i , de résistance R_i et d'une réactance X_i , comme illustré sur la figure 2.2.

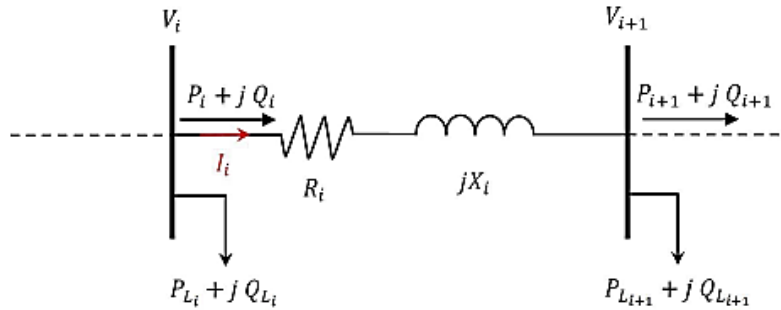


Figure 2.2 : Représentation de deux nœuds d'un réseau de distribution.

2.6.1 Calcul des tensions des nœuds

Les puissance active et réactive qui transitent du nœud i vers le nœud $i + 1$ dans la branche i peuvent être calculées par balayage arrière comme suit :

$$P_i = (P_{i+1} + P_{L_{i+1}}) + R_i \frac{(P_{i+1} + P_{L_{i+1}})^2 + (Q_{i+1} + Q_{L_{i+1}})^2}{V_{i+1}^2} \tag{2.1}$$

$$Q_i = (Q_{i+1} + P_{Q_{i+1}}) + X_i \frac{(P_{i+1} + P_{L_{i+1}})^2 + (Q_{i+1} + Q_{L_{i+1}})^2}{V_{i+1}^2} \tag{2.2}$$

Avec :

- P_i, Q_i sont les puissances actives et réactive qui transitent dans la branche i ;
- P_{Li}, Q_{Li} sont les puissances active et réactive de la charge au nœud i .

Le courant qui circule dans la branche i vaut :

$$I_i = \frac{V_i \angle \theta_i - V_{i+1} \angle \theta_{i+1}}{R_i + j X_i} \tag{2.3}$$

où encore:

$$I_i = \frac{S_i^*}{V_i^*} = \frac{P_i - jQ_i}{V_i \angle \theta_{i+1}} \quad (2.4)$$

En égalisant les équations (2.3) et (2.4), on obtient :

$$\frac{V_i \angle \theta_i - V_{i+1} \angle \theta_{i+1}}{R_i + jX_i} = \frac{P_i + jQ_i}{V_i \angle \theta_{i+1}} \quad (2.5)$$

$$V_i^2 - V_i V_{i+1} \angle (\theta_{i+1} - \theta_i) = (P_i R_i + Q_i X_i) - j(Q_i R_i - P_i X_i) \quad (2.6)$$

En séparant les deux parties réelles et imaginaires, on obtient :

$$V_i V_{i+1} \cos(\theta_{i+1} - \theta_i) = V_i^2 - (P_i R_i + Q_i X_i) \quad (2.7)$$

et :

$$V_i V_{i+1} \sin(\theta_{i+1} - \theta_i) = Q_i R_i - P_i X_i \quad (2.8)$$

La somme des carrés des équations (2.7) et (2.8) donne :

$$V_i^2 V_{i+1}^2 = [V_i^2 - (P_i R_i + Q_i X_i)]^2 + (Q_i R_i - P_i X_i)^2 \quad (2.9)$$

$$V_i^2 V_{i+1}^2 = V_i^4 - 2V_i^2 (P_i R_i + Q_i X_i) + (P_i^2 + Q_i^2)(R_i^2 + X_i^2) \quad (2.10)$$

Donc, l'amplitude de la tension au nœud $i + 1$ vaut :

$$V_{i+1} = \sqrt{V_i^2 - 2(P_i R_i + Q_i X_i) + \frac{(P_i^2 + Q_i^2)(R_i^2 + X_i^2)}{V_i^2}} \quad (2.11)$$

L'angle θ_{i+1} de la tension V_{i+1} peut être obtenu en divisant l'équation (2.8) sur l'équation (2.7) :

$$\tan(\theta_{i+1} - \theta_i) = \frac{(Q_i R_i - P_i X_i)}{[V_i^2 - (P_i R_i + Q_i X_i)]} \quad (2.12)$$

Par conséquent :

$$\theta_{i+1} = \theta_i + \arctan \left[\frac{(Q_i R_i - P_i X_i)}{[V_i^2 - (P_i R_i + Q_i X_i)]} \right] \quad (2.13)$$

Autrement, la tension V_{i+1} peut être calculer à partir de la loi de Kirchhoff (loi de maille) comme suit :

$$V_{i+1} \angle \theta_{i+1} = V_i \angle \theta_i - (R_i + jX_i) I_i \angle \delta_i \quad (2.14)$$

Les différents algorithmes de balayage avant et arrière peuvent être classés en deux deux groupes selon le calcul de la tension des nœuds :

- Les algorithmes basés sur les lois de Kirchhoff : les tensions de tous les nœuds du réseau se calculent en utilisant l'équation (2.14). Le courant de branche est calculé pendant la phase de balayage arrière ;
- Les algorithmes basés sur l'équation quadratique : dans ces cas les tensions se déduisent à partir de l'équation (2.11). Les puissances actives et réactives transitées dans les branches se calculent lors de la phase de balayage arrière.

2.6.2 Calcul des courants et des puissances transitées

Le calcul des puissances actives et réactives qui transitent dans chacune des branches ainsi que les courant qui y circulent est réalisé lors de la phase du balayage arrière. Ce calcul nécessite avant tout l'identification du type de tous les nœuds et la construction des différents types de lignes du réseau considéré.

Les différents algorithmes de balayage avant et arrière peuvent être classés en deux deux groupes selon le calcul de la tension des nœuds :

2.6.2.1 Identification du type des nœuds

Deux méthodes sont décrites pour identifier le type des nœuds :

- **Méthode de comparaison** : Pour identifier les différents types de nœuds, à partir des données du réseaux on procède à la comparaison des tous les nœuds d'arrivée aux nœuds de départ et en comptabilise ainsi le nombre d'égalité N_{eq} . Si :
 - $N_{eq} = 0$: le nœud i est lié avec une seule branche et considéré comme un nœud terminal ;

- $N_{eq} = 1$: le nœud i est lié avec un deux branches et constitue donc un nœud intermédiaire ;
- $N_{eq} > 1$: le nœud i est un nœud commun et il est lié avec au moins trois branches.
- **Méthode de comparaison** : Afin d'identifier le type des nœuds, une matrice M est conçue à partir de la configuration du réseau de distribution étudié.

Pour un réseau de distribution à n_{bus} nœuds, la matrice M est de dimensions $(n_{bus}, n_{bus} - 1)$.

Les lignes i de la matrice M correspondent aux nœuds de départ et les colonnes représentent les nœuds d'arrivés. Les éléments de la matrice sont soit 0 ou 1, tels que :

- Si une branche entre un nœud de départ i et un nœud d'arrivé j existe, donc :

$$M(i, j) = 1 \quad (2.15)$$

- Sinon, dans le cas où la branche n'existe pas :

$$M(i, j) = 0 \quad (2.16)$$

Le type du nœud i est défini selon le nombre d'éléments non nuls $N_{neqn}(i)$ (égales à 1) de la ligne i de la matrice M :

- Si $N_{neqn}(i) = 0$, le nœud i est un nœud terminal ;
- Si $N_{neqn}(i) = 1$, le nœud i représente un nœud intermédiaire ;
- Si $N_{neqn}(i) > 1$, dans ce cas le nœud i est un nœud commun.

À l'issue de procédure d'identification du type de nœuds, les trois vecteurs ci-dessous sont définis :

- Vecteur de nœuds terminaux ;
- Vecteur de nœuds intermédiaires ;
- Vecteur de nœuds communs.

2.6.2.2 Identification et formation des lignes

La procédure à suivre pour former les lignes du réseau est décrite selon le type de la ligne.

- **Ligne principale** : la ligne principale est constituée du premier nœud terminal et de tous les nœuds situés en aval de celui-ci et cela jusqu'au nœuds 1 qui est le nœud de référence.

- **Ligne latérale** : pour construire les lignes latérales, on procède comme suit :
 - Déterminer les nœuds de la ligne principale qui appartiennent au vecteur des nœuds communs. Ce qui nous donne le nombre de lignes latérales N_{ll} ;
 - Chacun de ces nœuds représente un nœud de départ d'une ligne latérale. Tous les nœuds situés entre ce nœud de départ et le prochain nœud terminal sont les nœuds de la ligne latérale. Ainsi, toutes les lignes latérales sont formés.
- **Ligne sous-latérale** : on détermine d'abord les nœuds communs qui appartiennent aux lignes latérales que je j'appellerai nœuds commun latérale. Cela nous permettra d'avoir le nombre de lignes sous-latérales N_{lsl} . Ensuite, chaque ligne sous-latérale contient les nœuds compris entre le nœuds commun latérale et le prochain nœud terminal ;
- **Ligne mineure** : On définit les nœuds commun appartenant aux lignes sous-latérales. Le nombre de ces nœuds représente le nombre de lignes mineurs N_{lm} . Une ligne mineure est formée des nœuds compris entre le nœud commun sous- latérale et le nœud terminal qui suit.

2.6.2.3 Courants et puissances transitées dans des branches

- **Les branches de la ligne mineure** : le courant qui circule dans la branche i d'une ligne latérale j ainsi que les puissances active et réactive qui y transitent sont exprimés par :

Pour les N_{lm} lignes mineur et $\forall 1 \leq j \leq N_{lm}$

$$I_i = \begin{cases} I_{L_{i+1}}, & i = JBt_{lmj} \\ I_{i+1} + I_{L_{i+1}}, & JB2_{lm} - 1 \leq i \leq JBt_{lmj} - 1 \end{cases} \quad (2.17)$$

$$P_i = \begin{cases} P_{L_{i+1}} + R_i \frac{P_{L_{i+1}}^2 + Q_{L_{i+1}}^2}{V_{i+1}^2} & i = JBt_{lmj} \\ (P_{i+1} + P_{L_{i+1}}) + R_i \frac{(P_{i+1} + P_{L_{i+1}})^2 + (Q_{i+1} + Q_{L_{i+1}})^2}{V_{i+1}^2} & JB2_{lm} - 1 \leq i \leq JBt_{lmj} - 1 \end{cases} \quad (2.18)$$

$$Q_i = \begin{cases} Q_{L_{i+1}} + X_i \frac{P_{L_{i+1}}^2 + Q_{L_{i+1}}^2}{V_{i+1}^2} & i = JBt_{lmj} \\ (Q_{i+1} + Q_{L_{i+1}}) + X_i \frac{(P_{i+1} + P_{L_{i+1}})^2 + (Q_{i+1} + Q_{L_{i+1}})^2}{V_{i+1}^2} & JB2_{lm} - 1 \leq i \leq JBt_{lmj} - 1 \end{cases} \quad (2.19)$$

où :

- $JB2_{lmj}$ est le deuxième nœud de la ligne mineure j ;
- JBt_{lmj} est le nœud terminale de la ligne mineure j .

Le courant qui circule dans la première branche de la ligne mineure j et les puissances qui y transitent (c'est à dire $i = JB2_{lmj} - 1$) sont posés égaux à :

$$\begin{cases} I_i = I_{lmj} \\ P_i = P_{lmj} \\ Q_i = Q_{lmj} \end{cases} \quad 1 \leq j \leq N_{lm} \quad (2.20)$$

- **Les branches de la ligne sous-latérale :** le courant qui circulent dans la branche i d'une ligne sous-latérale j ainsi que les puissances active et réactive qui y transitent sont exprimés par :

Pour les N_{lsl} lignes sous-latérales et $\forall 1 \leq j \leq N_{lsl}$

$$I_i = \begin{cases} I_{L_{i+1}} & i = JBt_{lslj} \\ I_{i+1} + I_{L_{i+1}} & JB2_{lslj} - 1 \leq i \leq JBt_{lslj} - 1, i \neq JBD_{lmk} - 1 \forall 1 \leq k \leq N_{lm} \\ I_{i+1} + I_{L_{i+1}} + \sum I_{lmk} & JB2_{lslj} - 1 \leq i \leq JBt_{lslj} - 1, i \neq JBD_{lmk} - 1 \forall 1 \leq k \leq N_{lm} \end{cases}$$

Pour $i = JBt_{lsl}$: (2.21)

$$\begin{cases} I_i = I_{L_{i+1}} \\ P_i = P_{L_{i+1}} + R_i \frac{P_{L_{i+1}}^2 + Q_{L_{i+1}}^2}{V_{i+1}^2} \\ Q_i = Q_{L_{i+1}} + X_i \frac{P_{L_{i+1}}^2 + Q_{L_{i+1}}^2}{V_{i+1}^2} \end{cases} \quad (2.22)$$

Pour $JB2_{lslj} - 1 \leq i \leq JBt_{lslj} - 1, i \neq JBD_{lmk} - 1 \forall 1 \leq k \leq N_{lm}$:

$$\begin{cases} I_i = I_{i+1} + I_{L_{i+1}} \\ P_i = (P_{i+1} + P_{L_{i+1}}) + R_i \frac{(P_{i+1} + P_{L_{i+1}})^2 + (Q_{i+1} + Q_{L_{i+1}})^2}{V_{i+1}^2} \\ Q_i = (Q_{i+1} + Q_{L_{i+1}}) + X_i \frac{(P_{i+1} + P_{L_{i+1}})^2 + (Q_{i+1} + Q_{L_{i+1}})^2}{V_{i+1}^2} \end{cases} \quad (2.23)$$

Pour $JB2_{lslj} - 1 \leq i \leq JBt_{lslj} - 1, i = JBD_{lmk} - 1 \forall 1 \leq k \leq N_{lm}$

$$\begin{cases} I_i = I_{i+1} + I_{L_{i+1}} + \sum I_{lmk} \\ P_i = (P_{i+1} + P_{L_{i+1}} + \sum P_{lmk}) + R_i \frac{(P_{i+1} + P_{L_{i+1}} + \sum P_{lmk})^2 + (Q_{i+1} + Q_{L_{i+1}} + \sum Q_{lmk})^2}{V_{i+1}^2} \\ Q_i = (Q_{i+1} + Q_{L_{i+1}} + \sum Q_{lmk}) + X_i \frac{(P_{i+1} + P_{L_{i+1}} + \sum P_{lmk})^2 + (Q_{i+1} + Q_{L_{i+1}} + \sum Q_{lmk})^2}{V_{i+1}^2} \end{cases} \quad (2.24)$$

où :

- $JB2_{lslj}$ est le deuxième nœud de la ligne sous-latérale j ;
- JBt_{lslj} est le nœud terminale de la ligne mineure j .
- JBD_{lmk} est le nœud de départ de la ligne mineure k .

Le courant qui circule dans la première branche de la ligne sous-latérale j et les puissances qui y transitent

$$\begin{cases} I_i = I_{lsl} \\ P_i = P_{lslj} \\ Q_i = Q_{lslj} \end{cases} \quad 1 \leq j \leq N_{lsl} \quad (2.25)$$

- **Les branches de la ligne latérale :**

Pour les N_{ll} lignes latérales et $\forall 1 \leq j \leq N_{ll}$ Pour $i = JBt_{llj}$:

$$\begin{cases} I_i = I_{L_{i+1}} \\ P_i = P_{L_{i+1}} + R_i \frac{P_{L_{i+1}}^2 + Q_{L_{i+1}}^2}{V_{i+1}^2} \\ Q_i = Q_{L_{i+1}} + X_i \frac{P_{L_{i+1}}^2 + Q_{L_{i+1}}^2}{V_{i+1}^2} \end{cases} \quad (2.26)$$

Pour $JB2_{ll_j} - 1 \leq i \leq JBt_{ll} - 1, i \neq JBD_{lsl_k} - 1 \forall 1 \leq k \leq N_{lsl}$:

$$\begin{cases} I_i = I_{i+1} + I_{L_{i+1}} \\ P_i = (P_{i+1} + P_{L_{i+1}}) + R_i \frac{(P_{i+1} + P_{L_{i+1}})^2 + (Q_{i+1} + Q_{L_{i+1}})^2}{V_{i+1}^2} \\ Q_i = (Q_{i+1} + Q_{L_{i+1}}) + X_i \frac{(P_{i+1} + P_{L_{i+1}})^2 + (Q_{i+1} + Q_{L_{i+1}})^2}{V_{i+1}^2} \end{cases} \quad (2.27)$$

Pour $JB2_{ll_j} - 1 \leq i \leq JBt_{ll_j} - 1, i = JBD_{lsl_k} - 1 \forall 1 \leq k \leq N_{lsl}$:

$$\begin{cases} I_i = I_{i+1} + I_{L_{i+1}} + \sum I_{lsl_k} \\ P_i = (P_{i+1} + P_{L_{i+1}} + \sum P_{lsl_k}) + R_i \frac{(P_{i+1} + P_{L_{i+1}} + \sum P_{lsl_k})^2 + (Q_{i+1} + Q_{L_{i+1}} + \sum Q_{lsl_k})^2}{V_{i+1}^2} \\ Q_i = (Q_{i+1} + Q_{L_{i+1}} + \sum Q_{lsl_k}) + X_i \frac{(P_{i+1} + P_{L_{i+1}} + \sum P_{lsl_k})^2 + (Q_{i+1} + Q_{L_{i+1}} + \sum Q_{lsl_k})^2}{V_{i+1}^2} \end{cases} \quad (2.28)$$

où :

- $JB2_{ll_j}$ est le deuxième nœud de la ligne latérale j ;
- JBt_{ll_j} est le nœud terminale de la ligne latérale j .
- JBD_{lsl_k} est le nœud de départ de la ligne sous-latérale k .

Le courant qui circule dans la première branche de la ligne latérale j et les puissances qui y transitent.

$$\begin{cases} I_i = I_{uj} \\ P_i = P_{uj} \\ Q_i = Q_{uj} \end{cases} \quad 1 \leq j \leq N_u \quad (2.29)$$

- Les branches de la ligne principale :

Pour $i = J B t_{l_p}$:

$$\begin{cases} I_i = I_{L_{i+1}} \\ P_i = P_{L_{i+1}} + R_i \frac{P_{L_{i+1}}^2 + Q_{L_{i+1}}^2}{V_{i+1}^2} \\ Q_i = Q_{L_{i+1}} + X_i \frac{P_{L_{i+1}}^2 + Q_{L_{i+1}}^2}{V_{i+1}^2} \end{cases} \quad (2.30)$$

Pour $1 \leq i \leq J B t_{l_p} - 1, i \neq J B D_{l_j} - 1 \forall 1 \leq j \leq N_{l_j}$:

$$\begin{cases} I_i = I_{i+1} + I_{L_{i+1}} \\ P_i = (P_{i+1} + P_{L_{i+1}}) + R_i \frac{(P_{i+1} + P_{L_{i+1}})^2 + (Q_{i+1} + Q_{L_{i+1}})^2}{V_{i+1}^2} \\ Q_i = (Q_{i+1} + Q_{L_{i+1}}) + X_i \frac{(P_{i+1} + P_{L_{i+1}})^2 + (Q_{i+1} + Q_{L_{i+1}})^2}{V_{i+1}^2} \end{cases} \quad (2.31)$$

Pour $1 \leq i \leq J B t_{l_p} - 1, i = J B D_{l_j} - 1 \forall 1 \leq j \leq N_{l_j}$:

$$\begin{cases} I_i = I_{i+1} + I_{L_{i+1}} + \sum I_{l_{sl_k}} \\ P_i = (P_{i+1} + P_{L_{i+1}} + \sum P_{l_{sl_k}}) + R_i \frac{(P_{i+1} + P_{L_{i+1}} + \sum P_{l_{sl_k}})^2 + (Q_{i+1} + Q_{L_{i+1}} + \sum Q_{l_{sl_k}})^2}{V_{i+1}^2} \\ Q_i = (Q_{i+1} + Q_{L_{i+1}} + \sum Q_{l_{sl_k}}) + X_i \frac{(P_{i+1} + P_{L_{i+1}} + \sum P_{l_{sl_k}})^2 + (Q_{i+1} + Q_{L_{i+1}} + \sum Q_{l_{sl_k}})^2}{V_{i+1}^2} \end{cases} \quad (2.32)$$

où :

- $J B t_{l_p}$ est le nœud terminale de la ligne principale.
- $J B D_{l_j}$ est le nœud de départ de la ligne latérale j .

2.6.3 Méthode directe de calcul d'écoulement de puissance

2.6.3.1 Principe de la méthode

Teng [15] a proposé un algorithme de résolution du problème d'écoulement de puissance en utilisant le principe de balayage avant et arrière connue sous le nom méthode directe du calcul d'écoulement de puissance (en anglais Direct load flow DLF). L'algorithme est basé sur la construction de deux matrices dérivées :

- La matrice BIBC ;
- La matrice BCBV.

Pour illustrer cette méthode, nous avons utilisé le réseau de distribution simple représenté sur la figure (2.3).

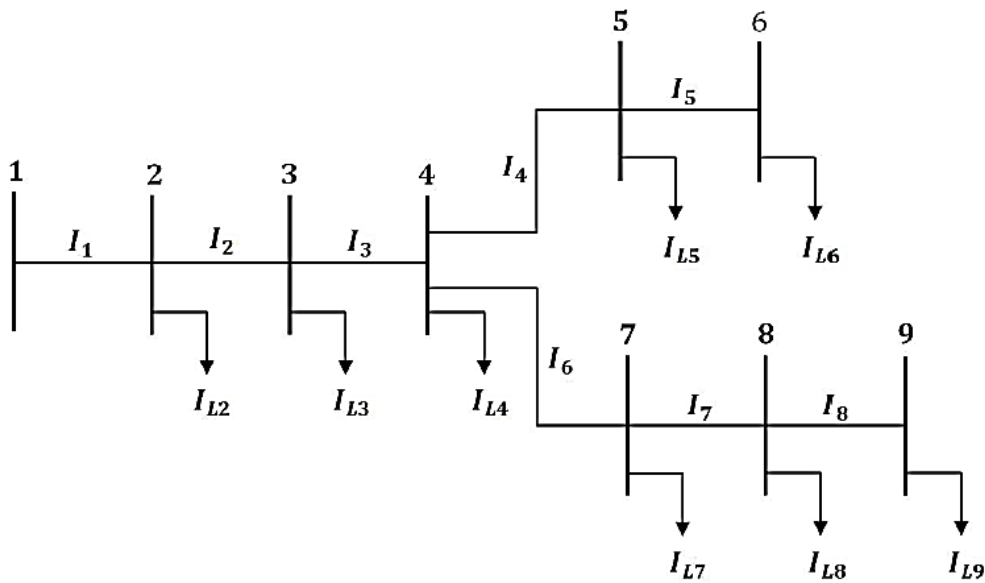


Figure 2.3 – Réseau de distribution simple.

Les courants de charges I_{Li} sont déterminés en utilisant l'équation (2.4). Les expressions des courants de branche sont déduites à partir de la loi de Kirchhoff :

$$\begin{aligned}
 I_1 &= I_{L2} + I_{L3} + I_{L4} + I_{L5} + I_{L6} + I_{L7} + I_{L8} + I_{L9} \\
 I_2 &= I_{L3} + I_{L4} + I_{L5} + I_{L6} + I_{L7} + I_{L8} + I_{L9} \\
 I_3 &= I_{L4} + I_{L5} + I_{L6} + I_{L7} + I_{L8} + I_{L9} \\
 I_4 &= I_{L5} + I_{L6} \\
 I_5 &= I_{L6} \\
 I_6 &= I_{L7} + I_{L8} + I_{L9} \\
 I_7 &= I_{L8} + I_{L9} \\
 I_8 &= I_{L9}
 \end{aligned}
 \tag{2.33}$$

La relation entre les courants de branche et les courant de charge peut être exprimée par :

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \\ I_7 \\ I_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{L2} \\ I_{L3} \\ I_{L4} \\ I_{L5} \\ I_{L6} \\ I_{L7} \\ I_{L8} \\ I_{L9} \end{bmatrix}
 \tag{2.34}$$

L'équation (2.34) sous une forme générale s'écrit :

$$[I] = [BIBC] [I_L]
 \tag{2.35}$$

où $[BIBC]$ est la matrice des courants de branches en fonction des courants de charge (en anglais Bus-injection to branche-current matrix). C'est une matrice triangulaire supérieure d'éléments 1 ou 0.

Les tensions aux nœuds du réseaux peuvent s'exprimer en fonction des courants de branche comme suit :

$$\begin{aligned}
 V_2 &= V_1 - I_1 Z_1 \\
 V_3 &= V_2 - I_2 Z_2 = V_1 - I_1 Z_1 - I_2 Z_2 \\
 V_4 &= V_3 - I_3 Z_3 = V_1 - I_1 Z_1 - I_2 Z_2 - I_3 Z_3 \\
 V_5 &= V_4 - I_4 Z_4 = V_1 - I_1 Z_1 - I_2 Z_2 - I_3 Z_3 - I_4 Z_4 \\
 V_6 &= V_5 - I_5 Z_5 = V_1 - I_1 Z_1 - I_2 Z_2 - I_3 Z_3 - I_4 Z_4 - I_5 Z_5 \\
 V_7 &= V_6 - I_6 Z_6 = V_1 - I_1 Z_1 - I_2 Z_2 - I_3 Z_3 - I_6 Z_6 \\
 V_8 &= V_7 - I_7 Z_7 = V_1 - I_1 Z_1 - I_2 Z_2 - I_3 Z_3 - I_6 Z_6 - I_7 Z_7 \\
 V_9 &= V_8 - I_8 Z_8 = V_1 - I_1 Z_1 - I_2 Z_2 - I_3 Z_3 - I_6 Z_6 - I_7 Z_7 - I_8 Z_8
 \end{aligned}
 \tag{2.36}$$

où V_i et Z_i sont respectivement la tension au nœud i et l'impédance de la branche i située entre les nœuds i et $i + 1$.

Les tensions des nœuds sont écrites en fonction de la tension du poste source V_1 , des courants de branche et des paramètres des lignes :

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_1 \\ V_1 \\ V_1 \\ V_1 \\ V_1 \\ V_1 \\ V_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \\ V_7 \\ V_8 \\ V_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_1 & Z_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_1 & Z_2 & Z_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_1 & Z_2 & Z_3 & Z_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_1 & Z_2 & Z_3 & Z_4 & Z_5 & 0 & 0 & 0 \\ Z_1 & Z_2 & Z_3 & 0 & 0 & Z_6 & 0 & 0 \\ Z_1 & Z_2 & Z_3 & 0 & 0 & Z_6 & Z_7 & 0 \\ Z_1 & Z_2 & Z_3 & 0 & 0 & Z_6 & Z_7 & Z_8 \end{bmatrix}
 \tag{2.37}$$

Cette équation sous sa forme générale donne :

$$[\Delta V] = [BCBV] [I]
 \tag{2.38}$$

$[BCBV]$ est la matrice des tensions des nœuds en fonction des courants de branche (en anglais branch-current to bus voltage matrix).

L'équation (1.38) devient :

$$[\Delta V] = [BCBV] [BIBC] [I_L]
 \tag{2.39}$$

$$[\Delta V] = [DLF] [I_L]
 \tag{2.40}$$

A chaque itération k , pour calculer les nouvelles tensions des nœuds on procède comme suit :

$$I_{Li}^k = \left(\frac{P_i + jQ_i}{V_i^k} \right)^* \quad (2.41)$$

$$[\Delta V^{k+1}] = [\text{DLF}] [I_L^k] \quad (2.42)$$

$$[V^{k+1}] = [V_1] + [\Delta V^{k+1}] \quad (2.43)$$

2.6.3.2 Construction des matrices BIBC et BCBV :

On considère un réseau de distribution de m branches et n nœuds.

La matrices dérivées BIBC est dans ce cas de dimensions $m(n - 1)$ pour construire cette matrice, on procède comme suit :

- Pour la première branche $k = 1$ située entre les nœuds 1 et 2, tous les éléments de la première colonne sont nuls sauf le premier élément (élément de la première ligne et de la première colonne) qui égal à 1.
- Pour les autres branches $k = 2, 3, \dots, m$. si la branche k est entre le nœud i et le nœud j , copier la colonne $i - 1$ de la matrice BIBC la colonne $j - 1$. L'élément de ligne k et de colonne j est remplacé par 1.

Les étapes à suivre pour construire la matrice BCBV de dimension $(n - 1) m$ sont:

- Pour la première branche $k = 1$, tous les éléments de la première ligne de la matrice BCBV sont égaux à 0 sauf le premier élément qui est égal à l'impédance de la première branche Z_1 ;
- Pour la branche k , avec $k = 2, 3, \dots, m$, située entre le nœud i et j copier la ligne $i - 1$ de la matrice BCBV à la ligne $j - 1$. Ensuite, l'élément situé à ligne k et colonne $j - 1$ est pris égal à Z_k .

2.6.3.3 Pertes de puissance

Les pertes actives et réactive de puissance dans la branche k sont données par :

$$P_{Lossk} = |I_k|^2 R_k \quad (2.44)$$

$$Q_{Lossk} = |I_k|^2 X_k \quad (2.45)$$

Où :

- $P_{loss k}$ est les pertes actives dans la branche k ;
- $Q_{loss k}$ est les pertes réactives dans la branche k ;
- $|I_k|$ est l'amplitude du courant circulant dans la branche k ;
- R_k est la résistance de la branche k ;

- X_k est la réactance de la branche k .

Les pertes actives et réactives totales dans le réseau est la somme des pertes dans chaque branche du réseau.

$$P_{Loss} = \sum_{k=1}^{nbr} P_{Lossk} \quad (2.46)$$

$$Q_{Loss} = \sum_{k=1}^{nbr} Q_{Lossk} \quad (2.47)$$

2.7 Algorithmes de l'écoulement de puissance

2.7.1 Algorithme du balayage avant et arrière

L'algorithme du backward and forward sweep appliqué pour le calcul de l'écoulement de puissance d'un réseau de distribution est décrit ci-dessous ;

- **Étape 1** : Lire les données du réseau de distribution testé et l'erreur de convergence ε_d et initialiser les tensions des bus à 1 pu.
- **Étape 2** : Identifier le type des bus et des lignes par la méthode matricielle.
- **Étape 3** : Calculer les courants de la dernière à la première branche, les puissances transitées dans les branches ainsi que les pertes actives et réactives (backward sweep).
- **Étape 4** : Calculer les nouvelles tensions du premier jusqu'au dernier nœud (forward sweep).
- **Étape 5** : Calcul l'écart de tension maximal :

$$\varepsilon_{max} = \max |V_i^{i+1} - V_i^{i+1}|$$

- **Étape 6** : Si L'écart de tension ε_{max} est inférieur ou égal à l'erreur de convergence ε_d , afficher les nouvelles tensions et phases, ainsi que les pertes actives et réactives. Sinon, actualiser les valeurs des tensions de bus et retourner à l'étape 3.

2.7.2 Algorithme de la méthode directe d'écoulement de puissance

- **Étape 1** : Lire les données du réseau de distribution testé et l'erreur de convergence ε_d et initialiser les tensions des bus à 1 pu.
- **Étape 2** : Construire les deux matrices dérivées BIBC et BCBV.
- **Étape 3** : Calculer les courants de charge en utilisant l'équation (2.41).
- **Étape 4** : Calculer les courants de branche en utilisant l'équation (2.35).
- **Étape 5** : Calcul les nouvelles tensions de l'ensemble des nœuds en utilisant les équations (2.42) et (2.43).

$$\varepsilon_{max} = \max |V_i^{i+1} - V_i^{i+1}|$$

- **Étape 6** : Si L'écart de tension ε_{max} est inférieur ou égal à l'erreur de convergence ε_d :
 - Afficher les nouvelles tensions et phases des nœuds du réseau ;
 - Calculer les pertes actives et réactives dans les branches en utilisant respectivement les équations (2.44) et (2.45) et les afficher.

Sinon, actualiser les valeurs des tensions de bus et retourner à l'étape 3.

L'amplitude de la tension au jeu de barre où il est installé le D-STATCOM est égalé à 1 pu.

2.8. Conclusion :

Nous avons dans ce chapitre, traité deux méthodes dans le cadre de la résolution du problème de l'écoulement de puissance dans un réseau de distribution radial.

L'ensemble de ces méthodes présentent une approche simple pour calculer les tensions au niveau des nœuds d'un réseau en calculant les courants dans les charges, puis dans les branches. Ces tensions sont corrigées à chaque itération jusqu'à atteindre la précision désirée. Nous avons donné un algorithme pour chaque méthode qui résume les différentes étapes pour la résolution des équations données auparavant.

Chapitre 3 :

Calcul de l'écoulement de puissance : Résultats et discussions.

Sommaire :

3.1 Introduction.....	36
3.2 Validation de méthode avant et arrière (backward and forward sweep).....	37
3.2.1 Discussion des résultats (backward and forward sweep).....	40
3.3 Validation de la méthode directe	41
3.3.1 Discussion des résultats (direct).....	45
3.4 Conclusion	45

3.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons effectuer le calcul de l'écoulement de puissance à partir des deux méthodes présentées dans le dernier chapitre (chapitre 2).

Premièrement, nous allons présenter un réseau de distribution radial à 33 jeux de barres dans son état initial et les données du réseau sont représentées en Annexe 1

Deuxièmement, la présentation des grandeurs obtenues de l'implantation sous MATLAB et discutées plus tard à partir de deux méthodes et consiste à effectuer une simulation sous MATLAB des mêmes étapes que celles réalisées avec les programmes pour calculer des pertes active, réactive et la tension dans les branches du réseau

En fin nous allons faire une comparaison entre ces deux résultats.

Le réseau de distribution testé est le réseau standard IEEE de 33 nœuds de tension nominale de 12.66 kV. Le diagramme unifilaire du réseau testé est présenté dans la figure (3.1) et le calcul de l'écoulement de puissance est effectué en deux méthodes :

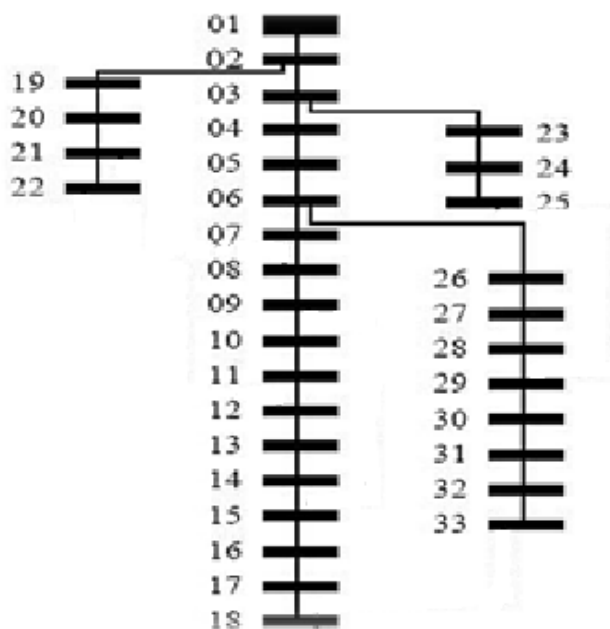


Figure. 3.1 : Réseau de distribution radial à 33 jeux de barres

3.2 Validation de la méthode avant et arrière (backward and forward sweep) :

Les résultats obtenus sont présentés dans les tableaux (3.1) (3.2) et figures (3.2), (3.3) et (3.4). (Les données du réseau sont représentées en Annexe 1)

Tableau 3.1 : Résultats de simulation d'amplitude et phase des tensions des nœuds

Nbus	Tension (pu)	Phase (degré)
1	1.0000	0.000
2	0.9970	0.014
3	0.9829	0.096
4	0.9755	0.162
5	0.9681	0.228
6	0.9497	0.134
7	0.9462	-0.096
8	0.9413	-0.060
9	0.9351	-0.133
10	0.9292	-0.196
11	0.9284	-0.189
12	0.9269	-0.177
13	0.9208	-0.269
14	0.9185	-0.347
15	0.9171	-0.385
16	0.9157	-0.408
17	0.9137	-0.485
18	0.9131	-0.495
19	0.9965	0.004
20	0.9929	-0.063
21	0.9922	-0.083
22	0.9916	-0.103
23	0.9794	0.065
24	0.9727	-0.024
25	0.9694	-0.067
26	0.9477	0.173
27	0.9452	0.229
28	0.9337	0.312
29	0.9255	0.390
30	0.9220	0.496
31	0.9178	0.411
32	0.9169	0.388
33	0.9166	0.380

Tableau 3.2 : Résultats de simulation pertes de puissances active et réactive du réseau de distribution IEEE 33-Bus

Numéro de branche	Départ de nœud	Nœud d'arrivé	Puissances transitées		Pertes	
			P(kW)	Q(kVAr)	Ploss(kW)	Qloss(kVAr)
1	1	2	3917.67	2435.14	12.24	6.24
2	2	3	3444.29	2207.82	51.79	26.38
3	3	4	2362.89	1684.20	19.90	10.13
4	4	5	2222.99	1594.06	18.70	9.52
5	5	6	2144.29	1554.54	38.25	33.02
6	6	7	1095.27	527.89	1.91	6.33
7	7	8	893.35	421.56	4.84	1.60
8	8	9	688.51	319.96	4.18	3.00
9	9	10	624.33	296.96	3.56	2.52
10	10	11	560.77	274.43	0.55	0.18
11	11	12	515.22	244.25	0.88	0.29
12	12	13	454.34	208.96	2.67	2.10
13	13	14	391.67	171.86	0.73	0.96
14	14	15	270.94	90.90	0.36	0.32
15	15	16	210.59	80.58	0.28	0.21
16	16	17	150.30	60.38	0.25	0.34
17	17	18	90.05	40.04	0.05	0.04
18	2	19	361.14	161.08	0.16	0.15
19	19	20	270.98	120.93	0.83	0.75
20	20	21	180.14	80.18	0.10	0.12
21	21	22	90.04	40.06	0.04	0.06
22	3	23	939.61	457.24	3.18	2.17
23	23	24	846.43	405.07	5.14	4.06
24	24	25	421.29	201.01	1.29	1.01
25	6	26	950.78	973.63	2.60	1.32
26	26	27	888.18	947.31	3.33	1.69
27	27	28	824.85	920.61	11.30	9.96
28	28	29	753.55	890.65	7.83	6.82
29	29	30	625.72	813.83	3.90	1.98
30	30	31	421.82	211.84	1.59	1.57
31	31	32	270.23	140.27	0.21	0.25
32	32	33	60.01	40.02	0.01	0.02
Pertes totales					202.67	135.14

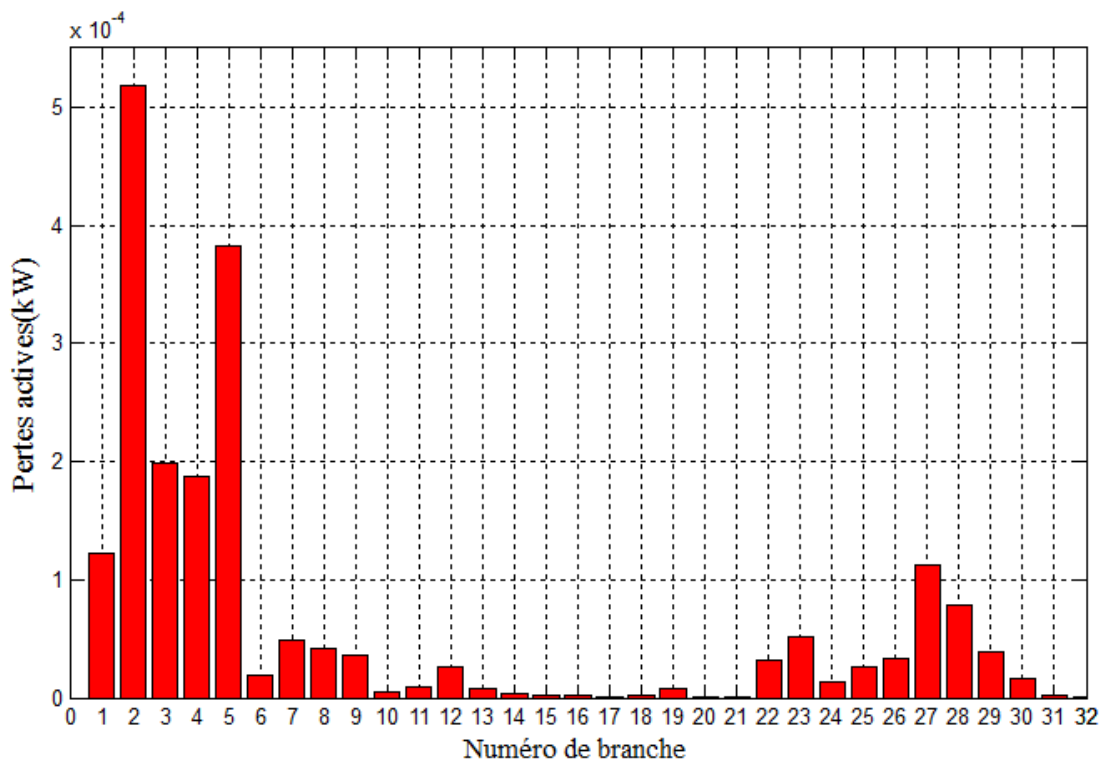


Figure 3.2 : Pertes de puissance active dans les branches du réseau IEEE33-Bus

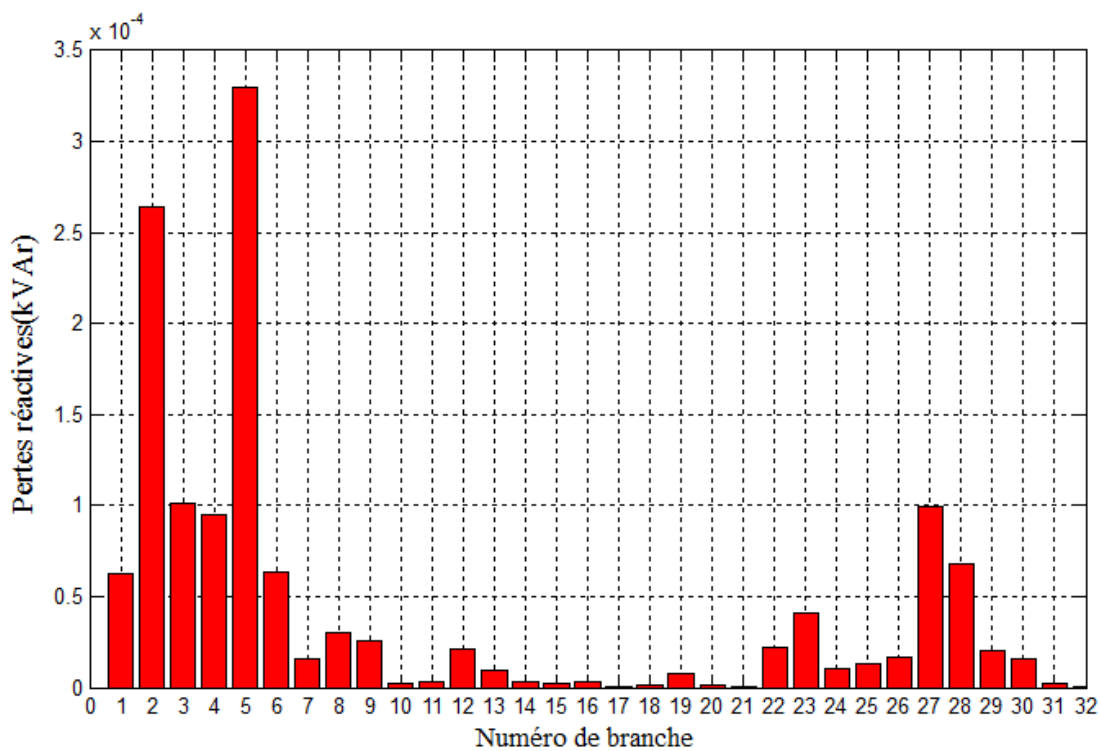


Figure 3.3: Pertes de puissance réactive dans les branches du réseau IEEE33-bus

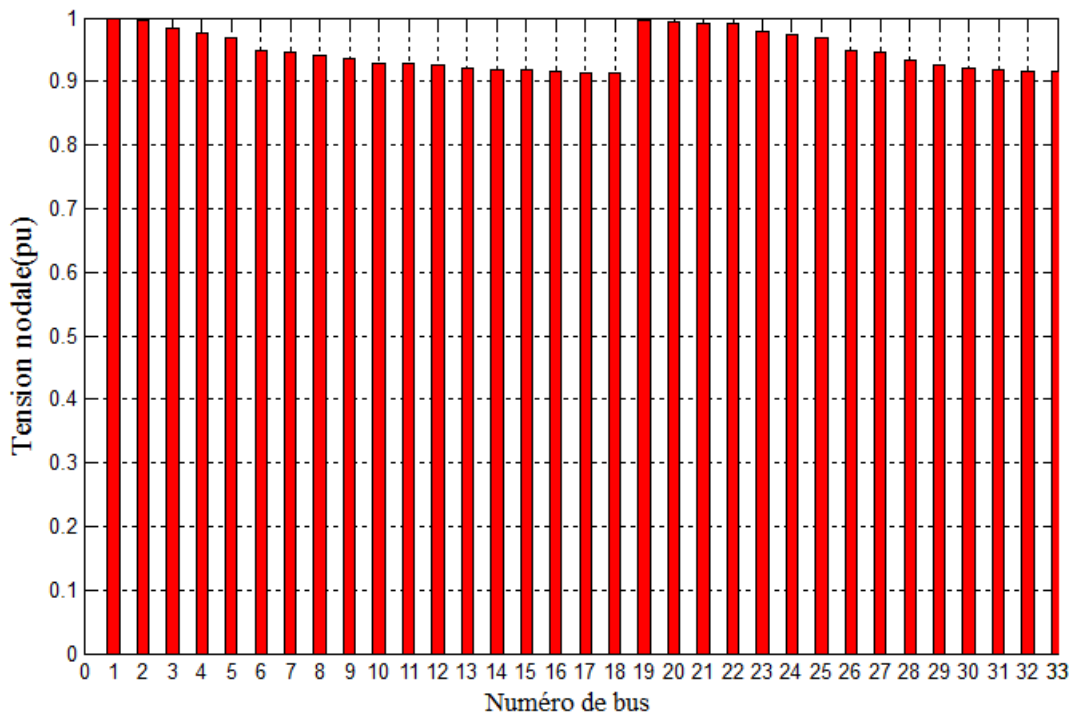


Figure 3.4 : La tension dans les branches du réseau IEEE33-bus

3.2.1 Discussion résultats (backward and forward sweep)

Les résultats de l'écoulement de puissance sont résumés dans les tableaux (3.1) et (3.2). On remarque que la plus grande tension atteint une amplitude de 0.9970 pu au deuxième jeu de barre, le premier étant celui du générateur dont la tension est imposée et fixée. La plus faible tension est observée au niveau de 18^{ème} jeu de barre, cela est justifié par l'accumulation des chutes de tension dans les branches. Pour les pertes de puissance, nous notons qu'elles sont respectivement 202.67kW et 135.14 kVAr.

Les figures (3.3) et (3.4) montrent que les plus grandes pertes de puissances actives et réactives sont enregistrées respectivement au niveau de 2^{ème} et 5^{ème} branche avec des valeurs (51.79 kW/26.28 kVAr) et (38.25kW/33.02 kVAr, cela est justifié par les valeurs des impédances de ces lignes.

3.3 Validation de la méthode directe :

Les résultats obtenus sont présentés dans les tableaux (3.3) (3.4) et figures (3.5), (3.6) et (3.7). (Les données du réseau sont représentées en Annexe 1)

Tableau 3.3 : Résultats de simulation d'amplitude et phase des tensions des nœuds

Nbus	Tension (pu)	Phase (degré)
1	1.0000	0.000
2	0.9970	0.014
3	0.9829	0.096
4	0.9755	0.162
5	0.9681	0.228
6	0.9497	0.134
7	0.9462	-0.096
8	0.9413	-0.060
9	0.9351	-0.133
10	0.9292	-0.196
11	0.9284	-0.189
12	0.9269	-0.177
13	0.9208	-0.269
14	0.9185	-0.347
15	0.9171	-0.385
16	0.9157	-0.408
17	0.9137	-0.485
18	0.9131	-0.495
19	0.9965	0.004
20	0.9929	-0.063
21	0.9922	-0.083
22	0.9916	-0.103
23	0.9794	0.065
24	0.9727	-0.024
25	0.9694	-0.067
26	0.9477	0.173
27	0.9452	0.229
28	0.9337	0.312
29	0.9255	0.390
30	0.9220	0.496
31	0.9178	0.411
32	0.9169	0.388
33	0.9166	0.380

Tableau 3.4 : Résultats de simulation pertes de puissances active et réactive du réseau de distribution IEEE 33-Bus

NB	Br départ	Br arrivé	Pertes	
			Ploss (kW)	Qloss (kVAr)
1	1	2	12.24	6.24
2	2	3	51.79	26.38
3	3	4	19.90	10.13
4	4	5	18.70	9.52
5	5	6	38.25	33.02
6	6	7	1.91	6.33
7	7	8	4.48	1.60
8	8	9	4.18	3.00
9	9	10	3.56	2.52
10	10	11	0.55	0.18
11	11	12	0.88	0.29
12	12	13	2.67	2.10
13	13	14	0.73	0.96
14	14	15	0.36	0.32
15	15	16	0.28	0.21
16	16	17	0.25	0.34
17	17	18	0.05	0.04
18	2	19	0.16	0.15
19	19	20	0.83	0.75
20	20	21	0.10	0.12
21	21	22	0.04	0.06
22	3	23	3.18	2.17
23	23	24	5.14	4.06
24	24	25	1.29	1.01

25	6	26	2.60	1.32
26	26	27	3.33	1.69
27	27	28	11.30	9.96
28	28	29	7.83	6.82
29	29	30	3.90	1.98
30	30	31	1.59	1.57
31	31	32	0.21	0.25
32	32	33	0.01	0.02
Pertes totales			202.66	135.13

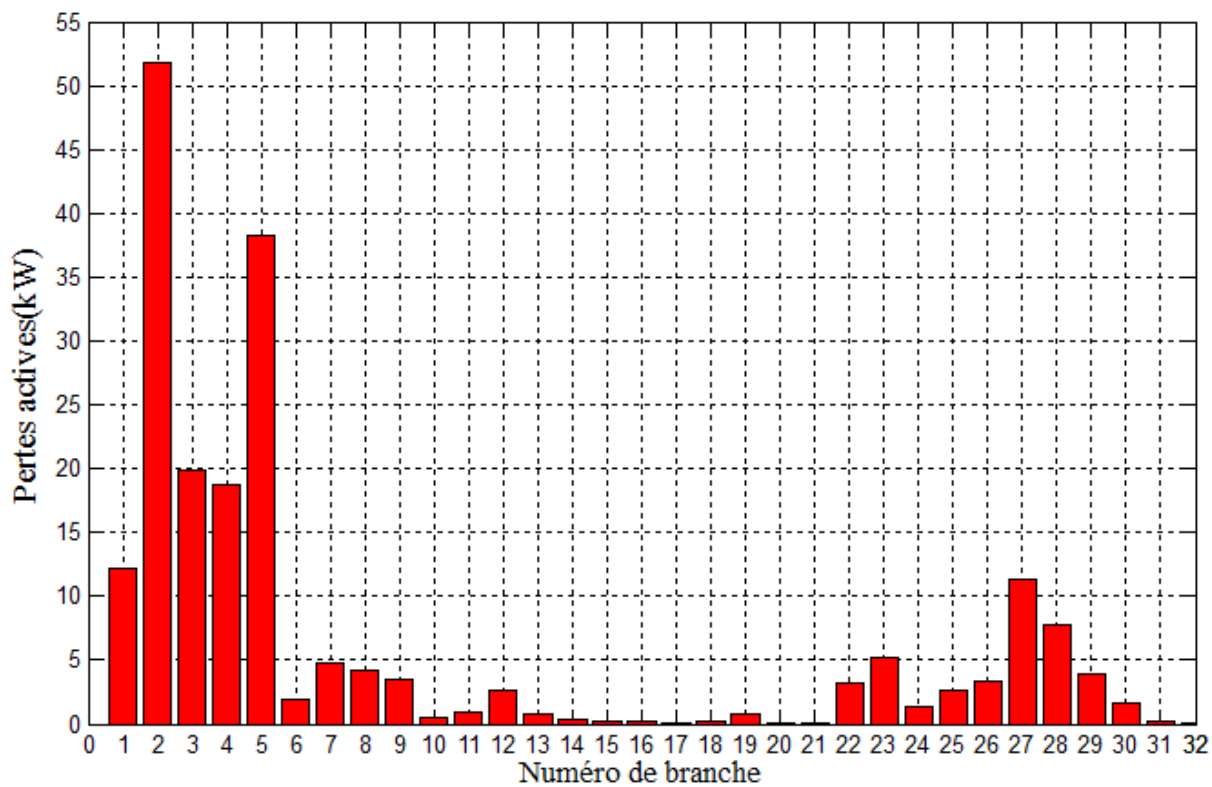


Figure 3.5 : Pertes de puissance active dans les branches du réseau IEEE33-Bus

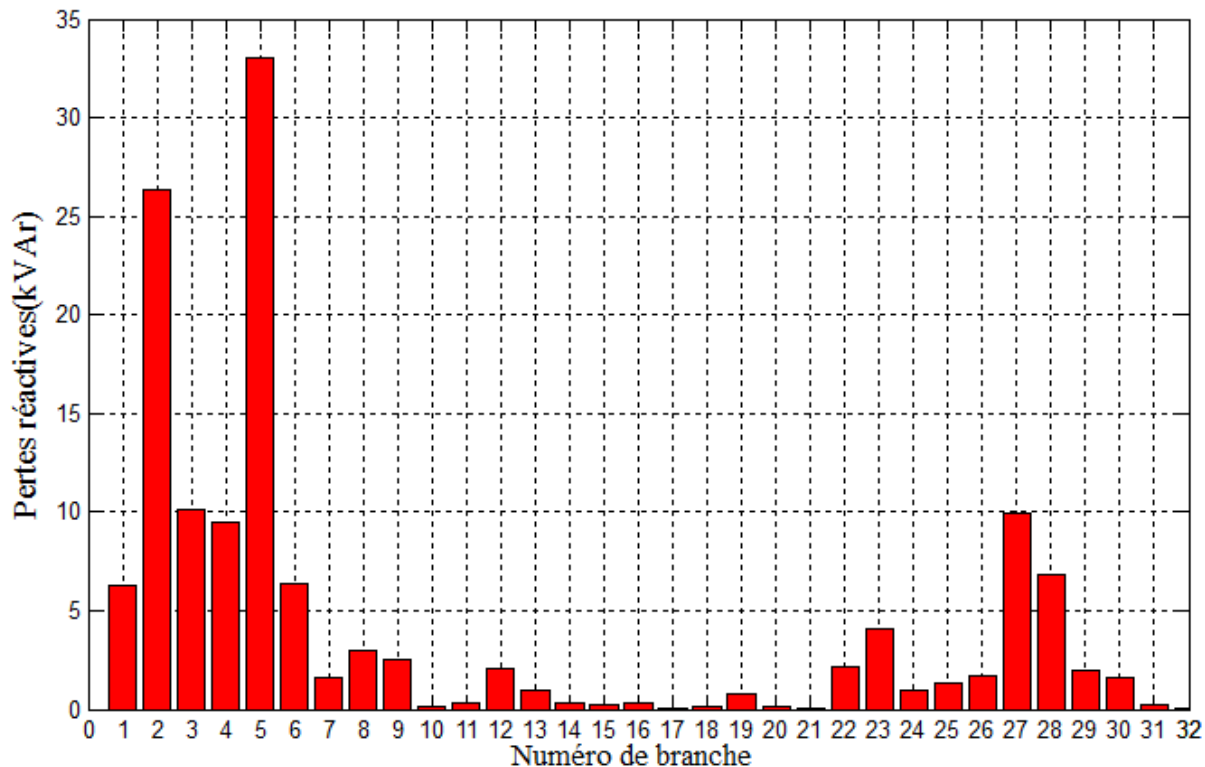


Figure 3.6: Pertes de puissance réactive dans les branches du réseau IEEE33-bus

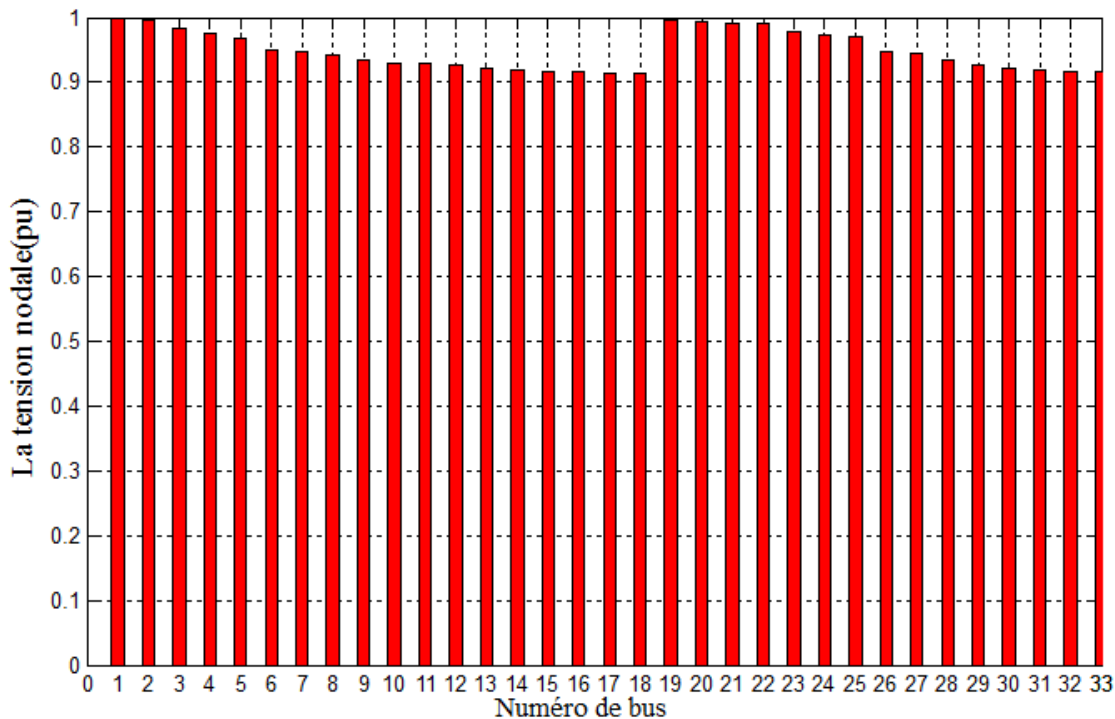


Figure 3.7 : La tension dans les branches du réseau IEEE33-bus

3.3.1 Discussion des résultats (direct)

Les tableaux (3.3) et (3.4) représentent les résultats de calcul de l'écoulement de puissance. On remarque que la plus grande tension atteint une amplitude de 0.9970 pu au deuxième jeu de barre, le premier étant celui du générateur dont la tension est imposée et fixée. La plus faible tension est observée au niveau de 18^{ème} jeu de barre, cela est justifié par l'accumulation des chutes de tension dans les branches. Pour les pertes de puissance, nous notons qu'elles sont respectivement 202.67kW et 135.14 kVAr.

Les figures (3.5) et (3.6) montrent que les plus grandes pertes de puissances actives et réactives sont enregistrées respectivement au niveau de 2^{ème} et 5^{ème} branche avec des valeurs (51.79 kW/26.28 kVAr) et (38.25kW/33.02 kVAr, cela est justifié par les valeurs des impédances de ces lignes.

3.4 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté le réseau de distribution radial à 33 jeux de barre et les données concernées. De plus, on a fait une simulation de l'algorithme de chaque méthode, et on a extrait les résultats de chaque méthode à partir des tableaux et les figures.

Nous concluons que les deux méthodes sont rapides et efficaces par rapport d'autres méthodes classiques, nous remarquons que les deux méthodes ont les mêmes nombres d'itérations et les mêmes résultats finaux.

Conclusion générale :

Dans ce travail, On a présenté le réseau de distribution radial et leurs caractéristiques, éléments et architectures. et on a mentionné l'objectif et les méthodes de l'analyse du système électrique.

Ensuite, on a fait cette analyse à partir de deux méthodes itératives (méthode Backward forward sweep et méthode Directe). Ces méthodes sont programmées sur MATLAB, et sont traité le réseau de distribution radial à 33 jeux de barres.

Les deux méthodes utilisées dans ce travail convergent et donnent les résultats, on peut dire que la méthode Backward forward sweep est la solution idéale au problème de calcul l'écoulement de puissance dans le réseau de distribution radial.

ANNEXE

Tableau A.1 : Les données des branches du réseau de distribution radial IEEE 33 bus

NB	dB	aB	R (Ω)	X (Ω)
1	1	2	0.0922	0.047
2	2	3	0.493	0.2511
3	3	4	0.366	0.1864
4	4	5	0.3811	0.1941
5	5	6	0.819	0.707
6	6	7	0.1872	0.6188
7	7	8	0.7114	0.2351
8	8	9	1.03	0.74
9	9	10	1.044	0.74
10	10	11	0.1966	0.065
11	11	12	0.3744	0.1298
12	12	13	1.468	1.155
13	13	14	0.5416	0.7129
14	14	15	0.591	0.526
15	15	16	0.7463	0.545
16	16	17	1.289	1.721
17	17	18	0.732	0.574
18	2	19	0.164	0.1565
19	19	20	1.5042	1.3554
20	20	21	0.4095	0.4784
21	21	22	0.7089	0.9373
22	3	23	0.4512	0.3083
23	23	24	0.898	0.7091
24	24	25	0.896	0.7011
25	6	26	0.203	0.1034
26	26	27	0.2842	0.1447
27	27	28	1.059	0.9337
28	28	29	0.8042	0.7006
29	29	30	0.5075	0.2585
30	30	31	0.9744	0.963
31	31	32	0.3105	0.3619
32	32	33	0.341	0.5302

Tableau A.2 : Les données des jeux de barres du réseau de distribution IEEE 33
 Nombre d'itérations = 4

Nbus	V (pu)	Delta (°)	P (kW)	Q (kVAr)
1	1	0	0	0
2	1	0	100	60
3	1	0	90	40
4	1	0	120	80
5	1	0	60	30
6	1	0	60	20
7	1	0	200	100
8	1	0	200	100
9	1	0	60	20
10	1	0	60	20
11	1	0	45	30
12	1	0	60	35
13	1	0	60	35
14	1	0	120	80
15	1	0	60	10
16	1	0	60	20
17	1	0	60	20
18	1	0	90	40
19	1	0	90	40
20	1	0	90	40
21	1	0	90	40
22	1	0	90	40
23	1	0	90	50
24	1	0	420	200
25	1	0	420	200
26	1	0	60	25
27	1	0	60	25
28	1	0	60	20
29	1	0	120	70
30	1	0	200	600
31	1	0	150	70
32	1	0	210	100
33	1	0	60	40

Bibliographies

[1] Commission de Régulation de l’Energie. Description générale des réseaux électriques. Dernière consultation : 01/06/2016

[2] Legifrance. Arrêté du 17 mars 2003 relatif aux prescriptions techniques de conception et de fonctionnement pour le raccordement au réseau public de distribution d’une installation de consommation d’énergie électrique, Mars 2003. Dernière consultation : 01/06/2016.

[3] Contribution à la gestion des réseaux de distribution en présence de dégradation d’énergie dispersée Thesis · December 2014

[4] Philippe CARRIVE, *Réseaux de distribution - Structure et planification*, volume D4210, collection Techniques de l’ingénieur.

[5] Guide de conception des réseaux électriques industriels, Schneider Electric, T&D 6 883 427/A

[6] RÉPARTITION OPTIMALE DES PUISSANCES UTILISANT LES TECHNIQUES DE L’INTELLIGENCE ARTIFICIELLE Option : ÉLECTROTECHNIQUE Par : Mr DRAIDI ABDELLAH Date de Soutenance : 11 juillet 2016

[7] S. Sivanagaraju, J.Viswanatha Rao and M. Giridhar, “A loop based load flow method for weakly meshed distribution network”, APRN Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol.3, No.4, pp.55-59, 2008.

[8] William. F. Tinney and Clifford E. Hart. Power Flow Solution by Newton’s Method. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-86(11), 1967.

[9] B. Stott and O. Alsac. Fast Decoupled Load Flow. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-93(3) :859–869, 1974.

[10] D. Das, D. P. Kothari, and A. Kalam. Simple and efficient method for load flow solution of radial distribution networks. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 17(5) :335–346, 1995.

- [11] D. Das, H.S. Nagi, and D.P. Kothari. Novel method for solving radial distribution networks. *Transmission and Distribution IEE Proceedings - Generation*, 141(4) :291–298, 1994.
- [12] S. Ghosh and D. Das. Method for load-flow solution of radial distribution networks. *Transmission and Distribution IEE Proceedings - Generation*, 146(6) :641–648, 1999.
- [13] Efficient load flow method for distribution systems with radial or mesh configuration - *IET Journals & Magazine*.
- [14] M. H. Haque. A general load flow method for distribution systems. *Electric Power Systems Research*, 54(1) :47–54, 2000.
- [15] Jen-Hao Teng. A direct approach for distribution system load flow solutions. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 18(3) :882–887, 2003.