



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية



**Republique Algerienne Democratique Et Populaire**

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

جامعة العربي التبسي تبسة

**Université Larbi tébessi – Tébessa –**

**Faculté des Sciences et de la Technologie**

**Département de Génie Electrique**

**MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du **diplôme de Master Académique**

**En : Électrotechnique**

**Spécialité : Électrotechnique industrielle**

**Par : ZERKANE Chaima & HAFDALLAH Abir**

**Thème**

**Étude de la performance d'un réseau électrique  
industriel par estimation d'état**

Présenté et soutenu le 14/06/2022 Devant le jury composé de :

M. BENDAKIR Abdelhakim	M.C.B	Président
M. DIB Djalel	Prof	Rapporteur
M. BOUKADOUM Aziz	M.C.A	Examineur

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# Remerciements

*Nos remerciements vont tout premièrement à ALLAH tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donnée durant toutes ces longues années.*

*Ainsi, Nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur professeur DIB Djalel On lui exprime toute notre gratitude pour son expérience, son soutien inconditionnel et ses qualités humaines, son encadrement qui nous a offert la possibilité de réaliser ce travail et qui nous a permis d'élargir notre spectre de connaissances scientifiques.*

*Nous remercions les membres de jury d'examen pour l'honneur qu'ils nous font en participant au jugement de ce travail.*

*Nous remercions vont aussi à tous les enseignants du département d'électrotechniques, et particulièrement ceux qui ont participé à nous formation.*

*Un grand merci pour nos parents.*

*Enfin nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis et collègues d'études pour leurs soutiens et encouragements tout au long de mon cursus.*

*Merci à tous et à toute*

# *Dédicaces*

*Avant tous, je remercie dieu le tout puissant de  
m'avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce  
travail malgré toutes les difficultés rencontrées.*

*Je dédie ce modeste travail :*

*À ma mère et mon père*

*À mes très chers frères et ma sœur.*

*À toute ma famille*

*À mes chers amis*

*À tous ceux que j'aime et qui m'aiment.*

*À mes amis ABIR, MOUFIDA, IMEN, SALSABIL.*

*À tous les amis d'études surtout ceux d'électrotechnique*

*Promotion 2021/2022*

**Chaima**

# Dédicaces

*J'ai le grand honneur de dédier ce modeste travail à :*

*Mes très chers parents, ces braves personnes qui se sont toujours dévoués à leurs fils.*

*Toute la vie durant, vous n'avez ménagés aucun effort pour le bonheur et la réussite de vos enfants. Ce travail est avant tout le fruit de vos sacrifices consentis, de votre grande compréhension et de l'amour que vous nous avez donnés qui comme un miracle efface toutes nos peines.*

*Pour cela, chers parents, je vous dis un grand merci et prie Allah pour qu'il vous accorde une longue vie afin que vous puissiez profiter pleinement des fruits que vous avez semés.*

*Mes chers frères: AYMEN, KHALIL, MOHAMED*

*Mes chères sœurs : HOUNAIIDA, MAYASSIN, MOUFIDA*

*Mes amis : AYA, IMEN, SALSABIL*

*Tous ceux qui m'ont donné des conseils et des orientations à Sonelgaz, en particulier MBARKA YASSIN, DJAFEL RAFIK*

*Tous mes camarades de la promotion 2022 du groupe ELT spécialement mon binôme CHAIMA  
Tous nos professeurs qui nous enseignèrent durant toutes ces longues années.*

**Abir**

## Liste des figures

### Chapitre I

<b>Figure I.1:</b> Différents étages d'un réseau électrique.....	6
<b>Figure I.2:</b> Schéma descriptif d'une centrale hydraulique.....	7
<b>Figure I.3:</b> Schéma descriptif d'une centrale nucléaire.....	7
<b>Figure I.4:</b> Schéma descriptif d'une centrale thermique.....	8
<b>Figure I.5:</b> Schéma descriptif d'une centrale éolienne.....	8
<b>Figure I.6:</b> Schéma descriptif d'une centrale photovoltaïque.....	8
<b>Figure I.7:</b> Schéma descriptif d'une centrale biomasse.....	9
<b>Figure I.8:</b> Structure générale d'un réseau électrique.....	10
<b>Figure I.9:</b> Fonctionnement général du réseau électrique.....	12
<b>Figure I.10:</b> Puissance de transit et pertes de puissance dans les lignes HT.....	12
<b>Figure I.11:</b> Capacité maximale de transport de puissance d'une ligne.....	14
<b>Figure I.12:</b> Présentation d'un réseau radial.....	15
<b>Figure I.13:</b> Présentation d'un réseau maillé.....	15
<b>Figure I.14:</b> Présentation d'un réseau bouclée.....	16
<b>Figure I.15:</b> Présentation d'un réseau arborescente.....	16
<b>Figure I.16:</b> Chaîne principale de la protection électrique.....	19
<b>Figure I.17:</b> Enroulements d'un TC.....	21
<b>Figure I.18:</b> Enroulements d'un TT.....	21
<b>Figure I.19:</b> Réseau transport électricité (Sonelgaz 2010).....	22
<b>Figure I.20:</b> La boucle du réseau électrique méditerranéenne 2010.....	22
<b>Figure I.21:</b> Réseau électrique d'interconnexion par les énergies renouvelables entre le nord Afrique, le sud de l'Europ et le moyen orienta (carte du projet DESERTEC).....	23

### Chapitre II

<b>Figure II.1:</b> Modèle d'un générateur utilisé dans l'étude de l'écoulement de puissance.....	28
<b>Figure II.2:</b> Schéma équivalent en $\pi$ d'une ligne de transmission.....	28
<b>Figure II.3:</b> Modèle de la charge électrique.....	29
<b>Figure II.4:</b> Modèle de l'élément shunt.....	29
<b>Figure II.5:</b> Modèle d'un transformateur.....	30

### Chapitre III

<b>Figure III.1:</b> Topologie du réseau IEEE standard à 05 nœuds.....	45
<b>Figure III.2 :</b> Organigramme de la méthode de Gauss-Seidel.....	48
<b>Figure III.3 :</b> Organigramme de la méthode de Newton-Raphson.....	50
<b>Figure III.4 :</b> Comparaison des performances de différentes méthodes de l'écoulement de puissance.....	52
<b>Figure III.5:</b> Bloc de simulation du réseau IEEE 05 nœud sous Matlab/Simulink	53

### Chapitre IV

<b>Figure IV.1 :</b> Schéma de principe de l'estimation d'état d'un réseau électrique....	58
<b>Figure IV.2:</b> Topologie du réseau IEEE standard à 05 nœuds.....	68
<b>Figure IV.3:</b> Les valeurs des $\theta$ par rapport le nombre d'itération.....	75
<b>Figure IV.4:</b> Valeurs des $\theta$ estimé.....	75

## Liste des tableaux

### Chapitre II

<b>Tableau II.1:</b> Types des variables des Jeux de barres existent.....	27
---	----

### Chapitre III

<b>Tableau III.1:</b> Données de production et de consommation du réseau IEEE standard à 05 nœuds.....	47
<b>Tableau III.2:</b> Données des lignes de transport du réseau IEEE 05 nœuds.....	47
<b>Tableau III.3:</b> Résultats de l'écoulement de puissance dans un réseau IEEE standard à 05 nœuds par la méthode de Gauss-Seidel.....	48
<b>Tableau III.4:</b> Résultats des puissances et des pertes transit dans les lignes par la méthode de Gauss-Seidel.....	48
<b>Tableau III.5:</b> Résultats de l'écoulement de puissance dans un réseau IEEE standard à 05 nœuds par la méthode de Newton-Raphson.....	50
<b>Tableau III.6:</b> Résultats des puissances et des pertes transit dans les lignes par la méthode de Newton-Raphson.....	50
<b>Tableau III.7:</b> Résultats de l'écoulement de puissance dans un réseau IEEE standard à 05 nœuds par la méthode de découplé.....	52
<b>Tableau III.8:</b> Résultats des puissances et des pertes transit dans les lignes par la méthode de découplé.....	52
<b>Tableau III.9:</b> Résultats de l'écoulement de puissance dans un réseau IEEE standard à 05 nœuds par Matlab/Simulink.....	54
<b>Tableau III.10:</b> Résultats des puissances et des pertes transit dans les lignes par Matlab/Simulink.....	55

### Chapitre IV

<b>Tableaux IV.1:</b> Les paramètres des lignes.....	70
--	----

## Liste des symboles et abréviations

### Chapitre I

<b>GRT :</b>	Gestionnaire de réseau de transport.
<b>THT :</b>	Très Haut Tension.
<b>HT :</b>	Haut Tension.
<b>MT :</b>	Moyen Tension.
<b>BT :</b>	Basse Tension.
<b>RTE :</b>	Réseau de Transport d'Électricité.
<b>C.E.I :</b>	La Commission Électrotechnique Internationale.
<b>TT :</b>	Transformateurs de tension.
<b>TC :</b>	Transformateur de courant.
<b>Sonelgaz :</b>	Société nationale de l'électricité et du gaz.

### Chapitre II

<b>EP :</b>	Ecoulement de puissance.
<b>CA :</b>	Courant alternatif.
<b>slack bus :</b>	Jeux de Barre de référence.
<b>P.V :</b>	Jeux de Barre de contrôle.
<b>P.Q :</b>	Jeux de Barre de charge.
<b><math>V_i</math> :</b>	La Tension de jeu de barre $i$ .
<b><math>P_i</math> :</b>	La puissance active de jeu de barre $i$ .
<b><math>Q_i</math> :</b>	La puissance réactive de jeu de barre $i$ .
<b><math>P_g</math> :</b>	La puissance active générée.
<b><math>Q_g</math> :</b>	La puissance réactive générée.
<b><math>V_g</math> :</b>	La Tension générée.
<b><math>Q_{gmin}</math> :</b>	La puissance réactive générée minimale.
<b><math>Q_{gmax}</math> :</b>	La puissance réactive générée maximale.
<b><math>Q_s</math> :</b>	La puissance réactive reste.
<b><math>A</math> :</b>	Vecteur d'accélération.
<b><math>P_L</math> :</b>	Puissance active de la charge au nœud.
<b><math>Q_L</math> :</b>	Puissance réactive de la charge au nœud.
<b><math>P_D</math> :</b>	La puissance active de la demande
<b><math>Q_D</math> :</b>	La puissance réactive de la demande.
<b><math>[X]</math> :</b>	Le vecteur d'état.
<b><math>K</math> :</b>	Le nombre d'itérations.
<b><math>\epsilon</math> :</b>	La précision de calcul ou la tolérance.
<b><math>Y_{bus}</math> :</b>	La matrice admittance nodale.
<b><math>V_{bus}</math> :</b>	Vecteur des tensions.
<b><math>I_{bus}</math> :</b>	Vecteur des courants injectés.
<b><math>\bar{P}_{Lossij}</math> :</b>	Puissance active perdue dans la branche $(i - j)$ .
<b><math>\bar{Q}_{Lossij}</math> :</b>	Puissance réactive perdue dans la branche $(i - j)$ .
<b><math>\bar{S}_{Lossij}</math> :</b>	Puissance apparente perdue dans la branche $(i-j)$ .
<b><math>\bar{S}_{ij}</math> :</b>	Puissance apparente qui transite de l'accès $i$ vers l'accès $j$ .
<b><math>\bar{S}_{ji}</math> :</b>	Puissance apparente qui transite de l'accès $j$ vers l'accès $i$ .
<b><math>P_{iP}</math> :</b>	Puissance active planifiée.
<b><math>P_{ic}</math> :</b>	Puissance active calculée.
<b><math>Q_{iP}</math> :</b>	Puissance réactive planifiée.
<b><math>Q_{ic}</math> :</b>	Puissance réactive calculée



---

<b> V  :</b>	Module de tension en V.
<b>GS :</b>	Gauss-Seidel.
<b>NR :</b>	Newton-Raphson.

### Chapitre III

<b>IEEE :</b>	L'Institute of Electrical and Electronics Engineers.
<b>R :</b>	La résistance de la ligne.
<b>X :</b>	La réactance de la ligne.
<b>B :</b>	La susceptance de la ligne.
<b>[p.u] :</b>	Per unit (unité relative).

### Chapitre IV

<b>WLS :</b>	Weighted Least-Squares.
<b>SCADA :</b>	Supervisory Control and Data Acquisition.
<b>E :</b>	Erreur d'estimation.
<b><math>\hat{Z}</math> :</b>	Valeurs estimées.
<b>Z :</b>	Valeurs mesurées.
<b>G :</b>	La matrice de gain.
<b><math>\sigma</math> :</b>	Le facteur de pondération
<b>[Z] :</b>	Vecteur des mesures.
<b>[e] :</b>	Vecteurs des erreurs sur les mesures.
<b>[R] :</b>	La matrice de covariance.
<b>J :</b>	Vecteur d'état qui donne l'erreur minimal de l'estimateur.
<b>H :</b>	La matrice Jacobienne.
<b>H<sup>T</sup> :</b>	La matrice transposée du Jacobienne.
<b>B :</b>	La condition de minimisation de la fonction objective.

## Table des matières

### Remerciement

Dédicaces	
Liste des figures.....	<i>i</i>
Liste des tableaux.....	<i>ii</i>
Liste des symboles et abréviations.....	<i>iv</i>
Tables des matières.....	<i>vi</i>
Introduction générale.....	2

### Chapitre I : Généralité sur le système électrique

I.1 Introduction.....	5
I.2 Le réseau électrique.....	5
I.3 Les différents types des centrales électriques.....	6
I.3.1 Centrales hydrauliques.....	7
I.3.2 Centrales nucléaires.....	7
I.3.3 Centrales thermiques.....	7
I.3.4 Centrales éoliennes.....	8
I.3.5 Solaire photovoltaïque.....	8
I.3.6 Centrales géométriques.....	9
I.3.7 Centrales biomasses.....	9
I.4 Structure générale des réseaux électriques.....	9
I.4.1 Production.....	10
I.4.2 Transport.....	10
I.4.3 Répartition.....	11
I.4.4 Distribution.....	11
I.4.5 Consommation BT.....	11
I.5 Fonctionnement du réseau électrique.....	11
I.6 Capacité de transit des puissances du réseau électrique. ....	12
I.6.1 Transport en haute tension et facteur de puissance.....	12
I.6.2 Puissance maximale.....	14
I.7 Architecture des réseaux électriques.....	14
I.7.1 Réseau radial.....	14
I.7.2 Réseau maillé.....	15
I.7.3 Réseau bouclé.....	16
I.7.4 Réseau arborescent.....	16
I.8 Les défauts dans les réseaux électriques.....	16
I.8.1 Les causes des défauts.....	17
I.8.2 Caractéristiques des défauts.....	17
I.8.3 Nature des défauts.....	17
I.8.4 Types de défauts dans les réseaux électriques.....	18
I.9 Système de protection dans les réseaux électriques.....	18
I.9.1 Les fonctions de protection.....	19
I.9.2 Chaîne de protection.....	19
I.9.3 Appareillages de mesures.....	19
I.9.4 Appareillage de protection.....	21
I.10 Structure du réseau national (Sonelgaz).....	22
I.11 Conclusion.....	23

## Chapitre II : Écoulement de puissance dans les réseaux électriques

II.1 Introduction.....	25
II.2 Concept général de l'écoulement de puissance.....	25
II.3 L'écoulement de puissance dans les réseaux électriques.....	25
II.4 Types des jeux de barres.....	26
II.4.1 Jeu de barres de référence (slack bus).....	27
II.4.2 Jeu de barres générateur (à tension contrôlée) (P V).....	27
II.4.3 Jeu de barres de charge (P, Q).....	27
II.5 Modélisation des éléments du réseau électrique.....	27
II.5.1 Modèle du générateur.....	27
II.5.2 Modèle de la ligne électrique.....	28
II.5.3 Modèle de la charge électrique.....	29
II.5.4 Modèle de l'élément shunt.....	29
II.5.5 Modèle de Transformateur.....	29
II.6 Classification des variables de l'écoulement de puissance.....	30
II.6.1 Variables de perturbation.....	30
II.6.2 Variables d'état.....	30
II.6.3 Variables de contrôle.....	31
II.7 Problème d'écoulement de puissance.....	31
II.8 Calcul d'écoulement de puissance.....	31
II.8.1 Dans les nœuds PQ.....	31
II.8.2 Dans les nœuds PV.....	31
II.8.3 Dans le nœud balancier (slack).....	32
II.9 Formulation du problème.....	33
II.9.1 Equation de la matrice d'admittance.....	33
II.9.2 Equations générales de la puissance.....	34
II.9.3 Puissances écoulées dans les lignes.....	34
II.9.4 Puissance écoulée dans les transformateurs régulateurs.....	34
II.9.5 Calcul des pertes totales dans le réseau.....	35
II.10 Méthodes de calcul de l'écoulement de puissance.....	36
II.10.1 Méthode de Gauss-Seidel.....	36
II.10.2 Méthode de Newton-Raphson.....	38
II.10.3 La méthode découplé.....	42
II.11 Conclusion.....	43

## Chapitre III : Étude de cas en écoulement de puissance

III.1 Introduction.....	46
III.2 Application sur réseau IEEE à 05 nœuds.....	46
III.3 Élaboration des programmes de calcul de l'écoulement de puissance.....	47
III.3.1 Résultats du calcul de l'écoulement de puissance par la méthode de Gauss-Seidel.....	47
III.3.2 Résultats des puissances et des pertes transit dans les lignes par la méthode de Gauss-Seidel.....	48
III.3.3 Résultats du calcul de l'écoulement de puissance par la méthode de Newton-Raphson.....	49
III.3.4 Résultats des puissances et des pertes transit dans les lignes par la méthode de Newton-Raphson.....	50
III.3.5 Résultats du calcul de l'écoulement de puissance par la méthode de Découplé.....	51

III.3.6 Résultats des puissances et des pertes transit dans les lignes par la méthode de Découplé.....	52
III.3.7 Comparaison des performances de différentes méthodes de l'écoulement de puissance.....	53
III.3.8 Analyse des résultats.....	53
III.4 Application sur Matlab/simulink de l'écoulement de puissance.....	53
III.4.1 Résultats du calcul de l'écoulement de puissance.....	54
III.4.2 Résultats des puissances et des pertes transit dans les lignes.....	55
III.4.3 Analyse des résultats.....	55
III.5 Conclusion.....	55

### **Chapitre IV : Estimation d'état d'un réseau électrique**

IV.1 Introduction.....	58
IV.2 Présentation générale de l'estimation d'état.....	58
IV.3 Estimateur transport versus Estimateur distribution.....	60
IV.3.1 L'estimateur d'état pour le réseau de transport.....	60
IV.3.2 L'estimateur d'état pour le réseau de distribution.....	60
IV.4 Le traitement de la topologie.....	60
IV.5 Importance de l'estimation d'état dans les systèmes de puissance.....	61
IV.6 Principales composantes de l'estimation d'état.....	61
IV.6.1 Analyse topologique du système électrique.....	62
IV.6.2 Analyse d'observabilité du système électrique.....	62
IV.6.3 Traitement des données fausses.....	62
IV.7 Différents types d'estimation d'état.....	62
IV.7.1 Estimation statique.....	62
IV.7.2 Estimation dynamique.....	62
IV.8 Détail sur l'estimation statique.....	63
IV.8.1 Vecteur d'état $[x]$ .....	63
IV.8.2 Vecteur des mesures $[Z]$ .....	63
IV.8.3 Vecteurs des erreurs sur les mesures $[e]$ .....	63
IV.8.4 Relation entre les vecteurs $Z, X, e$ .....	63
IV.9 Contexte mathématique.....	63
IV.10 Problème pour d'estimateur d'état.....	64
IV.11 L'estimateur des moindres carrés.....	66
IV.12 Algorithme de solution.....	68
IV.13 Étude de cas d'un réseau standard à 5 bus.....	69
IV.14 Conclusion.....	76
Conclusion général.....	79
Référence et bibliographique.....	81
Annexe.....	87

# Introduction générale

## **I.1 Introduction générale**

Le développement économique d'une région est souvent lié au niveau de consommation de l'énergie électrique. Le secteur industriel et la croissance de la population sont les premiers indices qui impliquent d'une manière absolue l'augmentation régulière de la consommation de l'énergie électrique.

L'évolution de la gabarie du réseau électrique ne facilite pas l'extension continue des lignes et du réseau de transport ou de distribution. À cet effet, les compagnies d'électricité cherchent à augmenter la puissance que peuvent transporter les lignes existantes, sans autant compromettre leur fiabilité et stabilité. Idéalement, on aimerait les charger jusqu'aux limites de la capacité thermique des conducteurs et utiliser toutes les lignes pour supporter la charge électrique.

Les réseaux d'énergie structures vastes et complexes sacheminent l'électricité depuis les centres de production jusqu'aux lieux de consommation souvent sur de longues distances. L'énergie électrique est produite en même temps qu'elle est consommée ; donc, en permanence, la production doit s'adapter à la consommation. Il faut, donc, ajuster les puissances active et réactive des générateurs interconnectés dans un réseau électrique dans leurs limites admissibles afin de satisfaire tout type de consommateur et avec un coût minimal tout en préservant l'environnement et avec un minimum de pertes de puissances.

L'exploitation des réseaux électriques pose de nombreux problèmes d'ordre technique et économique. Le propriétaire (gestionnaire) du réseau doit assurer en tout temps et en tout lieu la couverture de l'énergie demandée, de garantir une qualité acceptable de la puissance livrée et de procurer une sécurité d'alimentation élevée avec un coût aussi faible que possible. Sous des conditions normales, les systèmes de transmission électrique fonctionnent en régime permanent. Les calculs exigeant la caractérisation de cet état sont appelés « écoulement de puissance ».

L'estimation de l'état du réseau électrique est une notion avancée pour prédire une situation de fonctionnement du réseau avec des mesures considérées comme douteuses pour des raisons d'incertitudes inévitables.

Se basant sur des grandeurs à valeurs estimées pour l'analyse et le calcul des différents paramètres nécessaires avec l'une des méthodes liées à cette notion d'estimation d'état.

C'est dans ce contexte que notre présent travail de mémoire de fin d'étude de master s'est orienté pour estimer les grandeurs nécessaires (tensions, phases et puissances) avec l'objectif de créer une plateforme de données et de résultats importante qui sera à la disposition de tout acteur de l'énergie électrique.

Le volume de ce présent travail est réparti en 4 chapitres suit :

Dans le premier chapitre, des généralités sur les réseaux d'énergies électriques sont présentés à savoir leur structure, leurs fonctions, les différentes architectures de réseaux ainsi que le système de protection.

Dans le deuxième chapitre, le problème de l'écoulement de puissance dans un réseau électrique est traité où nous avons exposé les méthodes numériques de calcul de l'écoulement de puissance les plus utilisées.

Dans le troisième chapitre, nous avons appliqué la théorie de l'écoulement de puissance sur un réseau de type IEEE standard à 05 nœuds en utilisant notre élaboration de programme sous Matlab.

Dans le quatrième chapitre, l'étude et l'analyse du problème d'estimation d'état sont présentés après avoir présenté un état de l'art sur l'estimation d'état des systèmes non-linéaires suivant une représentation d'état spécifiques. Ainsi, la méthode de moindre carrée concernant l'observabilité des systèmes non-linéaires et on propose une réalisation de méthode techniques sur un le même réseau en utilisant l'environnement Matlab.

Une conclusion générale avec perspectives est présentée comme le terme de ce travail de fin d'étude.

# Chapitre 1

## Généralité sur le système électrique



## I.1 Introduction

À l'origine, le réseau électrique a été construit et dimensionné pour transporter l'énergie électrique produite par les centres de production jusqu'aux centres de consommation les plus éloignés. Ainsi, les transits de puissances circulent de l'amont depuis les productions d'énergie électrique de type grosses centrales thermiques, hydraulique ou nucléaire, vers l'aval représenté par les consommateurs. Le « système » réseau électrique met donc en œuvre des milliers de kilomètres de ligne, des milliers de poste de transformation, ainsi que de nombreux organes de coupure et d'automates de réglage, dimensionnés pour assurer le bon fonctionnement de la fourniture d'énergie électrique. Ainsi, des contrôles hiérarchisés assurent la tenue en tension et en fréquence ; ceux-ci couplés aux divers automates, ont la charge de garantir la continuité de service du système. Cependant le réseau peut être soumis à des perturbations se propageant vite et sur une partie étendue, et qui peuvent avoir un impact critique pour tout le système électrique. Ces perturbations peuvent être, entre autres, accentuées par des productions locales ajoutées sur le réseau transport ou de distribution.

On assiste donc à une prolifération de système de production décentralisée connectée pour l'essentiel à un système électrique non prévu pour les accueillir [1],[2].

## I.2 Le réseau électrique

Un réseau électrique est l'ensemble des composantes requises pour produire, transporter, distribution l'énergie électrique de la source (générateur) à la charge (consommateur). Cet ensemble comprend des transformateurs, des lignes de transmission, des réactances, des condensateurs, des moyens de mesure et de contrôle, des protections contre la foudre et les courts circuits, autrement dit, un réseau électrique est l'ensemble des infrastructures permettant d'acheminer l'énergie électrique des centres de production (centrales électriques), vers les consommateurs d'électricité. Un réseau électrique doit aussi assurer la gestion dynamique de l'ensemble production - transport - consommation, mettant en œuvre des réglages ayant pour assurer la stabilité de l'ensemble :

- Assurer au client la puissance dont il a besoin.
- Fournir une tension stable dont les variations n'excèdent pas 10% de la tension nominale.
- Fournir une fréquence stable.
- Fournir l'énergie avec prix acceptable.
- Maintenir des normes de sécurité rigoureuses.
- Veiller à la protection de l'environnement. [3]

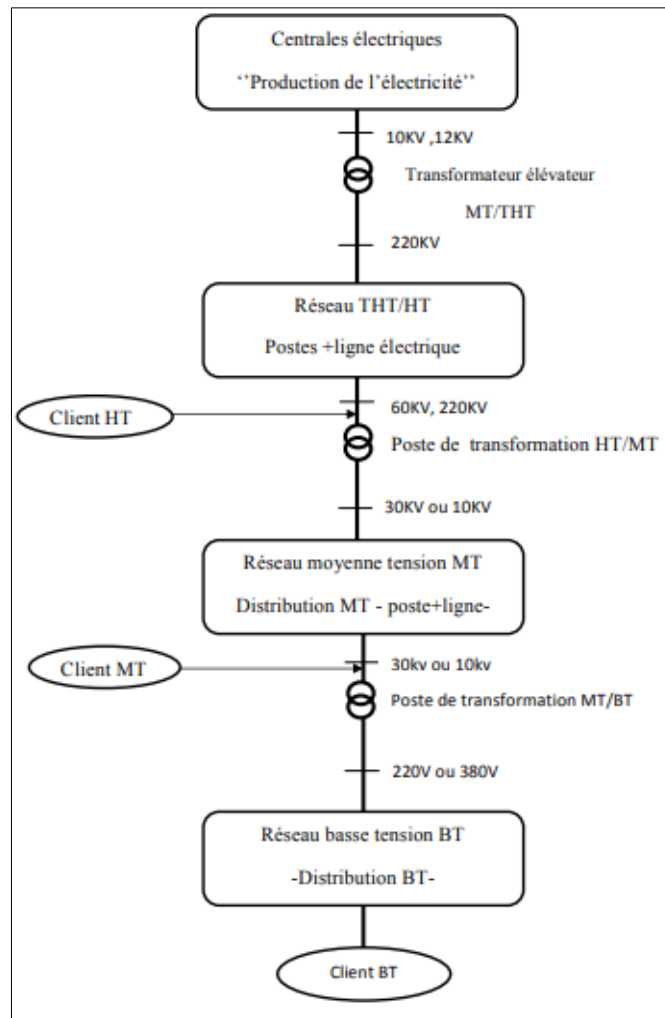


Figure I.1: différents étages d'un réseau électrique [4].

### I.3 les Différents types des centrales électriques

Les centrales représentées sont les centrales hydrauliques, nucléaires, centrales thermiques classiques, éoliennes, photovoltaïques, géométriques marémotrice et biomasse [5].

**I.3.1 Centrales hydrauliques :** Pour les centrales hydrauliques l'énergie potentielle de gravité de l'eau est convertie en électricité par le passage de l'eau dans une turbine reliée à un alternateur. La puissance de la centrale dépend également du débit d'eau. Elles sont utilisées en grande partie pour suivre les fluctuations brusques de la consommation.

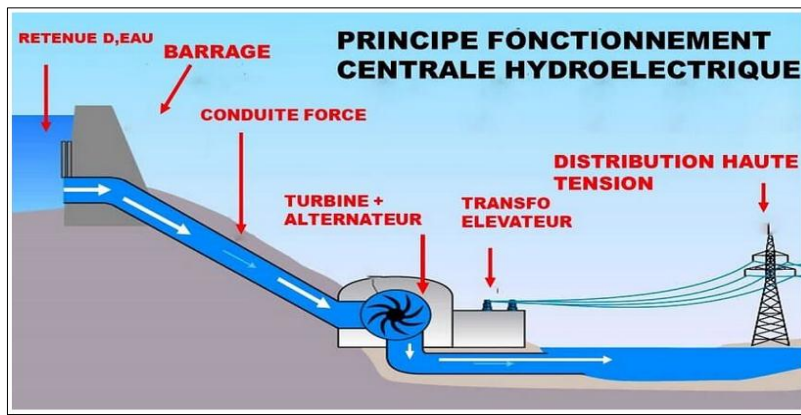


Figure I.2: Schéma descriptif d'une centrale hydraulique.

**I.3.2 Centrales nucléaires :** Le rôle de la centrale nucléaire est de générer la chaleur par la fission nucléaire d'uranium. La chaleur produite est utilisée pour faire réchauffer de l'eau et avoir de la vapeur qui est ensuite acheminée dans une turbine composée d'un corps haute pression et de plusieurs corps basse pression la quelle actionne un alternateur [6].

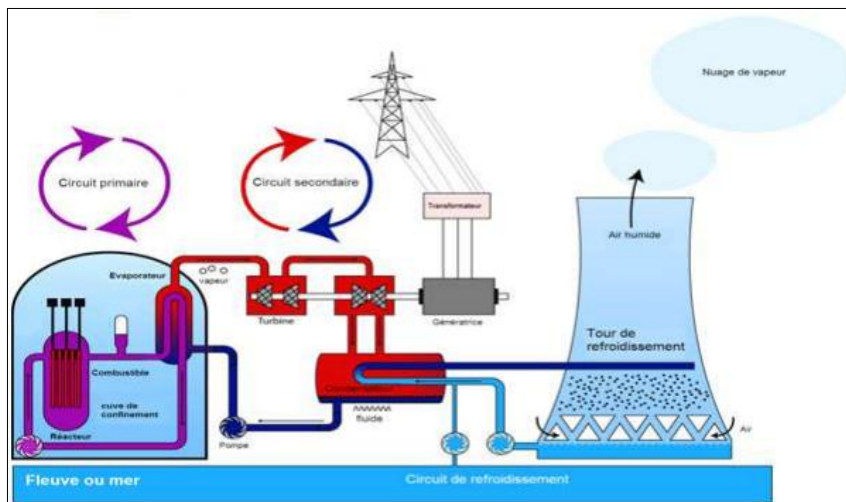


Figure I.3: Schéma descriptif d'une centrale nucléaire.

**I.3.3. Centrales thermiques :** Les centrales thermiques produisent l'électricité à partir de la chaleur qui se dégage de la combustion du charbon, du mazout ou de gaz naturel.

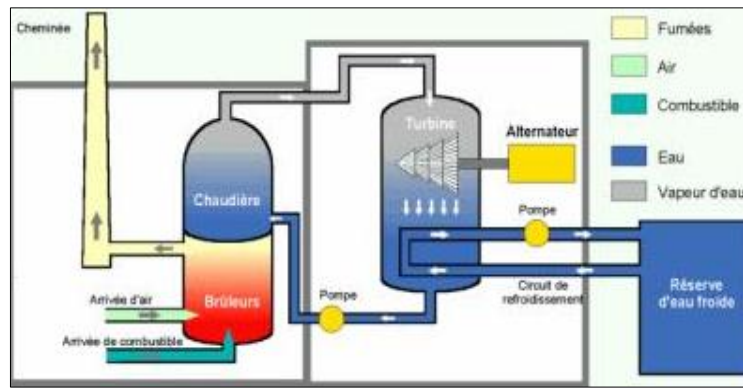


Figure I.4: Schéma descriptif d'une centrale thermique.

**I.3.4 Centrales éoliennes :** L'énergie du vent captée par les pales, entraîne le fonctionnement du moteur ; celui-ci est couplé à la génératrice qui permet de convertir l'énergie mécanique en énergie électrique.

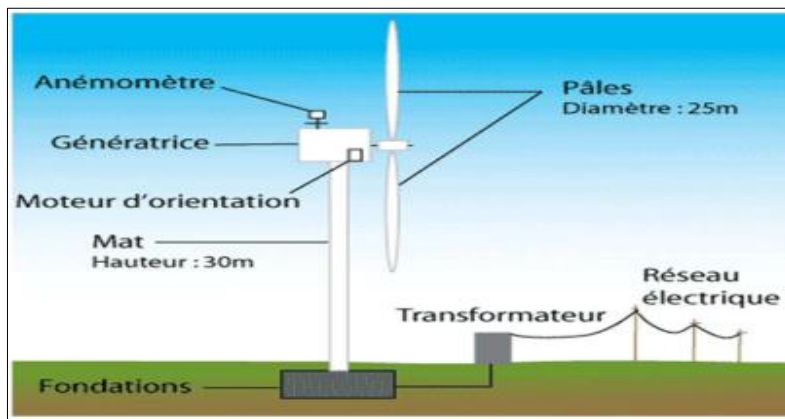


Figure I.5: Schéma descriptif d'une centrale éolienne.

**I.3.5 Solaire photovoltaïque :** Le solaire photovoltaïque permet de transformer la lumière du soleil en électricité.

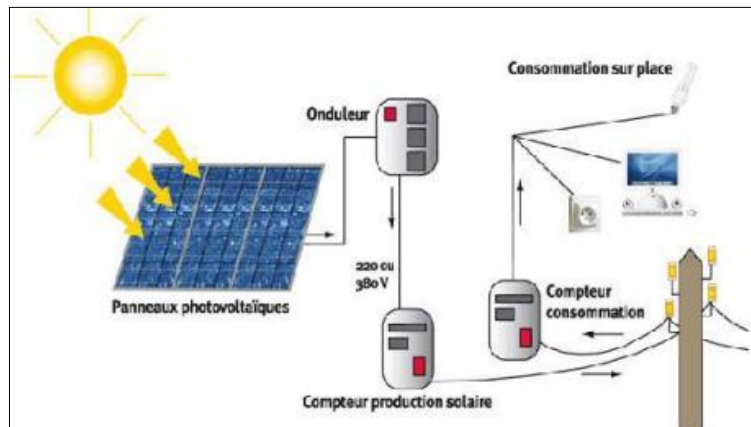
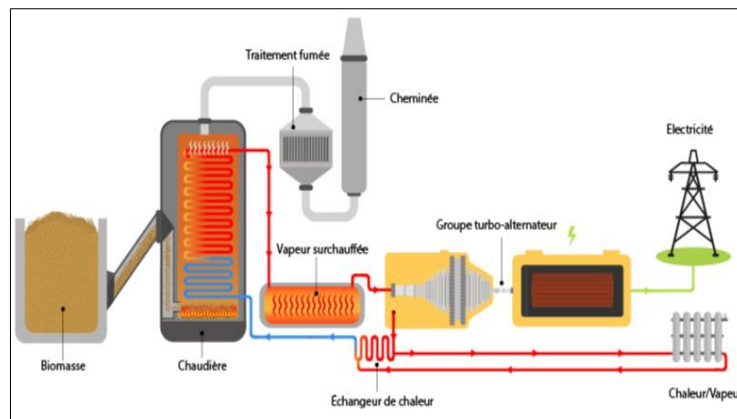


Figure I.6: Schéma descriptif d'une centrale photovoltaïque.

**I.3.6 Centrales géométriques :** Provenant du noyau terrestre. Le principe de la géothermie consiste à injecter en profondeur De l'eau froide sous pression ; celle-ci va Déplacer les roches et ainsi les fracturer.

**I.3.7 Centrales biomasses :** Une centrale biomasse produit de l'électricité grâce à la vapeur d'eau dégagée par la combustion de matières végétales ou animales, qui met en mouvement une turbine reliée à un alternateur [7].



**Figure I.7:** Schéma descriptif d'une centrale biomasse.

## I.4 Structure générale des réseaux électriques

Un système électrique est un ensemble constitué d'unités de production, unités de consommation de réseaux électriques et de centre de contrôle. Son exploitation est assurée par un Gestionnaire de réseau de transport 'GRT' [8].

L'architecture d'un réseau électrique est plus ou moins complexe suivant le niveau de tension, la puissance demandée et la sûreté d'alimentation requise.

Brièvement, le réseau électrique est subdivisé en deux catégories principales : les réseaux de transport/Répartition et les réseaux de Distribution/Livraison [9].

Pour les niveaux de tension, il existe plusieurs classifications provenant des différentes organisations d'électrotechnique qui s'occupe de maitre en œuvre les normes et les lois qui régissent le domaine du Génie électrique.

La plupart des pays mettent en œuvre (selon CEI) :

- Un réseau de transport THT 400..... 800 kV.
- Un réseau de répartition HT 60 ..... 220 kV.
- Un réseau de distribution MT 1 ..... 60 kV.
- Un réseau de livraison de l'abonné BT 400/230 V.

La nouvelle norme en vigueur en Algérie définit les niveaux de tension alternative comme suit :

HTB → pour une tension composée supérieure à 50 kV.

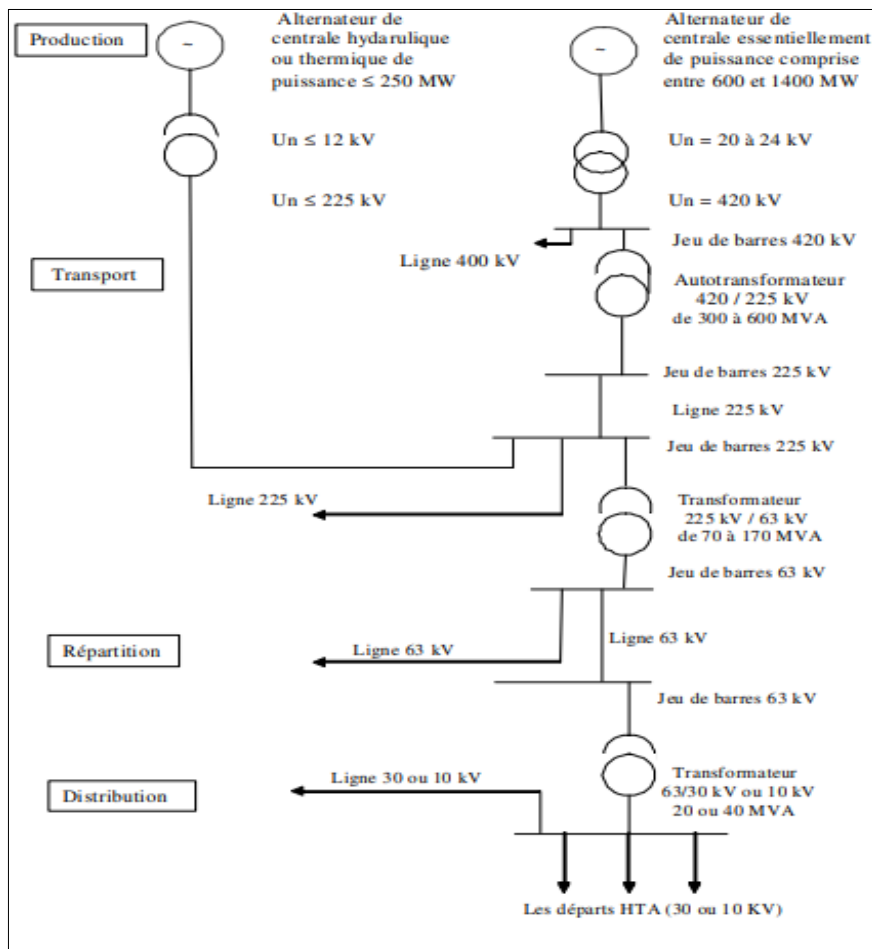
HTA → pour une tension composée comprise entre 1 kV et 50 kV.

BTB → pour une tension composée comprise entre 500V et 1 kV.

BTA → pour une tension composée comprise entre 50V et 500 V.

TBT → pour une tension composée inférieure ou égale à 50V.

Cette structure du réseau est montrée dans le schéma de la figure 8.



**Figure I.8:** Structure générale d'un réseau électrique [10].

De façon très générique, un réseau électrique est toujours dissocié des grandes parties.

**I.4.1 Production :** Elle consiste en la génération de l'ensemble de la puissance active consommée par le réseau tout entier. En grande majorité, les tensions associées à cette production sont produites sous la forme de systèmes triphasés par l'intermédiaire d'alternateurs entraînés à partir de divers types de sources d'énergie dites « primaires ».

**I.4.2 Transport THT ( $U > 220 \dots 800$  kV) :** Le réseau de transport et d'interconnexion achemine en très haute tension de grandes quantités d'énergie ( $S > 300$  MVA) sur de longues distances depuis

des centrales de production vers le réseau de répartition. Les réseaux de transport constituent une vaste grille couvrant le territoire. Ces réseaux sont, pour la plupart, aériens. Ils sont étudiés pour un transit donné correspondant à la limite thermique de la ligne [11].

Les protections de ces réseaux doivent être très performantes. Quant à leur exploitation, elle est assurée au niveau national par un centre de conduite ou de dispatching à partir duquel l'énergie électrique est surveillée et gérée en permanence [12].

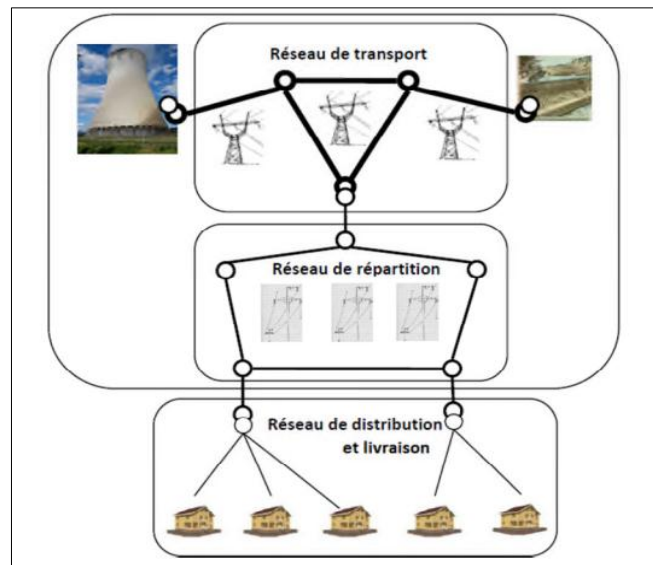
**I.4.3 Répartition HT et THT (60...170 kV) :** Les réseaux régionaux de répartition répartissent l'énergie au niveau des régions et alimentent les réseaux de distribution ainsi que les clients industriels importants ( $S > 10\text{MVA}$ ) livrés directement en HT ou en THT, Il s'agit essentiellement d'industriels tels la sidérurgie, la cimenterie, la chimie, le transport ferroviaire...etc. [8] Leur structure peut être soit aérienne ou souterraine à proximité des zones urbaines. Les protections sont de même nature que celles utilisées sur les réseaux de transport, sa gestion est prise en charge par les centres de conduite régionaux [12].

**I.4.4 Distribution MT (5...36 KV) :** Elle consiste en un maillage fin du territoire permettant à chaque utilisateur d'être à proximité d'une liaison au réseau. C'est l'ultime ramification des lignes et des installations qui permet également un passage progressif des très hautes tensions du transport aux basses tensions de la consommation.

**I.4.5 Consommation BT (400/230 V) :** Chaque récepteur électrique connecté au réseau consomme une puissance active et une puissance réactive. La consommation domestique, qui est généralement majoritaire, est très ramifiée et se fait sous basse tension souvent monophasée 220 V ou triphasé 380 V. Certains « clients » industriels (grosses usines, ferroviaire, etc.) sont directement reliés en moyenne, haute ou très haute tension.

## **I.5 Fonctionnement du réseau électrique**

L'électricité produite par les centrales est d'abord acheminée sur de longues distances dans des lignes à haute tension (HTB) gérées par RTE (Réseau de Transport d'Électricité). Elle est ensuite transformée en électricité à la tension HTA pour pouvoir être acheminée par le réseau de distribution. Cette transformation intervient dans les postes sources. Une fois sur le réseau de distribution, l'électricité haute tension HTA alimente directement les clients industriels. Pour les autres clients (particuliers, commerçants, artisans...), elle est convertie en basse tension (BT) par des postes de transformation avant d'être livrée. Au final, la qualité de l'alimentation en électricité des utilisateurs du réseau est donc le résultat de la qualité de tout ce parcours [13].



**Figure I.9:** Fonctionnement général du réseau électrique.

## I.6 Capacité de transit de la puissance dans les réseaux électriques

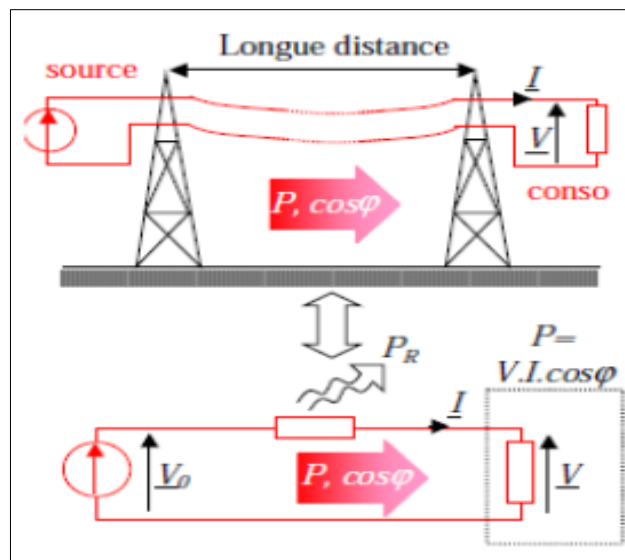
### I.6.1 Transport en haute tension et facteur de puissance

- Tout conducteur électrique présente une « impédance » dont la partie « résistive » est noté R
- Le transport de l'énergie de la source vers la consommation revient à l'acheminement de la

Puissance :  $P = E I \cos \varphi$  (I.1)

- La puissance perdue dans la résistance R s'écrit  $P_R = RI^2$ , ou  $P_R = R \frac{P^2}{E^2 \cos^2 \varphi}$  (I.2)

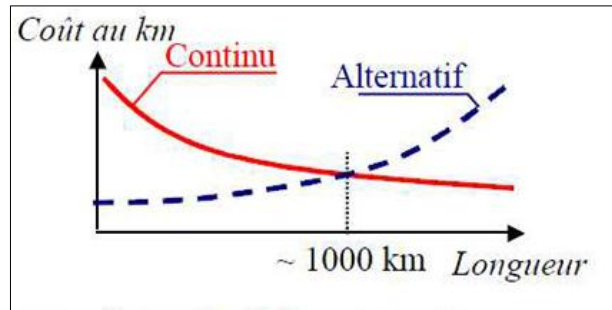
- Pour acheminer la puissance P avec un minimum de pertes la tension E doit être le plus grand possible. Le facteur de puissance doit être le plus proche possible de 1.



**Figure I.10:** Puissance de transit et pertes de puissance dans les lignes HT.



- Il semble qu'à chaque défaut du continu corresponde un avantage de l'alternatif.
- L'utilisation massive du transformateur pour élever et rabaisser les tensions se dégage tout de même comme argument de grand poids.
- Sur le plan économique, le coût au kilomètre évolue en fonction de la distance suivant la courbe ci-contre :



- L'alternatif reste plus économique sur des distances de l'ordre de 1000 Km, pour l'utilisation du transformateur.
- Par ailleurs, la nature sinusoïdale s'impose de par le fait que toute autre forme de tension alternative représente inévitablement un « contenu harmonique » qui n'a que des conséquences néfastes sur les pertes et le facteur de puissance. .

### A. Pour une ligne monophasée

$$P = E I \cos \varphi \quad (\text{I.3})$$

$$P_j = 2 R I^2 = 2R \frac{P^2}{E^2 \cos^2 \varphi} = \frac{2pL}{S} \frac{P^2}{E^2 \cos^2 \varphi} \quad (\text{I.4})$$

$$\text{Donc : } K = \frac{P_j}{P} = \frac{2pL}{S} \frac{P}{E^2 \cos^2 \varphi} \quad (\text{I.5})$$

### B. Pour une ligne triphasée

$$P = \sqrt{3} E I \cos \varphi \quad (\text{I.6})$$

$$P_j = 3 R I^2 = R \frac{P^2}{E^2 \cos^2 \varphi} = \frac{pL}{S} \frac{P^2}{E^2 \cos^2 \varphi} \quad (\text{I.7})$$

$$\text{Donc : } K = \frac{P_j}{P} = \frac{pL}{S} \frac{P}{E^2 \cos^2 \varphi} \quad (\text{I.8})$$

Il existe un certain nombre de phénomènes caractéristiques du fonctionnement normal des réseaux :

**I.6.2 Puissance maximale :** Chaque tronçon de réseau, comme chaque association « générateur / récepteur » présente une « puissance maximale transmissible ».

$$\text{Cette puissance s'écrit : } P_{\max} = \frac{V_r^2}{4Z_i} \quad (\text{I.9})$$

Elle dépend énormément de l'impédance de la ligne ( $Z_i$ ).

Si l'impédance de la ligne est réduite une valeur conventionnelle dite l'impédance caractéristique dont la fonction principale est l'adaptation des impédances  $Z_i$ , le courant transféré sera Maximal ce qui même à une puissance transportée maximale

À cette valeur de puissance le rendement  $\eta$  peut être faible (50%) c'est alors un cas limite.

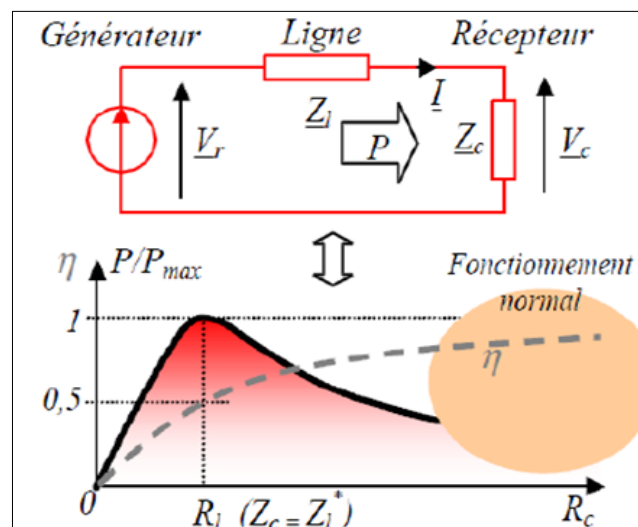


Figure I.11: Capacité maximale de transport de puissance d'une ligne.

## I.7 Architecture des réseaux électriques

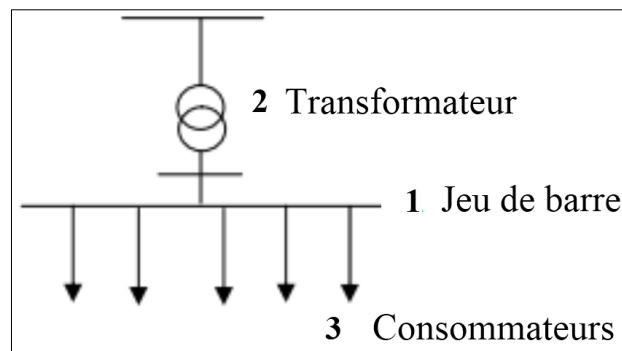
Pour effectuer le transit des puissances depuis les centres de production vers les consommateurs de divers niveaux de tensions, on utilise différentes architectures et topologies des réseaux qui assurent ces tâches, ces architectures dépendent de plusieurs critères :

- Le niveau de fiabilité recherché.
- La flexibilité et la maintenance.
- Le coût d'investissement et d'exploitation.

Ces topologies sont classées comme suit :

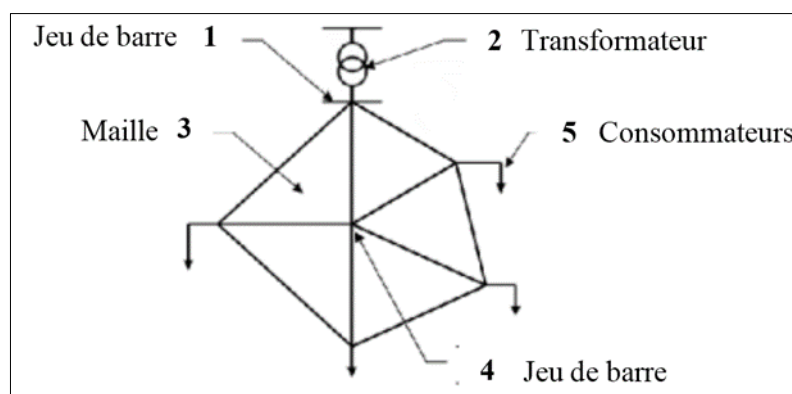
**I.7.1 Réseau radial :** Ce genre de topologie est principalement utilisé dans les réseaux MT et BT. Pour le radial, ça consiste à connecter deux postes sources MT ainsi, le flux de puissance n'a qu'un

seul trajet possible à suivre [14]. Parmi les avantages de ce type de réseau c'est qu'il est extra simple à étudier et à construire, en cas de défaut il suffit d'ouvrir l'appareille de protection placée en tête de ligne, ainsi dans toutes les branches. L'énergie circule dans un sens bien défini, ce qui permet de protéger et de commander celle-ci d'une façon simple, donc par un matériel peut onéreux. Toutefois, ce genre de réseau présent des lacunes, en effet il provoque une grande chute de tension comparativement à d'autres distributions. De plus, le réseau radial ne peut assurer une bonne continuité de service, du fait qu'un incident ou une coupure entraine la mise hors service du réseau sans aucune possibilité de réalimentation de secoure [15].



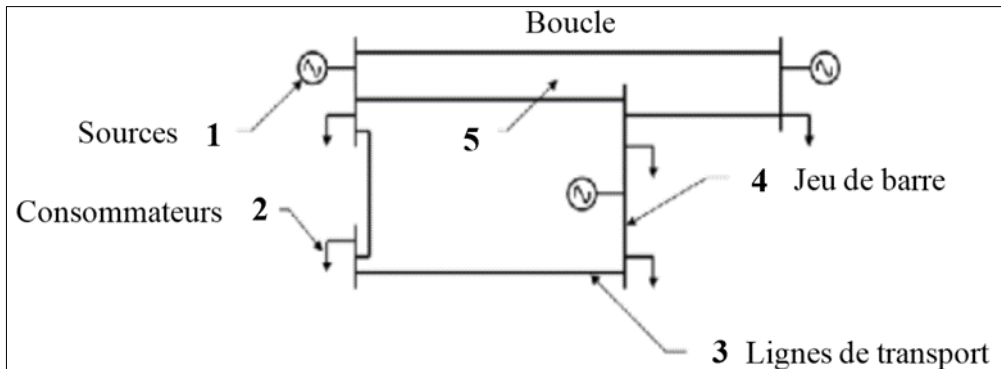
**Figure I.12:** Présentation d'un réseau radial.

**I.7.2 Réseau maillé :** Ce sont des réseaux utilisés pour le réseau de transport et de répartition, ils ont moins de pertes et sont mieux adaptés à la production décentralisée, la structure est semblable aux mailles d'un filet pour faciliter le contrôle précis des transits d'énergie dans les différentes branches. Chaque tronçon de ligne peut être alimenté via différentes voies. Même une défaillance sur plusieurs tronçons n'engendre pas une grosse perturbation et la panne d'une ligne ne peut pas paralyser tout le réseau [16]. Ce type de réseau présente l'avantage d'offrir d'une meilleure sécurité d'exploitation et une continuité de service pour les consommateurs, car en cas de défaut il suffit d'isoler le tronçon défectueux entre les deux nœuds. Son inconvénient réside au niveau de l'étude de ce type de réseau qui est très complexe, aussi sa réalisation est plus coûteuse par rapport à d'autres types de réseaux électriques.



**Figure I.13:** Présentation d'un réseau maillé.

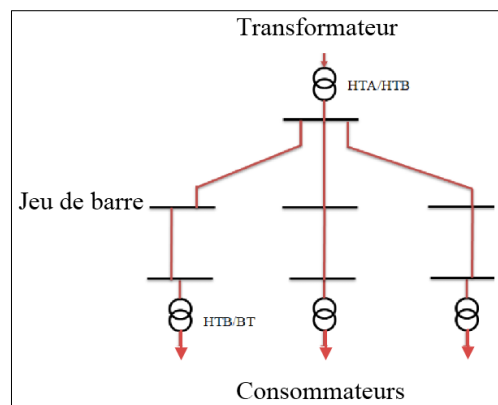
**I.7.3 Réseau bouclé :** Un réseau bouclé est un réseau maillé simplifié présentant un certain nombre de boucles fermées chacune de boucle contient un nombre limité de sources. L'avantage principal de ce type de réseau est qu'en cas de défaut d'un élément la continuité de service est toujours assurée, car la mise hors tension d'un tronçon bien défini n'entraîne pas des surcharges inadmissibles pour les autres. Fait du rapport de charge est donc de fortes sections. L'inconvénient de ce type de réseau est lié au coup de réalisation et de sa mise en œuvre qui est très importante sans compter le coup des protections.



**Figure I.14:** Présentation d'un réseau bouclée.

**I.7.4 Réseau arborescent :** Est un réseau à deux ordres de lignes : dorsales et dérivations Des sous-dérivations peuvent être utilisées pour alimenter des charges isolées ou pour grouper sur un même interrupteur à commande manuel un ensemble MT/BT.

Des interrupteurs automatiques seront installés à l'endroit de dérivation pour permettre l'élimination de la dérivation.



**Figure I.15:** Présentation d'un réseau arborescente [17].

## I.8 Les défauts dans les réseaux électriques

Un défaut électrique est toute perturbation qui engendre une modification de la valeur de courant (sur une ligne) et/ou de la tension (entre le demi-jeu de barres et le neutre) par rapport à une valeur

nominale (dépassement de seuil). Dans certains cas, un défaut peut conduire à l'effondrement électrique de réseau et la mise en danger de son environnement [18].

**I.8.1 Les causes des défauts :** Ils existent de nombreux incidents qui affectent le fonctionnement d'un réseau électrique et peuvent être catégorisés :

**A. Par leur origine**

- Mécanique (rupture de conducteurs, liaison électrique établie entre deux conducteurs par un mauvais câblage, un outil oublié, une branche ou par un animal).
- Surtension électrique d'origine interne (surtension de manœuvre) ou atmosphérique (foudre).
- Dégradation de l'isolement consécutive à la chaleur, à l'humidité, au vieillissement ou à une atmosphère corrosive.

**B. Par leur localisation**

- Interne ou externe à une machine, sur une ligne aérienne ou souterraine.

**C. Par la nature de la connexion**

- Court-circuit franc lorsque deux points mis en court-circuit se touchent directement.
- Court-circuit impudent lorsque les deux points mis en court-circuit sont reliés par un milieu impudent (un arbre par exemple) [19].

**I.8.2 Caractéristiques des défauts :** Les courts-circuits sous les défauts sont caractérisés par leur forme, leur durée et l'intensité du courant. Les ingénieurs en électrotechnique option réseaux électriques utilisent souvent, comme terme défaut. Un défaut dans les réseaux électriques peut être :

- Monophasé, entre une phase et la terre ou une masse.
- Biphasé, entre deux phases raccordées ensemble, peut être un défaut biphasé mis à la terre ou biphasé isolé.
- Triphasés, entre trois phases de la ligne ou les trois phases et la terre.

**I.8.3 Nature des défauts :** Les différents composants des réseaux sont conçus, construits et entre tenus de façon à réaliser le meilleur compromis entre cout et risque de défaillance. Ce risque n'est donc pas nul et des incidents ou défauts viennent perturber le fonctionnement des installations.

Les défauts peuvent être classés en fonction de leur persistance de ce point de vue en groupe les défauts en quatre catégories [20].

- **Défaut auto-extincteur :** si le défaut disparaît de lui-même en un temps très court, sans provoquer de déclenchement des organes de protection (fusible ou disjoncteur)

- **Défaut fugitif** : si le défaut disparaît après une ou plusieurs coupures brèves du réseau d'alimentation sans nécessité d'intervention.
- **Défaut semi-permanent** : si le défaut disparaît après une ou plusieurs coupures longues du réseau d'alimentation (quelques dizaines de secondes) sans nécessité d'intervention.
- **Défaut permanent** : nécessitent l'intervention humaine. Leur durée ne dépend que de la rapidité de cette intervention.

Ces défauts ne se produisent pas à même fréquence, car les statistiques donnent la répartition suivante :

- Auto-extincteurs : 5%
- Défauts fugitifs : 70 à 90%
- Défauts semi permanent : 5 à 15%
- Défauts permanent : 5 à 15% [19].

#### **I.8.4 Types de défauts dans les réseaux électriques**

Les défauts qui affectent les réseaux sont :

- Les courts-circuits.
- Les surcharges.
- Les surtensions.
- Les variations de tension (fluctuations).
- Les déséquilibres.

Les lignes aériennes (dans ce traité, articles spécialisés dans la rubrique matériels et ouvrages) sont soumises aux perturbations atmosphériques (foudre, tempêtes, etc.). Certaines régions, régions montagneuses par exemple, sont beaucoup plus exposées que d'autres à la foudre, selon les niveaux de tension, celle-ci est responsable de 60 à plus de 80 % des défauts. Les câbles souterrains sont exposés aux agressions extérieures (d'engins mécaniques de terrassement par exemple) qui entraînent systématiquement des défauts permanents. Les matériels de réseaux et de postes comportent des isolants (solides, liquides ou gaz) constitués d'assemblages plus ou moins complexes placés entre parties sous tension et masse. Les isolants subissent des dégradations conduisant à des défauts d'isolement qui se traduisent par des courts-circuits [20].

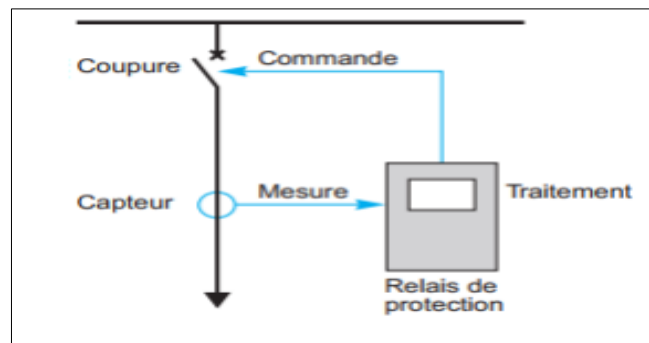
#### **I.9 Système de protection dans les réseaux électriques**

La Commission Électrotechnique Internationale (C.E.I) définit la protection comme l'ensemble des dispositions destinées à la détection des défauts et des situations anormales des réseaux afin de

commander le déclenchement d'un ou de plusieurs disjoncteurs et, si nécessaire d'élaborer d'autres ordres de signalisations.

**I.9.1 Les fonctions de protection :** Les fonctions de protection sont réalisées par des relais ou des appareils multifonctions. À l'origine, les relais de protection étaient de type analogique et effectuaient généralement une seule fonction. Actuellement, la technologie numérique est la plus employée. Elle permet de concevoir des fonctions de plus en plus évoluées et un même appareil réalise généralement plusieurs fonctions. C'est pourquoi, on parle plutôt d'appareils multifonctions [21].

**I.9.2 Chaîne de protection :** C'est le choix des éléments de protection et de la structure globale de l'ensemble de façon cohérente et adaptée au réseau, Le système de protection se compose d'une chaîne constituée des éléments suivants :



**Figure I.16:** Chaîne principale de la protection électrique.

- Capteurs de mesure – courant et tension – fournissant les informations de mesure nécessaires à la détection des défauts.
- Relais de protection, chargés de la surveillance permanente de l'état électrique du réseau, jusqu'à l'élaboration des ordres d'élimination des parties défectueuses, et leur commande par le circuit de déclenchement.
- Organes de coupure dans leur fonction d'élimination de défaut : disjoncteurs, interrupteurs-fusibles, contacteurs-fusibles [22].

### I.9.3 Appareillages de mesures

**-Transformateur de mesure :** Les transformateurs de mesure doivent transmettre une information (un signal électrique) avec une précision garantie, et assurer l'isolement entre le circuit primaire et le circuit secondaire (circuit de mesure). Cette isolation doit supporter la tension et la surtension du réseau ainsi les courants de défauts et il est très dangereux de brancher directement les appareils de mesure dans le circuit à HT ou THT.

Les réducteurs de mesures sont principalement transformateurs de tension (TT) et transformateur de courant (TC), ils sont destinés à ramener les tensions et les courants sur les circuits principaux, à des valeurs plus faibles et faciles à :

- Mesurer et afficher.
- Utiliser pour des installations de comptage, pour calcul les puissances P et Q ...etc.
- Utiliser pour alimenter des circuits de protections électriques ou des régulateurs.

**-Transformateur de courant (TC) :** Les courants industriels sont souvent trop importants pour traverser directement les appareils de mesure. Les transformateurs d'intensité (transformateurs de courant) permettent de ramener ces courants forts à des valeurs acceptables par la plupart des appareils, généralement 1 à 5 ampères.

La fonction d'un transformateur de courant de phase est de fournir à son secondaire un courant proportionnel au courant primaire mesuré. L'utilisation concerne autant la mesure que la protection, avec  $M = I_1/I_2$ .

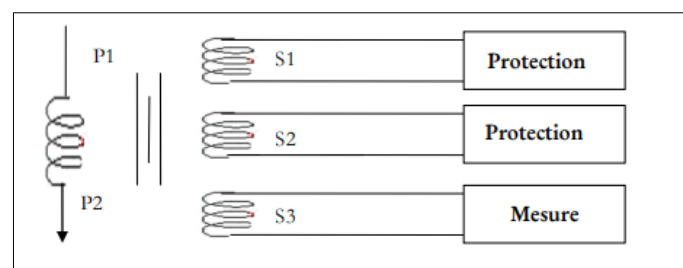
M : rapport de transformation de TC.

$I_1$  : courant primaire.

$I_2$  : courant secondaire.

Le TC doit être :

- Il ne faut jamais laisser le secondaire d'un transformateur de courant ouvert.
- On ne peut pas utiliser un transformateur de courant en courant continu.
- Dans chaque phase de réseaux électrique en trouve un transformateur de courant.



**Figure I.17:** Enroulements d'un TC.

**-Transformateur de tension (TT) :** La fonction d'un transformateur de tension est de fournir à son secondaire une tension image de celle qui lui est appliquée au primaire. L'utilisation concerne autant la mesure que la protection. Les transformateurs de tension (TT) sont constitués de deux enroulements, primaire et secondaire, couplés par un circuit magnétique, les raccordements peuvent se faire entre phases ou entre phase et terre avec,  $M = V_1/V_2$



M : rapport de transformation de TT.

$V_1$  : tension primaire.

$V_2$  : tension secondaire.

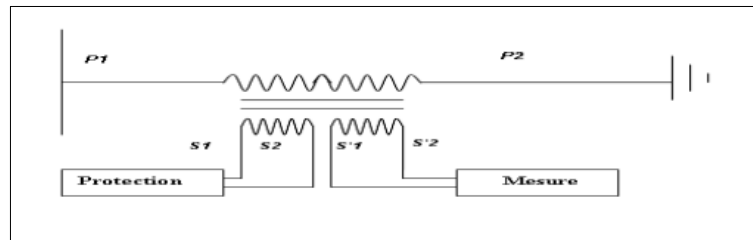


Figure I.18: Enroulements d'un TT [23].

#### I.9.4 Appareillage de protection

- **Parafoudres** : Les parafoudres sont des appareils destinés à limiter la surtension imposée aux transformateurs, instruments et machines électriques par la foudre et par les manœuvres de commutation. La partie supérieure du parafoudre est reliée à un des conducteurs de la ligne protégée et la partie inférieure est connectée au sol par une mise à la terre faible résistance.

- **Les fusibles** : Il est utilisé soit directement comme un dispositif de coupure soit indirectement connecté au circuit secondaire d'un transformateur de courant, avec un contact de fusion donnant un ordre de déclenchement au disjoncteur. La grande variété de réseaux électriques impose des modèles de fusibles de différentes natures selon l'application (un grand nombre de fusibles de recharge pour les différents calibres). L'inconvénient majeur de ces dispositifs réside dans le fait qu'ils sont endommagés par les défauts et qu'ils ont une faible sensibilité.

- **Les éclateurs** : L'éclateur est généralement constitué de deux électrodes, l'une reliée à l'élément protégé et l'autre à la terre. Leur distance est généralement réglable de façon à ajuster la tension d'amorçage. Son déclenchement est réglé pour provoquer l'amorçage si les surtensions des réseaux sont importantes.

- **Mise à la terre des pylônes** : Les pylônes des lignes de transport d'énergie sont reliés à des prises de terre conçues avec grande précaution afin de leur assurer une faible résistance effectivement. Il ne faut pas que la chute de tension dans la prise de terre provoquée par un courant de foudre qui frappe le pylône dépasse la tension de contournement des isolateurs. Sinon les trois phases de la ligne se mettent en court-circuit entre elles et à la terre.

- **Câbles de garde** : Les câbles de garde ne conduisent pas le courant. Ils sont situés au-dessus des conducteurs de phase. Ils jouent un rôle de paratonnerre au-dessus de la ligne, en attirant les coups de foudre, et en évitent le foudroiement des conducteurs. Ils sont en général réalisés en acier.

- **Les isolateurs** : Les isolateurs assurent l'isolement électrique entre les câbles conducteurs et les supports. Sur le réseau de transport, les isolateurs sont utilisés en chaîne, dont la longueur augmente avec le niveau de tension. la chaîne d'isolateurs joue également un rôle mécanique, elle doit être capable de résister aux efforts dus aux conducteurs, qui subissent les effets du vent et de la neige. Les isolateurs ont deux fonctions principales :

- Ils empêchent le courant qui circule dans les conducteurs de phase de passer dans les pylônes.
- Ils accrochent les conducteurs de phase aux pylônes [24].

**I.10 Structure du réseau national (Sonelgaz)**

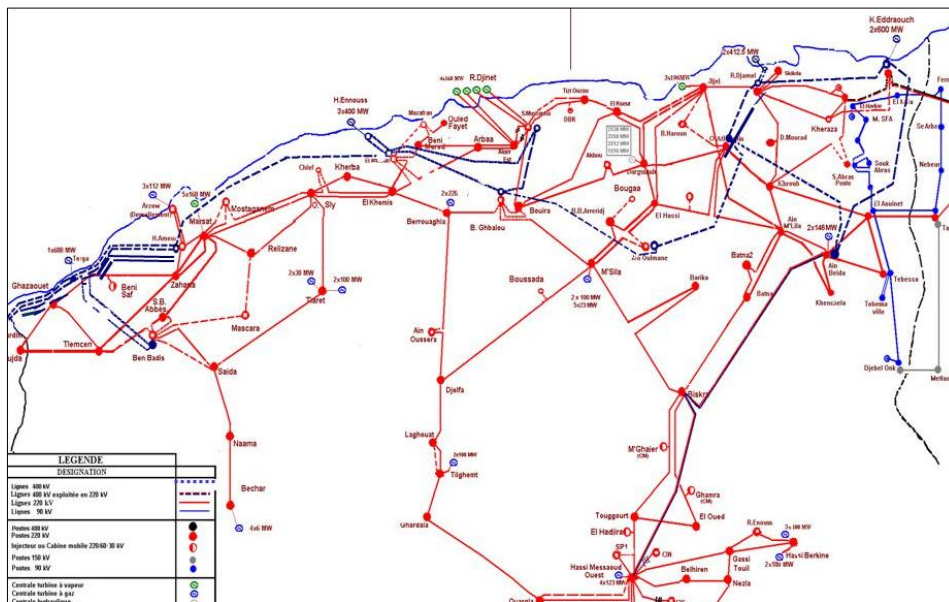


Figure I.19: Réseau transport électricité (Sonelgaz 2010).

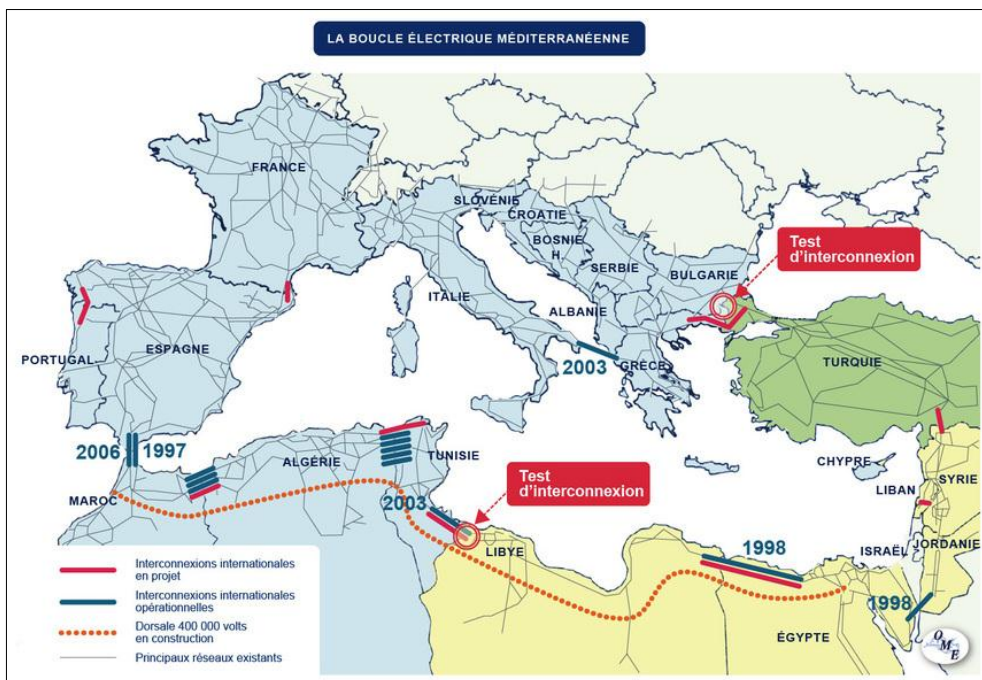
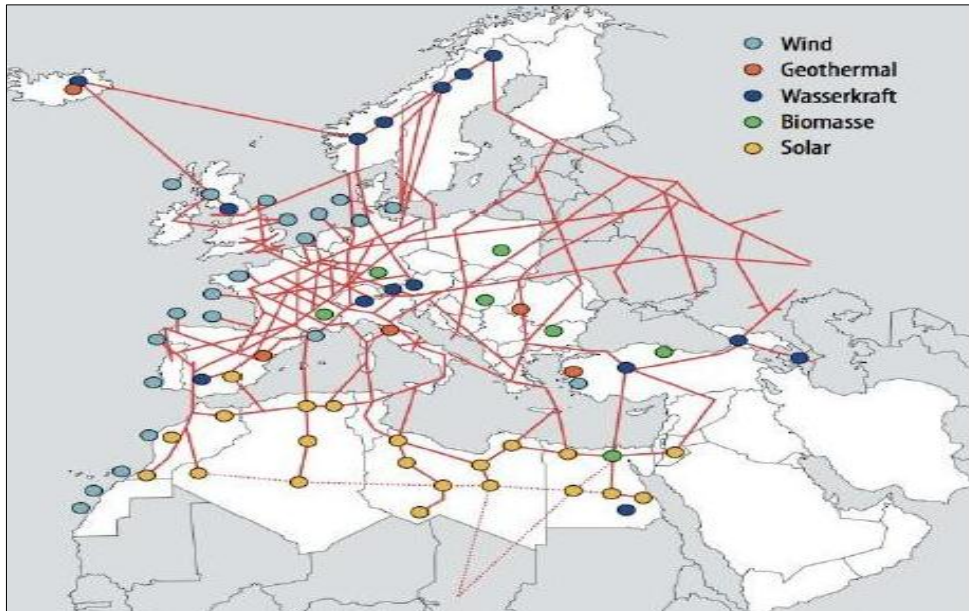


Figure I.20: La boucle du réseau électrique méditerranéenne 2010.



**Figure I.21:** Réseau électrique d'interconnexion par les Énergies Renouvelables entre le nord Afrique, le sud de l'Europ et le moyen orienta (carte du projet DESERTEC).

## I.11 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté un aperçu sur les notions générales des réseaux électrique que ce soit sur l'aspect structure ou l'aspect production et régime d'exploitation ainsi que le différent aspect technique ainsi que l'architecture des réseaux électriques.

Le système de protection et leur importance dans la sauvegarde du réseau électrique ont fait partie de ce présent chapitre.

**Chapitre II**  
**Écoulement de puissance**  
**dans les réseaux électriques**

## **II.1 Introduction**

L'exploitation des réseaux électriques pose de nombreux problèmes d'ordre technique et économique. L'exploitant du réseau doit assurer en tout temps et en tout lieu la couverture de l'énergie demandée, de garantir une qualité acceptable de la puissance livrée et de procurer une sécurité d'alimentation élevée avec un coût aussi faible que possible. Sous des conditions normales, les systèmes de transmission électrique fonctionnent en régime permanent. Les calculs exigeant la caractérisation de cet état sont appelés : Écoulement de puissance (EP) [25]. L'étude de l'écoulement de puissance (Load flow) permet d'avoir la solution des grandeurs d'un réseau électrique en fonctionnement normal et anormal afin d'assurer une exploitation efficace, c'est-à-dire conforme aux normes techniques.

Ces études sont nécessaires pour la planification et les développements futurs des réseaux et aussi pour assurer un fonctionnement fiable des systèmes existants. Le but du calcul de l'écoulement de puissance est de déterminer, en régime triphasé permanent équilibrer les modules et phases des tensions en tous points du réseau. Dans ce chapitre, nous rappelons d'abord les notions des réseaux électriques ; puis nous présentons l'analyse de l'écoulement de en décrivant les méthodes numériques utilisées pour l'étude de la répartition de charge dans un réseau électrique. Ainsi En utilisant ces valeurs, on peut calculer les puissances actives et réactives transitant par les lignes de transport et les transformateurs ainsi que les pertes de transmission [26].

## **II.2 Concept général de l'écoulement de puissance**

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 [27].

## **II.3 L'écoulement de puissance dans les réseaux électriques**

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 [29].

Le calcul de l'écoulement de puissance se traite à travers 5 étapes nécessaires pour aboutir aux résultats souhaités identifiant les tensions nodales et les puissances qui transitent dans les différentes lignes des réseaux et même celles produites par les sources connectées au réseau pour assurer la demande exigée par les différentes charges consommateurs et d'une manière optimale d'où atteindre la mission principale du réseau en cause.

**A. l'état du réseau :** L'objectif du calcul d'écoulement de puissance dans un réseau est de déterminer l'état du réseau selon les charges connectées et leur répartition sur tous les accès du réseau. Le calcul fournit une image précise du flux de puissance active et réactive dans chaque élément du réseau de transport, ainsi que les niveaux de tension en chaque nœud. Ce calcul est basé sur l'hypothèse que le réseau fonctionne à l'état d'équilibre et que les générateurs fournissent de l'énergie sous forme de courant alternatif (CA) sinusoïdale et de tensions triphasées équilibrées.

**B. Les flux de courant :** La valeur du courant circulant à travers chaque élément du réseau (ligne, un câble ou un transformateur) ne doit pas dépasser les valeurs nominales de courant de ces composants. Le calcul du flux de courant ne doit pas dépasser ces valeurs. Des valeurs excessives du courant peuvent conduire à une surchauffe des composants et même à une rupture.

**C. Les pertes en ligne :** Le calcul d'écoulement de puissance permet à travers les flux de courant une évaluation des pertes de puissance dans les lignes et les transformateurs. Des Pertes excessives peuvent conduire à la reconfiguration du réseau afin de minimiser ces dernières sur l'ensemble du réseau.

**D. Stratégie d'adaptation et de contrôle :** La détermination des tensions aux nœuds et de la puissance active et réactive que chaque générateur doit fournir pour assurer la livraison de puissance à chaque charge, permet de définir les instructions de commande pour la régulation de chaque machine connectée au réseau. Ce calcul est également utilisé dans l'analyse de stabilité.

**E. Optimisation de la capacité de transit de puissance :** Enfin, il est possible d'optimiser le flux de puissance afin d'augmenter la capacité de transfert de puissance disponible dans le réseau en utilisant des algorithmes basés sur le concept de contraintes et de fonction objectif.

## **II.4 Types des jeux de barres**

Dans l'analyse d'écoulement de puissance, les jeux de barre du système sont classés en trois catégories [30], Jeux de Barre de référence (Slack bus) et de contrôle (P.V bus) et charge (P.Q bus). Pour des conditions aux jeux de barres connues. On associe à chaque jeu de barre quatre quantités.

La puissance active, la puissance réactive, le module de la tension et l'angle de phase, deux de ces quatre quantités sont spécifiées.

**Tableau II.1:** Types des variables des Jeux de barres existent.

Type du jeu de barres	Variables connues	Variables inconnues
Charge (P,Q)	P,Q	$ V , \delta$
Contrôle (P,V)	P, $ V $	Q, $\delta$
Référence (Slack/swing bus)	$ V , \delta$	P,Q

#### II.4.1 Jeu de barres de référence (Slack bus)

Le rôle de ce jeu de barre est de fournir la puissance supplémentaire nécessaire pour compenser la perte de transmission, car celle-ci ne sont pas connues d'avance [30]. Dans un k (nœud de référence ou slack bus), on spécifie la phase et le module de la tension. Les valeurs à déterminer sont les puissances active et réactive [31].

#### II.4.2 Jeu de barres générateur (à tension contrôlée) (P|V)

Ce type de jeux de barres est connecté avec un générateur. Au niveau de ce jeu de barres,  $P_i$  et  $V_i$  sont des grandeurs spécifiées (connus). Donc,  $Q_i$  n'est pas connue à l'avance étant donné que  $Q_{gi}$  est inconnue est aussi  $\delta_i$ .

#### II.4.3 Jeu de barres de charge (P, Q)

Ce type de jeux de barres est connecté avec une charge. Au niveau de ce jeu de barres,  $P_i$  et  $Q_i$  sont des grandeurs spécifiées (connus). Donc,  $V_i$  n'est pas connue est aussi  $\delta_i$  [32].

### II.5 Modélisation des éléments du réseau électrique

Un réseau d'énergie électrique est un système d'éléments interconnectés, ces éléments peuvent être classés en trois sous-systèmes :

- Production (génératrices).
- Transport, répartition et distribution (lignes).
- Utilisation (consommateurs).

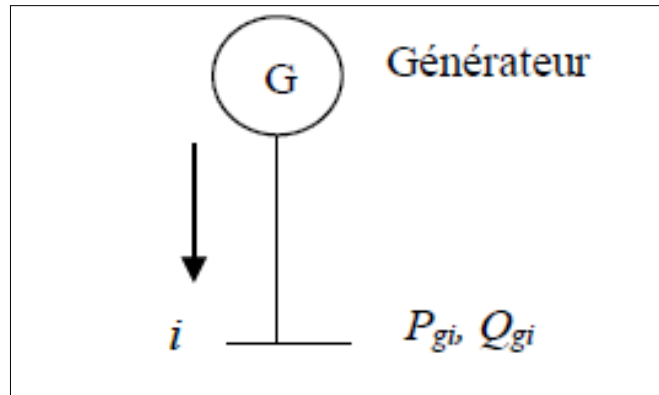
Pour étudier un réseau d'énergie électrique complexe, des modèles ou schémas équivalents de ces principaux composants (générateurs, différents types de transformateurs, lignes et charges) sont établis [26].

#### II.5.1 Modèle du générateur

Le générateur est considéré comme le cœur du réseau électrique. Il assure la production de l'énergie électrique demandée par le consommateur. Dans l'analyse de l'écoulement

de puissance, le générateur est modélisé comme une source de tension constante  $V_g$  qui injecte de la puissance active  $P_g$  et réactive  $Q_g$ .

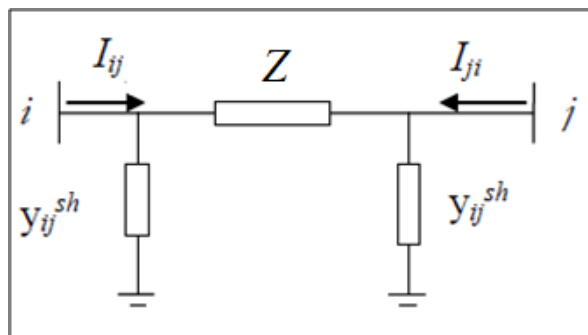
La puissance réactive du générateur s'adapte de façon à maintenir la tension au nœud constante. Aussi, le générateur est caractérisé par deux limites de puissance réactive  $Q_{gmin}$  et  $Q_{gmax}$ . Lorsque l'une de ces limites est atteinte, la puissance  $Q_s$  reste inchangée et la tension au nœud n'est plus fixe.



**Figure II.1:** Modèle d'un générateur utilisé dans l'étude de l'écoulement de puissance.

### II.5.2 Modèle de la ligne électrique

La ligne de transfert de l'énergie électrique située entre les nœuds  $i$  et  $j$  est généralement représentée par le schéma équivalent par phase de type ( $\pi$ ) comme indiqué sur la figure :



**Figure II.2:** Schéma équivalent en  $\pi$  d'une ligne de transmission

$Z_{is}$  : Impédance série par phase :  $Z_{is} = R + jX$ .

$R$  Et  $X$  : Sont respectivement, la résistance et la réactance série de la ligne entre les jeux de barres  $i$  et  $j$ .

$Y_{ijsh}$ : Admittance shunt.



### II.5.3 Modèle de la charge électrique

La charge électrique est souvent modélisée sous forme d'une impédance  $Z_{charge}$  qui consomme de la puissance active  $PL$  et réactive  $QL$  constantes (figure II.3). Cette charge représente souvent des postes de répartition (sous stations) qui alimentent des réseaux de distribution.

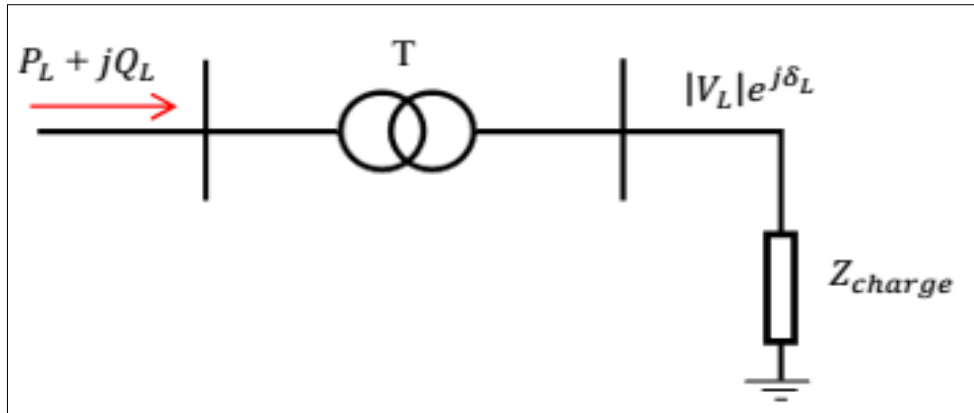


Figure II.3 : Modèle de la charge électrique.

### II.5.4 Modèle de l'élément shunt

Dans la plupart des cas, des éléments shunt (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 [33].

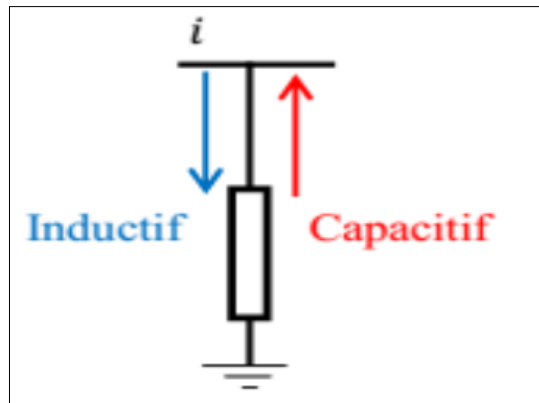


Figure II.4: Modèle de l'élément shunt.

### II.5.5 Modèle de Transformateur

Le transformateur est un appareil statique très robuste. Il est utilisé pour modifier la présentation de l'énergie électrique en alternative, afin de la rendre aussi commandée que possible à tous les stades de la production, de la distribution et de l'utilisation.

C'est cette facilité de transformation qui explique l'abandon du continu pour l'alternatif dans les réseaux de distribution.

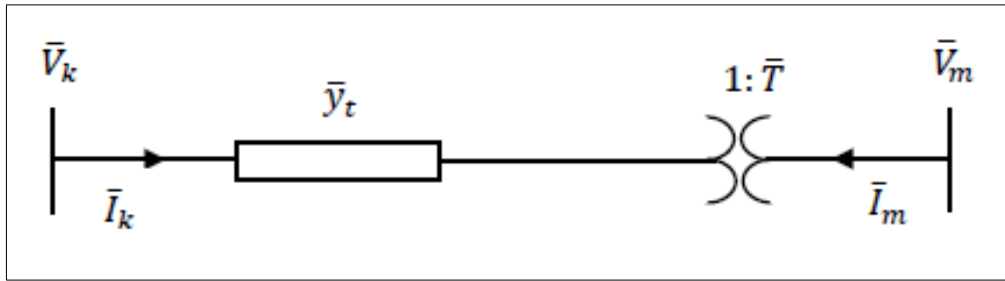


Figure II.5: Modèle d'un transformateur.

Dans le réseau d'énergie électrique les transformateurs rencontrés sont :

- Les transformateurs fonctionnant en régime nominal c'est-à-dire avec un rapport de transformation nominale.
- Les transformateurs à pas variables, le rapport de transformation est réglable
- Les transformateurs déphaseurs dont le rapport de transformations peut être représenté par un nombre complexe [31].

## II.6 Classification des variables de l'écoulement de puissance

**II.6.1 Variables de perturbation :** Parmi les variables des équations de l'écoulement de puissance, les variables de la demande (charge)  $P_D$  et  $Q_D$  qu'elles ne sont pas contrôlables car elles dépendent seulement des abonnés de la puissance. Les variables de perturbation avec cette définition constituent les composantes du vecteur de perturbation  $P$  [18].

$$P = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_n \\ Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{D1} \\ P_{D2} \\ \vdots \\ P_{Dn} \\ Q_{D1} \\ Q_{D2} \\ \vdots \\ Q_{Dn} \end{bmatrix} \quad (\text{II.1})$$

**II.6.2 Variables d'état :** Ce sont l'amplitude et l'angle de la tension au niveau des jeux de barres, ils sont qualifiés d'état suite à leur valeur qu'elles peuvent déterminer l'état de réseau. Elles représentés par le vecteur d'état  $X$  [32].

$$P = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \\ X_{n+1} \\ X_{n+2} \\ \vdots \\ X_{2n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \vdots \\ \delta_n \\ |V_1| \\ |V_2| \\ \vdots \\ |V_n| \end{bmatrix} \quad (\text{II.2})$$

n: nombre de jeux de barres de tout le réseau.

**II.6.3 Variables de contrôle :** Les puissances générées à savoir  $P_g$  ou  $Q_g$  (actives ou réactives) sont des variables de contrôles représentés par le vecteur de contrôle  $U$  [18].

$$P = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_n \\ U_{n+1} \\ U_{n+2} \\ \vdots \\ U_{2n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{G1} \\ P_{G2} \\ \vdots \\ P_{Gn} \\ Q_{G1} \\ Q_{G2} \\ \vdots \\ Q_{Gn} \end{bmatrix} \quad (\text{II.3})$$

## II.7 Problème d'écoulement de puissance

L'écoulement de puissance est affecté par des grandeurs indésirables et présentent un problème si elles sont inconnues comme les pertes en puissances, les chutes de tension, l'appel imprévu de puissances par les consommateurs ce qui influe directement sur les paramètres fondamentaux liés à l'écoulement de puissance comme les puissances produites, les tensions nodales, les puissances des lignes.

La connaissance de tous les grandeurs électriques liés à l'écoulement de puissance est indispensable et leurs optimisation est très nécessaire pour résoudre tous problèmes d'écoulement de puissance

## II.8 Calcul d'écoulement de puissance

Suivant le type de nœud, le calcul traite grandeurs bien définies, soit par calcul directe soit par calcul itératif basé sur la solution de l'itération (k) puis le calcul des nouvelles tensions à l'itération (k+1) dépend du type de nœud concerné.

**II.8.1 Dans les nœuds PQ:** Une formule générale pour déterminer la tension complexe (l'amplitude  $|V_i|$  et la phase  $|\theta_i|$ ) du nœud  $i$  peut être développée en substituant l'équation :

$$V_i^{k+1} = \frac{1}{Y_{ii}} \left( \frac{P_i - jQ_i}{V_i^{(k)*}} - \sum_{\substack{j \neq 1 \\ l \neq 1}}^n Y_{ij} V_j^{(k)} \right) \quad i = 2 \dots n \quad (\text{II.4})$$

Il faut noter que le nœud 1 est choisi comme nœud balancier dont l'amplitude et la phase de tension sont connues. Cela explique pourquoi on commence les calculs pour  $i = 2$ .

**II.8.2 Dans les nœuds PV :** Si le nœud est un nœud de génération, la puissance réelle  $P_i$  et l'amplitude de tension  $|V_i|$  sont connus, et il reste à déterminer la puissance réactive et la

phase de tension au début de chaque itération [35]. Aussi, pour le générateur du nœud  $i$ , on a :

$$I_{gi} = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = Y_{i1}V_1 + Y_{i2}V_2 \dots + Y_{in}V_n \quad (\text{II.5})$$

$$\text{D'où: } P_i - jQ_i = (V_i^k)^* [\sum_{j=1}^n Y_{ij}V_j^k] \quad (\text{II.6})$$

En prenant la partie imaginaire de l'équation (II.4), on obtient la puissance réactive du nœud de génération  $i$  :

$$Q_i = -\text{Im} \left[ V_i^{(k)*} [\sum_{j=1}^n Y_{ij}V_j^k] \right] \quad (\text{II.7})$$

Il faut remarquer que les meilleures valeurs de tension sont utilisées dans le calcul de la puissance réactive  $Q_i$ . Une fois  $Q_i$  est déterminé, on utilise l'équation (II.4) pour calculer la nouvelle valeur de  $V_i$  du nœud de génération  $i$  et en tirer la phase  $\theta_i$ . Habituellement, une limite maximum et/ou minimum :

$$Q_{min} \leq Q_i \leq Q_{max} \quad (\text{II.8})$$

$Q$  doit être spécifié. Si  $Q_{min}$  excède la limite spécifiée  $Q_{max}$ , cette dernière est alors choisie à la place de la valeur calculée pour être utilisée dans (II.4). Si l'amplitude de tension  $|V_i|$  de la nouvelle valeur calculée de  $V_i$  est plus grande que la valeur spécifiée d'amplitude de tension du nœud de génération  $i$ , la nouvelle tension est corrigée en la multipliant par le facteur correspondant au rapport de l'amplitude de tension spécifiée par l'amplitude de tension calculée, tout en gardant la phase de tension de la valeur calculée. En d'autres termes, seule l'amplitude doit être corrigée. En résumé le processus itératif de Gauss-Seidel commence en prenant des valeurs initiales pour les amplitudes et phases de tension inconnues (sauf pour le cas du nœud balancier) et calcule les nouvelles valeurs, qui sont ainsi des valeurs corrigées. Au niveau de chaque nœud, et à chaque itération, la tension corrigée est remplacée dans l'équation (II.4) comme une valeur estimée afin de calculer une nouvelle valeur. Ce processus est répété jusqu'à convergence.

### II.8.3 Dans le nœud balancier (Slack)

Une fois que toutes les tensions aux nœuds  $V_2, V_3, \dots, V_n$  sont calculées, la puissance du nœud balancier est alors calculée:

$$\begin{aligned} \frac{P_1 - jQ_1}{V_1^*} &= Y_{11}V_1 + Y_{12}V_2 + \dots + Y_{1n}V_n \\ P_1 - jQ_1 &= V_1^* Y_{11}V_1 + V_1^* Y_{12}V_2 + \dots + V_1^* Y_{1n}V_n \end{aligned} \quad (\text{II.9})$$

## II.9 Formulation du problème

**II.9.1 Équation de la matrice d'admittance :** L'équation décrivant les relations entre courants et tensions aux jeux de barres est donné par :

$$I_{BUS} = Y_{BUS} * V_{BUS} \quad (\text{II.10})$$

$V_{BUS}$  : Vecteur des tensions des jeux de barres.

Ou :

$$V_{BUS} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

$I_{BUS}$  : Vecteur des courants des jeux de barres.

$$I_{BUS} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

$Y_{BUS}$ : La matrice admittance du réseau électrique donnée par :

$$Y_{BUS} = \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^n Y_{1i} & -Y_{12} & \cdots & -Y_{1n} \\ -Y_{21} & \sum_{i=0}^n Y_{2i} & \cdots & -Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ -Y_{n1} & -Y_{n2} & \cdots & \sum_{i=0}^n Y_{ni} \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

La matrice présente les propriétés suivantes :

1. Matrice carrée d'ordre n.
2. Matrice symétrique  $Y_{BUS}(i, k) = Y_{BUS}(k, i)$
3. Matrice complexe.
4. Chaque élément  $Y_{BUS}(i, k)$  en dehors de la diagonale est l'opposé de l'admittance de la branche (k, i) entre les nœuds i et k.
5. Chaque élément de la diagonale  $Y_{BUS}(k, k)$  est la somme des admittances de toutes les branches liées au jeu de barres k.

$Y_{BUS}$ : L'impédance des jeux de barres [26].

$$Z_{BUS} = \frac{1}{Y_{BUS}} \quad (\text{II.14})$$

## II.9.2 Équations générales de la puissance

La puissance complexe  $S_i = P_i + jQ_i$  injecté au nœud  $i$ , en fonction des tensions aux nœuds et les éléments de la matrice admittance nodale  $Y_{bus}$ , en tenant compte de l'expression du courant injecté  $I_i$  au nœud  $i$ , est donnée par la relation suivante :

$$\bar{S}_i = \bar{P}_i + j\bar{Q}_i = \bar{V}_i \cdot I_i^* = \bar{V}_i \cdot \sum_{j \neq i} \bar{Y}_{ij}^* \cdot \bar{V}_j^* \quad (\text{II.15})$$

L'expression de la puissance complexe conjuguée s'écrit :

$$\begin{aligned} \bar{S}_i^* &= \bar{P}_i - j\bar{Q}_i = \bar{V}_i^* \cdot (\bar{Y}_{ii}\bar{V}_i + \sum_{j \neq i} \bar{Y}_{ij} \cdot \bar{V}_j) \\ S_i^* &= \bar{Y}_{ii} \cdot \bar{V}_i^* \cdot \bar{V}_i + \bar{V}_i^* \sum_{j \neq i} \bar{Y}_{ij} \cdot \bar{V}_j \end{aligned} \quad (\text{II.16})$$

En exprimant la tension sous sa forme polaire en module  $|\bar{V}_i|$  et argument  $\theta$ , l'expression de la puissance complexe devient :

$$\begin{aligned} \bar{S}_i^* &= \bar{Y}_{ii}|\bar{V}_i|^2 + |\bar{V}_i| \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij}|\bar{V}_j| e^{j(\theta_j - \theta_i)} \\ P_i &= \text{Réal}(\bar{S}_i^*) = \text{Réal}\{\bar{V}_i^* \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij}\bar{V}_j\} \\ Q_i &= -\text{Imag}(\bar{S}_i^*) = -\text{Imag}\{\bar{V}_i^* \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij}\bar{V}_j\} \end{aligned} \quad (\text{II.17})$$

**II.9.3 Puissances écoulées dans les lignes :** Pour calculer la puissance qui s'écoule dans la branche reliant les accès  $i$  et  $j$ , le courant qui circule entre les accès  $i$  et  $j$  a pour expression :

$$I_{ij} = \bar{Y}_{ij} \cdot (\bar{V}_i - \bar{V}_j) + \bar{Y}_{i0}\bar{V}_i \quad (\text{II.18})$$

Et la puissance apparente :

$$\begin{aligned} \bar{S}_{ij} &= \bar{V}_i \cdot \bar{I}_{ij}^* \\ \bar{S}_{ij} &= \bar{V}_i \cdot [\bar{Y}_{ij} \cdot (\bar{V}_i - \bar{V}_j) + \bar{Y}_{i0} \cdot \bar{V}_i]^* \\ \bar{S}_{ij} &= |\bar{V}_i|^2 \cdot \bar{Y}_{ij}^* - \bar{V}_i \bar{V}_j^* \cdot \bar{Y}_{ij}^* + |\bar{V}_i|^2 \cdot \bar{Y}_{i0}^* \end{aligned} \quad (\text{II.19})$$

De même la puissance apparente qui s'écoule de l'accès  $j$  vers l'accès  $i$  vaut :

$$\bar{S}_{ji} = |\bar{V}_j|^2 \bar{Y}_{ij}^* - \bar{V}_j \bar{V}_i^* \cdot \bar{Y}_{ij}^* + |\bar{V}_j|^2 \cdot \bar{Y}_{j0}^* \quad (\text{II.20})$$

**II.9.4 Puissance écoulee dans les transformateurs régulateurs :** Considérant un transformateur régulateur dont sa matrice admittance est :

$$[Y] = \begin{bmatrix} \frac{Y_{ij}}{a^2} & -\frac{Y_{ij}}{a} \\ -\frac{Y_{ij}}{a} & Y_{ij} \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

Le courant qui circule entre les accès  $i$  et  $j$  est donné comme suit :

$$\bar{I}_{ij} = \frac{\bar{Y}_{ij}}{a^2} \cdot \bar{V}_i - \frac{\bar{Y}_{ij}}{a} \cdot \bar{V}_j = \frac{1}{a} \cdot \bar{Y}_{ij} \left( \frac{1}{a} \bar{V}_i - \bar{V}_j \right) \quad (\text{II.22})$$

Et la puissance  $\bar{S}_i^*$  a pour valeur :

$$\begin{aligned}\bar{S}_{ij} &= \bar{V}_i \cdot \bar{I}_{ij}^* = \bar{V}_i \cdot \left[ \frac{1}{a} \bar{Y}_{ij} \left( \frac{1}{a} \bar{V}_i - \bar{V}_j \right) \right] \\ \bar{S}_{ij} &= \frac{1}{a^2} (\bar{V}_i)^2 \cdot \bar{Y}_{ij}^* - \frac{1}{a} \bar{Y}_{ij}^* \bar{V}_j^* \bar{V}_i\end{aligned}\quad (\text{II.23})$$

D'autre part le courant qui circule de l'accès j vers l'accès i :

$$\bar{I}_{ji} = \frac{1}{a} \cdot \bar{Y}_{ij} \left( \bar{V}_j - \frac{1}{a} \bar{V}_i \right) \quad (\text{II.24})$$

$$\bar{S}_{ij} = \bar{V}_j \cdot \bar{I}_{ji}^* = \bar{V}_j \cdot \left[ \frac{1}{a} \bar{Y}_{ij} \left( \bar{V}_j - \frac{1}{a} \bar{V}_i \right) \right]^* \quad (\text{II.25})$$

$$\bar{S}_{ji} = \frac{1}{a^2} (\bar{V}_j)^2 \cdot \bar{Y}_{ij}^* - \frac{1}{a} \bar{Y}_{ij}^* \cdot \bar{V}_j^* \bar{V}_i$$

### II.9.5 Calcul des pertes totales dans le réseau

Pour un élément du réseau reliant deux accès i et j on a :

$$\bar{S}_{\text{Lossi } j} = \bar{S}_{ij} + \bar{S}_{ji} \quad (\text{II.26})$$

Tel que :

$\bar{S}_{\text{Lossi } j}$ : Puissance apparente perdue dans la branche (i-j).

$\bar{S}_{ij}$ : Puissance apparente qui transite de l'accès i vers l'accès j.

$\bar{S}_{ji}$ : Puissance apparente qui transite de l'accès j vers l'accès i.

D'où :

$$\begin{aligned}\bar{P}_{\text{Lossi } j} &= \text{Réal}\{\bar{S}_{\text{Lossi } j}\} \\ \bar{Q}_{\text{Lossi } j} &= \text{Imag}\{\bar{S}_{\text{Lossi } j}\}\end{aligned}\quad (\text{II.27})$$

$\bar{P}_{\text{Lossi } j}$ : Puissance active perdue dans la branche (i - j).

$\bar{Q}_{\text{Lossi } j}$ : Puissance réactive perdue dans la branche (i - j).

La puissance totale perdue dans le réseau est égale à la somme des puissances perdues dans toutes les branches du réseau.

$$\begin{aligned}\bar{S}_{\text{Loss}} &= \sum \bar{S}_{\text{Lossi } j} \\ \bar{P}_{\text{Loss}} &= \text{Réal}\{\sum \bar{S}_{\text{Lossi } j}\} \\ \bar{Q}_{\text{Loss}} &= \text{Imag}\{\sum \bar{S}_{\text{Lossi } j}\}\end{aligned}\quad (\text{II.28})$$

### II.10 Méthodes de calcul de l'écoulement de puissance

Pour résoudre les équations d'écoulement statique des charges, un grand nombre des techniques numériques ont déjà été utilisées.

Dans cette partie de l'étude, on passera en revue les méthodes numériques itératives spécifiques courantes :

- La méthode itérative de Gauss-Seidel.
- La méthode de Newton-Raphson.
- La méthode découplée [36].

### II.10.1 Méthode de Gauss-Seidel

Cette méthode est considérée comme l'une des plus simples des méthodes itératives, à savoir que la méthode la plus efficace est la méthode de Newton-Raphson, mais la méthode de Gauss-Seidel s'intervient pour les raisons suivantes :

- 1- Elle possède une valeur scientifique sûre grâce à sa simplicité.
- 2- Elle est utilisée dans les systèmes à faible puissance, dans lesquelles les programmes sont simples.
- 3- Elle s'utilise dans de nombreux cas des grands systèmes pour obtenir une solution approximative [37].

#### - Algorithme de la méthode de GS dans l'EP

L'application de cette méthode pour la résolution d'un système non linéaire, Soit à résoudre l'équation :  $f(x)=0$  par rapport à la variable  $x$ , Il est toujours possible trouver une fonction  $g(x)$  tel que :  $x = g(x)$ .

On estime une valeur initiale  $x^0$  et on calcul  $x^1$  et on calcul en  $x^2$  en fonction de  $x^1$  ....etc.

$$\begin{aligned}
 x^1 &= g(x^0) \\
 x^2 &= g(x^1) \\
 &\dots \\
 &\dots \\
 x^{k+1} &= g(x^k)
 \end{aligned}
 \tag{II.29}$$

Si la différence entre deux valeurs successives vérifie le teste de convergence :  $|x^{k+1} - x^k| \leq \varepsilon$  On arrête le processus itératif ( $\varepsilon$  représente la précision de calcul ou la tolérance) Pour un système d'équations d'ordre  $n$ .

On donne des valeurs estimées pour  $x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0$  et on procède le calcul de  $x_1^1, x_2^1, \dots, x_n^1$  :



$$\begin{cases} x_1^1 = g_1(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) \\ x_2^1 = g_2(x_1^1, x_2^0, \dots, x_n^0) \\ \vdots \\ x_n^1 = g_n(x_1^1, x_2^1, \dots, x_n^0) \end{cases} \quad (\text{II.30})$$

Dans la même itération, les valeurs déjà calculées sont aussitôt remplacées par leurs valeurs fraîches. Le processus itératif est arrêté si le test de convergence est réalisé [38]

$$|x^{k+1} - x^k| \leq \varepsilon . \quad (\text{II.31})$$

### - Application de la méthode de GS dans l'EP

L'algorithme de Gauss Seidel commence par enlever séquentiellement chaque nœud et actualiser sa tension en fonction des valeurs disponibles de toutes les tensions des autres nœuds. Pour le cas de l'étude de l'écoulement de puissance, les solutions recherchées sont déduites de la résolution de l'équation nodale suivante :

$$I_i = Y_{i1}V_1 + Y_{i2}V_2 \dots + Y_{in}V_N = \sum_{j=1}^n Y_{ij}V_j \quad (\text{II.32})$$

$$P_i + jQ_i = \bar{V}_i \cdot \bar{I}_i^* = \bar{V}_i \cdot \left( \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \cdot \bar{V}_j \right)^* \quad (\text{II.33})$$

On prend le conjugué de la puissance apparente, on aura :

$$P_i - jQ_i = \bar{V}_i^* \cdot \bar{I}_i = \bar{V}_i^* \cdot \bar{Y}_{ii} \cdot \bar{V}_i + \bar{V}_i^* \cdot \left( \sum_{j=1}^{i-1} \bar{Y}_{ij} \cdot \bar{V}_j \right) + \bar{V}_i^* \cdot \left( \sum_{j=i+1}^n \bar{Y}_{ij} \cdot \bar{V}_j \right) \quad (\text{II.34})$$

Le processus d'itération de Gauss Seidel, peut être alors appliqué comme suit:

$$\bar{V}_i^{k+1} = \frac{1}{\bar{Y}_{ii}} \left( \frac{\bar{S}_i^*}{\bar{V}_i^k} - \left( \sum_{j=1}^{i-1} \bar{Y}_{ij} \bar{V}_j^{k+1} \right) + \left( \sum_{j=i+1}^n \bar{Y}_{ij} \bar{V}_j^k \right) \right) \quad (\text{II.35})$$

Pour des raisons de simplifications des calculs, on utilise les notations suivantes :

$$\begin{cases} KL_i = \frac{P_i - jQ_i}{Y_{ii}} \\ YL_{ij} = \frac{Y_{ij}}{Y_{ii}} \end{cases} \quad (\text{II.36})$$

D'où l'expression finale de la tension pour chaque nœud :

$$V_i^{k+1} = \frac{KL_i}{(V_i^*)^k} - \sum_{j=1}^{i-1} YL_{ij} V_j^{k+1} - \sum_{j=i+1}^n YL_{ij} V_j^k \quad i \neq S \quad (\text{II.37})$$

Cette équation, ne concerne pas l'accès bilan  $V$  et  $\Theta$  sont données ;  $P$  et  $Q$  à déterminer. Pour les accès générateurs ( $P$ ,  $|V|$ ), la puissance réactive est inconnue. Elle doit être calculée d'après l'équation suivante :

$$P_i^{k+1} = R \{ \bar{V}_i^* \cdot \bar{Y}_{ii} \cdot \bar{V}_i^k - (\sum_{i=1}^{i-1} \bar{Y}_{ij} \bar{V}_j^{k+1}) - (\sum_{i=i+1}^n \bar{Y}_{ij} \bar{V}_j^k) \} \quad (\text{II.38})$$

$$Q_i^{k+1} = -\text{imag} \{ \bar{V}_i^* \cdot \bar{Y}_{ii} \cdot \bar{V}_i^k + (\sum_{i=1}^{i-1} \bar{Y}_{ij} \bar{V}_j^{k+1}) + (\sum_{i=i+1}^n \bar{Y}_{ij} \bar{V}_j^k) \} \quad (\text{II.39})$$

Si la valeur de  $Q_i^{k+1}$  calculée d'après l'équation précédente viole l'une des limites spécifiées, on fixe la valeur de  $Q_i$  à la limite violée.

Ensuite on procède au calcul de  $\bar{V}_i^{k+1}$  d'après l'équation (II.35)

Pour le calcul de  $\bar{V}_i^{k+1}$ , pour ce type d'accès, le module de la tension étant spécifiée, on doit garder seulement l'angle de phase  $\theta$  calculé en effectuant l'opération suivante :

$$\bar{V}_i^{k+1} = \frac{\bar{V}_i^{k+1}}{|\bar{V}_i^{k+1}|} |\bar{V}_{i,\text{spécifie}}| \quad (\text{II.40})$$

Pour accélérer la convergence de la méthode, les tensions durant les itérations successives, doivent être modifiés comme suit :

$$\bar{V}_i^{k+1} = \bar{V}_i^k + \alpha (\bar{V}_i^{k+1} - \bar{V}_i^k) \quad (\text{II.41})$$

Où  $\alpha$  est un facteur d'accélération.

Pour la majorité des réseaux électriques,  $\alpha$  est compris entre 1,  $1 \leq \alpha \leq 2$

### II.10.2 Méthode de Newton-Raphson

Cette méthode itérative lorsqu'utilisée pour un écoulement de puissance sert à minimiser l'écart entre les puissances actives et réactives connues et leurs résultats à partir d'équations matricielles. [39]

#### - Algorithme de la méthode de NR dans l'EP

Une méthode de Newton-Raphson d'analyse non linéaire détermine itérativement la solution de  $g(x)=0$  sous la condition que la dérivée existe. Ainsi partant d'une solution  $x^{(0)}$  pas trop éloignée de la vraie solution  $\bar{x}$ , on détermine une meilleure approximation. Soit le système d'équations non linéaires suivant :

$$\begin{cases} Y_1 = f_1(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \\ Y_2 = f_2(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \\ \vdots \\ Y_n = f_n(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \end{cases} \quad (\text{II.42})$$

Si on suppose que les solutions initiales du système sont :

$$(x_1^0, x_2^0, x_3^0, \dots, x_n^0)$$

Les erreurs :

$$(\Delta x_1^0, \Delta x_2^0, \Delta x_3^0, \dots, \Delta x_n^0)$$

$$\text{Donc : } (x_1^0 + \Delta x_1^0, x_2^0 + \Delta x_2^0, x_3^0 + \Delta x_3^0, \dots, x_n^0 + \Delta x_n^0), i = 1, n$$

En appliquant le développement en série de Taylor d'ordre (1) aux points :

$$(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$$

$$\text{On aura : } Y_i = f_i(x_1^0, x_2^0, x_3^0, \dots, x_n^0) + \Delta x_1^0 \frac{\partial f_i}{\partial x_1} + \Delta x_2^0 \frac{\partial f_i}{\partial x_2} + \Delta x_3^0 \frac{\partial f_i}{\partial x_3} \dots + \Delta x_n^0 \frac{\partial f_i}{\partial x_n} + C_i \quad (\text{II.43})$$

En négligeant les termes d'ordre supérieur posant : C1, C2, C3, ...Cn, on aura le système d'équations suivant :

$$\begin{bmatrix} \Delta Y_1^0 \\ \Delta Y_2^0 \\ \vdots \\ \Delta Y_n^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 - f_1^0 \\ Y_2 - f_2^0 \\ \vdots \\ Y_n - f_n^0 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \Delta Y_1^0 \\ \Delta Y_2^0 \\ \vdots \\ \Delta Y_n^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \frac{\partial f_1}{\partial x_3} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \frac{\partial f_2}{\partial x_3} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \frac{\partial f_n}{\partial x_3} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x_1^0 \\ \Delta x_2^0 \\ \vdots \\ \Delta x_n^0 \end{bmatrix} \quad [ \Delta Y ] = [ J ] \cdot [ \Delta X ] \quad (\text{II.44})$$

Avec [J] : Matrice jacobienne.

La méthode de Newton-Raphson consiste à calculer les éléments du vecteur X, à la k+1 itération par :

$$x_i^{k+1} = x_i^k + \Delta x_i^k \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (\text{II.45})$$

Ce vecteur servira pour la nouvelle jacobine J afin de déterminer les nouvelles valeurs de xi en résolvant le système d'équations par la méthode adéquate de résolution de système linéaires. Ce processus de calcul est répété jusqu'à l'obtention de la précision désirée, et on arrête le processus d'itération une fois que [40].

$$|x_i^{k+1} - x_i^k| \leq \varepsilon \text{ pour } i = 1, 2, \dots, n \quad (\text{II.46})$$

#### - Application de la méthode de NR dans l'EP

Les expressions des puissances actives et réactives de chaque nœud **i** du réseau peuvent se mettre sous la forme suivante :

$$\left. \begin{aligned} P_i &= \sum_{m=1}^n |V_i| |V_m| |Y_{im}| \cos(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}) \\ Q_i &= - \sum_{m=1}^n |V_i| |V_m| |Y_{im}| \sin(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}) \end{aligned} \right\} i = 1, 2, \dots, n \quad (\text{II.47})$$

Avec :

$i = 1$ : Représente le nœud de référence.

$n$  : Nombre des nœuds.

$i$  : Numéro du nœud.

Après développement de  $P_i$  et  $Q_i$  en série de Taylor autour de la première approximation :

$$\begin{cases} P_i = P_i^{(0)} + \left(\frac{\partial P_i}{\partial \delta_2}\right)^{(0)} \Delta \delta_2^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial P_i}{\partial \delta_n}\right)^{(0)} \Delta \delta_n^{(0)} + \left(\frac{\partial P_i}{\partial |V_2|}\right)^{(0)} \Delta |V_2|^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial P_i}{\partial |V_n|}\right)^{(0)} \Delta |V_n|^{(0)} \\ Q_i = Q_i^{(0)} + \left(\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_2}\right)^{(0)} \Delta \delta_2^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_n}\right)^{(0)} \Delta \delta_n^{(0)} + \left(\frac{\partial Q_i}{\partial |V_2|}\right)^{(0)} \Delta |V_2|^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial Q_i}{\partial |V_n|}\right)^{(0)} \Delta |V_n|^{(0)} \end{cases} \quad (\text{II.48})$$

$$\text{À partir de la relation de : } \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (\text{II.49})$$

$$\text{Avec : } \begin{pmatrix} \Delta P_i^{(0)} = P_i - p_i^{(0)} \\ \Delta Q_i^{(0)} = Q_i - Q_i^{(0)} \end{pmatrix} \quad (\text{II.50})$$

Les deux systèmes d'équation (II.38) et (II.40) donnent :

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(0)} \\ \Delta Q_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial P_2}{\partial \delta_2}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial P_2}{\partial \delta_n}\right)^{(0)} & \left(\frac{\partial P_2}{\partial |V_2|}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial P_2}{\partial |V_n|}\right)^{(0)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial P_n}{\partial \delta_2}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial P_n}{\partial \delta_n}\right)^{(0)} & \left(\frac{\partial P_n}{\partial |V_2|}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial P_n}{\partial |V_n|}\right)^{(0)} \\ \left(\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n}\right)^{(0)} & \left(\frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_2}{\partial |V_n|}\right)^{(0)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n}\right)^{(0)} & \left(\frac{\partial Q_n}{\partial |V_2|}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_n}{\partial |V_n|}\right)^{(0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(0)} \\ \Delta V_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta V_n^{(0)} \end{bmatrix} \quad (\text{II.51})$$

Donc on peut écrire le système comme suit :

$$\begin{bmatrix} \Delta P^{(0)} \\ \Delta Q^{(0)} \end{bmatrix} = [J^{(0)}] \begin{bmatrix} \Delta \delta^{(0)} \\ \Delta |V|^{(0)} \end{bmatrix} \quad (\text{II.52})$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta^{(0)} \\ \Delta |V|^{(0)} \end{bmatrix} = [J^{(0)}]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P^{(0)} \\ \Delta Q^{(0)} \end{bmatrix} \quad (\text{II.53})$$

On rappelle que :

$$\Delta \delta^{(k)} = \delta_i^{(k+1)} - \delta_i^{(k)} \quad (\text{II.54})$$

$$\Delta |V_i|^{(k)} = |V_i|^{(k+1)} - |V_i|^{(k)} \quad (\text{II.55})$$

L'adaptation (II.43) avec (II.45) donne :

$$\begin{bmatrix} \delta^{(k+1)} \\ |V|^{(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta^{(k)} \\ |V|^{(k)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (\text{II.56})$$

$$\begin{bmatrix} \delta^{(k+1)} \\ |V|^{(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta^{(k)} \\ |V|^{(k)} \end{bmatrix} + [J^{(k)}]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P^{(k)} \\ \Delta |Q|^{(k)} \end{bmatrix} \quad (\text{II.57})$$

En remplaçant l'expression de l'équation (II.43) dans l'équation ci-dessus on aura :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (\text{II.58})$$

$$\text{Avec : } J = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \quad (\text{II.59})$$

$J_1, J_2, J_3$ , et  $J_4$  : sont les sous-matrices de Jacobienne

Détermination des sous-matrices de Jacobienne  $J_i$ .

### - La matrice Jacobienne

L'expression des éléments du Jacobien dépendent de la forme avec laquelle on représente les tensions et les éléments de la matrice admittance

A partir du système (II.33), on peut déterminer les éléments de  $J$ .

#### 1. Éléments de J1

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -|Y_{im}| |V_i| |V_m| \sin(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}) \quad i \neq m \quad (\text{II.60})$$

Éléments hors de la diagonale.

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{\substack{m=1 \\ i \neq m}}^n |Y_{im}| |V_i| |V_m| \sin(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}) \quad i = m \quad (\text{II.61})$$

Élément de la diagonale.

#### 2. Éléments de J2

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = |Y_{im}| |V_m| \cos(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}) \quad i \neq m \quad (\text{II.62})$$

Éléments hors de la diagonale.

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = 2|Y_{im}| |V_m| \cos(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}) \quad i = m \quad (\text{II.63})$$

Éléments de la diagonale.

#### 3. Éléments de J3

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = -|Y_{im}| |V_i| |V_m| \cos(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}) \quad i \neq m \quad (\text{II.64})$$

Éléments hors de la diagonale.

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{\substack{m=1 \\ i \neq m}}^n |Y_{im}| |V_i| |V_m| \cos(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}) \quad i = m \quad (\text{II.65})$$

Éléments de la diagonale.

#### 4. Éléments de J4

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -|V_{im}| |V_m| \sin(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}) \quad i \neq m \quad (\text{II.66})$$

Éléments hors de la diagonale.

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -\sum_{\substack{m=1 \\ i \neq m}}^n |Y_{im}| |V_m| \sin(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}) - 2|V_{im}| |V_i| \sin(\theta_{im}) \quad i = m \quad (\text{II.67})$$

Élément de la diagonale.

Le test de convergence de la méthode s'effectue comme suit :

$\Delta P_i$  et  $\Delta Q_i$  sont les variations respectives des puissances actives et réactives du nœud (i) définies par:

$$\begin{cases} \Delta P_i = P_{iP} - P_{iC} \\ \Delta Q_i = Q_{iP} - Q_{iC} \end{cases} \quad (\text{II.68})$$

Avec :

$P_{iP}$  : Puissance active planifiée.

$P_{iC}$  : Puissance active calculée.

$Q_{iP}$  : Puissance réactive planifiée.

$Q_{iC}$  : Puissance réactive calculée.

Le passage d'une itération vers l'autre se fait à partir des ajustements suivants :

$$\begin{cases} \delta^{(k+1)} = \delta^{(k)} + \Delta \delta^{(k)} \\ |V^{(k+1)}| = |V^{(k)}| + \Delta |V^{(k)}| \end{cases} \quad (\text{II.69})$$

K : est le nombre d'itérations [43].

### II.10.3 La méthode découplée

Soit le problème de l'écoulement de puissance dans sa forme polaire déjà définie par :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1 & J2 \\ J3 & J4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\Delta \theta}{V} \\ \frac{\Delta V}{V} \end{bmatrix} \quad (\text{II.70})$$

Dans les réseaux électriques de faibles conductances, l'écoulement de la puissance active est moins sensible aux variations des modules de tensions que celle des angles de tensions. D'où l'approximation d'une sous matrice N nulle est acceptable. De même l'écoulement de la puissance

réactive est moins sensible aux variations des angles de tensions que celle des modules de tension, et la sous matrice J peut être considérée comme nulle.

L'équation devient :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1 & 0 \\ 0 & J4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \frac{\Delta V}{V} \end{bmatrix} \quad (\text{II.71})$$

D'où

$$[\Delta P] = [J1][\Delta \theta]$$

$$[\Delta Q] = [J4] \left[ \frac{\Delta V}{V} \right]$$

Et sont connues comme les deux équations de l'écoulement de puissances découplées qui peuvent être résolues séparément comme suit :

$$[\Delta \theta] = [J1]^{-1} [\Delta P]$$

$$\left[ \frac{\Delta V}{V} \right] = [J4]^{-1} [\Delta Q]$$

## II.11 Conclusion

La présentation de la notion de l'écoulement de puissance, modélisation simplifiée des éléments du réseau électrique (générateur, ligne de transmission, charge électrique, l'élément shunt) et les classifications des jeux de barres pour l'étude de l'écoulement de puissance ainsi que les méthodes de résolution de ce problème forment l'essentiel de notre travail dans ce chapitre pour un prérequis aux étapes de calcul et de simulation dans les chapitres suivants.

Les méthodes utilisées pour résoudre le problème de l'écoulement de puissance sont des méthodes itératives appliquées à un système d'équation algébriques, non linéaires de grande dimension. Les méthodes itératives les plus utilisées dans le domaine de l'écoulement de puissance présentées ci-dessus sont la méthode de Gauss-Seidel, de Newton-Raphson et de découplé.

**Chapitre III**  
**Étude de cas en**  
**écoulement de puissance**



### III.1 Introduction

Le présent chapitre est consacré au développement des programmes de calcul de l'écoulement des puissances suivant les algorithmes proposés et la simulation appliquée au problème de l'écoulement de puissance, en se basant sur des données topologiques du réseau (nœuds, lignes et impédances des lignes), des données des charges (puissance active et réactives) et des données des générateurs (puissance actives, tensions et limites en puissance réactives) à fin d'aboutir aux grandeurs manquants en tension, phases, courants, puissances actives et réactives ainsi que les pertes. Trois algorithmes ont été utilisés dans le calcul.

Le calcul de l'écoulement de puissance est effectué d'après les méthodes de Gauss-Seidel, Newton-Raphson et la méthode de découplé, ces méthodes sont appliquées sur un réseau IEEE standard à 05 nœud (Bus).

La première phase de calcul est réalisée par l'élaboration des programmes de calcul par les méthodes sus citées.

La deuxième phase de calcul est réalisée par simulation sous Matlab/Simulink.

Une comparaison de performance de résultats est établie entre les méthodes utilisées.

### III.2 Application sur réseau IEEE à 05 nœuds

Le réseau électrique choisi pour cette étude est de type 5 nœuds (Bus) définie par :

- 02 générateurs
- 07 lignes électriques
- 04 charges

Sachant que le bus 01 est pris comme nœud de référence (bilan) et que tous les angles de phase ont une valeur initiale de  $0^\circ$ .

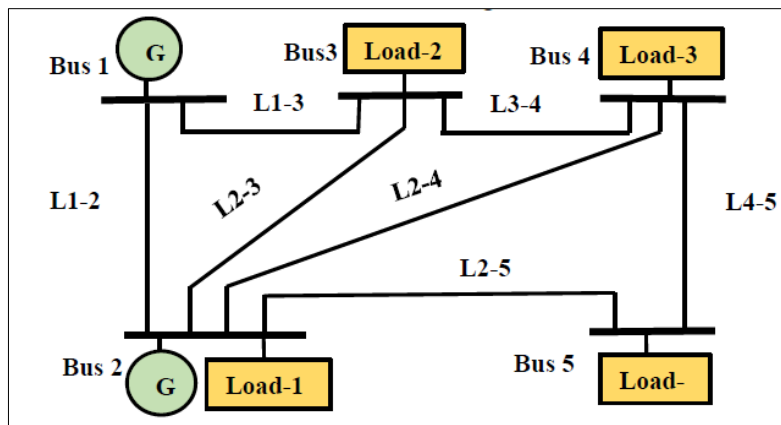


Figure III.1 : Topologie du réseau IEEE standard à 05 nœuds.

La puissance et la tension de base utilisées valent respectivement 100 MVA et 10 KV. Les données de production et de consommation ainsi que les caractéristiques des lignes sont indiquées sur le tableau (III.1) et le tableau (III.2) respectivement.

**Tableau III.1:** Données de production et de consommation du réseau IEEE standard à 05 nœuds [74].

Nœud	Type	Tension (pu)	Puissances générées		Puissances consommés	
			P <sub>Gi</sub> (MW)	Q <sub>Gi</sub> (MVar)	P <sub>Li</sub> (MW)	Q <sub>Li</sub> (MVar)
1	Slack	1.06	0.00	0.00	0.00	0.00
2	PV	1.00	40.0	0.00	20.0	10.0
3	PQ	1.00	0.00	0.00	45.0	25.0
4	PQ	1.00	0.00	0.00	40.0	65.0
5	PQ	1.00	0.00	0.00	60.0	10.0

**Tableau III.2:** Données des lignes de transport du réseau IEEE 05 nœuds [74].

Lignes					
Nœud de départ	Nœud d'arrivée	R (pu)	X (pu)	B/2 (pu)	X'mer Tap « a »
1	2	0,0200	0.0600	0.0600	1
1	3	0.0800	0.2400	0.0500	1
2	3	0.0600	0.1800	0.0400	1
2	4	0.0600	0.1800	0.0400	1
2	5	0.0400	0.1200	0.0300	1
3	4	0.0100	0.0300	0.0200	1
4	5	0.0800	0.2400	0.0500	1

- La topologie du réseau IEEE standard à 05 nœuds (Bus) à étudier vue sous le logiciel Matlab.
- Dans tous les nœuds types PQ l'amplitude des tensions est autour de 1 pu, avec une chute de tension acceptable  $\pm 5\%$ .

### III.3 Élaboration des programmes de calcul de l'écoulement de puissance

Les organigrammes présentés dans le chapitre précédent traduisent les programmes que nous avons élaborés dans cette phase de calcul.

#### III.3.1 Résultats du calcul de l'écoulement de puissance par la méthode de Gauss-Seidel

Les résultats de l'écoulement de puissance par la méthode de Gauss-Seidel (tableau III.3), pour une précision  $\varepsilon = 10^{-4}$ .

**Tableau III.3:** Résultats de l'écoulement de puissance dans un réseau IEEE standard à 05 nœuds : Résultats de nos calculs.

<b>Méthode de Gauss-Seidel après 17 itérations</b>						
<b>N° Nœud</b>	<b>Tension</b>		<b>Générateur</b>		<b>Charge</b>	
	<b>Amplitude (pu)</b>	<b>Phase (degré)</b>	<b>P (MW)</b>	<b>Q (MVar)</b>	<b>P (MW)</b>	<b>Q (MVar)</b>
<b>01</b>	1.060	0.000	130.162	61.705	0.000	0.000
<b>02</b>	1.010	-2.210	40.000	-49.266	20.000	10.000
<b>03</b>	1.000	-4.797	0.000	56.226	45.000	25.000
<b>04</b>	0.983	-4.855	0.000	0.000	40.000	65.000
<b>05</b>	0.981	-5.846	0.000	0.000	60.000	10.000
<b>Total</b>			170.162	68.705	165	110

### III.3.2 Résultats des puissances et des pertes transit dans les lignes par la méthode de Gauss-Seidel

Le tableau (III.4) qui suit, résume le transit de puissance sur l'ensemble des différentes lignes du réseau IEEE à 05 nœuds.

**Tableau III.4 :** Résultats des puissances et des pertes transit dans les lignes.

<b>Méthode de Gauss-Seidel</b>							
<b>Du Nœud</b>	<b>Au Nœud</b>	<b>P (MW)</b>	<b>Q (MVar)</b>	<b>Du Nœud</b>	<b>Au Nœud</b>	<b>P (MW)</b>	<b>Q (MVar)</b>
<b>1</b>	<b>2</b>	88.847	53.375	<b>1</b>	<b>2</b>	2.048	-6.717
<b>1</b>	<b>3</b>	41.652	8.545	<b>1</b>	<b>3</b>	1.378	-6.484
<b>2</b>	<b>3</b>	24.636	-6.133	<b>2</b>	<b>3</b>	0.359	-7.002
<b>2</b>	<b>4</b>	27.560	2.209	<b>2</b>	<b>4</b>	0.470	-6.538
<b>2</b>	<b>5</b>	54.826	4.281	<b>2</b>	<b>5</b>	1.200	-2.350
<b>3</b>	<b>4</b>	19.588	46.721	<b>3</b>	<b>4</b>	0.276	-3.107
<b>4</b>	<b>5</b>	6.512	-6.156	<b>4</b>	<b>5</b>	0.037	-9.543
<b>Total</b>						5.768	-41.740

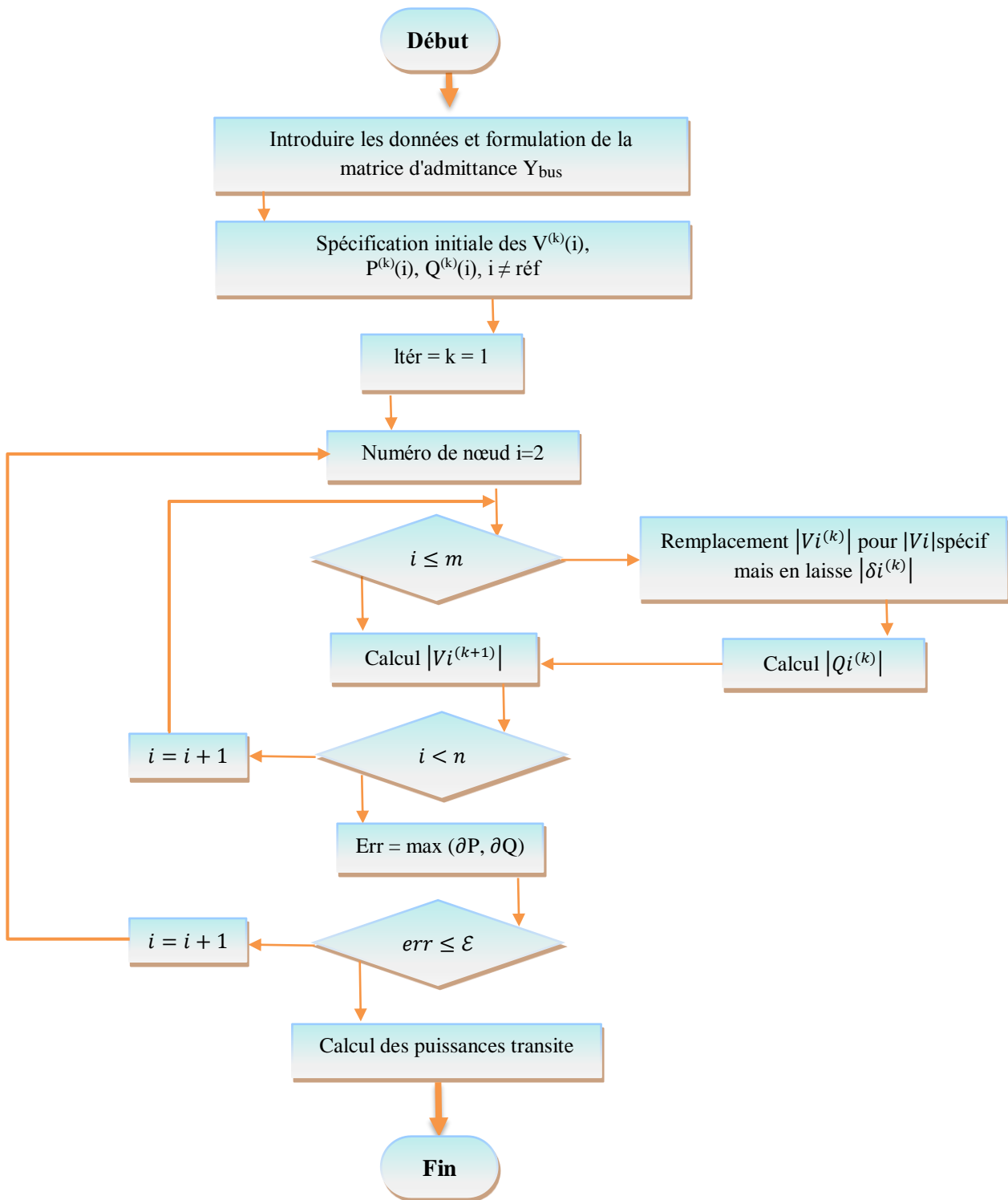


Figure III.2 : Organigramme de la méthode de Gauss-Seidel.

### III.3.3 Résultats du calcul de l'écoulement de puissance par la méthode de Newton-Raphson

Les résultats de l'écoulement de puissance par la méthode de Newton-Raphson tableau (III.5), pour une précision  $\epsilon = 10^{-4}$ .

**Tableau III.5:** Résultats de l'écoulement de puissance dans un réseau IEEE standard à 05 nœuds : Résultats de nos calculs.

<b>Méthode de Newton-Raphson après 02 itérations</b>						
N° Nœud	Tension		Générateur		Charge	
	Amplitude (pu)	Phase (degré)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
<b>01</b>	1.060	0.000	127.966	80.031	0.000	0.000
<b>02</b>	1.000	-2.058	40.000	-79.603	20.000	10.000
<b>03</b>	1.000	-4.859	0.000	66.068	45.000	25.000
<b>04</b>	0.981	-4.882	0.000	0.000	40.000	65.000
<b>05</b>	0.974	-5.793	0.000	0.000	60.000	10.000
<b>Total</b>			167.966	66.496	165	110

### III.3.4 Résultats des puissances et des pertes transit dans les lignes par la méthode de Newton-Raphson

Le tableau (III.6) qui suit, résume le transit de puissance sur l'ensemble des différentes lignes du réseau IEEE à 05 nœuds.

**Tableau III.6 :** Résultats des puissances et des pertes transit dans les lignes.

<b>Méthode de Newton-Raphson</b>							
Du Nœud	Au Nœud	P (MW)	Q (MVar)	Du Nœud	Au Nœud	P (MW)	Q (MVar)
<b>1</b>	<b>2</b>	89.234	70.653	<b>1</b>	<b>2</b>	2.484	-5.291
<b>1</b>	<b>3</b>	42.094	8.438	<b>1</b>	<b>3</b>	1.402	-6.411
<b>2</b>	<b>3</b>	24.632	-11.547	<b>2</b>	<b>3</b>	0.398	-6.805
<b>2</b>	<b>4</b>	27.495	-2.098	<b>2</b>	<b>4</b>	0.456	-6.484
<b>2</b>	<b>5</b>	54.621	2.271	<b>2</b>	<b>5</b>	1.205	-2.232
<b>3</b>	<b>4</b>	19.926	53.786	<b>3</b>	<b>4</b>	0.351	-2.873
<b>4</b>	<b>5</b>	6.512	-3.953	<b>4</b>	<b>5</b>	0.037	-9.446
<b>Total</b>						6.332	-39.543

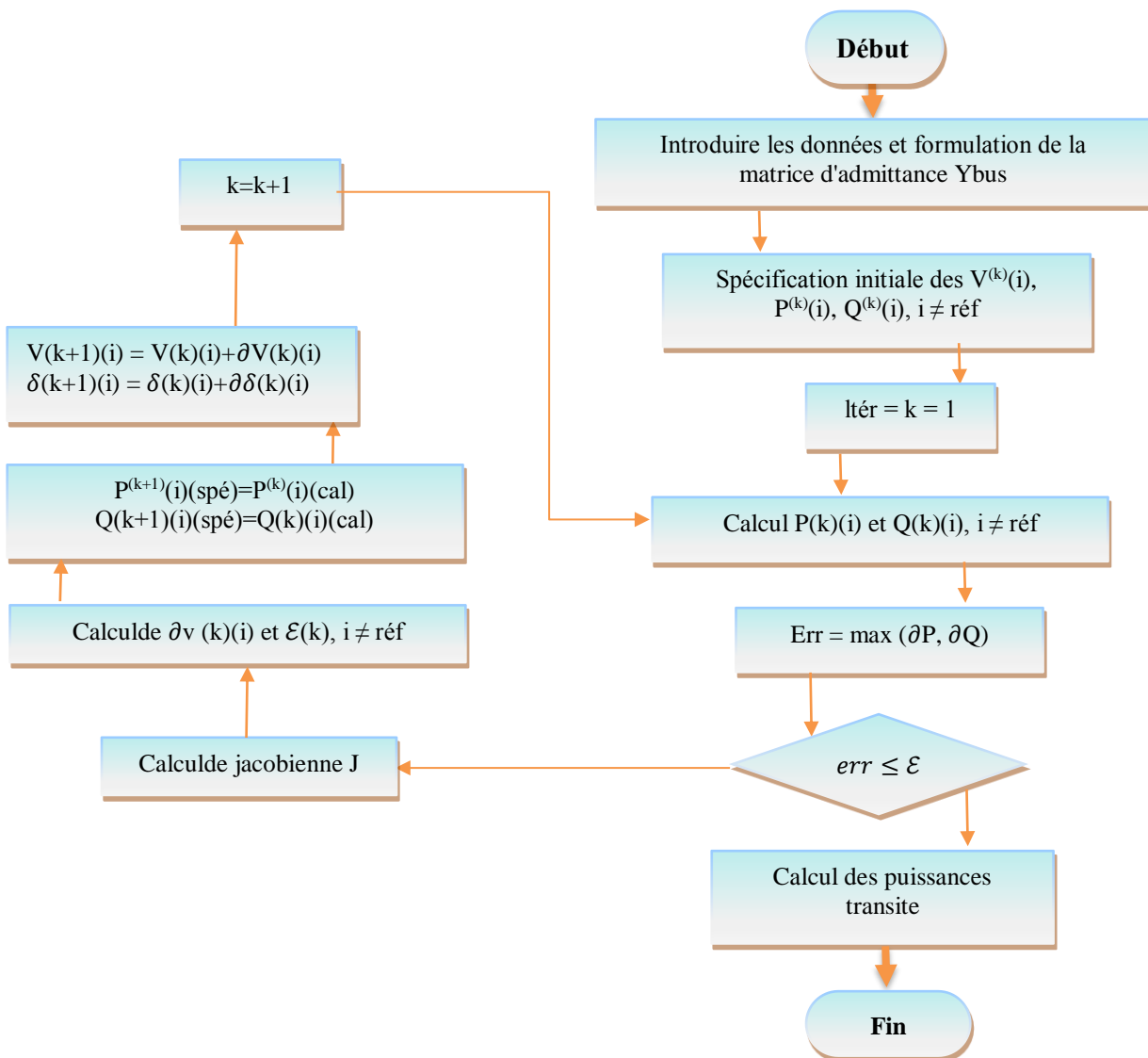


Figure III.3 : Organigramme de la méthode de Newton Raphson.

### III.3.5 Résultats du calcul de l'écoulement de puissance par la méthode de Découplé

Les résultats de l'écoulement de puissance par la méthode de Découplé tableau (III.7), pour une précision  $\varepsilon = 10^{-4}$ .

**Tableau III.7:** Résultats de l'écoulement de puissance dans un réseau IEEE standard à 05 nœuds : Résultats de nos calculs.

<b>Méthode de Découplé après 07 itérations</b>						
<b>N° Nœud</b>	<b>Tension</b>		<b>Générateur</b>		<b>Charge</b>	
	<b>Amplitude (pu)</b>	<b>Phase (degré)</b>	<b>P (MW)</b>	<b>Q (MVar)</b>	<b>P (MW)</b>	<b>Q (MVar)</b>
<b>01</b>	1.060	0.000	131.326	79.091	0.000	0.000
<b>02</b>	1.000	-2.058	40.000	-77.304	20.000	10.000
<b>03</b>	1.000	-4.859	0.000	68.727	45.000	25.000
<b>04</b>	0.981	-4.882	0.000	0.000	40.000	65.000
<b>05</b>	0.974	-5.793	0.000	0.000	60.000	10.000
<b>Total</b>			171.326	70.514	165	110

### III.3.6 Résultats des puissances et des pertes transit dans les lignes par la méthode de Découplé

Le tableau (III.8) qui suit, résume le transit de puissance sur l'ensemble des différentes lignes du réseau IEEE à 05 nœuds.

**Tableau III.8 :** Résultats des puissances et des pertes transit dans les lignes.

<b>Méthode de Découplé</b>							
<b>Du Nœud</b>	<b>Au Nœud</b>	<b>P (MW)</b>	<b>Q (MVar)</b>	<b>Du Nœud</b>	<b>Au Nœud</b>	<b>P (MW)</b>	<b>Q (MVar)</b>
<b>1</b>	<b>2</b>	89.237	70.652	<b>1</b>	<b>2</b>	2.484	-5.291
<b>1</b>	<b>3</b>	42.095	8.437	<b>1</b>	<b>3</b>	1.402	-6.411
<b>2</b>	<b>3</b>	24.633	-11.547	<b>2</b>	<b>3</b>	0.398	-6.805
<b>2</b>	<b>4</b>	27.493	-2.093	<b>2</b>	<b>4</b>	0.456	-6.484
<b>2</b>	<b>5</b>	54.628	2.294	<b>2</b>	<b>5</b>	1.205	-2.231
<b>3</b>	<b>4</b>	19.914	53.818	<b>3</b>	<b>4</b>	0.351	-2.872
<b>4</b>	<b>5</b>	6.620	-3.945	<b>4</b>	<b>5</b>	0.037	-9.445
<b>Total</b>						6.333	-39.539

### III.3.7 Comparaison des performances de différentes méthodes de l'écoulement de puissance

L'écoulement de puissance de la méthode de Gauss-Seidel (bilan de puissance) a convergé en (17) itérations et en  $t = 0.013$  secondes.

L'écoulement de puissance de la méthode de Newton-Raphson (bilan de puissance) a convergé en (02) itérations et en  $t = 0.0435$  seconde.

L'écoulement de puissance de la méthode de Découplé (bilan de puissance) a convergé en (07) itérations et en  $t = 0.033$  seconde.

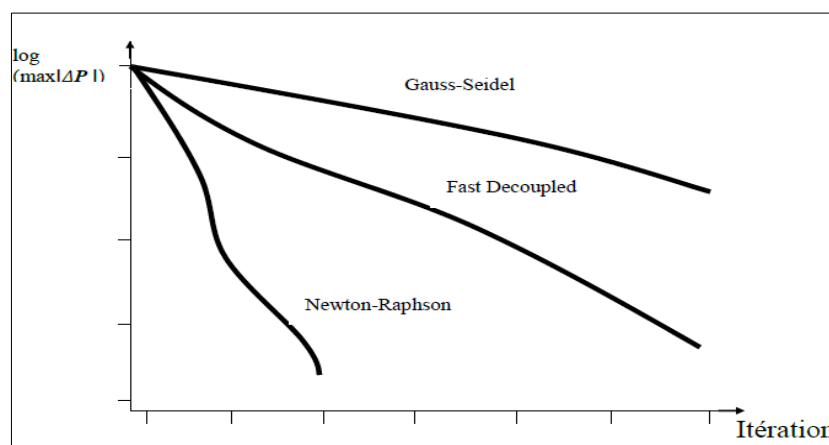
### III.3.8 Analyse des résultats

D'une façon presque identique sont obtenus les résultats par les trois méthodes itératives cependant, le nombre d'itérations n'est pas le même, ce qui fait la différence entre les trois méthodes pour un éventuel choix.

En comparant les calculs de trois méthodes, on constate que chaque itération Newton-Raphson plus de temps que l'itération Gauss Seidel et Découplé. Mais la convergence est obtenue avec moins d'itérations donc, globalement, il y'a habituellement une économie de calcul.

Deux (02) itérations pour la méthode de Newton Raphson, (17) itérations pour la méthode de Gauss-Seidel et (07) itérations pour la méthode de Découplé.

À ce niveau de calcul nous pouvons opter pour la méthode de NR comme la meilleure.



**Figure III.4:** Comparaison des performances de différentes méthodes de l'écoulement de puissance.

### III.4 Application sur Matlab/Simulink de l'écoulement de puissance

La topologie du réseau IEEE standard à 05 nœuds à étudier vue sous Matlab/ Simulink est présentée dans le bloc de simulation de la figure (III.3) suivante :



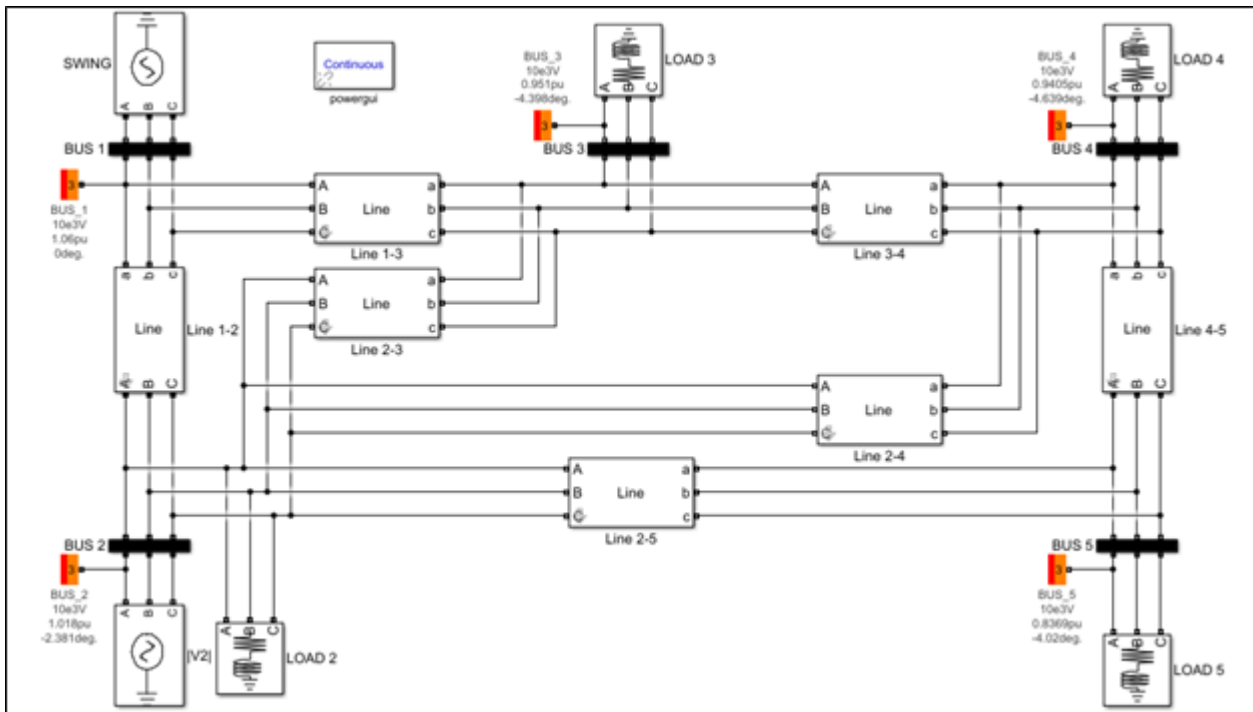


Figure III.5: Bloc de simulation du réseau IEEE 05 nœuds sous Matlab/Simulink.

### III.4.1 Résultats du calcul de l'écoulement de puissance

Tableau III.9: Résultats de l'écoulement de puissance dans un réseau IEEE standard à 05 nœuds : Résultats de nos calculs.

N° Nœud	Tension		Générateur		Charge	
	Amplitude (pu)	Phase (degré)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
01	1.060	0.000	131.400	61.070	0.000	0.000
02	1.018	-2.038	40.000	10.000	20.000	10.000
03	0.970	-4.320	0.000	0.000	45.000	25.000
04	0.960	-4.510	0.000	0.000	40.000	65.000
05	0.979	-5.840	0.000	0.000	60.000	10.000
<b>Total</b>			171.400	71.070	165	110

### III.4.2 Résultats des puissances et des pertes transit dans les lignes

Le tableau (III.10) qui suit, résume le transit de puissance sur l'ensemble des différentes lignes du réseau IEEE à 05 nœuds.

**Tableau III.10:** Résultats des puissances et des pertes transit dans les lignes.

Du Nœud	Au Nœud	P (MW)	Q (MVar)
1	2	90.090	46.210
1	3	41.310	27.220
2	3	24.860	19.040
2	4	28.000	23.460
2	5	55.410	15.850
3	4	18.850	24.670
4	5	5.980	-9.350
<b>Total Pertes</b>		<b>P (MW)</b>	<b>Q (MVar)</b>
		<b>6.400</b>	<b>19.200</b>

### III.4.3 Analyse des résultats

L'écoulement de puissance par l'environnement Simulink de Matlab (bilan de puissance) a convergé en (05) itérations. Nous remarquons une très bonne concordance entre nos résultats de simulation en utilisant l'environnement Simulink de Matlab et les résultats trouvées dans la partie précédente notamment pour les puissances actives, cependant nous avons obtenu une non concordance dans les puissances réactives entre les résultats des programmes élaborés sous Matlab et les résultats du Simulink/Matlab, un aléas que nous avons tenté énormément de le réduire à un niveau approximative acceptable mais le temps n'était pas à notre faveur.

Les chiffres marquant dans les résultats obtenus sont :

- Nombre d'itérations optimal était de Newton-Raphson (02 itérations).
- Temps de réponse optimale était de Découplé.
- L'erreur optimale entre les deux dernières itérations était de Gauss-Seidel.

### III.5 Conclusion

Nous avons dans ce chapitre, traité les méthodes dans le cadre de la résolution du problème de l'écoulement de puissance dans un réseau maillé. L'ensemble de ces méthodes présentent une approche simple pour calculer les tensions les angles et les puissances actives et réactives au niveau de chaque nœud d'un réseau, puis dans les branches. Ces tensions sont corrigées à chaque itération jusqu'à atteindre la précision désirée. Nous avons à la fin de chaque méthode, donné un organigramme qui résume les différentes étapes pour la résolution des équations données au paravent.

Dans ce chapitre, nous avons développé une simulation sous Matlab afin d'effectuer les calculs, et de tester la fiabilité en comparant les résultats obtenus avec ceux d'autres méthodes déjà approuvées.

# Chapitre IV

## Estimation d'état du réseau électrique

## IV.1 Introduction

L'énergie électrique est essentielle à la société moderne. La prospérité économique, la sécurité nationale et le niveau de vie dépendent de la fiabilité des systèmes d'alimentation électrique, et il est très important pour les systèmes d'alimentation d'obtenir des informations sur les conditions de fonctionnement et l'état du réseau électrique [45].

Les réseaux électriques interconnectés sont devenus plus complexes et la tâche de sécuriser le fonctionnement du système est devenue plus difficile, pour éviter les pannes majeures du système et les pannes de courant régionales, les services publics ont mis en place un système de contrôle et d'acquisition de données (SCADA, Supervisory Control And Data Acquisition) plus étendu sur l'ensemble du réseau pour prendre en charge les systèmes informatiques du centre de contrôle énergétique. La banque de données créée est destinée à un certain nombre de programmes d'application - certains pour assurer le fonctionnement du système économique et d'autres pour évaluer la sécurité du système en cas de défaillance des équipements et de lignes.

Dans les années 1970, Schweppe a proposé pour la première fois l'idée de l'estimation d'état des réseaux électriques [46]. L'estimation de l'état du système électrique constitue le cœur des fonctions de surveillance, d'analyse et du contrôle du système en ligne [47],[48]. Il s'agit comme un filtre entre les mesures brutes reçues du système et toutes les fonctions d'application qui ont besoin des données les plus fiables pour l'état de fonctionnement actuel du système, et elle comprend généralement le traitement des mauvaises données, les solutions d'estimation d'état, le traitement des erreurs de paramètres et de topologie, et d'autres analyses [49].

## IV.2 Présentation générale de l'estimation d'état

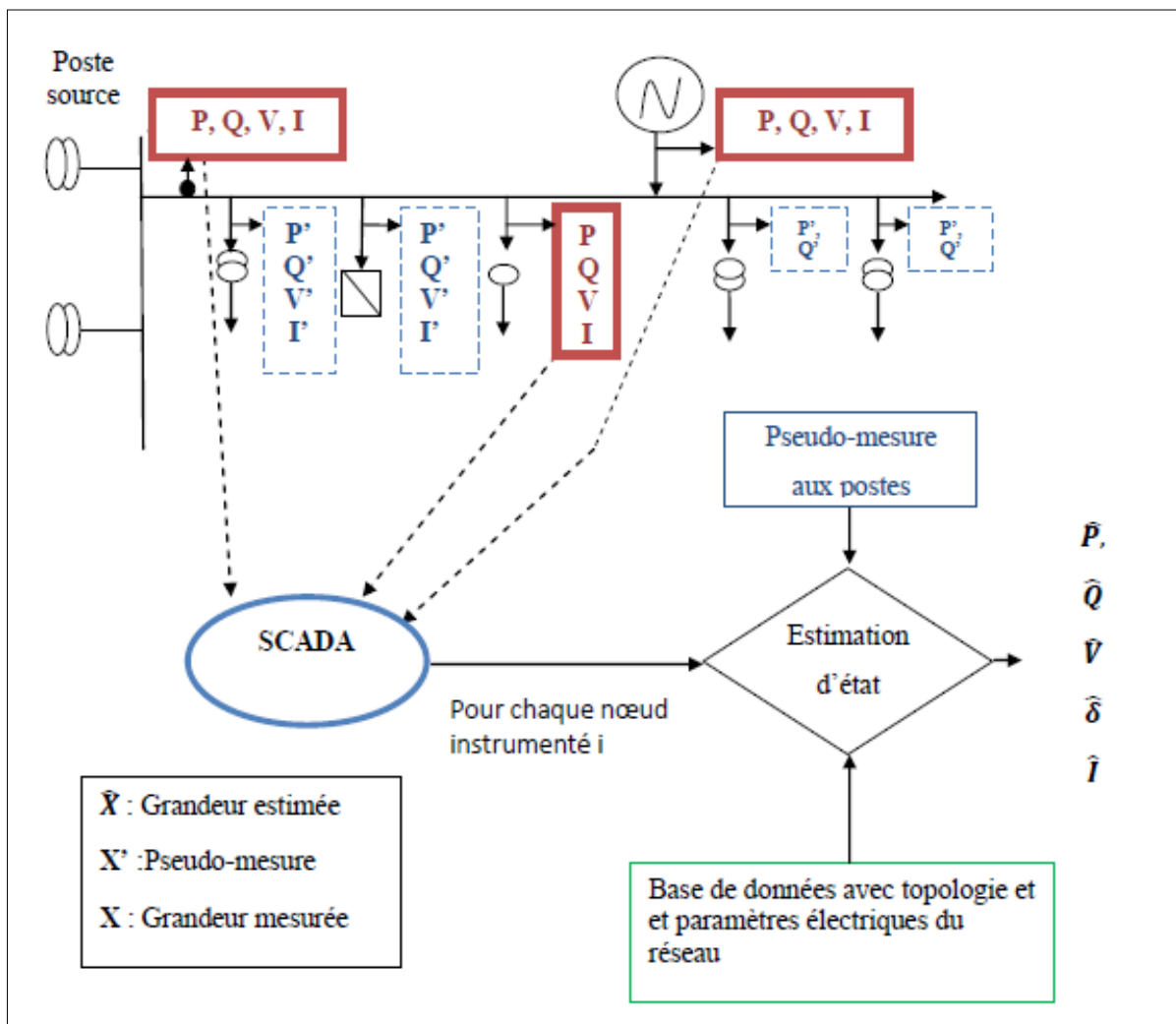
Initialement, les estimateurs d'état ont été développés pour les réseaux de transport. En effet, ceux-ci sont la colonne vertébrale des systèmes électriques, pour lesquels la sûreté de fonctionnement est primordiale. Néanmoins, les réseaux de distribution prennent une importance accrue, notamment avec le développement des stratégies d'auto consommation individuelle et collective. Les premiers articles sur l'estimation d'état datent de 1970, et concernaient des réseaux de transport à structure maillée et à grande observabilité. L'objectif des estimateurs d'état était d'identifier l'état réel du réseau. Les modèles utilisés pour ces estimateurs étaient en général des modèles monophasés qui s'adaptent parfaitement aux particularités des réseaux de transport [50].

L'estimation d'état d'un système est l'ensemble minimum de variables qui peuvent être utilisées pour définir complètement le système électrique à l'aide de la topologie du réseau et des paramètres d'impédance, les tensions de nœuds complexes ou courants de branche, L'estimation d'état est le

processus de détermination de l'état du système à l'aide de mesures du système basées sur la minimisation de certains critères statistiques (par exemple les moindres carrés) [51].

Les principaux objectifs de L'estimation d'état sont les suivants :

1. Détection de données de mesure erronées.
2. Lissage des petites erreurs.
3. Détection d'erreurs de topologie (d'états de commutation incorrects).
4. Fourniture d'estimations pour les parties non surveillées du système (remplir les mesures du compteur pour les mesures manquantes ou retardées).
5. Estimation des paramètres du réseau sur la base des mesures de redondance [52],[53].



**Figure IV.1 :** Principe de l'estimation d'état d'un réseau électrique [54].

Le schéma ci-dessus décrit le principe de l'estimateur d'état. Il s'appuie sur un système SCADA doté de l'infrastructure de mesure, de contrôle, et de réglage à distance recueille les grandeurs mesurées.

Ces grandeurs sont transférées dans une base de données avec paramètres électrique du réseau, l'estimateur d'état compare ces données à celle des grandeurs pseudos mesures dans chaque nœud (grandeurs qui peuvent comprendre des charges nodales à savoir V, P, Q, I, évaluées empiriquement) ainsi, il nous donne des grandeurs estimées [55].

### **IV.3 Estimateur transport et Estimateur distribution**

#### **IV.3.1 L'estimateur d'état pour le réseau de transport**

Aujourd'hui, l'estimateur d'état est implanté largement sur les réseaux de transport. Le vecteur estimé (ensemble des grandeurs qui sont analysées dans le processus algorithmique) est souvent composé des amplitudes et des angles des tensions. L'introduction de la fonction d'estimation d'état a augmenté les performances du système SCADA, en diminuant les erreurs des mesures. Pour les réseaux de transport, les nœuds sont les postes de transformation ou les postes « d'aiguillage » qui contiennent toutes les mesures nécessaires, de plus elles sont redondantes (doublées, voir triplées). Ainsi, il y a plus de mesures que nécessaires pour établir l'observabilité du système. En effet, la perte d'observabilité d'un système exploité proche de ses limites lors d'un incident (N-1) peut être catastrophique [56].

#### **IV.3.2 L'estimateur d'état pour le réseau de distribution**

Actuellement, les seules mesures disponibles dans le réseau de distribution sont localisées au niveau du poste source. Ainsi, les seules mesures réelles sont les puissances active et réactive au niveau de l'arrivée HTA dans le poste source, l'amplitude de tension au jeu de barres et les amplitudes de courants en tête de chaque départ HTA. Le manque d'observabilité dans la distribution ou delà du poste source est donc évident. En conséquence, des modèles de charges doivent être utilisés, étant appelés pseudo-mesures. Ces pseudo mesures donnent des informations sur les puissances active et réactive consommées dans les postes de distribution publics HTA/BT avec, potentiellement et sans travaux plus poussés sur la question, des erreurs très importantes (50% ou plus). D'autres valeurs utilisées, lorsque nécessaire, pour l'observabilité de nœuds d'étoilement dans le réseau de distribution sont les puissances active et réactive pour les nœuds sans charge. Elles sont toujours égales à zéro et sont appelées mesures virtuelles [57].

### **IV.4 Le traitement de la topologie**

Le traitement de la topologie utilise des paramètres réseau tels que les informations d'état du disjoncteur et du commutateur et met à jour la topologie du réseau. Il s'assure que les informations de topologie correctes ont été utilisées dans le processus d'estimation d'état [58],[59]. L'analyse d'observabilité détermine si les mesures sont suffisantes pour réaliser l'estimation d'état. Pour assurer

l'observabilité des mesures basées sur des données de charge historiques, appelées pseudo mesures, et des mesures d'injection nulle, dites mesures virtuelles, sont utilisées. Une méthode des espaces nuls pour l'analyse de l'observabilité. Le mauvais processeur de données est une autre fonction importante de l'estimation, qui traite les mesures et détecte les mesures erronées qui sont corrompues pour des raisons telles que des pannes de réseau de communication ou des paquets de mesure perdus. Il détecte et élimine les erreurs de mesure grossières sous réserve de la présence d'une redondance de mesure suffisante. Ainsi, l'état du système est obtenu par l'estimateur d'état en utilisant les mesures traitées et les résultats de l'analyseur d'observabilité et du processeur de topologie. Le système de gestion de l'énergie est utilisé pour surveiller et contrôler le fonctionnement d'un système électrique, où l'estimation d'état joue un rôle important [60]. Les données de mesure sont reçues à partir de dispositifs tels que les terminales à distance unidirectionnelles et plus récemment.

Ces mesures, ainsi que d'autres mesures (pseudo-mesures et mesures virtuelles) et des informations provenant de l'analyse d'observabilité et du processeur de topologie, sont utilisées pour estimer l'état du système. Cet état est également utilisé par le système de contrôle de supervision, qui génère la séquence de commande pour l'appareillage (disjoncteurs) [61].

#### **IV.5 Importance de l'estimation d'état pour les puissances**

La fonction d'un système de puissance électrique est la conversion et la distribution d'énergie aux utilisateurs quand ou tant que demandée et aussi économiquement que possible. L'objectif de l'interconnexion des plans par le réseau de transmission et de designer et maintenir les niveaux de génération des plans et les écoulements de puissance dans les lignes de transmission qui vont assurer un niveau élevé de sécurité.

Dans le but d'améliorer la performance du système général, il est important de connaître comment le système se comporte à n'importe quel moment, c'est-à-dire, l'état du courant du système doit être connu. En résumé, la fonction de l'estimation d'état est d'adoucir les petites erreurs hasardeuses dans les lectures, de détecter et identifier les grandes erreurs de mesure et de remplir les lectures qui ont échoué dû aux pannes des équipements de communication [62].

#### **IV.6 Principales composantes de l'estimation d'état**

Un programme d'estimation d'état comporterait généralement trois composants. Les fonctions de ces derniers sont décrites ci-après :



### **IV.6.1 Analyse topologique du système électrique**

Cette fonction est utilisée pour déterminer la structure du système électrique en temps réel sur la base des mesures qui représentent les variables binaires décrivant l'état logique (ouvert/fermé) de chaque disjoncteur et de chaque sectionneur du système, reçues via le Système SCADA.

### **IV.6.2 Analyse d'observabilité du système électrique**

Cette fonction se sert des résultats obtenus de l'analyse topologique du système électrique et des mesures analogiques reçues via le système SCADA pour déterminer si le système est observable ou non. En effet, dans le cas où le système n'est pas observable, l'analyse va en plus déterminer où des pseudos mesures devront être rajoutées pour rendre le système observable. Comme le montre cette fonction permettra également de déterminer les parties du système qui constituent des îlots observables. Par ailleurs seules les parties observables du système peuvent être estimées.

Il existe deux types de méthodes d'analyse d'observabilité : la méthode topologique et la méthode numérique. La méthode topologique utilise l'information sur la distribution des mesures physiques partout dans le système, tandis que la méthode numérique utilise les informations fournies par la matrice jacobienne de l'estimation d'état [63].

### **IV.6.3 Traitement des données fausses**

Un des rôles clé de l'estimateur est de détecter et d'éliminer les données fausses. Le traitement des données fausses dépend de la méthode utilisée par l'estimateur. Ainsi cette fonction est faite soit à la fin, soit pendant chaque estimation [64].

## **IV.7 Différents types d'estimation d'état**

On distingue deux types d'estimation d'état, à savoir l'estimation statique et l'estimation dynamique.

### **IV.7.1 Estimation statique**

L'estimation statique est appliquée surtout dans la détermination de la répartition de puissance dans un réseau de transmission, pour les systèmes qui rencontre de faible perturbation de fréquence.

### **IV.7.2 Estimation dynamique**

Contrairement à l'estimation statique, l'estimation dynamique est appliquée à un système qui est sujet à de haute perturbation de fréquence elle est donc appliquée aux systèmes rencontrant des problèmes de la stabilité dynamique ou transitoire.

Que ce soit dans l'estimation statique ou dynamique, le succès de l'opérateur ne peut être que dans les limites des propriétés statistiques des mesures, par exemple la déviation standard des mesures données par l'appareillage de télémessure [62].

## IV.8 Détail sur l'estimation statique

L'estimateur d'état est basé essentiellement pour trouver un meilleur estimé d'un vecteur d'état initialement sujet à certaines erreurs de mesures, par conséquent, nous allons essayer de développer cette méthode après avoir définis les vecteurs d'état, des mesures et des erreurs d'un système électro énergétique.

### IV.8.1 Vecteur d'état [X]

Le vecteur d'état d'un système électro énergétique à  $n$  accès, est défini par  $2n$  équations d'écoulement de puissance dont  $2(n-1)$  variables d'état représentant les tensions complexes à tous les accès de charges  $|V_p| e^{j\delta_p}$ , excepté l'accès bilan où la phase  $\delta$  est prise égale à zéro et le module est spécifié.

### IV.8.2 Vecteur des mesures [Z]

Les composantes du vecteur des mesures  $Z$ , peuvent être par exemple, les puissances active et réactive de charge représentée individuellement, les modules des tensions aux accès, les modules des courants circulant dans les lignes.

### IV.8.3 Vecteurs des erreurs sur les mesures [e]

Le vecteur  $e$  représente les faibles perturbations avec des propriétés statistiques connues.

Si on désigne par  $E$  la valeur moyenne (espérance mathématique) du vecteur  $e$ , on a :

$$E(v)=0 \text{ et } E(e \cdot e^T) = R \quad (\text{IV.1})$$

Où :  $[R]$  est la matrice de covariance.

### IV.8.4 Relation entre les vecteurs Z, X, e

Pour que la topologie du réseau soit connue, les équations du réseau peuvent être utilisées pour relier le vecteur des mesures  $Z$  avec le vecteur des variables d'état  $X$  telle que :

$$Z = (X)+e \quad (\text{IV.2})$$

Où :

- Pouvant être une fonction linéaire ou non linéaire.
- $X^T = (V_2, \dots, V_{NS}, \delta_2, \dots, \delta_{NS})$ ,  $NS$  nombre d'états.
- $Z^T = (\dots, P_p, Q_p, \dots, P_{pq}, Q_{pq}, \dots, V_p)$ .
- $X^T$  et  $Z^T$  sont les vecteurs transposés, respectivement, des vecteurs  $X$  et  $Z$ [65].

## IV.9 Contexte Mathématique

Pour estimer les données de charge sur la présence d'un nombre limité de mesures réelles, le modèle de charge de bus basé sur le concept des caractéristiques de charge typiques peuvent être

développées. Le modèle de charge définis individuellement pour chaque bus de charge peut être développés par utilisant les mesures réelles aux départs et mesurables charges à travers la relation entre une charge individuelle et la charge totale du système.

La précision du modèle d'estimation peut être encore améliorée en inclusion d'erreurs dans les données de charge estimées. Les techniques d'estimation qui consistent à attribuer une valeur à un variable d'état du système inconnue basée sur les mesures de ce système selon un critère statistique est utilisée pour la charge estimation dans le système électrique industriel [66]. Dans le processus d'estimation, le réseau étudié et ses paramètres de ligne sont donnés et utilisés avec les mesures réelles pour obtenir la « meilleure estimation » de l'état du système [67].

#### IV.10 Problème pour d'estimateur d'état :

Vecteur d'état pour un réseau N bus comme :

$$\underline{X} = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_{2N-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_2 \\ \vdots \\ \theta_N \\ V_1 \\ \vdots \\ V_N \end{bmatrix} \quad (\text{IV.3})$$

On a :  $n=N-1$

Pour chaque paramètre mesuré, nous écrivons une équation en termes d'états :

$$\hat{Z}_i = h_i * (\underline{x}) \quad (\text{IV.4})$$

Pour une mesure de tension, la fonction  $h_i$  est très simple :

$$\hat{Z}_i = v_k \quad (\text{IV.5})$$

Pour les flux des puissances active et réactive, la fonction  $h$  est donnée par les expressions de flux de puissance sur une ligne allant du bus  $i$  au bus  $j$ , Ceux-ci sont:

$$P_i = V_i \sum_{j=0}^N V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (\text{IV. 6})$$

$$Q_i = V_i \sum_{j=0}^N V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (\text{IV. 7})$$

En généralisant les expressions ce qui donne :

$$\underline{Z} = \hat{Z}_i + e \quad (\text{IV.8})$$

$$\text{Avec : } \underline{\hat{Z}} = \begin{bmatrix} \hat{Z}_1 \\ \vdots \\ \hat{Z}_m \end{bmatrix} \quad (\text{IV.9})$$

$$\underline{e} = \begin{bmatrix} \hat{e}_1 \\ \vdots \\ \hat{e}_m \end{bmatrix} \quad (\text{IV.10})$$

$$\underline{z} = \begin{bmatrix} z_1 \\ \vdots \\ z_m \end{bmatrix} \quad (\text{IV.11})$$

$\underline{\hat{z}}$  : Valeurs estimé.

$\underline{e}$ : L'erreur individuel dans une chaque mesure Z.

Z : Valeurs mesuré.

D'après (3) (IV.4), on a aussi pour vecteur de fonctions exprimant les valeurs de mesure en termes d'état

$$\underline{\hat{z}} = h(x) \quad (\text{IV.12})$$

En remplaçant l'équation (IV.12) en (IV.11) :

$$\underline{z} = h(x) + \underline{e} \quad (\text{IV.13})$$

De l'équation (IV.13), on a que l'erreur est :

$$\underline{e} = \underline{z} - h(x) \quad (\text{IV.14})$$

Il est préférable de minimiser la somme directe des carrés des erreurs. Cependant, pour que les mesures à partir de compteurs plus précis soient traitées plus favorablement que des mesures moins précises, chaque terme de la somme des carrés est multiplié par un facteur de pondération approprié " $\frac{1}{\sigma_i^2}$ " pour donner la fonction objective.

$$J = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m e_i^2 = \frac{1}{2} \underline{e}^T \underline{e} = \frac{1}{2} (\underline{z} - \underline{h}(x))^T (\underline{z} - \underline{h}(x)) \quad (\text{IV.15})$$

En minimisant J, nous choisissons effectivement x qui correspond le mieux aux mesures, certains appareils de mesure qui sont meilleurs que d'autres.

Par conséquent nous modifierons l'équation (IV.15) pour être :

$$J = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \frac{\eta_i^2}{\sigma_i^2} \quad (\text{IV.16})$$

La matrice de covariance de mesure R est définie sur la base des variances de diverses mesures comme suit :

$$\underline{R} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 & 0 & 0 \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_m^2 \end{bmatrix} \quad (\text{IV.17})$$

Comme R est diagonale, son inverse est facile à trouver :

$$\underline{R}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma_1^2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_2^2} & 0 & 0 \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sigma_m^2} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.18})$$

Donc exprimer l'équation (IV.16) comme suite :

$$J = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \frac{e_i^2}{\sigma_i^2} = \frac{1}{2} \underline{e}^T \underline{R}^{-1} \underline{e} = \frac{1}{2} (\underline{z} - \underline{h}(\underline{x}))^T \underline{R}^{-1} (\underline{z} - \underline{h}(\underline{x})) \quad (\text{IV.19})$$

Le problème devient alors de trouver  $[\underline{x}]$  qui minimise  $[J]$ , cependant que  $h$  est non linéaire, et donc notre solution sera nécessairement itérative [68],[69].

#### IV.11 L'estimateur des moindres carrés

L'estimateur des moindres carrés est l'estimateur le plus souvent utilisé pour les réseaux de transport. Il implique une solution itérative donnée par des équations normalisées. Ainsi, une première initialisation doit être faite pour le vecteur d'état  $\underline{x}^{(0)}$ . Les mesures peuvent être de divers types. Les mesures les plus couramment utilisées sont les puissances de transits dans les lignes, les puissances dans les nœuds, les amplitudes de tensions, les amplitudes de courants dans les lignes. Ces mesures algébriques peuvent être exprimées, en termes de variables d'état, soit en utilisant la forme rectangulaire, soit la forme des coordonnées polaires. Lors de l'utilisation des coordonnées polaires pour un système de  $N$  nœuds, le vecteur d'état aura  $2N-1$  éléments [70].

Pour déterminer l'état le plus probable du réseau par la méthode de moindre carrée, il est nécessaire de résoudre un problème d'optimisation à travers la fonction à minimiser, Nous redéfinissons cette fonction sous forme vectorielle en l'appelant  $J(\underline{x})$  définie par :

$$J(\underline{x}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \frac{e_i^2}{\sigma_i^2} = \frac{1}{2} \underline{e}^T \underline{R}^{-1} \underline{e} = \frac{1}{2} (\underline{z} - \underline{h}(\underline{x}))^T \underline{R}^{-1} (\underline{z} - \underline{h}(\underline{x})) \quad (\text{IV.20})$$

$J$  : Vecteur d'état qui donne l'erreur minimal de l'estimateur.

On peut appliquer des conditions de premier ordre, qui signifient que toutes les dérivées premières de l'objectif fonction par rapport aux variables de décision doit être nul, c'est-à-dire que  $\Delta J = 0$ .

$$\Delta_{\underline{x}} J = \frac{\partial J}{\partial \underline{x}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial J}{\partial x_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial J}{\partial x_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{IV.21})$$

Pour un seul élément de  $\Delta J = 0$  on a :

$$J = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \frac{(z_i - h_i(\underline{x}))^2}{\sigma_i^2} \quad (\text{IV.22})$$

$$\frac{\partial J}{\partial x_1} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \frac{-2(z_i - h_i(\underline{x}))}{\sigma_i^2} \frac{\partial h_i(\underline{x})}{\partial x_1} = \sum_{i=1}^m \frac{-(z_i - h_i(\underline{x}))}{\sigma_i^2} \frac{\partial h_i(\underline{x})}{\partial x_1} \quad (\text{IV.23})$$

Cela peut être écrit sous forme matricielle comme :

$$\frac{\partial J}{\partial x_1} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial h_1(\underline{x})}{\partial x_1} & \frac{\partial h_2(\underline{x})}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial h_m(\underline{x})}{\partial x_1} \end{bmatrix} \underline{R}^{-1} \begin{bmatrix} z_1 - h_1(\underline{x}) \\ z_2 - h_2(\underline{x}) \\ \vdots \\ z_m - h_m(\underline{x}) \end{bmatrix} \quad (\text{IV.24})$$

Donc nous écrivons le vecteur des dérivées, selon :

$$\frac{\partial J}{\partial \underline{x}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_1(\underline{x})}{\partial x_1} & \frac{\partial h_2(\underline{x})}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial h_m(\underline{x})}{\partial x_1} \\ \frac{\partial h_1(\underline{x})}{\partial x_2} & \frac{\partial h_2(\underline{x})}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial h_m(\underline{x})}{\partial x_2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial h_1(\underline{x})}{\partial x_n} & \frac{\partial h_2(\underline{x})}{\partial x_n} & \dots & \frac{\partial h_m(\underline{x})}{\partial x_n} \end{bmatrix} \underline{R}^{-1} \begin{bmatrix} z_1 - h_1(\underline{x}) \\ z_2 - h_2(\underline{x}) \\ \vdots \\ z_m - h_m(\underline{x}) \end{bmatrix} \quad (\text{IV.25})$$

Nous reconnaissons la matrice des dérivées partielle dans (IV.24) comme un sort de matrice Jacobienne mais :

- a- C'est  $N \times M$ , c'est à dire qu'il n'est pas carré.
- b- Contrairement au jacobien standard, ici les lignes varient avec la variable  $(x_1, x_2, \dots)$ , et non avec la fonction  $(h_1, h_2, \dots)$

Définissons une matrice H qui n'as pas le deuxième attribut (b)

$$\underline{H} = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_1(\underline{x})}{\partial x_1} & \frac{\partial h_1(\underline{x})}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial h_1(\underline{x})}{\partial x_n} \\ \frac{\partial h_2(\underline{x})}{\partial x_1} & \frac{\partial h_2(\underline{x})}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial h_2(\underline{x})}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial h_m(\underline{x})}{\partial x_1} & \frac{\partial h_m(\underline{x})}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial h_m(\underline{x})}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.26})$$

H : La matrice Jacobienne, c'est la transposée de la première matrice dans (IV.25).

La condition d'optimalité peut s'écrire comme suite :

$$\Delta \underline{x} J = \frac{\partial J}{\partial \underline{x}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial J}{\partial x_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial J}{\partial x_n} \end{bmatrix} = -\underline{H}^T(\underline{x}) \underline{R}^{-1} [(\underline{z} - \underline{h}(\underline{x}))] = \underline{0} \quad (\text{IV.27})$$

La procédure de résolution en définit la partie gauche de l'équation comme :

$$\underline{G}(\underline{x}) = -\underline{H}^T(\underline{x}) \underline{R}^{-1} [(\underline{z} - \underline{h}(\underline{x}))] = \underline{0} \quad (\text{IV.28})$$

$$\text{On a : } \underline{b} = \frac{\partial J}{\partial \underline{x}} = \underline{H}^T(\underline{x}) \underline{R}^{-1} [(\underline{z} - \underline{h}(\underline{x}))] \quad (\text{IV.29})$$

$\underline{b}$  : c'est la condition de minimisation de la fonction objective.

$\underline{G}$  : c'est La matrice de gain, constituée en utilisant la matrice Jacobienne H et la matrice de covariance d'erreur de mesure R.

Effectuer un développement en série de Taylor de G(x) autour d'un certain état  $\underline{x}^{(0)}$

$$\underline{G}(\underline{x}_0 + \Delta \underline{x}) = \underline{G}(\underline{x}_0) + \nabla_{\underline{x}}(\underline{G}\underline{x}) |_{\underline{x}_0} \Delta \underline{x} = \underline{0} \quad (\text{IV.30})$$

Puisque l'équation est non linéaire, il faut recourir à un algorithme itératif de type Newton pour le résoudre.

Supposons que nous puissions faire une assez bonne estimation de la solution à l'équation (IV.28).

C'est-à-dire que la différence entre notre supposition et la solution réelle est relativement faible.

Dénotons cette expression par  $\underline{x}^{(k)}$ , parce que ce n'est pas la solution de  $\underline{G}(\underline{x}^{(k)}) = 0$

Nous voulons donc une meilleure estimation dénotez par  $\underline{x}^{(k+1)}$ , La différence entre l'ancienne estimation et la nouvelle estimation  $\underline{x}^{(k+1)}$ , et  $\Delta \underline{x}$  :

$$\underline{x}^{(k+1)} = \underline{x}^{(k)} + \Delta \underline{x} \quad (\text{IV.31})$$

Ou on peut écrire :

$$\Delta \underline{x} = \underline{x}^{(k+1)} - \underline{x}^{(k)} \quad (\text{IV.32})$$

## IV.12 Algorithme de solution

L'algorithme itératif pour l'estimateur des moindres carrés pondérés peut être décrit comme suit :

Donné :

- Mesures  $z$  [ $z_1, \dots, z_m$ ].
- Écarts types [ $\sigma_1, \dots, \sigma_m$ ].

- Le réseau étudié.

Paramètres à calculer :

1. Initialiser le vecteur d'état  $X^T$  (toutes les amplitudes de tension et tous les angles de tension sauf pour l'angle du bus pivotant)
2. Formez des expressions de mesure  $h(x)$
3. Former des expressions dérivées  $H = \frac{\partial h(x)}{\partial x}$
4. Formulaire R
5. Soit  $k=0$ . Devinez la solution  $x^{(k)}$
6. Calculer  $H(x^{(k)})$ ,  $h(x^{(k)})$
7. Calculer  $A = H^T(x)R^{-1}H(x)$ ,  $b = H^T(x)R^{-1}[(z-h(x))]$
8. Résolvez  $A \cdot \Delta x = b$  pour  $\Delta x$ .
9. Calculer  $x^{(k+1)} = x^{(k)} + \Delta x$
10. Décomposer  $G(x^k)$  et résoudre pour  $\Delta x^k$
11. Test de convergence  $\text{Max } |\Delta x^k| > \epsilon$ .
12. Si non  $x^{(k+1)} = x^{(k)} + \Delta x$ ,  $k=k+1$  et revenir à l'étape 6.
13. Si oui, stop [71],[72].

#### IV.13 Étude de cas d'un réseau standard à 5 bus

Considérons le système étudié dans le chapitre précédent, un réseau de 5 bus et 7 lignes.

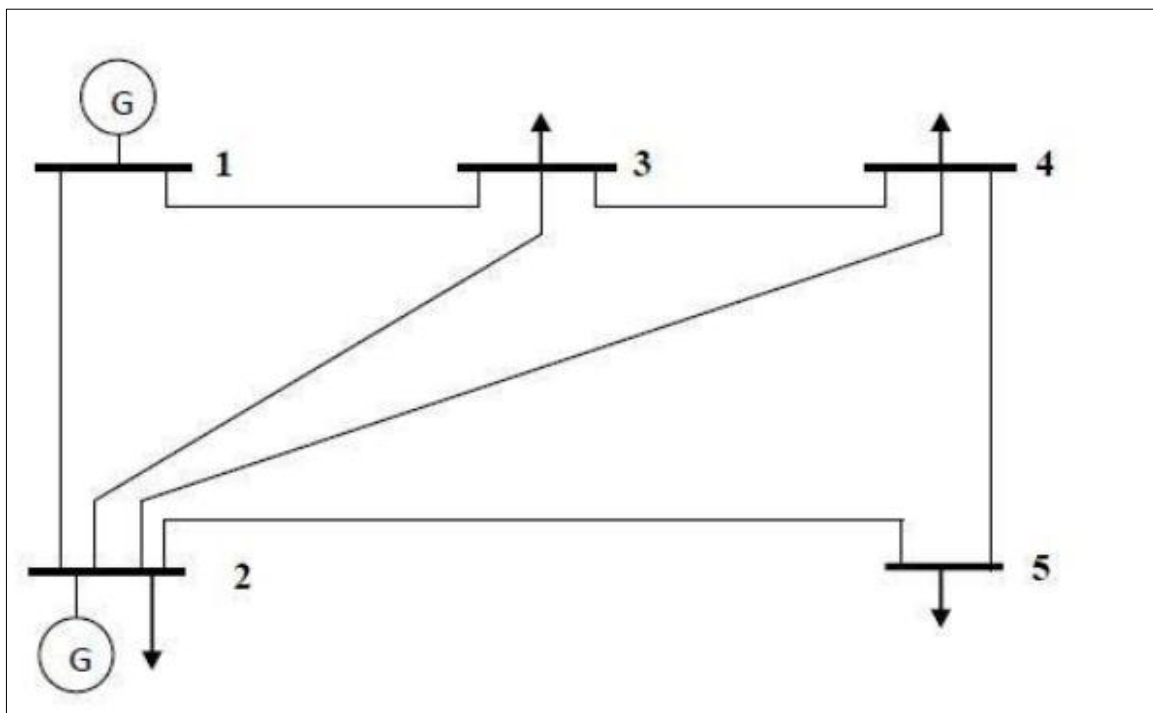


Figure IV.2: Topologie du réseau IEEE standard à 05 nœuds.



En rappelant que  $P_{ik} = 1/X_{ik} (\Theta_i - \Theta_k)$ , d'après les données suivantes :

**Tableaux IV.1:** les paramètres des lignes.

Ligne	$P_{ik}$	$X_{ik}$
<b>1-2</b>	0.89	0.06
<b>1-3</b>	0.42	0.24
<b>2-3</b>	0.24	0.18
<b>2-4</b>	0.27	0.18
<b>2-5</b>	0.54	0.12
<b>3-4</b>	0.19	0.03
<b>4-5</b>	-0.06	0.24

- **Les résultats de première itération**

Les fonctions objectives sont :

$$h_1(x) = P_{12} = 1/3((50 * \Theta_1) - (50 * \Theta_2))$$

$$h_2(x) = P_{13} = 1/6((25 * \Theta_1) - (25 * \Theta_3))$$

$$h_3(x) = P_{23} = 1/9((50 * \Theta_2) - (50 * \Theta_3))$$

$$h_4(x) = P_{24} = 1/9((50 * \Theta_2) - (50 * \Theta_4))$$

$$h_5(x) = P_{25} = 1/3((25 * \Theta_2) - (25 * \Theta_5))$$

$$h_6(x) = P_{34} = 1/3((100 * \Theta_3) - (100 * \Theta_4))$$

$$h_7(x) = P_{45} = 1/6((25 * \Theta_4) - (25 * \Theta_5))$$

Le vecteur d'état se présenter comme se dessous :

$$X^{(0)} = [\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3, \Theta_4, \Theta_5]^T = [0, -2.058, -4.859, -4.882, -5.793]^T \text{ ( en radians)}$$

Les valeurs du vecteur de mesure X sont :

$$X = \begin{bmatrix} h_1 = -33.4109 \\ h_2 = -19.8221 \\ h_3 = -15.2925 \\ h_4 = -15.3878 \\ h_5 = -30.6267 \\ h_6 = -0.57144 \\ h_7 = -3.7725 \end{bmatrix}$$

L'expression de la dérivée H est :

$$H(x) = \begin{bmatrix} 16.667 & -16.667 & 0 & 0 & 0 \\ 4.1667 & 0 & -4.1667 & 0 & 0 \\ 0 & 5.5556 & -5.5556 & 0 & 0 \\ 0 & 5.5556 & 0 & -5.5556 & 0 \\ 0 & 8.3333 & 0 & 0 & -8.3333 \\ 0 & 0 & 33.333 & -33.333 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4.1667 & -4.1667 \end{bmatrix}$$

H : est une matrice constante, en général elle sera une fonction des états et changera donc d'itération en itération.

La matrice de H transposé effectué comme suite :

$$H^T(x) = \begin{bmatrix} 16.667 & 4.1667 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -16.667 & 0 & 5.5556 & 5.5556 & 8.3333 & 0 & 0 \\ 0 & -4.1667 & -5.5556 & 0 & 0 & 33.333 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -5.5556 & 0 & -33.333 & 4.1667 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -8.3333 & 0 & -4.1667 \end{bmatrix}$$

La matrice de covariance R est :

$$R = \begin{bmatrix} 0.0001 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0001 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0001 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0001 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0001 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0001 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0001 \end{bmatrix}$$

Le Gain de ce système définir comme la matrice suivante :

$$G = \begin{bmatrix} 2.9514 \cdot 10^6 & -2.7778 \cdot 10^6 & -1.7361 \cdot 10^5 & 0 & 0 \\ -2.7778 \cdot 10^6 & 4.0895 \cdot 10^6 & -3.0864 \cdot 10^5 & -3.0864 \cdot 10^5 & -6.9444 \cdot 10^5 \\ -1.7361 \cdot 10^5 & -3.0864 \cdot 10^5 & 1.1593 \cdot 10^7 & -1.1111 \cdot 10^7 & 0 \\ 0 & -3.0864 \cdot 10^5 & -1.1111 \cdot 10^7 & 1.1593 \cdot 10^7 & -1.7361 \cdot 10^5 \\ 0 & -6.9444 \cdot 10^5 & 0 & -1.7361 \cdot 10^5 & 8.6806 \cdot 10^5 \end{bmatrix}$$

Le vecteur de condition de minimisation de la fonction objective b :

$$b = \begin{bmatrix} -6.3944 \cdot 10^6 \\ 1.3118 \cdot 10^6 \\ 1.485 \cdot 10^6 \\ 8.8817 \cdot 10^5 \\ 2.7094 \cdot 10^6 \end{bmatrix}$$

Les nouvelles valeurs des  $\theta$  ce sont :

$$\theta^{(1)} = [-8.1206, -6.116, -3.3633, -3.3462, -2.4408]^T$$

Les erreurs estimées dans les mesures sont alors données par :

$$e = \begin{bmatrix} 0.00092714 \\ -0.0037086 \\ -0.028587 \\ -0.031125 \\ 0.041662 \\ -0.0052281 \\ -0.083325 \end{bmatrix}$$

Donc en calculent la valeur de  $\Delta\theta$  d'après les deux valeurs des  $\theta$  :

$$\Delta\theta = \theta^{(1)} - \theta^{(0)} = \begin{bmatrix} -8.1206 - 0 = -8.1206 \\ -6.116 + 4.058 = -4.058 \\ -3.3633 + 4.859 = 1.4957 \\ -3.3426 + 4.882 = 1.5358 \\ -2.4408 + 5.793 = 3.3522 \end{bmatrix}$$

La valeur maximale de  $|\Delta\theta|$  est : 8.1206.

Déjà on à trouver la première itération du programme en continue les autres itérations jusqu'à la condition d'arrêt :

$$\text{Max } |\Delta x^k| > \varepsilon \text{ avec } \varepsilon = 10^{-3}$$

- **Les résultats de deuxième itération :**

$$X^{(1)} = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5]^T = [-8.1206, -6.116, -3.3633, -3.3462, -2.4408]^T$$

Les valeurs du vecteur de mesure X sont :

$$X = \begin{bmatrix} h1 = -33.4109 \\ h2 = -19.8221 \\ h3 = -15.2925 \\ h4 = -15.3878 \\ h5 = -30.6267 \\ h6 = -0.57144 \\ h7 = -3.7725 \end{bmatrix}$$

L'expression de la dérivée H est :

$$H = \begin{bmatrix} 16.667 & -16.667 & 0 & 0 & 0 \\ 4.1667 & 0 & -4.1667 & 0 & 0 \\ 0 & 5.5556 & -5.5556 & 0 & 0 \\ 0 & 5.5556 & 0 & -5.5556 & 0 \\ 0 & 8.3333 & 0 & 0 & -8.3333 \\ 0 & 0 & 33.333 & -33.333 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4.1667 & -4.1667 \end{bmatrix}$$

La matrice de H transposé effectué comme suite:

$$H^T(x) = \begin{bmatrix} 16.667 & 4.1667 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -16.667 & 0 & 5.5556 & 5.5556 & 8.3333 & 0 & 0 \\ 0 & -4.1667 & -5.5556 & 0 & 0 & 33.333 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -5.5556 & 0 & -33.333 & 4.1667 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -8.3333 & 0 & -4.1667 \end{bmatrix}$$

Le Gain de ce système définir comme la matrice suivante :

$$G = \begin{bmatrix} 2.9514 * 10^6 & -2.7778 * 10^6 & -1.7361 * 10^5 & 0 & 0 \\ -2.7778 * 10^6 & 4.0895 * 10^6 & -3.0864 * 10^5 & -3.0864 * 10^5 & -6.9444 * 10^5 \\ -1.7361 * 10^5 & -3.0864 * 10^5 & 1.1593 * 10^7 & -1.1111 * 10^7 & 0 \\ 0 & -3.0864 * 10^5 & -1.1111 * 10^7 & 1.1593 * 10^7 & -1.7361 * 10^5 \\ 0 & -6.9444 * 10^5 & 0 & -1.7361 * 10^5 & 8.6806 * 10^5 \end{bmatrix}$$

Le vecteur de condition de minimisation de la fonction objective b :

$$b = \begin{bmatrix} 6.5602 * 10^6 \\ -1.3868 * 10^6 \\ -1.4525 * 10^6 \\ -9.69 * 10^6 \\ -2.7519 * 10^6 \end{bmatrix}$$

Les nouvelles valeurs des  $\theta$  ce sont :

$$\theta^{(2)} = [8.492, 6.434, 3.633, 3.61, 2.699]^T$$

Les erreurs estimées dans les mesures sont alors données par :

$$e = \begin{bmatrix} 0.00092714 \\ -0.0037086 \\ -0.028587 \\ -0.031125 \\ 0.041662 \\ -0.0052281 \\ -0.083325 \end{bmatrix}$$

En calcule  $\Delta\theta$  d'après  $\theta^{(1)}$  et  $\theta^{(2)}$  :

$$\Delta\theta = \theta^{(2)} - \theta^{(1)} = \begin{bmatrix} 8.492 + 8.106 = 16.6126 \\ 6.434 + 6.116 = 12.51 \\ 3.633 + 3.3633 = 6.9963 \\ 3.3462 + 3.61 = 6.9562 \\ 2.699 + 2.4408 = 5.1398 \end{bmatrix}$$

La valeur maximale de  $|\Delta\theta|$  est : 16.6126.

#### - Les résultats de troisième itération

$$X^{(3)} = [\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3, \Theta_4, \Theta_5]^T = [8.492, 6.434, 3.633, 3.61, 2.699]^T$$

Les valeurs du vecteur de mesure sont X :

$$X = \begin{bmatrix} h1 = 34.3 \\ h2 = 20.2458 \\ h3 = 15.5611 \\ h4 = 15.6889 \\ h5 = 31.125 \\ h6 = 0.76667 \\ h7 = 3.7958 \end{bmatrix}$$

L'expression de la dérivée H est :

$$H = \begin{bmatrix} 16.667 & -16.667 & 0 & 0 & 0 \\ 4.1667 & 0 & -4.1667 & 0 & 0 \\ 0 & 5.5556 & -5.5556 & 0 & 0 \\ 0 & 5.5556 & 0 & -5.5556 & 0 \\ 0 & 8.3333 & 0 & 0 & -8.3333 \\ 0 & 0 & 33.333 & -33.333 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4.1667 & -4.1667 \end{bmatrix}$$

La matrice de H transposé effectué comme suite :

$$H^T = \begin{bmatrix} 16.667 & 4.1667 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -16.667 & 0 & 5.5556 & 5.5556 & 8.3333 & 0 & 0 \\ 0 & -4.1667 & -5.5556 & 0 & 0 & 33.333 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -5.5556 & 0 & -33.333 & 4.1667 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -8.3333 & 0 & -4.1667 \end{bmatrix}$$

Le Gain de ce système définir comme la matrice suivante :

$$G = \begin{bmatrix} 2.9514 * 10^6 & -2.7778 * 10^6 & -1.7361 * 10^5 & 0 & 0 \\ -2.7778 * 10^6 & 4.0895 * 10^6 & -3.0864 * 10^5 & -3.0864 * 10^5 & -6.9444 * 10^5 \\ -1.7361 * 10^5 & -3.0864 * 10^5 & 1.1593 * 10^7 & -1.1111 * 10^7 & 0 \\ 0 & -3.0864 * 10^5 & -1.1111 * 10^7 & 1.1593 * 10^7 & -1.7361 * 10^5 \\ 0 & -6.9444 * 10^5 & 0 & -1.7361 * 10^5 & 8.6806 * 10^5 \end{bmatrix}$$

Le vecteur de condition de minimisation de la fonction objective b :

$$b = \begin{bmatrix} -6.3944 * 10^6 \\ 1.3118 * 10^6 \\ 1.485 * 10^6 \\ 8.8817 * 10^6 \\ 2.7094 * 10^6 \end{bmatrix}$$

Les nouvelles valeurs des  $\theta$  ce sont :

$$\theta^{(3)} = [-8.3206, -6.316, 3.5633, -3.5462, 2.6408]^T$$

Les erreurs estimées dans les mesures sont alors données par :

$$e = \begin{bmatrix} 0.00092714 \\ -0.0037086 \\ -0.028587 \\ -0.031125 \\ 0.041662 \\ -0.0052281 \\ -0.083325 \end{bmatrix}$$

Nous notons que les résultats de la troisième itération sont les mêmes que les résultats de la première itération et en conséquence nous pouvons prendre satisfacteur de l'itération 3, comme c'est illustré dans la figure suivante :

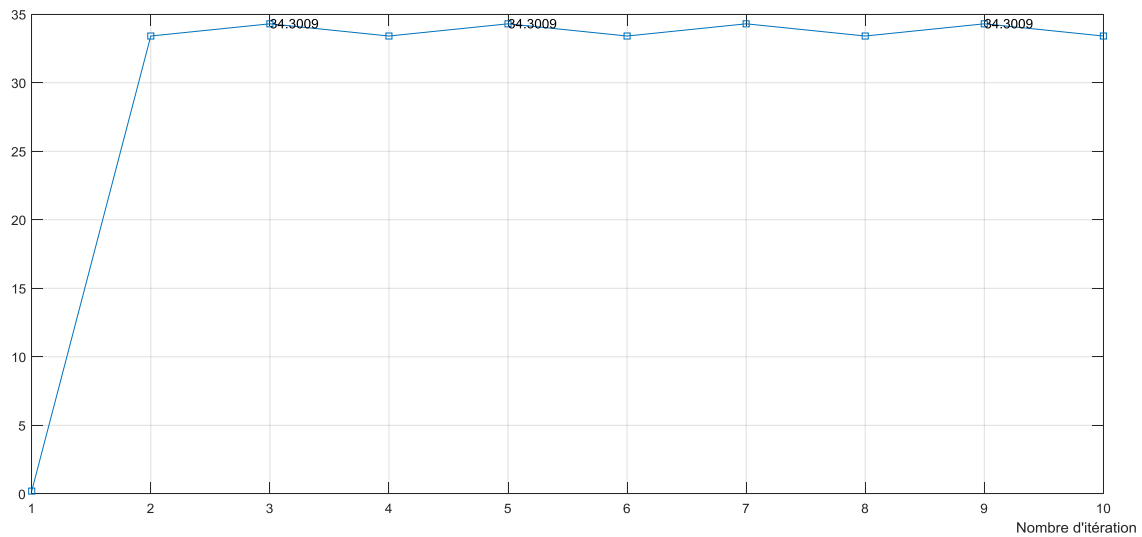


Figure IV.3 : Les valeurs des  $\theta$  par rapport le nombre d'itération.

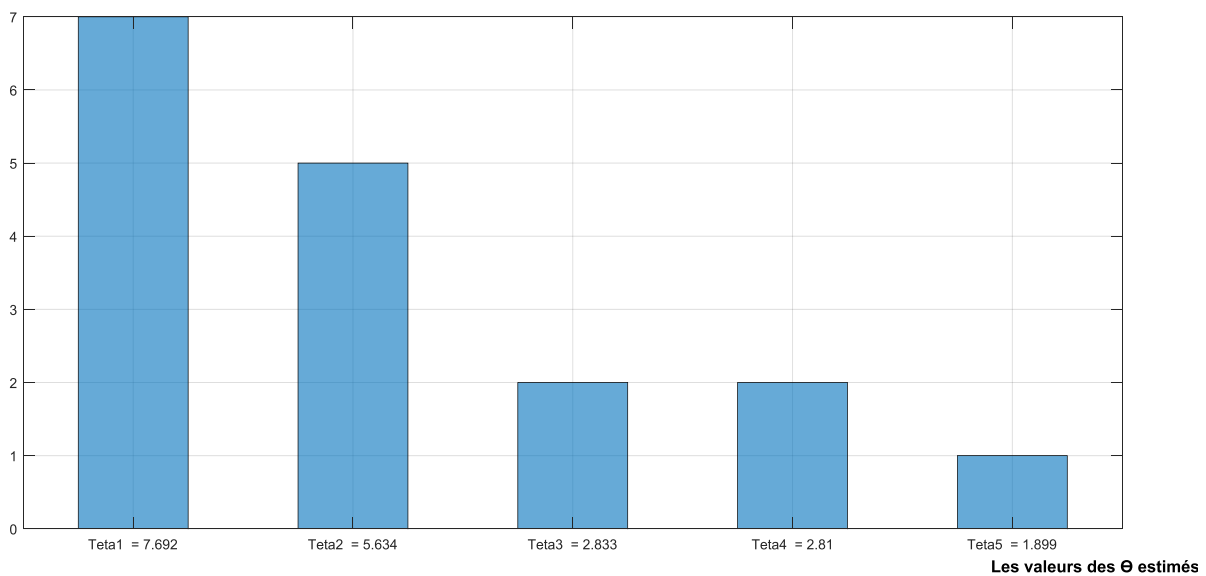


Figure IV.4 : Valeurs des  $\theta$  estimé

#### IV.14 Conclusion

Une présentation générale de l'estimation d'état sur réseaux de transport et de distribution en faisant signe l'importance de l'estimation d'état et les principaux composants avec leurs fonctionnements. En fonction de l'état du système, de nombre de mesures disponibles et de la confiance qu'on leur accorde, il faut choisir le plus adapté aux besoins de l'utilisateur. Pour les réseaux de transport, nous avons beaucoup de mesures pour ne pas avoir de problèmes d'observabilité du système, ainsi les M estimateurs proposés par la littérature peuvent rejeter les fausses données ou pour les cas défavorables des moins les prendre en compte.

Pour résoudre le problème la méthode de moindre carrée est utilisée pour adapter au mieux les données mesurées relatives à deux quantités ou plus.

L'élaboration d'un algorithme à base de la méthode des moindres carrés pour calculer l'estimateur d'état et son implémentation sous Matlab avec le but de trouver l'estimateur le plus adapté au réseau pour connaître l'état actuel du système présente notre apport dans ce chapitre.



# Conclusion générale

## **Conclusion Générale**

L'industrie de l'énergie électrique est confrontée à des problèmes liés à des contraintes qui touchent différents aspects de la production, du transport et de la distribution de l'énergie électrique. Le volet de la surveillance et le contrôle dans les réseaux électrique reste un domaine fertile pour toute tentative d'amélioration et de développement. L'estimation d'état dans les réseaux électriques présente un atout actuellement très intéressant pour l'évaluation des données réelles et incertaines ou mesurées et calculées permettant ainsi la prédiction d'un état de tension, de courant ou de puissance rassurante pour tous les acteurs intervenant au réseau électrique.

Le présent travail est divisé en deux principales parties :

Une première partie traitait l'écoulement de puissance dans un réseau standard de type IEEE à 5 Bus dont les résultats valorisent tous les paramètres et les grandeurs électriques nécessaire à la lecture détaillée du réseau électrique à la base des méthodes de calcul diverses comme les méthodes de Gauss Seidel, Newton Raphson et de découplé où la méthode avec convergence meilleure était celle de Newton Raphson.

Une deuxième partie s'intéressait à la théorie de l'estimation de l'état de réseaux électriques pour quantifier les datas mesurées, calculées et estimées qui seront utiles pour une prédiction de l'état futur du réseau électrique de même type à 5 bus , l'élaboration d'un programme sous Matlab était nécessaire pour calculer les différents paramètres liés à l'estimation de l'état du réseau après avoir fixé la fonction objective le vecteur d'état, la matrice de covariance (poids), la matrice de Gain , la Jacobienne, et l'erreur estimé. Pour un vecteur très réduit implique une estimation optimisée et souhaitée.

# Références bibliographiques

## **Référence et bibliographique**

- [1]: A. Abdel Baki & D. Belkhir & Y. Lahouassa, « Calcul de courant de court-circuit dans les réseaux électriques », Mémoire d'ingénieur de l'université de M'sila, Département d'Electronique, 2012.
- [2]: C. Bouneau, M. Derdevet, J. Percebois, « Les réseaux électriques au cœur de la civilisation industrielle », Ed. Timée-Editions, France, 2007.
- [3]: électrotechnique Théodore wildi avec collaboration de Gilbert Sybille (ingénieur, institut de recherche d'Hydro-Québec) 3e édition.
- [4]: World Electricity Production by Source 2017. Nuclear Power Today | Nuclear Energy–WorldNuclearAssociation generation / nuclearpower-in-the-world-today.aspx, 2017.
- [5]: Jean-Claude Sabonnadière Nouridine Hadjsaïd, lignes et réseaux électriques 3, Ed. Lavoisier 2008.
- [6]: Arnaud VERGNOL. « Intégration dans le réseau électrique et le marché de l'électricité de production décentralisée d'origine renouvelable (Gestion de congestion<sup>o</sup>) » Thèse Doctorat. 2010.
- [7]: Egor GLADKIKH. « Optimisation de l'architecture des réseaux de distribution de l'énergie électrique » Thèse Doctorat. 20
- [8]: Narimen AOUELLAG. « Contribution à l'Amélioration de la Flexibilité dans les Réseaux Electriques liée à l'Intégration des Générateurs Eoliens » Thèse Doctorat. 201
- [9]: Thu Hà PHAM, « Influence de la production décentralisée sur la gestion des infrastructures critiques des réseaux de puissance ». Thèse Doctorat 2006
- [10]: Egor GLADKIKH. « Optimisation de l'architecture des réseaux de distribution de l'énergie électrique » Thèse Doctorat 2006.
- [11]: Site Internet : <http://www.enedis.fr/fonctionnement-du-reseau>.
- [12]: P.S.R.Murty. "Power System Analysis ", BS Publications 2007.
- [13]: J.M. DELBARRE. « Postes à HT et THT - Rôle et Structure », Techniques de l'Ingénieur, Traité Génie électrique, D 4570, 2004.
- [14]: R. V. Bernard, « Analyse d'un réseau radial lors d'un Renforcement de puissance », PFE, Université d'Antananarivo, 2009.

- [15]: S.KHEMRI et B.MAOUEL « Protection numérique et mise en service d'une installation électrique et son réseau de distribution » Projet de fin d'étude (ingénieur). Université de TIZI-OUZOU année 2009.
- [16]: K. GHEMMOURI et L. HAMMOUCHE. « Réglage des relais de protection pour les départs moyenne tension au complexe de l'ENIEM ».
- [17]: Guide de conception des réseaux électriques industriels, T&D 6883 427/ A, Schneider électrique
- [18]: GUID TECHNIQUESONELGAZ TEBESSA.
- [19]: M. LAMI, « Protection et Surveillance des Réseaux de Transport d'Énergie Électrique », Volume 2, Electricité de France (EDF), février 2003.
- [20]: Merlin Gerin, « Guide de la protection des réseaux électrique ».
- [21]: Mancer Nabil « contribution à l'amélioration de l'efficacité de la sélectivité du système de protection des réseaux électrique par les méthodes Meta heuristiques », thèse de doctorat, université de Biskra 2017.
- [22]: Réseaux électriques industriels/3ème LEM
- [23]: P. Bornard, M. Pavard, "Réseaux d'interconnexion et de transport: réglage et fonctionnement", Techniques de l'Ingénieur, traite Génie Electrique D 4 090, 1993.
- [24]: "Description physique du réseau ",Référentiel technique NOPRES\_46E, EDF, 2005.
- [25]: <https://fr.scribd.com/doc/294668823/ch1> METHODE D'ECOULEMENT DE PUISSANCE DANS LES RESEAUX DE DISTRIBUTION.
- [26]: Oussama. MAMMERI, « Différentes Méthodes De Calcul De La Puissance Réactive Dans un Nœud A Charge Non Linéaire En Présence D'un Système De Compensation De L'énergie», Mémoire de Magister, Université de Batna 2012.
- [27]: 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.
- [28]: Aravindhababu, P. et R. Ashokkumar. 2008. « A Fast Decoupled Power Flow for Distribution Systems », Electric power components and systems, volume 36: p.932-940.
- [29]: P.S.R.Murty. "Power System Analysis", BS Publications 2007.

- [30]: SAYAH, S .application de l'intelligence artificielle pour le fonctionnement optimal de système électrique thèse de doctorat universèti ferhat abbas-sètef
- [31]: FRIDJAT, Z and TAMMA, M, E. Application des algorithmes génétiques à l'optimisation de la production énergie active dans réseau électrique. Mémoire de MASTER Soutenu Juin 2014.
- [32]: SAIHI, M., Optimisation Mono Et Multi Objectif De L'écoulement De Puissance Avec Intégration De STATCOM Dans Le Réseau Electrique. 2015.
- [33]: G. Abdelmalek, « Utilisation des méthodes d'optimisations méta heuristiques pour La résolution du Problème de répartition optimale de La Puissance dans les réseaux électriques», mémoire de Magister, Université d'El-oued, 2010.
- [34]: Arthur, R.B. and V. Vijay, Power systems analysis. Prentice Hall, 2000.
- [35]: B.Boussahoua«Chapitre de l'écoulement de puissance» cours,vol mat 203,p.p.1-26 ,2010.
- [36]: FRIDJAT, Z and TAMMA, M, E. Application des algorithmes génétiques à l'optimisation de la production énergie active dans réseau électrique. Mémoire de MASTER Soutenu Juin 2014.
- [37]: électrotechnique Théodore wildi avec collaboration de Gilbert Sybille (ingénieur, institut de recherche d'Hydro-Québec) 3e édition.
- [38]: Doudjella Houari, « le contrôle des puissances réactives et des tensions dans un réseau de transport d'énergie électrique au moyen de dispositifs SVC », Mémoire de Magister Soutenu au département d'électrotechnique Université Djilali Liabes Bel-Abbes.
- [39]: Durga Prasad, G., A. K. Jana et S. C. Tripathy. 1990. « Modifications to Newton-Raphson load flow for ill-conditioned power systems », International journal of electrical power & energy systems, volume 12: p.192-196.Nweton raphson.
- [40]: St. Clair, H. P., G. W. Stagg, and Maria Tscherne; "Digital Computer Takes Over Load Flow Calculations", Electrical World, Sept. 30, 1957.
- [41]: M. Crappe and S. Dupuis: « Les systèmes flexibles de transport de l'énergie électriques », Stabilité et sauvegarde des réseaux électriques, Chapitre 4, pp 149-204, Paris, Hermes, 2003.
- [42]: M. Aganagic, S. Mokhtari, "Security Constrained Economic Dispatch Using Nonlinear Dantzig-Wolfe Decomposition", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, No. 1, pp.105-112, Février 1991.

- [43]: B. stott,O.Alsac,Fast decoupled load flow ,IEEE Trans,on power Apparatus and systems,VoL.PAS-93,No.3,May/June 1974,pp.859-869.
- [44]: M. D. Omar Faruque *et al.*, "Real-Time Simulation Technologies for Power Systems Design, Testing, and Analysis," in *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal*, vol. 2, no. 2, pp. 63-73, June 2015.
- [45]: Phadke, A.G.; Moraes, R.M. The wide world of wide-area measurement. *IEEE Power Energy Mag.* 2008, 6, 52–65. [CrossRef]
- [46]: Schweppe, F.C.; Wildes, J.; Rom, D.B. Power system state-state estimation, parts I, II and III. *IEEE Trans. Power Appar. Syst.* 1970, 89, 120–135. [CrossRef]
- [47]: Wang, B.; He, G.Y.; Liu, K.C. A new scheme for guaranteed state estimation of power system. *IEEE Trans. Power Syst.* 2013, 28, 4875–4876. [CrossRef]
- [48]: Guo, Y.; Wu, W.C.; Zhang, B.M.; Sun, H.B. A fast solution for the lagrange multiplier-based electric power network parameter error identification model. *Energies* 2014, 7, 1288–1299. [CrossRef]
- [49]: Korres, G.N.; Contaxis, G.C. A reduced model for bad data processing in state estimation. *IEEE Trans. Power Syst.* 1991, 6, 550–557. [CrossRef]
- [50]: Shweppe JWF, Rom D. Power system static state estimation: part I, II, and III. *Power Ind. Comput. Conf.*, 1969.
- [51]: Huang Y-F, Werner S, Huang J, Kashyap N, Gupta V. State estimation in electric power grids: Meeting new challenges presented by the requirements of the future grid. *IEEE Signal Process Mag* 2012;29:33–43.
- [52]: Wood AJ, Wollenberg BF. *Power generation, operation, and control.* John Wiley & Sons; 2012.
- [53]: Alvarado FL. State estimation for the detection of market parameters. *Power Eng. Soc. Summer Meet.* 2001, vol. 1, 2001, p. 442–7.
- [54]: Kieny O.D. C, « L'intelligence des Smart Grids : la place du calcul numérique et des STIC».2012
- [55]: Daneels A, Cern, Geneva, Switzerland ,W.Salter, «WHAT IS SCADA?»,1999.
- [56]: Stéphane Gerbex, "14 août 2003 - Analyse du black-out nord américain", BKW FMB Energie SA.

- [57]: Ni Ding, Yvon Bésanger, Frédéric Wurtz, Guillaume Antoine, Philippe Deschamps, “Time Series Method for Short-Term Load Forecasting using Smart Metering in Distribution Systems”, Power Tech Conference Proceedings, 2011 IEEE Trondheim, Norway
- [58]: Costa IS, Leao JA. Identification of topology errors in power system state estimation. IEEE Trans Power Syst 1993;8:1531–8.
- [59]: Liu W-H, Lim S-L. Parameter error identification and estimation in power system state estimation. IEEE Trans Power Syst 1995;10:200–9.
- [60]: Alsac O, Vempati N, Stott B, Monticelli A. Generalized state estimation [power systems]. Power Ind. Comput. Appl. 1997. 20th Int. Conf., 1997, p. 90–6.
- [61]: Castillo E, Conejo AJ, Pruneda RE, Solares C. State estimation observability based on the null space of the measurement Jacobian matrix. IEEE Trans Power Syst 2005;20:1656–8.
- [62]: Lhacani N et ZEHAR K, «identification des sources harmoniques par des réseaux de neurones », thèse magister, université de Bejaia, 2000.
- [63]: Thabet A, «Estimation de l'état pour la surveillance des systèmes de grandes dimensions. Application aux réseaux électriques».
- [64]: A. Abur, A.G. Exposito, “Power System State Estimation”, Editions Marcel Dekker, 2004
- [65]: Medjoudj R, Djebari D, «estimation de l'état de réseau électrique», mémoire de fin d'étude, université de Bejaia, 1990
- [66]: E. Handschin and C. Dornemann, “Bus load modeling and forecasting,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 3, no. 2, pp. 627–633, May 1988.
- [67]: J. Wood and B. F. Wollenberg, Power Generation Operation and Control. Hoboken, NJ: Wiley, 1996.
- [68]: F. Schweppe, .J. Wildes, and D. Rom, “Power system static state estimation: Parts I, II, and III,” Power Industry Computer Conference (PICA), Denver, Colorado June, 1969.
- [69]: A. Monticelli, “State Estimation in Electric Power Systems: A Generalized Approach,” Kluwer, Boston, 1999.
- [70]: A. Abur, A.G. Exposito, “Power System State Estimation”, Editions Marcel Dekker, 2004
- [71]: G. Strang, “Linear algebra and its applications,” third edition, Harcourt Brace, 1988.
- [72]: A. Papoulis, “Probability, Random Variables, and Stochastic Processes,” McGraw-Hill, New York, 1984.



# Annexe