

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU
Faculté de Génie Electrique et d'Informatique
Département d'Electrotechnique



Mémoire

De fin d'études en vue d'obtention du diplôme
d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique
Option : Réseaux Eléctriques

Thème

*Mise en œuvre d'un outil de calcul de
l'écoulement de puissance dans les réseaux
électriques*

Proposé et dirigé par :

M^r : M.RACHEK

Réalisé par :

M^r : AMMOUR Djamel

M^r : SADOUR Mohand Arezki

Année Universitaire 2007-2008

Remerciements

Nous remercions le bon dieu pour nous avoir donné la force et la volonté de dépasser tous les obstacles et finaliser ce travail.

Nos vifs remerciements vont à notre promoteur Mr RACHEK pour son aide précieuse, et sa disponibilité, nous lui exprimons notre profonde gratitude d'avoir dirigé ce travail et mis à notre disponibilité la documentation nécessaires.

Nous remercions les membres du jury pour nous avoir fait l'honneur d'évaluer notre travail.

Nous tenons à remercier aussi Mr BESSAI, pour son aide et en fin toute personne ayant contribué de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail.

Dédicace

Je dédie mon travail à toute ma petite famille, en particulier mon père, ma mère et mon grand frère Naceur et sa famille bien sûr.

A mes frères ; Sadek, Abdallah, leur famille, et Mumus.

A mes sœurs ; Djamila, Fatima, Zakia, Samira et leurs époux et petits enfants.

A ma chère et adorable princesse wiwiz, sans oublier sa sœur Chahra ;

A mes cousins Zoheir et kiki ;

A Saïd, Chabane, Sofiane et Mamiche.

A mes meilleurs amis khelifa, Ayara et sa fiancé Mel, Lynda, boukhalfa, Karim, belka, Marzouk et générale Hocine ;

Et pour finir je dédierais, personnellement, mon travail à mon promoteur Mr RACHEK.

Dj. AMMOUR

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I- Généralités sur les réseaux électriques	
I-1)- Introduction.....	3
1)- Réseaux de transport.....	3
2)-Réseaux de répartitions.....	3
3)-Réseaux de distributions.....	4
a)-Moyen tension.....	4
b)-Basse tension.....	4
I-2)- Différentes structures du réseau de distribution électrique.....	4
I-2-1)- Structure radiale.....	4
I-2-2)-structure en boucle.....	4
I-2-3)-Structure en maille.....	5
I-2-4)-Structure en peigne.....	5
I-3)- Nature des réseaux.....	5
I-3-1)- Réseaux aériens en conducteurs nus.....	6
I-3-2)-Réseaux souterrains.....	6
I-3-3)-Réseaux torsadés.....	7
I-4)- Régime du neutre.....	7
I-5)- Les postes.....	8
I-5-1)- Etude des éléments constitutifs des postes MT et BT.....	8
I-5-2)-Structure des postes.....	8
I-5-3)- Les types de postes.....	9
I-6)- Appareillage d'un poste.....	9
I-6-1)- Sectionneurs.....	9
1) Définition.....	9
2) Types de sectionneurs.....	10
I-6-2)- Disjoncteurs.....	10
1) Définition.....	10
2) Types de disjoncteurs.....	10
I-6-3)- Les fusibles.....	11
1) Définition.....	11
2) Types de fusibles.....	11
I-6-4)- Jeux de barres.....	12
I-6-5)- Câbles.....	12

1) Câbles MT.....	12
2) Câbles BT.....	12
I-6-6)- Transformateurs.....	13
1) Constitution d'un transformateur.....	13
2) Principe de fonctionnement d'un transformateur.....	15
3) Pertes d'un transformateur.....	15
4) Types de transformateur.....	16
I-7)- Notion de puissance et de tension.....	18
I-7-1)- Tension en un point du réseau.....	18
I-7-2)- Notion de puissance.....	18
1)- Nature de la puissance active, réactive et apparente.....	18
a)- L'énergie active consommée.....	18
b)- L'énergie réactive consommée.....	18
c)-La puissance apparente.....	19
2)- Facteur de puissance.....	19
3)- Bilan de puissance.....	19
I-8)-Conclusion.....	20

Chapitre II-Modélisation des réseaux électriques

II-1)-Introduction.....	21
II-2)-Modèles de connaissance-Modèles de comportement.....	21
II-2-1)-Modèles de connaissance.....	21
II-2-2)-Modèles de comportement.....	22
II-3)-Modélisation d'un réseau électrique.....	22
II-4)-Modélisation des composants principaux des réseaux électriques.....	23
II-4-1)-Modélisation d'un système d'énergie.....	23
II-4-2)- Modélisation d'un générateur (la source).....	24
II-4-3)- Modélisation des lignes et des câbles.....	24
II-4-4)- Modélisation des transformateurs.....	25
II-4-5)- Modélisation des productions et des consommateurs.....	28
II-4-6)- Modélisation des charges.....	28
II-4-7)- Modélisation des moyens de compensations.....	29
1)-Les groupes thermiques.....	29
2)-Les condensateurs.....	29
3)-Les inductances.....	29
4)-Les compensateurs synchrones.....	30
5)-Les compensateurs statiques.....	30
6)-Les charges.....	30
II-5)-Conclusion.....	30

Chapitre III – Modèles d'analyse l'écoulement de puissance.

III-1) – Etude de l'écoulement de puissance.....	32
III-1-1) – Introduction.....	32
III-1-2) – Définition du Problème de l'écoulement.....	33
1) – Nœuds consommateurs.....	34
2) – Nœuds producteurs.....	34
3) – Nœuds bilans.....	34
III-1-3) - Formulation analytique de l'écoulement de puissance.....	34
III-1-4)- Etablissement des équations.....	35
III-1-5)- Calcul de puissance active et réactive.....	37
1)-Calcul de P et Q en coordonnées cartésiennes.....	37
2)- Calcul de P et Q en coordonnées polaires.....	37
III-1-6)-Critère de convergence.....	38
1)-vérification du critère.....	39
2)-Critère de variation de la tension.....	39
3)-Accélération de la convergence.....	40
III-2)-Méthodes de calcul de l'écoulement de puissance.....	40
III-2-1)-Méthode de Gauss et Gauss-Seidel.....	43
1)-Itérative de Gauss-Seidel.....	44
2)-Critère de convergence.....	46
3)-Méthode de la matrice Y, de Gauss-Seidel.....	46
4)- Méthode de la matrice Z, de Gauss-Seidel.....	51
III-2-2)-Méthode de Newton-Raphson.....	52
1)-Généralisation sur un système à n dimensions.....	53
2)-Représentation des grandeurs.....	56
a) En coordonnées polaire.....	56
b) En coordonnées rectangulaire.....	58
III-3)-Ecoulement de puissance décollé rapide.....	65
III-4)-Conclusion.....	66

Chapitre IV : implémentation de l'outil informatique et validation

IV-1)-Calcul théorique.....	67
IV-1-1)-Méthode de Gauss-Seidel.....	67
1-) Calcul de la matrice Y_{BUS}	69
2)- calcul de Q_2	70
3)- Calcul des tensions.....	71
4)- Calcul des puissances.....	72
a)-Calcul de la puissance circulant d'un nœud à un autre.....	72
b) -Calcul des puissances aux nœuds.....	76
c) -Calcul des pertes dans les lignes.....	76
d) -Construction de la matrice S.....	78

IV-1-2)-Méthode de Newton.....	78
IV-2)-Programmation.....	80
IV-2-1) La méthode Gauss-Seidel.....	81
IV-2-2) La méthode Newton-Raphson.....	88
1) Coordonnées polaires.....	88
2) Coordonnées rectangulaires.....	96
IV-3) Conclusion.....	115

Introduction générale

La conception, la réalisation et l'exploitation d'un système production – transport – distribution d'énergie électrique sont réalisées avec un triple souci de qualité de la fourniture, de sécurité de fonctionnement et d'économie. Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire de bien comprendre et de quantifier précisément les phénomènes dont le système électrique est le siège.

Les besoins en électricité des pays industrialisés ne cessent d'augmenter. C'est ainsi, qu'en période de croissance normale, on estime que la consommation en électricité, d'un pays, double tous les dix ans.

Les problèmes que doit résoudre un distributeur d'énergie électrique sont très complexes, car il doit fournir à chaque instant une énergie égale à celle réclamée par les consommateurs tout en s'assurant que la tension et la fréquence du réseau demeurent constantes. L'analyse de l'écoulement de puissance dans des réseaux de distribution de l'énergie électrique est un outil de base indispensable pour l'exploitant, c'est la technique la plus utilisée pour le calcul et la planification en régime de fonctionnement du système d'énergie.

Résoudre le problème d'écoulement de puissance revient à déterminer les grandeurs inconnues connaissant celles qui sont imposées et vérifier les transferts des lignes et les contraintes.

Plusieurs méthodes de résolutions du problème de l'écoulement de puissance ont été développées. Notre travail, dont l'essence, consistera à mettre en œuvre un outil informatique qui servira à calculer rapidement et efficacement l'écoulement de puissance dans les réseaux électriques. Et pour cela, on peut citer celle de Gauss, Gauss-Seidel, Newton-Raphson et celle de découplé rapide. On s'intéressera, dans notre étude, à deux d'entre elles qui sont les plus utilisées dans ce type de calcul, celle de Gauss- Seidel dans ses deux formes ; indirecte

(matrice admittance Y_{Bus}) et directe (matrice impédance Z_{Bus}) ainsi que celle de Newton-Raphson.

A fin de bien cerner le problème soulevé, nous avons réparti notre travail, précédé d'une introduction générale, en quatre chapitres

➤ Le premier chapitre est consacré aux généralités sur les réseaux électriques.

➤ Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation des réseaux électriques.

➤ Le troisième chapitre concerne les modèles d'analyse de l'écoulement de puissance dans les réseaux électriques

➤ L'implémentation de l'outil informatique ainsi des validations est l'objet du quatrième chapitre.

Une conclusion générale ainsi que des perspectives clôtureront notre travail.

I-1) Introduction

Les réseaux électriques sont constitués des lignes aériennes et des câbles souterrains, ils sont dessinés à la disposition des usages selon la puissance demandée. La distribution se fait en triphasé 220/380V, en monophasé 220V, sachant qu'actuellement tous les réseaux sont en triphasé.

Pour que l'énergie électrique soit utilisable, le réseau de transport et de distribution doit assurer au client la puissance dont il a besoin et lui fournir une tension stable dont les variations restent dans les limites d'exploitation acceptables, pour assurer un bon fonctionnement du réseau.

Dans un système électrique, il ya trois types de réseau ; le réseau de transport, le réseau de répartition et le réseau de distribution.

1) Réseau de transport

Il est constitué des lignes et des postes de transformation issus des centrales et a pour rôle de transporter l'énergie électrique des centrales de production vers les gros centres de consommation, d'alimenter les grandes et les petites industries et de servir pour les interconnexions avec les pays voisins.

2) Réseaux de répartition

Il comprend les lignes de transport et les postes de transformation intermédiaires entre le réseau de transport et le réseau de distribution, permet de répartir la puissance avec les postes de distribution. Il s'agit des réseaux de niveaux de tension inférieurs à 220 KV, essentiellement 60 KV pour les réseaux de SONEGAS.

3) Réseau de distribution

Il est constitué des lignes et des postes de transformation qui servent à l'alimentation des ménages, l'éclairage public, la moyenne et la petite entreprise. Ce réseau comprend un réseau à moyenne tension et un réseau à basse tension.

➤ **Moyenne tension MT:** (5,5 kV, 10kV, 20 kV) alimenté par des postes HT/MT ou THT/MT pour les abonnés industriels.

➤ **Basse tension BT :** alimenté par des postes MT/BT pour les abonnés domestiques sous une tension 220/380 kV.

I-2) Différentes structures du réseau de distribution électrique

Il existe quatre structures différentes des réseaux de distribution

I-2-1) Structure radiale

C'est la structure la plus utilisée, elle est recommandée systématiquement dans toutes les installations industrielles. Cette structure possède des avantages dont on peut citer une grande simplicité d'étude et de réalisation, une exploitation facile (simple et économique), un faible courant de court circuit ainsi que des frais de réalisation raisonnables. Cependant elle présente quelques inconvénients tels que des chutes de tension importantes ainsi que la mise hors service des consommateurs sans aucune possibilité de secours en cas de coupure en tête de ligne.

I-2-2) Structure en boucle

Dans un réseau bouclé une ligne est issue d'un poste d'interconnexion et y revient après avoir alimenté plusieurs postes de transformation. Cette structure possède des avantages qui se résument dans des faibles chutes de tension, un

seul dispositif de protection par boucle et un bon rendement. Cependant elle présente différents inconvénients, tel qu'un courant de court circuit très élevé, une réalisation coûteuse, une difficulté d'exploitation et une connexion spéciale aux dérivations (ne pas couper la boucle).

I-2-3) Structure en maille

Dans cette structure tous les postes débitent en parallèle et entièrement bouclés sur eux même. Généralement cette structure est adoptée dans les agglomérations. Elle présente aussi des avantages et des inconvénients ; les avantages se limitent dans bonne continuité de service, bon rendement et faible chutes de tension. Les inconvénients dans une réalisation coûteuse procédée d'une étude très complexe, et un fort courant de court circuit.

I-2-4) Structure en peigne

C'est un circuit constitué d'une canalisation alimentant plusieurs charges d'un même point, généralement cette distribution est utilisée dans les installations peu étendues et de faible puissance. On peut citer que cette structure a comme avantages des faibles chutes de tension et une bonne sécurité d'exploitation. Pour les inconvénients, on notera un fort courant de court circuit et réalisation couteuse.

I-3) Nature des réseaux

Les réseaux électriques sont répartis selon différents types

- *Réseaux aériens en conducteurs nus ;*
- *Réseaux souterrains ;*
- *Réseaux torsadés.*

I-3-1) Réseaux aériens en conducteurs nus

Les lignes en conducteurs nus sont constituées par des conducteurs posés sur des isolateurs, ces derniers sont fixés par des ferrures aux supports qui permettent le maintien des conducteurs à des hauteurs suffisantes. On trouve ce genre de conducteurs dans les réseaux à faible densité de population (zone rurale, semi urbain). Ils peuvent être homogènes ou avec âme d'acier.

➤ *Nature et section des conducteurs*

Les sections de conducteurs se justifient par leur aptitude à alimenter les charges malgré les différentes contraintes de tenue en court circuit, chute de tension et tenue mécanique. La nature et les sections des conducteurs à utiliser sont donnés dans le tableau suivant :

<i>Lignes</i>	<i>Nature</i>	<i>Sections (mm²)</i>
<i>Dorsale</i>	<i>Alliage Al</i>	<i>93,3</i>
<i>Dérivation</i>	<i>Alliage Al</i>	<i>34,3</i>

Tableau (I-1) Nature et sections des conducteurs [SOU-KHE-HAM 06]

I-3-2) Réseaux souterrains

Un câble souterrain est constitué d'une partie centrale conductrice du courant appelée âme et de plusieurs couches (enveloppes, gaines, revêtement, ...etc).

➤ *Nature et section des conducteurs*

La nature et les sections des conducteurs à utiliser sont données dans le tableau suivant :

<i>Réseau(KV)</i>	<i>conducteur</i>	<i>Section (mm²)</i>
<i>10</i>	<i>Cuivre</i>	<i>120</i>
	<i>aluminium</i>	<i>180</i>
<i>30</i>	<i>cuivre</i>	<i>3*120</i>

Tableau (I-2) Nature et section des conducteurs [SOU-KHE-HAM 06]

I-3-3) Réseaux torsadés

Les réseaux classiques aériens BT en conducteurs nus posent un certain nombre de problèmes, et l'emploi des câbles souterrains qui procurent une très grande sécurité d'exploitation aurait pu être généralisée, mais son coût élevé nous incite à retenir l'introduction de la technique mettant en œuvre les câbles torsadés.

I-4) Régime du neutre

Le régime du neutre caractérise la position du neutre du réseau et des masses métallique par rapport à la terre. On distingue trois régimes, ces dernières sont définies d'après la norme NFC15-100, caractérisée par deux lettres, dont les significations sont données par le tableau suivant :

Première lettre	<i>Situation du neutre par rapport à la terre</i>	T	<i>Liaison directe du neutre à la terre.</i>
		I	<i>Neutre isolé ou relié à la terre à travers une impédance</i>
Deuxième lettre	<i>Situations des masses à la terre.</i>	T	<i>Masse reliée directement à la terre</i>
		N	<i>Masse reliée directement au neutre</i>

Tableau (I-3) régime du neutre [SOU-KHE-HAM 06]

I-5) Les postes

I-5-1) Etude des éléments constitutifs des postes MT/BT

Les postes de transformations servent à élever ou baisser la tension à réguler au moyen de compensation synchrone, de réactance capacitive ou inductive et de transformations à prises variables. Ils contiennent aussi des appareils de protection tels que les disjoncteurs, les fusibles, les sectionneurs afin de protéger le réseau et le personnel.

I-5-2) Structure générale des postes

La partie centrale d'un poste est constituée par un ou plusieurs jeux de barres triphasés, exploités à une tension déterminée et auxquels chaque branche (lignes aériennes ou souterraines) est raccordée par l'intermédiaire d'un appareil de coupure qui permet de la séparer du réseau. Généralement, un poste comprend un ou deux jeux de barres, dont chaque liaison peut être reliée à l'un de ces derniers. On a alors constitué deux nœuds séparément qui seront reliés

par une liaison courte. Pour qu'un poste fonctionne dans de meilleures conditions, il est souhaitable qu'il soit disposé de deux jeux de barres afin de le soumettre alternativement aux opérations d'entretien indispensable.

I-5-3) Les types de postes

On distingue plusieurs types de postes selon les fonctions qu'ils assurent :

- *Les postes de transformations comportant au moins deux jeux de barres à des tensions différentes liées par un ou plusieurs transformateurs.*
- *Les postes d'interconnexions à 400KV et à 200KV assurant le regroupement des puissances appelées.*
- *Les postes d'alimentations régionaux.*
- *Les postes d'alimentations des réseaux moyens tension qui transforment la haute tension en moyenne tension.*

I-6) Appareillage d'un poste de transformation

Pour pouvoir mettre en service ou hors service d'une partie ou d'une autre partie d'une installation, il ya un ensemble d'appareils dont le rôle est d'effectuer les diverses opérations de connexion ou de déconnexion des circuits tels que (sectionneurs, disjoncteurs, relais...etc).

I-6-1) Sectionneurs

1) Définition

Les sectionneurs sont dépourvus du pouvoir de coupure par conséquent ils doivent être manœuvrés à vide, leur rôle principal est d'opérer une séparation visible sur une branche de l'installation. Ils sont placés à l'origine des installations et coupent tous les conducteurs sauf le conducteur de protection.



2) Types de sectionneurs

On distingue selon leurs rôles, deux types de sectionneurs :

- *Les sectionneurs de ligne, reliant deux parties du réseau ;*
- *Les sectionneurs de terre, permettant de relier galvaniquement à la terre des parties flottantes du réseau.*

I-6-2) Disjoncteurs

1) Définition

Un disjoncteur est un interrupteur fonctionnant automatiquement dans les conditions prédéterminées, il se compose essentiellement :

- *D'un interrupteur à fort pouvoir de coupure car l'appareil doit être capable de couper le courant de court circuit du réseau.*
- *D'un mécanisme actionné par une source d'énergie (ressort, air comprimé) et assurent le fonctionnement automatique de l'interrupteur.*
- *De dispositifs de déclenchement et d'enclenchement dans les conditions préétablies.*



2) Types de disjoncteurs.

L'agent utilisé pour l'extinction, de l'arc permet d'établir une distinction entre plusieurs types de disjoncteurs :

- *Le disjoncteur pneumatique ou air comprimé ;*
- *Le disjoncteur à faible volume d'huile ;*
- *Le disjoncteur magnétique ;*
- *Le disjoncteur à hexa fluorure de soufre SF6*
- *Le disjoncteur à l'huile.*

I-6-3) Les fusibles

1) Définition

Un fusible est un appareil de connexion possédant un pouvoir de coupure, utilisé pour protéger contre les surintensités (surcharge et court circuit). Son rôle consiste à ouvrir un circuit par la fusion d'un ou plusieurs éléments prévus à cet effet, en cas d'anomalies l'élément conducteur se chauffe par effet joule jusqu'à atteindre la température de la fusion.

2) Types de fusibles

- *Les fusibles d'usage général ; ils protègent contre les surcharges et les courts circuits.*
- *Les fusibles dont leur rôle est limité à protéger contre les courts circuits, ils sont conçus et prévus pour protéger contre les courants alternatifs, ils appartiennent à la classe am (accompagnement moteur).*
- *Les fusibles d'usage général temporel, leur temps de fusion est retardé (classe R).*

I-6-4) Jeux de barres

Les jeux de barres sont l'organe essentiel d'un poste, ce sont les points où se réalisent une concentration d'énergie et l'organisation des transits de puissance vers divers lignes ou transformateurs raccordés.

Pour chaque échelon de tension le nombre de jeux de barres est généralement de deux.

I-6-5) Les câbles

1) Les câbles MT

Les réseaux MT étaient depuis fort longtemps constitués de câbles isolés au papier imprégné généralement à champ non radial de tension égale à 5,5 ; 10 ; 15 KV voir quelque fois 20 KV. La normalisation à 20KV de la distribution a pour conséquences, de ne plus désormais, utiliser sur les réseaux neufs, que des câbles à champ radial de tension spécifiés à 11,6KV. Par ailleurs, le coût élevé du cuivre conduit à préférer l'aluminium dans la fabrication des conducteurs.

On distingue différents types de câbles :

➤ *Les câbles en plomb isolés au papier imprégné unipolaire ou tripolaires pour la réalisation des réseaux ;*

➤ *Les câbles unipolaires à isolation synthétique pour différents cas particuliers.*

Les câbles traditionnels isolés au papier imprégné céderont la place aux câbles à isolation synthétique.

2) Les câbles BT

Le passage sous terre de canalisations s'impose dans certaines circonstances ou leur passage aérien présenterait des inconvénients notamment dans les agglomérations et à proximité des emplacements où il ya un risque d'explosion. Une canalisation enterrée comprend :

➤ *Des conducteurs destinés à assurer la conduction électrique.*

➤ *Des accessoires destinés aux raccordements des câbles (prolongement ou dérivation).*

➤ *Un mode de pose des câbles approprié aux besoins et aux lieux (tranchée, caniveau, galerie)*

I-6-6) Les transformateurs

Un transformateur est un convertisseur statique qui convertit un signal alternatif en un autre signal alternatif de même fréquence mais de valeur efficace différente. Il comporte deux enroulements l'un dit primaire qui reçoit la puissance électrique de la source et l'autre dit secondaire qui restitue cette puissance. Electrique avec des niveaux de tension ou de courant différents.



Un transformateur est dit élévateur si la tension secondaire est plus élevée que la tension primaire, dans le cas contraire, il est abaisseur.

1) Constitution d'un transformateur

a) Un circuit magnétique

Le circuit magnétique est traversé par un flux magnétique alternatif. Pour réduire les pertes par courant de Foucault et les pertes par hystérésis, le circuit magnétique est constitué d'un empilement de plusieurs tôles magnétiques.

b) Bobinage

Le nombre de spires de deux bobines sont différentes, l'enroulement qui en comporte le plus, est dit haute tension, l'enroulement qui en comporte le moins, est dit basse tension. La bobine B_1 qui est reliée à la source alternative fonctionne comme un récepteur, elle reçoit la puissance, dont la tension doit être modifiée. La bobine B_2 restitue la puissance, après transformation, elle fonctionne comme génératrice, c'est le secondaire du transformateur.

c) Caractéristique

Les transformateurs peuvent être utilisés dans les réseaux de transport et de distribution. Sans transformateurs, il ne pourrait y avoir de transport d'énergie électrique à de grande distances ni de distribution de l'énergie produite par les centrales. Pour montrer combien peuvent varier les caractéristiques des transformateurs, nous indiquons ci-dessous les principaux éléments susceptibles d'influencer la conception et la réalisation d'un transformateur.

- *Puissance : s'étalent quelques VA à 290 MVA et plus.*
- *Tension : varient de quelques volts à 380 KV et plus.*
- *Fréquence : généralement 50Hz, fréquences plus élevées en électronique.*
- *Courants utilisés : monophasés, triphasés, tétraphasés.*
- *La variation de la tension : peut être obtenue par des commutateurs de prises en charge.*
- *Circuits magnétiques : horizontaux, verticaux, à 2, 3 ou 5 colonnes, types cuirassé ou classique.*
- *Mode de refroidissement : dans l'air, dans l'huile, naturel ou forcé ;*
- *Genre d'utilisation : transformateur de puissance, transformateur de mesure, transformateur d'isolement.*
- *Mode de transport : transformateur portatif, transformateur fixe.*
- *Régime de charge : fonctionnement en charge, par exemple 25-50-80-100% de la charge nominale.*

Rappelons que la puissance des transformateurs est toujours donnée en puissance apparente (KVA ou MVA).

2) Principe de fonctionnement

Le transformateur utilise les effets de l'induction magnétique, il comporte deux enroulements qui embrassent un flux magnétique commun. L'enroulement primaire alimenté par une source de courant alternatif fonctionnant comme un récepteur, engendre un flux d'induction dans le circuit magnétique. L'autre enroulement appelé secondaire, embrasse ce flux et devient le siège d'une f-e-m alternative.

3) Pertes dans les transformateurs

Pour déterminer les pertes à vide et les pertes en charge d'un transformateur, on pratique deux essais :

a) Essai à vide

L'essai à vide se pratique avec le secondaire ouvert et le primaire est alimenté à la tension nominale. La mesure de la puissance primaire correspond aux pertes fer (hystérésis et courant de Foucault).

Ces types de pertes sont constantes quelque soit la charge du transformateur.

b) Essai en court circuit

Cet essai se pratique ; le secondaire en court circuit, le primaire est alimenté avec une tension réduite de telle sorte à avoir un courant secondaire égal au courant nominal. La puissance mesurée au primaire est celle due aux pertes cuivre (RI^2) des enroulements primaire et secondaire.

4) Types de transformateurs

a) Transformateur de réglage

Il s'agit d'un transformateur monophasé qui fonctionne comme un autotransformateur, il est construit avec un enroulement bobiné sur un noyau torique (circulaire). La prise de la tension secondaire se fait entre un fil commun et une spire de l'enroulement par un balai. Ce transformateur permet des réglages en continu de la tension (alternative) secondaire (de 0% à 100%). Un fil étant commun au primaire et secondaire, il ne faut en aucun cas l'utiliser où la sécurité impose l'emploi de transformateur de séparation.

b) Transformateur de séparation

Le transformateur de séparation est construit avec deux enroulements (transformateur monophasé) ou six enroulements (transformateur triphasé), ces enroulements n'ont absolument aucune liaison électrique entre eux. On utilise ce type de transformateur là où la sécurité est exigée, c'est-à-dire où l'emplacement de travail avec des appareils électriques présente de grandes surfaces conductrices. Le secondaire du transformateur étant totalement isolé du primaire donc aussi du conducteur de protection et donc de toutes parties conductrices, lors d'un défaut d'un appareil, aucun courant ne peut traverser le corps humain.

c) Transformateur d'intensité

Ce type de transformateur est construit avec une bague bobinée qui représente le secondaire du transformateur, le primaire étant le fil ou la barre de cuivre qui passera à l'intérieur de l'anneau. Ce transformateur est utilisé pour alimenter des compteurs d'énergie lorsque le courant nominal est important (généralement 100A). On installe sur chacun des conducteurs polaires (phase L_1, L_2, L_3) un transformateur d'intensité. Le courant maximal au

secondaire T_1 est de 5A, il existe différents rapports de transformation primaire/secondaire (par exemple 100/5A). Le compteur d'énergie électrique ne mesure alors qu'une partie de l'énergie réellement consommée, pour connaître la vraie quantité d'énergie à comptabiliser, il suffit de multiplier la consommation indiquée par le facteur de transformation.

d) Transformateur de mesure

Ce type de transformateur est rarement utilisé, car il sert à diminuer la tension dans le but de faire des mesures. La tension au secondaire est de 100V, la désignation des bornes est « U.V » au primaire (HT) et « u.v » au secondaire (BT). Les bornes « V » seront raccordées au conducteur de protection. Lors de l'installation d'un tel transformateur, il faut absolument placer des fusibles dans le circuit secondaire pour éviter des courants très élevés qui pourraient détruire le transformateur.

e) Transformateur triphasé

La construction d'un transformateur triphasé est électriquement identique à trois transformateurs monophasés, physiquement on trouve trois noyaux (colonnes) sur lesquels sont enroulées une bobine primaire et une secondaire, ces noyaux étant reliés par des culasses à fusibles réluctance magnétique.

Mais dans l'industrie, il existe un nombre considérable de modèles de transformateurs répondant à des besoins très divers, nous citerons trois genres de transformateurs :

- Transformateurs de très faible puissance de 0 à 0,5 KVA ;
- Transformateurs de moyenne puissance (1K à 1MVA) ;
- Transformateurs à grande puissance (de 1MVA à 290MVA).

I-7) Notion de tension et de puissance

I-7-1) Tension en un point du réseau

La tension en un point du réseau est fonction des forces électromotrices des générateurs, des charges, autres impédance shunts et les chutes de tension dans les divers éléments série du système : machines, lignes, transformateurs...etc.

[THE] [BOR-PAV]

I-7-2) notion de puissance

1) Nature des puissances active, réactive et apparente

Tout système électrique (câble, ligne, transformateur, moteur, éclairage, etc.) utilisant le courant alternatif met en jeu deux formes d'énergie : l'énergie active et l'énergie réactive. [PRE 07]

a) L'énergie active consommée (KWh)

Elle résulte de l'utilisation de puissance active P (KW) essentiellement par les récepteurs. Elle se transforme intégralement en énergie mécanique, thermique ou lumineuse.

b) L'énergie réactive consommée (KVARh)

Elle sert à l'équilibre entre l'énergie emmagasinée sous forme électrique et magnétique dans les machines (transformateurs, moteurs), les lignes et les câbles. Les machines consomment ou produisent de la puissance réactive selon les conditions de leur alimentation. Les lignes et les câbles consomment ou produisent de la puissance réactive suivant leur charge. Elle correspond à la puissance réactive Q (KVAR) des récepteurs.

c) La puissance apparente (KVA)

Elle permet de déterminer la valeur du courant absorbé par un récepteur, elle est exprimée en fonction des puissances active P et réactive Q .

2) Facteur de puissance

Le facteur de puissance est défini par le rapport suivant :

$$F = \frac{P}{S} = \frac{\text{puissance active (KW)}}{\text{puissance apparente (KVA)}}$$

$F = F_d \cos \varphi$ / F_d : facteur de déformation.

Le $\cos \varphi$ est d'autant meilleur qu'il est proche de 1.

En l'absence d'harmoniques, le facteur de puissance est égale à $\cos \varphi$. Par contre, en présence d'harmoniques ces deux valeurs peuvent être très différentes :

3)- Bilan de puissance

C'est la première étape de l'étude de conception d'un réseau. Elle doit estimer et localiser géographiquement les valeurs des puissances actives et réactives.

Selon l'étude du site, les puissances installées et leurs répartitions, l'installation sera en plusieurs zones géographiques (trois à huit zones).

Le bilan des puissances actives et réactives sera alors fait pour chaque zone en appliquant, aux puissances installées, les facteurs d'utilisation propre à chaque récepteur et le facteur de simultanéité pour le groupement de plusieurs récepteurs ou circuits.

I-8) Conclusion :

Le réseau électrique est constitué de lignes, de charges, de transformateurs...etc. Chacun de ces composants joue un rôle important dans la distribution et transport de l'énergie électrique. Un défaut dans l'un de ces derniers entrainera une perturbation dans le réseau électrique.

Dans le chapitre suivant, qui est consacré à la modélisation de ces composants, on définira aussi l'importance et le rôle de chaque élément dans un réseau électrique.

II-1) - Introduction

Les études du système d'énergie électrique reposent sur la simulation des phénomènes réels utilisant des modèles ayant le même comportement que les éléments du système physique. L'approche globale du système électrique est très complexe, et aujourd'hui, on ne sait pas appréhender l'ensemble des phénomènes par une modélisation unique capable d'en être une image fidèle dans toute l'étendue des constantes de temps. Confronté à une certaine classe de problèmes, l'ingénieur a besoin d'un modèle adapté à leur étude. C'est ce besoin qui définit les caractéristiques du modèle, en particulier, le domaine des constantes de temps à couvrir. Dans cet esprit, différents modèles ont été développés correspondant chacun à une bande nécessaire mais limitée de constante de temps, sous réserve de certaines simplifications. L'ensemble de ces contraintes définit un domaine de validité du modèle dans lequel on peut considérer qu'il représente fidèlement les phénomènes réels. Ceci est un aspect fondamental en simulation. On peut parler de modèle qu'en précisant son domaine de validité défini par les hypothèses faites pour une application donnée. Les domaines de validités adoptés couvrent les différents régimes.

[BAR 07]

II-2)-Modèles de connaissance-Modèle de comportement

Suivant le type d'étude envisagé, on peut distinguer deux types de modèles conduisant à des réalisations différentes.

II-2-1) - Modèles de connaissance

Pour les études d'investigation (de caractérisation et de comportement), il est nécessaire de disposer de modèles permettant une simulation détaillée et précise. Les différents paramètres, (tensions, courants), doivent être accessibles

Ces modèles suivent au plus près et le plus fidèlement possible, les phénomènes physiques (exemple les puissances). Ils résolvent les équations mathématiques régissant ces phénomènes. De ce fait, ils sont généralement complexes et de taille importante. Ils constituent des références dans leur domaine de validité.

II-2-2) - Les modèles de comportement

Ces modèles doivent donner des résultats précis dans un certain domaine d'hypothèses correspondant à leur utilisation. Ce sont des boîtes noires pour lesquelles disparaît la notion de représentation de la réalité physique des phénomènes, seule compte la relation données-résultats. Dans cette catégorie entrent les modèles utilisés pour conception et l'exploitation des réseaux. Leur usage limité conduit à des modèles plus simples que précédents nécessitant des ressources informatiques plus légères. De ce fait, ils sont plus facilement intégrables dans de grands ensembles de simulations permettant de couvrir une large gamme de phénomènes.

II-3) - Modélisation du réseau électrique

Les lignes, les câbles, les transformateurs sont représentés par des éléments à constantes localisées quadripôles en Π ou en T identiques à ceux utilisés dans les calculs de répartition.

Dans ces conditions, l'état du réseau peut être représenté par des relations en nombres complexes du type :

$$\mathbf{I} = \mathbf{Y}^d \mathbf{V} \quad (\text{II} - 1)$$

Cette représentation en nombres complexes suppose que l'on s'écarte peu de la fréquence fondamentale, et que l'on ne tiendra pas compte des variations d'impédance avec la fréquence.

II-4)- Modélisation des principaux composants des réseaux électriques

Un état du réseau est, en premier lieu, défini par sa topologie, c'est-à-dire, d'une part, la liste des ouvrages en service à l'instant étudié, et d'autre part, les connexions entre ces ouvrages. On distingue la topologie élémentaire(ou détaillée) et la topologie nodale.

En topologie détaillée, un poste est représenté avec ses organes de coupure (disjoncteurs, sectionneurs), tronçons de jeux de barre, départs,...Il peut être représenté par un graphe dont les sommets sont les liaisons internes, et les arêtes les organes de coupures fermés. Chaque composante connexe du graphe d'un poste constitue un nœud électrique. On suppose ainsi que l'ensemble des éléments d'une composante connexe est à la même tension, ce qui revient à négliger les impédances de ces éléments.

La topologie nodale peut être définie par un graphe dont les sommets sont les nœuds électriques, et les arêtes les ouvrages du réseau (lignes, câbles, transformateurs)

II-4-1) - Modélisation d'un système d'énergie

Dans un réseau d'énergie électrique, on trouve tout les éléments raccordés les uns les autres. On les classe en deux catégories ;

a) - Eléments producteurs qui sont les générateurs.

b) - Eléments passifs dont on trouve les transformateurs et les lignes de transmissions.

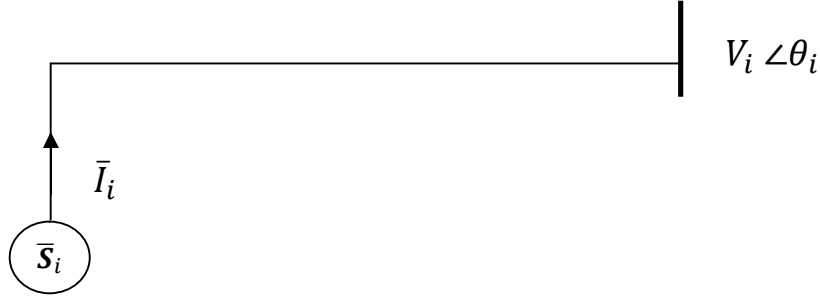


Figure (II – 1) : Modèle d’une source d’énergie [BAA 01]

II-4-2) - Modélisation d’un générateur (la source)

Un générateur est représenté par une source de courant ou de tension. Dans le calcul de l’écoulement de puissance, on représente le générateur par la puissance apparente débitée.

II-4-3) - Modélisation des lignes et des câbles

*Une ligne ou un câble, reliant deux nœuds **p** et **q**, est modélisée par un schéma en π dont l’impédance série est figure (II-3)*

$$\bar{Z}_{pq} = Z_{pq} e^{j\delta_{pq}} = R_{pq} + jX_{pq} \quad (II - 2)$$

*Et l’admittance en dérivation côté **p** :*

$$\bar{y}_{pq} = G_{pq} + jB_{pq} \quad (II - 3)$$

Ce schéma en π est symétrique, et l'on a de plus :

$$G_{pq} = G_{qp} = 0, \quad B_{pq} = B_{qp} = \frac{C_{pq}\omega}{2} \quad (II - 4)$$

Où $C_{pq}\omega$ désigne la susceptance.

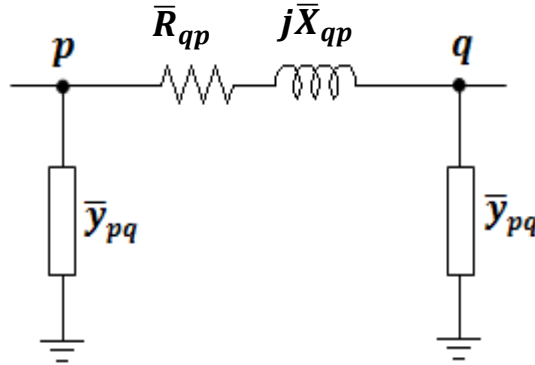


Figure (II-3) : Modélisation des lignes et des câbles [BAR 97]

II-4-4)- Modélisation des transformateurs

Un transformateur est classiquement représenté par un schéma comprenant un quadripôle en Γ associé à un transformateur parfait de rapport nominal $n_0 = \frac{n_1}{n_2}$, n_1 désignant le nombre de spires primaires et n_2 le nombre de spires secondaires figure (II-4a)

En pratique, le quadripôle en Γ peut être remplacé par un schéma en π symétrique comme pour une ligne. Si $\bar{Z}_s$ et $\bar{y}_d$ désignent respectivement l'impédance série et l'admittance en dérivation du quadripôle en Γ , on a la figure (II-4b) ;

$$\bar{Z}_{pq} = \bar{Z}_s, \bar{Y}_{pq} = \frac{y_d}{2}$$

Cette approximation est justifiée, $\mathbf{Z}_d$ étant grand par rapport à $\mathbf{Z}_s$.

De plus, si les caractéristiques du réseau secondaire sont ramenées à la tension primaire, on n'a plus à considérer le transformateur parfait. Une impédance $\bar{Z}_2$ du réseau secondaire est représentée « ramenée au primaire » par une impédance :

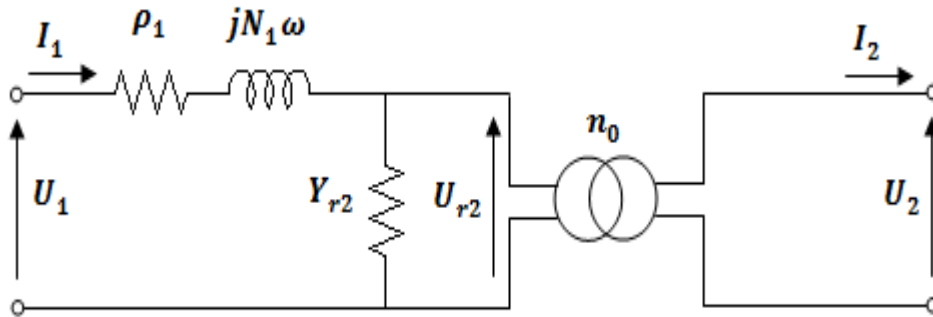


Figure (II-4a) : Schéma équivalent d'un transformateur ramené au primaire. [BAR 97]

$$\bar{Z}_1 = \bar{Z}_2 n_0 \quad (II - 5)$$

Les tensions du réseau secondaire calculées dans cette représentation doivent être divisées par n_0 pour obtenir les tensions réelles.

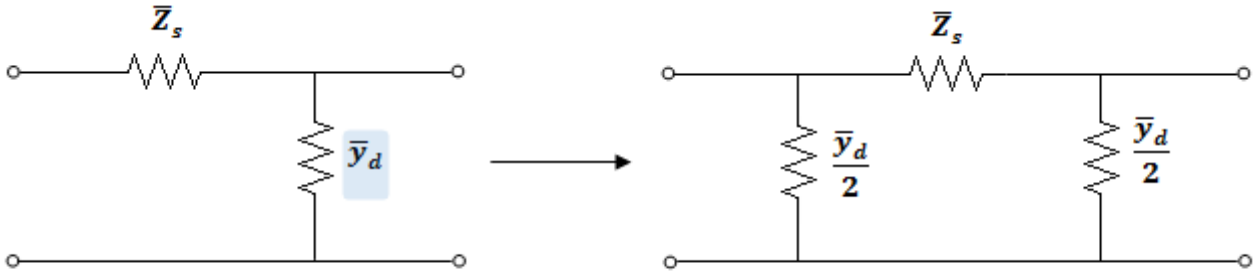


Figure (II-4b): Schéma en Γ et en π du quadripôle équivalent d'un transformateur [BAR 97]

L_1, L_2 : Coefficient d'induction propre de chaque enroulement,

M : coefficient d'induction mutuelle,

$$\rho_1 = R_1 + R_{r2}$$

$R_{r2} = \left(\frac{M}{L_2}\right)^2 R_2$: Résistance secondaire ramenée au primaire

$N_1 = L_1 - \frac{M^2}{L_2}$: Inductance des fuites totales du transformateur ramenée au primaire,

$Y_{r2} = \frac{1}{R_{r2} + jL_{r2}\omega}$: Admittance secondaire à vide,

$$L_{r2} = \left(\frac{M}{L_2}\right)^2 \quad U_{r2} = \left(\frac{M}{L_2}\right) U_2, \quad \text{avec } \frac{M}{L_2} + \frac{n_1}{n_2} + n_0$$

II-4-5) - Modélisation des productions et des consommations

Les productions et les consommations sont représentées par des injecteurs de puissance dans les nœuds électriques. Une injection positive (respectivement négative) correspond à une production (respectivement, à une consommation).

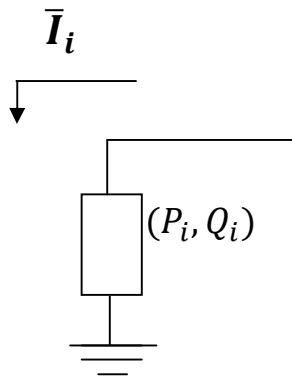
Nous désignons par P_i (respectivement par Q_i) le bilan algébrique des puissances actives (respectivement réactives) injectées au nœud i .

II-4-6)- Modélisation des charges

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

$$Z = \frac{V^2}{P - jQ} \quad (\text{II} - 6)$$

En général, cette représentation est conservatrice, conduisant à des résultats pessimistes.



II-4-7) - Modélisation des moyens de compensations

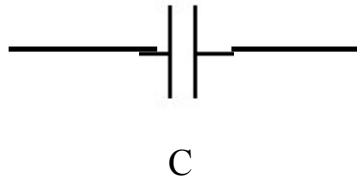
Ces moyens sont :

1) - Les groupes thermiques et hydrauliques

Ils jouent un rôle essentiel dans le contrôle de la tension et de la compensation réactive, ils constituent les sources de tension grâce à la force électromotrice de l'alternateur, ils fixent la tension et la régule au moyen de leur régulateur de tension.

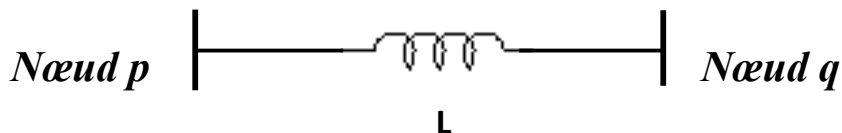
2) - Les condensateurs

Ils ont pour rôle fournir une partie de l'énergie réactive consommée par les charges ou le réseau.



3) - les inductances

Elles sont utilisées pour compenser l'excès de l'énergie réactive fournie en régime de creux de la charge par les lignes à très haute tension ou par des câbles faiblement chargés.



4) - Les compensateurs synchrones

Les compensateurs synchrones sont des machines tournantes qui peuvent fournir ou absorber de la puissance réactive sans mettre en jeu de la puissance active.

5) - Les compensateurs statiques

Ils sont appelés ainsi par ce qu'ils ne comportent aucun éléments tournant, les compensateurs statiques ont constitués d'un ensemble de condensateurs et d'inductances, certains d'entre eux sont équipés de dispositifs à réglage automatique commandé par des thyristors.

6) - Les charges

Les charges sont des récepteurs d'énergie électrique et constituent ce qui est appelé communément consommation, elles ont une partie active et une partie réactive qui dépendent de la tension et du temps.

$$P_c = P_c(t, V) \quad (\text{II} - 7)$$

$$Q_c = Q_c(t, V)$$

II-5) Conclusion :

Le fonctionnement d'un réseau électrique dépend des éléments qui le constituent, chaque défaillance entrainera une anomalie. Pour bien comprendre les réseaux électriques, on essayera d'approfondir notre étude et ce on utilisant ou en appliquant des méthodes plus approfondies et plus déterminées.

Le chapitre qui suit se limite dans l'analyse et l'étude de ces méthodes. Et pour cela, on peut citer la méthode de gauss-Seidel, la méthode Newton-Raphson et la méthode découplé rapide, qui calculeront l'écoulement de puissance dans les réseaux électriques (c.-à-d : calculer les puissances et les pertes de puissances dans les lignes et aux nœuds du réseau). Puis étudier leur convergence.

III-1) – Etude de l'écoulement de puissance :

III-1-1) - Introduction

L'étude de l'écoulement de puissance permet d'avoir la solution des grandeurs d'un réseau électrique en fonctionnement normal équilibré et en régime permanent. Ces grandeurs sont les tensions aux nœuds, les puissances injectées aux nœuds et celles qui transitent dans les lignes. Les pertes et les courants s'en déduisent. Les études de l'écoulement de puissance permettent de planifier la construction et l'extension des réseaux électriques ainsi que la conduite et le contrôle de ces réseaux. Un grand nombre de mathématiciens, d'informaticiens et d'ingénieurs ont consacré des années de leur carrière à étudier les méthodes de calcul de l'écoulement de puissance. Il n'y a qu'à voir le nombre de publications dans ce domaine pour apprécier l'effort qu'ils ont développé.

Avant 1929, les calculs de load flow (appelé power flow) se faisaient à la main. En 1929, des calculateurs de réseaux (de Westing House) ou des analyseurs de réseaux (de General Electric) furent employés pour les calculs d'écoulement de puissance. Ce n'est qu'en 1956 que fut développée la première méthode adéquate par Ward et Hale.

Les premières méthodes étaient basées sur la méthode itérative de Gauss-Seidel relative à la matrice admittance Y . Elle ne nécessite pas beaucoup d'espace mémoire et sa programmation est relativement simple. Mais, si les petits réseaux ne nécessitent que peu d'itérations pour converger, les grands réseaux, par contre, demandent un grand nombre d'itérations si toutefois ils convergent. Ce qui poussa les chercheurs à développer les méthodes basées sur la matrice impédance Z . Mais même si ces dernières avaient de meilleures caractéristiques de convergence, elles ont comme désavantage de nécessiter

beaucoup d'espace mémoire dû au fait que la matrice Z n'est pas calculée, contrairement à son inverse Y .

Ce qui amena les chercheurs à s'appuyaient sur une autre méthode itérative, la méthode de Newton-Raphson. Cette méthode nécessite plus de temps par itération que celle de Gauss-Seidel, alors qu'elle ne demande que quelques itérations même pour les grands réseaux. Cependant, elle requiert des capacités de stockage ainsi que des puissances de calcul informatiques importantes.

D'autres techniques sont apparues: celles qui exploitent l'éparpillement de la matrice Y et du Jacobien (variation de la puissance en fonction de la tension et l'angle de déphasage) afin d'optimiser le stockage et celles qui tiennent compte du fort couplage entre la puissance active P et l'angle de déphasage Θ et entre la puissance réactive Q et la tension V afin d'accélérer le temps de calcul.

Ce chapitre est consacré à l'étude des différentes méthodes qui peuvent nous servir pour l'analyse et le calcul de l'écoulement de puissance. On peut citer comme méthodes ; Gauss- Seidel, Newton-Raphson et la méthode de découplé.

III-1-2) - Définition du problème de l'écoulement:

L'objectif consiste à déterminer les valeurs des courants, des puissances actives et réactives(**P et Q**), des chutes de tensions (ΔV) dans les lignes pour chaque branche (**$p - q$**) du réseau, ainsi que celles des tensions (**V_p**) aux nœuds d'un réseau électrique. Cette étude est exploitable pour la stabilité, le contrôle ainsi que pour le bon fonctionnement des systèmes de transmission d'énergie. [AZOU 05]

Le calcul des puissances transitées demande la connaissance en chaque nœud (**p**), des grandeurs suivantes:

P_p : puissance active injectée au nœud(p).

Q_p : puissance réactive injectée au nœud(p).

V_p : module de la tension au nœud (p)

θ_p : phase de la tension au nœud (p)

En général deux grandeurs parmi celles qui sont citées ci-dessus sont connues, selon le type du nœud considéré:

1) - Nœud producteur (P-V):

Accès auxquels des consommateurs sont raccordés et où la puissance active P et le module de la tension V sont donnés.

2) - Nœud consommateur (P- Q):

Accès auxquels des consommateurs sont raccordés et où les puissances actives P et réactives Q sont données.

3) -Nœud bilan:

Il fournit des puissances actives et réactives supplémentaires pour tenir compte des pertes de puissance qui restent inconnues jusqu'à la fin de calcul, en ce nœud le module de la tension ainsi que la phase sont connus.

I-1-3) - Formulation analytique de l'écoulement de puissance:

Les performances d'un réseau représenté par sa structure nodale sont décrites par les équations suivantes :

$$\begin{aligned} \bar{V}_{Bus} &= \bar{Z}_{Bus} \bar{I}_{Bus} & \text{où.} \\ \bar{I}_{Bus} &= \bar{Y}_{Bus} \bar{V}_{Bus} \end{aligned} \quad (III - 1)$$

$\bar{V}_{Bus}$: Vecteur des tensions complexes aux accès.

$\bar{I}_{Bus}$: Vecteur des courants complexes injectés aux accès.

$\bar{Y}_{Bus} = \frac{1}{\bar{Z}_{Bus}}$: Matrice admittance complexes nodale du réseau

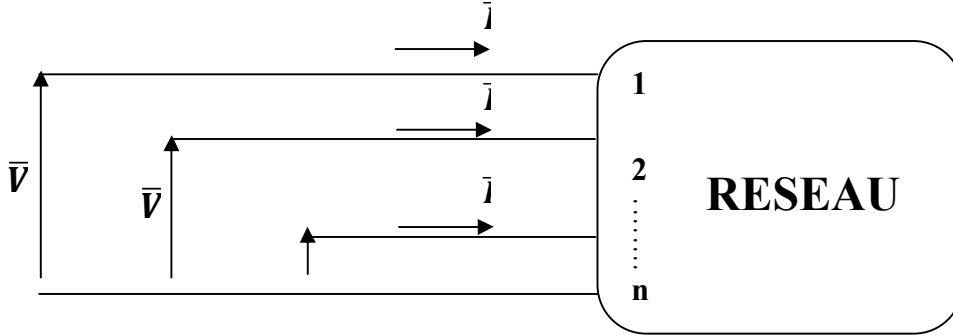


Figure :(III-1)

Chaque nœud du réseau est défini par quatre paramètres $(P_p, Q_p, V_p, \theta_p)$

L'expression de la puissance apparente S_p , injectée par la source dans un nœud (p) du système d'énergie est donnée par :

$$\begin{aligned}\bar{S}_p &= P_p + jQ_p = \bar{V}_p \bar{I}_p^* = \bar{S}_{Gp} - \bar{S}_{Lp} \\ &= (P_{Gp} - P_{Lp}) + j(Q_{Gp} - Q_{Lp})\end{aligned}\quad (III - 2)$$

$\bar{S}_{Gp} = P_{Gp} + jQ_{Gp}$: La puissance apparente générée ou produite par les générateurs.

$\bar{S}_{Lp} = P_{Lp} + jQ_{Lp}$: la puissance apparente consommée par la charge.

III-1-4) - Etablissement des équations

On a le réseau suivant figure (III – 2) :



Figure (III – 2) : Réseau à deux nœuds.

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_{10} + \bar{I}_{12} = \bar{V}_1 \bar{y}_{10} + (\bar{V}_1 - \bar{V}_2) \bar{y}_{12} \quad (III - 3)$$

$$\bar{I}_2 = \bar{I}_{20} + \bar{I}_{21} = \bar{V}_2 \bar{y}_{20} + (\bar{V}_2 - \bar{V}_1) \bar{y}_{21} \quad (III - 4)$$

Comme $\bar{y}_{12} = \bar{y}_{21} = -\bar{y}_{21} = -\bar{y}_{12}$

on aura :

$$\bar{I}_2 = -\bar{y}_{12} \bar{V}_1 + \bar{V}_2 (\bar{y}_{12} + \bar{y}_{20}) = \bar{y}_{21} \bar{V}_1 + \bar{y}_{22} \bar{V}_2 \quad (III - 5)$$

Avec : $\bar{Y}_{22} = \bar{y}_{20} + \bar{y}_{12}$

En général :

$$\bar{Y}_{pp} = \sum_{q=0}^n \bar{y}_{pq}$$

$\bar{Y}_{pp}$: Admittance propre au nœud(**p**). Elle est égale à la somme de toutes les admittances incidente à ce nœud.

$q = 0$, represente le nœud de la terre.

$\bar{Y}_{pq} = -\bar{y}_{pq}$: appelée admittance de transfert entre le nœud (**p**) et le nœud(**q**), elle est égale à la somme de toutes les admittances connectées ou liées directement entre ces deux nœuds, cette somme est prise avec un signe moins

A partir des admittances de transferts et des admittances propres en chaque nœud, pour un réseau à n nœuds, on construit la matrice $\mathbf{Y}_{Bus}$ utilisée dans la méthode de Gauss-Seidel pour le calcul de l'écoulement de puissance. Le courant au $p^{ième}$ nœud, dans un réseau a n nœud est donné par :

$$\bar{I}_p = \sum_{q=1}^n \bar{Y}_{pq} \bar{V}_q \quad (III - 6)$$

D'où :

$$\bar{S}_p = P_p + jQ_p = \bar{V}_p \bar{I}_p^* = \bar{V}_p \sum_{q=1}^n \bar{Y}_{pq}^* \bar{V}_q^* \quad (III - 7)$$

II-1-5) - Calcul de la puissance active et réactive :

1) - En coordonnées cartésiennes :

On a : $\bar{V}_p = (e_p + jf_p)$ et $\bar{V}_q = (e_q + jf_q)$

$$\begin{aligned} \bar{S}_p &= \bar{V}_p \sum_{q=1}^n \bar{Y}_{pq}^* \bar{V}_q^* = (e_p + jf_p) \sum_{q=1}^n (G_{pq} - jB_{pq}) (e_q - jf_q) \\ &= e_p \sum_{q=1}^n (G_{pq}e_q - B_{pq}f_q) + f_p \sum_{q=1}^n (G_{pq}f_q + B_{pq}e_q) \\ &\quad + j \left[f_p \sum_{q=1}^n (G_{pq}e_q - B_{pq}f_q) - e_p \sum_{q=1}^n (G_{pq}f_q + B_{pq}e_q) \right] \quad (III - 8) \end{aligned}$$

En séparant les parties réelle et imaginaire, on aura :

$$P_p = e_p \sum_{q=1}^n (G_{pq}e_q - B_{pq}f_q) + f_p \sum_{q=1}^n (G_{pq}f_q + B_{pq}e_q) \quad (III - 9)$$

$$Q_p = f_p \sum_{q=1}^n (G_{pq}e_q - B_{pq}f_q) - e_p \sum_{q=1}^n (G_{pq}f_q + B_{pq}e_q) \quad (III - 10)$$

2) - En coordonnées polaires

$$\bar{V}_p = V_p e^{j\theta_p} \quad \bar{V}_q = V_q e^{j\theta_q}$$

$$\bar{Y}_{pq} = G_{pq} + jB_{pq} \text{ et } \bar{Y}_{pq}^* = G_{pq} - jB_{pq}$$

D'autre part :

$$\bar{S}_p = \bar{V}_p \sum_{q=1}^n \bar{Y}_{pq}^* \bar{V}_q$$

En remplaçant chaque terme de l'équation ci-dessus avec sa valeur, on trouve :

$$\bar{S}_p = V_p e^{j\theta_p} \sum_{q=1}^n (G_{pq} - jB_{pq}) V_q e^{j\theta_q}$$

$$\bar{S}_p = V_p \sum_{q=1}^n (G_{pq} \cos \theta_{pq} + B_{pq} \sin \theta_{pq}) + jV_p \sum_{q=1}^n (G_{pq} \sin \theta_{pq} - B_{pq} \cos \theta_{pq})$$

On a :

$$P_p = R_e(\bar{S}_p) \quad \text{et} \quad Q_p = I_m(\bar{S}_p)$$

D'où :

$$P_p = V_p \sum_{q=1}^n (G_{pq} \cos \theta_{pq} + B_{pq} \sin \theta_{pq}) \quad (III - 11)$$

$$Q_p = V_p \sum_{q=1}^n (G_{pq} \sin \theta_{pq} - B_{pq} \cos \theta_{pq}) \quad (III - 12)$$

II-1-6) - Critère de convergence :

Dans le calcul de l'écoulement de puissance, on doit satisfaire les conditions suivantes et qui sont données sous forme d'algorithme, on les appelle aussi équations de l'écoulement de puissance. [DEK 02]

Soient :

$$\bar{V}_p \bar{I}_p^* = \bar{S}_p = P_p^{sp} + jQ_p^{sp} = (P_{Gp}^{sp} - P_{Lp}^{sp}) + j(Q_{Gp}^{sp} - Q_{Lp}^{sp}) \quad (III - 13)$$

$$Re(\bar{V}_p \bar{I}_p^*) = P_p^{sp} = (P_{Gp}^{sp} - P_{Lp}^{sp}) \quad (III - 14)$$

$$|\bar{V}_p| = (e_p^2 + f_p^2)^{\frac{1}{2}} = |\bar{V}_p^{sp}| \quad (III - 15)$$

Avec

$\bar{V}_p^{sp}$: la tension spécifiée au nœud(p).

P_p^{sp} : la puissance active spécifiée au nœud(p).

1) - Vérification de la convergence :

Le problème, dans le calcul de l'écoulement de puissance, est de savoir quand le processus itératif converge avec une bonne précision. Ce processus prend fin lorsque les conditions suivantes sont satisfaites.

$$\text{Max } |\Delta P_p| \leq C_p \text{ valable pour les nœuds } (P - V) \text{ et } (P - Q)$$

$$\text{Max } |\Delta Q_p| \leq C_v \text{ valable pour les nœuds } (P - Q).$$

C_p et C_q sont des constantes fixées d'avance, dans la plus part des cas $C_p = C_q$

2) - Critère de variation de la tension entre deux itérations successives (k) et (k+1) :

Le critère de la variation de $|\Delta V|$ est donné par : $|\Delta V_p| = |V_p^{k+1} - V_p^k|$

Le test de convergence est vérifié si : $|\Delta V_p| \leq C_v$

3) - Accélération de la convergence :

L'accélération de la convergence est améliorée en utilisant un facteur d'accélération de convergence(α). [GLE 78]

On a :

$$V_p^{k+1} = V_p^k + \Delta V_p^{k+1} \rightarrow \Delta V_p^{k+1} = \alpha (V_{pcal}^{k+1} - V_p^k) \quad (III - 16)$$

Avec :

α : Facteur d'accélération de la convergence. ($1 < \alpha < 2$)

V_p^k : Valeur de la tension calculée à l'itération k .

V_{pcal}^{k+1} : Valeur de la tension calculée à l'itération $k+1$.

V_p^{k+1} : Valeur accélérée de la tension à l'itération $k+1$.

Dans les nœuds de type($P - Q$), on applique une correction après chaque itération si le test de convergence n'est pas atteint.

III-2) - Méthodes de calcul d'écoulement de puissance

Les méthodes itératives de la matrice Y étaient les toutes premières à être appliquées aux calculs d'écoulement de puissance sur la première génération des calculateurs numériques. Celles-ci ont exigées un stockage mémoire minimum, cependant, elles ne convergent pas sur quelques problèmes. Cette insuffisance a mené au développement des méthodes de la matrice Z, qui ont eut une meilleure convergence, mais ont exigés plus de stockage et fonctionnent en ralenti sur grand nombre de systèmes, un problème que partage aussi la méthode de Newton-Raphson qui possède, par contre, un avantage très intéressant celui de convergence rapide après peu d'itérations. [DEK 02]

Ces méthodes d'écoulement de puissance, seront traitées dans cette partie, pour un réseau général contenant de 1 à n nœud.

La matrice d'accès est :

$$Y = \begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots\dots\dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots\dots\dots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots\dots\dots & Y_{nn} \end{pmatrix} \quad (III - 17)$$

Où les éléments diagonaux Y_{pp} , Avec $p = (1, \dots \dots \dots, n)$, sont donnés par la somme algébrique de toutes les admittances arrivant au nœud (p).

Les éléments Y_{pq} , Avec $p, q = (1, \dots \dots \dots, n)$, sont les accès mutuels ou de transfert entre les nœuds (p) et (q) et sont donnés par le négatif de la somme de toutes les admittances directement reliés entre ces nœuds.

Les modifications suivantes peuvent être facilement applicable sur la matrice Y :

➤ *Changement de l'admittance d'une branche de y_{pq} à $(y_{pq} + \Delta y_{pq})$ entre deux accès (p) et (q) mène à :*

$$\begin{cases} Y_{pp} \rightarrow Y_{pp} + \Delta y_{pq} \\ Y_{pq} \rightarrow Y_{pq} - \Delta y_{pq} \\ Y_{qq} \rightarrow Y_{qq} + \Delta y_{pq} \end{cases} \quad (III - 18)$$

➤ L'addition d'une nouvelle branche, d'une admittance y_{pq} , entre deux accès (p) , (q) existants donne :

$$\begin{cases} Y_{pp} \rightarrow Y_{pp} + y_{pq} \\ Y_{pq} \rightarrow Y_{pq} - y_{pq} \\ Y_{qq} \rightarrow Y_{qq} + y_{pq} \end{cases} \quad (III - 19)$$

➤ L'addition d'une nouvelle branche entre un accès existant (p) et un nouvel accès (q') est montrée dans ce qui suit :

$$\begin{cases} I_{q'} = Y_{q'p} V_p + Y_{q'q'} V_{q'} \\ Y_{q'p} = -Y_{pq'} \\ Y_{q'q'} = Y_{q'q'} + Y_{pq'} \end{cases} \quad (III - 20)$$

L'ordre de la matrice Y est augmenté de 1. Toutes les équations demeurent sans changement excepté celle de l'accès existant (p) .

$$I_p = Y_{p1} V_1 + (Y_{pp} + y_{pq'}) \dots \dots V_{q'} \quad (III - 21)$$

$$\text{Ainsi : } \begin{cases} Y_{pp} \rightarrow Y_{pp} + y_{pq'} \\ Y_{pq'} \rightarrow -y_{pq'} \end{cases} \quad (III - 22)$$

Les tensions et les courants sont exigés sous des contraintes de puissance dans les accès.

Les courants sont donnés par la formule (III - 1), et les puissances par celle de (III - 2), avec $p = (1, \dots, n)$ et n est égale au nombre d'accès.

III-2-1) - Méthode de Gauss-Seidel

La méthode commence par initialiser les valeurs des tensions, généralement égale à la tension au nœud bilan, (c'est à dire à 1 par unité).

De la contrainte de puissance de nœud, les courants sont connus et substituant de nouveau, dans les équations de la matrice Y , une meilleure évaluation des tensions est obtenue. Ces nouvelles valeurs des tensions sont employées pour trouver de nouvelles valeurs des courants.

L'itération est continuée jusqu'à ce que la tolérance exigée sur l'écoulement de puissance soit obtenue. [DAS 02]

1) - Technique itérative de Gauss-Seidel

Soient le système d'équations non linéaire, ci-dessous, avec n inconnus :

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n = b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n = b_2 \\ \vdots \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots + a_{nn}x_n = b_n \end{cases} \quad (III - 23)$$

Le système (III – 23) peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\begin{cases} x_1^{(k+1)} = \frac{1}{a_{11}}(b_1 - a_{12}x_2^k - \dots - a_{1n}x_n^k) \\ x_2^{(k+1)} = \frac{1}{a_{22}}(b_2 - a_{21}x_1^k - \dots - a_{2n}x_n^k) \\ \vdots \\ x_n^{(k+1)} = \frac{1}{a_{nn}}(b_n - a_{n1}x_1^k - \dots - a_{nn}x_{(n-1)}^k) \end{cases} \quad (III - 24)$$

Pour résoudre le système d'équation précédent, on démarre à partir d'un vecteur estimé initial $\mathbf{x}^{(0)} = (\mathbf{x}_1^{(0)}, \mathbf{x}_2^{(0)} \dots \dots \dots, \mathbf{x}_n^{(0)})$ de la solution exacte $\mathbf{x}^{(\alpha)} = (\mathbf{x}_1^{(\alpha)}, \mathbf{x}_2^{(\alpha)}, \mathbf{x}_3^{(\alpha)})$ puis on génère la suite, $\mathbf{x}^{(1)}, \mathbf{x}^{(2)}, \dots \dots \dots, \mathbf{x}^{(k+1)}$, jusqu'à la convergence du processus de calcul [DEK 02]

2) - Critère de convergence

Pour vérifier la convergence de processus, on vérifie le vecteur d'erreur $\mathbf{e}^{(k)} = \mathbf{x}^{(k+1)} - \mathbf{x}^{(k)}$, associé à la $k^{\text{ème}}$ itération.

Un critère courant est d'arrêter les itérations quand $|\mathbf{e}^{(k)}| = \mathbf{e}$

3) - Méthode de la matrice Y de Gauss-Seidel

Dans les calculs d'écoulement de puissance, les équations de système peuvent être écrites en termes de courant, tension, ou puissance au $p^{\text{ème}}$ nœud. Nous savons que l'équation de la matrice des tensions inconnues, en utilisant la matrice d'accès de n nœud est donnée comme suit : [DAS 02]

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{01} \\ V_{02} \\ \vdots \\ V_{0n} \end{pmatrix} \quad (\text{III} - 25)$$

Avec 0 est le nœud commun.

Bien que les courants entrant dans les nœuds des générateurs et des charges ne soient pas connus, ceux-ci peuvent être écrits en termes de P , Q , et V :

$$I_p = \frac{P_p - jQ_p}{V_p^*} \quad (\text{III} - 26)$$

$$\frac{P_p - jQ_p}{V_p^*} = Y_{p1}V_1 + Y_{p2}V_2 + Y_{p3}V_3 + \dots + Y_{pp}V_{pp} \dots Y_{pn}V_n \quad (\text{III} - 27)$$

On peut écrire cette équation comme suite :

$$V_p = \frac{1}{Y_{pp}} \left[\frac{P_p - jQ_p}{V_p^*} - Y_{p1}V_1 - Y_{p3}V_3 - \dots - Y_{pn}V_n \right] \quad (\text{III} - 28)$$

En général, pour le $p^{\text{ème}}$ nœud :

$$V_p = \frac{1}{Y_{pp}} \left[\frac{P_p - jQ_p}{V_p^*} - \sum_{q=1}^{q=n} Y_{pq}V_q \right] \quad \text{pour } p \neq q \quad (\text{III} - 29)$$

La tension V_p à la $(k+1)^{\text{ème}}$ itération peut s'écrire comme suit :

$$V_p^{k+1} = \frac{1}{Y_{pp}} \left[\frac{P_p - jQ_p}{V_p^*} - \sum_{q=1}^{p-1} Y_{pq}V_q^{k+1} - \sum_{q=p+1}^n Y_{pq}V_q^k \right] \quad (\text{III} - 30)$$

L'équation (III - 30) est une équation non linéaire.

La résolution de cette équation avec la méthode Gausse-Seidel suit la procédure suivante :

1^{ère} étape : initialisation des tensions.

Pour les nœuds de type (P-Q), on prend $V_p^{(0)} = 1 + j0$.

Pour les nœuds de type (P-V), on prend $V_p^{(0)} = V_p^\delta + j0$, avec δ le déphasage de la tension.

2^{ème} étape : calculer les nouvelles valeurs des tensions au niveau de l'accès (p), en utilisant l'expression (III - 32)

3^{ème} étape : faire le test de convergence :

Si le test est positif, on arrête la résolution.

Sinon on revient à 2^{ème} étape.

➤ **Critère de convergence :**

La solution de calcul d'écoulement de puissance est atteinte lorsque la relation ci-dessous est satisfaite :

$$P_p + jQ_p = V_p I_p^*$$

On définit les mismatches en puissance active et réactive en nœud (p) comme suit :

$$\begin{cases} \Delta P_p = P_p^{\delta p} - P_p^{cal} \\ \Delta Q_p = Q_p^{\delta p} - Q_p^{cal} \end{cases} \quad (III - 31)$$

Si pour tous les nœuds du réseau, on a :

$$\begin{cases} \Delta P_p \leq C_p = 0,0001 \\ \Delta Q_p \leq C_p = 0,0001 \end{cases}$$

Donc la convergence est obtenue.

➤ **Cas des nœuds producteurs (P-V)**

Les données sont la puissance active P et le module de la tension V .

Les inconnus sont la puissance réactive Q et le déphasage δ .

En ce nœud, le calcul diffère par rapport au nœud consommateur

(Nœud (P-Q)), la puissance réactive Q , n'est pas connue. Selon le diagramme des puissances de la machine synchrone, la puissance Q d'un groupe générateur doit demeurer entre une limite supérieure $Q_{\max}$ et inférieure $Q_{\min}$ les deux limites dépendent de la puissance active choisie et de la tension.

La procédure de calcul est la suivante :

1^{ère} étape : Initialisation des tensions.

Pour les nœuds (P-Q), prendre $V_p^{(0)} = 1 + j0$.

Pour les nœuds (P-V), prendre $V_p^{(0)} = V_p^\delta + j0$

2^{ème} étape : Calculer la puissance réactive au niveau du nœud (P-V).

$$Q_p^{cal} = f_p^{(0)} \sum_{q=1}^n (G_{pq} e_q^{(0)} - B_{pq} f_q^{(0)}) - e_p^{(0)} \sum_{q=1}^n (G_{pq} f_q^{(0)} + B_{pq} e_q^{(0)}) \quad (III - 32)$$

3^{ème} étape : On fait le test.

$$Q_{\min} \leq Q_p^{cal} \leq Q_{\max}$$

a) – Si Q_p^{cal} satisfait le test :

Calculer V_p^{k+1} en utilisant la formule (III - 32), avec $Q_p^\delta = Q_p^{cal}$.

Une fois V_p^{k+1} obtenue alors :

$$V_p^{k+1} = e_p^{k+1} + j f_p^{k+1}$$

$$\delta_p = \text{Arctg} \left(\frac{f_p^{k+1}}{e_p^{k+1}} \right)$$

La tension nouvelle au nœud (P-V) sera :

$$V_p^{k+1} = |V_p^\delta| \angle \delta_p^{k+1} = |V_p^{k+1}| (\cos \delta_p^{k+1} + j \sin \delta_p^{k+1}) \quad (\text{III} - 33)$$

b) - Sinon :

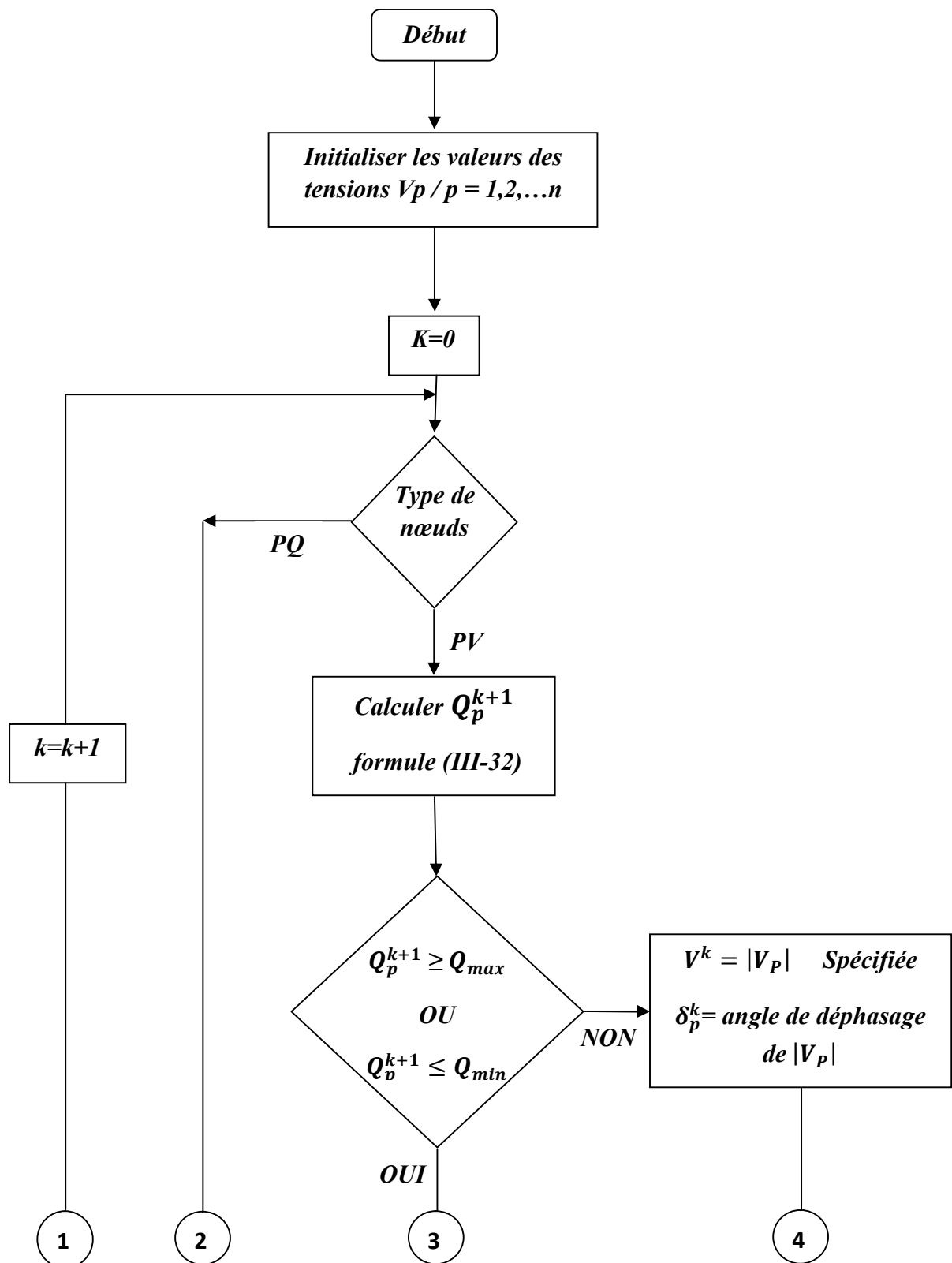
➤ Si $Q_p^{cal} \geq Q_{max}$:

Dans la formule (II - 30), on prend $Q_p^\delta = Q_{max}$, le nœud (P-V) devient un nœud de type (P-Q).

La formule (III - 30) est utiliser pour calculer la nouvelle valeur de la tension V_p^{k+1} .

➤ Si $Q_p^{cal} \leq Q_{min}$:

On prend $Q_p^{cal} = Q_{min}$, on utilisera la formule (III - 30) pour calculer V_p^{k+1} .

❖ *Organigramme récapitulatif*

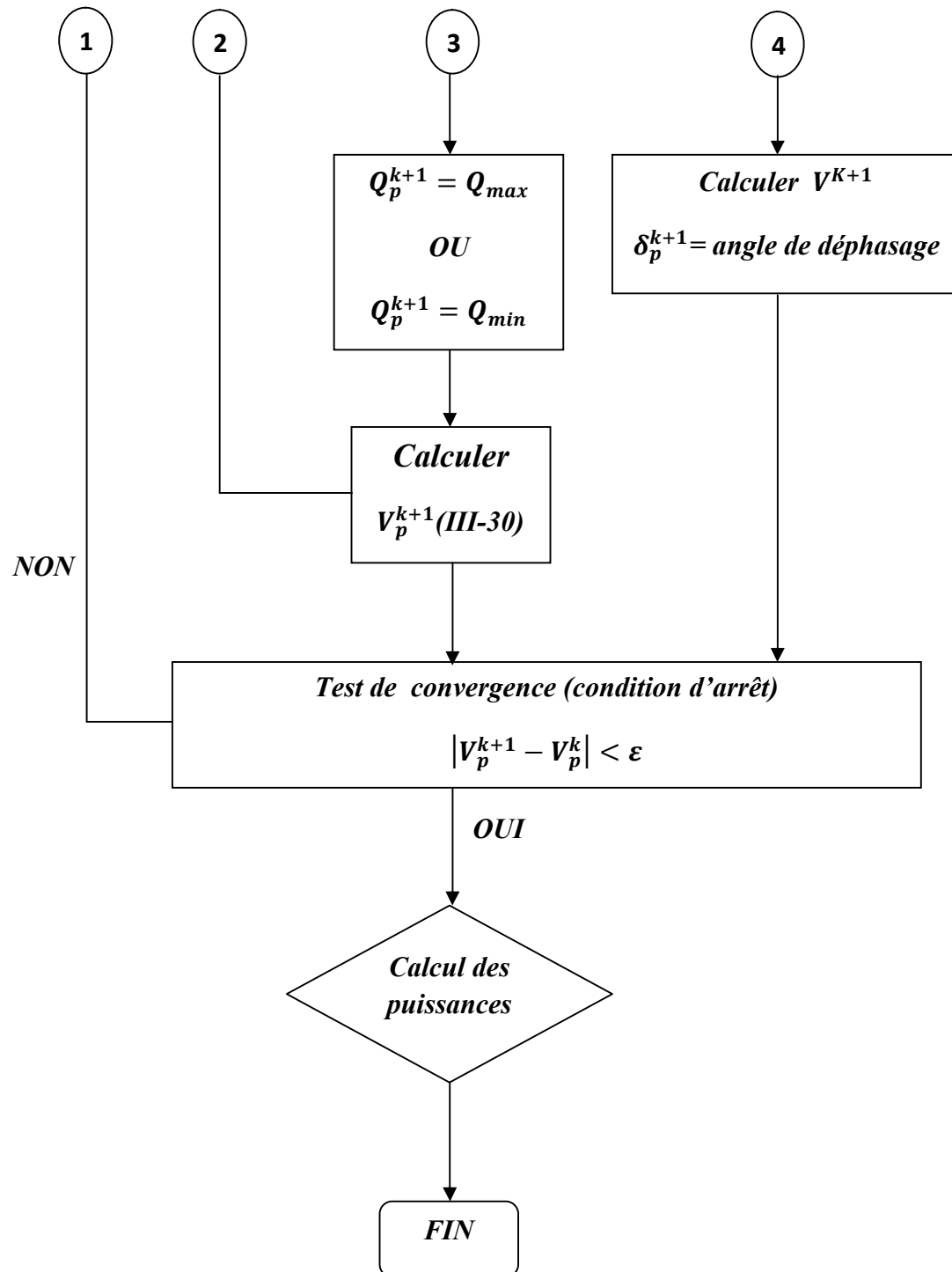


Figure (III-2-2)

4) - La méthode de la matrice Z de Gauss-Seidel

Une fois Z_{Bus} construite, on aura à définir toutes les tensions aux accès excepté celle du nœud bilan qui est préalablement définie et donc n'a pas besoin d'être incluse dans les équations de matrice. [MOK 00]

$$\begin{pmatrix} V_2 \\ V_3 \\ \vdots \\ V_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{22} & Z_{23} & \dots & Z_{2n} \\ Z_{32} & Z_{33} & \dots & Z_{3n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ Z_{n2} & Z_{n3} & \dots & Z_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_2 \\ I_3 \\ \vdots \\ I_n \end{pmatrix}$$

Par conséquent, nous pouvons écrire

$$V_p = Z_{p2} I_2 + Z_{p3} I_3 + \dots + Z_{pn} I_n$$

Le courant dans la $p^{ème}$ branche peut s'écrire comme suit :

$$I_p = \frac{P_p - jQ_p}{V_p^*} - Y_p V_p$$

Avec : Y_p l'admittance de l'accès p par rapport au nœud référence.

Si la $p^{ème}$ branche est un générateur qui fournit de la puissance réactive à l'accès p , alors P et Q auront des valeurs positives.

Si la $p^{ème}$ branche tire la puissance du réseau alors P et Q auront des valeurs négatives.

Définition des tensions

$$\begin{aligned}
V_p &= Z_{p1} I_1 + Z_{p2} I_2 + \dots + Z_{pn} I_n \\
&= Z_{p1} \left(\frac{P_1 - jQ_1}{V_1^*} - Y_1 V_1 \right) + Z_{p2} \left(\frac{P_2 - jQ_2}{V_2^*} - Y_2 V_2 \right) + \dots + Z_{pn} \frac{P_n - jQ_n}{V_n^*} \\
&\quad - Y_n V_n \\
V_{pq} &= \sum_{q=1}^n Z_{pq} \left(\frac{P_q - jQ_q}{V_q^*} - Y_q V_q \right) \tag{III - 34}
\end{aligned}$$

Le processus de résolution est identique à celui utiliser avec Y_{Bus} sauf que cette fois-ci on utilisera l'expression (III - 34) au lieu de (III - 30).

Ainsi on suivra les mêmes étapes parcourues lors de la résolution de l'équation (III - 30), sans oublier la vérification de la convergence qui, cette fois-ci, a de fortes caractéristiques, sauf que la taille de mémoire demandé sur ordinateur, les calculs préliminaires, ainsi que les modifications à apporter en cas de changement de système rendent cette méthode relativement difficile.

Pour un nœud générateur ($P-V$), on procédera de la même manière mais en utilisant la formule ci-dessous pour calculer Q_p au lieu de celle utilisée précédemment.

$$Q_p = -I_m \left[\frac{V_p^*}{Z_{pp}} \left(V_p - \sum_{i=1, i \neq p}^n Z_{pi} \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \right) \right]$$

Avec I_m signifie la partie imaginaire.

II-2-2) - La méthode de Newton-Raphson

La méthode de Newton-Raphson (NR) a des caractéristiques de convergence puissantes, peu de nombre d'itérations sont exigées, par rapport à

Pour résoudre le système, on démarre par estimer l'initial de la solution ;

$$\mathbf{x}^{(0)} = x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots \dots x_n^{(0)}.$$

On prend le vecteur d'erreur $\Delta \mathbf{x}^{(0)} = \Delta x_1^{(0)}, \Delta x_2^{(0)}, \dots \dots \Delta x_n^{(0)}$.

Tel que :

$$\begin{cases} \Delta x_i^{(0)} = x_i^{(1)} - x_i^{(0)} \\ i = 1, 2, \dots \dots n \end{cases}$$

Pour développer en série de Taylor au voisinage de $\mathbf{x}^{(0)}$, on écrit :

$$\begin{aligned} Y_1 = f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots \dots x_n^{(0)}) + \Delta x_1^{(0)} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \Big|_{x^{(0)}} + \Delta x_2^{(0)} \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \Big|_{x^{(0)}} \\ + \Delta x_n^{(0)} \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \Big|_{x^{(0)}} + \text{termes supérieurs} \end{aligned}$$

On exprime de la même façon $y_1, y_2, \dots \dots y_n$.

Le système d'équation obtenu peut être écrit sous forme matricielle suivante :

$$\begin{pmatrix} Y_1 - f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots \dots x_n^{(0)}) \\ Y_2 - f_2(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots \dots x_n^{(0)}) \\ \vdots \\ Y_n - f_n(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots \dots x_n^{(0)}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots \dots \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots \dots \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \dots \dots \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x_1^{(0)} \\ \Delta x_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta x_n^{(0)} \end{pmatrix} \quad (III-35)$$

Dans le système (III-35) toutes les quantités sont connues $\mathbf{J}$, est le jacobien ou la matrice Jacobienne

$$\begin{cases} \Delta x_1^{(0)} = x_1^{(1)} - x_1^{(0)} \\ x_1^{(1)} = \Delta x_1^{(0)} + x_1^{(0)} \end{cases}$$

A la $k^{\text{ème}}$ itération, le système (III-35) s'écrit :

$$\begin{pmatrix} Y_1 - f_1(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)}) \\ Y_2 - f_2(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)}) \\ \vdots \\ Y_n - f_n(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\delta f_1}{\delta x_1} & \frac{\delta f_1}{\delta x_2} & \dots & \frac{\delta f_1}{\delta x_n} \\ \frac{\delta f_2}{\delta x_1} & \frac{\delta f_2}{\delta x_2} & \dots & \frac{\delta f_2}{\delta x_n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\delta f_n}{\delta x_1} & \frac{\delta f_n}{\delta x_2} & \dots & \frac{\delta f_n}{\delta x_n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x_1^{(k)} \\ \Delta x_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta x_n^{(k)} \end{pmatrix} \quad (\text{III-36})$$

$$\Delta Y^{(k)} = J \Delta x^{(k)}$$

La résolution du système (III-38) revient à calculer $\Delta x^{(k)}$.

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

Une fois $\Delta x^{(k)}$ trouvée, la nouvelle solution est donnée par :

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

Arrêt des itérations :

On arrête les itérations par l'un des tests suivants :

$$1) - |x_i^{k+1} - x_i^k| \leq \varepsilon_1 \quad i = 1, \dots, n$$

$$2) - \left| \frac{x_i^{k+1} - x_i^k}{x_i^k} \right| \leq \varepsilon_2$$

$$3) - \Delta Y^{(k)} \leq \varepsilon_3$$

Avec $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ sont des bornes supérieurs à l'erreur fixées a priori.

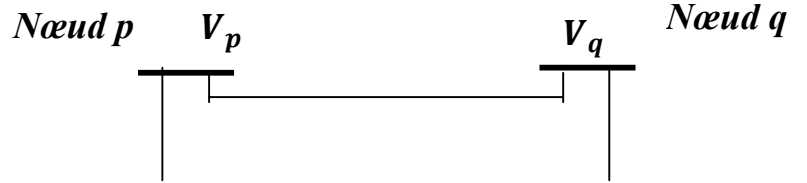
2) - Représentation des grandeurs en coordonnées polaires et rectangulaires

a) - Coordonnées polaires

$$\bar{V}_p = |V_p| \angle \delta_p$$

$$\bar{V}_q = |V_q| \angle \delta_q$$

$$\bar{Y}_{pq} = |Y_{pq}| \angle \theta_{pq}$$



On définit le courant injecté au nœud (P) par I_p :

$$I_p = \sum_{q=1}^n Y_{pq} V_q = \sum_{q=1}^n |Y_{pq}| |V_q| \angle (\theta_{pq} + \delta_q)$$

$$I_p = \sum_{q=1}^n (|Y_{pq}| |V_q| \cos(\theta_{pq} + \delta_q) + j |Y_{pq}| |V_q| \sin(\theta_{pq} + \delta_q)) \quad (III - 37)$$

On définit aussi la puissance injectée au nœud (P) :

$$S_p = V_p I_p^* = V_p \left(\sum_{q=1}^n Y_{pq} V_q \right)^* = \sum_{q=1}^n |V_p| |Y_{pq}| |V_q| \angle (\delta_p - \delta_q - \theta_{pq}) \quad (III - 38)$$

$$S_p = P_p + jQ_p$$

$$P_p = \sum_{q=1}^n |V_p| |Y_{pq}| |V_q| \cos(\delta_p - \delta_q - \theta_{pq}) \quad (III - 39)$$

$$Q_p = \sum_{q=1}^n |V_p| |Y_{pq}| |V_q| \sin(\delta_p - \delta_q - \theta_{pq}) \quad (III - 40)$$

Le nœud bilan n'a aucune équation, parce que la puissance active et réactive n'est pas spécifiée à son niveau. La tension, par contre, est indiquée.

La matrice jacobienne pour les coordonnées polaire est :

$$\begin{pmatrix} \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \hline \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{pmatrix}^{(k)} = \begin{pmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial \theta_3} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_2}{\partial V_2} & \frac{\partial P_2}{\partial V_3} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial V_n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_n}{\partial \theta_3} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_n}{\partial V_2} & \frac{\partial P_n}{\partial V_3} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial V_n} \\ \hline \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_3} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_n} & \frac{\partial Q_2}{\partial V_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial V_3} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial V_n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Q_n}{\partial \theta_3} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial \theta_n} & \frac{\partial Q_n}{\partial V_2} & \frac{\partial Q_n}{\partial V_3} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial V_n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \theta_2 \\ \vdots \\ \Delta \theta_n \\ \hline \Delta V_2 \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{pmatrix}^{(k)} \quad (III - 41)$$

Se système peut être écrit sous la forme suivante :

$$\begin{pmatrix} \Delta P \\ \hline \Delta Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S & T \\ \hline U & W \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \theta \\ \hline \Delta V \end{pmatrix} \quad (III - 42)$$

Les dérivés partiels peuvent être calculés comme suit :

Les éléments non diagonaux :

$$\frac{\partial P_p}{\partial \theta_q} = G_{pq} V_p V_q \sin(\theta_p - \theta_q) - B_{pq} V_p V_q \cos(\theta_p - \theta_q)$$

$$\frac{\partial P_{Sp}}{\partial V_q} = G_{pq} V_p \cos(\theta_p - \theta_q) + B_{pq} \sin(\theta_p - \theta_q) = \left(-\frac{1}{V_q} \right) \frac{(\partial Q_p)}{(\partial \theta_q)}$$

$$\frac{\partial Q_p}{\partial \theta_q} = -G_{pq} V_p V_q \cos(\theta_p - \theta_q) - B_{pq} V_p V_q \sin(\theta_p - \theta_q)$$

$$\frac{\partial Q_p}{\partial V_q} = G_{pq} V_p \sin(\theta_p - \theta_q) - B_{pq} V_p \cos(\theta_p - \theta_q) = \left(\frac{1}{V_q} \right) \frac{(\partial P_p)}{(\partial \theta_q)}$$

Les éléments diagonaux :

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_p}{\partial \theta_p} &= V_p \sum_{q=1}^{q=n} V_q [-G_{pq} \sin(\theta_p - \theta_q) + B_{pq} \cos(\theta_p - \theta_q)] - V_p^2 B_{pp} \\ &= -Q_p - V_p^2 B_{pp} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_p}{\partial V_p} &= \sum_{q=1}^{q=n} V_q [G_{pq} \cos(\theta_p - \theta_q) + B_{pq} \sin(\theta_p - \theta_q)] - V_p G_{pp} \\ &= \frac{P_p}{V_p} + V_p G_{pp} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_p}{\partial \theta_p} &= V_p \sum_{q=1}^{q=n} V_q [G_{pq} \cos(\theta_p - \theta_q) + B_{pq} \sin(\theta_p - \theta_q)] - V_p^2 G_{pp} \\ &= P_p - V_p^2 G_{pp} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_p}{\partial V_p} &= \sum_{q=1}^{q=n} V_q [G_{pq} \sin(\theta_p - \theta_q) - B_{pq} \cos(\theta_p - \theta_q)] - V_p B_{pp} \\ &= \frac{Q_p}{V_p} - V_p B_{pp} \end{aligned}$$

b) - Coordonnées rectangulaires

L'élément $p \ q$ de la matrice Y_{Bus} s'écrit :

$$Y_{pq} = G_{pq} + jB_{pq}$$

La tension au niveau de l'accès (P), $V_p = e_p + jf_p$

Le courant :

$$I_p = \sum_{q=1}^n Y_{pq} V_q = \sum_{q=1}^n (G_{pq} + jB_{pq})(e_q + jf_q) \quad (III - 43)$$

$$S_p = V_p I_p^* = (e_p + jf_p) \left(\sum_{q=1}^n (G_{pq} + jB_{pq})(e_p + jf_p) \right)^* \quad (III - 44)$$

$$S_p = P_p + jQ_p$$

$$\begin{cases} P_p = e_p \sum_{q=1}^n (G_{pq} e_q - B_{pq} f_q) + f_p \sum_{q=1}^n (G_{pq} f_q + B_{pq} e_q) \\ Q_p = f_p \sum_{q=1}^n (G_{pq} e_q - B_{pq} f_q) - e_p \sum_{q=1}^n (G_{pq} f_q + B_{pq} e_q) \end{cases} \quad (III - 45)$$

Application de la méthode de NR au problème d'écoulement de puissance :

Soit un réseau à n nœuds, on suppose a un seul générateur pris comme nœud bilan, tous les autres accès sont de types (P-Q), le système matriciel sera comme suit :

$$\begin{pmatrix} \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \hline \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{pmatrix}^{(k)} = \begin{pmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial e_2} & \frac{\partial P_2}{\partial e_3} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial e_n} & \frac{\partial P_2}{\partial f_2} & \frac{\partial P_2}{\partial f_3} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial f_n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial e_2} & \frac{\partial P_n}{\partial e_3} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial e_n} & \frac{\partial P_n}{\partial f_2} & \frac{\partial P_n}{\partial f_3} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial f_n} \\ \hline \frac{\partial Q_2}{\partial e_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial e_3} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial e_n} & \frac{\partial Q_2}{\partial f_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial f_3} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial f_n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial e_2} & \frac{\partial Q_n}{\partial e_3} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial e_n} & \frac{\partial Q_n}{\partial f_2} & \frac{\partial Q_n}{\partial f_3} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial f_n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta e_2 \\ \vdots \\ \Delta e_n \\ \hline \Delta f_2 \\ \vdots \\ \Delta f_n \end{pmatrix}^{(k)} \quad (III - 46)$$

On écrit ce système sous la forme :

$$\begin{pmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S' & T' \\ U' & W' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta e \\ \Delta f \end{pmatrix} \quad (\text{III-47})$$

Dans le cas où le réseau contient des nœuds de type (P-V), on aura le système suivant :

$$\begin{pmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta |V|^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S' & T' \\ U' & W' \\ C' & D' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta e \\ \Delta f \end{pmatrix}$$

Avec :

$$\Delta P_p^{(k)} = P_p^{sp} - P_p^{cal(k)}$$

$$\Delta Q_p^{(k)} = Q_p^{sp} - Q_p^{cal(k)}$$

$$\Delta |V|_p^2 = |V_p^{sp}|^2 - |V_p^{(k)cal}|^2$$

La résolution du système (II - 46) nous donne :

$$\Delta e_p^{(k)} \text{ et } \Delta f_p^{(k)}$$

La nouvelle solution des tensions est :

$$\begin{cases} e_p^{(k+1)} = e_p^{(k)} + \Delta e_p^{(k)} \\ f_p^{(k+1)} = f_p^{(k)} + \Delta f_p^{(k)} \end{cases}$$

Le processus de calcul est répété jusqu'à la convergence :

$$C'est\text{-}\grave{a}\text{-dire} : \begin{cases} |\Delta \mathbf{P}_p^{(k)}| \leq \varepsilon_p & \text{pour les noeuds } ((P - Q), (P - V)) \\ |\Delta \mathbf{Q}_p^{(k)}| \leq \varepsilon_p & \text{pour les noeuds } (P - Q) \\ |\Delta V_p^{(k)}|^2 \leq \varepsilon_p = |V_p^{sp}|^2 - |V_p^{(k)cal}|^2 & \text{noeud } (P - V) \end{cases}$$

Les éléments de la matrice Jacobienne en coordonnées rectangulaire sont donnés par :

➤ Sous matrice S'

$$\frac{\partial \mathbf{P}_p^{(k)}}{\partial \mathbf{e}_q^{(k)}} = \mathbf{e}_p^{(k)} \mathbf{G}_{pq} + \mathbf{f}_p^{(k)} \mathbf{B}_{pq} \quad (p \neq q)$$

$$\frac{\partial \mathbf{P}_p^{(k)}}{\partial \mathbf{e}_p^{(k)}} = 2\mathbf{e}_p^{(k)} \mathbf{G}_{pp} + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n (\mathbf{e}_q^{(k)} \mathbf{G}_{pq} - \mathbf{f}_q^{(k)} \mathbf{B}_{pq}) \quad (p = q)$$

➤ Sous matrice T'

$$\frac{\partial \mathbf{P}_p^{(k)}}{\partial \mathbf{f}_q^{(k)}} = -\mathbf{e}_p^{(k)} \mathbf{B}_{pq} + \mathbf{f}_p^{(k)} \mathbf{G}_{pq} \quad (p \neq q)$$

$$\frac{\partial \mathbf{P}_p^{(k)}}{\partial \mathbf{f}_p^{(k)}} = 2\mathbf{f}_p^{(k)} \mathbf{G}_{pp} + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n (\mathbf{f}_q^{(k)} \mathbf{G}_{pq} + \mathbf{e}_q^{(k)} \mathbf{B}_{pq}) \quad (p = q)$$

➤ Sous matrice U'

$$\frac{\partial \mathbf{Q}_p^{(k)}}{\partial \mathbf{e}_q^{(k)}} = -\mathbf{e}_p^{(k)} \mathbf{B}_{pq} + \mathbf{f}_p^{(k)} \mathbf{G}_{pq} \quad (p \neq q)$$

$$\frac{\partial \mathbf{Q}_p^{(k)}}{\partial \mathbf{e}_p^{(k)}} = -2\mathbf{e}_p^{(k)} \mathbf{B}_{pp} - \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n (\mathbf{f}_q^{(k)} \mathbf{G}_{pq} + \mathbf{e}_q^{(k)} \mathbf{B}_{pq}) \quad (p = q)$$

➤ Sous matrice W' :

$$\frac{\partial Q_p^{(k)}}{\partial f_q^{(k)}} = -e_p^{(k)} G_{pq} - f_p^{(k)} B_{pq} \quad (p \neq q)$$

$$\frac{\partial Q_p^{(k)}}{\partial f_p^{(k)}} = -2f_p^{(k)} B_{pp} + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n (e_q^{(k)} G_{pq} - f_q^{(k)} B_{pq}) \quad (p = q)$$

➤ *Sous matrice C' :*

$$\frac{\partial |V_p|^2}{\partial e_q} = 0 \quad \text{pour } (p \neq q)$$

$$\frac{\partial |V_p|^2}{\partial e_q} = 2e_p \quad \text{pour } (p = q)$$

➤ *Sous matrice D' :*

$$\frac{\partial |V_p|^2}{\partial f_q} = 0 \quad \text{pour } (p \neq q)$$

$$\frac{\partial |V_p|^2}{\partial f_q} = 2f_p \quad \text{pour } (p = q)$$

❖ *Organigramme récapitulatif*

L'organigramme récapitulatif résumant la méthode de Newton-Raphson est donné dans la figure (III-2-3-a) pour un nœud PQ (consommateur) et la figure (III-2-3-b) pour un nœud PV (générateur).

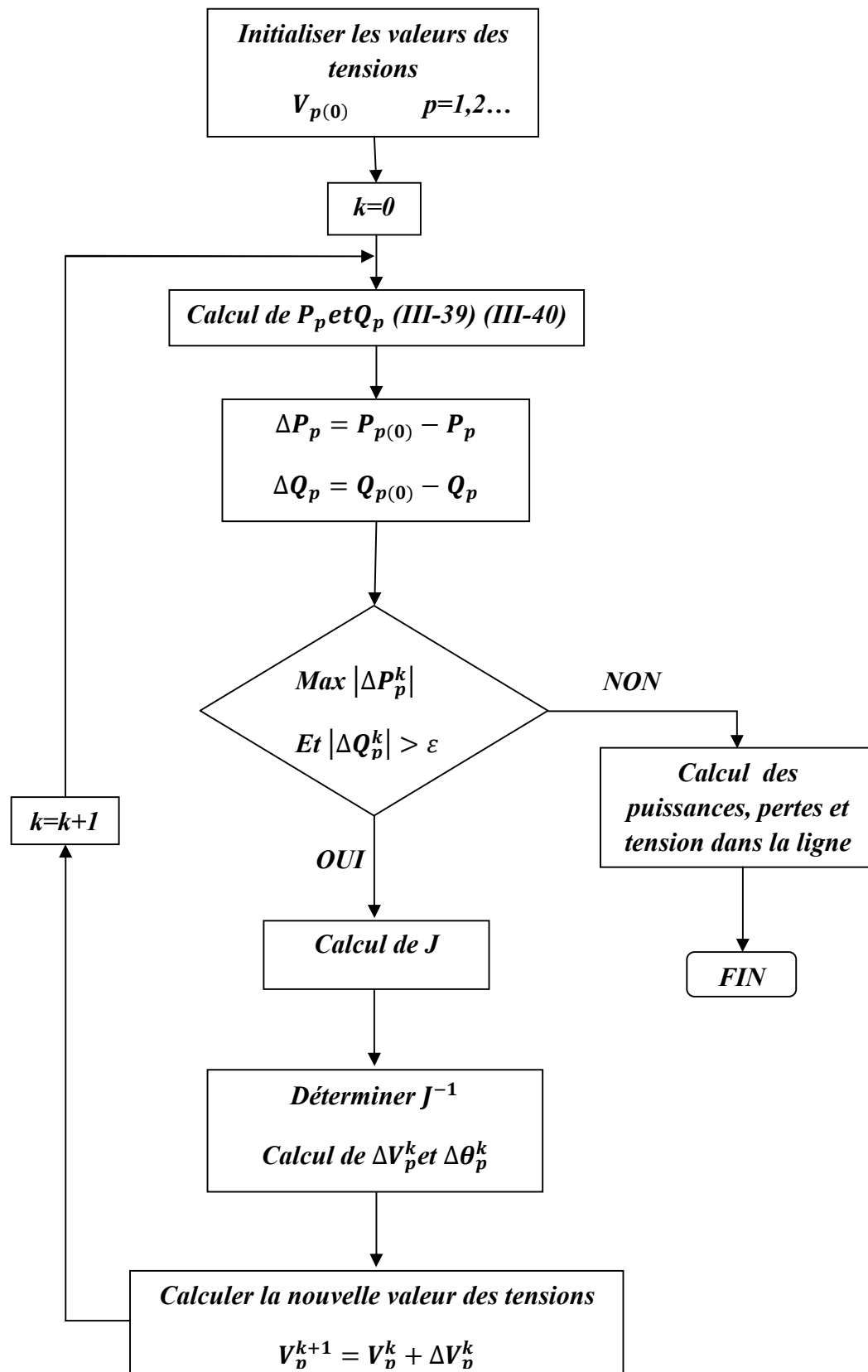


Figure (III-2-3-a) nœud PQ

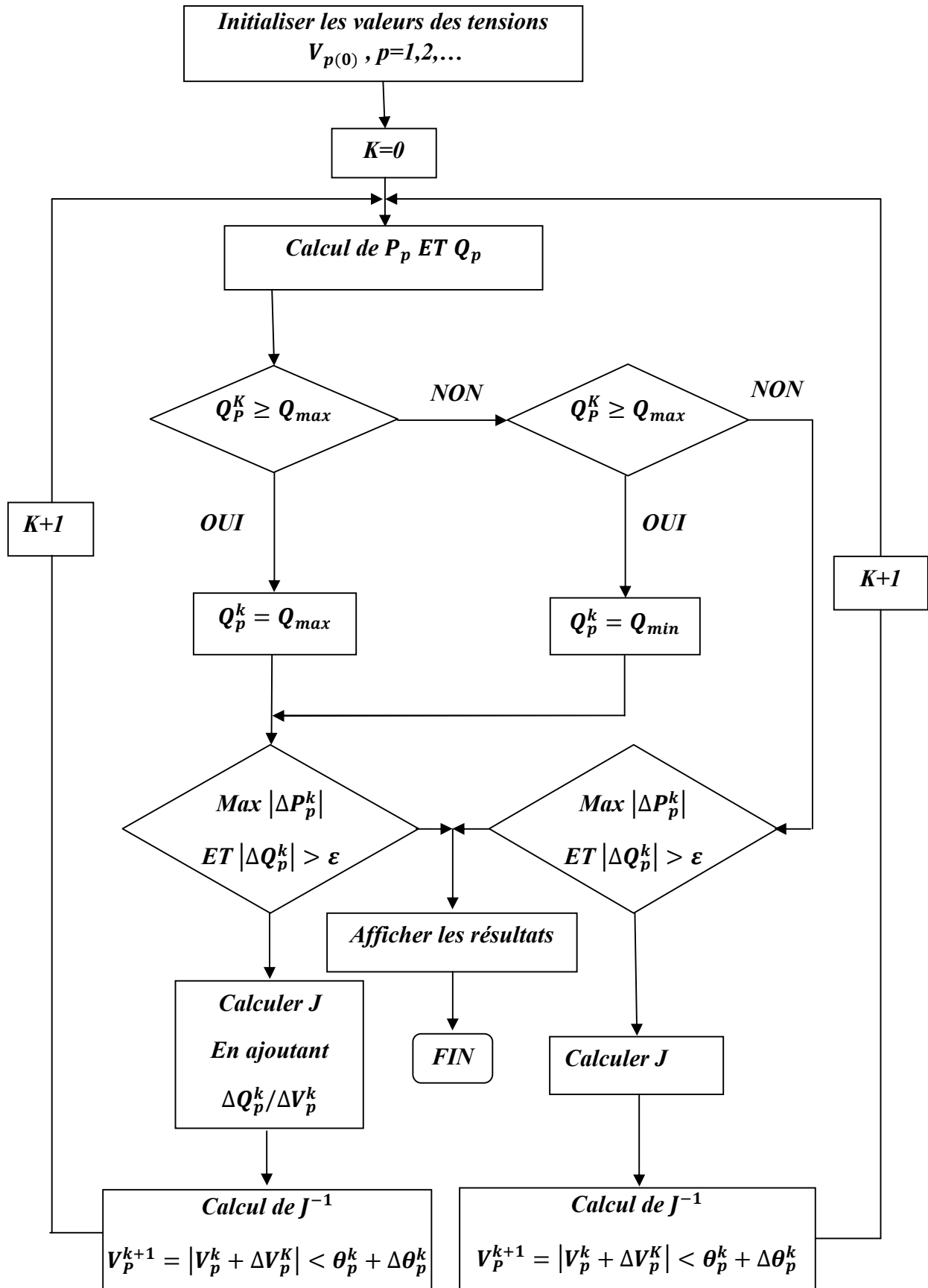


Figure (III-2-3-b) nœuds PV

III-3) - *Ecoulement de puissance découplé rapide*

L'inconvénient principal de la méthode générale de Newton – Raphson est la réévaluation des éléments du jacobien après chaque itération, ce qui nécessite un nombre d'opérations arithmétiques élevé, et donc un temps important par itération, ce qui rend intéressante l'idée de simplification de calcul par la méthode découplée. [DAS 02]

Deux réseaux synthétiques, (P-θ) et (P-V), sont construits. Ce qui permet la résolution du problème d'écoulement de puissance séparément par ces deux réseaux.

*L'application de cette méthode revient à négliger les matrices **T** et **U** du jacobien calculées précédemment, c'est-à-dire négliger l'interdépendance entre, d'une part, la puissance active et l'angle de déphasage de tension au nœud et, d'autre part, la puissance réactive et l'amplitude de la tension au nœud.*

Donc on aura le système simplifié suivant :

$$[\Delta \mathbf{P}] = [\mathbf{S}] [\Delta \mathbf{Q}]$$

$$[\Delta \mathbf{Q}] = [\mathbf{W}] \left[\frac{\Delta |\mathbf{V}|}{|\mathbf{V}|} \right]$$

***S** et **W** sont les éléments de la matrice jacobienne calculés auparavant. Cette méthode sera améliorée en appliquant des approximations physiques et mathématiques justifiées dans la formulation du jacobien, ce qui permet de minimiser le temps d'exécution et l'espace mémoire. Alors des hypothèses simplificatrices physiquement justifiables ont été proposées, ce qui conduit à une méthode de découplée simplifiée.*

➤ *hypothèses*

1) – Comme le réseau possède en général un rapport $\frac{R}{X}$, relativement faible (inférieur à 10%) ce qui nous permet d'écrire :

$$G_{pq} \sin(\theta_p - \theta_q) \ll B_{pq}$$

2) – La différence entre les phases de tension entre deux nœuds adjacents est presque nulle, donc :

$$\sin(\theta_p - \theta_q) \approx \theta_p - \theta_q \approx 0 \Rightarrow \cos(\theta_p - \theta_q) \approx 1$$

$$\text{Avec : } \theta_{pq} = \theta_p - \theta_q$$

3) – la puissance réactive Q_p est négligeable devant l'expression $V_p^2 B_{pp}$.

D'où :

$$\begin{cases} S(p, q) = W(p, q) = -|\bar{V}_p||\bar{V}_q| B_{pq} \text{ pour } p \neq q \\ S(p, q) = -|\bar{V}_p|^2 B_{pp} \text{ pour } p = q \\ W(p, q) = -|\bar{V}_p|^2 B_{pp} \text{ pour } p = q \end{cases}$$

III-4) Conclusion

Toutes ces méthodes utilisées dans ce chapitre, que sa soit Gauss- Seidel ou Newton-Raphson ou bien découplée rapide, ont un seul objectif c'est de calculer l'écoulement de puissance dans les réseaux électrique mais la seul différence qu'on peut citer c'est que la méthode Newton-Raphon converge mieux que les deux méthodes restantes (Gauss- Seidel et découplé rapide).

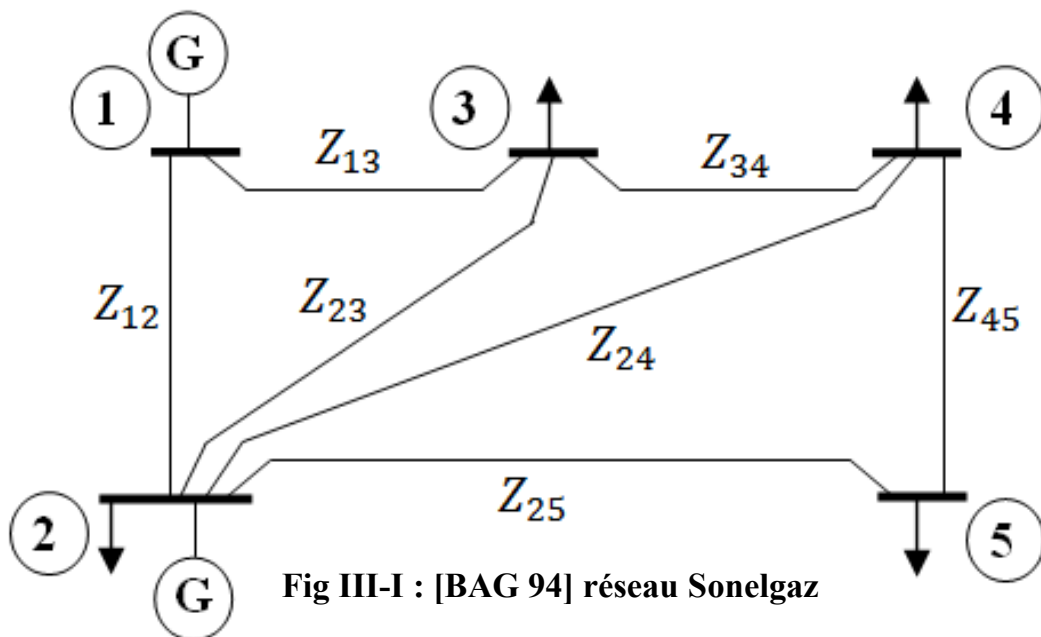
On utilisera un outil informatique, dans le chapitre qui suit, à fin de calculer l'écoulement de puissance puis on le comparera avec les résultats trouvés dans la partie théorique.

IV-1)- Analyse de l'écoulement de puissance dans un réseau à 5 nœuds

IV-1-1)- Calcul théoriques

★ Méthode de Gauss Seidel

Pour illustrer tout le travail qui a été fait dans les deux chapitres précédents, on procédera, en utilisant la méthode de Gauss – Seidel, par la résolution du problème si dessous, en choisissant un réseau a 5 nœuds dont les paramètres et le schéma sont donnés par : (fig - III - 1).



Paramètres du réseau

Z_{12}	Z_{13}	Z_{23}	Z_{24}	Z_{25}	Z_{34}	Z_{45}
$0.02+j0.06$	$0.08+j0.24$	$0.06+j0.18$	$0.06+j0.18$	$0.04+j0.12$	$0.01+j0.03$	$0.08+j0.24$

<i>Données</i> <i>Nœuds</i>	<i>P_g</i>	<i>Q_g</i>	<i>P_a</i>	<i>Q_a</i>	<i>V_b</i>
①	0,00	0,00	0,00	0,00	1,06
②	0,40	0,00	0,20	0,10	1,047
③	0,00	0,00	0,45	0,15	1,00
④	0,00	0,00	0,40	0,05	1,00
⑤	0,00	0,00	0,60	0,10	1,00

Avec :

Nœud ① : nœud Bilan.

Nœud ② : nœud **PV**, ou nœud générateur.

Les autres nœuds sont des nœuds consommateurs ou **PQ**.

P_g : puissance active générée.

Q_g : puissance réactive générée.

P_a : puissance active absorbée.

Q_a : puissance réactive absorbée.

V_b : tension des bus.

Procédure de calcul

- Calcul de **Y_{Bus}**
- Calcul de **Q₂** pour les nœuds **PV**
- Calcul des tensions après la première itération
- Calcul des puissances :

❖ *Calcul des puissances circulant entre deux nœuds*

❖ *Calcul des puissances aux nœuds*

$$Y_{bus} = \begin{pmatrix} 6.25-j18.75 & -5+j15 & -1.25+j3.75 & 0 & 0 \\ -5+j15 & 10.833-j32.5 & -1.6667+j5 & -1.6667+j5 & -2.5+j7.5 \\ -1.25+j3.75 & -1.6667+j5 & 12.9167-j38.75 & -10+j30 & 0 \\ 0 & -1.6667+j5 & -10+j30 & 12.9167-j38.75 & -1.25+j3.75 \\ 0 & -2.5+j7.5 & 0 & -1.25+j3.75 & 3.75-j11.25 \end{pmatrix}$$

❖ *Calcul des pertes dans les lignes*

➤ *Construction de la matrice S*

1) - Calcul de la matrice Y_{Bus}

On a $y = \frac{1}{z}$

$$y_{12} = \frac{1}{0,02 + j 0,06} = 5 - j 15$$

$$y_{13} = \frac{1}{0,08 + j 0,24} = 1,25 - j 3,75$$

$$y_{11} = y_{12} + y_{13} = 6,25 - j 18,75$$

$$y_{14} = 0, \quad y_{15} = 0$$

$$y_{23} = y_{24} = 1,66 - j 5$$

$$y_{34} = 10 - j 30$$

$$y_{22} = y_{21} + y_{23} + y_{24} + y_{25} = 10,8333 - j 32,5$$

$$y_{33} = y_{31} + y_{32} + y_{34} = 12,9167 - j 38,5$$

$$y_{44} = y_{42} + y_{43} + y_{45} = 12,9167 - j 38,75$$

$$y_{45} = 1,25 - j 3,75$$

$$y_{55} = y_{52} + y_{54} = 3,75 - j 11,25$$

A partir de ces résultats on constituera la matrice Y_{Bus} suivante :

Pour la suite du calcul l'initialisation des tensions se fera comme suite :

➤ Pour les nœuds **PQ** : $V_p^{(0)} = 1 + j 0$

➤ Pour les nœuds **PV** : $V_p^{(0)} = V_p + j 0$

2) - Calcul de Q_2

Le nœud $\textcircled{2}$ est un nœud de type (**PV**),

En générale :

$$Q_p^{cal} = f_p^{(0)} \sum_{q=1}^n (e_q G_{pq} - f_q B_{pq}) - e_p^{(0)} \sum_{q=1}^n (f_q G_{pq} + e_q B_{pq}) \quad (*)$$

$$V_p = e_p + j f_p = e_p \text{ car } f_p = 0$$

L'équation (*) devient :

$$Q_p^{cal} = -e_p^{(0)} \sum_{q=1}^n (e_q B_{pq})$$

A.N :

$$\begin{aligned} Q_2^{cal} &= -e_2 \sum_{q=1}^n (e_q B_{2q}) \\ &= (-1,047)(e_1 B_{12} + e_2 B_{22} + e_3 B_{23} + e_4 B_{24} + e_5 B_{25}) \end{aligned}$$

$$= (-1,047)[(1,06)(15) + (1,047)(-32,5) + (5) + (5) + (7,5)]$$

$$Q_2^{cal} = 0,6570$$

On remarque que $Q_2^{cal} > Q_{max}$ donc on prendra $Q_2 = Q_{max} = 0,4$ tout en considérant le nœud $\textcircled{2}$ étant un nœud **PQ**.

3) – Calcul des tensions

En général : pour un nœud **PQ**

$$V_p^{(k+1)} = \frac{1}{y_{pp}} \left[\frac{-P_p + jQ_p}{(V_p^{(k)})^*} - \sum_{q=1}^{p-1} y_{pq} V_q^{(k+1)} - \sum_{q=p+1}^n y_{pq} V_q^{(k)} \right]$$

Donc on aura :

$$\begin{aligned} \text{➤ } V_2^{(1)} &= \frac{1}{y_{22}} \left[\frac{-P_2 + jQ_2}{(V_2^{(0)})^*} - y_{21} V_1^{(1)} - y_{23} V_3^{(0)} - y_{24} V_4^{(0)} - y_{25} V_5^{(0)} \right] \\ &= \left(\frac{1}{10,8333 - j32,5} \right) \left[\frac{-0,2 + j0,4}{(1,047)} - (-5 + j15)(1,06) - (-1,6667 + j5) \right. \\ &\quad \left. - (-1,6667 + j5) - (-2,5 + j7,5) \right] \end{aligned}$$

$$V_2^{(1)} = (1,0154 - j0,0018)$$

$$\begin{aligned} \text{➤ } V_3^{(1)} &= \frac{1}{y_{33}} \left[\frac{-P_3 + jQ_3}{(V_3^{(0)})^*} - y_{31} V_1^{(1)} - y_{32} V_2^{(1)} - y_{34} V_4^{(0)} - y_{35} V_5^{(0)} \right] \\ &= \frac{-1}{12,9167 - j38,75} \left[\frac{0,45 - j0,15}{1} + (-1,25 + j3,75)(1,06) \right. \\ &\quad \left. + (-1,6667 + j5)(1,0154 - j0,0018) + (-10 + j30) \right] \end{aligned}$$

$$V_3^{(1)} = 1,0008 - j0,0095$$

$$\begin{aligned}
\triangleright V_4^{(1)} &= \frac{1}{y_{44}} \left[\frac{-P_4 + jQ_4}{(V_4^{(0)})^*} - y_{41}V_1^{(1)} - y_{42}V_2^{(1)} - y_{43}V_3^{(1)} - y_{45}V_5^{(0)} \right] \\
&= \frac{-1}{12,9167 - j38,75} \left[\frac{0.4 - j0,05}{1} + (-1,6667 + j5)(1,0154 - j0,0018) \right. \\
&\quad \left. + (-10 + j30)(1,0008 - j0,0095) + (-1,25 + j3,75) \right]
\end{aligned}$$

$$V_4^{(1)} = 0,9983 - j0,0165$$

$$\begin{aligned}
\triangleright V_5^{(1)} &= \frac{1}{y_{55}} \left[\frac{-P_5 + jQ_5}{(V_5^{(0)})^*} - y_{51}V_1^{(1)} - y_{52}V_2^{(1)} - y_{53}V_3^{(1)} - y_{54}V_4^{(1)} \right] \\
&= \frac{-1}{3,75 - j11,25} \left[\frac{0.6 - j0,1}{1} + (-2,5 + j7,5)(1,0154 - j0,0018) \right. \\
&\quad \left. + (-1,25 + j3,75)(0,9983 - j0,0165) \right]
\end{aligned}$$

$$V_5^{(1)} = 0,9857 - j0,052$$

4) – calcul des puissances

A) - Calcul de la puissance circulant d'un nœud à un autre

• Calcul des S_{pq} et S_{qp}

La puissance circulant d'un nœud $\textcircled{p}$ à un nœud $\textcircled{q}$ est :

$$\bar{S}_{pq} = P_{pq} + jQ_{pq} = V_p^{(k)} I_{pq}^{(*)} = V_p^{(k)} \left[y_{pq}^* (V_p^{(k)} - V_q^{(k)})^* \right]$$

La puissance circulant d'un nœud $\textcircled{q}$ à un nœud $\textcircled{p}$:

$$\bar{S}_{qp} = V_q^{(k)} I_{qp}^{(*)} = V_q^{(k)} \left[y_{qp}^* (V_q^{(k)} - V_p^{(k)})^* \right].$$

a) – Calcul des S_{pq}

On fera les calculs pour la première itération c'est-à-dire $k = 1$.

1) *Calcul de $\bar{S}_{12}$*

$$\begin{aligned}\bar{S}_{12} &= P_{12} + jQ_{12} = V_1^{(1)} \left[y_{12}^* \left(V_1^{(1)} - V_2^{(1)} \right)^* \right] \\ &= 1,06 [(-5 - j15)(1,06 - 1,0154 + j0,0018)^*]\end{aligned}$$

$$\Rightarrow \bar{S}_{12} = -0,2650 - j0,6996$$

2) *Calcul de $\bar{S}_{13}$:*

$$\begin{aligned}\bar{S}_{13} &= V_1^{(1)} \left[y_{13}^* \left(V_1^{(1)} - V_3^{(1)} \right)^* \right] \\ &= 1,06 [(-1,25 - j3,75)(1,06 - 1,0008 + j0,0095)^*]\end{aligned}$$

$$\bar{S}_{13} = -0.1162 - j 0.2227$$

3) *Calcul de $\bar{S}_{23}$:*

$$\begin{aligned}\bar{S}_{23} &= P_{23} + jQ_{23} = V_2^{(1)} \left[y_{23}^* \left(V_2^{(1)} - V_3^{(1)} \right)^* \right] \\ &= (1.01 - j0.0018)[(-1.6667 - j5)(1.0154 - j0.0018 - 1,0008 + j0.0095)^*]\end{aligned}$$

$$\bar{S}_{23} = 0.0639 + j0.0610$$

4) *Calcul de $\bar{S}_{24}$:*

$$\begin{aligned}\bar{S}_{24} &= P_{24} + jQ_{24} = V_2^{(1)} \left[y_{24}^* \left(V_2^{(1)} - V_4^{(1)} \right)^* \right] \\ &= (1.0154 - j0.0018)[(-1.6667 - j5)(1.0154 - j0.0018 - 0.9983 + j0.0165)^*]\end{aligned}$$

$$\bar{S}_{24} = -0.1037 + j 0.0618$$

5) *Calcul de $\bar{S}_{25}$:*

$$\bar{S}_{25} = P_{25} + jQ_{25} = V_2^{(1)} \left[y_{25}^* \left(V_2^{(1)} - V_5^{(1)} \right)^* \right]$$

$$= (1.0154 - j0.0018)[(-2.5 - j7.5)(1.0154 - j0.0018 - 0.9857 + j0.0520)^*]$$

$$\bar{S}_{25} = -0.4579 - j 0.0979$$

6) *Calcul de $\bar{S}_{34}$:*

$$\bar{S}_{34} = P_{34} + jQ_{34} = V_3^{(1)} \left[y_{34}^* \left(V_3^{(1)} - V_4^{(1)} \right)^* \right]$$

$$= (1.0008 - j0.0095)[(-10 - j30)(1.0008 - j0.0095 - 0.9983 + j0.0165)^*]$$

$$\bar{S}_{34} = -0.2352 - j0.0028$$

7) *Calcul de $\bar{S}_{45}$:*

$$\bar{S}_{45} = P_{45} + jQ_{45} = V_4^{(1)} \left[y_{45}^* \left(V_4^{(1)} - V_5^{(1)} \right)^* \right]$$

$$= (0.9983 - j0.0165)[(-1.25 - j3.75)(0.9983 - j0.0165 - 0.9857 + j0.0520)^*]$$

$$\bar{S}_{45} = 0.1487 - j0.0004$$

b) - Calcul des $\bar{S}_{qp}$

1) *Calcul de $\bar{S}_{21}$*

$$\bar{S}_{21} = P_{21} + jQ_{21} = V_2^{(1)} \left[y_{21}^* \left(V_2^{(1)} - V_1^{(1)} \right)^* \right]$$

$$= (1.0154 - j0.0018)[(-5 - j15)(1.0154 - j0.0018 - 1.06)^*]$$

$$\bar{S}_{21} = 0.255 + j 0.6697$$

2) *Calcul de $\bar{S}_{31}$*

$$\bar{S}_{31} = P_{31} + jQ_{31} = V_3^{(1)} \left[y_{31}^* \left(V_3^{(1)} - V_1^{(1)} \right)^* \right]$$

$$= (1.0008 - j0.0095)[(-1.25 - j3.75)(1.0008 - j0.0095 - 1.06)^*]$$

$$\bar{S}_{31} = 0.1117 + j 0.2093$$

3) Calcul de $\bar{S}_{32}$

$$\begin{aligned}\bar{S}_{32} &= P_{32} + jQ_{32} = V_3^{(1)} \left[y_{32}^* \left(V_3^{(1)} - V_2^{(1)} \right)^* \right] \\ &= (1.0008 - j0.0095)[(-1.6667 - j5)(1.0008 - j0.0095 - 1.0154 + j0.0018)^*] \\ \bar{S}_{32} &= 0.0635 + j0.0596\end{aligned}$$

4) Calcul de $\bar{S}_{42}$

$$\begin{aligned}\bar{S}_{42} &= P_{42} + jQ_{42} = V_4^{(1)} \left[y_{42}^* \left(V_4^{(1)} - V_2^{(1)} \right)^* \right] \\ &= (0.9983 - j0.0165)[(-1.6667 - j5)(0.9983 - j0.0165 - 1.0154 + j0.0018)^*] \\ \bar{S}_{42} &= 0.1028 - j 0.0592\end{aligned}$$

5) Calcul de $\bar{S}_{52}$

$$\begin{aligned}\bar{S}_{52} &= P_{52} + jQ_{52} = V_5^{(1)} \left[y_{52}^* \left(V_5^{(1)} - V_2^{(1)} \right)^* \right] \\ &= (0.9857 - j0.052)[(-2.5 - j7.5)(0.9857 - j0.052 - 1.0154 + j0.0018)^*] \\ \bar{S}_{52} &= 0.5303 - j0.5008\end{aligned}$$

6) Calcul de $\bar{S}_{54}$

$$\begin{aligned}\bar{S}_{54} &= P_{54} + jQ_{54} = V_5^{(1)} \left[y_{54}^* \left(V_5^{(1)} - V_4^{(1)} \right)^* \right] \\ &= (0.9857 - j0.052)[(-1.25 - j3.75)(0.9857 - j0.052 - 0.9983 + j0.0165)^*] \\ \bar{S}_{54} &= 0.1469 - j 0.0049\end{aligned}$$

7) Calcul de $\bar{S}_{43}$

$$\begin{aligned}\bar{S}_{43} &= P_{43} + jQ_{43} = V_4^{(1)} \left[y_{43}^* \left(V_4^{(1)} - V_3^{(1)} \right)^* \right] \\ &= (0.9983 - j0.0165)[(-10 - j30)(0.9983 - j0.0165 - 1.0008 + j0.0095)^*] \\ \bar{S}_{43} &= 0.2347 + j0.0011\end{aligned}$$

B) - Calcul des puissances aux nœuds

$$\begin{aligned} 1) \quad \text{Nœud } \textcircled{1} : \bar{S}_1 &= \bar{S}_{12} + \bar{S}_{13} \\ &= -0.2650 - j0.6996 - 0.1162 - j0.2227 \end{aligned}$$

$$\bar{S}_1 = -0.3812 - j0.9223$$

$$\begin{aligned} 2) \quad \text{Nœud } \textcircled{2} : \bar{S}_2 &= \bar{S}_{21} + \bar{S}_{23} + \bar{S}_{24} + \bar{S}_{25} \\ &= 0.255 + j0.6697 - 0.0639 - j0.0610 - 0.1037 - j0.0618 - 0.4579 - j0.0979 \end{aligned}$$

$$\bar{S}_2 = -0.3705 + j0.4490$$

$$\begin{aligned} 3) \quad \text{Nœud } \textcircled{3} : \bar{S}_3 &= \bar{S}_{31} + \bar{S}_{32} + \bar{S}_{34} \\ &= 0.1117 + j0.2093 + 0.0635 + j0.0596 - 0.2352 - j0.0028 \\ \bar{S}_3 &= -1.7756 - j4.722 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 4) \quad \text{Nœud } \textcircled{4} : \bar{S}_4 &= \bar{S}_{42} + \bar{S}_{43} + \bar{S}_{45} \\ &= 0.1028 + j0.0592 + 0.2347 + j0.0011 - 0.2352 - j0.0028 \end{aligned}$$

$$\bar{S}_4 = 0.1023 + j0.0575$$

$$\begin{aligned} 5) \quad \text{Nœud } \textcircled{5} : \bar{S}_5 &= \bar{S}_{52} + \bar{S}_{54} \\ &= 0.4494 + j0.0724 + 0.1469 - j0.0049 \end{aligned}$$

$$\bar{S}_5 = 0.5963 + j0.0675$$

C) – Calcul des pertes dans les lignes

$$\begin{aligned} 1) \quad \text{Ligne } (1 - 2) : \Delta_1 &= S_{12} + S_{21} \\ &= -0.2650 - j0.6996 + 0.255 + j0.6697 \end{aligned}$$

$$\Delta_1 = -0.01 - j0.0299$$

$$\begin{aligned}
2) \quad & \text{Ligne (1 - 3)} : \Delta_2 = S_{13} + S_{31} \\
& = -0.1162 - j0.2227 + 0.1117 + j0.2093
\end{aligned}$$

$$\Delta_2 = -0.0045 - j0.0134$$

$$\begin{aligned}
3) \quad & \text{Ligne (2 - 3)} : \Delta_3 = S_{23} + S_{32} \\
& = -0.0639 - j0.0610 + 0.0635 + j0.0596
\end{aligned}$$

$$\Delta_3 = -0.0004 - j0.0014$$

$$\begin{aligned}
4) \quad & \text{Ligne (2 - 4)} : \Delta_4 = S_{24} + S_{42} \\
& = -0.1037 - j0.0618 + 0.1028 + j0.0592
\end{aligned}$$

$$\Delta_4 = -0.0009 - j0.0026$$

$$\begin{aligned}
5) \quad & \text{Ligne (2 - 5)} : \Delta_5 = S_{25} + S_{52} \\
& = -0.4579 - j0.0979 + 0.4494 + j0.0724
\end{aligned}$$

$$\Delta_5 = -0.0085 - j0.0255$$

$$\begin{aligned}
6) \quad & \text{Ligne (3 - 4)} : \Delta_6 = S_{34} + S_{43} \\
& = -0.2352 - j0.0028 + 0.2347 - j0.0011
\end{aligned}$$

$$\Delta_6 = -0.0005 - j0.0039$$

$$\begin{aligned}
7) \quad & \text{Ligne (4 - 5)} : \Delta_7 = S_{45} + S_{54} \\
& = -0.1487 - j0.0004 + 0.1469 - j0.0049
\end{aligned}$$

$$\Delta_7 = -0.0018 - j0.0053$$

D) – Construction de la matrice S

$$\bar{S} = \begin{pmatrix} -1.7541 - j 4.6480 & -1.5847 - j 4.3142 & -0.1594 - j 0.3338 & 0 & 0 \\ 1.2087 + j 3.7862 & 0.4029 + j 5.8048 & 0.2414 + j 0.7336 & -0.4895 + j 0.8776 & -0.5614 + j 0.4074 \\ 0.1497 + j 0.3045 & -0.2986 - j 0.9077 & -5.5713 + j 0.4748 & -5.4224 + j 1.0780 & 0 \\ 0 & 0.3917 - j 1.1721 & 5.0992 - j 2.0476 & 5.4909 - j 3.7894 & 0.0000 - j 0.5697 \\ 0 & 0.5303 - j 0.5008 & 0 & -0.0278 + j 0.4865 & 0.5025 - j 0.0143 \end{pmatrix}$$

★ Méthode de Newton-Raphson(en coordonnées polaires)

Dans ce qui suit, on prendra comme exemple à étudier un réseau à trois nœuds, tel que :

➤ **Pour le nœud 1 :**

$$V_1 = 1.02 \text{ pu}, P_1 = 0, Q_1 = 0, \theta_1 = 0. \text{ (nœud bilan)}$$

➤ **Pour le nœud 2 :**

$$V_2 = 1 \text{ pu}, P_2 = -0.25, Q_2 = 0.25, \theta_2 = 0 \text{ (nœud PQ)}$$

➤ **Pour le nœud 3 :**

$$V_3 = 1.02 \text{ pu}, P_3 = 0.5, Q_3 = 0, \theta_3 = 0. \text{ (nœud PV)}.$$

On a :

$$Y = \begin{pmatrix} 0,474-j2,428 & -0,474+j2,45 & 0 \\ -0,474+j2,45 & 1,142-j4,70 & -0,668-j4,70 \\ 0 & -0,668+j2,297 & 0,668-j2,272 \end{pmatrix}$$

Pour une première itération, on trouvera, et d'après les équations citer dans le chapitre III, concernant le calcul de la matrice jacobienne en coordonnées polaires, que :

$$P_2 = -0.0228, V_2 = 1, \theta_2 = 0, Q_2 = -0.142.$$

$$P_3 = 0.0136, Q_3 = -0.213.$$

Et pour cela, on trouvera que :

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_2}{\partial \theta_2} &= 4.8419, & \frac{\partial P_2}{\partial \theta_3} &= -2.3429, & \frac{\partial P_2}{\partial V_2} &= 1.1192 \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_2} &= -1.1648, & \frac{\partial Q_2}{\partial V_2} &= 4.5581, & \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_3} &= 0.6814, \\ \frac{\partial P_3}{\partial \theta_3} &= 2.34, & \frac{\partial P_3}{\partial V_2} &= -0.6814, & \frac{\partial P_3}{\partial \theta_3} &= -2.3429 \end{aligned}$$

La matrice jacobienne sera donc égale à :

$$\bar{J} = \begin{pmatrix} 4.8419 & -2.3429 & 1.1192 \\ -2.3429 & 2.3429 & -0.6814 \\ -1.1648 & 0.6814 & 4.5581 \end{pmatrix}$$

Notre système d'équation sera équivalent à :

$$\begin{vmatrix} \Delta \theta_2^1 \\ \Delta \theta_3^1 \\ \Delta V_2^1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 4.8419 & -2.3429 & 1.1192 \\ -2.3429 & 2.3429 & -0.6814 \\ -1.1648 & 0.6814 & 4.5581 \end{vmatrix}^{-1} \begin{vmatrix} -0.25 - (-0.0228) \\ 0.5 - 0.0136 \\ 0.25 - (-0.1419) \end{vmatrix}$$

En inversant la matrice jacobienne, on trouve :

$$\begin{vmatrix} \Delta \theta_2^1 \\ \Delta \theta_3^1 \\ \Delta V_2^1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0.3932 & 0.4037 & -0.0362 \\ 0.4048 & 0.8246 & 0.0239 \\ 0.0400 & -0.0201 & 0.2066 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} -0.2272 \\ 0.4864 \\ 0.3919 \end{vmatrix}$$

Donc :

$$\begin{cases} \Delta\theta_2^1 = 0.0928 \\ \Delta\theta_3^1 = 0.3185 \\ \Delta V_2^1 = 0.0621 \end{cases}$$

Les nouvelles valeurs des tensions et des angles de déphasage :

$$\begin{cases} \theta_2^1 = 0.09 \\ \theta_3^1 = 0.3185 \\ |V_2^1| = 1.0621 \end{cases}$$

Donc on aura finalement :

$$\begin{cases} V_1^1 = 1.02 + j 0 \\ V_2^1 = 1.0575 + j 0.0985 \\ V_3^1 = 0.9687 + j 0.3194 \end{cases}$$

Les calculs deviennent de plus en plus lourds et compliqués, et cela rien que pour un réseau de trois nœuds et pour une seule itération, autrement dit le calcul le plus facile qu'on aura à effectuer, or dans la réalité on aura affaire à des réseaux beaucoup plus importants et comportant des centaines de nœuds voir des milliers et pour plusieurs itérations, ce qui rend inévitable l'utilisation d'un programme informatique pour effectuer tous ces calculs.

IV-2)- Implémentation de l'outil informatique

Pour les raisons citées ci-dessus, pour bien cerner notre étude sur les réseaux électriques afin d'approfondir nos calculs sur l'écoulement de puissance, et surtout pour pouvoir élargir nos calcul à "n" nœuds, nous avons réalisé différents programmes pour les différentes méthodes existantes.

Nos programmes sont faits d'une manière à garantir une bonne facilité d'utilisation. Nous avons essayé d'introduire, dans la mesure du possible, des

interfaces graphiques, pour garantir une meilleure communication avec l'utilisateur et surtout une bonne fluidité du programme.

Nous avons réalisé un programme principal pour chaque méthode, au cours de son exécution, ce dernier fait appel à des sous programmes, indépendants et propres à chaque méthode, cette manière de procéder est beaucoup plus efficace, et surtout plus ordonnée, tel que le constructeur peut facilement se repérer et cibler une partie bien précise en cas de problème ou un quelconque dysfonctionnement, tandis qu'il sera complètement perdu si c'était un grand programme en bloc où les variables peuvent être confondues ce qui multiplie le risque d'avoir des erreurs.

Chaque programme principal est divisé en deux parties distinctes, et cela pour garantir deux conditions d'arrêt de calcul, l'utilisateur aura à choisir entre un nombre d'itérations bien défini qu'il aura à introduire ou une précision sur le mismatch.

Dans ce qui suit nous allons traiter, en utilisant nos programmes, les mêmes exemples que ceux traités dans (IV-1-1) et (IV-1-2) mais en effectuant plusieurs itérations ce qui rend le calcul encore plus précis.

★ La méthode Gauss-Seidel :

Dans ce qui suit, nous allons donner le programme principal appliqué à la méthode de Gauss Seidel, que nous allons par la suite utiliser au réseau à 5 nœuds traité précédemment. Cette fois nous allons effectuer 5 itérations, les résultats sont recopiés intégralement.


```

1  ****
2  ****
3  ****      Programme Principal de Calcul de l'écoulement de puissance
4  ****      par la methode de Gauss Seidel
5  ****
6  ****
7  ****
8  ****      Réaliser par SADOUR Mohand Arezki et AMMOUR Djamel
9  ****
10 ****
11 ****
12 ****      Encadrer par Mr. M. RACHEK
13 ****
14 ****
15 - plc; clear;
16 - [Qinf,Qsup,V,Q,P,vect_calit,Y,n] = donne;
17 - [arret,aret] = arret_iteration(n);
18 - compteur1 = 1;
19 - if (aret == 1);
20 -     while compteur1 <= arret;
21 -     [P,Q,Vu,V,vect_2] = puissances_GS(n,Y,vect_calit,P,Q,Qinf,Qsup,V);
22 -     [V] = calcul_V_GS (V,Y,n,P,Q);
23 -     [V,P,Q,S,pert] = affiche_result_GS (V,P,Q,Y,n,aret,arret);
24 -     compteur1 = compteur1 + 1;
25 -     end;
26 - elseif (aret == 2);
27 -     cont = 1;
28 -     D = 1000;
29 -     while D > arret;
30 -     [P,Q,Vu,V,vect_2] = puissances_GS(n,Y,vect_calit,P,Q,Qinf,Qsup,V);
31 -     [V] = calcul_V_GS (V,Y,n,P,Q);
32 -     D = V(2:n) - Vu(2:n);
33 -     [V,P,Q,S,pert] = affiche_result_GS (V,P,Q,Y,n,aret,arret);
34 -     cont = cont + 1;
35 -     end;
36 -     end;

```

Nous avons :

Z_{12}	Z_{13}	Z_{23}	Z_{24}	Z_{25}	Z_{34}	Z_{45}
$0.02+j0.06$	$0.08+j0.24$	$0.06+j0.18$	$0.06+j0.18$	$0.04+j0.12$	$0.01+j0.03$	$0.08+j0.24$

<i>Données</i> <i>Nœuds</i>	<i>P_g</i>	<i>Q_g</i>	<i>P_a</i>	<i>Q_a</i>	<i>V_b</i>
①	0,00	0,00	0,00	0,00	1,06
②	0,40	0,00	0,20	0,10	1,047
③	0,00	0,00	0,45	0,15	1,00
④	0,00	0,00	0,40	0,05	1,00
⑤	0,00	0,00	0,60	0,10	1,00

La matrice Ybus est la suivante :

```

6.2500 -18.7500i -5.0000 +15.0000i -1.2500 + 3.7500i 0 0
-5.0000 +15.0000i 10.8333 -32.5000i -1.6667 + 5.0000i -1.6667 + 5.0000i -2.5000 + 7.5000i
-1.2500 + 3.7500i -1.6667 + 5.0000i 12.9167 -38.7500i -10.0000 +30.0000i 0
0 -1.6667 + 5.0000i -10.0000 +30.0000i 12.9167 -38.7500i -1.2500 + 3.7500i
0 -2.5000 + 7.5000i 0 -1.2500 + 3.7500i 3.7500 -11.2500i

```

Après avoir réalisé : 1 itérations on aura :

La tension du noeud 1 est : 1.06

La puissance P du noeud 1 est : 0

La puissance réactive Q du noeud 1 est : 0

La tension du noeud 2 est : 1.0153-0.0017633i

La puissance P du noeud 2 est : 0.2

La puissance réactive Q du noeud 2 est : 0.4

La tension du noeud 3 est : 1.0008-0.0095178i

La puissance P du noeud 3 est : 0.45

La puissance réactive Q du noeud 3 est : 0.15

La tension du noeud 4 est : 0.99836-0.016499i

La puissance P du noeud 4 est : 0.4

La puissance réactive Q du noeud 4 est : 0.05

La tension du noeud 5 est : 0.98569-0.052009i

La puissance P du noeud 5 est : 0.6

La puissance réactive Q du noeud 5 est : 0.1

La matrice des puissances $S(p)$ de notre reseau est la suivante

-0.3809 - 0.9232i	-0.2647 - 0.7006i	-0.1162 - 0.2226i	0	0
0.2547 + 0.6706i	-0.3711 + 0.4514i	-0.0641 - 0.0605i	-0.1037 - 0.0611i	-0.4581 - 0.0976i
0.1118 + 0.2092i	0.0636 + 0.0592i	-0.0589 + 0.2665i	-0.2343 - 0.0018i	0
0	0.1028 + 0.0586i	0.2338 + 0.0002i	0.1878 + 0.0581i	-0.1488 - 0.0007i
0	0.4496 + 0.0720i	0	0.1470 - 0.0047i	0.5966 + 0.0674i

La matrice de pertes de puissances dans notre reseau est

0	-0.0100 - 0.0300i	-0.0045 - 0.0135i	0	0
-0.0100 - 0.0300i	0	-0.0005 - 0.0014i	-0.0008 - 0.0025i	-0.0085 - 0.0255i
-0.0045 - 0.0135i	-0.0005 - 0.0014i	0	-0.0005 - 0.0016i	0
0	-0.0008 - 0.0025i	-0.0005 - 0.0016i	0	-0.0018 - 0.0053i
0	-0.0085 - 0.0255i	0	-0.0018 - 0.0053i	0

Après avoir réalise : 2 itérations on aura :

La tension du noeud 1 est : 1.06

La puissance P du noeud 1 est : 0

La puissance réactive Q du noeud 1 est : 0

La tension du noeud 2 est : 1.0306-0.024198i

La puissance P du noeud 2 est : 0.2

La puissance réactive Q du noeud 2 est : -0.3

La tension du noeud 3 est : 1.0014-0.025112i

La puissance P du noeud 3 est : 0.45

La puissance réactive Q du noeud 3 est : 0.15

La tension du noeud 4 est : 0.99926-0.036442i

La puissance P du noeud 4 est : 0.4

La puissance réactive Q du noeud 4 est : 0.05

La tension du noeud 5 est : 0.99346-0.072862i

La puissance P du noeud 5 est : 0.6

La puissance réactive Q du noeud 5 est : 0.1

La matrice des puissances $S(p)$ de notre reseau est la suivante

-0.7179 - 0.5385i	-0.5405 - 0.3390i	-0.1774 - 0.1995i	0	0
0.5333 + 0.3173i	-0.1210 - 0.1187i	-0.0583 - 0.1475i	-0.1202 - 0.1378i	-0.4757 - 0.1507i
0.1723 + 0.1843i	0.0569 + 0.1432i	-0.1317 + 0.3849i	-0.3609 + 0.0573i	0
0	0.1184 + 0.1321i	0.3596 - 0.0613i	0.3351 + 0.0998i	-0.1429 + 0.0290i
0	0.4663 + 0.1226i	0	0.1412 - 0.0341i	0.6075 + 0.0885i

La matrice de pertes de puissances dans notre reseau est

0	-0.0072 - 0.0217i	-0.0051 - 0.0152i	0	0
-0.0072 - 0.0217i	0	-0.0014 - 0.0043i	-0.0019 - 0.0057i	-0.0094 - 0.0281i
-0.0051 - 0.0152i	-0.0014 - 0.0043i	0	-0.0013 - 0.0040i	0
0	-0.0019 - 0.0057i	-0.0013 - 0.0040i	0	-0.0017 - 0.0051i
0	-0.0094 - 0.0281i	0	-0.0017 - 0.0051i	0

Après avoir réalise : 3 itérations on aura :

La tension du noeud 1 est : 1.06

La puissance P du noeud 1 est : 0

La puissance réactive Q du noeud 1 est : 0

La tension du noeud 2 est : 1.0314-0.022092i

La puissance P du noeud 2 est : -0.2

La puissance réactive Q du noeud 2 est : -0.11866

La tension du noeud 3 est : 1.0021-0.04016i

La puissance P du noeud 3 est : 0.45

La puissance réactive Q du noeud 3 est : 0.15

La tension du noeud 4 est : 1.0005-0.049736i

La puissance P du noeud 4 est : 0.4

La puissance réactive Q du noeud 4 est : 0.05

La tension du noeud 5 est : 0.99371-0.074932i

La puissance P du noeud 5 est : 0.6

La puissance réactive Q du noeud 5 est : 0.1

La matrice des puissances $S(p)$ de notre reseau est la suivante

-0.7394 - 0.5151i	-0.5030 - 0.3381i	-0.2364 - 0.1769i	0	0
0.4965 + 0.3185i	-0.3568 - 0.0502i	-0.1461 - 0.1168i	-0.1981 - 0.1077i	-0.5092 - 0.1442i
0.2302 + 0.1583i	0.1441 + 0.1109i	0.0718 + 0.3281i	-0.3024 + 0.0589i	0
0	0.1952 + 0.0991i	0.3015 - 0.0617i	0.3941 + 0.0487i	-0.1027 + 0.0113i
0	0.4986 + 0.1127i	0	0.1018 - 0.0139i	0.6004 + 0.0988i

La matrice de pertes de puissances dans notre reseau est

0	-0.0065 - 0.0196i	-0.0062 - 0.0186i	0	0
-0.0065 - 0.0196i	0	-0.0020 - 0.0059i	-0.0029 - 0.0086i	-0.0105 - 0.0316i
-0.0062 - 0.0186i	-0.0020 - 0.0059i	0	-0.0009 - 0.0028i	0
0	-0.0029 - 0.0086i	-0.0009 - 0.0028i	0	-0.0009 - 0.0026i
0	-0.0105 - 0.0316i	0	-0.0009 - 0.0026i	0

Après avoir réalise : 4 itérations on aura :

La tension du noeud 1 est : 1.06

La puissance P du noeud 1 est : 0

La puissance réactive Q du noeud 1 est : 0

La tension du noeud 2 est : 1.0261-0.03693i

La puissance P du noeud 2 est : 0.2

La puissance réactive Q du noeud 2 est : -0.050207

La tension du noeud 3 est : 1.0022-0.052248i

La puissance P du noeud 3 est : 0.45

La puissance réactive Q du noeud 3 est : 0.15

La tension du noeud 4 est : 0.99978-0.061133i

La puissance P du noeud 4 est : 0.4

La puissance réactive Q du noeud 4 est : 0.05

La tension du noeud 5 est : 0.98987-0.088549i

La puissance P du noeud 5 est : 0.6

La puissance réactive Q du noeud 5 est : 0.1

La matrice des puissances $S(p)$ de notre reseau est la suivante

-1.0513 - 0.5043i	-0.7670 - 0.3438i	-0.2843 - 0.1605i	0	0
0.7544 + 0.3061i	-0.0362 - 0.0017i	-0.1228 - 0.0919i	-0.1725 - 0.0874i	-0.4954 - 0.1285i
0.2767 + 0.1377i	0.1215 + 0.0879i	0.1075 + 0.2567i	-0.2907 + 0.0311i	0
0	0.1704 + 0.0810i	0.2898 - 0.0337i	0.3448 + 0.0515i	-0.1154 + 0.0041i
0	0.4854 + 0.0987i	0	0.1143 - 0.0073i	0.5997 + 0.0914i

La matrice de pertes de puissances dans notre reseau est

0	-0.0126 - 0.0377i	-0.0076 - 0.0228i	0	0
-0.0126 - 0.0377i	0	-0.0013 - 0.0040i	-0.0021 - 0.0064i	-0.0099 - 0.0298i
-0.0076 - 0.0228i	-0.0013 - 0.0040i	0	-0.0008 - 0.0025i	0
0	-0.0021 - 0.0064i	-0.0008 - 0.0025i	0	-0.0011 - 0.0032i
0	-0.0099 - 0.0298i	0	-0.0011 - 0.0032i	0

Après avoir réalise : 5 itérations on aura :

La tension du noeud 1 est : 1.06

La puissance P du noeud 1 est : 0

La puissance réactive Q du noeud 1 est : 0

La tension du noeud 2 est : 1.0277-0.032569i

La puissance P du noeud 2 est : -0.2

La puissance réactive Q du noeud 2 est : -0.0017121

La tension du noeud 3 est : 1.0018-0.060415i

La puissance P du noeud 3 est : 0.45

La puissance réactive Q du noeud 3 est : 0.15

La tension du noeud 4 est : 0.9992-0.068157i

La puissance P du noeud 4 est : 0.4

La puissance réactive Q du noeud 4 est : 0.05

La tension du noeud 5 est : 0.99008-0.087713i

La puissance P du noeud 5 est : 0.6

La puissance réactive Q du noeud 5 est : 0.1

La matrice des puissances $S(p)$ de notre reseau est la suivante

-1.0063 - 0.4923i	-0.6890 - 0.3410i	-0.3173 - 0.1513i	0	0
0.6785 + 0.3094i	-0.2724 + 0.0201i	-0.1902 - 0.0795i	-0.2344 - 0.0781i	-0.5264 - 0.1317i
0.3085 + 0.1249i	0.1877 + 0.0722i	0.2375 + 0.2123i	-0.2587 + 0.0151i	0
0	0.2309 + 0.0678i	0.2581 - 0.0171i	0.4037 + 0.0467i	-0.0853 - 0.0040i
0	0.5152 + 0.0983i	0	0.0847 + 0.0022i	0.6000 + 0.1005i

La matrice de pertes de puissances dans notre reseau est

0	-0.0105 - 0.0316i	-0.0088 - 0.0264i	0	0
-0.0105 - 0.0316i	0	-0.0024 - 0.0072i	-0.0035 - 0.0104i	-0.0111 - 0.0334i
-0.0088 - 0.0264i	-0.0024 - 0.0072i	0	-0.0007 - 0.0020i	0
0	-0.0035 - 0.0104i	-0.0007 - 0.0020i	0	-0.0006 - 0.0017i
0	-0.0111 - 0.0334i	0	-0.0006 - 0.0017i	0

On voit bien que les résultats trouvés sont très proche de ceux trouvés par le calcul théorique mais sont encore plus précis, et par conséquent plus correctes, puisqu'il nous offre la possibilité de se rapprocher le plus possible de la valeur réelle en effectuant 5 itérations.

★ La méthode Newton Raphson

➤ En coordonnées polaires

Le programme qui correspond à cette méthode est le suivant :

```

1  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
2  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
3  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
4  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
5  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
6  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
7  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
8  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
9  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
10 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
11 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
12 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
13 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
14 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
15 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
16 - clc; clear;
17 - [Qinf,Qsup,Vu,Q,P,vect_calit,Y,n] = donne;
18 - V = Vu;
19 - for l = 1 : n;
20 -     Teta(l) = (atan(imag(V(l))/(real(V(l)))));
21 - end;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

Programme Principal de Calcul de l'écoulement de puissance
par la methode de Newton Raphson
Coordonnées Polaires

Réaliser par SADOOR Mohand Arezki et AMMOUR Djamel

Encadrer par Mr. M. RACHEK

```

22 - Tetau(1:n) = Teta(1:n);
23 - [arret,aret] = arret_iteration(n);
24 - vect_2 = vect_calit;
25 - vect_mp = find(vect_2 == 2);
26 - dim_vect_mp = numel (vect_mp);
27 - for invers_mp = 1 : dim_vect_mp;
28 -     P(vect_mp(invers_mp)) = - P(vect_mp(invers_mp));
29 - end;
30 - if (aret == 1);
31 -     conteur1 = 1;
32 -     while conteur1 <= arret;
33 -         NPv = find(vect_2 == 1);
34 -         nbr_pv = numel (NPv);
35 -         if (nbr_pv ==0);
36 -             [P,Q,Pu,Qu,vect_2] = puissance_m(P,Q,V,n,vect_2,Teta,Y);
37 -             [jacobien_a_mp] = jacobien1_mp(Y,Teta,V,n);
38 -             [jacobien_b_mp] = jacobien2_mp (V,Y,vect_2,n,Teta);
39 -             [jacobien_c_mp] = jacobien3_mp (V,Y,vect_2,n,Teta);
40 -             [jacobien_d_mp] = jacobien4_mp(V,Y,n,Teta,vect_2);
41 -             jacobien_mp = [jacobien_a_mp jacobien_b_mp ; jacobien_c_mp jacobien_d_mp];
42 -             [deltaP,deltaQ] = delta_pui_pq(P,Q,Pu,Qu,n);
43 -             [Teta,V] = calcul_v_mp(V,Vu,Teta,Tetau,jacobien_mp,deltaP,deltaQ,n,vect_2);
44 -             [jacobien_mp,P,Q,V,pert,S,Teta] = affiche_reslt_m...
45 -                 (jacobien_mp,P,Q,Y,aret,conteur1,Teta,V,n);
46 -             conteur1 = conteur1 + 1;
47 -         else
48 -             [P,Q,Pu,Qu,vect_2] = puissance_mp(P,Q,V,n,vect_2,Teta,Y,Qinf,Qsup);
49 -             [jacobien_a_mp] = jacobien1_mp(Y,Teta,V,n);
50 -             [jacobien_b_mp] = jacobien2_mp (V,Y,vect_2,n,Teta);
51 -             [jacobien_c_mp] = jacobien3_mp (V,Y,vect_2,n,Teta);
52 -             [jacobien_d_mp] = jacobien4_mp(V,Y,n,Teta,vect_2);
53 -             jacobien_mp = [jacobien_a_mp jacobien_b_mp ; jacobien_c_mp jacobien_d_mp];
54 -             [deltaP,deltaQ] = delta_pui_pq(P,Q,Pu,Qu,n);
55 -             [Teta,V] = calcul_v_mp(V,Vu,Teta,Tetau,jacobien_mp,deltaP,deltaQ,n,vect_2);
56 -             [jacobien_mp,P,Q,V,pert,S,Teta] = affiche_reslt_m...
57 -                 (jacobien_mp,P,Q,Y,aret,conteur1,Teta,V,n);

58 -         conteur1 = conteur1 + 1;
59 -         end;
60 -     end;
61 - else
62 -     if (aret == 2);
63 -         cont = 0;
64 -         deltaP(2:n) = 100;
65 -         deltaQ(2:n) = 100;
66 -         while ((abs (deltaP(2:n))) > arret) ;
67 -             while ((abs(deltaQ(2:n))) > arret);
68 -                 NPv = find(vect_2 == 1);
69 -                 nbr_pv = numel (NPv);
70 -                 if (nbr_pv ==0);
71 -                     [P,Q,Pu,Qu,vect_2] = puissance_m(P,Q,V,n,vect_2,Teta,Y);
72 -                     [jacobien_a_mp] = jacobien1_mp(Y,Teta,V,n);
73 -                     [jacobien_b_mp] = jacobien2_mp (V,Y,vect_2,n,Teta);
74 -                     [jacobien_c_mp] = jacobien3_mp (V,Y,vect_2,n,Teta);
75 -                     [jacobien_d_mp] = jacobien4_mp(V,Y,n,Teta,vect_2);

```



```

76 -     jacobien_mp = [jacobien_a_mp jacobien_b_mp ; jacobien_c_mp jacobien_d_mp];
77 -     [deltaP,deltaQ] = delta_pui_pq(P,Q,Pu,Qu,n);
78 -     [Teta,n,V] = calcul_v_mp(V,Vu,Teta,Tetau,jacobien_mp,deltaP,deltaQ,n,vect_2);
79 -     [jacobien_mp,P,Q,V,pert,Teta,S,deltaP,deltaQ] = affiche_reslt_mp...
80 -         (jacobien_mp,P,Y,deltaP,deltaQ,Q,cont,aret,Teta,V,n);
81 -     cont = cont + 1;
82 -     else
83 -         [P,Q,Pu,Qu,vect_2] = puissance_mp(P,Q,V,n,vect_2,Teta,Y,Qinf,Qsup);
84 -         [jacobien_a_mp] = jacobien1_mp(Y,Teta,V,n);
85 -         [jacobien_b_mp] = jacobien2_mp(V,Y,vect_2,n,Teta);
86 -         [jacobien_c_mp] = jacobien3_mp(V,Y,vect_2,n,Teta);
87 -         [jacobien_d_mp] = jacobien4_mp(V,Y,n,Teta,vect_2);
88 -         jacobien_mp = [jacobien_a_mp jacobien_b_mp ; jacobien_c_mp jacobien_d_mp];
89 -         [deltaP,deltaQ] = delta_pui_pq(P,Q,Pu,Qu,n);
90 -         [Teta,n,V] = calcul_v_mp(V,Vu,Teta,Tetau,jacobien_mp,deltaP,deltaQ,n,vect_2);
91 -         [jacobien_mp,P,Q,V,pert,Teta,S,deltaP,deltaQ] = affiche_reslt_mp...
92 -             (jacobien_mp,P,Y,deltaP,deltaQ,Q,cont,aret,Teta,V,n);
93 -         cont = cont + 1;
94 -         end;
95 -     end;
96 - end;
97 - end;
98 - end;

```

Nous allons appliquer ce programme sur un reseau de 3 nœuds, avec 5 itérations. Les angles sont affichées en radian.

Les données sont les suivantes:

➤ **Pour le nœud 1 :**

$$V_1 = 1.02 \text{ pu}, P_1 = 0, Q_1 = 0, \theta_1 = 0. \text{ (nœud bilan)}$$

➤ **Pour le nœud 2 :**

$$V_2 = 1 \text{ pu}, P_2 = -0.25, Q_2 = 0.25, \theta_2 = 0 \text{ (nœud PQ)}$$

➤ **Pour le nœud 3 :**

$$V_3 = 1.02 \text{ pu}, P_3 = 0.5, Q_3 = 0, \theta_3 = 0. \text{ (nœud PV)}.$$

On a :

la matrice Y_{bus} est la suivante

$Y =$

$$\begin{array}{rrrr}
 0.4740 - 2.4280i & -0.4740 + 2.4500i & & 0 \\
 -0.4740 + 2.4500i & 1.1420 - 4.7000i & -0.6680 + 2.2970i & \\
 0 & -0.6680 + 2.2970i & 0.6680 - 2.2720i &
 \end{array}$$

Après avoir effectué 1 itération on aura :

la matrice jacobienne finale est la suivante

4.8419	-2.3429	1.1192
-2.3429	2.3429	-0.6814
-1.1648	0.6814	4.5581

l'angle de déphasage θ_1 finale de la tension au noeud numero 1 est : 0

pour le noeud bilan on a $V(1) = 1.02$

pour le noeud bilan on a $P(1) = 0$

pour le noeud bilan on a $Q(1) = 0$

la puissance P finale du noeud numero 2 est : -0.02284

la puissance Q finale du noeud numero 2 est : -0.14194

la tension V finale du noeud numero 2 est : $1.0575 + 0.098471i$

l'angle de déphasage θ_2 finale de la tension au noeud numero 2 est : 5.3197

la puissance P finale du noeud numero 3 est : 0.013627

la puissance Q finale du noeud numero 3 est : 0.020849

la tension V finale du noeud numero 3 est : $0.9687 + 0.3194i$

l'angle de déphasage θ_3 finale de la tension au noeud numero 3 est : 18.2486

La matrice des puissances $S(p)$ de notre réseau est la suivante

0.2642 + 0.0462i	0.2642 + 0.0462i	0
-0.2695 - 0.0734i	0.2391 - 0.4011i	0.5086 - 0.3277i
0	-0.5464 + 0.1975i	-0.5464 + 0.1975i

La matrice de pertes de puissances dans notre reseau est

0	-0.0053 - 0.0272i	0
-0.0053 - 0.0272i	0	-0.0379 - 0.1302i
0	-0.0379 - 0.1302i	0

Après avoir effectué 2 itérations on aura :

La matrice jacobienne finale est la suivante

4.9538	-2.2634	0.9878
-2.5873	2.5873	-0.1399
-1.5273	1.2621	5.3196

L'angle de déphasage $teta1$ finale de la tension au nœud numéro 1 est : 0

Pour le nœud bilan on a $V(1) = 1.02$

pour le nœud bilan on a $P(1) = 0$

pour le noeud bilan on a $Q(1) = 0$

la puissance P finale du noeud numero 2 est : -0.23906

la puissance Q finale du noeud numero 2 est : 0.34809

la tension V finale du noeud numero 2 est : $1.0154+0.015169i$

l'angle de déphasage $teta2$ finale de la tension au noeud numero 2 est : 0.85584

la puissance P finale du noeud numero 3 est : 0.5464

la puissance Q finale du noeud numero 3 est : -0.22349

la tension V finale du noeud numero 3 est : $1.0195+0.032779i$

l'angle de déphasage $teta3$ finale de la tension au noeud numero 3 est : 1.8416

La matrice des puissances $S(p)$ de notre reseau est la suivant

$$\begin{array}{ccc} 0.0357 - 0.0187i & 0.0357 - 0.0187i & 0 \\ -0.0358 + 0.0181i & 0.0080 + 0.0162i & 0.0438 - 0.0019i \\ 0 & -0.0441 + 0.0011i & -0.0441 + 0.0011i \end{array}$$

La matrice de pertes de puissances dans notre reseau est

$$1.0e-003 *$$

$$\begin{array}{ccc} 0 & -0.1189 - 0.6146i & 0 \\ -0.1189 - 0.6146i & 0 & -0.2180 - 0.7496i \\ 0 & -0.2180 - 0.7496i & 0 \end{array}$$

après avoir effectué 3 itérations on aura :

la matrice jacobienne finale est la suivante

$$\begin{array}{ccc} 4.9121 & -2.3671 & 1.1519 \\ -2.3909 & 2.3909 & -0.6410 \\ -1.1858 & 0.7328 & 4.7094 \end{array}$$

l'angle de déphasage $teta1$ finale de la tension au noeud numero 1 est : 0

pour le noeud bilan on a $V(1) = 1.02$

pour le noeud bilan on a $P(1) = 0$

pour le noeud bilan on a $Q(1) = 0$

la puissance P finale du noeud numero 2 est : -0.0080221

la puissance Q finale du noeud numero 2 est : -0.064683

la tension V finale du noeud numero 2 est : $1.0707+0.11514i$

l'angle de déphasage $teta2$ finale de la tension au noeud numero 2 est : 6.1381

la puissance P finale du noeud numero 3 est : 0.044064

la puissance Q finale du noeud numero 3 est : -0.027155

la tension V finale du noeud numero 3 est : $0.95786+0.35059i$

l'angle de déphasage $teta3$ finale de la tension au noeud numero 3 est : 20.1034

La matrice des puissances $S(p)$ de notre reseau est la suivante

$$\begin{array}{ccc} 0.3122 + 0.0709i & 0.3122 + 0.0709i & 0 \\ -0.3197 - 0.1097i & 0.2266 - 0.5019i & 0.5463 - 0.3922i \\ 0 & -0.5918 + 0.2356i & -0.5918 + 0.2356i \end{array}$$

La matrice de pertes de puissances dans notre reseau est

$$\begin{array}{ccc} 0 & -0.0075 - 0.0388i & 0 \\ -0.0075 - 0.0388i & 0 & -0.0455 - 0.1566i \\ 0 & -0.0455 - 0.1566i & 0 \end{array}$$

après avoir effectué 4 itérations on aura :

la matrice jacobienne finale est la suivante

$$\begin{array}{ccc} 5.0025 & -2.2713 & 1.0193 \\ -2.6254 & 2.6254 & -0.0958 \\ -1.5508 & 1.3209 & 5.4765 \end{array}$$

l'angle de déphasage θ_1 finale de la tension au noeud numero 1 est : 0

pour le noeud bilan on a $V(1) = 1.02$

pour le noeud bilan on a $P(1) = 0$

pour le noeud bilan on a $Q(1) = 0$

la puissance P finale du noeud numero 2 est : -0.22658

la puissance Q finale du noeud numero 2 est : 0.44738

la tension V finale du noeud numero 2 est : $1.0303+0.030332i$

l'angle de déphasage θ_2 finale de la tension au noeud numero 2 est : 1.6862

la puissance P finale du noeud numero 3 est : 0.59184

la puissance Q finale du noeud numero 3 est : -0.26165

la tension V finale du noeud numero 3 est : $1.018+0.064064i$

l'angle de déphasage θ_3 finale de la tension au noeud numero 3 est : 3.601

La matrice des puissances $S(p)$ de notre reseau est la suivante

$$\begin{array}{ccc} 0.0808 + 0.0112i & 0.0808 + 0.0112i & 0 \\ -0.0813 - 0.0137i & -0.0084 - 0.0641i & 0.0729 - 0.0504i \\ 0 & -0.0737 + 0.0474i & -0.0737 + 0.0474i \end{array}$$

La matrice de pertes de puissances dans notre reseau est

$$\begin{array}{ccc} 0 & -0.0005 - 0.0025i & 0 \\ -0.0005 - 0.0025i & 0 & -0.0009 - 0.0030i \\ 0 & -0.0009 - 0.0030i & 0 \end{array}$$

après avoir effectué 5 itérations on aura :

la matrice jacobienne finale est la suivante

$$\begin{array}{ccc} 4.9798 & -2.3903 & 1.1853 \\ -2.4372 & 2.4372 & -0.6027 \\ -1.2050 & 0.7826 & 4.8584 \end{array}$$

l'angle de déphasage $teta1$ finale de la tension au noeud numero 1 est : 0

pour le noeud bilan on a $V(1) = 1.02$

pour le noeud bilan on a $P(1) = 0$

pour le noeud bilan on a $Q(1) = 0$

la puissance P finale du noeud numero 2 est : 0.0084158

la puissance Q finale du noeud numero 2 est : 0.014129

la tension V finale du noeud numero 2 est : $1.0833+0.13175i$

l'angle de déphasage $teta2$ finale de la tension au noeud numero 2 est : 6.9343

la puissance P finale du noeud numero 3 est : 0.073735

la puissance Q finale du noeud numero 3 est : -0.073411

la tension V finale du noeud numero 3 est : $0.94649+0.38022i$

l'angle de déphasage $teta3$ finale de la tension au noeud numero 3 est : 21.8861

La matrice des puissances $S(p)$ de notre reseau est la suivante

$$\begin{bmatrix} 0.3598 + 0.0945i & 0.3598 + 0.0945i & 0 \\ -0.3700 - 0.1468i & 0.2126 - 0.6039i & 0.5825 - 0.4571i \\ 0 & -0.6363 + 0.2723i & -0.6363 + 0.2723i \end{bmatrix}$$

La matrice de pertes de puissances dans notre reseau est

$$\begin{bmatrix} 0 & -0.0101 - 0.0523i & 0 \\ -0.0101 - 0.0523i & 0 & -0.0537 - 0.1848i \\ 0 & -0.0537 - 0.1848i & 0 \end{bmatrix}$$

➤ *En coordonnées rectangulaires :*

Le programme principal est donné ci-dessous, nous allons essayer de traiter un réseau de 3 nœuds dont un nœud PV, en exécutant 5 itérations.

```

1  ****
2  ****
3  ****      Programme Principal de Calcul de l'écoulement de puissance
4  ****      par la methode de Newton Raphson
5  ****      Coordonnées rectangulaires
6  ****
7  ****
8  ****
9  ****      Réaliser par SÂDOUR Mohand Areski et AMMOUR Djamel
10 ****
11 ****
12 ****
13 ****      Encadrer par Mr. M. RACHEK
14 ****
15 ****
16 - clc; clear;
17 - [Qinf,Qsup,Vu,Q,P,vect_calit,Y,n] = donne;
18 - V(1) = Vu(1);
19 -   V(2:n) = 1;
20 - for l = 1 : n;
21 -     e(l)= real(V(l));
22 -     f(l)= imag(V(l));
23 - end;
24 - [arret,aret] = arret_iteration(n);
25 - if (aret == 1);
26 -     conteur1 = 1;
27 -     vect_2 = vect_calit;
28 -     while conteur1 <= arret;
29 -     NPv = find(vect_2 == 1);
30 -     nbr_pv = numel (NPv);
31 -     if (nbr_pv ==0);
32 -     [P,Q,Pu,Qu] = puissanc(n,Y,e,f,vect_2,P,Q);
33 -     [matrice_a] = jacobien_1(n,Y,e,f);
34 -     [matrice_b] = jacobien_2(n,Y,e,f);
35 -     [matrice_c] = jacobien_3(n,Y,e,f,vect_2);
36 -     [matrice_d] = jacobien_4(n,Y,e,f,vect_2);
37 -     matrice_fin = [matrice_a matrice_b ; matrice_c matrice_d];

```

```

38 - [deltaP,deltaQ] = delta_pui_pq(P,Q,Pu,Qu,n);
39 - [e,f,V] = calcul_V_pq (matrice_fin,e,f,n,deltaP,deltaQ);
40 - [matrice_fin,P,S,pert,Q,V] = affiche_reslt(matrice_fin,P,Y,Q,f,e,V,n);
41 - conteur1 = conteur1 + 1;
42 - else
43 - [P,Q,Pu,Qu,vect_2] = puissances(n,Y,e,f,vect_2,P,Q,Qinf,Qsup);
44 - [matrice_a] = jacobien_1(n,Y,e,f);
45 - [matrice_b] = jacobien_2(n,Y,e,f);
46 - [matrice_c] = jacobien_3(n,Y,e,f,vect_2);
47 - [matrice_d] = jacobien_4(n,Y,e,f,vect_2);
48 - [matrice_e] = jacobien_5(n,e,vect_2);
49 - [matrice_f] = jacobien_6(n,f,vect_2);
50 - matrice_int1=[matrice_c; matrice_e];
51 - matrice_int2=[matrice_d; matrice_f];
52 - matrice_fin=[matrice_a matrice_b; matrice_int1 matrice_int2];
53 - [deltaP,deltaQ,deltaV,Vu] = delta_pui_pv(P,Q,Pu,Qu,V,Vu,n);
54 - [e,f,V,delQP] = calcul_V (matrice_fin,n,V,e,f,deltaP,deltaQ,deltaV,vect_2);
55 - [matrice_fin,P,S,pert,Q,V] = affiche_reslt(matrice_fin,P,Y,Q,f,e,V,n);
56 - conteur1 = conteur1 + 1;
57 - end;
58 - end;
59 - end;
60 - if (aret == 2);
61 -     deltaP = 100;
62 -     deltaQ = 100;
63 -     deltaV = 100;
64 -     while (deltaP > arret) & (deltaQ > arret);
65 - NPv = find(vect_2 == 1);
66 - nbr_pv = numel (NPv);
67 - if (nbr_pv ==0);
68 - [P,Q,Pu,Qu] = puissanc(n,Y,e,f,vect_2,P,Q);
69 - [matrice_a] = jacobien_1(n,Y,e,f);
70 - [matrice_b] = jacobien_2(n,Y,e,f);
71 - [matrice_c] = jacobien_3(n,Y,e,f,vect_2);
72 - [matrice_d] = jacobien_4(n,Y,e,f,vect_2);
73 - matrice_fin = [matrice_a matrice_b ; matrice_c matrice_d];

74 - [deltaP,deltaQ] = delta_pui_pq(P,Q,Pu,Qu,n);
75 - [e,f,V] = calcul_V_pq (matrice_fin,e,f,n,deltaP,deltaQ);
76 - [matrice_fin,P,S,pert,Q,V] = affiche_reslt(matrice_fin,P,Y,Q,f,e,V,n);
77 - else
78 - [P,Q,Pu,Qu,vect_2] = puissances(n,Y,e,f,vect_2,P,Q,Qinf,Qsup);
79 - [matrice_a] = jacobien_1(n,Y,e,f);
80 - [matrice_b] = jacobien_2(n,Y,e,f);
81 - [matrice_c] = jacobien_3(n,Y,e,f,vect_2);
82 - [matrice_d] = jacobien_4(n,Y,e,f,vect_2);
83 - [matrice_e] = jacobien_5(n,e,vect_2);
84 - [matrice_f] = jacobien_6(n,f,vect_2);
85 - matrice_int1=[matrice_c; matrice_e];
86 - matrice_int2=[matrice_d; matrice_f];
87 - matrice_fin=[matrice_a matrice_b; matrice_int1 matrice_int2];
88 - [deltaP,deltaQ,deltaV,Vu] = delta_pui_pv(P,Q,Pu,Qu,V,Vu,n);
89 - [e,f,V,delQP] = calcul_V (matrice_fin,n,V,e,f,deltaP,deltaQ,deltaV,vect_2);
90 - [matrice_fin,P,S,pert,Q,V] = affiche_reslt(matrice_fin,P,Y,Q,f,e,V,n);
91 - end;
92 - end;
93 - end;

```


Les données de l'exemple à traiter sont les suivants :

<i>impédances</i>	<i>1 - 2</i>	<i>1 - 3</i>	<i>2 - 3</i>
	$0.08+j0.24$	$0.02+j0.06$	$0.06+j0.18$

	<i>Tension (V)</i>	<i>P générée</i>	<i>Q générée</i>	<i>P consommée</i>	<i>Q consommée</i>
<i>1</i>	$1.06+j0.00$	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
<i>2</i>	$1+j0.00$	<i>0.2</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
<i>3</i>	$1+j0.00$	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0.6</i>	<i>0.25</i>

La matrice Ybus est la suivante :

```

6.2500 -18.7500i -1.2500 + 3.7500i -5.0000 +15.0000i
-1.2500 + 3.7500i 2.9167 - 8.7500i -1.6667 + 5.0000i
-5.0000 +15.0000i -1.6667 + 5.0000i 6.6667 -20.0000i

```

après avoir effectué 1 itérations on aura :

```

la matrice jacobienne finale est la suivante
2.8417 -1.6667 8.9750 -5.0000
-1.6667 6.3667 -5.0000 20.9000
-5.0000 19.1000 1.6667 -6.9667
2.0000 0 0 0

```

pour le noeud bilan on a $V(1) = 1.06$

pour le noeud bilan on a $P(1) = 0$

pour le noeud bilan on a $Q(1) = 0$

la puissance P finale du noeud numero 2 est : -0.075

la puissance Q finale du noeud numero 2 est : -0.225

la tension V finale du noeud numero 2 est : $1+0.026604i$

l'angle de déphasage teta2 finale de la tension au noeud numero 2 est : 1.524

la puissance P finale du noeud numero 3 est : -0.3

la puissance Q finale du noeud numero 3 est : -0.9

la tension V finale du noeud numero 3 est : $1.0259+0.026604i$

l'angle de déphasage teta3 finale de la tension au noeud numero 3 est : 1.4855

La matrice des puissances $S(p)$ de notre reseau est la suivante

```

-0.7889 - 0.6042i  -0.1853 - 0.2032i  -0.6037 - 0.4009i
 0.1697 + 0.1964i   0.2094 + 0.3271i   0.0397 + 0.1307i
 0.5742 + 0.4032i  -0.0409 - 0.1341i   0.5333 + 0.2691i

```

La matrice de pertes de puissances dans notre reseau est

```

      0          -0.0156 - 0.0069i  -0.0295 + 0.0023i
-0.0156 - 0.0069i      0          -0.0011 - 0.0034i
-0.0295 + 0.0023i  -0.0011 - 0.0034i      0

```

après avoir effectué 2 itérations on aura :

la matrice jacobienne finale est la suivante

```

 2.6655  -1.5336   9.2154  -5.0443
-1.5768   6.5792  -5.1739  21.2104
-5.1739  20.1810   1.5768  -6.0355
 2.0000      0    0.0532      0

```

pour le noeud bilan on a $V(1) = 1.06$

pour le noeud bilan on a $P(1) = 0$

pour le noeud bilan on a $Q(1) = 0$

la puissance P finale du noeud numero 2 est : -0.0081098

la puissance Q finale du noeud numero 2 est : -0.38833

la tension V finale du noeud numero 2 est : 0.99987+0.018235i

l'angle de déphasage $teta2$ finale de la tension au noeud numero 2 est : 1.0448

la puissance P finale du noeud numero 3 est : 0.29258

la puissance Q finale du noeud numero 3 est : -0.5208

la tension V finale du noeud numero 3 est : 1.0904+0.018235i

l'angle de déphasage $teta3$ finale de la tension au noeud numero 3 est : 0.95804

La matrice des puissances $S(p)$ de notre reseau est la suivante :

```

-0.2807 + 0.3659i  -0.1522 - 0.2149i  -0.1286 + 0.5807i
 0.1398 + 0.2053i   0.2825 + 0.6609i   0.1427 + 0.4556i
 0.1423 - 0.5952i  -0.1564 - 0.4966i  -0.0141 - 1.0918i

```

La matrice de pertes de puissances dans notre reseau est

```

      0      -0.0123 - 0.0096i   0.0137 - 0.0145i
-0.0123 - 0.0096i      0      -0.0137 - 0.0410i
 0.0137 - 0.0145i  -0.0137 - 0.0410i      0

```

après avoir effectué 3 itérations on aura :

la matrice jacobienne finale est la suivante

```

 2.5990   -1.5753   9.5032   -5.0297
-1.7262    7.4816  -5.4826   21.1121
-5.4826   22.7488    1.7262   -6.3282
 1.9997      0     0.0365      0

```

pour le noeud bilan on a $V(1) = 1.06$

pour le noeud bilan on a $P(1) = 0$

pour le noeud bilan on a $Q(1) = 0$

la puissance P finale du noeud numero 2 est : -0.14494

la puissance Q finale du noeud numero 2 est : -0.70395

la tension V finale du noeud numero 2 est : $1.0004+0.0091078i$

l'angle de déphasage $teta2$ finale de la tension au noeud numero 2 est : 0.52164

la puissance P finale du noeud numero 3 est : 0.61395

la puissance Q finale du noeud numero 3 est : 0.90291

la tension V finale du noeud numero 3 est : $1.0644+0.0091078i$

l'angle de déphasage $teta3$ finale de la tension au noeud numero 3 est : 0.49024

La matrice des puissances $S(p)$ de notre reseau est la suivante

```

-0.2366 - 0.1063i  -0.1152 - 0.2250i  -0.1213 + 0.1187i
 0.1068 + 0.2134i   0.2107 + 0.5348i   0.1039 + 0.3215i
 0.1229 - 0.1182i  -0.1108 - 0.3420i   0.0121 - 0.4601i

```

La matrice de pertes de puissances dans notre reseau est

```

      0          -0.0084 - 0.0117i   0.0015 + 0.0005i
-0.0084 - 0.0117i      0          -0.0068 - 0.0205i
 0.0015 + 0.0005i  -0.0068 - 0.0205i      0

```

après avoir effectué 4 itérations on aura :

la matrice jacobienne finale est la suivante

```

 2.6908  -1.6217   9.3351  -5.0170
-1.7285   7.1796  -5.3373  21.0080
-5.3373  21.6906   1.7285  -6.6485
 2.0007      0    0.0182      0

```

pour le noeud bilan on a $V(1) = 1.06$

pour le noeud bilan on a $P(1) = 0$

pour le noeud bilan on a $Q(1) = 0$

la puissance P finale du noeud numero 2 est : -0.14219

la puissance Q finale du noeud numero 2 est : -0.55697

la tension V finale du noeud numero 2 est : 1.0002-0.016925i

l'angle de déphasage $teta2$ finale de la tension au noeud numero 2 est : -0.9694

la puissance P finale du noeud numero 3 est : 0.27956

la puissance Q finale du noeud numero 3 est : 0.36568

la tension V finale du noeud numero 3 est : 0.9997-0.016925i

l'angle de déphasage $teta3$ finale de la tension au noeud numero 3 est : -0.96991

La matrice des puissances $S(p)$ de notre reseau est la suivante

```
-0.0624 - 1.3085i  -0.0119 - 0.2600i  -0.0505 - 1.0485i
 0.0154 + 0.2452i   0.0145 + 0.2425i  -0.0009 - 0.0026i
 0.0643 + 0.9880i   0.0009 + 0.0026i   0.0653 + 0.9906i
```

La matrice de pertes de puissances dans notre reseau est

```
      0      0.0035 - 0.0149i  0.0139 - 0.0604i
0.0035 - 0.0149i      0      -0.0000 - 0.0000i
0.0139 - 0.0604i -0.0000 - 0.0000i      0
```

après avoir effectué 5 itérations on aura :

la matrice jacobienne finale est la suivante

```
 2.9281  -1.7517   8.9030  -4.9729
-1.7508   6.4469  -4.9703  20.7037
-4.9703  19.0587   1.7508  -7.5594
 2.0005      0  -0.0338      0
```

pour le noeud bilan on a $V(1) = 1.06$

pour le noeud bilan on a $P(1) = 0$

pour le noeud bilan on a $Q(1) = 0$

la puissance P finale du noeud numero 2 est : -0.14072

la puissance Q finale du noeud numero 2 est : -0.19805

la tension V finale du noeud numero 2 est : 1.0004-0.0074423i

l'angle de déphasage $teta2$ finale de la tension au noeud numero 2 est : -0.42623

la puissance P finale du noeud numero 3 est : -0.57

la puissance Q finale du noeud numero 3 est : -0.81285

la tension V finale du noeud numero 3 est : 1.0256-0.0074423i

l'angle de déphasage $teta3$ finale de la tension au noeud numero 3 est : -0.41575

La matrice des puissances $S(p)$ de notre reseau est la suivante

La matrice des puissances $S(p)$ de notre reseau est la suivante

```

-0.1133 - 0.8329i  -0.0494 - 0.2467i  -0.0639 - 0.5862i
 0.0483 + 0.2325i   0.0913 + 0.3582i   0.0430 + 0.1257i
 0.0660 + 0.5667i  -0.0440 - 0.1289i   0.0219 + 0.4378i

```

La matrice de pertes de puissances dans notre reseau est

```

      0      -0.0010 - 0.0142i   0.0020 - 0.0195i
-0.0010 - 0.0142i      0      -0.0011 - 0.0032i
 0.0020 - 0.0195i  -0.0011 - 0.0032i      0

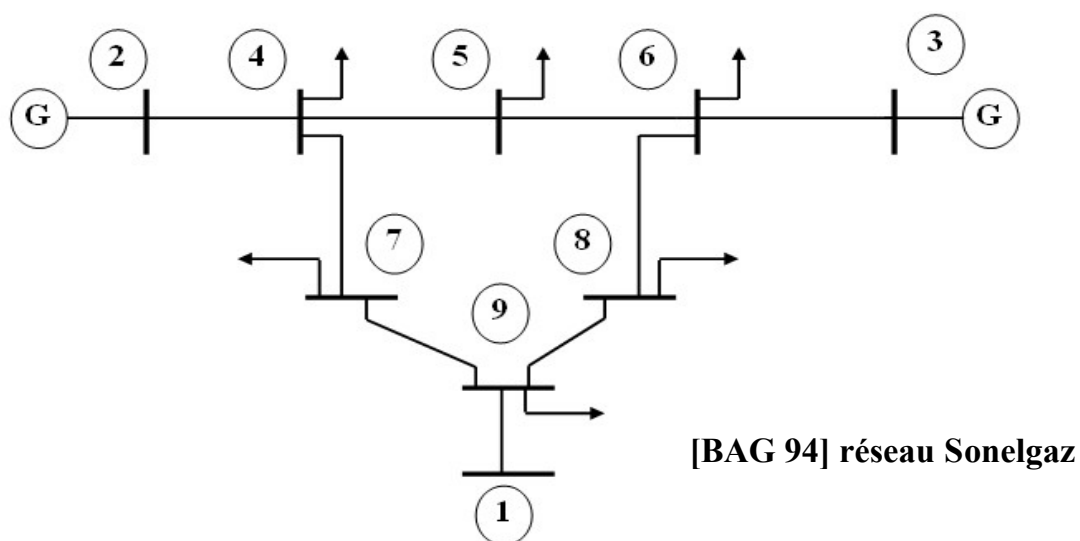
```

Malgré que les résultats donnés par les différents testes effectués sur les trois programmes sont jugés satisfaisant comparés à ceux donnés par J. C. Das et L. BAGHLI, Mais nous avons décidé d'effectuer un dernier teste plus complexe sur un réseau de 9 nœuds pour 3 itérations.

- Analyse de l'écoulement de puissance pour un réseau à 9 noeuds

Du moment que l'algorithme de Newton Raphson est réputé pour sa stabilité, et sa bonne convergence nous avons choisit d'appliquer ce dernier exemple sur celui de Gauss Seidel.

Les données concernant ce réseau :



<i>Les impédances</i>	<i>2 - 4</i>	<i>4 - 5</i>	<i>5 - 6</i>	<i>3 - 6</i>
	$0.5+j0.0625$	$0.0085+j0.072$	$0.0119+j0.1008$	$0+j0.0506$

<i>1 - 9</i>	<i>4 - 7</i>	<i>6 - 8</i>	<i>9 - 7</i>	<i>8 - 9</i>
$0+j0.0576$	$0.0320+j0.161$	$0.039+j0.17$	$0.01+j0.085$	$0.017+j0.092$

	<i>P</i>	<i>Q</i>	<i>V</i>
<i>1 (bilan)</i>	<i>0.56453</i>	<i>0.72072</i>	<i>1</i>
<i>2 (PQ)</i>	<i>1.650</i>	<i>0.55809</i>	<i>1</i>
<i>3(PQ)</i>	<i>1.000</i>	<i>0.400</i>	<i>1</i>
<i>4 (PQ)</i>	<i>0.000</i>	<i>0.000</i>	<i>1</i>
<i>5(PV)</i>	<i>1.000</i>	<i>0.35</i>	<i>1</i>
<i>6 (PQ)</i>	<i>0.000</i>	<i>0.000</i>	<i>1</i>
<i>7 (PV)</i>	<i>1.25</i>	<i>0.5</i>	<i>1</i>
<i>8(PV)</i>	<i>0.9</i>	<i>0.3</i>	<i>1</i>
<i>9 (PQ)</i>	<i>0.00</i>	<i>0.00</i>	<i>1</i>

La matrice Ybus :

Columns 1 through 5

0 -17.3611i	0	0	0	0
0	0 -16.0000i	0	0 +16.0000i	0
0	0	0 -17.0648i	0	0
0	0 +16.0000i	0	2.8047 -35.6731i	-1.6171 +13.6980i
0	0	0	-1.6171 +13.6980i	2.7722 -23.4822i
0	0	0 +17.0648i	0	-1.1551 + 9.7843i
0	0	0	-1.1876 + 5.9751i	0
0	0	0	0	0
0 +17.3611i	0	0	0	0

Columns 6 through 9

0	0	0	0 +17.3611i
0	0	0	0
0 +17.0648i	0	0	0
0	-1.1876 + 5.9751i	0	0
-1.1551 + 9.7843i	0	0	0
2.4371 -32.4374i	0	-1.2820 + 5.5882i	0
0	2.5528 -17.5792i	0	-1.3652 +11.6041i
-1.2820 + 5.5882i	0	3.2242 -16.0989i	-1.9422 +10.5107i
0	-1.3652 +11.6041i	-1.9422 +10.5107i	3.3074 -39.4759i

après avoir effectué 1 itérations on aura :

la matrice jacobienne finale est la suivante

Columns 1 through 9

0	0	0	0	0	0	0	0	16.0000
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	2.8047	-1.6171	0	-1.1876	0	0	-16.0000
0	0	-1.6171	2.7722	-1.1551	0	0	0	0
0	0	0	-1.1551	2.4371	0	-1.2820	0	0
0	0	-1.1876	0	0	2.5528	0	-1.3652	0
0	0	0	0	-1.2820	0	3.2242	-1.9422	0
0	0	0	0	0	-1.3652	-1.9422	3.3074	0
16.0000	0	-16.0000	0	0	0	0	0	0
0	17.0648	0	0	-17.0648	0	0	0	0
-16.0000	0	35.6731	-13.6980	0	-5.9751	0	0	0
0	-17.0648	0	-9.7843	32.4374	0	-5.5882	0	0
0	0	0	0	0	-11.6041	-10.5107	39.4759	0
0	0	0	2.0000	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	2.0000	0	0	0
0	0	0	0	0	0	2.0000	0	0

Columns 10 through 16

0	-16.0000	0	0	0	0	0
17.0648	0	0	-17.0648	0	0	0
0	35.6731	-13.6980	0	-5.9751	0	0
0	-13.6980	23.4822	-9.7843	0	0	0
-17.0648	0	-9.7843	32.4374	0	-5.5882	0
0	-5.9751	0	0	17.5792	0	-11.6041
0	0	0	-5.5882	0	16.0989	-10.5107
0	0	0	0	-11.6041	-10.5107	39.4759
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	-2.8047	1.6171	0	1.1876	0	0
0	0	1.1551	-2.4371	0	1.2820	0
0	0	0	0	1.3652	1.9422	-3.3074
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0

pour le noeud bilan on a $V(1) = 1$
pour le noeud bilan on a $P(1) = 0.56453$
pour le noeud bilan on a $Q(1) = 0.72072$
la puissance P finale du noeud numero 2 est : 0
la puissance Q finale du noeud numero 2 est : 0
la tension V finale du noeud numero 2 est : $0.92389-0.19687i$
l'angle de déphasage θ_2 finale de la tension au noeud numero 2 est : -12.0294
la puissance P finale du noeud numero 3 est : 0
la puissance Q finale du noeud numero 3 est : 0
la tension V finale du noeud numero 3 est : $0.93877-0.13051i$
l'angle de déphasage θ_3 finale de la tension au noeud numero 3 est : -7.9149
la puissance P finale du noeud numero 4 est : 0
la puissance Q finale du noeud numero 4 est : $-1.7764e-015$
la tension V finale du noeud numero 4 est : $0.95877-0.093749i$
l'angle de déphasage θ_4 finale de la tension au noeud numero 4 est : -5.5847
la puissance P finale du noeud numero 5 est : 0
la puissance Q finale du noeud numero 5 est : 0
la tension V finale du noeud numero 5 est : $1-0.19687i$
l'angle de déphasage θ_5 finale de la tension au noeud numero 5 est : -11.1376
la puissance P finale du noeud numero 6 est : $2.2204e-016$
la puissance Q finale du noeud numero 6 est : $2.6645e-015$
la tension V finale du noeud numero 6 est : $0.96221-0.046764i$
l'angle de déphasage θ_6 finale de la tension au noeud numero 6 est : -2.7824
la puissance P finale du noeud numero 7 est : $-2.2204e-016$
la puissance Q finale du noeud numero 7 est : $-1.7764e-015$
la tension V finale du noeud numero 7 est : $1-0.13051i$
l'angle de déphasage θ_7 finale de la tension au noeud numero 7 est : -7.4359
la puissance P finale du noeud numero 8 est : $2.2204e-016$
la puissance Q finale du noeud numero 8 est : 0
la tension V finale du noeud numero 8 est : $1-0.093749i$
l'angle de déphasage θ_8 finale de la tension au noeud numero 8 est : -5.3558
la puissance P finale du noeud numero 9 est : 0
la puissance Q finale du noeud numero 9 est : 0
la tension V finale du noeud numero 9 est : $0.99821-0.071914i$
l'angle de déphasage θ_9 finale de la tension au noeud numero 9 est : -4.1206

La matrice des puissances $S(p)$ de notre reseau est la suivante

Columns 1 through 5

1.2485 - 0.0311i	0	0	0	0
0	-1.4145 + 0.8405i	0	-1.4145 + 0.8405i	0
0	0	-1.2895 + 0.5620i	0	0
0	1.5297 - 0.6898i	0	3.2618 - 0.2777i	1.4556 + 0.2429i
0	0	0	-1.5576 - 0.1068i	-3.1087 - 0.0053i
0	0	1.3565 - 0.4517i	0	1.4644 + 0.1182i
0	0	0	-0.2951 - 0.1676i	0
0	0	0	0	0
-1.2440 + 0.1208i	0	0	0	0

Columns 6 through 9

0	0	0	1.2485 - 0.0311i
0	0	0	0
-1.2895 + 0.5620i	0	0	0
0	0.2766 + 0.1691i	0	0
-1.5510 + 0.1014i	0	0	0
3.1272 - 0.2029i	0	0.3063 + 0.1307i	0
0	-0.9698 - 0.0193i	0	-0.6747 + 0.1483i
-0.3252 - 0.1218i	0	-0.5559 - 0.0763i	-0.2308 + 0.0454i
0	0.6770 - 0.1082i	0.2309 - 0.0403i	-0.3362 - 0.0277i

La matrice de pertes de puissances dans notre reseau est

Columns 1 through 5

0	0	0	0	0
0	0	0	0.1151 + 0.1507i	0
0	0	0	0	0
0	0.1151 + 0.1507i	0	0	-0.1020 + 0.1361i
0	0	0	-0.1020 + 0.1361i	0
0	0	0.0670 + 0.1103i	0	-0.0866 + 0.2196i
0	0	0	-0.0185 + 0.0015i	0
0	0	0	0	0
0.0045 + 0.0897i	0	0	0	0

Columns 6 through 9

0	0	0	0.0045 + 0.0897i
0	0	0	0
0.0670 + 0.1103i	0	0	0
0	-0.0185 + 0.0015i	0	0
-0.0866 + 0.2196i	0	0	0
0	0	-0.0188 + 0.0089i	0
0	0	0	0.0023 + 0.0401i
-0.0188 + 0.0089i	0	0	0.0001 + 0.0051i
0	0.0023 + 0.0401i	0.0001 + 0.0051i	0

après avoir effectué 2 itérations on aura :

la matrice jacobienne finale est la suivante

Columns 1 through 9

1.5000	0	-3.1500	0	0	0	0	0	15.3403
0	0.7980	0	0	-2.2272	0	0	0	0
-1.5000	0	9.2001	-2.8346	0	-1.6988	0	0	-15.3403
0	0	-4.3139	4.6243	-3.0814	0	0	0	0
0	-0.7980	0	-1.5690	6.9303	0	-1.4949	0	0
0	0	-1.9674	0	0	3.9989	0	-2.8797	0
0	0	0	0	-1.8059	0	4.2933	-2.9276	0
0	0	0	0	0	-2.1972	-2.6946	5.7954	0
14.2241	0	-14.7822	0	0	0	0	0	-4.8000
0	15.6200	0	0	-16.0200	0	0	0	0
-15.3403	0	33.4759	-12.9816	0	-5.6174	0	0	1.5000
0	-16.4200	0	-9.3605	30.6832	0	-5.3171	0	0
0	0	0	0	0	-11.4852	-10.3522	38.9744	0
0	0	0	2.0000	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	2.0000	0	0	0
0	0	0	0	0	0	2.0000	0	0

Columns 10 through 16

0	-14.7822	0	0	0	0	0
16.4200	0	0	-16.0200	0	0	0
0	34.4028	-12.9816	0	-5.6174	0	0
0	-13.3796	21.6618	-9.5569	0	0	0
-16.4200	0	-9.3605	31.5122	0	-5.3171	0
0	-5.8201	0	0	16.8553	0	-11.4259
0	0	0	-5.4681	0	15.4640	-10.3286
0	0	0	0	-11.4852	-10.3522	39.3605
0	3.1500	0	0	0	0	0
-3.6564	0	0	2.2272	0	0	0
0	-2.8668	2.8346	0	1.6988	0	0
0.7980	0	1.5690	-0.7935	0	1.4949	0
0	0	0	0	2.1972	2.6946	-6.4852
0	0	-0.3937	0	0	0	0
0	0	0	0	-0.2610	0	0
0	0	0	0	0	-0.1875	0

pour le noeud bilan on a $V(1) = 1$
 pour le noeud bilan on a $P(1) = 0.56453$
 pour le noeud bilan on a $Q(1) = 0.72072$
 la puissance P finale du noeud numero 2 est : -1.6343
 la puissance Q finale du noeud numero 2 est : -0.19077
 la tension V finale du noeud numero 2 est : $1.0511+0.0036103i$
 l'angle de déphasage θ_2 finale de la tension au noeud numero 2 est : 0.1968
 la puissance P finale du noeud numero 3 est : -1.3939
 la puissance Q finale du noeud numero 3 est : -0.18898
 la tension V finale du noeud numero 3 est : $1.0375+0.0063064i$
 l'angle de déphasage θ_3 finale de la tension au noeud numero 3 est : 0.34826
 la puissance P finale du noeud numero 4 est : 2.9926
 la puissance Q finale du noeud numero 4 est : -0.74122
 la tension V finale du noeud numero 4 est : $1.0238+0.0028069i$
 l'angle de déphasage θ_4 finale de la tension au noeud numero 4 est : 0.15709
 la puissance P finale du noeud numero 5 est : -2.5201
 la puissance Q finale du noeud numero 5 est : 1.8202
 la tension V finale du noeud numero 5 est : $1.0229+0.0036103i$
 l'angle de déphasage θ_5 finale de la tension au noeud numero 5 est : 0.20223
 la puissance P finale du noeud numero 6 est : 2.933
 la puissance Q finale du noeud numero 6 est : -0.54234
 la tension V finale du noeud numero 6 est : $1.0224+0.1678i$
 l'angle de déphasage θ_6 finale de la tension au noeud numero 6 est : 9.3204
 la puissance P finale du noeud numero 7 est : -0.79726
 la puissance Q finale du noeud numero 7 est : 0.50149
 la tension V finale du noeud numero 7 est : $1.0096+0.0063064i$
 l'angle de déphasage θ_7 finale de la tension au noeud numero 7 est : 0.35789
 la puissance P finale du noeud numero 8 est : -0.40897
 la puissance Q finale du noeud numero 8 est : 0.37388
 la tension V finale du noeud numero 8 est : $1.0052+0.0028069i$
 l'angle de déphasage θ_8 finale de la tension au noeud numero 8 est : 0.16
 la puissance P finale du noeud numero 9 est : -0.35818
 la puissance Q finale du noeud numero 9 est : -0.16789
 la tension V finale du noeud numero 9 est : $1.0046-0.022134i$
 l'angle de déphasage θ_9 finale de la tension au noeud numero 9 est : -1.2623

La matrice des puissances $S(p)$ de notre reseau est la suivante

Columns 1 through 5

0.3843 + 0.0790i	0	0	0	0
0	0.0151 - 0.4600i	0	0.0151 - 0.4600i	0
0	0	-2.8576 - 0.2853i	0	0
0	-0.0144 + 0.4480i	0	-0.0655 + 0.3541i	-0.0127 - 0.0114i
0	0	0	0.0127 + 0.0114i	-1.6317 + 0.1949i
0	0	2.7742 + 0.7264i	0	1.6741 + 0.0804i
0	0	0	0.0376 + 0.0815i	0
0	0	0	0	0
-0.3878 - 0.0709i	0	0	0	0

Columns 6 through 9

0	0	0	0.3843 + 0.0790i
0	0	0	0
-2.8576 - 0.2853i	0	0	0
0	-0.0384 - 0.0825i	0	0
-1.6444 + 0.1836i	0	0	0
5.4200 + 0.6429i	0	0.9717 - 0.1638i	0
0	0.3645 - 0.0147i	0	0.3269 - 0.0963i
-0.9054 + 0.3070i	0	-0.6429 + 0.2527i	0.2625 - 0.0543i
0	-0.3225 + 0.1050i	-0.2610 + 0.0608i	-0.9712 + 0.0948i

La matrice de pertes de puissances dans notre reseau est

Columns 1 through 5

0	0	0	0	0
0	0	0	0.0007 - 0.0120i	0
0	0	0	0	0
0	0.0007 - 0.0120i	0	0	-0.0000 + 0.0000i
0	0	0	-0.0000 + 0.0000i	0
0	0	-0.0834 + 0.4411i	0	0.0297 + 0.2639i
0	0	0	-0.0008 - 0.0010i	0
0	0	0	0	0
-0.0035 + 0.0081i	0	0	0	0

Columns 6 through 9

0	0	0	-0.0035 + 0.0081i
0	0	0	0
-0.0834 + 0.4411i	0	0	0
0	-0.0008 - 0.0010i	0	0
0.0297 + 0.2639i	0	0	0
0	0	0.0663 + 0.1432i	0
0	0	0	0.0044 + 0.0087i
0.0663 + 0.1432i	0	0	0.0015 + 0.0065i
0	0.0044 + 0.0087i	0.0015 + 0.0065i	0

après avoir effectué 3 itérations on aura :

la matrice jacobienne finale est la suivante

Columns 1 through 9

-0.0449	0	0.0578	0	0	0	0	0	16.3802
0	-2.8634	0	0	0.1076	0	0	0	0
0.0449	0	2.7448	-1.6171	0	-1.1991	0	0	-16.3802
0	0	-1.6046	1.1544	-1.1462	0	0	0	0
0	2.8634	0	0.4608	2.3546	0	-0.3730	0	0
0	0	-1.1613	0	0	2.8074	0	-1.3051	0
0	0	0	0	-1.2729	0	2.5148	-1.9227	0
0	0	0	0	0	-1.6283	-2.1837	3.2117	0
17.2555	0	-16.8179	0	0	0	0	0	0.0706
0	17.9635	0	0	-17.7053	0	0	0	0
-16.3802	0	36.1936	-14.0280	0	-6.1205	0	0	-0.0449
0	-17.4471	0	-10.1973	33.0055	0	-5.9286	0	0
0	0	0	0	0	-11.6267	-10.5155	39.6838	0
0	0	0	2.0457	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	2.0192	0	0	0
0	0	0	0	0	0	2.0103	0	0

Columns 10 through 16

0	-16.8179	0	0	0	0	0
17.4471	0	0	-17.7053	0	0	0
0	36.8639	-14.0280	0	-6.1205	0	0
0	-14.0170	23.8486	-10.0121	0	0	0
-17.4471	0	-10.1973	34.1404	0	-5.9286	0
0	-6.0400	0	0	17.8331	0	-11.7241
0	0	0	-5.6206	0	16.1179	-10.5703
0	0	0	0	-11.6267	-10.5155	39.4809
0	-0.0578	0	0	0	0	0
-2.6482	0	0	-0.1076	0	0	0
0	-2.7977	1.6171	0	1.1991	0	0
-2.8634	0	-0.4608	8.2571	0	0.3730	0
0	0	0	0	1.6283	2.1837	-5.1807
0	0	0.0072	0	0	0	0
0	0	0	0	0.0126	0	0
0	0	0	0	0	0.0056	0

pour le noeud bilan on a $V(1) = 1$
pour le noeud bilan on a $P(1) = 0.56453$
pour le noeud bilan on a $Q(1) = 0.72072$
la puissance P finale du noeud numero 2 est : 0.011931
la puissance Q finale du noeud numero 2 est : 0.46006
la tension V finale du noeud numero 2 est : 1.057-1.0462i
l'angle de déphasage θ_2 finale de la tension au noeud numero 2 est : -44.7066
la puissance P finale du noeud numero 3 est : -2.8609
la puissance Q finale du noeud numero 3 est : 0.25049
la tension V finale du noeud numero 3 est : 1.164-1.0239i
l'angle de déphasage θ_3 finale de la tension au noeud numero 3 est : -41.3359
la puissance P finale du noeud numero 4 est : -0.026172
la puissance Q finale du noeud numero 4 est : -0.34321
la tension V finale du noeud numero 4 est : 1.0452-1.1161i
l'angle de déphasage θ_4 finale de la tension au noeud numero 4 est : -46.8783
la puissance P finale du noeud numero 5 est : -1.6335
la puissance Q finale du noeud numero 5 est : 0.17886
la tension V finale du noeud numero 5 est : 1.0235-1.0462i
l'angle de déphasage θ_5 finale de la tension au noeud numero 5 est : -45.6284
la puissance P finale du noeud numero 6 est : 5.52
la puissance Q finale du noeud numero 6 est : 0.31015
la tension V finale du noeud numero 6 est : 1.316-1.0464i
l'angle de déphasage θ_6 finale de la tension au noeud numero 6 est : -38.4889
la puissance P finale du noeud numero 7 est : 0.34471
la puissance Q finale du noeud numero 7 est : -0.067628
la tension V finale du noeud numero 7 est : 1.0125-1.0239i
l'angle de déphasage θ_7 finale de la tension au noeud numero 7 est : -45.3192
la puissance P finale du noeud numero 8 est : -0.68452
la puissance Q finale du noeud numero 8 est : 0.071455
la tension V finale du noeud numero 8 est : 1.0061-1.1161i
l'angle de déphasage θ_8 finale de la tension au noeud numero 8 est : -47.9666
la puissance P finale du noeud numero 9 est : -0.98674
la puissance Q finale du noeud numero 9 est : 0.12371
la tension V finale du noeud numero 9 est : 1.0251-1.2963i
l'angle de déphasage θ_9 finale de la tension au noeud numero 9 est : -51.6617

La matrice des puissances $S(p)$ de notre reseau est la suivante

Columns 1 through 5

22.5049 + 0.4366i	0	0	0	0
0	0.9852 - 1.3687i	0	0.9852 - 1.3687i	0
0	0	3.1031 + 2.6265i	0	0
0	-0.9589 + 1.4447i	0	-2.9140 + 2.9282i	-1.2432 + 0.9150i
0	0	0	1.2088 - 0.8496i	4.5508 + 1.7240i
0	0	-3.2198 - 3.0122i	0	-3.4420 - 3.4107i
0	0	0	0.6847 - 0.5170i	0
0	0	0	0	0
-23.6368 +28.7251i	0	0	0	0

Columns 6 through 9

0	0	0	22.5049 + 0.4366i
0	0	0	0
3.1031 + 2.6265i	0	0	0
0	-0.7118 + 0.5686i	0	0
3.3420 + 2.5736i	0	0	0
-8.5779 - 8.8114i	0	-1.9161 - 2.3885i	0
0	3.6717 - 3.9994i	0	2.9870 - 3.4824i
2.0406 + 1.8235i	0	3.8163 - 0.4824i	1.7758 - 2.3059i
0	-2.9656 + 4.3510i	-1.7856 + 2.6567i	-28.3880 +35.7328i

La matrice de pertes de puissances dans notre reseau est

Columns 1 through 5

0	0	0	0	0
0	0	0	0.0263 + 0.0760i	0
0	0	0	0	0
0	0.0263 + 0.0760i	0	0	-0.0344 + 0.0654i
0	0	0	-0.0344 + 0.0654i	0
0	0	-0.1167 - 0.3857i	0	-0.1000 - 0.8371i
0	0	0	-0.0271 + 0.0516i	0
0	0	0	0	0
-1.1319 +29.1617i	0	0	0	0

Columns 6 through 9

0	0	0	-1.1319 +29.1617i
0	0	0	0
-0.1167 - 0.3857i	0	0	0
0	-0.0271 + 0.0516i	0	0
-0.1000 - 0.8371i	0	0	0
0	0	0.1245 - 0.5650i	0
0	0	0	0.0214 + 0.8686i
0.1245 - 0.5650i	0	0	-0.0098 + 0.3508i
0	0.0214 + 0.8686i	-0.0098 + 0.3508i	0

Conclusion

On constate après vérification et comparaison que les résultats trouvés dans nos programmes sont logiques et justes et ils concordent parfaitement avec ceux trouver par J. C. Das et L. BAGHLI.

Nous avons vu, à travers ces trois exemples donnés ci-dessus, que nos programmes, ainsi que l'outil informatique en générale réduit à quelques cliques de souris, une tache qui prenais des journées voire des mois, autre fois, en calculant à la main toutes ces itérations nécessaires pour converger à la bonne solution avec des risques d'erreurs très élevés.

Conclusion générale :

Le travail que nous avons effectué consiste en l'analyse de l'écoulement de puissance dans les réseaux électriques. Pour résoudre ce problème, plusieurs méthodes ou solutions ont été trouvées et utilisées tels que Gauss-Seidel, Newton-Raphson et découplé rapide.

A cause de la convergence quadratique de la méthode de Newton-Raphson, une solution de haute précision peut être obtenue en quelques itérations seulement. Le découplage P de V et Q de δ permet d'accroître ces performances au détriment quelques fois de la stabilité de la méthode par rapport à celle de (N-R), mais des approximations viennent consolider cette stabilité. De plus, ces méthodes peuvent facilement être adaptées afin d'inclure les transformateurs de réglage et la production optimale. Ajoutons à cela que le test de convergence basé sur le mismatch (N-R) est plus robuste que celui basé sur les écarts de tension (G-S). Ces caractéristiques font le succès du Fast Decoupled Load Flow et de la méthode de Newton-Raphson.

A l'avenir, on pensera améliorer ces programmes, en incluant dans nos calculs des transformateurs, des inductances et des capacités de compensation et en introduisant des interfaces graphiques puissantes où quelques click de souris suffiront pour représenter graphiquement le réseau.

Bibliographie

[PRE 07] Cristophe PREVE, «Les réseaux électriques industriels (T₁ et T₂)», édition Lavoisier 2007

[BAR 97] Jean-paul BARRET, pierre BERNARD et bruno MEYER, Préface de paul CASEAU, «Simulation des réseaux électriques», édition Eyrolles, juin 1997.

[DAS 02] J.C.DAS, « power system analysis », marcel DEKKER, INC, édition 2002, New york.Barsel.

[AZO 05] R .AZOUAOU 2005«Notes de cours sur le calcul informatique des réseaux électriques», Département d'électrotechnique, à l'U.M.M.T.O

[AIT R 02] S. AIT RAMDANE, «Analyse de l'écoulement de puissance dans les réseaux électriques triphasés », Mémoire de fin d'étude d'ingénieur à l'Université de Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou, 2002.

[NAG 83] I.J NAGRATH et D.P KOTARI, «Modern power system analysis», Edition Tat Graw-Hill, Publishing company limited, 1983

[MOK _] Samuel MOK, Dr S. ELANGO VAN, Dr CAO LONGAIN et Dr MMA SALAMA, « A new approach for power flow analysis of balanced radial distribution systems », électrique machines and power systems pp 325-340.

[WIL 91] Theodore WILDI, « ELECTROTECHNIQUE » 1991,Deuxième édition.

[SAT 78] Gleen w. SATAGG et ahmed h. EL ABIAD, « Computer methods in power system analysis », International student Edition, 1978.

[BAG 94] L. BAGHLI, «Réalisation d'un environnement graphique avec Base de données pour l'Analyse et la simulation des réseaux électriques », Mémoire de fin d'études d'ingénieur d'état à l'école nationale de politéque, juin 1994.

[BOR_] P.BORNARD, « Réseaux de transport et d'interconnexion de l'énergie électrique fonctionnement et réglage »

[BAH 02] A. BAHMANE, F. BAKKOUCHE, « Analyse de l'écoulement de puissance dans les réseaux électriques de distribution radiale », mémoire de fin d'étude d'ingénieur, 2002.

[SOU 06] M. SOULLAF R.KHLOUFI Y.HMID, « Redimensionnement d'un poste électrique MT/BT », Mémoire de fin d'étude DEUA, 2006.