

**République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique**



**Université d'EL-Oued
Faculté des Sciences et de la Technologie**

**Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme de**

LICENCE ACADEMIQUE

**Domaine : Sciences et de Technologies
Filière: Génie Électrique
Spécialité: Réseaux Électriques**

Thème

Calcul l'écoulement de la puissance dans
les réseaux électriques par les méthodes
itératives

Dirigé par:
LABBI Yacine

Réalisés par:
BALI Abdel Hadi
CHAOUCH Saad Eddine

Soutenu 04 Juin 2013

Dédicace

Nous consacrons CE MODESTE TRAVAIL A :
Nos chers parents
Nos sœurs et nos frères
Toute nos familles
Tous nos amis
Tous les enseignants qui m'ont aidé de proche ou de loin pour
être un jour licencié d'électrotechnique.

Remerciements

Remerciements à Dieu –le tout puissant– qui nous a aidé à réaliser ce modeste travail.

Nous tenons à remercier notre promoteur

M^{er} LABBI YACINE d'avoir accepté de nous encadrer et de nous suivre durant toute cette période.

Nos remerciements vont aussi au président du jury et aux membres du jury examinateurs qui nous fait l'honneur de participer au jury de ce travail.

Et enfin nous remercions l'ensemble, enseignants et collègues de notre promotion, qui nous ont aidés à réaliser ce modeste travail.

SOMMAIRE

- * Dédicaces
- * Remerciements
- * Sommaire
- * Liste des Figures
- * Liste des Tableaux
- * Liste des Symboles et Acronyme

Introduction Générale.....	1
----------------------------	---

CHAPITRE I

L'écoulement De Puissance

I-1 Introduction.....	3
I-2 Modélisation des éléments du réseau électrique.....	3
2-1 Générateur de puissance (Machine synchrone).....	3
2-2 Ligne de transport.....	4
2-3 Transformateur.....	4
2-4 Charge électrique.....	5
2-5 Elément shunt.....	5
I-3 Classification des jeux de barres selon leurs spécifications.....	5
I-4 Généralisation à un système de n jeux de barres.....	6
I-5 Exemple de démonstration pour deux jeux de barres.....	6
5-1 Les équations de l'écoulement de puissance.....	7
5-2 Les équations d'écoulement dans les lignes	9
5-3 Equations de l'écoulement de puissance (sous forme réelle).....	10
5-4 Les pertes de puissance dans lignes.....	11
5-5 Facteur de puissance.....	12
I-6 Classification des variables de l'écoulement de puissance	12
6-1 Les variables de perturbation ou non contrôlables.....	12
6-2 Les variables de contrôle et d'état	12
I-7 Conclusion.....	13

SOMMAIRE

CHAPITRE II

Les Méthodes Numériques itérative

II-1 Introduction.....	14
II-2 La méthode itérative de Gauss-Seidel	14
2-1 Principe.....	14
II-3 Méthode de Newton-Raphson.....	15
3-1- Représentation géométrique de la méthode de N-R.....	15
3-2 Résolution d'un système d'équation à (n) variables non linéaire.....	16
3-3 Arrêt des opérations	17
3-4 La méthode de Newton-Raphson appliquée aux équations d'écoulement de puissance..	17
3-4-1 Détermination des sous matrices de la Jacobienne J	19
3-4-2 Algorithme de Newton-Raphson.....	20
II-4 Conclusion	21

CHAPITRE III

Tests et Résultats Numérique

IV-1- Introduction.....	22
IV-2 Test de l'algorithme NR-EP.....	22
2-1 Réseau test à 6 jeux de barres.....	22
2-2 Réseau test à 30 jeux de barres (IEEE 30-bus).....	23
IV-3 Conclusion.....	28
Conclusion Générale.....	29
*Annexe	
*Bibliographie	

Listes des figures

Figure I.1: Exemple d'un réseau électrique à deux jeux de barres.	7
Figure II.1: Représentation géométrique de la méthode de N-R.....	16
Figure III.1: Schéma unifilaire du réseau électrique à 6 J.B.....	22
Figure III.2: Schéma unifilaire du réseau électrique à 30 J.B.....	24
Figure III.3: Modules des tensions du réseau électrique à 30 J.B	26
Figure III.4: Phases des tensions du réseau électrique à 30J.B.....	26

Listes de tableaux

Tableau III.1: tensions du réseau électrique à 6 J.B.	23
Tableau III.2 : puissances et coûts de production du réseau électrique à 6 J.B.....	23
Tableau III.3: Tensions du réseau électrique à 30 J.B.....	25
Tableau III.4: Puissances et coûts de production du réseau électrique à 30 J.B.....	26
Tableau III.5: Comparaison des puissances et coûts de production du réseau électrique à 30 J.B.....	27

Liste de symbole

b : susceptance shunt.

B : matrice susceptance du système.

B_{ij} et B_{i0} B_{00} : Coefficients de pertes.

Nbr : est le nombre total des lignes de transporte (branches).

D : Matrice carrée.

F : Facteur de puissance.

g : Conductance shunt.

$g_i(x)$: Contraintes d'égalité.

$h_i(x)$: Contraintes d'inégalités.

i : Numéro du J.d.B.

I_i : Courant injecte au J.d.B « i ».

J : Matrice Jacobienne .

J.d.B : Jeux de barres.

k : Numéro d'itération.

n : Nombre de J.d.B.

ng : est le nombre total des générateurs.

NR: Newton-Raphson.

OPF: Ecoulement de Puissance Optimal.

P : Puissance active.

P_D : Puissance active demandée.

P_G : Puissance active générée.

P_L : Perte active de ligne.

$p.u$: Unité relative.

Q : Puissance réactive.

Q_D : Puissance réactive demandée.

Q_G : Puissance réactive générée.

Q_L : Perte réactive de ligne.

R : Résistance

S : Puissance apparente.

S_b : Valeur de base.

S_D : Puissance apparente demandée.

S_G : Puissance apparente générée.

V_i : Tension au J.d.B.

Y : Matrice admittance.

G_{ij} : La partie réelle de la matrice admittance Y .

B_{ij} : La partie imaginaire de la matrice admittance Y .

γ : Phase d'admittance.

δ : Phase de tension.

ε : Tolérance estimée.

Z : matrice impédance.

X : vecteur d'état.

U : vecteur de contrôle

$x_{\min} \leq x \leq x_{\max}$: Limites minimales et maximales des variables d'état et de contrôle.

$u_{\min} \leq u \leq u_{\max}$

$[P_B]$: Vecteur des puissances actives transmises par les lignes de transport.

$[J_{n\delta}]$, $[J_{hv}]$: Sous matrices jacobéennes.

Introduction générale

Depuis longtemps l'électricité a occupé une classe très importante dans la civilisation moderne. La puissance croissante des ordinateurs a permis d'aborder, puis de résoudre complètement des problèmes liés au réseau électrique de plus en plus nombreux et de plus en plus difficiles, par leur complexité propre et par le nombre d'information à traiter. Pour résoudre ces problèmes, l'ingénieur d'aujourd'hui ne doit pas ignorer les techniques numériques, ni les situations nouvelles qu'elles permettent de considérer. De ce fait, il doit posséder une bonne formation tant en analyse mathématique qu'en analyse numérique et en analyse statique, en vue d'une meilleure compréhension des phénomènes et donc d'une meilleure utilisation de ce moyen d'investigation et de décision.

Dans ce mémoire, nous présentons dans un premier chapitre des généralités sur les réseaux électriques et l'étude de l'écoulement de puissance.

Dans le chapitre II, nous présentons les différentes méthodes standard utilisées pour l'étude et du problème de l'écoulement de puissance dans les réseaux HT, Méthodes de Gauss-Seidel et Newton-Raphson. L'étude d'écoulement de puissance est une tâche indispensable pour assurer une meilleure exploitation des réseaux électriques. Nous mettons en évidence les modèles utilisés et les hypothèses simplificatrices ainsi que les algorithmes de calcul existant. Des exemples viennent ensuite valider ces études.

Dans le troisième chapitre nous présentons le programme proposé pour la simulation des réseaux de distribution électriques, des exemples de réseaux standard (IEEE 6Bus, IEEE 30Bus, Réseaux bouclés) ont été testés pour valider la robustesse du programme.

Enfin, une conclusion générale récapitule le travail que nous avons effectué et les principaux résultats que nous avons obtenus.

Chapitre : I

l'écoulement de puissance

I-1 Introduction [1]

L'objectif principal de l'étude de l'écoulement de puissance est déterminé les conditions de fonctionnement d'un réseau électrique, avec des paramètres donnés pour ce réseau (paramètres des lignes, puissance active et réactive,etc.).

Le but est de déterminer les tensions complexes des jeux de barres, à partir desquelles toutes les autres grandeurs telles que les puissances transitant à travers les lignes de transport, les puissances, et les pertes de puissances peuvent être obtenues.

Le problème de l'analyse de l'écoulement de puissance se traduit par la relation non linéaire qui existe entre les différentes puissances générées, les puissances demandées (charges) et les modules et phases des tensions au niveau des jeux de barres avec les paramètres du circuit équivalent modélisant les éléments de réseau électrique.

I-2 Modélisation des éléments du réseau électrique [2]

Un réseau d'énergie électrique comprend des génératrices des lignes de transport et de distribution de réseau et d'un ensemble de consommateurs, qui constituent les charges du réseau, en outre le réseau comporte également des transformateurs et des appareils de protection. L'ensemble des systèmes électriques comportent trois sous systèmes:

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

2-1 Générateur de puissance (Machine synchrone) [1]

Dans l'analyse de l'écoulement de puissance, les générateurs sont modélisés comme des injecteurs des courants. Dans l'état stationnaire, un générateur est généralement contrôlé de

sorte que la puissance active (P_g) injectée au jeu de barre et la tension aux bornes du générateur soient maintenues constantes.

La puissance active du générateur est déterminée par le contrôle de la turbine, qui doit être dans la capacité du système turbine – générateur. La tension (V_g) est principalement déterminée par l'injection de la puissance réactive au jeu de barre de production.

2-2 Ligne de transport [1]

La ligne de transport est modélisée par le schéma unifilaire en π à paramètres distribués. Ces paramètres dépendent de la nature du conducteur et de leurs géométries :

- Des paramètres linéaires série par phase :

r : résistance linéique ou série (Ω/km).

x : réactance linéique ou série (Ω/km).

- Des paramètres shunt par phase :

b : susceptance shunt ($1/\Omega.km$).

g : conductance shunt ($1/\Omega.km$).

Dans la plupart des cas, la conductance shunt est négligeable ($g \approx 0$).

Les lignes électriques peuvent être classées suivant plusieurs critères.

- *- Situation dans l'espace : linges aériennes, linges souterraines (câbles).
- *- Classe de tension : linges à base tension ($<1\text{kV}$) et ligne à haut tension ($>1\text{kV}$).
- *- Suivant la longueur:-Ligne courte $L < 80\text{kM}$.
 - Ligne moyenne $80\text{kM} < L < 240\text{kM}$.
 - Ligne longue $L > 240\text{kM}$. [2]

2-3 Transformateur [2]

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

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

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

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

2-4 Charge électrique [1]

La charge électrique est souvent modélisée sous forme d'une impédance constante. La plupart des charges représentent une sous-station (système de distribution). Ces charges sont connectées au réseau électrique à travers un transformateur à prises de charges variables, où le niveau de tension de la charge est maintenu pratiquement constant. Dans ce cas, les puissances actives et réactives de la charge peuvent être représentées par des valeurs constantes.

2-5 Élément shunt

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

I-3 Classification des jeux de barres selon leurs spécifications [4]

On peut grouper les jeux de barres en trois catégories, en fonction des spécifications des variables utilisées :

- a. Jeu de barres de référence
- b. Jeu de barres de charge
- c. Jeu de barres générateur (à tension contrôlée)

Notons que dans un réseau électrique, les jeux de barres de charge forment de 80 à 90% de la totalité des jeux de barres, et 1% J.d.B de référence et le reste J.d.B de contrôle.

Pour chaque jeu de barre, deux variables doivent être spécifiées au préalable et les deux autres sont à calculer.

a) Jeu de barre de référence :

C'est un jeu de barre générateur où le module et la phase de tension (V, δ) sont les deux spécifiés. Les puissances (P, Q) sont inconnues et doivent être calculées à la fin.

Le jeu de barre de référence, est choisi parmi les jeux de barres générateurs dont la puissance active est la plus importante. Ce jeu de barre est pris comme référence des angles de tension.

b) Jeu de barre générateur :

Ce jeu de barre est connecté à un générateur délivrant une puissance active P sous une tension constante V contrôlée par un régulateur automatique de tension (AVR). Donc (P, V) sont spécifiées alors que (Q, δ) sont à calculer.

c) Jeu de barre de charge :

Ce jeu de barre alimente une charge caractérisée par sa puissance active P et réactive Q . Donc (P, Q) sont spécifiées, alors que (V, δ) sont à calculer.

I-4 Généralisation à un système de n jeux de barres [5]

Les réseaux électriques réels peuvent contenir des centaines de jeux de barres, de générateurs et de milliers de branches, donc pour un système de n jeux de barres on aura :

- ✓ n variables : $|V_i|$ (module de la tension du jeu de barres i)
- ✓ n variables : δ_i (angle de phase de la tension du jeu de barres i)
- ✓ n variables : P_{Gi} (puissance active injectée au jeu de barres i)
- ✓ n variables : Q_{Gi} (puissance réactive injectée au jeu de barres i)
- ✓ n variables : P_{Di} (puissance active demandée au jeu de barres i)
- ✓ n variables : Q_{Di} (puissance réactive demandée au jeu de barres i)

Avec $i=1,2,\dots,n$. Donc nous avons en tout $6n$ inconnues.

La puissance nette injectée à un jeu de barre, est égale à la différence entre la puissance générée S_{Gi} et la puissance demandée S_{Di} au niveau de ce jeu de barre .

I-5 Exemple de démonstration pour deux jeux de barres [5]

On peut démontrer d'une façon simple les propriétés fondamentales de l'étude de l'écoulement de puissance par la discussion d'un système à deux jeux de barres qui est montré à la figure (I-1).

Un réseau électrique réel ne peut pas être de cette simplicité, mais cela va seulement servir comme objet de démonstration. Chaque jeu de barres est alimenté d'un générateur. Les générateurs fournissent les énergies S_{G1} et S_{G2} aux jeux de barres. Les charges

demandées sont prises de chaque jeu de barres à des quantités S_{D1} et S_{D2} , les deux jeux de barres sont liés par une ligne de transmission caractérisée par une admittance série Y_s et une admittance parallèle Y_p .

Les tensions des jeux de barres sont symbolisées par V_1 et V_2 respectivement. Pour ce réseau les puissances des deux jeux de barres sont :

$$\begin{cases} P_1 + jQ_1 = P_{G1} - P_{D1} + j(Q_{G1} - Q_{D1}) \\ P_2 + jQ_2 = P_{G2} - P_{D2} + j(Q_{G2} - Q_{D2}) \end{cases}$$

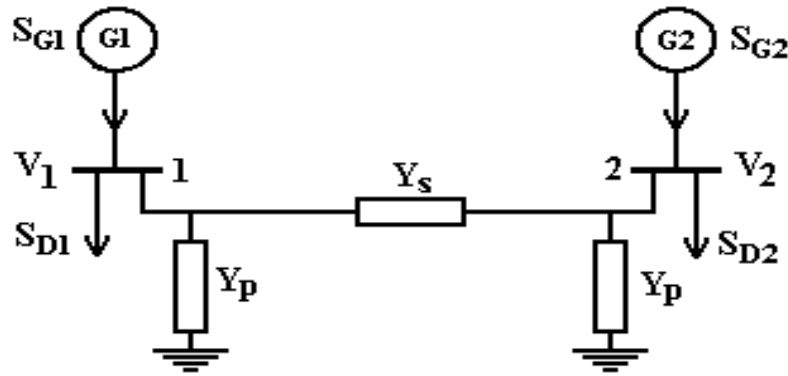


Figure I -1 : Exemple d'un réseau électrique à deux jeux de barres

5-1 Les équations de l'écoulement de puissance [5]

La construction du modèle mathématique duquel on peut prédire la forme (aspect) de l'écoulement de puissance, est essentielle pour la compréhension du mécanisme de l'écoulement de puissance.

Dans la formulation des équations de l'écoulement de puissance l'une des deux matrices (admittance ou impédance est nécessaire).

La puissance apparente S_1 injectée au jeu de barres 1 est donnée par l'équation $S_1 = V_1 I_1^*$ où I_1 est le courant qui entre dans le jeu de barres 1. Ce courant est composé de deux composantes, une composante $Y_p V_1$ qui s'écoule à travers l'admittance shunt, et une composante $(V_1 - V_2)Y_s$ qui s'écoule à travers l'admittance série de la ligne équivalente du réseau. D'après la loi de Kirchhoff appliquée à un jeu de barres, nous avons :

$$I_1 = \frac{S_1^*}{V_1^*} = V_1 Y_p + (V_1 - V_2) Y_s \quad (\text{I-1})$$

$$I_2 = \frac{S_2^*}{V_2^*} = V_2 Y_p + (V_2 - V_1) Y_s \quad (\text{I-2})$$

NB : Les équations (I-1) et (I-2) sont données pour une seule phase.

On peut écrire ces deux dernières équations d'une manière plus simple :

$$\begin{cases} I_1 = \frac{S_1^*}{V_1^*} = Y_{11} V_1 + Y_{12} V_2 \\ I_2 = \frac{S_2^*}{V_2^*} = Y_{21} V_1 + Y_{22} V_2 \end{cases} \quad (\text{I-3})$$

$$\text{Avec : } \begin{aligned} Y_{11} &= Y_{22} = Y_p + Y_s \\ Y_{12} &= Y_{21} = -Y_s \end{aligned}$$

Maintenant on va introduire les matrices et les vecteurs suivants :

$$I_{BUS} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \text{ Vecteur de courants des jeux de barres}$$

$$V_{BUS} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \text{ Vecteur de tensions des jeux de barres}$$

$$Y_{BUS} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \text{ La matrice admittance du réseau}$$

$$Z_{BUS} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \text{ La matrice impédance du réseau}$$

On peut écrire les équations (I-3) d'une manière plus simple

$$I_{BUS} = Y_{BUS} V_{BUS} \quad (\text{I-4})$$

$$V_{BUS} = Z_{BUS} I_{BUS} \quad (\text{I-5})$$

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$$

Et ainsi de suit. On peut généraliser la méthode de formulation comme suit pour le système a « n » J.d.B connectés entre eux

$$\begin{aligned}
I_1 &= \left(\sum_{i=1, i \neq n}^m y_{1i} \right) V_1 + (-y_{12}) V_2 + \dots + (-y_{1n}) V_n \\
&\vdots \\
I_n &= (-y_{n1}) V_1 + (-y_{n2}) V_2 + \dots + (-y_{nn}) V_n
\end{aligned}$$

La matrice admittance est donc :

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1, i \neq n}^n y_{1i} & \dots & (-y_{1n}) \\ \dots & \dots & \dots \\ (-y_{n1}) & \dots & \dots \\ (-y_{nn}) & \dots & \sum_{i=1, i \neq n}^m y_{ni} \end{bmatrix}$$

Ces équations sont complexes, linéaires. La caractéristique de linéarité assure une simple solution des inconnues. Les courants aux jeux de barres seront calculés par la substitution directe dans (I-3), et vice versa. Si les courants sont des inconnus, les tensions aux jeux de barres seront calculées d'après (I-4). Naturellement on a besoin d'inverser la matrice Y_{BUS} .

En réalité, ce sont les puissances qui seront connues et pas les courants, ce qui change la forme des équations (I-3) à :

$$\begin{cases} S_1^* = P_1 - jQ_1 = (Y_{11}V_1 + Y_{12}V_2)V_1^* \\ S_2^* = P_2 - jQ_2 = (Y_{21}V_1 + Y_{22}V_2)V_2^* \end{cases} \quad (I-6)$$

Ces équations sont les équations de "l'écoulement de puissance" ou "l'écoulement de charge" recherchées.

La solution de ces équations est plus difficile que la solution du système d'équations linéaires (I-4) et (I-5), car elles ne sont pas linéaires.

5-2 Les équations d'écoulement dans les lignes [5]

Quand la solution itérative des tensions aux J.d.B est achevée, on peut calculer l'écoulement dans les lignes. Le courant au J.d.B « i » dans la ligne de connexion de nœud « i » vers le nœud « k » est :

$$I_{ik} = (V_i - V_k) y_{ik} + V_i \cdot \frac{y'_{ik}}{2}$$

y_{ik} : Admittance de la ligne entre les J.d.B « i » et « k ».

y'_{ik} : Admittance totale de la ligne de charge.

$V_i \cdot \frac{y'_{ik}}{2}$: Contribution du courant au J.d.B « i » due a la ligne de charge.

La puissance qui écoule, active et réactive, est :

$$P_{ik} - jQ_{ik} = V_i^* \cdot I_{ik}$$

$$P_{ik} - jQ_{ik} = V_i^* (V_i - V_k) y_{ik} + V_i^* \cdot V_i \cdot \frac{y'_{ik}}{2} \quad (I-7)$$

Soient P_{ki} et Q_{ki} les puissances active et réactive reparties du J.d.B « k » vers le J.d.B « i ».

$$P_{ki} - jQ_{ki} = V_k^* (V_k - V_i) y_{ik} + V_k^* \cdot V_k \cdot \frac{y'_{ik}}{2} \quad (I-8)$$

Les pertes de puissances dans la ligne « i-k » sont égales à la somme algébrique de la répartition des puissances déterminées a partir des relations (I-7) et (I-8).

5-3 Equations de l'écoulement de puissance (sous forme réelle) [5]

On peut écrire les équations (1-6) comme suit :

$$S_1^* = P_1 - jQ_1 = V_1^* \sum_{k=1}^2 Y_{1k} V_k, \quad S_2^* = P_2 - jQ_2 = V_2^* \sum_{k=1}^2 Y_{2k} V_k$$

D'une manière plus compacte on a :

$$S_i^* = P_i - jQ_i = V_i^* \sum_{k=1}^2 Y_{ik} V_k \quad i=1,2 \quad (I-9)$$

Chaque tension au jeu de barres V_i a une amplitude $|V_i|$ et un angle de phase δ_i ainsi que chaque élément de la matrice admittance est en général de type complexe donc on peut écrire $V_i = |V_i| \angle \delta_i$, $Y_{ij} = |Y_{ij}| \angle \gamma_{ij}$

D'ici on peut écrire les équations de l'écoulement de puissance

$$P_i - jQ_i = \sum_{k=1}^2 |Y_{ik}| |V_i| |V_k| \exp(\delta_k - \delta_i + \gamma_{ik}) \quad (I-10)$$

Séparons les parties réelles et imaginaires

$$P_i = \sum_{k=1}^2 |Y_{ik}| |V_i| |V_k| \cos(\delta_k - \delta_i + \gamma_{ik}) \quad (\text{I-11})$$

$$Q_i = \sum_{k=1}^2 |Y_{ik}| |V_i| |V_k| \sin(\delta_k - \delta_i + \gamma_{ik}) \quad (\text{I-12})$$

$i=1,2$

Pour l'exemple à deux jeux de barres on a :

$$\begin{cases} P_1 = P_{G1} - P_{D1} = |Y_{11}|^2 |V_1|^2 \cos(\gamma_{11}) + |Y_{12}| |V_1| |V_2| \cos(\delta_2 - \delta_1 + \gamma_{12}) = f_{1p} \\ P_2 = P_{G2} - P_{D2} = |Y_{22}|^2 |V_2|^2 \cos(\gamma_{22}) + |Y_{21}| |V_1| |V_2| \cos(\delta_1 - \delta_2 + \gamma_{21}) = f_{2p} \\ Q_1 = Q_{G1} - Q_{D1} = -|Y_{11}|^2 |V_1|^2 \sin(\gamma_{11}) - |Y_{12}| |V_1| |V_2| \sin(\delta_2 - \delta_1 + \gamma_{12}) = f_{1q} \\ Q_2 = Q_{G2} - Q_{D2} = -|Y_{22}|^2 |V_2|^2 \sin(\gamma_{22}) - |Y_{21}| |V_1| |V_2| \sin(\delta_1 - \delta_2 + \gamma_{21}) = f_{2q} \end{cases} \quad (\text{I-13})$$

5-4 Les pertes de puissance dans lignes [3]

Au niveau de J.d.B la puissance apparente nette est la différence entre la puissance générée et la puissance demandée.

Pour un J.d.B « i » :

On a :

$$S_i = S_{Gi} - S_{Di}$$

Avec :

$$P_i = P_{Gi} - P_{Di} = F_{ip}$$

$$Q_i = Q_{Gi} - Q_{Di} = F_{iq}$$

$$\sum P_i = \sum F_{ip} = \sum P_{Gi} - \sum P_{Di}$$

$$\sum Q_i = \sum F_{iq} = \sum Q_{Gi} - \sum Q_{Di} \quad (\text{I-14})$$

Le système d'équations (I-14) exprime l'expression des pertes.

Ou bien on peut calculer les pertes par une autre méthode, on calcule les pertes au niveau des lignes puis la somme donne l'expression des pertes

$$\begin{aligned} P_{Lij} &= P_{ij} + P_{ji} \\ Q_{Lij} &= Q_{ij} + Q_{ji} \end{aligned} \quad (\text{I-15})$$

5-5 Facteur de puissance

Le facteur de puissance est défini par le rapport suivant :

$$F = \cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (\text{I-16})$$

I-6 Classification des variables de l'écoulement de puissance

La dernière observation nous permet de remarquer une des plus importantes spécifications du problème. Donc il est impératif d'introduire un certain ordre sur les variables. Pour cette raison on les partage en ces groupes naturels suivants :

6-1 Les variables de perturbation ou non contrôlables [5]

Parmi les douze variables des équations de l'écoulement de puissance, les variables de la demande $P_{D1}, P_{D2}, Q_{D1}, Q_{D2}$ ne sont pas contrôlables car elles dépendent seulement des utilisateurs de la puissance. Les variables de perturbation avec cette définition constituent les composantes du vecteur de perturbation P.

$$P = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ Q_1 \\ Q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{D1} \\ P_{D2} \\ Q_{D1} \\ Q_{D2} \end{bmatrix} \quad (\text{I-17})$$

6-2 Les variables de contrôle et d'état

Les huit variables $|V_1|, |V_2|, \delta_1, \delta_2, P_{G1}, P_{G2}, Q_{G1}, Q_{G2}$ peuvent facilement être groupées en deux groupes, les variables de "contrôles" et variables "d'état".

- ✓ Les variables $|V_1|, |V_2|, \delta_1, \delta_2$ sont définies comme variables d'état. Pour utiliser la notation connue dans la théorie de contrôle ces variables doivent être représentées par les variables $X_1, \dots, X_4$
- ✓ Les variables $P_{G1}, P_{G2}, Q_{G1}, Q_{G2}$ sont des variables de contrôle, et qu'on préfère le symboliser par $U_1, \dots, U_4$, donc nous aurons:

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ |V_1| \\ |V_2| \end{bmatrix} \quad X : \text{vecteur d'état} \quad (\text{I-18})$$

$$U = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{G1} \\ P_{G2} \\ Q_{G1} \\ Q_{G2} \end{bmatrix} \quad U : \text{vecteur de contrôle} \quad (\text{I-19})$$

I-7 Conclusion [6]

Le problème de répartition de charges occupe une partie très importante dans le procédure de commande et contrôle des réseaux électriques.

Il est largement utilisé dans les centres de contrôle de système de puissance pour étudier les problèmes d'exploitation des réseaux électriques et favoriser la précision des calculs des pertes de transmission et des facteurs de pénalité.

Elle donne tous les variables du réseau électrique les arguments et les modules de la tension nodale, et les puissances actives et réactives.

Chapitre : II

les méthodes numériques itératives

II-1 Introduction

Il existe deux méthodes de base pour la résolution des équations non linéaires de l'écoulement de puissance : Gauss- Seidel (GS) et Newton-Raphson (NR). Dans ce chapitre, on va présenter la méthode de NR, ainsi Gauss- Seidel (GS).

Dans notre projet on a utilisée la programmation en MATLAB

II-2 La méthode itérative de Gauss-Seidel [7]

La méthode de Gauss-Seidel est l'une de plus simples méthodes itératives utilisées pour la résolution du problème de l'écoulement de puissance pour résoudre un ensemble très large d'équations algébriques non linéaires.

2-1 Principe :

Soit à résoudre l'équation : $f(x) = 0$

Cette méthode est basée sur le changement de l'équation $f(x) = 0$ à la forme $x = g(x)$

Pour une fonction $f(x) = 0$, il est toujours possible de trouver une fonction $g(x)$, tel que $x = g(x)$ ($g(x)$ n'est pas unique).

On estime une valeur initiale x^0

$$\left\{ \begin{array}{l} x^1 = g(x^0) \\ x^2 = g(x^1) \\ \cdot \\ \cdot \\ x^{k+1} = g(x^k) \end{array} \right.$$

Où k : numéro d'itération

Le processus itératif se termine si la différence entre deux valeurs successives vérifie le test de convergence :

$$|x^{k+1} - x^k| \leq \varepsilon$$

Pour un système de n équations :

$$f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$$

$$f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$$

.

.

.

$$f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$$

Pour trouver l'algorithme de Gauss-Seidel on a besoin de reformer la fonction $f(x) = 0$ à la forme itérative $x = g(x)$

$$\begin{cases} x^1 = g(x^0) \\ x^2 = g(x^1) \\ \cdot \\ \cdot \\ x^{k+1} = g(x^k) \end{cases}$$

A la fin de chaque itération on fait le test de convergence :

$$|x^{k+1} - x^k| \leq \varepsilon$$

II-3 Méthodes de Newton-Raphson [5]

La technique itérative de Newton Raphson converge avec une même vitesse, mesurée par le nombre d'itérations, pour les larges et courts systèmes, en moins de quatre à cinq itérations en général. C'est pour cette raison que la méthode de N-R est la plus utilisée pour l'étude des larges systèmes.

II-3-1-Représentation géométrique de la méthode de N-R

Elle est basée sur la détermination de la tangente à la courbe $f(x)$ à chaque point $(x^{(k)}, f(x^{(k)}))$. L'intersection de cette tangente avec l'axe des x fournit le point $x^{(k+1)}$, ($\Delta x^{(k)}$ étant une approximation de l'erreur commise sur x à l'itération (k)).

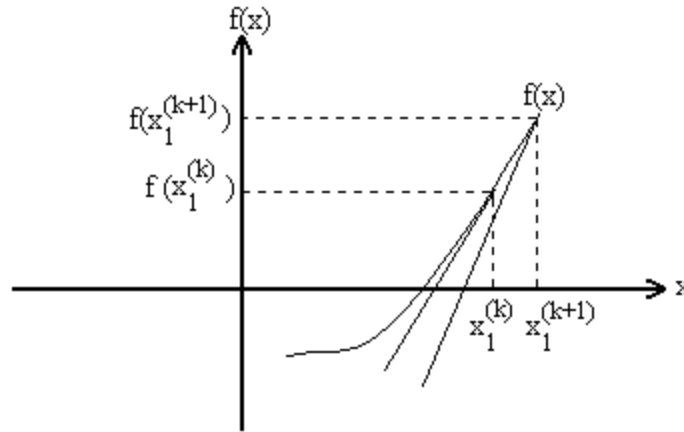


Figure II-1 : Représentation géométrique de la méthode de N-R

II-3-2 Résolution d'un système d'équation à (n) variables non linéaire

Soit la fonction $f(x) = 0$ de dimension n , tel que :

$$f(x) = \begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \\ \vdots \\ f_n(x) \end{bmatrix} \quad x^{(0)} = \begin{bmatrix} x_1^{(0)} \\ x_2^{(0)} \\ \vdots \\ x_n^{(0)} \end{bmatrix}$$

On estime que $x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}$ sont les solutions de ces n équations. L'exposant $^{(0)}$ indique que ces valeurs sont des estimations initiales.

On désigne par $\Delta x_1^{(0)}, \Delta x_2^{(0)}, \dots, \Delta x_n^{(0)}$ les valeurs à ajouter à $x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}$ pour trouver les solutions correctes.

Lorsqu'on développe toutes les fonctions en série de Taylor au voisinage du point d'estimation initiale on aura :

$$f_1(x^{(0)}) + \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right)^{(0)} \Delta x_1^{(0)} + \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_2}\right)^{(0)} \Delta x_2^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_n}\right)^{(0)} \Delta x_n^{(0)} = 0$$

$$f_2(x^{(0)}) + \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_1}\right)^{(0)} \Delta x_1^{(0)} + \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_2}\right)^{(0)} \Delta x_2^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_n}\right)^{(0)} \Delta x_n^{(0)} = 0$$

$$\vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots$$

$$f_n(x^{(0)}) + \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_1}\right)^{(0)} \Delta x_1^{(0)} + \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_2}\right)^{(0)} \Delta x_2^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_n}\right)^{(0)} \Delta x_n^{(0)} = 0$$

On peut écrire le système de n équations linéaires comme suit :

$$\begin{bmatrix} f_1(x^{(0)}) \\ f_2(x^{(0)}) \\ \vdots \\ f_n(x^{(0)}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (\frac{\partial f_1}{\partial x_1})|_0 & (\frac{\partial f_1}{\partial x_2})|_0 & \dots & (\frac{\partial f_1}{\partial x_n})|_0 \\ (\frac{\partial f_2}{\partial x_1})|_0 & (\frac{\partial f_2}{\partial x_2})|_0 & \dots & (\frac{\partial f_2}{\partial x_n})|_0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (\frac{\partial f_n}{\partial x_1})|_0 & (\frac{\partial f_n}{\partial x_2})|_0 & \dots & (\frac{\partial f_n}{\partial x_n})|_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(0)} \\ \Delta x_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta x_n^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$$

(II-1)

Les termes $(\frac{\partial f_1}{\partial x_1})|_0, \dots, (\frac{\partial f_n}{\partial x_n})|_0$ correspondent à la dérivée partielle évaluée avec les valeurs $x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}$.

Ou dans une notation compacte : $f(x^{(0)}) + j^{(0)} \Delta x^{(0)} \approx 0$

La matrice carrée dite Jacobienne : $[J^{(0)}]$

De cette dernière équation on tire ensuite le vecteur erreur $\Delta x^{(0)} = -[j^{(0)}]^{-1} f(x^{(0)})$

Mais $\Delta x^{(0)} = x^{(1)} - x^{(0)}$ donc $x^{(1)} = x^{(0)} - [j^{(0)}]^{-1} f(x^{(0)})$

En général : $x^{(k+1)} = x^{(k)} - [j^{(k)}]^{-1} f(x^{(k)})$

II-3-3 Arrêt des opérations

On a vu que théoriquement la solution n'est atteinte qu'après une infinité d'itérations. En pratique, on arrête les opérations pour l'un des tests suivants:

1. Si $f(x^{(k)})$ est quasiment nulle.
2. Si l'amélioration de $x^{(k)}$ d'une itération à la suivante ne justifie pas l'effort de calcul supplémentaire.
3. Si la convergence n'est pas obtenue avant un nombre d'itérations fixe. Le processus est considéré comme non convergent pour l'estimation initiale $(x^{(0)})$ donnée.

II-3-4 La méthode de Newton-Raphson appliquée aux équations d'écoulement de puissance [8]

D'après la forme générale d'équations de puissance au J.d.B :

$$\left. \begin{aligned} P_i &= \sum_{j=1}^n |y_{ij}| |V_i| |V_j| \cos(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) = F_{ip} \\ Q_i &= \sum_{j=1}^n |y_{ij}| |V_i| |V_j| \sin(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) = F_{iq} \end{aligned} \right\} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (\text{II-2})$$

n : Nombre de J.d.B

i : Numéro de J.d.B

Après le développement de F_{ip} et F_{iq} en série de Taylor autour de la première approximation :

$$\left. \begin{aligned} P_i &= F_{ip}^{(0)} + \left(\frac{\partial F_{ip}}{\partial \delta_2}\right)^{(0)} \Delta \delta_2^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial F_{ip}}{\partial \delta_n}\right)^{(0)} \Delta \delta_n^{(0)} + \left(\frac{\partial F_{ip}}{\partial |V_2|}\right)^{(0)} \Delta V_2^{(0)} \\ Q_i &= F_{iq}^{(0)} + \left(\frac{\partial F_{iq}}{\partial \delta_2}\right)^{(0)} \Delta \delta_2^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial F_{iq}}{\partial \delta_n}\right)^{(0)} \Delta \delta_n^{(0)} + \left(\frac{\partial F_{iq}}{\partial |V_2|}\right)^{(0)} \Delta V_2^{(0)} \end{aligned} \right\} \quad (\text{II-3})$$

Avec $F_{ip}^{(0)}$ et $F_{iq}^{(0)}$ sont des fonctions de tension et de phase :

$$\text{A partir de la relation de } \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}$$

$$\text{Avec } \left. \begin{aligned} \Delta P_i^{(0)} &= P_i - F_{ip}^{(0)} \\ \Delta Q_i^{(0)} &= Q_i - F_{iq}^{(0)} \end{aligned} \right\} \quad (\text{II-4})$$

Les deux systèmes d'équations (II-3) et (II-4) donnent :

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(0)} \\ \Delta P_n^{(0)} \\ \Delta Q_2^{(0)} \\ \Delta Q_n^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_{2p}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial F_{2p}}{\partial \delta_n} \frac{\partial F_{2p}}{|V_2|} & \dots & \frac{\partial F_{2p}}{|V_n|} \\ \frac{\partial F_{np}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial F_{np}}{\partial \delta_n} \frac{\partial F_{np}}{|V_2|} & \dots & \frac{\partial F_{np}}{|V_n|} \\ \frac{\partial F_{2q}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial F_{2q}}{\partial \delta_n} \frac{\partial F_{2q}}{|V_2|} & \dots & \frac{\partial F_{2q}}{|V_n|} \\ \frac{\partial F_{nq}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial F_{nq}}{\partial \delta_n} \frac{\partial F_{nq}}{|V_2|} & \dots & \frac{\partial F_{nq}}{|V_n|} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(0)} \\ \Delta \delta_n^{(0)} \\ \Delta V_2^{(0)} \\ \Delta V_n^{(0)} \end{bmatrix}$$

Donc on peut écrire le système comme suit :

$$\begin{bmatrix} \Delta P^{(0)} \\ \Delta Q^{(0)} \end{bmatrix} = [J^{(0)}] \begin{bmatrix} \Delta \delta^{(0)} \\ \Delta V^{(0)} \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} \Delta \delta^{(0)} \\ \Delta V^{(0)} \end{bmatrix} = [J^{(0)}]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P^{(0)} \\ \Delta Q^{(0)} \end{bmatrix} \quad (\text{II-5})$$

On rappelle que :

$$\Delta\delta_i^{(K)} = \delta_i^{(K+1)} - \delta_i^{(K)} \quad i \neq 1(\text{ref}), i \neq 2(\text{cont}) \quad (\text{II-6})$$

$$\Delta|V_i|^{(k)} = |V_i|^{(K+1)} - |V_i|^{(K)}$$

L'adaptation de (II-5) avec (II-6) donne :

$$\begin{bmatrix} \delta_i^{(K+1)} \\ |V|^{(K+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta^{(K)} \\ |V|^{(K)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta|V| \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} \delta_i^{(K+1)} \\ |V|^{(K+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta^{(K)} \\ |V|^{(K)} \end{bmatrix} + [J^{(K)}]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P^{(k)} \\ \Delta Q^{(k)} \end{bmatrix}$$

D'une manière générale

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta|V| \end{bmatrix}$$

$$J = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j_1 & j_2 \\ j_3 & j_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta|V| \end{bmatrix} \quad (\text{II-7})$$

J_1, J_2, J_3, J_4 Sont les sous matrice de Jacobienne.

II-3-4-1 Détermination des sous matrices de la Jacobienne J

A partir du système d'équations (II-2) on peut déterminer les éléments de J

Sous matrice J_1 :

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -|V_i||V_j||y_{ij}|\sin(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}), \quad i \neq j \quad (\text{II-8})$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j=1, i \neq j}^n |V_i||V_j||y_{ij}|\sin(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}), \quad i = j$$

Sous matrice J_2 :

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = |V_j| |y_{ij}| \cos(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}), \quad i \neq j \quad (\text{II-9})$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = 2|V_i| |y_{ij}| \cos(\gamma_{ij}) + \sum_{j=1, i \neq j}^n |V_j| |y_{ij}| \cos(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}), \quad i = j$$

Sous matrice J₃:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = |V_i| |V_j| |y_{ij}| \cos(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}), \quad i \neq j \quad (\text{II-10})$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j=1, i \neq j}^n |V_i| |V_j| |y_{ij}| \cos(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}), \quad i = j$$

Sous matrice J₄:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -|V_j| |y_{ij}| \sin(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}), \quad i \neq j \quad (\text{II-11})$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = - \sum_{j=1, i \neq j}^n |V_j| |y_{ij}| \sin(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) - 2|V_i| |y_{ij}| \sin(\gamma_{ij}), \quad i = j$$

II-3-4-2 Algorithme de Newton-Raphson [9]

Etape (1) : Formuler la matrice admittance (Y).

Etape (2) : Initialiser le compteur d'itération ($K = 0$), ainsi que les modules et les angles de tensions : $V_i = 1.0$ p.u et $\delta_i = 0$.

Etape (3) : Déterminer le vecteur des écarts de puissance $\Delta U^{(K)}$.

Etape (4) : Déterminer la matrice jacobienne $[J]^{(K)}$.

Etape (5) : Déterminer le vecteur d'erreur. $[\Delta X]^{(K)} = ([J]^{(K)})^{-1} \cdot [\Delta U]^{(K)}$.

Vérifier si le vecteur d'erreur est inférieur à une certaine tolérance ε : $[\Delta X]^{(K)} \leq \varepsilon$.

Si l'inégalité est vérifiée, le processus converge, aller à l'étape (6).

Sinon, calcule la valeur de $[X]$ à l'itération $(K+1)$, c à d :

$$[X]^{(K+1)} = [X]^{(K)} + [\Delta X]^{(K)}$$

Incrémente le nombre d'itérations (K) de 1 et retourne à l'étape (3).

Etape (6) : Calculer les puissances actives et réactives à générer par le jeu de barre de référence.

Etape (7) : Calculer les puissances apparentes qui transitent à travers les lignes, les pertes,...etc.

II-5 Conclusion

La méthode la plus utilisée pour la résolution du problème de l'écoulement de puissance, est celle de Newton-Raphson (NR), qui a été détaillée et appliquée à notre problème. La méthode de NR a montré son efficacité, vu sa convergence rapide (quadratique). Le problème de l'écoulement de puissance occupe une partie très importante dans la procédure de commande et contrôle des réseaux électriques, dont la solution aide l'exploitant ou le dispatcheur du système électrique à connaître les niveaux de tension de tous les jeux de barres, les pertes de puissance, les contraintes de fonctionnement forcées et les lignes de transport surchargées. [1]

Chapitre : III

Tests et Résultats Numériques

III-1- Introduction

Ce chapitre est consacré au test l'algorithme de l'écoulement de puissance de Newton-Raphson (NR-EP) sur différents types de réseaux testes.

III-2 Test de l'algorithme NR-EP

Dans cette partie, on va appliquer l'algorithme de l'écoulement de puissance de Newton-Raphson sur différents types de réseaux, et voir leur résultats.

2-1 Réseau test à 6 jeux de barres [4]

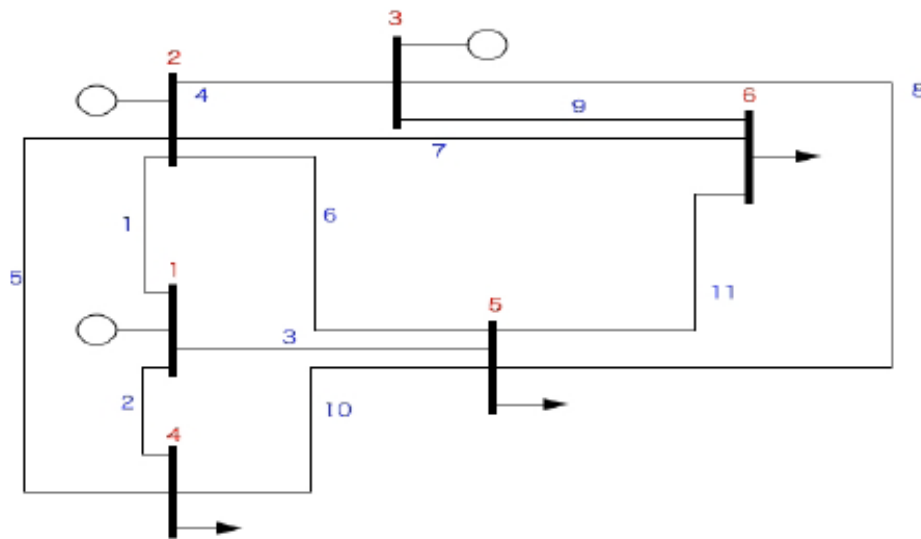


Figure III-1 Schéma unifilaire du réseau électrique à 6 jeux de barres.

Ce réseau est constitué de 11 lignes de transport, 3 générateurs et 3 charges au niveau des jeux de barres n° 4, 5 et 6 (Fig.III-1). Les données de ce réseau sont montrées dans l'annexe. La puissance et la tension de base sont respectivement ,100 MVA et 230 KV. Les puissance actives et réactives générées (en MW et MVAR) sont limitées par les contraintes d'inégalités suivantes :

$$\begin{aligned}
50 &\leq P_{g1} \leq 200 \\
37.5 &\leq P_{g2} \leq 150 \\
45 &\leq P_{g3} \leq 180 \\
-100 &\leq Q_{g1} \leq 100 \\
-100 &\leq Q_{g2} \leq 100 \\
-100 &\leq Q_{g3} \leq 100
\end{aligned}$$

Tableau III-1: tensions du réseau électrique à 6 J.B.

<i>J.B</i>	NR-EP	
	$V(p.u)$	$\delta(p.u)$
1	1.050	0.000
2	1.050	-3.671
3	1.070	-4.273
4	0.989	-4.195
5	0.985	-5.276
6	1.004	-5.947

Le tableau (III-1) montre le module et la phase des tensions après la convergence des algorithmes NR-EP. Les résultats énergétiques figurent dans le tableau (III-2).

D'après le tableau (III-1) on remarque que toutes les tensions sont dans leurs limites admissibles.

Tableau IV-2 : puissances et coûts de production du réseau électrique à 6 J.B.

<i>J.B</i>	$P_g(MW)$	$Q_g(MVAR)$
1	107.88	15.96
2	50.00	74.36
3	60.00	89.63
Puissance total générée	217.88	179.95
Puissance total demandée	210	210
Pertes totales de puissance	7.87	-30.06
Coût de production (\$/h)	3189.50	

Le tableau (III-2) montre que le coût de production de la puissance active, après convergence de l'algorithme de l'écoulement de puissance de Newton-Raphson (NR-EP).

2-2 Réseau test à 30 jeux de barres (IEEE 30-bus)

Le réseau IEEE 30-bus est constitué de 30 jeux de barres et 6 générateurs (aux jeux de barres n° 1, 2, 5, 8, 11, et 13), alimentant un ensemble de 20 charges à travers 41 lignes de transport (Fig.III-2). La puissance et la tension de base sont respectivement 100 MVA et 135 kV.

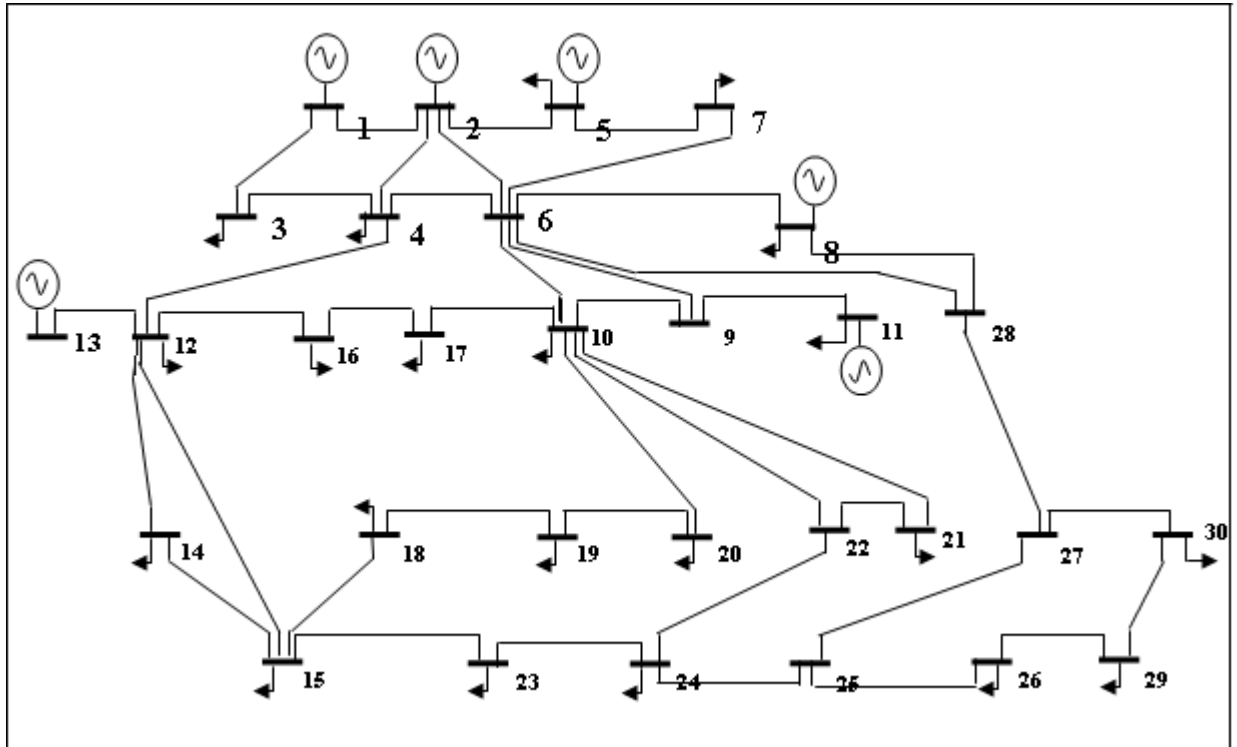


Figure III-2 : Schéma unifilaire du réseau électrique à 30 jeux de barres.

En premier lieu, les contraintes de sécurité considérées seront les limites des modules et phases des tensions ainsi que les puissances actives et réactives des générateurs. Ensuite on va inclure les contraintes de sécurité sur les puissances actives transmises par les lignes, et voir la différence. Il est clair d'après le tableau (III-3) que les contraintes de sécurité pour les modules et phases de tension, sont dans leurs limites admissibles.

Tableau III-3: Tensions du réseau électrique à 30 J.B.

$J.B$	$V_{\min}$ (p.u)	$V_{\max}$ (p.u)	$V(p.u)$	$\delta_{\min}$ (degré)	$\delta_{\max}$ (degré)	$\delta(\text{degré})$
1	0.95	1.10	1.060	-14	0.0	0.000
2	0.95	1.10	1.043	-14	0.0	-1.535
3	0.90	1.10	1.031	-14	0.0	-3.525
4	0.90	1.10	1.023	-14	0.0	-4.294
5	0.95	1.10	1.010	-14	0.0	-6.165
6	0.90	1.10	1.015	-14	0.0	-5.050
7	0.90	1.10	1.005	-14	0.0	-6.039
8	0.95	1.10	1.010	-14	0.0	-5.265
9	0.90	1.10	1.026	-14	0.0	-6.504
10	0.90	1.10	1.004	-14	0.0	-8.504
11	0.95	1.10	1.082	-14	0.0	-4.358
12	0.90	1.10	1.030	-14	0.0	-7.885
13	0.95	1.10	1.071	-14	0.0	-6.431
14	0.90	1.10	1.012	-14	0.0	-8.830
15	0.90	1.10	1.006	-14	0.0	-8.882
16	0.90	1.10	1.011	-14	0.0	-8.398
17	0.90	1.10	1.001	-14	0.0	-8.713
18	0.90	1.10	0.993	-14	0.0	-9.494
19	0.90	1.10	0.988	-14	0.0	-9.653
20	0.90	1.10	0.991	-14	0.0	-9.426
21	0.90	1.10	0.991	-14	0.0	-8.999
22	0.90	1.10	0.991	-14	0.0	-8.988
23	0.90	1.10	0.981	-14	0.0	-9.276
24	0.90	1.10	0.977	-14	0.0	-9.436
25	0.90	1.10	0.976	-14	0.0	-9.503
26	0.90	1.10	0.958	-14	0.0	-9.960
27	0.90	1.10	0.984	-14	0.0	-9.260
28	0.90	1.10	1.010	-14	0.0	-5.495
29	0.90	1.10	0.964	-14	0.0	-10.590
30	0.90	1.10	0.952	-14	0.0	-11.547

Le temps de convergence de l'algorithme a été de 4.55 secondes, et le processus a convergé à la 27^{ème} itération.

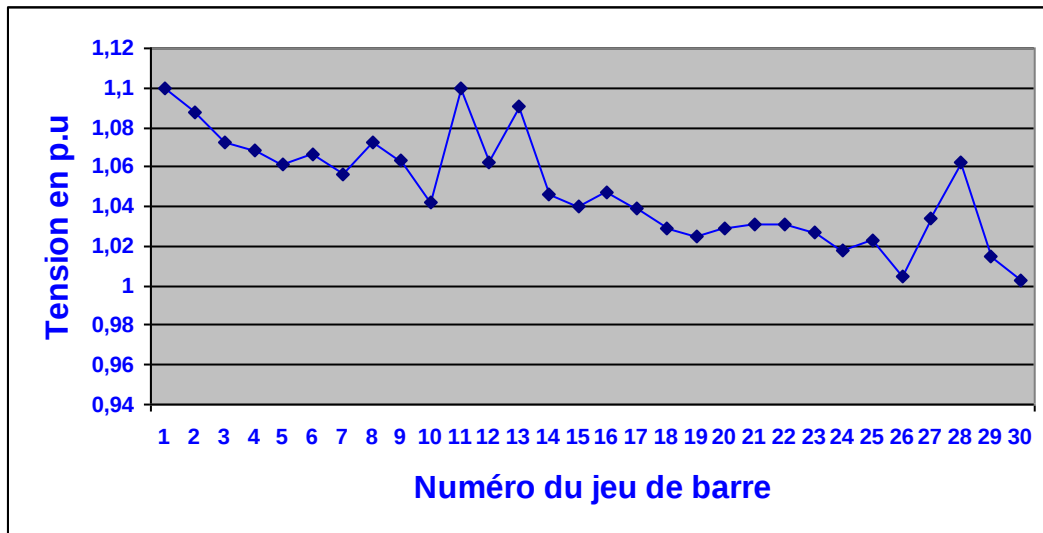


Figure III-3 Modules des tensions du réseau électrique à 30 J.B.

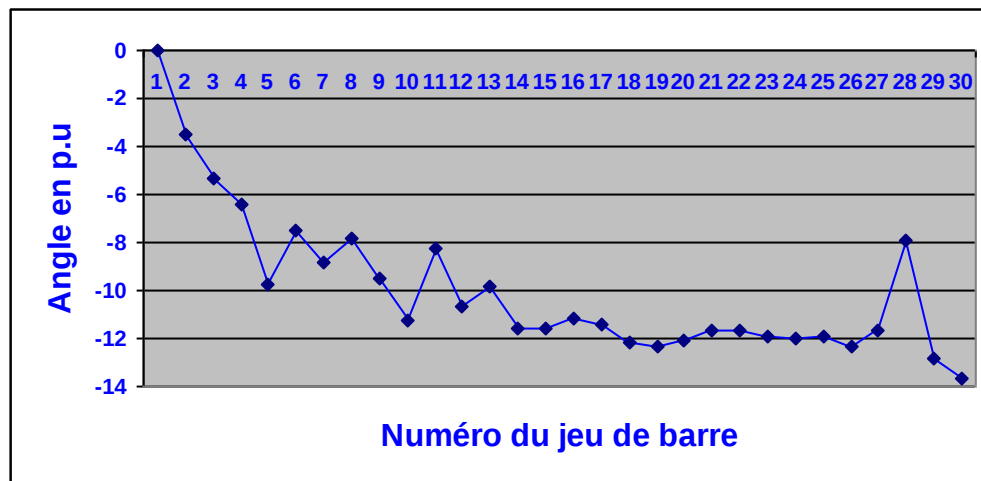


Figure III-4 : Phases des tensions du réseau électrique à 30 J.B.

Tableau III-4: Puissances et coûts de production du réseau électrique à 30 J.B.

<i>J.B</i>	$P_{g \min}$ (MW)	$P_{g \max}$ (MW)	P_g (MW)	$Q_{g \min}$ (MVAR)	$Q_{g \max}$ (MVAR)	Q_g (MVAR)
1	50	200	99.00	-20	200	16.22
2	20	80	80.00	-20	100	7.58
5	15	50	50.00	-15	80	15.52
8	10	35	20.00	-15	60	17.44
11	10	30	20.00	-10	50	29.22
13	12	40	20.00	-15	60	31.60
Puissance total générée	292.64			145.43		
Puissance totale demandée	283.40			126.20		
Pertes totales	9.24			38.05		

Tableau III-5: Puissances actives transmises par les lignes du réseau électrique à 30 J.B.

<i>N° ligne</i>	<i>Du J.B</i>	<i>Au J.B</i>	<i>Limite Normale</i> (MW)	<i>puissance</i> (MW)
1	1	2	80	80.000
2	1	3	44	41.48
3	2	4	80	25.58
4	3	4	80	38.35
5	2	5	44	43.92
6	2	6	80	31.15
7	4	6	80	31.27
8	5	7	80	-5.72
9	6	7	80	28.78
10	6	8	80	-0.72
11	6	9	80	10.60
12	6	10	80	10.56
13	9	11	80	-23.27
14	9	10	80	33.88
15	4	12	80	24.58
16	12	13	80	-20.13
17	12	14	80	8.02
18	12	15	80	18.30
19	12	16	80	7.18
20	14	15	80	1.750
21	16	17	80	3.62
22	15	18	80	6.06
23	18	19	80	2.810
24	19	20	80	-6.69
25	10	20	80	8.98
26	10	17	80	5.41
27	10	21	80	16.60
28	10	22	80	7.65
29	21	22	80	-1.01
30	15	23	80	5.52
31	22	24	80	6.59
32	23	24	80	2.28
33	24	25	80	0.09
34	25	26	80	3.54
35	25	27	80	-3.45
36	28	27	80	16.75
37	27	29	80	6.17
38	27	30	80	7.11
39	29	30	80	3.68
40	8	28	80	4.22
41	6	28	80	12.58

III-3 Conclusion

Dans ce chapitre, on a appliqué l'algorithme de l'écoulement de puissance de Newton-Raphson (NR-EP), sur des réseaux standards. Les résultats obtenus sont très concluants du point de vue de modules et de phases des tensions ainsi que les puissances actives et réactives des générateurs.

Conclusion générale

Dans ce travail, on a présenté la base théorique du problème de la répartition de puissance (PF, EP) dans les réseaux électriques. On a exposé la méthode de Newton Raphson NR pour résoudre le problème de l'PF. Les contraintes de sécurité principales considérées sont les puissances actives et réactives générées ainsi que les modules des tensions des jeux de barres. Les puissances actives transmises par les lignes de transport, ont été introduites parmi les contraintes de sécurité du problème, vue leur impact direct sur la stabilité du système électrique. La considération des contraintes de puissances transmises, peut forcer quelques lignes à fonctionner avec leurs valeurs limites maximum.

La méthode proposée, commence par la formulation du problème de l'PF sera résolu par une technique itérative robuste utilisant l'environnement Matlab .

Les méthodes proposées ont été testées sur des réseaux électriques à moyenne échelle, dont les résultats ont été validés par les résultats obtenus sont très concluantes et confirment la validité et l'efficacité de cette méthode.

Comme on sait que la répartition de puissance se fait en temps réel, cette méthode a montré une convergence rapide (temps acceptable).

En perspective, nous proposons d'optimiser d'autres fonctions objectives importantes, comme la puissance réactive, les pertes de puissances actives et les émissions des gaz toxiques dans l'atmosphère. La théorie des ensembles flous, s'impose alors, pour la modélisation de toutes les grandeurs jugées incertaines, du système de puissance, comme par exemple la puissance active et réactive des générateurs, les charges...etc.

Tableau 1 : Données des lignes et transformateurs du réseau électrique à 6 J.B

Du $J.B$	Au $J.B$	r ($p.u$)	x ($p.u$)	$b/2$ ($p.u$)
1	2	0.10	0.20	0.040
1	4	0.05	0.20	0.040
1	5	0.08	0.30	0.060
2	3	0.05	0.25	0.060
2	4	0.05	0.10	0.020
2	5	0.10	0.30	0.040
2	6	0.07	0.20	0.050
3	5	0.12	0.26	0.050
3	6	0.02	0.10	0.020
4	5	0.20	0.40	0.080
5	6	0.10	0.30	0.060

Tableau 2 : Données des jeux de barres du réseau électrique à 6 J.B.

Numéro $J.B$	Type	P_d (MW)	Q_d ($MVAR$)	V ($p.u$)	δ (degré)	$V_{\min}$ ($p.u$)	$V_{\max}$ ($p.u$)
1	Ref	0.000	0.000	1.05	0.00	1.05	1.05
2	PV	0.000	0.000	1.05	0.00	1.05	1.05
3	PV	0.000	0.000	1.07	0.00	1.07	1.07
4	PQ	70.00	70.00	1.00	0.00	0.95	1.05
5	PV	70.00	70.00	1.00	0.00	0.95	1.05
6	PQ	70.00	70.00	1.00	0.00	0.95	1.05

Tableau 3 : Données des générateurs du réseau électrique à 6 J.B.

N $J.B$	P_g (MW)	Q_g ($MVAR$)	$Q_{\max}$ ($MVAR$)	$Q_{\min}$ ($MVAR$)	$P_{g \max}$ (MW)	$P_{g \min}$ (MW)	γ ($\$/MW^2h$)	β ($\$/MWh$)	α ($\$/h$)
1	0	0	100	-100	200	50	0.00533	11.669	213.1
2	50	0	100	-100	150	37.5	0.00889	10.333	200
3	60	0	100	-100	180	40	0.00741	10.833	240

Tableau 4 : Données des lignes et transformateurs du réseau électrique à 30 J.B

Du $J.B$	Au $J.B$	r ($p.u$)	x ($p.u$)	$b/2$ ($p.u$)
1	2	0.02	0.06	0.03
1	3	0.05	0.19	0.02
2	4	0.06	0.17	0.02
3	4	0.01	0.04	0.00
2	5	0.05	0.20	0.02
2	6	0.06	0.18	0.02
4	6	0.01	0.04	0.00
5	7	0.05	0.12	0.01
6	7	0.03	0.08	0.01
6	8	0.01	0.04	0.00
6	9	0.00	0.21	0.00
6	10	0.00	0.56	0.00
9	11	0.00	0.21	0.00
9	10	0.00	0.11	0.00
4	12	0.00	0.26	0.00
12	13	0.00	0.14	0.00
12	14	0.12	0.26	0.00
12	15	0.07	0.13	0.00
12	16	0.09	0.20	0.00
14	15	0.22	0.20	0.00
16	17	0.08	0.19	0.00
15	18	0.11	0.22	0.00
18	19	0.06	0.13	0.00
19	20	0.03	0.07	0.00
10	20	0.09	0.21	0.00
10	17	0.03	0.08	0.00
10	21	0.03	0.07	0.00
10	22	0.07	0.15	0.00
21	22	0.01	0.02	0.00
15	23	0.10	0.20	0.00
22	24	0.12	0.18	0.00
23	24	0.13	0.27	0.00
24	25	0.19	0.33	0.00
25	26	0.25	0.38	0.00
25	27	0.11	0.21	0.00
28	27	0.00	0.40	0.00
27	29	0.22	0.42	0.00
27	30	0.32	0.60	0.00
29	30	0.24	0.45	0.00
8	28	0.06	0.20	0.02
6	28	0.02	0.06	0.01

Tableau 5 : Données des jeux de barres du réseau électrique à 30 J.B.

N <i>J.B</i>	Type	P_d (MW)	Q_d (MVAR)	V (p.u)	δ (degré)	$V_{\min}$ (p.u)	$V_{\max}$ (p.u)
1	Ref	0.000	0.000	1.06	0.00	0.95	1.10
2	PV	21.70	12.70	1.043	0.00	0.95	1.10
3	PQ	2.400	1.200	1.000	0.00	0.90	1.10
4	PQ	7.600	1.600	1.000	0.00	0.90	1.10
5	PV	94.20	19.00	1.010	0.00	0.95	1.10
6	PQ	0.000	0.000	1.000	0.00	0.90	1.10
7	PQ	22.80	10.90	1.000	0.00	0.90	1.10
8	PV	30.00	30.00	1.010	0.00	0.95	1.10
9	PQ	0.000	0.000	1.000	0.00	0.90	1.10
10	PQ	5.800	2.000	1.000	0.00	0.90	1.10
11	PV	0.000	0.000	1.082	0.00	0.95	1.10
12	PQ	5.800	7.500	1.000	0.00	0.90	1.10
13	PV	0.000	0.000	1.071	0.00	0.95	1.10
14	PQ	11.20	1.600	1.000	0.00	0.90	1.10
15	PQ	0.000	2.500	1.000	0.00	0.90	1.10
16	PQ	6.200	1.800	1.000	0.00	0.90	1.10
17	PQ	8.200	5.800	1.000	0.00	0.90	1.10
18	PQ	3.500	0.900	1.000	0.00	0.90	1.10
19	PQ	9.000	3.400	1.000	0.00	0.90	1.10
20	PQ	3.200	0.700	1.000	0.00	0.90	1.10
21	PQ	9.500	11.20	1.000	0.00	0.90	1.10
22	PQ	2.200	0.000	1.000	0.00	0.90	1.10
23	PQ	17.50	1.600	1.000	0.00	0.90	1.10
24	PQ	0.000	6.700	1.000	0.00	0.90	1.10
25	PQ	3.200	0.000	1.000	0.00	0.90	1.10
26	PQ	8.700	2.300	1.000	0.00	0.90	1.10
27	PQ	0.000	0.000	1.000	0.00	0.90	1.10
28	PQ	0.000	0.000	1.000	0.00	0.90	1.10
29	PQ	2.400	0.900	1.000	0.00	0.90	1.10
30	PQ	10.60	1.900	1.000	0.00	0.90	1.10

Tableau 6 : Données des générateurs du réseau électrique à 30 J.B .

N <i>J.B</i>	P_g (MW)	Q_g (MVAR)	$Q_{\max}$ (MVAR)	$Q_{\min}$ (MVAR)	$P_{g \max}$ (MW)	$P_{g \min}$ (MW)	γ (\$/MW ² h)	β (\$/MWh)	α (\$/h)
1	0.0	0.0000	200	-20	200	50	0.00375	2.00	0
2	80	27.687	100	-20	80	20	0.01750	1.75	0
5	50	21.544	80	-15	50	15	0.06250	1.00	0
8	20	22.933	60	-15	35	10	0.00830	3.25	0
11	20	38.883	50	-10	30	10	0.02500	3.00	0
13	20	40.345	60	15	40	12	0.02500	3.00	0

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Sayah Samir «Application des Ensembles Flous à la Repartition Optimale de la Puissance Dans les Réseaux Electriques» Mémoire de magister, université de setif (2005).
- [2] M.Dris et G.Mohammed et F.Abdelhamid «Calcule d'écoulement de Puissance Par La Méthode GAUSS-SAIDEL» Mémoire de fin d'étude université de Biskra Promotion (1996).
- [3] Z.F.Fethi et G.Abdelmalek et D.Mohammed «L'application de la Méthode Newten-Raphson à L'écoulement de Puissance Dans Le Système Electrique» Mémoire de fin d'étude université EL-OUDE Promotion (2007)
- [4] M.Gaboussa et B. Boubaker, «Echange Economique de Puissance entre des Reseaux Electrique» Mémoire de Fin d'Etudes pour l'obtention du Diplôme d'ingénieur d'Etat en Electrotechnique, Université Biskra, Promotion 2004.
- [5] A.Messaouoi «Dispatching Economique Des Reseaux Electrique Par Les Méthodes Numériques» Mémoire de magister, université de Batna (2001).
- [6] S.Touil et A.Boulbir «Analyse de la stabilité transitoire d'un réseau électrique» Mémoire de fin d'étude centre universitaire d'Oum El-bouaghi (promotion 2001).
- [7] H. Wayne Beaty «Handbook of Electric Power Calculations» New York, NY: McGrawHill, Inc., 2001.
- [8] P. Kundur «Power System Stability and Control» New York, NY: McGraw Hill, Inc., 1994.
- [9] T. Bouktir «Application de la Programmation Orientée Objet à l'Optimisation de L'Ecoulement de Puissance Thèse» Doctorat, Université de Batna, 2004.
- [10] R.Labdani «Optimisation De L'écoulement De puissance Dans Un Marche De L'électricité Libère Par Essaims De Particules» Mémoire de magistère, université d'Oum El-bouaghi (2007)
- [11] J.D. Weber «Implementation of a Newton-Based Optimal Power Flow into a Power System Simulation Environment» Master Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1997.