

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



Université d'EL-Oued
Faculté des Sciences et de Technologies

Mémoire de Fin d'Etude
En vue de l'obtention du diplôme de
MASTER ACADEMIQUE

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

Thème

***Application des algorithmes
génétiques à l'optimisation de la
production énergie active dans
réseau électrique***

Diriger par

Réalise par:

M^{er}. GACEM Abdelmalek

* FRIDJAT Zineddine

* TAMMA Mohammed Elhadi

Soutenu Juin 2014

Résumé

Habituellement, le calcul de la répartition optimale de la puissance ou l'écoulement de puissance optimal (OPF), au niveau d'un réseau électrique, emploie des techniques de programmation mathématique standard. Parfois ces techniques ne sont pas convenables pour traiter certaines considérations pratiques rencontrées dans les systèmes de puissance, telle que l'incertitude des contraintes de fonctionnement.

Les contraintes d'un système électrique réel peuvent être divisées en deux groupes : les limites physiques de commande et les limites de fonctionnement. Les limites physiques sur les variables de commande ne peuvent pas être dépassées. Par exemple, un générateur ne peut pas produire une puissance au-delà ses limites supérieures et inférieures (rigides). Donc on ne peut pas admettre une solution de l'OPF qui donne un dépassement de ce genre. Cependant, les limites de fonctionnement peuvent être considérées souples puisqu'elles sont imposées pour des considérations de sécurité et ne représentent nullement des limites physiques.

Elles peuvent être dépassées temporairement, si le besoin se fait sentir, pour obtenir des solutions pratiques. Pour bien prendre en compte ce type de contraintes, on propose dans ce travail l'application d'une méthode basée sur l'algorithme génétique, au problème de la répartition optimale des puissances, connue aussi par « l'écoulement de puissance optimal » (OPF). La méthode développée a été testée sur des réseaux électriques standard à moyenne échelle (6 J.B, 25 J.B et 30 J.B), et comparée avec d'autres méthodes. Les résultats numériques de test montrent que cette méthode est prometteuse et possède une grande flexibilité pour incertitudes dans certains systèmes de puissance pratique.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier tout premièrement Dieu le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience , qu'il nous a donné durant toutes ces longues années .

*Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur **Mr. GACEM Abdelmalek** pour avoir d'abord proposée ce thème, pour suivi continuel tout le long de la réalisation de ce mémoire et qui n'a pas cessée de nous donner ses conseils.*

Nous tenons à remercier vivement toutes personnes qui nous ont aidés à élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à accomplir ce travail.

Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation par ailleurs, Nos remerciements à tous les membres du jury qui ont accepté de juger notre travail.

En fin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis et collègues pour le soutien moral et matériel...

**TAMMA
FRIDJAT**

DEDICACE



Je dédie ce modeste travail à

♥ *Mon très cher père « MOHAMMED DJABARI »*

♥ *Ma très très très chère mère « RAHAL DJAMILA »*

♥ *Ma très chère grande mère « SALHI DJABARIA »*

♥ *A mes très cher frère «Kamal , Mohammed Seghir, Mohemmed Tahar, Sohaib
Abd El Aali »*

♥ *A mes sœurs «Sara , Asma, Zoubaida ,Sabrina , Wiam»*

♥ *A ma fiancée :B.A . HASSIBA*

A mon camarade de travail: « El Hadi »

A mes amies particulière : AMARA

*A tous mes amis : Elhadi , Mohammed ,Tarek , Mohammed Djemoui , Salafi ,
Ali , Abd Erazzak , Djabaria et Radhia*

A tous la promotion d'Électrotechnique 2013/2014

ZINEDDIN

Sommaire

- ✓ Résumé
- ✓ Remerciement
- ✓ Dédicaces
- ✓ Sommaire
- ✓ Liste des Symboles
- ✓ Liste des figures
- ✓ Liste des tableaux

CHAPITRE I : Répartition des charges électriques

I.1	Introduction :	3
I.2	Formulation du problème :	3
I.3	Objectif de l'étude de la répartition de charge :	3
I.4	Classification des jeux de barres:	4
I.4.1	J.d.B de référence (slack bus) :	4
I.4.2	J.d.B de contrôle (P.V bus) :	4
I.4.3	J.d.B de charge (P.Q bus):	4
I.5	Classification des variables des équations de répartition charge :	5
I.5.1	Variables de perturbation (Variables non contrôlées) :	5
I.5.2	Variables d'états:	5
I.5.3	Variables de contrôle:	5
I.6	Bilans de puissances et balancier :	5
I.6.1	Bilans de puissances:	5
I.6.2	Le générateur balancier	6
I.7	Constitution d'un réseau:	6
I.7.1	Les générateurs	6
I.7.2	Les charges :	7
I.7.3	Ligne de transport :	7
I.7.4	Transformateur :	8
I.7.5	Élément shunt :	9

I.8	Formulation des équations de répartition de charge :	9
I.8.1	Relations paramétriques du système :	9
I.8.2	Les équations aux J.d.B de charge:	9
I.8.3	Exemple d'un système à deux jeu de barres :	10
I.8.4	Calcul de la puissance au niveau de jeu de barres:	12
I.8.5	La puissance transmise dans la ligne :	12
I.8.6	Les pertes de puissance dans lignes :	13
I.9	Les méthodes numériques itrative:	13
I.9.1	Les Principe de méthode de Newton-Raphson :	14
I.9.1.1	Résolution d'une équation à une variable unique non linéaire :	14
I.9.1.2	Résolution d'un système d'équation a ((n)) variables non linéaire:	14
I.9.2	Application de la méthode de N-R au problème de l'écoulement de puissance :	16
I.9.3	Détermination des sous matrices de la Jacobienne J :	18
I.9.4	Organigramme de Newton-Raphson :	18
I.10	Conclusion :	20

CHAPITRE II : Dispatching Economique

II.1	Introduction :	22
II.2	Architecture des réseaux électriques :	22
II.3	Stratégies du fonctionnement des centrales électriques :	22
II.3.1	Unités de Base :	23
II.3.2	Unités Intermédiaires :	23
II.3.3	Unités de Pointes :	23
II.3.4	Unités de Réserve :	24
II.4	Dispatching économique :	24
II.5	Fonction du coût et incrémentation du coût :	25
II.6	Les contraintes :	26
II.6.1	Contraintes d'égalité :	26
II.6.1.1	Cas d'un Système sans pertes:	26
II.6.1.2	Cas d'un Système avec pertes :	26
II.6.2	Contraintes d'inégalités :	27
II.7	Formulation mathématique du problème du Dispatching Economique :	27

II.7.1	dispatching économique sans pertes :	27
II.7.1.1	Méthode lagrangien :	27
II.7.1.2	Méthode graphique:	28
II.7.2	Dispatching économique avec pertes :	29
II.7.2.1	Calcule les pertes :	30
II.7.2.2	Incrémentation des pertes de transmission:	30
II.7.2.3	la résolution du problème:	30
II.7.3	la méthode itérative de lambda :	33
II.8	Conclusion.....	36

CHAPITRE III : Algorithme génétique

III.1	Introduction :	38
III.2	Les algorithmes génétiques	38
III.3	Codage des chromosomes et décodage :	39
III.3.1	Codage binaire	39
III.3.2	Codage de gray	40
III.3.3	Codage dynamique des paramètres.....	41
III.3.4	Codage réel	42
III.4	Présentation des algorithmes génétiques :	42
III.4.1	Evaluation :	44
III.4.2	La sélection :	44
III.4.2.1	Méthode de la roulette de loterie (casino) :	45
III.4.2.2	Sélection par tournoi :	45
III.4.2.3	La sélection universelle stochastique :	45
III.4.2.4	La méthode élitiste :	46
III.4.3	La recombinaison génétique :	46
III.4.3.1	Croisement :	46
III.4.3.2	La mutation :	49
III.5	Conclusion :	50

CHAPITRE IV Application de l'A-G on problème CP

IV.1	Introduction	52
IV.2	L'objectif de chapitre :	52
IV.3	Test de l'algorithme Génétique :	52
IV.3.1	Réseau 6 jeux de barres :	53
IV.3.2	Réseau 25 jeux de barres :	56
IV.3.3	Réseau 30 jeux de barres :	62
IV.4	Conclusion :	67
	✓ Conclusion générale	
	✓ Bibliographie	
	✓ Annexe	

Dédicace



Je dédie ce modeste travail :

A ces qui ma donné ce que personne ne peut me donner.

A l'étoile qui guide mon chemin.

Au soleil qui allume ma vie.

Mes très chers parents :



Ma mère : AHMIM MARIEM.



Mon père : SALAH.



Ma chère sœur : FATIHA et HANAN.



A mes chères frères : LAROSSE, ILYAS et IBRAHIM

A les enfants : Abd Samad et Abd Momen et dhekra



A tout la famille: TAMMA.

A mon camarade de travail: ZINEDDINE

Je dédie tout l'équipe sport étoile oued alenda (c.s.e.o.a)

A mes camarades de classe :, , Mohammed ,Tarek, Mohammed Djemoui Amara Mohammed

Seghir , Abd'Erazzak, et Radhia

A tout mes professeurs : qu'ils sont m'enseigner et guidé dans mes études.

A tout qu'ils sont proche de moi.

A tous la promotion d'Électrotechnique 2013/2014

ELhadi

Liste des Symboles

OPF	: Ecoulement de puissance optimal.
P_g	: Puissance active générée.
Q_g	: Puissance réactive générée.
π	: modèle la ligne électrique.
Z	: Les différentes impédances.
Y_{cap}	: l'impédance à vide.
α_{ij}	: le déphasage du déphaseur de la puissance active.
P.V bus	: les grandeurs de la tension et la puissance active sont spécifiées.
P.Q bus	: la puissance totale injectée est spécifiée pour chacun d'eux.
P_L	: Perte active totale.
Q_L	: Perte réactive de consommation.
ng	: Nombre de nœuds de génération.
nc	: Nombre de nœuds de consommation.
V_i	: Module de la tension au nœud i .
$V_{i_{min}}, V_{i_{max}}$	: Respectivement limites (minimale et maximale) de la tension.
S_{ij}	: Puissance apparente transitée dans la ligne i - j .
$S_{ij_{max}}$	: Puissance apparente maximale transitée dans la ligne i - j .
P_{ij}	: Puissance active transitée dans la ligne i - j .
Q_{ij}	: Puissance réactive transitée dans la ligne i - j .
A_k	: Le rapport de transformation des transformateurs.
nt	: Nombre de transformateur.
U	: la tension phase/terre.
I	: le courant injecté en un nœud.
Y	: matrice d'admittance aux nœuds.
S	: Puissance apparente.
S_b	: Valeur de base.
S_d	: Puissance apparente demandée.
S_G	: Puissance apparente générée.
NR	: Newton-Raphson.
P_{gi}	: la quantité de génération en mégawatts au générateur i .
$\delta C_i / \delta P_{Gi}$	: l'incrément du coût.
λ	: Multiplicateur de Lagrange.
P_d	: La valeur de la charge totale.
P_D	: La puissance demandée.
L_n	: Le facteur de pénalité.
AG	: les algorithmes génétiques.
AE	: des algorithmes évolutionnaires.
l	: Longueur de chaînes binaires.
p_c	: probabilité de croisement.
p_m	: probabilité de mutation.
L	: la fonction de Lagrange.
k	: individus.

Liste des figures

CHAPITRE I : Répartition des charges électriques

Figure (I-1) : Modèles d'un générateur	6
Figure (I-2) : Modèle d'une charge électrique sous forme d'une impédance constante	7
Figure (I-3) : Modèle d'une ligne par un schéma en Π équivalent	8
Figure(I-4) :Modèle d'un transformateur	8
Figure (I-5):système à deux J.d.B	10
Figure (I-6) : Organigramme simplifié de l'algorithme de Newton-Raphson	19

CHAPITRE II : Dispatching Economique

Figure (II-1) : stratégie de génération d'une société d'électricité	23
Figure (II-2) : Modèle du système électrique utilisé dans le Dispatching Economique	24
Figure (II-3): Courbe de coût typique (entrée-sortie) d'un générateur	25
Figure (II-3) : Courbe typique de l'accroissement du coût de combustible	26
Figure (II-4) : Méthode graphique pour la solution du dispatching économique de trois générateurs	29
Figure (II-5) : l'organigramme de méthode de lagrangien avec pertes	33
Figure (II-6) : l'explication graphique de la méthode Itératif de la lambda	34
Figure (II-7) : Organigramme de la méthode lambda	35

CHAPITRE III : Algorithme génétique

Figure (III-1) Organigramme d'un algorithme génétique simple	43
Figure (III-2) : Sélection par la méthode de la roulette de casino.	45
Figure (III-3). Principe du croisement à un site.	47
Figure (III-4). Principe du croisement multi-sites.	48
Figure (III-5). Principe du croisement uniforme.	49
Figure (III-6). Principe de la mutation.	49

CHAPITRE IV : Application del'AGau problème CP

Figure(IV-1) :Schéma unifilaire du réseau électrique à 6 jeux de barres	54
Figure (IV-2) : Evolution du coût de production pour le réseau électrique à 6 jeux de barre	55
Figure (IV-3) Modules des tensions du réseau électrique à 6 jeux de barre	56

Figure (IV-4) Angles des tensions du réseau électrique à 6 jeux de barre.	56
Figure (IV-5) Schéma unifilaire du réseau électrique à 25 jeux de barres.	57
Figure (IV-6) : Evolution progressive de la fonction coût de l'AG - Binaire.	58
Figure (IV-7) Modules des tensions du réseau électrique à 25 jeux de barre.....	60
.Figure (IV-8) : Angles des tensions du réseau électrique à 25 jeux de barre.....	60
.Figure (IV-9) : les pertes actives du réseau électrique à 25 jeux de barre.....	60
Figure (IV-10) : Puissances actives générées du réseau électrique à 25 jeux de barre.	61
Figure (IV-11) : Schéma unifilaire du réseau électrique à 30 jeux de barres.	62
Figure (IV-12) : Evolution progressive de la fonction coût de l'AG - Binaire.	63
Figure (IV-13) : Puissances réactives générées du réseau électrique à 30 jeux de barre	63
Figure (IV-14) Modules des tensions du réseau électrique à 30 jeux de barre.	66
Figure (IV-15) : Angles des tensions du réseau électrique à 30 jeux de barre.....	66
.Figure (IV-16) : les pertes actives du réseau électrique à 30 jeux de barre.	67

Liste des tableaux

CHAPITRE I : Répartition de charge électrique

Tableau (I-1) : classification des variables	4
--	---

CHAPITRE III : Algorithme génétique

Tableau (III- 1) : Code binaire et code gray sur 4 bits	41
---	----

CHAPITRE IV : Application de l'AG au problème CP

Tableau (IV-1):.les opérateurs de l'AG – Binaire.	53
Tableau (IV- 2) : Les données des fonctions de coût des 3 générateurs du réseau 6 bus.....	53
Tableau (IV-3) :Tensions du réseau électrique à 6 J.B.	54
Tableau (IV-4) Puissances et coûts de production du réseau électrique à 6 J.B.	55
Tableau (IV-5) Les données des fonctions de coût des 3 générateurs du réseau 6 bus	58
Tableau (IV-6) Tensions du réseau électrique à 25 J.B	59
Tableau (IV-7) Puissances et coûts de production du réseau électrique à 25 J.B.	60
Tableau (IV-8): Les données des fonctions de coût des 6 générateurs du réseau 30 bus.....	63
Tableau (IV-9) : Tensions du réseau électrique à 30 J.B.....	65
Tableau (VI-10) : Puissances et coûts de production du réseau électrique à 30 J.B.....	66

Introduction générale

Le rôle principal de toute entreprise chargée de la production d'énergie électrique est d'assurer à tout moment, et en tout lieu, la couverture des demandes des utilisateurs en puissances actives et réactives. L'entreprise doit en outre garantir une qualité acceptable de la puissance avec un coût d'exploitation réduit. Pour bien exploiter un réseau électrique donné, il faut tout d'abord résoudre les problèmes d'ordre technique et économique. Souvent, on se trouve confronté à un problème, qui est celui de la répartition économique des puissances. Au début, la solution utilisée consiste à charger ou à faire produire au maximum les unités ayant le meilleur rendement. Cette solution n'est pas rentable puisque l'abus de fonctionnement des machines diminue leurs durées de vie et par conséquent, les frais d'entretien et de maintenance augmentent considérablement. L'extension et la complexité du réseau, laisse le choix aux chercheurs pour le développement de nouvelles méthodes afin de contribuer à l'allègement de ce problème.

Le problème de la répartition économique d'énergie a pris une importance considérable avec l'apparition de la crise d'énergie nécessitant des combustibles de plus en plus chers. Il faut donc planifier les puissances actives et réactives de chaque centrale électrique, de telle sorte que le coût total de fonctionnement du réseau entier soit minimal. D'une autre façon, il faut varier les puissances actives et réactives des générateurs dans certaines limites afin de satisfaire la demande particulière de la charge avec un coût minimal du combustible. Ce processus est appelé l'écoulement de puissance optimal, et parfois, il est connu comme le problème du dispatching économique.

L'exploitation du grand développement du domaine informatique et l'apparition des nouvelles générations d'ordinateurs plus rapides et plus puissants, ont conduit à une étude plus profonde et un calcul plus précis et rigoureux du réseau électrique, en général cette étude est divisée en quatre chapitres :

Le premier chapitre : L'étude de l'écoulement de puissance qui consiste à coordonner l'exploitation de toutes les sources d'énergie et la répartition de la production entre les différents utilisateurs, et ce la dans le but d'avoir une exploitation économique conduisant à une meilleure utilisation de ces sources.

Le deuxième chapitre: donne une idée générale sur le dispatching économique, son objectif, mode d'exploitation des unités de génération, le dispatching économique dans

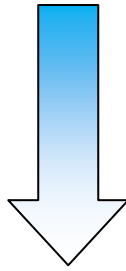
les réseau sans pertes ou avec pertes, et quelques définitions et donne une démonstration intuitive et mathématique du critère à incrémentation égale utilisé dans les réseaux sans pertes, ainsi que la technique du facteur de pénalité.

Le troisième chapitre : fournit une initiation de base aux « algorithmes génétiques » ainsi que l'application des ces derniers au problème de dispatching économique optimales.

Le quatrième chapitre: donne ou expose des simulations sur des systèmes génériques de 6, 25 et 30 jeux de barres. Les résultats obtenus sont aussi analysés.

Finalement nous terminerons ce mémoire par une conclusion et différentes perspectives de recherche qui nous semblent intéressantes pour la continuité de ce travail.

Chapitre I



*Répartition des charges
électriques*

I.1 Introduction :

L'étude de la répartition des charges coordonne la projection d'extension future des systèmes de puissance (dans les réseaux électriques). Ainsi que la détermination du régime de fonctionnement des réseaux existants. Pour ce fait les prévisions concernant la consommation et la production sont faites par des études approfondies qui ont à appliquer en ce domaine. Ces études ont pour but, le contrôle de l'exécution des programmes ainsi d'établir la surveillance et le maintien de la puissance, la tension, le courant et la fréquence exigée,

I.2 Formulation du problème :

La résolution du problème de la répartition des charges , nous permet de déterminer les valeur du module et de la phase tension en chaque nœud du réseaux pour des condition de fonctionnement donnés. Ce que nous permettrons de calculer les puissance transitées et générées et les pertes pour résoudre Ce problème, il est nécessaire de déterminer les conditions de l'opération en régime permanent, d'un système de puissance, qui sont [1]

- ❖ la formulation d'un modèle mathématique appropriée.
- ❖ la spécification d'un certain nombre de variables et de contraintes dans les nœud du système
- ❖ la résolution numérique du système.

I.3 Objectif de l'étude de la répartition de charge :

L'étude de la répartition de charge permet :

- ❖ L'équilibre entre la production et la demande de l'énergie électrique.
- ❖ Le maintien des tensions aux J.d.B entre les limites tolérées ($V_{\min} < V < V_{\max}$), pour éviter l'endommagement de certains récepteurs et l'excès des pertes de puissance dans les lignes et les transformateurs ...etc.
- ❖ Le contrôle de la puissance réactive c'est-à-dire, le maintien de cette puissance entre deux limites ($Q_{\min} < Q < Q_{\max}$), pour éviter l'excès des coûts d'utilisation de la puissance réactive.
- ❖ L'interconnexion entre les centrales et les réseaux qui permet d'améliorer la qualité d'énergie fournit en tension et fréquence.
- ❖ La planification des réseaux (étude prévisionnelle répandant à la demande des usagers dans l'avenir).[2]

I.4 Classification des jeux de barres:

Pour des conditions aux jeux de barres connues. On associe à chaque J.d.B quatre quantités. La puissance active, la puissance réactive, le module de la tension et l'angle de phase, deux de ces quatre quantités sont spécifiées.

On a trois types de J.d.B

I.4.1 J.d.B de référence (slack bus) :

Pour ce type de nœud on associe la centrale de production la plus puissante.

Dans un nœud k (nœud de référence ou slack bus), on spécifie la phase et le module de la tension. Les valeurs à déterminer sont les puissances active et réactive.[3]

I.4.2 J.d.B de contrôle (P.V bus) :

On les appelle « P.V bus » où les grandeurs de la tension et la puissance active sont spécifiées. Les valeurs inconnues sont l'argument de la tension et la puissance réactive.[4]

I.4.3 J.d.B de charge (P.Q bus):

Pour ce type de noeuds, on associe généralement les charges. Ces dernières sont caractérisées par la consommation des puissances active et réactive. On peut aussi associer des générateurs avec des puissances active et réactive fixées. Les variables à déterminer sont le module et la phase de la tension.[3]

Le tableau ci-dessous représente la classification des nœuds.

Type de J.d.B	Les variables connues						Les variables inconnues			
	P_D	Q_D	P_G	Q_G	$ V $	δ	P_G	Q_G	$ V $	$\Delta\delta$
J.d.B de référence	•	•			•	•	•	•		
J.d.B de charge	•	•	•	•					•	•
J.d.B de contrôle	•	•	•		•			•		•

Tableau (I-1) : classification des variables

I.5 Classification des variables des équations de répartition charge :[5]

I.5.1 Variables de perturbation (Variables non contrôlées) :

Ce sont les puissances, $P_{D1}, P_{D2}, Q_{D1}, Q_{D2}$ demandées par les charges :

$$P = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ Q_1 \\ Q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{D1} \\ P_{D2} \\ Q_{D1} \\ Q_{D2} \end{bmatrix} \quad (\text{I-1})$$

I.5.2 Variables d'états:

Ce sont les variables : $(V_1, V_2, \delta_1, \delta_2)$ Soit X un vecteur appelé vecteur d'état :

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ |V_1| \\ |V_2| \end{bmatrix} \quad (\text{I-2})$$

I.5.3 Variables de contrôle:

Ce sont les puissances de source $P_{G1}, P_{G2}, Q_{G1}, Q_{G2}$.

$$U = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{G1} \\ P_{G2} \\ Q_{G1} \\ Q_{G2} \end{bmatrix} \quad (\text{I-3})$$

I.6 Bilans de puissances et balancier :

I.6.1 Bilans de puissances:

Le bilan de puissance active du réseau s'écrit :

$$\Sigma P_G = \Sigma P_L + \text{pertes actives du réseau} \quad (\text{I-4})$$

La somme des puissances actives injectées par les générateurs est égale à la somme des puissances actives absorbées par les charges, augmentée des pertes actives du réseau

(résistance des lignes, des câbles, etc.). L'ordre de grandeur des pertes est de 5 %.

Le bilan de puissance réactive du réseau s'écrit :

$$\Sigma Q_G = \Sigma Q_L + \text{générations ou consommations réactives du réseau} \quad (\text{I-5})$$

La somme des puissances réactives injectées ou absorbées par les générateurs est égale à la somme des puissances réactives consommées/produites par les charges augmentées de la somme

Des consommations/productions réactives du réseau (réactance des lignes, des câbles, transformateurs, banc de condensateurs etc.). L'ordre de grandeur des consommations/productions réactives du réseau est très variable et peut être relativement élevé.

Le problème qui survient à ce niveau est qu'il n'est pas possible de prédire les termes qui vient du réseau de manière directe. En effet, ceux-ci dépendent des niveaux réels de tension et de la répartition du transit de puissance dans les lignes et les transformateurs. Or, c'est précisément ce transit que nous cherchons à déterminer.

I.6.2 Le générateur balancier :

Ne connaissant pas les pertes actives en ligne, nous ne pourrions pas imposer P en tous les noeuds (générateurs et charges). Pour résoudre notre problème de « Load flow », il faut donc un noeud particulier (dont le rôle est assuré en pratique par un groupe important ou un accès à un réseau important) auquel la puissance active ne pourra être imposée, mais résultera de notre calcul. Nous avons vu qu'à chaque noeud d'un réseau il faut imposer deux des Quatre valeurs P , Q , V et δ (phase de V). Vu sa nature, ce noeud particulier se verra Également imposé comme référence de tension et de phase $V \angle \delta$ (δ pris, assez naturellement, à 0). Nous introduisons donc, dans le schéma équivalent du système étudié, un générateur Particulier, dit « générateur balancier » ou « slack bus ». Celui-ci permettra de faire Intervenir dans les calculs les pertes actives du réseau tout en respectant les bilans de Puissances décrits au paragraphe précédent.

I.7 Constitution d'un réseau:

I.7.1 Les générateurs :

Les générateurs peuvent fournir une puissance active et fournir ou absorber une puissance Réactive dans certaines limites. Les groupes importants tentent de maintenir à leurs bornes un niveau de tension donné.



Figure (I-1) : Modèles d'un générateur

I.7.2 Les charges :

La consommation d'énergie électrique est le fait de tous les secteurs de la vie économique : industries, services, ménages. Elle se présente sous des formes très diverses : moteurs synchrones et asynchrones, appareils de chauffage,

Au contraire des générateurs, nous ne pouvons individualiser chaque consommation. C'est l'agrégat de consommation en un nœud du réseau qui constitue la 'charge' (Load) caractérisant ce nœud.

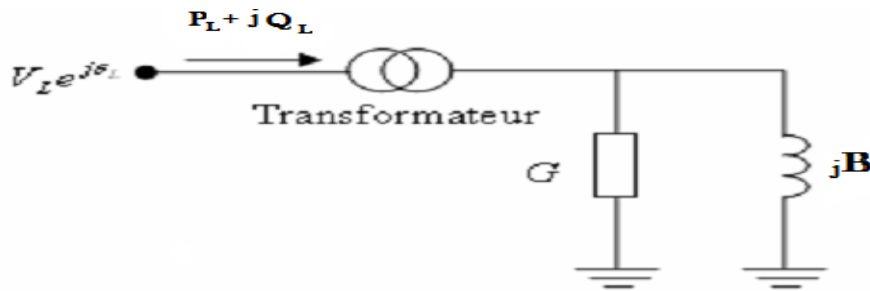


Figure (I-2) : Modèle d'une charge électrique sous forme d'une impédance constante

La puissance appelée par la charge varie avec la tension et la fréquence. Toutefois, une analyse en régime stationnaire suppose la constance de la fréquence. Dans le cadre, nous supposons qu'une charge peut être vue comme consommatrice de puissances active et réactive (P_L , Q_L) constantes. Q_L peut être positive (cas d'une charge inductive) ou négative (cas d'une charge capacitive).

Un nœud intermédiaire (poste d'aiguillage) qui n'est pas relié directement à une charge et/ou un générateur sera considéré comme un nœud « charge » dont les valeurs de P et Q sont nulles.[6]

I.7.3 Ligne de transport :

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 : lignes aériennes, lignes souterraines (câbles).

*- Classe de tension : lignes à basse tension ($<1kV$) et ligne à haute tension ($>1kV$).

*- Suivant la longueur: -Ligne courte $L < 80km$.

-Ligne moyenne $80\text{km} < L < 240\text{km}$.

-Ligne longue $L > 240\text{km}$. [7]

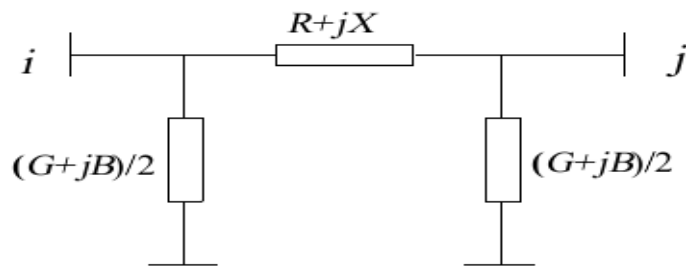
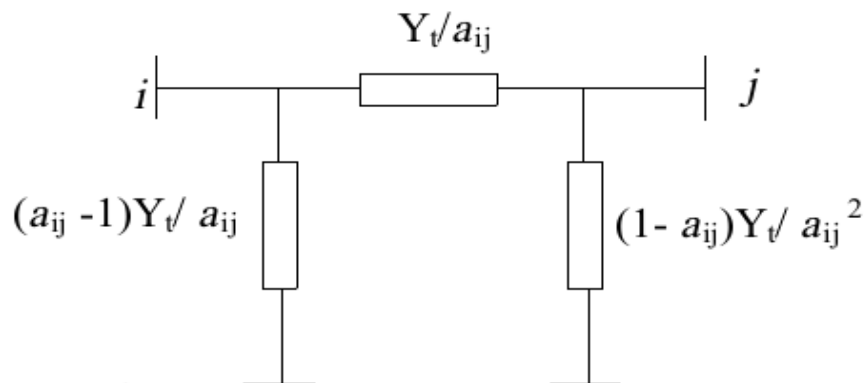


Figure (I-3) : Modèle d'une ligne par un schéma en Π équivalent

I.7.4 Transformateur :

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 commande que possible à tous les stades de la production, de la distribution et de l'utilisation.

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



Figure(I-4) : Modèle d'un transformateur

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

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

I.7.5 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.[8]

I.8 Formulation des équations de répartition de charge :

I.8.1 Relations paramétriques du système :

Les relations décrivant la topologie d'un système de distribution de puissance peuvent être développées en utilisant les équations de continuité ou de courant de noeuds pour obtenir:

$$[I]_{\text{barre}} = [Y]_{\text{barre}} * [V]_{\text{barre}} \quad (\text{I-6})$$

Dans laquelle:

$[I]_{\text{barre}}$ = vecteur des courants de noeuds

$[Y]_{\text{barre}}$ = matrice des admittances de barres (noeuds)

$[V]_{\text{barre}}$ = vecteur des voltages de barres,

La relation (I-6) entraîne que:

$$[Y]_{\text{boucle}} = [Z]^{-1}_{\text{boucle}} \quad (\text{I-7})$$

Lorsqu'on fait usage des conditions de compatibilité ou relations de voltage de boucle (maille), l'équation paramétrique du système devient:

$$[I]_{\text{boucle}} = [Y]_{\text{boucle}} * [V]_{\text{boucle}}$$

Les matrices des admittances et des impédances du système peuvent être formulées en incluant ou pas l'effet des éléments shunt telles les capacités statiques des réacteurs et les capacités de charge des lignes par rapport à la terre.[7]

I.8.2 Les équations aux J.d.B de charge:

Les puissances active et réactive à chaque J.d.B « i » sont :

$$P_i - jQ_i = V_i^* \cdot I_i \quad (\text{I-8})$$

Avec :

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad (\text{I-9})$$

Dans la formulation de l'équation du réseau, si les éléments shunts de mise à la terre sont inclus dans la matrice des paramètres l'équation (I-9) donne le courant total au J.d.B. D'un autre coté, si les éléments shunts du réseau ne sont pas inclus. Le courant total au J.d.B « i » est :

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} - Y_i V_i \quad (\text{I-10})$$

Y_i : Admittance totale shunt au J.d.B « i ».

$Y_i V_i$: Courant de shunt circulant du J.d.B « i » vers la terre

I.8.3 Exemple d'un système à deux jeu de barres :[5]

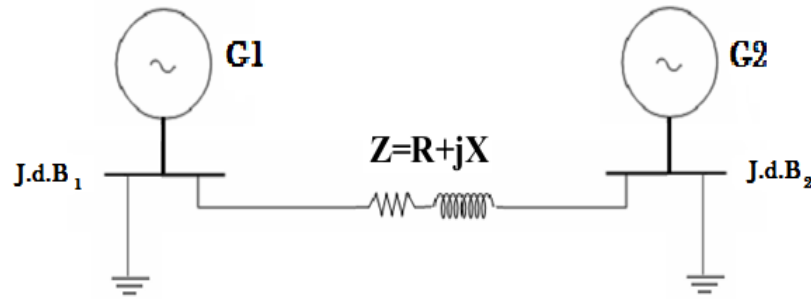


Figure (I-5): système à deux J.d.B

On note que:

$$S_1 = S_{G1} - S_{D1} \quad S_2 = S_{G2} - S_{D2}$$

Et en générale :

$$S_i = S_{Gi} - S_{Di} \quad (\text{I-11})$$

$$S_i = P_i + jQ_i = P_{Gi} + jQ_{Gi} - (P_{Di} + jQ_{Di})$$

$$S_i = (P_{Gi} - P_{Di}) + j(Q_{Gi} - Q_{Di})$$

L'application des lois de KIRCHHOFF sur le système donne :

Au niveau de J.d.B « 1 »

$$I_1 = y_p \cdot V_1 + y_s (V_1 - V_2) = (y_p + y_s) V_1 - y_s \cdot V_2 \quad (\text{I-12})$$

On sait que :

$$S_1 = V_1 \cdot I_1^* \Rightarrow I_1 = \frac{S_1^*}{V_1}$$

Au niveau de J.d.B « 2 »

$$I_2 = y_p \cdot V_2 + y_s (V_2 - V_1) = (y_p + y_s) V_2 - y_s V_1 \quad (\text{I-13})$$

Avec :

$$S_2 = V_2 \cdot I_2^* \Rightarrow I_2 = \frac{S_2^*}{V_2^*}$$

Alors on peut écrire (I-12-1) (I-12-2) sous la forme :

$$I_1 = Y_{11} \cdot V_1 + Y_{12} \cdot V_2$$

(I-14)

$$I_2 = Y_{21} \cdot V_1 + Y_{22} \cdot V_2$$

Avec

$$Y_{11} = y_p + y_s, \quad Y_{22} = y_p + y_s$$

$$Y_{12} = -y_s, \quad Y_{21} = -y_s$$

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \quad (I-15)$$

On remplace (I-15) en (I-14) :

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

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

$$I_1 = \left(\sum_{i=1, i \neq n}^m y_{1i} \right) V_1 + (-y_{12}) V_2 + \dots + (-y_{1n}) V_n$$

·
·
·
·

$$I_n = (-y_{n1}) V_1 + (-y_{n2}) V_2 + \dots + \left(\sum_{i=1, i \neq n}^m y_{ni} \right) V_n$$

La matrice admittance est donc :

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

$$I_{bus} = \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ I_n \end{pmatrix} \quad V_{bus} = \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ V_n \end{pmatrix}$$

I.8.4 Calcul de la puissance au niveau de jeu de barres:

On a :

$$S_i = (P_{Gi} - P_{Di}) + j (Q_{Gi} - Q_{Di}) \\ = P_i + jQ_i$$

Alors :

$$S_i^* = P_i - jQ_i = V_i^* \cdot I_i$$

$$S_i^* = V_i^* \cdot \sum_{j=1}^n y_{ij} \cdot V_j \quad (\text{I-16})$$

En coordonnées polaires :

$$V_i = |V_i| \cdot \underline{\delta_i}$$

$$y_{ij} = |y_{ij}| \cdot \underline{\gamma_{ij}}$$

$$S_i^* = P_i - jQ_i = V_i^* \sum_{j=1}^n y_{ij} \cdot V_j = \sum |y_{ij}| |V_i| |V_j| e^{j(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij})}$$

Donc

$$P_i = \sum |y_{ij}| |V_i| |V_j| \cos(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij})$$

$$Q_i = -\sum |y_{ij}| |V_i| |V_j| \sin(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij})$$

I.8.5 La puissance transmise dans la ligne :

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 :

$$I_{ik} = (V_i - V_k)y_{ik} + V_i \cdot \frac{y'_{ik}}{2} \quad (\text{I-17})$$

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 à la ligne de charge.

La puissance écoulee, active et réactive, est :

$$P_{ik} - jQ_{ik} = V_i^* \cdot I_{ik} \quad (\text{I-18})$$

$$P_{ik} - jQ_{ik} = V_i^* (V_i - V_k) y_{ik} + V_i^* \cdot V_i \cdot \frac{y_{ik}}{2} \quad (\text{I-19})$$

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

$$P_{ki} - jQ_{ki} = V_k^* (V_k - V_i) y_{ik} + V_k^* \cdot V_k \cdot \frac{y_{ik}}{2} \quad (\text{I-20})$$

Les pertes de puissances dans la ligne « i-k » sont égales à la somme algébrique de la répartition des puissances déterminée à partir des relations (I-19) et (I-20).

I.8.6 Les pertes de puissance dans lignes :

Au niveau de J.d.B la puissance apparente écoulee est la différence entre la puissance générée et la puissance demandée. Pour un J.d.B « i » :

$$\text{On a :} \quad S_i = S_{Gi} - S_{Di}$$

$$\text{Avec :} \quad P_i = P_{Gi} - P_{Di} = F_{ip}$$

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

$$\sum P_i = \sum F_{ip} = \sum P_{Gi} - \sum P_{Di} \quad (\text{I-21})$$

$$\sum Q_i = \sum F_{iq} = \sum Q_{Gi} - \sum Q_{Di} \quad (\text{I-22})$$

Le système d'équations (I-13) 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 algébrique donne l'expression des pertes [5]

$$P_{L\ ij} = P_{ij} + P_{ji}$$

$$Q_{L\ ij} = Q_{ij} + Q_{ji}$$

I.9 Les méthodes numériques itératives :

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

Dans cette partie de l'étude, on passera en revue quatre méthodes numériques itératives spécifiques courantes. Ce sont, par ordre d'introduction dans le texte:

- ❖ la méthode itérative de Gauss
- ❖ la méthode itérative de Gauss-Siedel
- ❖ la méthode de Newton-Raphson
- ❖ la méthode de relaxation ou technique des résidus.

- Critère d'arrêts des itérations :

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

1. $|x_i^{(K+1)} - x_i^K| < \varepsilon_1$
2. $\frac{|x_i^{(K+1)} - x_i^K|}{x_i^{(K+1)}} < \varepsilon_2$
3. $|f_i(x^{(K+1)})| < \varepsilon_3$
4. $K > K_{\max}$

Où $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$, sont des bornes supérieures de l'erreur fixées a priori et $K_{\max}$ est le nombre maximum admissible d'itérations . [9]

I.9.2 Application de la méthode de N-R au problème de l'écoulement de puissance :

Mathématiquement, le problème de l'écoulement de puissance peut être réduit à un ensemble d'équations non-linéaires où le module et l'angle des tensions aux niveaux des jeux de barres sont les variables. Dans la forme la plus compacte, le nombre d'équations deux fois le nombre de jeux de barres.

Les non-linéarités peuvent être approximativement classées sous une forme quadratique. La technique de N-R basée sur le calcul du gradient et de la relaxation est utilisée comme méthodes de solution pour ces systèmes d'équations.

Le problème peut être résolu en utilisant soit les coordonnées rectangulaires soit les coordonnées polaires. Il est préférable d'utiliser la forme polaire pour faire apparaître les différentes grandeurs qui caractérisent le réseau électrique.

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

$$\left. \begin{aligned} P_i &= \sum_{j=1}^n |y_{ij}| |V_i| |V_j| \cos(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) = F_{ip} \\ Q_i &= \sum_{j=1}^n |y_{ij}| |V_i| |V_j| \sin(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) = F_{iq} \end{aligned} \right\} i = 1, 2, \dots, n \quad (\text{I-32})$$

Où $i=1$ c'est le J.d.B de référence

n: Nombre de J.d.B

i: Numéro de J.d.B

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

$$\left. \begin{aligned} P_i &= F_{ip}^{(0)} + \left(\frac{\partial F_{ip}}{\partial \delta_2}\right)^{(0)} \Delta \delta_2^{(0)} + \dots \dots \dots + \left(\frac{\partial F_{ip}}{\partial \delta_n}\right)^{(0)} \Delta \delta_n^{(0)} + \left(\frac{\partial F_{ip}}{\partial |V_2|}\right)^{(0)} \Delta V_2^{(0)} \\ Q_i &= F_{iq}^{(0)} + \left(\frac{\partial F_{iq}}{\partial \delta_2}\right)^{(0)} \Delta \delta_2^{(0)} + \dots \dots \dots + \left(\frac{\partial F_{iq}}{\partial \delta_n}\right)^{(0)} \Delta \delta_n^{(0)} + \left(\frac{\partial F_{iq}}{\partial |V_2|}\right)^{(0)} \Delta V_2^{(0)} \end{aligned} \right\} \quad (\text{I-33})$$

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

A partir de la relation de

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}$$

Avec:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_i^{(0)} &= P_i - F_{ip}^{(0)} \\ \Delta Q_i^{(0)} &= Q_i - F_{iq}^{(0)} \end{aligned} \right\} \quad (\text{I-34})$$

Les deux systèmes d'équations (I-19) et (I-20) donnent :

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

Donc on peut écrire le système comme suit :

$$\begin{bmatrix} \Delta P^{(0)} \\ \Delta Q^{(0)} \end{bmatrix} = [J^{(0)}] \begin{bmatrix} \Delta \delta^{(0)} \\ \Delta V^{(0)} \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} \Delta \delta^{(0)} \\ \Delta V^{(0)} \end{bmatrix} = [J^{(0)}]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P^{(0)} \\ \Delta Q^{(0)} \end{bmatrix} \quad (\text{I-35})$$

On rappelle que :

$$\begin{aligned} \Delta \delta_i^{(K)} &= \delta_i^{(K+1)} - \delta_i^{(K)}, \quad i \neq 1(\text{ref}), i \neq 2(\text{cont}) \\ \Delta |V_i|^{(K)} &= |V_i|^{(K+1)} - |V_i|^{(K)} \end{aligned} \quad (\text{I-36})$$

L'adaptation de (I-21) avec (I-22) donne :

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

D'une manière générale :

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

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

J_1, J_2, J_3, J_4 Sont les sous matrice de Jacobienne.[5]

I.9.3 Détermination des sous matrices de la Jacobienne J :[9]

A partir du système d'équations (I-1) on peut déterminer les éléments de J

Sous matrice J₁:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} &= -|V_i| |V_j| |y_{ij}| \sin(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) \quad , \quad i \neq j \\ \frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} &= \sum_{j=1, i \neq j}^n |V_i| |V_j| |y_{ij}| \sin(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) \quad , \quad i = j \end{aligned} \right\} \quad (\text{I-37})$$

Sous matrice J₂:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} &= |V_j| |y_{ij}| \cos(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) \quad , \quad i \neq j \\ \frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} &= 2|V_j| |y_{ij}| \cos(\gamma_{ij}) + \sum_{j=1, i \neq j}^n |y_{ij}| \cos(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) \quad , \quad i = j \end{aligned} \right\} \quad (\text{I-38})$$

Sous matrice J₃:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} &= |y_{ij}| |V_i| |V_j| \cos(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) \quad , \quad i = j \\ \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} &= \sum_{j=1, j \neq i}^n |y_{ij}| |V_i| |V_j| \cos(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) \quad , \quad i \neq j \end{aligned} \right\} \quad (\text{I-39})$$

Sous matrice J₄:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} &= -|V_j| |y_{ij}| \sin(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) \quad , \quad i \neq j \\ \frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} &= \sum_{j=1, i \neq j}^n |V_j| |y_{ij}| \sin(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) - 2|V_j| |y_{ij}| \cos(\gamma_{ij}) \quad , \quad i = j \end{aligned} \right\} \quad (\text{I-40})$$

I.9.4 Organigramme de Newton-Raphson :

L'organigramme suivant illustre la structure de l'algorithme newton. Nous détaillerons les Diverses phases qui le constituent et présenterons tout les étapes.

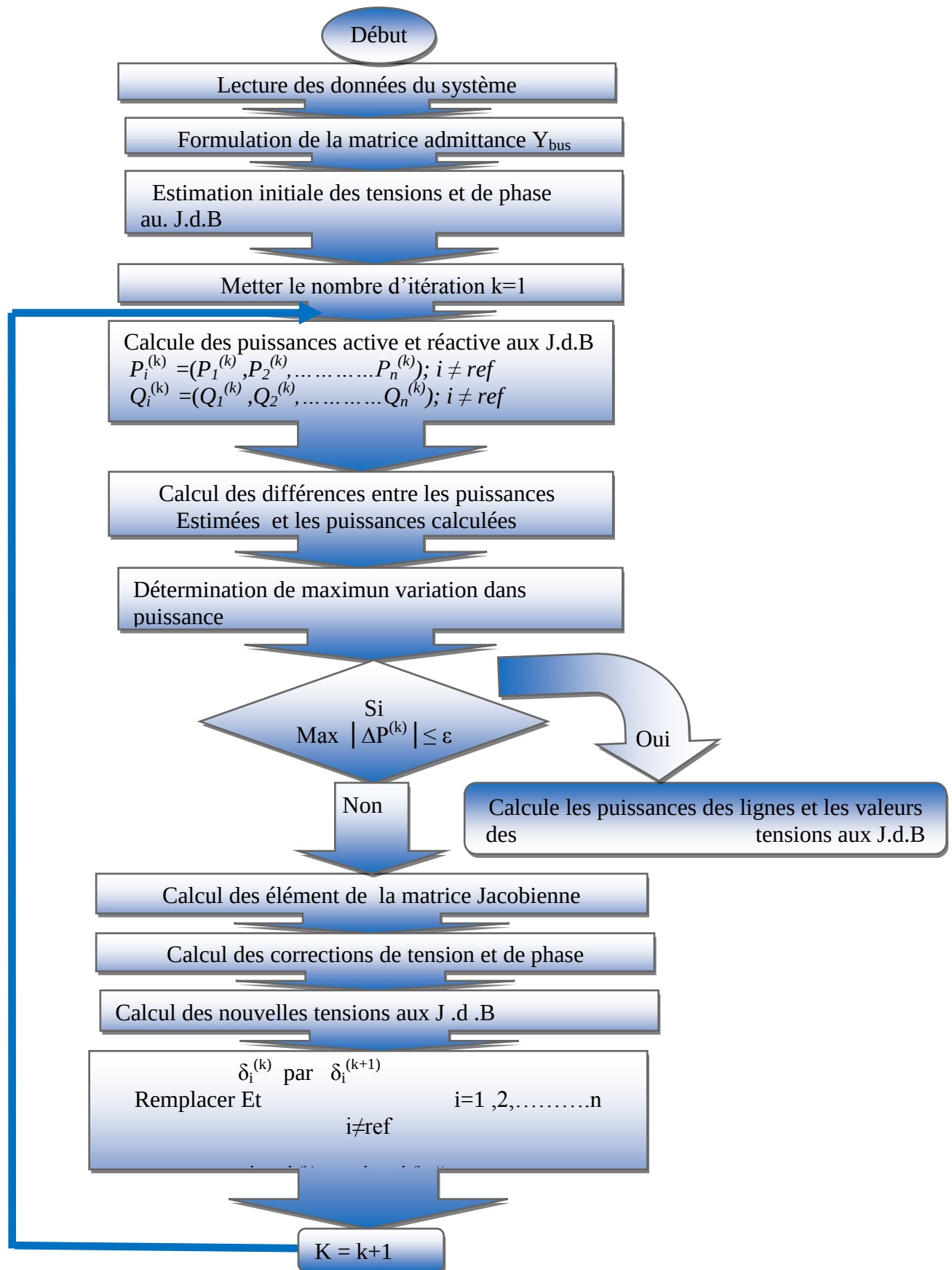
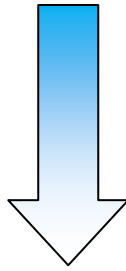


Figure (I-6) : Organigramme simplifié de l'algorithme de Newton-Raphson

I.10 Conclusion :

Dans ce chapitre, on a fait la modélisation de quelques éléments de puissance constituant le réseau de transport et dont leur modélisation entre directement dans le calcul de l'écoulement de puissance. Le problème de l'écoulement de la puissance peut être donc résolu par la technique de NR qui converge, mesurée par le nombre d'itérations, pour les larges et courts systèmes, en moins de 4 à 5 itérations en général. Le problème le plus important dans l'industrie d'électricité est de réduire au maximum le coût de la production de l'énergie électrique générée par l'ensemble des centrales interconnectées. Ce problème ne peut être résolu par l'écoulement de puissance mais par l'optimisation de l'écoulement de puissance. Ce dernier problème est le sujet du deuxième chapitre.

Chapitre II



Dispatching Economique

II.1 Introduction :

Le calcul de l'écoulement de puissance conventionnel ne répond que partiellement à un problème plus général comportant une exigence d'optimisation consistant à minimiser une fonction des variables P , Q , V , et θ , tout en respectant les équations du réseau et des contraintes d'inégalité qui traduisent les limites de fonctionnement des ouvrages (groupes de production, lignes, transformateurs, ...etc). Ce type de problèmes est connu par le Dispatching Economique ou plus généralement : Ecoulement de Puissance Optimal (OPF).

II.2 Architecture des réseaux électriques :

Le réseau à très haute tension THT (400 KV, 225KV) d'interconnexion internationale forme un ensemble maillé sur lequel sont les centrales grandes raccordées (centrales nucléaires de 1000 MW, par exemple). Il est complété par le réseau de répartition (60 à 150 KV) souvent exploité en poches reliées au niveau supérieur de tension et sur lequel se raccordent des centrales électriques de moindre puissances, ainsi que les grands utilisateurs industriels. On trouve en suite un réseau de distribution (de 20 KV à 400 V) desservant la clientèle (petites et moyennes entreprises, commerces, secteur résidentiel). Ce réseau de distribution est généralement de structure radiale, éventuellement bouclé dans des zones urbaines pour assurer la continuité de service, voire bouclé même en basse tension dans certaines grandes villes. Le coût d'un réseau bouclé est plus élevé par la complexité du contrôle et de la protection, mais ce type de réseau se caractérise par une meilleure continuité de service.

L'alimentation d'une grande agglomération se fait en général par une boucle à 380 ou 225 KV, alimentée par le réseau d'interconnexion et sur laquelle sont raccordés des postes abaisseurs vers le réseau de répartition, souvent en câble pour la pénétration urbaine. Sur ce réseau de répartition sont branchés des postes abaisseurs vers le réseau de distribution (15 à 20 KV), bouclé et enfin le réseau basse tension de structure radiale alimentant les consommateurs (en triphasé ou en monophasé) [5]

II.3 Stratégies du fonctionnement des centrales électriques :

La figure (II.1) illustre comment un organisme modèle fait face à la demande quotidienne de la charge.

- ✓ Des générateurs qui fonctionnent à 100% de leurs capacités pendant 24h, supportent la charge de base. Des générateurs intermédiaires commandés fonctionnent la plus part des temps, mais pas nécessairement avec leurs charges totales.
- ✓ Des unités de pointes sont mises en service pendant plusieurs heures chaque jour. On besoin d'une capacité de réserve pour affronter les cas d'urgences.

Par la suite on va donner les différentes unités du système électrique et leurs rôles dans la production d'énergie.

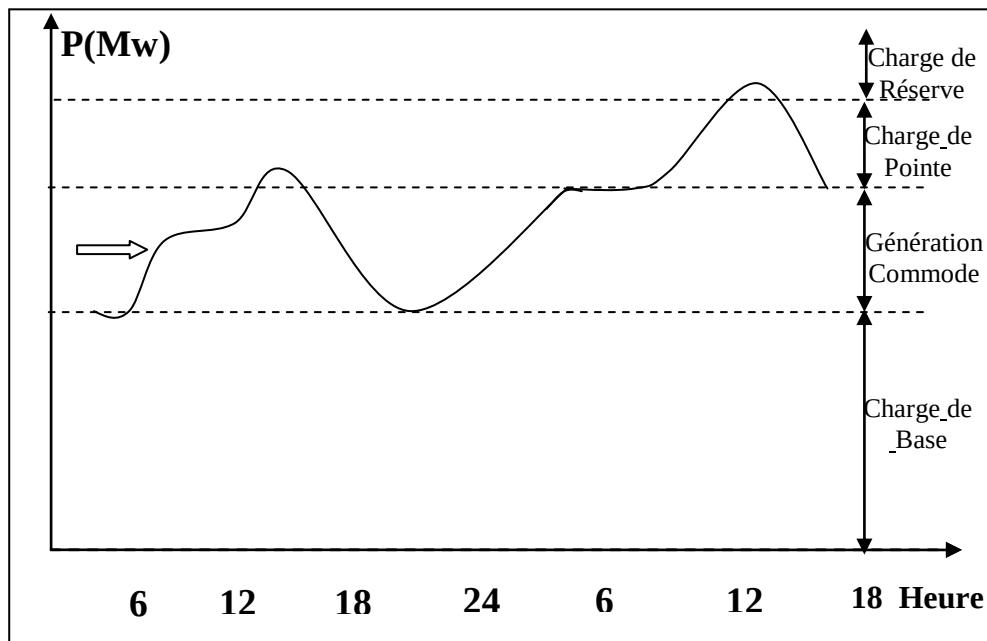


Figure (II-1) : stratégie de génération d'une société d'électricité

II.3.1 Unités de Base :

Les unités nucléaires sont généralement rangées dans cette catégorie à cause du besoin de conservation de l'équilibre thermique entre le réacteur atomique et le générateur de vapeur. Il est préférable si possible de stabiliser les puissances actives délivrées par ce genre d'unités à niveau constant, d'autre part il faut faire fonctionner ces unités en utilisant les combustibles fossiles à des puissances actives constantes.

II.3.2 Unités Intermédiaires :

Quand il faut organiser les puissances actives délivrées, on préfère d'utiliser les unités fonctionnant hydrauliquement, car on peut contrôler l'énergie générée par l'unité hydraulique en jouant sur le débit d'eau entrant dans la turbine.

Les centrales électriques ne sont pas toutes hydrauliques, mais on utilise des centrales thermiques contrôlables. A cause des constantes de temps thermiques d'un système à vapeur, il est toujours nécessaire d'organiser ces centrales dans les limites de leurs rendements maximales.

II.3.3 Unités de Pointes :

Les générateurs entraînés par des turbines à gaz peuvent répondre à l'augmentation de la charge avec une grande vitesse, pour cela ils sont utilisés fréquemment pendant les heures de

pointes. Mais lorsqu'on dispose des générateurs entraînés hydrauliquement ceux-ci sont préférés en premier lieu.

II.3.4 Unités de Réserve :

La gamme de générateurs demandée par les sociétés d'électricité peut être constituée par des générateurs conservés pour la production partielle, ou des générateurs de précaution disposés à différents niveaux [10].

II.4 Dispatching économique :

Dans le dispatching économique, la fonction objective à minimiser est le coût total de production des groupes thermiques, de telle sorte que la charge électrique du système soit entièrement satisfaite. Dans ce cas, la seule contrainte est que la somme de toutes les puissances actives générées, soit égale à la charge totale du système.

On en conclut que le modèle utilisé par le dispatching économique standard, considère que les pertes de puissances actives dans les lignes de transport et les transformateurs sont négligeables, et que les équations de l'écoulement de puissance ne sont pas prises en considération.

Le système électrique est alors équivalent à un seul jeu de barre où sont connectées tous les générateurs de puissance et toutes les charges électriques figure (II-2).

Le coût de l'énergie à l'entrée du générateur, est évalué en (Mbtu/h) ou (\$/MW), qui représente la quantité de fuel ou de combustible nécessaire pour le fonctionnement de la chaudière.

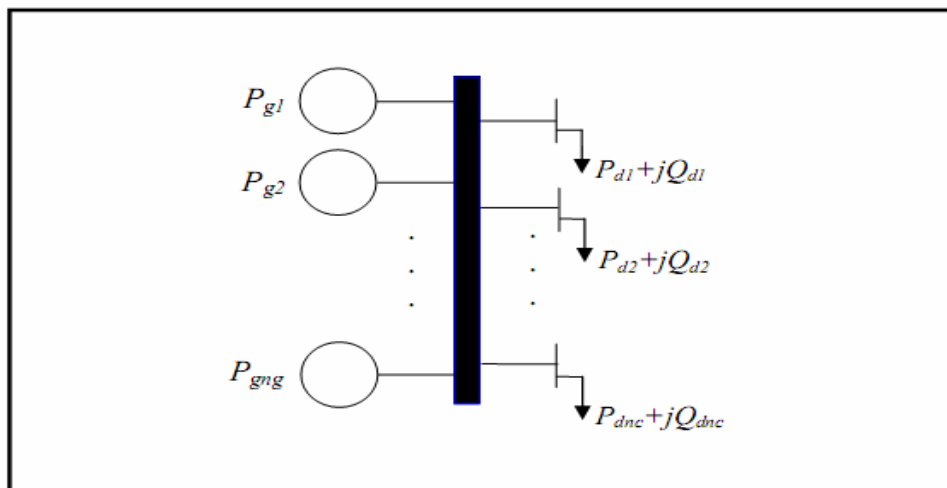


Figure (II-2) : Modèle du système électrique utilisé dans le Dispatching Economique

II.5 Fonction du coût et incrémentation du coût :

Le coût de production à l'entrée \$ / Mw varie avec la puissance à la sortie du générateur P_{gi} en Mw . La relation entre le coût de production et la puissance de sortie est appelée « courbe de coût » $C_i(P_{gi})$, figure (II-3).

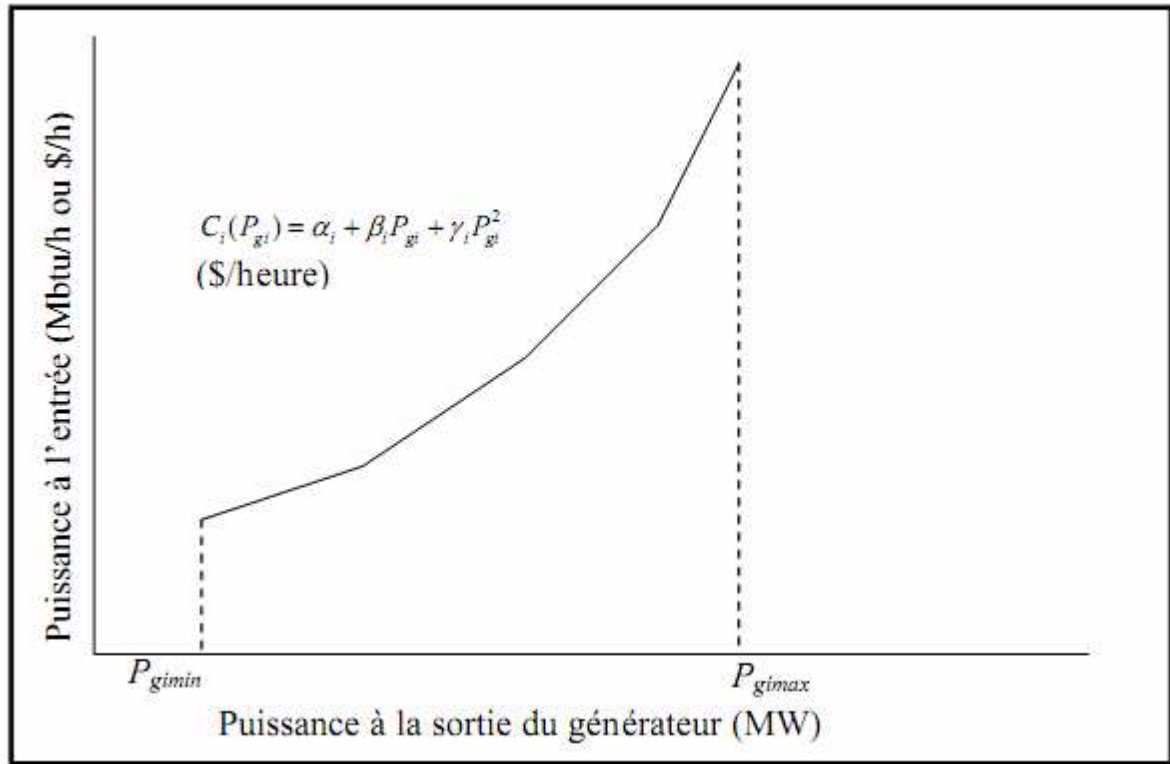


Figure (II-3): Courbe de coût typique (entrée-sortie) d'un générateur

La fonction du coût d'un générateur i , peut être approximée par une forme quadratique, comme suit $C_i(P_{gi}) = \alpha_i + \beta_i \cdot P_{gi} + \gamma_i \cdot P_{gi}^2$ [\$ / h]

Où $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ sont des coefficients constants propres au générateur i .

La dérivée de la fonction de coût par rapport à la puissance générée, représente l'accroissement Du coût de combustible figure (II-3).

$$\frac{dC_i}{dP_{gi}} = \beta_i + 2\gamma_i \cdot P_{gi} \quad [\$ / Mwh]$$

La courbe de l'accroissement du coût de combustible, mesure le coût additionnel du combustible \$ / Mw, pour augmenter la puissance de sortie du générateur de 1 Mw .[11]

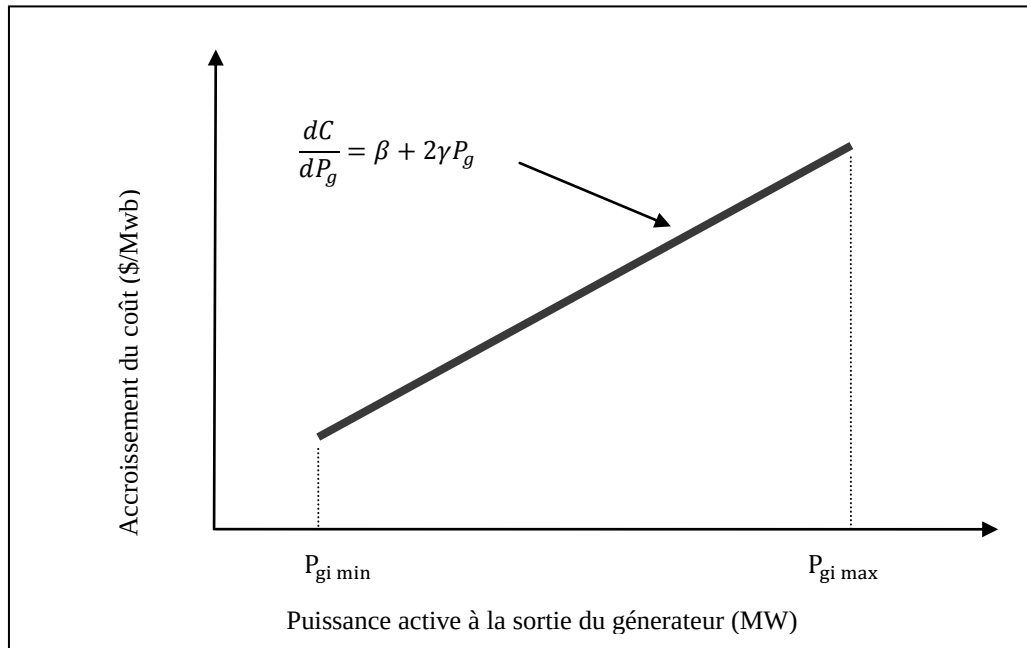


Figure (II-3) : Courbe typique de l'accroissement du coût de combustible

II.6 Les contraintes :

II.6.1 Contraintes d'égalité :

Dans le dispatching économique, la fonction objective à minimiser est le coût total de production des groupes thermiques, de telle sorte que la charge électrique du système soit entièrement satisfaite.

On peut dire que les contraintes d'égalités vérifient les lois de Kirchhoff, bilans d'énergie.

II.6.1.1 Cas d'un Système sans pertes:

Dans ce cas, la seule contrainte est que la somme de toutes les puissances actives générées, soit égale à la charge totale de système

$$\sum_{i=1}^K P_{Gi} = P_D \quad (\text{II-1})$$

II.6.1.2 Cas d'un Système avec pertes :

Dans les systèmes réels, le transport de l'énergie électrique vers les jeux de barre de charge est souvent accompagné par des pertes de transmission. Le problème du dispatching économique devient un peu compliqué par rapport au cas précédent où les pertes ont été négligées.

Dans ce cas, la contrainte d'égalité représentée par l'équation d'équilibre de puissance donnée dans (2.3) doit inclure ces pertes. Si on désigne par P_L les pertes totales de puissances actives, la contrainte d'égalité devient :

$$\sum_{i=1}^{ng} P_{gi} = P_D + P_L \quad (\text{II-2})$$

II.6.2 Contraintes d'inégalités :

Puisque, chaque générateur est limité par sa capacité minimale et maximale de production il faut que la puissance P_{Gi} choisi doive être satisfaire la contrainte d'inégalité :

$$P_{Gimin} < P_{Gi} < P_{Gimax}$$

II.7 Formulation mathématique du problème du Dispatching Economique :

Le problème du dispatching économique consiste à minimiser le coût total du combustible (C),n sujet à une seule contrainte d'égalité qui est la somme de toute les puissances générées est égale à la puissance totale demandée (P_D).

Mathématiquement on peut écrire

$$\text{Minimiser : } C = \sum_{i=1}^{ng} C_i(P_{gi}) = \sum_{i=1}^{ng} (\alpha_i + \beta_i \cdot P_{gi} + \gamma_i \cdot P_{gi}^2) \quad (\text{II-3})$$

$$\text{Sujet à la contrainte : } \sum_{i=1}^{ng} P_{gi} = P_D \quad (\text{II-4})$$

Dans la pratique, chaque puissance générée (P_{gi}) est limitée par une limite inférieure (P_{gimin}) et une autre supérieure (P_{gimax}), ce qui donne la contrainte d'inégalité suivante.[5]

$$P_{gi \min} \leq P_{gi} \leq P_{gi \max} \quad i \ 1,2,..., ng \quad (\text{II-5})$$

II.7.1 dispatching économique sans pertes :

II.7.1.1 Méthode lagrangien :[8]

Donc, on remarque que cette formulation est caractérisée par une fonction de coût qui est la seule non-linéarité, une contrainte d'égalité scalaire unique et des contraintes d'inégalités sous forme de limites inférieures et supérieures sur les puissances produites.

Pour résoudre le problème du dispatching économique, on formule le lagrangien comme suit,

$$L = \sum_{i=1}^{ng} (\alpha_i + \beta_i P_{gi} + \gamma_i P_{gi}^2) + \lambda (P_D - \sum_{i=1}^{ng} P_{gi}) \quad (\text{II-6})$$

Les conditions d'optimalités nécessaire sont les équations suivantes :

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial P_{g_i}} = \beta_i + 2\gamma_i P_{g_i} - \lambda = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} = P_D - \sum_{i=1}^{ng} P_{g_i} = 0 \\ P_{g_i}^{\min} \leq P_{g_i} \leq P_{g_i}^{\max} \end{cases} ; i=1, ng \quad (\text{II-7})$$

On peut résoudre ce système d'équations d'ordre $ng+2$ par la substitution des valeurs P_{g_i} des premières équations dans l'avant dernière équation.

$$P_{g_i} = \frac{\lambda - \beta_i}{2\gamma_i}; i=1, ng \quad (\text{II-8})$$

En remplaçant l'équation (II-8) dans l'équation (II-1), on aura :

$$\sum_{i=1}^{ng} \frac{\lambda}{2\gamma_i} = P_D + \sum_{i=1}^{ng} \frac{\beta_i}{2\gamma_i} \quad (\text{II-9})$$

La valeur optimale de lambda déterminée de l'équation (II-9) est comme suit :

$$\lambda = \lambda_{opt} = \left(P_D + \sum_{i=1}^{ng} \frac{\beta_i}{2\gamma_i} \right) / \sum_{i=1}^{ng} \frac{1}{2\gamma_i} \quad (\text{II-10})$$

La valeur numérique optimale de lambda peut être remplacée dans l'équation (II-8) pour obtenir toutes les valeurs optimales des puissances générées :

$$P_{g_i} = P_{g_{opt_i}} = \frac{1}{2\gamma_i} \left(\left(P_D + \sum_{i=1}^{ng} \frac{\beta_i}{2\gamma_i} \right) / \sum_{i=1}^{ng} \frac{1}{2\gamma_i} - \beta_i \right); i=1, ng \quad (\text{II-11})$$

II.7.1.2 Méthode graphique:

Le problème du dispatching économique peut être résolu par une méthode graphique, en traçant la courbe d'accroissement du coût $\lambda = C_i(P_{g_i})$ pour chaque générateur et sur le même plan (Fig. II-4).

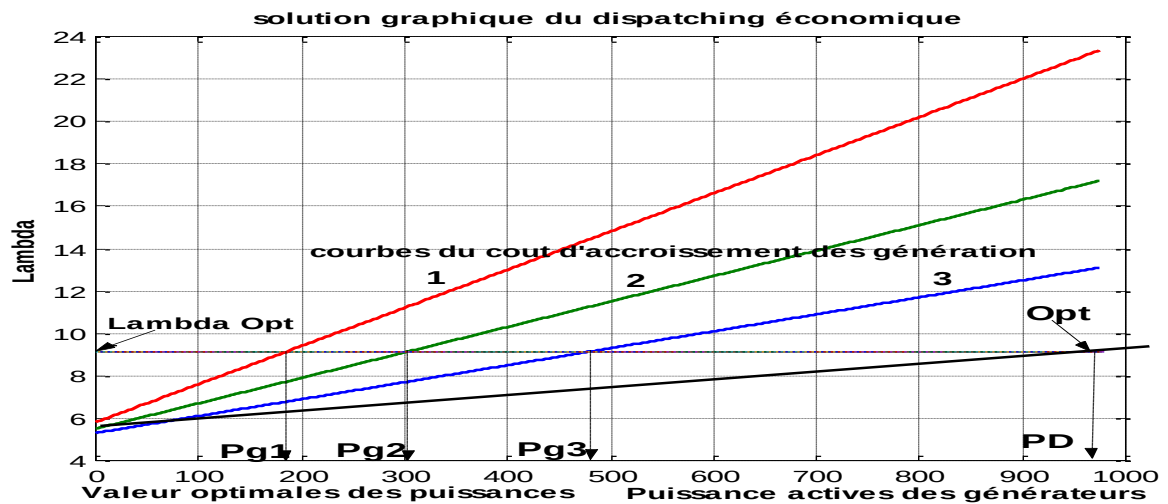


Figure (II-4) : Méthode graphique pour la solution du dispatching économique de trois générateurs

En ajoutant graphiquement les valeurs des puissances, on aboutit à une seule courbe résultante représentant le coût d'accroissement total de tous les générateurs.

La valeur de la charge totale (P_d) peut être prise comme point de départ d'une ligne verticale, tirée jusqu'à ce que la ligne du coût d'accroissement totale soit traversée. Cette valeur de la traversée (Optimum) est prise comme point de début d'une ligne horizontale allant vers la gauche. Cette ligne indique la valeur optimale de lambda (λ^*) pour toutes les puissances actives des générateurs.

Les points d'intersection de cette ligne avec les courbes du coût d'accroissement originales sont les valeurs optimales de la solution. Pour obtenir les puissances optimales des générateurs, il suffit de tracer des lignes verticales descendantes à partir des courbes du coût d'accroissement des générateurs. [9]

II.7.2 Dispatching économique avec pertes : [12]

Dans les systèmes réels, le transport de l'énergie électrique vers les jeux de barres de charge est souvent accompagné par des pertes de transmission. Le problème du dispatching économique devient un peu compliqué par rapport au cas précédant où les pertes ont été négligées. Donc, la topologie du réseau aura une incidence sur la répartition optimale de la production. Cependant pour pénaliser les centrales qui produisent de la puissance dont le transit provoque des pertes importantes, nous multiplierons les coefficients de leur de coût par un facteur de pénalité.

Il existe deux approches générales pour résoudre le problème du dispatching économique avec pertes de puissance :

A- considération des pertes constant :

Dans ce cas, la valeur de pertes se rassembler avec la puissance demandée totale et le problème sera étudié comme le cas sans pertes.

B- pertes variables :

Nous devenons à développer une expression mathématique des pertes de puissances actives, en fonction des puissance actives des générateurs.

II.7.2.1 Calcule les pertes :

Il existe deux approches générales pour calculer les pertes :

on calcule les pertes de transmission par les méthodes de calcul de l'écoulement de puissance N-R ou G-S.

la méthode de "**formule des pertes**" est basée sur l'approximation des pertes totales de puissance active par une fonction directe des puissance actives des générateurs (P_{gi}), donnée par l'équation suivante .

$$P_i = \sum_{i=1}^{ng} \sum_{jj=1}^{ng} B_{ij} P_{gi} P_{gj} + \sum_{i=1}^{ng} B_{io} P_{gi} + B_{oo} \quad (\text{II-12})$$

Où P_{gi} : puissance active du générateur i .

B_{ij} , B_{io} et B_{oo} : coefficients de pertes (constantes réelles).

les coefficients de pertes sont des constantes réelles spécifiques au réseau étudié, et sont calculés en fonction de la matrice impédance du réseau, des puissance actives et réactives demandées et des tensions. Dans la littérature, il existe beaucoup de formules pour le calcul des coefficients de pertes.

II.7.2.2 Incrémentation des pertes de transmission:

Soit P_L Les pertes totales dans les lignes de transmission. La dérivée partielle $\partial P_L / \partial P_{Gi}$ Sont appelées l'incrémentation des pertes de transmission (ITL), elle représente la variation des pertes totales liée à la variation de la puissance générée par le générateur i .

II.7.2.3 la résolution du problème:

Pour résoudre le problème du dispatching économique avec pertes, on peut formuler le lagrangien avec pertes comme suit :

$$L = F(P_{gi}) + \lambda.H(P_{gi})$$

Où: $H(P_{gi})$: est la contrainte d'égalité

$$H(P_{gi}) = P_d + P_L(P_{g1}, P_{g2}, P_{g3}, \dots, P_{gn}) - \sum_{i=1}^{ng} P_{gi} = 0 \quad (\text{II-13})$$

$$L = \sum_{i=1}^{ng} C_i(P_{gi}) + \lambda \cdot (P_d + P_L(P_{g1}, P_{g2}, \dots, P_{gn}) - \sum_{i=1}^{ng} P_{gi}) \quad (\text{II-14})$$

Pour Minimisé la fonction de lagrangien il faut que :

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial P_{gi}} = \beta_i + 2\gamma_i - \lambda \left(\frac{\partial P_L}{\partial P_{gi}} - 1 \right) = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} = P_d + P_L(P_{g1}, P_{g2}, P_{g3}, \dots, P_{gn}) - \sum_{i=1}^{ng} P_{gi} \end{cases} \quad \begin{matrix} P_{gi(\min)} \leq P_{gi} \leq P_{gi(\max)} \\ i = 1, 2, 3, \dots, ng \end{matrix} \quad (\text{II-15})$$

$$\frac{dC_i}{dP_{gi}} = \lambda \left(1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_{gi}} \right) \Rightarrow \lambda = \left(1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_{gi}} \right)^{-1} \frac{dC_i}{dP_{gi}}$$

$$\lambda = f_i \cdot \left(\frac{dC_i}{dP_{gi}} \right) \quad (\text{II-16})$$

$$\text{Où : } f_i = \left(1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_{gi}} \right)^{-1} \quad (\text{II-17})$$

f_i : Représente le facteur de pénalité de central i.

Donc, pour pénaliser les centrales qui produisent de la puissance dont le transit provoque des pertes importantes, nous multiplierons les coefficients de leur fonction de coût par un facteur de pénalité f_i .

Par les mêmes étapes du dispatching sans pertes on trouve que :

$$P_{gi} = \frac{\lambda \cdot f_i^{-1} - \beta_i}{2\gamma_i} \quad (\text{II-18})$$

En remplaçant l'équation (II-18) dans l'équation (II-13) :

$$P_d + P_L(P_{g1}, P_{g2}, P_{g3}, \dots, P_{gn}) - \lambda \sum_{i=1}^{ng} \frac{f_i^{-1}}{2\gamma_i} + \sum_{i=1}^{ng} \frac{\beta_i}{2\gamma_i} = 0 \quad (\text{II-19})$$

$$\lambda = \frac{P_d + P_L(P_{g1}, P_{g2}, P_{g3}, \dots, P_{gn}) + \sum_{i=1}^{ng} \frac{\beta_i}{2\gamma_i}}{\sum_{i=1}^{ng} \frac{f_i^{-1}}{2\gamma_i}}$$

$$P_{gi} = \left[\frac{1}{2\gamma_i} \left(\left(\frac{P_d + P_L(P_{g1}, P_{g2}, P_{g3}, \dots, P_{gn}) + \sum_{i=1}^{ng} \frac{\beta_i}{2\gamma_i}}{\sum_{i=1}^{ng} \frac{f_i^{-1}}{2\gamma_i}} \right) f_i^{-1} - \beta_i \right) \right] \quad (\text{II-20})$$

Le problème devient plus difficile à résoudre car, suite à l'introduction du terme de pertes les équation de stationnarité du lagrangien deviennent des équations couplées.

$$P_L = F(P_{g1}, P_{g2}, P_{g3}, \dots, P_{gn})$$

Donc, il faut utiliser une méthode itérative pour calculer chaque puissance sous les étapes suivantes :

- ❖ **L'étape 1** : calculer de valeurs initiales des puissance générées par la méthode de lagrangien sans pertes.
- ❖ **L'étape 2** : remplacement des puissance générées dans la formule des pertes.
- ❖ **L'étape 3** : calcule des coefficients $\frac{\partial P_L}{\partial P_{gi}}$ ensuite, l'évaluation des facteurs de pénalités de tous les générateurs.
- ❖ **L'étape 4** : calculer $\lambda^{(K)}$ correspondant.
- ❖ **L'étape 5** : mise à jour des P_{gi}
- ❖ **L'étape 6** : vérifier que : $(\sum_{i=1}^{ng} P_{gi} - P_d - P_L \leq \varepsilon)$.

Si oui : on passe à l'étape (7)

Si non : on retourne à l'étape (2)

- ❖ **L'étape 7** : on calcule le coût de chaque central puis le coût total qui représente la solution optimale du problème.

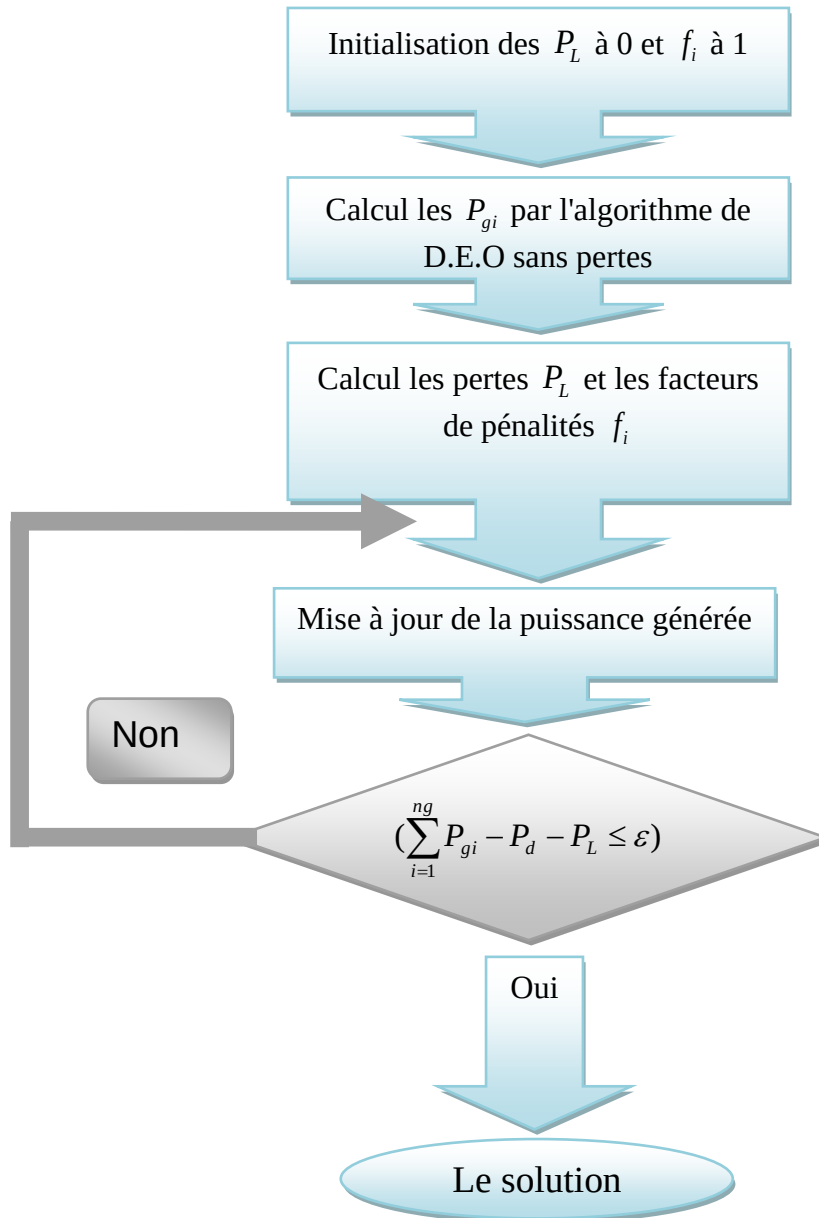


Figure (II-5) : l'organigramme de méthode de lagrangien avec pertes

II.7.3la méthode itérative de lambda :

La méthode da lambda est utilisée lorsque la fonction de coût n'est pas quadratique dont, elle est polynôme de degré supérieur à 2, cette méthode s'appuyer sur al fonction d'erreur qui supposer une fonction continue, pour appliqué la théorème de valeur moyenne.

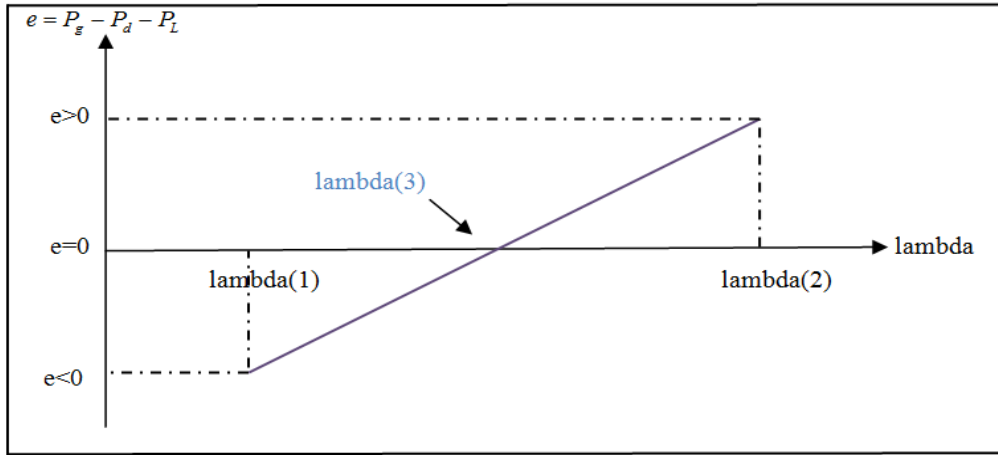


Figure (II-6) : l'explication graphique de la méthode Itératif de la lambda

Où les étapes de cette méthode sont :

❖ **L'étape 1 :** Estimation de $\lambda^{(1)}$.

❖ **L'étape 2 :** on calcule les puissances générées par la méthode lagrangien est les pertes par leurs relation.

$$\frac{\partial C_i}{\partial P_{gi}} = \lambda \left(1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_{gi}} \right)$$

❖ **L'étape 3 :** calculé l'error : $e_1 = \sum_{i=1}^{ng} P_{gi} - P_d - P_L$

-Si $e_1 = 0$: afficher les résultats (solution finale).

-Sinon, on passe à l'étape 4

❖ **L'étape 4 :** Nouvelle valeur de λ

Où : $\lambda_2 = \lambda_1 + \Delta\lambda$

$-(10\% \lambda_1) \leq \Delta\lambda \leq +(10\% \lambda_1)$

-Si $e_2 = 0$, les résultats représente la solution optimale

-Sinon :

$$\begin{cases} \text{Si } e_1 \cdot e_2 < 0 \text{ on passe à l'étape 5} \\ \text{Sinon, on retourne à l'étape 4} \end{cases}$$

❖ **L'étape 5 :** on fait le calcule suivante :

$$\frac{|e_2|}{\lambda_2 - \lambda_3} = \frac{|e_1|}{\lambda_3 - \lambda_1} \Rightarrow \lambda_3 = \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{|e_1| + |e_2|} |e_2| + \lambda_2 \quad (\text{II-21})$$

$e_3 = 0 \Rightarrow$ la solution optimal

$e_3 \neq 0 \Rightarrow$ donc la solution optimal enter λ_1 et λ_3 ou enter λ_2 et λ_3 .

L'algorithme de la méthode lambda [5] :

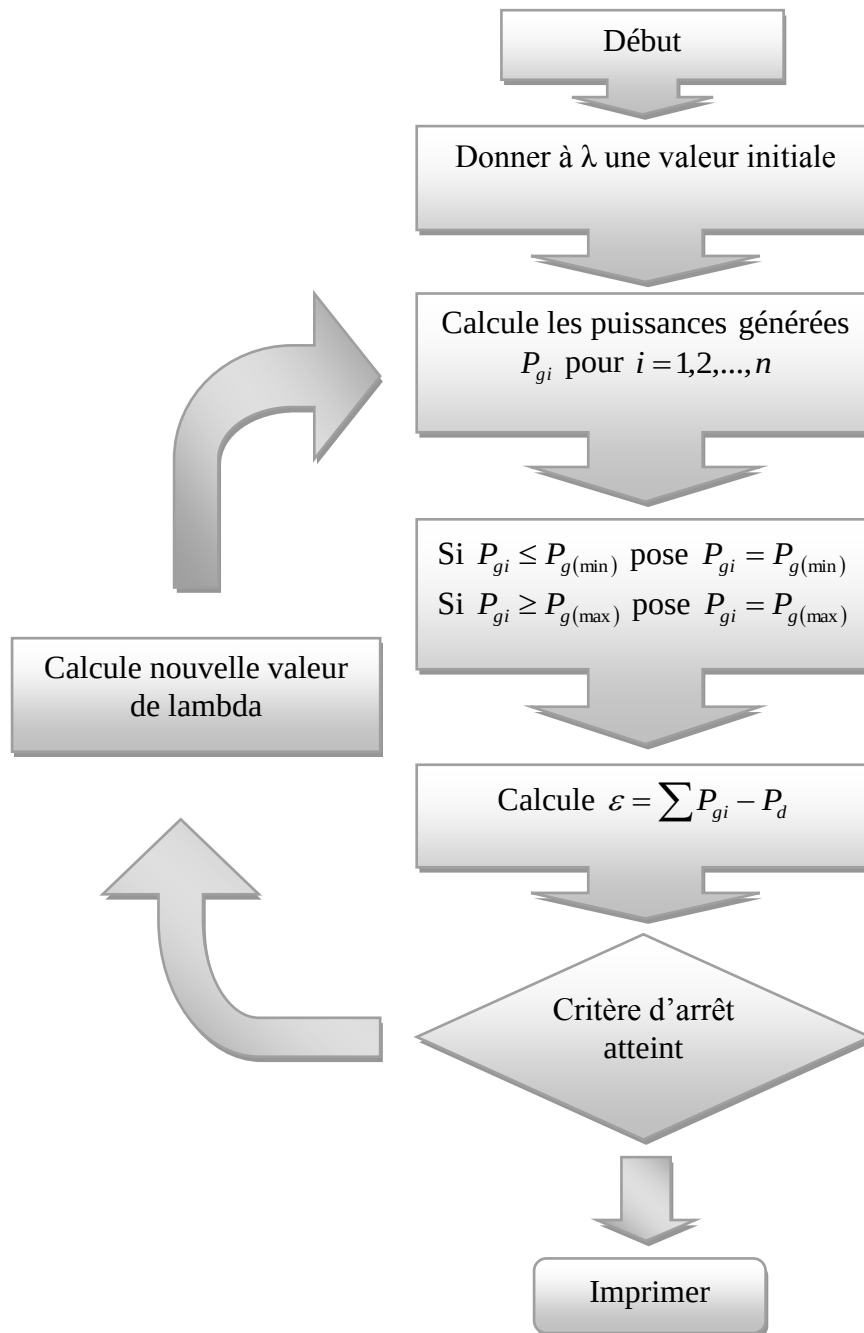
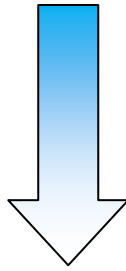


Figure (II-7) : Organigramme de la méthode lambda

II.8 Conclusion

Un système de puissance électrique contenant plusieurs générateurs ou plusieurs centrales, peut alimenter une charge demandée pendant un nombre infini de cycle de génération. L'arrivée à un minimum de coût de production est une caractéristique très importante. Aujourd'hui le fonctionnement des systèmes de puissance électriques est basé sur la minimisation du coût total.

Chapitre III



Algorithme génétique

III.1 Introduction :

Le concept de la sélection naturelle développé par Charles Darwin dans son livre « the origin of species » en 1859 allait un siècle plus tard inspirer de nombreux scientifiques comme John Holland pour l'élaboration des algorithmes évolutionnaires (AE). Actuellement désignés sous le terme générique anglo-saxon « Evolutionary computation », les AE sont à l'origine de trois types : les algorithmes génétiques (AG), les stratégies d'évolution et la programmation évolutionnaire. Actuellement, ils trouvent leurs applications dans tous les domaines de technologie ou même encore de l'économie.

III.2 Les algorithmes génétiques

Un algorithme génétique recherche le ou les extrema d'une fonction défini sur un espace de données. Pour l'utiliser, on doit disposer des cinq éléments suivants :

1. Un principe de codage de l'élément de population. Cette étape associe à chacun des points de l'espace d'état une structure de données. Elle se place généralement après une phase de modélisation mathématique du problème traité. Le choix du codage des données conditionne le succès des algorithmes génétiques. Les codages binaires ont été très employés à l'origine. Les codages réels sont désormais largement utilisés, notamment dans les domaines applicatifs, pour l'optimisation de problèmes à variables continues.

2. Un mécanisme de génération de la population initiale. Ce mécanisme doit être capable de produire une population d'individus non homogène qui servira de base pour les générations futures. Le choix de la population initiale est important car il peut rendre plus ou moins rapide la convergence vers l'optimum global. Dans le cas où l'on ne connaît rien du problème à résoudre, il est essentiel que la population initiale soit répartie sur tout le domaine de recherche.

3. Une fonction à optimiser. Celle-ci prend ses valeurs dans $\mathbb{R}^+$ et est appelée fitness ou fonction d'évaluation de l'individu. Celle-ci est utilisée pour sélectionner et reproduire les meilleurs individus de la population.

4. Des opérateurs permettant de diversifier la population au cours des générations et d'explorer l'espace d'état. L'opérateur de croisement recompose les gènes d'individus existant dans la population, l'opérateur de mutation a pour but de garantir l'exploration de l'espace d'état.

5. Des paramètres de dimensionnement : taille de la population, nombre total de générations ou critère d'arrêt, probabilités d'application des opérateurs de croisement et de mutation [5].

III.3 Codage des chromosomes et décodage :[5]

Il y a plusieurs types de codage : binaire, réel, codage de gray et codage dynamique des paramètres.

Chacun ayant ses propres avantages et inconvénients. Les plus utilisés sont présentés ci-dessous.

III.3.1 Codage binaire

Holland et de Jong ont imposé le codage binaire de longueur fixe pour un chromosome qui s'écrit sous la forme d'une chaîne de l bits avec

$$l = \sum_{i=1}^n l(x_i)$$

Où $l(x_i)$ est le nombre de bits du gène numéro i correspondant au paramètre x_i .

Un des avantages du codage binaire est que l'on peut ainsi facilement coder toutes sortes de paramètre : réel, entiers booléens et chaînes de caractère. Cela nécessite simplement l'usage de fonction de codage et décodage pour passer d'une présentation à l'autre. Ce choix le rend virtuellement applicable à tous les problèmes dont les solutions sont numériques, c'est-à-dire calculées par ordinateur.

Le génotype d'un individu caractérise la structure du chromosome tandis que le phénotype désigne la chaîne obtenue par la concaténation des paramètres réels ou gènes ($x_1, x_2, x_3, \dots$).

Le décodage convertit le chromosome en phénotype grâce au génotype. Les valeurs des paramètres sont extraites du phénotype et ensuite fournies à la fonction d'adaptation qui retourne la performance permettant ainsi de classer l'individu dans la population.

Le phénotype est obtenu à partir du génotype par l'équation :

$$x = \left(\frac{x_{iM} - x_{im}}{2^{l(x_i)} - 1} \right) \sum_{j=0}^{l(x_i)} 2^j \cdot b_j + x_{im}$$

b_j est le $j^{ème}$ bit dans le gène numéro i .

Cette méthode de codage est relativement facile à implanter mais elle présente l'inconvénient de limiter la précision des paramètres à une valeur correspondant à l'écart entre deux configurations réelles adjacentes obtenues, pour une variation du bit le moins significatif. On constate que la

précision du codage dépend du nombre de bits utilisé. Pour un nombre de bits par gène valant 8, 16 et 32, les précisions relatives valent $3.9.10^{-3}$, $1.5.10^{-5}$ et $2.3.10^{-10}$, respectivement.

A chaque paramètre x_i , on associe un gène i g qui est un entier obtenue par :

$$g_i = \frac{x_i - x_{im}}{x_{iM} - x_{im}} (2^{l(x_i)} - 1)$$

III.3.2 Codage de gray

Avec le codage binaire, deux configurations proches dans l'espace des paramètres peuvent avoir deux chromosomes très distincts, par exemple, les chaînes « 01111 » et « 10000 » correspondent à deux configurations réelles voisines alors qu'elles diffèrent de cinq bits. Cette caractéristique peut s'avérer pénalisante pour la recherche locale par croisement.

L'utilisation de code gray a été recommandée pour répondre à ce problème. En effet, avec ce code, les entiers adjacents ne diffèrent que d'un bit. Le passage entre deux configurations réelles voisines ne nécessite que de modifier un seul bit dans le chromosome.

Le passage du code binaire au code de gray est effectué de la manière suivante :

$$b_j^{gray} = \begin{cases} b_j & \text{si } j = l(x_i) \\ b_j \oplus b_{j-1} & \text{si } j \leq l(x_i) \end{cases}$$

Où $\oplus$ représente l'addition modulo 2.

La transformation inverse s'obtient avec l'équation suivante :

$$b_j = \bigoplus_{k=j}^{l(x_i)} b_k^{gray}$$

Si on considère que le chromosome est représenté en code de gray, on effectuera d'abord la transformation avant un décodage binaire standard.

Ces opérations sont transcrites dans la table III-1.

Entier	Code binaire	Code Gray
0	0000	0000
1	0001	0001
2	0010	0011
3	0011	0010
4	0100	0110
5	0101	0111
6	0110	0101
7	0111	0100
8	1000	1100
9	1001	1101
10	1010	1111
11	1011	1110
12	1100	1010
13	1101	1011
14	1110	1001
15	1111	1000

Tableau (III- 1): Code binaire et code gray sur 4 bits

L'intérêt du codage de Gray se comprend mieux lorsque les opérateurs de croisement et de mutation sont présentés.

III.3.3 Codage dynamique des paramètres

Pour résoudre le problème de précision inhérent au décodage binaire standard et améliorer la

Recherche locale, un codage dynamique des paramètres est proposé. La procédure de décodage est la suivante :

$$x_i = x_{im} + \frac{x_{iM} - x_{im}}{2^{l(x_i)} - 1} \left(\sum_{j=0}^{l(x_i)} 2^j b_j + dN(x_i) \right)$$

Où $dN(x_i)$ est une variable réelle aléatoire à densité de probabilité uniforme prise, dans l'intervalle $[0,1]$

L'introduction de $dN(x_i)$ supprime donc les discontinuités entre deux configurations réelles adjacentes, obtenues pour une variation du bit le moins significatif, en proposant une valeur aléatoire.

III.3.4 Codage réel

Dans le cas du codage binaire, des difficultés surviennent pour calculer la fonction objectif et traiter les problèmes à variables :

a. Les fonctions objectifs sont exprimées sous forme réelle. Les chromosomes binaires doivent alors être convertis à chaque évaluation.

b. Les problèmes multi-variables sont ramenés à des problèmes mono variable par concaténation des inconnues en un seul chromosome. A chaque évaluation, la chaîne de bits résultante doit alors être découpée en autant de sous-chaînes qu'il y a d'inconnues. Ces sous-chaînes sont converties en nombres réels pour l'évaluation de la fonction objective.

Une solution est tout simplement de représenter l'ensemble des variables par un vecteur $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ où chaque x_i est un nombre réel. Cette façon de faire est le codage réel.

Il emploie à cet effet des mécanismes plus adaptés, reposant principalement sur une représentation réelle des chromosomes.

III.4 Présentation des algorithmes génétiques :

L'algorithme génétique est organisé en plusieurs étapes et fonctionne de manière itérative. La Figure (III.1) représente l'algorithme génétique le plus simple introduit par Holland. Celui-ci met en œuvre différents opérateurs qui seront décrits dans la section suivante. Mais avant, il est nécessaire de définir quelques termes de base rencontrés dans la littérature :

- ❖ **Individu** : solution potentielle du problème.
- ❖ **Chromosome** : solution potentielle du problème sous une forme codée (forme de chaîne de caractères).
- ❖ **Population** : ensemble fini d'individus (de solution).
- ❖ **Gène** : partie élémentaire (caractère) non divisible d'un chromosome.

- ❖ **Fitness** : terme anglo-saxon qui désigne la fonction d'évaluation d'un individu. Cette fonction est liée à la fonction à optimiser et permet de définir le degré de performance d'un individu (donc d'une solution).

D'une manière générale, un algorithme génétique manipule les solutions potentielles d'un problème donné afin d'atteindre la solution optimale ou une solution jugée satisfaisante.

Un algorithme génétique fait évoluer une population de gènes en utilisant les mécanismes de sélection naturelle et de la génétique de l'évolution. Il utilise une fonction coût basée sur un critère de performance pour calculer une « qualité d'adéquation » (fitness). Les individus les plus « forts » seront à même de se reproduire et auront plus de descendants que les autres. Chaque chromosome est constitué d'un ensemble d'éléments appelés caractéristiques ou gènes. Le but est de trouver la combinaison optimale de ces éléments qui donne une « fitness » maximale. A chaque itération (génération de population), une nouvelle population est créée à partir de la population précédente. [13]

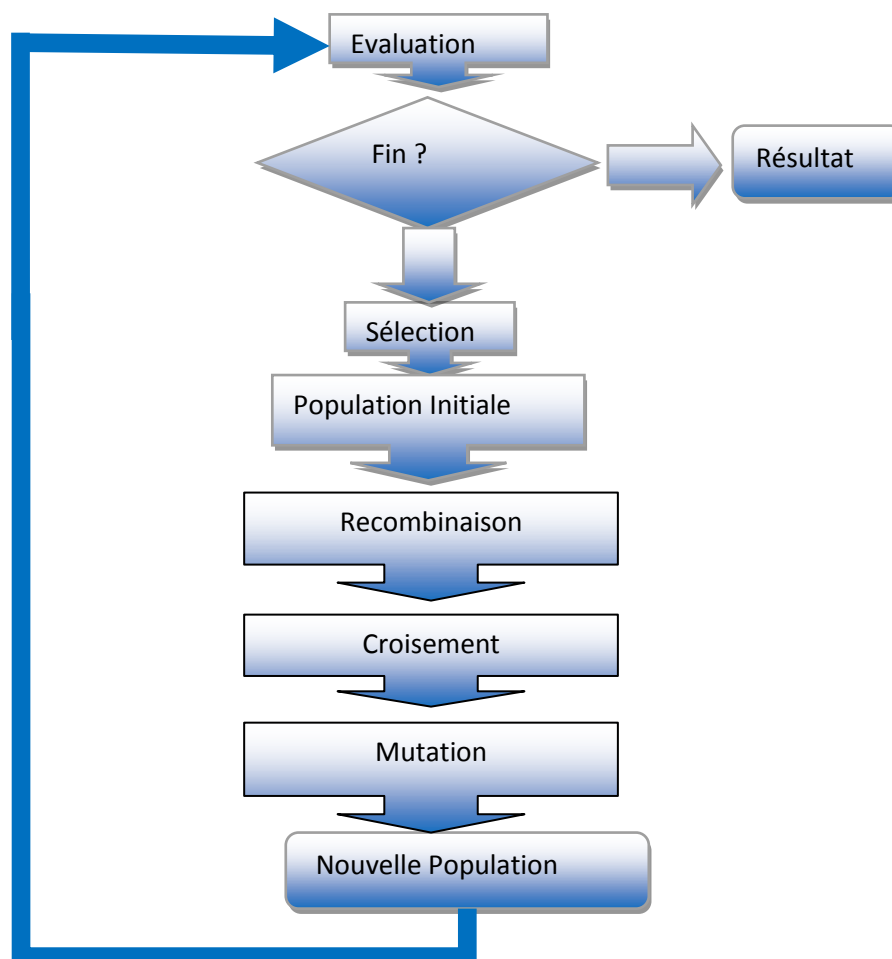


Figure (III-1) Organigramme d'un algorithme génétique simple

III.4.1 Evaluation :

L'évaluation consiste à mesurer la performance de chaque individu de la population. On utilise pour cela une fonction directement liée à la fonction objective (fonction à optimiser) appelée fonction fitness. C'est une fonction réelle positive qui reflète la force de l'individu. Un individu ayant une grande valeur fitness représente une bonne solution au problème, alors qu'un individu ayant une faible valeur fitness représente une solution médiocre.

Dans le cas d'un problème de minimisation, la fonction fitness peut être obtenue en utilisant une des formulations suivantes, [13].

$$Fit(x) = N - F_{obj}(x) \quad Si \ F_{obj}(x)$$

Sinon $Fit(x) = 0$ (N est une constante positive).

$$Fit(x) = \frac{1}{F_{obj}(x)}$$

$$Fit(x) = -F_{obj}(x)$$

Contrairement aux méthodes classiques d'optimisation, aucune condition liée à la dérivabilité, à la continuité, la convexité ou concavité n'est requise pour la fonction objective. Il suffit juste qu'elle fournisse une valeur numérique finie pour chaque individu. Cela donne aux algorithmes génétiques un caractère très attrayant pour la résolution dont les formulations mathématiques sont méconnues ou très difficiles à déterminer.

III.4.2 La sélection :

Le rôle de la sélection est de choisir parmi tous les individus d'une population les parents qui assureront la reproduction. Ce choix est réalisé par tirage au sort parmi les individus, en tenant compte d'une probabilité de sélection affectée à chacun d'eux. Un individu a d'autant plus de chances d'être sélectionné que sa fonction d'évaluation prend une valeur importante.

Pratiquement, la probabilité p_i d'évolution d'un individu i est définie par :

$$P_i = \frac{f_e(C_i)}{\sum_{j=0}^{np} f_e(C_j)}$$

Il existe plusieurs méthodes de sélection. Nous ne citerons que quatre des plus connues :

III.4.2.1 Méthode de la roulette de loterie (casino) :

Où chaque chromosome sera dupliqué dans une nouvelle population proportionnellement à sa valeur d'adaptation. Son principe est d'associer à chaque individu une portion d'une roue dont la surface dépend uniquement de sa valeur fitness. Chaque individu occupe un secteur de la roulette dont l'angle est proportionnel à sa probabilité de sélection, définie par l'équation de probabilité P_i . On actionne Np fois la roulette, afin de définir les parents qui assureront la reproduction.

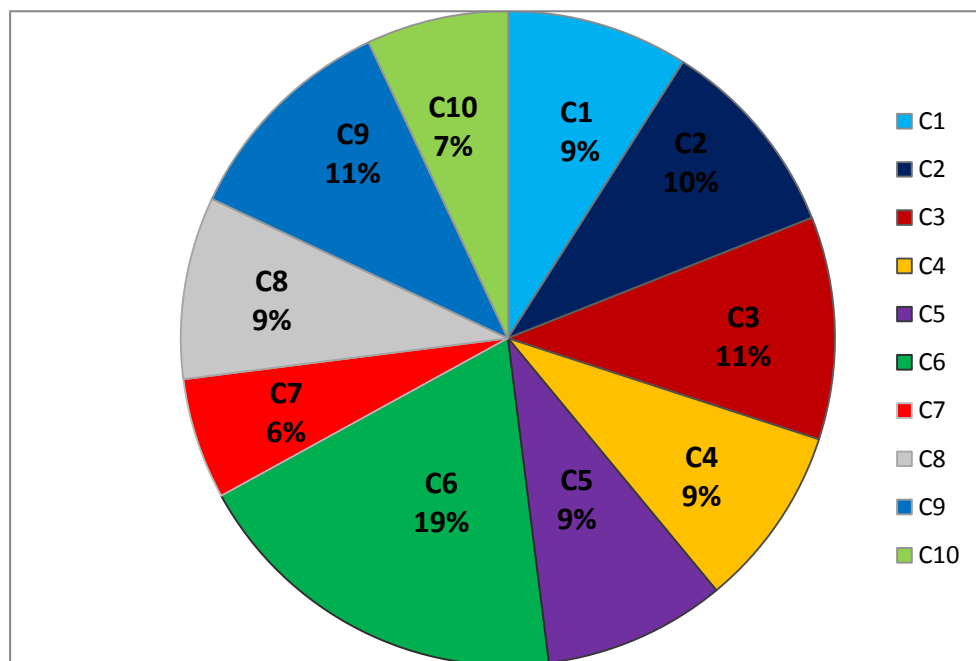


Figure (III-2) : Sélection par la méthode de la roulette de casino.

III.4.2.2 Sélection par tournoi :

On tire deux individus aléatoirement dans la population et on reproduit le meilleur des deux dans la nouvelle population. On répète la procédure jusqu'à ce que la nouvelle population soit complète.

III.4.2.3 La sélection universelle stochastique :

Cette méthode semble être très peu utilisée et qui plus est possède une variance faible, donc introduit peu de diversité, nous n'entrerons donc pas dans les détails, on se contentera d'exposer sa mise en œuvre. On prend l'image d'un segment découpé en autant de sous segments qu'il y a d'individus. Les individus sélectionnés sont désignés par un ensemble de points équidistants [5].

III.4.2.4 La méthode élitiste :

Cette méthode consiste à sélectionner les n individus dont on a besoin pour la nouvelle génération P' en prenant les n meilleurs individus de la population P après l'avoir triée de manière décroissante selon la fitness de ses individus. Il est inutile de préciser que cette méthode est encore pire que celle de la loterie biaisée dans le sens où elle amènera à une convergence prématurée encore plus rapidement et surtout de manière encore plus sûre que la méthode de sélection de la loterie biaisée ; en effet, la pression de la sélection est trop forte, la variance nulle et la diversité inexistante, du moins le peu de diversité qu'il pourrait y avoir ne résultera pas de la sélection mais plutôt du croisement et des mutations.

III.4.3 La recombinaison génétique :

La recombinaison agit directement sur la structure des chromosomes en modifiant leurs gènes pour obtenir les nouveaux chromosomes d'une nouvelle population. Il existe deux catégories d'opérateurs de recombinaison : l'opérateur de croisement et l'opérateur de mutation. [13]

III.4.3.1 1 Croisement : [9]

Le croisement est un processus aléatoire de probabilité p_c appliqué séquentiellement à des couples de parents pris au hasard dans la population. Il consiste à échanger une partie du matériel génétique des parents pour former deux nouveaux individus (enfants).

Les parents après croisement peuvent être retirés de la population de reproducteurs (*croisement sans remplacement*) ou bien être gardés pour avoir une nouvelle chance de se reproduire (*croisement avec remplacement*). C'est la première solution qui est généralement adoptée.

❖ Le croisement à un site :

Considérons deux chaînes binaires de longueur l qui représentent les chromosomes de deux parents reproducteurs. Lorsque le croisement a lieu, un site de croisement est choisi entre les positions 1 et $l-1$ du chromosome. Le mécanisme de croisement consiste alors à échanger les gènes de chaque parent entre le site sélectionné et la position finale l des deux chaînes, comme le montre la figure (III.3).

L'effet d'un opérateur de recombinaison génétique peut être perçu à travers la propagation des schémas comme lors de la sélection des parents. Il convient alors de déterminer le taux de *destruction* (ou de *survie*) d'un schéma quelconque sous l'opérateur considéré.

Pour le croisement à un site, la probabilité qu'un schéma de longueur utile $d(H)$ soit détruit est donnée par :

$$P_d(H) = \frac{\delta(H)}{l-1} \quad (\text{III-1})$$

Où l désigne la longueur du chromosome.

Si le croisement est appliqué avec une probabilité p_c , le taux effectif de destruction d'un schéma devient :

$$P_{d, \text{eff}}(H) \leq P_c P_d(H) \quad (\text{III-2})$$

Ce qui correspond à une probabilité de survie :

$$P_{s, \text{eff}}(H) \geq 1 - P_c P_d(H) \quad (\text{III-3})$$

La relation précédente est générale et ne dépend pas du type de croisement. Dans le cas du Croisement standard à un site, elle peut être réécrite en prenant en compte (III-1).

$$P_{s, \text{eff}}(H) \geq 1 - P_c \frac{\delta(H)}{l-1} \quad (\text{III-4})$$

L'équation (III-4) montre que $P_{s, \text{eff}}(H)$ diminue lorsque la longueur utile du schéma augmente. Le croisement à un site préserve essentiellement des schémas de longueur utile courte.

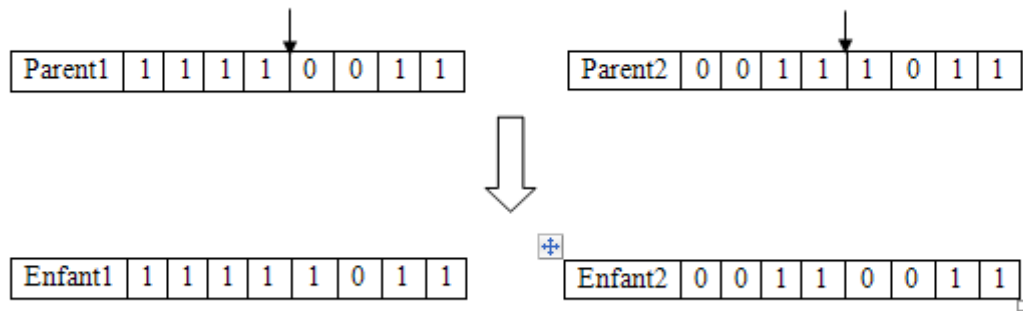


Figure (III-3). Principe du croisement à un site.

❖ Le croisement multi-sites :

Le croisement peut être généralisé à n sites, la permutation des gènes étant effectuée entre chaque site. Si le nombre de sites est impair, on fixe un emplacement supplémentaire correspondant à la dernière position dans la chaîne comme pour le croisement à un site. Le mécanisme du croisement généralisé est illustré à la figure(III.4).

Pour le croisement multi-sites, la probabilité de survie d'un schéma peut être exprimée récursivement par rapport à son ordre $o(H)$ et en fonction de sa longueur utile $d(H)$. Nous ne spécifions pas ici l'expression assez complexe de cette probabilité mais nous invitons le lecteur à se reporter pour plus d'informations.

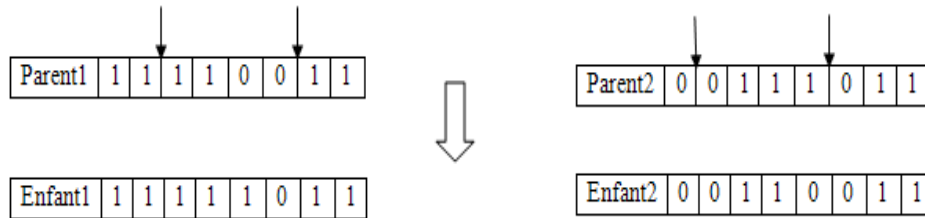


Figure (III-4). Principe du croisement multi-sites.

❖ Le croisement uniforme :

Le croisement uniforme est obtenu à partir d'un masque binaire initialisé aléatoirement et possédant un nombre de bits égal au nombre de gènes des individus de la population. Le premier enfant est créé en prenant les gènes du premier parent lorsque les bits correspondant dans le masque valent "1" et les gènes du deuxième parent si ces derniers valent "0". Le deuxième enfant s'obtient de la même manière en complétant le masque.

La figure(III.5) illustre le processus du croisement uniforme. Bien que le nombre effectif de sites ne soit pas fixe à chaque recombinaison, on estime que le croisement uniforme produit une moyenne de $l/2$ sites, l étant toujours la longueur totale du chromosome.

La probabilité de survie d'un schéma soumis au croisement uniforme est donnée par :

$$P_s(H) = \frac{1}{2^{o(H)-1}} \quad (\text{III-5})$$

Dans le cas du croisement uniforme, les taux de survie et de destruction d'un schéma particulier ne sont pas liés à sa longueur utile mais à son ordre. Il devient alors difficile de quantifier l'effet de cet opérateur.

Signalons pour finir que le masque de croisement est généralement construit de manière uniformément aléatoire en respectant l'équiprobabilité d'obtenir une valeur égale à 0 ou 1 pour chaque bit. Toutefois, un croisement uniforme paramétré fonction d'une probabilité supplémentaire

p_0 , liée à l'apparition d'une des deux valeurs de l'alphabet binaire, a été proposé pour augmenter l'efficacité de l'opérateur. Lorsque $p_0=0.5$, on retrouve évidemment le croisement uniforme standard.

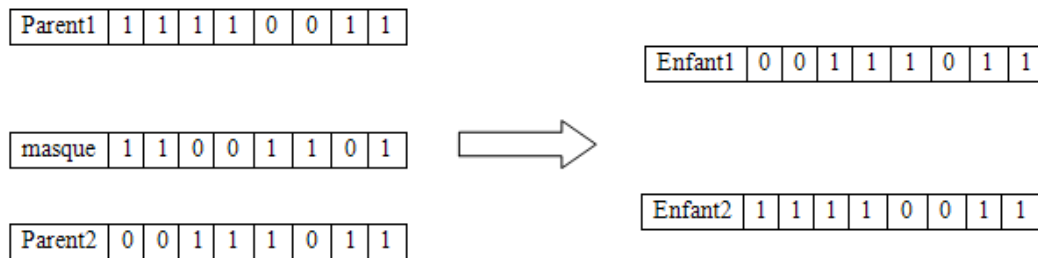


Figure (III-5). Principe du croisement uniforme.

III.4.3.2 La mutation :

La mutation est une altération aléatoire d'un gène d'un individu. L'opérateur de mutation Consiste à complémenter la valeur d'un bit du chromosome avec une probabilité P_m (voir Figure (III.6)). Le processus est exécuté bit à bit.

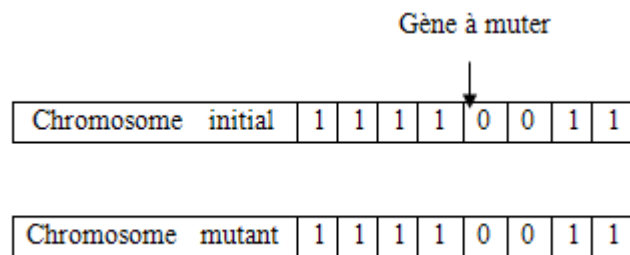


Figure (III-6). Principe de la mutation.

La combinaison de la sélection et du croisement est normalement nécessaire pour assurer l'évolution de la population et la convergence de l'algorithme vers l'optimum. Mais, il arrive parfois que des informations essentielles contenues dans les gènes des individus disparaissent au cours des générations. Le rôle principal de la mutation est de protéger les individus contre cette perte irrémédiable de matériel génétique. Prise indépendamment, la mutation constitue un opérateur de recherche secondaire qui favorise l'apparition de génotypes nouveaux.

Pour qu'un schéma survive à l'opération de mutation, il faut que toutes ses positions instanciées soient conservées. Comme la probabilité de survie d'un allèle quelconque est $1 - p_m$ et que le nombre de positions fixes dans le schéma est $o(H)$, la probabilité de survie d'un schéma à la mutation est :

$$P_s(H) = (1 - P_m)^{o(H)} \quad (\text{III-6})$$

Pour de très faibles taux de mutation, l'expression précédente peut être évaluée approximativement comme suit :

$$P_s(H) = 1 - o(H)P_m \quad (\text{III-7})$$

III.5 Conclusion :

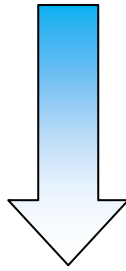
Dans ce chapitre nous avons présenté en détail les mécanismes d'un algorithme génétique. Les algorithmes génétiques constituent une famille d'algorithmes heuristiques permettant de rechercher l'optimum ou un quasi-optimum des fonctions objectives, sur les quelles il n'est besoin de faire aucune hypothèse particulière, notamment en ce qui concerne leur dérivabilité. Pour mettre en œuvre avec succès un algorithme génétique simple, il faut choisir avec soin les trois paramètres suivants:

La probabilité de croisement P_c , la probabilité de mutation P_m , et la taille de la population L . par ailleurs, il faut choisir entre divers mécanismes de sélection, de recombinaison et de mutation. Des essais pratiques se révèlent indispensables pour optimiser les valeurs retenues en fonction du problème à résoudre et pour montrer que les opérateurs choisis donnent des résultats meilleurs.

Enfin les algorithmes génétiques fournissent des solutions proches de la solution optimale à l'aide des mécanismes de sélection, de croisement et de mutation comme le montre la Figure (III.1), Ils sont applicables pour nombreux problèmes, dont le problème de dispatching économique optimal.

Dans le chapitre qui suit on donne une application des algorithmes génétiques sur la répartition optimale le puissances générées.

Chapitre IV



Application de l'AG au
problème CP

IV.1 Introduction

Nous avons assisté ces dernières années à une croissance très rapide des travaux utilisant les techniques métaheuristiques dans les systèmes électriques. Cela est dû à la simplicité de leurs mécanismes, la facilité de leur mise en application et leur efficacité même pour les problèmes complexes. Ce chapitre est consacré au test des algorithmes suivants :

1. Algorithme de l'écoulement de puissance de Newton-Raphson (N-R).
2. Algorithme de l'écoulement de puissance optimale par la méthode lagrangien.
3. Algorithme de l'écoulement de puissance optimale par les méthodes métaheuristiques.
 - ❖ Algorithme génétique (codage binaire).
 - ❖ Algorithme d'optimisation par Essaim Particules.

Les tests seront effectués sur des réseaux électriques de petites et moyennes échelles. Ces algorithmes ont été développés dans l'environnement MATLAB version 7.12, et exécutés par un microprocesseur Pentium i3 avec 4 GP de RAM et CPU 1.8 GHZ.

IV.2 L'objectif de chapitre :

Le problème de l'écoulement de puissance consiste à trouver la répartition des puissances sur les générateurs du réseau afin d'obtenir la puissance demandée sans tenir en compte le coût de production c.-à-d. :

$$\sum_{i=1}^{ng} P_{gi} = P_D$$

Mais Le problème de l'écoulement de puissance optimal consiste à trouver le minimum de la fonction objective suivante :

$$F(x) = \sum_{i=1}^{ng} (\alpha_i + \beta_i \cdot P_{gi} + \gamma_i \cdot P_{gi}^2)$$

Chaque puissance active générée P_{gi} est limitée par une limite inférieure $P_{Gi(min)}$ est une limite supérieure $P_{Gi(max)}$

$$P_{gi \min} \leq P_{gi} \leq P_{gi \max}$$

IV.3 Test de l'algorithme Génétique :

Dans cette partie, on va appliquer l'algorithme génétique d'optimisation à l'écoulement de puissance, et voir l'avantage de cet algorithme par rapport à celui de l'écoulement de puissance de Newton-Raphson. Ensuite on va procéder à des comparaisons avec la méthode lagrangien.

Paramètres A-G :

Le code représenté par le format binaire est d'une longueur 16 bits pour chaque générateur. Les probabilités de mutation est 0.05. Le tableau IV.1 montre les paramètres de l'AG utilisés pour cette simulation [5].

Taille de la population	50-80
La mutation	0.05
Type de croisement	Croisement en un point
Type de sélection	proportionnelle
Nombre de générations	200

Tableau (IV-1): les opérateurs de l'AG – Binaire.

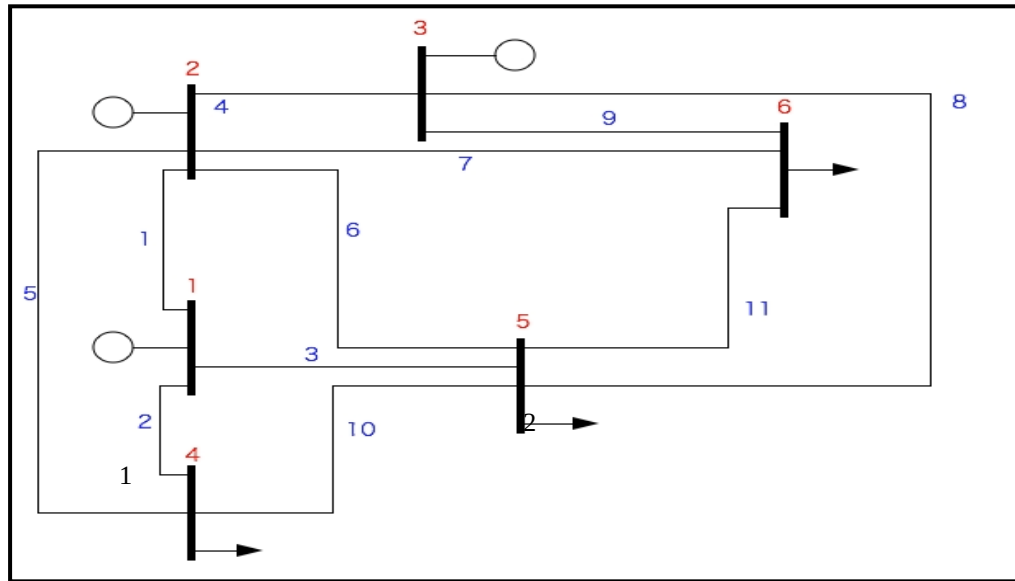
IV.3.1 Réseau 6 jeux de barres :

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 figure.(IV-1). La puissance et la tension de base sont respectivement, 100 MVA et 230 KV .

Les coefficients de la fonction quadratique de coût et les limites min et max des puissances actives et réactives des trois générateurs sont donnés dans le tableau(IV-2).

J-b	Pg _i		Qg _i		Coefficients de coût		
	limite min. (MW)	limite max. (MW)	limite min. (MVAR)	limite max. (MVAR)	γ (\$/MW ² hr)	β (\$/MWhr)	α (\$/hr)
1	50.0	200	-300	300	0.00533	11.669	213.1
2	37.5	150	-300	300	0.00889	10.333	200.0
3	45.0	180	-300	300	0.00741	10.883	240.0

Tableau (IV- 2) : Les données des fonctions de coût des 3 générateurs du réseau 6 bus



Figure(IV-1) :Schéma unifilaire du réseau électrique à 6 jeux de barres.

Le tableau IV.2 dressé ci-après montre les tensions aux niveaux de tous les jeux de barres du réseau test après convergence de l'optimisation de l'écoulement de puissance par l'algorithme génétique et celle de l'écoulement de puissance par la méthode de Newton-Raphson.

N de JDB	Newton Raphson		lambda		Algorithme génétique	
	Module	Angle	Module	Angle	Module	Angle
1	1.0500	0.0000	1.0500	0.000	1.0500	0.0000
2	1.0500	-3.6712	1.0500	-0.4316	1.0500	-0.5056
3	1.0700	-4.2733	1.0700	-0.7009	1.0700	-0.6290
4	0.9894	-4.1958	0.9869	-2.0476	0.9870	-2.0892
5	0.9854	-5.2764	0.9846	-2.7954	0.9846	-2.7956
6	1.0044	-5.9475	1.0046	-2.6471	1.0046	-2.6259

Tableau (IV-3) :Tensions du réseau électrique à 6 J.B.

Il est clair d'après le tableau (IV.3) que les pertes de puissance actives ont diminué après l'optimisation. Le coût total des puissances actives est de **3192.38** \$/H en utilisant l'écoulement de puissance N-R alors qu'il n'est que de **3126.60** \$/H en utilisant l'AG, ce qui résulte en un gain de **65.78** \$/hr. On peut conclure par conséquent que l'algorithme génétique avait planifié les puissances actives des générateurs pour minimiser le coût des kilowattheures. On remarque aussi une amélioration dans les valeurs des tensions et angles de phase des différents jeux de barres.

La valeur des pertes de puissance activées qui réside dans le réseau vaut **7.8755** MW en utilisant la méthode de Newton-Raphson pour le problème de l'écoulement de puissance alors qu'elle n'est que de **6.6990** MW dans le cas de l'AG. ce qui résulte en un gain de **1.1765** \$/hr. On peut alors déduire que la planification adéquate des générateurs a aussi minimisé les pertes totales du système, ce qui à une amélioration considérable de l'efficacité de production de transport.

N° J.B	Pg		
	NR	lambda	AG
1	107.87	51.1155	51.0356
2	50.00	92.6077	89.2358
3	60.00	74.9923	76.4248
Puissanc totale générée active	217.8755	216.7155	216.6991
Puissance total demander active	210.0000	210.00	210.0000
Pertes totales de puissance active	7.8755	6.7155	6.6990
Coût de production (\$/h)	3192.38	3127.27	3126.60

Tableau (IV-4) Puissances et coûts de production du réseau électrique à 6 J.D.B.

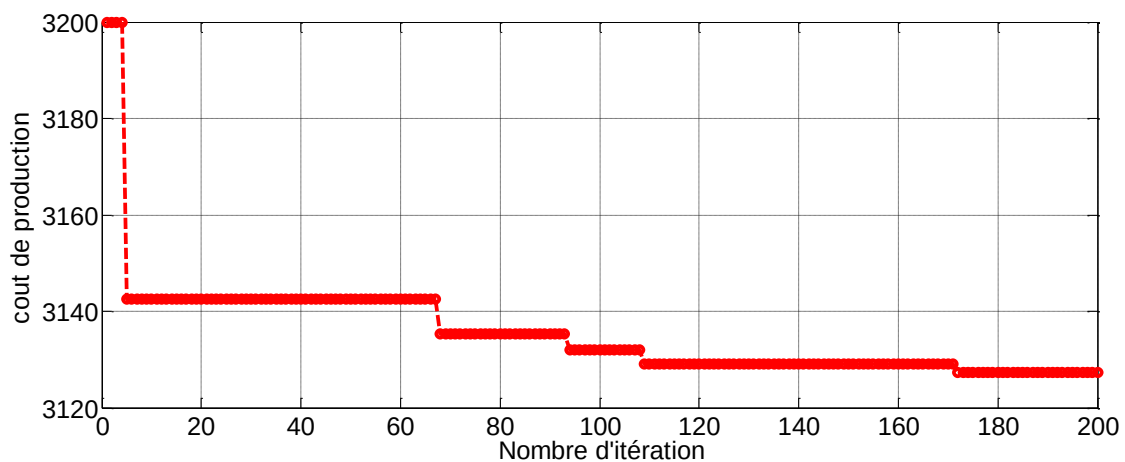


Figure (IV-2) : Evolution du coût de production pour le réseau électrique à 6 J.D.B par A-G

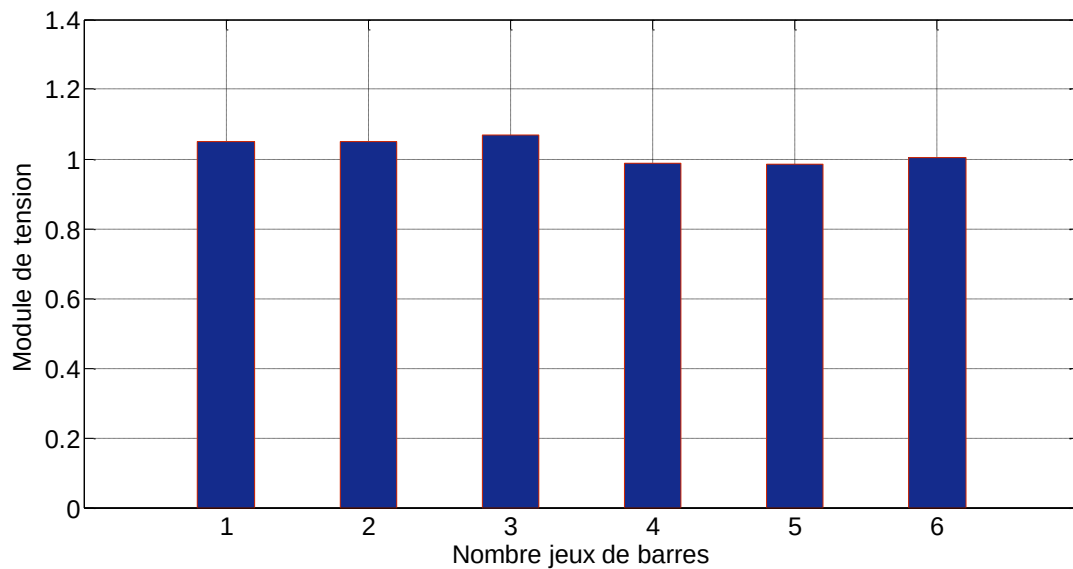


Figure (IV-3) Modules des tensions du réseau électrique à 6 J.D.B par A-G

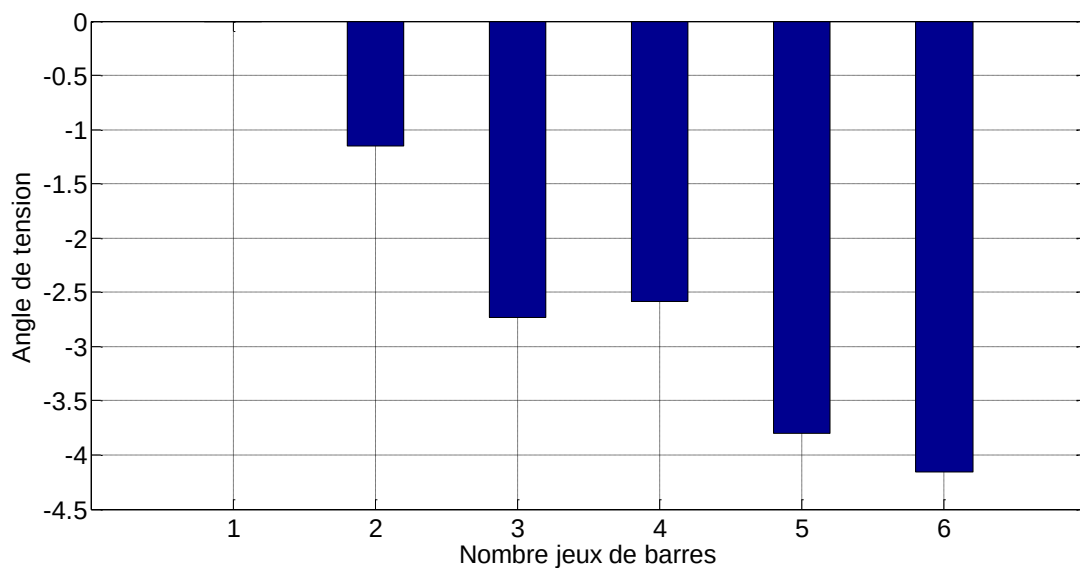


Figure (IV-4) Angles des tensions du réseau électrique à 6 J.D.B par A-G

IV.3.2 Réseau 25 jeux de barres :

Ce réseau est classé parmi les réseaux de moyenne échelle et il est constitué de 35 lignes de transport, 5 générateurs et 24 charges figurent (IV-5)

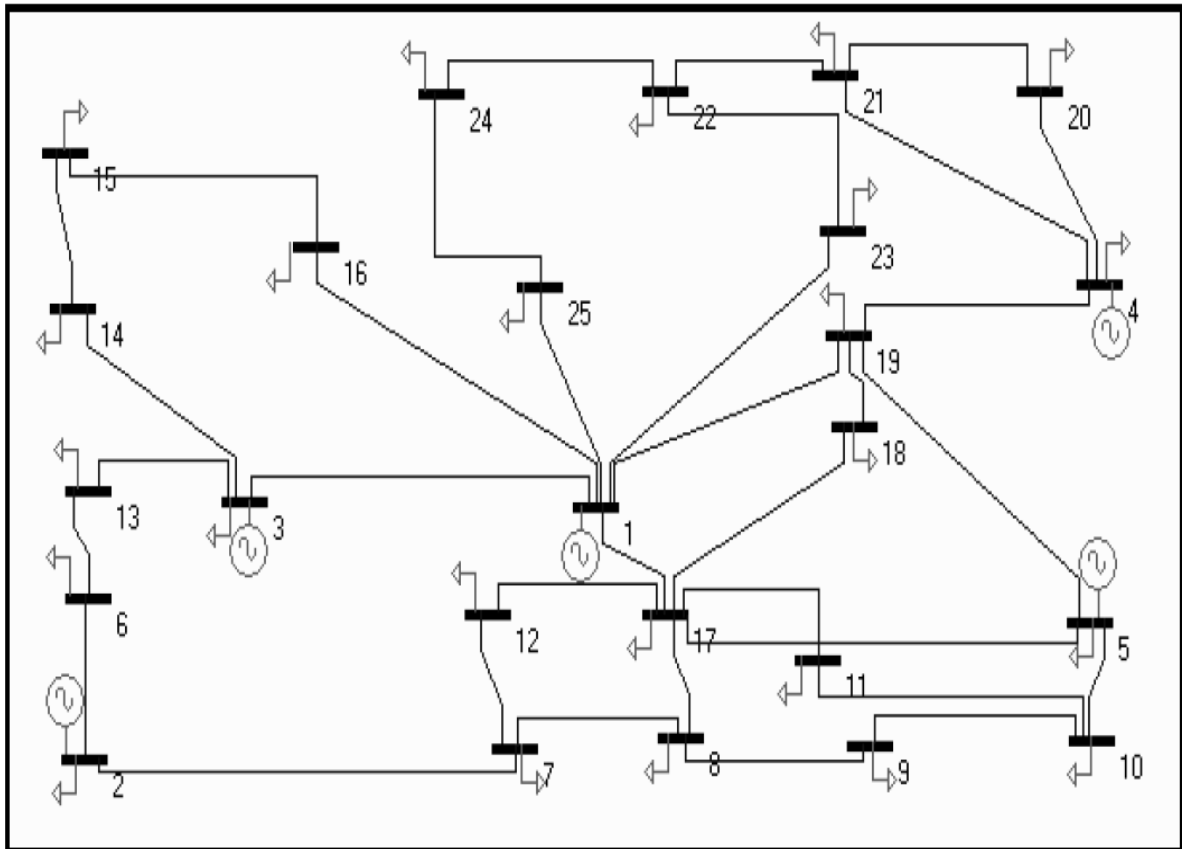


Figure (IV-5) Schéma unifilaire du réseau électrique à 25 jeux de barres.

Les limites des puissances générées (en MW et MVAR) ainsi que Les coefficients de la fonction Quadratique de coût sont donnés dans le tableau (IV-5).

N de JDB	P_{gi}		Q_{gi}		Coefficients de coût		
	Limite min. (MW)	Limite max (MW)	Limite min (Mvar)	limite max. (Mvar)	γ (\$/MW ₂ hr)	β (\$/MW ₁ hr)	α (\$/hr)
1	100	300	-150	250	0.0015	1.80	40
2	80	150	-80	150	0.0030	1.7	60
3	80	200	-80	150	0.0012	2.1	100
4	20	100	-80	150	0.0080	2.0	25
5	100	300	-80	150	0.0010	1.9	120

Tableau (IV-5) Les données des fonctions de coût des 3 générateurs du réseau 6 bus

Convergence de l'Algorithme Génétique :

La figure (IV-6) montre les meilleures valeurs sélectives pour chaque génération. Nous remarquons une amélioration de la population est très rapide au début et devient de plus en plus lente à mesure que le temps passe. L'optimum a été obtenu après quelle que secondes pour les 300 générations. L'influence selon de la taille de la population 50 et 80, nous montre une grande amélioration de la fonction coût avec l'augmentation de la taille de la population, mais elle génère une augmentation du temps d'exécution [5].

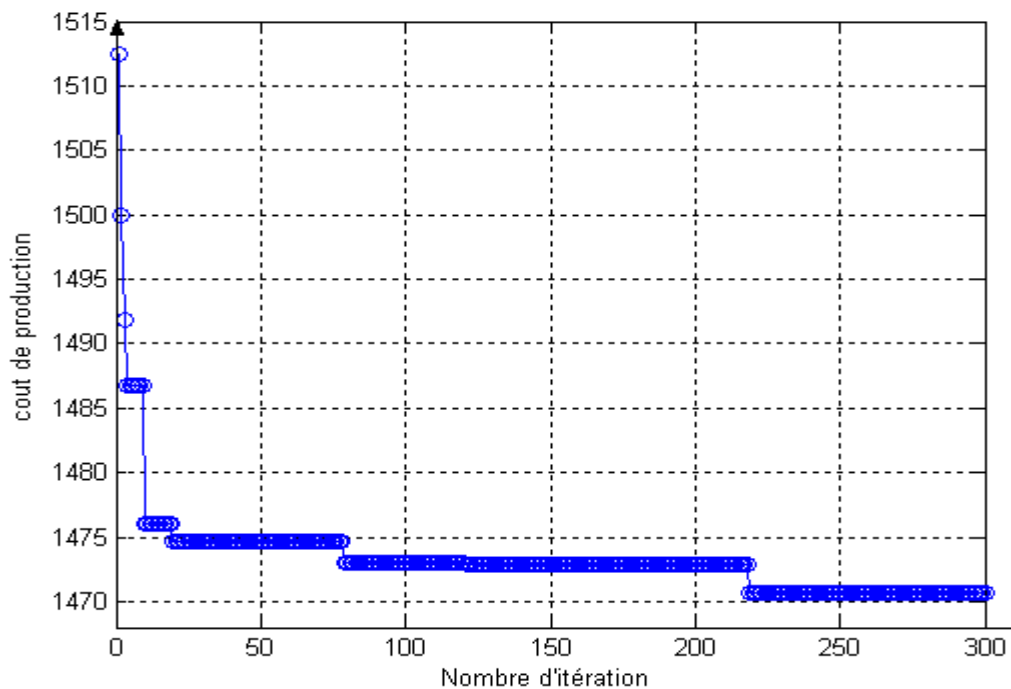


Figure (IV-6) : Evolution progressive de la fonction coût de l'AG - Binaire.

Le tableau (IV-6) montre le module et la phase des tensions après la convergence des algorithmes NR et AG avec algorithmes LG. Les résultats énergétiques et économiques figurent dans le tableau (IV-7).

D'après le tableau (IV-6) on remarque que les tensions avant et après optimisation n'ont pas beaucoup changé, et ils sont dans leurs limites admissibles (entre 0.90 p.u et 1.10 p.u) figure (IV-7). Par contre, les phases des tensions ont changé. Cela s'explique par le fort couplage qui existe entre les phases des tensions et les puissances actives du système électrique.

N de JDB	Newton Raphson		lambda		Algorithme génétique	
	Module	Angle	Module	Angle	Module	Angle
1	1.0200	0.0000	1.0200	0.0000	1.0200	0.0000
2	1.0000	13.5558	1.0000	6.9126	1.0000	5.5228
3	1.0000	6.5962	1.0000	-0.5911	1.0000	-0.7079
4	1.0000	2.2322	1.0000	-3.5112	1.0000	-2.0986
5	1.0000	7.4680	1.0000	2.6058	1.0000	3.5146
6	0.9802	7.4548	0.9803	0.5060	0.9801	-0.1690
7	0.9913	5.7528	0.9912	-0.2760	0.9923	-0.3990
8	0.9939	3.9060	0.9933	-1.9111	0.9943	-1.9998
9	1.0026	2.6911	1.0005	-2.3174	1.0010	-2.0009
10	1.0171	3.3125	1.0156	-1.5168	1.0163	-0.9275
11	1.0081	2.4218	1.0053	-2.1240	1.0061	-1.5797
12	0.9929	3.7334	0.9914	-1.3684	0.9925	-1.3553
13	0.9790	6.5416	0.9791	-0.4841	0.9790	-0.9790
14	0.9549	-2.0256	0.9540	-5.1428	0.9590	-5.1937
15	0.9570	-3.0916	0.9605	-5.2968	0.9606	-5.3330
16	0.9727	-2.9055	0.9758	-4.3260	0.9758	-4.3494
17	0.9952	2.5282	0.9912	-1.7181	0.9921	-1.2218
18	0.9928	1.5845	0.9809	-2.8474	0.9837	-2.0771
19	1.0094	2.4203	0.9894	-2.1725	0.9941	-1.1150
20	0.9854	0.4420	0.9859	-4.6834	0.9859	-3.4652
21	0.9769	-0.0611	0.9778	-4.1741	0.9779	-3.2746
22	0.9752	-2.4024	0.9755	-5.5007	0.9757	-4.8221
23	0.9983	-2.2684	0.9994	-3.3774	0.9993	-3.1339
24	0.9740	-5.0039	0.9752	-6.9962	0.9752	-6.5582
25	0.9772	-5.0257	0.9781	-6.4100	0.9981	-6.1050

Tableau (IV-6) Tensions du réseau électrique à 25 J.D.B

Les résultats obtenus par A-G sont comparés avec ceux trouvés par la méthode Newton Raphson et avec la méthode d'optimisation LAG.

J.B	Pg		
	NR	lambda	AG
1	45.77	160.1571	150.3691
2	100.00	95.7722	84.6439
3	150.00	80.0000	82.5080
4	50.00	20.0000	30.0568
5	200.00	187.3167	193.7598
Puissance totale générée	545.77	543.2460	541.3376
Puissance totale demandée	530.00	530.0000	530.0000
Pertes totales de puissance	15.7715	13.2460	11.4499
Coût de production (\$/h)	1512.50	1471.957	1469.4

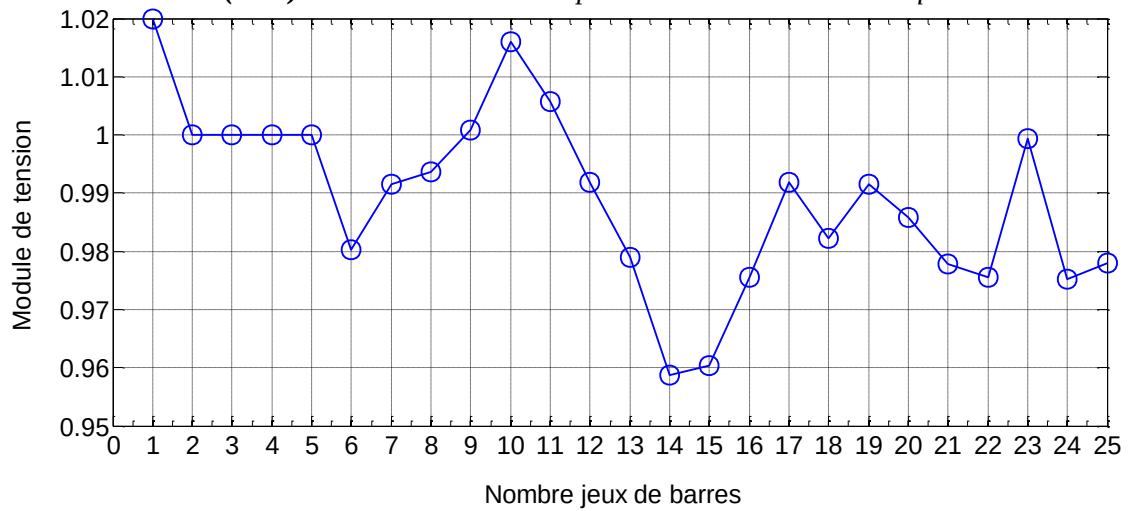
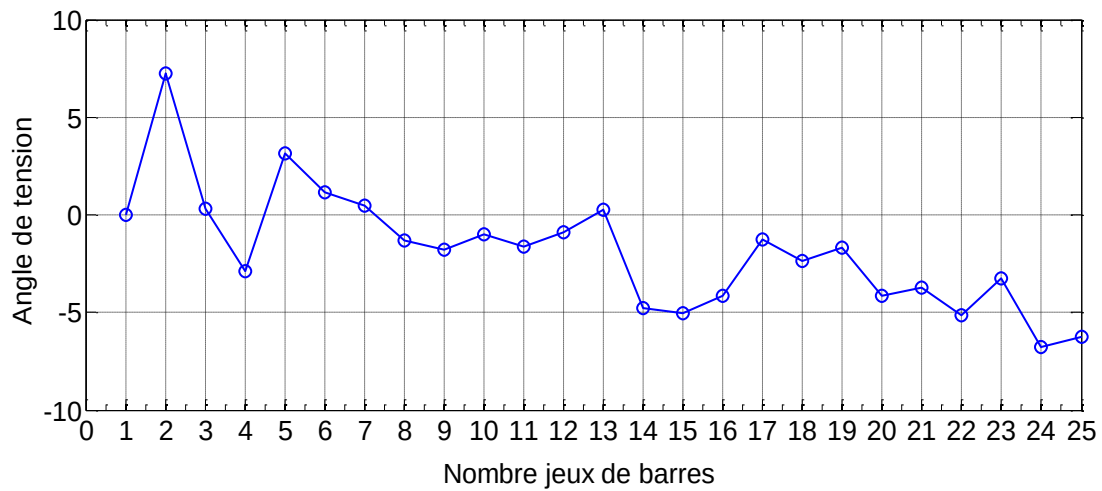
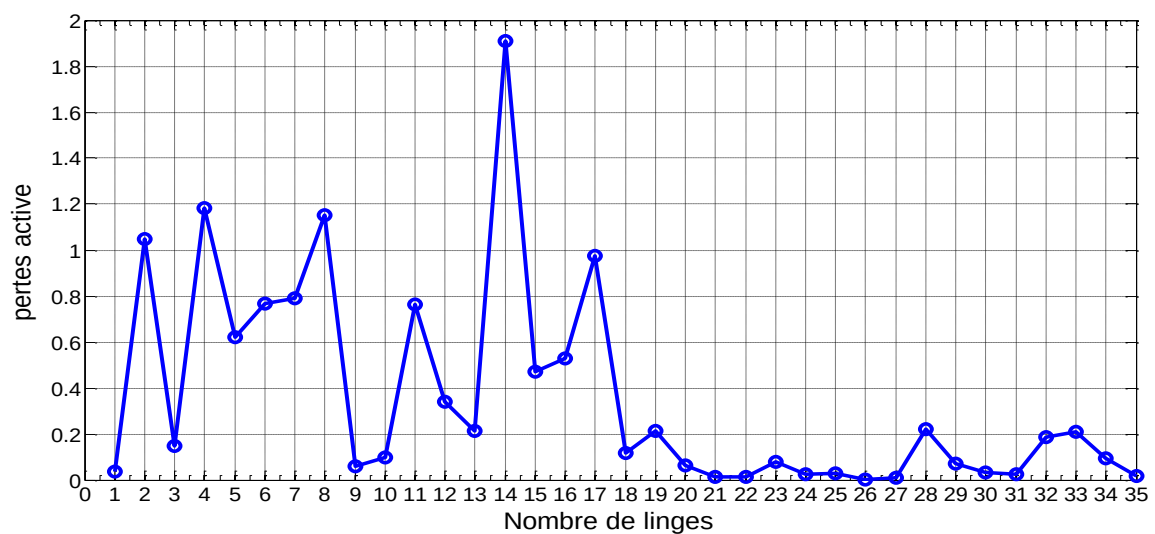
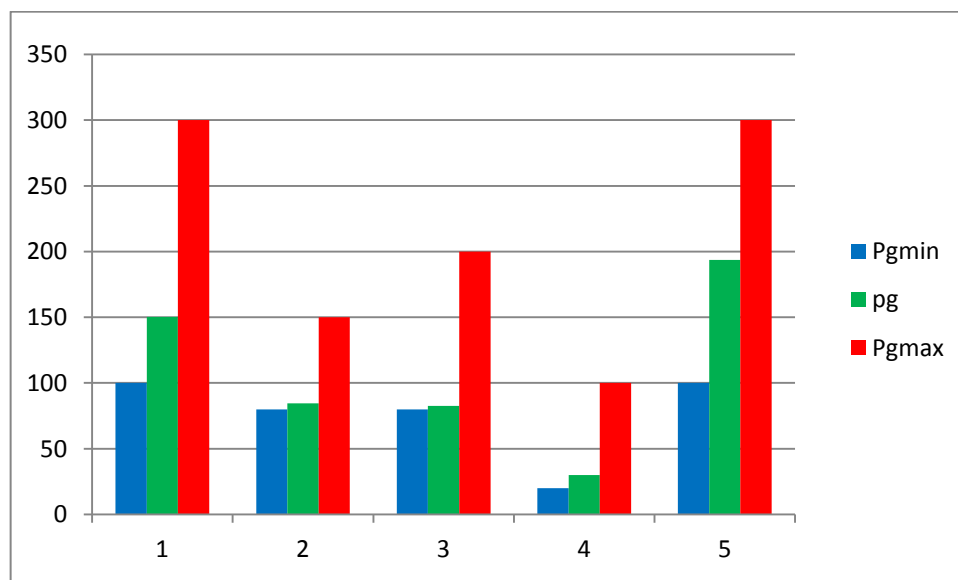
Tableau (IV-7) Puissances et coûts de production du réseau électrique à 25 J.D.B.**Figure (IV-7)** Modules des tensions du réseau électrique à 25 J.D.B par A-G**Figure (IV-8) :** Angles des tensions du réseau électrique à 25 J.D.B par A-G

Figure (IV-9) : les pertes actives du réseau électrique à 25 J.D.B par A-G.

D'après le tableau VI-7 on peut faire les remarques suivantes :

- ❖ Toutes les puissances générées sont dans leurs limites admissibles Figure. IV-3.
- ❖ Le coût de production de la puissance active a baissé considérablement après convergence de l'algorithme génétique **1512.50 \$/h** contre **1469.4 \$/h**, soit un gain financier de **43.1 \$/h -2.84 %**.
- ❖ En plus du gain financier apporté par l'algorithme génétique de l'optimisation, les pertes totales de puissance active ont aussi fortement diminuées de **4.3216MW (-27.40%)**.

*Figure (IV-10) : Puissances actives générées du réseau électrique à 25 J.D.B par A-G.*

IV.3.3 Réseau 30 jeux de barres :

Le troisième test est accompli sur un réseau électrique, Constitué de 30 jeux de barres, 41 lignes électriques, 6 générateurs, et 20 charges, puissance demandée pour ce réseau test vaut 283.4 MW [5].

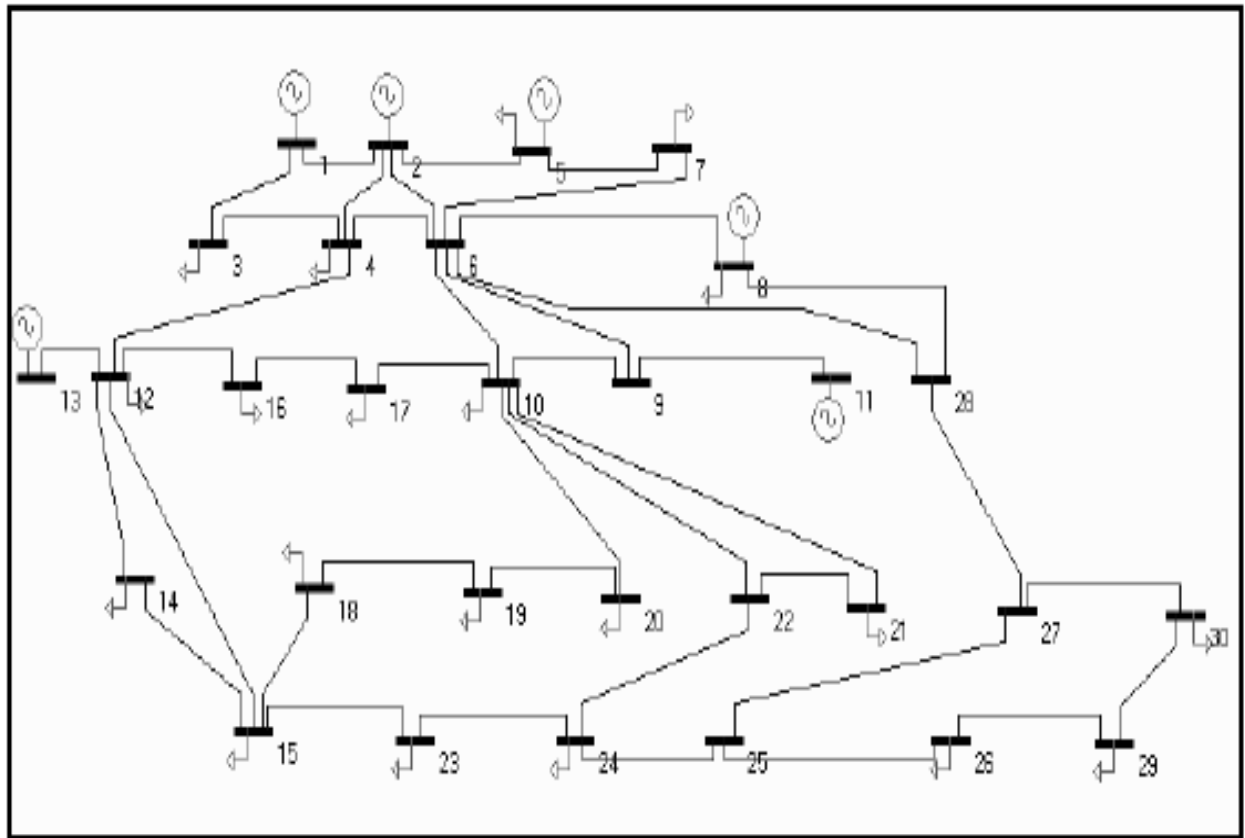


Figure (IV-11) : Schéma unifilaire du réseau électrique à 30 jeux de barres.

Les coefficients de la fonction quadratique de coût et les limites min et max des puissances actives et réactives des six générateurs sont donnés dans le tableau (IV-8)

N de J.D.B	P min (MW)	P max.(MW)	c (\$/MW ² hr)	b(\$/MWhr)	a(\$/hr)
1	50	200	0.00375	2.00	0
2	20	80	0.01750	1.75	0
5	15	50	0.06250	1.00	0
8	10	35	0.00830	3.25	0
11	10	30	0.02500	3.00	0
13	12	40	0.02500	3.00	0

Tableau (IV-8): Les données des fonctions de coût des 6 générateurs du réseau 30 bus

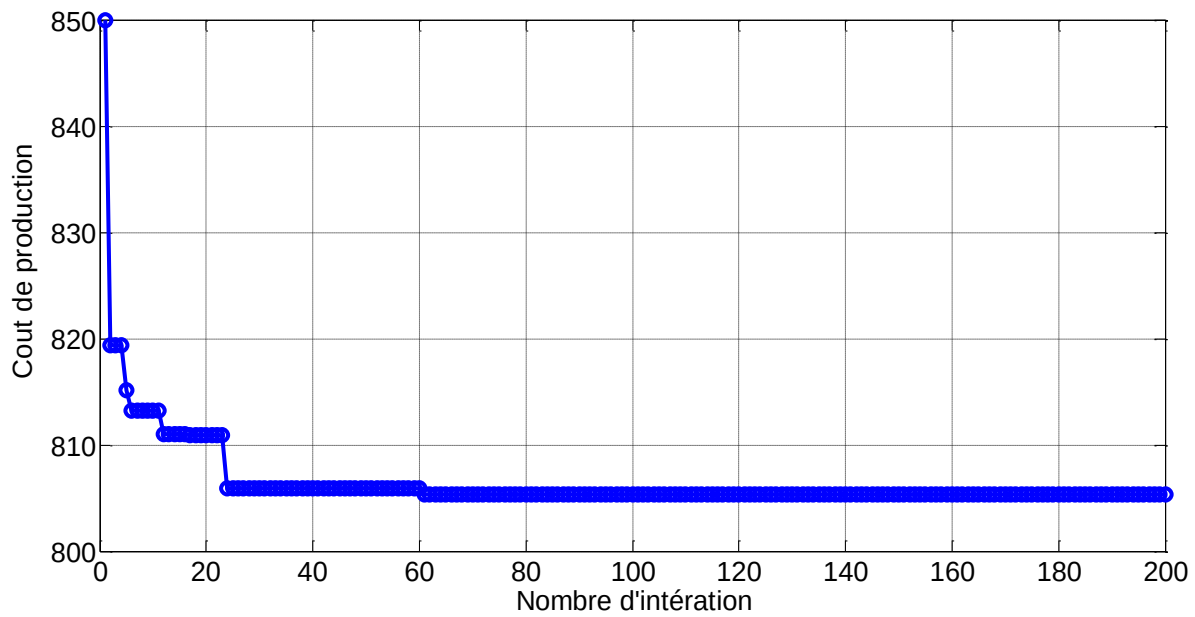
Convergence de l'Algorithme Génétique :

Figure (IV-12) : Evolution progressive de la fonction coût de l'AG - Binaire.

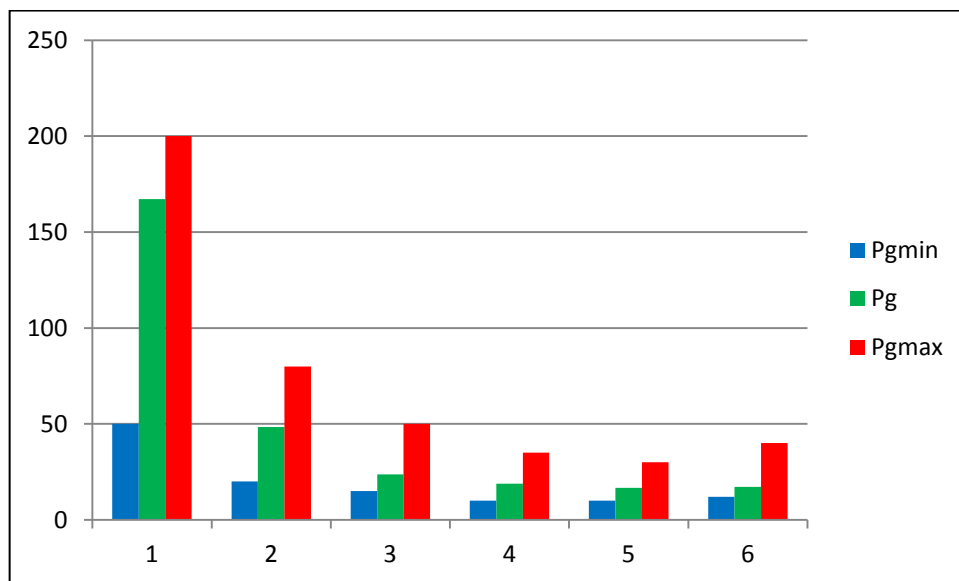


Figure (IV-13) : Puissances actives générées du réseau électrique à 30 J.D.B par A-G

N° J-B	Newton Raphson		lambda		A-G	
	Module	Angle	Module	Angle	Module	Angle
1	1.0600	0.0000	1.0600	0.0000	1.0600	0.0000
2	1.0470	-3.7704	1.0430	-4.0816	1.0430	-3.5114
3	1.0343	-5.6276	1.0389	-6.4411	1.0350	-5.4791
4	1.0281	-6.7930	1.0351	-7.7515	1.0299	-6.5902
5	1.0200	-10.5871	1.0100	-11.1214	1.0100	-9.9934
6	1.0248	-7.8418	1.0252	-8.8763	1.0224	-7.6200
7	1.0151	-9.4507	1.0123	-10.3125	1.0105	-9.1086
8	1.0290	-8.0629	1.0100	-9.1152	1.0100	-7.7529
9	1.0221	-9.8798	1.0586	-10.9927	1.0486	-9.3159
10	1.0019	-11.8180	1.0613	-12.6247	1.0425	-11.1513
11	1.0600	-8.352	1.0820	-9.9422	1.0820	-7.5424
12	1.0251	-11.3393	1.0990	-12.2776	1.0540	-10.3247
13	1.0600	-10.4535	1.1522	-11.5174	1.0710	-9.0957
14	1.0080	-12.2744	1.0904	-13.3206	1.0481	-11.4646
15	1.0019	-12.3021	1.0836	-13.3609	1.0444	-11.6085
16	1.0079	-11.8272	1.0809	-12.7769	1.0467	-11.0588
17	0.9983	-12.0315	1.0638	-12.8892	1.0404	-11.3590
18	0.9893	-12.8888	1.0738	-13.9867	1.0412	-12.3816
19	0.9850	-13.0299	1.0672	-14.0846	1.0387	-12.5453
20	0.9885	-12.7831	1.0665	-13.8089	1.0404	-12.2861
21	0.9893	-12.2754	1.0553	-13.1557	1.0356	-11.6963
22	0.9897	-12.2694	1.0566	-13.1677	1.0367	-11.7067
23	0.9875	-12.6302	1.0716	-13.7817	1.0389	-12.1576
24	0.9769	-12.7048	1.0552	-13.8219	1.0319	-12.3402
25	0.9809	-12.6339	1.0600	-13.8116	1.0433	-12.5073
26	0.9625	-13.0859	1.0549	-14.6119	1.0377	-13.3201
27	0.9924	-12.2989	1.0585	-13.1876	1.0463	-11.9781
28	1.0212	-8.3016	1.0254	-9.4844	1.0221	-8.1919
29	0.9718	-13.6194	1.0537	-14.7411	1.0411	-13.5587
30	0.9600	-14.5472	1.0445	-15.5802	1.0317	-14.4172

Tableau (IV-9) : Tensions du réseau électrique à 30 J.B.

Il est clair d'après le tableau (IV-9) que les contraintes de sécurité pour les modules et phases de tension, sont dans leurs limites admissibles. Aucune tension des jeux de barre de charge, n'a pris une valeur au dessous de la valeur minimum de 0.90 p.u. figure (VI-14) Les phases des tensions des jeux de barres sont comprises entre le minimum de -14.0° et le maximum de 0.0° figure (VI-15) [5].

Comme montré dans le tableau (IV-10), le coût de production de la puissance active a été réduit de **-10.8%** après optimisation par l'algorithme génétique, avec un gain financier de **95.3983 \$/h**. Malgré que les pertes de puissance active ont augmentées après l'optimisation, mais le gain financier reste le plus significatif [5].

	N-R	Lambda	A-G
Pg ₁ (MW)	98.7407	193.0588	167.2606
Pg ₂ (MW)	80.0000	48.4159	48.3360
Pg ₅ (MW)	50.0000	19.5564	23.7950
Pg ₈ (MW)	20.0000	11.7202	18.9631
g ₁₁ (MW)	20.0000	10.0000	16.7207
Pg ₁₃ (MW)	20.0000	12.0000	17.2941
Pertes de puissances actives (MW)	5.3407	11.3513	8.9695
Puissance active générée totale (MW)	288.7407	294.7513	292.3695
Coût de Génération (\$/hr)	900.6128	805.2812	805.2145

Tableau (VI-10) : Puissances et coûts de production du réseau électrique à 30 J.B.

D'après la convergence des algorithmes d'optimisation AG on remarque que les tensions avant et après optimisation n'ont pas beaucoup changé. Par ce que une petite variation dans la puissance active au J.d.B, le module de la tension au J.d.B ne varie pas d'une façon appréciable.

$$[\Delta Q] = [J_4][\Delta V] \quad (IV-01)$$

Ils sont dans leurs limites admissibles entre 0.90 p.u et 1.10 p.u. Sont d'un minimum de **0.9600 p.u.** et d'un maximum de **1.0600 p.u** figure (IV-14).

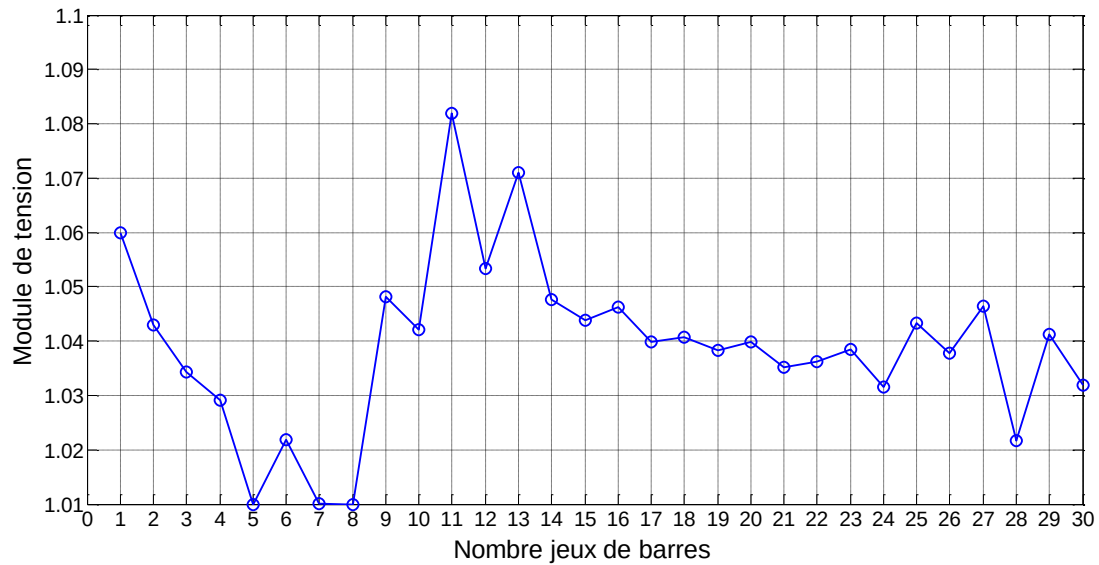


Figure (IV-14) Modules des tensions du réseau électrique à 30 25 J.D.B par A-G.

Par contre, les phases des tensions ont changé. Cela s'explique par le fort couplage qui existe entre les phases des tensions et les puissances actives du système électrique.

Les angles des tensions sont d'un minimum et d'un maximum de -14.5472° et de 0.0° respectivement figure (IV-15) [5].

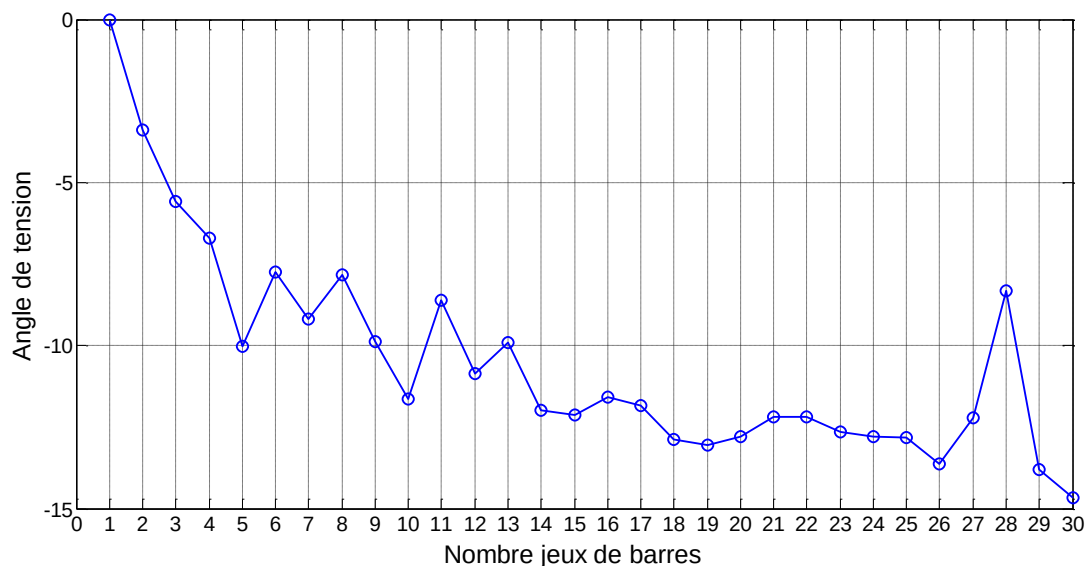


Figure (IV-15) : Angles des tensions du réseau électrique à 30 25 J.D.B par A-G.

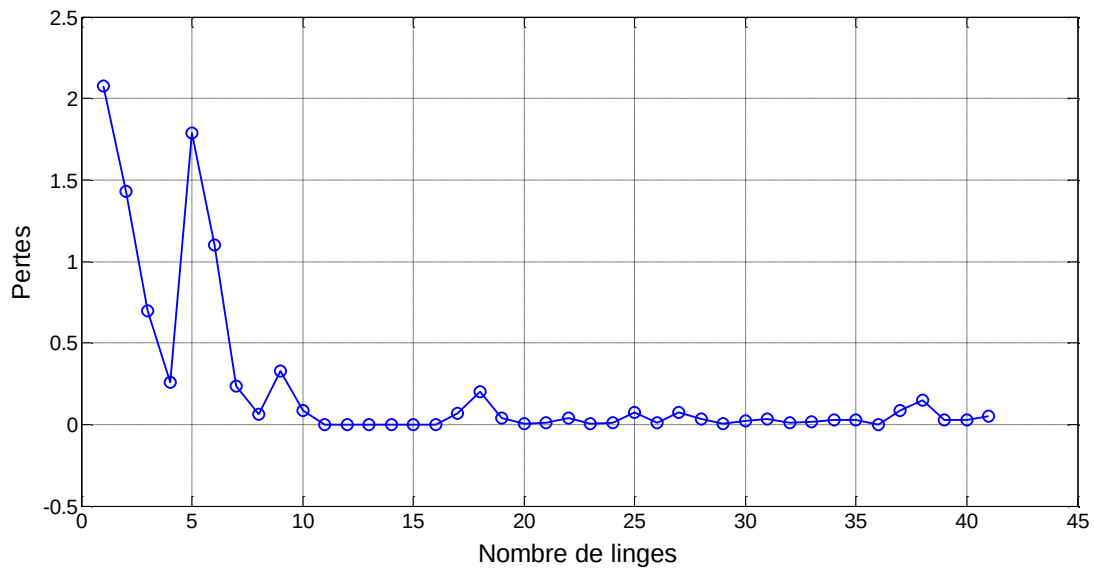


Figure (IV-16) : les pertes actives du réseau électrique à 30 25 J.D.B par A-G.

IV.4 Conclusion :

Les algorithmes génétiques(AG) présentent un fort potentiel d'application pratique. Le choix du type de codage des individus reste l'un des problèmes des algorithmes génétiques, c'est très difficile de trouver un bon codage adapté à la structure du problème.

Les résultats trouvés par un codage binaire sont acceptables mais le temps de calcul est assez important, par contre le codage réel a donné des résultats satisfaisants avec un temps de calcul raisonnable, pour cette raison on a intérêt à utiliser la représentation réelle de l'individu lorsque les paramètres du problème à résoudre ont de grandes valeurs et nécessitent une grande précision.

Conclusion générale

L'objectif de cette mémoire, on a présenté la formulation du problème de la répartition optimale de puissance dans les réseaux électriques. Les méthodes classiques proposées ont été testées sur des réseaux électriques à moyenne échelle, dont les résultats ont été validés. Les algorithmes génétiques constituent une famille d'algorithmes heuristiques permettant de rechercher l'optimum ou un quasi-optimum des fonctions objectives, sur les quelles il n'est besoin de faire aucune hypothèse particulière, notamment en ce qui concerne leur dérivabilité.

L'efficacité de la recherche d'optimum effectuée par les algorithmes génétiques permet d'envisager le traitement du problème de complexité non polynomiale de taille important en un temps raisonnable.

Enfin perspective, nous proposons d'optimiser d'autres fonctions objectives importantes, comme la puissance réactive et les émissions des gaz toxiques dans l'atmosphère.

Bibliographique

- [1] **HAIMOUR Rachida** « contrôle des puissances réactives et de tension par les dispositif FACTS dans un réseau électrique » mémoire magistère en électrotechnique, école national supérieur de l'enseignement technologique d'Oran
- [2] **AROUA Mohammed Hamza ,BOUGHAZALA Mohammed SALAH, TAMER Smail** mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en électrotechnique « Dispatching Economique Optimale par la methode swarm (psa) »centre universitaire d'el-oued promotion 2009.
- [3] **MANANE Hamida** Mémoire de fin d'étude Présenté pour l'obtention du diplôme de master académique « Analyse de la stabilité statique de tension des réseaux électriques » centre universitaire d'el-oued promotion 2011.
- [4]**MEGURHI Mohammed MEHDA Bilal** Mémoire de fin d'étude Présenté pour l'obtention du diplôme de licence académique « utilisation de la méthode GAUSS SEIDEL dans les Réseaux Electriques » centre universitaire d'el-oued promotion 2012.
- [5] **GACEM Abdelmalek** mémoire Présenté pour obtenir le diplôme de Magister en électrotechnique « Utilisation des Méthodes d'Optimisations Métaheuristiques Pour La Résolution Du Problème De Répartition Optimale De La Puissance Dans les Réseaux Electriques » Centre Universitaire d'El-oued promotion 2010.
- [6] **P. Jean-Louis LILJEN** Manuel de travaux pratiques destiné au cours « transport et Distribution de l'Energie Electrique » université de Liège 1999/2000.
- [7] **adama d. Diarra** Ingénieur génie électrique « la répartition optimale de la puissance réactive pour le contrôle des tensions de barre d'un réseau électrique par simplex lp » université du Québec septembre 1984
- [8] **LABBI Ezzidine, HADA Mohammed** Mémoire de fin d'Etude en vue de l'Obtention du Diplôme de licence académique « Optimisation de l'écoulement de puissance en utilisant MATPOWER » Centre Universitaire d'El-oued promotion 2010.
- [9] **LAICHE Youcef , FADHEL M^{ed}chaouki** Mémoire de fin d'Etude en vue de l'Obtention du Diplôme de Ingénieur d'Etat en Génie Électrique « Optimisation De La Répartition Des Puissances dans Les Réseaux Electriques Par L'utilisation Des Les ALGORITHMES GENETIQUES » Centre Universitaire d'El-oued promotion 2010
- [10] **SAYAh Samir** Mémoire d'ingénieur: Etude Et Analyse Le Problème du Dispatching Economique Par Les Algorithmes Génétiques, juin 2006.
-

- [11] **S. Sayah**, "Application des ensembles flous a la repartition optimale de la puissance dans les réseaux électriques " Mémoire de Magister, Université de Sétif, 2005
- [12]: **ABOUB HANIA, MAAMIR MADIHA**, "étude de la répartition économique des puissance dans les réseaux électriques par les algorithmes génétiques", mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en électrotechnique, 2009-2010.
- [13] **M FATAH Amir** Présentée à la Faculté des Sciences de l'Ingénieur Pour L'Obtention du Diplôme de Magistère en électrotechnique « Etude du fonctionnement des centres de production dans un système de marché libre de l'énergie électrique » Université De Batna promotion 2011/2012.
-

A. Réseaux électrique à 6 jeux de barres:

Tableau A.1 Données des lignes et transformateurs du réseau électrique à 6 JDB

<i>Du</i> <i>J.B</i>	<i>Au</i> <i>J.B</i>	<i>R</i> <i>(p.u)</i>	<i>x</i> <i>(p.u)</i>	<i>b/2</i> <i>(p.u)</i>
1	2	0.10	0.20	0.020
1	4	0.05	0.20	0.020
1	5	0.08	0.30	0.030
2	3	0.05	0.25	0.030
2	4	0.05	0.10	0.010
2	5	0.10	0.30	0.020
2	6	0.07	0.20	0.025
3	5	0.12	0.26	0.025
3	6	0.02	0.10	0.010
4	5	0.20	0.40	0.040
5	6	0.10	0.30	0.030

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

<i>Numéro</i> <i>J.B</i>	<i>Pg</i> _{<i>d</i>} <i>(MW)</i>	<i>V</i> <i>(p.u)</i>	<i>θ</i> <i>(degré)</i>
1	0.0	1.05	0.00
2	0.0	1.05	0.00
3	0.0	1.07	0.00
4	70.0	1.00	0.00
5	70.0	1.00	0.00
6	70.0	1.00	0.00

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

<i>N.J</i>	<i>Pg</i>	<i>Pg</i> <i>max</i>	<i>Pg</i> <i>min</i>	<i>γ</i> \$/MW ² h	<i>β</i> \$/MW ² h	<i>α</i> \$/hr
1	0.0	200.0	50.0	0.00533	11.669	213.1
2	50.0	150.0	37.5	0.00889	10.333	200.0
3	60.0	180.0	45.0	0.00741	10.833	240.0

B. Réseaux électrique à 25 jeux de barres:*Tableau B.1 Données des lignes et transformateurs du réseau électrique à 25 J.B.*

<i>Du</i>	<i>Au</i>	<i>r</i>	<i>x</i>	<i>b/2</i>
<i>J.B</i>	<i>J.B</i>	<i>(p.u)</i>	<i>(p.u)</i>	<i>(p.u)</i>
1	3	0.0720	0.2876	0.0179
1	16	0.0290	0.1379	0.0337
1	17	0.1012	0.2799	0.0144
1	19	0.1407	0.0097	0.0379
1	23	0.1015	0.2245	0.0873
1	25	0.0759	0.3593	0.0186
2	6	0.0617	0.2935	0.0155
2	7	0.0511	0.2442	0.0175
3	8	0.0579	0.2763	0.0185
3	13	0.0564	0.1478	0.0185
3	14	0.1183	0.3573	0.0113
4	19	0.0196	0.0514	0.0220
4	20	0.0382	0.1007	0.0558
5	21	0.0970	0.2547	0.0057
5	10	0.0497	0.2372	0.1335
5	17	0.0144	0.1269	0.0140
5	19	0.0929	0.2442	0.0140
6	13	0.0263	0.0691	0.0040
7	8	0.0529	0.1465	0.0078
7	12	0.0364	0.1736	0.0110
8	9	0.0387	0.1847	0.0118
9	17	0.0407	0.2075	0.0118
9	10	0.0970	0.2091	0.0900
10	11	0.0890	0.2859	0.0137
11	17	0.1068	0.2807	0.0161
12	17	0.0460	0.2196	0.0139
14	15	0.0281	0.0764	0.0044
15	16	0.0256	0.0673	0.0148
17	18	0.0806	0.2119	0.0122
18	19	0.0872	0.2294	0.0132
20	21	0.0615	0.1613	0.0354
21	22	0.0414	0.1087	0.0238
22	23	0.2250	0.3559	0.0169
22	24	0.0970	0.2595	0.0567
24	25	0.0472	0.1458	0.0317

Tableau B.2 Données des jeux de barres du réseau électrique à 25 J.B

Numéro J.B	P _q (MW)	V (p.u)	θ (degré)
1	00	1.02	0.0
2	10	1.00	0.0
3	50	1.00	0.0
4	30	1.00	0.0
5	25	1.00	0.0
6	15	1.00	0.0
7	15	1.00	0.0
8	25	1.00	0.0
9	15	1.00	0.0
10	15	1.00	0.0
11	05	1.00	0.0
12	10	1.00	0.0
13	25	1.00	0.0
14	20	1.00	0.0
15	30	1.00	0.0
16	30	1.00	0.0
17	60	1.00	0.0
18	15	1.00	0.0
19	15	1.00	0.0
20	25	1.00	0.0
21	20	1.00	0.0
22	20	1.00	0.0
23	15	1.00	0.0
24	15	1.00	0.0
25	25	1.00	0.0

Tableau B.3 Données des générateurs du réseau électrique à 25 J.B.

N.J	P _g	P _g max	P _g min	γ \$/MW ² h	β \$/MW ² h	α \$/hr
1	0	300	100	0.0015	1.80	40
2	100	150	80	0.0030	1.70	60
3	150	200	80	0.0012	2.10	100
4	50	100	20	0.0080	2.00	25
5	200	300	100	0.0010	1.90	120

C. Réseaux électrique à 30 jeux de barres:

Tableau C.1 Données des lignes et transformateurs du réseau électrique à 30 J.B

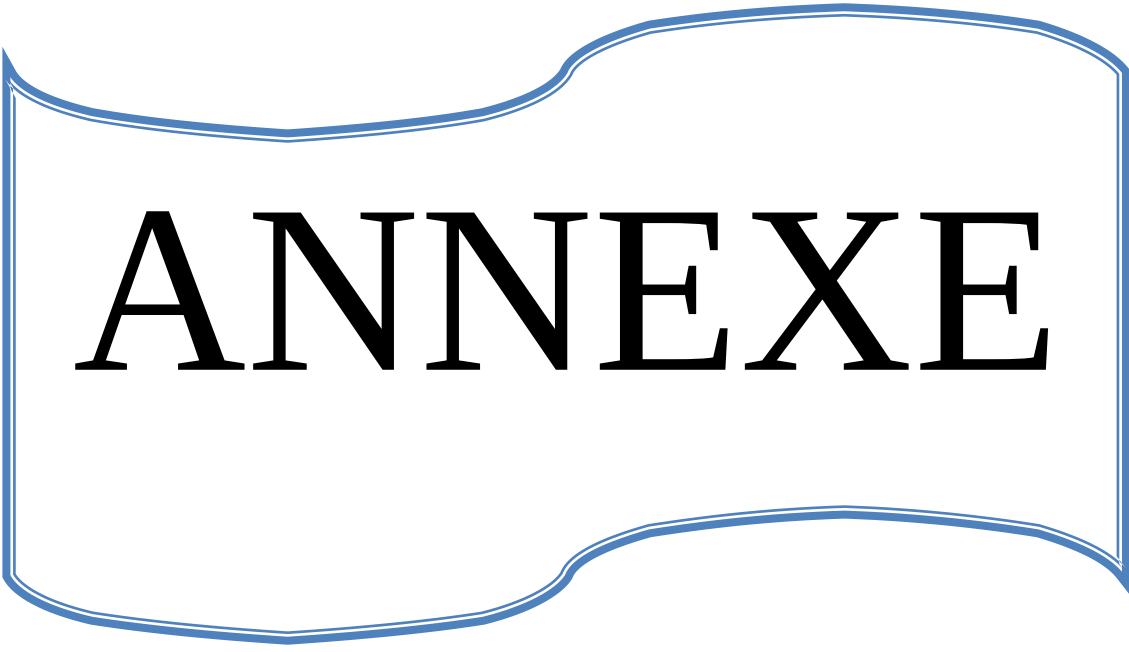
<i>Du</i> <i>J.B</i>	<i>Au</i> <i>J.B</i>	<i>R</i> <i>(p.u)</i>	<i>x</i> <i>(p.u)</i>	<i>b/2</i> <i>(p.u)</i>
1	2	0.02	0.06	0.03
1	3	0.05	0.19	0.02
2	4	0.06	0.17	0.02
3	4	0.01	0.04	0.00
2	5	0.05	0.20	0.02
2	6	0.06	0.18	0.02
4	6	0.01	0.04	0.00
5	7	0.05	0.12	0.01
6	7	0.03	0.08	0.01
6	8	0.01	0.04	0.00
6	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 C.2 Données des jeux de barres du réseau électrique à 30 J.B

Numéro J.B	P d (MW)	V (p.u)	θ (degré)
1	0.0	1.060	0.0
2	21.70	1.043	0.0
3	2.4	1.000	0.0
4	7.6	1.000	0.0
5	94.2	1.010	0.0
6	0.0	1.000	0.0
7	22.8	1.000	0.0
8	30.0	1.010	0.0
9	0.0	1.000	0.0
10	5.8	1.000	0.0
11	0.0	1.082	0.0
12	11.2	1.000	0.0
13	0	1.071	0.0
14	6.2	1.000	0.0
15	8.2	1.000	0.0
16	3.5	1.000	0.0
17	9.0	1.000	0.0
18	3.2	1.000	0.0
19	9.5	1.000	0.0
20	2.2	1.000	0.0
21	17.5	1.000	0.0
22	0	1.000	0.0
23	3.2	1.000	0.0
24	8.7	1.000	0.0
25	0	1.000	0.0
26	3.5	1.000	0.0
27	0	1.000	0.0
28	0	1.000	0.0
29	2.4	1.000	0.0
30	10.6	1.000	0.0

Tableau C.3 Données des générateurs du réseau électrique à 30 J.B

N.J	Pg	Pg max	Pg min	γ \$/MW²h	β \$/MW²h	α \$/hr
1	0	200	50	0.00375	2.00	0
2	80	80	20	0.01750	1.75	0
5	50	50	15	0.06250	1.00	0
8	20	35	10	0.00830	3.25	0
11	20	30	10	0.02500	3.00	0
13	20	40	12	0.02500	3.00	0



ANNEXE