

**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**

**LICENCE ACADEMIQUE**

**Domaine : Sciences et de Technologies**

**Filière: Génie Électrique**

**Spécialité: Réseaux Électriques**

## **Thème**

***Application d'une méthode métaheuristique  
à la répartition optimale des puissances dans  
les réseaux électriques***

**Diriger par :**

<sup>er</sup>  
**M .MIDA DRIS**

**Réaliser par :**

**HOUAMED A/ELKAMEL  
HADJ AMMAR AMER**

**Année universitaire : 2012/2013**

# *Dédicace*

Nous consacrons ce modeste travail à:

Nos chers parents

Nos sœurs et nos frères

Toutes nos familles

Tous nos amis

Tous les enseignants qui nous avons aidé de proche ou de loin pour  
être un jour licenciés d'électrotechnique.

# *Remerciements*

Nous tenons à remercier très sincèrement notre encadreur, Mida Dris , pour ses conseils précieux, ses orientations judicieuses, sa patience, sa diligence, ainsi que ses suggestions et critiques qui ont facilités l'achèvement de ce présent travail.

Nous tenons également à remercier Mr le président de jury, pour l'honneur qu'il nous a fait de présider le jury. Nous remercions aussi tous les membres de jury, qui ont bien voulu examiner ce travail .

Enfin, nous remercions toutes les personnes qui m'ont soutenu de près ou de loin, à l'élaboration de ce travail.

|                                                                                                              |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>                                                                           | <b>01</b> |
| <b>CHAPITRE 01 .....</b>                                                                                     | <b>03</b> |
| <i>Ecoulement de Puissance et Ecoulement optimal de Puissance</i>                                            |           |
| <b>1.1 Introduction.....</b>                                                                                 | <b>03</b> |
| <b>1.2 Ecoulement de Puissance.....</b>                                                                      | <b>03</b> |
| <b>1.2.1 Modélisation des éléments du réseau électrique .....</b>                                            | <b>03</b> |
| 1.2.1.1 Générateur de puissance (Machine synchrone) .....                                                    | 03        |
| 1.2.1.2 Ligne de transport .....                                                                             | 04        |
| 1.2.1.3 Transformateur de puissance .....                                                                    | 04        |
| 1.2.1.4 Charge électrique.....                                                                               | 05        |
| 1.2.1.5 Elément shunt.....                                                                                   | 05        |
| <b>1.2.2 Classification des jeux de barres dans un réseau électrique.....</b>                                | <b>05</b> |
| 1.2.2.1 Jeu de barre de référence.....                                                                       | 06        |
| 1.2.2.2 Jeu de barre générateur.....                                                                         | 06        |
| 1.2.2.3 Jeu de barre de charge .....                                                                         | 06        |
| <b>1.2.3 Formulation des équations de l'écoulement de puissance en utilisant la matrice admittance .....</b> | <b>06</b> |
| <b>1.2.4 Transits et pertes de puissance dans les lignes de transport.....</b>                               | <b>08</b> |
| <b>1.2.5 Résolution des équations de l'écoulement de puissance .....</b>                                     | <b>09</b> |
| 1.2.5.1 Méthode de Newton-Raphson.....                                                                       | 09        |
| 1.2.5.2 Application de la méthode de Newton-Raphson, au problème de l'écoulement de puissance.....           | 10        |
| <b>1.3 Ecoulement Optimal de Puissance .....</b>                                                             | <b>13</b> |
| <b>1.3.1 Résumé de la littérature de l'OPF.....</b>                                                          | <b>13</b> |
| <b>1.3.2 But de l'OPF.....</b>                                                                               | <b>13</b> |
| <b>1.3.3 Dispatching Economique.....</b>                                                                     | <b>13</b> |
| 1.3.3.1 Formulation mathématique du problème du Dispatching Economique .....                                 | 15        |
| 1.3.3.2 Solution analytique du problème du Dispatching Economique .....                                      | 16        |
| 1.3.3.3 Dispatching Economique avec considération des pertes de puissance actives .....                      | 17        |
| <b>1.3.4 Formulation mathématique du problème de l'OPF .....</b>                                             | <b>19</b> |
| <b>1.3.5 Solution du problème de l'OPF par la méthode de Newton .....</b>                                    | <b>19</b> |
| 1.3.5.1 Développement du Lagrangien, du Gradient et du Hessien .....                                         | 19        |
| 1.3.5.2 Application de la méthode de Newton au problème de l'OPF.....                                        | 20        |
| 1.3.5.3 Algorithme de Newton.....                                                                            | 23        |

|                                                                                       |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1.4 Conclusion .....</b>                                                           | <b>23</b> |
| <b>CHAPITRE 02.....</b>                                                               | <b>24</b> |
| <i>Optimisation par essaim de particules (OEP)</i>                                    |           |
| <b>2.1 Introduction.....</b>                                                          | <b>24</b> |
| <b>2.2 Voisinage.....</b>                                                             | <b>24</b> |
| <b>3.3 Cadre des métaheuristiques.....</b>                                            | <b>25</b> |
| <b>2.4 Description de la méthode Optimisation par essaim de particules (OEP).....</b> | <b>25</b> |
| <b>2.4.1 L'algorithme OEP.....</b>                                                    | <b>26</b> |
| <b>2.4.2 Description informelle.....</b>                                              | <b>28</b> |
| <b>2.4.3 Principales caractéristiques.....</b>                                        | <b>29</b> |
| <b>2.4.4 Le voisinage.....</b>                                                        | <b>30</b> |
| <b>2.4.5 Les étapes de la méthode d'OEP.....</b>                                      | <b>30</b> |
| <b>2.5 Expériences d'optimisation .....</b>                                           | <b>31</b> |
| <b>2.6 Conclusion.....</b>                                                            | <b>32</b> |
| <b>CHAPITRE 03 .....</b>                                                              | <b>33</b> |
| <i>Tests et Résultats Numériques</i>                                                  |           |
| <b>3.1 Introduction.....</b>                                                          | <b>33</b> |
| <b>3.2 Résultats de simulation.....</b>                                               | <b>35</b> |
| <b>3.3 Conclusion.....</b>                                                            | <b>36</b> |
| <b>CONCLUSION GENERALE.....</b>                                                       | <b>37</b> |
| <b>ANNEXES.....</b>                                                                   | <b>38</b> |
| <b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>                                                             | <b>42</b> |

## Introduction Générale [1]

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 (OPF), et parfois, il est connu comme le problème du dispatching économique.

Dans la littérature, plusieurs techniques ont été proposées pour résoudre le problème de l'OPF. L'inconvénient de ces techniques, est le traitement rigide des contraintes qui doivent être satisfaites tout le temps.

Dans la pratique, dans les systèmes de puissance réels, il existe deux types de contraintes : les contraintes rigides, et les contraintes souples. Les contraintes rigides, imposées par la nature du système, ne doivent pas être violées. Quant aux contraintes souples, elles peuvent être dépassées avec un certain degré de tolérance.

Le problème de l'OPF peut être résolu avec plusieurs méthodes classiques ou métaheuristiques, dans notre travail la méthode utilisée pour résoudre ce problème est la méthode des essaims de particules appelées (swarm).

Le présent travail est décomposé en trois chapitres le premier chapitre traite l'écoulement de puissance et l'écoulement optimal de puissance.

Le deuxième chapitre est consacré l'application de la méthode d'Optimisation par Essaim de particules (OEP) au problème d'écoulement optimal de puissance.

Le troisième chapitre ulistre le Tests et Résultats Numériques et en termine ce travail par une conclusion générale.

## **1.1 Introduction [1]**

L'objectif principal de l'étude de l'écoulement de puissance et l'écoulement optimal de puissance est de déterminer les conditions de fonctionnement d'un réseau électrique, avec des paramètres donnés pour ce réseau (paramètres des lignes, puissance actives et réactives, ...etc). Le but est de déterminer les tensions complexes des jeux de barres, à partir desquelles toutes les autres grandeurs telles que les puissances transitant à travers les lignes de transport, les puissances, et les pertes de puissance peuvent être obtenues.

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

Afin de déterminer la répartition économique de la charge entre les générateurs interconnectés, le coût de fonctionnement de ces centrales doit être exprimé en fonction de la puissance à la sortie (débit). La fonction du coût à une forme non linéaire qui peut approximer une courbe quadratique. A chaque étape, la condition de fonctionnement de chaque générateur est vérifiée pour l'assurer dans sa plage de fonctionnement. En particulier il faut vérifier les angles de phase et les tensions au niveau des jeux de barres aussi bien que les limites de charge de la ligne.

Le but de ce chapitre est de montrer comment on peut résoudre le problème de la répartition des puissances sur les centrales électriques avec un coût de production minimal en utilisant la méthode classique.

## **1.2 Écoulement de Puissance**

### **1.2.1 Modélisation des éléments du réseau électrique**

Un réseau de distribution électrique contient un ensemble de composants qu'il faut modéliser pour pouvoir établir les équations qui régissent le comportement du système.

Les éléments qui interviennent dans le problème de l'OPF sont ceux qui sont exposés à des hautes tensions et à des forts courants, à savoir : générateurs de puissance (machine synchrone), charges électriques, lignes de transports, transformateurs de puissances et compensateurs statiques.

#### **1.2.1.1 Générateur de puissance (Machine synchrone)**

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

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

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

### 1.2.1.2 Ligne de transport

La ligne de transport est modélisée par le schéma unifilaire en  $\pi$  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 ( $\Omega/km$ ).

$x$  : réactance linéique ou série ( $\Omega/km$ ).

- 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 ( $g \approx 0$ ).

### 1.2.1.3 Transformateur de puissance

Les transformateurs à modéliser sont de deux types :

- Transformateurs à prise de charge variable, qui ont un rapport de transformation ( $t_{ij}$ ) variable et sont utilisés pour le réglage de la tension (Fig. 1.1).
- Transformateurs déphaseurs, qui ont un angle de déphasage ( $\alpha_{ij}$ ) variable et sont utilisés pour le contrôle de l'écoulement de puissance active.

Le modèle équivalent en  $\pi$  d'un transformateur à prise de charge variable est identique à celui de la ligne de transport [1] (Fig. 1.1).

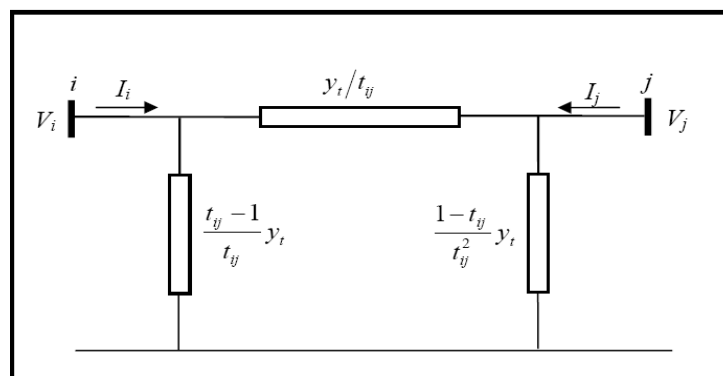


Figure 1.1. Modèle équivalent en  $\pi$  d'un transformateur à prise de charge variable

Dans le cas général, pour un transformateur à prises de charges variables et/ou déphaseur, le rapport de transformation est un nombre complexe ( $\bar{t}_{ij} = t_{ij} \cdot e^{j\alpha_{ij}}$ ), et le modèle équivalent en  $\pi$  ne peut pas être réalisé. Dans ce cas la matrice admittance nodale du transformateur est donnée par [1]

$$Y_t = \begin{pmatrix} y_t & \frac{-e^{-j\alpha_{ij}}}{t_{ij}} y_t \\ \frac{-e^{j\alpha_{ij}}}{t_{ij}} y_t & \frac{1}{t_{ij}^2} y_t \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

où,  $Y_t$  : matrice admittance nodale du transformateur.

$y_t$  : admittance du transformateur.

$t_{ij}$  : rapport de transformation du transformateur.

$\alpha_{ij}$  : angle de déphasage du transformateur.

Donc, les rapports de transformation et les angles de déphasages sont représentés par une modification directe de la matrice admittance du système.

#### 1.2.1.4 Charge électrique

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

#### 1.2.1.5 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.

### 1.2.2 Classification des jeux de barres dans un réseau électrique

Chaque jeu de barre ( $i$ ) est caractérisé par quatre variables qui sont

- $|V_i|$  : Module de la tension du jeu de barre  $i$  ;
- $\theta_i$  : Phase de la tension du jeu de barre  $i$  ;
- $P_i$  : Puissance Active nette injectée au jeu de barre  $i$  ;
- $Q_i$  : Puissance Réactive nette injectée au jeu de barre  $i$ .

La puissance nette injectée à un jeu de barre, est égale à la différence entre la puissance générée ( $S_{gi}$ ) et la puissance demandée ( $S_{di}$ ) au niveau de ce jeu de barre

$$S_i = S_{gi} - S_{di}$$

$$P_i = P_{gi} - P_{di} \quad (1.2)$$

$$Q_i = Q_{gi} - Q_{di}$$

Pour chaque jeu de barre, deux variables doivent être spécifiées au préalable et les deux autres sont à calculer. Donc, on peut classer les jeux de barres comme suit

### 1.2.2.1 Jeu de barre de référence

C'est un jeu de barre générateur où le module et la phase de tension ( $V, \theta$ ) sont tout deux spécifiés. Les puissances ( $P, Q$ ) sont inconnues et doivent être calculées en dernier.

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

### 1.2.2.2 Jeu de barre générateur

Ce jeu de barre est connecté à un générateur délivrant une puissance active  $P$  sous une tension constante  $V$  contrôlée par un régulateur automatique de tension (AVR).

Donc ( $P, V$ ) sont spécifiés alors que ( $Q, \theta$ ) sont à calculer.

### 1.2.2.3 Jeu de barre de charge

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

## 1.2.3 Formulation des équations de l'écoulement de puissance en utilisant la matrice admittance

Considérons un jeu de barre typique ( $i$ ), (Fig. 1.2), faisant partie d'un réseau à ( $n$ ) jeux de barres

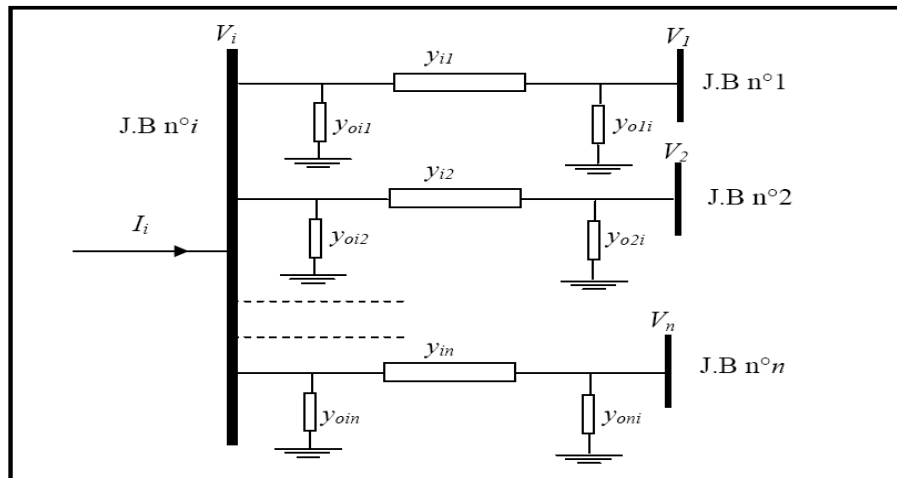


Figure 1.2. Jeu de barre typique ( $i$ ) dans un réseau électrique à ( $n$ ) jeux de barres

Les lignes étant modélisées par des modèles équivalents en  $\pi$ . La puissance apparente ( $S_i$ ), injectée au jeu de barre ( $i$ ), peut être écrite sous forme rectangulaire ou polaire comme suit

• Sous la forme rectangulaire

$$S_i^* = P_i - jQ_i = E_i^* I_i = E_i^* \sum_{j=1}^n Y_{ij} E_j \quad (1.3)$$

$E_i$ : Tension complexe du jeu de barre ( $i$ ), donnée par

$$E_i = V_i (\cos \theta_i + j \sin \theta_i) \quad (1.4)$$

$I_i$  : Courant complexe injecté au jeu de barre ( $i$ ).

$\theta_i$ : Phase de la tension au niveau du jeu de barre ( $i$ ).

$Y_{ij}$ : Eléments complexes de la matrice admittance, donnés par

$$Y_{ij} = |Y_{ij}| \cdot e^{j\delta_{ij}} = G_{ij} + jB_{ij} \quad (1.5)$$

$G_{ij}$  et  $B_{ij}$  sont respectivement la partie réelle (conductance) et la partie imaginaire (susceptance) des éléments de la matrice admittance  $Y$ .

$\delta_{ij}$  est l'argument de l'élément ( $i, j$ ) de la matrice admittance.

Les éléments de la matrice admittance nodale  $Y$ , sont donnés par les expressions

$$Y_{ij} = -y_{ij} \text{ et } Y_{ij} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n (y_{oij} + y_{ij}) \quad (1.6)$$

avec,  $y_{ij}$  : Admittance série de la branche  $i$ - $j$ .

$y_{oij}$  : Admittance shunt de la branche  $i$ - $j$ .

L'expression de la tension au niveau du jeu barre  $i$ , est donnée par

$$E_i = \frac{1}{y_{ii}} \left( \frac{P_i - jQ_i}{E_i^*} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n Y_{ij} E_j \right) \quad (1.7)$$

• Sous la forme polaire

$$S_i = E_i \cdot I_i^* = \sum_{j=1}^n V_i |Y_{ij}| V_j \cdot e^{j(\theta_i - \theta_j - \delta_{ij})} \quad (1.8)$$

$$S_i = \sum_{j=1}^n V_i |Y_{ij}| V_j \cdot \cos(\theta_i - \theta_j - \delta_{ij}) + j \sum_{j=1}^n V_i |Y_{ij}| V_j \cdot \sin(\theta_i - \theta_j - \delta_{ij}) \quad (1.9)$$

Les puissances actives et réactives injectées au jeu de barre ( $i$ ), sont alors données par :

$$P_i = P_{gi} - P_{di} = \sum_{j=1}^n V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (1.10)$$

$$Q_i = Q_{gi} - Q_{di} = \sum_{j=1}^n V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (1.11)$$

Avec  $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$

$\theta_{ij}$  est la différence entre les phases des tensions des jeux de barre  $i$  et  $j$ .

L'expression (1.7) représente l'ensemble des équations non linéaires de l'écoulement de puissance, sous la forme rectangulaire (complexe), à résoudre par rapport à  $E_i$ , alors que les expressions (1.10) et (1.11) représentent la forme polaire de ces mêmes équations à résoudre par rapport à  $V_i$  et  $\theta_i$ .

#### 1.2.4 Transits et pertes de puissance dans les lignes de transport

Le calcul des puissances qui transitent à travers les lignes du réseau, représente la dernière étape dans l'analyse de l'écoulement de puissance.

Pour cela on considère le modèle en  $\pi$  d'une ligne de transport, (Fig.1.3)

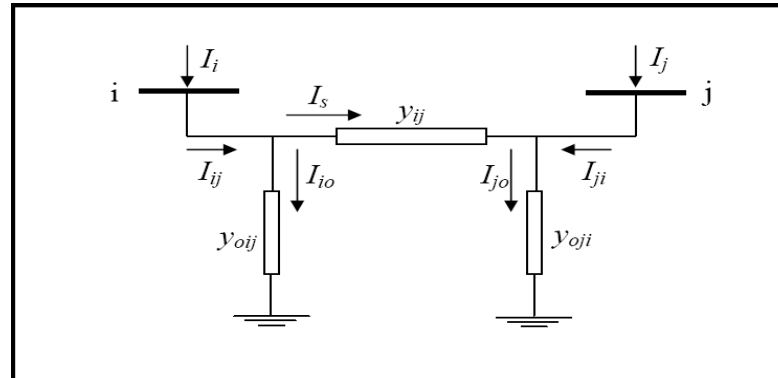


Figure 1.3. Transits de puissances au niveau d'une ligne de transport.

La direction du sens positif du courant de ligne  $I_{ij}$  est définit de  $i$  vers  $j$ .

D'après la figure 1.3., On peut écrire

$$I_{ij} = I_s + I_{io} = (E_i - E_j)y_{ij} + E_i \cdot y_{oij}$$

Soient  $S_{ij}$  et  $S_{ji}$  les puissances apparentes qui transitent par la ligne ( $i,j$ ). On défini la direction du sens positif des puissances de  $i$  vers  $j$

$$S_{ij} = P_{ij} + Q_{ij} = E_i \cdot I_{ij}^* = E_i (E_i^* - E_j^*) \cdot y_{ij}^* + |E_i|^2 y_{oij}^* \quad (1.12)$$

$$S_{ji} = P_{ji} + Q_{ji} = E_j \cdot I_{ji}^* = E_j (E_j^* - E_i^*) \cdot y_{ji}^* + |E_j|^2 y_{oji}^* \quad (1.13)$$

Les puissances actives et réactives qui transitent par la ligne  $(i,j)$  sont données par les expressions :

$$P_{ij} = -G_{ij}V_i^2 + G_{ij}V_iV_j \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij}V_iV_j \sin(\theta_i - \theta_j) \quad (1.14)$$

$$Q_{ij} = B_{ij}V_i^2 + G_{ij}V_iV_j \sin(\theta_i - \theta_j) - B_{ij}V_iV_j \cos(\theta_i - \theta_j) - y_{oij} \cdot V_i^2 \quad (1.15)$$

Les pertes de puissance, au niveau de la ligne  $i-j$ , sont égales à la somme algébrique de  $S_{ij}$  et  $S_{ji}$

$$\Delta S_{ij} = S_{ij} + S_{ji} \quad (1.16)$$

### 1.2.5 Résolution des équations de l'écoulement de puissance

Il existe deux méthodes de base pour la résolution des équations non linéaires de l'écoulement de puissance : Gauss-Seidel (GS) et Newton-Raphson (NR). La méthode la plus utilisée est celle de NR à cause de sa convergence quadratique.

#### 1.2.5.1 Méthode de Newton-Raphson

La méthode de NR, nous permet de remplacer le système d'équations non - linéaires, donné par (1.10) et (1.11) par un système linéaire.

Soit  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  une fonction à  $(n)$  variables. Le développement de cette fonction en série de Taylor, au voisinage d'un point  $(a_1, a_2, \dots, a_n)$ , nous donne

$$\begin{aligned} f(x_1, x_2, \dots, x_n) &\approx f(a_1, a_2, \dots, a_n) + (x_1 - a_1) \left( \frac{\partial f}{\partial x_1} \right)_{a_1} \\ &+ (x_2 - a_2) \left( \frac{\partial f}{\partial x_2} \right)_{a_2} + \dots + (x_n - a_n) \left( \frac{\partial f}{\partial x_n} \right)_{a_n} \end{aligned} \quad (1.17)$$

Si on pose,  $\Delta x_i = x_i - a_i$ ,  $(i = 1, n)$ , on aura

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) - f(a_1, a_2, \dots, a_n) = (\Delta x_1) \left( \frac{\partial f}{\partial x_1} \right)_{a_1} + (\Delta x_2) \left( \frac{\partial f}{\partial x_2} \right)_{a_2} + \dots + (\Delta x_n) \left( \frac{\partial f}{\partial x_n} \right)_{a_n} \quad (1.18)$$

Considérons maintenant un système d'équations non - linéaires, à  $n$  variables

$$f_1(x_1, \dots, x_n) = y_1$$

$$f_2(x_1, \dots, x_n) = y_2 \quad (1.19)$$

$$f_n(x_1, \dots, x_n) = y_n$$

Ou,  $f_k(x_1, \dots, x_n) = y_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, n$

Le développement en série de Taylor, du système d'équations (1.19), au voisinage d'une estimation initiale  $\left(X_k^{(0)}\right)$ , donne

$$f_k(x_1, \dots, x_n) = y_k = f_k(X_1^{(0)}, \dots, X_n^{(0)}) + (\Delta X_1^{(0)}) \left( \frac{\partial f_k}{\partial x} \right)_{X_1^{(0)}} + \dots + (\Delta X_n^{(0)}) \left( \frac{\partial f_k}{\partial x} \right)_{X_n^{(0)}} \quad (1.20)$$

$$k = 1, 2, \dots, n$$

$\Delta x_k$ , représente la correction à ajouter à  $X_k^{(0)}$ , pour se rapprocher de la solution correcte.

Le système (1.20), peut être écrit sous la forme matricielle suivante

$$\begin{bmatrix} y_1 - f_1(X_1^{(0)}, \dots, X_n^{(0)}) \\ \dots \dots \dots \\ y_n - f_n(X_1^{(0)}, \dots, X_n^{(0)}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \big|_{x_1^{(0)}} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \big|_{x_2^{(0)}} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \big|_{x_n^{(0)}} \\ \dots & \dots & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \big|_{x_n^{(0)}} \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \big|_{x_1^{(0)}} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} \big|_{x_2^{(0)}} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \big|_{x_n^{(0)}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(0)} \\ \dots \\ \Delta x_n^{(0)} \end{bmatrix} \quad (1.21)$$

ou encore

$$[\Delta U]^{(0)} = [J]^{(0)} \cdot [\Delta X]^{(0)} \quad (1.22)$$

$[J]$  est la matrice jacobéenne du système (1.19).

d'où l'on tire

$$[\Delta X]^{(0)} = ([J]^{(0)})^{-1} \cdot [\Delta U]^{(0)} \quad (1.23)$$

La première solution approchée du processus itératif est calculée par

$$[\mathbf{X}]^{(1)} = [\mathbf{X}]^{(0)} + [\Delta\mathbf{X}]^{(0)} \quad (1.24)$$

$$[\mathbf{X}]^{(1+1)} = [\mathbf{X}]^{(\mathbf{K})} + [\Delta\mathbf{X}]^{(\mathbf{K})} \quad (1.25)$$

### 1.2.5.2 Application de la méthode de Newton-Raphson, au problème de l'écoulement de puissance

La méthode de NR sera appliquée directement au système d'équation non – linéaire, donné par (1.10) et (1.11).

Le nombre de variables inconnues dépend de la nature des jeux de barre:

- Pour les jeux de barres de charges, les inconnues sont le module et l'angle de tension.
- Pour les jeux de barres de génération, les inconnues sont l'angle de la tension et l'énergie réactive.

Donc pour un réseau à  $(n)$  jeux de barres, on a  $(2n-2)$  inconnues (la tension et l'angle de la tension du jeu de barre de référence étant connus). Il nous faut donc,  $(2n-2)$  équations.

En appliquant la forme (1.21) aux équations de l'écoulement de puissance (1.10) et (1.11), on aura le système suivant

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(0)} \\ \dots \\ \Delta P_n^{(0)} \\ \dots \\ \Delta Q_2^{(0)} \\ \dots \\ \Delta Q_n^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial P_2}{\partial \theta_2} \right|^{(0)} & \dots & \left. \frac{\partial P_2}{\partial \theta_n} \right|^{(0)} & \left. \frac{\partial P_2}{\partial V_2} \right|^{(0)} & \dots & \left. \frac{\partial P_2}{\partial V_n} \right|^{(0)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \left. \frac{\partial P_n}{\partial \theta_2} \right|^{(0)} & \dots & \left. \frac{\partial P_n}{\partial \theta_n} \right|^{(0)} & \left. \frac{\partial P_n}{\partial V_2} \right|^{(0)} & \dots & \left. \frac{\partial P_n}{\partial V_n} \right|^{(0)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \left. \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_2} \right|^{(0)} & \dots & \left. \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_n} \right|^{(0)} & \left. \frac{\partial Q_2}{\partial V_2} \right|^{(0)} & \dots & \left. \frac{\partial Q_2}{\partial V_n} \right|^{(0)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \left. \frac{\partial Q_n}{\partial \theta_2} \right|^{(0)} & \dots & \left. \frac{\partial Q_n}{\partial \theta_n} \right|^{(0)} & \left. \frac{\partial Q_n}{\partial V_2} \right|^{(0)} & \dots & \left. \frac{\partial Q_n}{\partial V_n} \right|^{(0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_2^{(0)} \\ \dots \\ \Delta \theta_n^{(0)} \\ \dots \\ \Delta V_2^{(0)} \\ \dots \\ \Delta V_n^{(0)} \end{bmatrix} \quad (1.26)$$

ou encore, sous forme matricielle

$$\begin{pmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H & N \\ M & L \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{pmatrix} \quad (1.27)$$

$$H = \frac{\partial P}{\partial \theta}, N = \frac{\partial P}{\partial V}, M = \frac{\partial Q}{\partial \theta} \text{ et } L = \frac{\partial Q}{\partial V}$$

$$[\Delta U]^{(0)} = [J]^{(0)} \cdot [\Delta X]^{(0)} \quad (1.28)$$

$[\Delta U]^{(0)}$ : Vecteur écarts de puissances en fonction de l'estimation initiale (itération  $k=0$ ).

$[J]^{(0)}$ : Matrice jacobéenne, calculée en fonction du vecteur de l'estimation initiale  $[X]^{(0)}$ .

$[\Delta X]^{(0)}$ : Vecteur des erreurs, à l'itération  $k=0$ .

Les éléments de la matrice jacobéenne, sont donnés comme suit

$$H_{ij} = \frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} = V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}), \quad j \neq i \quad (1.29)$$

$$H_{ii} = \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n V_i V_j (-G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij})$$

$$N_{ij} = \frac{\partial P_i}{\partial V_j} = V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}), \quad j \neq i \quad (1.30)$$

$$N_{ii} = \frac{\partial P_i}{\partial V_i} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) + V_i G_{ii}$$

$$M_{ij} = \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} = -V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}), \quad j \neq i$$

$$M_{ii} = \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (1.31)$$

$$L_{ij} = \frac{\partial Q_i}{\partial V_j} = V_i (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}), \quad j \neq i$$

$$L_{ii} = \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) - V_i B_{ii} \quad (1.32)$$

### ❖ Remarques

- Si les écarts de puissance réactive au niveau des jeux de barres de génération ne sont pas donnés, les lignes et les colonnes correspondant à ces jeux de barres doivent être éliminées.
- Si la puissance réactive générée au niveau d'un jeu de barre de génération dépasse sa limite inférieure ou supérieure, ce jeu de barre sera considéré comme un jeu de barre de charge avec ( $Q_g = Q_{gmin}$ ) ou ( $Q_g = Q_{gmax}$ ) et le module de la tension ( $V$ ) devient une inconnue à calculer.

### ❖ Algorithme de Newton-Raphson [1]

**Etape (1).** Formuler la matrice admittance ( $Y$ ).

**Etape (2).** Initialiser le compteur d'itération ( $k=0$ ), ainsi que les modules et les angles de tensions :

$$V_i = 1.0 \text{ p.u. et } \theta_i = 0$$

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

**Etape (4).** Déterminer la matrice jacobéenne  $[J]^{(k)}$ .

**Etape (5).** Déterminer le vecteur d'erreur

$$[\Delta X]^{(k)} = ([J]^{(k)})^{-1} \cdot [\Delta U]^{(k)}$$

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

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

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

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

Incrémenter le nombre d'itérations ( $k$ ) de 1 et retourner à l'étape (3).

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

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

d'autre méthode numérique peuvent être utilisée pour la résoudre ce problème comme la méthode de découplée rapide et la méthode de l'approximation du courant continu (DC power flow).

## 1.3 Ecoulement optimal de puissance

### 1.3.1 Résumé de la littérature de l'OPF

La formulation et la solution du problème de l'OPF, ont été traités la première fois en 1961 par R.B Squires [2], dont l'algorithme de la solution proposé était une méthode de type Gauss- Seidel.

En 1962, Carpentier a été le premier qui a fait une formulation exacte et générale du problème du dispatching économique, dont la solution utilise le théorème d'optimalité de Kuhn-Tucker [3]. Depuis lors, plusieurs algorithmes ont été développés afin de rendre le calcul de l'OPF plus efficace, ces algorithmes utilisent les techniques de programmations mathématiques, dites linéaires ou non linéaires.

La majorité des techniques de programmation mathématiques, discutées dans la littérature utilisent une des cinq méthodes suivantes [1]:

- Méthode itérative du lambda (appelée aussi méthode du critère d'égalité de l'accroissement du coût).
- Méthode du gradient .
- Méthode de Newton .
- Méthode de programmation linéaire .
- Méthode du point intérieur .

### 1.3.2 But de l'OPF

L'objectif principal de l'OPF est de minimiser le coût du combustible, pour la production de l'énergie électrique au profit de la demande du consommateur, tout en maintenant la sécurité et la stabilité du système [1].

Le maintien de la sécurité du système, nécessite de garder chaque équipement dans les limites de fonctionnement voulues. Ceci inclut les puissances minimum et maximum produites par les générateurs, les puissances apparentes maximales transitant au niveau des lignes de transport et des transformateurs, ainsi que les modules de tension au niveau des jeux de barres.

### 1.3.3 Dispatching Economique

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 (Fig. 1.4).

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.

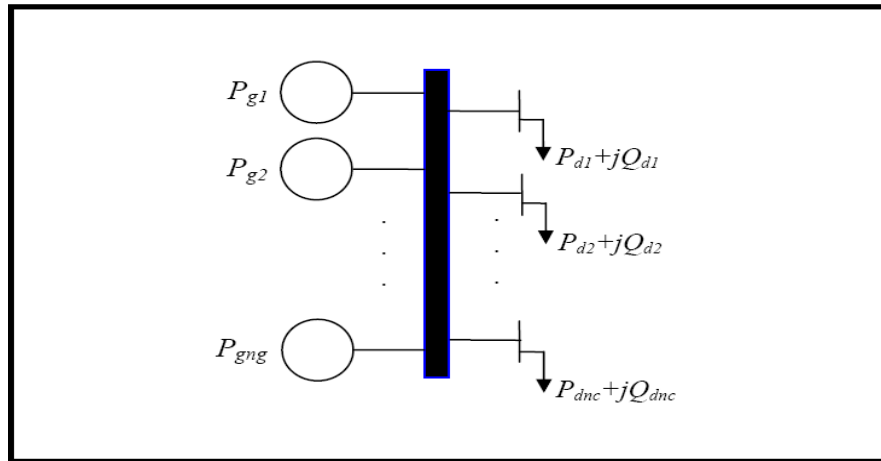


Figure 1.4. Modèle du système électrique utilisé dans le Dispatching Economique.

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 »  $C_i(P_{gi})$ , (Fig. 1.5).

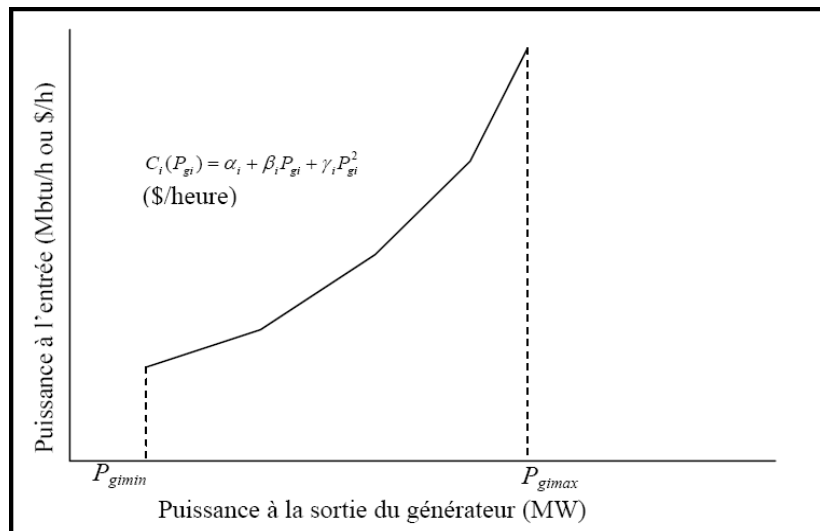


Figure 1.5. Courbe de coût typique (entrée-sortie) d'un générateur

La fonction du coût d'un générateur  $i$ , peut être approximée par une forme quadratique, comme suit:

$$C_i(P_{gi}) = \alpha_i + \beta_i P_{gi} + \gamma_i P_{gi}^2 \quad [$/h] \quad (1.33)$$

Où  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$  et  $\gamma_i$  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 (Fig. 1.6).

$$\frac{dC_i}{dP_{gi}} = \beta_i + 2\gamma_i P_{gi} \quad [$/MWh] \quad (1.34)$$

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

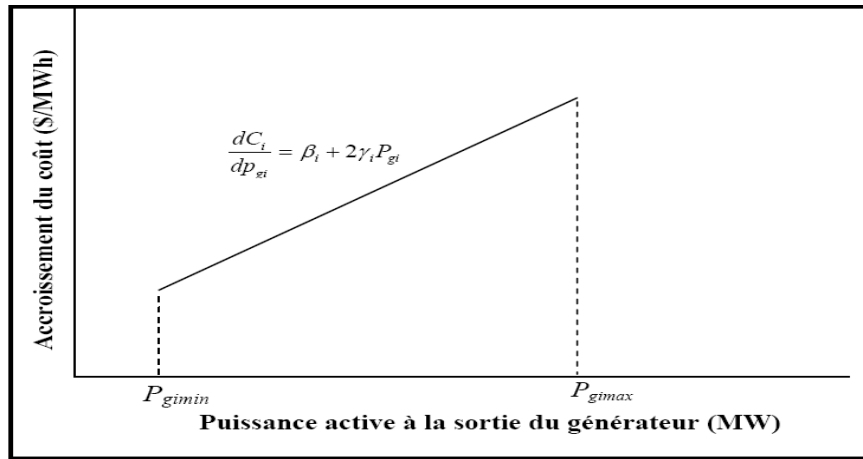


Figure 1.6. Courbe typique de l'accroissement du coût de combustible

### 1.3.3.1 Formulation mathématique du problème du Dispatching Economique

Le problème du dispatching économique consiste à minimiser le coût total du combustible (C), sujet à une seule contrainte d'égalité qui est la somme de toutes les puissances générées est égale à la puissance totale demandée ( $P_d$ ). Mathématiquement on peut écrire:

Minimiser

$$C = \sum_{i=1}^{ng} C_i(P_{gi}) = \sum_{i=1}^{ng} (\alpha_i + \beta_i P_{gi} + \gamma_i P_{gi}^2) \quad (1.35)$$

Sujet à contrainte  $\sum_{i=1}^{ng} P_{gi} = P_d$

Dans la pratique, chaque puissance générée ( $P_{gi}$ ) est limitée par une limite inférieure ( $P_{gi \min}$ ) et une autre supérieure ( $P_{gi \max}$ ), ce qui donne la contrainte d'inégalité suivante

$$P_{gi \min} \leq P_{gi} \leq P_{gi \max} \quad i = 1, 2, \dots, ng \quad (1.36)$$

### 1.3.3.2 Solution analytique du problème du Dispatching Economique

Pour résoudre le problème du dispatching économique, on fait appel à la fonction de Lagrange, formulée comme suit:

$$L = \sum_{i=1}^{ng} (\alpha_i + \beta_i P_{gi} + \gamma_i P_{gi}^2) + \lambda \left( P_d - \sum_{i=1}^{ng} P_{gi} \right) \quad (1.37)$$

$\lambda$  est le multiplicateur de Lagrange.

Les conditions nécessaires pour un minimum sont données par

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial P_{gi}} &= \beta_i + 2\gamma_i P_{gi} - \lambda = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} &= P_d - \sum_{i=1}^{ng} P_{gi} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, ng \end{aligned} \quad (1.38)$$

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

Donc, pour un fonctionnement optimal des générateurs, il faut que le l'accroissement du coût de tout les générateurs soit le même, c a d égal à ( $\lambda$ ).

Le système d'équations (1.38) comporte ( $ng + 1$ ) équations avec ( $ng + 1$ ) inconnus, qui peuvent êtres résolues par la substitution des valeurs de ( $P_{gi}$ ) des premières équations dans l'avant dernière

$$\begin{aligned} P_{gi} &= \frac{\lambda - \beta_i}{2\gamma_i} \\ P_d &= \sum_{i=1}^{ng} \left( \frac{\lambda - \beta_i}{2\gamma_i} \right) \quad i = 1, 2, \dots, ng \end{aligned} \quad (1.39)$$

La valeur optimale de ( $\lambda$ ) est alors calculée comme suit

$$\lambda = \lambda^* = \frac{P_d + \sum_{i=1}^{ng} \frac{\beta_i}{2\gamma_i}}{\sum_{i=1}^{ng} \frac{1}{\gamma_i}} \quad (1.40)$$

La valeur optimale  $\lambda^*$  est remplacée dans les premières équations de (1.39) pour obtenir la puissance optimale à générer par chaque générateur:

$$P_{gi} = \frac{1}{2\gamma_i} \left( \frac{P_d + \sum_1^{ng} \frac{\beta_i}{2\gamma_i}}{\sum_1^{ng} \frac{1}{\gamma_i}} - \beta_i \right) \quad (1.41)$$

### 1.3.3.3 Dispatching Economique avec considération des pertes de puissance actives

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 (1.35) doit inclure ces pertes. Si on désigne par  $P_L$  les pertes totales de puissances actives, la contrainte d'égalité devient :

$$\sum_{i=1}^{ng} P_{gi} = P_d + P_L \quad (1.42)$$

Le lagrangien est alors formulé par:

$$L = \sum_{i=1}^{ng} (\alpha_i + \beta_i P_{gi} + \gamma_i P_{gi}^2) + \lambda \left( P_d + P_L - \sum_{i=1}^{ng} P_{gi} \right) \quad (1.43)$$

Les conditions nécessaires pour un minimum sont données par

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial P_{gi}} &= \beta_i + 2\gamma_i P_{gi} - \lambda \left( 1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_{gi}} \right) = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} &= P_d + P_L - \sum_{i=1}^{ng} P_{gi} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, ng \end{aligned} \quad (1.44)$$

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

Les pertes de puissances actives dans le système électrique,  $P_L$ , sont fonctions des impédances du réseau et des courants qui transitent dans les différentes branches du système électrique [1].

On peut donc considérer que les courants sont fonction des variables indépendantes,  $P_{gi}$  et  $P_d$ . La première équation de l'expression (1.44), nous donne une relation directe entre la puissance générée ( $P_{gi}$ ) et le multiplicateur de Lagrange ( $\lambda$ ), donnée par:

$$\lambda = \frac{dC_i / dP_{gi}}{1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_{gi}}} = L_i \cdot \frac{dC_i}{dP_{gi}} \quad (1.45)$$

Le terme  $L_i = 1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_{gi}}$  est appelé : *facteur de pénalité* du générateur  $i$ .

Il existe trois approches générales pour résoudre le problème du dispatching économique avec pertes de puissance [1]

1. La première approche consiste à considérer les pertes de puissances actives constantes, dans la contrainte d'égalité donnée par l'équation (1.42).
2. La deuxième approche consiste à développer une expression mathématique des pertes de puissances actives, en fonction des puissances actives des générateurs.

Celle-ci est connue par la méthode de « formule des pertes », ou méthode des « coefficients B » (voir formule 1.46).

3. La troisième approche consiste à introduire les équations de l'écoulement de puissance comme contraintes essentielles dans la formulation du problème d'optimisation.

Cette approche est connue par l'Ecoulement de puissance optimal (OPF), qui sera discutée dans le paragraphe (1.37).

La méthode de « formule des pertes » est basée sur l'approximation des pertes totales de puissance active par une fonction directe des puissances actives des générateurs ( $P_{gi}$ ), donnée par l'équation suivante [1]

$$P_L = \sum_{i=1}^{ng} \sum_{j=1}^{ng} \beta_{ij} P_{gi} P_{gj} + \sum_{i=1}^{ng} \beta_{io} P_{gi} + \beta_{oo} \quad (1.46)$$

où,  $P_{gi}$  : puissance active du générateur  $i$ .

$\beta_{ij}$ ,  $\beta_{io}$  et  $\beta_{oo}$  : 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 puissances actives et réactives demandées et des tensions. Dans la littérature, Il existe beaucoup de formules pour le calcul des coefficients de pertes [1].

Les équations données par (1.44) sont alors de formes quadratiques, dont la solution nécessite l'application d'une méthode itérative comme celle de Newton-Raphson, où l'estimation initiale peut être égale à la solution du dispatching économique sans pertes.

Le Dispatching Economique classique, est limité à l'optimisation de la puissance active générée sans prendre en considération la nature du réseau ainsi que certaines contraintes de sécurité, comme:

- Contraintes de transmission
- Limites des transits de puissance des lignes de transport.
- Limites des tensions au niveau des jeux de barres.
- Limites des puissances réactives.

Dans un système électrique, l'objectif est de trouver la puissance active et réactive à assigner pour chaque centrale de production, de manière à minimiser le coût de fonctionnement de ces centrales.

Cela signifie que la puissance active et réactive des générateurs peut varier dans certaines limites afin de satisfaire une demande de charge avec un coût minimum de combustible. Ce problème est connu sous le nom de l'écoulement de puissance optimal (OPF).

L'OPF est une extension du problème du dispatching économique conventionnel, dont l'objectif est de déterminer les valeurs optimales des variables de contrôle tout en satisfaisant des contraintes diverses.

### 1.3.4 Formulation mathématique du problème de l'OPF

Le problème de l'OPF standard peut être formulé comme suit [5]

$$\begin{aligned} &\text{Minimiser } f(x) && \text{(fonction objective)} \\ \text{Sujet à } &g_i(x) = 0 \quad i = 1, \dots, n && \text{(contraintes d'égalité)} \\ &h_i(x) = 0 \quad i = 1, \dots, m && \text{(contraintes d'inégalités)} \end{aligned} \quad (1.47)$$

Il y a  $n$  contraintes d'égalités et  $m$  contraintes d'inégalités. Le nombre de variables est égal à la taille du vecteur  $x$ .

### 1.3.5 Solution du problème de l'OPF par la méthode de Newton

La méthode de Newton est une méthode très puissante à cause de sa convergence rapide au voisinage de la solution. Cette propriété est spécialement utile pour les applications dans les systèmes électriques [5].

#### 1.3.5.1 Développement du Lagrangien, du Gradient et du Hessian

La solution du problème de l'OPF par la méthode de Newton, nécessite l'utilisation des théorèmes de Lagrange et de Kuhn Tucker. Le lagrangien est formulé comme suit:

$$L(z) = f(x) + \lambda^t g(x) + \mu^t h(x) \quad (1.48)$$

Avec:  $z = [x \ \lambda \ \mu]^t$

$\lambda$  et  $\mu$  sont respectivement les multiplicateurs de Lagrange et de Kuhn Tucker.

$h(x)$  inclut seulement les contraintes d'inégalités actives ( $\mu_i \geq 0$  et  $h_i(x) = 0$ ).

Le Gradient et le Hessian, du Lagrangien  $\nabla L$  et  $\nabla^2 L$  peuvent être définis comme suit

$$\nabla L(z) = \left[ \frac{\partial L(z)}{\partial z_i} \right] \quad (1.49)$$

$$\nabla^2 L(z) = \left[ \frac{\partial^2 L(z)}{\partial z_i \partial z_j} \right] = H = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 L(z)}{\partial x_i \partial x_j} & \frac{\partial^2 L(z)}{\partial x_i \partial \lambda_j} & \frac{\partial^2 L(z)}{\partial x_i \partial \mu_j} \\ \frac{\partial^2 L(z)}{\partial \lambda_i \partial x_j} & 0 & 0 \\ \frac{\partial^2 L(z)}{\partial \mu_i \partial x_j} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1.50)$$

Le Gradient est un vecteur constitué des premières dérivées partielles du Lagrangien.

Le Hessian est une matrice carrée constituée des dérivées partielles secondes du Lagrangien.

Le théorème de Kuhn Tucker donne les conditions nécessaires de la solution optimale  $z^*$  [1]

$$\nabla_x L(z^*) = \nabla_x L([x^* \ \lambda^* \ \mu^*]) = 0$$

$$\nabla_\lambda L(z^*) = \nabla_\lambda L([x^* \ \lambda^* \ \mu^*]) = 0 \quad (1.51)$$

$$\nabla_\mu L(z^*) = \nabla_\mu L([x^* \ \lambda^* \ \mu^*]) = 0$$

$$\mu_i^* \geq 0 \text{ si } h_i(x^*) = 0 \text{ (contrainte d'inégalité active ou forcée)}$$

$$\mu_i^* = 0 \text{ si } h_i(x^*) \leq 0 \text{ (contrainte d'inégalité inactive ou non forcée)}$$

$$\lambda^* = \text{Réel}$$

$z^* = [x^* \ \lambda^* \ \mu^*]$ , est la solution optimale du problème d'optimisation.

Donc, la solution du système d'équations non linéaires  $\nabla_z L(z^*) = 0$ , donnée par (1.51), nous donne la solution optimale du problème d'optimisation.

### 1.3.5.2 Application de la méthode de Newton au problème de l'OPF

#### a) Classification des variables de l'OPF

Les variables existants dans le problème de l'OPF, sont classées en trois catégories [1]

- **Les variables de contrôles** : Représentées par les quantités qui peuvent être manipulées arbitrairement dans leurs limites de fonctionnement. Celles-ci incluent les puissances actives des générateurs, les tensions des jeux de barres générateurs, les sources de puissance réactive, les rapports de transformation des transformateurs à prises de charges et les angles de déphasage des transformateurs déphaseurs.

- **Les variables d'état** : Représentées par les quantités dépendants des variables de contrôles, et qui doivent être contrôlées durant le processus d'optimisation. Ces variables incluent les tensions de jeux de barres de charge ainsi que les angles de phase de tous les jeux de barres du système électrique (sauf le jeu de barre de référence).

- **Les variables des contraintes** : Représentées par les variables associées aux contraintes. Celles-ci incluent tous les multiplicateurs de Lagrange et de Kuhn Tucker.

### b) Fonction objective

La fonction objective, dans notre cas, représente le coût (\$/h) associé à la génération de la puissance active dans le système électrique. Le modèle quadratique donnée par l'équation (1.33), sera utilisée

$$f(x) = \sum_{i=1}^{ng} \alpha_i + \beta_i P_{gi} + \gamma_i P_{gi}^2 \quad [$/h] \quad (1.52)$$

### c) Contraintes d'égalités

Ces contraintes sont traduites par les lois physiques gouvernant le système électrique. Elles sont représentées par les équations non linéaires de l'écoulement de puissance. Il faut que la somme des puissances actives et réactives injectées dans chaque jeu de barre soit égale à zéro [5]. D'après les équations (1.10) et (1.11), les contraintes d'égalités sont données par

$$\Delta P_i = \sum_{j=1}^n V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) - P_{gi} + P_{di} = 0 \quad (1.53)$$

$$\Delta Q_i = \sum_{j=1}^n V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) - Q_{gi} + P_{di} = 0 \quad (1.54)$$

### d) Contraintes d'inégalités

Les contraintes d'inégalités traduisent les limites admissibles des éléments physiques du système électrique. Ces limites ne doivent pas être dépassées, afin d'assurer la sécurité du système [5]

• La puissance active et réactive de chaque générateur est limitée par une valeur minimum et une valeur maximum

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

$$Q_{gi \min} \leq Q_{gi} \leq Q_{gi \max} \quad (1.55)$$

• Les transformateurs à prises de charges possèdent des prises variables pour le réglage du rapport de transformation. Ces prises sont réglées entre une position minimum et maximum par rapport à la tension nominale. De même, les transformateurs déphaseurs ont des prises pour le réglage du déphasage, pouvant être réglées entre deux positions minimum et maximum.

$$t_{ij \min} \leq t_{ij} \leq t_{ij \max}$$

$$\alpha_{ij \min} \leq \alpha_{ij} \leq \alpha_{ij \max} \quad (1.56)$$

• Afin de maintenir la sécurité du système électrique, les lignes de transport et les transformateurs ont des limites sur le transit de puissance apparente. Ces limites sont dues aux pertes thermiques dans les conducteurs, et/ou la stabilité du système. Cette contrainte limitera le carré de la puissance apparente d'une ligne de transport ou d'un transformateur.

$$|S_{ij}|^2 \leq |S_{ij \max}|^2 \quad (1.57)$$

• Pour maintenir la qualité de service électrique et la stabilité du système, les niveaux de tensions des jeux de barres doivent être toujours entre leurs limites min. et max.

$$V_{i \min} \leq V_i \leq V_{i \max} \quad (1.58)$$

### e) Résumé de la formulation du problème de l'OPF

En résumé, le problème d'optimisation de l'écoulement de puissance peut être écrit sous la forme suivante: Minimiser

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

Sujet à

$$g(x) = 0 \Rightarrow \begin{cases} \Delta P_i = 0 \\ \Delta Q_i = 0 \end{cases}$$

Et

$$h(x) \leq 0 \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} P_{gi} - P_{gi \max} \leq 0 \\ P_{gi \min} - P_{gi} \leq 0 \\ Q_{gi} - Q_{gi \max} \leq 0 \\ Q_{gi \min} - Q_{gi} \leq 0 \\ V_i - V_{i \max} \leq 0 \\ V_{i \min} - V_i \leq 0 \\ |S_{ij}|^2 - |S_{ij \max}|^2 \leq 0 \\ t_{ij} - t_{ij \max} \leq 0 \\ t_{ij \min} - t_{ij} \leq 0 \\ \alpha_{ij} - \alpha_{ij \max} \leq 0 \\ \alpha_{ij \min} - \alpha_{ij} \leq 0 \end{array} \right. \quad (1.59)$$

On remarque qu'il existe beaucoup de contraintes d'égalité et d'inégalité qu'on peut prendre en considération, mais il faut savoir qu'il n'est pas toujours rentable d'inclure toutes ces contraintes. On peut choisir les contraintes les plus importantes et on construit donc un problème réduit et à la fin de la convergence du problème d'optimisation, on fait un test pour le reste des contraintes.

Les contraintes associées à la puissance réactive des générateurs, peuvent être éliminées de la formulation (1.59), puisque si la puissance réactive d'un générateur dépasse sa limite min. ou max., il sera considéré comme une charge dans le processus itératif avec  $Q_g$  constante.

Il faut noter que les termes représentant les contraintes d'inégalités qui vont être inclus dans le lagrangien, sont seulement ceux qui dépassent leurs limites (contraintes actives).

### 1.3.5.3 Algorithme de Newton

Les étapes de base de l'algorithme utilisé se résument par

**Etape (1).** Choisir un vecteur initial  $Z^{(0)}$ : tensions, angles de phases des jeux de barres, puissances actives des générateurs, rapports de transformation, angles de déphasage des transformateurs et tout les multiplicateurs de Lagrange.

**Etape (2).** Déterminer les contraintes d'inégalités actives et inactives en utilisant les informations des multiplicateurs de Lagrange.

**Etape (3).** Calculer le Gradient et le Hessien du Lagrangien.

**Etape (4).** Résoudre l'équation :  $[H].\Delta Z = \nabla L(Z)$ .

**Etape (5).** Mettre à jour la solution :  $Z_{\text{nouveau}} = Z_{\text{ancien}} - \Delta Z$ .

**Etape (6).** Vérifier si :  $|\Delta Z| \leq \varepsilon$ . Si c'est affirmé continuer, sinon, aller à l'étape (3).

**Etape (7).** Vérifier que les contraintes d'inégalités violées ont été bien ajustées (activées). Si c'est le cas, le problème est résolu, sinon, aller vers l'étape (2).

d'autres méthodes numériques peuvent être citées pour la résolution du problème de l'OPF comme la méthode de programmation linéaire (LP) et la méthode de programmation linéaire successive (LSP).

## 1.4 Conclusion

Dans ce chapitre on a donné une formulation du problème de l'écoulement de puissance, par un système d'équations non linéaires gouvernant le système de puissance. Les variables sont les modules et phases des tensions aux niveaux des jeux de barres. La méthode la plus utilisée pour la résolution du problème de l'écoulement de puissance et écoulement optimal de puissance est celle de Newton-Raphson (NR).

## 2.1 Introduction

Les algorithmes de métaheuristiques permettent de s'approcher d'une ou de plusieurs solutions à des problèmes dits "difficiles" qui s'apparentent à des problèmes d'optimisations. Un problème d'optimisation est un problème dont on peut distinguer une ou plusieurs fonctions coût qui permettent de différencier une bonne solution d'une mauvaise. Le principe d'une métaheuristique est de minimiser ou de maximiser ces fonctions. L'avantage des métaheuristiques est de trouver un minimum global à un problème de minimisation et de ne pas rester bloqué sur un minimum local.

Dans ce chapitre on va choisir la méthode d'optimisation par essaim de particules (OEP) pour la résolution du problème d'optimisation de l'écoulement de puissance.

## 2.2 Voisinage

Sans conteste, le principe général le plus largement utilisé dans l'élaboration d'heuristiques est celui de voisinage. À chaque solution  $s$  du problème, on associe un sous-ensemble  $V(s)$  de solutions. Ce sous-ensemble peut être statique, comme dans le cas du recuit simulé ou des méthodes de bruitage, mais aussi dynamique et dépendre du temps  $t$  (ou plus précisément de l'itération à laquelle on se trouve). Notons que la dépendance du voisinage par rapport au temps est étroitement couplée à d'autres principes de base contenus dans la métaheuristique, comme par exemple la liste de tabous ou de candidats dans une recherche avec tabous.

Même dans le cas d'une structure de voisinage statique est très simple, où le seul but est de trouver un optimum local, on ne connaît que très peu de résultats théoriques utiles. L'algorithme du simplexe pour la programmation linéaire est un exemple typique. Pour ce problème, il est bien connu que le nombre d'itérations pour arriver à une solution optimale peut être exponentiel en la taille du problème.

Pourtant, en pratique, on observe que le nombre d'itérations croît bien plus lentement, ce qui en fait un algorithme efficace et très largement utilisé.

Pour un problème d'optimisation combinatoire non convexe, pour lequel il est possible de définir un ensemble de voisinages a priori intéressants, la situation se complexifie. Il devient alors difficile de se décider pour l'un ou l'autre des voisinages autrement que par des essais. Comme le voisinage n'est qu'une partie des principes, tous interdépendants, utilisés dans l'heuristique, le choix d'un (ou de plusieurs) voisinages devient réellement problématique car on ne dispose que de très peu de résultats théoriques sur la qualité d'un voisinage pour un problème particulier.

Il existe une mesure de l'adéquation des voisinages appelée *rugosité* : l'idée consiste à évaluer la variance des coûts de deux solutions voisines. Cette variance est ensuite normalisée par la variance des coûts de l'ensemble des solutions et par la taille du problème, afin d'avoir une mesure indépendante de la valeur absolue de la fonction objective ou de la taille du problème [6].

La rugosité donne une indication sur la difficulté à résoudre un problème à l'aide d'une recherche locale utilisant un voisinage donné. En effet, si cette mesure est élevée, on peut supposer que le voisinage est peu adapté car les valeurs des solutions voisines semblent peu corrélées, alors que si cette mesure est faible, on aura un « paysage » lisse, avec relativement peu d'optima locaux, donc un problème facile à optimiser à l'aide d'une recherche locale.

Naturellement, si la rugosité est une notion mathématiquement bien définie, l'interprétation donnée ci-dessus n'est qu'une supposition seulement par des considérations empiriques [4].

### 2.3 Cadre des métaheuristiques

L'arrivée des métaheuristiques marque une réconciliation des deux domaines : en effet, celles-ci s'appliquent à toutes sortes de problèmes discrets, et elles peuvent s'adapter aussi aux problèmes continus. Ces méthodes ont en commun, en outre, les caractéristiques suivantes [7]:

- elles sont, au moins pour partie, stochastiques : cette approche permet de faire face à l'explosion combinatoire des possibilités.
- souvent d'origine discrète (à l'exception notable de l'OEP), elles ont l'avantage, décisif dans le cas continu, d'être directes, c'est-à-dire qu'elles ne recourent pas au calcul, souvent problématique, des gradients de la fonction objective.
- elles sont inspirées par des analogies : avec la physique (recuit simulé, diffusion simulée...), avec la biologie (algorithmes évolutionnaires, recherche tabou...) ou avec l'éthologie (colonies de fourmis...).
- elles partagent aussi les mêmes inconvénients : les difficultés de réglage des paramètres de la méthode, et le temps de calcul élevé.

### 2.4 Description de la méthode Optimisation par essaim de particules (OEP)

L'optimisation par essaim de particules (OEP) est une technique d'optimisation parallèle développée par Kennedy et Eberhart, comme une alternative aux algorithmes génétiques standard [4]. Ces algorithmes sont inspirés des essaims d'insectes (ou des bancs de poissons ou des nuées d'oiseaux) et de leurs mouvements coordonnés. En effet, tout comme ces animaux se déplacent en groupe pour trouver la source de nourriture ou éviter les prédateurs,

les algorithmes à essaim de particules recherchent des solutions pour un problème d'optimisation. Les individus de l'algorithme sont appelés particules et la population est appelée essaim. Dans cet algorithme, une particule décide de son prochain mouvement en fonction de sa propre expérience, qui est dans ce cas la mémoire de la meilleure position qu'elle a rencontrée, et en fonction de son meilleur voisin. Ce voisinage peut être défini spatialement en prenant par exemple la distance euclidienne entre les positions de deux particules ou sociométriquement (position dans l'essaim de l'individu). Les nouvelles vitesses et direction de la particule seront définies en fonction de trois tendances : la propension à suivre son propre chemin, sa tendance à revenir vers sa meilleure position atteinte et sa tendance à aller vers son meilleur voisin. Les algorithmes à essaim de particules peuvent s'appliquer aussi bien à des données discrètes qu'à des données continues. Les algorithmes à essaim de particules ont été utilisés pour réaliser différentes tâches d'extraction de connaissances [4].

### 2.4.1 L'algorithme OEP

L'algorithme d'OEP est initialisé par une population de solutions potentielles aléatoires, interprétées comme des particules se déplaçant dans l'espace de recherche. Chaque particule est attirée vers sa meilleure position découverte par le passé ainsi que vers la meilleure position découverte par les particules de son voisinage (ou de tout l'essaim, dans la version globale de l'algorithme). L'algorithme d'OEP comprend plusieurs paramètres de réglage qui permettent d'agir sur le compromis exploration – exploitation [4]. L'exploration est la capacité de tester différentes régions de l'espace à la recherche de bonnes solutions candidates. L'exploitation est la capacité de concentrer la recherche autour des solutions prometteuses afin de s'approcher le plus possible de l'optimum. Le choix des paramètres reste en grande partie empirique. Une analyse complète de l'algorithme a été faite par Clerc et Kennedy [4].

#### a. Algorithme général [4]

L'algorithme d'OEP classique peut être décrit sous forme vectorielle de la façon suivante :

$$\vec{v}_{k+1} = \vec{w} \otimes \vec{v}_k + \vec{c}_1 \otimes \vec{r}_1 \otimes (\vec{p}_{best} - \vec{x}_k) + \vec{c}_2 \otimes \vec{r}_2 \otimes (\vec{p}_{gbest} - \vec{x}_k) \quad (2.1)$$

$$\vec{x}_{k+1} = \vec{a} \otimes \vec{x}_k + \vec{b} \otimes \vec{v}_{k+1} \quad (2.2)$$

Le symbole  $\otimes$  signifie ici la multiplication des vecteurs éléments par élément. A l'itération  $k$ , la vitesse  $\vec{v}_k$  d'une particule est modifiée à partir de sa valeur courante, affectée d'un coefficient d'inertie ( $\vec{w}$ ), et de deux forces qui attirent la particule vers sa propre meilleure position passée ( $\vec{p}_{best}$ ) et la meilleure position de tout l'essaim ( $\vec{p}_{gbest}$ ). L'intensité de

l'attraction est donnée par les coefficients  $\vec{c}_1$  et  $\vec{c}_2$ . La position de la particule  $\vec{x}_k$  est modifiée à partir de la position courante et de la nouvelle vitesse calculée  $\vec{v}_{k+1}$ , affectées des coefficients  $\vec{a}$  et  $\vec{b}$  respectivement.

L'expérience montre qu'une bonne exploration du domaine de recherche est obtenue en introduisant les nombres aléatoires  $\vec{r}_1$  et  $\vec{r}_2$ , en général avec une répartition uniforme entre 0 et 1.

### **b. Algorithme unidimensionnel déterministe**

Chaque coordonnée d'une particule est modifiée indépendamment des autres coordonnées (équations (2.1) et (2.2)). Le seul lien entre les coordonnées est à travers la fonction objectif, c'est-à-dire à travers les meilleures positions trouvées jusqu'à présent  $\vec{p}_{best}$  et  $\vec{p}_{gbest}$ .

Une autre simplification consiste à considérer la version déterministe de l'algorithme, ce qui revient à remplacer les nombres aléatoires par leurs valeurs moyennes (1/2).

Avec ces simplifications, l'algorithme unidimensionnel déterministe s'écrit :

$$v_{k+1} = wv_k + c(p - x_k) \quad (2.3)$$

$$x_{k+1} = ax_k + bv_{k+1} \quad (2.4)$$

Le nouveau coefficient d'attraction ( $c$ ) est la moyenne des coefficients propre ( $c_1$ ) et social ( $c_2$ ).

Le nouveau point d'attraction ( $p$ ) est la moyenne de ( $p_{best}$ ) et de ( $p_{gbest}$ ), pondérés par ( $c_1$ ) et ( $c_2$ ) respectivement.

### **c. Algorithme avec $a = 1$ et $b = 1$**

Il a été montré [4] que les coefficients  $a$  et  $b$  peuvent être toujours choisis de valeur 1, sans perte de généralité. Plus exactement, toute séquence de positions successives ( $x_k$ ) générée par l'algorithme décrit par les équations (2.3) et (2.4), peut également être générée en fixant  $a = 1$  et  $b = 1$  et en choisissant convenablement  $w$  et  $c$ . Les séquences des vitesses sont bien sûr différentes, mais cela ne change rien au problème d'optimisation, qui ne fait intervenir que les positions successives. Le choix  $a = 1$  et  $b = 1$  est en partie arbitraire mais a la propriété intéressante que la variable  $v$  garde une vraie signification de vitesse, c'est-à-dire de différence entre deux positions successives [4].

### **d. Algorithme discrète (binaire)**

Dans l'Optimisation par Essaim de Particules Discrète (OEPD), ( $x_k$ ) et ( $p_{best}$ ) prennent seulement des valeurs de 0 et 1. La vitesse ( $v_k$ ) déterminera une probabilité de seuil. Si  $v_k$  est plus élevé, la particule est choisie la valeur 1 et pour les valeurs plus basses favorisent le 0 comme choix.

Un tel seuil doit rester dans la gamme [0.0, 1.0].

### 2.4.2 Description informelle

La version historique peut facilement être décrite en se plaçant du point de vue d'une particule.

Au départ de l'algorithme, un essaim est réparti au hasard dans l'espace de recherche, chaque particule ayant également une vitesse aléatoire. Ensuite, à chaque pas de temps :

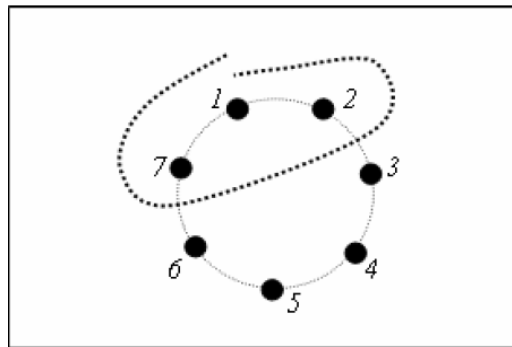
- chaque particule est capable d'évaluer la qualité de sa position et de garder en mémoire sa meilleure performance, c'est-à-dire la meilleure position qu'elle a atteinte jusqu'ici (qui peut en fait être parfois la position courante) et sa qualité (la valeur en cette position de la fonction à optimiser).

- chaque particule est capable d'interroger un certain nombre de ses coogénères (ses informatrices, dont elle-même) et d'obtenir de chacune d'entre elles sa propre meilleure performance (et la qualité afférente).

- chaque particule choisit la meilleure des meilleures performances dont elle a connaissance, modifie sa vitesse en fonction de cette information et de ses propres données et se déplace en conséquence.

Le premier point se comprend facilement, mais les deux autres nécessitent quelques précisions.

Les informatrices sont définies une fois pour toutes de la manière suivante (Figure 2.1) :



**Figure 2.1** Le cercle virtuel pour un essaim de sept particules. Le groupe d'information de taille trois de la particule 1 est composé des particules 1, 2 et 7.

On suppose toutes les particules disposées (symboliquement) en cercle et, pour la particule étudiée, on inclut progressivement dans ses informatrices, d'abord elle-même, puis les plus proches à sa droite et à sa gauche, de façon à atteindre le total requis. Il y a bien sûr de nombreuses variantes, y compris celle consistant à choisir les informatrices au hasard, mais celle-ci est à la fois simple et efficace.

Une fois la meilleure information détectée, la modification de la vitesse est une simple combinaison linéaire de trois tendances, à l'aide de coefficients de confiance :

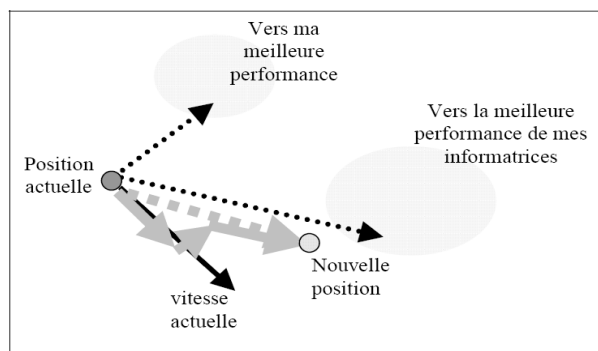
- la tendance « aventureuse », consistant à continuer selon la vitesse actuelle.
- la tendance « conservatrice », ramenant plus ou moins vers la meilleure position déjà trouvée.

- la tendance « panurgienne », orientant approximativement vers la meilleure information. Les termes « plus ou moins » ou « approximativement » font référence au fait que le hasard joue un rôle, grâce à une modification aléatoire limitée des coefficients de confiance, ce qui favorise l'exploration de l'espace de recherche. La Figure (2.2) présente un schéma de principe résumant les explications ci-dessus. Naturellement, pour pouvoir être programmé, tout ceci est formalisé dans des équations de mouvement (2.1) et (2.2) ou (2.3) et (2.4).

### 2.4.3 Principales caractéristiques

Ce modèle présente quelques propriétés intéressantes, qui en font un bon outil pour de nombreux problèmes d'optimisation, particulièrement les problèmes fortement non linéaires, continus ou mixtes (certaines variables étant réelles et d'autres entières) :

- il est facile à programmer, quelques lignes de code suffisent dans n'importe quel langage évolué,
- il est robuste (de mauvais choix de paramètres dégradent les performances, mais n'empêchent pas d'obtenir une solution).



**Figure 2.2** Schéma de principe du déplacement d'une particule.

Pour réaliser son prochain mouvement, chaque particule combine trois tendances : suivre sa vitesse propre, revenir vers sa meilleure performance, aller vers la meilleure performance de ses informations.

Signalons, de plus, qu'il existe des versions adaptatives qui évitent même à l'utilisateur la peine de définir les paramètres (taille de l'essaim, taille des groupes d'informatrices, coefficients de confiance) [4].

#### 2.4.4 Le voisinage

Le voisinage constitue la structure du réseau social. Les particules à l'intérieur d'un voisinage communiquent entre-elles. Différents voisinages ont été étudiés [4] et sont considérés en fonction des identificateurs des particules et non des informations topologiques comme les distances euclidiennes dans l'espace de recherche :

- Topologie en étoile (Figure 2.3(a)) : le réseau social est complète, chaque particule est attirée vers la meilleure particule notée  $\vec{p}_{g_{best}}$  (gbest) et communique avec les autres.
- Topologie en anneau (Figure 2.3(b)) : chaque particule communique avec  $n$  voisines immédiates ( $n=3$  Figure 2.3(b)). Chaque particule tend à se déplacer vers la meilleure dans son voisinage local notée  $\vec{p}_{best}$  (lbest).
- Topologie en rayon (Figure 2.3(c)) : une particule "centrale" est connectée à tous les autres.

Seule cette particule centrale ajuste sa position vers la meilleure, si cela provoque une amélioration l'information est propagée aux autres.

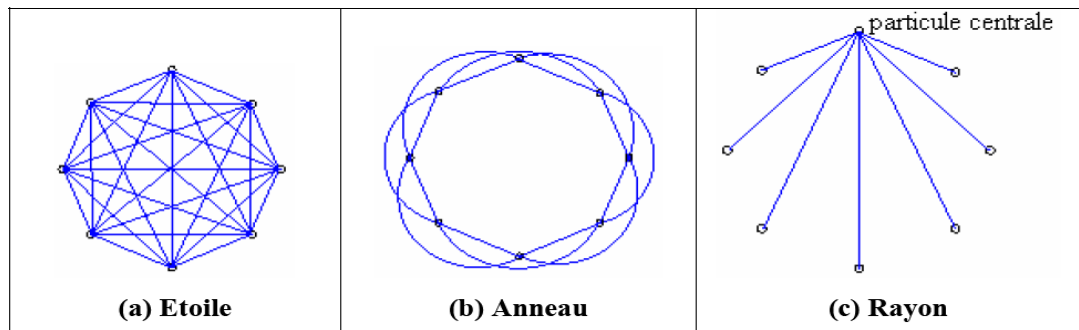


Figure 2.3 Trois topologies du voisinage différentes.

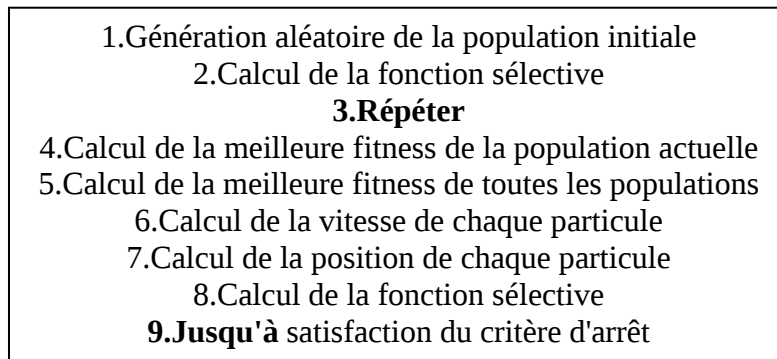
#### 2.4.5 Les étapes de la méthode d'Optimisation par Essaim de Particules

L'algorithme de cette méthode peut être décrit comme suit :

- ✓ 1<sup>ère</sup> étape : Initialisation des coefficients  $\vec{c}_1$  et  $\vec{c}_2$ , le coefficient d'inertie ( $\vec{w}$ )
- ✓ 2<sup>ème</sup> étape : La création de la population initiale aléatoirement et le calcul de la fitness de chaque particule: la meilleure position de la particule  $i$  dans la population actuelle ; ( $p_{best_i}$ ) : la meilleure position dans toute les populations (la meilleure des meilleures).

- ✓ 3<sup>ème</sup> étape : Le calcul de la nouvelle vitesse et nouvelle position de chaque particule par l'utilisation des formules (2.1) et (2.3).
- ✓ 4<sup>ème</sup> étape : Le calcul de la meilleure fitness de la population initiale et comparer par la précédente pour trouver la meilleure de toute les populations ( $p_{gbest}$ ).
- ✓ 5<sup>ème</sup> étape : incrémentation du nombre d'itération  $t = t+1$ .
- ✓ 6<sup>ème</sup> étape : Si un critère d'arrêt est satisfait alors passer à la 7<sup>ème</sup> étape. Autrement, aller à la 3<sup>ème</sup> étape.
- ✓ 7<sup>ème</sup> étape : La position enregistrée dans ( $p_{gbest}$ ) est la solution optimale.

La figure 2.4 illustre les différentes opérations qui interviennent dans la méthode OEP :



**Figure 2.4** Optimisation par essaim de particules.

Dans le détail, ces algorithmes peuvent être résumés, aux opérations indiquées sur l'organigramme de la figure 2.5.

## 2.5 Expériences d'optimisation

Dans la pratique, les comportements intéressants sont ceux qui assurent la convergence des particules de l'essaim vers la meilleure solution trouvée. Il convient donc de choisir les paramètres  $w$  et  $c$  à l'aide du test sur l'une des fonctions objectives. Pour l'optimisation, les choix qui semblent donner les meilleurs résultats sont avec une convergence plus ou moins rapide selon qu'on désire favoriser l'exploration et l'exploitation, et donne le minimum de la fonction objective.

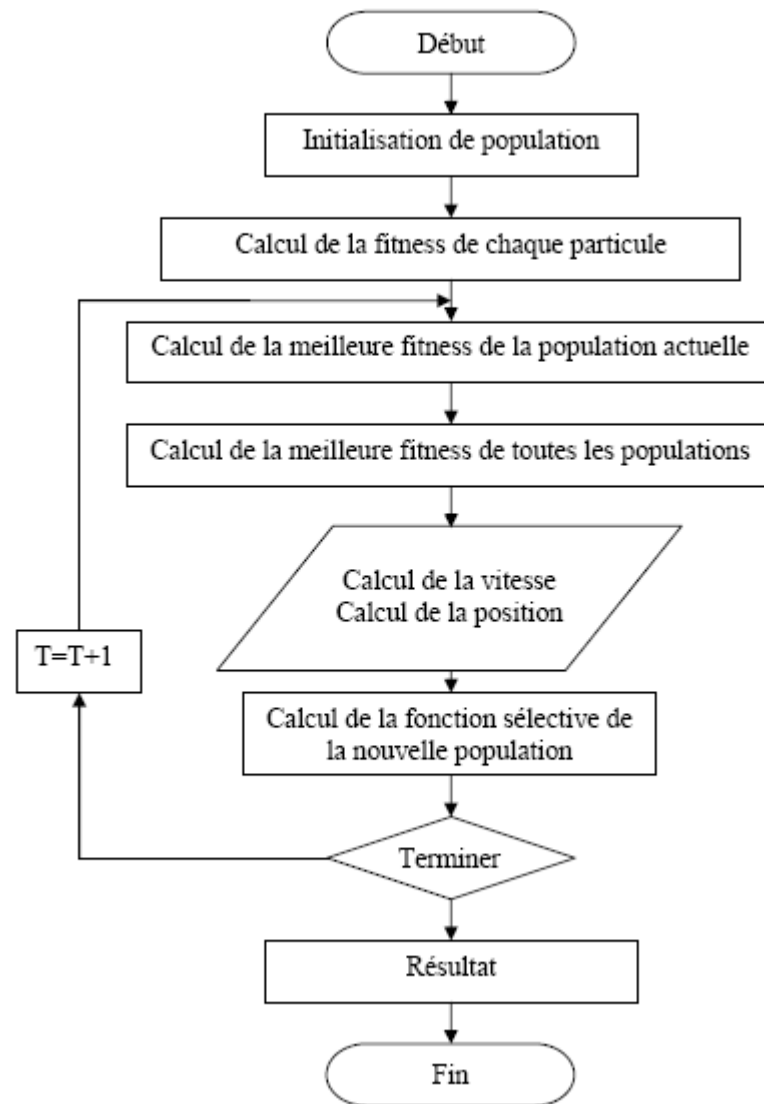


Figure 2.5 Organigramme d'OEP.

### 3.6 Conclusion

L'optimisation par essaims particulaires fournit des solutions proches de la solution optimale à l'aide des mécanismes de modification de vitesse et la position comme le montre la figure (2.5), mais il reste le choix des paramètres de la méthode comme problème principal. Elle est applicable pour nombreux problèmes, dont le problème de l'optimisation de l'écoulement de puissance.

### 3.1 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. Nous appliquons ici l'algorithme d'optimisation par essaim de particules étape par étape au problème d'écoulement de puissance optimale à un réseautest de la figure (3.1) Ce réseau est constitué de 30 jeux de barres, 41 lignes électriques, 6 générateurs, et 20 charges. Le tableau (3.1) montre les données techniques et économiques des six générateurs interconnectés. La puissance et la tension de base utilisées valent respectivement 100MVA et 135 kV.

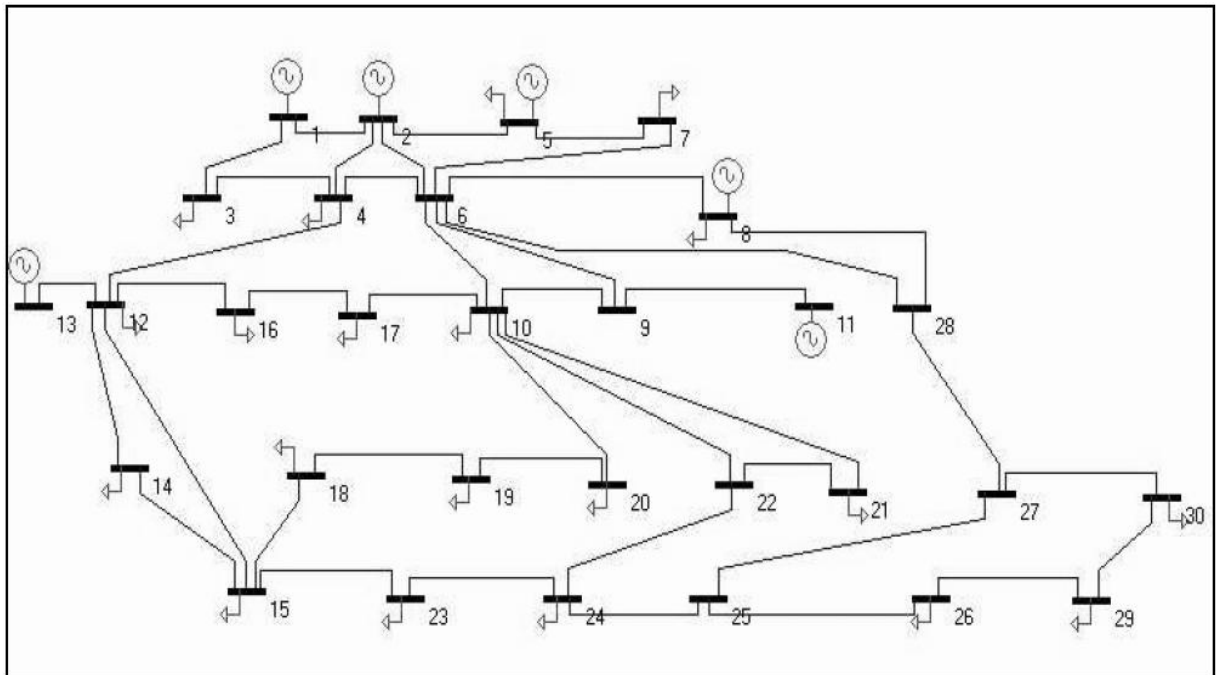


Figure 3.1 Schéma unifilaire du réseau électrique IEEE 30 bus

Tableau 3.1 Données techniques et économiques des six générateurs du réseau test

| Jb (i) | $P_{gimin}$<br>(MW) | $P_{gimax}$<br>(MW) | $\alpha_i$ | $\beta_i \cdot 10^{-2}$<br>(\$/MW.hr) | $\gamma_i \cdot 10^{-4}$<br>(\$/MW <sup>2</sup> .hr) |
|--------|---------------------|---------------------|------------|---------------------------------------|------------------------------------------------------|
| 1      | 50                  | 200                 | 0.00       | 200                                   | 37.5                                                 |
| 2      | 20                  | 80                  | 0.00       | 175                                   | 175.0                                                |
| 5      | 15                  | 50                  | 0.00       | 100                                   | 625.0                                                |
| 8      | 10                  | 35                  | 0.00       | 325                                   | 83.0                                                 |
| 13     | 10                  | 30                  | 0.00       | 300                                   | 250.0                                                |
| 15     | 12                  | 40                  | 0.00       | 300                                   | 250.0                                                |

Les données des jeux de barres de ce réseau figurent dans le tableau (3.2), sachant que les niveaux de tension des jeux de barres sont entre limite min. 0.9 p.u et limite max. 1.1 p.u. et les angles de phase ont une valeur 0.0°. Le tableau (3.3) montre les données des lignes et des transformateurs. Notons que la résistance  $r$ , la réactance  $x$  et la susceptance  $b$  ainsi que les niveaux de tension des jeux de barres sont donnés en unité relative.

**Tableau 3.2** Données des jeux de barres du réseau électrique IEEE 30 bus

| jb (i) | $V_i$<br>p.u | Angle<br>(°) | $P_{gi}$<br>MW | $Q_{gi}$<br>MVAR | $P_{di}$<br>MW | $Q_{di}$<br>MVAR | $Q_{imin}$<br>MVAR | $Q_{imax}$<br>MVAR |
|--------|--------------|--------------|----------------|------------------|----------------|------------------|--------------------|--------------------|
| 1      | 1.06         | 0.000        | 0.000          | 0.000            | 0.000          | 0.000            | -20                | 200                |
| 2      | 1.047        | 0.000        | 50.5846        | 0.000            | 21.7           | 12.70            | -20                | 100                |
| 3      | 0.000        | 0.000        | 0.000          | 0.000            | 2.4            | 1.20             | 0.000              | 0.000              |
| 4      | 0.000        | 0.000        | 0.000          | 0.000            | 7.6            | 1.60             | 0.000              | 0.000              |
| 5      | 1.020        | 0.000        | 18.5227        | 0.000            | 94.2           | 19.00            | -15                | 50                 |
| 6      | 0.000        | 0.000        | 0.000          | 0.000            | 0.000          | 0.000            | 0.000              | 0.000              |
| 7      | 0.000        | 0.000        | 0.000          | 0.000            | 22.8           | 10.90            | 0.000              | 0.000              |
| 8      | 1.029        | 0.000        | 18.0865        | 0.000            | 30.00          | 30.00            | -15                | 60                 |
| 9      | 0.000        | 0.000        | 0.000          | 0.000            | 0.000          | 0.000            | 0.000              | 0.000              |
| 10     | 0.000        | 0.000        | 0.000          | 0.000            | 5.8            | 2.00             | 0.000              | 0.000              |
| 11     | 1.060        | 0.000        | 10.4038        | 0.000            | 0.000          | 0.000            | -10                | 50                 |
| 12     | 0.000        | 0.000        | 0.000          | 0.000            | 11.20          | 7.50             | 0.000              | 0.000              |
| 13     | 1.060        | 0.000        | 13.2553        | 0.000            | 0.000          | 0.000            | -15                | 60                 |
| 14     | 0.000        | 0.000        | 0.000          | 0.000            | 6.20           | 1.60             | 0.000              | 0.000              |
| 15     | 0.000        | 0.000        | 0.000          | 0.000            | 8.20           | 2.50             | 0.000              | 0.000              |
| 16     | 0.000        | 0.000        | 0.000          | 0.000            | 3.5            | 1.80             | 0.000              | 0.000              |
| 17     | 0.000        | 0.000        | 0.000          | 0.000            | 9.00           | 5.80             | 0.000              | 0.000              |
| 18     | 0.000        | 0.000        | 0.000          | 0.000            | 3.20           | 0.90             | 0.000              | 0.000              |
| 19     | 0.000        | 0.000        | 0.000          | 0.000            | 9.50           | 3.40             | 0.000              | 0.000              |
| 20     | 0.000        | 0.000        | 0.000          | 0.000            | 2.20           | 0.70             | 0.000              | 0.000              |
| 21     | 0.000        | 0.000        | 0.000          | 0.000            | 17.50          | 11.20            | 0.000              | 0.000              |
| 22     | 0.000        | 0.000        | 0.000          | 0.000            | 0.000          | 0.000            | 0.000              | 0.000              |
| 23     | 0.000        | 0.000        | 0.000          | 0.000            | 3.20           | 1.60             | 0.000              | 0.000              |
| 24     | 0.000        | 0.000        | 0.000          | 0.000            | 8.70           | 6.70             | 0.000              | 0.000              |
| 25     | 0.000        | 0.000        | 0.000          | 0.000            | 0.000          | 0.000            | 0.000              | 0.000              |
| 26     | 0.000        | 0.000        | 0.000          | 0.000            | 3.50           | 2.30             | 0.000              | 0.000              |
| 27     | 0.000        | 0.000        | 0.000          | 0.000            | 0.000          | 0.000            | 0.000              | 0.000              |
| 28     | 0.000        | 0.000        | 0.000          | 0.000            | 0.000          | 0.000            | 0.000              | 0.000              |
| 29     | 0.000        | 0.000        | 0.000          | 0.000            | 2.40           | 0.90             | 0.000              | 0.000              |
| 30     | 0.000        | 0.000        | 0.000          | 0.000            | 10.60          | 1.90             | 0.000              | 0.000              |

Tableau 3.3 Données des branches du réseau électrique IEEE 30 bus

| La branche |     | R<br>Pu | X<br>pu | l/2B<br>pu | La ligne |     | R<br>Pu | X<br>pu | l/2B<br>pu |
|------------|-----|---------|---------|------------|----------|-----|---------|---------|------------|
| Départ     | Fin |         |         |            | Départ   | Fin |         |         |            |
| 1          | 2   | 0.0192  | 0.0575  | 0.0264     | 15       | 18  | 0.1073  | 0.2185  | 0.000      |
| 1          | 3   | 0.0452  | 0.1852  | 0.0204     | 18       | 19  | 0.0639  | 0.1292  | 0.000      |
| 2          | 4   | 0.0570  | 0.1737  | 0.0184     | 19       | 20  | 0.0340  | 0.0680  | 0.000      |
| 3          | 4   | 0.0132  | 0.0379  | 0.0042     | 10       | 20  | 0.0936  | 0.2090  | 0.000      |
| 2          | 5   | 0.0472  | 0.1983  | 0.0209     | 10       | 17  | 0.0324  | 0.0845  | 0.000      |
| 2          | 6   | 0.0581  | 0.1763  | 0.0187     | 10       | 21  | 0.0348  | 0.0749  | 0.000      |
| 4          | 6   | 0.0119  | 0.0414  | 0.0045     | 10       | 22  | 0.0727  | 0.1499  | 0.000      |
| 5          | 7   | 0.0460  | 0.1160  | 0.0102     | 21       | 22  | 0.0116  | 0.0236  | 0.000      |
| 6          | 7   | 0.0267  | 0.0820  | 0.0085     | 15       | 23  | 0.1000  | 0.2020  | 0.000      |
| 6          | 8   | 0.0120  | 0.0420  | 0.0045     | 22       | 24  | 0.1150  | 0.1790  | 0.000      |
| 6          | 9   | 0.000   | 0.2080  | 0.000      | 23       | 24  | 0.1320  | 0.2700  | 0.000      |
| 6          | 10  | 0.000   | 0.5560  | 0.000      | 24       | 25  | 0.1885  | 0.3292  | 0.000      |
| 9          | 11  | 0.000   | 0.2080  | 0.000      | 25       | 26  | 0.2544  | 0.3800  | 0.000      |
| 9          | 10  | 0.000   | 0.1100  | 0.000      | 25       | 27  | 0.1093  | 0.2087  | 0.000      |
| 4          | 12  | 0.000   | 0.2560  | 0.000      | 28       | 27  | 0.0000  | 0.3960  | 0.000      |
| 12         | 13  | 0.000   | 0.1400  | 0.000      | 27       | 29  | 0.2198  | 0.4153  | 0.000      |
| 12         | 14  | 0.1231  | 0.2559  | 0.000      | 27       | 30  | 0.3202  | 0.6027  | 0.000      |
| 12         | 15  | 0.0662  | 0.1304  | 0.000      | 29       | 30  | 0.2399  | 0.4533  | 0.000      |
| 12         | 16  | 0.0945  | 0.1987  | 0.000      | 8        | 28  | 0.0636  | 0.2000  | 0.0214     |
| 14         | 15  | 0.2210  | 0.1997  | 0.000      | 6        | 28  | 0.0169  | 0.0599  | 0.0065     |
| 16         | 17  | 0.0824  | 0.1923  | 0.000      |          |     |         |         |            |

### 3.2 Résultats de simulation

Le problème de ce test consiste à trouver le minimum de la fonction objective suivante :

$$F(x) = \sum_{i=1}^{ng} (\alpha_i + \beta_i P_{Gi} + \gamma_i P_{Gi}^2) \quad (3.1)$$

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

$$P_{Gi(min)} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi(max)} \quad (3.2)$$

Puisque la fonction objective est bornée supérieurement, on va choisir une fonction fitness à maximiser de la forme suivante :

$$fitness = \frac{F_{max}}{F(x)} \quad (3.3)$$

Il y a de nombreuses façons de choisir le coefficient  $F_{max}$ . Ce facteur peut être pris comme coefficient d'entrée, ou bien on peut lui affecter la plus grande valeur de  $F(x)$  dans la population actuelle. Nous envisagerons cette dernière possibilité dans cet exemple.

La méthode étudiée est testée sur le réseau de la figure (3.1). Le système est optimisé en utilisant la méthode d'optimisation par essaim de particules. Les paramètres utilisées pour exécuter cette méthode sont  $W = 0.1$ ,  $C_1 = 0.5$ ,  $C_2 = 0.5$ ,  $V_{inc} = 1.98$ ,  $nbr\_particles = 20$ ,  $max\_generation = 20$ , la tolérance est 0.0001 p.u, le maximum d'amplitude de tension de tous les jeux de barres est 1.1 p.u tandis que le minimum est 0.95. Le maximum d'angle de tous les jeux de barres est  $0^\circ$  tandis que le minimum est  $-14^\circ$ . le programme est exécuté dans l'environnement matlab 7. La comparaison des résultats (puissance active, le coût et les pertes de puissances) sont montrés dans le tableau (3.4) .

**Tableau 3.4** La comparaison des résultats du Newton-Raphson avec l'OEP

|                             |                    |                    | Méthode N.R | Méthode OEP |
|-----------------------------|--------------------|--------------------|-------------|-------------|
| J.B                         | $P_{gmin}$<br>(MW) | $P_{gmax}$<br>(MW) | $P_g$ (MW)  | $P_g$ (MW)  |
| 1                           | 50                 | 200                | 123.99      | 176.7303    |
| 2                           | 20                 | 80                 | 41.58       | 48.8301     |
| 5                           | 15                 | 50                 | 45.56       | 21.4738     |
| 8                           | 10                 | 35                 | 35.00       | 21.6481     |
| 11                          | 10                 | 30                 | 21.90       | 12.0937     |
| 13                          | 12                 | 40                 | 20.96       | 12.0000     |
| Puissance totale générée    |                    |                    | 289.02      | 292.77      |
| Puissance totale Demandée   |                    |                    | 283.40      | 283.40      |
| Pertes totales de Puissance |                    |                    | 5.62        | 9.3760      |
| Coût de production (\$/h)   |                    |                    | 859.53      | 801.84      |

### 3.3 Conclusion

La méthode d'optimisation par essaim de particule a donné des résultats plus satisfaisantes que la méthode classique de Newton-Raphson donc la nécessité de son application à ce genre de problème .

### **Conclusion générale**

Après l'étude accomplie dans ce mémoire concernant l'optimisation de l'écoulement de puissance par essaim de particules, on peut conclure que l'OEP est bien adaptée à la détermination des valeurs optimales des puissances générées par les centrales interconnectées pour avoir le minimum coût possible ainsi que le meilleur profit.

Une des particularités importantes des métaheuristiques, réside dans l'absence d'hypothèses particulière sur la régularité de la fonction objective. Aucune hypothèse sur la continuité de cette fonction n'est requise, ses dérivées successives ne sont pas nécessaires, ce qui rend très vaste le domaine d'application de ces métaheuristiques dans les systèmes électriques.

La formulation d'un modèle mathématique convenable du réseau électrique décrivant d'une façon suffisante les relations entre les tensions et les puissances dans le système interconnecté, puis la spécification des limites d'énergie et des tensions qui doivent être appliquées aux différents jeux de barres est un pas très essentiel dans la modélisation des problème d'optimisation de l'écoulement de puissance.

Enfin, perspective aux futurs on peut utilise l'OEP sur un problème se focaliseront sur la prise en compte des contraintes des régimes transitoires des réseaux électriques (les pannes des lignes et des transformateurs et les surcharges des lignes).

**Programmes executes:****1) Data base 30 JDR**

clear;

clc;

```

%          IEEE 30-BUS TEST SYSTEM
%          Bus Bus  Voltage Angle  ---Load--- -----
Generator----- Injected
%          No  code Mag.    Degree  MW      Mvar  MW  Mvar Qmin
Qmax      Mvar
global busdata linedata gencost Pdt
basemva=100;
busdata=[1  1  1.06  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0
0  0
          2  2  1.043  0.0  21.70  12.7  40.0  0.0 -40
50  0
          3  0  1.0  0.0  2.4  1.2  0.0  0.0  0
0  0
          4  0  1.06  0.0  7.6  1.6  0.0  0.0  0
0  0
          5  2  1.01  0.0  94.2  19.0  0.0  0.0 -40
40  0
          6  0  1.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0
0  0
          7  0  1.0  0.0  22.8  10.9  0.0  0.0  0
0  0
          8  2  1.01  0.0  30.0  30.0  0.0  0.0 -10
60  0
          9  0  1.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0
0  0
         10  0  1.0  0.0  5.8  2.0  0.0  0.0 -6
24 19
         11  2  1.082  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0
0  0
         12  0  1.0  0  11.2  7.5  0  0  0
0  0
         13  2  1.071  0  0  0.0  0  0 -6
24 0
         14  0  1  0  6.2  1.6  0  0  0
0  0
         15  0  1  0  8.2  2.5  0  0  0
0  0
         16  0  1  0  3.5  1.8  0  0  0
0  0
         17  0  1  0  9.0  5.8  0  0  0
0  0
         18  0  1  0  3.2  0.9  0  0  0
0  0
         19  0  1  0  9.5  3.4  0  0  0
0  0

```

```

0      20  0  1  0  2.2  0.7  0  0  0
0      0
0      21  0  1  0  17.5  11.2  0  0  0
0      0
0      22  0  1  0  0  0.0  0  0  0
0      0
0      23  0  1  0  3.2  1.6  0  0  0
0      0
0      24  0  1  0  8.7  6.7  0  0  0
0  4.3
0      25  0  1  0  0  0.0  0  0  0
0      0
0      26  0  1  0  3.5  2.3  0  0  0
0      0
0      27  0  1  0  0  0.0  0  0  0
0      0
0      28  0  1  0  0  0.0  0  0  0
0      0
0      29  0  1  0  2.4  0.9  0  0  0
0      0
0      30  0  1  0  10.6  1.9  0  0  0
0      0];

```

```

%
%          Bus bus   R      X      1/2 B      Line code
%          nl  nr   p.u.  p.u.  p.u.      = 1 for lines
%          > 1 or < 1 tr. tap at
bus nl
linedata=[1  2  0.0192  0.0575  0.02640  1
          1  3  0.0452  0.1852  0.02040  1
          2  4  0.0570  0.1737  0.01840  1
          3  4  0.0132  0.0379  0.00420  1
          2  5  0.0472  0.1983  0.02090  1
          2  6  0.0581  0.1763  0.01870  1
          4  6  0.0119  0.0414  0.00450  1
          5  7  0.0460  0.1160  0.01020  1
          6  7  0.0267  0.0820  0.00850  1
          6  8  0.0120  0.0420  0.00450  1
          6  9  0.0      0.2080  0.0      0.978
          6 10  0      .5560  0      0.969
          9 11  0      .2080  0      1
          9 10  0      .1100  0      1
          4 12  0      .2560  0      0.932
          12 13  0      .1400  0      1
          12 14  .1231  .2559  0      1
          12 15  .0662  .1304  0      1
          12 16  .0945  .1987  0      1
          14 15  .2210  .1997  0      1
          16 17  .0824  .1923  0      1
          15 18  .1073  .2185  0      1
          18 19  .0639  .1292  0      1
          19 20  .0340  .0680  0      1

```

```

10 20 .0936 .2090 0 1
10 17 .0324 .0845 0 1
10 21 .0348 .0749 0 1
10 22 .0727 .1499 0 1
21 22 .0116 .0236 0 1
15 23 .1000 .2020 0 1
22 24 .1150 .1790 0 1
23 24 .1320 .2700 0 1
24 25 .1885 .3292 0 1
25 26 .2544 .3800 0 1
25 27 .1093 .2087 0 1
28 27 0 .3960 0 0.968
27 29 .2198 .4153 0 1
27 30 .3202 .6027 0 1
29 30 .2399 .4533 0 1
8 28 .0636 .2000 0.0214 1
6 28 .0169 .0599 0.065 1];

gencost = [1 0.00375 2 0 50 200;
2 0.0175 1.75 0 20 80;
5 0.0625 1 0 15 50;
8 0.0083 3.25 0 10 35;
11 0.025 3 0 10 30;
13 0.025 3 0 12 40];

Pdt=283.4;

l=gencost(2:6,5)';
u=gencost(2:6,6)';
ran=[l' u'];
nn=length(gencost(:,1))-1;
Pdef = [20 600 20 2 2 0.9 0.4 1500 1e-6 5000 NaN 0 0];
[OUT]=pso_Trelea_vectorized('OEP',nn,1,ran,0,Pdef);
out=abs(OUT);
P1=out(1:nn)
[F1 P VV]=OEP(P1')
TL=sum(P)-Pdt

```

### Programme OEP:

```

function [F1 PP vv]=OEP(x)
global busdata linedata gencost Pdt
basemva=100;
mm1=length(x(:,1));
nn1=length(gencost(:,1));
for ii=1:mm1
    for i=1:nn1-1;
        xx=gencost(i+1,1);
        busdata(xx,7)=x(ii,i);
    end
[Pgg P vv]=pflow(busdata,linedata);
if Pgg(1)>gencost(1,6);
    Pgg(1)=gencost(1,6);
else

```

```
end
TL=basemva*sum(P);
if min(vv)<0.95
    lam2=100;
else lam2=0;
end
lam=100*abs(sum(Pgg)-TL-Pdt)+lam2;
a1=gencost(:,2);
b1=gencost(:,3);
c1=gencost(:,4);
d0=gencost(:,7);
e0=gencost(:,8);
f0=gencost(:,9);
g0=gencost(:,10);
h0=gencost(:,11);

F1(ii,1)=(Pgg.*Pgg)*a1 + Pgg*b1+sum(c1)+ lam;

VV(ii,:)=vv;
PP(ii,:)=Pg;
end
```

**BIBLIOGRAPHIE**

- [1] SAYAH. S Application des ensembles flous a la répartition optimale de la puissance dans les réseaux électriques , M. magister L'université Ferhat Abbas de Sétif , années 2005.
- [2] R.B. Squires, "Economic dispatch of generation directly from power system voltages and admittance", IEEE Transactions, pp.1235-1244, PAS-79(3), 1961.
- [3] J. Carpentier, "Contribution à l'étude du Dispatching Economique", Bulletin Société Française Electriciens, Vol. 3, August 1962.
- [4] LABDANI. R Optimisation de L'écoulement de puissance dans un marche de l'électricité libre par essais de particules ,Centre universitaire Larbi Ben M'hidi , Oum El-Bouaghi , années 2007
- [5] T. Bouktir, "Application de la Programmation Orientée Objet à l'Optimisation de l'Ecoulement de Puissance", Thèse Doctorat, Université de Batna , 2004.
- [6] ANGEL É., "La rugosité des paysages : une théorie pour la difficulté des problèmes d'optimisation combinatoire relativement aux métaheuristiques", thèse de doctorat, Université de Paris-Sud, U. F. R. scientifique d'Orsay, Orsay, 1998.
- [7] Maurice Clerc et Patrick Siarry, "Une nouvelle métaheuristique pour l'optimisation difficile : la méthode des essais particulières", Séminaire « L'optimisation par essaim de particules», Paris, 2003.

### Résumé

Le problème de l'optimisation de l'écoulement de puissance rencontré dans l'industrie de l'électricité devient de plus en plus complexe depuis les changements considérables et la restructuration de cette industrie. IL devient alors un problème très complexe non linéaire avec beaucoup de contraintes linéaire et non linéaire. Comme alternative aux méthodes d'optimisation classiques, un ensemble de méthodes métaheuristiques inspiré de la nature sont considérées comme méthodes qui peuvent trouver des solutions optimales globales ou quasi-globales pour les problèmes d'optimisation dans les systèmes électriques. L'objectif de ce travail est le développement d'un outil d'optimisation de l'écoulement de puissance par les essais de particules.

**Mots clés:** Optimisation de l'écoulement de puissance, Méthodes métaheuristiques, Optimisation par essais de particules.

### ملخص

يعد مشكل السريان الأمثل للطاقة الكهربائية من أصعب المشاكل وأعقدها إثر التغيرات والتطورات التي شهدتها الكهرباء الصناعية خاصة بعد إعادة النظر في هيكلية هذه . السريان الأمثل للطاقة الكهربائية هو مشكل جد معقد غير خطي ترفقه عدة إجهادات خطية وغير خطية. لإيجاد حلول مثالية لمثل هذه المشاكل وكبديل للطرق الكلاسيكية المستعملة توجد عدة طرق مستوحاة من الطبيعة تعتمد أساسا على التعاون المشترك بين الحيوانات في التنقل والبحث عن مصدر الأكل ومن بين هذه الطرق اخترنا طريقة سرب الجزيئات المثالية .الهدف من هذا العمل هو إنشاء تقنية السريان الأمثل للطاقة باستعمال سرب.

**الكلمات المفتاحية:** السريان الأمثل للطاقة ، سرب الجزيئات المثالي , طرق وراثية.