



## Mémoire de Projet de Fin d'Études

présenté par

CHANANE ABDALLAH

&

GHOUL YOUNES

Pour l'obtention du diplôme Master en Électrotechnique option Machines Électriques

---

### Thème

---

## Écoulement de Puissance Optimal Dans Un Réseau Électrique

---

Proposé par : Dr. BELAZZOUG Messaoud

Année Universitaire 2012-2013

## ملخص

الهدف الرئيسي لهذه الأطروحة هو تطبيق الكشف عن مجريات الأمور الفوقيه التقنية سرب الجسيمات الأمثل لحل المشكلة الأمثل من تدفق الطاقة الذي يعتبر مشكلة كبيرة غير الخطية مع القيود لتعظيم دالة الهدف ونلاحظ مع أساليب الكشف عن مجريات الأمور الوصفية يمكن أن نجد متجه الحل الأمثل العالمية أو شبه الأمثل فقط باستخدام المعلومات على وظائف الأهداف وقد تم التحقق من صحة الاختبارات على شبكات معيار. 14. 30 و 57 عقدة .

سرب الجسيمات, الاستفادة المثلثي في تدفق الطاقة، تدفق الطاقة

## Résumé

L'objectif principale de cette thèse est l'application d'une technique méta heuristique "Optimisation par Essaims de Particules (PSO)", pour résoudre le problème d'optimisation de l'écoulement de puissance(OPF) qui est considéré comme un large problème d'optimisation non linéaire avec contraintes afin d'optimiser une fonction objectif. On remarque qu'avec les méthodes méta heuristiques on peut trouver un vecteur solution optimal global ou quasi-optimal en utilisant seulement les informations sur les fonctions objectifs. . Des tests ont été validés sur des réseaux standards IEEE 14 ,30 et 57 jeux de barres.

**Mots clés :** Écoulement de puissance optimal (**OPF**) .

Optimisation par essaim de particule (**PSO**).

## Abstract

The main objective of this thesis is the application of technical meta heuristic: Particle Swarm Optimization (PSO) to solve the optimization problem of the power flow (OPF) is considered a large problem nonlinear optimization with constraints to maximize an objective function. We note with meta heuristic methods we can find a global optimal solution vector or quasi-optimal using only the information on the objectives functions. . Tests have been validated on standard IEEE 14,30 and 57 networks bus bars.

## Keywords:

Optimal Power Flow (**OPF**); Particle swarm optimization (**PSO**).

## I.1 Introduction

L'étude de l'écoulement de puissance permet d'avoir la solution des grandeurs d'un réseau électrique en fonctionnement normal équilibré en régime permanent. Ces grandeurs sont les tensions aux nœuds, les puissances injectées aux nœuds et celles qui transitent dans les lignes. Les pertes et les courants s'en déduisent.

Les études de l'écoulement de puissance permettent de planifier la construction et l'extension des réseaux électriques ainsi que la conduite et le contrôle de ces réseaux.

Un grand nombre de mathématiciens, d'informaticiens et d'ingénieurs ont consacré des années de leur carrière à étudier les méthodes de calcul de l'écoulement de puissance. Il n'y a qu'à voir le nombre de publications dans ce domaine pour apprécier l'effort qu'ils ont développé.

Avant 1929 [3], les calculs de l'écoulement de puissance (appelé power flow ou load flow) se faisaient à la main. En 1929, des calculateurs de réseaux (de Westing House) ou des analyseurs de réseaux (de General Electric) furent employés pour les calculs d'écoulement de puissance. Ce n'est qu'en 1956 que fut développée la première méthode adéquate par Ward et Hale [4].

Le but du calcul de l'écoulement de puissance est de déterminer, en régime permanent équilibré, les modules et phases des tensions en tout point du réseau en utilisant ces valeurs, on peut calculer les puissances actives et réactives transitant par les lignes de transport et les transformateurs ainsi que les pertes de transmission.

Le but de ce chapitre est de faire une définition générale de tous ce qui englobe notre travail, commençons par le réseau électrique jusqu'au aboutir le problème de l'écoulement de puissance.

## I. 2 Caractéristiques des réseaux électriques

### I.2.1 Centrales électriques

Les caractéristiques technico-économiques des centrales électriques sont déterminantes pour leur exploitation. Trois types de caractéristiques ont une influence sur l'exploitation d'une centrale électrique à court terme [5] :

- son coût de production
- ses contraintes techniques
- sa fiabilité

### I.2.2 Réseau de transport

Le rôle principal du réseau de transport est la liaison entre les grands centres de consommation et les moyens de productions. Ce rôle est particulièrement important car l'énergie électrique ne peut pas être stockée à grande échelle [6].

### I.2.3 La consommation électrique

Connaître la consommation de l'électricité dans une période future est important pour l'exploitation du système électrique. La consommation d'électricité varie en permanence, au cours des saisons, au cours d'une journée, en suivant le rythme de l'activité quotidienne et économique et en temps réel en fonction de la météo du moment.

### I.2.4 Équilibre du système électrique

L'équilibre du système électrique est nécessaire parce qu'il faut que la puissance injectée (Production) soit égale à la puissance soutirée (consommation) plus les pertes générées sur le réseau. Ainsi, les systèmes électriques subissent-ils une forte contrainte d'équilibre en temps réel entre les injections et les soutirages. Cet équilibre production-consommation est nécessaire tout d'abord car les systèmes électriques à courant alternatif

fonctionnent comme une «grande» machine synchronisée. Le fonctionnement de cette machine est très Complexé et particulièrement vulnérable aux instabilités. Ces instabilités se produisent principalement quand l'équilibre production-consommation n'est pas respecté [7].

### I.2.5 Limites thermiques des lignes électriques en fonctionnement normal

Les lignes électriques et les transformateurs ont des capacités de transport physiquement Limitées. Ces limites sont principalement thermiques. Les limites thermiques sont liées à L'échauffement des lignes lors du passage du courant électrique. L'effet Joule entraîne une transformation de puissance électrique en puissance thermique. Cette énergie thermique Provoque une augmentation de la température de la ligne. Ce changement de température modifie les caractéristiques mécaniques de la ligne et provoque une dilatation des conducteurs [8].

## I.3 Structures topologiques des réseaux électriques

Le concept de réseau englobe la totalité des installations, notamment les lignes aériennes, les câbles, les transformateurs et les appareils avec leurs moyens de contrôle et de sécurité, les interrupteurs, etc., nécessaires au transport et à la distribution de l'énergie électrique. On distingue trois structures de réseau. D'une façon générale, ce sont les caractéristiques des sources de production, les besoins des utilisateurs et l'expérience d'exploitation qui est ajoutés à des considérations économiques, conduisent à choisir la structure topologique des réseaux électriques.

### I.3.1 Réseau radial ou en étoile

Leur configuration est celle rencontrée dans l'exploitation des réseaux de distribution dont les sources de tension sont constituées d'un ou plusieurs transformateur(s) abaisseur(s).Il représente le réseau sous sa forme la plus simple. Les lignes partent d'un point central, par exemple une station de transformation locale, et rayonnent depuis celui-ci. Si une perturbation se produit sur ce type de réseau, l'alimentation électrique de tous les clients rattachés à ce rayon défectueux est interrompue, jusqu'à ce que la panne soit réparée. La panne d'une station de transformation peut paralyser tout un quartier.

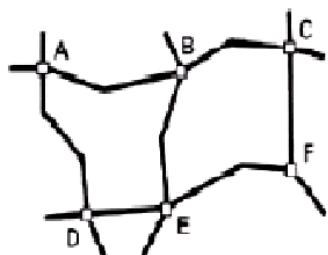
### I.3.2 Réseau en boucle

Un réseau bouclé est un réseau maillé simplifié présentant un certain nombre de boucles fermées. Chacune de boucle contient un nombre limité de sources. L'assemblage en boucle des lignes permet de mettre hors circuit une partie de la ligne défectueuse grâce à ses points de séparation. L'alimentation électrique est interrompue uniquement dans cette partie jusqu'à la réparation de la panne ; le reste du réseau peut continuer à fonctionner.

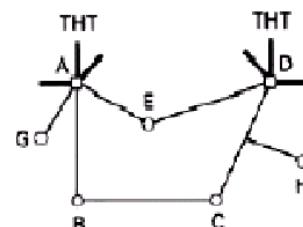
### I.3.3 Réseau maillé

Ce sont des réseaux dans lesquels les liaisons forment des boucles dont la majorité a des côtés communs, réalisant ainsi une structure semblable aux mailles d'un filet. Dans ces Réseaux, les transits d'énergie dans les différentes branches peuvent facilement échapper à tout contrôle précis.

Cette structure est généralement utilisée pour le transport. Lorsque des lignes en boucle sont regroupées pour relier des points très éloignés les uns des autres, Elles forment un réseau maillé. Les réseaux maillés sont surtout construits et exploités là où la sécurité d'approvisionnement d'un grand nombre de clients peut être compromise par une perturbation, comme c'est particulièrement le cas pour les réseaux de transport et de distribution haute tension.



a) Exemple de structure maillée



b) exemple de structure bouclée



d) exemple de structure radiale

Figure 1.1 Structure topologique des réseaux électriques.

## I.4 Architecture des réseaux électriques

Les réseaux électriques sont divisés en trois grandes catégories ; premièrement le réseau de transport puis le réseau de répartition enfin le réseau de distribution. Tout ça est expliqué au paragraphe suivant. L'architecture d'un réseau électrique est plus ou moins complexe suivant le niveau de tension, la puissance demandée et la sûreté d'alimentation requise. Nous allons identifier les différents niveaux de tension ainsi les puissances. Alors Le réseau de transport et d'interconnexion à très haute tension (400 kV, 225 kV) forme un ensemble maillé sur lequel sont raccordés les grandes centrales (>300MW). Il est suivi par un réseau de répartition à haute tension (60 kV à 150 kV) exploité soit en boucle fermée, soit le plus souvent en boucle ouverte et sur lequel se raccordent des centrales électriques de moindre puissance, ainsi que les grands utilisateurs industriels (>80 MW). On trouve ensuite un réseau de distribution (10kV, 30kV, 400 V) desservant la clientèle (petites et moyennes entreprises, commerces, secteurs résidentiels, etc.) à travers des postes de répartition. Ce réseau de distribution est généralement de structure radiale, éventuellement bouclable dans les zones urbaines pour assurer la continuité de service. Et enfin le réseau basse tension (380V, 220V) de structure radiale alimentant les consommateurs (en triphasé ou en monophasé).

## I.5 Modélisation des composants du réseau électrique

Un réseau électrique (transport ou distribution) contient un ensemble de composants (générateurs, lignes de transmission, transformateurs de puissance, charges électriques) qu'il faut modéliser pour pouvoir établir les équations qui régissent le comportement du système.

### I.5.1. Générateurs

Dans le cas de 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 injecté au jeu de barres et la tension aux bornes du générateur soient maintenues constantes. La puissance active délivrée par le générateur est réglée à travers le contrôle de la turbine, qui doit être dans les limites de la capacité du système turbine – générateur. La tension est liée principalement à l'injection de la puissance réactive au jeu de barres de production et comme le générateur doit fonctionner dans les limites de sa courbe de capacité réactive  $Q(P)$ , il n'est pas possible de régler la tension en dehors de certaines limites admissibles [9].

### I.5.2 Lignes et câbles de transmission

- Le modèle en  $\pi$  est une représentation de la ligne de transmission (Fig. 1.2) .les paramètres spécifiques pour des lignes ou des câbles avec une configuration donnée, dépendent de la nature des conducteurs et de leurs géométries les paramètres suivantes de ce modèle sont les suivantes [9]. :
- L'impédance série par phase  $\bar{Z}_{km}$  (unité  $\Omega$ ) :

$$\bar{Z}_{km} = r_{km} + jx_{km} \quad (1.1)$$

Avec :

$r_{km}$  La résistance série de la ligne entre les jeux de barres k et m.

$x_{km}$  La réactance série de la ligne entre les jeux de barres k et m.

- L'admittance shunt par phase  $\bar{y}_{km}^{sh}$  (unité : Siemens) :

$$\bar{y}_{km}^{sh} = g_{km}^{sh} + jb_{km}^{sh} \quad (1.2)$$

Avec :

$g_{km}^{sh}$  La conductance shunts de la ligne entre les jeux de barres k et m.

$b_{km}^{sh}$  La susceptance shunts de la ligne entre les jeux de barres k et m.

- L'expression de la conductance et la susceptance peuvent être écrite comme suit :

$$g_{km} = \frac{r_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} \quad (1.3)$$

$$b_{km} = -\frac{x_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} \quad (1.4)$$

- L'admittance série  $\bar{y}_{km}$  des lignes, qui est donnée par :

$$\bar{y}_{km} = g_{km} + jb_{km}. \quad (1.5)$$

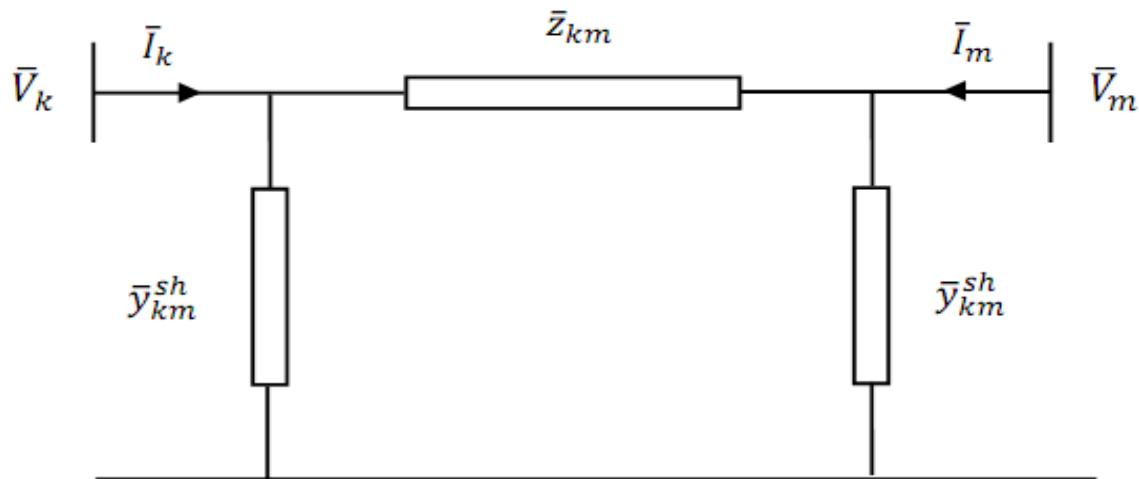


Figure 1.2 : Modèle en  $\pi$  d'une ligne de transmission

Note : Dans la plupart des cas, la valeur de  $g_{km}^{sh}$  est si petite qu'on peut la négliger.

- l'admittance est l'inverse de l'impédance  $\bar{y}_{km} = \frac{1}{\bar{Z}_{km}} = \frac{1}{r_{km} + jx_{km}}$  (1.6)
- L'expression des courants dans le modèle en  $\Pi$  s'écrit sous la forme suivante :

$$\bar{I}_{km} = \bar{y}_{km}(\bar{V}_k - \bar{V}_m) + \bar{y}_{km}^{sh} \bar{V}_k \quad (1.7)$$

$$\bar{I}_{mk} = \bar{y}_{mk}(\bar{V}_m - \bar{V}_k) + \bar{y}_{km}^{sh} \bar{V}_m \quad (1.8)$$

- sous forme matricielle on peut écrire :

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_{km} \\ \bar{I}_{mk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{y}_{km} + \bar{y}_{km}^{sh} & -\bar{y}_{km} \\ -\bar{y}_{km} & \bar{y}_{km} + \bar{y}_{km}^{sh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_k \\ \bar{V}_m \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

### I.5.3. Transformateurs de puissance

Le transformateur de puissance est un élément fondamental des systèmes électriques, permettant d'acheminer l'énergie, de manière économique avec un rendement élevé et de faible chute de tension.

Les transformateurs de puissance haute tension sont munis de prises réglables en charge (on peut appeler transformateur régulateur en charge) afin de maintenir un niveau de tension acceptable et d'assurer la régulation de la puissance active et réactive transitant sur les lignes de transports.

Ce type de transformateur est généralement représenté par une admittance branchée en série avec un transformateur idéal d'un rapport de transformation complexe [9] (Fig. 1.3).

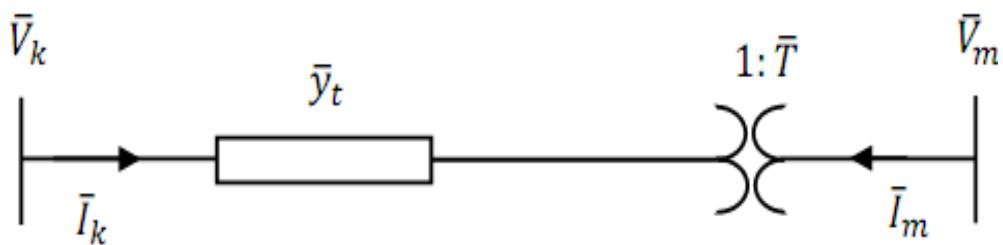


Figure 1.3 : Modèle du transformateur muni de prises réglables en charge

L'équation des tensions nodales du transformateur peuvent être écrites sous la forme :

$$\bar{I}_k = \bar{y}_t \cdot \bar{v}_k - (\bar{y}_t / \bar{T}) \bar{v}_m \quad (1.10)$$

$$\bar{I}_m = -(\bar{y}_t / \bar{T}^*) \bar{v}_k + (\bar{y}_t / T^2) \bar{v}_m \quad (1.11)$$

- Et Sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_k \\ \bar{I}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{y}_t & -\bar{y}_t / \bar{T} \\ -\bar{y}_t / \bar{T}^* & +\bar{y}_t / T^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{v}_k \\ \bar{v}_m \end{bmatrix} \quad (1.12)$$

où

- $\bar{y}_t$  est l'admittance du transformateur exprimée en unités relatives p.u. (per unit).
- le rapport de transformation sous forme complexe, est représenté par :  $\bar{T} = T e^{j\phi_t}$
- $\phi_t$  : l'angle de déphasage introduit par le transformateur entre les jeux de barres k et m.

On note que dans la Figure 1.3, le régleur du transformateur est disposé du côté du jeu de barres m.

Dépendant du rapport de transformation  $\bar{T}$  s'il est réel ou complexe, le transformateur est dit en phaseur ( $\phi_t = 0$ ) ou déphaseur ( $\phi_t \neq 0$ ). Dans le cas où  $\bar{T}$  est réel, le circuit équivalent du transformateur en phase est représenté dans la Figure 1.4 [7]. Donc, le transformateur est facilement intégré dans le modèle du réseau.

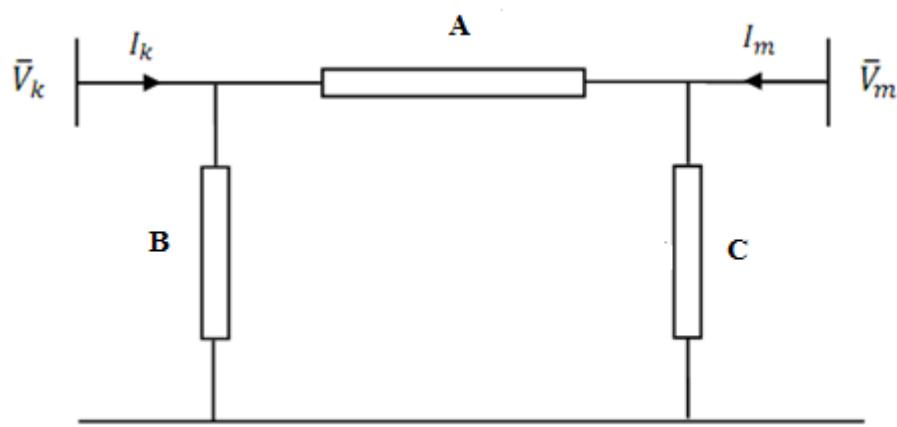


Figure 1.4: Circuit équivalent du transformateur en phase

Avec:

$$A = \frac{\bar{y}_t}{T}$$

$$B = \left( \frac{T-1}{T} \right) \cdot \bar{y}_t$$

$$C = \left( \frac{1-T}{T^2} \right) \cdot \bar{y}_t$$

#### I.5.4. Charges électriques

Les charges sont connectées au réseau électrique à travers des transformateurs (munis de prises réglables en charge) où, le niveau de tension de la charge est maintenu pratiquement constant.

Les charges sont modélisées par des injections négatives de puissance dans les jeux de barre. La modélisation statique est mieux adaptée aux programmes d'écoulement de puissance [9].

#### I. 5.5 Éléments 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.

Chaque élément connecté au réseau sera modélisé, suivant le cas, par une admittance équivalente ou une injection de puissance. [9].

### I.5.6 Modèles des nœuds du réseau

Dans un réseau électrique on distingue trois types de nœud :

- **Nœud de charge (PQ)** : c'est un nœud connecté directement avec la charge, il ne possède aucune source d'énergie. Les puissances active et réactive sont considérées connues.
- **Nœud générateur (PV)** : c'est un nœud connecté directement avec un générateur ou une source d'énergie réactive. la puissance active et la tension sont considérées connues
- **Nœud de référence (slack bus)** : c'est un nœud connecté avec un générateur relativement puissant il est considéré dans le calcul d'écoulement de puissance afin de compenser les pertes actives et assurer l'égalité entre la demande et la génération de la puissance active. Dans un nœud référence, l'amplitude et l'angle de la tension sont supposés connus.
  - la figure suivante schématise un réseau électrique à (5) nœuds [10].

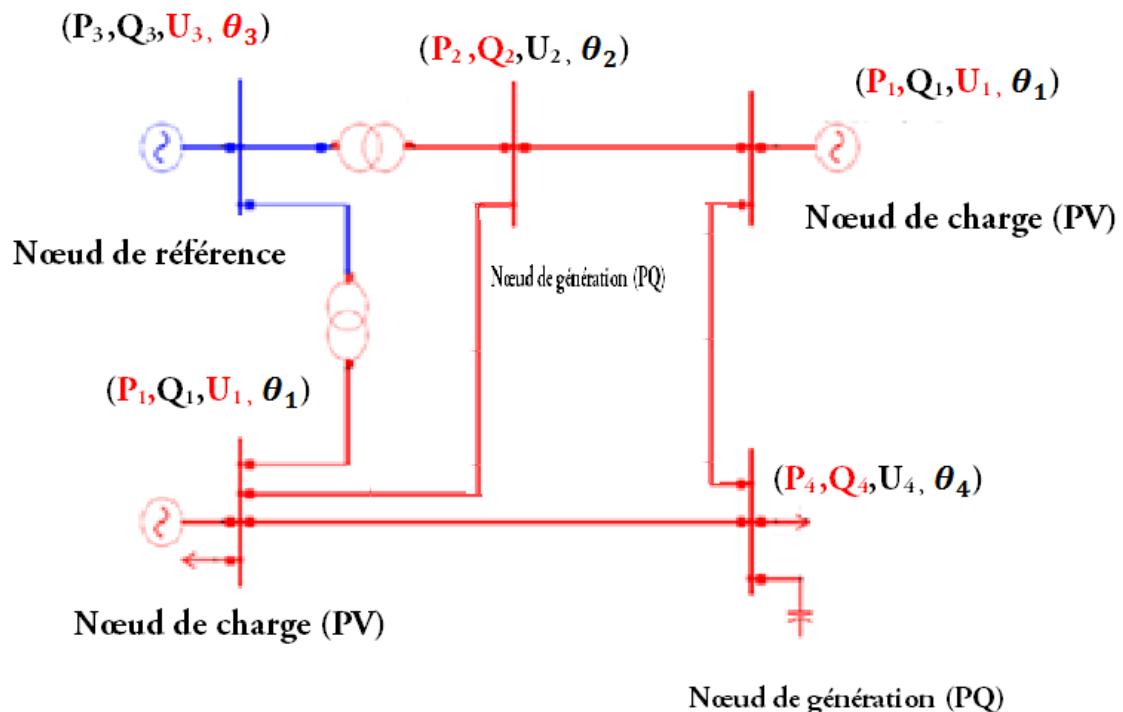


Figure 1.5 Réseau à cinq (5) nœuds

\*

Ce schéma à 5 nœud contient :

- Des nœuds PV, PQ, slack bus (référence)
- Trois générateurs
- Deux transformateurs.

## I.6 Formulation des équations de l'écoulement de puissance

Dans cette partie, toutes les grandeurs sont exprimées en unités relatives (per unit ou p.u.), à partir d'une puissance apparente triphasée de base et de la tension nominale composée de chaque jeu de barres, avec une tension de base par niveau de tension.[10]

Pour un réseau électrique avec N jeux de barres, les équations des tensions natales sont exprimées par la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \vdots \\ \bar{I}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{11} & \bar{Y}_{12} & \cdots & \bar{Y}_{1N} \\ \bar{Y}_{21} & \bar{Y}_{22} & \cdots & \bar{Y}_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{Y}_{N1} & \bar{Y}_{N2} & \cdots & \bar{Y}_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \\ \vdots \\ \bar{V}_N \end{bmatrix} \quad (1.13)$$

-Ou bien sous cette forme d'équation :

$$I_{BUS} = Y_{bus} V_{bus} \quad (1.14)$$

Avec :

- $I_{bus} = [\bar{I}_1 \cdots \bar{I}_N]^T$ : Le vecteur des courants complexes injectés à chaque jeu de barres ( $N \times 1$ )
- $V_{bus} = [\bar{V}_1 \cdots \bar{V}_N]^T$ : Le vecteur des tensions complexes de chaque jeu de barres ( $N \times 1$ ).
- $Y_{bus}$  : La matrice admittance nodale du système ( $N \times N$ ).

-La matrice admittance nodale est formée sur la base des composants du réseau électrique (lignes de transmission, transformateurs, batteries de condensateurs et réactances).

- Chaque composant du réseau peut être connecté entre deux jeux de barres i et m, ou entre un jeu de barres i et le jeu de barres de référence (jeu de barres 0).

- Chaque élément diagonal de la matrice (1.13) est égal à la somme des admittances de tous les composants connectés au jeu de barres i.
- Chaque élément non diagonal est égal les admittances de tous les composants connectés entre le jeu de barres i et m (négative).

$$\bar{Y}_{ii} = \sum_{m=0, m \neq i}^N \bar{y}_{im}^{serie} + \sum_{m=0, m \neq i}^N \bar{y}_{im}^{sch} + \bar{y}_i^{sch} \quad (1.15)$$

$$\bar{Y}_{im} = -\bar{y}_{im}^{serie} \quad (1.16)$$

- Le courant injecté à un jeu de barres i, peut s'écrire :

$$\bar{I}_i = \sum_{m=1}^N \bar{Y}_{im} \bar{V}_m \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1.17)$$

- Les grandeurs complexes  $\bar{V}_m$  et  $\bar{Y}_{im}$  sont représentées sous la forme suivante :

$$\bar{V}_m = V_m \cos \delta_m + j V_m \sin \delta_m = e_m + j f_m \quad (1.18)$$

$$\bar{Y}_{im} = Y_{im} \cos \theta_{im} + j Y_{im} \sin \theta_{im} = G_{im} + j B_{im} \quad (1.19)$$

Où :

-  $\delta_m$  est la phase de la tension au jeu de barres m (mesurée par rapport à une certaine référence des phases),  $\theta_{im}$  est la phase (ou l'argument) de l'élément i m de la matrice admittance,  $\bar{V}_m$  la tension du jeu de barres m, avec  $e_m$  et  $f_m$  sont, respectivement, la partie réelle et la partie imaginaire de  $\bar{V}_m$ .

-  $\bar{Y}_{im}$  c'est l'admittance de la branche im avec

-  $G_m$  et  $B_m$  sont, respectivement, la partie réelle (la conductance) et la partie imaginaire (la susceptance) de  $\bar{Y}_{im}$ .

-L'expression de la puissance apparente  $\bar{S}_i$  injectée à un jeu de barres i est exprimée par :

$$\bar{S}_i = P_i + jQ_i = \bar{V}_i \bar{I}_i^* = \bar{V}_i \sum_{m=1}^N \bar{Y}_{im}^* \bar{V}_m^* \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1.20)$$

Où :  $P_i$  et  $Q_i$  sont, respectivement, l'injection des puissances active et réactive au jeu de barres i. En remplaçant (1.18) et (1.19) dans (1.20), on a :

$$P_i = \sum_{m=1}^N V_i V_m Y_{im} \cos(\delta_i - \delta_m - \theta_{im}), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1.21)$$

$$Q_i = \sum_{m=1}^N V_i V_m Y_{im} \sin(\delta_i - \delta_m - \theta_{im}), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1.22)$$

Cet ensemble de  $2N$  équations non linéaires constitue la forme polaire des équations de l'écoulement de puissance. Pour un profil de tension et une topologie du réseau donnés, ces équations donnent les injections de la puissance active  $P_i$  et la puissance réactive  $Q_i$  au niveau d'un jeu de barres i. Ces dernières sont décrites par les relations :

$$P_i = P_{Gi} - P_{Di} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1.23)$$

$$Q_i = Q_{Gi} - Q_{Di} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1.24)$$

Où:

$P_{Gi}$ ,  $P_{Di}$ ,  $Q_{Di}$ ,  $Q_{Gi}$  sont, respectivement, la puissance active générée, la puissance active demandée, la puissance réactive générée et la puissance réactive demandée au jeu de barres i.

Finalement, les équations d'équilibre de puissance sont de la forme :

$$P_{Gi} = P_{Di} + \sum_{m=1}^N V_i V_m Y_{im} \cos(\delta_i - \delta_m - \theta_{im}), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1.25)$$

$$Q_{Gi} = Q_{Di} + \sum_{m=1}^N V_i V_m Y_{im} \sin(\delta_i - \delta_m - \theta_{im}), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1.26)$$

## I.7. Problème de l'écoulement de puissance

Chaque jeu de barres  $i$  du réseau à des grandeurs fondamentales associées et qui sont le module de tension  $V_i$ , phase de tension  $\delta_i$ , puissance active injectée  $P_i$ , puissance réactive injectée  $Q_i$ . Pour chaque jeu de barres, deux variables doivent être spécifiées au préalable et les deux autres sont à calculer. Les modules des tensions et les phases des tensions inconnues sont appelés variables d'état. L'état du système n'est déterminé qu'après avoir calculer ces valeurs. Dans l'analyse de l'écoulement de puissance, les jeux de barres du système sont classés en trois catégories :

### a) Jeu de barre de référence

C'est un jeu de barre générateur où le module et la phase de tension sont tous les deux Spécifiés (connues). 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.

### b) Jeu de barre contrôlé

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 la puissance réactive et la phase doivent être calculées.

### c) Jeu de barre de charge

Ce jeu de barre alimente une charge caractérisée par sa puissance active P et la puissance réactive Q, donc, (P, Q) sont spécifiées alors que la tension et la phase sont à calculer.

## I. 8 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre un aperçu sur les principales caractéristiques du réseau électrique ainsi que la modélisation des différents composants à savoir : les lignes de transport, les transformateurs et les charges . A la fin nous avons posés le Problème de l'écoulement de puissance.

## II.1. Introduction

Le développement technologique a contribué à une augmentation de la consommation d'énergie qui a eu pour conséquence un accroissement des puissances à générer et à transporter. Pour résoudre le problème de l'acheminement de la puissance disponible sur les lieux de consommation, il est nécessaire de déterminer le niveau de production de chaque groupe et les transits de puissance dans le réseau. Il faut faire face à la demande, en respectant les contraintes technico-économiques d'exploitation afin de minimiser les coûts de production. Par conséquent, les réseaux deviennent de plus en plus grands et compliqués. Donc, il est nécessaire de faire appel à des outils informatiques spécialisés pour chercher le point de fonctionnement optimal du système. Ce programme de calcul connu par L'écoulement de Puissance Optimal (souvent désigné par l'appellation anglaise, *Optimal Power Flow* ou OPF) est un outil d'optimisation important intégré au système de gestion de l'énergie (*Energy Management System* ou EMS) au niveau des centres de conduite des réseaux électriques. Le rôle de la fonction OPF est de déterminer, par un processus itératif, la valeur des variables de commande, telles que les consignes de puissance des générateurs et les prises de réglage des transformateurs, afin de minimiser une fonction objectif, par exemple le coût global d'exploitation ou les pertes de puissance, en tenant compte de certaines contraintes techniques du système à savoir, les domaines de fonctionnement des générateurs, les tensions et les courants admissibles des lignes, Des transformateurs et de l'appareillage (disjoncteurs, sectionneurs,...). Ce problème a été introduit par Carpentier en 1962 sous la forme d'un dispatching Économique contraint [11]. Une formulation plus générale de ce problème a vu le jour en 1968 grâce à Dommel et Tinney [12][13].

Dans ce chapitre, nous allons modéliser le problème d'OPF en lui donnant une forme mathématique (un polynôme du deuxième degré), en tenant compte des contraintes techniques (contraintes d'égalité et d'inégalité).

## II. 2. But de l'écoulement de puissance optimal

Il a pour but de minimiser le coût total de la production de la puissance d'un réseau électrique et de déterminer, en régime triphasé permanent (en général équilibré), les tensions en module et en phase en tout point du réseau et les puissances actives et réactives transitant sur toutes les lignes du réseau électrique [14].

Le problème de l'écoulement de puissance optimal (OPF) est l'un des principaux problèmes rencontrés par les ingénieurs d'études des réseaux électriques qui utilisent les outils de la recherche opérationnelle, qui programme les commandes de système d'alimentation pour optimiser une fonction objectif tout en satisfaisant un ensemble de contraintes non linéaires d'égalité et d'inégalité [15]

## II .3. Formulation Générale de l'écoulement de puissance optimal

Le problème d'écoulement de puissance optimal cherche à trouver le point de fonctionnement optimal du réseau électrique, en considérant la charge dans le réseau et les coûts de production de chaque générateur. En plus de la fonction objectif qui détermine les critères d'optimalité à considérer. Le problème de l'écoulement de puissance optimal est donné sous une forme standard d'optimisation avec contraintes d'égalités et d'inégalités [15] comme suit :

$$\min f(x, u) \quad (2.1)$$

$$\text{sujet à } g_i(x, u) = 0 \text{ tel que } , i=1,2.., n \quad (2.2)$$

$$h_j(x, u) \leq 0 \text{ tel que } , j=1,2..., m \quad (2.3)$$

Dans cette formulation, la fonction  $f(x, u)$  est la fonction objectif , elle doit être minimisée tout en assurant la validité des fonctions de contraintes, tel que  $g(x, u)$  représente l'ensemble de contraintes non linéaires d'égalité.  $h(x, u)$  Représente l'ensemble de Contraintes non linéaires d'inégalité.  $x$  est l'ensemble de variables d'état,

$u$  est l'ensemble de variables commandées.  $x_{min}, x_{max}, u_{min}, u_{max}$  sont les limites minimales et maximales des variable d'état et de contrôle.

Les problèmes d'optimisation sont définis selon plusieurs caractéristiques :

- Mono-objectif ou multi-objectif.
- Linéaire ou non-linéaire.
- Constraint ou sans-constraint.
- Stochastique ou non stochastique.
- Etc...

## II.4 Classification des variables d'équations d'écoulement de puissance

Dans l'écoulement de puissance optimisé, nous trouvons deux types de variables :

Les variables d'état et les variables de contrôle [13]. On définit chaque type au paragraphe suivant :

### ➤ Les variables d'état

Ce sont les modules et les angles de phases des tensions des nœuds  $PQ$ , les puissances réactives et les angles de phases des nœuds  $PV$ .

### ➤ Les variables de contrôle

Sont représentées par les puissances actives, les modules des tensions des nœuds  $PV$  et les prises des transformateurs variables en charge.

### II.4.1.Fonction objectif

La formulation de la fonction objectif est parmi les aspects de l'optimisation les mieux développés. Il est souvent difficile de décrire aux mieux les fonctions objectifs par une fonction scalaire simple. La fonction objectif rencontrée est :

### ➤ Le coût de production

C'est la fonction objectif la plus utilisée, très rencontrée dans la répartition économique de puissance, elle est constituée d'une somme de fonctions élémentaires :

$$F = \sum_{i=1}^{ng} f_i = \sum_{i=1}^{ng} (a_i + \beta_i P_{Gi} + \gamma_i P_{Gi}^2) \quad (2.4)$$

Où :

$a_i, \beta_i, \gamma_i$  : Les coefficients de coûts de production.

$P_G$  : La puissance active générée.

## II .4.2 Contraintes

Pour obtenir une solution acceptable de l'écoulement de puissance optimale, deux types de contraintes doivent être satisfaites:

### II .4.2 .1 Contraintes d'égalités

Les équations de l'écoulement de puissance sont exprimées en termes d'équilibre des puissances.

Pour chaque nœud du système nous avons :

$$P_{Gi} = P_{Di} + \sum_{m=1}^N V_i V_m V_{im} \cos(\delta_i - \delta_m - \delta_{im}), \quad \forall i \in N_s \quad (2.5)$$

$$Q_{Gi} = Q_{Di} + \sum_{m=1}^N V_i V_m V_{im} \sin(\delta_i - \delta_m - \delta_{im}), \quad \forall i \in NPQ \quad (2.6)$$

Où :

$N_s$  : Ensemble des indices de tous les nœuds sauf le nœud de référence

$NPQ$  : Ensemble des indices de tous les nœuds de charge.

$P_{Di}, Q_{Di}$  La puissance active et réactive respectivement demandées.

## II .4.2 .2 Contraintes d'inégalités

Dans un OPF, deux types de contraintes d'inégalité existent :

### a) Les contraintes dures

qui représentent les Limites des modules des tensions aux nœuds.

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max}, \forall i \in N \quad (2.7)$$

Avec :

$V_i^{\min}$  est la limite minimale du module de tension au niveau du JDB  $i$ ,

$V_i^{\max}$  est la limite maximale du module de tension au niveau du JDB  $i$ ,

$N$  est l'ensemble des JDB du système.

Pour des raisons de sécurité et de stabilité du système électrique, les fluctuations de tension sont indésirables. Donc, il est en général important de maintenir la tension au niveau de tous les jeux de barres dans des limites admissibles.

### b) Les contraintes paramétriques

qui représentent les limites de puissances actives et réactives générées ainsi que les limites des transformateurs réglables en charge.

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max}, \forall i \in N_g \quad (2.8)$$

$$Q_{Ci}^{\min} \leq Q_{Ci} \leq Q_{Ci}^{\max}, \forall i \in N_g \quad (2.9)$$

$$T_{im}^{\min} \leq T_{im} \leq T_{im}^{\max}, \forall (i, m) \in N_t \quad (2.10)$$

Les transformateurs dotés de prises de réglage sont utilisés pour le réglage des modules des tensions, et la régulation du flux des puissances réactives. Les positions de ces prises sont limitées par deux valeurs l'une minimale et l'autre maximale.

Où :

$P_{Gi}^{\min}$  est la limite minimale de puissance active générée au niveau du JDB  $i$ ,

$P_{Gi}^{\max}$  est la limite maximale de puissance active générée au niveau du JDB  $i$ ,

$Q_{Gi}^{\min}$  est la limite minimale de puissance réactive générée au niveau du JDB  $i$ ,

$Q_{Gi}^{max}$  est la limite maximale de puissance réactive générée au JDB  $i$ ,

$N_g$  est l'ensemble des indices de tous les JDB générateurs.

$T_{im}^{min}$  est la limite minimale du régulateur du transformateur entre les JDB  $i$  et  $m$ ,

$T_{im}^{max}$  est la limite maximale du régulateur du transformateur entre les JDB  $i$  et  $m$ ,

$N_t$  est l'ensemble des indices  $(i, m)$  de tous les JDB de départ et d'arrivée auxquels les transformateurs réglables sont raccordés.

### c) Limites des écoulements de puissance

Pour maintenir la sécurité dans le fonctionnement du système électrique, les branches (les lignes de transport ou les transformateurs) ne doivent en aucun cas être surchargés. Donc, l'écoulement de puissance sur chaque branche est limité par une valeur maximum qui est généralement spécifiée.

Ces limites sont dues aux pertes thermiques dans les conducteurs, la stabilité du système. Elles sont représentées par une contrainte d'inégalité, qui limitera la puissance en MVA d'un transformateur ou d'une ligne de transport.

$$S_{im} - S_{im}^{max} \leq 0 \quad \forall (i, m) \in N_b \quad (2.11)$$

Où :

$S_{im}^{max}$  est la limite maximale de puissance apparente entre les JDB  $i$  et  $m$ .

$N_b$  est l'ensemble des indices  $(i, m)$  de tous les JDB de départ et d'arrivée du système.

- Les expressions générales des puissances écoulées sur une branche  $i \rightarrow m$ , sont calculées à l'aide des formules :

$$P_{im} = T_{im}^2 g_{im} V_i^2 - T_{im} V_i V_m [g_{im} \cos(\delta_i - \delta_m + \phi_{im}) + b_{im} \sin(\delta_i - \delta_m + \phi_{im})] \quad (2.12)$$

$$Q_{im} = -T_{im}^2 V_i^2 (b_{im} + b_{im}^{sh}) - T_{im} V_i V_m [g_{im} \sin(\delta_i - \delta_m + \phi_{im}) - b_{im} \cos(\delta_i - \delta_m + \phi_{im})] \quad (2.13)$$

$$S_{im} = \sqrt{P_{im}^2 + Q_{im}^2} \quad (2.14)$$

Où :

$\phi_{im}$ : La limite maximale d'angle déphasage de transformateur entre les jeux de barre  $i$  et  $m$

$g_{im}$ ,  $b_{im}$  et  $b_{im}^{sh}$  sont, respectivement, la conductance série, la susceptance série et la susceptance shunte de la branche connectée entre les JDB  $i$  et  $m$ .

## II .5. Classification des problèmes d'optimisation

Les méthodes de résolution de la forme générale du problème d'optimisation ont tendance à être complexes et exigent un effort numérique considérable. Des méthodes plus efficaces sont disponibles pour certaines formes spéciales du problème général.

À cette fin, les problèmes d'optimisation sont habituellement classés dans les types suivants :

### II .5.1. Problèmes sans contraintes

Ces problèmes ont une fonction d'objectif, mais sans contraintes. La fonction objectif doit être non-linéaire (parce que le minimum d'une fonction objectif linéaire sans contrainte est évidemment -infini). Les problèmes avec les limites simples sur des variables d'optimisation peuvent être résolus comme sans contraintes. Après avoir

examiné différentes options, nous pouvons choisir une solution qui satisfait les bornes sur les variables.

## II .5.2 Problèmes de programmation linéaire

Si la fonction objectif et toutes les contraintes sont des fonctions linéaires de variables d'optimisation,[16][17][18] le problème est appelé un problème de programmation linéaire.

La programmation linéaire est considérée comme une technique de base en recherche opérationnelle. C'est un outil très puissant qui permet de résoudre un grand nombre de problèmes. En effet, une fois un problème est modélisé sous forme d'équations linéaires, la programmation linéaire assure la résolution du problème d'une manière exacte [19].

Ces problèmes peuvent être résolus par différentes méthodes, comme la méthode du simplexe. L'optimisation linéaire étudie le cas où la fonction objectif et les contraintes sont linéaires. C'est une méthode très employée pour établir les programmes des raffineries pétrolières.

L'optimisation linéaire en nombres entiers étudie les problèmes d'optimisation linéaire dans lesquels certaines ou toutes les variables sont contraintes de prendre des valeurs entières.

La méthode de programmation linéaire a l'avantage d'être extrêmement rapide, même pour les grands réseaux. Par contre, la linéarisation des équations du réseau et de la fonction objectif affecte la précision des résultats. Il est parfois nécessaire d'effectuer plusieurs programmes linéaires successifs pour améliorer la précision, d'où une perte partielle de rapidité de résolution.

➤ **Méthode du simplexe**

L'algorithme du simplexe est présenté par George Dantzig en 1947, est un algorithme itératif Permettant de résoudre un problème de programmation linéaire.

L'algorithme du simplex est une procédure servant à générer et tester systématiquement les solutions applicables à un programme linéaire. Cet algorithme est le plus utilisé pour la Programmation linéaire.

Dans sa version la plus classique, la méthode compte deux phases :

- ✓ **Phase I** : Cette phase permet de trouver une base de départ admissible ou de prouver qu'il n'en existe pas (le problème étant alors sans solution admissible).
- ✓ **Phase II** : A partir d'une base admissible du programme linéaire ' $PL$ ', l'algorithme cherche une base admissible voisine dont la solution de base est meilleure.

La méthode s'arrête soit lorsque :

- Il n'est plus possible d'améliorer la valeur de la solution de base courante qui est alors Optimale.
- Un rayon extrême du domaine admissible est découvert, le long duquel la valeur des Solutions augmente à l'infini, le problème étant alors non borné.

### **II.5.3 Problèmes de programmation non linéaire**

La programmation non linéaire étudie le cas général dans lequel l'objectif et les Contraintes sont non linéaires. Il y a plusieurs méthodes (itératives) qui ont été implémentées et qui permettent la résolution des problèmes d'optimisation non linéaire.

Nous citons par exemple :

#### **a) Méthodes de gradient**

Les méthodes du gradient , [20] [21] connues aussi par les méthodes de descente, sont des méthodes itératives basées sur la recherche du minimum d'une fonction en

suivant la ligne de plus grande pente associée à la fonction objectif. la direction de descente associée à cette ligne est donnée par le gradient de la fonction objectif. L'idée est donc minimiser une fonction objectif à travers une suite de points destinées à converger vers la solution optimal du problème. Le passage d'un point à un autre se fait suivant la direction de descente avec un pas fixe ou variable.

L'algorithme du gradient est également connu sous le nom d'algorithme de la plus forte pente ou de la plus profonde descente (*steepest descent*, en anglais) parce que le gradient est la pente de la fonction au point courant et est donc, localement, sa plus forte pente (une notion qui dépend du produit scalaire).

Le processus itératif est arrêté s'il n'y a pas d'amélioration de la solution. Généralement, les techniques du gradient présentent plusieurs inconvénients, tels que les problèmes de convergence, l'instabilité et la complexité des algorithmes.

### b) Méthode de point intérieur

Les méthodes de points intérieurs [22] [23], où les contraintes d'inégalités sont au départ converties en contraintes d'égalités par l'introduction des variables d'écart. La fonction de Lagrange est formulée pour satisfaire les contraintes d'égalité.

Les contraintes d'inégalité sont ajoutées à travers des fonctions barrières de type logarithmique. Les conditions de Kuhn Tucker du problème modifié sont alors formulées comme des équations non linéaires, qui peuvent être résolues par la méthode itérative de Newton. Une caractéristique intéressante des méthodes du point intérieur est leur faculté à traiter les inégalités non linéaires sans recourir à une identification de l'ensemble des contraintes actives, comme dans les méthodes de Newton.

L'expérience a montré que cette technique est efficace pour les problèmes de grande taille comme ceux de l'OPF. Cependant, si le pas n'est pas correctement choisi, on peut avoir une solution non réalisable. En plus, cette méthode présente une sensibilité aux conditions initiales et dans la plupart des cas, elle est incapable de résoudre les problèmes dans ce cas-là.

## II.6 .Les Méta heuristiques

Une recherche locale peut être piégée dans un minimum local. Les métahéuristiques peuvent échapper à ces minima en construisant aussi une suite de solutions, les métahéuristiques (M) sont souvent des algorithmes stochastique (aléatoire) et qui progressent vers un optimum utilisant un échantillonnage d'une fonction objectif elles tentent de trouver l'optimum global (G) d'un problème d'optimisation difficile (avec des discontinuités — D —, par exemple), sans être piégé par les optimas locaux (L).

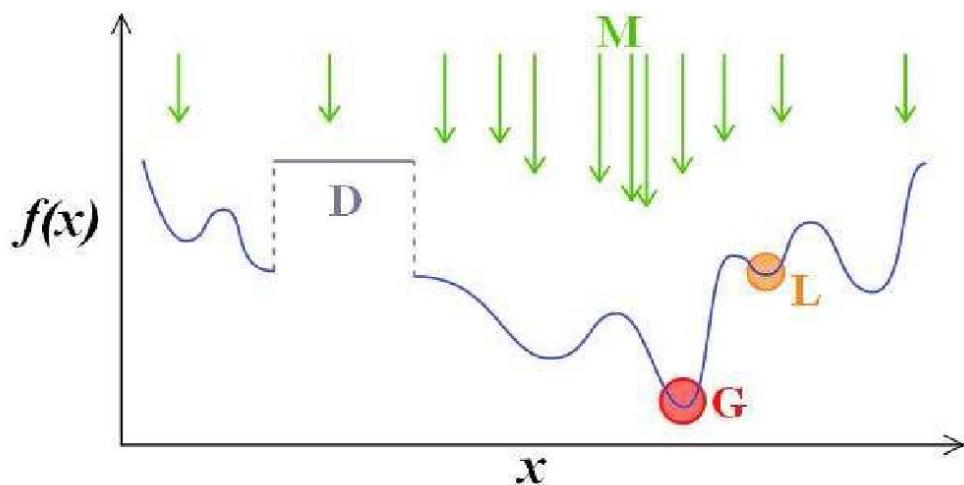


Figure II.1 Recherche de minimum global dans les méthodes métahéuristiques

- L'optimisation stochastique étudie le cas dans lequel certaines variables sont aléatoires un titre d'exemple les algorithmes génétique (AG).

## II.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le problème de l'écoulement de puissance optimal notamment sa formulation générale qui cherche à trouver le point de fonctionnement optimal. Enfin, nous avons présenté les différentes méthodes de programmation qui existent à savoir la programmation linéaire et la programmation non linéaire.

On conclut que l'écoulement de puissance optimal est un problème non linéaire avec contraintes non linéaires liées au fonctionnement du système. Il est classé dans le domaine d'exploitation et de planification de système électrique.



# Dédicaces



*Je tiens à dédier ce mémoire :*

*A ma très chère **Mère** et à mon cher **Père**, en témoignage et en gratitude de leurs dévouement, de leurs soutien permanent durant toutes mes années d'études, leurs sacrifices illimités, leurs réconfort moral, eux qui ont consenti tant d'effort pour mon éducation, mon instruction et pour me voir atteindre ce but, pour tout cela et pour ce qui ne peut être dit, mes affections sans limite.*

 *A toutes les familles : GHOUŁ, BOUCHETIT*

 *A mes chers Grands-Mères. (Que Dieu les garde pour moi).*

 *A mes Amis : khelef abdelkader, ratni rabeh, hamamti*

*mohammed, boukenoui rachid, antar tales, surtout ceux qui ont supporté mes sauts d'humeur.*

*younes*



# Dédicaces



*Je tiens à dédier ce mémoire :*

*À ma très chère **Mère** et à mon cher **Père**, en témoignage et en gratitude de leurs dévouement, de leurs soutien permanent durant toutes mes années d'études, leurs sacrifices illimités, leurs réconfort moral, eux qui ont consenti tant d'effort pour mon éducation, mon instruction et pour me voir atteindre ce but, pour tout cela et pour ce qui ne peut être dit, mes affections sans limite.*

 *À toutes les familles : CHANANE, BENKHEDA*

 *À mes Amis : hamamti mohammed, ghoul younes, benzigem housseme eddine, surtout ceux qui ont supporté mes sauts d'humeur.*

*Abd Allah.*

# Liste des figures

- Figure 1.1** Structure topologique des réseaux électriques
- Figure 1.2** Modèle en  $\pi$  d'une ligne transmission
- Figure 1.3** Modèle du transformateur muni de prise réglable en charge
- Figure 1.4** Circuit équivalent du transformateur en phase
- Figure 1.5** Réseau à cinq (5) nœuds
- Figure 2.1** Recherche de minimum global dans les méthodes Meta heuristiques
- Figure 3.1** Trois topologies du voisinage différentes
- Figure 3.2** Schéma de principe du déplacement d'une particule
- Figure 3.3** Organigramme de la méthode de PSO
- Figure 3.4** Structure de la particule
- Figure 3.5** Organigramme général pour la solution de l'écoulement de puissance optimal (OPF)
- Figure 4.1** Réseau test à 14 jeux de barres
- Figure 4.2** Convergence de pso pour un réseau à 14 JDB ( premier cas)
- Figure 4.3** Convergence de pso pour un réseau à 14 JDB et 50 itérations (premier cas)
- Figure 4.4** Convergence de pso pour un réseau à 14 JDB (deuxième cas)
- Figure 4.5** Convergence de pso pour un réseau à 14 JDB et 50 itérations (deuxième cas)
- Figure 4.6** Convergence de pso pour un réseau à 14 JDB (troisième cas)
- Figure 4.7** Convergence de pso pour un réseau à 14 JDB et 50 itérations (troisième cas)
- Figure 4.8** Les tensions de charge pour le réseau de 14 JDB
- Figure 4.9** Réseau test à 30 jeux de barres
- Figure 4.10** Convergence de PSO pour un réseau de 30 JDB (deuxième cas)
- Figure 4.11** Convergence de PSO pour un réseau de 30 JDB et 50 itérations (deuxième cas)
- Figure 4.12** Convergence de PSO pour un réseau de 30 JDB (troisième cas)

**Figure 4.13** Convergence de PSO pour un réseau de 30 JDB et 50 itérations(troisième cas)

**Figure 4.14** Les tensions de charge pour le réseau de 30 JDB

**Figure 4.15** Réseau test à 57 jeux de barres

**Figure 4.16** Convergence de PSO pour un réseau de 57 JDB (premier cas)

**Figure 4.17** Convergence de PSO pour un réseau de 57 JDB et 50 itérations (premier cas)

**Figure 4.18** Convergence de PSO pour un réseau de 57 JDB (deuxième cas)

**Figure 4.19** Convergence de PSO pour un réseau de 57 JDB et 50 itérations(deuxième cas)

**Figure 4.20** Convergence de PSO pour un réseau de 57 JDB(troisième cas)

**Figure 4.21** Convergence de PSO pour un réseau de 57 JDB et 50 itérations(troisième cas)

**Figure 4.22** Les tensions de charge pour le réseau de 57 JDB

## ***Liste des tableaux***

**Tableau 4.1** Paramètres de contrôle de PSO pour les réseaux à 14 , 30 et 57 JDB

**Tableau 4.2** Les valeurs optimales pour les trois cas avec les coûts de production

Pour un réseau à 14JDB

**Tableau 4.3** Les valeurs optimales pour les trois cas avec les coûts de production

Pour un réseau à 30 JDB

**Tableau 4.4** Les valeurs optimales pour les trois cas avec les coûts de production pour un

Réseau à 57JDB

**Tableau A.1** Données des jeux de barres du système test à 14 jeux de barres

**Tableau A.2** Données des générateurs du système test à 14 jeux de barres

**Tableau A.3** Données des branches du système test à 14 jeux de barres

**Tableau A.4** Données des générateurs coûts du système test à 14 jeux de barres

**Tableau A.5** Données des jeux de barres du système test à 30 jeux de barres

**Tableau A.6** Données des générateurs du système test à 30 jeux de barres

**Tableau A.7** Données des branches du système test à 30 jeux de barres

**Tableau A.8** Données des générateurs coûts du système test à 30 jeux de barres

**Tableau A.9** Données des jeux de barres du système test à 57 jeux de barres

**Tableau A.10** Données des générateurs du système test à 57 jeux de barres

**Tableau A.11** Données des branches du système test à 57 jeux de barres

**Tableau A.12** Données des générateurs coûts du système test à 57 jeux de barres

## LISTES DES ACRONYMES ET ABRÉVIATIONS

OPF	optimisation de l'écoulement de puissance.
JDB	Jeu de barres.
PSO	Optimisation par essaim de particule.
$P_{Gi}$ et $Q_{Gi}$	Puissance active et réactive du générateur i.
NG	Nombre total de générateurs.
NT	Nombre total de transformateurs.
$P_{Gi}^{max}$ et $Q_{Gi}^{max}$	Limites min. et max. de puissance active du générateur i.
$P_{Gi}^{min}$ et $Q_{Gi}^{min}$	Limites min. et max. de puissance réactive du générateur i.
$P_D$	Puissance active totale demandée (charge).
$\bar{Z}_{km}$	Impédance série par phase de la ligne k – m.
$r_{km}$ et $x_{km}$	Résistance et réactance série de la ligne k – m.
$\bar{y}_{km}^{sh}$	Admittance shunt de la ligne k – m.
$g_{km}^{sh}$ et $b_{km}^{sh}$	Conductance et susceptance shunts de la ligne k – m.
$\bar{y}_{km}$	Admittance série de la ligne k – m.
$g_{km}$ et $b_{km}$	Conductance et susceptance séries de la ligne k – m.
$\bar{y}_t$	Admittance du transformateur.
$\bar{T}=T e^{j\phi_t}$	Rapport de transformation complexe.
T	Module du rapport de transformation.
$\phi_t$	Angle de déphasage introduit par le transformateur.
$I_{bus}$	Vecteur des courants complexes injectés aux jeux de barres.

$V_{bus}$	Vecteur des tensions complexes des jeux de barres.
$Y_{bus}$	Matrice admittance nodale.
$\bar{Y}_{im}$	Élément $im$ de la matrice admittance.
$\bar{y}_{im}$	Admittance de la branche $im$ .
$\bar{I}_i$	Courant net injecté à un jeu de barres $i$ .
$\bar{V}_m$	Tension d'un jeu de barres $m$ .
$V_m$ et $\delta_m$	Module et phase de la tension au jeu de barres $m$ .
$Y_{im}$ et $\theta_{im}$	Module et argument de l'élément $im$ de la matrice admittance.
$e_m$ et $f_m$	Partie réelle et imaginaire de la tension au jeu de barres $m$ .
$G_{im}$ et $B_{im}$	Conductance et suceptance de l'élément $im$ de la matrice admittance.
$\bar{S}_i$	Puissance apparente injectée à un jeu de barres $i$ .
$P_i$ et $Q_i$	Injection des puissances active et réactive au jeu de barres $i$ .
$N$	Nombre total de bus.
$P_{Di}$ et $Q_{Di}$	Puissance active et réactive demandée au jeu de barres $i$ .
$F$	Fonction objectif.
$G$	Ensemble des contraintes d'égalité.
$g_i$	$i^{\text{ème}}$ contrainte d'égalité.
$h_i$	$i^{\text{ème}}$ contrainte d'inégalité.
$U$	Vecteur des variables de contrôle.
$X$	Vecteur des variables d'état.

$u^{\min}$ et $u^{\max}$	Limites max. et min. des variables de contrôle.
$x^{\min}$ et $x^{\max}$	Limites max. et min. des variables de d'état.
$N_S$	Ensemble des indices de tous les nœuds sauf le nœud de référence.
$NPQ$	Ensemble des indices de tous les nœuds de charge.
$N$	Ensemble des indices de tous les nœuds du système.
$N_g$	Ensemble des indices de tous les nœuds générateurs.
$N_p$	Taille de la population.
$a_i$ et $\beta_i$ et $\gamma_i$	coefficient du cout.
$V_{Gi \min}$ et $V_{Gi \max}$	Limites minimale et maximale sur la variable tension.
$T_{i\min}$ et $T_{i\max}$	Limites minimale et maximale sur la variable du rapport de Transformation.
$P_{Gslack}^{\min}$ et $P_{Gslack}^{\max}$	Limites minimale et maximale sur la variable de puissance active générée.
$Q_G^{\min}$ et $Q_G^{\max}$	Limites minimale et maximale sur la variable de puissance réactive générée.
$V_{G1}, \dots, V_{GNG}$ ,	Les tensions de tous les jeux de barres générateurs
$T_1, \dots, T_{NT}$	Les prises des transformateurs variables

$x_i (k)$	La position de la particule a l'itération k
$x_i (k + 1)$	La position de la particule a l'itération k +1
$v_i (k)$	La vitesse de la particule a l'itération k
$v_i (k + 1)$	La vitesse de la particule a l'itération k + 1
$p_{best}$	la meilleure position de la particule
$p_{gbest}$	la meilleure position connue de son voisinage
$C_1 \ C_2$	coefficient d'accélération
$w$	coefficient d'inertie
$r_1 \ r_2$	nombre aléatoire avec une répartition uniforme entre 0 et 1.
$p_1 \ p_2$	Coefficient de confiance



Tout d'abord on remercie dieu tout puissant pour la bonne santé, la volonté et de la patience qu'il nous a données tout au long de notre projet de fin d'études.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à notre promoteur monsieur **M ,Belazoug**, pour nous avoir proposé ce sujet, et conseillé tout au long de notre travail, pour, *Ses orientations judicieuses, sa patience et diligence, et par ses suggestions qui ont grandement facilité ce travail.*

*Nous remercions très chaleureusement les autres membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'être rapporteurs de notre mémoire.*

Nous souhaitons aussi remercier tous les enseignants de l'université SAAD DAHLEB de Blida, en particulier nos enseignants d'électrotechnique, pour l'enseignement qu'ils nous ont transmis, pour leur disponibilité et leur gentillesse, ainsi pour tous leurs sacrifices afin de nous offrir les meilleures conditions d'étude.

*Nous remercions vivement toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

## Table des matières

<b>Introduction générale</b>	1
------------------------------	---

## Chapitre I : Écoulement de puissance

I.1 Introduction	4
I.2 Caractéristiques des réseaux électriques	5
I.2.1 Centrales électriques	5
I.2.2 Réseau de transport	5
I.2.3 La consommation électrique	5
I.2.4 Équilibre du système électrique	5
I.2.5 Limites thermiques des lignes électriques en fonctionnement normal	6
I.3 Structures topologiques des réseaux électriques	6
I.3.1 Réseau radial ou en étoile	6
I.3.2 Réseau en boucle	7
I.3.3 Réseau maillé	7
I.4 Architecture des réseaux électriques	8
I.5 Modélisation des composants du réseau électrique	9
I.5.1 Générateurs	9
I.5.2 Lignes et câbles de transmission	9
I.5.3 Transformateurs de puissance	11
I.5.4 Charges électriques	13
I.5.5 Éléments shunt	13
I.5.6 Modèles des nœuds du réseau	14
I.6 Formulation des équations de l'écoulement de puissance	15
I.7 Problème de l'écoulement de puissance	17
a) <i>Jeu de barre de référence</i>	18
b) <i>Jeu de barre contrôlé</i>	18
a) <i>Jeu de barre de charge</i>	18
I.8 Conclusion	18

## Chapitre II : Écoulement de puissance optimal

II.1 Introduction	19
II.2 But de l'écoulement de puissance optimal	20
II.3 Formulation Générale de l'écoulement de puissance optimal	20
II.4 Classification des variables d'équations d'écoulement de puissance	21
II.4.1 Fonction objectif	21
II.4.2 Contraintes	22
II.4.2.1 Contraintes d'égalités	22
II.4.2.2 Contraintes d'inégalités	23
a) Les contraintes dures	23
b) Les contraintes paramétriques	23
c) Limite des écoulements de puissance	24
II.5 Classification des problèmes d'optimisation	25
II.5.1 Problèmes sans contraintes	25
II.5.2 Problèmes de programmation linéaire (LP)	26
II.5.3 Problèmes de programmation non linéaire (NLP)	27
a) Méthodes de gradient	27
b) Méthode de point intérieur	28
II.6 Les Métaheuristiques	29
II.7 Conclusion	30

## Chapitre III : *Optimisation par essaim de particule Appliquée à l'OPF*

III .1Introduction	31
II.2 Optimisation par essaim de particules (PSO)	31
III.3 Idées de base	31
III.4 <i>Algorithme PSO</i>	32
III.5 Algorithme général	33

III.6 Formalisation	35
III.6.1 Nombre de particules	35
III.6.2 Facteur d'inertie	36
III.6.3 Coefficients de confiance	36
III.6.4 Vitesse maximale et coefficient de constriction	37
III.6.5 Notion de voisinage	37
III.7 critère d'arrêt	38
III.8 Mouvement d'une particule dans l'espace de recherche	39
III.9 Synthèse de l'algorithme	40
III.10 Les étapes de la méthode d'Optimisation par Essaim de Particule	41
III.11 Organigramme de la PSO	42
III.12 Test de la méthode PSO sur OPF	43
III.12.1 Variables d'état	43
III.12.2 Variables de contrôle	43
III.12.3 Fonction objectif	44
III.12.4 Contraintes d'égalité	44
III.12.5 Contraintes d'inégalités	44
a) les contraintes des générateurs	45
b) les contraintes des transformateurs	45
III.13 Les étapes de la méthode PSO appliquée à l'OPF	47
III. 13.1 Organigramme général pour la solution de l'OPF	48
III. 14 Conclusion	49

## **Chapitre IV : application numérique et résultats**

IV 1 INTRODUCTION	50
IV 2 Système test à 14 jeux de barres	51
IV.3 Système test à 30 jeux de barres	58
IV 4 Système test à 57 jeux de barres	63
<b>Conclusion générale</b>	71
Annexe : données de réseaux test	74
A1 Réseau électrique à 14 JBD	74
A2 Réseau électrique à 30JBD	76
A3 Réseau électrique à 57 JBD	78
Bibliographie	83

## 1. Introduction générale

L'industrie de l'électricité est l'industrie de capital la plus importante. Son produit l'électricité, est essentiel à la société d'aujourd'hui. L'électricité fait partie intégrante de notre vie quotidienne. Elle alimente les appareils ménagers, soutient nos vastes réseaux de communications et d'information, éclaire nos cités et nos villes et elle est considérablement utilisée dans de nombreuses grandes entreprises. Un service d'approvisionnement en électricité fiable et économique est indispensable au bien-être de la population et des entreprises [1].

Le système électrique est un réseau-source alimentant un très grand nombre de clients à partir d'un petit nombre de centrales de production. L'énergie produite par les centrales transite sur les lignes de haute et très haute tensions du réseau de transport maillé sur une zone couvrant un ou plusieurs états, puis est acheminée sur des réseaux de distribution de moyennes et basses tensions pour approvisionner les clients.

L'énergie électrique est produite en même temps qu'elle est consommée; donc, en permanence, la production doit s'adapter à la consommation. Il faut, donc, ajuster les puissances active et réactive des générateurs interconnectés dans un réseau électrique dans leurs limites admissibles afin de satisfaire la charge électrique fluctuante avec un coût minimal. Cela est appelé l'écoulement de puissance optimal (OPF) et parfois connu comme le problème de dispatching économique de l'écoulement de puissance [2].

L'étude de l'écoulement de puissance est très importante à la planification, au contrôle des réseaux électriques et aux stratégies d'opération. Elle implique essentiellement la solution d'un ensemble d'équation algébrique non linéaire pour un plan de charge donné. Pendant les dernières quatre décennies, probablement presque toutes les méthodes connues appropriées d'analyse numérique pour résoudre un ensemble d'équations algébriques non linéaires ont été appliquées dans des algorithmes de développement d'écoulement de puissance.

En général, le problème de l'OPF est un problème d'optimisation avec contraintes qui est très difficile à résoudre. En raison de son importance dans les applications de planification et de fonctionnement des systèmes électro-énergétiques, des efforts importants de recherches ont été consacrés au développement de procédures d'OPF efficaces et robustes.

Dans les années récentes, les techniques de calcul intelligentes, en particulier les PSO se sont imposés comme des méthodes puissantes et efficaces dans la résolution de plusieurs problèmes d'optimisation jugés difficiles. Cette technique offre plusieurs caractéristiques remarquables.

### 2. Objectifs et contributions du mémoire :

La contribution principale de ce travail est l'élaboration d'une procédure efficace capable de résoudre le problème de l'écoulement de puissance optimal (OPF) en présence de générateurs avec des caractéristiques de coût, il s'agit de développer une approche basée sur une méthode méta heuristique (PSO). Cette dernière est testée avec succès sur différents cas de figures qui sont extrêmement difficile, en raison de l'espace de solution du problème qui est non linéaire.

La technique proposée est capable de fournir à la fin du processus d'optimisation, une famille de solutions physiquement réalisables de par la nature des contraintes et d'une précision acceptable sur le plan pratique.

### 3. Plan du mémoire :

La présente mémoire est structurée autour de quatre chapitres à savoir :

Dans le premier chapitre, nous donnerons un aperçu général sur les réseaux électriques à savoir les différentes caractéristiques et structures ainsi la modélisation des éléments essentiels des réseaux électriques .Ce chapitre trouve sa justification dans la nécessaire détermination de l'état du système électrique en régime stationnaire.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons la formulation générale du problème d'écoulement de puissance optimale ainsi qu'un état de l'art sur différentes méthodes d'optimisation : optimisation linéaire, non linéaire, dans laquelle nous allons citer les différentes méthodes de résolution de ce problème.

Dans le troisième chapitre, une approche basée sur l'optimisation par essaim de particule pour la solution du problème de l'écoulement de puissance optimal sera présentée. Le principe général de PSO est discuté au début du chapitre, à la fin de ce chapitre on applique la méthode sur l'écoulement de puissance optimal (OPF).

Le quatrième chapitre sera dédié aux résultats de simulations de la démarche proposée pour la solution du problème de l'OPF. La validation de ces résultats est montrée et discutée à travers plusieurs études de cas.

Enfin, nous clôturerons ce travail par une conclusion générale avec quelques perspectives envisagées.

## CONCLUSION GENERALE

Les travaux présentés dans ce mémoire traitent les problèmes d'optimisation de l'écoulement de puissance dans un réseau électrique.

Nous avons exploré et testé l'optimisation de l'écoulement de puissance par une méthode méta heuristique « essaim de particules ».

Les méta-heuristiques constituent une stratégie de résolution de plus en plus privilégiée. Une des particularités importantes des méta-heuristiques, réside dans l'absence d'hypothèses particulière sur la régularité de la fonction objectif. 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 méta heuristiques dans les systèmes électriques.

L'optimisation par essaim de particules (PSO) peut être utilisée comme un outil puissant pour les problèmes d'optimisation. En effet, cette dernière est capable de trouver l'optimum global dans l'espace de recherche limité par l'ensemble des contraintes.

Un des avantages de cette méthode c'est la facilité de manipulation. Elle est facilement adaptable à tous types de problèmes d'optimisations. Aussi, elle est le plus judicieusement employée sur des problèmes d'optimisations difficiles.

Les résultats obtenues par PSO sont très satisfaisant et confirment bien la validité de l'algorithme, sa simplicité d'implémentation lui donne un avantage conséquent, néanmoins par l'expérimentation, nous avons remarqué que la qualité des solutions ne peut être garantie que si en augmentant le nombre d'itérations.

L'optimisation par essaims de particules présente un fort potentiel d'application pratique, mais le choix de paramètres reste l'un des problèmes de l'optimisation par essaim de particules, c'est très difficile de trouver des bons paramètres adaptés à la structure du problème.

## CONCLUSION GENERALE

Le premier chapitre est consacré à la définition et la formulation du modèle mathématique convenable du réseau électrique décrivant d'une façon suffisante les relations entre les tensions et les puissances dans les systèmes interconnectés.

Dans le deuxième chapitre, nous avons étudié, en détail le problème de l'écoulement de puissance optimisé.

Dans troisième chapitre, nous avons exploré la méthode PSO pour la résolution de l'OPF.

Enfin, dans le dernier chapitre de cette thèse, nous avons appliqué cette méthode pour résoudre l'OPF sur trois systèmes électriques 14,30 57 JDB avec interprétation des résultats.

Nous pouvons conclure que la complexité des problèmes liés aux réseaux électriques fait en sorte qu'il est souvent difficile d'utiliser des méthodes exactes de solution puisque d'une part le manque de flexibilité des méthodes classiques pour intégrer diverses contraintes spécifiques et d'autre part la solution de ces problèmes par ces méthodes est complexe de point de vue modélisation et calcul.

La méthode utilisée « Essaim de particules » 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.

En perspective, on prévoit d'appliquer cette approche pour la résolution d'autres problèmes rencontrés dans le domaine d'exploitation des réseaux telle que la compensation de l'énergie réactive, la sécurité de tension et l'implantation des systèmes FACTS dans les réseaux.

## Réseau électrique à 14 nœuds

Bus-i	Type	Pd	Qd	Vm	Vmin	Vmax
1	3	0	0	1.06	0.94	1.06
2	2	21.7	12.7	0	0.94	1.06
3	2	94.2	19	1	0.94	1.06
4	1	47.8	-3.9	0	0.94	1.06
5	1	7.6	1.6	1.02	0.94	1.06
6	2	11.02	7.5	1	0.94	1.10
7	1	0	0	1.062	0.94	1.06
8	2	0	0	1.09	0.94	1.10
9	1	29.5	16.6	19	0.94	1.06
10	1	9	5.8	1.051	0.94	1.06
11	1	3.5	1.8	1.057	0.94	1.06
12	1	6.1	1.6	1.055	0.94	1.06
13	1	13.5	5.8	1	0.94	1.06
14	1	14.9	5	1	0.94	1.06

Tableau A.1: Données des jeux de barres du système test à 14 jeux de barres

Bus	Pg	Qg	Qmax	Qmin	Vg	Pmax	Pmin
1	232.4	-16.9	10	0	1.06	332.4	0
2	40	42.4	50	-40	1.045	140	0
3	0	23.4	40	0	1.01	100	0
6	0	12.2	24	-6	1.07	100	0
8	0	174	24	-6	1.09	100	0

Tableau A.2: Données des générateurs du système test à 14 jeux de barres

Fbus	tbus	r	x	Ratio
1	2	0.01938	0.05917	0
1	5	0.05403	0.22304	0
2	3	0.04699	0.19797	0
2	4	0.05811	0.17632	0
2	5	0.05695	0.17388	0
3	4	0.06701	0.17103	0
4	5	0.01335	0.04211	0
4	7	0	0.20912	0.978 0
4	9	0	0.55618	0.969 0
5	6	0	0.25202	0.932 0
6	11	0.09498	0.1989	0
6	12	0.12291	0.25581	0
6	13	0.06615	0.13027	0
7	8	0	0.17615	0
7	9	0	0.11001	0
9	10	0.03181	0.0845	0
9	14	0.12711	0.27038	0
10	11	0.08205	0.19207	0
12	13	0.22092	0.19988	0
13	14	0.17093	0.34802	0

**Tableau A.3 :** Données des branches du système test à 14 jeux de barres

C3	C2	C1
0.0430293	20	0
0.25	20	0
0.01	40	0
0.01	40	0
0.01	40	0

**Tableau A.4:** Données des générateurs coûts du système test à 14 jeux de barres

## Réseau électrique à 30 nœuds

bus_i	type	Pd	Qd	vm	vmax	v min
1	3	0	0	1	1.05	0.95
2	2	21.7	12.7	1	1.1	0.95
3	1	2.4	1.2	1	1.05	0.95
4	1	7.6	1.6	1	1.05	0.95
5	1	0	0	1	1.05	0.95
6	1	0	0	1	1.05	0.95
7	1	22.8	10.9	1	1.05	0.95
8	1	30	30	1	1.05	0.95
9	1	0	0	1	1.05	0.95
10	1	5.8	2	1	1.05	0.95
11	1	0	0	1	1.05	0.95
12	1	11.2	7.5	1	1.05	0.95
13	2	0	0	1	1.1	0.95
14	1	6.2	1.6	1	1.05	0.95
15	1	8.2	2.5	1	1.05	0.95
16	1	3.5	1.8	1	1.05	0.95
17	1	9	5.8	1	1.05	0.95
18	1	3.2	0.9	1	1.05	0.95
19	1	9.5	3.4	1	1.05	0.95
20	1	2.2	0.7	1	1.05	0.95
21	1	17.5	11.2	1	1.05	0.95
22	2	0	0	1	1.1	0.95
23	2	3.2	1.6	1	1.1	0.95
24	1	8.7	6.7	1	1.05	0.95
25	1	0	0	1	1.05	0.95
26	1	3.5	2.3	1	1.05	0.95
27	2	0	0	1	1.1	0.95
28	1	0	0	1	1.05	0.95
29	1	2.4	0.9	1	1.05	0.95
30	1	10.6	1.9	1	1.05	0.95

**Tableau A.5** : Données des jeux de barres du système test à 30 jeux de barres

## ANNEXE

## DONNÉES DES RESEAUX TEST

Bus	P <sub>g</sub>	Q <sub>g</sub>	Q <sub>max</sub>	Q <sub>min</sub>	V <sub>g</sub>	P <sub>max</sub>	P <sub>min</sub>
1	23.54	0	150	-20	1	80	0
2	60.97	0	60	-20	1	80	0
22	21.59	0	62.5	-15	1	50	0
27	26.91	0	48.7	-15	1	55	0
23	19.2	0	40	-10	1	30	0
13	37	44.7	-15	-15	1	40	0

Tableau A.6: Données des générateurs du système test à 30 jeux de barres

fbus	tbus	r	x	ratio
1	2	0.02	0.06	0
1	3	0.05	0.19	0
2	4	0.06	0.17	0
3	4	0.01	0.04	0
2	5	0.05	0.2	0
2	6	0.06	0.18	0
4	6	0.01	0.04	0
5	7	0.05	0.12	0
6	7	0.03	0.08	0
6	8	0.01	0.04	0
6	9	0	0.21	0
6	10	0	0.56	0
9	11	0	0.21	0
9	10	0	0.11	0
4	12	0	0.26	0
12	13	0	0.14	0
12	14	0.12	0.26	0
12	15	0.07	0.13	0
12	16	0.09	0.2	0
14	15	0.22	0.2	0
16	17	0.08	0.19	0
15	18	0.11	0.22	0
18	19	0.06	0.13	0
19	20	0.03	0.07	0
10	20	0.09	0.21	0
10	17	0.03	0.08	0
10	21	0.03	0.07	0
10	22	0.07	0.15	0
21	22	0.01	0.02	0
15	23	0.1	0.2	0
22	24	0.12	0.18	0
23	24	0.13	0.27	0
24	25	0.19	0.33	0

25	26	0.25	0.38	0
25	27	0.11	0.21	0
28	27	0	0.4	0
27	29	0.22	0.42	0
27	30	0.32	0.6	0
29	30	0.24	0.45	0
8	28	0.06	0.2	0
6	28	0.02	0.06	0

**Tableau A.7** : Données des branches du système test à 30 jeux de barres

c3	c2	C1
0	20	0.002
0	20.75	0.0175
0	20	0.0625
0	20.25	0.00834
0	10	0.025
0	10	0.025

**Tableau A.8** : Données des générateurs couts du système test à 30 jeux de barres

### Réseau électrique à 57 nœuds

Bus_i	type	Pd	Qd	Vm	Vmax	Vmin
1	3	55	17	1.0400	1.0600	0.9400
2	2	3	88	1.0100	1.0600	0.9400
3	2	41	21	0.9850	1.0600	0.9400
4	1	0	0	0.9808	1.0600	0.9400
5	1	13	4	0.9765	1.0600	0.9400
6	2	75	2	0.9800	1.0600	0.9400
7	1	0	0	0.9842	1.0600	0.9400
8	2	150	22	1.0050	1.0600	0.9400
9	2	121	26	0.9800	1.0600	0.9400
10	1	5	2	0.9862	1.0600	0.9400

## ANNEXE

## DONNÉES DES RESEAUX TEST

11	1	0	0	0.9740	1.0600	0.9400
12	2	377	24	1.0150	1.0600	0.9400
13	1	18	2.3	0.9789	1.0600	0.9400
14	1	10.5	5.3	0.9702	1.0600	0.9400
15	1	22	5	0.9880	1.0600	0.9400
16	1	43	3	1.0134	1.0600	0.9400
17	1	42	8	1.0175	1.0600	0.9400
18	1	27.2	9.8	1.007	1.0600	0.9400
19	1	3.3	0.6	0.9702	1.0600	0.9400
20	1	2.3	1	0.9638	1.0600	0.9400
21	1	0	0	1.0085	1.0600	0.9400
22	1	0	0	1.0097	1.0600	0.9400
23	1	6.3	2.1	1.0083	1.0600	0.9400
24	1	0	0	0.9992	1.0600	0.9400
25	1	6.3	3.2	0.9825	1.0600	0.9400
26	1	0	0	0.9588	1.0600	0.9400
27	1	9.3	0.5	0.9815	1.0600	0.9400
28	1	4.6	2.3	0.9967	1.0600	0.9400
29	1	17	2.6	1.0102	1.0600	0.9400
30	1	3.6	1.8	0.9627	1.0600	0.9400
31	1	5.8	2.9	0.9459	1.0600	0.9400
32	1	1.6	0.8	0.9499	1.0600	0.9400
33	1	3.8	1.9	0.9476	1.0600	0.9400
34	1	0	0	0.9592	1.0600	0.9400
35	1	6	3	0.9662	1.0600	0.9400
36	1	0	0	0.9758	1.0600	0.9400
37	1	0	0	0.9849	1.0600	0.9400
38	1	14	7	1.0128	1.0600	0.9400
39	1	0	0	0.9828	1.0600	0.9400
40	1	0	0	0.9728	1.0600	0.9400
41	1	6.3	3	0.9962	1.0600	0.9400
42	1	7.1	4.4	0.9665	1.0600	0.9400
43	1	2	1	1.0096	1.0600	0.9400
44	1	12	1.8	1.0168	1.0600	0.9400
45	1	0	0	1.0360	1.0600	0.9400
46	1	0	0	1.0598	1.0600	0.9400
47	1	29.7	11.6	1.0333	1.0600	0.9400
48	1	0	0	1.0274	1.0600	0.9400
49	1	18	8.5	1.362	1.0600	0.9400
50	1	21	10.5	1.0233	1.0600	0.9400
51	1	18	5.3	1.0523	1.0600	0.9400
52	1	4.9	2.2	0.9804	1.0600	0.9400
53	1	20	10	0.9709	1.0600	0.9400
54	1	4.1	1.4	0.9963	1.0600	0.9400
55	1	6.8	3.4	1.0308	1.0600	0.9400
56	1	7.6	2.2	0.9684	1.0600	0.9400
57	1	6.7	2	0.9648	1.0600	0.9400

**Tableau A.9** : Données des jeux de barres du système test à 57 jeux de barres

bus	Pg	Qg	Qmax	Qmin	Vg	Pmax	Pmin
1	478.6638	-16.1	200	-140	1.04	575.88	0
2	0	-0.8	50	-17	1.01	100	0
3	40	-1	60	-10	0.9850	140	0
6	0	0.8	25	-8	0.98	100	0
8	450	62.1	200	-140	1.005	550	0
9	0	2.2	9	-3	0.98	100	0
12	310	128.5	155	-150	1.0150	410	0

**Tableau A.10** : Données des générateurs du système test à 57 jeux de bar

fbus	tbus	R	X	Ratio
1	2	0.0083	0.280	0
2	3	0.0298	0.0850	0
3	4	0.0112	0.0366	0
4	5	0.0625	0.1320	0
4	6	0.0430	0.1480	0
6	7	0.0200	0.1020	0
6	8	0.0339	0.1730	0
8	9	0.0099	0.0505	0
9	10	0.0369	0.1679	0
9	11	0.0258	0.0848	0
9	12	0.0648	0.2950	0
9	13	0.0481	0.1580	0
13	14	0.0132	0.0434	0
13	15	0.0269	0.0869	0
1	15	0.0178	0.0910	0
1	16	0.0454	0.2060	0
1	17	0.0238	0.1080	0
3	15	0.0162	0.0530	0
4	18	0	0.5550	0.970
5	18	0	0.4300	0.978
5	6	0.0302	0.0641	0
7	8	0.0139	0.0712	0
10	12	0.0277	0.1262	0
11	13	0.0223	0.0732	0

## ANNEXE

## DONNÉES DES RESEAUX TEST

12	13	0.0178	0.0580	0
12	16	0.0180	0.0813	0
12	17	0.0397	0.1790	0
14	15	0.0171	0.0547	0
18	19	0.4610	0.6850	0
19	20	0.2830	0.4340	0
21	20	0	0.7767	1.043
21	22	0.0736	0.1170	0
22	23	0.0099	0.0152	0
23	24	0.1660	0.2560	0
24	25	0	1.1820	1.000
23	24	0	1.2300	1.000
24	26	0	0.0473	1.0430
26	27	0.1650	0.2540	0
27	28	0.0618	0.0954	0
28	29	0.0418	0.0587	0
7	29	0	0.0648	0.9670
25	30	0.1350	0.2020	0
30	31	0.3260	0.4970	0
31	32	0.5070	0.7550	0
32	33	0.0392	0.0360	0
34	32	0	0.9530	0.975
34	35	0.0520	0.0780	0
35	36	0.0430	0.0537	0
36	37	0.0290	0.0366	0
37	38	0.0651	0.1009	0
37	39	0.0239	0.0379	0
36	40	0.0300	0.0466	0
22	38	0.0192	0.0295	0
11	41	0	0.7490	0.955
41	42	0.2070	0.3520	0
41	43	0	0.4120	0
38	44	0.0289	0.0585	0
15	45	0	0.1042	0.955
14	46	0	0.0735	0.900
46	47	0.0230	0.0680	0
47	48	0.0182	0.0233	0
48	49	0.0834	0.1290	0
49	50	0.0801	0.1280	0
50	51	0.1386	0.220	0
10	51	0	0.0712	0.930
13	49	0	0.1910	0.8950
29	52	0.1442	0.1870	0
52	53	0.0762	0.0984	0
53	54	0.1878	0.2320	0
54	55	0.1732	0.2265	0
11	43	0	0.1530	0.9580

<b>44</b>	<b>45</b>	<b>0.0624</b>	<b>0.1242</b>	<b>0</b>
<b>40</b>	<b>56</b>	<b>0</b>	<b>1.1950</b>	<b>0.9580</b>
<b>56</b>	<b>41</b>	<b>0.5530</b>	<b>0.5490</b>	<b>0</b>
<b>56</b>	<b>42</b>	<b>0.2125</b>	<b>0.3540</b>	<b>0</b>
<b>39</b>	<b>57</b>	<b>0</b>	<b>1.3550</b>	<b>0.980</b>
<b>57</b>	<b>56</b>	<b>0.1740</b>	<b>0.2600</b>	<b>0</b>
<b>38</b>	<b>49</b>	<b>0.1150</b>	<b>0.1770</b>	<b>0</b>
<b>38</b>	<b>48</b>	<b>0.0312</b>	<b>0.0482</b>	<b>0</b>
<b>9</b>	<b>55</b>	<b>0</b>	<b>0.1205</b>	<b>0.940</b>

**Tableau A.11:** Données des branches du système test à 57 jeux de barres

<b>C3</b>	<b>C2</b>	<b>C1</b>
<b>0.0775795</b>	<b>20</b>	<b>0</b>
<b>0.01</b>	<b>40</b>	<b>0</b>
<b>0.25</b>	<b>20</b>	<b>0</b>
<b>0.01</b>	<b>40</b>	<b>0</b>
<b>0.022222</b>	<b>20</b>	<b>0</b>
<b>0.01</b>	<b>40</b>	<b>0</b>
<b>0.0322581</b>	<b>20</b>	<b>0</b>

**Tableau A.12:** Données des générateurs couts du système test à 57 jeux de barres

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] C. Bouneau, M. Derdevet, J. Percebois, « les réseaux électriques au coeur de la civilisation industrielle », Ed. Timée-Editions, France, 2007.
- [2] T. Bouktir ; «Application de la programmation orientée objet à l'optimisation de l'écoulement de puissances », Thèse de doctorat d'état. U-Batna, Algérie, juin 2004.
- [3] Turan, G., Modern Power System Analysis. John Wiley & sons, 1988.
- [4] Ward, J.B. and Hale, H.W., "Digital Computer Solution of Power Flow Problems". Trans.Am.Inst.Elect.Eng. Part 3 75 398-404, 1956.
- [5] Martin Hennebel, «*Valorisation des services système sur un réseau de transport d'électricité en environnement concurrentiel*», Thèse de doctorat, U-Paris Sud 11, 2009.
- [6] Vincent RIOUS, «*Le développement du réseau de transport dans un système électrique libéralisé, un problème de coordination avec la production* », Thèse de Doctorat en Sciences économiques, U-Paris-Sud 11, 2007.
- [7] D. Benitez, Crampes C., «*L'allocation des capacités de transport pour l'électricité* », Rapport réalisé pour la Commission de Régulation de l'Energie, juillet 2003.
- [8] T. Bouktir ; «*Application de la programmation orientée objet à l'optimisation de L'écoulement de puissances* », Thèse de doctorat d'état. U-Batna, Algérie, juin 2004.
- [9] H. Saadat, Power system analysis, Second Edition, McGraw - Hill International Editions, 2004
- [10]: Numerical methods for load flow calculation EEH power system laboratory.
- [11] J. Carpentier, "Contribution à l'étude du dispatching économique," Bulletin de la Société Française des Electriciens, Vol. 3, Aout 1962, pp. 431-447.
- [12] H. W. Dommel, W. F. Tinney, "Optimal Power Flow Solutions," IEEE Trans on power apparatus and systems, Vol. PAS.87, N.10, pp.1866-1876, October 1968.
- [13] H.W. Dommel, W.F. Tinney, "Optimal power flow solutions," IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems.

## BIBLIOGRAPHIE

- [14] K. Y. Lee, Y.M. Park, and J.L. Ortiz, "A Unified Approach to Optimal Real and Reactive Power Dispatch," IEEE Trans on Power Systems, Vol. Pas-104, pp.1147-1153, May 1985.
- [15] O.Alsac,J.Bright,M.Prais,B.Stott,"Further developments in Lp-based optimal power flow",IEEE Trans.on Power Systems,Vol.5,No.3,August 1990,pp.697-711.
- [16] S. Sayah, K. Zehar, "Economic load dispatch with security constraints of the Algerian power system using successive linear programming method," Leonardo Journal of Sciences, Issue 9, July-December 2006, pp. 73-86.
- [17] B. Stott, J.L Marinho, "Linear programming for power-system network security applications , " IEEE Trans. on Power Systems, Vol. PAS-98, No. 3, May 1979, pp. 837-848.
- [18] O. Alsac, J. Bright, M. Prais, B. Stott, "Further developments in LP-based optimal power flow," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 5, No. 3, August 1990, pp. 697-711.
- [19] EL-HAWARY M.E., Optimal Power Flow, in "Power system stability and control", chap 20, Springer, 2007.
- [20] O. Alsac, B. Stott, "Optimal load flow with steady-state security," IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-93, No. 3, May 1974, pp. 745-51.
- [21] R. Divi, H.K Kesavan, "A shifted penalty function approach for optimal load-flow, " IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 9, September 1982, pp. 3502-3512.
- [22] L.S. Vargas, V.H. Quintana, A. Vannelli "A tutorial Description of an Interior Point Method and its Applications to Security-Constrained Economic Dispatch," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 8, No. 3, August 1993, pp. 1315-1324.
- [23] J.A. Momoh, J.Z. Zhu, "Improved interior point method for OPF problems," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 14, No. 3, August 1999, pp. 1114-1120.
- [24] Russell C. Eberhart, Yuhui Shi, and James Kennedy. Swarm Intelligence. The Morgan Kaufmann Series in Artificial Intelligence. Morgan Kaufmann, San Francisco, CA, USA, 2001.
- [25] Riccardo Poli, James Kennedy, and Tim Blackwell. Particle swarm optimization. Swarm Intelligence,1(1) :33–57, 2007.
- [26] Michel ,Minoux « programmation mathématique Théorie et algorithme », 2 edition .

## BIBLIOGRAPHIE

- [27] F. Heppner and U. Grenander. A stochastic nonlinear odel for coordinated bird flocks. AAAS Publication, Washington, DC, 1990.
- [28][CLERC et SIARRY 2003] Une nouvelle métaheuristique pour l'optimisation difficile : la méthode des essaims particulaires, 2003
- [29] Ioan Cristian TRELEA, "L'essaim de particule vu comme un système dynamique : convergence et choix des paramètres", conf, L'OEP essaim de particules, Paris, 2003.
- [30] J. Kennedy and R. Eberhart, "A Particle Swarm Optimization", Proceedings of IEEE Inter conf on Neural Networks, Vol. IV, pp.1942- 1948, Perth, Australia, 1995.
- [31] Ioan Cristian TRELEA, "L'essaim de particule vu comme un système dynamique : convergence et choix des paramètres", conf, L'OEP essaim de particules, Paris, 2003.
- [32] Clerc, M. and Kennedy, J., "The particle swarm: explosion stability and convergence in a multidimensional complex space", IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2002.
- [33] Trelea I. C., "The particle swarm optimization algorithm: convergence analysis and parameter selection", Information Processing Letters, Vol. 85, p. 317-325, 2003.
- [34] Yuhui Shi and Russell Eberhart, "A modified particle swarm optimizer", IEEE World Congress on Computational Intelligence, 69-73, 1998.
- [35] Maurice Clerc and James Kennedy. The particle swarm - explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space. IEEE Trans. Evolutionary Computation, 6(1) :58–73, 2002.
- [36] Kennedy, J., "Small Worlds and Mega-Minds : Effects of Neighborhood Topology on Particle Swarm Performance", IEEE Congress on Evolutionary Computation, Volume III, pages 1932-1938, 1999.
- [37] Cui-Ru Wang, He-Jin Yuan, Zhi-Qiang Huahg, Jiang-Wei Zhang, Chen-Jun Sun. "A modified particle swarm optimization algorithm and its application in optimal power flow problem," IEEE Proceeding of the 4th Inter Conf on Machine Learning and Cybernetics,Guangzhou, 18-21 August 2005.
- [38] Ray D. Zimmerman ; Carlos E. Murillo-Sánchez. Manual of MATPOWER "A MATLAB™ Power System Simulation Package Version 3.2 September 21, 2007", © 1997-2007 Power Systems Engineering Research Center (PSERC), School of Electrical Engineering, Cornell University, Ithaca, NY 14853.

### **III .1. Introduction**

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. Lorsqu'un nouveau problème d'optimisation se pose en ingénierie, il faut parfois définir de nouvelles méthodes de résolution , car les techniques existantes ne sont pas précisément adaptées au cas traité. La source d'inspiration de ces méthodes peut être issue de la modélisation des systèmes complexes naturels. Il s'agit de copier et d'adapter les concepts mis en œuvre par le monde du vivant pour la résolution de problèmes d'optimisation. Les recherches sur les comportements collectifs des insectes sociaux fournissent aux chercheurs des méthodes puissantes pour la conception d'algorithmes d'optimisation combinatoire. L'étude menée par des chercheurs éthologiste montre que ces techniques s'appliquent aujourd'hui à tout un ensemble de problèmes scientifiques et techniques.

Dans cette session, on va étudier et tester l'application de l'écoulement de puissance optimal (OPF) par une méthode dite PSO sur des réseaux électriques de 14 ,30 et 57 jeux de barres.

### **III. 2 Optimisation par essaim de particules (PSO)**

Nous avons assisté ces dernières années à une croissance très rapide des travaux utilisant les PSO 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 des problèmes complexes.

### **III .3 Idées de base**

L'optimisation par essaim de particules (PSO) est une technique d'optimisation Stochastique, utilisée pour des fonctions non linéaires. Elle a été développée par Dr. Kennedy et Dr. Eberhart en 1995. [24][25] . Ces algorithmes sont inspirés des essaims d'insectes (ou des bancs de poissons de REYNOLD [5], HEPPNER et GRENANDER [27] , 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. Les nouvelles vitesses et direction de la particule seront définies en fonction de trois tendances :

- la propension à suivre son propre chemin et sa vitesse propre (égoïste)
- sa tendance à revenir vers la meilleure position atteinte (conservateur)
- la tendance à aller vers son meilleur voisin (panurgien)

De ces trois tendances on se rend compte, en accord avec Maurice Clerc et Patrick Siarry [28].

On voit alors que la bio-inspiration à l'origine de l'optimisation par essaim particulaire ressort dans l'algorithme sous la forme d'une intelligence collective : coordination du groupe, instinct individuel et interaction locale entre les individus. Les algorithmes à essaim de particules ont été utilisés pour réaliser différentes tâches d'extraction de connaissances [29].

### **III. 4. Algorithme PSO**

Pour appliquer la PSO il faut définir un espace de recherche constitué de particules et une fonction objectif à optimiser. Le principe de l'algorithme est de déplacer ces particules

afin qu'elles trouvent l'optimum. Chacune de ces particules est dotée :

- D'une position, c'est-à-dire ses coordonnées dans l'ensemble de définition.
- D'une vitesse qui permet à la particule de se déplacer.

De cette façon, au cours des itérations, chaque particule change de position, elle évolue en fonction de son meilleur voisin, de sa meilleure position, et de sa position précédente. C'est cette évolution qui permet de tomber sur une particule optimale.

- D'un voisinage, c'est-à-dire un ensemble de particules qui interagissent directement sur la particule, en particulier celle qui a le meilleur critère.

A tout instant, chaque particule connaît :

- Sa meilleure position visitée. On retient essentiellement la valeur du critère calculée ainsi que ses coordonnées.
- La position du meilleur voisin de l'essaim qui correspond à l'ordonnancement optimal.
- La valeur qu'elle donne à la fonction objectif car à chaque itération il faut une comparaison entre la valeur du critère donnée par la particule courante et la valeur optimal.

L'algorithme PSO 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 PSO comprend plusieurs paramètres de réglage qui permettent d'agir sur le compromis exploration – exploitation [30]. 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 [31].

### III. 5 Algorithme général

Dans PSO chaque particule  $i$  ( $i=1.....N$ ) dans la population est caractérisée par trois vecteurs ( $x_i, V_i, P_i$  ) qui représentent leur position temporelle, vitesse et la meilleure position. chaque particule stock sa meilleure position appelée meilleur personnel  $P_{best}$  qui donne la meilleure fitness dans la mémoire .ils peuvent également consulter la meilleure position de leur voisin, le meilleur du voisin est la meilleure position parmi des meilleurs personnels de la population entière. Par conséquent, la page de position s'appelle le meilleur global.

La nouvelle position d'une particule est déterminée en fonction de sa propre valeur et celle de ses voisines.

Au départ de l'algorithme, la position de la particule ainsi que la vitesse sont initialisées Aléatoirement.

A chaque itération, les particules se déplacent en prenant en compte leur meilleure Position ( $P_{best}$ ) Mais aussi la meilleure position de son voisinage ( $P_{gbest}$ ).

L'expression de la nouvelle vitesse est donnée par l'équation suivante :

$$V_i(k+1) = W \cdot V_i(k) + C_1 \cdot r_1 \cdot (P_{best} - X_i(k)) + C_2 \cdot r_2 \cdot (P_{gbest} - X_i(k)) \quad (3.1)$$

On peut ensuite déterminer la nouvelle position de la particule grâce à la vitesse que l'on vient de calculer (3.1) :

$$X_i(k+1) = X_i(k) + V_i(k+1) \quad (3.2)$$

### Explication :

A l'itération  $k$ , la vitesse d'une particule est modifiée à partir de sa valeur courante, affectée d'un coefficient d'inertie. L'intensité de l'attraction est donnée par les coefficients d'accélération. La meilleure position de la particule appelée  $P_{best}$ . La meilleure position de tout l'essaim appelée  $P_{gbest}$ . La position de la Particule est modifiée à partir de la position courante et de la nouvelle vitesse calculée

L'expérience montre qu'une bonne exploration du domaine de recherche est obtenue en introduisant les nombres aléatoires  $r_1$  et  $r_2$ , en général avec une répartition uniforme entre la marge [0 1]. Il existe une analyse mathématique précisant les conditions de convergence et le choix des paramètres [32], [33], et un article spécialement pour les meilleures choix du coefficient d'inertie  $W$  [34].

Avec :

1.  $x_i(k)$  et  $x_i(k + 1)$  : la position de la particule à l'itération K et K+1.
2.  $V_i(k)$  et  $V_i(k + 1)$  : la vitesse de la particule à l'itération K et K+1.
3.  $P_{best}$  : la meilleure position de la particule c'est à dire la position de la meilleur solution visitée.
4.  $P_{gbest}$  : la meilleure position de son voisinage c'est à dire la position de la meilleur solution connue de son voisinage.
5.  $C_1$  et  $C_2$  : sont des coefficients d'accélération tel que  $C_1+C_2 \leq 4$ .

### **III. 6 Formalisation**

Un essaim de particule est caractérisé par

- le nombre de particules de l'essaim
- facteur d'inertie d'une particule
- Les coefficients de confiance
- La vitesse maximale d'une particule
- La topologie du voisinage d'une particule qui définissent son réseau social .

#### **III. 6.1 Nombre de particules**

Il n'y a pas de règle pour déterminer ce paramètre, faire de nombreux essais permet de se doter de l'expérience nécessaire à l'appréhension de ce paramètre.

Le nombre de particule dépend essentiellement de deux paramètres :

- la taille de l'espace de recherche
- le rapport entre les capacités de calcul de la machine et le temps maximum de recherche.

### III. 6.2 Facteur d'inertie

Le facteur d'inertie  $w$  introduit par SHI et EBERHART permet de définir la capacité d'exploration de chaque particule en vue d'améliorer la converge de la méthode. Cette variante, de Shi et Eberhart constitue la première variante de la version originale de la PSO. Ce coefficient d'inertie est déjà introduit dans la règle de vitesse (3.1 ).

Une grande valeur de  $W$  ( $> 1$ ) est synonyme d'une grande amplitude de mouvement et donc, une exploration globale. Au contraire, une faible valeur de  $W$  ( $< 1$ ) est synonyme de faible amplitude de mouvement et donc, une exploration locale. Fixer ce facteur, revient donc à trouver un compromis entre l'exploration locale et l'exploration globale.

De ce fait, il peut être envisagé de commencer le processus avec une valeur élevée de  $w$  puis de diminuer  $w$  au fil des itérations, en vue d'affiner la recherche au fur et à mesure de la convergence .

L'expression de  $W$  peut être choisie comme suit :

$$w = w_{max} - \frac{w_{max} - w_{min}}{iter_{max}} \times iter \quad (3.3)$$

### III. 6.3 Coefficients de confiance

Les variables de confiance pondèrent les tendances de la particule à vouloir suivre son instinct de conservation ou panurgisme. Les variables aléatoires  $p_1$  et  $p_2$  peuvent être définies de la façon suivante :

$$\begin{cases} p_1 = r_1 c_1 \\ p_2 = r_2 c_2 \end{cases}$$

Où

- **r1** et **r2** suivent une loi uniforme sur [0: 1]
- **c1** et **c2** sont des constantes positives déterminées de façon empirique et suivant la relation  $c1+c2 \leq 4$ .

### III. 6.4 Vitesse maximale et coefficient de constriction :

Afin d'éviter que les particules ne se déplacent trop rapidement dans l'espace de recherche, passant éventuellement à côté de l'optimum, il peut être nécessaire de fixer une vitesse maximale pour améliorer la convergence de l'algorithme. Cependant, on peut s'en passer si on utilise un coefficient de constriction  $k$  introduit par Maurice CLERC [35] et qui permet de resserrer l'hyper-espace de recherche. L'équation suivante donne l'expression de ce coefficient :

$$k = 1 - \frac{1}{p} + \frac{\sqrt{|p^2 - 4p|}}{2} \quad (3.4)$$

Dans ce cas l'expression de la vitesse devient alors :

$$V_i(k+1) = k \left( .w.Vi(k) + C_1. r_1.(Pbest_i - X_i(k)) + C_2. r_2.(P_{gbest} - X_i(k)) \right) \quad (3.5)$$

### III. 6.5 Notion de voisinage

Le voisinage constitue la structure du réseau social. Les particules à l'intérieur d'un voisinage communiquent entre-elles. La topologie du voisinage définit avec qui chacune des particules va pouvoir communiquer.

Différents voisinages ont été étudiés (Kennedy, 1999) [36] et sont considérés en fonction des identificateurs des particules et non des informations topologiques comme les distances euclidiennes dans l'espace de recherche [36] [37].

- Topologie en étoile (figure3.1 (a)) : chaque particule est reliée à toutes les autres , c'est-à-dire que l'optimum du voisinage est l'optimum global.
- Topologie en anneau (figure3.1(b)) : chaque particule communique avec  $n$  voisines (en général  $n=3$ ). Chaque particule tend à se déplacer vers la meilleure dans son voisinage local .
- Topologie en rayon (figure3.1(c)) : une particule "centrale" est connectée à tous les autres.(les particules ne communiquent qu'avec une seule particule centrale).

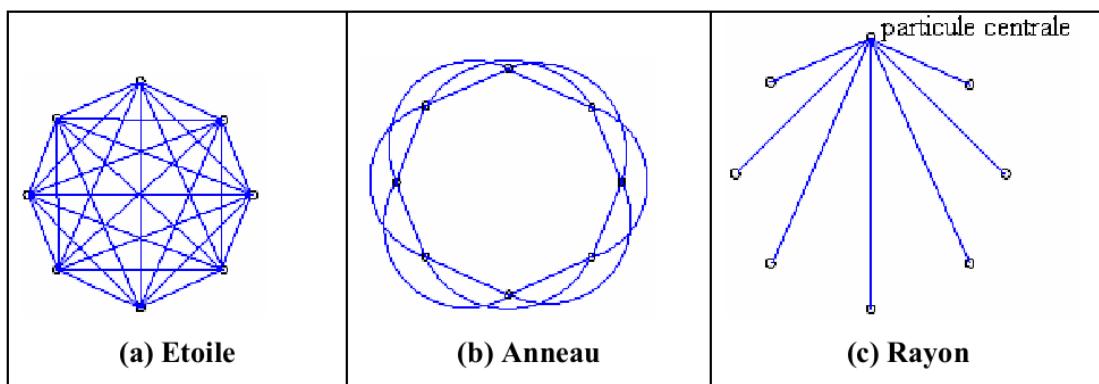


Figure 3.1 Trois topologies du voisinage différentes.

### III. 7 Critères d'arrêt

La convergence vers la solution optimale globale n'est pas garantie dans tous les cas de figure même si les expériences dénotent la grande performance de la méthode. De ce fait, il est fortement conseillé de doté l'algorithme d'une porte de sortie en définissant un nombre maximum d'itération.

L'algorithme doit alors s'exécuter tant que l'un des critères de convergence suivant n'a pas été atteint :

- Nombre itération max a été atteint (c'est le cas de notre étude).
- la variation de la vitesse est proche de zéro.
- le fitness de la solution est suffisant.

### III. 8 Mouvement d'une particule dans l'espace de recherche :

L'algorithme (PSO) est basé sur :

- la communication entre les particules.
- La dispersion uniforme des particules sur l'espace de recherche.

Pendant le passage de la particule(i) par les points (m1,m2,m3) la meilleure valeur de fitness est celle du point m1 donc elle la mémorise comme  $P_{best}$  quand la

particule(i) arrive au point  $m_3$  elle calcule sa nouvelle vitesse et son nouveau sens de déplacement (sens de direction), elle reçoit les valeurs de fitness de toutes les particules .le point  $m_4$  a la meilleure valeur de fitness globalement noté  $P_{gbest}$  .après l'utilisation des deux expressions (3.1),(3.2) le prochain point est le  $m_5$  .

la figure suivante présente le trajet de la particule (i) .

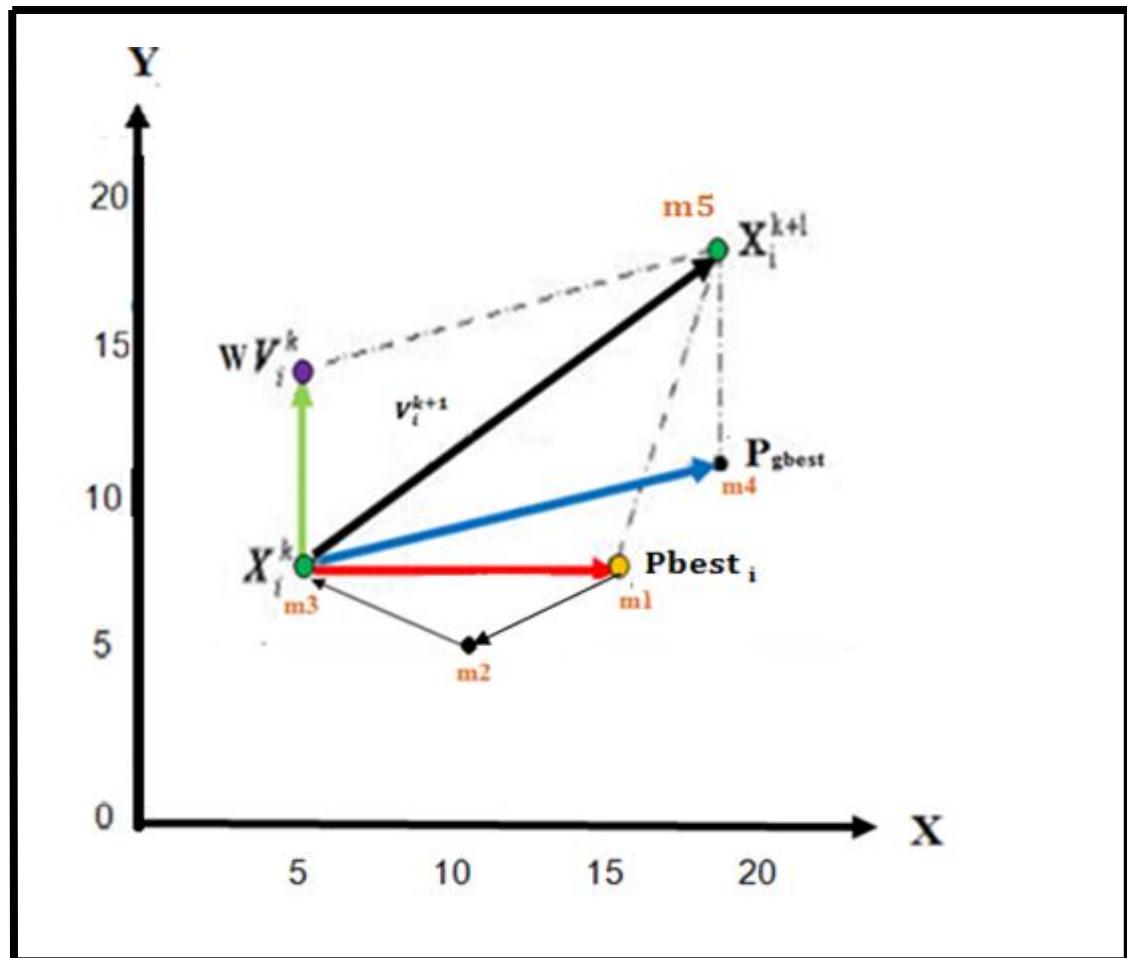


Figure 3.2 Schéma de principe du déplacement d'une particule.

### III.9. Synthèse de l'algorithme :

En considérant un voisinage en étoile l'algorithme est le suivant :

[Les variables et paramètres de l'algorithme]

$N$  nombre de particules,  $x_i, V_i, P_{best}, P_{gbest}, C_1, C_2, r_1, r_2, f$  (fitness).

[Initialisations]

.....

[Traitement]

Répéter

    Pour i allant de 1 à N faire

        Si la valeur de fitness est meilleur que  $P_{best}$

            Alors mettre cette valeur comme nouveau  $P_{best}$

        Fin si

        Si la valeur de fitness est meilleur que  $P_{gbest}$

            Alors mettre cette valeur comme nouveau  $P_{gbest}$

        Fin si

    Fin pour

    Pour i de 1 à N

$$V_i(k+1) = W \cdot V_i(k) + C_1 \cdot r_1 \cdot (P_{best} - X_i(k)) + C_2 \cdot r_2 \cdot (P_{gbest} - X_i(k))$$

$$X_i(k+1) = X_i(k) + V_i(k+1)$$

Fin pour

Jusqu'à ce que (le processus converge)

Algorithme avec un voisinage en étoile

### III.10 Les étapes de la méthode d'Optimisation par Essaim de Particules

Les étapes de cette méthode peuvent être écrites comme suit :

- **1ère étape** : Initialisation des coefficients  $C_1$  et  $C_2$  , le coefficient d'inertie  $W$ .
- **2ème étape** : La création de la population initiale aléatoirement (les positions et les vitesses des particules sont initialisés aléatoirement) et le calcul de la fitness de chaque particule,  $P_{best}$  (la meilleure position de la particule  $i$  dans la population actuelle),  $P_{gbest}$  (la meilleure position dans toutes les essaims (la meilleure des meilleures)).
- **3ème étape** : Le calcul de la nouvelle vitesse et nouvelle position de chaque particule par l'utilisation des formules (3.1) et (3.2).
- **4ème étape** : Le calcul de la meilleure fitness de la population actuelle et comparer avec la précédente pour trouver la meilleure de toutes les populations (  $P_{gbest}$  ).
- **5ème étape** : incrémentation du nombre d'itération  $k = k+1$ .
- **6ème étape** : Si un critère d'arrêt est satisfait alors passer à la **7ème étape**.  
Autrement, aller à la **3ème étape**.
- **7ème étape** : La position enregistrée dans  $P_{gbest}$  est la solution optimale.

### III.11. Organigramme de la PSO :

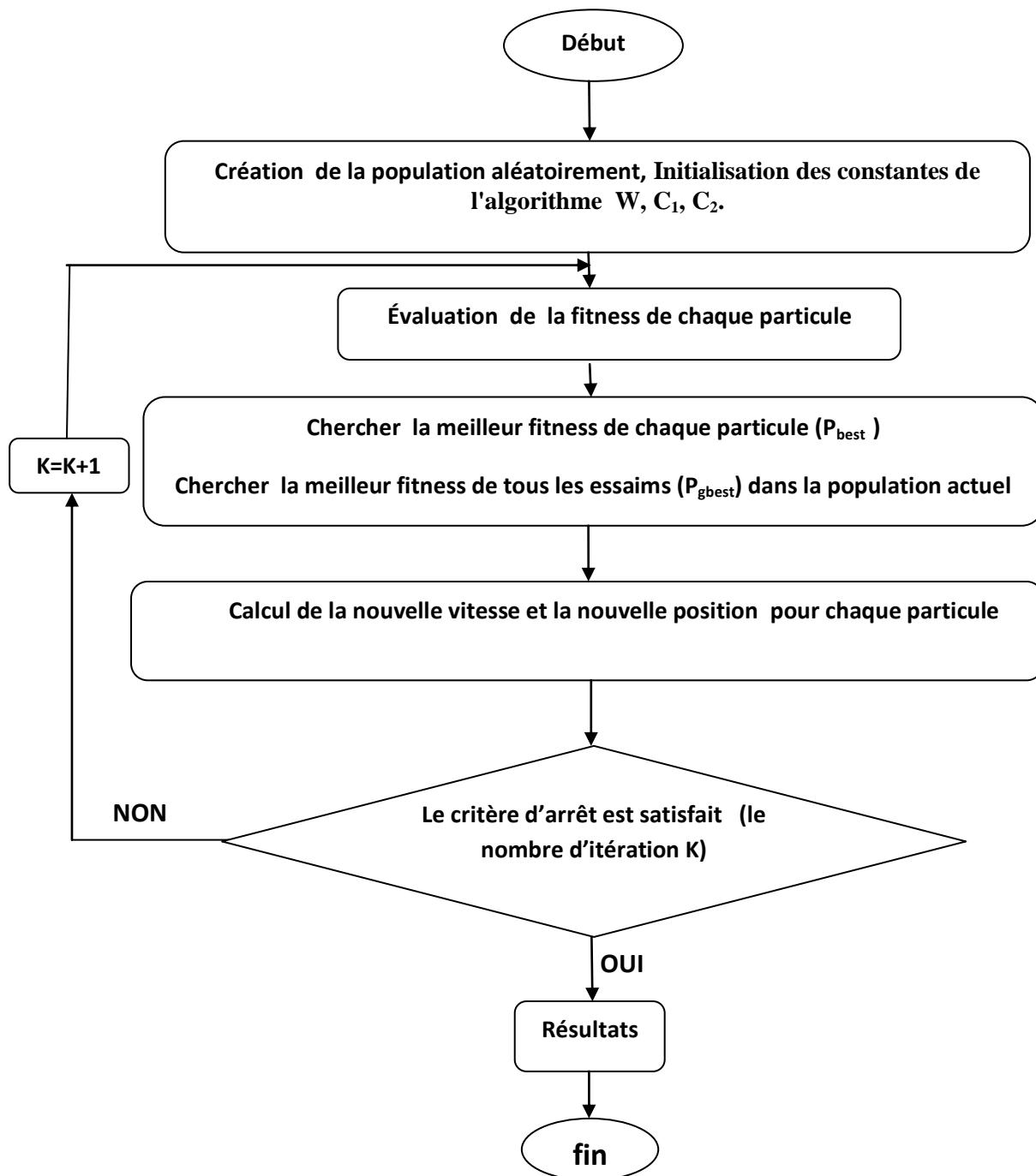


Figure 3.3 Organigramme de la méthode de PSO

### III .12 Test de la méthode PSO sur OPF

Dans cette partie on va appliquer la méthode PSO à l'écoulement de puissance optimal.

#### III.12.1 Variables d'état

Ce sont les variables du problème qui dépendent des variables de contrôle.

Le vecteur  $x$  des variables d'état est composé de la puissance active du générateur de référence, les tensions des jeux de barre de charge, les puissances réactives des générateurs.

Le vecteur d'état sera exprimé par :

$$x^T = [P_{G1}, V_{1PQ}, \dots, V_{NPQ}, Q_1, \dots, Q_N]^T \quad (3,6)$$

Où

$P_{G1}$  La puissance active de jeu de barre de référence

$V_{1PQ}, \dots, V_{NPQ}$  La tension de tous les jeux de barres de charge

,  $Q_1, \dots, Q_N$  la puissance réactive

#### III.12.2 Variables de contrôle

Ce sont les variables du problème qui peuvent être ajustées afin d'optimiser la fonction objectif et satisfaire les contraintes [37] :

le vecteur  $U$  des variables de contrôle comporte les puissances actives générées sauf celle du jeu de barres de référence, les tensions des générateurs et les prises des transformateurs variables.

Le vecteur de contrôle sera exprimé par :

$$U^T = [P_{G2}, \dots, P_{GNG}, \dots, V_{G1}, \dots, V_{GNG}, T_1, \dots, T_{NT}]^T \quad (3,7)$$

Où :

$P_{G2}, \dots, P_{GN}$  Les puissances actives générées sauf celle du jeu de barres de référence.

$V_{G1}, \dots, V_{GN}$  Les tensions de tous les jeux de barres générateurs

$T_1, \dots, T_{NT}$  Les prises des transformateurs variables

NG, NT et sont respectivement le nombre de générateurs, le nombre de transformateurs réglables

### III.12.3. Fonction objectif

La fonction objectif représente le critère utilisé pour l'optimisation. Le problème est de minimiser le coût de la puissance totale générée par l'ensemble des centrales interconnectées.

$$F = \sum_{i=1}^{ng} f_i = \sum_{i=1}^{ng} a_i + \beta_i P_G + \gamma_i P_G^2 \quad (3,9)$$

### III.12.4. Contraintes d'égalité :

Ces contraintes sont traduites par les lois physiques gouvernant le système électrique. La puissance générée doit satisfaire la demande de charge plus les pertes de transmission. Cet équilibre énergétique est décrit par les équations d'équilibre de l'écoulement de puissance.

$$\Delta p_i = 0 = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) - P_{Gi} + P_{Di} \quad (3,10)$$

$$\Delta Q_i = 0 = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) - Q_{Gi} + Q_{Di} \quad (3,11)$$

### II.12.5 Contraintes d'inégalités:

En pratique, on ne doit pas dépasser les limites des éléments physiques du réseau électrique ainsi que les limites créées pour assurer la sécurité du système:

### a) les contraintes des générateurs

- La puissance active générée  $P_{Gi}$  qui est limitée par une borne inférieure  $P_{Gi\ min}$  et une borne supérieure  $P_{Gi\ max}$

$$P_{Gi\ min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi\ max} \quad (3,12)$$

- Pour garder la qualité de service électrique et la sécurité du système, les niveaux de tension des jeux de barres doivent toujours être entre leurs limites max. et min. Ces limites exigent encore l'addition des contraintes d'inégalités.

$$V_{Gi\ min} \leq V_{Gi} \leq V_{Gi\ max} \quad (3,13)$$

### b) les contraintes des transformateurs

- Les transformateurs à prises de charge ont des déviations max. et min. du niveau de tension par rapport à la tension nominale.

$$T_{i\ min} \leq T_i \leq T_{i\ max} \quad (3,14)$$

Afin de résoudre le problème de l'OPF à l'aide de l'algorithme PSO, *La Figure 3.4* montre la structure de la particule utilisée dans notre application.

Puissances des générateurs			Tensions des générateurs			Prises des transformateurs		
$P_{G2}$	$P_{G3}$	....	$V_{G1}$	$V_{G2}$	....	$T_1$	$T_2$	....

**Figure 3.4 :** Structure de la particule

Il convient de mentionner que les variables de contrôle seront générées dans leurs limites admissibles en utilisant les méthodes basées sur les fonctions de pénalités. Afin de manipuler les contraintes d'inégalité des variables d'état, comprenant les puissances active du jeu de barres, les tensions des jeux de barres.

La fonction objectif augmentée (fonction de performance) est calculée par :

$$\begin{aligned}
 \mathbf{F} = \sum_{i=1}^{ng} f_i + \mu_p (P_{Gslack} - P_{Gslack}^{lim})^2 + \mu_v (V_i - V_i^{lim})^2 \\
 + \mu_q (Q_{Gi} - Q_{Gi}^{lim})^2
 \end{aligned} \tag{3,15}$$

où

$\mu_p$ ,  $\mu_q$  et  $\mu_v$  représentent les facteurs de pénalité respectivement pour la puissance active la puissance réactive et la tension.

- $P_{Gslack}^{lim}$  est défini par :

$$P_{Gslack}^{lim} = \begin{cases} P_G^{max} \text{ si } P_{Gslack} > P_{Gslack}^{max} \\ P_{Gslack}^{min} \text{ si } P_{Gslack} < P_{Gslack}^{min} \\ P_{Gslack} \text{ si } P_{Gslack} > P_{Gslack}^{max} \text{ et} \\ \quad P_{Gslack} < P_{Gslack}^{min} \end{cases} \tag{3,16}$$

- $V_i^{lim}$  est défini par pour les nœuds de charge:

$$V_i^{lim} = \begin{cases} V_i^{max} \text{ si } V_i > V_i^{max} \\ V_i^{min} \text{ si } V_i < V_i^{min} \\ V_i \text{ si } V_i > V_i^{max} \text{ et} \\ \quad V_i < V_i^{min} \end{cases} \tag{3,17}$$

- $Q_G^{max}$  est défini par :

$$Q_G^{lim} = \begin{cases} Q_G^{max} \text{ si } Q_G > Q_G^{max} \\ Q_G^{min} \text{ si } Q_G < Q_G^{min} \\ Q_G \text{ si } Q_G > Q_G^{max} \text{ et} \\ \quad Q_G < Q_G^{min} \end{cases} \tag{3,18}$$

### **III.13 .Les étapes de la méthode PSO appliquée à l'OPF**

#### **Étape 1 : Introduction de toutes les données**

Introduire toutes les données concernant le réseau électrique tel que les impédances des lignes, les susceptances, les puissances consommées et les valeurs initiales de toutes les variables et aussi les données relatives à la méthode utilisée comme : le nombre de particules, le coefficient d'inertie  $w$  et les coefficients d'accélération  $C_1$  et  $C_2$ .

#### **Étape 2:Initiation**

La création aléatoire de l'essaim initial, cet essaim est un ensemble des particules et chaque particule contient les valeurs des puissances délivrées par chaque générateur, des tensions et des rapports de transformations en utilisant ces valeurs dans l'espace des valeurs permises. Puisque chaque paramètre à une limite supérieure et une limite inférieure.

#### **Étape 3 : évaluation de la fonction objectif**

Chaque particule est placée sur la position initiale suivant la valeur de la fonction fitness, en se basant sur le concept de ce processus pour chaque particule de l'essaim Dans cette étape. L'influencé directe de la valeur de la fonction objectif de l'OPF dépend de la position de chaque particule.

#### **Étape 4:Le calcul de la meilleure position de chaque particule ( $P_{best}$ ) et la meilleure position dans toutes la population ( $P_{gbest}$ )**

Dans cette étape, on calcule les deux meilleures positions, la première c'est la meilleure position de chaque particule  $P_{best}$  et la deuxième c'est la meilleure position de toutes les particules  $P_{gbest}$  . Ce calcul se fait suivant les valeurs de la fonction fitness.

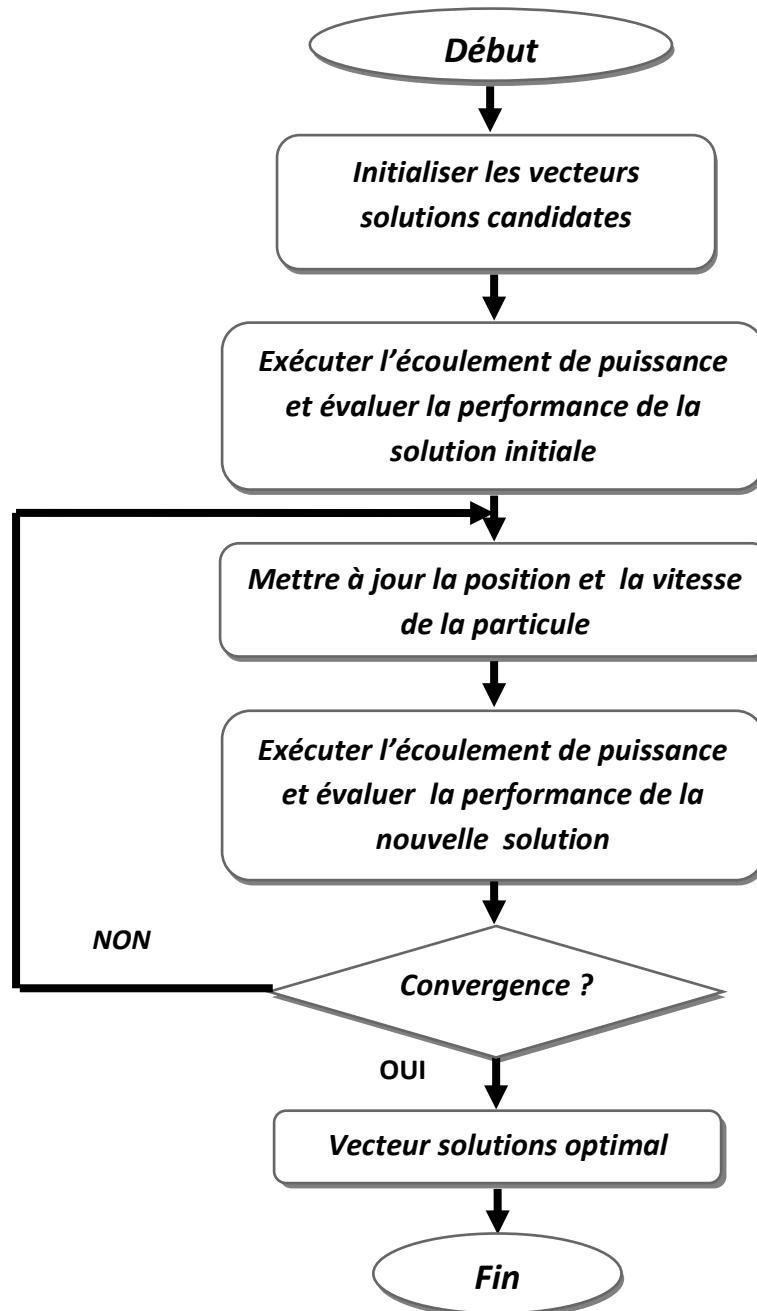
#### **Étape 5 : La modification de la vitesse et de la position**

Selon les équations discutée au pare avant (3.1) et (3.2), chaque particule choisit la prochaine direction en prenant en considération la vitesse initiale de chaque particule, l'inertie et les valeurs de l'intensité d'attraction

Chaque position est l'image de la puissance délivrée par le générateur, la tension et le rapport de transformation correspondant.(coordonnées de particule).

**Étape 6 :** Correction de ces puissances générées les tensions et des puissances réactives par injection des pénalités sur la fonction objectif dans le programme de l'écoulement de puissance.

### III. 13.1 Organigramme général pour la solution de l'OPF :



**Figure 3.5 :** Organigramme général pour la solution de l'écoulement de puissance optimal (OPF)

**III .14 Conclusion :**

Dans ce chapitre, une approche d'optimisation au problème de l'écoulement de puissance optimal est présentée en détail. La recherche dans le secteur des métaheuristiques a rendu le développement possible des méthodes d'optimisation qui ont le but de fournir des solutions de haute qualité aux systèmes.

## IV.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les résultats numériques relatifs à l'application de l'approche proposée à base des PSO, conçue pour optimiser l'écoulement de puissance. Dans le but de bien illustrer l'efficacité et la robustesse de cette méthode. L'application a été faite sur les réseaux test 14, 30 et 57 jeux de barres.

Nous avons considérés trois cas d'étude pour le vecteur solution obtenu :

- **Premier cas** : nous considérons le vecteur solution qui a les paramètres suivants (les puissances actives les tensions et les rapports de transformations).
- **Deuxième cas** : nous considérons le vecteur solution qui a les paramètres suivants (Les puissances actives et les tensions)
- **Troisième cas** : nous considérons considère le vecteur solution qui a seulement les puissances actives.

Le but de ces trois cas est de voir l'importance de chacune de ces trois paramètres(les puissances actives, les tensions et les rapports de transformation) sur le réseau électrique et leurs influences et contribution sur le coût total de production.

Les résultats obtenus par la méthode proposée ont été comparées avec les résultats trouvés par un logiciel nommé « MATPOWER » version 4.1 à la résolution du problème de l'OPF par des méthodes déterministes comme celle du point intérieur (interior point).

L'approche proposée a été développée sous environnement Matlab version 7.8, en utilisant un ordinateur doté d'un processeur AMD Athlon(tm)X2 Dual-Core QL-65 2.10GHz et une mémoire vive de 4GB.

Le tableau suivant présente les paramètres de contrôle de l'algorithme PSO utilisées

Paramètres	Valeur
<b>Taille de la population</b>	100
<b>Les coefficients d'accélération <math>C_1, C_2</math></b>	2
<b>Coefficient d'inertie <math>W_{min}</math></b>	0.4
<b>Coefficient d'inertie <math>W_{max}</math></b>	0.9
<b>Facteur de pénalité de la puissance active <math>UP</math></b>	$30.10^7$
<b>Facteur de pénalité des modules de tension <math>UV</math></b>	$10.10^7$
<b>Facteur de pénalité de la puissance réactive <math>Uq</math></b>	$15.10^7$

**Tableau 4.1** Paramètres de contrôle de PSO pour les réseaux à 14, 30 et 57 JDB

## IV.2 Système test à 14 jeux de barres

La Figure 4.1 montre le réseau standard IEEE à 14 jeux de barres, utilisé pour cette simulation. Les données de ce système sont données dans [38] et reportées en annexe.

Ce système comprend 20 lignes de transmission, 5 générateurs connectés aux jeux de barres ainsi que 3 transformateurs en phase muni de prises réglables.

La limite inférieure de tension de tous les jeux de barre est de 0.94 p.u. alors que la limite supérieure est de 1.06 p.u. pour le jeu de barres de référence et tous les jeux de barres de charge, sauf le jeu de barre no.6 et 8 dont la limite inférieure est de 0.94 pu et la limite supérieure est de 1.1, la limite inférieure du rapport de transformation est de 0.9 alors que la limite supérieure est de 1.1. Le jeu de barres 1 est pris comme référence.

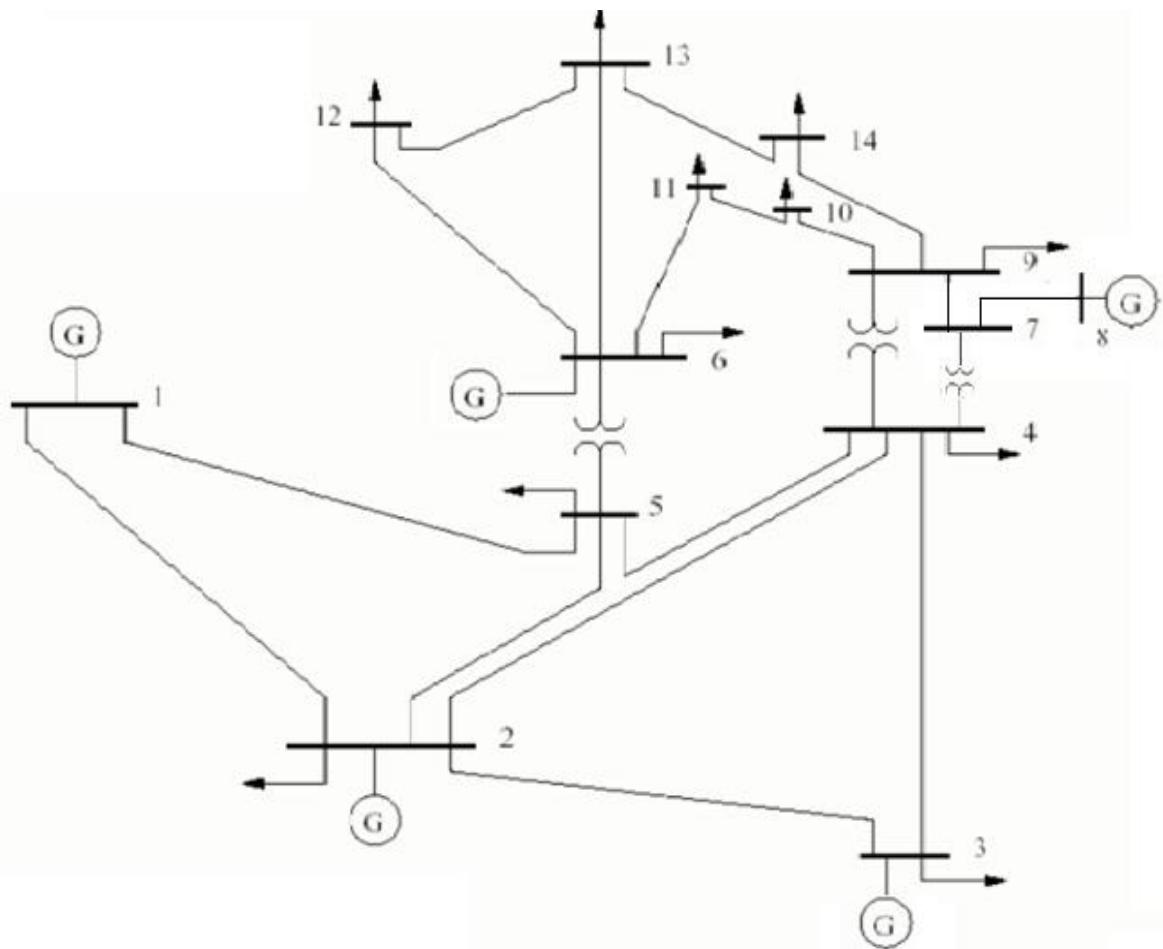


Figure 4.1 Réseau test à 14 jeux de barres

La meilleure solution obtenue par PSO est exposée dans le Tableau 4.1 avec les paramètres suivants :  $C_1 = 2$ ,  $C_2 = 2$ . On remarque que la solution donnée par PSO donne le plus faible coût et toutes les valeurs sont dans leurs limites admissibles (le cas où tous les paramètres sont considérés c'est le premier cas).

Le tableau 4.2 présente une récapitulation des résultats d'optimisation pour la solution donnant le coût de production.

Variables	Limites		État optimal	PSO			
	Inferieure Supérieures						
				1 <sup>er</sup> cas	2 <sup>ème</sup> cas	3 <sup>ème</sup> cas	
PG2 (MW)	0.00	140	40.00	36,77	36,73	37,24	
PG3 (MW)	0.00	100	0.00	28,71	28,61	34,12	
PG6 (MW)	0.00	100	0.00	0	0	0	
PG8 (MW)	0.00	100	0.00	8,16	8,54	0	
VG1 (p.u)	0.94	1.06	1.06	1,06	1,06		
VG2 (p.u)	0.94	1.06	1.045	1,046	1,044		
VG3 (p.u)	0.94	1.06	1.010	1,022	1,018		
VG6 (p.u)	0.94	1.1	1.070	1,06	1,06		
VG8 (p.u)	0.94	1.1	1.090	1,06	1,06		
T1 (4-7)	0.9	1.1	0.978	1,019			
T2 (4-9)	0.9	1.1	0.969	0,96			
T3 (5-6)	0.9	1.1	0.932	0,976			
<b>Le Coût (\$/h)</b>			<b>8081</b>	<b>8077.3</b>	<b>8081.2</b>	<b>8082.3</b>	

**Tableau 4.2** Les valeurs optimales pour les trois cas avec les coûts de production pour un réseau à 14 JDB

Les coûts de production associés à chaque solution finale pour chaque essai ( chaque cas) sont représentés dans le tableau 4.2 .D'après ces résultats nous peuvent conclure que :

- Nous avons pu atteindre notre objectif qui est la minimisation du coût de production (8077,3 < Etat optimal 8081) .

En comparant l'importance de chacun des paramètres (P, V, T), nous avons étudié les trois cas discuté au par avant, nous avons trouvé trois coût différents dont lequel le meilleur coût correspond au premier cas la où tous les paramètres de réseau sont considérés.

Pour le troisième cas la où nous avons considéré que la puissance active, nous avons trouvé un coût supérieur à celui trouvé dans le premier cas ( sa est due à l'absence de la tension et le rapport de transformation ).

D'après les résultats obtenus nous pouvons conclure que si on considère que la puissance active on aura un coût minimal, mais le meilleur coût minimal est obtenue seulement si prend tous les paramètres en considération, alors la puissance active est un paramètre essentiel dans la minimisation du coût de production ( grande contribution ).

Les deux autres paramètres (  $V$ ,  $T$  ) ont une légère contribution dans la minimisation du coût de production. On conclu alors que les tensions et les rapports de transformation n'ont pas une grande influence sur le coût total de production dans ce réseau.

#### Premier cas :

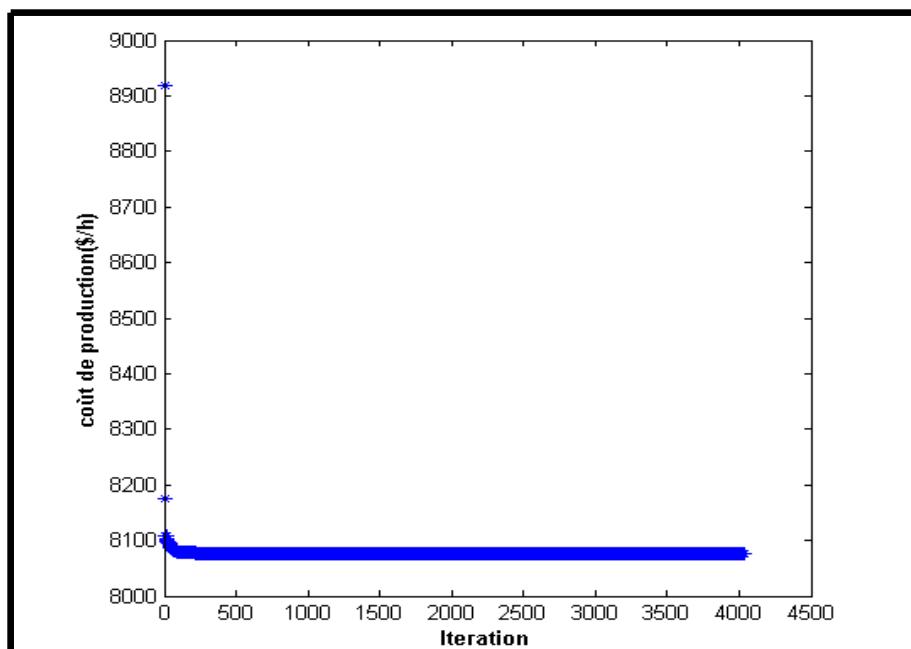


Figure 4.2 Convergence de PSO pour un réseau à 14 JDB

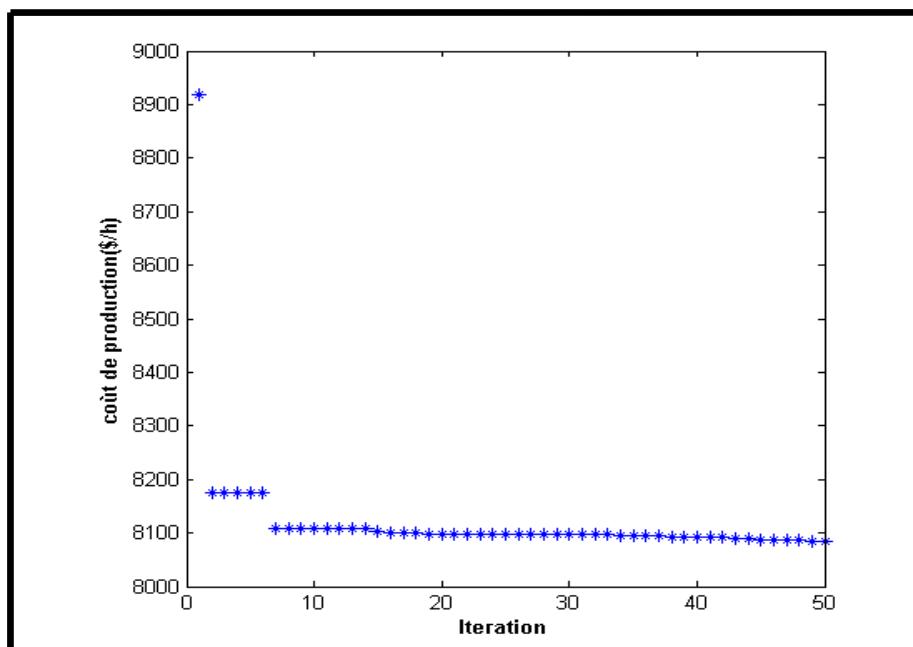


Figure 4.3 Convergence de PSO pour un réseau à 14 JDB et 50 itérations

Deuxième cas :

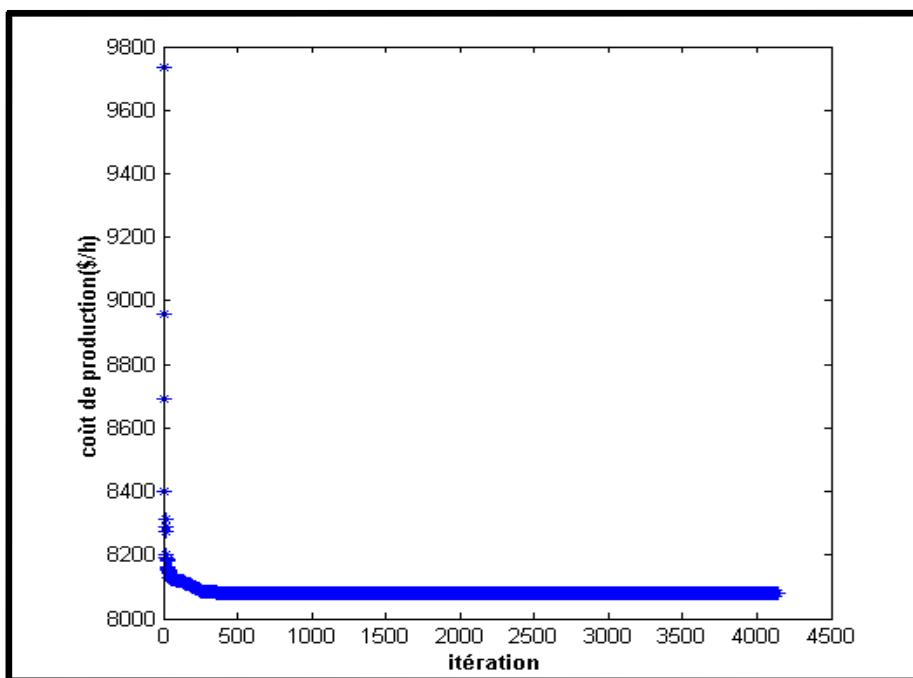


Figure 4.4 Convergence de PSO pour un réseau à 14 JDB

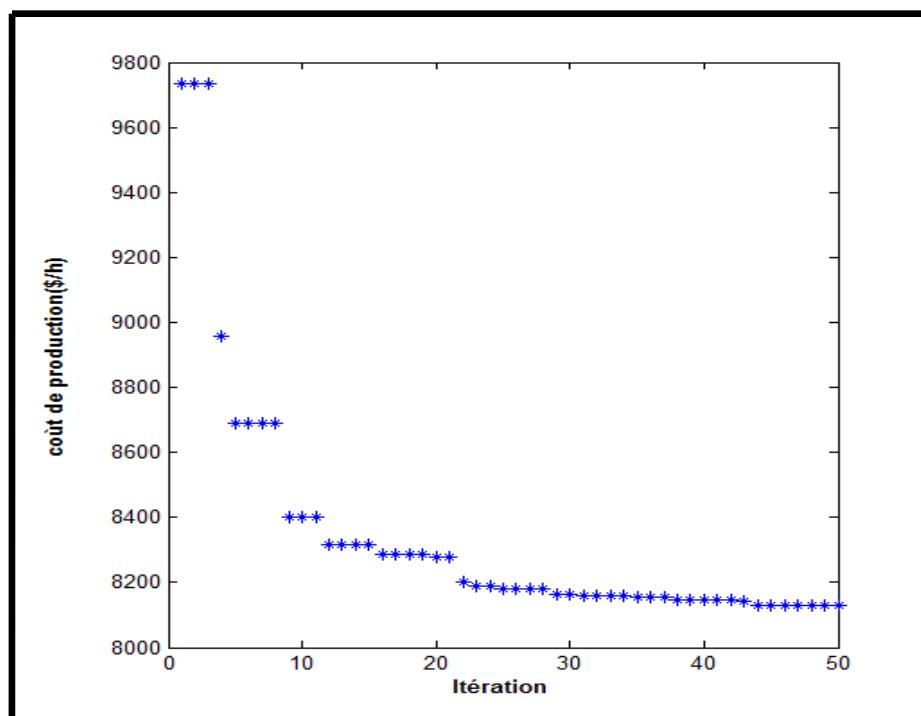


Figure 4.5 Convergence de PSO pour un réseau à 14 JDB et 50 itérations

Troisième cas :

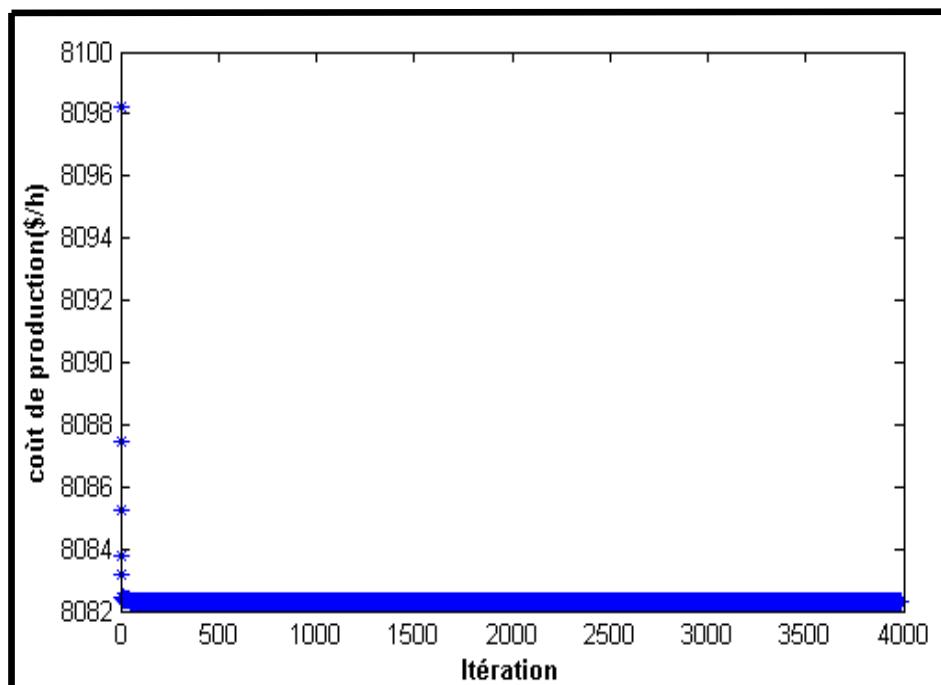


Figure 4.6 Convergence de PSO pour un réseau à 14 JDB

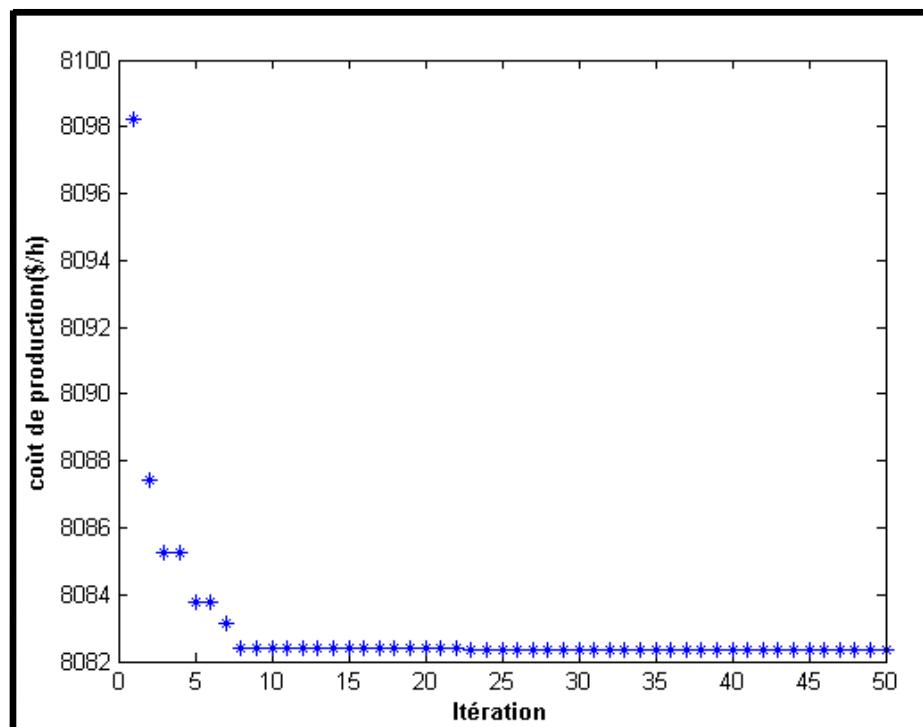


Figure 4.7 Convergence de PSO pour un réseau à 14 JDB et 50 itérations

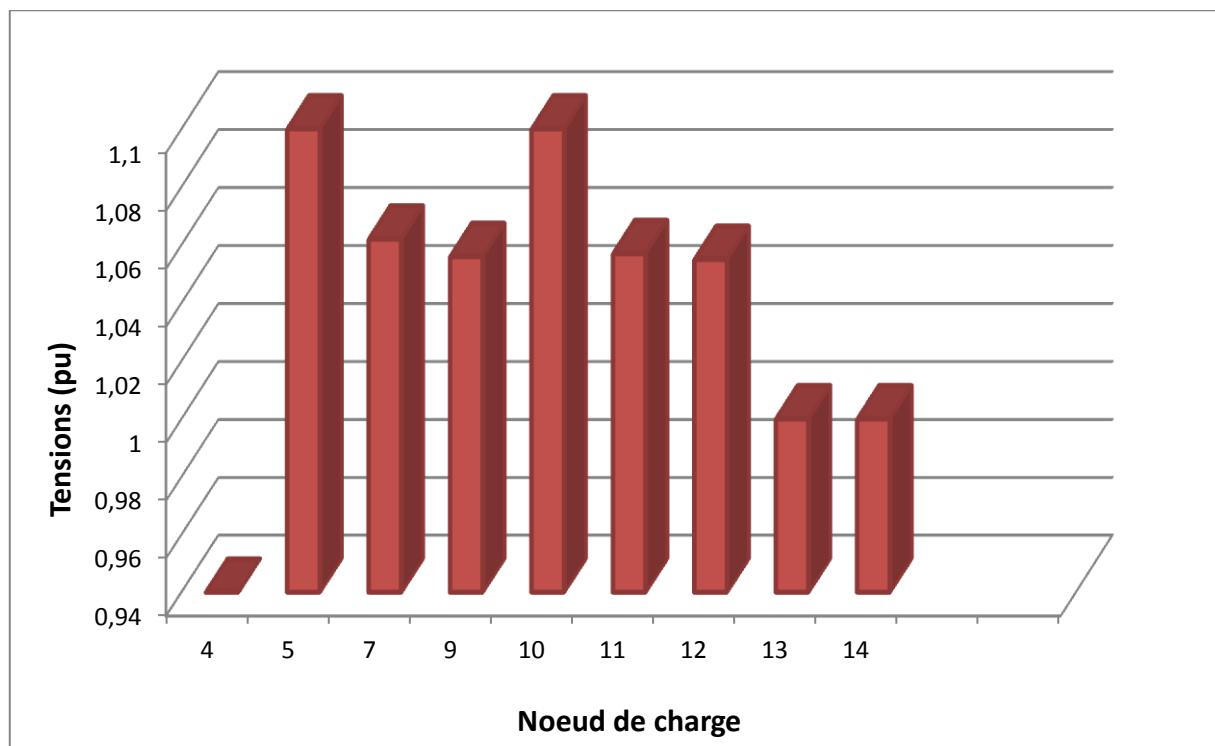


Figure 4.8 Les tensions de charge pour le réseau de 14 JDB

La figure 4.8 présente les tensions pour les jeux de barres de charge pour le réseau de 14 JDB, les paramètres sont dans leurs limites admissibles telles que la tension maximale égale à 1.1 (pu) et les tensions minimales égales à 0.94 (pu).

### IV .3 Système test à 30 jeux de barres

La Figure 4.9 montre le réseau standard IEEE à 30 jeux de barres, utilisé pour cette simulation. Les données de ce système sont données dans [38] et reportées en annexe.

Ce système comprend 41 lignes de transmission, 6 générateurs connectés aux jeux de barres.

La limite inférieure de tension de tous les jeux de barre est de 0.95 p.u alors que la limite supérieure est de 1.05 p.u pour le jeu de barres de référence et tous les jeux de barres de charge, sauf le jeu de barre no.2 ,13 ,22,23 et 27 dont la limite supérieure est de 1.1 p.u .

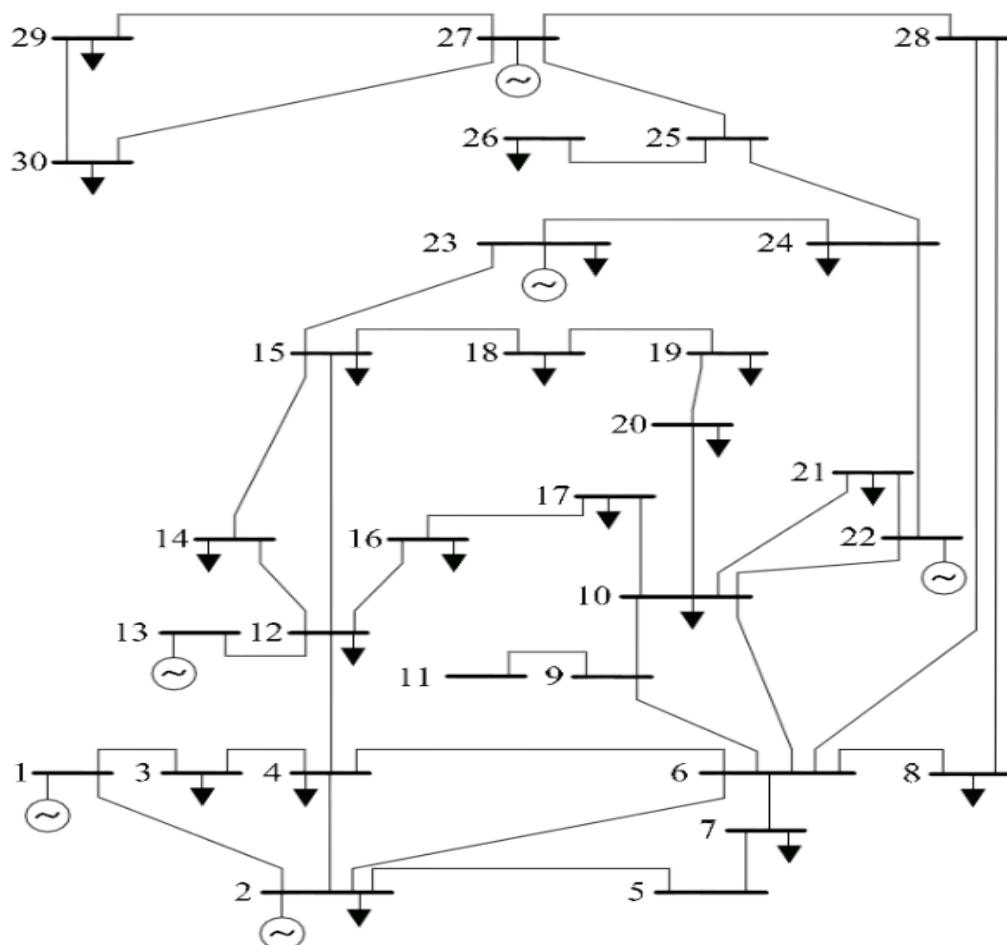


Figure4.9 Réseau test à 30 jeux de barres

Le tableau 4.3 présente une récapitulation des résultats d'optimisation pour la solution donnant de coût de production.

Variables	Limites		État optimal	PSO	
	Inferieure	Supérieures		1 <sup>er</sup> cas	2 <sup>ème</sup> cas
pg2 (MW)	0	80	60,97	0	0
pg22 (MW)	0	50	21,59	17,53	18,5
pg27 (MW)	0	55	26,91	34,34	34,16
pg23 (MW)	0	30	19,2	20,09	19,79
pg13 (MW)	0	40	37	40	40
vg1 (p.u)	0.95	1.05	1.00	1,05	
vg2 (p.u)	0.95	1.1	1.00	1,043	
vg22 (p.u)	0.95	1.1	1.00	1,033	
vg27 (p.u)	0.95	1.1	1.00	1,054	
vg23 (p.u)	0.95	1.1	1.00	1,042	
vg13 (p.u)	0.95	1.1	1.00	1,079	
Le coût (\$/h)			5505	5494	5516

**Tableau4.3** les valeurs optimales pour les trois cas avec les coûts de production

Pour un réseau à 30 JDB

Les coûts de production associés à chaque solution finale pour chaque essai ( chaque cas) sont représentés dans le tableau 4.3 .D'après ces résultats nous pouvons conclure que :

- Nous avons pu atteindre notre objectif qui est la minimisation du coût de production (5494< Etat optimal 5505) .

En comparant l'importance de chacun des paramètres (P, V), nous avons étudié les deux cas discuté au par avant, nous avons trouvé deux coût différents dont lequel le meilleur coût correspond au premier cas la où tous les paramètres de réseau sont considérés.

pour le deuxième cas la où nous avons considéré que la puissance active, nous avons trouvé un coût supérieur à celle trouvé dans le premier cas ( ce est due à l'absence de la tension ).

D'après les résultats obtenus nous pouvons conclure que si on considère que la puissance active on aura un coût minimal, mais le meilleur coût minimal est obtenu seulement si prend tous les paramètres en considération, alors la puissance active est un paramètre essentiel dans la minimisation de coût de production ( grande contribution ).

Le paramètre ( V ) a une légère contribution dans la minimisation du coût de production. On conclu alors que les tensions n'ont pas une grande influence sur le coût total de production dans ce réseau.

Premier cas :

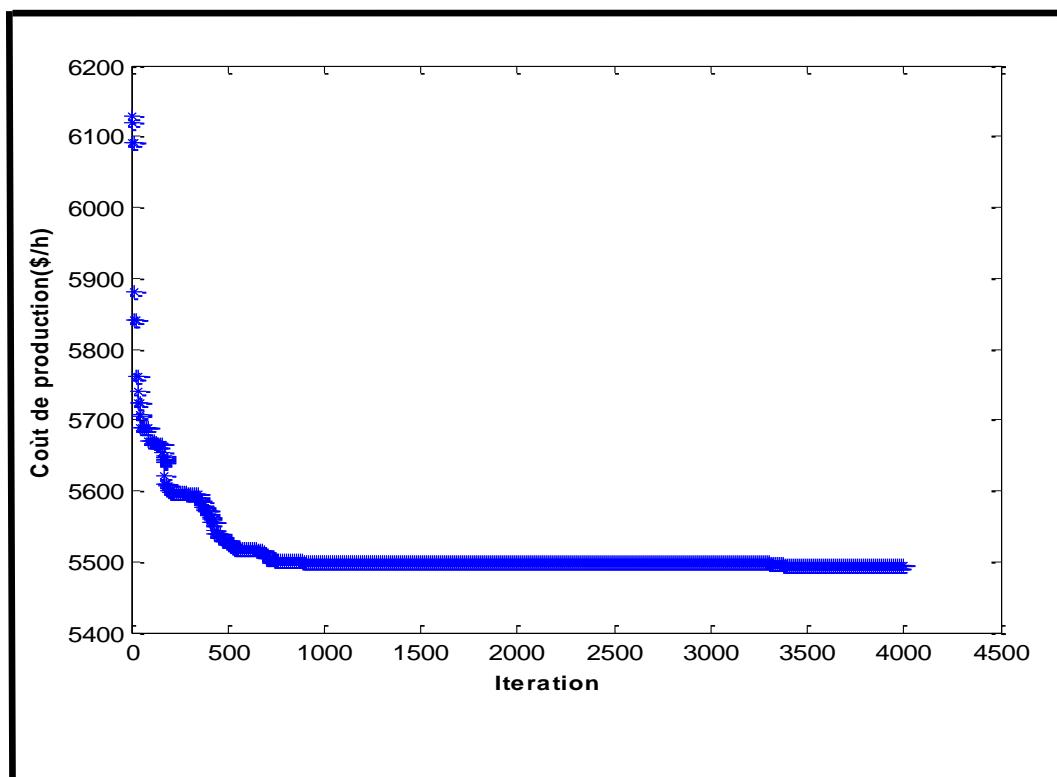


Figure 4.10 Convergence de PSO pour un réseau de 30 JDB

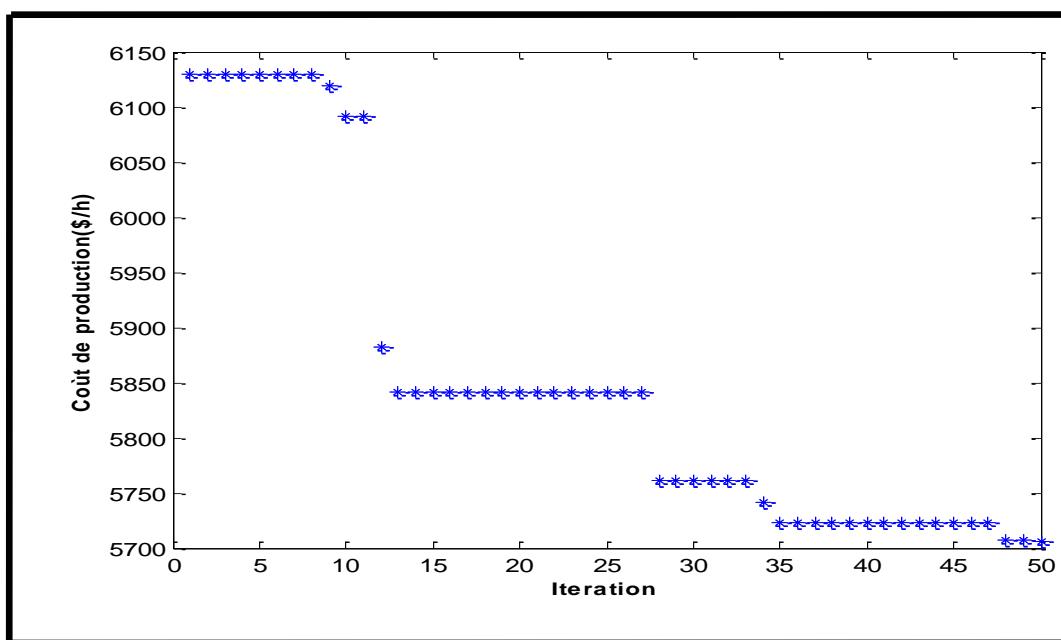


Figure 4.11 Convergence de PSO pour un réseau de 30 JDB et 50 itérations

Deuxième cas :

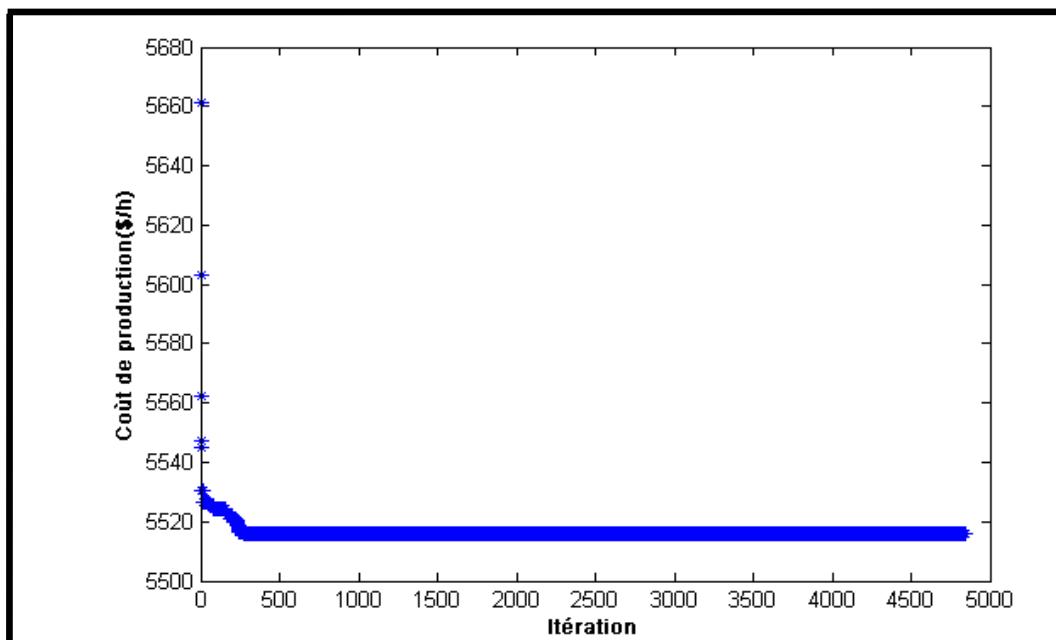


Figure 4.12 Convergence de PSO pour un réseau de 30JDB

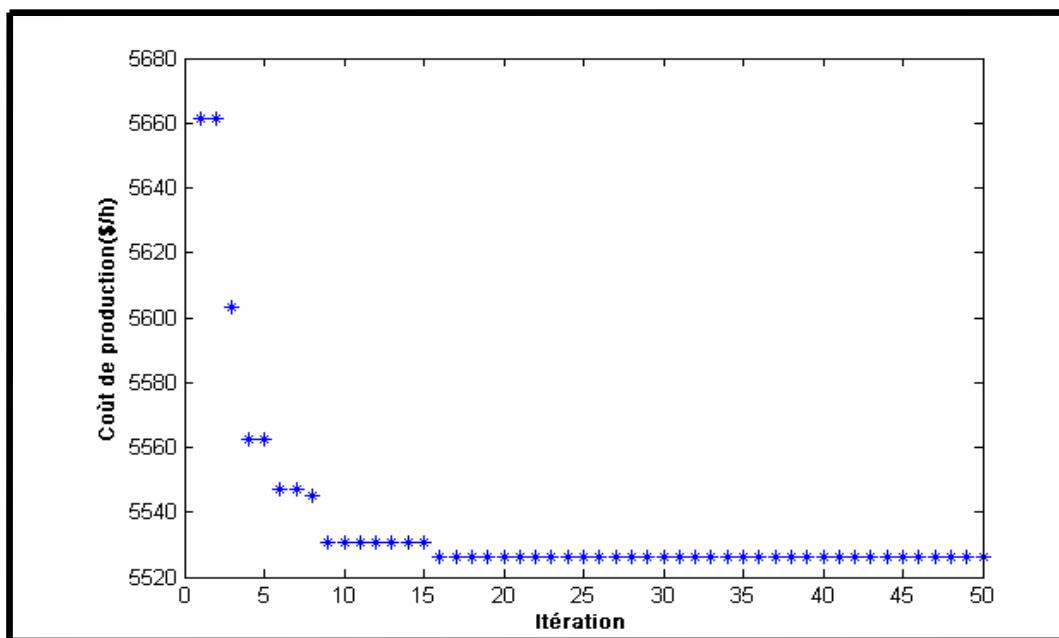


Figure 4.13 Convergence de PSO pour un réseau de 30 JDB et 50 itérations

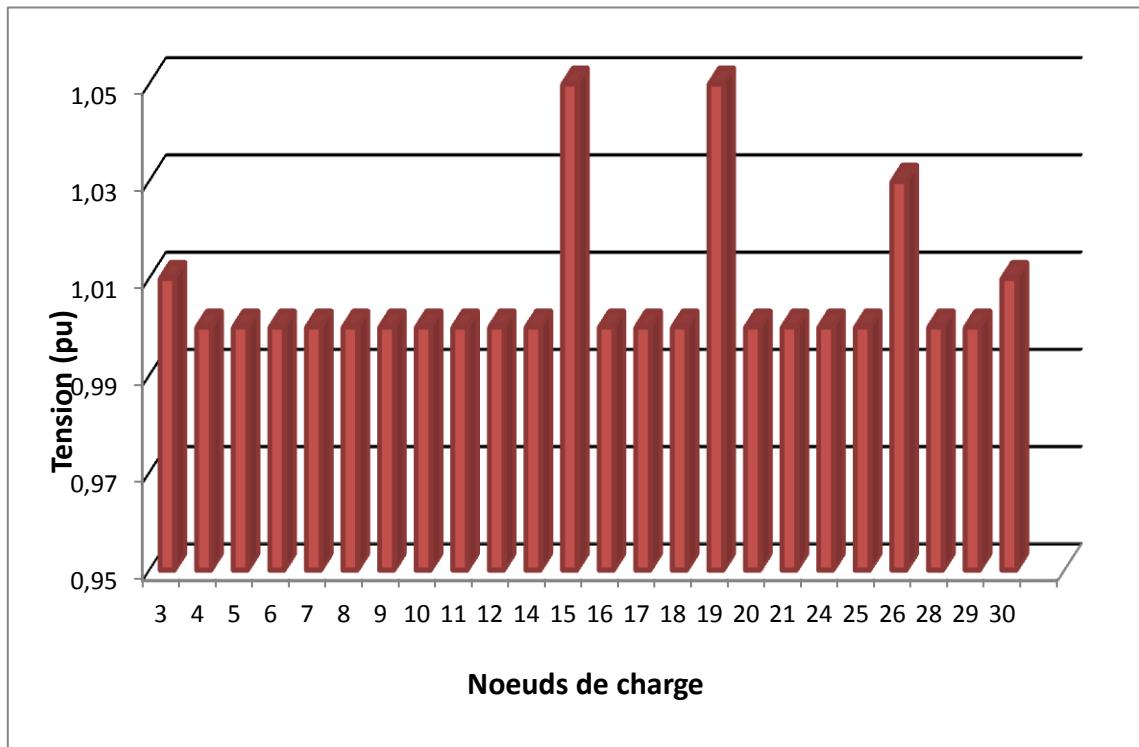


Figure 4.14 Les tension de charge pour le réseau de 30 JDB

#### IV.4 Système test à 57 jeux de barres

La Figure 4.15 montre le réseau standard IEEE à 57 jeux de barres, utilisé pour cette simulation. Les données de ce système sont données dans [38] et reportées en annexe.

Ce système comprend 80 lignes de transmission, 7 générateurs connectés aux jeux de barres ainsi que 17 transformateurs en phase muni de prises réglables.

La limite inférieure de tension de tous les jeux de barre est de 0.94 p.u. alors que la limite supérieure est de 1.06 p.u pour le jeu de barres de référence et tous les jeux de barres de charge, la limite inférieure du rapport de transformation est de 0.9 alors que la limite supérieure est de 1.1. Le jeu de barres 1 est pris comme référence.

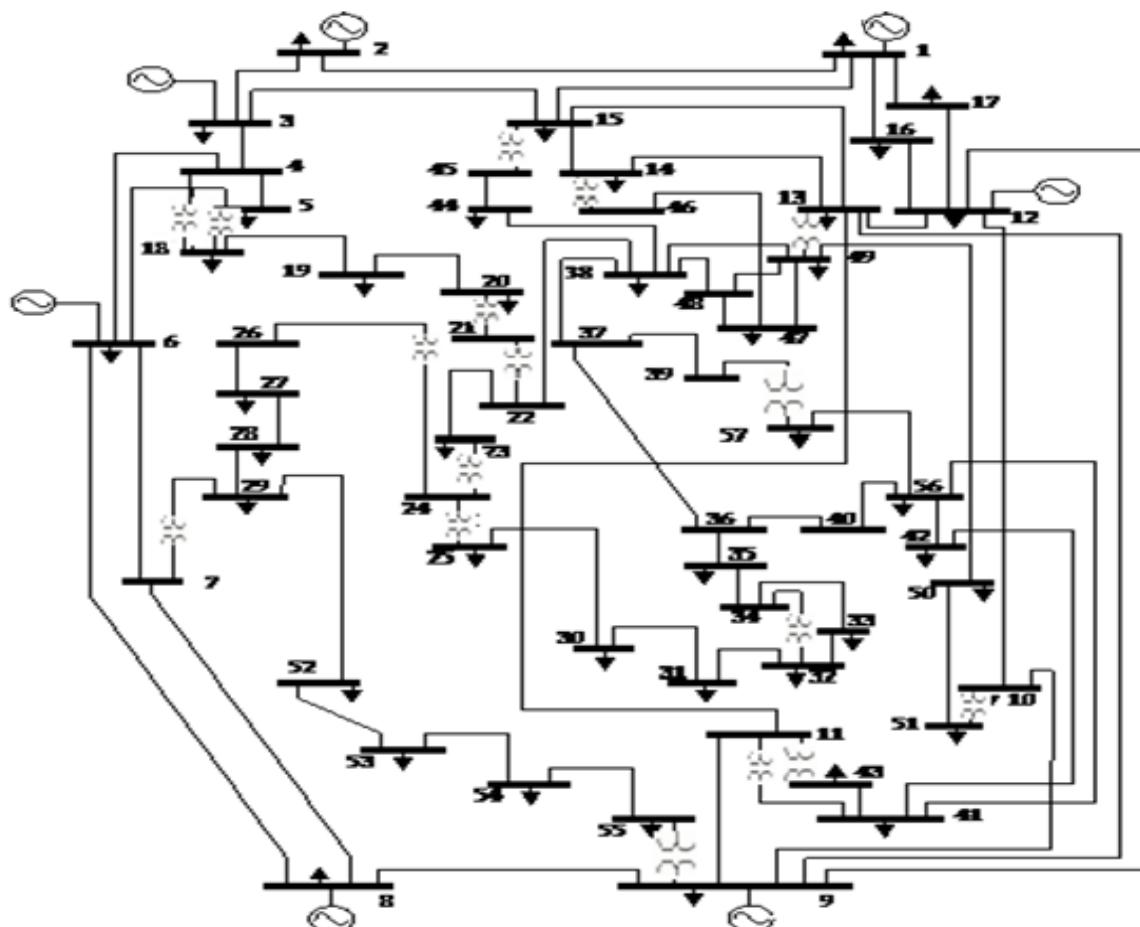


Figure4.15 réseau test à 57 jeux de barres

Le tableau 4.4 présente une récapitulation des résultats d'optimisation pour la solution donnant de coût de production.

Variables	Limites		État optimal	PSO		
	Inferieure	Supérieures		1 er cas	2 éme cas	3éme cas
pg2(MW)	0	100	0	87,18	100	91.06
pg3(MW)	0	140	40.00	44,57	44,25	45,18
pg6(MW)	0	100	0.00	75,45	100	66.52
pg8(MW)	0	550	450.00	454,97	451,86	455,82
pg9(MW)	0	100	0	98,93	81,28	100
pg12(MW)	0	410	310	362,11	352,84	366.49
Vg1(p.u)	0.9400	1.06	1.040	1,042	1,007	
Vg2(p.u)	0.9400	1.1	1.010	1,041	1,015	
Vg3(p.u)	0.9400	1.1	0.985	1,038	1,012	
Vg6(p.u)	0.9400	1.1	0.9800	1,047	1,039	
Vg8(p.u)	0.9400	1.1	1.0050	1,061	1,04	
Vg9(p.u)	0.9400	1.1	0.9800	1,034	1,005	
Vg12(p.u)	0.9400	1.1	1.0150	1,04	0,94	
T1(4 18)	0,9	1,1	0.970	1,1		
T2(5 18)	0,9	1,1	0.978	0,929		
T3(21 20)	0,9	1,1	1.043	1,071		
T4(24 25 )	0,9	1,1	1.000	1,079		
T5(23 24 )	0,9	1,1	1.000	0,9		
T6(24 26)	0,9	1,1	1.0430	1,014		
T7(7 29)	0,9	1,1	0.9670	0,976		
T8(34 32)	0,9	1,1	0.975	0,978		
T9(11 41)	0,9	1,1	0.955	0,959		
T10(15 45)	0,9	1,1	0.955	0,96		
T11(14 46)	0,9	1,1	0.900	0,948		
T12(10 51)	0,9	1,1	0.930	0,969		
T13(13 49)	0,9	1,1	0.8950	0,921		
T14(11 43)	0,9	1,1	0.9580	0,949		
T15(40 56)	0,9	1,1	0.9580	1,017		
T16 (39 57)	0,9	1,1	0.980	0,983		
T17 (9 55)	0,9	1,1	0.940	0,981		
<b>Le Coût (\$/h)</b>			<b>41737</b>	<b>41696</b>	<b>41838</b>	<b>41873</b>

Tableau 4.4 Les valeurs optimales pour les trois cas avec les coûts de production pour un

réseau de 57JDB

Les coûts de production associés à chaque solution finale pour chaque essai ( chaque cas) sont représentés dans le tableau 4.4 .D'après ces résultats nous pouvons conclure que :

- Nous avons pu atteindre notre objectif qui est la minimisation du coût de production (41737< Etat optimal 41696) .

En comparant l'importance de chacun des paramètres (P, V, T), nous avons étudié les trois cas discutés au paragraphe précédent, nous avons trouvé trois coûts différents dont lequel le meilleur coût correspond au premier cas là où tous les paramètres de réseau sont considérés.

pour le troisième cas là où nous avons considéré que la puissance active, nous avons trouvé un coût supérieur à celle trouvé dans le premier cas ( ce qui est dû à l'absence de la tension et du rapport de transformation ).

D'après les résultats obtenus nous pouvons conclure que si on considère que la puissance active on aura un coût minimal, mais le meilleur coût minimal est obtenu seulement si on prend tous les paramètres en considération, alors la puissance active est un paramètre essentiel dans la minimisation du coût de production ( grande contribution ).

Les deux autres paramètres ( V, T ) ont une légère contribution dans la minimisation du coût de production. On conclut alors que les tensions et les rapports de transformation n'ont pas une grande influence sur le coût total de production dans ce réseau.

Premier cas :

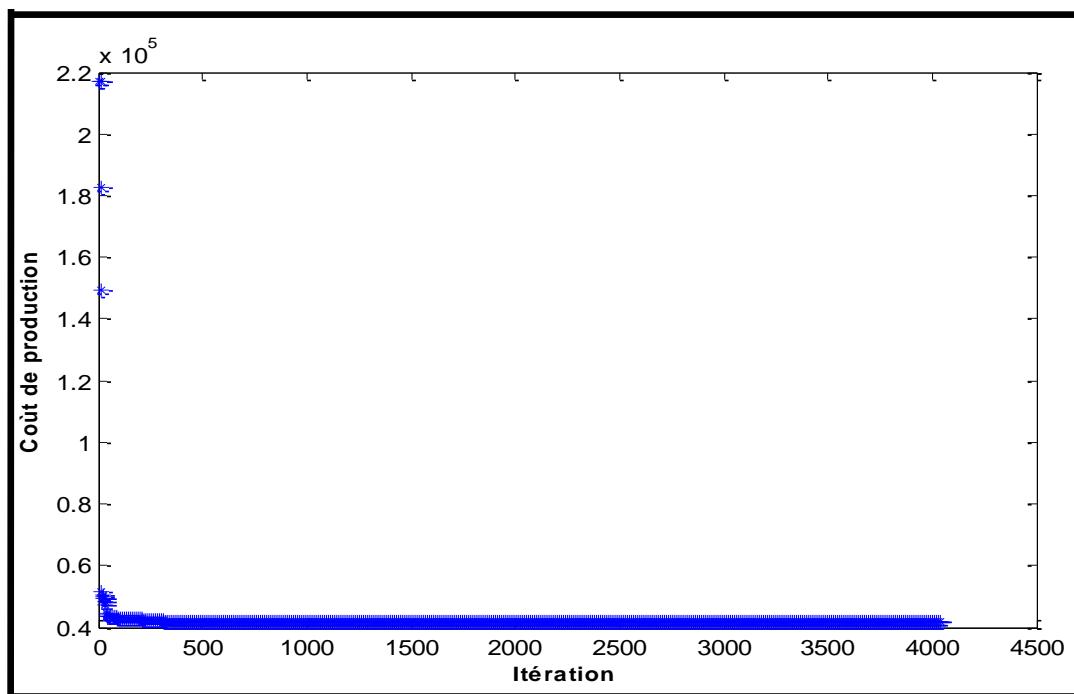


Figure 4.16 Convergence de PSO pour un réseau de 57 JDB

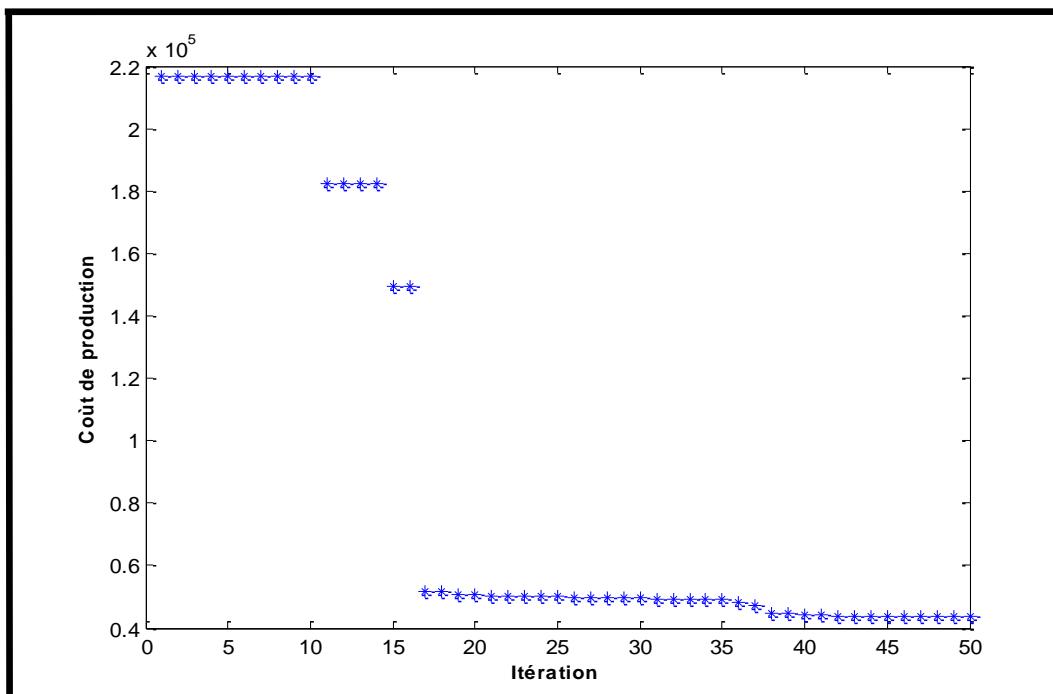


Figure 4.17 Convergence de PSO pour un réseau de 57 JDB et 50 itérations

Deuxième cas :

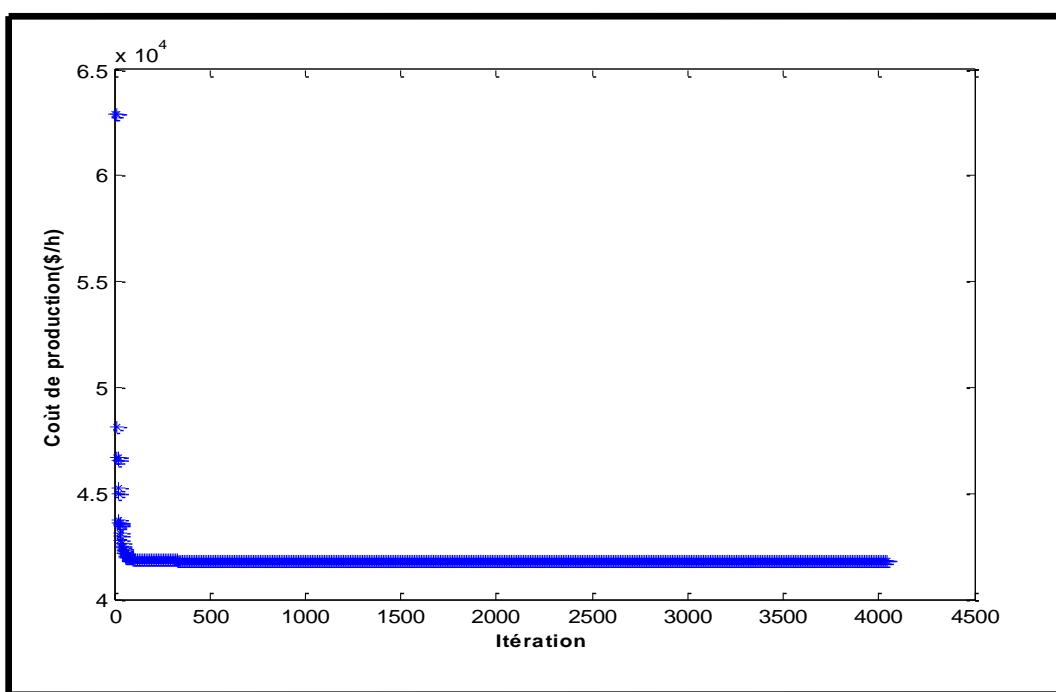


Figure 4.18 Convergence de PSO pour un réseau de 57 JDB

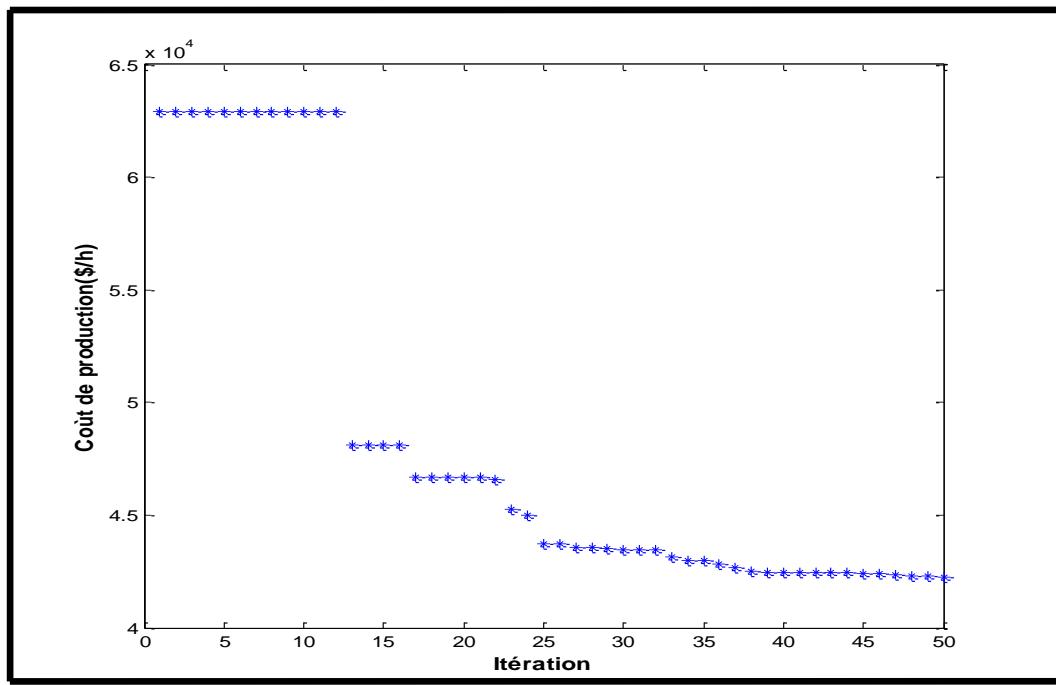
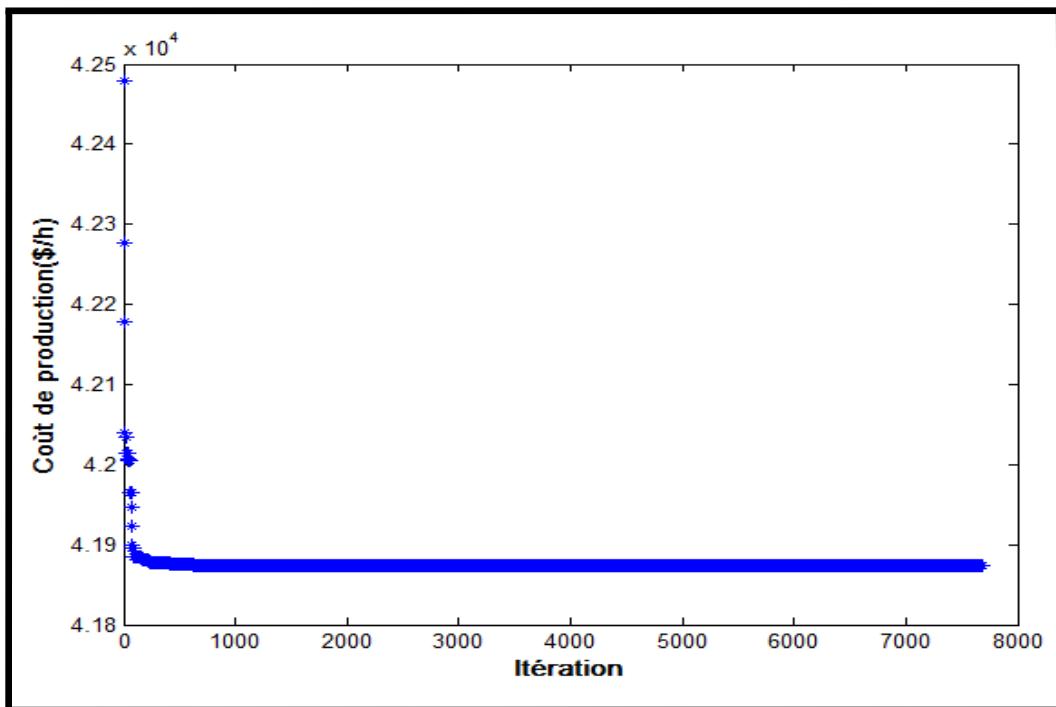
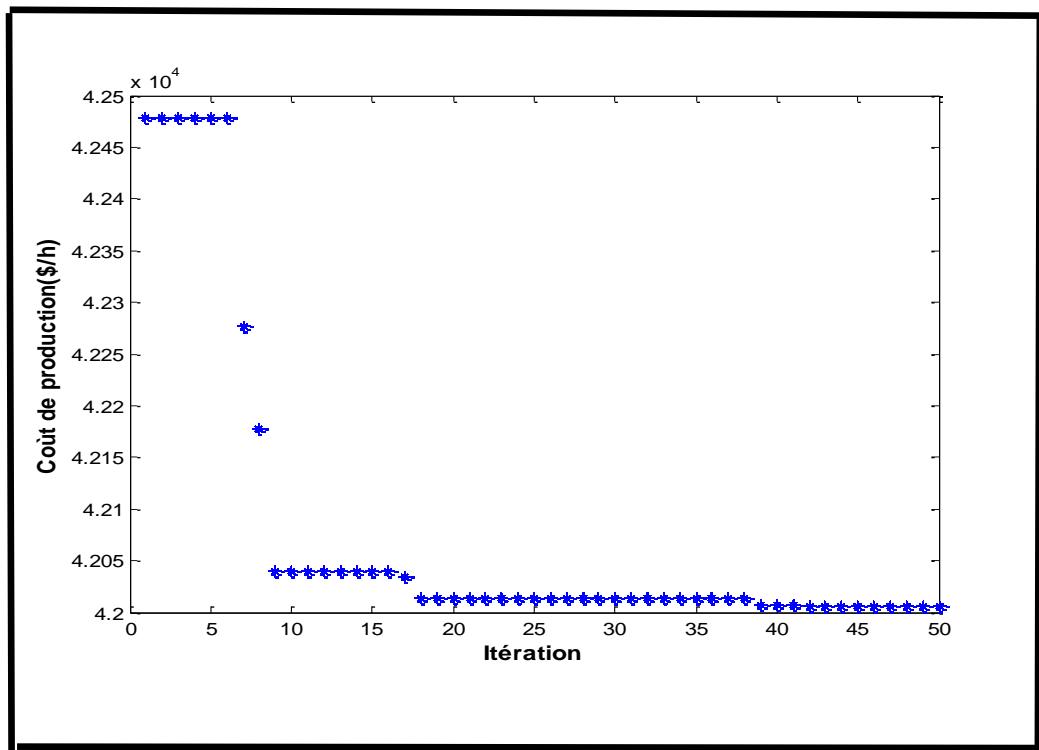


Figure 4.19 Convergence de PSO pour un réseau de 57 JDB et 50 itérations

Troisième cas :



**Figure 4.20** Convergence de PSO pour un réseau de 57JDB **Figure 4.20**



**Figure 4.21** Convergence de PSO pour un réseau de 57 JDB et 50 itérations

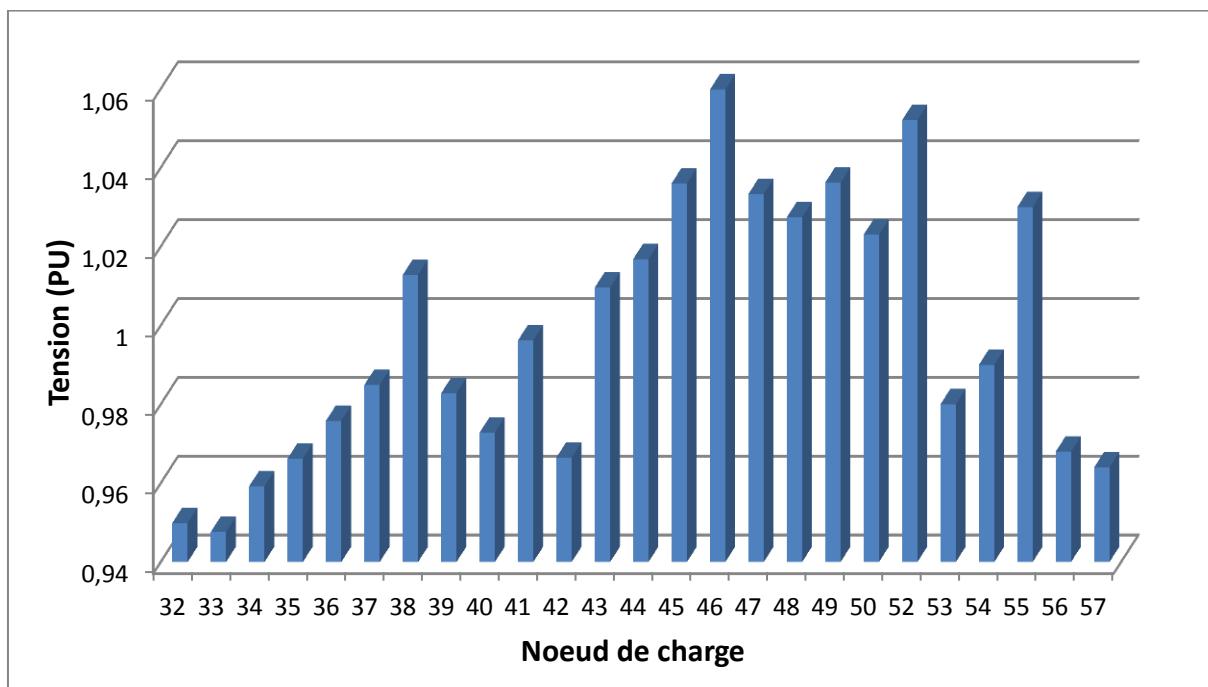
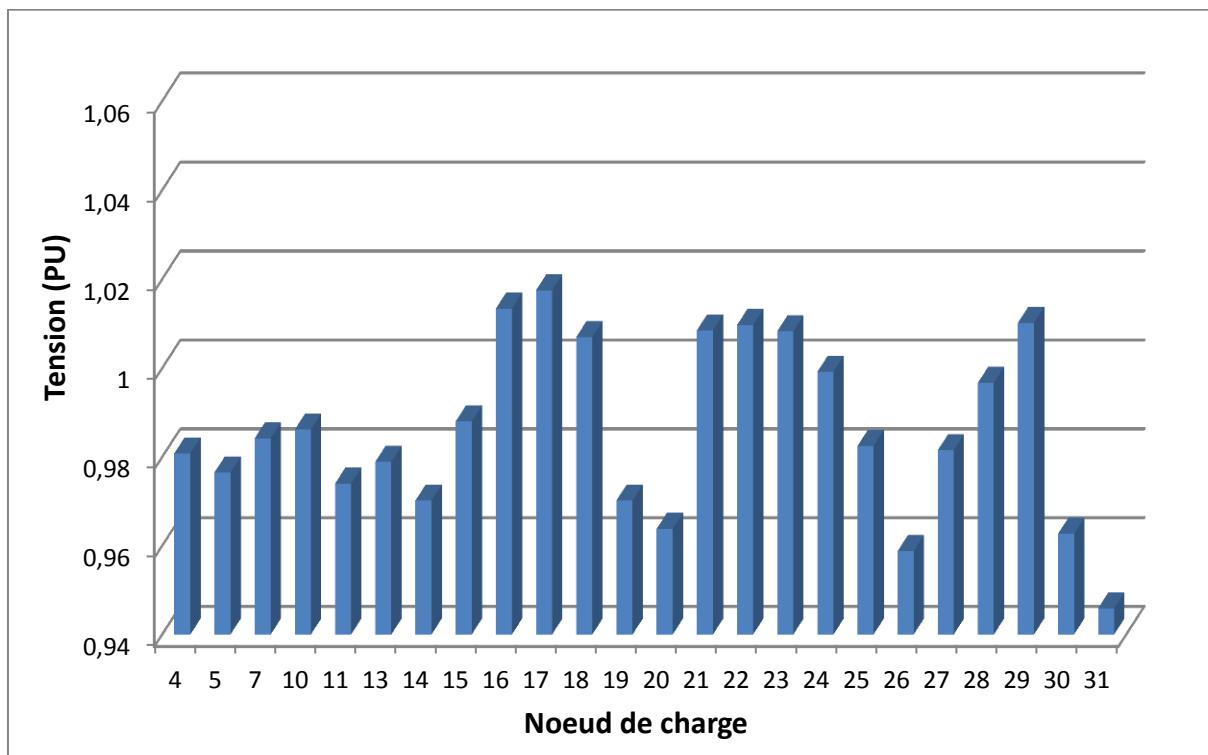


Figure 4.22 les tensions de charge pour le réseau de 57 JDB

**Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté en détail les résultats d'optimisation de l'écoulement de puissance avec la méthode méta heuristique PSO.

L'approche proposée a été faite sur des réseaux de test IEEE 14,30 et 57 noeuds.

Les résultats de simulation démontrent l'efficacité et la robustesse de l'algorithme proposé pour résoudre le problème d'écoulement de puissance optimal.