

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البلدية
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الآلية والكهروتقني
Département d'automatique & Electrotechnique



Mémoire de Master

Filière Électrotechnique
Spécialité Machines électriques

Présenté par

Sebaa Sid Ahmed

&

Bal Djamel

Contribution à l'écoulement de puissance optimale dans les réseaux électriques

Proposé par : Dr CHANANE Abdallah

Année Universitaire 2020-2021

Remerciement

Nous remercions dieu le tout puissant de nous avoir donnée la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Notre travail est une contribution aux précédents et une continuité des futurs travaux. Sincèrement, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu voir le jour sans l'aide et l'encadrement de Monsieur CHANANE, enseignant à la faculté de Technologie de l'université Blida 1, à qui nous lui portons nos plus sincères remerciements, sa disponibilité durant notre préparation, de ce mémoire.

Nos remerciements s'adressent également à Mr BELAZZOUGH chef de spécialités Machines électriques et à tous les membres de jury et tous nos enseignants et à toutes les personnes qui ont aidés et soutenu de près ou de loin, sans oublier de remercier nos familles pour leurs soutiens, sans laquelle ne nous serions pas ici aujourd'hui.

Avant tous, je remercie dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce Travail malgré toutes les difficultés rencontrées.

Je dédie ce modeste travail :

À ma chère mère et mon cher père À mes très chers frères et ma sœur et toute ma famille.

À tous mes enseignants surtout Mr BELAZZOUGH, Mr KOUCHIH, Mr BENNILA, Mr KHELIFI, Mme BOUDISSA, Mme EL-MIRRAOUI, Mme BRAHIMI.

À mes chers amis À tous ceux que j'aime et qui m'aiment. À mon binôme Djamel et À tous les amis

d'études de promotion 2020/2021

Sid Ahmed

Je tiens à dédier ce modeste travail à :

Ma très chère mère et mon cher père, qui n'ont pas cessé de m'encourager, de me soutenir dans les moments difficiles et qui ont su m'entourer de toute leur affection et leur amour pour que je puisse réussir.

Que Dieu les protège.

À mes chers frères et sœurs et leurs fils.

À tous mes enseignants surtout Mr BELAZZOUGH, Mr
MISSOUM, Mr CHANANE.

À mon binôme Sid Ahmed ainsi qu'à tous ses proches

À tous mes amis et ceux qui' m'ont soutenu durant
mon cursus universitaire.

À tous mes proches et les élèves de ma promotion.

Bal Djamel

ملخص: إن حل مسائل التدفق الأمثل للقدرة الكهربائية قد عرف في السنوات الأخيرة الكثير من الأبحاث بسبب المتطلبات التي تواجهها أنظمة الطاقة الحديثة مع وجود معطيات غير مكتملة ومحددة بشكل واضح. للأسف، الطرق التقليدية لحل مسائل التدفق الأمثل للقدرة الكهربائية ليست فعالة لإعتبرات عملية خاصة بمتغيرات المسألة ودوال الهدف المدروسة. لهذا الغرض، تعرض هذه المذكرة مساهمة رئيسية والتي تتلخص في تطبيق خوارزميات عشوائية من أجل حل مسألة أحادية الهدف والمعنية بالجانب الإقتصادي وذلك بتقليل دالة الهدف التي تعنى بتكلفة وقود التشغيل، مع الأخذ بعين الإعتبار أمن الشبكة وذلك بالتقليل من انحراف طويلة التوتر عن طويلة التوتر الإسمي في جميع عقد الشبكة.

مهمتنا هي تطبيق خوارزمية مستعمرة النحل في هذه المذكرة بحيث تحصلنا على نتائج مقبولة فيما يتعلق بتقليل تكلفة الإنتاج.

تم التحقق من صحة الخوارزمية على شبكة معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات ذات 9 عقد و14 عقدة.

كلمات المفاتيح: التدفق الأمثل للقدرة الكهربائية؛ دالة الهدف؛ خوارزميات عشوائية؛ خوارزمية مستعمرة النحل؛ شبكة معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات.

Résumé : La résolution du problème de l'écoulement de puissance optimal a connu dans ces dernières années beaucoup de travaux de recherche à cause des exigences rencontrées dans les réseaux électriques modernes et l'existence de données incomplètes et mal définies. Malheureusement, les méthodes de résolution classiques de l'optimisation de l'écoulement de puissance ne sont pas rentables pour des considérations pratiques relatives aux variables et aux fonctions objectifs étudiées. Pour cet objectif, cette mémoire présente une contribution principale. La contribution se récapitule par l'application des méthodes métaheuristiques pour la résolution du problème mono objectif du Dispatching Economique, avec la prise en considération de la sécurité du réseau en minimisant la déviation de la tension par rapport à la tension nominale dans tous les jeux de barres du réseau.

Notre travail consiste à l'application de la méthode de colonie d'abeille (ABC). Dans ce mémoire, où nous avons eu des résultats acceptables concernant la minimisation du coût de production. L'algorithme a été validé sur un réseau test IEEE 14-9 Bus

Mots clés : Ecoulement de puissance optimal (OPF) ; Fonction objectif ; méthodes métaheuristiques ; Algorithme de colonie d'abeille (ABC) ; IEEE 14-9 Bus.

Abstract: The resolution of the optimal power flow problem has been the subject of several researches nowadays. Because of the high demand encountered in modern power grids and the existence of incomplete and ill-defined data. Unfortunately, classical methods of solving power flow optimization are not cost effective for practical considerations relating to the variables and objective functions studied. For this objective, this thesis presents a main

contribution. The contribution is summarized by the application of metaheuristic methods for the resolution of the single objective problem of Economic Dispatching, with the consideration of the security of the network by minimizing the deviation of the voltage compared to the nominal voltage in all the sets of network bars.

The main objective is to apply the bee colony method. In this thesis, where we get acceptable results concerning the minimization of the production cost. The proposed Artificial Bee Colony algorithm has been validated on an IEEE 14- and IEEE 9 Bus electrical network.

Keywords: Optimal power flow (OPF); Objective function; metaheuristic methods; bee colony algorithm (ABC); IEEE 14-9 Bus.

Liste des abréviations et acronymes

Liste des abréviations et acronymes

OPF	Optimisation de l'écoulement de puissance.
JDB	Jeu de barres.
P_i, Q_i	Puissance active et réactive triphasée injectée au nœud i .
P_{Gi}, Q_{Gi}	Puissance active et réactive de génération triphasée injectée au nœud i .
P_{Di}, Q_{Di}	Puissance active et réactive demandée au jeu de barres i .
S_{ij}	La puissance apparente complexe triphasée injectée au nœud ij .
V_i	Tension complexe au nœud i .
δ_i	Déphasage de la tension au nœud i .
\bar{V}_S, \bar{I}_S	Tension et courant à la source respectivement.
\bar{V}_R, \bar{I}_R	Tension et courant de charge respectivement.
A, B, C et D	Les paramètres constantes de la ligne de transmission.
\bar{Z}	Impédance de la ligne.
R, X	Résistance et réactance de la ligne respectivement.
\bar{Y}	Admittance shunt de la ligne.
I_{BUS}	Vecteur des courants complexes injectés à chaque jeu de barres.
V_{bus}	Vecteur des tensions complexes des jeux de barres.
Y_{bus}	Matrice admittance nodale.
h	Contrainte d'égalités.
g	Contrainte d'inégalités.
X	Le vecteur des variables d'état.
U	Le vecteur des variables de contrôle.
F	Fonction objective.
a_i, b_i et c_i	Coefficient du coût.
d_i, e_i	Coefficients de réglage
f_i	Fonction du coût.
F_2	Fonction de perte.
ΔP_i	Différence (écarts) entre P_i calculée et P_i spécifiée.

Liste des abréviations et acronymes

G_{ij}	Conductance entre le JDB <i>i</i> et JDB <i>j</i> .
B_{ij}	Susceptance entre le JDB <i>i</i> et JDB <i>j</i> .
Y_{ij} et θ_{ij}	Module et argument de l'élément <i>ime</i> de la matrice admittance.
V_{max} et V_{min}	Limites max et min de la tension au nœud <i>i</i>
S_{max} et S_{min}	Limites max et min de la puissance apparente injectée au nœud <i>i</i> .
P_{Gi}^{min} et P_{Gi}^{max}	Limites min. et max de puissance active du générateur <i>i</i> .
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_{slack}	La puissance active de jeu de barre de référence.
P_{G2}, \dots, P_{GN_G}	Puissances actives générées sauf celle du jeu de barres de référence.
V_{G1}, \dots, V_{GN_G}	Les tensions de tous les jeux de barres générateurs.
T_1, \dots, T_{N_T}	Les prises des transformateurs variables.
N_G	Nombre total de générateur.
N_T	Nombre total de transformateur.
N	Nombre total de bus dans le réseau.
y_{ij}	Module d'un élément de la matrice admittance du réseau.
ABC	Colonie d'abeille artificiel
Pso	Optimisation par essaim de particule.
P_{best}	La meilleure position de l'abeille c'est à dire la position de la meilleure solution visitée.
P_{gbest}	La meilleure position de son voisinage c'est à dire la position de la meilleure solution connue de son voisinage.

REMERCEIMENTS

DEDICACE

RESUME

LISTE DES ABREVIATIONS

SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

Introduction générale.....1

Chapitre 01 : Généralités sur les réseaux électriques

1.1 Introduction	3
1.2 Historique des réseaux électriques.....	3
1.3 Structure des réseaux électriques.....	4
a. Réseau maillé/bouclé.....	4
i. Avantage.....	5
ii. Inconvénient.....	5
b. Réseau Radial/arborescent.....	5
i. Avantage.....	5
ii. Inconvénient.....	5
1.4 Architecture des réseaux électriques.....	6
a. Réseau de transport HTB	8
b. Réseau de répartition HTB et HTA	8
c. Réseau de distribution HTA.....	8
d. Réseau de livraison BTB.....	9
1.5 Représentation et analyse des réseaux électriques.....	9
a. Schéma unifilaire	9
b. Analyse par phase ou circuit monophasé équivalent.....	10
c. Système d'unité relative PU.....	11
1.6 Modélisation des composantes du réseau électrique.....	11
a. Modélisation des générateurs.....	12
b. Lignes et câbles de transmission.....	13
c. Transformateurs de puissance.....	15
d. Charge électrique.....	16
e. Éléments shunt.....	17
1.7 Modèles des nœuds du réseau.....	17
a. Nœud de charge (PQ).....	17
b. Nœud de générateur (PV).....	17
c. Nœud de référence (Slack bus).....	18
1.8 Protection d'un réseau électrique.....	18
1.9 Chaîne générale d'un système de protection.....	19
1.10 Conclusion.....	19

Chapitre 02 : Ecoulement de puissance optimale

2.1 Introduction.....	20
2.2 But de l'écoulement de puissance.....	20
2.3 Ecoulement de puissance optimale.....	20
2.4 Domaine d'application de l'écoulement de puissance optimal.....	21
a. Maximisation de la puissance transmissible.....	21
b. Minimisation du coût de combustible.....	21
c. Minimisation des pertes.....	22
d. Amélioration du profil de tension.....	22
e. Amélioration de la stabilité de tension.....	22
2.5 Classification des jeux de barres.....	22
a. Jeu de barres de charge (PQ).....	22
b. Jeu de barres de contrôle (PV).....	22
c. Jeu de barre de référence.....	23
2.6 L'acheminement de la puissance.....	23
2.7 Formulation mathématique de l'écoulement de puissance optimal.....	23
a. Fonction objective.....	24
b. Contraintes d'égalité.....	25
c. Contraintes d'inégalité.....	25
2.8 Classification des variables de l'écoulement de puissance.....	26
a. Variables de perturbation.....	26
b. Variables d'état.....	27
c. Variables de contrôle.....	27
2.9 Méthodes itératives dans l'écoulement de puissance.....	28
a. Méthode de Gauss-Seidel.....	28
b. Méthode de Newton-Raphson.....	29
2.10 Conclusion.....	31

Chapitre 03 : Méthodes métaheuristiques appliqué à l'OPF

Sommaire

3.1 Introduction.....	32
3.2 Méthodes Méta heuristiques.....	32
3.2.1 Définition des méthodes méta heuristiques.....	32
3.2.2 Recuit simulé.....	33
3.2.3 Recherche taboue.....	33
3.2.4 Algorithme génétique.....	34
3.3 Optimisation par Colonie d'abeilles.....	34
3.3.1 Les abeilles en nature.....	34
a. La Reine.....	34
b. Le male (faux-bourdon).....	35
c. Ouvrières.....	35
d. Couvées.....	35
3.3.2 Recherche de nourriture chez les abeilles.....	36
3.3.3 Méthode de communication chez les abeilles.....	36
3.3.4 Optimisation naturelle : Les directions fournies par les abeilles.....	39
3.4 Algorithme d'optimisation de colonie d'abeilles artificielle (ABC).....	39
3.5 Le processus de l'algorithme.....	40
3.6 Organigramme de l'algorithme ABC.....	43
3.7 Conclusion.....	44

Chapitre 04 : Résultats et discussion

4.1 Introduction.....	45
4.2 Les Fonctions objectif.....	45
4.3 Les contraintes.....	45
4.4 Application1 : Optimisation par l'algorithme de colonie d'abeille 14-Bus.....	46
4.4.1 La charge nominale.....	47
Le tableau du coût de la production.....	47
La figure du coût de la production.....	48
L'histogramme du coût de la production.....	49
Les pertes de puissance active.....	49

Sommaire

4.4.2 Charge à point maximal.....	50
Le tableau du coût de la production.....	50
La figure du coût de la production.....	51
Les pertes de puissance active.....	51
4.5 Application2 : Optimisation par l’algorithme de colonie d’abeille 9-Bus.....	52
4.5.1 La charge nominale.....	52
Le tableau du coût de la production.....	52
La figure du coût de la production.....	53
L’histogramme du coût de la production.....	54
Les pertes de puissance active.....	54
4.5.2 Charge à point maximal.....	55
Le tableau du coût de la production.....	55
La figure du coût de la production.....	55
Les pertes de puissance active.....	56
Discussion.....	56
Conclusion.....	57
Conclusion générale	59
Annexes	
Bibliographie	

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre 1 :

Figure 1.1 : Les différentes structures de réseau électrique	6
Figure 1.2 : structure générale d'un réseau électrique	7
Figure 1.3 : Schéma unifilaire du réseau IEEE 14 barres	10
Figure 1.4 : Modèle du générateur	12
Figure 1.5 : Modélisation d'une ligne électrique.....	13
Figure 1.6 : Modèle d'un transformateur	15
Figure 1.7 : Modèle d'une charge.....	16
Figure 1.8 : Modèles des éléments shunt.....	17
Figure 1.9 : Chaîne générale d'un système de protection.....	19

Chapitre 3 :

Figure 3.1 : La danse des abeilles	37
Figure 3.2 : L'indice de la direction.....	38
Figure 3.3 : Organigramme du modèle de base de l'algorithme ABC.....	43

Chapitre 4 :

Figure 4.1 : le schéma unifilaire du réseau électrique IEEE 14-Bus.....	46
Figure 4.2: La courbe du coût de production	48
Figure 4.3: Les tensions générées.....	49
Figure 4.4 : La courbe du coût de production à la charge maximale.....	51
Figure 4.5 : le schéma unifilaire du réseau électrique IEEE 9-Bus	52
Figure 4.6 : La courbe du coût de production	53
Figure 4.7 : Les tensions générées	54
Figure 4.8 : La courbe du coût de production à la charge maximale.....	55

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Chapitre2 :

Tableau 2.1 : Type de jeu de barres.....23

Chapitre4 :

Tableau 4.1 : les valeurs optimales obtenues pour le réseau 14JDB.....47/48

Tableau 4.2 : les valeurs obtenues à la charge maximale pour un réseau de 14JDB.....50

Tableau 4.3 : les valeurs optimales obtenues pour le réseau 9JDB.....52

Tableau 4.4 : les valeurs obtenues à la charge maximale pour un réseau de 9JDB.....55

Introduction

Générale

Introduction générale

L'énergie électrique est un produit qui joue un rôle très important dans la société moderne d'aujourd'hui. Elle est largement utilisée pour l'éclairage, les systèmes informatiques, les systèmes de communication, les systèmes de transport, l'industrie et pour d'autres domaines.

Cette énergie est assurée par un système énergétique interconnecté et complexe qui peut être défini comme 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 hautes et très hautes 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 dont l'arborescence permet d'atteindre les clients finals. Cette énergie est produite en même temps qu'elle est consommée ; donc en permanence, la production doit s'adapter à la consommation. Par conséquent, il faut ajuster les puissances active et réactive des générateurs selon les limites prédéfinies, en satisfaisant la charge fluctuante avec un coût le plus bas possible. Cela est appelé l'écoulement de puissance optimal (OPF).

Malgré l'importance du concept de l'OPF, il reste subordonné à quelques considérations pratiques. La première considération, c'est la sécurité de fonctionnement du système énergétique qui a un rapport direct avec le transport de l'énergie électrique, où les puissances transitées sur les lignes de transport et les tensions aux différents jeux de barres doivent être dans les plages de fonctionnement adéquat.

La deuxième considération c'est le facteur économique, où la répartition de la puissance générée doit engendrer un coût total de génération minimal tout en satisfaisant les contraintes de fonctionnement.

La troisième considération c'est la sécurité de l'environnement, indiquée par la minimisation des gaz toxiques dégagés par les centrales de production.

La structure générale de notre mémoire est divisée en quatre chapitres :

Le premier chapitre présente une vue générale sur le réseau électrique tel que leur architecture, et leur structure, ainsi que ça modélisation.

Dans le deuxième chapitre, on a procédé à une étude détaillée sur l'écoulement de la puissance active dans le réseau électrique et ces méthodes de résolution présentes dans la

Introduction générale

littérature, telles que la méthode de Gauss-Seidel et la méthode de Newton-Raphson, ainsi que des notions sur le contrôle.

Le chapitre trois, présente les méthodes métaheuristiques à savoir : Le recuit simulé, La recherche taboue, L'algorithme génétique, et en détail l'algorithme d'intelligence artificielle de colonie d'abeille (ABC).

Le dernier chapitre comporte la partie de notre programmation qui est divisée en deux parties :

- La première partie consiste à introduire la fonction objective dans l'écoulement de puissance où on a pris en compte le débit sur un réseaux de 14 JDB sur une charge nominale et encore dans la charge maximale. Ensuite on compare nos résultats avec les résultats du programme conventionnel de l'écoulement de puissance pour l'apprentissage.
- La deuxième partie consiste à introduire la fonction objective dans l'écoulement de puissance où on a pris en compte le débit sur un réseaux de 14 JDB sur une charge nominale et encore dans la charge maximale. Ensuite on compare nos résultats avec les résultats du programme conventionnel de l'écoulement de puissance pour l'apprentissage.

Chapitre 1 :

Généralités

sur les

réseaux

électriques

Chapitre 1 Généralités sur les réseaux électriques

1.1 Introduction

Un réseau électrique est un ensemble d'infrastructures énergétiques plus ou moins disponibles permettant d'acheminer l'énergie électrique des centres de production vers les consommateurs d'électricité.

Il est constitué de lignes électriques exploitées à différents niveaux de tension, connectées entre elles dans des postes électriques.

Les postes électriques permettent de répartir l'électricité et de la faire passer d'une tension à l'autre grâce aux transformateurs.

Un réseau électrique doit aussi assurer la gestion dynamique de l'ensemble production - transport - consommation, mettant en œuvre des réglages ayant pour but d'assurer la stabilité de l'ensemble.

1.2 Historique des réseaux électriques

Un réseau électrique étant composé de machines de production et de consommation, ainsi que de structures (lignes, transformateurs) pour les relier, les réseaux électriques ne sont apparus que vers la fin de 19^{ème} siècle, lorsque chaque élément avait atteint une maturité technologique suffisante.

Lors de la première moitié du 19^{ème} siècle, les inventeurs mettent au point de nombreux types de machines électriques à courant continu, mais leur utilisation de manière industrielle ne se développe qu'après l'invention de la dynamo (génératrice de courant continu) par Zénobe Gramme en 1869 (présentée à l'Académie des sciences, à Paris, en 1871), qui est rapidement améliorée.

À l'Exposition internationale d'Électricité de Paris de 1881, Marcel Deprez présente pour la première fois une installation de distribution d'énergie électrique alimentée par deux dynamos. À l'automne 1882, les premiers réseaux électriques apparaissent simultanément à New York et Bellegarde, en France. Ils sont très locaux et utilisent le courant continu.

Thomas Edison a joué un rôle déterminant dans le développement de l'électricité : il fonde en 1878 l'Edison Electric Light Co (qui devient en 1892 General Electric), dépose le brevet de l'ampoule électrique en 1879, puis crée le réseau électrique de New York.

Chapitre 1 Généralités sur les réseaux électriques

Ce dernier, qui avait essentiellement pour but l'éclairage, se développe rapidement : de 1 200 ampoules en 1882, il passe à 10 000 ampoules l'année suivante. Ce réseau, qui souffre de nombreuses pannes, est constitué de petites centrales électriques (30 kW) et d'un réseau de distribution à 110 V. Il est cependant très limité car l'acheminement de l'électricité n'est possible que sur quelques kilomètres.

À cette époque, les premières expérimentations de transport de l'énergie électrique se développent et sont menées notamment par Marcel Deprez, qui utilise le courant continu. Ce sont cependant des échecs relatifs car elles ne permettent pas le transport de puissances industrielles (Deprez réussit en 1882 à transporter 400 W sur 57 km de distance, mais avec un rendement global de seulement 30 %).

Les ingénieurs Lucien Gaulard et John Gibbs travaillent quant à eux sur le courant alternatif. Bien que le transformateur soit connu depuis 1837, ils mettent au point en 1884 un transformateur de forte puissance utilisant du courant triphasé, ce qui permet de changer facilement le niveau de tension. La même année ils démontrent l'intérêt du transformateur en mettant en service une ligne de 80 km de long alimenté en courant alternatif sous une tension de 2000 V.

1.3 Structure des réseaux électriques

Pour effectuer le transit des puissances depuis les centres de production vers les consommateurs de divers niveaux de tensions, on utilise différentes architectures et topologies des réseaux qui assurent ces tâches, ces architectures dépendent de plusieurs critères :

- Le niveau de fiabilité recherché.
- La flexibilité et la maintenance.
- Le coût d'investissement et d'exploitation.

Ces topologies sont classées comme suit :

a. Réseau maillé/bouclé

Il est souvent utilisé dans l'interconnexions des réseaux au niveau du transport et de la répartition, la topologie maillée consiste à créer plusieurs boucles ou liaisons entre les différents postes d'interconnexions à l'aide de lignes THT ce qui forme un maillage.

Chapitre 1 Généralités sur les réseaux électriques

Les réseaux bouclés sont par contre utilisés pour des niveaux de tension moins élevés, HT ou MT. On les trouve dans les réseaux de répartition et de distribution. Il faut noter que les réseaux MT ne sont pas forcément bouclés

i. Avantage

Cette structure, grâce à ses multiples dérivations garantit une grande fiabilité, et une continuité de service. En cas de défaut sur l'une des lignes, ce genre de structure offre une grande sécurité d'alimentation. Pour le réglage de fréquence et de tension, l'interconnexion offre une meilleure souplesse et minimise l'impact des surcharges sur une source donnée.

ii. Inconvénient

Cette structure nécessite une protection très complexe et avancée ce qui rend le cout de réalisation très élevé. La complexité et l'étendu de sa structure la rend difficile à gérer et à assurer sa maintenance.

b. Réseau Radial/arborescent

Ce genre de topologie est principalement utilisé dans les réseaux MT et BT.

Pour le radial, ça consiste à connecter deux postes sources MT ainsi, le flux de puissance n'a qu'un seul trajet possible à suivre.

Pour l'arborescent, il est constitué d'un poste de répartition qui alimente plusieurs postes de distribution BT grâce à des dérivations faites à différents niveaux des lignes alimentant les postes MT/BT.

i. Avantage

Les dispositifs de protection dans ce type de topologie sont moins complexes que ceux utilisés dans le réseau maillé, ce qui rend sa maintenabilité plus facile et moins couteuse. L'extension se fait facilement, il suffit d'un piquage sur la ligne principale. D'un point de vue économique, le cout de sa réalisation est faible comparé à celui d'une structure maillée.

ii. Inconvénient

L'inconvénient de cette réalisation est que lors d'un défaut, tout ce qui se trouve en aval du défaut serait isolé, donc il n'assure pas de continuité de service dans ce cas

Chapitre 1 Généralités sur les réseaux électriques

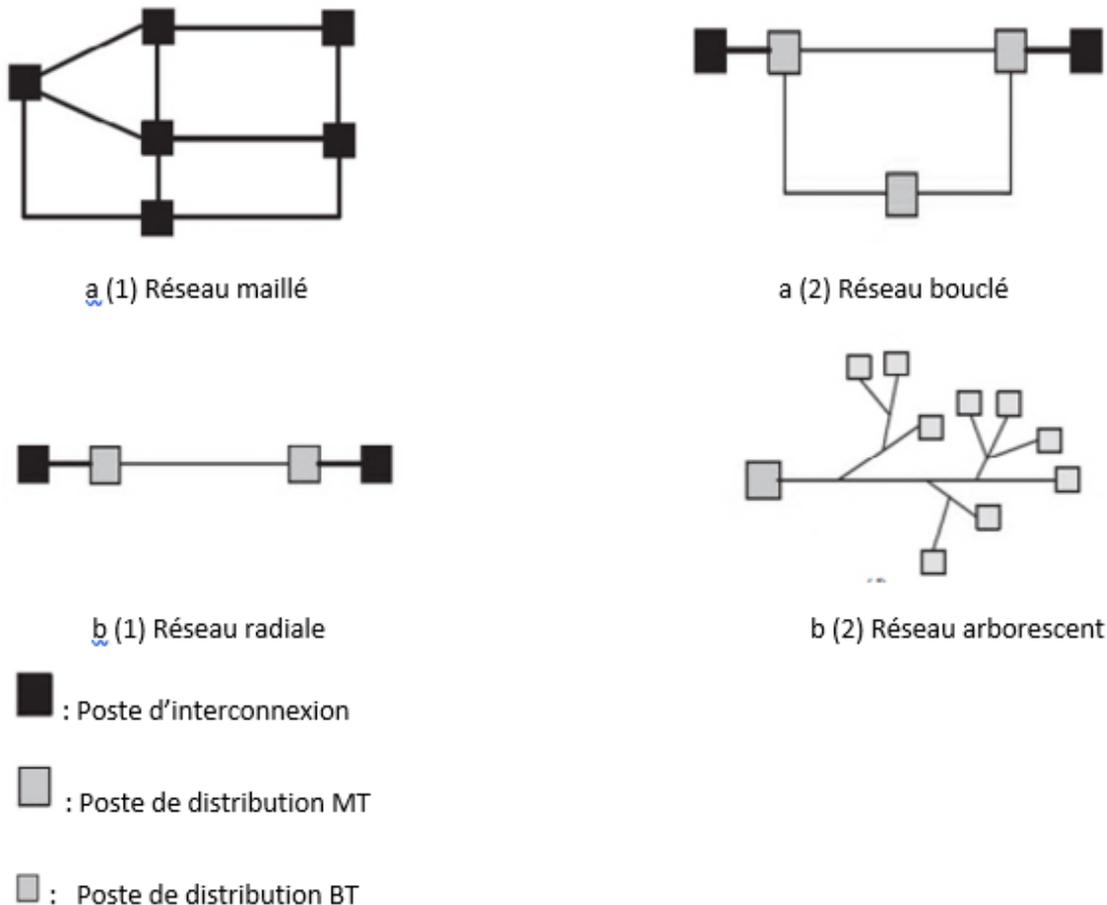


Figure 1.1 : Les différentes structures de réseau électrique

1.4 Architecture des réseaux électriques

Un système électrique est un ensemble constitué d'unités de production, unités de consommation, des réseaux électriques et de centre de contrôle. Son exploitation est assurée par un Gestionnaire de réseau de transport 'GRT'. [1]

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. Brièvement, le réseau électrique est subdivisé en deux catégories principales : les réseaux de transport/Répartition et les réseaux de Distribution/Livraison. [2]

Pour les niveaux de tension, il existe plusieurs classifications provenant des différentes organisations d'Electrotechnique qui s'occupe de maitre en œuvre les normes et les lois qui régissent le domaine du Génie électrique.

Chapitre 1 Généralités sur les réseaux électriques

Les réseaux électriques sont hiérarchisés. La plupart des pays mettent en œuvre (selon CEI) : [3]

- Un réseau de transport THT 220.... 800 Kv.
- Un réseau de répartition HT 60 170 Kv.
- Un réseau de distribution MT 5 36 Kv.
- Un réseau de livraison de l'abonné BT 400/230 Kv.

La nouvelle norme en vigueur en France UTE C18-510 définit les niveaux de tension alternative comme suit : [3]

- HTB → pour une tension composée supérieure à 50 kV
- HTA → pour une tension composée comprise entre 1 kV et 50 kV
- BTB → pour une tension composée comprise entre 500V et 1 kV
- BTA → pour une tension composée comprise entre 50V et 500 V
- TBT → pour une tension composée inférieure ou égale à 50V

Cette hiérarchie du réseau est montrée dans le schéma sous dessous

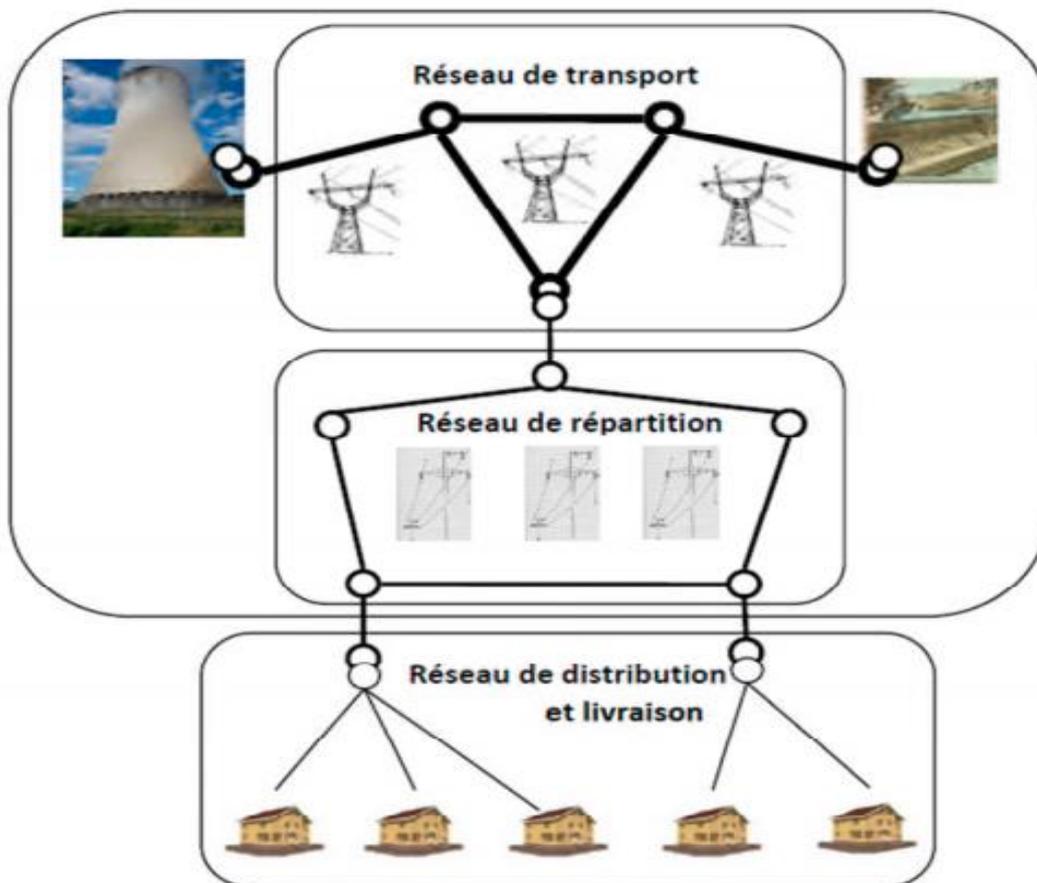


Figure 1.2 : structure générale d'un réseau électrique

Chapitre 1 Généralités sur les réseaux électriques

a. Réseau de transport HTB

Le réseau de transport et d'interconnexion achemine en très haute tension de grandes quantités d'énergie sur de longues distances depuis des centrales de production vers le réseau de répartition. [3]

Les réseaux de transport constituent une vaste grille couvrant le territoire. Ces réseaux sont, pour la plupart, aériens. Ils sont étudiés pour un transit donné correspondant à la limite thermique de la ligne. [3]

Les protections de ces réseaux doivent être très performantes. Quant à leur exploitation, elle est assurée au niveau national par un centre de conduite ou de dispatching à partir duquel l'énergie électrique est surveillée et gérée en permanence. [1]

b. Réseau de répartition HTB et HTA

Les réseaux régionaux de répartition répartissent l'énergie au niveau des régions et alimentent les réseaux de distribution ainsi que les clients industriels importants ($S > 10\text{MVA}$) livrés directement en HT ou en THT, Il s'agit essentiellement d'industriels tels la sidérurgie, la cimenterie, la chimie, le transport ferroviaire...etc. [2]

Leur structure peut être soit aérienne ou souterraine à proximité des zones urbaines. Les protections sont de même nature que celles utilisées sur les réseaux de transport, sa gestion est prise en charge par les centres de conduite régionaux. [1]

c. Réseau de distribution HTA

La finalité du réseau de répartition s'achève avec un réseau de distribution en moyenne tension qui desservant le consommateur dans le domaine public et les petites et moyennes entreprises. [4]

Des lignes de distribution à moyenne tension partent des postes de répartition et alimentent des postes de transformation répartis en différents endroits de la zone à desservir. Son exploitation est assurée par un centre de conduite local. [1]

Chapitre 1 Généralités sur les réseaux électriques

d. Réseau de livraison BTB

C'est le réseau qui nous est familier puisqu'il s'agit de la tension 400V/230V. La finalité de ce réseau est d'acheminer l'électricité du réseau de distribution aux points de faible consommation dans le domaine public avec l'accès aux abonnés. Il représente le dernier niveau dans une structure électrique. [2]

La puissance à ce niveau est acheminée avec deux topologies suivant la localisation des charges :

- I. Les réseaux urbains : la puissance transite par voie souterraine, ce type de réseau est caractérisé par une forte densité de charge, la topologie de ces réseaux sont réparties en trois groupes : les réseaux en dérivation multiples, les réseaux en coupure d'artère et les réseaux fortement bouclés. [2]
- II. Les réseaux ruraux : la puissance est acheminée par voie aérienne, ils sont caractérisés par une faible densité de charge et un faible maillage avec des boucles entre les postes sources. [2]

1.5 Représentation et analyse des réseaux électriques

L'analyse des réseaux électriques peut être effectuée à l'aide des modèles de circuits. Cependant, ces modèles sont complexes, car les réseaux électriques sont en général multiphasés et contiennent un nombre élevé de composants. Un autre facteur qui complique davantage l'analyse est la présentation des transformateurs qui séparent le réseau en plusieurs secteurs de tension différente.

Pour faciliter l'analyse des réseaux électriques, on a développé plusieurs outils, principalement le diagramme unifilaire, l'analyse par phase (en utilisant le circuit monophasé équivalent), et le système d'unité relative PU.

a. Schéma unifilaire

La complexité des réseaux électriques rend leur représentation par les schémas classiques impraticables. Pour représenter de façon efficace un réseau électrique, on utilise un schéma unifilaire dans lequel les interconnexions des différents équipements sont indiquées par une seule ligne. Les connexions électriques réelles n'y sont pas représentées.

Chapitre 1 Généralités sur les réseaux électriques

Le schéma unifilaire sert seulement à indiquer tous les détails du réseau. L'analyse du réseau est faite à l'aide du circuit monophasé équivalent. À la fin, les valeurs triphasées réelles sont déduites à partir des valeurs monophasées par les relations du système triphasé équilibré.

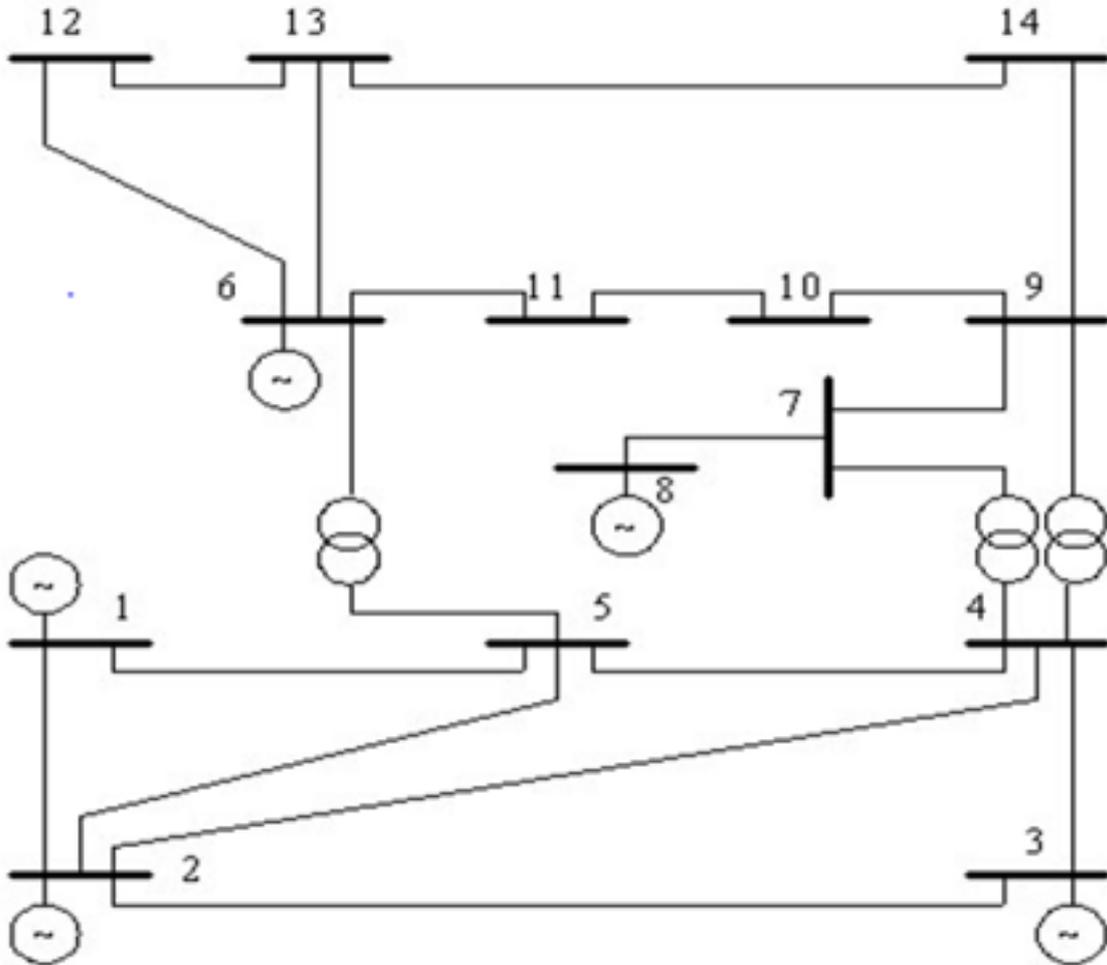


Figure 1.3 : Schéma unifilaire du réseau IEEE 14 barres

b. Analyse par phase ou circuit monophasé équivalent

L'analyse d'un système triphasé équilibré peut être effectuée de façon simple en le transformant en un système Y et en considérant seulement le circuit monophasé équivalent qui représente la phase A uniquement.

Les tensions et les courants des autres phases sont déduits à partir des tensions et courants de la phase A en ajoutant les déphasages.

Chapitre 1 Généralités sur les réseaux électriques

c. Système d'unité relative PU

Les calculs en électrotechnique peuvent être simplifiés en utilisant le système d'unité relative (système per-unit PU). Dans ce système, les quantités (tension, courant, impédance, puissance) sont exprimées en fonction des valeurs de base choisies.

Pour utiliser le système d'unité relative, on commence par choisir des valeurs de bases pour deux quantités. Dans la plupart des cas, on choisit une tension V_{baseLN} et une puissance apparente de base S_{base10} et les autres valeurs de base sont déduites à partir de ces deux valeurs:

$$\text{Courant de base } I_{base} = \frac{S_{base10}}{V_{baseLN}}$$

$$\text{Impédance de base } Z_{base} = R_{base} = X_{base} = \frac{V_{baseLN}}{I_{base}} = \frac{(V_{baseLN})^2}{S_{base10}}$$

Les variables dans le système électrique considéré seront exprimées comme des fractions sans unité des valeurs de bases :

$$\text{Valeur en PU} = \frac{\text{Valeur réelle}}{\text{Valeur de base}}$$

Ainsi, les calculs peuvent être effectués en PU.

Les valeurs réelles sont obtenues en multipliant les valeurs en PU par les valeurs de base

Les principaux avantages du système PU sont

- Les chiffres sont plus petits (autour de 1.0)
- La comparaison des caractéristiques des systèmes de puissance différentes est plus facile.

1.6 Modélisation des composantes du réseau électrique

Aujourd'hui le réseau électrique est exploité au plus près de ces limites physiques. Ce qui n'avait pas d'importance avant, lorsque l'on sur dimensionnait les ouvrages, nécessite maintenant une modélisation précise pour être sûr de ne pas faire tomber le réseau.

Chapitre 1 Généralités sur les réseaux électriques

Un réseau d'énergie électrique comprend des génératrices, des lignes de transport et distribution, des transformateurs de puissance ainsi des charges électriques. En outre le réseau comporte également des transformateurs et des appareils de protection. L'ensemble des systèmes électriques comporte en gros trois sous-systèmes :

- Production (génératrice).
- Transport, répartition et distribution (lignes).
- Utilisation (consommateur).

Vu la complexité d'un réseau d'énergie électrique, il faut simplifier leur représentation pour établir des modèles ou des schémas équivalents des principaux composants à savoir, les générateurs, les différents types de transformateurs, des lignes, les charges. Ceux-ci sont ensuite intégrés dans des programmes de calcul permettant de simuler leurs effets dans l'ensemble du système. [5].

a. Modélisation des générateurs

Les générateurs sont des éléments qui permettent la conversion de l'énergie (mécanique, photonique, chimique...) vers une énergie électrique. Ils peuvent fournir de l'énergie active ou réactive et ils peuvent maintenir un niveau de tension désirée. Un générateur peut être considéré comme une source de puissance active et réactive qui peut maintenir une tension de consigne.

A cause de certains facteurs comme la limite thermique du rotor, du stator et la limite de stabilité au régime permanent, le fonctionnement d'un générateur est limité en puissance active ainsi qu'en puissance réactive. Ainsi un générateur peut être modélisé selon le schéma de la figure 1.4. [6]

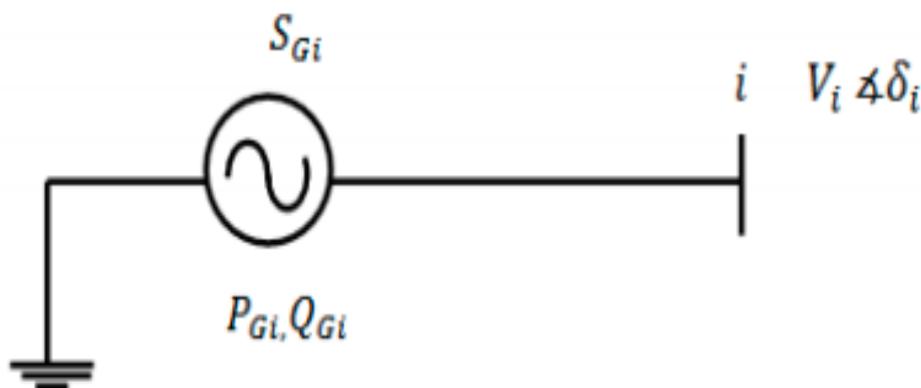


Figure 1.4 : Modèle du générateur [6]

Chapitre 1 Généralités sur les réseaux électriques

Avec :

S_i : Puissance apparente au nœud i

P_{Gi} : Puissance active délivrée par le générateur au nœud i

Q_{Gi} : Puissance réactive délivrée par le générateur au nœud i

V_i : Tension au nœud i

δ_i : Déphasage de la tension au nœud i

b. Lignes et câbles de transmission

Généralement la ligne de transport est modélisée par un schéma équivalent en π qui se compose d'une impédance série (résistance R en série avec une réactance inductive X), et une admittance shunt qui consiste en une susceptance capacitive B (due à l'effet capacitif de la ligne avec la terre) en parallèle avec une conductance d'isolation G . Voir (Figure. 1.5) [7].

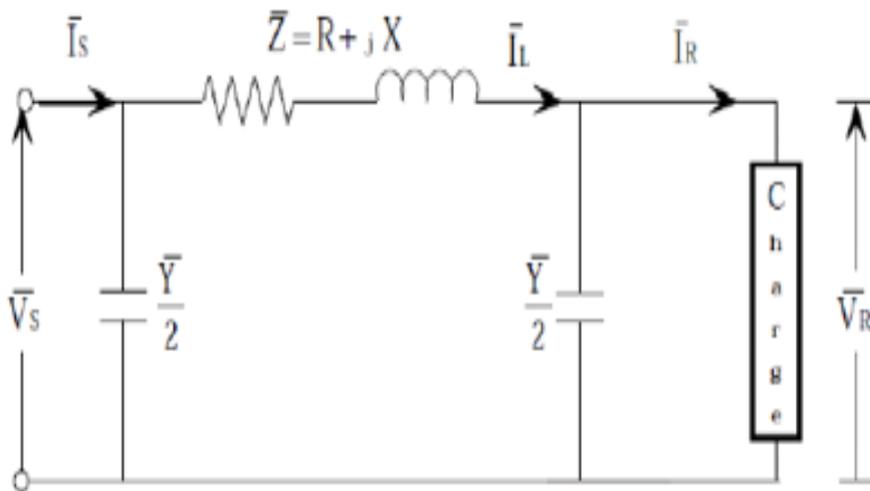


Figure 1.5 : Modélisation d'une ligne électrique [7]

Appliquant la loi de Kirchhoff pour déterminer la tension et le courant à la source, on aura le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} \bar{V}_s = A \cdot \bar{V}_R + B \cdot \bar{I}_R \\ \bar{I}_s = C \cdot \bar{V}_R + D \cdot \bar{I}_R \end{cases} \quad (1.1)$$

Sous la forme matricielle :

Chapitre 1 Généralités sur les réseaux électriques

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_S \\ \bar{I}_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \bar{V}_R \\ \bar{I}_R \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

Avec :

A, B, C et D : sont les paramètres qui dépendent des constantes de la ligne de transmission, qu'on déterminera par la suite.

$A = V_s/V_r$, si $I_r = 0$, i.e., l'extrémité de réception est en circuit ouvert. A est donc un rapport de deux tensions (sans dimension).

$B = V_s/I_r$, si $V_r = 0$, i.e., l'extrémité de réception est en court-circuit. B a une dimension d'une impédance (en ohm).

$C = I_s/V_r$, si $I_r = 0$, i.e., l'extrémité de réception est en circuit ouvert. C donc a une dimension d'une admittance

$D = I_s/I_r$, si $V_r = 0$, i.e., l'extrémité de réception est en court-circuit. D a est donc un rapport de deux courants (sans dimension).

\bar{V}_S, \bar{I}_S : Tension et courant à la source respectivement.

\bar{V}_R, \bar{I}_R : Tension et courant à la réception respectivement.

\bar{Z} : Impédance de la ligne.

R, X : Résistance et réactance de la ligne respectivement.

\bar{Y} : Admittance shunt de la ligne.

La tension et le courant à l'extrémité source sont obtenus comme suit :

De la figure (1.4) on a :

$$\bar{I}_L = \bar{I}_R + \frac{\bar{Y}}{2} \bar{V}_R \quad (1.3)$$

La tension à la source est :

$$\bar{V}_S = \bar{V}_R + \bar{Z} \cdot \bar{I}_L \quad (1.4)$$

En remplaçant (1.3) dans (1.4) on aura :

$$\bar{V}_S = \left(1 + \bar{Z} \frac{\bar{Y}}{2}\right) \bar{V}_R + \bar{Z} \cdot \bar{I}_R \quad (1.5)$$

Le courant à la source est :

$$\bar{I}_S = \bar{I}_L + \frac{\bar{Y}}{2} \bar{V}_S \quad (1.6)$$

Remplaçant (1.3) et (1.5) dans (1.6) on obtient :

Chapitre 1 Généralités sur les réseaux électriques

$$\bar{I}_S = \bar{Y} \left(1 + \bar{Z} \frac{\bar{Y}}{2}\right) \bar{V}_R + \left(1 + \bar{Z} \frac{\bar{Y}}{2}\right) \bar{I}_R \quad (1.7)$$

Les équations (I.5) et (I.6) peuvent être écrites sous la forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_S \\ \bar{I}_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(1 + \bar{Z} \frac{\bar{Y}}{2}\right) & \bar{Z} \\ \bar{Y} \cdot \left(1 + \bar{Z} \frac{\bar{Y}}{2}\right) & \left(1 + \bar{Z} \frac{\bar{Y}}{2}\right) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \bar{V}_R \\ \bar{I}_R \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

Par identification des équations (1.2) et (1.8) on aura :

$$A = D = \left(1 + \bar{Z} \frac{\bar{Y}}{2}\right); B = \bar{Z}; C = \bar{Y} \cdot \left(1 + \bar{Z} \frac{\bar{Y}}{2}\right) \quad (1.9)$$

c. Transformateurs de puissance

Un transformateur d'énergie électrique est représenté par un quadripôle en π non symétrique. Les grandeurs associées sont le rapport de transformation. Les rapports de transformation sont inclus dans les éléments de la matrice admittance, c'est-à-dire que les susceptances de la matrice admittance sont vues comme des fonctions de rapports de transformation (figure 1.6) [6].

Le transformateur est l'un des éléments qu'on retrouve aux différents niveaux de tensions du réseau électrique, il est entièrement statique, il permet la modification de la présentation de l'énergie électrique alternative afin de la rendre aussi commode que possible aux différents stades de la production, du transport d'énergie à HT (réduction des pertes en lignes) et de la distribution en MT et BT. [7]

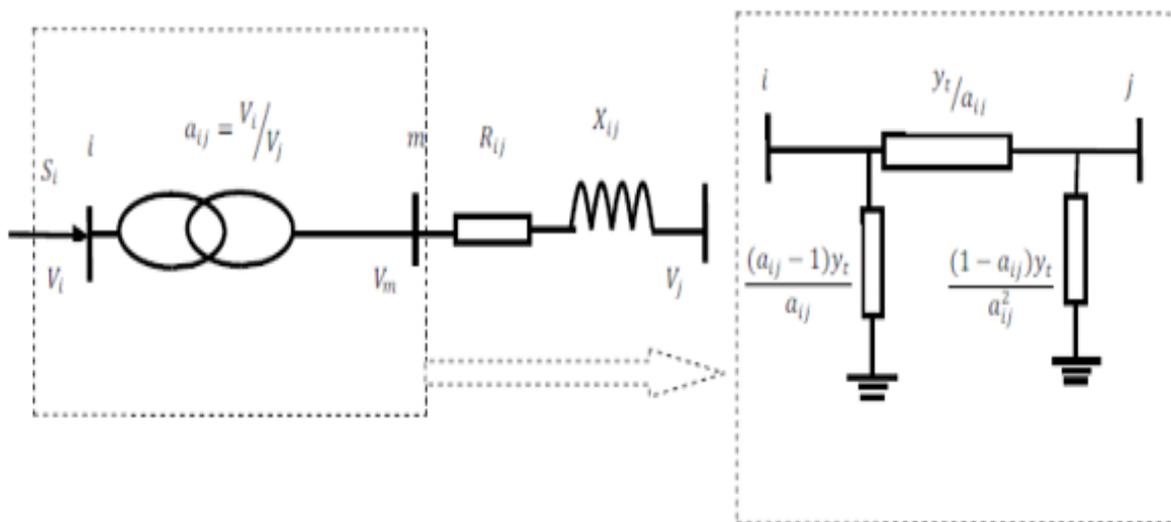


Figure 1.6 : Modèle d'un transformateur [6]

Chapitre 1 Généralités sur les réseaux électriques

La matrice d'admittance d'un transformateur inséré entre un nœud i et un nœud j s'écrit :

$$y_t = \begin{bmatrix} \frac{y_{ij}}{a_{ij}^2} & \frac{-y_{ij}}{a} \\ \frac{-y_{ij}}{a} & y_{ij} \end{bmatrix} \quad (1.10)$$

d. Charge électrique

La charge électrique est souvent modélisée sous forme d'une impédance constante. La plupart des charges représentent une sous-station (système de distribution). Ces charges sont connectées au réseau électrique à travers un transformateur à prises de charges variables, où le niveau de tension de la charge est maintenu pratiquement constant.

Dans ce cas, les puissances actives et réactives de la charge peuvent être représentées par des valeurs constantes. [8]

Les charges sont modélisées par des puissances constantes indépendantes de la tension nodale :

$$S_{Di} = P_{Di} + jQ_{Di} \quad (1.11)$$

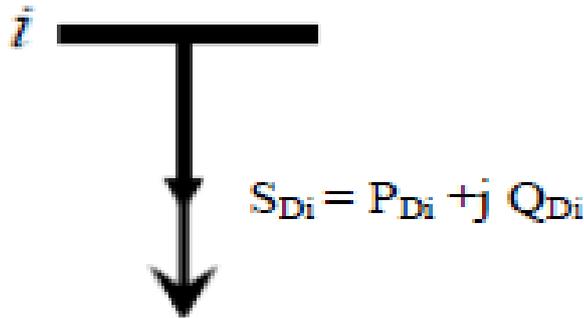


Figure 1.7 : Modèle d'une charge. [8]

S_{Di} : puissance apparente demandée au jeu de barres i

P_{Di} : puissance active demandée au jeu de barres i

Q_{Di} : puissance réactive ; cette puissance réactive peut être positive ou négative selon que la charge est de nature inductive ou capacitive.

Chapitre 1 Généralités sur les réseaux électriques

e. Éléments shunt [6]

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., sont modélisés par des admittances y_i de la forme :

$$y_i = g_i + jb_i \quad (1.12)$$

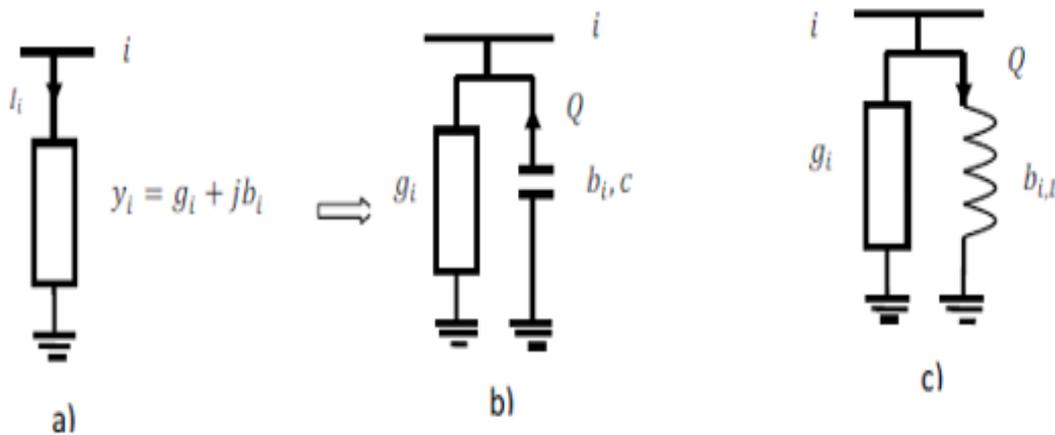


Figure 1.8 : Modèles des éléments shunt : a) symbole, b) élément capacitif, c) élément inductif [6]

1.7 Modèles des nœuds du réseau

Chaque nœud d'un réseau est caractérisé par quatre variables, P_i, Q_i, V_i, δ_i . Si on connaît deux des quatre variables on pourra déterminer les deux autres à partir des équations dans un réseau électrique on distingue trois types de nœud :

a. 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.

b. Nœud de 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

c. Nœud de référence (Slack bus)

Chapitre 1 Généralités sur les réseaux électriques

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. [9]

1.8 Protection d'un réseau électrique

Les dispositifs de protection vérifient en permanence l'état électrique des éléments d'un réseau et provoquent leur mise hors tension lorsque ces éléments sont le siège d'une perturbation indésirable : court-circuit, défaut d'isolement, surtension, etc. [10]

Lorsqu'un défaut apparaît sur un réseau électrique, plusieurs organes de protection situés dans différentes zones du réseau peuvent détecter simultanément cette anomalie. Leur déclenchement sélectif vise à isoler le plus rapidement possible la partie du réseau affecté par le défaut et uniquement cette partie, en laissant sous tension toutes les parties saines de ce réseau.[11]

Les fonctions de protection sont réalisées par des relais ou des appareils multifonctions. A l'origine, les relais de protection étaient de type analogique et effectuaient généralement une seule fonction.

Actuellement, la technologie numérique est la plus employée. Elle permet de concevoir des fonctions de plus en plus évoluées et un même appareil réalise généralement plusieurs fonctions. C'est pourquoi, on parle plutôt d'appareils multifonctions. [12]

Les principales qualités d'un système de protection sont définies par :

- La rapidité
- La sélectivité
- La sensibilité
- La fiabilité (sûreté et sécurité)

1.9 Chaîne générale d'un système de protection

C'est le choix des éléments de protection et de la structure globale de l'ensemble, de façon cohérente et adaptée au réseau (Figure 1.9). Le système de protection se compose principalement des éléments suivants :

Chapitre 1 Généralités sur les réseaux électriques

D : disjoncteur

TC : transformateur de courant

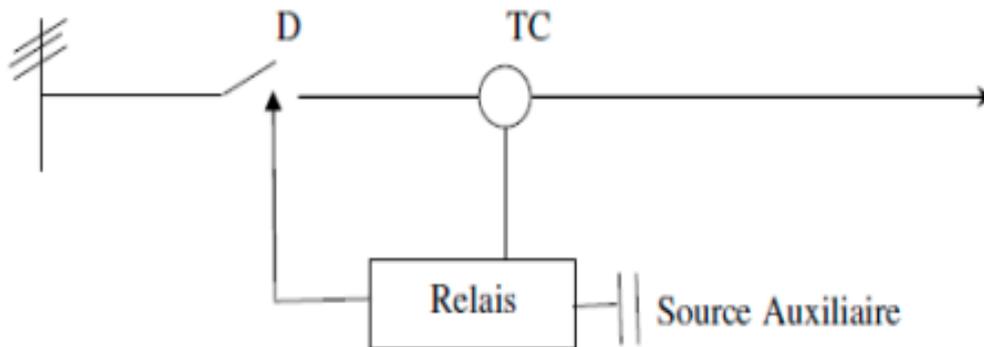


Figure 1.9 : Chaîne générale d'un système de protection

1.10 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différentes structures du réseau électrique, ainsi que les architectures de chaque structure. Puis nous avons mis en évidence les avantages et inconvénients de ces deux architectures. Par la suite nous avons modéliser les différents composants à savoir les transformateurs, les charges et les lignes de transport.

Nous avons parlé à la fin de ce chapitre brièvement sur la protection des réseaux.

Chapitre2 :
Ecoulement
de
puissance
optimale

2.1 Introduction

L'apparition de la crise de l'énergie et les prix de plus en plus chers des combustibles ont donné au fonctionnement des réseaux électriques une position importante dans l'industrie de l'électricité. C'est au début du dernier siècle que le "Dispatching Economique" était proposé comme une approche afin de répartir la puissance active produite entre les groupes thermiques de la manière la plus économique, compte tenu des coûts marginaux de production et des pertes du réseau.

En vue de déterminer l'état optimal du réseau électrique pour un problème quelconque (que soit économique, environnemental ou de sécurité), on doit maîtriser le fonctionnement optimal de chaque composant du réseau électrique, ainsi que sa modélisation.

Ce chapitre traite le fonctionnement optimal du système énergétique et la résolution du problème de l'écoulement de puissance optimal plus particulièrement le problème économique en minimisant le coût de production d'énergie électrique.

2.2 But de l'écoulement de puissance

L'étude de l'écoulement de puissance ou de flux de puissance est une étape essentielle pour l'étude et la conception des réseaux électriques. Cette étude est nécessaire pour la planification, l'échange de puissance entre les centres de production et le dispatching économique. Elle est aussi essentielle pour l'évaluation de la stabilité transitoire, stabilité dynamique et l'estimation de l'état du réseau ainsi que la prise de mesure adéquate à d'éventuelle imprévue.

2.3 Écoulement de puissance optimale

L'objectif d'un écoulement de puissance optimale et d'atteindre une valeur maximale ou minimale d'une fonction objective. [13]

L'objectif de la fonction peut-être :

- Minimiser les coûts de production électrique.
- Minimiser les pertes en puissance actives.
- Maximiser la puissance générer.

Tout en s'assurant que le réseau opère de façon sécuritaire :

- $V_{min} < \text{tensions des générateurs} < V_{max}$
- $S_{min} < \text{Puissances transitées dans les lignes} < S_{max}$

Pour atteindre cet objectif, on utilise les contrôles suivants :

- Consigne de tension des générateurs
- Compensation shunt
- Position des prises des transformateurs, etc.

2.4 Domaine d'application de l'écoulement de puissance optimal

Les applications de la fonction « écoulement de puissance optimal » peuvent être classées en applications d'exploitation et celles de planification. Dans le domaine d'exploitation, on distingue les applications d'ordre économiques et celles d'ordre technique. Dans chaque catégorie on trouve plusieurs applications, dont les plus courantes sont :

a. Maximisation de la puissance transmissible

Maximiser le transfert de puissance est un objectif appréciable pour les systèmes interconnectés. Il peut aider à minimiser les coûts d'exploitation des systèmes électriques en plus d'autres avantages tel que l'amélioration de la fiabilité. Cet objectif est mieux géré par un ajustement optimal des sources de puissance réactives. [14]

Cependant, l'intégration des dispositifs à base de semi-conducteurs (FACTS) dans la procédure de l'OPF, peut apporter une amélioration considérable de la capacité de transfert de puissance. [15]

b. Minimisation du coût de combustible

Le point de départ de l'OPF est la minimisation des coûts d'exploitation des réseaux électriques. La minimisation du coût de combustible est le principal objectif dans cette catégorie. Le but est de trouver les puissances optimales à générer par les centrales avec un coût minimal du combustible. [16] [17]

c. Minimisation des pertes

La minimisation des pertes de transmission est considérée aussi comme l'un des objectifs qui permet une réduction des coûts. Cet objectif ainsi que la minimisation du coût de combustible est l'un des objectifs les plus couramment utilisés. [16]

d. Amélioration du profil de tension

En général, les tensions sont bornées entre des limites supérieures et inférieures dans les contraintes d'inégalité. Cependant, il existe d'autres formulations où le but est de déterminer les paramètres de contrôle pour minimiser la somme des déviations de tension au niveau des générateurs. [18]

e. Amélioration de la stabilité de tension

L'amélioration du profil de tension ne garantit pas une sécurité optimale du système. En effet, des problèmes d'instabilité de tension ont été rencontrés dans des systèmes ayant un profil de tension acceptable.

La sécurité de tension est assurée si un système est capable de maintenir constamment une tension acceptable au niveau de tous les jeux de barre du système, dans les conditions de fonctionnement normale, après une augmentation de charge, après un changement de configuration ou lorsque le système est soumis à une perturbation. Cet objectif a fait l'objet de plusieurs travaux de recherches où il a été formulé de différentes manières. [19]

2.5 Classification des jeux de barres

Les jeux de barres sont classés suivant les deux variables connues parmi les quatre variables P_i, Q_i, V_i, δ_i . Généralement, on les classe sous trois types. [20]

a. Jeu de barres de charge (PQ)

Ce sont les jeux de barres de la demande de la clientèle, pour ce genre, les puissances actives et réactives sont données, mais l'amplitude et l'argument de la tension sont à déterminer

b. Jeu de barres de contrôle (PV)

Ce sont les jeux de barres où sont liés les générateurs de réseau, les grandeurs de la puissance active et du module de la tension sont connues, puisqu'elles sont contrôlables ; par contre, les grandeurs de la puissance réactive et l'argument de la tension sont inconnues.

c. Jeu de barre de référence

C'est un jeu de barre connecté à une source de tension considérée constante, et son angle de phase est pris comme référence de calcul. Ses puissances actives et réactives, doivent être calculées d'après le calcul de la puissance pour s'adapter aux exigences des jeux de barres de contrôle. Il faut noter que les variables concernées dans le tableau suivant sont celles injectées dans le réseau à partir du jeu de barre concerné

Type de jeux de barre (JB)	Variables connues	Abondance dans le réseau (%)
Charge (P, Q)	P, Q	≥ 80
Contrôle (P, V)	P, V	≤ 20
Référence (Slack/swing bus)	V, δ_i	1

Tableau 2.1 : Type de jeu de barres

2.6 L'acheminement de la puissance

En général, il existe une multitude de plans de production qui permettent de faire face à la demande. Toutefois, certains de ces plans ne sont pas adaptés pour acheminer la puissance sur les lieux de consommation en respectant les contraintes technico-économiques d'exploitation (minimiser les coûts de production et le coût des pertes, respecter les limites thermiques des ouvrages, maintenir la tension dans certaines plages en chaque nœud du réseau, être capable de faire face le plus rapidement possible à certains types de défaillance...). Le problème général de la production et de la répartition optimale et en sécurité de la puissance dans un système production-transport-consommation alternatif maillé est donc fort complexe.

Le fonctionnement d'un système électrique est gouverné, à chaque instant, par l'équilibre nécessaire entre les puissances actives et réactives produites et consommées. Lorsque cette condition nécessaire de fonctionnement est respectée, l'état du système est caractérisé, en régime stationnaire, par la fréquence f et les tensions. La fréquence f est fixée par la vitesse de rotation de toutes les machines qui doivent rester synchrones (en régime permanent). [21]

2.7 Formulation mathématique de l'écoulement de puissance optimal

Le problème de la répartition optimale des puissances est un problème d'optimisation dont l'objectif est de minimiser le coût total de la production de la puissance d'un réseau électrique.

Si on prend en considération seulement la fonction objective, on parle alors d'une optimisation sans contraintes. Mais si on prend en considération les équations de l'écoulement de puissance, on est donc devant un problème d'optimisation avec contraintes d'égalités. Si on prend de plus les limites min et max des puissances générées par les alternateurs, la surcharge des lignes de transports et les niveaux de tensions admissibles pour les jeux de barres de charges, on est alors devant un problème d'optimisation avec contraintes d'égalités et d'inégalités.

Le problème de l'écoulement de puissance optimal est donné sous une forme standard d'optimisation avec contraintes d'égalités et d'inégalités comme suit [22] [23] :

$$\text{Min } f(x, u)$$

Sous les contraintes d'égalité et d'inégalités :

$$h(x, u) = 0 \text{ (contraintes d'égalités)}$$

$$g(x, u) \leq 0 \text{ (contraintes d'inégalités)}$$

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

- X : Est le vecteur des variables d'état.
- U : Est le vecteur des variables de contrôle.

Le but est d'optimiser une fonction objective avec une solution satisfaisant un certain nombre de contraintes d'égalité et d'inégalités [24]

a. Fonction objective :

Cette fonction reflète le besoin de minimiser le coût total de la production des puissances actives. On suppose que le coût individuel de chaque centrale de production dépend uniquement de la génération de la puissance active [25].

$$F = \sum_{i=1}^{ng} f_i = \sum_{i=1}^{ng} (a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2) \quad (2.1)$$

Avec :

- P_{Gi} Les puissances active générées au nœud i .

b. Contraintes d'égalité :

Ces contraintes sont l'image des lois physiques gouvernant le système électrique. Elles sont représentées par les équations non linéaires de l'écoulement de puissance. Il faut que la somme des puissances actives et réactives injectées dans chaque jeu de barres soit égale à zéro.

$$g_i(x_1, \dots, x_n) = 0 \quad i = 1, \dots, n$$

$$\Delta P_i = 0 = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) - P_{Gi} + P_{Di} \quad (2.2)$$

$$\Delta Q_i = 0 = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) - Q_{Gi} + Q_{Di} \quad (2.3)$$

c. Contraintes d'inégalité :

En pratique, on ne doit pas dépasser les limites des éléments physiques du réseau électrique tels que les générateurs, les transformateurs à prises de charge, et les transformateurs de phase.

En plus des contraintes sur les puissances actives à chaque générateur qui a une influence directe sur la fonction coût, on peut citer d'autres contraintes d'inégalité [26] :

- La puissance réactive générée Q_{Gi} qui est limitée par une borne inférieure $Q_{Gi.min}$, et une borne supérieure $Q_{Gi.max}$.

$$Q_{Gi.min} < Q_{Gi} < Q_{Gi.max}$$

- Les transformateurs à prises de charge ont des déviations max et min du niveau de tension par rapport à la tension nominale. De même les transformateurs à angles de phase ont des décalages max et min des phases des tensions. Les deux types de transformateurs forment les contraintes d'inégalité suivantes :

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

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

- Pour maintenir la sécurité du système électrique, les lignes de transport et les transformateurs de puissances ont des limites sur le transit de puissance apparente. Ces limites sont dues aux pertes thermiques dans les conducteurs, et/ou la stabilité du système. Elles sont représentées par une contrainte d'inégalité, qui limitera le carré de puissance en MVA d'un transformateur ou d'une ligne de transport.
- 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.

$$V_{i.\min} < V_i < V_{i.\max}$$

Donc il y'a 'n' contraintes d'égalités et 'm' contraintes d'inégalités et le nombre des variables du problème est égal à la taille du vecteur des variables de contrôle (y compris puissances actives et réactives générées, niveaux de tension des jeux de barres, prises des transformateurs, etc...).

2.8 Classification des variables de l'écoulement de puissance

On peut résumer toutes les grandeurs électriques qui participent dans le calcul de l'écoulement de puissance électrique de réseau en quatre variables : la puissance active P, la puissance réactive Q, le module de tension |V| et l'angle δ_i . La distinction entre ces différentes variables est due à leur nature [27].

a. Variables de perturbation

Parmi les variables des équations de l'écoulement de puissance, les variables de la demande (charge) P_D et Q_D qu'elles ne sont pas contrôlables car elles dépendent seulement de la

puissance des abonnés. Les variables de perturbation avec cette définition constituent les composantes du vecteur de perturbation P et du vecteur de perturbation Q .

$$P = \llbracket P_{D1} \quad P_{D2} \quad P_{D3} \quad \dots \quad P_{Dn} \rrbracket$$

$$Q = \llbracket Q_{D1} \quad Q_{D2} \quad Q_{D3} \quad \dots \quad Q_{Dn} \rrbracket$$

b. Variables d'état

Ce sont les variables du problème qui dépendent des variables de contrôle. Ces variables sont essentiellement les modules des tensions des jeux de barres de charges, les puissances actives références (Slack-bus) et les rapports des transformateurs. Et les phases des tensions de tous les jeux de barres (sauf le jeu de barres de référence). L'état de fonctionnement d'un système électrique est complètement déterminé par les variables de contrôle et les variables d'état. [16].

$$X = \begin{bmatrix} P_1 & P_2 & \dots & \dots & P_n \\ V_1 & V_2 & \dots & \dots & V_n \\ T_1 & T_2 & \dots & \dots & T_n \end{bmatrix}$$

c. Variables de contrôle

Ce sont les variables du problème qui peuvent être ajustées afin d'optimiser la fonction objective et satisfaire les contraintes. Ces variables peuvent inclure :

- les puissances actives générées sauf la référence (Slack-bus).
- les puissances réactives générées par les alternateurs.
- les modules des tensions des jeux de barres.
- les rapports de des transformateurs.

Les puissances générées actives P_G sont des variables de contrôles représentées par le vecteur de contrôle U .

$$U = \begin{bmatrix} P_2 & P_3 & \dots & \dots & P_n \\ V_1 & V_2 & \dots & \dots & V_n \\ T_1 & T_2 & \dots & \dots & T_n \end{bmatrix}$$

2.9 Méthodes itératives dans l'écoulement de puissance :

La méthode initialement utilisée était la méthode de Gauss-Seidel, qui a l'inconvénient de converger en un nombre d'itérations proportionnel à la taille du réseau. Actuellement, la méthode universellement adoptée est la méthode de Newton – Raphson ou la méthode découplée rapide, dont le nombre d'itérations requis pour obtenir une solution est indépendant de la taille du réseau étudié.

La résolution du problème de l'écoulement de puissance est basée sur un processus itératif. On utilise des valeurs estimées des tensions des jeux de barres pour calculer un ensemble de nouvelles valeurs, qui sont fonctions des valeurs estimées des tensions, des puissances actives et réactives spécifiées et des admittances du réseau. Chaque fois qu'un ensemble des valeurs de tensions est obtenue, le nombre d'itérations augmente d'une unité.

Depuis longtemps plusieurs méthodes ont été proposées par différents chercheurs pour la résolution des systèmes d'équations modélisant le fonctionnement en régime permanent du Système électrique. Pour calculer les tensions des jeux de barres des réseaux électriques on utilise l'une des méthodes suivantes

➤ Méthode de Gauss-Seidel

La méthode de Gauss-Seidel permet la résolution du problème de l'écoulement de puissances, en utilisant la matrice admittance on détermine les tensions des nœuds.

Dans un réseau à n nœuds, les tensions et les courants ont chacun n composantes réelles et n composantes imaginaires et la matrice Y_{ij} , est une matrice de $n * n$ Dont les éléments sont calculés à partir des caractéristiques des composants du réseau.

Cette méthode dérivant de la méthode itérative de Gauss permet de résoudre un système d'équations non linéaires en utilisant la matrice admittance.

On calcul initialement des tensions pour tous les nœuds excepte le nœud de bilan (nœud pris comme nœud de référence ou Slack bus) où la tension est maintenue constante.

On peut écrire pour chaque nœud l'expression du courant :

$$I_i = \frac{S_i^*}{V_i^*} = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.4)$$

Où :

n : le nombre de nœuds dans le réseau ;

S_i^* : le conjugué de la puissance apparente injectée au nœud i ;

V_i^* : le conjugué de la tension au nœud i .

P_i : la puissance active injectée au nœud i .

Q_i : la puissance réactive injectée au nœud i .

En remplaçant l'équation (2.5) dans (2.4), on aura :

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = Y_{ii}V_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n Y_{ij}V_j \quad i \neq s \quad (2.5)$$

Où :

s : le numéro du nœud de référence.

L'expression de la tension pour chaque nœud est :

$$V_i^{K+1} = \frac{1}{Y_{ii}} \left(\frac{P_i - jQ_i}{(V_i^*)^K} - \sum_{j=1}^{i-1} Y_{ij}V_j^{K+1} - \sum_{i+1}^n Y_{ij}V_j^K \right) \quad (2.6)$$

Cette dernière équation est basée sur un calcul itératif qui se fait de la manière suivante :

La tension du nœud de bilan et les tensions estimées pour tous les autres nœuds sont substituées dans l'équation (2.6) pour obtenir des nouvelles valeurs de tensions.

Ces nouvelles valeurs sont encore utilisées dans l'équation (2.6) pour calculer les autres nouvelles tensions et ainsi de suite. Le processus se poursuit jusqu'à ce que la différence entre la tension trouvée et celle qui la précède pour chaque nœud soit inférieure à une certaine valeur imposée au début du calcul.

Pour des raisons de simplifications des calculs, on utilise les notations suivantes :

$$\begin{cases} KL_i = \frac{P_i - jQ_i}{Y_{ii}} \\ YL_{ij} = \frac{Y_{ij}}{Y_{ii}} \end{cases} \quad (2.7)$$

L'expression pour chaque itération s'écrit :

$$V_i^{k+1} = \frac{KL_i}{(V_i^*)^k} - \sum_{j=1}^{i-1} YL_{ij}V_j^{k+1} - \sum_{i+1}^n YL_{ij}V_j^k \quad i \neq s \quad (2.8)$$

➤ **Méthode de Newton-Raphson**

La méthode de Newton Raphson permet la résolution du problème de l'écoulement de puissances.

Soit une fonction scalaire. Si elle est continue et dérivable au voisinage de x_n , alors son développement en série de TAYLOR au voisinage $x_n = \bar{x}$ est :

$$f(\bar{x}) = f(x_n) + \frac{(\bar{x}-x_n)}{1!} f'(x_n) + \frac{(\bar{x}-x_n)^2}{2!} f''(x_n) + \dots \quad (2.9)$$

Si x_n est un estimé proche de \bar{x} , alors le carré de l'erreur $\varepsilon_n = \bar{x} - x_n$ et les termes de degrés supérieurs sont négligeable.

Sachant que $f(\bar{x}) = 0$ on obtient la relation approximative :

$$f(x_n) + (\bar{x} - x_n)f'(x_n) \approx 0 \quad (2.10)$$

Donc

$$\bar{x} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (2.11)$$

En générale :

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (2.12)$$

n : Nombre d'itérations

On peut donc écrire :

$$x_{n+1} = x_n + \varepsilon_n \quad (2.13)$$

Et

$$\varepsilon_n = - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (2.14)$$

2.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté brièvement les conditions de fonctionnement optimal des systèmes d'énergie électrique, en exposant les moyens de contrôle et de réglage de la génération de l'énergie électrique.

Aussi on a vu que la solution de l'écoulement de puissance est basée essentiellement sur les méthodes mathématiques numériques itératives.

A la fin de ce chapitre, on peut résumer que l'utilisation des méthodes classiques pour résoudre le problème d'OPF est complexe au niveau de la modélisation et du calcul et elles ne donnent pas de solutions exactes surtout si la fonction de coût et/ou les contraintes sont vraiment non linéaires.

C'est pour cela, on préfère l'utilisation des méthodes métaheuristiques dans le prochain chapitre qui n'exigent aucune condition sur la continuité, la dérivabilité et la linéarité de la fonction de coût du problème à optimiser.

Chapitre 3 :

Méthodes

Métaheuristi-

ques appliqué

à l'OPF

3.1 Introduction

La complexité du problème d'optimisation de l'écoulement de puissance surtout dans un environnement de marché d'électricité libre, avec l'apparition de nouvelles contraintes en matière de réduction des émissions de gaz polluant (Protocole de Kyoto, 2005) et l'utilisation de sources d'énergies renouvelables, fait en sorte qu'il est souvent difficile d'utiliser des méthodes exactes de solution compte tenu du manque de flexibilité des méthodes classiques pour intégrer diverses contraintes spécifiques. [28]

Ces problèmes ont donné lieu au développement d'une nouvelle classe de méthodes d'optimisation nommées méta heuristiques, celles-ci marquent une grande révolution dans le domaine d'optimisation. En effet, elles s'appliquent à toutes sortes de problèmes combinatoires, et elles peuvent également s'adapter aux problèmes continus. Les méthodes méta heuristiques apparues à partir des années 1980 [29], permettent de trouver une solution de bonne qualité en un temps de calcul en général raisonnable, sans garantir l'optimalité de la solution obtenue. Les méthodes heuristiques peuvent être divisés en deux classes. Il y a, d'une part, les algorithmes spécifiques à un problème donné qui utilisent des connaissances du domaine, et d'autre part les algorithmes généraux qui peuvent être utilisés pour une grande variété de problèmes.

3.2 Méthodes Méta heuristiques

3.2.1 Définition des méthodes méta heuristiques

Les métaheuristiques sont un ensemble d'algorithmes d'optimisation visant à résoudre les problèmes d'optimisation difficiles. Elles sont souvent inspirées par des systèmes naturels, qu'ils soient pris en physique (cas du recuit simulé), en biologie de l'évolution (cas des algorithmes Génétiques) ou encore en éthologie (cas des algorithmes de colonies de fourmis ou de l'optimisation par essais particuliers).

Ces techniques métaheuristiques peuvent être classés en deux groupes : les méthodes à population de solutions connues sous le nom d'algorithmes évolutionnaires comme les algorithmes génétiques...etc., ainsi que les méthodes à solution unique comme le recuit simulé. Les méthodes métaheuristiques ont prouvé leurs efficacités dans le domaine de l'optimisation mono-objectif. Actuellement les recherches qui utilisent ces algorithmes sont développées pour la résolution des problèmes d'optimisation multi objectif, en tenant compte de plusieurs

contraintes et de nouvelles configurations des réseaux électriques surtout à l'associations de sources des énergies renouvelables où la résolution de ce system complexe est un défi.

3.2.2 Recuit simulé

Le recuit simulé est une méthode empirique inspirée d'un processus utilisé en métallurgie (appelé le recuit) où, pour atteindre les états de basse énergie d'un solide, on chauffe celui-ci jusqu'à des températures élevées, avant de le laisser refroidir lentement. L'algorithme du recuit simulé a été proposé par Kirkpatrick et al. [30] (Indépendamment, Cerny [31]).

La description classique du recuit simulé le présente comme un algorithme probabiliste, où un point évolue dans l'espace de recherche. L'algorithme de recuit simulé est résumé en Figure 3.1. Les inconvénients du recuit simulé résident dans : a- Les « réglages », car l'algorithme dispose d'un nombre élevé de paramètres (température initiale, règle de décroissance de la température, durées des paliers de température, etc.) qui rendent les réglages de l'algorithme assez empiriques ; b- Les « temps de calcul », qui peuvent devenir très importants. Cependant, il existe des études qui s'attachent à régler de manière optimale les paramètres de l'algorithme. [32]

Par ailleurs, pour surmonter le problème de temps de calcul, plusieurs méthodes de parallélisation des calculs ont été introduites. [33]

3.2.3 Recherche taboue

La méthode taboue qui fait partie des méthodes de voisinage, a été proposée par Fred Glover en 1986. [34] Elle utilise la notion de mémoire pour éviter un optimum local. Le principe de la recherche tabou repose sur une méthode de déplacement sur l'espace des solutions, tout en cherchant constamment à améliorer la meilleure solution courante et en conservant en mémoire la liste des précédents déplacements et ainsi guider la recherche en dehors de zones précédemment parcourues. En général on ne va pas garder tous les déplacements (trop coûteux en mémoire), mais on va seulement empêcher l'accès à certaines solutions pendant un certain nombre d'itération.

3.2.4 Algorithme génétique

Les algorithmes génétiques appartiennent à la famille des algorithmes évolutionnistes. Leur but est d'obtenir une solution approchée à un problème d'optimisation. [35]

La solution optimale est cherchée à partir d'une population de solutions en utilisant des processus aléatoires. La recherche de la meilleure solution est effectuée en créant une nouvelle génération de solutions par application successive, à la population courante, de trois opérateurs : la sélection, le croisement, et la mutation. Ces opérations sont répétées jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit atteint

3.3 Optimisation par Colonie d'abeilles

L'optimisation par colonie d'abeilles est une famille très récente des métaheuristiques. Son principe est basé sur le comportement des abeilles réelle dans la vie. Cette approche de résolution fait l'objet de notre étude. Dans ce contexte, nous allons donner la structure d'une colonie d'abeille, puis une description du comportement des abeilles lors de la recherche de nourriture, enfin nous allons présenter quelques algorithmes inspirés du ce comportement.

3.3.1 Les abeilles en nature

Les abeilles possèdent des propriétés assez différentes de celles des autres espèces d'insectes. Elles vivent en colonies, en construisant leurs nids dans des troncs d'arbres ou d'autres espaces clos similaires. [36]

Généralement, une colonie d'abeilles contient une femelle reproductrice appelée reine, quelques centaines de mâles connus sous le nom de faux-bourdon, et de 10.000 à 80.000 femelles stériles qui s'appellent les ouvrières. Après accouplement avec plusieurs faux-bourdons, la reine reproduit beaucoup de jeunes abeilles appelées les couvées.

a. La Reine

Dans une colonie d'abeilles, il y a une seule reine qui est la femelle reproductrice avec l'espérance de vie entre 3 et 5 ans. Son rôle principal est la reproduction, elle s'accouple avec (7-20) faux-bourdon dans une opération de reproduction appelée le vol nuptial (mating flight).

Chapitre 3 Méthodes Méta heuristiques appliqué à l'OPF

Elle conserve les spermatozoïdes dans sa spermathèque et puis pond jusqu'à 2000 œufs par jour. Les œufs fertilisés vont bien devenir femelles (ouvrières) et les œufs non-fertilisés deviennent mâles (bourdons).

b. Le male (faux-bourdon)

Au sein de la famille des Apidés, se trouvent plusieurs genres, et notamment les bourdons, qu'il ne faut pas confondre avec les faux-bourdons, les mâles de l'abeille domestique. Les faux-bourdons représentent les mâles, variant entre 300 et 3000 dans une ruche. Selon la taille de l'alvéole, dans une grande cellule hexagonale, la reine dépose un œuf sans que son réceptacle séminal laisse sortir de spermatozoïde. L'œuf non fécondé donnera ainsi naissance à un faux-bourdon. Ce dernier a une espérance de vie de 90 jours. Après l'accouplement, qui a lieu en vol, le male meurt rapidement. [37]

c. Ouvrières

Les ouvrières sont les abeilles femelles mais elles ne sont pas reproductrices, elles vivent de 4 à 9 mois dans une saison froide et leur nombre arrive jusqu'à 30.000 dans une colonie (ruche). Cependant, en été, leur durée de vie est de 6 semaines et leur nombre atteint jusqu'à 80.000. L'ouvrière est responsable de la défense de la ruche utilisant sa piqûre barbelée. En conséquence, elle meurt après avoir piquée. On peut énumérer les activités des ouvrières par le critère des jours de sa vie comme suit : nettoyage de cellules (jour 1-2), soigner les abeilles (jour 3- 11), production du cire (jour 12-17), surveiller les autres abeilles (jour 18-21), et recherche de nourriture (jour 22-42). L'ouvrière assure les activités habituelles de la colonie d'abeilles telles que l'emballage de pollen, éventer les abeilles, porter l'eau, déplacement des œufs, s'occuper de la reine, nourrir les bourdons, et construction du nid d'abeilles. [38]

d. Couvées

Les jeunes abeilles sont nommées les couvées. Elles sont nées après que la reine pond un œuf fécondé par un spermatozoïde libéré par la spermathèque dans des cellules spéciales du nid d'abeilles appelées trames de couvée (brood frames). L'œuf fécondé donne naissance à une

Chapitre 3 Méthodes Méta heuristiques appliqué à l'OPF

abeille ou à une reine en fonction des soins et de la nourriture apportés aux larves. Peu de larves femelles sont choisies pour être des futures reines.

Les œufs non fertilisés donnent naissance aux couvées. Les jeunes larves tournent par le cocon, couvrant la cellule par les ouvrières les plus âgées. C'est l'étape de chrysalides. Puis, elles atteignent l'étape de développement dans laquelle elles reçoivent le nectar et le pollen des abeilles chercheurs jusqu'à ce qu'elles quittent la ruche et passent leurs vies comme chercheurs de nourriture. [39]

3.3.2 Recherche de nourriture chez les abeilles

Les scientifiques ont effectué beaucoup de recherches pour déterminer comment l'ordre est maintenu dans la ruche où vivent des dizaines de milliers d'abeilles. Un grand nombre d'études académiques ont été aussi effectuées à cette fin.

Un éminent expert et professeur à l'Université de Munich, le zoologiste autrichien Karl Von Frisch, a consacré un livre de 350 pages à la communication des abeilles, "The dance language and orientation of bees" (Le langage de la danse et l'orientation des abeilles).

3.3.3 Méthode de communication chez les abeilles

Karl Von Frisch a construit une ruche avec une paroi en verre par laquelle il pouvait observer le comportement des abeilles à l'intérieur. Il remarqua que dans le retour des abeilles employeuse à la ruche, elles exécutent la danse. Si une seule abeille l'exécute, ce n'est pas toute la ruche qui passe à l'action. Premièrement, un groupe d'éclaireuses quitte la ruche. Si, à son retour, ce groupe exécute aussi la danse, alors un groupe plus important d'abeilles se dirigera vers l'objectif. Meilleure est la source de nourriture qu'elles trouvent, plus longtemps dure la danse et plus grand sera le nombre d'abeilles qui les suivent. De cette façon, l'attention des butineuses est toujours fixée sur la source la plus productive.

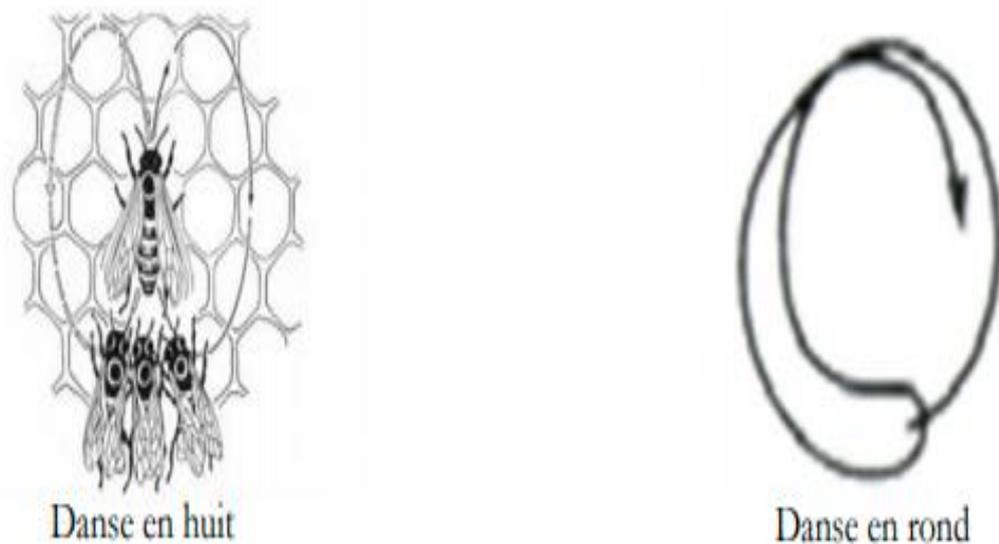


Figure 3.1 : La danse des abeilles

Si la source de nourriture qu'elles trouvent est très riche, la danse que les abeilles exécutent est très enthousiaste. Si la source est à proximité, elles décrivent son emplacement en exécutant la "danse en rond" illustrée à droite. Pour les sources de nourriture plus éloignées, elles exécutent la danse en huit illustrée à gauche, avec des mouvements frétilants. [40] Dans la danse frétilante, l'abeille tourne alternativement d'un côté et de l'autre effectuant un demi-tour circulaire qui la ramène au point de départ.

Les ouvrières suivent la danseuse au cours de ses déplacements, et la touchent des antennes. Cette danse est très riche en information, en particulier, elle donne aux abeilles observatrices deux indications essentielles : la quantité de nourriture, la distance à parcourir et la direction à suivre. [41] Concernant la distance, plusieurs paramètres sont utilisés simultanément, le plus important est le tempo de la danse, c'est-à-dire le nombre de tours complets effectués par la danseuse par unité de temps. Les mouvements de l'abeille sont d'autant plus durables que la source est riche (quantité de nourriture).

En ce qui concerne la direction, elle est donnée par rapport à l'azimut solaire (en plan horizontal), la position angulaire de la source est indiquée par l'angle que fait la partie frétilante avec la verticale du rayon comme l'indique la figure (3.1) [40]. Dans le cas où la source de nourriture trouvée serait improductive, les abeilles dansent tout de même, mais elles le font à contre-cœur et pendant une plus brève durée. Cela se reflète aussi sur les autres abeilles dans la

Chapitre 3 Méthodes Méta heuristiques appliqué à l'OPF

ruche, les abeilles qui se rassemblent autour de la danseuse se dispersent rapidement et une nouvelle équipe quitte la ruche à la recherche de nourriture. [40]

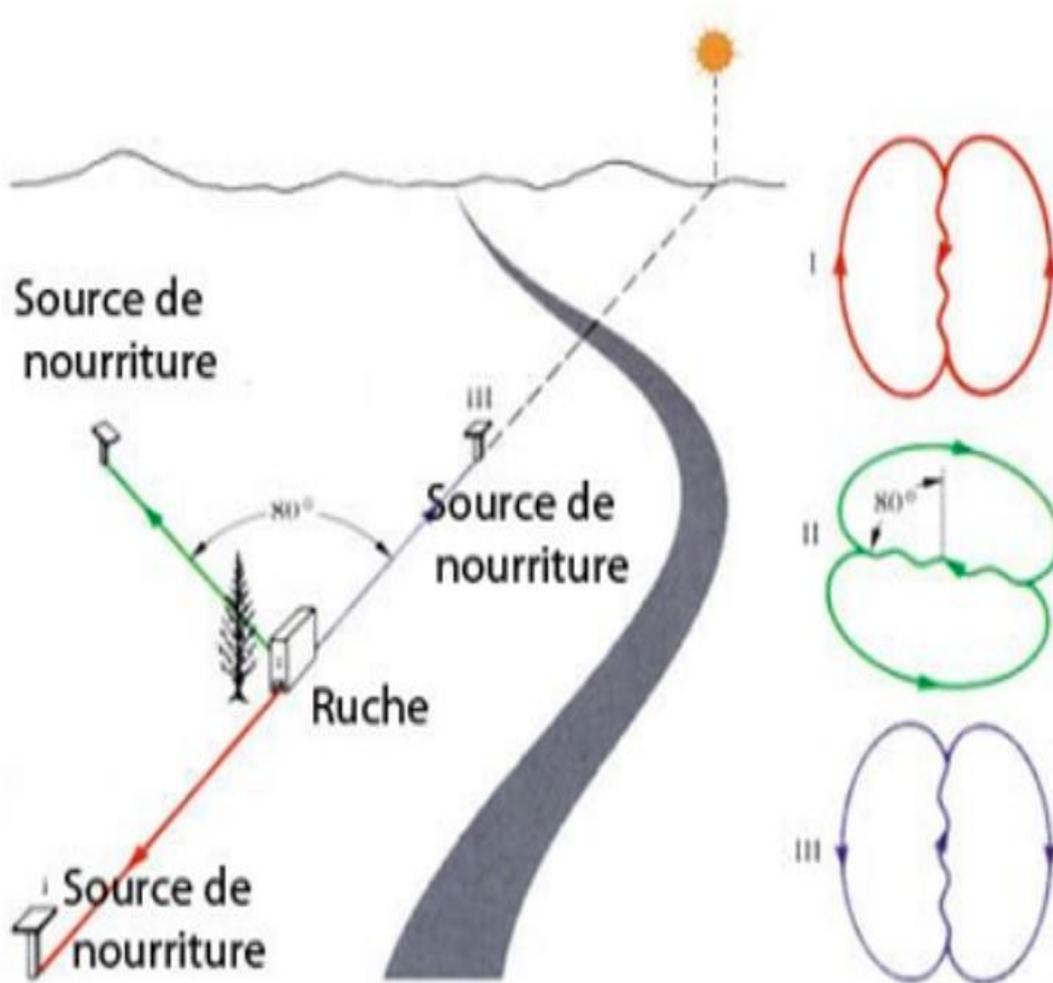


Figure 3.2 : L'indice de la direction

- 1- Si la source de nourriture se trouve exactement dans la direction du soleil, ou dans la direction opposée, les frétillements dans la danse seront verticaux sur le rayon.
- 2- Si la source de nourriture est 80 degrés à gauche du soleil, cela est indiqué en faisant la trajectoire du frétillement de la danse à un angle correspondant de 80 degrés à gauche de la verticale.
- 3- Si l'abeille suit une direction vers le haut durant son frétillement, elle signale que la source de nourriture se trouve dans la direction vers le soleil. Et si elle se dirige droit en bas, cela signifie que la source se trouve dans la direction exactement opposée de celle du soleil.

3.3.4 Optimisation naturelle : Les directions fournies par les abeilles

Comme il a été déjà mentionné, peu après avoir regardé l'abeille danseuse, les autres ouvrières quittent la ruche et se dirigent vers l'objectif. Cependant, les abeilles sont confrontées à un problème important : l'angle que la danseuse a fourni à ses sœurs est basé sur le soleil. Cependant, le soleil n'est pas fixe dans le ciel, mais il change de position de 1 degré à toutes les 4 minutes. Si une abeille suivait la ligne d'origine, elle ne serait jamais capable de localiser son objectif à cause du changement de position du soleil. Chaque fois que 4 minutes s'écoulent, cela correspond à une marge d'erreur de 1 degré, laquelle atteindra des dimensions impossibles à corriger au cours d'un long voyage. En réalité, cela ne se produit jamais.

Depuis maintenant des millions d'années, les abeilles ont compris les directions qui leur sont fournies par leurs sœurs, malgré le mouvement du soleil et le changement des angles. Les abeilles n'éprouvent aucune difficulté à trouver des sources de nourriture, ce qui indique qu'elles ne font aucune erreur en calculant l'angle par rapport au soleil.

Pour exprimer cela en termes mathématiques, les abeilles calculent que le soleil se déplace de 1 degré à chaque 4 minutes. En conséquence, elles sont capables de se rappeler de l'emplacement exact de la source de nourriture et de le "décrire" aux autres abeilles. Les autres abeilles calculent l'angle suivant la position modifiée du soleil, comprennent les directions données et localisent la source de nourriture en question.

3.4 Algorithme d'optimisation de colonie d'abeilles artificielle (ABC)

L'algorithme ABC (Artificiel Bee Colony) est développé par Karaboga et Basturk en 2005, en inspectant les comportements des abeilles réelles pour trouver la source de nourriture, qui s'appelle le nectar, et partager l'information des sources de nourriture aux autres abeilles dans le nid. Dans cet algorithme, les abeilles artificielles sont définies et classifiées en trois groupes : abeilles employeuses (abeilles qui recherche la nourriture), spectatrices (abeilles d'observation) et scouts (éclaireuses) sont chargées de trouver de nouvelles nourritures, (le nectar de nouvelles source). [42] Pour chaque source de nourriture, il y a seulement une abeille employeuse. C'est-à-dire, le nombre d'abeilles employeuses est égal au nombre de sources de nourriture. [43] Si l'abeille employeuse d'un site ne réussit pas de trouver la source de nourriture, elle doit être forcément devenir un scout pour rechercher aléatoirement de nouvelles sources de nourriture.

Chapitre 3 Méthodes Méta heuristiques appliqué à l'OPF

Les abeilles employeuses partagent l'information avec les abeilles spectatrices dans une ruche de sorte que les abeilles spectatrices puissent choisir une source de nourriture pour l'explorer.

3.5 Le processus de l'algorithme

Etape 1- Initialisation : On commence par sélectionner F_e pourcentage de population de façon aléatoire dans l'espace de recherche en utilisant l'équation suivante :

$$U_j = U_j^{min} + n_j * (U_j^{max} - U_j^{min}) \quad n_j \in [0,1] \quad (3.1)$$

Sachant que chaque abeille porte un vecteur 'U' de 'n'solution. A titre d'exemple le cas qu'on va simuler est expliqué comme suit :

$$U_{controle} = (P_i, V_i, T_i) \equiv \begin{cases} abeille = (P_1 V_1 T_1) \\ abeille2 = (P_2 V_2 T_2) \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ abeille_i = (P_i V_i T_i) \end{cases}$$

P_i : Puissance générée au jeu de barres i ;

V_i : Tension générée au jeu de barres i ;

T_i : Prises en charge des transformateurs ;

Puis, on les évalue dans la fonction objective (équation de cout), ensuite on calcule leurs valeurs Fitness, appelées la quantité de nectar par l'équation suivante :

$$Fitness = \frac{1}{F_{objective}} \quad (3.2)$$

F_e : Représente le rapport des abeilles dans la population totale. Une fois que ces populations sont placées dans l'espace de recherche, elles prennent le nom : les abeilles employeuses.

Chapitre 3 Méthodes Méta heuristiques appliqué à l'OPF

Etape 2- Déplacement des abeilles employeuses : Calculer la probabilité de choisir une source de nourriture par l'équation (3.3),

$$P_i = \frac{0.9 * Fitness_i}{\max (Fitness_i)} + 0.1 \quad (3.3)$$

Puis sélectionner une source de nourriture et ensuite déterminer ses quantités de nectar. L'équation de mouvement des abeilles observatrices est donnée ci-dessous :

$$m_{ij}(t + 1) = x_{kj} + y \left(x_{ij}(t) - x_{kj}(t) \right) \quad y \in [0,1] \quad (3.4)$$

Tel que m_{ij} est la $i^{ème}$ position de l'abeille spectatrice, t est le nombre d'itération, x_{ij} est l'abeille utilisée choisie aléatoirement, 'j' représente la dimension du vecteur de solution qui produit une série de variables aléatoires dans la gamme [-1,1].

Où:

$k \in 1,2,3 \dots\dots$

N et $j \in 1,2, \dots\dots$

D sont choisis aléatoirement ;

'D' est le nombre de paramètre à optimiser. [44]

'K' est aussi choisi aléatoirement mais doit être différent de l'indice 'i'

Etape 3-Déplacer les scouts : Si les valeurs de Fitness des abeilles employeuses ne sont pas améliorées par un nombre d'itérations prédéterminé, appelé "max-cycle", ces sources de nourriture sont abandonnées, et l'abeille trouvée dans cet emplacement passera aléatoirement pour explorer d'autres nouveaux emplacements. (Abeilles employeuses deviennent des Scouts). Cette explication est traduite mathématiquement par l'équation (3.5):

$$V_{ij} = V_{ij}^{min} + \varphi_{ij} * (V_{ij}^{max} - V_{ij}^{min}) \quad \varphi_{ij} \in [0,1] \quad (3.5)$$

Chapitre 3 Méthodes Méta heuristiques appliqué à l'OPF

Etape 4-Mettre à jour la meilleure source de nourriture trouvée jusqu'ici :

Apprendre la meilleure valeur de Fitness et la position, qui sont trouvées par les abeilles, et les mémoriser.

Etape 5-Critère d'arrêt : Vérifier le processus de calcul jusqu'à ce que le nombre d'itérations atteigne la valeur maximale prédéfinie ou qu'une solution de la fonction objective acceptable soit trouvée.

3.6 Organigramme de l'algorithme ABC

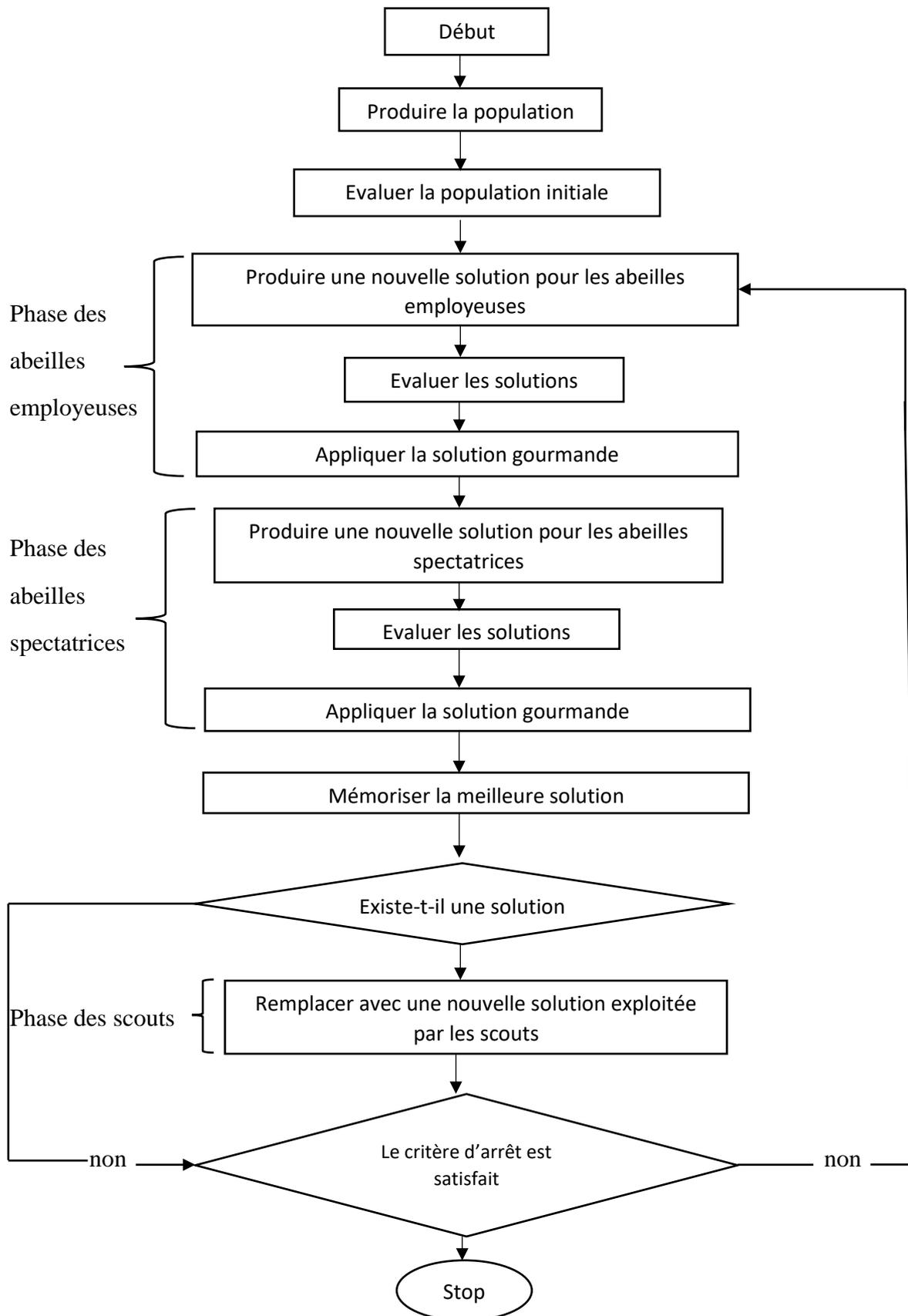


Figure 3.3 : Organigramme du modèle de base de l'algorithme ABC

3.7 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation des méthodes métaheuristiques les plus répandues destinées à la résolution des problèmes complexes.

Elles sont inspirées de l'analogie avec des domaines aussi variés que la physique, la génétique ou encore l'éthologie. Ces méthodes ont rencontré un très grand succès dans leurs domaines d'application comme la production industrielle, l'économie ou le transport en prouvant leurs capacités à traiter les problèmes les plus difficiles en variables continues et discrètes.

La simplicité d'implémentation des méthodes métaheuristiques a encouragé les chercheurs pour une variété de domaines à hybrider ces méthodes entre elles, en vue d'obtenir de meilleures performances possibles.

Nous avons discuté en détail, la méthode de colonie d'abeille à cause de son large usage dans plusieurs domaines et en vue de l'appliquer dans le domaine de l'écoulement de puissance optimal.

Toujours dans le cadre de l'amélioration de cet algorithme, plusieurs variantes ont été exposées dans ce chapitre pour remédier au problème de la convergence prématurée.

Chapitre4 :

Résultats

et

Discussion

4.1 Introduction

Ce chapitre présente les résultats numériques et graphiques, les discussions et les interprétations relatifs à l'application de la méthode de colonie d'abeille pour la résolution du problème mono-objectif de l'écoulement de puissance optimal.

Les résultats d'application de l'approche proposée seront comparés à des résultats de l'écoulement de puissance pour les mêmes réseaux test pour bien illustrer l'efficacité et la robustesse de la nouvelle approche.

La simulation est adoptée sous l'environnement MATLAB 2014 et implémenté sur un PC avec un Intel® 2,7 GHz Core™ (Intel Corporation) i5 CPU et 6 Go de RAM.

4.2 Les Fonctions objectif

Les fonctions objectives à minimiser sont :

-Le coût de production.

A la charge nominale

$$F = \sum_{i=1}^{ng} f_i = \sum_{i=1}^{ng} (a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2) \quad (4.1)$$

A la charge maximale

$$F = \sum_{i=1}^{ng} f_i = \sum_{i=1}^{ng} (a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2) + |d_i \sin(e_i (P_{Gi}^{min} - P_{Gi}))| \quad (4.2)$$

4.3 Les contraintes

Les contraintes de sécurité considérées dans notre optimisation sont les limites des modules et phases de tensions ainsi que les puissances actives et réactives des générateurs de production.

Les variables de contrôle sont classées selon trois types.

Le premier type est défini par les puissances générées actives, limitées par les bornes inférieure et supérieure selon la capacité des centrales électriques.

Le deuxième type est réservé aux rapports de transformation des transformateurs à prises de réglage dont la valeur est limitée entre 0.9 et 1.1.

Le troisième type est adressé aux tensions au niveau des jeux de barres PV dont la valeur est limitée entre 0.94 pu et 1.06 pu.

4.4 Application1 : Optimisation par l'algorithme de colonie d'abeille 14-Bus

Le modèle mathématique est appliqué sur le réseau IEEE14 JDB qui contient 05 générateurs de production (installés aux nœuds 1, 2, 3, 6, et 8), 20 lignes et 03 transformateurs situés entre les jeux de barres (5-6), (4,7), (4,9) et 11 charges et un seul élément shunt.

Le schéma unifilaire de ce réseau test est présenté dans la figure 4.1.

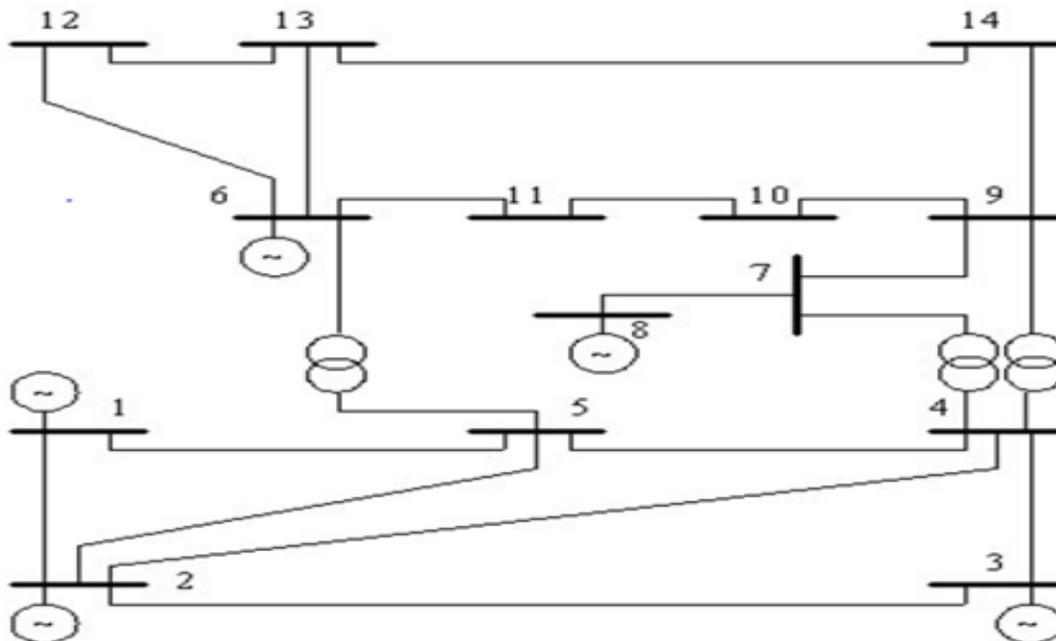


Figure 4.1 : le schéma unifilaire du réseau électrique IEEE 14-Bus

Paramètres de l'algorithme :

Dans cette première application de l'algorithme de colonie d'abeille est utilisé pour résoudre le problème d'optimisation

Les paramètres que nous avons utilisés sont présentés comme suit :

La population = 50

Critère d'arrêt : maximum nombre d'itérations

Sigma_initial (initial standard deviation) = 0.9

Sigma_final (final standard deviation) = 0.4

φ_{ij} = Coefficient de réglage

❖ La charge nominale

➤ Le tableau du coût de la production :

Variables	Inférieure	Supérieures	PF	OPF	ABC	Ecart1	Ecart2
PG2(MW)	0	140	40	36.73	36.69	0.08275	0.0001
PG3(MW)	0	100	0	28.61	28.22	0	0.0136
PG6(MW)	0	100	0	0	0	0	0
PG8(MW)	0	100	0	8.55	8.54	0	0.0001
VG1 (p.u)	0.94	1.06	1.06	1.06	1.06	0	0
VG2 (p.u)	0.94	1.06	1.045	1.044	1.04	0.0004	0.0003
VG3 (p.u)	0.94	1.06	1.01	1.019	1.01	0	0.0008
VG6 (p.u)	0.94	1.06	1.06	1.06	1.06	0	0
VG8 (p.u)	0.94	1.06	1.06	1.06	1.06	0	0
T1 (4-7)	0.9	1.1	0.978	0.978	0.9	0.0797	0.0797
T2 (4-9)	0.9	1.1	0.969	0.969	1.1	0.1351	0.1351
T3 (5-6)	0.9	1.1	0.932	0.932	1.01	0.0836	0.0836

Cost (\$/h)	-	-	-	8081.19	8078.9	-	0.0002
Ecart1= $ (PF-ABC) / PF $				Ecart2= $ (OPF-ABC) / OPF $			

Tableau 4.1 : les valeurs optimales obtenues pour le réseau 14JDB et leurs écarts.

Pour ce cas le coût optimal obtenu est de 8078.9 \$/h qui est inférieur au cas ordinaire, c'est-à-dire on a atteint notre objectif qui est la minimisation du coût de production.

Il est noté que les contraintes de sécurités sont vérifiées, les tensions aux niveaux des jeux de barres sont dans leurs limites admissibles, les puissances transitées dans les lignes sont aussi respectées.

➤ **La figure du coût de la production :**

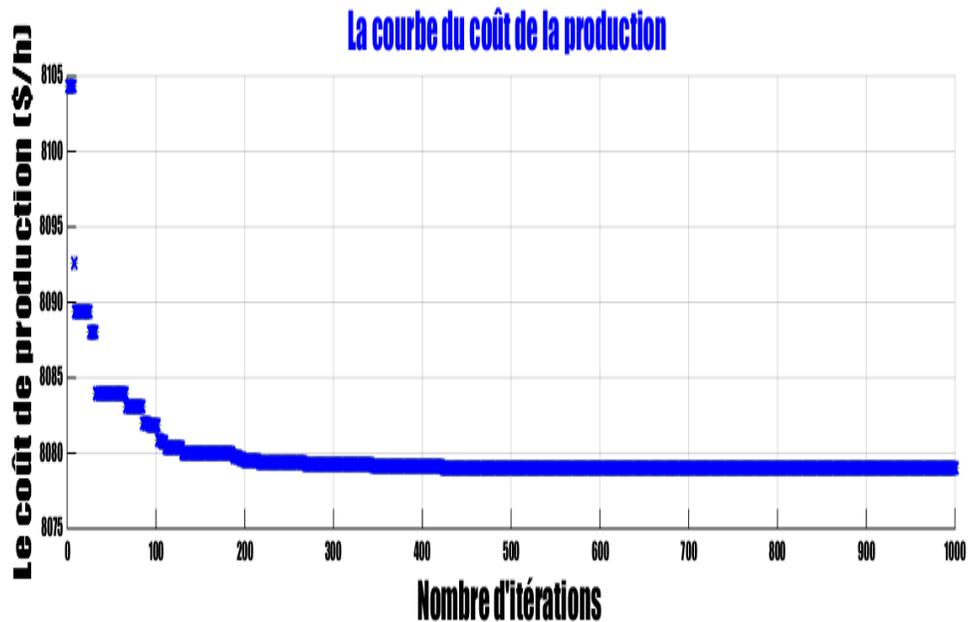


Figure 4.2: La convergence de la courbe du coût de la production 14JDB à la charge nominale.

On voit que la courbe est bien convergée après 420 itérations.

➤ L’histogramme du coût de la production :

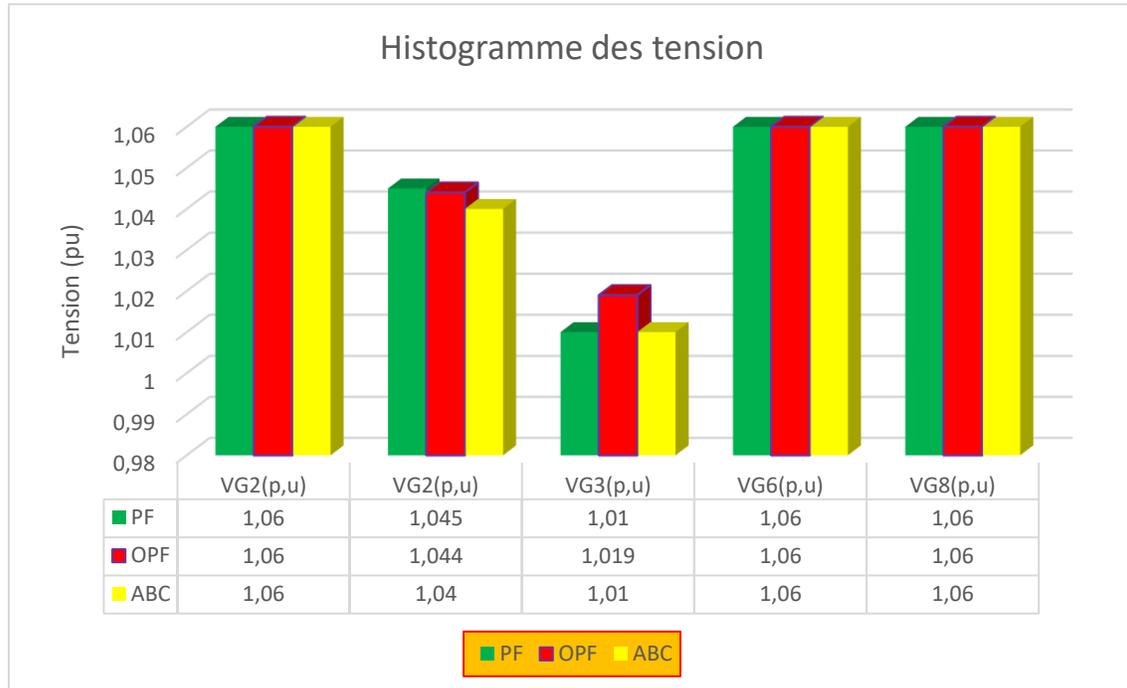


Figure 4.3: Les tensions générées dans les nœuds.

On constate d’après la figure ci-dessus que les tensions sont équilibrées. Ceci revient à la précision de l’algorithme proposé ainsi que les limites physiques du réseau électrique.

➤ Les pertes de puissance active :

$$P_{Loss} = \sum P_{Gi} - \sum P_{Di} \tag{4.3}$$

AN:

$$P_{Loss} = (194.39 + 36.5484 + 28.6588 + 0 + 8.6734) - 259 = 9.2706 \text{ MW}$$

On remarque que la puissance demander est fixe et la puissance perdue est très petite par rapport à la consommation du rapport qui est égale à 3.5%.

❖ Charge à point maximal:

Variables	Limites		ABC
	Inférieure	Supérieures	
PG2(MW)	0	140	35.7970
PG3(MW)	0	100	34.02221
PG6((MW)	0	100	0
PG8(MW)	0	100	16.6133
VG1 (p.u)	0.94	1.06	0.94
VG2 (p.u)	0.94	1.06	0.94
VG3 (p.u)	0.94	1.06	0.94
VG6 (p.u)	0.94	1.06	0.94
VG8 (p.u)	0.94	1.06	1.06
T1 (4-7)	0.9	1.1	1.1
T2 (4-9)	0.9	1.1	0.909
T3 (5-6)	0.9	1.1	0.9937
Valve point effect (\$/h)	-	-	8189.1

Tableau 4.2 : les valeurs obtenues à la charge maximale pour un réseau de 14JDB.

On note bien dans ce cas le coût de la production total de la production est un peu plus grand que le cout optimal, aussi là on note que le pourcentage d'augmentation égale à 98%,

L'indice d'augmentation égale à 1.01 de la puissance nominale

➤ **La figure du coût de la production :**

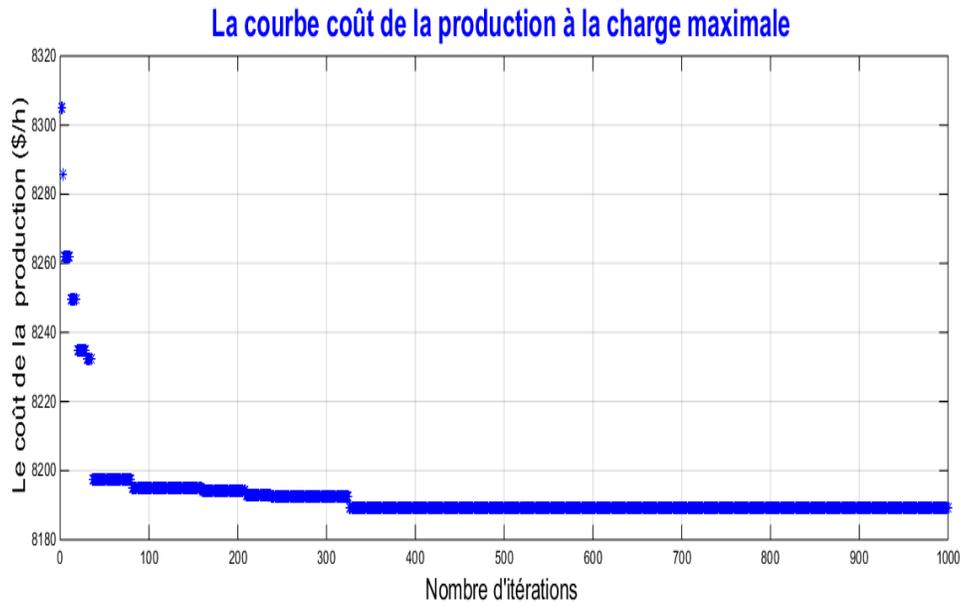


Figure 4.4 : La convergence de la courbe du coût de la production 14JDB à la charge maximale.

On note que le nombre d'itérations pour la convergence est 320 itérations

La courbe bien convergée vers un coût acceptable ce qui implique l'efficacité de l'algorithme

➤ **Les pertes de puissance active :**

$$P_{Loss} = \sum P_{Gi} - \sum P_{Di} \quad (4.4)$$

AN :

$$P_{Loss} = (194.39 + 35.7970 + 34.0220 + 0 + 16.6133) - 259 = 21.82 \text{ MW}$$

Quand la vanne est strictement ouverte alors on est dans le cas de la charge maximale (Valve point effect) alors les pertes sont assez grandes par rapport au cas de la charge normale qui est égale à 21.28MW, et le rapport de perturbation par rapport à la consommation égale à 8.2%.

4.5 Application2 : Optimisation par l’algorithme de colonie d’abeille 9-Bus

Ce réseau est composé de 03 générateurs de production (installés aux nœuds 1, 2, et 3), 12 lignes de transmission et 3 charges et 0 élément shunt.

Le schéma unifilaire de ce réseau test est présenté dans la figure 4.1.

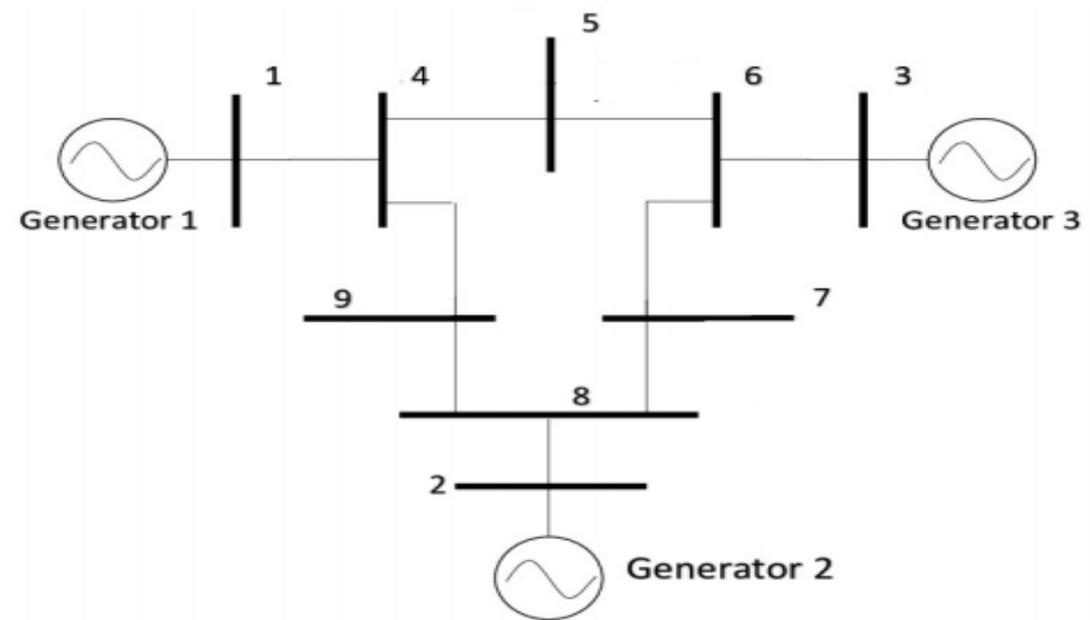


Figure 4.5 : le schéma unifilaire du réseau électrique IEEE 9-Bus

❖ La charge nominale

❖ Le tableau du coût de la production :

Variables	Inférieure	Supérieures	PF	OPF	ABC	Ecart1	Ecart2
PG2(MW)	0	140	163	134.32	135,85	0.1759	0.1666
PG3(MW)	0	100	85	94.19	92,60	0.1081	0.089
VG1 (p.u)	0.9	1.1	1	1.1	0,94	0.1	0.06
VG2 (p.u)	0.9	1.1	1	1.097	0.9	0.097	0.1
VG3 (p.u)	0.9	1.1	1	1.087	0.9	0.087	0.1
Cost (\$/h)	-	-	-	5296.69	5295.01	-	0.0003
Ecart1= (PF-ABC) /PF			Ecart2= (OPF-ABC) /OPF				

Tableau 4.3 : les valeurs optimales obtenues pour le réseau 9JDB et leurs écarts.

Pour cette essai le coût optimal obtenu est de 5295.01 \$/h qui est inférieur au cas de l'écoulement de puissance ordinaire, c'est-à-dire on a atteint notre objectif qui est la minimisation du coût de production.

Il est noté aussi que les contraintes de sécurités sont vérifiées, les tensions aux niveaux des jeux de barres sont dans leurs limites admissibles, les puissances transitées dans les lignes sont aussi respectées.

➤ **La figure du coût de la production :**

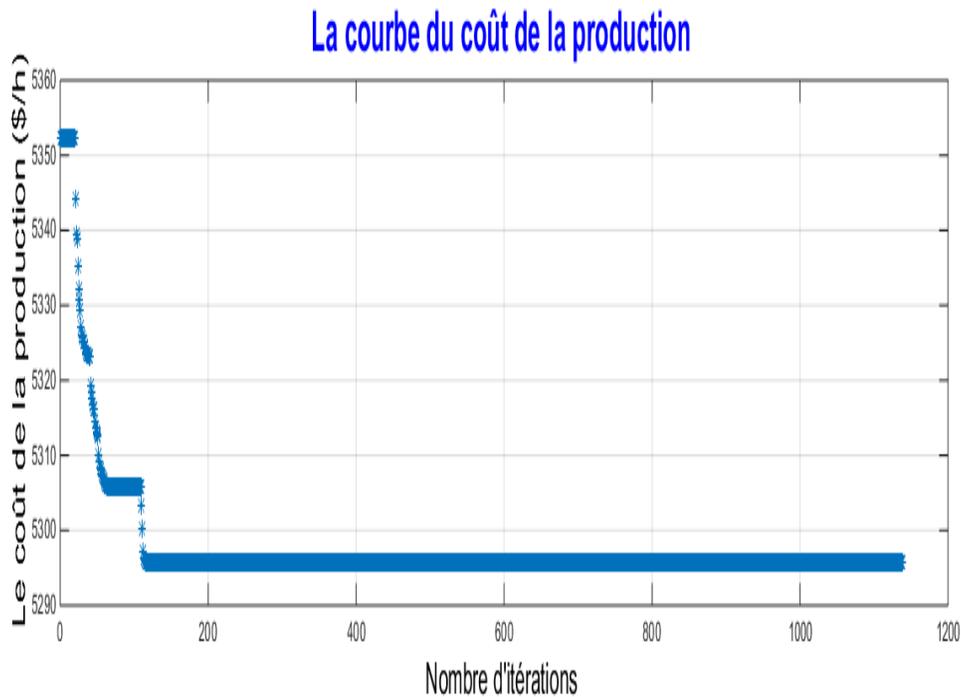


Figure 4.6 : La convergence de la courbe du coût de la production 9JDB à la charge nominale.

On a vu que le nombre d'itérations nécessaire pour la convergence de la courbe égale à 110 itérations.

➤ L’histogramme du coût de la production :

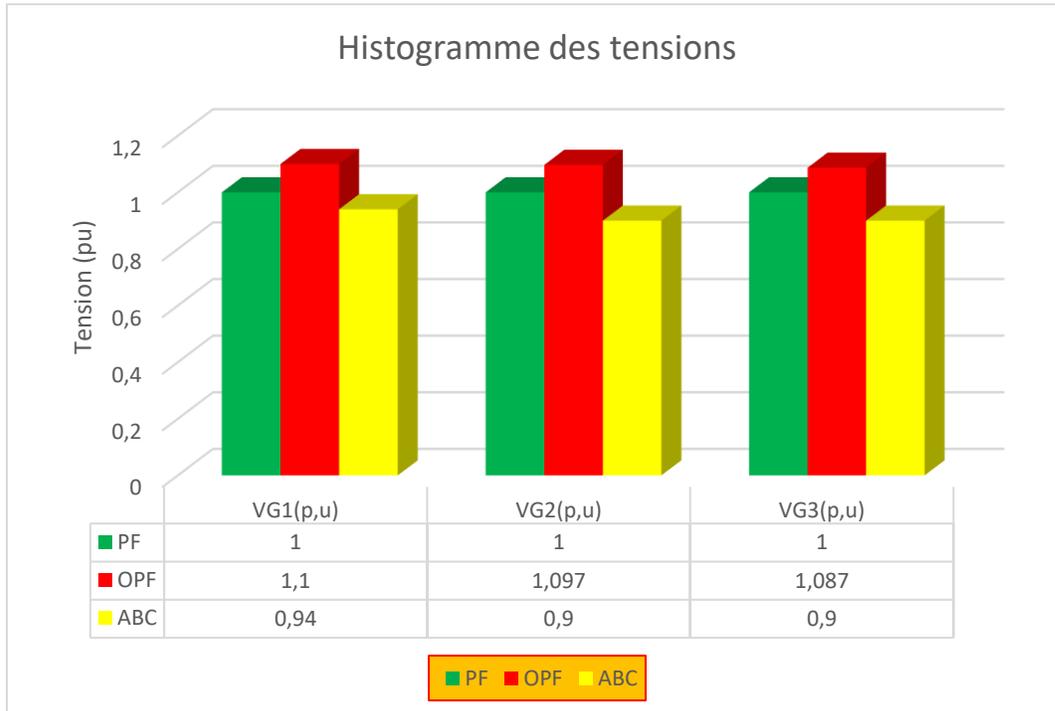


Figure 4.7 : Les tensions générées dans les nœuds.

On constate d’après la figure ci-dessus que les tensions sont équilibrées avec un décalage très petite.

➤ Les pertes de puissance active :

$$P_{Loss} = \sum P_{Gi} - \sum P_{Di}$$

AN:

$$P_{Loss} = (89.80 + 134.32 + 94.19) - (90 + 100 + 125) = 3.31 \text{ MW}$$

❖ Charge à point maximal:

Variables	Limites		ABC
	Inférieure	Supérieures	
PG2(MW)	10	300	153,4732
PG3(MW)	10	270	78,0782
VG1 (p.u)	0.94	1.06	1,004
VG2 (p.u)	0.94	1.06	1,002
VG3 (p.u)	0.94	1.06	1,002
Valve point effect (\$/h)	-	-	5381

Tableau 4.4 : les valeurs obtenues à la charge maximale pour un réseau de 9JDB.

On note bien que dans ce cas le coût de la production total est un peu plus grand que le cout optimal.

➤ **La figure du coût de la production :**

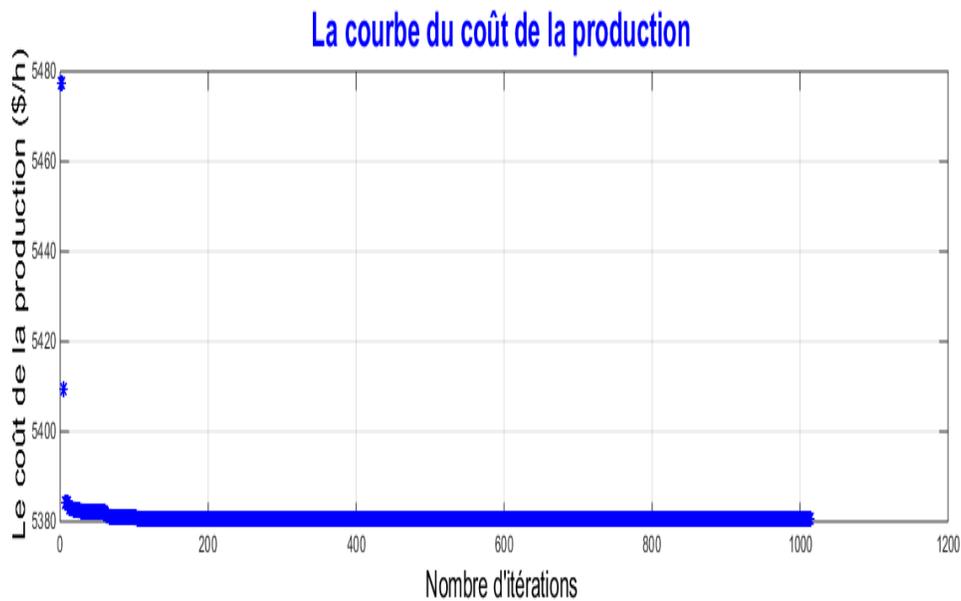


Figure 4.8 : La convergence de la courbe du coût de la production 9JDB à la charge maximale.

On note que le nombre d'itérations pour la convergence est 110 itérations

La courbe bien convergée vers un coût acceptable ce qui implique l'efficacité de l'algorithme

➤ **Les pertes de puissance active :**

$$P_{Loss} = \sum P_{Gi} - \sum P_{Di} \quad (4.5)$$

AN :

$$P_{Loss} = (89.80 + 129.6956 + 96.2885) - (90 + 100 + 125) = 0.7841 \text{ MW}$$

Lorsque la charge est maximale (Valve point effect) alors on est dans le cas de l'ouverture strictement de la vanne alors les pertes égale à 0.7841 MW.

4.6 Discussion

Les résultats montrent que la valeur de l'état optimal, et le vecteur solution pour les deux essais sont très proches donc les valeurs d'écart type faibles.

Les résultats obtenus par l'application de l'algorithme de colonie d'abeille nommée ABC nous permet de conclure que :

- 1- L'algorithme d'optimisation prouve sa qualité de convergence sur plusieurs tests effectués.
- 2- Une remarquable robustesse est vérifiée, en effet cet algorithme donne des résultats proches de la valeur optimale avec un nombre réduit d'exécution.
- 3- Le temps d'exécution de l'algorithme ABC est plus ou moins réduit en comparant avec les algorithmes classiques tel que newton raphson.

4.7 Conclusion

Dans ce dernier chapitre, on a testé la méthode de colonie d'abeilles artificielle sur le réseau IEEE 14 et 9 jeux de barres pour résoudre le problème de l'écoulement de puissance optimal.

Les résultats de simulation obtenus permettent d'espérer une application pratique de cette méthode métaheuristique pour le calcul de l'OPF avec plusieurs et différentes topologies des réseaux électriques.

Afin de tester l'efficacité de la méthode d'optimisation proposée dans le domaine de gestion optimale de l'énergie électrique, un cas critique qui est la surcharge, pour cela l'algorithme de colonie d'abeille est appliqué pour déterminer la répartition optimale des puissances générées afin de minimiser le cout total de production. Pour ce cas la seule contrainte de sécurité que nous avons considérée est la tension aux niveaux des jeux de barres.

Conclusion

Générale

Conclusion générale

Dans ce mémoire, une analyse de l'écoulement de puissance optimal OPF dans les réseaux électriques a été abordée en mettant en évidence, l'aspect technico-économique du fonctionnement des unités de production, les contraintes pratiques. Nous avons formulé le problème de dispatching économique en soulignant les difficultés rencontrées pour le résoudre avec les méthodes conventionnelles. Ce qui fait appel aux méthodes métaheuristiques qui sont aptes à traiter des fonctions objectifs complexes sous contraintes non-linéaires, contenant des variables discrètes et continues. Les méthodes d'intelligence artificielle ont été énoncées pour la description de leur importance dans les réseaux électriques modernes, où plusieurs préoccupations énergétiques doivent être étudiées. Une analyse des méthodes non conventionnelles pour la résolution du problème d'OPF.

Ces méthodes métaheuristiques ont prouvés leur flexibilité vis-à-vis de n'importe quel type de fonction objectif. Une des particularités importantes des méthodes métaheuristiques, réside dans l'absence d'hypothèses particulières sur la régularité de la fonction coût. 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 méthodes dans les systèmes d'énergie électriques. Les algorithmes métaheuristiques peuvent être appliqués à tout problème, du moment qu'il est formulé sous la forme de l'optimisation des critères. Ils progressent vers un optimum par échantillonnage d'une fonction objectif. Ils se prêtent aussi à toutes sortes d'extensions, notamment en optimisation multi-objectif.

La nécessité de garder la tension dans tous les jeux de barres du réseau proche de la valeur nominale pour une raison de sécurité, nous a motivé à exploiter les différents équipements du réseau pour un réglage optimal. Il s'agit donc d'une optimisation d'une fonction relative au profil de la tension en agissant sur les transformateurs à prises de réglage, les compensateurs installés aux différents postes et les différents régulateurs automatiques de tension disponibles au niveau des centrales électriques. Ces moyens de réglage sont relatifs à des variables discrètes où l'application des méthodes déterministes n'est pas évidente. En plus, la fonction du profil de la tension a une forme mathématique irrégulière en fonction des variables de contrôle, où réside l'importance de faire appel aux méthodes métaheuristiques.

Nous avons traité trois problèmes importants qui sont des préoccupations importantes pour les exploitants de réseaux électriques, c'est l'économie, la sécurité de l'environnement et la sécurité de réseaux. Ces trois préoccupations reflètent la nécessité de minimiser la fonction coût de génération de l'énergie électrique, la fonction émission des gaz et la fonction profile de

Conclusion générale

tension (exprimant la déviation du module de la tension par rapport à la tension nominale). Les variables de décision sont données par les paramètres de commande de tous les équipements disponibles dans le réseau électrique et influent d'une façon directe sur les fonctions objectives ; tels que les puissances actives générées, les tensions au niveau des jeux de barres PV et les transformateurs à prises de réglage.

En perspective on prévoit d'appliquer cette variante nommée ABC pour résoudre le problème d'optimisation de l'écoulement de puissance multi-objective en tenant en considération d'autres contraintes liées aux unités de production à savoir la fonction objectif multi fuels et les zones de fonctionnement prohibées et aussi en considérant l'intégration des systèmes FACTS afin de développer un algorithme d'optimisation généralisé pour la gestion optimale des réseaux électriques.

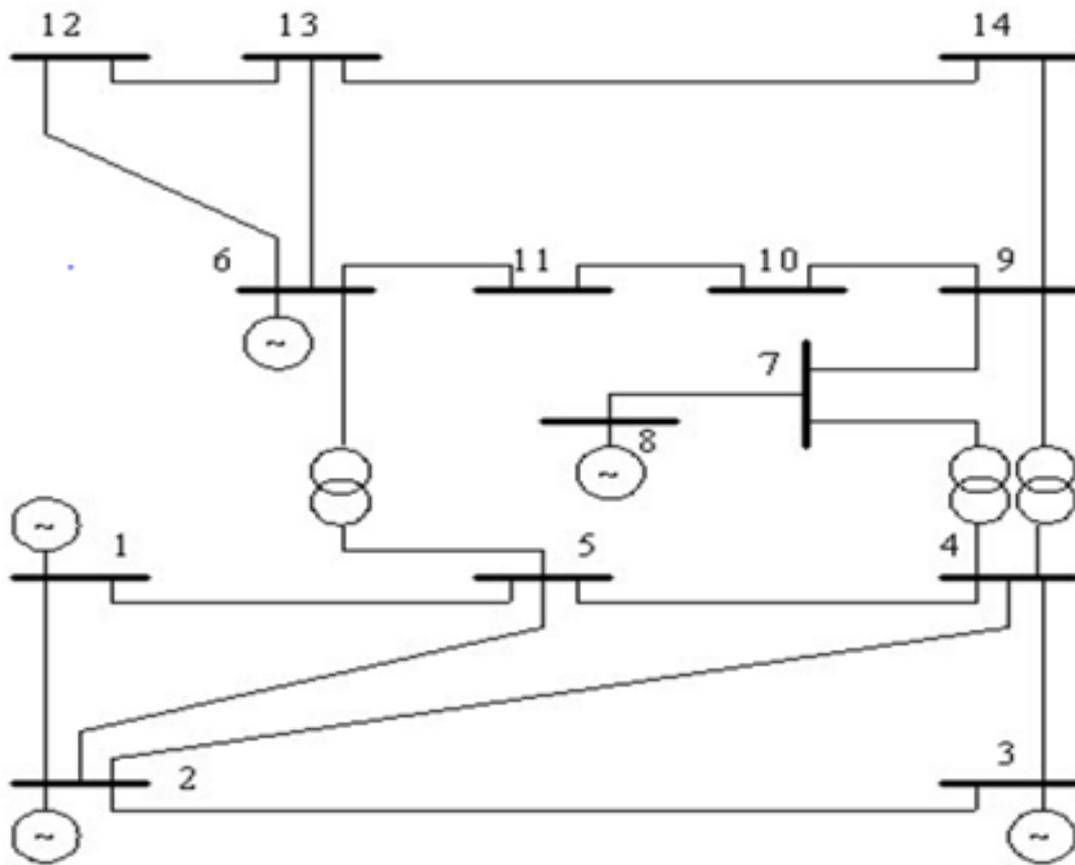


Figure : le schéma unifilaire du réseau électrique IEEE 14-Bus

Bus- i	Type	Pd	Qd	Gs	Bs	Area	Vm	Va	baseKV	Zon e	Vmax	vmin
1	3	0	0	0	0	1	1.06	0	0	1	1.06	0.94
2	2	21.7	12.7	0	0	1	1.045	-4.98	0	1	1.06	0.94
3	2	94.2	19	0	0	1	1.01	-12.72	0	1	1.06	0.94
4	1	47.8	-3.9	0	0	1	1.019	-10.33	0	1	1.06	0.94
5	1	7.6	1.6	0	0	1	1.02	-8.78	0	1	1.06	0.94
6	2	11.2	7.5	0	0	1	1.07	-14.22	0	1	1.06	0.94
7	1	0	0	0	0	1	1.062	-13.37	0	1	1.06	0.94
8	2	0	0	0	0	1	1.09	-13.36	0	1	1.06	0.94
9	1	29.5	16.6	0	19	1	1.056	-14.94	0	1	1.06	0.94
10	1	9	5.8	0	0	1	1.051	-15.01	0	1	1.06	0.94
11	1	3.5	1.8	0	0	1	1.057	-14.79	0	1	1.06	0.94
12	1	6.1	1.6	0	0	1	1.055	-15.07	0	1	1.06	0.94
13	1	13.5	5.8	0	0	1	1.05	-15.16	0	1	1.06	0.94
14	1	14.9	5	0	0	1	1.036	-16.04	0	1	1.06	0.94

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

Annexes

Bus	Pg	Qg	Qmax	Qmin	Vg	mBase	Status	Pmax	Pmin
1	232.4	-16.9	40	-20	1.06	100	1	332.4	0
2	40	42.4	50	-40	1.045	100	1	140	0
3	0	23.4	40	0	1.01	100	1	100	0
6	0	12.2	24	-6	1.07	100	1	100	0
8	0	17.4	24	-6	1.09	100	1	100	0

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

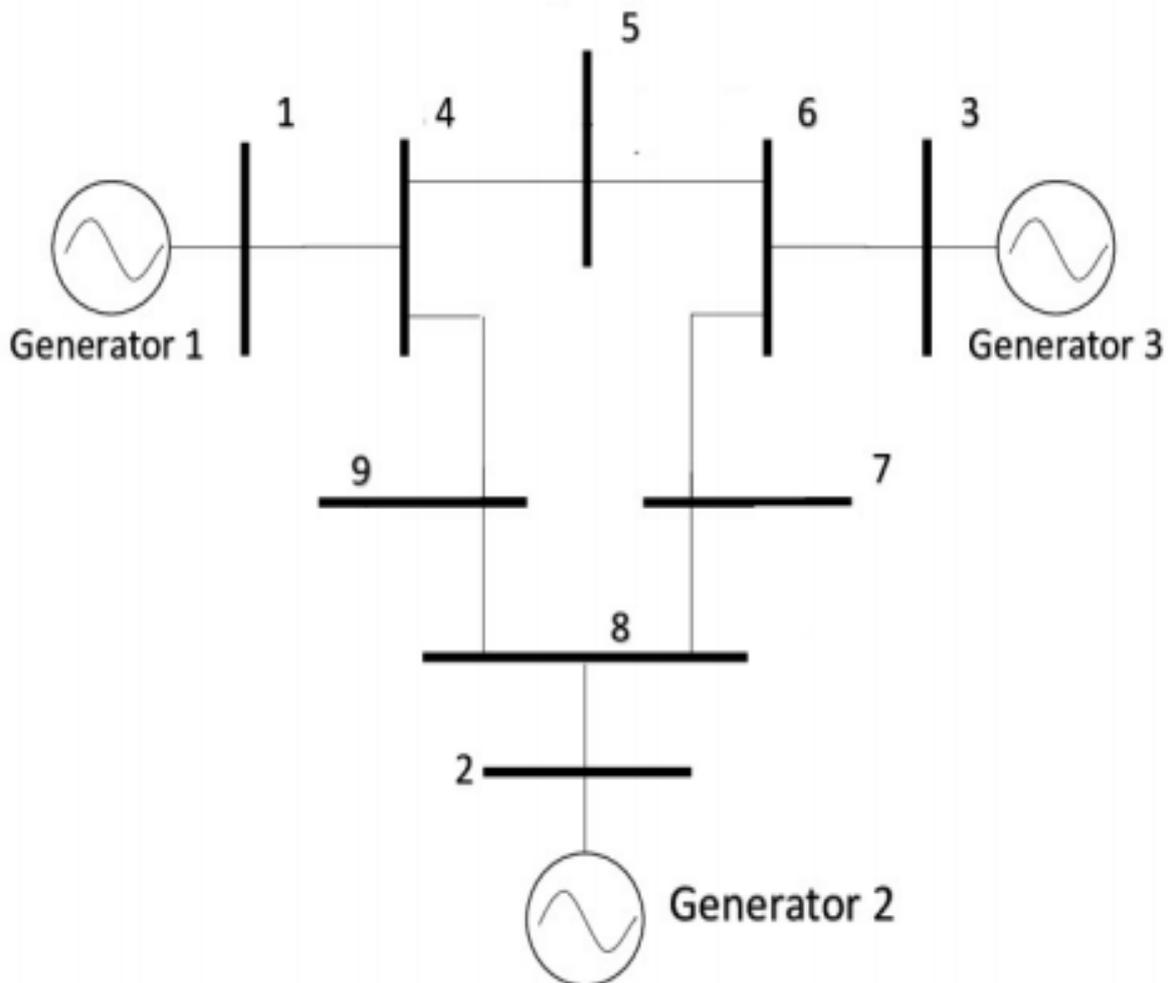


Figure : le schéma unifilaire du réseau électrique IEEE 9-Bus

Bus	Pg	Qg	Qmax	Qmin	Vg	mBase	Status	Pmax	Pmin
1	0	0	300	-300	1	100	1	250	10
2	163	0	300	-300	1	100	1	300	10
3	85	0	300	-300	1	100	1	270	10

Tableau : Données des générateurs du système test à 9 jeux de barres

Annexes

Bus-i	Type	Pd	Qd	Gs	Bs	Area	Vm	Va	BaseKv	Zone	Vmax	Vmin
1	3	0	0	0	0	1	1	0	345	1	1.1	0.9
2	2	0	0	0	0	1	1	0	345	1	1.1	0.9
3	2	0	0	0	0	1	1	0	345	1	1.1	0.9
4	1	0	0	0	0	1	1	0	345	1	1.1	0.9
5	1	90	30	0	0	1	1	0	345	1	1.1	0.9
6	1	0	0	0	0	1	1	0	345	1	1.1	0.9
7	1	100	35	0	0	1	1	0	345	1	1.1	0.9
8	1	0	0	0	0	1	1	0	345	1	1.1	0.9
9	1	125	50	0	0	1	1	0	345	1	1.1	0.9

Tableau : Données des jeux de barres du système test à 9 jeux de barres

Références bibliographiques

- [1] : **Arnaud VERGNOL**. « Intégration dans le réseau électrique et le marché de l'électricité de production décentralisée d'origine renouvelable (Gestion de congestion°) » Thèse Doctorat. 2010
- [2] : **Egor GLADKIKH**. « Optimisation de l'architecture des réseaux de distribution de l'énergie électrique » Thèse Doctorat. 2006
- [3] : **Narimen AOUZELLAG**. « Contribution à l'Amélioration de la Flexibilité dans les Réseaux Electriques liée à l'Intégration des Générateurs Eoliens » Thèse Doctorat. 2011
- [4] : **Sellé TOURÉT**. « Optimisation des réseaux « réseau actif et flexible » Thèse Doctorat.2014
- [5] **Yahiaoui Merzoug**, << Contrôle optimal des puissances réactives et des tensions dans un réseau d'énergie électrique par dispositifs FACTS >>, Thèse en vue de l'obtention du diplôme de doctorat Es-science-d 'Oran Mohamed Boudiaf, Algérie, avril2014
- [6] **Yahiaoui Merzoug**, << Contrôle optimal des puissances réactives et des tensions dans un réseau d'énergie électrique par dispositifs FACTS >>, Thèse en vue de l'obtention du diplôme de doctorat Es-science-d 'Oran Mohamed Boudiaf, Algérie, avril2014
- [7] **Mr Menad MOUZAIA, Mr Sofiane IDIRI**, << Etude de la variation de tension pour le raccordement d'une production décentralisée dans un réseau de distribution >>, Mémoire de Fin d'étude En vue de l'obtention du diplôme de Master en Electrotechnique, U-A. MIRABejaia, Algérie, juin2013
- [8] **N. Mancer**, << Contribution à l'optimisation de la puissance réactive en présence de dispositifs de compensation dynamique (FACTS) >>, mémoire de magister 2012, Université Mohamed Khider – Biskra.
- [9] Numerical methods for load flow calculation EEH power system laboratory.
- [10] **M.Tajayouti**, Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau électrique, Cours destinées au Doctorants Marocains des filières photovoltaïques, Université Mohammed V –Rabat, 2015
- [11] **G. Thomasset**, La conception des réseaux industriels en haute tension, CT 169, Groupe Schneider, édition octobre 1993, 24 p
- [12] **M. Zellagui**, Etude des protections des réseaux électriques mt (30 & 10 kV), mémoire de Magistère en électrotechnique, Université Mentouri Constantine, Algérie, 2010, 151 p.

Références bibliographiques

- [13] **Wael AMOR**, << Écoulement de puissance pour les réseaux de grande dimension et malconditionnés >>, Mémoire présenté à l'école de technologie supérieure comme exigence partielle à l'obtention de la maîtrise avec mémoire en génie électrique, école de technologie supérieure université du Québec, aout 2018.
- [14] **M. Eghbal, N. Yorino, Y. Zoka, E.E. El Araby**, << Application of multi objective Evolutionary optimization algorithms to reactive power planning problem >>, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Vol. 4, No. 5, August 2009, pp. 625 632.
- [15] **M. Rashidinejad, H. Farahmand, M. Fotuhi Firuzabad, A.A. Gharaveisi**, << ATC enhancement using TCSC via artificial intelligent techniques >>, Journal of Electric Power Systems Research, Vol. 78, No. 1, January 2008, PP. 11 20.
- [16] **Ahmed Ould Nagi**, << Optimisation de l'écoulement de puissance Par algorithmes : AG et PSO-TVAC >>, Mémoire de Fin d'Etudes En vue de l'obtention du diplôme : MASTER, U-Mohamed Khider Biskra, Algérie, Juin 2014.
- [17] **M.S. Osman, M.A. Abo Sinna, A.A. Mousa**, << A solution to the optimal power flow using genetic algorithm >>, International Journal of Applied Mathematics and Computation, Vol. 155, No. 2, August 2004, pp. 391 405.
- [18] **M.A. Abido**, << Optimal power flow using tabu search algorithm » International Journal of Electric Power Components and Systems >>, Vol. 30, No. 5, 2002, pp. 469 483.
- [19] **T.J. Overbye, C.L. Demarco**, << Voltage security enhancement using energy-based sensitivities >> IEEE Trans. On Power Systems, Vol. 6, No. 3, August 1991, pp. 1196 1202.
- [20] **W.D. Stevenson**, "Elements of Power System Analysis", 4th Ed., McGraw-Hill Book 1982.
- [21] **DelendiLouardi**, « Contrôle de l'écoulement de puissance active par système FACTS », Thèse de Magister, Université de Batna, Décembre 2009.
- [22] **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.
- [23] **K. Y. Lee, Y.M. Park, and J.L. Ortiz**, "A United Approach to Optimal Real and Reactive Power Dispatch," IEEE Trans on Power Systems, Vol. Pas-104, pp.1147-1153, May 1985.

Références bibliographiques

- [24] **N. Mezhoud, A. Boukadoum, S. Leulmi, F. Boukhenoufa**, << Conference Paper: September 2010, U- 20 Août 1955 – Skikda, Algérie, this page was uploaded by Nabil Mezhoudon 18 February 2016.
- [25] **M. Sasson**, "Non linear Programming Solutions for load flow, minimum loss, and economic dispatching problems", IEEE trans. vol. Pas-88, No. 4, pp. 399- 409, April 1969.
- [26] **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.
- [27] **B.M. Weedy**, "Electric Power Systems", 3rd Ed., John Wiley & Sons Ltd., London, 1979.
- [28] **Martin Hennebel**, «Valorisation des services système sur un réseau sport d'électricité en environnement concurrentiel», Thèse de doctorat, U-Paris Sud de tran 11, 2009.
- [29] **M. Sasson**, "Non linear Programming Solutions for load flow, minimum loss, and economic dispatching problems," IEEE trans., Vol. Pas-88, N.4, April 1969.
- [30] **S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, and M. P. Vecchi**. "Optimization by Simulated Annealing". Science, Vol. 220, 4598, pp. 671–680, 1983.
- [31] **V. Cerny**. "Thermodynamical Approach to the Travelling Salesman Problem : An Efficient Simulation Algorithm". Journal of Optimization Theory and Applications, Vol. 45, pp. 41–51, 1985.
- [32] **J. P. Courat, G. Raynaud, I. Mrad, and P. Siarry**. "Electronic component model minimization based on Log Simulated Annealing". pp. 790–795, 1994.
- [33] **R. Azencott**. Simulated Annealing: Parallelization Techniques. WileyInterscience, 1992.
- [34] **F. Glover**. "Future paths for integer programming and links to artificial intelligence". Computers and Operations Research, Vol. 13, pp. 533–549, 1986.
- [35] **Harbadji.w**, "optimisation de l'écoulement de puissance environnemental par la méthode de l'algorithme Génétique," Université de Sétif Mémoired' ingénieur, 2010.
- [36] **H. YAHYA**, Book "The Miracle of the honeybee", G. M. D. Cd., Ed. Okmeydani-Istanbul-Turkey, March 2007.
- [37] **harunyahya**. <http://jlpetitlaurent.free.fr/abeille/http://lerucherdulac.free.fr>.

Références bibliographiques

- [38] **Mezhoudi Houcem Edinne**, "Résolution du problème d'affectation de fréquence dynamique en utilisant un algorithme basé sur le comportement des abeilles," 2010.
- [39] **Mezhoudi Houcem Edinne**, "Résolution du problème d'affectation de fréquence dynamique en utilisant un algorithme basé sur le comportement des abeilles," 2010.
- [40] **H. YAHYA**, Book "The Miracle of the honeybee", G. M. D. Cd., Ed. Okmeydani-Istanbul-Turkey, March 2007.
- [41] **Mezhoudi Houcem Edinne**, "Résolution du problème d'affectation de fréquence dynamique en utilisant un algorithme basé sur le comportement des abeilles," 2010.
- [42] **Efr'en Mezura-Montes Mauricio Dami'an-Araoz and Omar Cetina-Dom'ingez**, "Smart Flight and Dynamic Tolerances in the Artificial Bee Colony for Constrained Optimization," Sep. 2010.
- [43] **Dervis Karaboga and Bahriye Basturk**, "Artificial Bee Colony (ABC) Optimization Algorithm for Solving Constrained Optimization Problems," Springer-Verlag Berlin Heidelberg , p. 789–798, 2007.
- [44] **S.Hemamalini and Sishaj P Simon**, "economic load dispatch with valve-point effect using artificial bee colony algorithm ," in xxxii national systems conference, 2008, pp. 525-530.