

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED– NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
DÉPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :
Énergies Renouvelables
Option : Énergies Renouvelables en Électrotechnique

Intitulé :

L'utilisation de l'algorithme d'optimisation essaim de particule (OEP) pour résoudre le problème de dispatching économique basé sur l'énergie renouvelable en Algérie, Une étude de cas : site de Naama

Présenté par :

- MEFTI Soria
- GHERIB Saliha

Soutenu le :07/07/2020 devant le Jury :

<i>Dr.BENMOHAMMED Fayçal</i>	<i>MCB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Président</i>
<i>Dr.HABCHI Yacine</i>	<i>MCB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Examineur</i>
<i>Dr.BADAoui Abd Alhamid</i>	<i>MCB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Encadreur</i>
<i>Dr.MEZIANE Mohammed Amine</i>	<i>MCB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Co-Encadreur</i>

Naama – Algérie - 2020

Remercîment

*Nous remercions avant tous le **Bon Dieu** qu'il nous a aidé pour réaliser ce modeste travail.*

Nous remercions notre encadreur Dr. Mezian Mohammed et Dr. Badaoui Abdelhamid pour les efforts et le temps qu'il nous a consacré, il nous a beaucoup aidés par ses conseils, son expérience et ses encouragements, nous lui sommes très reconnaissants

Notre reconnaissance va également à nos enseignants pour leur honorable tâche durant notre période d'études.

Merci, à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin pour accomplir ce travail.



*Je dédie ce modeste travail à ma mère et mon père
symboles d'affection et d'amour, qui ont sacrifié tout
leur temps pour mon bonheur et ma réussite qu'ils se
trouvent ici le témoignage de ma profonde
reconnaissance et ma très grande affection.*

A mon frère et ma sœur qui m'ont soutenue

Egalement à tous les membres de ma famille

Mes oncles et Mes tentes Mes cousins et cousines qui

Mon soutenues durent tout la période de mes études.

A tous mes amis et mes collègues et à tous ceux que J'aime.

Mefti Soria



À la plus belle créature que Dieu a créée sur terre,

À cette source de tendresse, de patience et de générosité,

*À ma mère **karima** !*

*À mon père **MOHAMED** et mes chers frères **ABDELWADOUD, ABOUDI** et **MONIB***

*À mon coup de cœur ma petite sœur **RIHEB**,*

*et un spécial dédicace : **Abdesselem Chellali***

À tout ma Famille qui a toujours étaient à mes cotés

*À mon encadreur **M.MEZIANE** qui m'a encouragée et aidé à la*

réalisation

De ce projet.

À tous les étudiants de la promotion 2019/2020

*Option : **Energie renouvelable***

A tous ceux qui, par un mot, m'ont donné la force de continuer ...

GHERIB ISSLAH

المخلص

في السنوات الأخيرة، أصبح دمج الطاقات المتجددة أكثر شيوعًا في شبكة الكهرباء؛ تساهم مصادر الطاقة هذه بشكل ملحوظ في إنتاج الطاقة الكهربائية في عدة نقاط. الهدف الرئيسي من هذا العمل هو تقديم تقنية لتحسين تكامل طاقة الرياح والطاقة الشمسية في الجزائر. دراسة حالة (موقع النعام). كما نعلم، فإن تنوع الطلب على الطاقة يتطلب توزيعًا اقتصاديًا في كل فترة زمنية تخضع لقيود المساواة وليس المساواة، في هذه الدراسة، سنرى تأثير تكامل الطاقات المتجددة (الريحية / الشمسية) بشأن مشكلة التوزيع الاقتصادي (DE) التي تم حلها باستخدام خوارزمية تحسين سرب الجسيمات (OEP). تعطي النتائج تحسنا جيدا في التكلفة الإجمالية للإنتاج وتوافر الطاقة.

الكلمات المفتاحية: الطاقة المتجددة، طاقة الرياح، الطاقة الشمسية، التوزيع الاقتصادي، تحسين سرب

الجسيمات

RÉSUMÉ

Ces dernières années, l'intégration des énergies renouvelables s'étend de plus en plus dans le réseau électrique; ces sources d'énergie contribuent remarquablement à la production d'énergie électrique en plusieurs points. L'objectif principal de ce travail est de présenter une technique permettant d'optimiser l'intégration d'une énergie éolienne et solaire en Algérie. Une étude de cas (site de Naama). Comme on le sait, la variation de la demande d'énergie nécessite une répartition économique à chaque période de temps qui est soumise à des contraintes d'égalité et non égalité, dans cette étude, nous verrons l'impact de l'intégration des énergies renouvelable (éolienne / solaire) sur le problème de Dispatching Economique (DE) résolu avec un algorithme d'Optimisation Essaims de Particules (OEP). Les résultats donnent une bonne amélioration du coût de production total et de la disponibilité de l'énergie.

Mots clés : Énergies Renouvelables; Énergie Éolienne ; Énergie Solaire; Dispatching Economique ; OEP

ABSTRACT

In recent years, the integration of renewable energies increasingly extends into the electricity grid; this energy source helps remarkably in the production of electrical energy in several points. The main objective of this work is to present a technique to optimize the integration of wind and solar energy in Algeria. A case study (Naama site). As known the power demand variation needs economic dispatch (ED) at each time period which is a subject to constraints such as equality and inequality, in this study, we will see the impact of the integration of renewable energies (wind / solar) on the problem of Economic Dispatch solved with a Swarm Algorithm Intelligent Optimization (PSO).

Key words: Renewable Energies; Wind Power; Solar Energy; Economic Dispatch; PSO

Table des matières

Remerciement	i
Dédicace	ii
Résumé.....	iv
Table de matière.....	v
Liste des figures.....	viii
Liste de tableaux	x
Liste des Symboles.....	xi
Liste des Abréviation.....	xii
Introduction générale.....	01
<u>Chapitre I : Généralité sur le réseau électrique</u>	
I.1 Introduction.....	04
I.2 Description du réseau électrique	04
I.2.1 Topologie des réseaux électriques.....	06
I.2.1.1 Production.....	06
I.2.1.2 Transport.....	06
I.2.1.3 Distribution.....	07
I.3 Généralité sur l'architecture des réseaux électrique.....	07
I.4 Modélisations des éléments de puissance d'un réseau électrique.....	08
I.4.1 Générateur de puissance.....	08
I.4.2 Lignes de transport.....	09
I.4.3 Transformateur de puissance	09
I.4.4 Les charges électriques.....	10
I.4.5 Élément shunt (condensateur ou réactance)	11
I.5 Classification des jeux de barres.....	12
I.5.1 Le jeu de barres de référence (SLACK BUS)	12
I.5.2 Jeu de barres générateur (ou à tension contrôlée).....	12
I.5.3 Jeu de barres de charge.....	12
I.6 Problème de l'écoulement de puissance.....	13
I.6.1 Formulation des équations d'écoulement de puissance.....	13
I.6.2 Méthodes de résolution de l'écoulement de puissance.....	16

I.7 conclusion.....	17
<u>Chapitre II : Dispatching économique</u>	
II.1 Introduction.....	18
II.2 Ecoulement de puissance optimale.....	18
II.3 Objectives d'écoulement de puissance optimal.....	18
II.4 Défis d'écoulement de puissance optimale.....	20
II.5 Formulation du problème de l'écoulement de puissance optimale.....	21
II.5.1 Fonction Objective.....	22
II.5.2 Contraintes D'égalité.....	22
II.5.3 Contraintes D'inégalité.....	22
II.6 Domain d'application de l'écoulement de puissance	23
II.6.1 Minimisation du cout de combustible.....	23
II.6.2 Minimisation des pertes.....	23
II.6.3 Amélioration du profil de tension.....	23
II.6.4 Amélioration de la stabilité de la tension.....	23
II.6.5 Maximisation de la puissance transmissible.....	24
II.7 Dispatching économique	24
II.7.1 La Fonction Coût Et Incrémentation Du Coût.....	24
II.7.1.1 La fonction coût.....	24
II.7.1.2 Incrémentation du coût.....	25
II.7.2 Formulation Mathématique	25
II.7.2.1 Dispatching Economique Sans Pertes.....	26
II.7.2.1 Dispatching Economique avec Pertes.....	27
II.8 Dispatching Economique dynamique	28
II.9 Conclusion	28
<u>Chapitre III : Technique d'optimisation essaim de particule (OEP)</u>	
III.1 Introduction.....	29
III.2 Définition de l'optimisation.....	29
III.3 Terminologie de l'optimisation.....	29
III.4 Classification des problèmes d'optimisation.....	30
III.4.1 L'optimisation mono-objective.....	30
III.4.2 L'optimisation multi-objective.....	31

III.5 Les méthodes d'optimisation.....	31
III.5.1 Les méthodes déterministes.....	31
III.5.2 Les méthodes de métaheuristiques.....	31
III.6 L'optimisation des essais de particules.....	33
III.6.1 L'origine et l'idée de base de l'OEP (Etat de l'art).....	33
III.6.2 Définition.....	34
III.6.3 Principe de l'Algorithme OEP.....	37
III.6.4 Formulation mathématique de l'OEP	38
III.6.5 Conception et Déroulement de l'algorithme.....	39
III.7 Développement d'un algorithme OEP pour la résolution du problème d'un dispatching économique.....	41
III.8 Conclusion.....	44
<u>Chapitre IV : Application numérique et résultats</u>	
IV.1 Introduction.....	46
IV.2 Les énergies renouvelables.....	47
IV.2.1 L'énergie éolienne.....	47
IV.2.2 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.....	48
IV.2.2.1 Avantage.....	48
IV.2.2.2 Inconvénients.....	48
IV.2.3 Energie solaire.....	49
IV.2.4 Avantages et inconvénients de l'énergie solaire PV.....	50
IV.2.4.1 Avantage.....	50
IV.2.4.2 Inconvénients.....	50
IV.3 Potentiel solaire et éolien en Algérie.....	50
IV.4 Spécification de site de Naama.....	52
IV.4.1 Présentation et emplacement du Naama.....	52
IV.4.2 Etude statistique du potentiel solaire et éolien dans la région de Naama.....	53
IV.4.2.1 Etude statistique du potentiel solaire dans la région de Naama.....	53
IV.4.2.2 Etude statistique du potentiel éolien dans la région de Naama.....	54
IV.5 Simulation, résultat et discussion	54
IV.5.1 Scénario 1 : Dispatching économique avec la micro-turbine à gaz et énergie solaire PV.....	55

IV.5.2 Scénario 2 : Dispatching économique avec la micro-turbine à gaz et énergie éolienne.....	57
IV.5.3 Scénario 3 : Dispatching économique avec la micro-turbine à gaz, énergie solaire PV et éolienne	59
IV.6 Conclusion.....	61
Conclusion Générale.....	62
Référence bibliographique	63
Annexe.....	72

Liste des figures

CHAPITRE I : GENERALITE SUR LES RESEAUX ELECTRIQUES

Figure I.1 : Réseau électrique simplifié.....	5
Figure I.2 : Architecture générale des réseaux d'énergie électrique.....	8
Figure I.3 : Modèle en π de ligne de transport.....	9
Figure I.4 : Modèle de transformateur de puissance.....	10
Figure I.5 : modèle d'une phase du compensateur statique.....	12
Figure I.6 : Algorithme de résolution du problème de la répartition des charges.....	16

CHAPITRE II : DISPATCHING ECONOMIQUE

Figure II.1 : Le coût de carburant en fonction de la puissance générée.....	24
Figure II.2 : La courbe de l'accroissement du coût de combustible.....	25
Figure II.3 : Caractéristique du coût d'un générateur thermique.....	26

CHAPITRE III : TECHNIQUE D'OPTIMISATION ESSAIM DE PARTICULE (OEP)

Figure III.1 : Groupe de : (a) oiseaux, (b) poissons.....	35
Figure III.2 : Déplacement d'une particule.....	36
Figure III.3 : Exemple de voisinage géographique.....	36
Figure III.4 : Deux cas de voisinage social.....	37
Figure III.5 : Organigramme général de la méthode d'OEP.....	40

CHAPITRE IV : APPLICATION NUMERIQUE ET RESULTATS

Figure IV.1 : Chaîne de conversion d'énergie éolienne.....	48
Figure IV.2 : Chaîne de conversion de photovoltaïque.....	49
Figure IV.3 : Atlas saisonnier de la vitesse moyenne du vent en Algérie.....	51
Figure IV.4 : Les radiations solaires de l'Algérie.....	52
Figure IV.5 : Carte de l'Algérie (localisation de la région étudiée).....	52

Figure IV.6 : Contribution de l'énergie solaire PV par rapport à la micro-turbine à gaz en toutes saisons.....	56
Figure IV.7 : Caractéristique de convergence de l'algorithme OEP.....	57
Figure IV.8:Contribution de l'énergie éolienne par rapport à la micro-turbine à gaz en toutes saisons.....	58
Figure IV.9 : Caractéristique de convergence de l'algorithme OEP.....	59
Figure IV.10 : Contribution de l'énergie solaire et éolienne par rapport à la micro-turbine à gaz en toute saison.....	60
Figure IV.11 : Caractéristique de convergence de l'algorithme OEP.....	61

Liste des tableaux

CHAPITRE I : GENERALITE SUR LES RESEAUX ELECTRIQUES

Tableau I.1 : classification des jeux de barres.....	13
--	----

CHAPITRE IV : APPLICATION NUMERIQUE ET RESULTATS

Tableau IV.1 : Le taux d'ensoleillement pour chaque région d'Algérie.....	51
Tableau IV.2 : Irradiation globale Wh/m2.....	53
Tableau IV.3 : Vitesse moyenne mensuelle et densité de puissance moyenne pour Naama (Ain sefra / Mecheria).....	54
Tableau IV.4 : Coefficients de coût et limites de production pour un réseau électrique autonome réel, site de Naama (ouest de l'Algérie).....	55
Tableau IV.5 : Capacités de production et coûts totale du système hybride micro-turbine à gaz et énergie solaire en utilisant l'OEP.....	56
Tableau IV.6: Capacités de production et coûts totale du système hybride micro-turbine à gaz et énergie éolienne en utilisant l'OEP.....	58
Tableau IV.7 : Capacités de production et coûts totale du système hybride micro-turbine à gaz, énergie solaire et éolien en utilisant OEP.....	59

Liste des symboles

Z	L'impédance série en (Ω)
Y	L'admittance shunt par phase en (en Siemens [S])
Y_{ij}	L'admittance shunt par phase en (en Siemens [S])
α_i, b_i, c_i	Coefficients de la courbe du coût quadratique du générateur i
P_{gi}	la puissance active générée par le générateur au nœud i
P_g	puissance active générée par la centrale
$\beta_{ji} \beta_{i0} \beta_{00}$	coefficients de pertes (constantes réelles)
P_0	puissances active
Q_0	puissances réactive
$f(x)$	Fonction objective
$g(x)$	Contraintes d'égalités
$h(x)$	Contraintes d'inégalités
x	Vecteur des variables d'état
u	Vecteur des variables de contrôle
W	constant coefficient d'inertie
c_1, c_2	constantes coefficients d'accélération
r_1, r_2	nombres aléatoires tirés uniformément
$X(t)$	solution candidate de particule
$pop(t)$	Ensemble de n particules
C_p	Le coefficient aérodynamique
V_w	la vitesse du vent
ρ	la densité de l'air
R_p	le rayon de la turbine
E_c	le rayonnement solaire
T_{jref}	la température de référence des panneaux
T_j	la température de jonction des cellules

Liste des abréviations

- OPE :** Optimisation particule essaim
- OPF :** Optimal Power Flow (Ecoulement de Puissance Optimal)
- DE :** Dispatching économique
- N-R :** Newton -Raphson
- G-S :** Gaus-Siedel

A decorative frame resembling a scroll, with a vertical strip on the left side and rounded corners. The text is centered within the main rectangular area of the scroll.

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

L'énergie électrique occupe une place très importante dans les branches de l'économie moderne et de la vie courante. La demande d'énergie électrique s'accroît de jour en jour, et ce à l'inverse des ressources d'énergie qui sont en continuelle diminution. La planification des systèmes électriques consiste à élaborer des scénarios d'évolution de la demande d'énergie électrique et à choisir l'infrastructure permettant d'y répondre à savoir, quels moyens de production, de transport, de distribution et d'exploitation doivent être mis en œuvre et quand ils doivent l'être. L'exploitation des systèmes électriques consiste à utiliser de la meilleure manière les installations existantes. Les principes qui doivent guider ces activités sont la sécurité de fonctionnement et l'économie. [1]

Le fonctionnement optimal et efficace des systèmes électriques représente donc l'une des priorités absolues pour les compagnies d'électricité qui dépensent des sommes d'argent colossales dans le combustible nécessaire à la production de l'énergie électrique.

Avec la demande croissante de l'énergie électrique et l'augmentation des prix du combustible, les compagnies d'électricité travaillent sans cesse pour garantir à leurs clients un approvisionnement continu et fiable en énergie électrique à des prix compétitifs. Afin d'atteindre cet objectif, les opérateurs du réseau ont besoin d'ajuster constamment les variables de commande du système électrique (à savoir, consignes de puissance des générateurs, prises des transformateurs, ...etc.)[2]. Cette tâche extrêmement difficile est exécutée par la fonction Dispatching Economique (souvent désignée par l'appellation anglaise, Economic Dispatch) au niveau des centres de conduites des réseaux électriques. Le dispatching économique (DE) est une forme abrégée de la répartition optimale des puissances produites par les générateurs afin de minimiser le coût de production total et satisfaire les contraintes d'égalité et d'inégalité [3]. La procédure DE utilise des méthodes basées sur la programmation mathématique afin de déterminer le réglage optimal des variables de contrôle du système et ce, en satisfaisant un ensemble d'exigences spécifiées de fonctionnement et de sécurité.

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

Il y a plusieurs méthodes d'optimisation, il existe deux grandes approches d'optimisation. L'une est dite déterministe, les algorithmes de recherche utilisent toujours le

même cheminement pour arriver à la solution. Et l'autre est métaheuristiques, pour des conditions initiales données, l'algorithme ne suivra pas le même cheminement pour aller vers la solution, et peut même proposer différentes solutions. C'est vers cette seconde approche, que va s'orienter notre travail, et plus particulièrement vers un type bien précis d'algorithme de recherche aléatoire appartenant aux algorithmes évolutionnaires, qui est appelée l'algorithme D'optimisation Essaim de Particule (OEP).

De plus, la demande en énergie renouvelable s'accroît de jour en jour. Les réserves de l'énergie fossile s'épuisent avec le temps. Ajouté à cela l'énergie nucléaire avec tout ce qu'elle comporte de menaçant de par ses déchets, ses accidents ainsi que leurs effets de pollution et de réchauffement de l'atmosphère reconnus par tous, font que la demande en énergie renouvelable est en nette croissance.

Il y a trois sources d'énergie renouvelable de nature très différentes et d'importances quantitatives extrêmement inégales : le soleil et tout ce qui en dérive, la géothermie naturelle et les marées [4].

L'Algérie de par sa situation géographique demeure un pays favorable au développement et à l'utilisation permanente et à grande échelle de cette énergie. Notre pays devra investir dans ce créneau afin de palier aux différentes ressources en voie d'épuisement (pétrole, gaz et charbon).

Le travail présenté dans cette mémoire passe en revue de manière approfondie l'hybridation de la turbine à gaz, l'énergie photovoltaïque et l'éolienne dans le site Naama-Algérie et prise en condition les paramètres géographiques et climatiques du site. Cette étude analysera l'impact de l'intégration des énergies renouvelables sur le problème de répartition économique qui sera résolu avec un algorithme d'optimisation essaim de particule OEP. Les résultats de simulation satisfaisants montrent que le cout est minimisé avec l'inclusion de ces sources d'énergie renouvelables en plus de l'efficacité de l'algorithme proposé et sont démontrées.

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

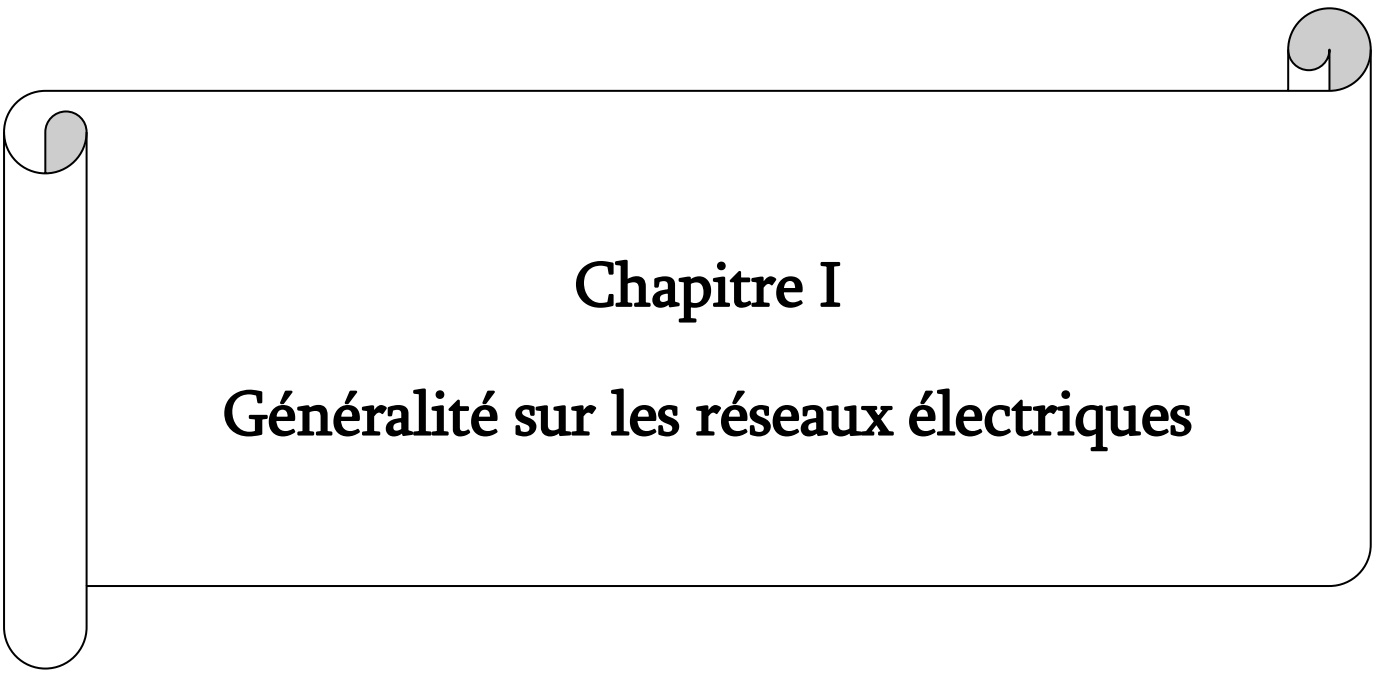
Le chapitre 1 présente une généralité sur les réseaux électriques leur comportement (production, transport, distribution, et consommation), et donne des définitions de base sur la notion de l'écoulement de puissance.

Le chapitre 2 aborde le problème du fonctionnement optimal des systèmes électro énergétiques. Ce chapitre traite en particulier le problème du dispatching économique.

Le chapitre 3 est consacré à donner des notions de base sur l'optimisation, suivi d'une discussion sur l'approche proposée OEP pour la solution du problème de DE.

Le chapitre 4 présente les résultats de simulations de la démarche proposée pour la solution du problème de DE.

En fin nous clôturons ce travail par une conclusion générale et perspective à la future.

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left and a horizontal strip at the top, both with rounded ends and a slight shadow effect.

Chapitre I

Généralité sur les réseaux électriques

I.1 Introduction

Aujourd'hui, l'électricité joue un rôle très important dans notre vie quotidienne et chaque pays considère cette énergie comme un moyen indispensable pour son développement social et économique. Chaque moindre problème d'origine électrique influe considérablement sur la continuité des activités économiques [5].

Ce chapitre donne une vision générale sur la topologie des réseaux électrique, qui est toujours en évolution comme la production d'énergie électrique en conventionnel et à la base des énergies renouvelables, dans le monde et en Algérie. Il s'intéresse aussi à la structure des réseaux de transport et distribution, la qualité du transport électrique et les problématiques rencontrées par les réseaux électriques tels que le déséquilibre entre la production et la consommation, surtout avec la forte croissance de la demande électrique durant ces dernières années.

Ce chapitre présente aussi les problèmes de l'écoulement de puissance, en décrivant les méthodes numériques utilisées pour l'étude de la répartition de charge dans un réseau électrique.

I.2 Description du réseau électrique

Un réseau électrique est un ensemble d'infrastructures permettant d'acheminer l'énergie électrique des centrales de production vers les consommateurs. Il est constitué de lignes électriques exploitées à différents niveaux de tension, connectées entre elles avec des postes électriques. Les postes électriques permettent de répartir et de faire passer l'électricité d'une tension à une 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 [6].

Les interconnexions internationales des réseaux électriques deviennent de plus en plus importantes dans le monde accompagné d'un intérêt grandissant pour la puissance électrique [7].

Actuellement, presque tout l'appareillage du réseau électrique produit et distribue le courant alternatif triphasé. Les transformateurs augmentent la tension produite par les alternateurs tout en diminuant le courant électrique, cela permet de réduire les pertes de puissance active par effet Joule.

L'augmentation de la consommation d'énergie électrique a engendré une forte demande sur le système de distribution, ou les préoccupations sont non seulement asservir plus de clients, mais fournir l'équipement qui exige plus d'attention aux variations de la tension et moins d'interruptions de service. [8]

Le système électrique peut être séparé en quatre fonctions principales (voir figure II.1) :

- La production
- Le transport
- La distribution

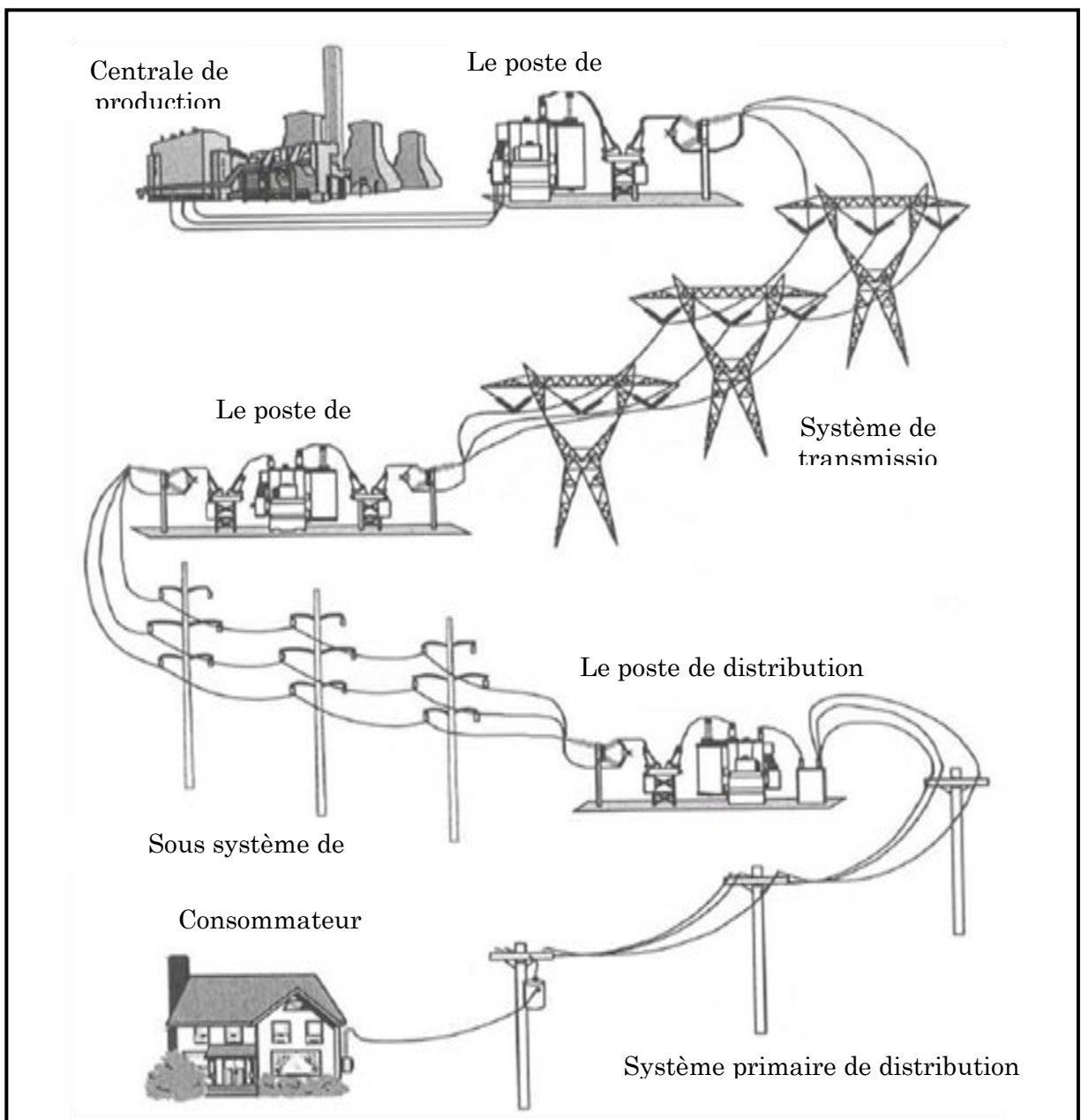


Figure I.1 : Réseau électrique simplifié [9]

I.2.1 Topologie des réseaux électriques

I.2.1.1 Production

Les grands groupes de production d'énergie électrique sont en général basés sur des alternateurs synchrones de grandes tailles entraînés par des turbines à vapeur, à gaz ou hydrauliques. Ils sont connectés sur le réseau de transport via un transformateur de groupe. L'ordre de grandeur de la puissance active produite par ces groupes est compris entre 100 MW pour les centrales thermiques de faibles puissances et 1650 MW pour les plus puissantes tranches des centrales nucléaires [10].

La production peut être classée suivant le type d'énergie primaire utilisée pour générer de l'électricité.

I.2.1.2 Transport

Il consiste à acheminer les puissances produites par les unités de production auprès des points de consommation. Donc le rôle principal du réseau de transport est la liaison entre les grands centres de consommation (gros consommateurs et distributeurs) et les moyens de production. Ce rôle est particulièrement important, car le stockage d'énergie électrique presque impossible. Les grandes centrales sont souvent près des cours d'eau et des océans, autour des fleuves. Sur le plan économique l'ordre de grandeur des distances impose entre autres le fait de véhiculer l'énergie électrique en courant alternatif sous très haute tension afin de minimiser les pertes au niveau des lignes de transmission contrairement à la production et la consommation qui se réalisent à des niveaux de tension plus faibles.

Les transformateurs sont alors nécessaires pour la mise à niveau de tension [11] [12]. Les réseaux de transport d'électricité sont composés de lignes (ou de couloirs de lignes) reliant les différents jeux de barres ou nœuds. D'une façon générale, ils ont une topologie maillée pour offrir une multiplicité de possibilité d'aller d'un nœud à un autre du réseau. Les réseaux de transport doivent être exploités dans les limites de fonctionnement autorisées.

Ces limites ou autrement dit les contraintes du réseau sont exprimées par des valeurs maximales ou minimales sur certaines variables du réseau (Flux de puissance sur les lignes ou transformateurs, niveau de tension, etc.). Dans le cas où ces limites sont dépassées à plusieurs reprises cela implique une dégradation des différents composants du système et le réseau risque de tomber dans un problème d'instabilité [13].

I.2.1.3 Distribution

Les réseaux de distribution acheminent l'énergie électrique du réseau de répartition (ou de transport) aux clients résidentiels et aux petits clients industriels. Les tensions des réseaux de distribution sont comprises entre 230V à 400V pour la basse tension et 4kV à 45 kV pour la moyenne tension. La structure des réseaux de distribution est exploitée en radial. Néanmoins, certains pays disposent de réseaux maillés et avec la possibilité d'une exploitation en boucle fermée [14].

Donc un réseau électrique doit satisfaire les exigences suivantes:

- Assurer au client la puissance dont il a besoin.
- Fournir une tension stable dont les variations n'excèdent pas 10% de la tension nominale.
- Fournir une fréquence stable.
- Fournir l'énergie avec prix acceptable.
- Maintenir des normes de sécurité rigoureuses.
- Veiller à la protection de l'environnement.

I.3 Généralité sur l'architecture des réseaux électriques

Le réseau de transport et d'interconnexion à très haute tension (400 kV, 225 kV) forme un ensemble maillé sur lequel sont raccordés les grandes centrales (>300 MW). Il est complété par un réseau de répartition à haute tension (60 kV à 150 kV) exploité soit en bouclé fermée, soit le plus souvent en boucle ouverte et sur lequel se raccordent des centrales électriques de moindre puissance, ainsi que les grands utilisateurs industriels (>100 MVA). On trouve ensuite un réseau de distribution (de 20 kV à 400 V) desservant la clientèle (petites et moyennes entreprises, commerces, secteurs résidentiels, ...etc.) à travers des postes de répartition. Ce réseau de distribution est généralement de structure radiale, éventuellement boucler dans les zones urbaines pour assurer la continuité de service. L'alimentation d'une grande agglomération se fait en général par une boucle à 380 kV ou 225 kV alimentée par le réseau d'interconnexion et sur laquelle sont raccordés des postes abaisseurs vers le réseau de répartition. Sur ce réseau de répartition sont branchés des postes abaisseurs (postes de répartition) vers le réseau de distribution (15 kV à 20 kV), qui est bouclé ou boucler et enfin le réseau basse tension de structure radiale alimentant les consommateurs (en triphasé ou en monophasé).

Un schéma simplifié de l'architecture générale du réseau électrique est illustré dans la figure (I.2).

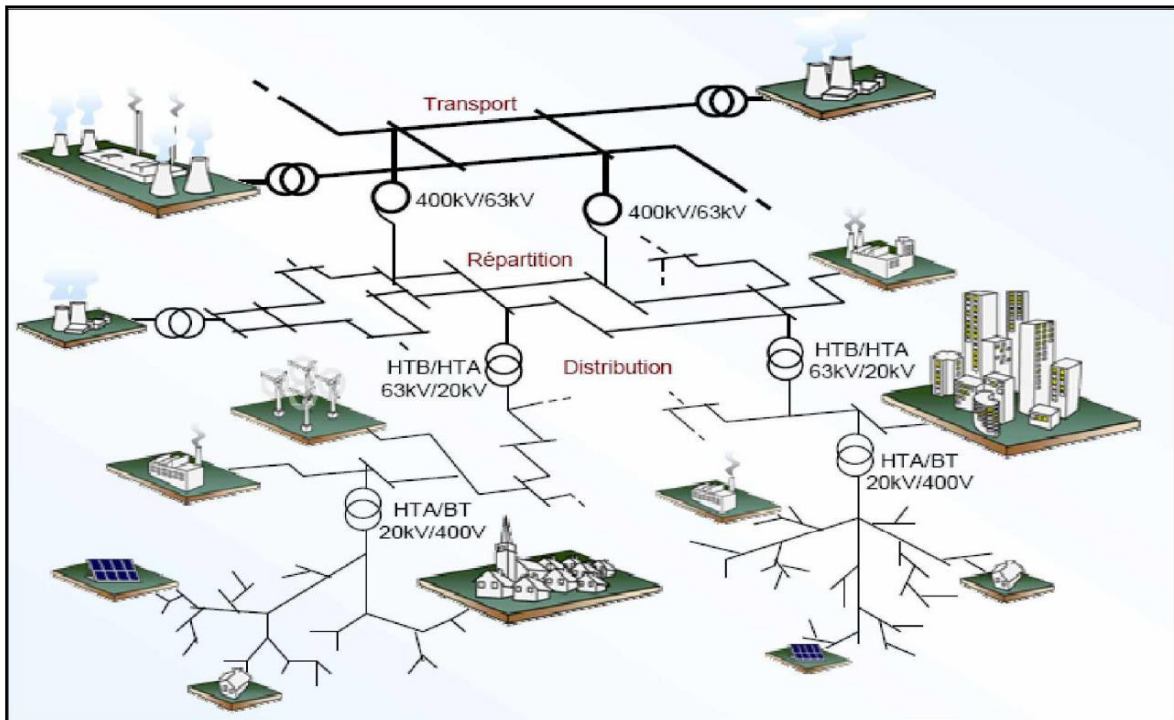


Figure I.2 : [Architecture générale des réseaux d'énergie électrique](#)

I.4 Modélisation des éléments de puissance d'un réseau électrique

Lorsqu'on veut calculer l'écoulement de puissance ou bien l'écoulement de puissance optimal dans un réseau électrique, il n'est pas nécessaire de modéliser tous les éléments qui constituent ce réseau, mais on ne modélise que les éléments qui interviennent réellement, tels que les générateurs de puissance, les charges électriques, les lignes de transport, les transformateurs de puissance et les compensateurs statiques.

Le modèle doit être suffisamment simple tout en traduisant principalement la réalité du comportement [15].

I.4.1 Générateur de puissance

Les générateurs sont modélisés comme des injecteurs de courant. Dans l'état stationnaire, un générateur est généralement contrôlé de sorte que la puissance injectée au jeu de barres et la tension aux bornes du générateur soit maintenue constantes.

La puissance active délivrée par le générateur est réglée à travers le contrôle de la turbine qui doit être dans les limites de capacité du système turbine-générateur. La tension est liée principalement à l'injection de la puissance réactive au jeu de barres de production [16].

I.4.2 Lignes de transport

Une ligne électrique entre les jeux de barres i et j sera donc représentée par le schéma équivalent en π , illustré dans la figure (I.3):

Les pertes longitudinales totales par effet joule dans l'ensemble des conducteurs de la ligne sont représentée par la résistance $R(\Omega)$;

L'énergie magnétique emmagasinée dans l'ensemble de conducteurs de la ligne est représentée par la réactance longitudinale total $X(\Omega)$;

La capacité totale de la ligne est répartie équitablement aux deux jeux de barres et les pertes transversales par effet couronne dans le cas des lignes de transport sont négligeables.

Dans la plupart des cas la valeur de G est si petite qu'on peut la négliger [17].

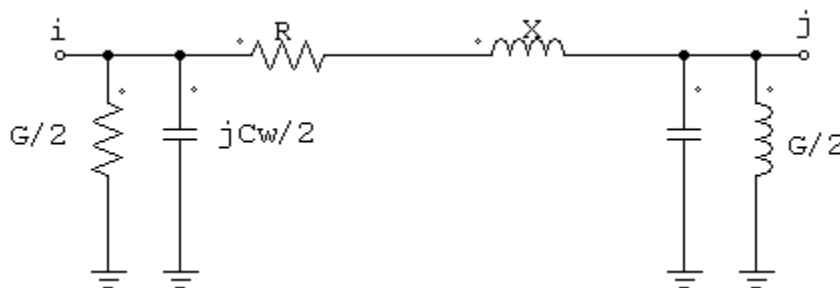


Figure I.3 : [Modèle en \$\pi\$ de ligne de transport](#)

I.4.3 Transformateur de puissance

Il ya deux types de transformateur à modéliser: le transformateur régulateur de tension à changeur de prises de charges et le transformateur déphaseur. Dans la modélisation des systèmes électriques, les rapports de déviations et les décalages de phase sont typiquement représentés comme des modifications à la matrice admittance.

La figure (I.4) présente le schéma unifilaire équivalent d'un transformateur triphasé symétrique à changeur de prises de charge et / déphaseur [15].

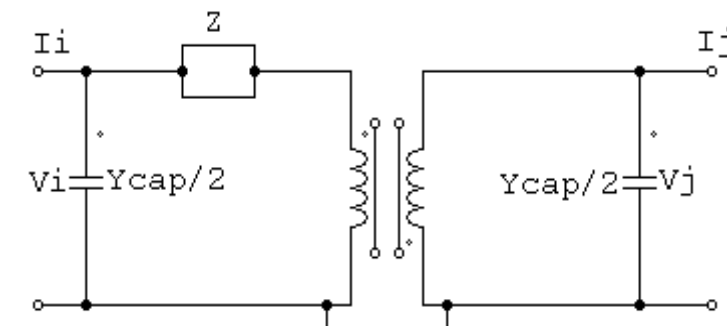


Figure I.4 : [Modèle de transformateur de puissance](#)

Z : représente les pertes par effet joule et les inductances de fuite de transformateur ramenées au secondaire.

La modélisation retenue suppose que les pertes sont séparées pour moitié au primaire et pour l'autre moitié au secondaire. Le paramètre t_{ij} symbolise la ration de régulateur de tension en charge.

Le paramètre α_{ij} symbolise le déphasage introduit par le transformateur entre les jeux de barres i et j . Il est important de noter que la matrice admittance du réseau électrique qui prend en considération ces variables va être donc ajustée à chaque itération.

Y : c'est la matrice admittance du transformateur qui s'écrit comme suit:

$$I = Y \times V \Rightarrow \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y + \frac{Y_{cap}}{2} & \frac{-e^{-j\alpha_{ij}}}{T_{ij}} Y \\ Y \frac{-e^{+j\alpha_{ij}}}{T_{ij}} & \frac{1}{T_{ij}^2} Y + \frac{Y_{cap}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (I.1)$$

I.4.4 Les charges électriques

La modélisation de la charge joue un rôle très important dans l'étude de l'écoulement de puissances. Ces charges sont souvent des sous-stations qui alimentent les réseaux de distribution, on les modélise statiquement comme des injecteurs négatifs de puissance dans les jeux de barres. La connexion de la charge au réseau est réalisée par l'intermédiaire d'un transformateur à prises de charge qui maintient le niveau de tension constant, cela signifie que les puissances active et réactive de la charge peuvent être représentées par des valeurs constantes.

Il existe aussi la modélisation dynamique des charges qui est relativement compliquée car la puissance consommée par la charge est en fonction de la tension et du temps, et elle est utilisée généralement pour l'étude et l'analyse de la stabilité transitoire [17]. Les équations des puissances active et réactive de la charge en fonction de la tension de jeu de barres peuvent s'écrire comme suit :

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{np} \quad (I.2)$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{nq} \quad (I.3)$$

Où P_0 et Q_0 : puissances active et réactive consommées à une tension de référence

$V_0 = 1 P_U ; n_P$ et n_q : constantes dépendant du type de la charge.

I.4.5 Elément shunts (condensateur ou réactance)

Les condensateurs statiques et les réactances sont très utilisés pour fournir ou absorber la puissance réactive qui permet, par son transit en un point du réseau, d'ajuster la tension de ce point [18]. Les moteurs synchrones peuvent également fournir de l'énergie réactive, mais leur fonction principale, la force motrice, n'est pas toujours compatible avec la demande instance de puissance réactive. Les compensateurs synchrones sont aujourd'hui délaissés malgré leurs mérites, parce qu'ils sont trop coûteux en investissement et en frais d'exploitation. Le cout d'investissement par Kvar des batteries de condensateurs est plus faible et leurs pertes sont seulement de quelques Watts par Kvar au lieu de 10 à 15 pour un compensateur synchrone [19]. Mais elles présentent certaines limitations :

- La puissance réactive fournie n'est pas réglable simplement ;
- La puissance réactive fournie varie avec la tension d'alimentation ;
- La mise sous tension provoque un violent appel de courant ;
- Si la fréquence de résonance avec l'inductance de la source et proche de celle d'un harmonique existant, cet harmonique est amplifié et peut devenir gênant ou dangereux

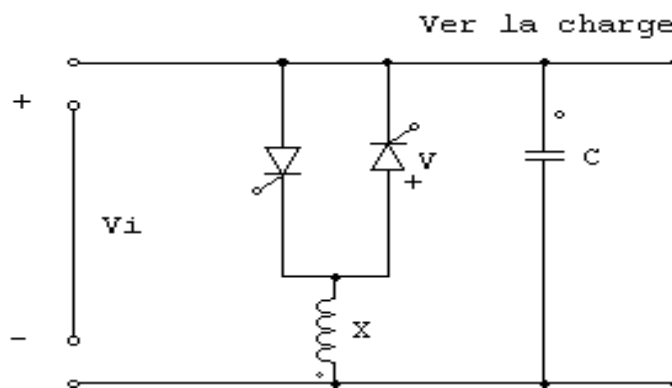


Figure I.5 : [modèle d'une phase du compensateur statique](#)

I.5 Classification des jeux de barres

Dans l'analyse de l'écoulement de puissance, les jeux de barres d'un réseau électrique sont classés en trois catégories :

I.5.1 Le jeu de barres de référence (SLACK BUS)

On l'appelle aussi le jeu de barres balancier ou swing bus, c'est un élément fictif créé pour l'étude de la répartition de la puissance, il a pour rôle de fournir la puissance supplémentaire nécessaire pour compenser les pertes de transmission, car celles-ci ne sont pas connues d'avance. D'une façon générale et par convention ce jeu de barres est identifié par le jeu de barres $N^0 = 1$ connecté à une source de tension d'où le module V et la phase (δ) de la tension sont connues, ces valeurs sont prises comme des références $V = 1 pu$ et $\delta = 0^0$.

Les puissances active (P) et réactive (Q) sont donc inconnues et doivent être calculées après avoir résolu le problème de l'écoulement de puissance [20] [21] [22].

I.5.2 Jeu de barres générateur (ou à tension contrôlée)

Ce sont les jeux de barres du système auxquels la puissance active et le module de tension sont spécifiés, la puissance réactive et l'angle de tension sont inconnus. Ils sont désignés par (PV bus) [23].

I.5.3 Jeu de barres de charge

Ce sont des jeux de barres où les puissances active et réactive sont spécifiées, le module et l'angle de la tension sont inconnus. Ils sont désignés par (PQ bus) [23].

En résumé cette classification des jeux de barres dans le tableau suivant

Tableau I.1 : classification des jeux de barres.

Jeux de barres	Variables connues	Variables inconnues (à calculé)
Jeu de barre de référence ($V\delta$)	Le module de tension et l'argument (V et δ)	La puissance active et réactive (P et Q)
Jeu de barre contrôlé (PV)	La puissance active et la module de tension (P et $ V $)	La puissance réactive et la module de tension (Q et δ)
Jeu de barre de charge (PQ)	La puissance active et réactive (P et Q)	Le module de tension et l'argument ($ V $ et δ)

I.6 Problème de l'écoulement de puissance

Le problème de l'écoulement de puissance consiste à calculer les tensions du réseau électrique pour des extrémités spécifiées et des conditions données aux jeux de barres. Il est énoncé par la spécification des charges en mégawatts et en méga vars qui doivent être alimentées à certains jeux de barres et par les puissances générées et les modules de tension aux restes des jeux de barres. Une description totale de la topologie du système en utilisant leurs impédances (admittances) est nécessaire. Les tensions calculées sont utilisées pour déterminer toutes les autres grandeurs telles que les courants dans les lignes de transport, les puissances et les pertes de puissances.

I.6.1 Formulation des équations d'écoulement de puissance

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

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

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \vdots \\ \bar{I}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{11} & \bar{Y}_{12} & \cdots & \bar{Y}_{1N} \\ \bar{Y}_{21} & \bar{Y}_{22} & \cdots & \bar{Y}_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{Y}_{N1} & \bar{Y}_{N2} & \cdots & \bar{Y}_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \\ \vdots \\ \bar{V}_N \end{bmatrix} \quad (\text{I.4})$$

Ou encor

$$I_{bus} = Y_{bus} V_{bus} \quad (\text{I.5})$$

Ou $I_{bus} = [\bar{I}_1 \dots \bar{I}_N]^T$ est le vecteur $N \times 1$ des courants complexes injectés à chaque jeu de barres, $V_{bus} = [\bar{V}_1 \dots \bar{V}_N]^T$ est le vecteur $N \times 1$ des tensions complexes de chaque jeu de barres et Y_{bus} est la matrice admittance nodale $N \times N$ du système.

La matrice admittance nodale est formée sur la base des composants du réseau électrique (lignes de transmission, transformateurs, batteries de condensateurs et réactances), représentés par leurs modèles discutés dans la section (I.5). Chaque composant du réseau peut être connecté entre deux jeux de barres i et m , ou entre un jeu de barres i et le jeu de barres de référence (jeu de barres 0). Les éléments de la matrice admittance peuvent être obtenus en fonction des admittances des composants du réseau, en appliquant les règles suivantes :

- ✓ \bar{Y}_{ii} l'élément diagonal ii , est égal à la somme des admittances de tous les composants connectés au jeu de barres i , soit :

$$\bar{Y}_{ii} = \sum_{\substack{m=0 \\ m \neq i}}^N \bar{y}_{im} \quad (I.6)$$

- ✓ \bar{Y}_{im} l'élément hors diagonale im , est égal à la somme négative des admittances de tous les composants connectés entre les jeux de barres i et m , c'est à dire :

$$\bar{Y}_{im} = - \sum_{m \neq i} \bar{y}_{im} \quad (I.7)$$

$$\bar{I}_i = \sum_{m=1}^N \bar{Y}_{im} \bar{V}_m, \quad i=1,2,\dots,N \quad (I.8)$$

Les grandeurs complexes \bar{V}_m et \bar{Y}_{im} sont représentées sous la forme polaire ou rectangulaire suivantes :

$$\bar{V}_m = V_m \cos \delta_m + j V_m \sin \delta_m = e_m + j f_m \quad (I.9)$$

$$\bar{Y}_{im} = Y_{im} \cos \theta_{im} + j Y_{im} \sin \theta_{im} = G_{im} + j B_{im} \quad (I.10)$$

Ou δ_m est la phase de la tension au jeu de barres m (mesurée par rapport à une certaine référence des phases), θ_{im} est la phase (ou l'argument) de l'élément im de la matrice admittance, e_m et f_m sont, respectivement, la partie réelle et la partie imaginaire de V_m , G_{im} et B_{im} sont, respectivement, la partie réelle (ou conductance) et la partie imaginaire de \bar{Y}_{im} .

L'expression de la puissance apparente \bar{S}_i injectée à un jeu de barres i s'obtient par :

$$\bar{S}_i = P_i + j Q_i = \bar{V}_i \bar{I}_i^* = \bar{V}_i \bar{I}_i^* = \bar{V}_i \sum_{m=1}^N \bar{Y}_{im}^* \bar{V}_m^* \quad i=1,2,\dots,N \quad (I.11)$$

En remplaçant (I.10) et (I.11) dans (I.12), on a :

$$P_i = \sum_{m=1}^N V_i V_m Y_{im} \cos(\delta_i - \delta_m - \theta_{im}), \quad i=1,2,\dots,N \quad (I.12)$$

$$Q_i = \sum_{m=1}^N V_i V_m Y_{im} \sin(\delta_i - \delta_m - \theta_{im}), \quad i=1,2,\dots,N \quad (I.13)$$

Cet ensemble de $2N$ équations non linéaires constitue la forme polaire des équations de l'écoulement de puissance. Pour un profil de tension et une topologie du réseau donnés, ces

équations donnent les injections de la puissance active P_i et la puissance réactive Q_i au niveau d'un jeu de barres i . Ces dernières sont décrites par les relations :

$$P_i = P_{Gi} - P_{Di}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (\text{I.14})$$

$$Q_i = Q_{Gi} - Q_{Di}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (\text{I.15})$$

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

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

$$P_{Gi} + P_{Di} + \sum_{m=1}^N V_i V_m Y_{im} \cos(\delta_i - \delta_m - \theta_{im}), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (\text{I.16})$$

$$P_{Gi} - P_{Di} + \sum_{m=1}^N V_i V_m Y_{im} \sin(\delta_i - \delta_m - \theta_{im}), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (\text{I.17})$$

I.6.2 Méthodes de résolution de l'écoulement de puissance

Les solutions de l'écoulement de puissance en fonction de la matrice d'impédance nodale ont été brièvement expérimentées [24], mais les problèmes de stockage informatique et la vitesse sont devenus des problèmes insurmontables à l'époque. Pour surmonter ces limitations, il existe un grand nombre de méthodes.

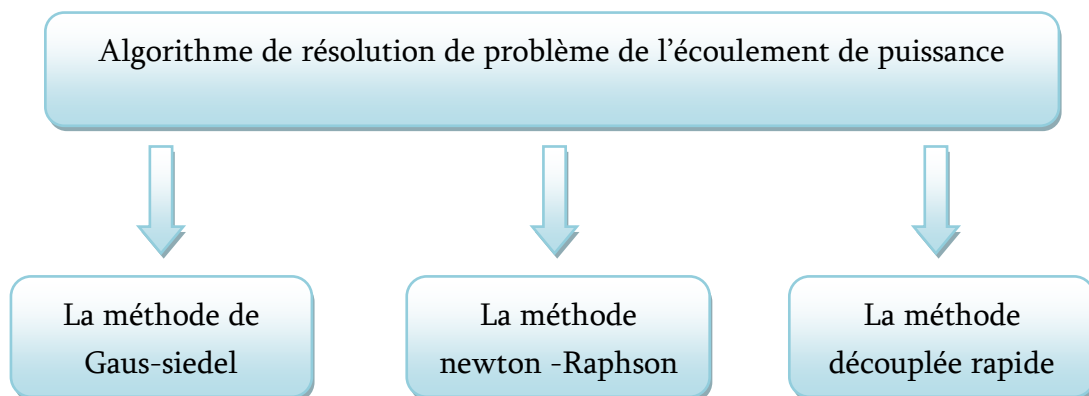


Figure I.6: Algorithme de résolution du problème de la répartition des charges.

La méthode de Newton-Raphson et ces formulations dérivées ont été développées au début des années 1970 et sont devenues fermement établies dans l'industrie des réseaux électriques [25] [26] [27] [28].

Du point de vue de modélisation mathématique, la solution de l'écoulement de puissance consiste à résoudre l'ensemble des équations algébriques non linéaires, qui décrivent le réseau électrique sous régime permanent stable. Au fil des ans, plusieurs approches ont été proposées pour la solution des équations l'écoulement de puissance. Les premières approches ont été basées sur les équations bouclées et les méthodes numériques de type Gauss. La méthode était laborieuse parce que les boucles de réseau devaient être précisées au préalable. L'amélioration de ces techniques ont vu l'introduction de l'analyse nodale en faveur de l'analyse de la boucle, ce qui conduit à une réduction considérable de la préparation des données. Néanmoins, la fiabilité de la convergence était encore la principale préoccupation. D'autres développements ont abouti à la mise en place de la méthode de Gauss-Seidel avec des facteurs d'accélération. L'appel de cette génération de méthodes d'écoulement de puissance est leurs exigences minimales de stockage et le fait qu'ils sont faciles à comprendre et à coder sous forme de programmes informatiques. L'inconvénient est que ces algorithmes présentent une mauvaise caractéristique de convergence lorsqu'elles sont appliquées à la solution des réseaux de taille réaliste [29] [30].

La méthode de Newton-Raphson: en raison de la convergence quadratique, cette méthode est mathématiquement supérieure à la méthode de Gauss-Seidel et plus efficace pour les grands systèmes d'alimentation avec une convergence robuste et un nombre réduit d'itérations [30]. La méthode découplée rapide s'agit d'une variante de l'algorithme de Newton-Raphson [31].

I.7 Conclusion

Dans la première partie, nous avons présenté d'une manière générale le principe de fonctionnement d'un réseau électrique, ainsi que la structure des différents sous systèmes, de la production jusqu'à la consommation finale. Une deuxième partie a été consacrée pour calculer la matrice admittance du réseau électrique et en prenant le cas d'un réseau à (n) accès indépendants. Le but de la dernière partie est l'étude de l'écoulement de puissance par la méthode de Newton-Raphson, qui nous permettra par son application, d'avoir des informations sur l'état du réseau à étudier pour des paramètres précis.



Chapitre II

Dispatching économique

II.1 Introduction

L'apparition de la crise d'énergie et les prix de plus en plus chers des combustibles ont donné au fonctionnement optimal des réseaux électriques une position importante dans l'industrie de l'électricité. Le problème qui se pose donc est, comment répartir la charge totale du système parmi les unités de générations disponibles de manière à minimiser le coût de production. 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 [32].

Dans ce chapitre, la formulation du problème de l'écoulement de puissance optimale, la définition du dispatching économique et la fonction coût seront présentées.

II.2 Ecoulement de puissance optimale

Le flux de puissance optimal aussi dénommé En anglais "Optimal Power Flow (OPF)" est un problème qui suscite un grand intérêt chez les chercheurs et les praticiens de l'industrie depuis son introduction par Dommel et Tinney en 1968 [33].

L'OPF est défini comme un outil mathématique utilisé pour trouver les paramètres optimaux du réseau électrique [34]. L'objectif principal du problème d'OPF est d'optimiser une fonction objective spécifique tout en satisfaisant les contraintes de faisabilité et de sécurité [35]. L'OPF a été largement utilisé dans des études précédentes [36], et a servi de problème test d'optimisation substantiel parce qu'il est caractérisé comme multidimensionnel, non linéaire non convexe à grande échelle, et fortement contraint [37] [38].

Plusieurs formulations d'OPF ont été développées au cours des dernières décennies afin d'optimiser le fonctionnement d'un système d'énergie électrique soumis à des contraintes physiques [39]. Le problème d'optimisation émergent utilise différents noms et différentes fonctions objectives [40]. De nombreuses approches de solutions d'OPF ont été développées, chacune avec des caractéristiques mathématiques et des exigences de calcul distinctes [41] [42]. Ces dernières années, les problèmes d'optimisation de l'OPF ont repris de l'importance en raison de l'adoption rapide de ressources énergétiques distribuées dans le réseau [43].

II.3 Objectives d'écoulement de puissance optimal

Les programmes commerciaux actuels d'OPF peuvent résoudre des problèmes d'optimisation des systèmes d'alimentation très grands et complexes en relativement peu de

temps. De nombreuses méthodes différentes de solution ont été suggérées pour résoudre les problèmes d'OPF.

Dans un écoulement de puissance conventionnel, les valeurs des variables de contrôle sont prédéterminées. Dans un OPF, les valeurs de certaines ou de toutes les variables de contrôle doivent être connues afin d'optimiser (minimiser ou maximiser) un objectif prédéfini. Le calcul OPF a de nombreuses applications dans les systèmes d'alimentation, le contrôle en temps réel, la planification opérationnelle et la planification. OPF est utilisé dans de nombreux systèmes de gestion de l'énergie modernes.

L'OPF reste important étant donné la croissance de la taille du système énergétique et la complexité de l'interdépendance. Par exemple, l'OPF devrait soutenir les transactions de déréglementation ou fournir des informations sur le renforcement requis. Les études OPF peuvent déterminer les compromis entre les renforts et les options de contrôle en fonction des résultats obtenus lors de la réalisation des études OPF. Il est clarifié lorsqu'une option de contrôle améliore l'utilisation d'un actif existant (par exemple, une production ou un transport), ou lorsqu'une option de contrôle constitue une alternative peu coûteuse à l'installation de nouvelles installations. OPF peut définir une priorité prioritaire pour l'accès à la diffusion et le prix du VAR ou des coûts supplémentaires supportant le coût des achats et des achats.

L'objectif principal d'un OPF générique est de réduire les coûts pour répondre à la demande de charge d'un système d'alimentation tout en préservant la sécurité du système. Du point de vue d'un OPF, le maintien de la sécurité du système nécessite de maintenir chaque périphérique du système d'alimentation dans la plage de fonctionnement souhaitée en régime établi. Cela inclut les sorties maximales et minimales pour les générateurs, les flux maximaux de MVA sur les lignes de transmission et les transformateurs, ainsi que le maintien de la tension du bus système dans les plages spécifiées.

L'objectif secondaire d'un OPF est la détermination des données de coût marginal du système. Ces données de coût marginal peuvent aider à la tarification des transactions en MW ainsi qu'à la tarification des services auxiliaires tels que le support de tension via le support MVAR. L'OPF est capable de réaliser toutes les fonctions de contrôle nécessaires au système d'alimentation. Alors que le dispatching économique d'un système d'alimentation commande la sortie de MW du générateur, l'OPF contrôle également les rapports de prises et les angles de déphasage des transformateurs. L'OPF est également capable de surveiller les problèmes de

sécurité du système, notamment les surcharges de ligne et les problèmes de basse ou haute tension. En cas de problème de sécurité, l'OPF modifiera ses contrôles pour les résoudre, c'est-à-dire supprimera une surcharge de la ligne de transmission.

La qualité de la solution dépend de la précision du modèle utilisé. Il est essentiel de définir correctement le problème avec des objectifs clairement définis. Aucun service public à double alimentation ne possède le même type de périphériques et les mêmes exigences opérationnelles. Le formulaire type présenté ici permet au développement d'OPF d'adapter facilement sa solution aux différents cas à l'étude.

OPF dépend dans une large mesure de la méthode d'optimisation statique pour minimiser une fonction d'optimisation scalaire (par exemple, le coût). Il a été introduit pour la première fois dans les années 1960 par Tinney et Dommel [44]. Il utilise un algorithme de gradient du premier ordre pour minimiser les fonctions objectives soumises à des contraintes d'égalité et d'inégalité. Les méthodes de solution n'étaient pas populaires car elles nécessitent beaucoup de calcul que le flux d'énergie traditionnel. La nouvelle génération d'OPF a été supérieure, car l'exploitation ou la planification de systèmes électriques doivent connaître la limite, le coût de l'énergie, l'incitation à ajouter des unités et la construction de systèmes de transmission d'une charge particulière.

II.4 Défis d'écoulement de puissance optimal

La demande pour un outil OPF a augmenté pour évaluer l'état et les mesures de contrôle recommandées pour les études hors ligne et en ligne, puisque le premier document OPF a été présenté dans 60 ans. Les efforts déployés par OPF pour résoudre les problèmes de l'industrie déréglementée d'aujourd'hui et le problème non résolu dans l'industrie à intégration verticale lui ont posé de nouveaux problèmes pour évaluer les capacités de l'OPF existante en termes de potentiel et de capacités. Il reste de nombreux défis à relever avant qu'OPF ne soit résolu. Ils peuvent être énumérés comme indiqué ci-dessous.

- ✓ En raison de la prise en compte d'un grand nombre de contraintes et du non linéarité des modèles mathématiques, OPF représente un défi de taille pour les mathématiciens ainsi que pour les ingénieurs dans l'obtention de solutions optimales.
- ✓ Le marché de l'électricité déréglementé demande à OPF de répondre à différents types de participants au marché, aux exigences du modèle de données, au traitement en temps réel et à la sélection du coût de revient approprié pour chaque évaluation de service dégroupé.

- ✓ Répondre aux exigences de temps de réponse, modélisation des externalités (flux de boucle, transferts environnementaux et simultanés), fonctionnalité et sensibilité pour une utilisation en ligne.
- ✓ Dans quelle mesure l'avenir de l'OPF fournira-t-il des mesures de contrôle locales ou globales pour supporter l'impact d'éventualités critiques menaçant la stabilité du système et la stabilité de l'angle, simulées.
- ✓ Future OF doit prendre en compte toute la gamme d'opérations et d'environnements de planification en fournissant des installations de nouvelle génération, des services de transmission non groupés et d'autres allocations de ressources.

Enfin, il doit être simple à utiliser, portable et suffisamment rapide.

II.5 Formulation du problème de l'écoulement de puissance optimale

La formulation du problème de l'OPF concerne le réglage optimal des variables de contrôle pour l'étude des performances en régime permanent du système électrique par rapport à une fonction objective prédéfinie, sous réserve de diverses contraintes d'égalité et d'inégalité [45] [46]. Mathématiquement, le problème de l'OPF peut être représenté comme suit [47].

$$\text{Min } f(x, u) \quad (\text{II.1})$$

Selon :

$$\begin{aligned} g(x, u) &= 0 \\ h(x, u) &\leq 0 \end{aligned} \quad (\text{II.2})$$

$$\begin{aligned} x_{\min} &\leq x \leq x_{\max} \\ u_{\min} &\leq u \leq u_{\max} \end{aligned} \quad (\text{II.3})$$

Tels que

$f(x)$: Fonction objective ;

$g(x)$: Contraintes d'égalités;

$h(x)$: Contraintes d'inégalités;

x : Vecteur des variables d'état ;

u : Vecteur des variables de contrôle.

II.5.1 Fonction Objective

La fonction objective (c'est-à-dire la minimisation du coût total du combustible pour la production active d'électricité). On suppose que le coût individuel de chaque centrale de production dépende uniquement de la génération de la puissance active [48].

$$F = \sum_{i=1}^{ng} f_i = \sum_{i=1}^{ng} C_i = \sum_{i=1}^{ng} \alpha_i + \beta_i P_{gi} + \gamma P_{gi}^2 \quad (\text{II.4})$$

Où p_{gi} est la puissance active générée par le générateur au nœud i , ng est le nombre de générateurs, α_i , β_i , γ_i sont les coefficients de coût du combustible.

II.5.2 Contraintes D'égalité

Les contraintes d'égalité de l'OPF reflètent à des lois physiques gouvernant le système électrique. Elles sont représentées par les équations non-linéaires de l'écoulement de puissance qui exigent que la somme de l'injection nette des puissances actives et réactives dans chaque jeu de barres soit nulle [49] [50].

$$\Delta p_i = 0 = v_i \sum_{k=1}^N [v_k [G_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k) + B_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k)]] - P_{gi} + P_{Di} \quad (\text{II.5})$$

$$\Delta Q_i = 0 = v_i \sum [v_k [G_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k) - B_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k)]] - Q_{gi} + Q_{Di} \quad (\text{II.6})$$

II.5.3 Contraintes D'inégalité

Les contraintes d'inégalités habituelles peuvent inclure les limites sur les dispositifs physiques dans le système électrique tels que, les générateurs, les transformateurs à prises de charge, et les transformateurs déphaseurs, ainsi que les limites créées pour assurer la sécurité de système, en plus d'autres contraintes d'inégalités comme les limites des puissances réactives de compensations. Les limites sur les générateurs concernent les limites des puissances actives et réactives qui doivent être maintenues dans les limites admissibles [51]:

$$\begin{aligned} P_{gi \min} &\leq P_{gi} \leq P_{gi \max} \\ Q_{gi \min} &\leq Q_{gi} \leq Q_{gi \max} \end{aligned} \quad (\text{II.7})$$

Les deux types de transformateurs forment les contraintes d'inégalité suivantes:

$$\begin{aligned} T_{ij \min} &\leq T_{ij} \leq T_{ij \max} \\ \alpha_{ij \min} &\leq \alpha_{ij} \leq \alpha_{ij \max} \end{aligned} \quad (\text{II.8})$$

Les limites sur le transit de puissance apparente au niveau des lignes de transport et des transformateurs de puissance sont créées pour assurer la sécurité de système contre les pertes thermiques dans les conducteurs, et/ou la stabilité du réseau :

$$|s_{ik}|^2 \leq |s_{ik \max}|^2 \quad (\text{II.9})$$

II.6 Domaines 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 [52]:

II.6.1 Minimisation du cout 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 étant de trouver les puissances optimales à générer par les centrales de façon à minimiser le coût total du combustible [53] [54].

II.6.2 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 sont les objectifs les plus couramment utilisés [55].

II.6.3 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 jeux de barres de charge [56].

II.6.4 Amélioration de la stabilité de la 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 [57]. 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 [58].

II.6.5 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 [59].

II.7 Dispatching économique

Le dispatching économique est la génération, la répartition et l'exploitation à coût minimal de l'énergie électrique dans un réseau de puissance électrique, nous pouvons encore dire que c'est un problème d'optimisation qui est basé essentiellement sur la répartition la plus économique de la puissance active produite par les groupes de génération existant dans un réseau électrique [60]. En satisfaisant toute la demande et en tenant compte des contraintes types égalité et inégalité des groupes [61].

II.7.1 La fonction coût et incrémentation du coût

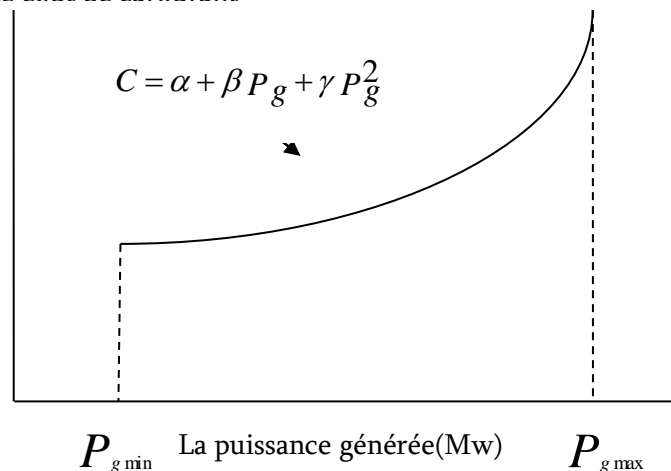
II.7.1.1 La fonction coût

Le coût de production d'une centrale est généralement modélisé par une fonction polynomiale du second degré en P_g (puissance active générée par la centrale) dont les coefficients sont des constantes propres à chaque centrale [62] [63].

$$C = \sum_{i=1}^{ng} C_i(p_{gi}) = \sum_{i=1}^{ng} (\alpha_i + \beta P_{gi} + \gamma P_{gi}^2) \text{ [$/h]} \quad (\text{II.10})$$

Où α_i β_i γ_i sont des coefficients constants propres au générateur i . La relation entre le coût de production et la puissance de sortie est appelée « courbe de coût »

Le coût de carburant



Figure(II.1): Le coût de carburant en fonction de la puissance générée.

II.7.1.2 Incrémentation du coût

La dérivée partielle dc_i/dp_{gi} avec $(i=1,2,\dots,n)$ de la fonction de cout s'appelle l'incrémentation du coût du générateur i . Elle représente la tangente de la courbe qui lie le coût et la puissance générée comme elle est montrée sur la (Figure II.2). Son unité s'exprime en (\$/KWh), pour les grands générateurs l'unité est (\$/MWh) [63] [64].

$$\frac{dc_i}{dP} = \beta + 2\gamma P_{gi} \quad (\text{II.11})$$

Du coût combustible

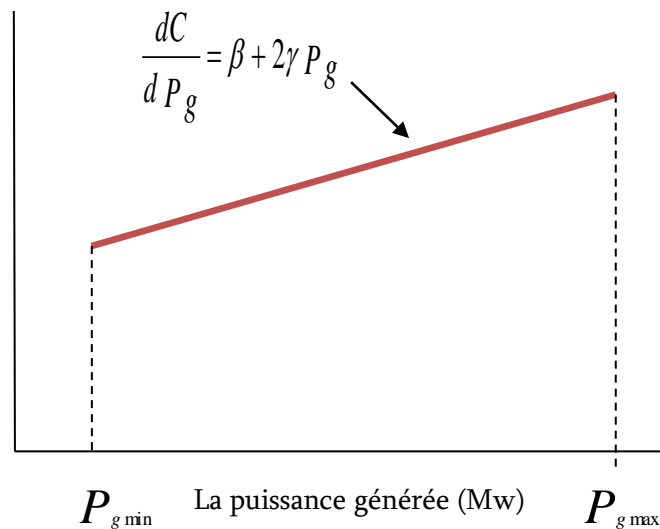


Figure II.2: [La courbe de l'accroissement du coût de combustible.](#)

II.7.2 Formulation Mathématique

Les générateurs à combustibles distincts possèdent différents coûts pour fournir le même montant d'énergie électrique. C'est important de se rendre compte que le générateur le plus efficace du système ne peut pas produire de l'électricité au plus bas coût et qu'un générateur bon marché ne peut pas être le plus rentable [65]. Puisqu'un générateur qui se trouve trop loin du centre de la charge donne des pertes de transmission énormes, et donc le rend peu économique de fonctionner [66].

Le problème est de réduire au minimum le coût de la puissance totale générée par l'ensemble des centrales interconnectées. Ce problème devient plus simple lorsque les limites des puissances de chaque générateur et les pertes dans le réseau sont négligées. Il est décrit comme suit [65] :

$$F = \sum_{i=1}^{n_g} f_i = \sum_{i=1}^{n_g} (\alpha_i + \beta_i P_{Gi} + \gamma_i P_{Gi}^2) \quad (\text{II.12})$$

Où les coefficients α_i , β_i et γ_i sont numériquement connus et $\gamma_i > 0$.

II.7.2.1 Dispatching Economique Sans Pertes

a) Fonction objective :

Le problème d'optimisation est la minimisation de la somme de ces coûts individuels:

$$C = \sum_{i=1}^{n_g} C_i = \sum_{i=1}^{n_g} (\alpha_{i0} + \alpha_{i1} P_{gi} + \alpha_{i2} P_{gi}^2) \quad (\text{II.13})$$

b) Contrainte d'égalité :

Selon une seule contrainte d'égalité qui est « la somme de toutes les puissances générées égale à la charge p_D ». La puissance demandée p_D peut être considérée numériquement donnée.

$$\sum_{i=1}^{n_g} P_{gi} = p_D \quad (\text{II.14})$$

c) Contrainte d'inégalité :

En pratique, la puissance générée P_{gi} est limitée par une borne inférieure $P_{gi \min}$ et une borne supérieure $P_{gi \max}$

$$P_{gi \min} \leq P_{gi} \leq P_{gi \max} \quad ; i = 1, \dots, n_g \quad (\text{II.15})$$

Coût de production \$/h

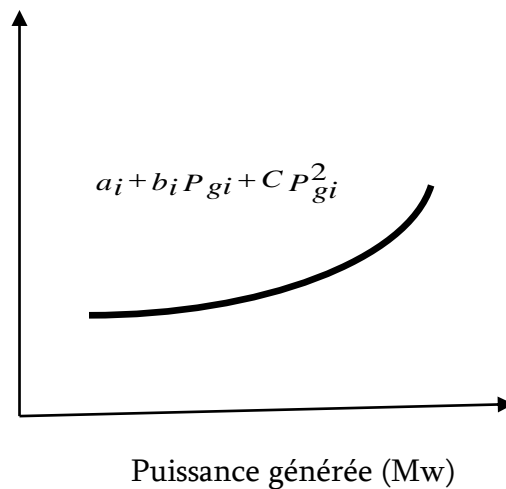


Figure II.3: Caractéristique du coût d'un générateur thermique

La figure (II.3) montre cette fonction quadratique, dont l'axe y est l'énergie à l'entrée de la chaudière (en MBtu/h ou \$/h) et l'axe x est la puissance à la sortie du générateur (en MW). Cela est fait en variant la puissance du générateur P_{gi} entre P_{gimin} et P_{gimax} et le Mbtu/h correspondant à chaque puissance P_{gi} de sortie est enregistré. Ensuite ces points sont ajustés, dans une courbe, à une équation quadratique.

II.7.2.2 Dispatching Economique Avec Pertes

Deux approches sont essentiellement utilisées pour la solution de dispatching économique avec pertes, la première est le développement d'une expression mathématique des pertes en fonction des puissances de sortie de chaque unité de production (comme celle de beta coefficient). La deuxième approche consiste à utiliser les équations de l'écoulement de puissances optimal (optimal power flow) [67].

a) Considération des pertes constant

Dans ce cas, la valeur de pertes se rassembler avec la puissance demandée totale et le problème sera étudié comme le cas sans pertes [68].

b) Pertes variables

Nous devenons à développer une expression mathématique des pertes de puissances actives, en fonction des puissances actives des générateurs [68].

c) Calcule les pertes

Il existe deux approches générales pour calculer les pertes [64]:

- On calcule les pertes de transmission par les méthodes de calcul de l'écoulement de puissance N-R ou G-S.
- La méthode de «formule des pertes» est basée sur l'approximation des pertes totales de puissance active par une fonction directe des puissances actives des générateurs (P_{gi}), donnée par l'équation suivante.

$$P_i = \sum_{i=1}^{ng} \sum_{j=1}^{ng} B_{ij} P_{gi} P_{gj} + \sum_{i=1}^{ng} B_{i0} P_{gi} + B_{00} \quad (II.16)$$

Ou :

P_{gi} : Puissance active du générateur i .

B_{ji} B_{i0} et B_{00} coefficients de pertes (constantes réelles) [69].

Les coefficients de pertes sont des constantes réelles spécifiques au réseau étudié, et sont Calculés en fonction de la matrice impédance du réseau, des puissances actives et réac demandées et des tensions. Dans la littérature, Il existe beaucoup de formules pour le calcul des coefficients de pertes.

II.7.3 Dispatching Economique Dynamique

Le dispatching économique dynamique consiste à trouver la meilleure configuration des puissances produites à chaque variation de charge dans un intervalle du temps (heure) pour la minimisation du cout de production avec satisfaction des contraintes d'égalités et d'inégalités [70].

II.8 Conclusion

Dans ce chapitre, on a donné un aperçu général sur le problème de l'écoulement de puissance optimal (OPF). Essentiellement, la formulation mathématique du problème de l'OPF est présentée, suivi par le problème du dispatching économique. L'objectif des problèmes de répartition économique de la production d'énergie électrique est de planifier la production des unités de production pour répondre à la demande de charge requise tout en satisfaisant les contraintes d'égalité et d'inégalité du système.

Dans le prochain chapitre nous allons présenter l'algorithme d'optimisation par essaim du particulaire pour résoudre le problème de dispatching.

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left and rounded corners on the right. The text is centered within this scroll.

Chapitre III

Technique d'optimisation essaim de particule (OEP)

III.1 Introduction

La résolution des problèmes d'optimisation est utilisée dans un grand nombre de domaines [71] [72]. A l'origine, ce sont les militaires qui se sont intéressés à ces questions au cours de la seconde guerre mondiale. C'était en fait un nouveau domaine de recherche en mathématiques appliquées qui a vu le jour avec la recherche opérationnelle. Le développement de l'informatique a ouvert de nouveaux horizons à la résolution de ces problèmes, et a permis un élargissement massif des champs d'application de ces techniques [73].

Les algorithmes d'optimisation par essaim de particules ont prouvé leur efficacité dans la résolution des problèmes d'optimisation complexes. En fait, ils permettent une recherche globale et efficace de la solution optimale en présentant plusieurs caractéristiques intéressantes y compris l'adaptation, l'efficacité et la simplicité d'implémentation. De plus, l'algorithme d'optimisation par essaim particulaire (OEP) est l'algorithme principal dans la classe des algorithmes basés sur l'intelligence d'essaim.

Ce chapitre commence par donner un aperçu général sur l'optimisation, suivi une présentation de la méthode d'essaim de particules. À la fin du chapitre, formulation de l'algorithme OEP pour la résolution du problème de Dispatching Economique.

III.2 Définition de l'optimisation

L'optimisation consiste à trouver la plus petite valeur (pour les problèmes de minimisation) ou la plus grande valeur (pour les problèmes de maximisation) [74]. C'est un domaine provenant des mathématiques mais son utilisation a été étendue à l'informatique, notamment en recherche opérationnelle.

L'optimisation se définit également comme la sélection de la meilleure solution, appelée optimum, parmi un ensemble de solutions admissibles, appelé espace de recherche [75].

III.3 Terminologie de l'optimisation

Tout d'abord, nous définirons les concepts communs à n'importe quelle méthode d'optimisation [76] :

- ✓ **Fonction d'objectif** : équation mathématique qui représente ce qu'on désire améliorer dans un dispositif. Elle est aussi appelée critère d'optimisation, fonction coût, fonction d'adaptation, ou encours performance.
- ✓ **Paramètres** : Correspondent aux variables de la fonction objective. Ils sont ajustés pendant le processus d'optimisation, pour obtenir le(s) solution(s) optimale(s). On les

appelle aussi variables d'optimisation, variables de conception ou de projet (design variables);

- ✓ **Espace de recherche :** domaine (délimité ou pas) défini par l'ensemble des combinaisons des valeurs des paramètres. Il correspond à l'espace des solutions. La dimension de l'espace de recherche est définie par le nombre de paramètres impliqués dans les solutions (par exemple, si chaque solution est définie par trois paramètres, l'espace de recherche est tridimensionnel). On l'appelle aussi espace des paramètres.
- ✓ **Espace des objectifs :** ensemble image de l'espace de recherche, déterminé par toutes les valeurs possibles des fonctions objectif
- ✓ **Contraintes :** spécifications du problème qui limitent les espaces des paramètres (contraintes constructives, etc.) et qui interdisent une certaine bande de valeurs dans les objectifs (par exemple, des projets peuvent imposer que, au-dessous d'une valeur déterminée, la solution ne soit pas considérée)
- ✓ **Domaine réalisable :** région de l'espace (des paramètres ou des objectifs) dans laquelle les contraintes sont respectées. On l'appelle aussi espace admissible
- ✓ **Domaine non-réalisable :** région de l'espace où les contraintes sont violées. Les mécanismes pour l'exploration de l'espace de recherche, spécifiques à chaque méthodologie d'optimisation, sont conditionnés par des paramètres de contrôle (nombre d'itérations, direction de recherche, vérification de convergence, etc.) et par des conditions initiales (valeurs initiales des paramètres, limites des domaines, etc.).

III.4 Classification des problèmes d'optimisation

III.4.1 L'optimisation mono-objective

Un problème d'optimisation en général est défini par un espace de recherche S et une fonction d'objectif f . Le but est de trouver la solution s^* dans S de meilleure qualité $f(s^*)$. Suivant le problème posé, on cherche soit le minimum soit le maximum de la fonction f .

Un problème d'optimisation mono-objectif est présenté sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \min \text{ ou } \max f(x) \\ g(x) = 0 \text{ et } h(x) \leq 0 \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

Tel que $f(x)$ est la fonction d'objective à optimiser. Et $g(x)$, $h(x)$ représentent respectivement les contraintes d'égalité et d'inégalité [77].

III.4.2 L'optimisation multi-objective

Dans un problème d'optimisation multi objectif, il y a plus qu'une fonction objective ($k \geq 2$), chaque fonction objective pouvant avoir une solution optimale différente. Le but d'un problème multi objectif est de trouver de "bons compromis" plutôt qu'une seule solution. Lorsqu'il y a plusieurs objectifs, la notion d'optimum change et il est préférable d'utiliser un autre terme, le terme le plus couramment adopté étant l'optimum de Pareto [77].

III.5 Les méthodes d'optimisation

III.5.1 Les méthodes déterministes

Les méthodes déterministes se caractérisent par une exploration de l'espace de recherche. Il existe de nombreuses méthodes d'optimisation déterministes. Les méthodes locales qui assurent la convergence vers l'optimum de la fonction le plus proche de la solution courante en explorant son voisinage et les méthodes globales qui s'attachent à faire converger la solution vers l'optimum globale de la fonction [78].

Ces méthodes nécessitent que la fonction objective présente un certain nombre de caractéristiques telles que la convexité, la continuité ou la dérivabilité. Nous pouvons citer, parmi les méthodes les plus connues, les méthodes de programmation linéaire [79], quadratique [80] et/ou dynamique [81] la méthode de Newton [80], la méthode du simplexe [82] ou encore la méthode du gradient [83].

III.5.2 Les méthodes de métaheuristiques

Des heuristiques plus poussées, adaptables à un grand nombre de problèmes différents, sans changements majeurs dans l'algorithme, ont été mises au point et ont donné naissance à une nouvelle famille d'algorithmes d'optimisation stochastiques : les métaheuristiques. Le terme métaheuristique a été inventé par Fred Glover en 1986, lors de la conception de la recherche taboue [84]. Les métaheuristiques forment une famille d'algorithmes d'optimisation visant à résoudre des problèmes d'optimisation difficile, pour lesquels nous ne connaissons pas de méthodes classiques plus efficaces.

Elles sont généralement utilisées comme des méthodes génériques pouvant optimiser une large gamme de problèmes différents. Leur capacité à optimiser un problème à partir d'un nombre minimal d'informations est contrebalancée par le fait qu'elles n'offrent aucune garantie quant à l'optimalité de la meilleure solution trouvée. Cependant, du point de vue de la recherche opérationnelle, ce constat n'est pas forcément un désavantage, puisque l'on préfère

toujours une approximation de l'optimum global trouvée rapidement à une valeur exacte trouvée dans un temps rédhitoire.

Il existe un grand nombre de métaheuristiques différentes, allant de la simple recherche locale à des algorithmes complexes de recherche globale. La plupart des métaheuristiques utilisent des processus aléatoires comme moyens de récolter de l'information et de faire face à des problèmes comme l'explosion combinatoire. Les métaheuristiques peuvent être considérées comme des algorithmes stochastiques itératifs, où elles manipulent une ou plusieurs solutions à la recherche de l'optimum.

Les itérations successives doivent permettre de passer d'une solution de mauvaise qualité à la solution optimale. L'algorithme s'arrête après avoir atteint un critère d'arrêt, consistant généralement en l'atteinte du temps d'exécution imparti ou en une précision demandée. Ces méthodes tirent leur intérêt de leur capacité à éviter les optima locaux, soit en acceptant des dégradations de la fonction objectif au cours du traitement, soit en utilisant une population de points comme méthode de recherche. Les métaheuristiques sont souvent inspirées de processus naturels qui relèvent de la physique (l'algorithme du recuit simulé), de la biologie de l'évolution (les algorithmes génétiques) ou encore de l'éthologie (les algorithmes de colonies de fourmis ou l'optimisation par essaim particulaire). Les métaheuristiques se caractérisant par leur capacité à résoudre des problèmes très divers, elles se prêtent naturellement à des extensions. Pour illustrer celles-ci, nous pouvons citer :

- ✓ Les métaheuristiques pour l'optimisation multi objectif [85]: où il faut optimiser plusieurs objectifs contradictoires. Le but ne consiste pas ici à trouver un optimum global, mais à trouver une ensemble d'optima, qui forment une surface de compromis pour les différents objectifs du problème;
- ✓ Les métaheuristiques pour l'optimisation multimodale [86]: où l'on ne cherche plus l'optimum global, mais l'ensemble des meilleurs optima globaux et/ou locaux;
- ✓ Les métaheuristiques pour l'optimisation de problèmes bruités : où il existe une incertitude sur le calcul de la fonction objectif, dont il faut tenir compte dans la recherche de l'optimum;
- ✓ Les métaheuristiques pour l'optimisation dynamique [87]: où la fonction objective varie dans le temps, ce qui nécessite d'approcher l'optimum à chaque pas de temps;
- ✓ Les métaheuristiques hybrides [87]: qui consiste à combiner différentes métaheuristiques, afin de tirer profit des avantages respectifs;

- ✓ Les métaheuristiques parallèles [88]: où l'on cherche à accélérer le calcul, en répartissant la charge de calcul sur des unités fonctionnant de concert. Le problème revient alors à adapter les métaheuristiques pour qu'elles soient distribuées.

En général, l'utilisateur demande des méthodes efficaces et rapides permettant d'atteindre un optimum avec une précision acceptable dans un temps raisonnable, mais il a besoin aussi des méthodes simples à utiliser. Un des enjeux des métaheuristiques est donc de faciliter le choix d'une méthode et de simplifier son réglage pour l'adapter au mieux à un problème posé. De nombreuses méthodes existant dans la littérature, parmi les plus courantes, nous nous allons choisir la méthode d'optimisation d'essaim de particules, seront présentée plus en détail dans la section ci dessous.

III.6 L'optimisation des essais de particules

III.6.1 L'origine et l'idée de base de l'OEP (Etat de l'art)

L'idée de l'optimisation par essaim de particules trouve ses racines dans les années 80. Précisément en 1983, lorsque Reeves [89] a essayé de résoudre le problème de rendu des images afin de simuler les phénomènes naturels en utilisant l'outil Informatique pour créer des scènes animées. Dans le cadre de son travail, Reeves a implémenté un système de particules qui œuvrent ensemble pour simuler un objet flou (nuage, explosion...). Le modèle proposé par Reeves considère que chaque particule est caractérisée par une position dans l'espace de recherche et une vitesse de déplacement. En effet, les particules de l'essaim se déplacent en fonction de leurs positions courantes et leurs vitesses qui seront adaptées au cours de la recherche.

D'autre part, Craig Reynolds [90] a été intrigué par l'organisation et l'esthétique du comportement social des oiseaux. Il a tenté d'améliorer l'idée de Reeves, en rendant le comportement du groupe des particules plus dynamique et plus organisé. Reynolds a ajouté la notion d'orientation et la notion de communication inter-particules: chaque particule doit rester proche des autres particules de l'essaim comme elle (i.e. la particule) doit éviter d'entrer en collision avec ses congénères. C'est la raison pour laquelle, chaque particule doit avoir conscience de la position des autres particules du groupe. Suite à sa recherche, Reynolds a découvert que l'implémentation d'un modèle simulant le comportement de particules tel qu'il est en réalité n'est pas faisable. En fait, il a découvert que son modèle engendre une exécution très complexe surtout avec une population de grande taille. Afin de pallier à ce problème, Reynolds a proposé l'utilisation de la notion du voisinage.

De leurs parts, Heppner et Grenander [91] ont apprécié la manière de volées d'oiseaux. Ils ont établi une recherche sur les différentes règles permettant à un ensemble d'agents de se communiquer d'une manière très simple et de produire un comportement social imprévisible, bien organisé et intelligent.

En 1995, Kennedy et Eberhart se sont basés sur les idées et les études de Reeves, Reynolds et surtout des résultats de Heppner et Grenander afin de comprendre la stratégie de recherche de nourriture et d'affrontement des prédateurs que l'on retrouve chez les groupes d'animaux tels que les bancs de poissons, les volées d'oiseaux ou les essaims d'insectes. Le fruit des recherches de Kennedy et Eberhart était la proposition de la métaheuristique d'optimisation par essaim de particules dont le principe sera décrit dans ce qui suit.

III.6.2 Définition

L'optimisation d'essaim de particules (OEP) est une technique stochastique basée sur la population d'optimisation développée par Dr. Eberhart et Dr. Kennedy en 1995, inspiré par le comportement social des oiseaux s'assemblant ou le banc de poissons figure (III.1). Ses deux concepteurs, cherchaient à modéliser des interactions sociales entre des « agents » devant atteindre un objectif donné dans un espace de recherche commun, chaque agent ayant une certaine capacité de mémorisation et de traitement de l'information. La règle de base était qu'il ne devait y avoir aucun chef d'orchestre, ni même aucune connaissance par les agents de l'ensemble des informations, seulement des connaissances locales. Un modèle simple fut alors élaboré [92].

En effet, on peut observer chez ces animaux des dynamiques de déplacement relativement complexes, alors qu'individuellement chaque individu a une intelligence limitée et une connaissance seulement locale de sa situation dans l'essaim. Un individu de l'essaim n'a pour connaissance que la position et la vitesse de ses plus proches voisins. Chaque individu utilise donc, non seulement, sa propre mémoire, mais aussi l'information locale sur ses plus proches voisins pour décider de son propre déplacement. Des règles simples, telles que "aller à la même vitesse que les autres", "se déplacer dans la même direction" ou encore "rester proche de ses voisins" sont des exemples de comportements qui suffisent à maintenir la cohésion de l'essaim, et qui permettent la mise en œuvre de comportements collectifs complexes et adaptatifs.



(a)



(b)

Figure III. 1: Groupe de : (a) oiseaux, (b) poissons

L'intelligence globale de l'essaim est donc la conséquence directe des interactions locales entre les différentes particules de l'essaim. La performance du système entier est supérieure à la somme des performances de ses parties. Kennedy et Eberhart se sont inspirés de ces comportements socio-psychologiques pour créer le PSO. Un essaim de particules, qui sont des solutions potentielles au problème d'optimisation, "survole" l'espace de recherche, en quête de l'optimum global. Le déplacement d'une particule est influencé par les trois composantes suivantes [93]:

- Une composante physique : la particule tend à suivre sa direction courante de déplacement ;
- Une composante cognitive : la particule tend à se diriger vers le meilleur site par lequel elle est déjà passée ;
- Une composante sociale : la particule tend à se fier à l'expérience de ses congénères et, ainsi, à se diriger vers le meilleur site déjà atteint par ses voisins.

Dans le cas d'un problème d'optimisation, la qualité d'un site de l'espace de recherche est déterminée par la valeur de la fonction objective en ce point. La figure (III.2), illustre la stratégie de déplacement d'une particule.

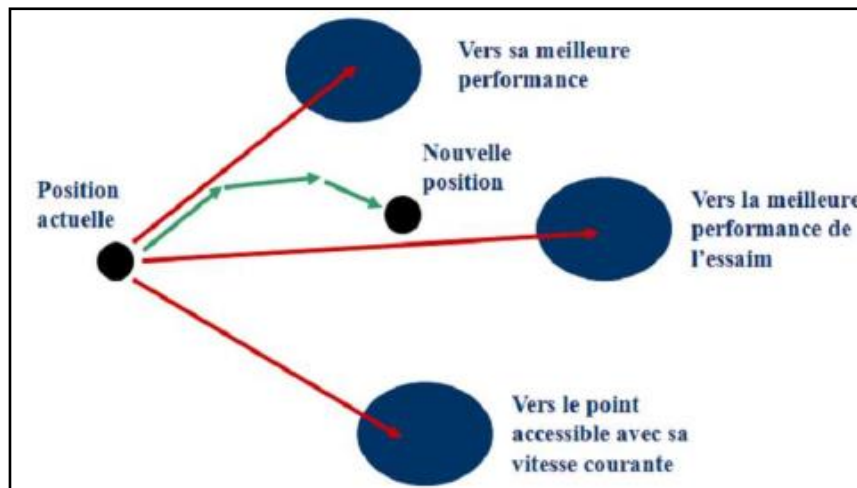


Figure III.2: Déplacement d'une particule

Il faut ensuite définir les voisinages et leur structure, il en existe de deux types :

- Les voisinages géographiques : les voisins d'une particule sont ses voisines les plus proches. Ce type de voisinage impose l'utilisation d'une distance pour recalculer à chaque itération (ou toutes les k itérations) les voisins de chaque particule. Ci-dessous, la figure (III.3) est un exemple où les voisins d'une particule sont les deux particules qui lui sont le plus proche.

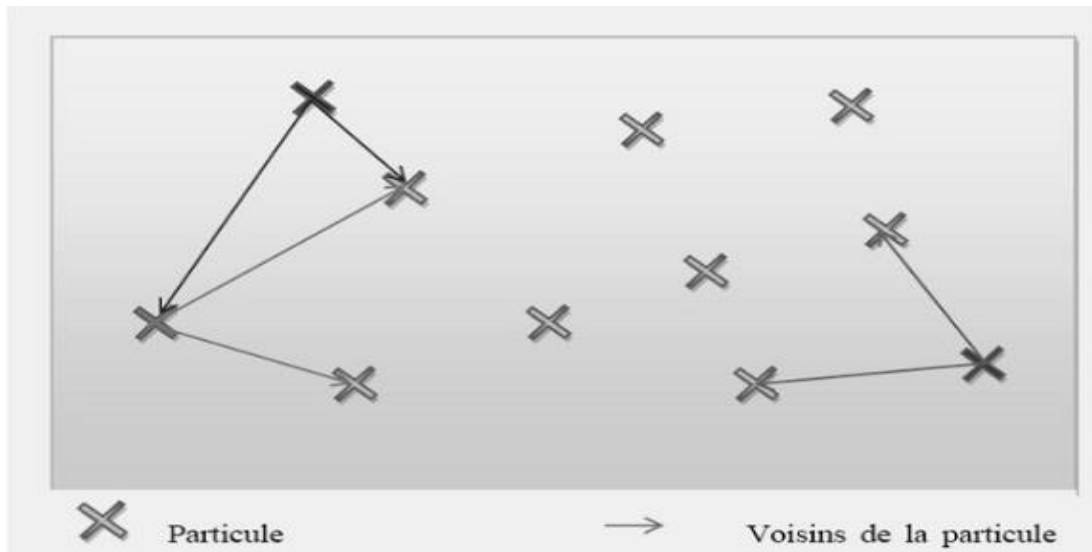


Figure III.3: Exemple de voisinage géographique.

- Les voisinages sociaux : les voisinages sont établis à l'initialisation et ne sont pas modifiés ensuite. Il existe différentes structures de voisinages sociaux, nous allons vous en présenter quelques uns (Figure III.4) [94].

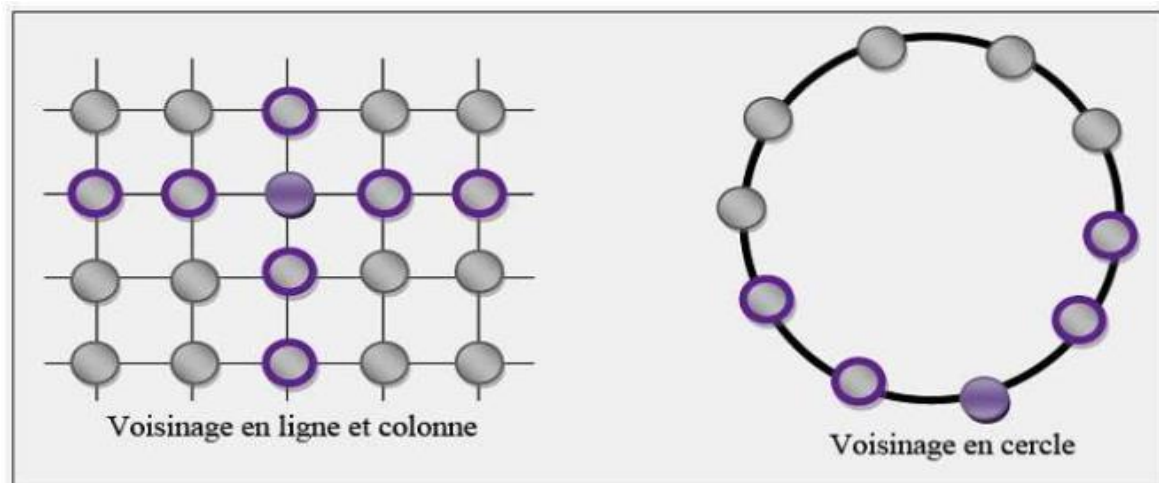


Figure III.4: Deux cas de voisinage social.

III.6.3 Principe de l'Algorithme OEP

Dans l'OEP, chaque individu de la population est dit (particule), tandis que la population est connue sous le nom (Essaim). Il faut noter, que la particule peut bénéficier des mouvements des autres particules dans la même population pour ajuster sa position et sa vitesse durant le processus d'optimisation. Chaque individu utilise l'information locale à laquelle il peut accéder sur le déplacement de ses plus proches voisins pour décider de son propre déplacement. Des règles très simples comme "rester proche des autres individus", "aller dans la même direction", "aller à la même vitesse" suffisent pour maintenir la cohésion du groupe tout entier. Au départ de l'algorithme, un essaim est réparti au hasard dans l'espace de recherche, chaque particule ayant également une vitesse aléatoire. Ensuite, à chaque pas de temps :

- Chaque particule est capable d'évaluer la qualité de sa position et de garder en mémoire sa meilleure performance, c'est-à-dire la meilleure position qu'elle a atteinte jusqu'ici (qui peut en fait être parfois la position courante) et sa qualité (la valeur en cette position de la fonction à optimiser).
- Chaque particule est capable d'interroger un certain nombre de ses congénères de son voisinage et d'obtenir de chacune d'entre elles sa propre meilleure performance.
- A chaque pas de temps, chaque particule choisit la meilleure des meilleures

Performances dont elle a connaissance, modifie sa vitesse en fonction de cette information et de ses propres données et se déplace en conséquence.

A partir des quelques informations dont elle dispose, une particule doit décider de son prochain mouvement, c'est-à-dire décider de sa nouvelle vitesse. Pour ce faire, elle combine trois informations :

- Sa vitesse actuelle.
- Sa meilleure position actuelle.
- La meilleure performance (vitesse et position) de ses voisines.

Le hasard joue un rôle, grâce à une modification aléatoire limitée des coefficients de confiance, ce qui favorise l'exploration de l'espace de recherche.

Naturellement, pour pouvoir être programmé, tout ceci est formalisé dans des équations de mouvement. Un point intéressant est que, contrairement à bien d'autres heuristiques qui restent purement expérimentales, il existe une analyse mathématique précisant les conditions de convergence et le choix des paramètres [94].

III.6.4 Formulation Mathématique de l'OEP [95]

Dans un espace de recherche de dimension D , la particule i de l'essaim est modélisée par son vecteur position $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{iD})$ et par son vecteur vitesse $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, v_{i3}, \dots, v_{iD})$. Cette particule garde en mémoire la meilleure position par laquelle elle est déjà passée, que l'on note $P_{iBest} = (P_{i1Best}, P_{i2Best}, P_{i3Best}, \dots, P_{iDBest})$.

La meilleure position atteinte par toutes les particules de l'essaim est notée $G_{iBest} = (g_{i1Best}, g_{i2Best}, g_{i3Best}, \dots, g_{iDBest})$.

Au temps t , le vecteur de vitesse est calculé à partir de l'équation (III.2) :

$$V_{ij} = W \cdot V_{ij}(t-1) + c_1 \cdot r_1 \cdot (P_{ijBest}(t-1) - X_{ij}(t-1)) + c_2 \cdot r_2 \cdot (G_{jBest} - X_{ij}(t-1)) \quad (III.2)$$

$$j \in \{1 \dots D\}$$

La position au temps t de la particule i est alors définie par l'équation (III.3) :

$$X_{ij}(t) = X_{ij}(t-1) + V_{ij}(t) \quad (III.3)$$

Où : W est en général une constante appelée coefficient d'inertie, c_1 et c_2 constantes appelées coefficients d'accélération, r_1 et r_2 sont deux nombres aléatoires tirés uniformément dans $[0,1]$ à chaque itération et pour chaque dimension.

$w \cdot V_{ij}(t-1)$ Correspond à la composante physique du déplacement. Le paramètre w contrôle l'influence de la direction de déplacement sur le déplacement futur. Il est à noter que, dans certaines applications, le paramètre w peut être variable.

$c1 \cdot r1 (P_{ij}Best - X_{ij}^{(t-1)})$ Correspond à la composante cognitive du déplacement où $c1$ contrôle le comportement cognitif de la particule.

$c1 \cdot r1 (G_{ij}Best - X_{ij}^{(t-1)})$ Correspond à la composante sociale du déplacement, où $c2$ contrôle l'aptitude sociale de la particule.

Les gammes appropriées de valeur pour $c1$ et $c2$ sont de 1 à 2, mais 2 est le plus approprié dans beaucoup de cas.

Le coefficient d'inertie est donné :

$$W = w_{\max} - \left(\frac{w_{\max} - w_{\min}}{k_{\max}} \right) \times k \quad (\text{III.4})$$

k_{\max} , k sont respectivement le nombre maximum des itérations et le nombre d'itération courante. w_{\max} Et w_{\min} sont respectivement les coefficients minimum et maximum d'inertie. Le coefficient d'inertie W joue un rôle important dans la procédure de recherche. Elle garantit un équilibre entre la recherche locale et la recherche globale, un bon choix de cette fonction augmente l'efficacité de la méthode pour avoir une solution globale. L'expérience a montré que la diminution linéaire de la valeur de W de 0.9 à 0.4 au cours de la procédure de recherche donne des meilleurs résultats.

III.6.5 Conception et Déroulement de l'algorithme

Pour expliquer le principe de l'algorithme OEP appliqué pour résoudre un problème de minimisation ou de maximisation, considérons le problème d'optimisation: [96] [97]

$$\min \{f(x_j)\}, \quad j = 1, 2, 3 \quad (\text{III.5})$$

La fonction fitness associée est :

$$fitness(x_j) = f(x_j) \quad (\text{III.6})$$

L'algorithme OEP se déroule suivant les étapes suivantes:

Etape 1: initialiser une population de particules et de vitesses, uniformément réparties dans l'espace de recherche, et fixer le critère d'arrêt.

Etape 2: évaluer la fonction objective, pour chaque particule.

Etape 3: mettre à jour la meilleure position P_{bestj} pour chaque particule et la meilleure position globale g_{Bestj} dans la population.

Etape 4: mettre à jour la position et la vitesse utilisant les équations (III.2) et (III.3).

Etape 5: vérifier le critère d'arrêt. Si le critère d'arrêt n'est pas satisfait, aller vers l'étape 2; sinon, le programme se termine, et la solution optimale est produite.

La figure (III.5) montre l'organigramme général de la méthode OEP :

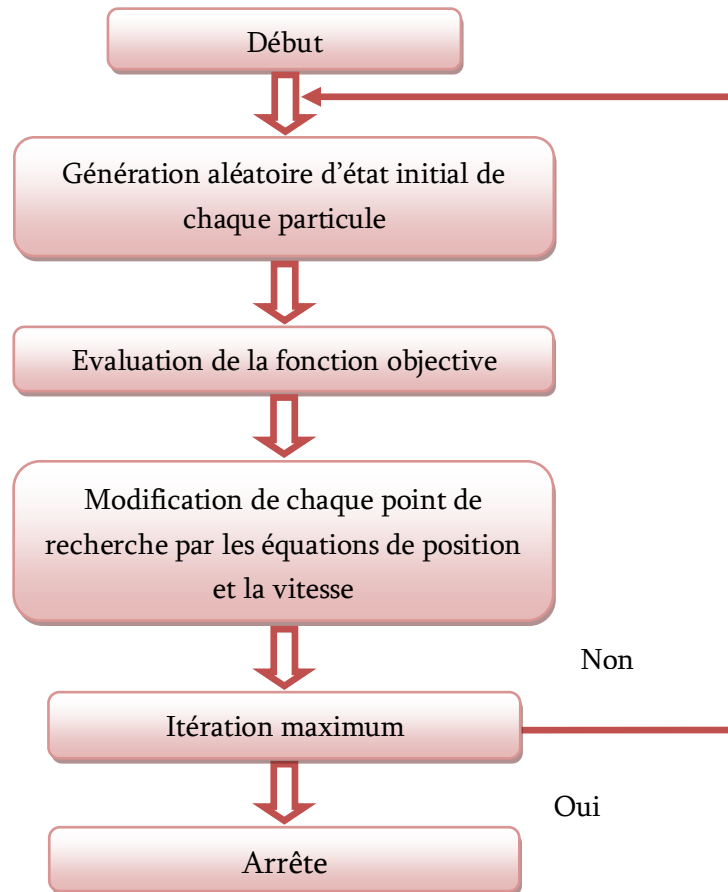


Figure III.5 : Organigramme général de la méthode d'OEP

III.7 Développements d'un algorithme OEP pour la résolution du problème d'un dispatching économique.

La description des éléments de base nécessaires au développement de l'algorithme de solution est donnée ci-dessous.

Particule $X(t)$: C'est une solution candidate représentée par un vecteur de m-dimension où m est le nombre de paramètres optimisés.

Au temps t, la *j*th particule $X_j(t)$ peut être décrite comme $X_j(t) = [x_{j,1}(t), \dots, x_{j,m}(t)]$, où x_s sont les paramètres optimisés et $x_{j,k}(t)$ est la position de la *j*th particule par rapport à la

k th dimension, c'est-à-dire la valeur du k th paramètre optimisé dans la j th solution candidate.

Population $pop(t)$: C'est un ensemble de n particules à l'instant t , c'est-à-dire :

$$pop(t) = [X_1(t), \dots, X_n(t)]^T$$

Essaim : C'est une population apparemment désorganisée de particules en mouvement qui ont tendance à se regrouper, tandis que chaque particule semble se déplacer dans une direction aléatoire.

Vitesse des particules $V(t)$: C'est la vitesse des particules en mouvement représentée par un vecteur m dimensionnel. À l'instant t , la j th particule la vitesse $V_j(t)$ peut être décrite comme $V_j(t) = [v_{j,1}(t), \dots, v_{j,m}(t)]$ où $v_{j,k}(t)$ est la composante de vitesse de la j th particule par rapport à la k th dimension.

Poids d'inertie $\omega(t)$: C'est un paramètre de contrôle permettant de contrôler l'impact des vitesses précédentes sur la vitesse actuelle. Ainsi, il est recommandé de choisir entre les capacités d'exploration globale et locale des particules, un poids d'inertie élevé pour améliorer l'exploration globale. Il est recommandé lors des étapes initiales, où, comme pour les étapes finales, le poids d'inertie est réduit pour une meilleure exploration locale.

Meilleur individuel $X^*(t)$: Au cours du processus de recherche, la particule compare sa valeur de condition physique à la position actuelle à la meilleure valeur de forme physique qu'elle n'ait jamais atteinte à tout moment, jusqu'à l'heure actuelle. La meilleure position associée à la meilleure forme physique rencontrée jusqu'à présent est appelée la meilleure personne, $X^*(t)$. De cette manière, la meilleure position $X^*(t)$. Pour chaque particule de l'essaim peut être déterminée et mise à jour au cours de la recherche. Par exemple, dans un problème de minimisation avec la fonction objective J , le meilleur individuel de la j th particule $X^*(t)$ est déterminé de telle sorte que $J(X_j^*(t)) \leq J(X_j^*(\tau))$, $\tau \leq t$. Pour simplifier, on suppose que $J_j^*(X_j^*(t))$. Pour la particule j th, le meilleur individu peut être exprimé comme $X_j^*(t) = [x_{j,1}^*(t), \dots, x_{j,m}^*(t)]$.

Meilleur global $X^{**}(t)$: C'est la meilleure position parmi toutes les meilleures positions individuelles (c'est-à-dire la meilleure de toutes) obtenue jusqu'à présent. Par conséquent, le

meilleur global peut être déterminé en tant que tel $J(X_j^{**}(t)) \leq J(X_j^*(\tau))$, $j = 1, \dots, n$. Pour simplifier, supposons que $J^{**} = J(X^{**}(t))$.

Critères d'arrêt : les conditions dans lesquelles le processus de recherche se terminera. Dans le cas présent, la recherche prendra fin si l'une des conditions suivantes est remplie.

- a) Le nombre d'itérations depuis, le dernier changement de la meilleure solution est supérieur à un nombre prédéfini.
- b) Le nombre d'itérations a atteint le nombre maximal autorisé. Avec la description des éléments de base ci-dessus, l'algorithme Solution est développé comme indiqué ci-dessous :

- ✓ Afin de faire une recherche uniforme dès les premières étapes et très recherche locale dans les étapes ultérieures, dans la procédure de recuit est suivie. Une fonction de décrémentation pour diminuer le poids d'inertie donné en $\omega(t) = \alpha\omega(t-1)$, α est une constante de décrémentation inférieure à 1 mais proche de 1, considéré ici.
- ✓ Contrôles de faisabilité, pour l'imposition de procédure de la particule
- ✓ positions, après la mise à jour de la position pour empêcher les particules de voler en dehors de la zone de recherche possible.
- ✓ La vitesse des particules dans la k th dimension est limitée par une valeur maximale v_k^{\max} . Avec cette limite, il est possible d'améliorer l'espace d'exploration locale et de simuler de manière réaliste les changements incrémentiels de l'apprentissage humain. Afin d'assurer une vitesse uniforme dans toutes les dimensions, la vitesse maximale dans la k th dimension est donnée par:

$$v_{k \max} = (x_{k \max} - x_{k \min})/N \quad (\text{III.7})$$

Dans l'algorithme PSO, la population comprend n particules et chaque particule est un vecteur de dimension m , où m est le nombre de paramètres optimisés. En incorporant les modifications ci-dessus, le flux de calcul de la technique OEP peut être décrit dans les étapes suivantes.

Étape 1 (*initialisation*)

- ✓ Définir le compteur de temps $t=0$ et générer aléatoirement n particules, $[X_j(0), j=1, \dots, n]$, où $X_j(0) = [x_{j,1}(0), \dots, x_{j,m}(0)]$.
- ✓ est généré en sélectionnant de manière aléatoire une valeur avec une probabilité uniforme sur le k th espace de recherche de paramètres optimisé $\mathcal{X}_{k_{\min}}, \mathcal{X}_{k_{\max}}$.
- ✓ De même, générer des vitesses initiales aléatoires de toutes les particules, $[V_j(0), j=1, \dots, n]$, où $V_j(0) = [v_{j,1}(0), \dots, v_{j,m}(0)]$.
- ✓ $v_{j,k}(0)$ est généré en sélectionnant de manière aléatoire une valeur avec une probabilité uniforme sur la k th dimension $[-v_{k_{\max}}, v_{k_{\max}}]$.
- ✓ Chaque particule de la population initiale est évaluée à l'aide de la fonction objectif J .
- ✓ Pour chaque particule, définir $X_j^*(0) = X_j(0)$ and $J_j^* = J_j, j=1, \dots, n$.
- ✓ Définir la particule associée à J_{best} comme le meilleur global, $X^{**}(0)$, avec une fonction objective de J^{**} .
- ✓ Définir la valeur initiale du poids d'inertie $\omega(0)$.

Étape 2 (mise à jour du temps)

Mettre à jour le compteur de temps $t = t + 1$.

Étape 3 (mise à jour du poids)

Mettre à jour le poids d'inertie $\omega(t) = \alpha\omega(t-1)$.

Étape 4 (mise à jour de la vitesse)

En utilisant le meilleur global et le meilleur individuel de chaque particule, la j th vitesse de particule dans la k th dimension est mise à jour selon l'équation suivante:

$$v_{j,k}(t) = \omega(t)v_{j,k}(t-1) + c_1r_1(x_{j,k}^*(t-1) - x_{j,k}(t-1)) + c_2r_2(x_{j,k}^{**}(t-1) - x_{j,k}(t-1)) \quad (\text{III.8})$$

Où c_1 et c_2 sont des constantes positives et r_1 et r_2 sont des nombres aléatoires uniformément répartis dans $[0, 1]$. Il est à noter que le deuxième terme représente la partie cognitive de la PSO où la particule change de vitesse en fonction de sa propre pensée et de sa mémoire. Le troisième terme représente la partie sociale de PSO où la particule change de vitesse en fonction de l'adaptation socio-psychologique de la connaissance. Si une particule ne respecte pas les limites de vitesse, définissez sa vitesse sur la limite.

Étape 5 (mise à jour de la position)

En fonction des vitesses mises à jour, chaque particule change de position en fonction de l'équation suivante:

$$x_{j,k}(t) = v_{j,k}(t) + x_{j,k}(t-1) \quad (\text{III.9})$$

Si une particule ne respecte pas ses limites de position dans n'importe quelle dimension, définissez sa position sur la limite appropriée.

Étape 6 (*Meilleure mise à jour individuelle*)

Chaque particule est évaluée en fonction de sa position mise à jour. Si $J_j < J_j^*$, $j = 1, \dots, n$ puis mettre à jour mieux comme $X_j^*(t) = X_j(t)$ et $J_j^* = J_j$ et passez à l'étape 7; sinon passez à l'étape 7.

Étape 7 (*Meilleure mise à jour globale*)

Rechercher la valeur minimale J_{\min} parmi J_j^* où min est l'indice de la particule ayant la fonction objectif minimale, c'est-à-dire $\min \in \{j; j = 1, \dots, n\}$ si $J_{\min} < J^*$ puis mettre à jour le meilleur global comme $X^{**}(t) = X_{\min}(t)$ et $J^{**} = J_{\min}$. et passez à l'étape 8; sinon passez à l'étape 8.

Étape 8 (*Critères d'arrêt*)

Si l'un des critères d'arrêt est satisfait, arrêtez-vous; sinon passez à l'étape 2.

III.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une généralité sur l'optimisation, aussi nous avons donné une brève introduction sur la méthode d'optimisation Essaim de particule, la méthode OEP converge grâce à l'intelligence collective, vers l'optimum global. Comme une autre alternative très simple à mettre en œuvre montrant récemment une grande aptitude à résoudre des problèmes d'optimisation dans un grand nombre d'applications.

Dans le chapitre suivant, nous allons employer l'algorithme d'optimisation par essaim de particules pour trouver les puissances actives optimales produites par les centrales de production afin de réduire au minimum le coût de production et les pertes de transmissions.

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left and rounded corners on the right, framing the text.

Chapitre IV

Application numérique et résultats

IV.1 Introduction

Avec l'augmentation de la demande d'électricité, la production d'électricité à partir de combustibles fossiles est davantage sollicitée. Afin de réduire l'utilisation des combustibles fossiles et des gaz à effet de serre, des recherches convaincantes ont été menées dans le monde entier pour intégrer et améliorer les sources d'énergie renouvelables dans les systèmes électriques existants [98].

La production d'énergie éolienne est de plus en plus populaire lorsqu'il s'agit d'avoir une production électrique sans pollution de l'environnement, alors que le monde tend vers cette technologie car elle est gratuite et utilise le vent pour nous faire de l'électricité dans le parc éolien à grande échelle. N'oublions pas non plus l'importance de l'énergie solaire, reconnue comme une énergie propre et sans émission directe, pour contribuer à minimiser les problèmes environnementaux alarmants, tels que le problème des gaz à effet de serre [99], et en Algérie, ces énergies renouvelables (solaire et éolienne) sont abondantes.

C'est en 1957 que l'ingénieur français ANDREAU a tenté pour la première fois d'installer une éolienne de 100 kW sur le site des Grands Vents (Alger) sur le réseau de distribution d'électricité. Ce prototype a été installé à l'origine à St-Alban en Angleterre. Actuellement, la puissance éolienne totale installée en Algérie est insignifiante. Cependant, le ministère de l'énergie et des mines a prévu, dans son programme de développement des énergies renouvelables, d'installer des parcs éoliens supplémentaires d'une capacité totale de 1 000 MW à moyen terme (2015-2020) pour atteindre 5010 MW en 2030.

De plus, la politique nationale de développement des énergies renouvelables a été adoptée en 2011 et mise à jour en 2015. À ce jour, l'Algérie compte 22 centrales photovoltaïques, d'une capacité totale de 350 MW. Le projet portera la production d'énergie solaire à près de 5 000 MW, selon un responsable du ministère. C'est un bond considérable, mais nous sommes loin des objectifs fixés par le programme national : 47 à 51 TWh (térawatt heures) d'énergie propre d'ici 2030-2040. Il y aura encore beaucoup de travail à faire. Une grande station pilote fonctionnant à l'énergie solaire sera réalisée sur le territoire de la wilaya de Naâma dans une zone de 15 hectares à l'entrée nord de la ville de Naâma, à ce projet dont la construction a commencé au début de l'année 2017, avant de préciser que cette station sera équipée de panneaux photovoltaïques qui fourniront environ 30% de ses besoins en électricité [100].

La répartition économique (DE) est l'un des principaux outils d'exploitation et de planification du réseau électrique moderne et constitue la base de nombreux programmes d'application. L'objectif principal est de répondre aux exigences de production d'électricité spécifiées à un coût total minimum tout en satisfaisant à toutes les contraintes des unités et des systèmes [101]. Dans ce chapitre, nous étudierons l'hybridation de l'énergie éolienne et solaire PV avec la centrale turbine à gaz, installée sur les hauts plateaux d'Algérie (site de Naama). En effet, nous prendrons des scénarios pour analyser l'impact de l'intégration de ces énergies renouvelable (éolienne / solaire) sur le problème de répartition économique dynamique résolu avec un algorithme d'optimisation essaim de particule OEP.

IV.2 Les énergies renouvelables

Les énergies renouvelables (ER) ont été définies comme des flux d'énergie qui se produisent naturellement et de manière répétée dans l'environnement et peuvent être exploités au profit de l'homme. La description largement utilisée pourrait être de l'énergie produite à partir d'une source de carburant renouvelable et / ou durable. Il pourrait être nommé: «renouvelable», «durable» ou «alternative» pour l'énergie (c'est-à-dire une alternative aux combustibles fossiles traditionnels). L'énergie renouvelable est générée à partir de ressources naturelles telles que le vent, la lumière du soleil, la marée, l'hydroélectricité, la biomasse et la géothermie. Cette étude se concentre principalement sur deux types d'énergies; l'énergie solaire et l'énergie éolienne.

IV.2.1 L'énergie éolienne

L'énergie éolienne est en train de devenir l'une des plus importantes sources renouvelables. De nombreuses études sont orientées vers ce type de production d'énergie dans le but de la rendre plus efficace. Cette énergie est une source d'électricité renouvelable abondante qui est exploitée en convertissant l'énergie cinétique de la masse d'air en mouvement en électricité [102].

L'énergie éolienne est caractérisée par une production locale distribuée/dispersée, à l'exception des grands parcs éoliens offshore, qui sont considérés comme des centrales électriques locales dont la puissance nominale est supérieure à 100 MW. Dans le cas d'une éolienne [103], la puissance mécanique récupérée par une éolienne peut être écrite sous la forme [104]:

$$P_w = \frac{1}{1} C_p \cdot \rho \cdot \tau \cdot R_p^2 \cdot V_w^3 \quad (\text{IV.1})$$

Où : C_p , est le coefficient aérodynamique de la puissance de la turbine (il caractérise l'aptitude de l'aérogénérateur à capter l'énergie du vent), ρ est la densité de l'air, R_p le rayon de la turbine et

V_w la vitesse du vent. La valeur du coefficient de puissance C_p , dépend de la vitesse de rotation de la turbine et de la vitesse du vent.

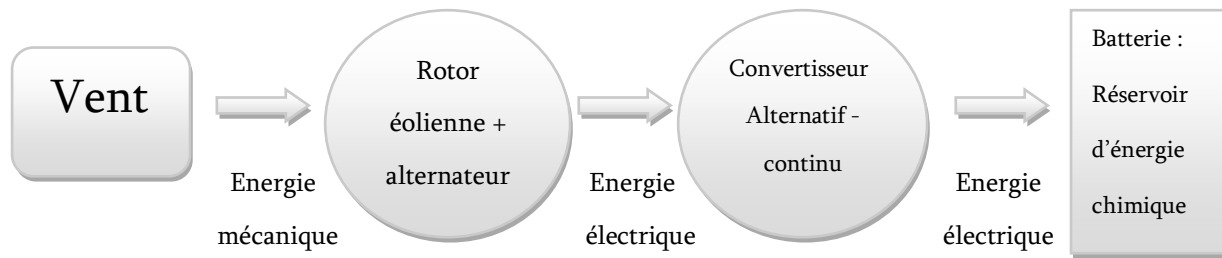


Figure IV.1 : Chaîne de conversion d'énergie éolienne

IV.2.2 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

IV.2.2.1 Avantage

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui ne nécessite aucun carburant, ne crée pas de gaz à effet de serre, ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs. En luttant contre le changement climatique, l'énergie éolienne participe à long terme au maintien de la biodiversité des milieux naturels.

- L'énergie éolienne produit de l'électricité éolienne : sans dégrader la qualité de l'air, sans polluer les eaux, sans polluer les sols.
- La production éolienne d'électricité suit notre consommation d'énergie: le vent souffle plus souvent en hiver, cette saison étant celle où la demande d'électricité est la plus forte.
- L'énergie éolienne offre la possibilité de réduire les factures d'électricité et peut permettre de vous mettre à l'abri des ruptures de courant.

IV.2.2.2 Inconvénients

- Le vent peut parfois souffler à des intensités irrégulières.
- Les éoliennes sont parfois bruyantes et modifient le paysage d'une région.
- La production dépend de l'intensité des vents et non de la demande en énergie.

IV.2.3 Energie solaire

L'énergie solaire est l'énergie produite par le rayonnement solaire, directement ou de manière diffuse à travers l'atmosphère. Grâce à divers procédés, elle peut être transformée en une autre forme d'énergie utile à l'activité humaine, notamment en électricité ou en chaleur [105].

L'énergie solaire dépend des conditions météorologiques, telles que l'irradiation et la température ambiante, qui sont directement liées à l'emplacement géographique [106].

La puissance maximale fournie par un panneau solaire est donnée par la caractéristique suivante :

$$P_s = P_1 \times E_c \times [1 + P_2 \times (T_j - T_{jref})] \quad (IV.2)$$

E_c est le rayonnement solaire, T_{jref} est la température de référence des panneaux de 25°C, T_j est la température de jonction des cellules (°C), P_1 représente la dispersion caractéristique des panneaux et la valeur pour un panneau est incluse entre 0,095 et 0,105 et le paramètre $P_2 = -0,47\%/C^\circ$; est la dérive en température des panneaux [103].

L'ajout d'un paramètre P_3 à la caractéristique, donne des résultats plus satisfaisants :

$$P_s = P_1 \times [1 + P_2 \times (T_j - T_{jref})] \times (P_3 - E_c) \quad (IV.3)$$

Ce modèle simplifié permet de déterminer la puissance maximale fournie par un groupe de panneaux pour le rayonnement solaire et la température de panneau donnée, avec seulement trois paramètres constants P1, P2 et P3 et une équation simple à appliquer.

Une centrale solaire thermique consiste en une production de chaleur du système solaire qui s'alimente à partir des turbines dans un cycle thermique de production d'électricité.

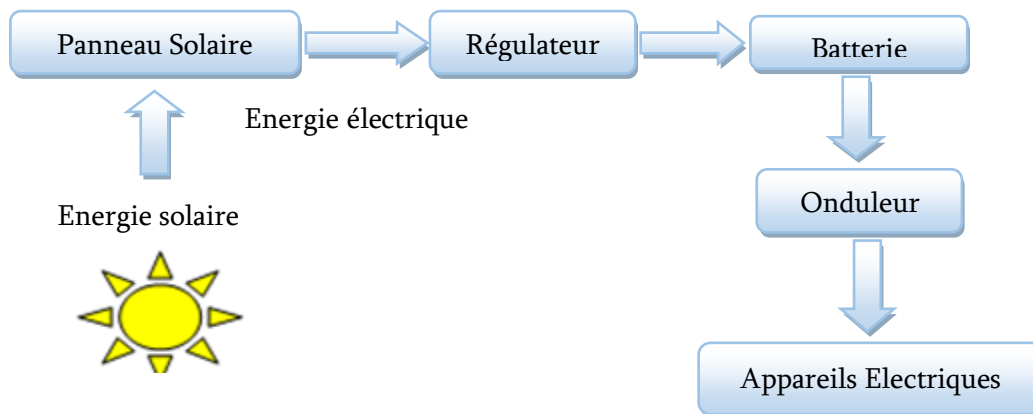


Figure IV.2 : Chaîne de conversion de photovoltaïque

IV.2.4 Avantages et inconvénients de l'énergie solaire PV

IV.2.4.1 Avantage

- Gratuité de cette ressource et énormité de son potentiel réparti sur le globe terrestre,
- Propreté durant son utilisation,
- Grande fiabilité,
- Peu d'entretien,

- Grande souplesse de production (variant de milliwatts aux mégawatts),
- Utilisation autonome et décentralisée.

IV.2.4.2 Inconvénients

- Source diffuse du rayonnement solaire qui nécessite de grandes surfaces,
- Technologie coûteuse,
- Facteur de charge faible,
- Stockage difficile,
- Difficulté à recycler les composants du système,
- Investissement élevé dépendant des décisions politiques.

IV.3 Potentiel solaire et éolien en Algérie

Les exigences du développement durable conduisent à une augmentation de la production et éolienne d'électricité à partir de sources renouvelables. L'énergie solaire photovoltaïque est actuellement les ressources les plus compétitives et l'amélioration des éoliennes et des panneaux solaires conduit à de nombreuses recherches notamment dans le domaine de l'électrotechnique.

L'exploitation des ressources renouvelables est en plein essor dans de nombreux pays, par exemple: l'Algérie est un vaste pays au climat très diversifié. Il a deux grandes zones géographiques distinctes, le nord de la Méditerranée et le sud du Sahara. Il peut devenir un bon concurrent dans ce domaine.

L'Algérie reçoit en moyenne 3 000 heures / an de rayonnement solaire; il possède le potentiel solaire le plus important de la Méditerranée (169440 TWh / an). La moyenne de l'énergie solaire reçue dans les régions côtières est de 1700 kWh / m² / an alors qu'elle est de 1900 kWh / m² / an sur les hauts plateaux et de 2650 kWh / m² / an au Sahara (voir le tableau VI-1).

Il a été prouvé que le potentiel solaire du Sahara peut couvrir tous les besoins énergétiques du monde si nous mettons les investissements nécessaires dans ce domaine.

Tableau IV. 1 : Le taux d'ensoleillement pour chaque région d'Algérie, [107].

Régions	Zones côtières	hauts plateaux	Sahara
Domaine	4%	10%	86%

Durée moyenne d'ensoleillement (heures/an)	2650	3000	3500
Énergie moyenne reçue (KWh/m ² /an)	1700	1900	2650

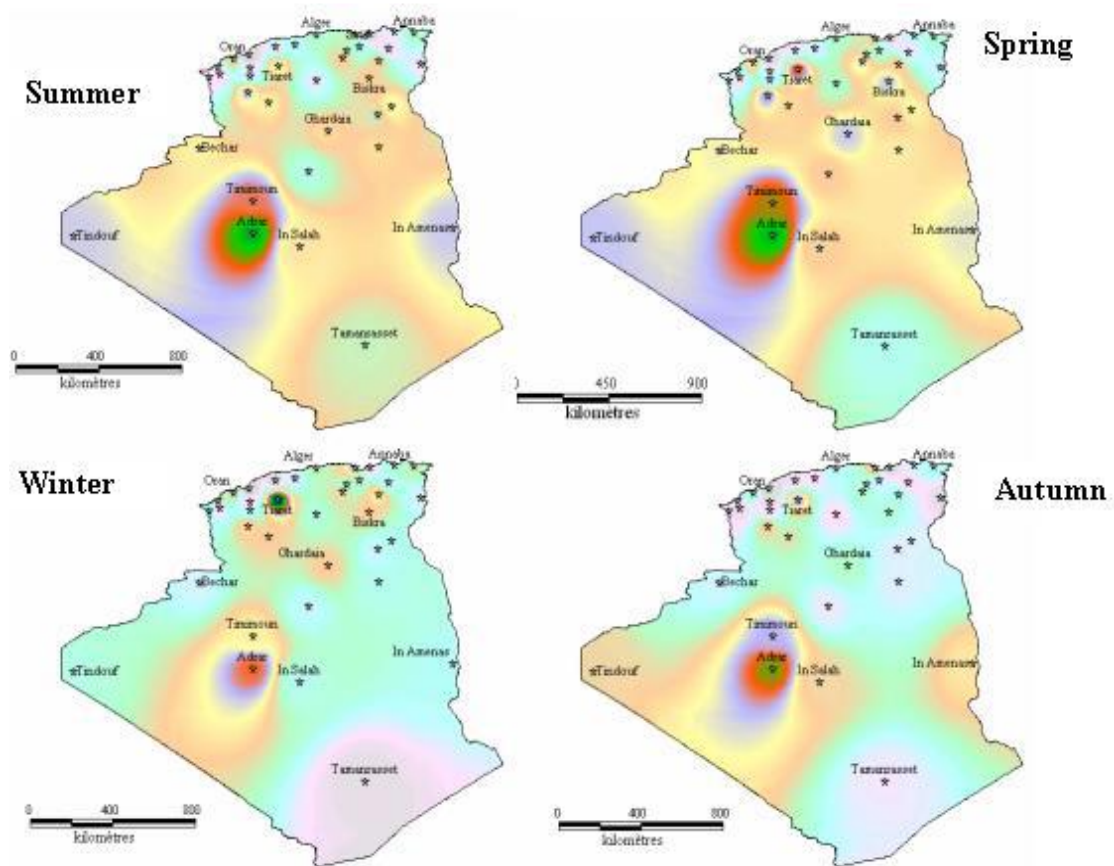


Figure IV.3 : Atlas saisonnier de la vitesse moyenne du vent en Algérie [108].

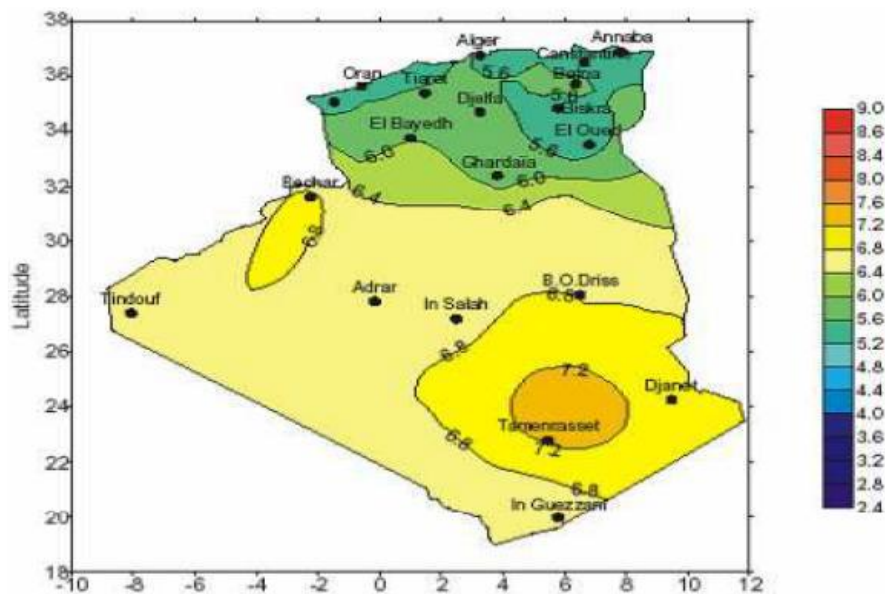


Figure IV.4 : Les radiations solaires de l'Algérie

IV.4 Spécification de site de naama

IV.4.1 Présentation et emplacement du Naama

Cette zone d'étude est la partie sud-ouest des hautes plaines d'Oran. Elle est administrativement reliée à la wilaya de Naama. Cette dernière est la dernière division administrative de 1984. Elle est constituée de 07 daïras comprenant 12 communes. Elle est insérée entre l'Atlas tell nord et l'Atlas saharien au sud ; Elle couvre une superficie de 29825 km² et une population de 225 530 soit une densité moyenne de 7,6 habitants par km² (voir figure IV.3).

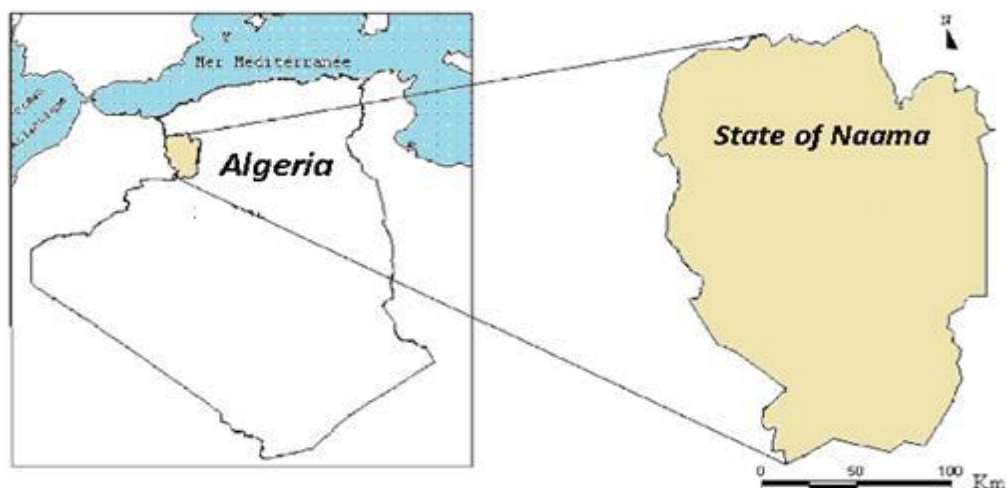


Figure IV.5 : Carte de l'Algérie (localisation de la région étudiée)

IV.4.2 Etude statistique du potentiel solaire et éolien dans la région de Naama

L'énergie solaire et l'énergie éolienne sont fortement dépendantes des conditions météorologiques (ensoleillement, vitesse du vent) du site d'installation du système d'énergie hybride. Pour une utilisation efficace du champ photovoltaïque et de l'éolienne, une analyse préliminaire de l'énergie solaire et éolienne du champ du site est essentielle.

IV.4.2.1 Etude statistique du potentiel solaire dans la région de Naama

Le champ solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible sur un site donné et dans une période donnée. Son évaluation peut être faite à partir des données sur l'irradiation solaire globale. Pour permettre un dimensionnement plus précis, donné pour répondre aux demandes énergétiques, l'étude du gisement est le point de départ de toute investigation. Cette étude est très essentielle dans le domaine de l'énergie solaire afin de simuler le fonctionnement probable du système énergétique pour s'assurer de son intérêt et de sa faisabilité.

Tableau IV.2 : Irradiation globale Wh/m² [109]

Stations	Ain-Sefra	Naama	Mecheria
Paramètres	G(Wh/m ²)	G(Wh/m ²)	G(Wh/m ²)
Janvier	3851	3819	3655
Février	4744	4719	4558
Mars	6090	6087	5981
Avril	7528	7553	7534
Mai	8514	8571	8634
Juin	8926	8999	9136
Juillet	8883	8964	9113
Août	8450	8516	8609
Septembre	7571	7609	7629
Octobre	6341	6353	6287
Novembre	4951	4943	4802
Décembre	3970	4941	3784

IV.4.2.2 Etude statistique du potentiel éolien dans la région de Naama

L'estimation de l'énergie éolienne disponible dans une région donnée reste l'une des étapes les plus importantes avant une éventuelle implantation d'un parc éolien. Ainsi, la répartition géographique d'un gisement reste très complexe car elle dépend de plusieurs paramètres tels que le climat, la topographie du terrain et la rugosité du sol [110].

Tableau IV.3 : Vitesse moyenne mensuelle et densité de puissance moyenne pour Naama (Ain sefra / Mecheria) [110]

Stations	Ain-Sefra		Mecheria	
	V(m/s)	P(W/m ²)	V(m/s)	P(W/m ²)
Janvier	2,26	37,56	4,70	154,30
Février	2,63	39,43	5,12	185,07
Mars	2,97	43,15	5,32	164,64
Avril	3,28	50,93	5,64	188,62
Mai	3,24	43,94	5,57	164,72
Juin	2,80	29,03	5,03	114,48
Juillet	2,40	17,74	4,73	91,84
Aout	2,54	19,31	4,61	90,19
Septembre	2,39	21,79	4,72	104,99
Octobre	2,10	19,13	4,44	100,37
Novembre	2,05	24,39	4,61	126,68
Décembre	2,17	27,23	5,03	156,00

IV.5 Simulation, résultats et discussion

La méthodologie proposée a été simulée sur le réseau real Ouest Algérien. Les données détaillées sont présentées dans la section suivante. La consommation d'énergie maximale pour l'année 2018 est de 850 [MW]. Sur la base du modèle de production d'énergie solaire et éolienne présenté ci dessus, différents scénarios sont envisagés pour cette étude. Le système de production d'énergie solaire et éolienne est considéré avec une capacité P éolienne = 100 [MW] et P solaire = 20 [MW].

Les simulations ont été réalisées pour trois scénarios différents :

Scénario 1 : Dispatching économique avec la micro-turbine à gaz et énergie solaire PV.

Scénario 2 : Dispatching économique avec la micro-turbine à gaz et énergie éolienne.

Scénario 3 : Dispatching économique avec la micro-turbine à gaz, énergie solaire PV et éolienne.

IV.5.1 Description du réseau ouest Algérien 220 kv

Le réseau Ouest Algérien de transport et de répartition 220 kV est caractérisé par :

- ✓ Un grand nombre de nœuds de charge qui sont connectés radialement aux nœuds principaux.
- ✓ L'éloignement considérable de certains nœuds de consommation.
- ✓ Une distribution inadéquate des réserves de la puissance réactive pour certain nœud due à la mauvaise distribution des réserves de cette puissance malgré la Présence des générateurs.
- ✓ Un nombre insuffisant de capacités shunts.

Le schéma du réseau Ouest algérien de transport et de répartition 220 kV est représenté dans la figure IV.3.

Le réseau est composé par : 22 Nœuds, 7 nœuds de génération, le nœud de Terga (centrale type cycle combiné), Hassi Hameur, Marsat El Hadjaj (1et2), Tiaret, Relizane, Naama, et nœud d'Oujda et oued SLY par fois sont consommateurs et générateur mais les autres nœuds sont des consommateurs. Les paramètres de la fonction de coût et les limites des générateurs sont dans le tableau IV.1.

Tableau V.4 : Coefficients de coût et les limites des générateurs

JDB	$P_{G,min}$ [MW]	$P_{G,max}$ [MW]	Coefficients de coût		
			a_i [\$/MW ² h]	b_i [\$/MWh]	c_i [\$/h]
1	100	500	0.007	7.5	240
2	50	200	0.008	7	200
3	80	300	0.0085	7.5	220
4	50	150	0.009	7	200
5	50	200	0.009	9	220
6	50	120	0.0075	10	190
7	10	80	0.009	6.3	180

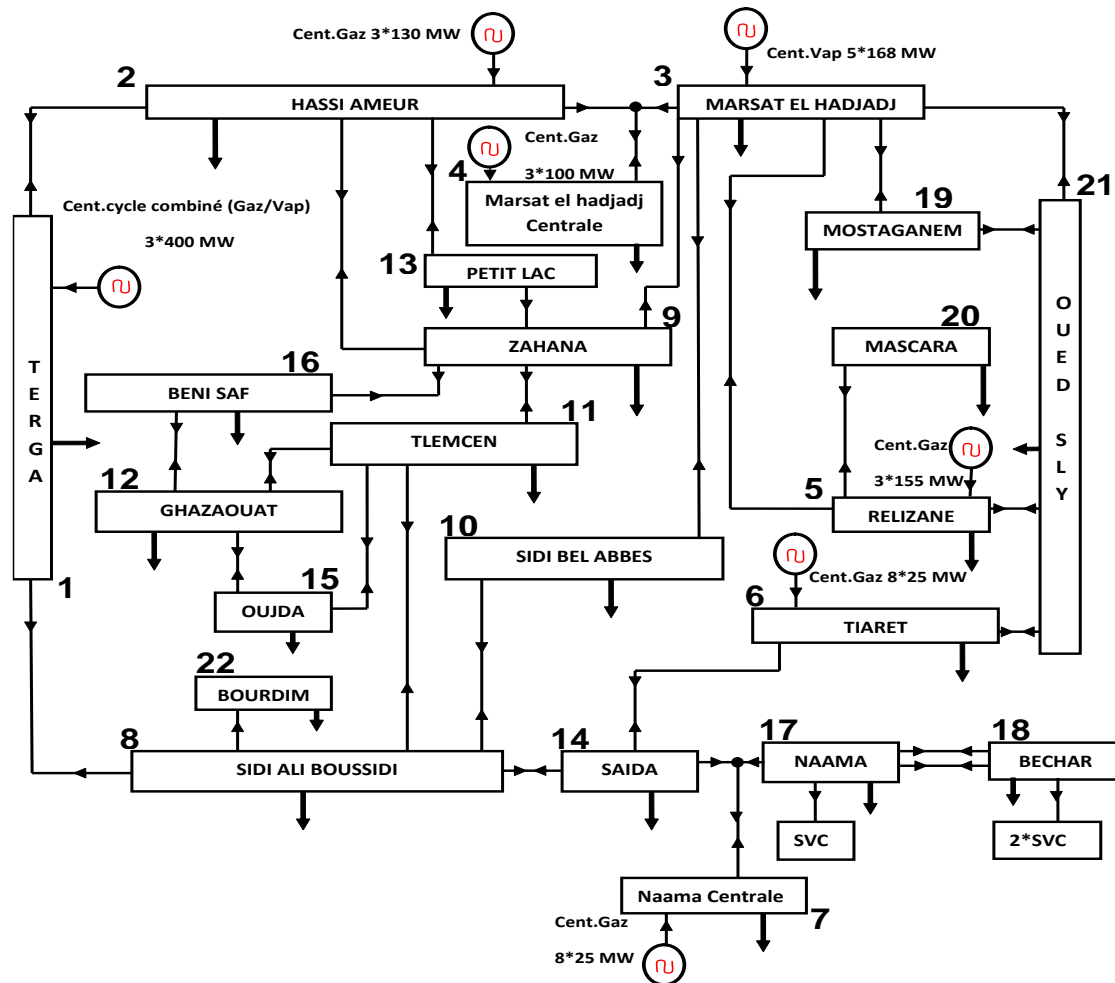


Figure IV.3 : Réseau Ouest Algérien 220 KV.

IV.5.2 Scénario 1 : Dispatching économique avec la micro-turbine à gaz et énergie solaire PV.

Pour montrer l'impact du parc solaire, il a été appliqué au problème de la répartition économique sur le réseau électrique ouest Algérien avec l'intégration d'une ferme solaire dans le nœud 7 site Naama. La ferme solaire est conçue avec 10000 modules PV qui comprend une capacité installée de 20 MW (10000*220W). Les fonctions objectives sont optimisées pour quatre saisons et sont analysées. Les résultats, y compris les valeurs optimales de la puissance produite, le coût de production et les pertes de puissance sont présentés dans le tableau IV.5.

Tableau IV.5 : Capacités de production et coûts totale du système hybride micro-turbine à gaz et énergie solaire en utilisant l'OEP

Critère		Cas de base	Hiver	Printemps	Été	Automne
P_{G1} [MW]		320	320	320	320,0082	320
P_{G2} [MW]		140	132,6830	131,7946	128,6281	137,5571
P_{G3} [MW]		100	100	100	100,0406	102,7880
P_{G4} [MW]		104,6470	105,1568	98,9365	95,8882	93,6284
P_{G5} [MW]		110	110	110	110	110
P_{G6} [MW]		50	50,5685	50,1913	50	50
P_{G7} [MW]	$P_{g,Gaz}$ [MW]	80	79,9842	79,9964	80	79,9811
	$P_{g,Solaire}$ [MW]	0	5.91	12.59	18.42	9.55
P_{Perte} [MW]		48,6460	48,2542	47,5024	46,9798	47,5046
P_{Sortie} [MW]		904,6470	904,3027	903,5090	902,9853	903,5047
$P_{Demande}$ [MW]		850	850	850	850	850
Coût total [\$/h]		9548,9379	9492,3523	9425,5700	9368,9297	9455,3738

Comme illustré dans le tableau IV.5, la puissance active produite par la micro-turbine à gaz est toute dans leurs limites autorisée.

Ainsi que les résultats du tableau IV.5 et la figure IV.4 montre clairement que la contribution de la centrale solaire est considérable en été, puisque le coût de production (**9368.9297 [\$/h]**) est inférieur à celui des autres cas. En outre, le bénéfice obtenu avec l'incorporation de la ferme solaire est significatif par rapport au cas de base.

La figure IV.5 montre la caractéristique de convergence de l'algorithme OEP pour les meilleures solutions du coût total minimum. On peut voir que la convergence de l'OEP est plus rapide et efficace, ce qui démontre la capacité de l'algorithme à trouver les points optimaux dans un espace de recherche.

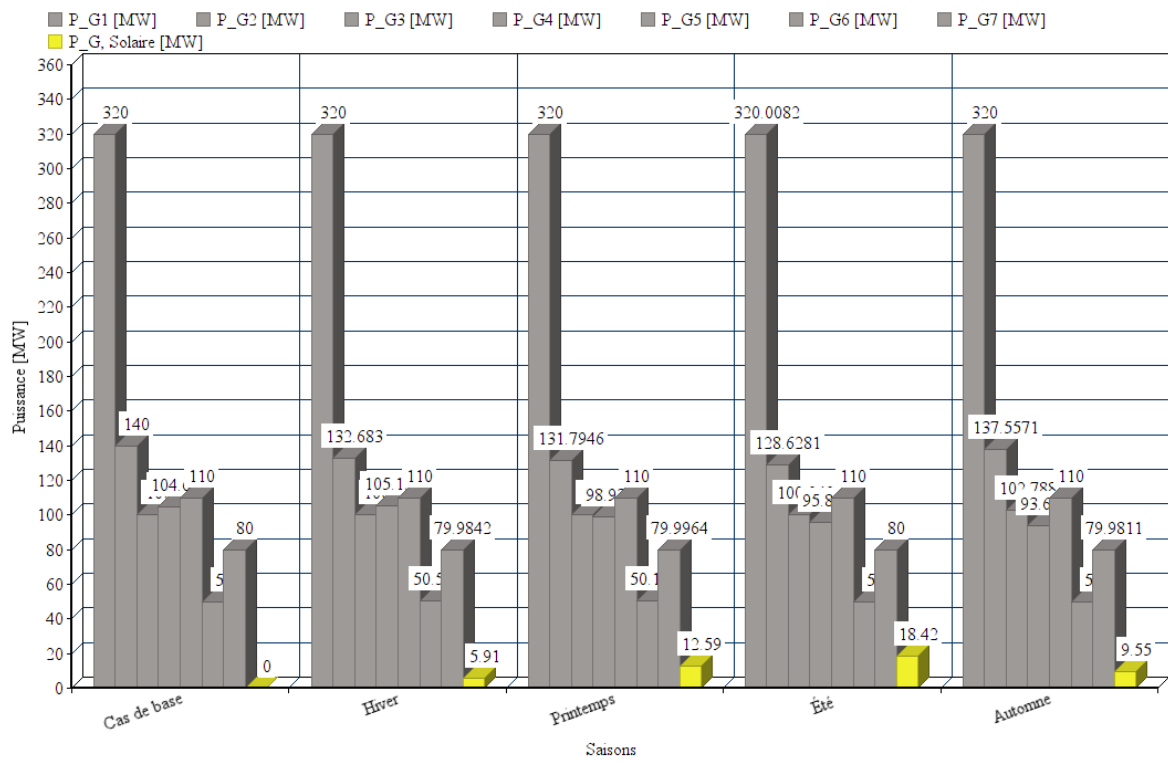
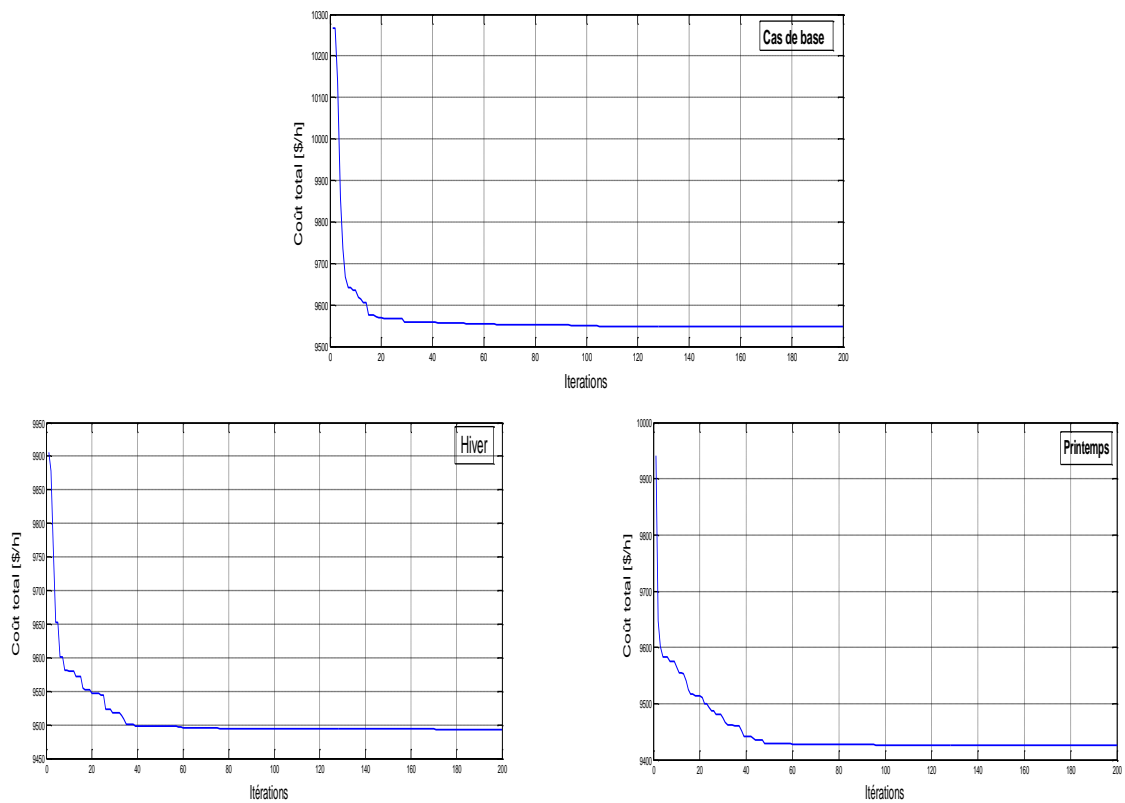


Figure IV.6 : Contribution de l'énergie solaire PV par rapport à la micro-turbine à gaz en toutes saisons.



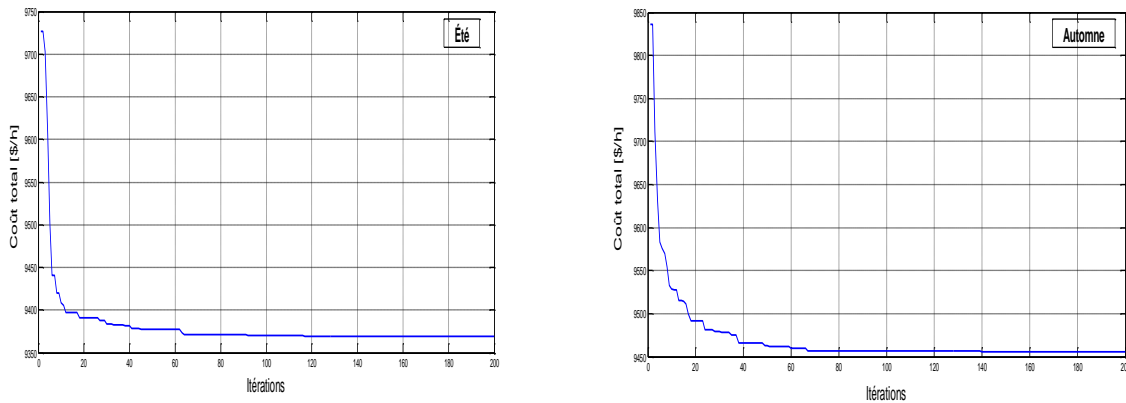


Figure IV.7 : Caractéristique de convergence de l'algorithme OEP

I.V.5.2 Scénario 2 : Dispatching économique avec la micro-turbine à gaz et énergie éolienne.

Pour montrer l'impact du parc éolien, il a été appliqué au problème de la répartition économique sur le réseau électrique ouest Algérien avec l'intégration d'une ferme éolienne dans le nœud 7 site Naama. La ferme éolienne est conçue avec 6 éoliennes qui comprennent une capacité installée de 100 MW. Les fonctions objectives sont optimisées pour quatre saisons et sont analysées. Les résultats, y compris les valeurs optimales de la puissance produite, le coût de production et les pertes de puissance sont présentés dans le tableau IV.6.

Pour évaluer l'efficacité de la centrale éolienne, une répartition économique est effectuée pour la demande actualisée et la fonction objective est optimisée et analysée sur quatre saisons. Le générateur éolien qui sera utilisé sera introduit comme une fonction de coût, mais avec une puissance déjà connue ou attendue. Nous prévoyons d'avoir un parc éolien en Mecheria, en particulier près de l'état de Naama, qui produira environ 100 [MW]. L'électricité produite et le coût total de toutes les unités sont indiqués dans le tableau IV.6.

Tableau IV.6 : Capacités de production et coûts totale du système hybride micro-turbine à gaz et énergie éolienne en utilisant l'OEP

Critère	Cas de base	Hiver	Printemps	Été	Automne
P_{G1} [MW]	320,0096	320,0106	320,0005	320	320
P_{G2} [MW]	140	90	90	113,3045	90
P_{G3} [MW]	107,5370	100,0692	100	100,0019	100
P_{G4} [MW]	96,8515	64,5034	61,6583	76,9680	68,3368

P_{G5} [MW]		110	110	110	110	110
P_{G6} [MW]		50	50	50	50,0055	50
P_{G7} [MW]	$P_{g,Gaz}$ [MW]	79,9868	72,9720	65	79,9995	74,6346
	$P_{g,Eolienne}$ [MW]	0	90	100	55	85
P_{Perte} [MW]		48,3820	41,5313	40,6588	44,2756	41,9715
P_{Sortie} [MW]		904,3851	897,5553	896,6588	900,2796	897,9715
$P_{Demande}$ [MW]		850	850	850	850	850
Coût total [\$/h]		9550,0711	8728,6426	8648,6056	9074,3026	8770,1416

La contribution à chaque saison de la centrale éolienne est plus comparée aux études de cas ci-dessus ; dans le scénario 1 avec le solaire PV, le prix a clairement diminué. Il est donc clair que l'installation d'un parc éolien au bon endroit (Mecheria) peut réduire le coût de production.

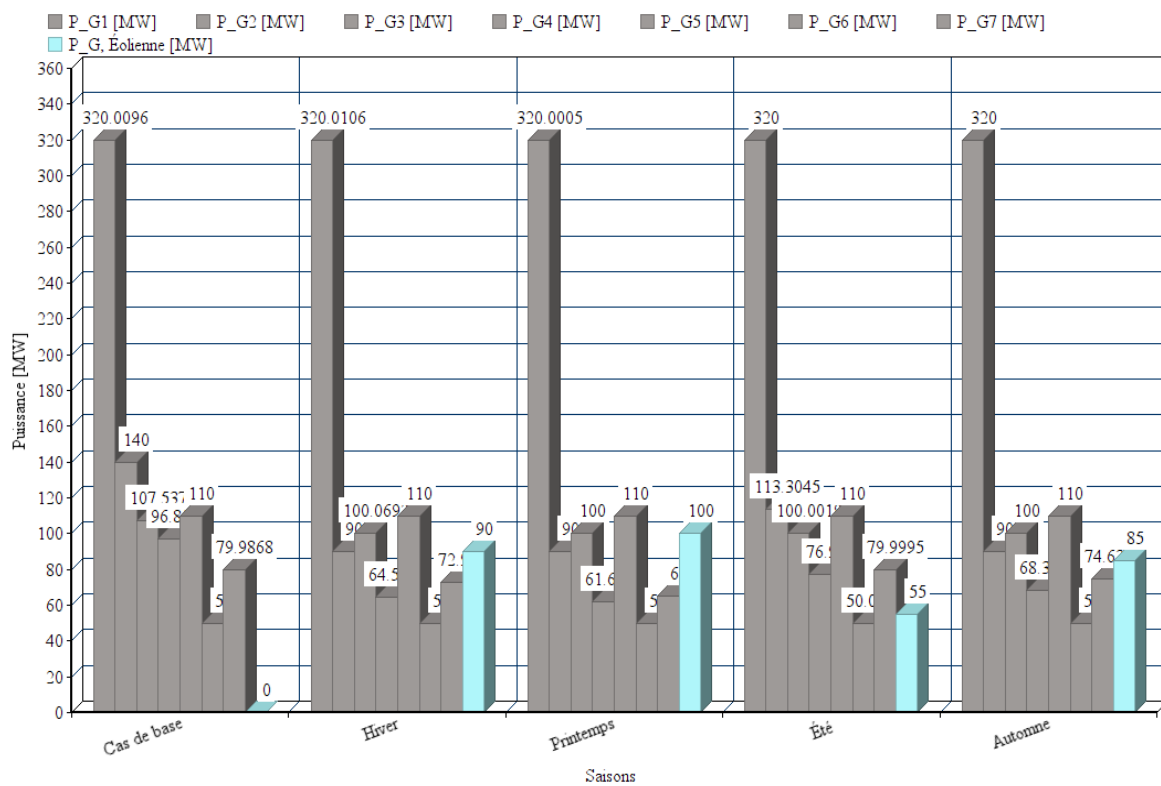


Figure IV.8 : Contribution de l'énergie éolienne par rapport à la micro-turbine à gaz en toutes saisons.

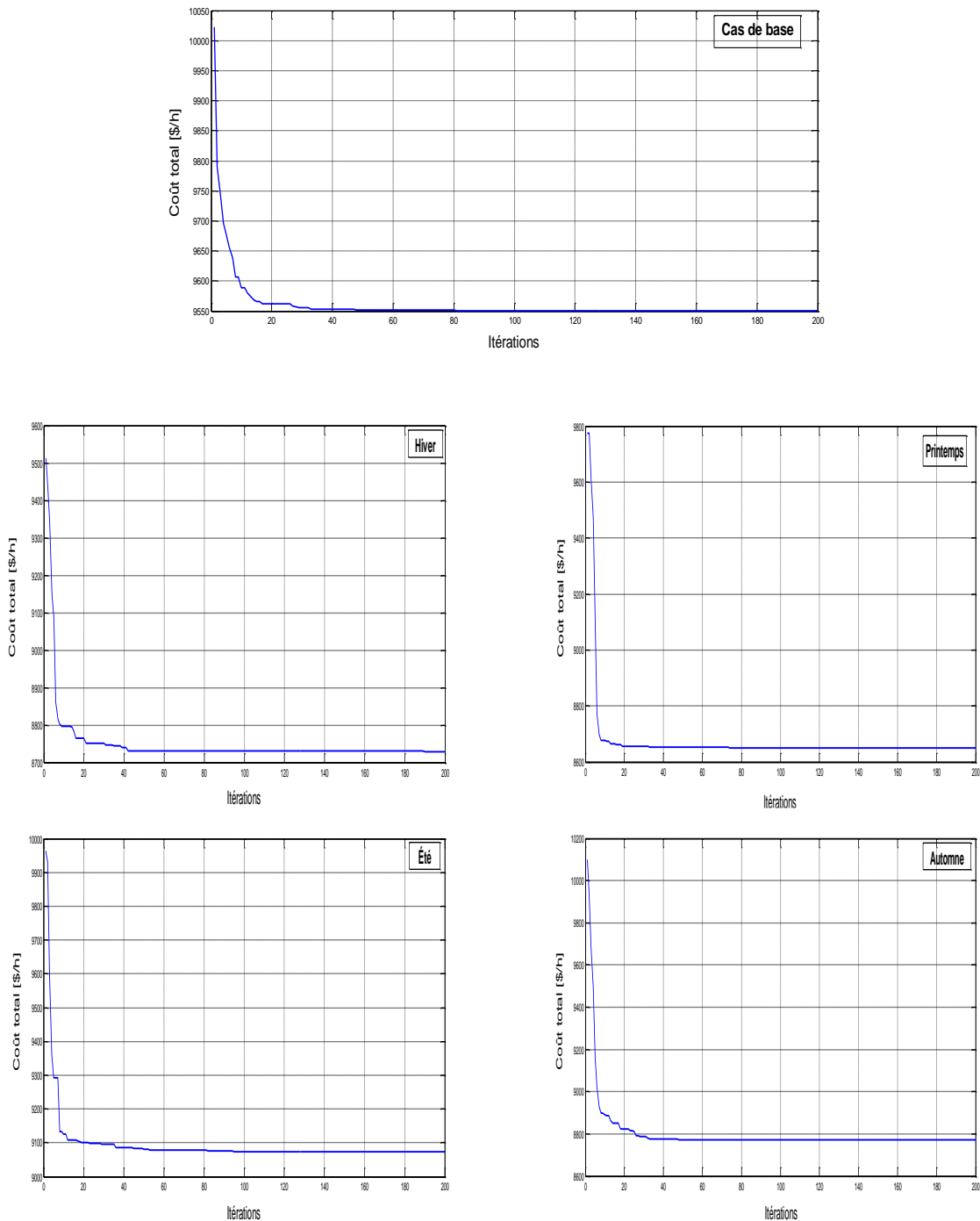


Figure IV.9 : Caractéristique de convergence de l'algorithme OEP

I.V.5.3 Scénario 3 : Dispatching économique avec la micro-turbine à gaz, énergie solaire PV et éolienne.

Pour montrer l'impact du parc solaire et éolien, il a été appliqué au problème de la répartition économique sur le réseau électrique ouest Algérien avec l'intégration d'une ferme

solaire dans le nœud 7 site Naama. La ferme solaire est conçue avec 10000 modules PV et 6 éolienne qui comprend une capacité installée de 20 MW (10000*220W) PV et pour l'éolienne 100 MW.

Les fonctions objectives sont optimisées pour quatre saisons et sont analysées. Les résultats, y compris les valeurs optimales de la puissance produite, le coût de production et les pertes de puissance sont présentés dans le tableau IV.7.

Dans ce cas, on suppose que les parcs solaires et éoliens sont combinés avec un bus de générateur et que la charge sur ce générateur particulier est réduite. L'étude de cas est réalisée à partir des études de cas similaires ci-dessus dans les scénarios 1 et 2. La comparaison des coûts pour les différentes saisons est présentée dans le tableau IV.7.

Tableau IV.7 : Capacités de production et coûts totale du système hybride micro-turbine à gaz, énergie solaire et éolien en utilisant OEP

Critère		Cas de base	Hiver	Printemps	Été	Automne
P_{G1} [MW]		320,0016	320	320	320,0009	320
P_{G2} [MW]		140	81,2367	81,7409	112,0496	81,3619
P_{G3} [MW]		100,1454	100	100	100	100
P_{G4} [MW]		104,7743	61,7127	60,2135	70,9562	63,4251
P_{G5} [MW]		110	110	110	110	110
P_{G6} [MW]		50	50,0575	50	50	50
P_{G7} [MW]	$P_{g,Gaz}$ [MW]	80	80	65	65	80
	$P_{g,Solaire}$ [MW]	0	5.91	12.59	18.42	9.55
	$P_{g,Eolienne}$ [MW]	0	90	100	55	85
P_{Perte} [MW]		48,9213	42,8939	43,5435	45,4248	43,3358
P_{Sortie} [MW]		904,9214	898,9170	899,5444	901,4268	899,3371
$P_{Demande}$ [MW]		850	850	850	850	850
Coût total [\$/h]		9551,4274	8686,4668	8568,0568	8900,8131	8699,0777

Ces résultats montrent que l'intégration d'une centrale solaire et éolienne dans le système illustre un coût optimal et est la plus économique.

Un point important à retenir dans cette étude est que le générateur éolien présente une option économiquement favorable pour ce type de charge dans l'état de Naama.

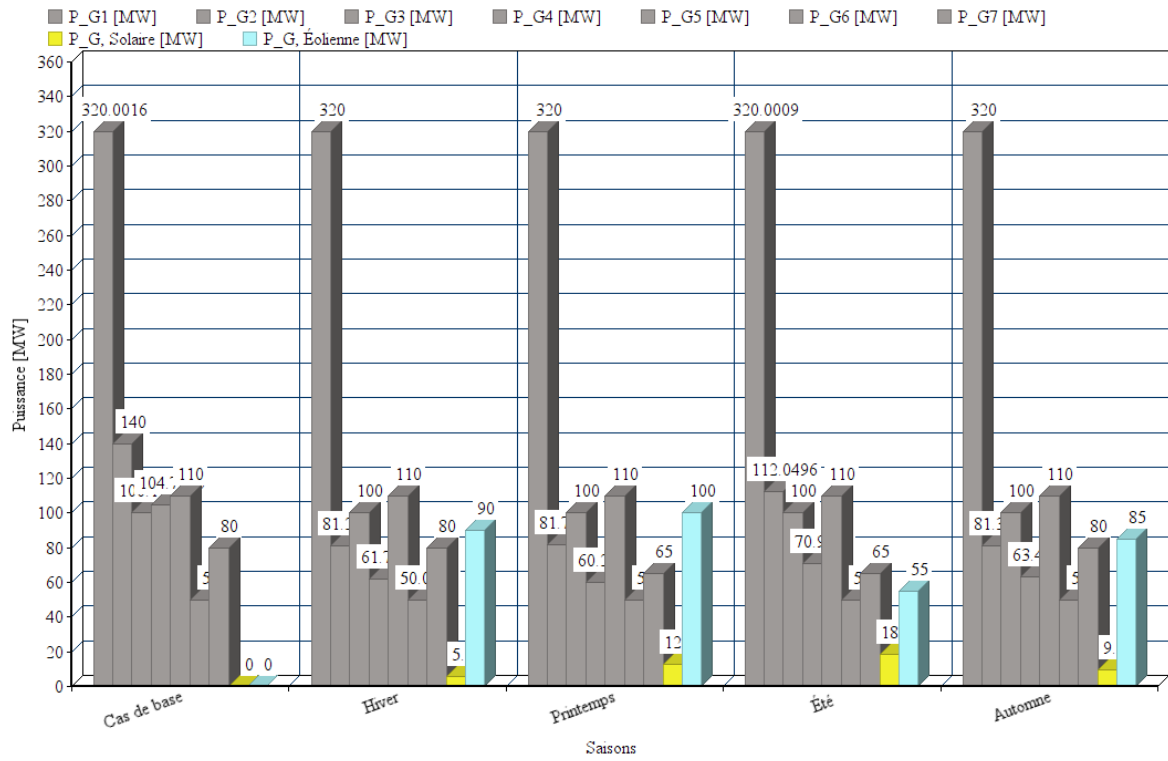
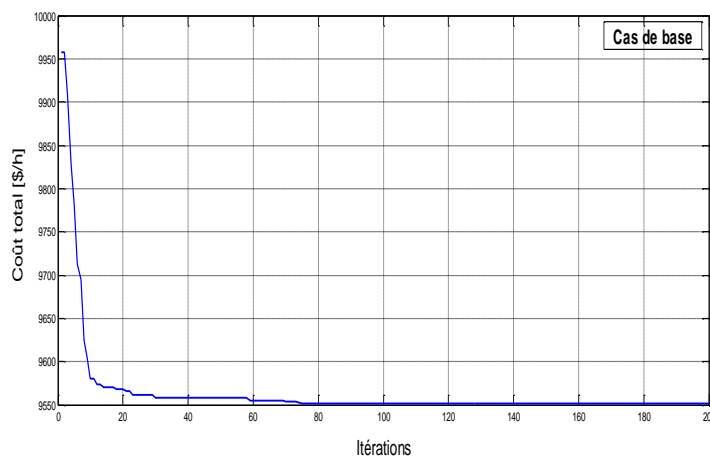


Figure IV.10 : Contribution de l'énergie solaire et éolienne par rapport à la micro-turbine à gaz en toutes saisons.



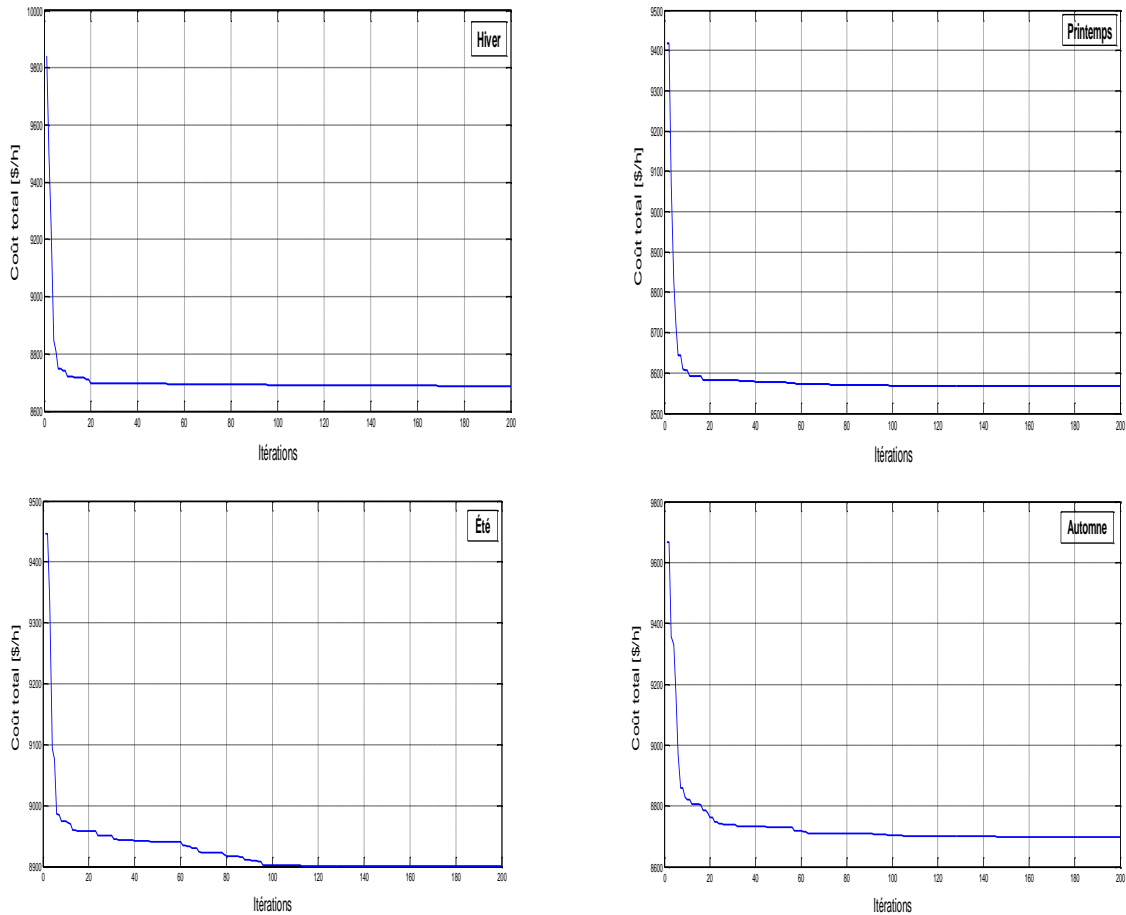


Figure IV.11 : Caractéristique de convergence de l'algorithme OEP

IV.6 Conclusion

L'étude présentée dans ce chapitre a démontré l'efficacité des énergies renouvelables, notamment l'énergie éolienne, et son impact positif sur la gestion moderne des systèmes d'énergie. De plus, l'utilisation de l'algorithme OEP pour résoudre le problème de dispatching économique du microsystème hybride autonome pour le site de Naama. Où les résultats ont montré que notre méthode permet d'obtenir de meilleures performances avec des résultats optimaux dans tous les cas, et en respectant les contraintes imposées.

Pour cela, nous venons de conclure que l'intégration des énergies renouvelables a un impact positif sur la répartition économique, ce qui réduira considérablement le coût total par rapport au même système sans énergies renouvelables.

Pour le site de Naama et pour une charge particulière, telle que citée dans cette étude, le système éolien a un impact économique plus favorable que celui de l'énergie solaire PV.

L'hybridation des centrales électriques en énergies renouvelables, permet de profiter de deux sources gratuites pour réduire les déficits du système algérien de production d'électricité. Les

résultats obtenus dans le cas étudié ont démontré que l'ajout des énergies renouvelables permet de réduire la consommation de carburant sur le site de Naama.

A decorative graphic of a scroll with a black outline and a light gray shadow. The scroll is oriented horizontally and has a vertical strip on the left side. The text is centered within the main body of the scroll.

Conclusion Générale

CONCLUSION GENERALE

L'énergie renouvelable est devenue l'amie de l'homme lorsqu'il s'agit d'avoir une production électrique sans pollution environnementale, qui le monde d'aujourd'hui tend à cette technologie car c'est une énergie gratuite et utilise des sources renouvelables pour nous faire de l'électricité que la demande d'électricité continue d'augmenter le long des différents appels des moyens d'organisation de préservation des milieux de plus en plus.

D'autre part le dispatching économique joue un rôle très important dans le domaine de l'énergie électrique, car il assure la production de l'énergie électrique avec un coût minimal. Dans notre travail, et après avoir formulé le problème du DE, nous avons résolu ce problème avec une méthode d'optimisation qui est: l'algorithme OEP à cause de ses avantages prédits par les chercheurs car il représente un équilibre entre l'exploration de l'espace de recherche et l'exploitation des meilleures solutions.

Pour concrétiser l'optimisation envisagée on a traité le problème du DE pour trois scénarios différents : le premier scénario consiste à la minimisation de la fonction du coût de production de la micro-turbine à gaz avec l'intégrations de l'énergie solaire PV, le deuxième scénario tient compte la minimisation de la fonction du coût de production de la micro-turbine à gaz avec l'intégrations de l'énergie éolienne, tandis que le troisième concerne la minimisation du coût de production de la micro-turbine à gaz avec l'intégrations de l'énergie solaire PV et éolienne.

En fin, nous avons prouvé l'efficacité de l'introduction des énergies renouvelables, notamment l'énergie solaire PV et éolienne, et son impact positif sur la gestion moderne du système électrique, tout en économisant le coût total de production et en fournissant plus d'énergie possible en fonction de la demande, sans interruption. Autrement, les résultats obtenus par la simulation reflètent la qualité de solution de l'approche utilisée OEP en matière de l'optimum trouvé et rapidité de convergence.

En conclusion, l'intégration de l'énergie renouvelable un impact positif sur la répartition économique.

Ainsi, nos perspectives sont résumées dans ce qui suit:

- On prévoit d'appliquer cette approche pour la résolution d'autres problèmes rencontrés dans le domaine d'exploitation des réseaux de transmission, comme la réduction des pertes de puissances et les émissions de gaz toxiques dans l'environnement.
- Améliorer la performance de l'algorithme utilisé.

Référence bibliographique

- [1] Wael AMOR, " Écoulement de puissance pour les réseaux de grande dimension et mal-conditionnés", MÉMOIRE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE M. Sc. A. MONTRÉAL, LE 1 AOUT 2018 UNIVERSITÉ DU QUÉBEC , 2018
- [2] SAYAH Samir, "Application de l'Intelligence Artificielle pour le Fonctionnement Optimal des Systèmes Electriques ", THÈSE Doctorat, Université Ferhat Abbas — Sétif, 2010.
- [3] Belkacem MAHDAD, "Dispatching Economique Par Matlab", livre, 13, rue des frères Boulahdour 16000 Alger-Algérie, Edtions El-Djazair — janvier 2014.
- [4] : A. Rachedi, « optimisation d'une installation photovoltaïque par la conception assisté par ordinateur CAO », thèse de Magister, Université de Tlemcen, juin 2001.
- [5] ADJOUDJ Labiba, " Contribution à l'étude de L'OPF du réseau Algérien basée sur les énergies renouvelables et les FACTS " THÈSE Doctorat, université de djillali liabes belabes 2018
- [6] Draïdi abdellah, "répartition optimale des puissances utilisant les techniques de l'intelligence artificielle" THÈSE doctorat ,11 juillet 2016
- [7] K. Srairi, B. Tarek, and A. Bensalem, "Dispatching Economique du Réseau Electrique Algérien en Présence des dispositifs Shunt FACTS avec Considération de la Pollution Belkacem Mahdad " , Biskra University.
- [8] Dale R. PATRICK et Stephen W. FARDO. Electrical distribution systems, 2nd edition. The Fairmont Press, 2009, 471 pages.
- [9] Richard E. Brown, «*Electric Power distribution reliability*», second Edition, 2009, Taylor & Francis Group, LLC, P.18.
- [10] Boris Berseneff, "Réglage de la tension dans les réseaux de distribution du futur " , Thèse de doctorat de L'Université de Grenoble, Décembre 2010
- [11] Marcelo SAGUAN ", l'analyse économique des architectures de marché électrique appli cation au market design du temps réel ".Thèse de doctorat, université Paris Sud 11 /2007.
- [12] Sihem Bouri ", Optimisation de la production et de la structure d'énergie électrique par les colonies de fourmis ". These de Doctorat Université de Jilali Liabès sidi belabess, 2007.
- [13] LABED Imen ", Dispatching Economique Dans un Système De Puissance Electrique Par L'intelligence Artificielle " , 2013
- [14] M. Fontela Garci, ", *Interaction des réseaux de transport et de distribution en présence de production décentralisé*", thèse de doctorat, l'institut polytechnique de Grenoble 2008.

- [15] L.Slimani , "optimisation de l'écoulement de puissance par une méthode de colonie de fourmis," Université de Sétif mémoire de Magister, 2006.
- [16] S.Sayah , "Application de l'intelligence artificiel pour le fonctionnement optimal des systèmes électriques," Université de Sétif Thèse de Doctorat , 2010.
- [17] Souhil mouassa ," Optimisation de l'écoulement de puissance par une méthode métaheuristique (technique des abeilles) ,"UNIVERSITE Ferhat ABBAS SETIF - (ALGERIE) mémoire de Magister En Electrotechnique ,2012
- [18] G.Habchi, 'Conceptualisation et Modélisation pour les simulations de production',UNIVERSITE DE SAVOIE document de synthèse L.F.Escudero,An inexact algorithm for the sequential ordering problem.European Jpurnal of Operational Research 37 (1988),232_253 2001.
- [19] Réseau Electrique,Encyclopédie Encarta ,2006 .
- [20] H.E. BROWN. Solution of Large Networks by Matrix Methods, Wiley, New York, 1975. 320 pages.
- [21] W. S. MEYER, V. D. ALBERTSON et N. M. PETERSON. "The Interarea Matrix: A Tie Line Flow Model for Power Pools", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Volume: PAS-90, Issue: 1, 1971, p. 36 – 45.
- [22] O. ALSAC et B. SCOTT. "Optimal load flow with steady state security", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PAS-93, No. 3, 1974, p.745–751.
- [23] Application of Artificial Bee Colony Technique for Optimal Power Flow Solution Incorporating FACTS Devices"4 th International Conference on Electrical Engineering- Université des Sciences et Technologies Houari Boumediene May 07-09, 2012
- [24] H.E. BROWN. Solution of Large Networks by Matrix Methods, Wiley, New York, 1975. 320 pages.
- [25] W. S. MEYER, V. D. ALBERTSON et N. M. PETERSON. "The Interarea Matrix: A Tie Line Flow Model for Power Pools", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Volume: PAS-90, Issue: 1, 1971, p. 36 – 45.
- [26] O. ALSAC et B. SCOTT. "Optimal load flow with steady state security", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PAS-93, No. 3, 1974, p.745–751.
- [27] H.W. DOMMEL et W.F. TINNEY. "Optimal power flow solutions", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-87, No. 10, 1968, p.1866–1876.

- [28] W. F. TINNEY et C. E. HART. "Power Flow Solution by Newton's Method". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-86, No: 11, 1967, p.1449 -1460.
- [29] O. I. ELGERD. Electric energy systems theory. Tata McGraw-Hill, 1983. 533 pages.
- [30] E. ACHA, C. R. FUERTE-ESQUIVEL, H. AMBRIZ-PE ´ REZ et C ANGELESCAMACHO. FACTS. Modelling and Simulation in Power Networks. John Wiley & Sons, Ltd. 2004, 420 pages
- [31] W.G. Tinney and C.E. Hart, "Power flow solution by Newton's method," IEEE Trans on Power Apparatus and systems, Vol. PAS-86, pp.1449- 1460, 1967.
- [32] SALHI Ahmed, "CONTRIBUTION A L'OPTIMISATION DE L'ECOULEMENT DE PUISSANCE EN UTILISANT LA LOGIQUE FLOUE ASSOCIEE AUX RESEAUX DE NEURONES (NEURO-FLOU) " Mémoire de Doctorat, Mohamed Khider-Biskra, 2015.
- [33].H.W. Dommel, W.F. Tinney, "Optimal Power Flow Solutions," IEEE Trans. on PAS, Vo1.87, pp.1866-1876, 1968.
- [34]. Carpentier, J. Optimal power flows. Int. J. Elect. Power Energy Syst. 1979, 1, 3–15.
- [35] Momoh, J.A.; Koessler, R.J.; Bond, M.S.; Stott, B.; Sun, D.; Papalexopoulos, A.; Ristanovic, P. Challenges to optimal power flow. IEEE Trans. Power Syst. 1997, 12, 444–447. [CrossRef]
- [36]. Capitanescu, F.; Martinez Ramos, J.L.; Panciatici, P.; Kirschen, D.; Platbrood, L.; Wehenkel, L. State-of-the-art challenges and future trends in security constrained optimal power flow. Elect. Power Syst. Res. 2011, 81, 1731–1741. [CrossRef]
- [37]. Low, S.H. Convex Relaxation of Optimal Power Flow: Parts I & II. IEEE Trans. Control Netw. Syst. 2014, 1, 15–27.
- [38]. Panciatici, P.; Campi, M.; Garatti, S.; Low, S.; Molzahn, D.; Sun, A.; Wehenkel, L. Advanced optimization methods for power systems. In Proceedings of the 18th Power Systems Computation Conference (PSCC), Wroclaw, Poland, 18–22 August 2014; pp. 1–18.
- [39]. Jalel Ben Hmida , Mohammad Javad Morshed , Jim Lee and Terrence Chambers. Hybrid Imperialist Competitive and Grey Wolf Algorithm to Solve Multiobjective Optimal Power Flow with Wind and Solar Units. Energies 2018, 11, 2891.
- [40]. Molzahn, D.K.; Dorfler, F.; Sandberg, H.; Low, S.H.; Chakrabarti, S.; Baldick, R.; Lavaei, J. A survey of distributed optimization and control algorithms for electric power systems. IEEE Trans. SmartGrid 2017, 8, 2941–2962. [CrossRef]
- [41]. Frank, S.; Steponavice, I.; Rebennack, S. Optimal power flow: A bibliographic survey parts I and II. Energy Syst. 2012, 3, 221–289. [CrossRef]

- [42]. Baydar, B.; Gozde, H.; Taplamacioglu, M.C.; Kucuk, A.O. Resilient Optimal Power Flow with Evolutionary Computation Methods: Short Survey. In Power Systems Resilience; Mahdavi, T.N., Ed.; Springer: Cham, Switzerland, 2019.
- [43]. Thomson, M.; Infield, D. Network power-flow analysis for a high penetration of distributed generation. *IEEE Trans. Power Syst.* 2007, 22, 1157–1162. [CrossRef]
- [44] HERMANN W. DOMMEL, WILLIAM F. TINNEY, Optimal Power Flow Solutions, recommended and approved by the Power System Engineering Committee of the IEEE Power Group for presentation at the IEEE Winter Power Meeting, New York, N.Y., 1968
- [45] Carpentier, J.: 'Optimal power flows', *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 1979, 1, (1), pp. 3–15.
- [46] Momoh, J.A., El-Hawary, M.E., Adapa, R.: 'A review of selected optimal power flow literature to 1993 Part II: Newton, linear programming and interior point methods', *IEEE Trans. Power Syst.*, 1999, 14, (1), pp. 105–111
- [47] Mukherjee, A., Mukherjee, V.: 'Solution of optimal power flow using chaotic krill herd algorithm', *Chaos Soliton. Fract.*, 2015, 78, pp. 10–21
- [48] M. Sasson, "Non linear Programming Solutions for load flow, minimum loss, and economic dispatching problems," *IEEE trans.*, Vol. Pas-88, N.4, April 1969.
- [49] Y. Himri, Arif S. Malik , A. Boudghene Stambouli , S. Himri , B. Draoui, "Review and use of the Algerian renewable energy for sustainable development," *elsevier Renewable and Sustainable Energy Reviews*, p. 1584–1591, Sep. 2009.
- [50] J. A. Momoh, R. J. Koessler, M. S. Bond, B. Stott, D. Sun, A. D. Papalexopoulos and P. Ristanovic, "Challenges to Optimal Power Flow," *Power Systems, IEEE Transactions*, vol. 12, no. 1, pp. 444-455, Feb. 1997.
- [51] Enhanced the Environmental/Economic Dispatch problem by Incorporation the wind farms in power system " Second International Conference on Renewable Energy Bejaia, Algeria, April 15-16 - 2012
- [52] OULD NAGI Ahmed, "Optimisation de l'écoulement de puissance par algorithmes : AG et PSO-TVAC" Mémoire de Master, Université Mohamed Khider-Biskra, 2014
- [53]: 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.
- [54]: J. Yuryevich , K.P. Wong, «Evolutionary programming based optimal power flow algorithm » *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 14, No. 4, 1999, pp. 1245 1250

- [55]: O. Alsac, J. Bright, M. Prais, B. Stott, « Further developments in LP based optimal power flow » IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 5, No. 3, August 1990, pp. 697 711.
- [56] :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.
- [57] :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.
- [58]: C. Canizares, W. Rosehart, A. Berizzi, C. Bovo, «Comparison of voltage Security constrained optimal power flow techniques » Proceedings of 2001 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vancouver, BC, Canada, Vol. 3, July 2001, pp. 1680 1685.
- [59]: M. Eghbal, N. Yorino, Y. Zoka, E.E. El Araby, « Application of multi objective Evolutionary optimization algorithms to reactive power planning problem »,IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Vol. 4, No. 5, August 2009, pp. 625 632.
- [60] FALIT Imane SHEIKH KHASSEM Ayman, "Calcul du dispatching économique d'un réseau d'énergie électrique avec intégration des énergies renouvelables" Mémoire Master, Université Tahar Moulay-Saïda, 2017
- [61]. J. Cai, Q. Li, L. Li, H. Peng, and Y. Yang, "A hybrid FCASO-SQP method for solving the economic dispatch problems with valve-point effects," *Energy*, vol. 38, no. 1, pp. 346–353, 2012.
- [62] DRAIDI Abdellah, "Répartition économique de l'énergie électrique utilisant le Techniques d'intelligence artificielle" Mémoire de Magistère, Université MentouriConstantine, 2010.
- [63] GUEDIRI Abdelkarim, "Application de la logique floue pour l'optimisation de l'écoulement de puissance" Mémoire de Magister, Université Larbi Ben M'hidi-Oum El Bouaghi, 2009.
- [64] SEGHEIR Tayeb. MOGDAD Med Tayeb, "Résolution de dispatching économique par la méthode pattern search" Mémoire de Master, Université d'EL-Oued, 2011.
- [65] Slimani Linda « Contribution à l'application de l'optimisation par des méthodes metaheuristiques à l'écoulement de puissance optimal dans un environnement de l'électricité déréglé » Thèse de doctorat université de Batna 12/2009.
- [66] M. Huneault and F. D. Galiana, "A Survey of the Optimal Power Flow Literature", IEEE Trans on Power Systems, Vol. 6, No. 2, pp. 762-770, May 1991.
- [67] AROUA Mohammd Hamza. BOUGHAZALA Mohammd Salah. TAMER Smail, "dispatching Economique optimale par la méthode swarm) PSO(" Mémoire Master, Universitaire d'El-Oued, 2009.

- [68] FRIDJAT Zineddine. TAMMA Mohammed Elhadi, "Application des algorithmes génétiques à l'optimisation de la production énergie active dans réseau électrique" Mémoire de Master, Université d'EL-Oued, 2014.
- [69] EkbalAbd Al-Majeed , Designing Program for Economic dispatch of Operation Power System,University of Technology, Baghdad, 2011.
- [70] E. A. Feigenbaum and J. Feldman. (Edirors). Computersand thought. McGraw-Hill Inc. pp.192. New York, 1963.
- [71] E.H.L. AARTS, J.K. LENSTRA (Eds.), Local search in combinatorial optimization, John Wiley & Sons, 1997.
- [72] D. Corne, M. Dorigo and F. Glover, editors, New Ideas in Optimization, McGraw-Hill, 11- 32
- [73] BOUIRI Sihem, Optimisation de la production et de la structure d'énergie électrique par les colonies de fourmis Mémoire de Doctorat, Université Djillali Liabès-Sidi Bel Abbès, 2007.
- [74] Gardeux V., Conception d'heuristiques d'optimisation pour les problèmes de grande dimension : application à l'analyse de données de puces à ADN, Thèse de doctorat, Université Paris-Est, 2011
- [75] Jozefowicz N., Optimisation combinatoire multi-objectif : des méthodes aux problèmes, de la Terre à (presque) la Lune, Habilitation à diriger des recherches, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2013
- [76] ABDELHAKEM-KORIDAK Lahouari, Contribution à l'Etude des Coûts Optimaux de la Production d'Energie Electrique et des Emissions de Gaz par les Algorithmes Génétiques Mémoire deDoctorat, Université Mohamed Boudiaf-Oran, 2010.
- [77] OTHMANI Imed, "Optimisation multicritère fondement et concept" Mémoire de doctorat, Université Joseph Fourier de Grenoble, 1998.
- [78] ALAIN Berro,Optimisation multiobjectif et stratégies d'évolution en environnement dynamique Mémoire de Doctorat, Université des sciences Sociales- Toulouse I, 2001.
- [79] A. Schrijver. Theory of Linear and Integer Programming. Wiley, 1998.
- [80] J. Nocedal and S. J. Wright. Numerical Optimization. Springer, 2000.
- [81] D. P. Bertsekas. Dynamic Programming and Optimal Control. Athena Scientific, 1995.
- [82] J. A. Nelder and R. Mead. "A Simplex Method for Function Minimization". The Computer Journal, Vol. 7, No. 4, pp. 308–313, 1965.
- [83] M. Avriel. Nonlinear Programming : Analysis and Methods. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1976.

- [84] F. Glover. "Future paths for integer programming and links to artificial intelligence". Computers and Operations Research, Vol. 13, pp. 533–549, 1986
- [85] Y. Collette and P. Siarry. Optimisation multiobjectif. Eyrolles, 2002.
- [86] D. E. Goldberg and J. Richardson. "Genetic algorithms with sharing for multimodal function optimization". In : Proceedings of the Second International Conference on Genetic Algorithms on Genetic algorithms and their application, pp. 41–49, Lawrence Erlbaum Associates., Mahwah, NJ, USA, 1987.
- [87] J. Branke. Evolutionary Optimization in Dynamic Environments. Kluwer Academic, 2002.
- [88] E. G. Talbi. "A Taxonomy of Hybrid Metaheuristics". Journal of Heuristics, Vol. 8, No. 5, pp. 541–564, 2002.
- [89] M. Benarous «dispatching économique des puissances actives par les algorithmes de fourmis» Mémoire de master ,Université Hassiba Ben Bouali Chlef 2008.
- [90] Yahiaoui. M « Contrôle optimal des puissances réactives et des tensions dans un réseau d'énergie électrique par dispositifs FACTS » Mémoire de doctorat, Université d'Oran 2014.
- [91] Mr. Mahdad belkacem «Contrôle optimisation de l'écoulement de puissance par algorithmes: AGet PSTVAC» Mémoire de master ,Université Mohamed Khider Biskra.
- [92] F. Heppner, U. Grenander. A stochastic nonlinear model for coordinated bird flocks. In: S Krasner (eds) The ubiquity of chaos. AAAS Publications, Washington, DC.
- [93] Yann Coreen, « Perfectionnement d'un algorithme adaptatif d'Optimisation par Essaim Particulaire. Applications en génie médical et en électronique», thèse doctorat en sciences de l'ingénieur, Université Paris 12 VAL DE MARNE, 2008.
- [94] Rehouma Ridha, Maamra Ali «Commande Optimisée du GADA Par La Méthode Essaim de Particules (PSO) » Mémoire de master ,Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued, Juin 2015.
- [95] Abbas EL DOR , " des algorithmes d'Optimisation par Essaim Particulaire " THÈSE de doctorat université paris-est école ,2012
- [96] Ioan Cristian TRELEA, "L'essaim de particule vu comme un système dynamique : convergence et choix des paramètres", conf, L'OEP essaim de particules, Paris, 2003.
- [97] J. Kennedy and R. Eberhart, "A Particle Swarm Optimization", Proceedings of IEEE Inter conf on Neural Networks, Vol. IV, pp. 1942- 1948, Perth, Australia, 1995.
- [98] Sangroya, Deepak, et Jogendra Kumar Nayak. "Développement de l'énergie éolienne en Inde". International Journal of Renewable Energy Research (IJRER) 5.1 (2015) : 1-13.

- [99] S.Dileep Kumar Varma, Y.P.Obulesh, Ch.Saibabu, "Un cadre de référence synchrone amélioré Controller Based Dynamic Voltage Restorer for Grid Connected Wind Energy System" International Journal of Renewable Energy Research (IJRER), S. D. K. Varma et al, Vol.6, No.3, 2016.
- [100] Ouahiba Guerri, " L'Energie éolienne en Algérie : Un bref aperçu " Bulletin des Energies Renouvelables - N° 21 2011, Centre de Développement des Energies Renouvelables, o_guerri@cder.dz
- [101] R. Arul, G. Ravi, S. Velusami, "Non-convex Economic Dispatch with Heuristic Load Patterns using Harmony Search Algorithm", International Journal of Computer Applications (0975 - 8887) Volume 16- No.1, février 2011.
- [102] O. Barambones, P. Alkorta, M. De La Sen, "Wind turbine output power maximization based on sliding mode control strategy", Proc. of International Symposium on Industry Electronics (ISIE), Bari, Italy, July 2010, pp. 364-369.
- [103] Oscar Barambones, Jose Maria Gonzalez de Durana, Manuel De la Sen "Robust Speed Control For A Variable Speed Wind Turbine" International Journal of Innovative Computing, Information and Control ICIC International 2012 ISSN 1349-4198 Volume 8, Number 11, November 2012 pp. 7627-7640.
- [104] Lingfeng Wang, Chanan Singh, "Compromis entre le coût et la fiabilité dans la conception optimale d'un système électrique hybride autonome utilisant l'algorithme PSO à intégration mixte", Département de génie électrique et informatique de l'Université Texas A&M. 2007.
- [105] A. Rini Ann Jerin, K. Palanisamy, S. Umashankar, A.D. Thirumoorthy "Power Quality Improvement of Grid Connected Wind Farms through Voltage Restoration Using Dynamic Voltage Restorer" International Journal of Renewable Energy Research (IJRER), Vol. 6, No. 1, pp. 53-60, 2016.
- [106] Saoussen Brini, Hsan Hadj Abdallah, and Abderrazak Ouali "Economic Dispatch for Power System included Wind and Solar Thermal energy" Leonardo Journal of Sciences ISSN 1583-0233 Issue 14, January-June 2009 p. 204-220.
- [107] GERGAUD O., "Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur". Thèse de Doctorat de l'École Normale Supérieure de Cachan, 2002.

[108] A. K. Pathak, M. PSharma, Mahesh Bundele, "A critical review of voltage and reactive power management of wind farms", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 51, pp. 460-471, Nov. 2015.

[109] <http://data.cder.dz:81/#>

[110] Centre de développement des énergies renouvelables", BP. 62 Route de l'Observatoire de Bouzareah 16340 Alger, Algérie, Site Internet : <http://www.cder.dz>.

|

Annexe

MATLAB script file – pso.m

```
clc;
clear;
close all;

%% Problem Definition

model=CreateModel();

CostFunction=@(x) MyCost(x,model);          % Cost Function

nVar=model.nPlant;                          % Number of Decision Variables

VarSize=[1 nVar];                          % Size of Decision Variables Matrix

VarMin=0;                                    % Lower Bound of Variables
VarMax=1;                                    % Upper Bound of Variables

%% PSO Parameters

MaxIt=200;                                  % Maximum Number of Iterations

nPop=100;                                   % Population Size (Swarm Size)

% Constriction Coefficients
phi1=2.05;
phi2=2.05;
phi=phi1+phi2;
chi=2/(phi-2+sqrt(phi^2-4*phi));
w=chi;                                       % Inertia Weight
wdamp=1;                                    % Inertia Weight Damping Ratio
c1=chi*phi1;                                % Personal Learning Coefficient
c2=chi*phi2;                                % Global Learning Coefficient

% Velocity Limits
VelMax=0.1*(VarMax-VarMin);
VelMin=-VelMax;

%% Initialization

empty_particle.Position=[];
empty_particle.Cost=[];
empty_particle.Out=[];
empty_particle.Velocity=[];
empty_particle.Best.Position=[];
empty_particle.Best.Cost=[];
empty_particle.Best.Out=[];

particle=repmat(empty_particle,nPop,1);

BestSol.Cost=inf;

for i=1:nPop
```

```

% Initialize Position
particle(i).Position=unifrnd(VarMin,VarMax,VarSize);

% Initialize Velocity
particle(i).Velocity=zeros(VarSize);

% Evaluation
[particle(i).Cost,
particle(i).Out]=CostFunction(particle(i).Position);

% Update Personal Best
particle(i).Best.Position=particle(i).Position;
particle(i).Best.Cost=particle(i).Cost;
particle(i).Best.Out=particle(i).Out;

% Update Global Best
if particle(i).Best.Cost<BestSol.Cost

    BestSol=particle(i).Best;

end

end

BestCost=zeros(MaxIt,1);

%% PSO Main Loop
for it=1:MaxIt

    for i=1:nPop

        % Update Velocity
        particle(i).Velocity = w*particle(i).Velocity ...
            +c1*rand(VarSize).* (particle(i).Best.Position-
particle(i).Position) ...
            +c2*rand(VarSize).*(BestSol.Position-particle(i).Position);

        % Apply Velocity Limits
        particle(i).Velocity = max(particle(i).Velocity,VelMin);
        particle(i).Velocity = min(particle(i).Velocity,VelMax);

        % Update Position
        particle(i).Position = particle(i).Position +
particle(i).Velocity;

        % Velocity Mirror Effect
        IsOutside=(particle(i).Position<VarMin |
particle(i).Position>VarMax);
        particle(i).Velocity(IsOutside)=-particle(i).Velocity(IsOutside);

        % Apply Position Limits
        particle(i).Position = max(particle(i).Position,VarMin);
        particle(i).Position = min(particle(i).Position,VarMax);

        % Evaluation

```

```

    [particle(i).Cost, particle(i).Out] =
    CostFunction(particle(i).Position);

    % Update Personal Best
    if particle(i).Cost < particle(i).Best.Cost

        particle(i).Best.Position = particle(i).Position;
        particle(i).Best.Cost = particle(i).Cost;
        particle(i).Best.Out = particle(i).Out;

        % Update Global Best
        if particle(i).Best.Cost < BestSol.Cost

            BestSol = particle(i).Best;

        end

    end

end

end

BestCost(it) = BestSol.Cost;

disp(['Iteration ' num2str(it) ': Best Cost = '
num2str(BestCost(it))]);

w = w * wdamp;

end

%% Results

figure;
plot(BestCost, 'LineWidth', 2);
xlabel('Iteration');
ylabel('Best Cost');

```