



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et technologies

Électrotechnique

Réseau électrique

Réf. :.....

Présenté et soutenu par :

HATTAB Wassila

BENLARBI Wiaam fatiha

Algorithme d'optimisation inspiré de la poussée d'archimède appliqué au dispatching économique

Jury :

Pr.Naimi Djemai	Professeur	Président
Dr. SALHI Ahmed	MCA	Encadreur
Dr.Rouina Abdelhafid	MCA	Examineur

Année universitaire : 2021/2022



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et technologies

Électrotechnique

Réseau électrique

Réf. :.....

Algorithme d'optimisation inspiré de la poussée d'archimède appliqué au dispatching économique

Présentée par :

HATTAB Wassila

BENLARBI Wiaam fatiha

Avis favorable de l'encadreur : Dr.SALHI AHMED

Avis favorable du Président du Jury : Pr.NAIMI DJEMAI

Cachet et signature

Résumé

Dans ce mémoire, on a traité le problème de dispatching économique (DE) qui joue un rôle important dans la planification et l'exploitation des réseaux électriques qui consiste à répartir la puissance générée totale sur les différentes centrales électriques d'une manière que le coût total de production soit minimal tout en satisfaisant leurs contraintes pratiques de fonctionnement telles que l'effet de rampe et l'effet d'ouverture des vannes d'admission. Pour résoudre ce problème d'optimisation nous avons proposé une nouvelle méthode récemment développée, appelée algorithme d'optimisation d'Archimède (AOA) qui est conçu de l'inspirations de la loi intéressante du principe d'Archimède de la physique. Les performances de cet algorithme ont été testée et vérifiée en utilisant les fameux réseaux électriques de test 6,15 et 40 unités de production. Les résultats obtenus par AOA ont été comparés avec ceux obtenus par des méthodes méta-heuristiques appliquées dans la littérature.

Mots clés :

Dispatching économique; contraintes pratiques; l'effet de rampe; l'effet d'ouverture des vannes; algorithme d'optimisation d'Archimède(AOA); méta-heuristiques.

ملخص

في هذا البحث عالجتنا مسألة التوزيع الاقتصادي للطاقة الكهربائية التي تلعب دوراً مهماً في التخطيط وتشغيل الشبكات الكهربائية والتي تتلخص في توزيع الطاقة الإجمالية المولدة على مختلف المحطات الكهربائية بطريقة تقلل التكلفة الإجمالية للإنتاج وذلك مع مراعاة القيود العملية لتشغيل كفاءة التغيرات الديناميكية للاستطاعة الكهربائية المطلوبة وقيد فتح الصمامات. لحل مشكلة التحسين هذه اقترحنا طريقة جديدة مطورة حديثاً والتي تدعى خوارزمية دافعة أرخميدس (AOA) والتي تم تصميمها بإلهام من قانون مثير للاهتمام لمبدأ أرخميدس في الفيزياء. تم اختبار أداء هذه الخوارزمية والتحقق منه باستخدام الشبكات الكهربائية المشهورة 6, 15, و 40 وحدة إنتاج. تم مقارنة النتائج المتحصل عليها مع تلك التي استنتجت عن طريق خوارزميات أخرى.

الكلمات المفتاحية: التوزيع الاقتصادي، القيود العملية، التغيرات الديناميكية للاستطاعة الكهربائية المطلوبة، أثر فتح الصمامات، خوارزمية التحسين أرخميدس، طرق شبه عشوائية.

Remerciements

En premier lieu, je tiens à remercier « DIEU » qui m'a aidé pour que ce modeste travail soit achevé et pour que nous avons réussi.

Et tenons à remercier vivement tous ceux qui nous a orientées et nous a encouragées. Et pensons en particulier à notre encadreur SALHI AHMED, d'avoir a bien suivi et dirigé notre travail et de faire profiter de son savoir, ainsi de ses conseils, et pour toute l'aide et les remarques constructives qui d'ont d'améliorer ce travail, et qui, grâce à lui avons pu réaliser l'objectif.

Je tiens à remercier vivement Mr. Naimi Djemai professeur à l'université de Biskra pour m'avoir fait l'honneur de présider ce jury.

Je tiens à remercier Mr. Rouina Abdelhafid qui m'a fait l'honneur de participer à ce jury en qualité d'examineur de mémoire.

Je tiens à exprimer toute ma profonde gratitude à Mlle Saadi Aicha, pour son aide précieuse et ses conseils.

Et grands remercient aussi à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation à l'institut d'électrotechnique de Biskra.

Je tiens à remercier spécialement et énormément, ma famille qui m'ont toujours soutenue et encouragée pendant toute la durée de mes études.

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à mes amis spécialement « Belhaserouf A , Zeroual A N , Slimani A et Sliman N » et toute autre personne qui m'a aidé de près ou de loin pour réaliser ce travail.

Table des matières

Table des matières	I
Liste des figures	III
Liste des tableaux	V
Introduction générale	1
1 Production de l'énergie électrique	3
1.1 Introduction	4
1.2 Composants d'un système de l'énergie électrique	4
1.3 Production de l'énergie électrique	5
1.4 Principe de fonctionnement d'une centrale électrique	6
1.5 Types des centrales de production d'énergie électrique	6
1.5.1 Centrales thermique classiques	7
1.5.1.1 Les centrales à combustible fossile	7
1.5.1.2 Les centrales nucléaires	7
1.5.2 Energie renouvelable	9
1.5.2.1 Les centrales solaires ou photovoltaïque	9
1.5.2.2 Les centrales éoliennes	9
1.5.2.3 Les centrales hydrauliques	10
1.5.2.4 Les centrales biomasse	11
1.6 Stratégie du fonctionnement des Centrales électriques	13
1.6.1 Unités de charge de base	13
1.6.2 Unités intermédiaires	13
1.6.3 Unités de pointe	14
1.6.4 Unités de réserve	14
1.7 La consommation	14
1.7.1 Fluctuations de la consommation :	14
1.7.2 Prévision de la consommation	16
1.8 La production de l'électricité en Algérie	17
1.9 Principaux producteurs d'électricite en ALGERIE	17
1.10 Réorganisation du groupe SONELGAZ	18
1.11 conclusion	18

2	Résolution le problème de dispatching économique	19
2.1	Introduction	20
2.2	Définition du dispatching économique	20
2.3	Problème de Dispatching économique	20
2.3.1	Les contraintes pratiques	21
2.3.1.1	Effet des Zones interdites	21
2.3.1.2	Effet d'ouverture des vannes	22
2.3.1.3	Effet du multi-combustibles	23
2.3.1.4	Effet des Rampes de générateur	24
2.4	Formulation mathématique de (DE)	25
2.4.1	Fonction objective	25
2.4.2	Les contraintes	27
2.4.2.1	Contraintes d'égalité	27
2.4.2.2	Contrainte d'inégalité	27
2.5	Résolution le problème du DE	28
2.5.1	Les méthodes d'optimisation mathématique (exacte)	28
2.5.1.1	Méthode du gradient	29
2.5.1.2	Méthode de Newton	29
2.5.1.3	Méthode du point intérieur	29
2.5.2	Les méthodes d'optimisation approchées	30
2.5.2.1	Méthodes heuristiques	30
2.5.2.2	Méthodes méta-heuristique	30
2.5.3	Les méthodes hybrides	34
2.6	Conclusion	35
3	L'Algorithme d'optimisation d'Archimède (AOA)	36
3.1	Intoduction	37
3.2	Le principe de AOA	37
3.3	Algorithme d'optimisation d'Archimède (AOA)	39
3.3.1	Les étapes de l'algorithmiques	39
3.4	Le pseudo code de l'algorithme AOA	45
3.5	Conclusion	45
4	Résultats de l'application de AOA au dispatching économique	47
4.1	Introduction	48
4.2	Application de l'algorithme AOA sur un système 6 unités sans effets de rampe et de zones interdites	48
4.2.1	Analyse paramétrique sur un système 6 unités	52
4.3	Application de l'algorithme AOA sur un système 15 unités	53
4.3.1	Système de 15 unités sans effets de rampe et de zones interdites	54
4.3.2	Système de 15 unités avec effets de rampe et de zones interdites	58
4.4	Application de l'algorithme AOA sur un système 40 unités	62
4.5	Conclusion	67

Liste des figures

1.1	Schéma de principe d'un système production transport de l'électricité [2].	5
1.2	Schéma d'un alternateur.	6
1.3	Principe de fonctionnement d'une centrale thermique.	7
1.4	Principe de fonctionnement d'une centrale nucléaires.	8
1.5	Principe de fonctionnement d'une centrale photovoltaïque	9
1.6	Principe de fonctionnement d'une centrale éolienne.	10
1.7	Principe de fonctionnement d'une centrale hydraulique	11
1.8	Principe de fonctionnement d'une centrale Biomasse	12
1.9	stratégie de fonctionnement des centrales suivant la demande de puissance électrique[11]	13
1.10	Courbe de charge de la consommation énergétique en Algérie ; fluctuations journalières [13].	15
1.11	Courbe de charge de la consommation énergétique en Algérie ; fluctuations hebdomadaires [15]	15
1.12	Courbe de charge de la consommation énergétique en Algérie fluctuations saisonnières [15].	16
2.1	Caractéristique de coût avec deux zones de fonctionnement interdites.	22
2.2	Effet de l'ouverture des vannes pour une unité thermique.	23
2.3	Courbe de coût du combustible d'une unité thermique avec trois types de combustible	24
2.4	Limites de ramp rate d'une unité de production	25
2.5	La variation du coût en fonction de la puissance générée.	26
2.6	Schéma de classification des méthodes d'optimisation.	28
2.7	Groupe de : (a) poissons, (b) oiseaux [35]	32
2.8	Les niveaux d'organisation d'un AG	33
3.1	Eau déplacée lorsqu'un objet est immergé dans le fluide.	38
3.2	Différents objets immergés dans le même fluide.	39
4.1	Répartition optimale de la puissance totale générée avec visualisation des limites min et max de génération.	49
4.2	Variation de coût optimal pour 50 essais.	49
4.3	Caractéristique de convergence de l'algorithme AOA.	50
4.4	Comparaison des résultats de système de six unités.	51

4.5	Répartition optimale de la puissance totale générée avec visualisation des limites min et max de génération. Cas de système à 15 unités sans effets de rampe et sans zones interdites.	54
4.6	Variation de coût optimal pour 50 essais. Cas de système à 15 unités sans effets de rampe et sans zones interdites	55
4.7	Caractéristique de convergence de l'algorithme AOA. Cas de système à 15 unités sans effets de rampe et sans zones interdites.	55
4.8	Comparaison des résultats de système de 15 unités. Cas sans effets de rampe et zones interdites pour 50 essais	56
4.9	Répartition optimale de la puissance totale générée avec visualisation des limites min et max de génération. Cas de système à 15 unités avec effets de rampe et zones interdites.	58
4.10	Variation de coût optimal pour 50 essais. Cas de système à 15 unités avec effets de rampe et sans zones interdites	59
4.11	Caractéristique de convergence de l'algorithme AOA. Cas de système à 15 unités avec effets de rampe et zones interdites.	59
4.12	Comparaison des résultats de système de 15 unités. Cas avec effets de rampe et zones interdites pour 50 essais	60
4.13	Répartition optimale de la puissance totale générée avec visualisation des limites min et max de génération. Cas de système à 40 unités avec effet de vannes. . . .	62
4.14	Variation de coût optimal pour 50 essais. Cas de système à 40 unités avec effet de vannes	64
4.15	Caractéristique de convergence de l'algorithme AOA. Cas de système à 40 unités avec effet de vannes.	64
4.16	Comparaison des résultats de système de 40 unités. Cas avec effet de vannes . .	65

Liste des tableaux

4.1	Les résultats de simulation de réseau électrique 6 générateurs.	48
4.2	Résultats de système à 6 unités sans effets de rampe et de zones interdites . . .	51
4.3	Senario 01	53
4.4	Senario 02	53
4.5	Senario 03	53
4.6	Résultats de système à 15 unités sans effets de rampe et de zones interdites . . .	54
4.7	Résultats de système à 15 unités sans effets de rampe et de zones interdites . . .	57
4.8	Résultats de système à 15 unités avec effets de rampe et de zones interdites. . .	58
4.9	Résultats de système à 15 unités avec effets de rampe et de zones interdites . . .	61
4.10	Résultats de système à 40 unités avec effet de vannes	62
4.11	Valeurs des puissances générées par chaque unité. Cas de système de 40 unités avec effet d'ouverture de vannes	63
4.12	Comparaison des résultats entre différentes méthodes. Cas de système de 40 unités avec effet d'ouverture de vannes	65
..		

Acronymes et abréviations

P_{gimin}	Puissance minimale générée par l'unité i
P_{gimax}	Puissance maximale générée par l'unité i
DE	Dispatching Economique
ABC	Artificial Bee Colony algorithm
PSO	Particle Swarm Optimization
GA	Genetic Algorithm
SSA	Salpe Swarm Algorithm
AEO	Artificial Ecosystem-based Optimization
GABC	Gbest Guided Artificial Bee Colony Algorithm
CSA	Crow Search Algorithm
APSO	Adaptive Particle Swarm Optimization
PVHS	Population -Variance Harmony Search Algorithm
MPSO	Modified Particle Swarm Optimisation
AIS	Artificial Immune System
IA-EDP	Immune Algorithm for Economic Dispatch Problem
TAS	Trouble du spectre autistique
SQP	Programmation quadratique séquentielle

Introduction générale

L'ÉNERGIE électrique joue un rôle très important dans la société moderne d'aujourd'hui, son augmentation continue due à la croissance démographique et à l'industrialisation. Elle est difficilement stockable, pour cela il faut la consommer à l'instant de sa production en gardant en permanence un équilibre entre la production et la consommation. D'où la nécessité d'une répartition adéquate de l'énergie produite pour satisfaire aux besoins économiques et techniques. Il faut donc ajuster les puissances actives produites par les générateurs interconnectés dans un réseau électrique (en respectant leurs limites admissibles) afin de satisfaire la charge électrique fluctuante et les contraintes de fonctionnement liées à tous les composants du système énergétique avec un coût minimal de génération, ce qui est connu sous le nom d'un problème de dispatching économique.

Le problème de dispatching économique est un problème d'optimisation qui doit être formulé mathématiquement selon les contraintes d'égalité et d'inégalité qui doivent être vérifiées selon la solution trouvée après résolution. D'après la synthèse bibliographique, nous avons constaté que plusieurs méthodes classiques et modernes ont été utilisées pour résoudre le problème du dispatching économique. Actuellement il existe des nouvelles approches méta-heuristiques, parmi lesquelles on trouve les algorithmes génétique (GA), l'algorithme d'optimisation par essaims de particules (PSO), colonie des abeilles artificielles (ABC), Salpe Swarm Algorithm (SSA), etc. Ce sont des méthodes d'optimisation globale. Leurs avantages résident dans le fait qu'elles peuvent traiter des problèmes complexes surmontant les inconvénients des méthodes classiques lorsque les fonctions objectives et les contraintes sont dérivables et continues.

Malgré les mérites des algorithmes méta-heuristiques mentionnés ci-dessus, le théorème NFL (pas de repas gratuit) (No free lunch) dit qu'aucun d'eux n'est capable de résoudre tous les problèmes d'optimisation. Cela signifie qu'il est toujours possible qu'un nouvel algorithme peut fournir des résultats de qualité supérieures par rapport à un autre pour les mêmes problèmes traités. Ce principe peut s'appliquer au dispatching économique.

C'est la motivation de ce travail, dans lequel une nouvelle technique méta heuristique d'optimisation s'est appliquée pour la première fois à la résolution du problème de dispatching économique, il s'agit de la méthode «Algorithme d'optimisation d'Archimède AOA » qui a été récemment développée en 29 Septembre 2020, C'est un algorithme méta-heuristique pour d'optimisation globale investiguée pour résoudre le problème de DE en tenant compte des complexités relatives aux contraintes pratiques des générateurs ou unités de production. L'efficacité

de la méthode proposée a été examinée sur 6, 15, et 40 unités de production selon les types de contraintes pratiques des générateurs adoptées. En outre les résultats de l'algorithme proposé ont été comparés en terme de qualité de solution aux autres méthodes performantes appliquées au DE pour les mêmes contraintes. Ce travail a pour objet :

- Appliquer l'algorithme (AOA) pour résoudre le problème de dispatching économique.
- Choisir l'environnement MATLAB comme espace de simulation.
- Elaborer une stratégie d'analyse des résultats de simulation pour juger l'efficacité de l'algorithme proposé.
- Comparer les résultats obtenus avec ceux d'autres méthodes dans le domaine pour prouver l'efficacité de l'algorithme AOA.

Afin que notre travail soit accompli et pour cerner tous les aspects de cette étude, ce mémoire est organisé comme suit :

- ❖ Le premier chapitre intitulé production de l'énergie électrique est consacré à donner une définition générale sur les systèmes d'énergie électrique et les différentes centrales de production avec leurs stratégies de fonctionnement. Comme nous exposons en bref les principaux producteurs de l'électricité en Algérie.
- ❖ Dans le deuxième chapitre, une définition de problème de DE est donnée avec sa formulation et les méthode d'optimisation destinée a sa résolution en discutant les contraintes pratiques des générateurs (l'effet de l'ouverture des vannes, les zones de fonctionnements interdite, les contraintes liées au combustibles et particulièrement la contrainte Rampe (Rampe Down, Rampe Up). Puis on traitera les différentes méthodes d'optimisation utilisées pour résoudre le problème de dispatching économique en choisissant celles de type méta-heuristiques.
- ❖ Dans le troisième chapitre nous présentons un aperçu théorique sur la méthode d'optimisation proposée AOA et les étapes suivies pour traiter le problème DE et les différentes procédures d'application.
- ❖ Dans le quatrième chapitre, l'algorithme AOA proposé est appliqué pour résoudre le problème de dispatching économique. Pour les systèmes de test 06-unités, 15-unités et 40-unités de production. Les résultats obtenus ont été comparé à ceux d'autres méthodes méta heuristiques tirées de la littérature.

Enfin, cette étude est complétée par une conclusion générale synthétisant les principaux résultats obtenus et en donnant une perspective à l'horizon de cet axe de recherche.

Chapitre 1

Production de l'énergie électrique

1.1 Introduction	3
1.2 Composants d'un système de l'énergie électrique	3
1.3 Production de l'énergie électrique	5
1.4 Principe de fonctionnement d'une centrale électrique	5
1.5 Types des centrales de production d'énergie électrique	6
1.6 Stratégie du fonctionnement des Centrales électriques	12
1.7 La consommation	13
1.8 La production de l'électricité en Algérie	15
1.9 Principaux producteurs d'électricite en ALGERIE	16
1.10 Réorganisation du groupe SONELGAZ	16
1.11 conclusion	17

1.1 Introduction

L'énergie électrique est un facteur essentiel de développement économique dans tous les pays du monde. Son importance relative s'accroît avec les progrès techniques l'industrialisation et le besoin de confort moderne. L'augmentation de sa production est synonyme d'amélioration de la qualité de vie et de création de richesse. La production d'électricité ramenée au nombre d'habitants est donc un bon indicateur permettant de mesurer les écarts de développement entre les différentes régions de monde.

Cette énergie est produite à partir d'usines appelées centrales électriques. Il est envoyé à du centre de production aux nombreux utilisateurs d'électricité, Réseau électrique pour assurer la continuité, la sécurité et la qualité de service requises.

Nous consacrons donc ce chapitre à étudier les concepts liés aux production d'énergie électrique à partir l'énergies primaires (eau, vent, soleil...).

L'alimentation en énergie électrique comporte plusieurs étapes : production, transport, distribution et utilisation de l'énergie(consommation).

Un bref rappel sur le marché de l'énergie électrique en Algérie est donné à la fin de ce chapitre.

1.2 Composants d'un système de l'énergie électrique

Un système de production-transport de l'électricité est un ensemble d'installations électriquement interconnectées, qui assure la livraison à tous les utilisateurs d'électricité des kilowatt-heures produits à partir de sources d'énergie primaire.

Au sein d'un système électrique, nous pouvons distinguer quatre étages (Figure 1.1) aux Fonctions différentes qui s'articulent entre elles :

- Le premier étage est celui de la production de l'électricité qui sera livrée aux Consommateurs. Il est constitué des centrales qui convertissent les énergies primaires en Kilowatt-heures, véritable source de l'énergie consommée par les utilisateurs d'électricité.

- Le deuxième étage est celui du réseau de transport et d'interconnexion, auquel sont raccordées les centrales de production. Cet étage assure la mise en commun et la répartition sur un très vaste territoire de toute l'électricité qui y est produite.
Le réseau de transport et d'interconnexion est le véritable noeud du système électrique. Il s'étale sur l'ensemble du territoire d'un pays, il peut être à l'échelle des territoires de plusieurs pays voisins comme les pays du Maghreb et même sur tout un continent tel que l'Europe où le réseau s'est étendu vers l'Afrique du Nord via le détroit de Gibraltar.

- Le troisième étage est celui du réseau de répartition, qui fait la liaison entre le réseau de transport et celui de la distribution. Son rôle est de desservir les consommateurs en MT tels que les usines.

- Le quatrième étage est celui des réseaux de distribution, qui sont des réseaux intermédiaires nécessaires pour desservir les millions et dizaines de millions de consommateurs, industriels ou domestiques, dont les besoins en puissance se chiffrent en quelques mégawatts.

De nombreux réseaux de distribution, alimentés chacun séparément par les réseaux de répartition, assurant l'acheminement de la puissance électrique et sa distribution vers les multitudes utilisateurs. [1]

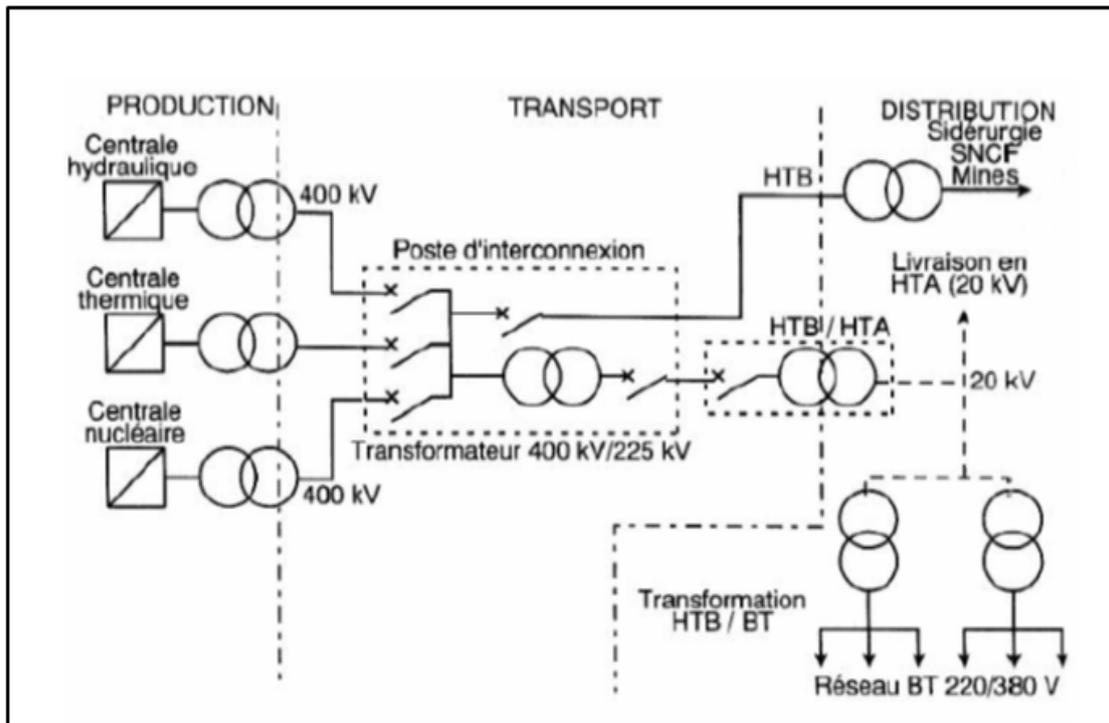


FIGURE 1.1 – Schéma de principe d'un système production transport de l'électricité [2].

1.3 Production de l'énergie électrique

L'énergie électrique est produite dans des centrales qui disposent d'éléments indispensables à la génération de courant électrique qui sont :

- ❖ Une turbine en mouvement.
- ❖ Un alternateur qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique.

1.4 Principe de fonctionnement d'une centrale électrique

La plupart des installations de production d'électricité - nucléaire, hydraulique ou les combustibles fossiles et les éoliennes - font exactement le même travail : ils convertissent l'énergie cinétique (l'énergie du mouvement) en un flux d'électrons appelé "électricité". Dans les centrales électriques, d'énormes alternateurs sont utilisés pour produire de l'électricité. Dans un alternateur, un énorme aimant appelé ROTOR tourne à l'intérieur d'un enroulement de fil de cuivre fixé sur un élément appelé STATOR (figure 1.2). La force résultante attire les électrons de leurs atomes induisant ainsi un flux d'électrons, c'est-à-dire l'électricité dans le fil de cuivre. Les électrons peuvent ensuite être envoyés par des lignes de transmission là où ils sont nécessaires.

Des roues géantes appelées turbines sont utilisées pour faire tourner les aimants à l'intérieur de l'alternateur, ce qui nécessite beaucoup d'énergie. L'énergie varie selon le type d'installation de production on utilise un flot déversant dans une centrale hydraulique, la vapeur dans une centrale nucléaire ou une centrale thermique qui brûle un combustible fossile et la force de l'air en mouvement dans une éolienne [3].

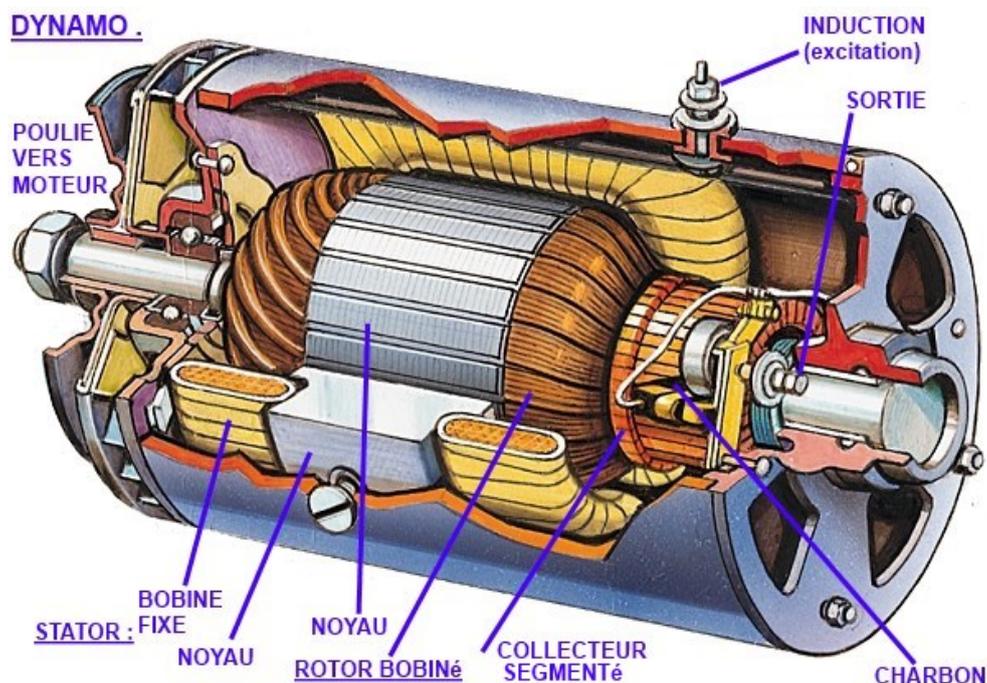


FIGURE 1.2 – Schéma d'un alternateur.

1.5 Types des centrales de production d'énergie électrique

Les centrales de production sont classées selon le type d'énergie primaire en deux catégories principales :

Centrales Thermique Classiques :

- Les centrales à combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel).

- Les centrales nucléaires.

Centrales Renouvelables :

- Les centrales solaires ou photovoltaïques.
- Les centrales hydroélectriques.
- Les centrales éoliennes.
- Les Centrales Biomasse.

1.5.1 Centrales thermique classiques

1.5.1.1 Les centrales à combustible fossile

Les centrales thermiques à vapeur brûlent du charbon, du pétrole ou du gaz naturel pour évaporer l'eau. La vapeur ainsi produite est détendue dans une turbine à vapeur.

Une turbine à vapeur convertit l'énergie cinétique du flux de vapeur d'eau en énergie mécanique, qui entraîne le turboalternateur relié à la turbine, générant l'électricité.

La vapeur se transforme alors à nouveau en eau lorsqu'elle traverse le condenseur et quitte la Chaudière pour un nouveau cycle comme été illustré dans la figure 1.3 [3].

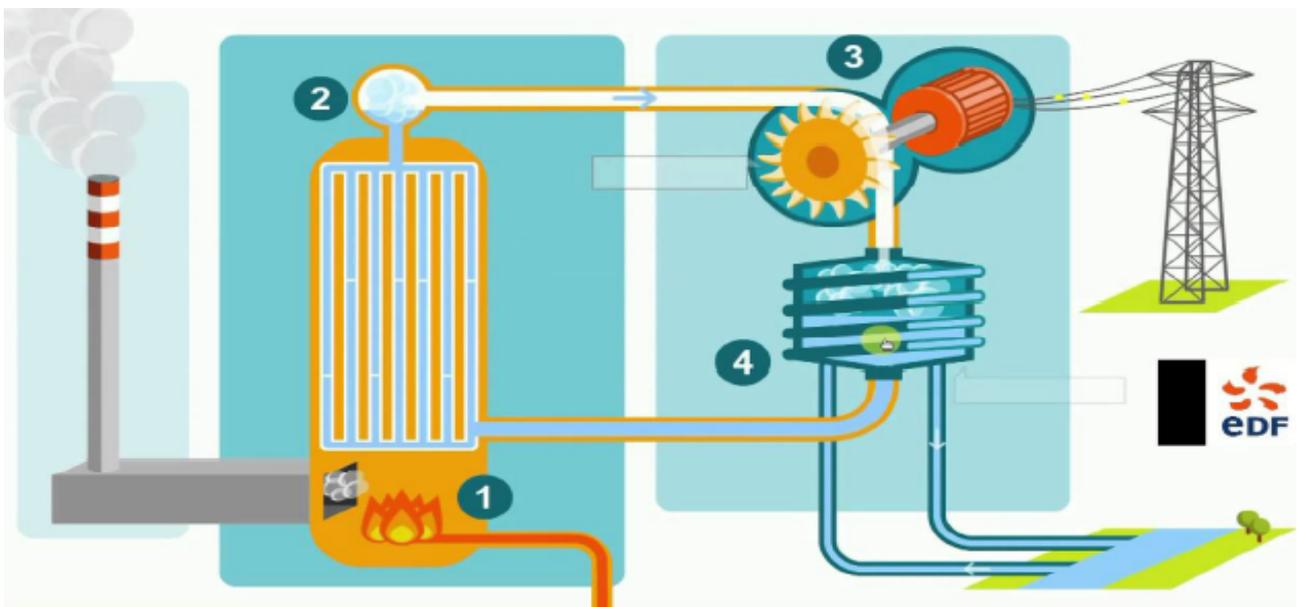


FIGURE 1.3 – Principe de fonctionnement d'une centrale thermique.

1.5.1.2 Les centrales nucléaires

Dans une centrale nucléaire, la chaleur est produite par la fission nucléaire de l'uranium. Cette chaleur produit de la vapeur qui est ensuite envoyée à une turbine qui entraîne un générateur.

La turbine est entraînée par détente de vapeur en boucle secondaire et se compose d'un corps haute pression (HP) et de plusieurs corps basse pression (BP).

Le refroidissement de la boucle de vapeur peut se faire directement, en utilisant l'eau des lacs, des rivières ou dans la boucle via des tours de refroidissement. La figure 1.4 explique le principe de fonctionnement des centrales nucléaires [4].

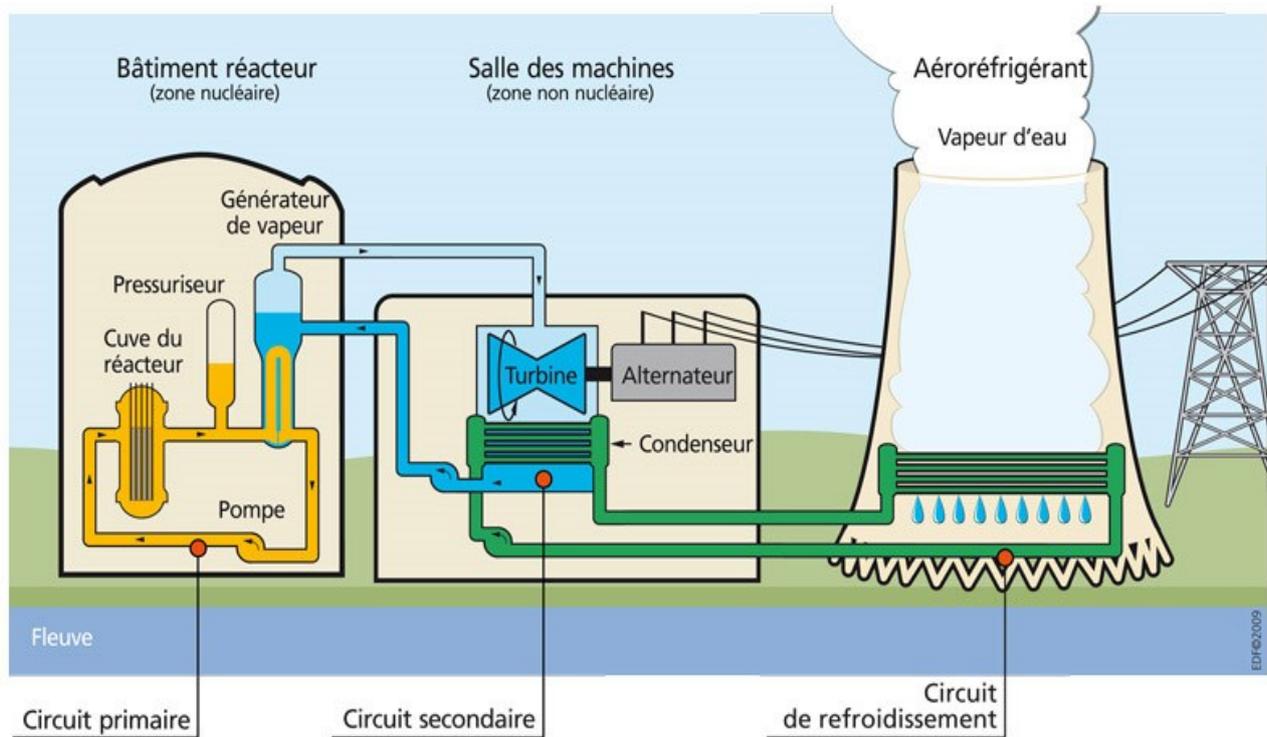


FIGURE 1.4 – Principe de fonctionnement d'une centrale nucléaires.

Les avantages et inconvénient des centrales classiques :

Les avantages :

- Qualité de la chaleur pour cogénération (haute température).
- Gros pouvoir énergétique.

Les inconvénients :

- Emissions de gaz à effet de serre et d'éléments polluants, notamment pour le fioul (SO_x, NO_x).
- Production de déchets radioactifs difficiles ou impossible à recycler.
- Besoin d'un débouché chaleur pour la cogénération.
- Usage de combustibles fossiles (raréfaction et coût de la ressource, dépendance énergétique).

1.5.2 Energie renouvelable

1.5.2.1 Les centrales solaires ou photovoltaïque

Les centrales photovoltaïques produisent de l'électricité en captant l'énergie lumineuse du soleil. Le rayonnement solaire est converti en courant continu par des cellules photovoltaïques, généralement en silicium, montées en série sur les panneaux. L'électricité continue ainsi générée est ensuite convertie en électricité alternative par des onduleurs afin d'être injectée dans le réseau de distribution puis utilisée par le consommateur final.

Les cellules photovoltaïques sont les composants électroniques de base des centrales solaires photovoltaïques. Il se compose d'une couche de matériau semi-conducteur qui libère des électrons lorsqu'il est touché par la lumière du soleil. C'est ce phénomène qui est à l'origine de la production d'électricité. Le semi-conducteur le plus utilisé est le silicium poly cristallin ou monocristallin. D'autres matériaux tels que le tellure de cadmium peut être utilisés, mais sont moins courants. Le schéma de principe de fonctionnement d'un parc cellule photovoltaïque dans la figure 1.5 [5].

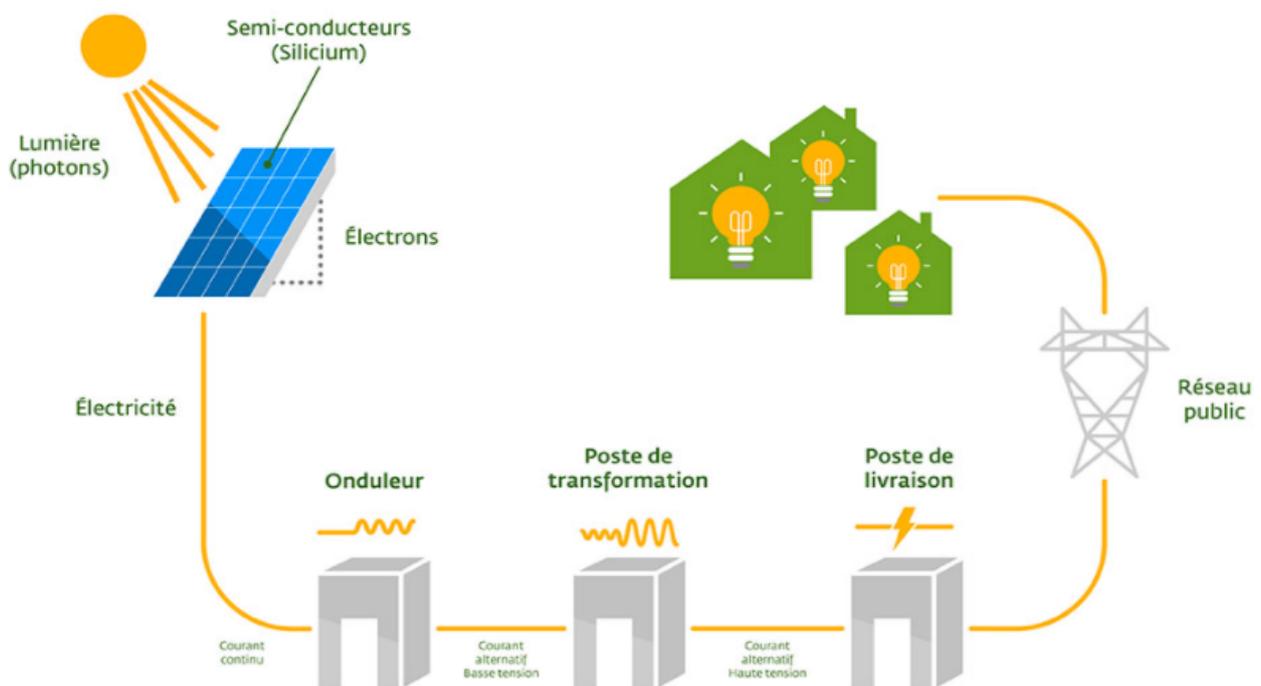


FIGURE 1.5 – Principe de fonctionnement d'une centrale photovoltaïque .

1.5.2.2 Les centrales éoliennes

Le principale source d'énergie est le vent. La technologie des éoliennes convertit l'énergie vent en électricité. Le vent déplace le rotor qui le convertit en énergie mécanique cette énergie mécanique est transmise à un générateur qui la transforme en énergie électrique [6].

L'énergie éolienne est la source d'énergie qui connaît la croissance la plus rapide au monde par rapport à d'autres types d'énergie plus traditionnels comme le nucléaire qui a augmenté de 1% ou le charbon qui n'a pas augmenté du tout dans les années 1990 [7].

La plupart des types de centrales électriques peuvent fonctionner 24 heures sur 24 mais les éoliennes produisent de l'électricité par intermittence uniquement lorsque le vent souffle à la vitesse appropriée . Le vent est généralement plus fort le soir que le jour et plus fort en hiver qu'en été.

En raison de cette limitation, on ne peut pas toujours compter sur les éoliennes pour répondre aux demandes de puissance de pointe. La figure 1.6 montre le schéma de principe de fonctionnement d'un parc éolien [3] .

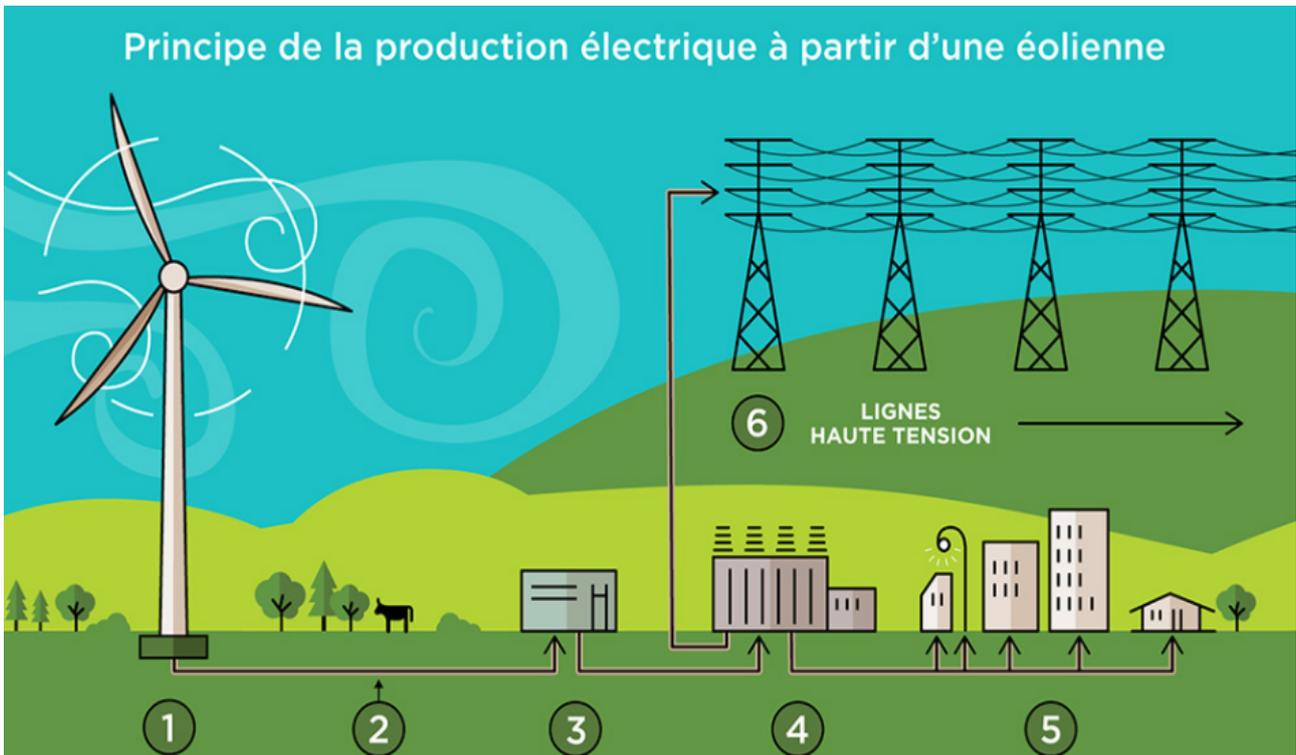


FIGURE 1.6 – Principe de fonctionnement d'une centrale éolienne.

1.5.2.3 Les centrales hydrauliques

L'énergie hydraulique implique l'utilisation de l'eau comme source d'énergie pour produire de l'électricité.

Les barrages stockent l'eau pour former des réservoirs. Nous dirigeons ensuite l'eau qui s'écoulera vers le mécanisme de production d'énergie. Le débit est contrôlé par une vanne. A la sortie du conduit, l'eau est projetée sur la turbine. La turbine est reliée à un alternateur qui convertit ensuite l'énergie mécanique de l'eau en électricité.

Les transformateurs élèvent alors la tension produite par les alternateurs qui sont transmis dans les lignes à haute et très haute tension du réseau de distribution électrique. Le schéma de principe de fonctionnement d'une centrale hydraulique est montré dans la figure 1.7 [8].

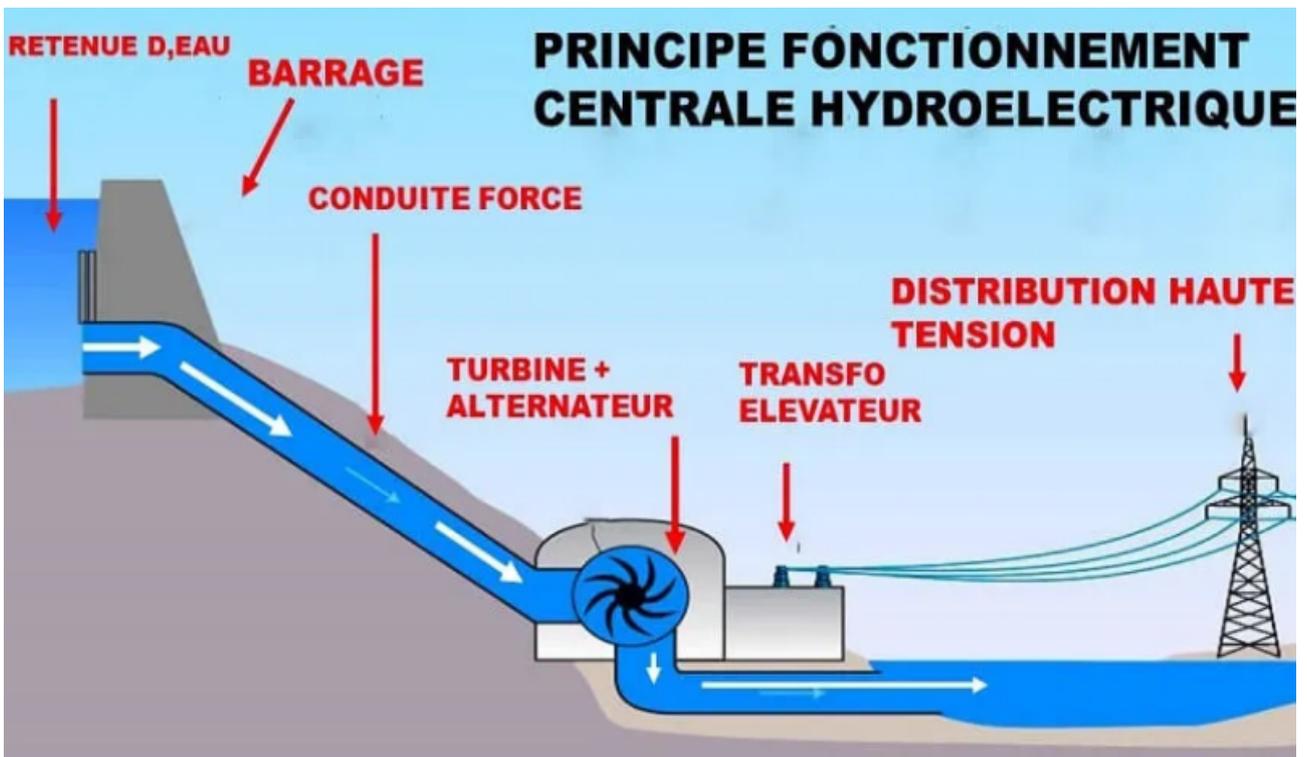


FIGURE 1.7 – Principe de fonctionnement d'une centrale hydraulique .

1.5.2.4 Les centrales biomasse

La biomasse est la première source d'énergie renouvelable dans le monde. Une centrale biomasse produit de l'électricité à partir de la vapeur d'eau qui se dégage lors de la combustion de matières végétales ou animales effectuée dans une chambre de combustion. La combustion des matières premières chauffe l'eau présente dans une chaudière, dont il se dégage de la vapeur. Cette vapeur d'eau met alors en mouvement une turbine reliée à un alternateur qui produit du courant électrique une plus petite partie de la vapeur est récupérée pour des besoins de chauffage. La figure 1.8 présente le schéma de principe de fonctionnement d'un parc de centrale Biomasse. [9].

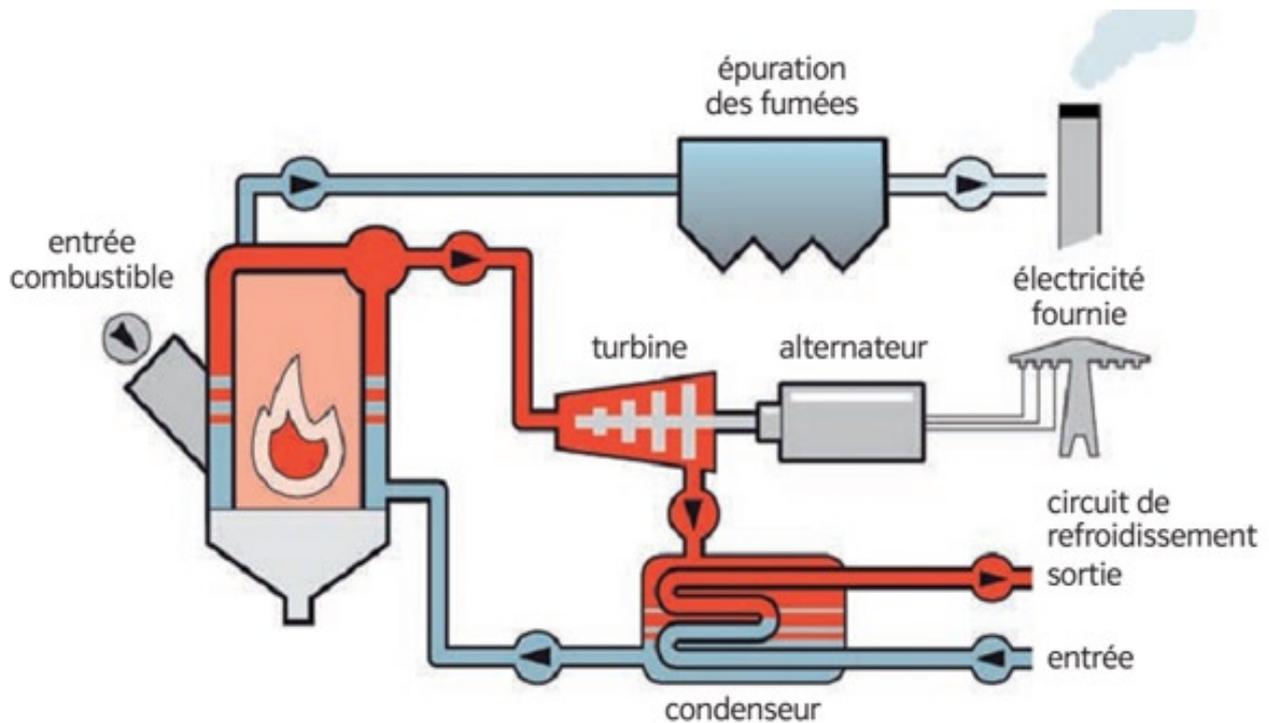


FIGURE 1.8 – Principe de fonctionnement d'une centrale Biomasse .

Les avantages et inconvénient de énergies renouvelables

Les avantages

- Les énergies renouvelables ne libèrent pas ou peu de gaz à effet de serre. C'est une énergie peu polluente.
- Ces énergies sont illimitées : le rayonnement de soleil , la force de vent et de l'eau sont des ressources inépuisables.
- Fort potentiel de développement.

Les inconvénients

- Une source d'énergie non constante.
- Une installation couteuse dans certains cas.
- Stockage difficile.
- Rendement énergétique faible.

1.6 Stratégie du fonctionnement des Centrales électriques

Il existe un nombre infini des formes de fonctionnement pour assure un chargement précis d'un système. On distingue chacune des unités de génération en désignant les puissances spécifiques de chacune d'elles en (MW) ou (MVAR). La figure 1.9 illustre comment fonctionne à 100% de leurs capacités pendant 24 heures supportant la charge de base.

Des générateurs intermédiaires commandés fonctionnent dans la plupart du temps mais pas nécessairement sous une charge totale. On procède au couplage des unités des pointes à la ligne pendant des heures chaque jour. On a besoin d'une capacité de réserve pour affronter les cas d'urgences [10].

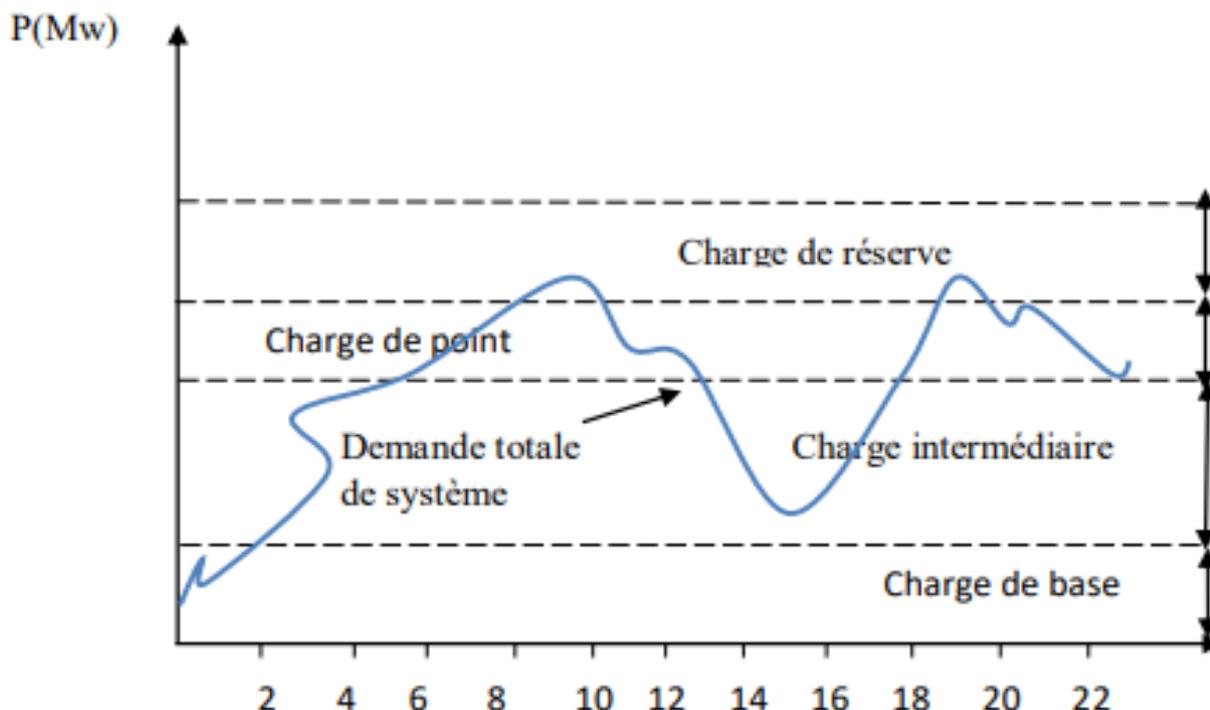


FIGURE 1.9 – stratégie de fonctionnement des centrales suivant la demande de puissance électrique[11]

1.6.1 Unités de charge de base

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

1.6.2 Unités intermédiaires

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

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

1.6.3 Unités de pointe

Les générateurs entraînés par des turbines à gaz peuvent répondre à l'augmentation de la charge avec une grande vitesse, pour cela ils sont utilisés fréquemment pendant les heures de pointes. mais lorsque on dispose des générateurs entraînés hydrauliquement ceux-ci sont préférés en premier lieu.

1.6.4 Unités de réserve

La gamme de générateurs demandée par les sociétés d'électricité peut être constitué par des générateurs conservés pour la production partielle, ou des générateurs de précaution disposés à différents niveaux [11].

1.7 La consommation

La consommation d'électricité correspond à un appel de puissance active sur le réseau pour une période de temps déterminée. Cela correspond à une consommation d'énergie. L'électricité est consommée par des différents types de consommateurs (résidentiels, commerciaux et industriels) et étant donné la pluralité de leurs utilisations individuelles de l'énergie électrique, elle varie à chaque moment. La consommation d'électricité se caractérise par :

- ❖ Ses fortes fluctuations .
- ❖ La difficulté de la prévoir de manière exacte .
- ❖ Sa faible élasticité-prix.

Pour suivre les fluctuations de la consommation, étant donnée le peu de flexibilité de la consommation, la production doit être contrôlable [12].

1.7.1 Fluctuations de la consommation :

Les fluctuations de la consommation peuvent être classées en trois catégories :

- 1) **Fluctuations infra journalières** : durant une journée, la consommation d'électricité peut fluctuer d'une façon importante comme été expliqué dans la figure 1.10. Ces fluctuations infra journalières sont récurrentes le long de l'année [12].

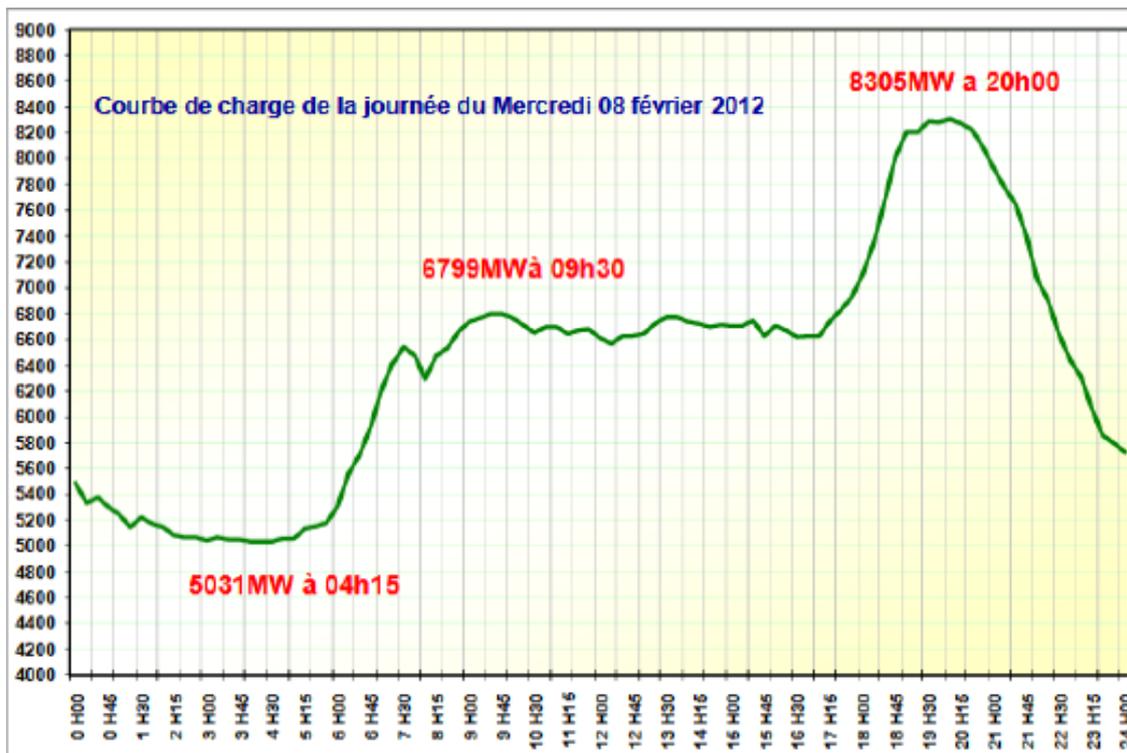


FIGURE 1.10 – Courbe de charge de la consommation énergétique en Algérie; fluctuations journalières [13].

2) **Fluctuations hebdomadaires** : jour ouvrable / week-end : les différences entre les consommations maximales entre un jour ouvrable et un jour du week-end du même mois peuvent aller jusqu'à 10 % de la demande maximale de l'année [14]. La figure (1.11) représente les fluctuations hebdomadaires

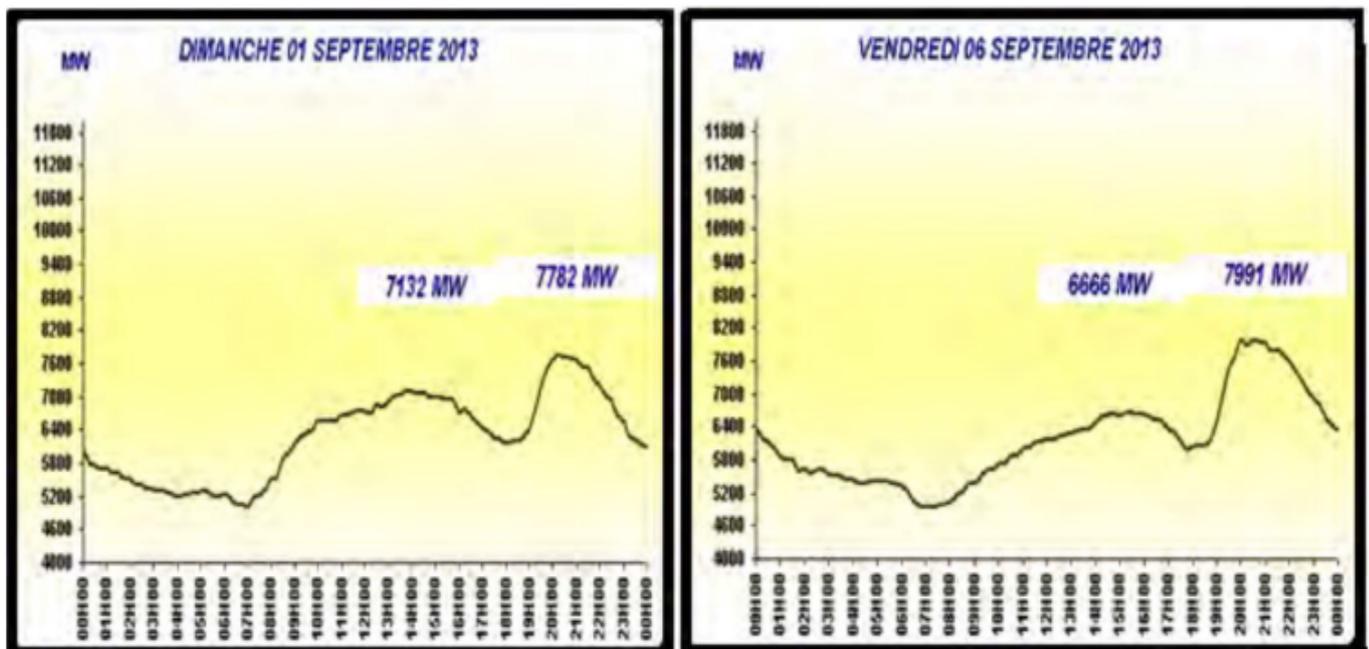


FIGURE 1.11 – Courbe de charge de la consommation énergétique en Algérie; fluctuations hebdomadaires [15]

- 3) **Fluctuations saisonnières** : jour hiver / jour été représenté respectivement dans la figure 1.12 : les différences entre les consommations (maximales et minimales) entre un jour ouvrable en été et un jour ouvrable en hiver peuvent aller jusqu'à plus de 20% de la consommation maximale [15].

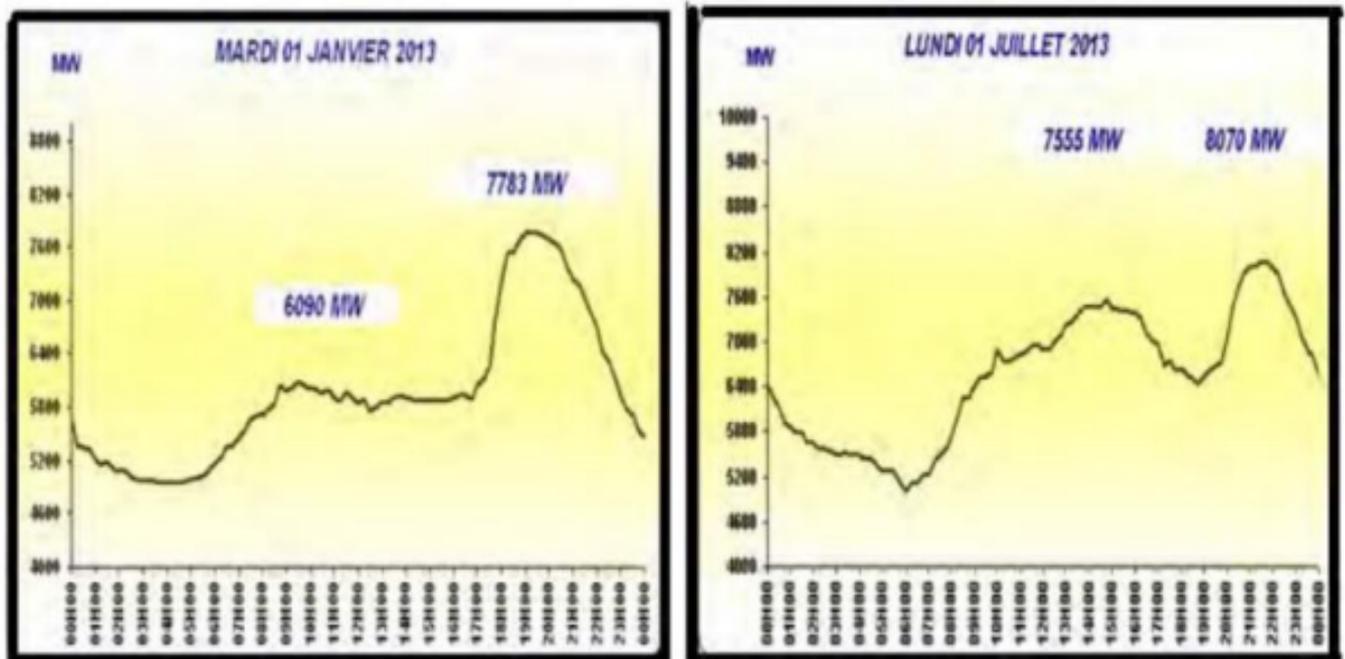


FIGURE 1.12 – Courbe de charge de la consommation énergétique en Algérie fluctuations saisonnières [15].

1.7.2 Prédiction de la consommation

Connaître la consommation de l'électricité d'une période future est important pour l'exploitation du système électrique. Pour ce faire, une multitude de variables sont traditionnellement utilisées pour expliquer et prédire le niveau de consommation d'électricité parmi lesquels : la température, l'heure de la journée, le jour de la semaine (jour ouvrable, week-end), le prix, etc. L'impact de la plupart de ces variables est lié aux conditions climatiques, aux habitudes de consommation aux rythmes de vie et au pays considéré.

Naturellement, plus la prévision est réalisée en avance par rapport au moment de la consommation, moins elle est précise, Bien que la prévision de la consommation s'affine lorsque l'on s'approche de la période prévue, il existe encore des écarts entre les prévisions faites la veille et la consommation réelle. Ces écarts, ou erreurs de prévision, peuvent provenir des erreurs de prévision des variables explicatives (Température, nébulosité) ou/et des simplifications du modèle de prévision [14].

1.8 La production de l'électricité en Algérie

L'énergie électrique en Algérie est générée en grande majorité par des turbines à gaz et des turbines à vapeur. Elles constituent les moyens par excellence de production d'électricité du fait du développement des technologies de pointe. Cela se justifie aussi par leur rapidité de démarrage et leurs faibles coûts d'investissement. L'Algérie s'est investie dans l'encouragement de la production de l'électricité à partir de sources renouvelables. Où la production de l'électricité a dépassé 61.822 gigawatts/heure fin septembre 2021, en hausse de 8,8 % par rapport à la production durant la même période de l'année écoulée, le pic de consommation de l'électricité à travers le territoire national ayant atteint 16.244 mégawatts /heure en août dernier, En plus de ça les capacités nationales de production frôlent les 23.700 mégawatts/heure [16].

Le nouveau programme national de développement de l'énergie renouvelables 2015-2030. En effet, le but visé est la préservation des ressources fossiles en diversifiant les filières de production dehors en étant capable de répondre à la forte demande en électricité . Selon les dernières statistiques de l'entreprise de Sonelgaz La capacité supplémentaire nationale de production d'électricité au cours de la période 2017-2027 sera de 21 307 MW, dont 20 994 MW ont déjà été décidés et 313 MW sont en projets. L'investissement pour la période 2017-2027 sera de : 1949 Milliards DA [12].

1.9 Principaux producteurs d'électricite en ALGERIE

Le parc de production national est constitué des centrales électriques de la Société Algérienne de Production de l'Électricité (SPE), et des sociétés en partenariat, à savoir :

- ▶ Kahrama Arzew mise en service fin 2005.

- ▶ Shariket Kahraba Skikda « SKS » mise en service en 2006.

- ▶ Shariket Kahraba Berrouaghia « SKB » (Médéa) mise en service en 2007.

- ▶ Shariket Kahraba Hadjret Ennouss « SKH » mise en service en 2009.

- ▶ Shariket Kahraba Terga « SKT » mise en service en 2012.

- ▶ Shariket Kahraba Koudiet Edraouch « SKD » mise en service en 2013 [17].

1.10 Réorganisation du groupe SONELGAZ

Toutes les opérations, entreprises depuis janvier 2022, ont permis de réduire considérablement le nombre des sociétés filiales de Sonelgaz qui passe de 26 sociétés au 31 décembre 2021 à, actuellement, 14 sociétés détenues à 100%. Ces transformations structurelles ont ainsi abouti à un recentrage optimal des activités sur les coeurs de métier du Groupe et à une organisation mature à même de les revitaliser et les rendre plus efficaces. Pour rappel, le Groupe détenait 44 sociétés en 2017, y compris les filiales en partenariat et les participations.

L'Algérie s'est investie dans l'encouragement de la production de l'électricité à partir de sources renouvelables. Où sonelgaz a décidé du changement des dénominations et des logos de ses filiales coeurs de métiers.

A la faveur de cette décision et à l'instar du changement de la dénomination de la Société Algérienne de Distribution de l'Electricité et du Gaz (SADEG) en "Sonelgaz Distribution", les dénominations des sociétés filiales suivantes ont été modifié comme suit :

- ▶ La société algérienne de production de l'électricité (SPE) change de nom est devient « Sonelgaz-Production de l'électricité».

- ▶ Shariket Kahraba wa Takat Moutadjadida (SKTM) change de nom est devient « Sonelgaz-Energies Renouvelables».

- ▶ La société algérienne de gestion du réseau de transport de l'électricité (GRTE) change de nom est devient « Sonelgaz-Transport de l'électricité».

- ▶ La société algérienne de gestion du réseau de transport de gaz (GRTG) change de nom est devient « Sonelgaz-Transport du gaz» [18].

1.11 conclusion

Dans ce chapitre on a défini les différentes types de centrale de production d'énergie électrique (classique et renouvelable) ainsi que, quelques généralités sur la constitution des réseaux d'énergie électriques et la production de l'électricité en Algérie.

Le problème le plus important dans l'industrie d'électricité est de réduire au maximum le coût de la production de l'énergie électrique générée par l'ensemble des centrales interconnectées. Ce problème peut être résolu par un outil mathématique d'optimisation. Ce dernier problème est le sujet du deuxième chapitre décrivant l'importance de dispatching économique.

Chapitre 2

Résolution le problème de dispatching économique

2.1 Introduction	19
2.2 Définition du dispatching économique	19
2.3 Problème de Dispatching économique	20
2.4 Formulation mathématique de (DE)	24
2.5 Résolution le problème du DE	26
2.6 Conclusion	33

2.1 Introduction

L'économie de production de l'énergie électrique à partir des centrales électriques représente un défi pour les sociétés productrices. Dans ce cas il est nécessaire de produire de l'énergie électrique au moindre coût, Ce coût de production est en fonction de la puissance active de sortie, l'opérateur système cherche une répartition la plus économique de la puissance active produite par les groupes de génération existant dans un réseau électrique . Pour arriver au moindre coût total et au même temp satisfaisant toute la demande ,on doit tous d'abord formuler puis résoudre ce problème qui est un problème d'optimisation connu sous le nom de dispatching économique. Pour cela, ce chapitre est dévisé en deux parties :

- ❖ la première est dédié à définir et étudier le problème du dispatching économique , afin de minimiser le coût de production d'énergie électrique, en satisfaisant les contraintes imposées par les centrales et le réseau électrique en tenant compte des pertes.
- ❖ La deuxième partie traite les méthodes d'optimisation les plus utilisées pour résoudre le problème de dispatching économique.

2.2 Définition du dispatching économique

Le dispatching économique (E D The Economic Dispatch) 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 , en satisfaisant toute la demande et en tenant compte des contraintes réeles relatives aux centrales électriques[15] et plus particulièrement les limites de production des centrales , les capacités de transport des lignes électriques et les transformateurs. La variable à optimiser est donc le coût de production de l'énergie électrique[19].

2.3 Problème de Dispatching économique

Le problème du dispatching économique statique sans pertes n'est pas très compliqué car le seul paramètre qui affecte le coût est la puissance active produite par les centrales (sans tenir compte des pertes de puissance dans les lignes lors de la transmission de puissance entre les centrales électriques et les charges)[20].

Notant que les générateurs à combustible distincts possèdent différents coût 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 qu'un générateur bon marché ne peut pas être le plus rentable, 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[21].

Le problème du dispatching économique avec pertes est plus compliqué que celui sans pertes, il tient compte de la topologie du réseau, les centrales qui produisent la puissance dont le transit

provoque d'importantes pertes seront pénalisées en multipliant leur coût incrémental par un facteur de pénalité, donc il est à noter qu'il est plus économique de produire l'énergie avec un coût plus cher pour un lieu de consommation de près qu'un coût moins cher pour une charge plus loin[22].

2.3.1 Les contraintes pratiques

Il y a plusieurs contraintes pratiques des centrales électriques qu'on peut les citer :

- ❖ Effet des Zones interdites.
- ❖ Effet d'ouverture des vannes .
- ❖ Effet du multi-combustibles.
- ❖ Effet des Rampes de générateur.

2.3.1.1 Effet des Zones interdites

Dans la pratique et à cause des limitations physiques des alternateurs où des vibrations inadmissibles de la turbine en délivrant certaines puissances, l'unité de génération peut posséder des intervalles interdit durant le fonctionnement (figure 2.1).

Les unités thermiques peuvent avoir des régions de fonctionnement indésirables pour des problèmes liés à l'instabilité ou des limitations physiques de fonctionnement au niveau des composantes des machines, ces régions créent des discontinuités au niveau de la courbe de coût du combustible [12].

$$P_i \in \begin{cases} P_{imin} \leq P_i \leq P_{i,1}^L \\ P_{i,k-1}^U \leq P_i \leq P_{i,k}^L, & k=2,\dots,n_i, \\ P_{i,n_i}^U \leq P_i \leq P_{imax} \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.1)$$

Avec :

n_i : est le nombre de zones prohibées dans les unités de production.

k : est l'indice de la zone prohibée pour les unités de production.

$P_{i,k}^L, P_{i,k}^U$: Sont les limites minimale et le maximale limites de la k_{ieme} zone prohibée de l'unité i .

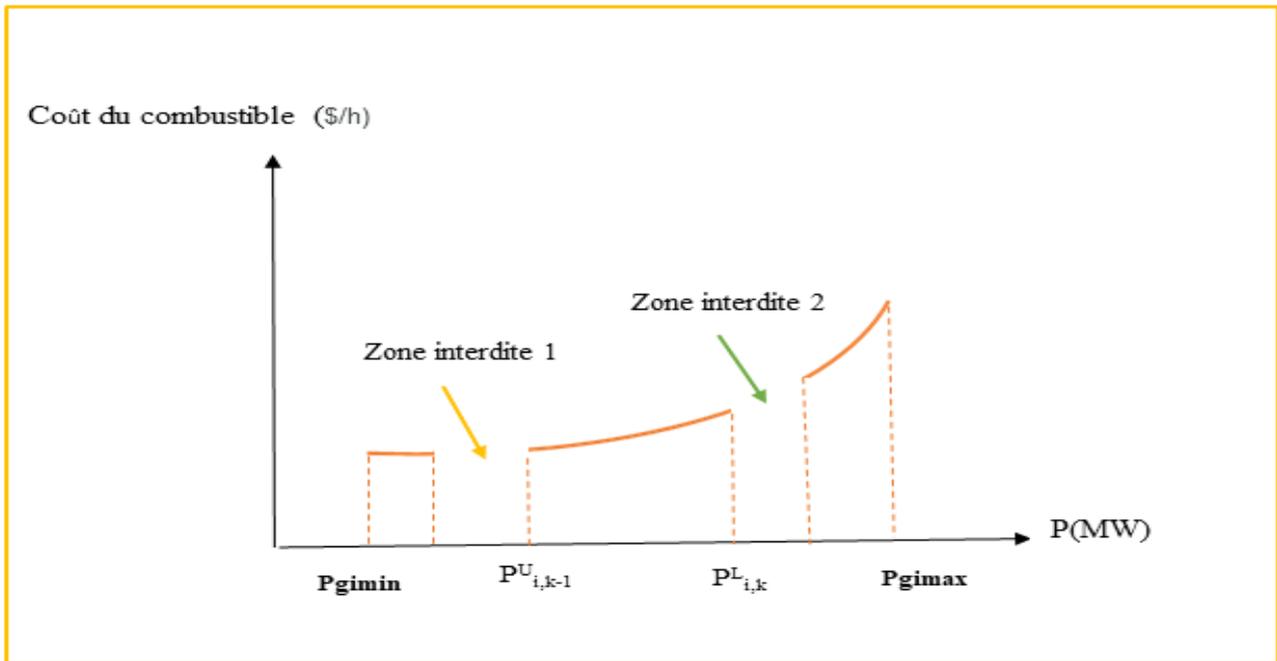


FIGURE 2.1 – Caractéristique de coût avec deux zones de fonctionnement interdites.

2.3.1.2 Effet d'ouverture des vannes

Les grandes centrales thermiques disposent de plusieurs vannes d'admission de vapeur, qui sont utilisées pour le contrôle de la puissance délivrée par l'unité. Chaque fois que l'on commence à ouvrir une vanne d'admission, on enregistre une augmentation soudaine des pertes et il en résulte alors des ondulations dans la courbe de coût du combustible. Avec l'ouverture graduelle de la vanne, ces pertes diminuent progressivement jusqu'à ce que la vanne soit complètement ouverte. La figure 2.2 montre la courbe de coût typique d'une unité thermique avec trois vannes d'admission de vapeur. L'effet d'ouverture de vanne est souvent modélisé par l'équation 2.2 en ajoutant une composante sinusoïdale à la fonction quadratique de base[23] :

$$\min_{P \in R^n} F = \sum_{i=1}^{Ng} f_i = \sum_{i=1}^{Ng} (a_i + b_i P_i + c_i P_i^2) + |d_i \sin(e_i (P_{imin} - P_i))| \quad (2.2)$$

Où a_i, b_i, c_i, d_i et e_i sont les coefficients de coût de l'unité génératrice i .

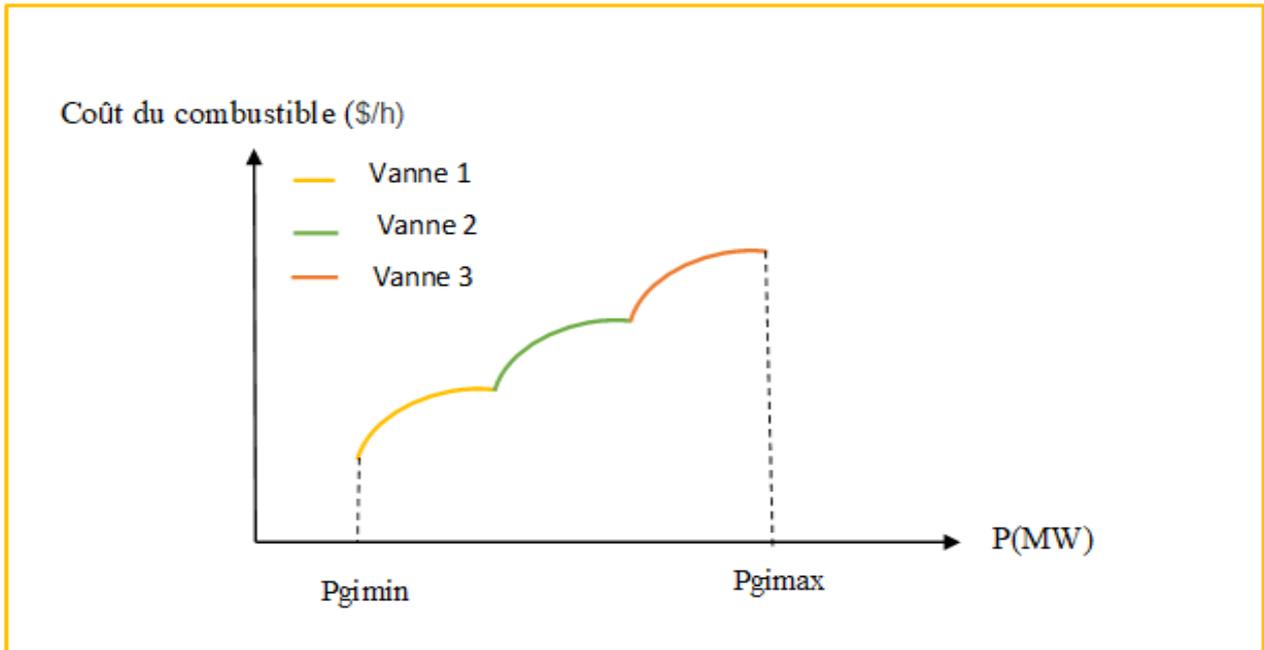


FIGURE 2.2 – Effet de l'ouverture des vannes pour une unité thermique.

2.3.1.3 Effet du multi-combustibles

En pratique les unités thermiques sont capables de fonctionner avec plusieurs types de combustibles comme le charbon, le gaz naturel et le pétrole.

La fonction du coût de combustible de ces centrales est décomposée par morceaux représentant des coûts quadratiques pour chaque type de combustible [21].

$$f_i = \begin{cases} a_{i,1} + b_{i,1}P_i + c_{i,1}P_i^2, & \text{Fuel1,} & P_{imin} \leq P_i \leq P_{i,1} \\ a_{i,2} + b_{i,2}P_i + c_{i,2}P_i^2, & \text{Fuel2,} & P_{i,1} \leq P_i \leq P_{i,2} \\ \vdots & & \\ a_{i,k} + b_{i,k}P_i + c_{i,k}P_i^2, & \text{Fuelk,} & P_{i,k-1} \leq P_i \leq P_{imax} \end{cases} \quad (2.3)$$

Où $a_{i,k}, b_{i,k}, c_{i,k}$, sont les coefficients du coût de l'unité i avec le combustible k.

on peut confirmer que le combustible le plus économique est celui qui est représenté par le morceau le plus inférieur de la courbe de la figure 2.3 [21].

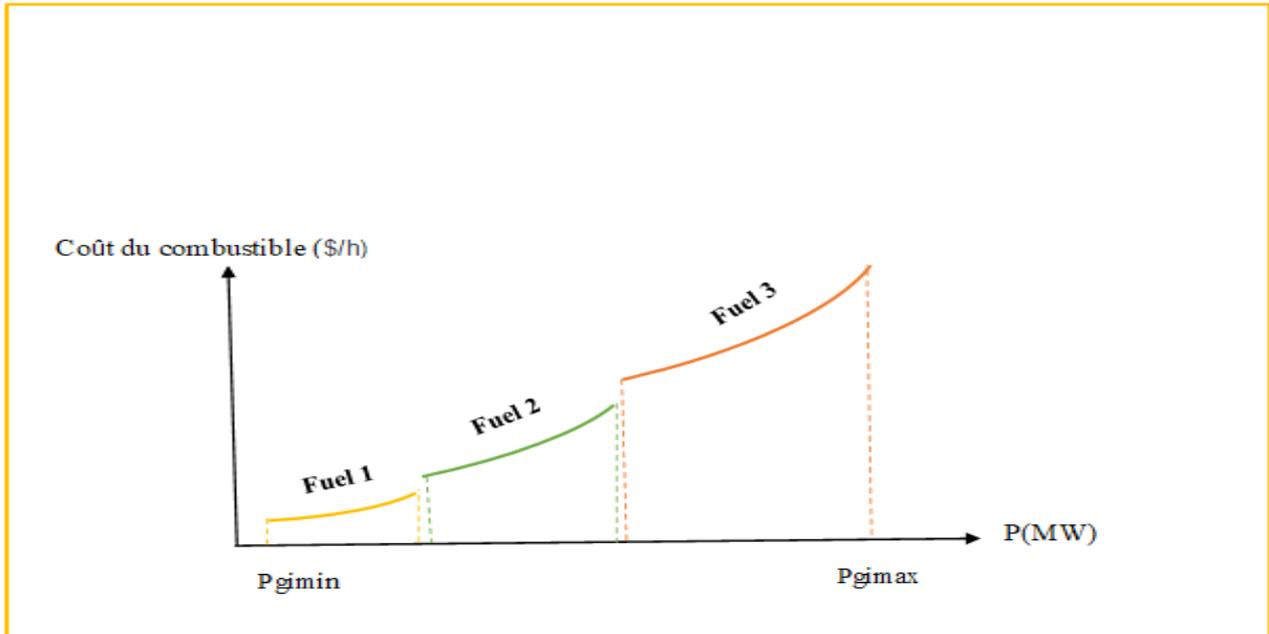


FIGURE 2.3 – Courbe de coût du combustible d'une unité thermique avec trois types de combustible

2.3.1.4 Effet des Rampes de générateur

Généralement, l'unité de production ne peut fonctionner de manière stable à partir d'un niveau de production minimal (capacité minimale de production) et jusqu'à un niveau maximal de production maximal (capacité maximale de production). L'inertie propre des moyens de production limite la vitesse à laquelle les unités de production peuvent changer leur niveau de production pour une période de temps donné [24].

Une condition d'inégalité est imposé qui sert à limiter le fonctionnement de toutes les centrales de production intégré au réseau avec des valeurs Ramp up et Ramp down admissible (figure 2.4), on définit la contrainte rampe comme limites inférieures et supérieures de production d'une heure à une autre que le générateur ne peut pas les dépasser en aucun cas qui s'expriment comme suit[25] :

Une augmentation de la production est limitée par :

$$P_{i(t)} - P_{i(t-1)} \leq UR_i \quad (2.4)$$

Une diminution de la production est limitée par :

$$P_{i(t-1)} - P_{i(t)} \leq DR_i \quad (2.5)$$

Où UR_i et DR_i sont respectivement les contraintes de ramp-up et de ramp-down exprimées en MW.

En combinant les équations 2.4 et 2.5 avec l'équation $P_{gimin} \leq P_{gi} \leq P_{gimax}$ on peut écrire :

$$\max(P_{imin}, P_{i(t-1)} - DR_i) \leq P_{i(t)} \leq \min(P_{imax}, P_{i(t-1)} + UR_i) \quad (2.6)$$

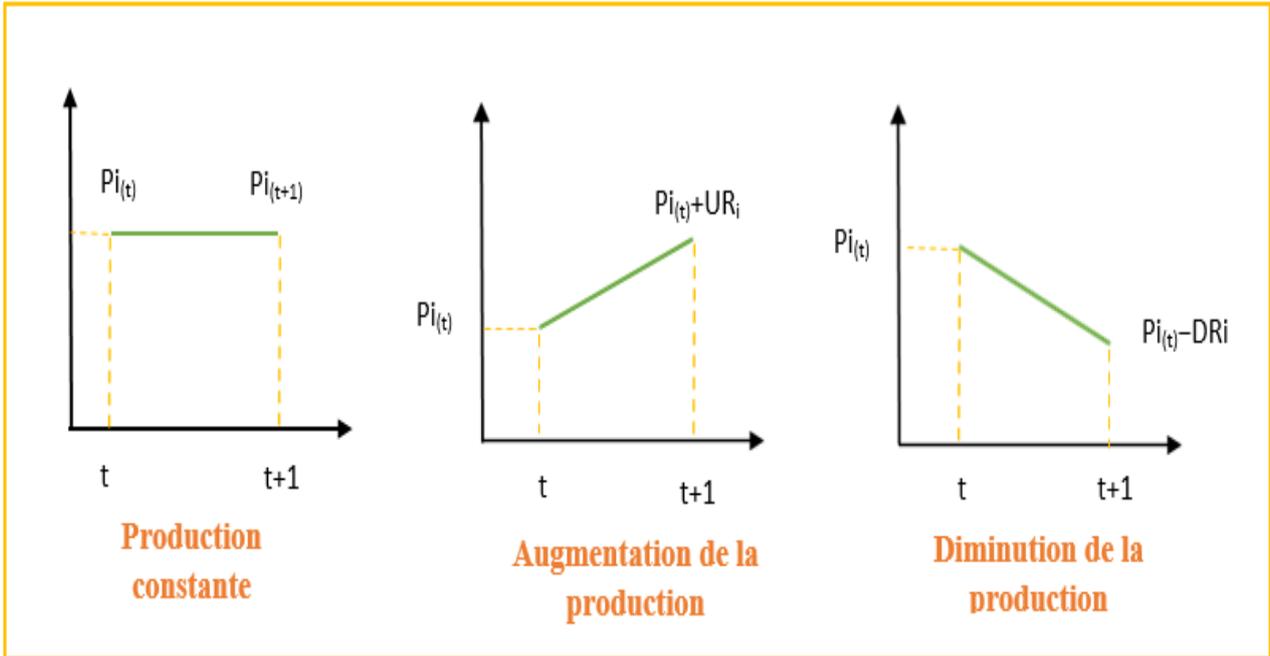


FIGURE 2.4 – Limites de ramp rate d'une unité de production

2.4 Formulation mathématique de (DE)

Par ailleurs le problème de l'optimisation peut être formulé mathématiquement par :

$$\left\{ \begin{array}{l} \min F_T = \sum_{i=1}^{Ng} (a_i + b_i P_{gi} + c_i P_{gi}^2) \\ \text{à sujet de :} \\ \sum_{i=1}^{Ng} P_{gi} = P_d + P_L \\ P_{gimin} \leq P_{gi} \leq P_{gimax} \quad i = 1, 2, \dots, Ng \end{array} \right. \quad (2.7)$$

2.4.1 Fonction objective

On l'appelle aussi fonction de coût ou critère d'optimisation . Le coût de production d'une centrale est généralement modélisé par une fonction polynomiale du second degré en fonction de la puissance générée. La formulation mathématique de la fonction coût quadratique est présentée sous la forme suivante :

$$F_T = \sum_{i=1}^{Ng} (a_i + b_i P_{gi} + c_i P_{gi}^2) \quad (2.8)$$

Avec :

F_T : La fonction coût de la centrale (i)exprimer en \$/h.

a_i , b_i , c_i : sont les coefficients de la fonction coût propres à chaque générateur.

P_{gi} : La puissance active générée par la centrale (i).

Ng : Nombre de générateurs liés au réseau.

La Figure 2.5 présente la variation du coût en fonction de la puissance générée pour une fonction coût quadratique.

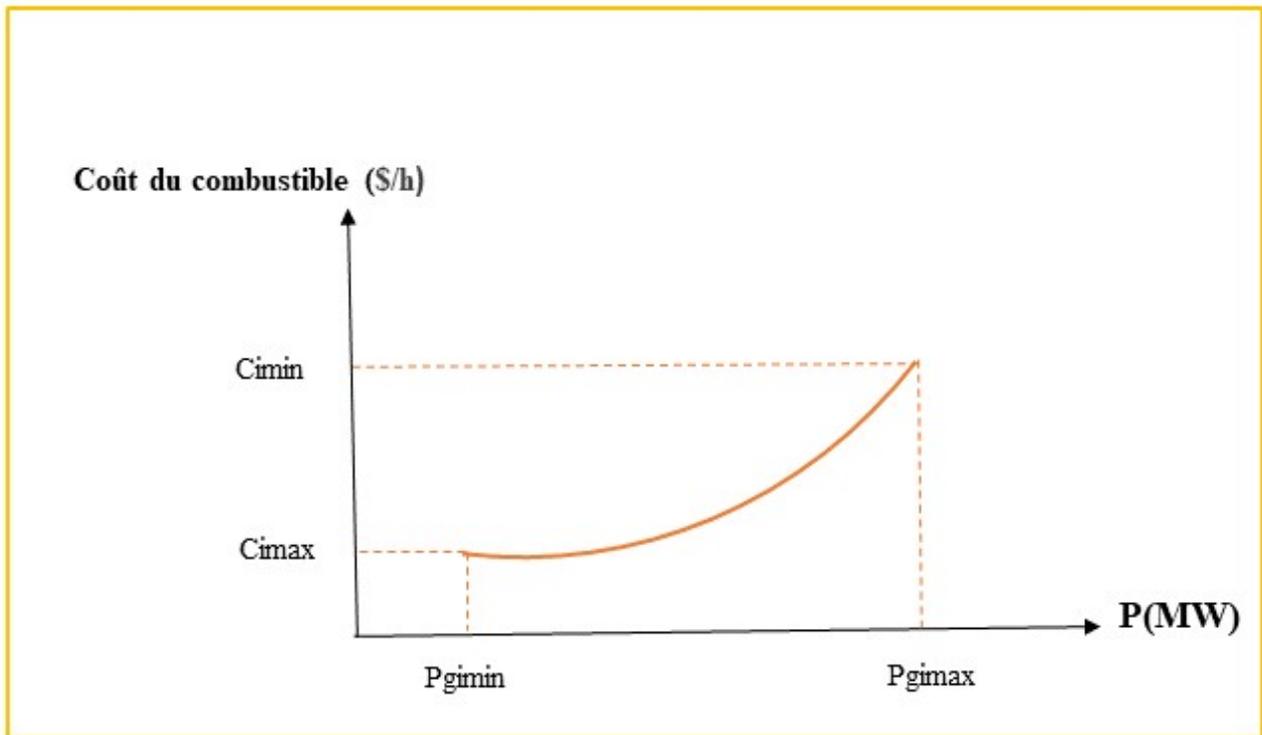


FIGURE 2.5 – La variation du coût en fonction de la puissance générée.

2.4.2 Les contraintes

L'optimisation de la fonction objective doit respecter certaines contraintes d'égalités et d'inégalités. Ces contraintes sont définies respectivement par :

2.4.2.1 Contraintes d'égalité

❖ Cas d'un Système sans pertes :

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

$$\sum_{i=1}^{N_g} P_{gi} = P_d \quad (2.9)$$

❖ Cas d'un système avec pertes :

Tout en minimisant la fonction de coût, il est nécessaire de s'assurer que la puissance générée satisfait toujours les demandes de charge (P_d) plus des pertes dans les lignes de transmission [15] :

$$\sum_{i=1}^{N_g} P_{gi} = P_d + P_L \quad (2.10)$$

2.4.2.2 Contrainte d'inégalité

Dans la pratique, chaque puissance générée (P_{gi}) est limitée par une limite inférieure (P_{gimin}) et une autre supérieure (P_{gimax}), ce qui donne la contrainte d'inégalité suivante [26] :

$$P_{gimin} \leq P_{gi} \leq P_{gimax} \quad i = 1, 2, \dots, N_g \quad (2.11)$$

2.5 Résolution le problème du DE

Pour résoudre le problème de dispatching économique. Il existe plusieurs méthodes d'optimisation qui peuvent être réparties en deux catégories :

- ❖ Méthodes exacte (classique).
- ❖ Méthodes approchées.

La figure 2.6 présente une classification des méthodes d'optimisation largement utilisés par les experts pour résoudre les différents problèmes d'optimisation complexes liés aux différents domaines de technologie[13].

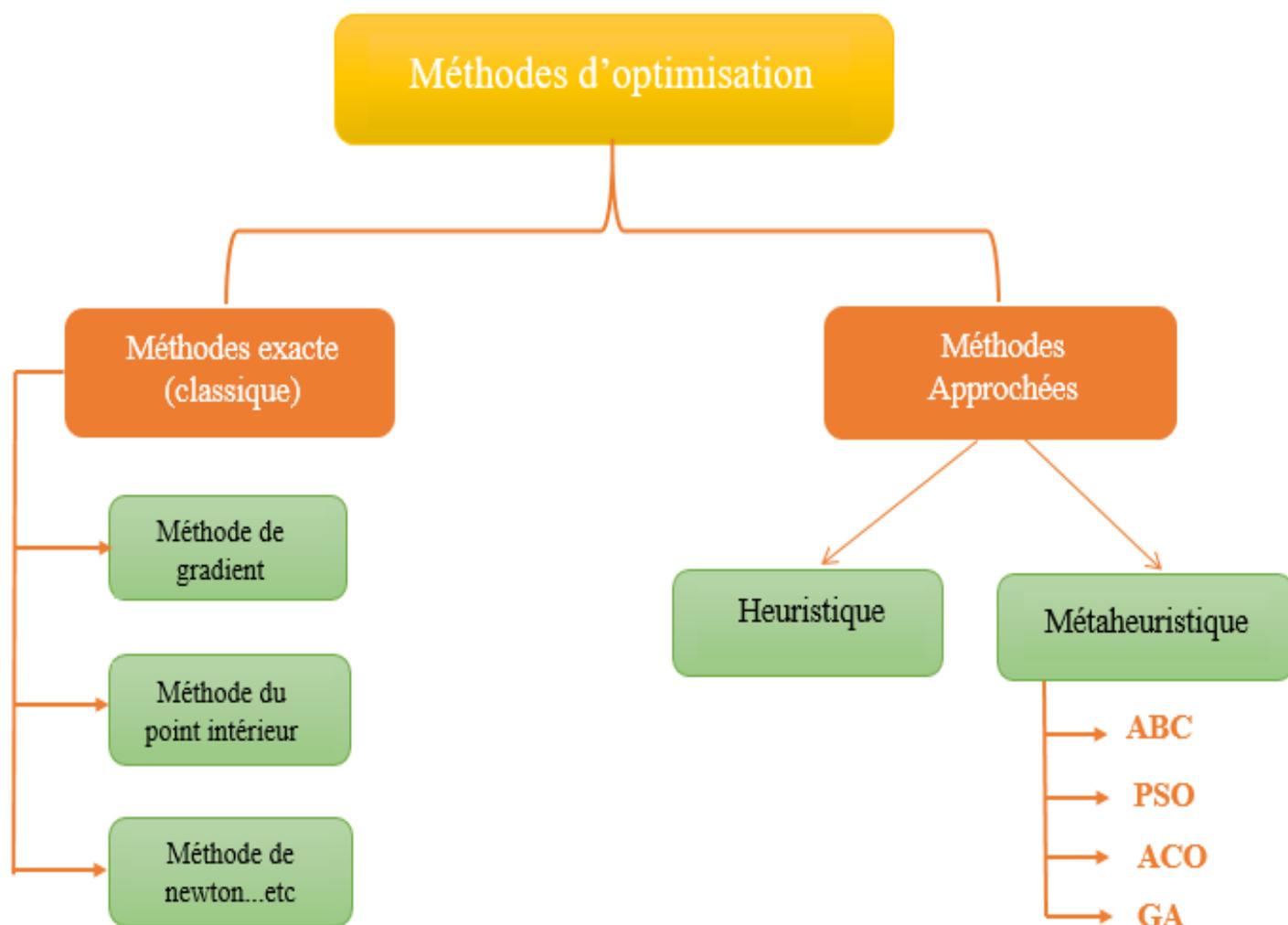


FIGURE 2.6 – Schéma de classification des méthodes d'optimisation.

2.5.1 Les méthodes d'optimisation mathématique (exacte)

Pour résoudre le problème d'optimisation, il existe plusieurs méthodes mathématiques classiques appliquées au problème de dispatching économique[13]. Toutefois, les techniques les plus intéressantes sont :

2.5.1.1 Méthode du gradient

Les méthodes du gradient connues aussi par les méthodes de descente sont des méthodes itératives basées sur la recherche du minimum d'une fonction en suivant la ligne de plus grande pente associée à la fonction objective[13]. D'un point de vue mathématique, la pente d'une fonction correspond à la dérivée de cette dernière. Si l'on se place dans le cadre d'une fonction ayant plusieurs paramètres, la dérivée devient un vecteur : le gradient de la fonction. Chaque élément de ce vecteur correspond alors à la dérivée partielle de la fonction selon l'un de ses paramètres [19].

2.5.1.2 Méthode de Newton

La méthode de Newton est une méthode très puissante à cause de sa convergence rapide au voisinage de la solution[13]. Sa convergence est de nature quadratique. C'est cette rapidité de convergence qui est la raison du succès de cette méthode et des méthodes de ce type [22]. Un lagrangien augmenté a été formulé initialement l'ensemble des dérivées premières de lagrangien augmenté par rapport aux variables de contrôle donne l'ensemble des équations non-linéaire que doivent être résolu par la méthode de newton[13].

2.5.1.3 Méthode du point intérieur

A l'origine, les méthodes de type (point intérieur) ont été conçues pour résoudre les problèmes de programmation non linéaire, des recherches plus approfondies sur ces méthodes ont montré qu'elles donnaient de très bonnes performances en termes de vitesse de convergence pour les problèmes de grande échelle, l'algorithme présenté dans cette section est connu sous le nom de « algorithme primal-dual » est l'un des plus utilisé. le principe de cette méthode est de rajouter à la fonction objective une fonction logarithmique « barrière » incluant des contraintes et qui décroît progressivement au fil de l'optimisation pour tend vers 0 [27].

2.5.1.A Inconvénients des méthodes classiques

- ❖ Les méthodes classiques sont inadaptés si les conditions suivantes ne sont pas respectées, ou alors lorsque :
 - Le nombre de variables et/ou de contraintes devient important.
 - Les fonctions définissant la fonction objective et les contraintes sont fortement non linéaires.
 - Il existe plusieurs optimums locaux.
- ❖ Ses inconvénients dans le problème de DE
 - L'inclusion des zones de fonctionnement interdites.
 - La discontinuité de la courbe de la fonction coût non convexe ou non régulière et les incertitudes portées aux contraintes de fonctionnement.

- Leurs convergences vers les optimums locaux.
- La fonction à optimiser n'est pas différentiable [21].

2.5.2 Les méthodes d'optimisation approchées

Aussi appelées méthodes non-déterministes ou stochastiques [28]. L'utilisation de méthodes exactes n'est pas toujours possible pour un problème donné à cause d'un certain nombre de contraintes, telles que le temps de calcul souvent important ou bien la difficulté qui se distingue certaines fonctions objectives.

Pour faire face à ces contraintes, nous utilisons des méthodes approchées, ces méthodes sont souvent classées en deux catégories : les heuristiques dédiées à la résolution de problèmes particuliers [29] et les méta-heuristiques qui se distinguent par le fait qu'elles sont adaptables aux différents types de problèmes d'optimisation, leur transposition se fait sans modifications substantielles des algorithmes employés[30].

2.5.2.1 Méthodes heuristiques

Une heuristique est un algorithme qui fournit rapidement une solution approchée et réalisable, pas nécessairement optimale pour un problème d'optimisation difficile. Cette méthode approximative est le contraire d'un algorithme exact qui donne une solution optimale pour un problème donné [31].

2.5.2.2 Méthodes méta-heuristique

Les méta heuristique sont un ensemble d'algorithmes d'optimisations visant à résoudre les problèmes d'optimisations difficiles. elles sont souvent inspirées par des systèmes naturels, qu'ils soient pris en physique (cas du recuit simulé), en biologie de l'évolution (cas des algorithmes génétiques) ou encore en éthologie (cas des algorithmes de colonies de fourmis ou de l'optimisation par essaims de particules) [24].

Ces algorithmes sont basés sur l'exploration aléatoire probabiliste d'une ou plusieurs régions de l'espace de recherche, cette exploration aléatoire guidée parfois par des fonctions probabilistes permet d'éviter les optimums locaux lors de l'exploration contrairement aux méthodes déterministes qui se bloque en général dans un optima local ou bien si la fonction objective présente certaine complexité mathématique grandissante [13].

2.5.2.2.A Types des méthodes Méta-heuristiques

Dans notre étude, nous nous sommes basés sur une classification qui distingue les méthodes à recherche locale (de voisinages) se basant sur une population de solution et il ya des études basées sur une solution unique.

A-Les méta-heuristiques à base de solution unique

Les métras heuristiques à base de solution unique aussi appelées méthodes de recherche locale ou méthodes de trajectoire [28], débutent la recherche avec une seule solution initiale. Elles se basent sur la notion du voisinage pour améliorer la qualité de la solution courante. En fait, la solution initiale subit une série de modifications en fonction de son voisinage. Le but de ces modifications locales est d'explorer le voisinage de la solution actuelle afin d'améliorer progressivement sa qualité au cours des différentes itérations, le voisinage de la solution s'englobe l'ensemble des modifications qui peuvent être effectuées sur la solution elle-même. La qualité de la solution finale dépend particulièrement des modifications effectuées par les opérateurs de voisinages, en effet, les mauvaises transformations de la solution initiale mènent la recherche vers la zone de l'optimum local d'un voisinage donné (peut être un mauvais voisinage) ce qui bloque la recherche en fournissant une solution de qualité insuffisante [24]. Cette catégorie englobe entre autres les méthodes de la recherche tabou (TS) et du recuit simulé (SA)[28].

B-Les méta-heuristiques à base de population de solution

1) Optimisation par la Colonie Artificiel des Abeilles (ABC)

L'optimisation par colonie d'abeilles est une famille très récente des Méta heuristique. son principe est basé sur le comportement des abeilles réelles dans la vie pour l'exploration de la nourriture [13] .

Le modèle décrivant le comportement des abeilles comprend trois éléments essentiels : les sources de nourriture, les abeilles employées et les abeilles non employées. Ce modèle définit deux modes principaux du comportement : le recrutement d'une source de nectar et l'abandon d'une source. Les abeilles s'organisent entre elles et exécutent différentes tâches en se reposant sur les principes suivant :

- Comme la quantité de nectar des sources de nourritures augmente, le nombre de leurs visites par les abeilles augmente aussi.

- Le processus d'exploitation des sources de nourriture pauvres est arrêté par les abeilles [28].

L'échange d'information entre les abeilles est le facteur le plus important dans la construction du savoir collectif.

Ce partage se fait dans la zone de danse et chacune des abeilles employées effectue une dans proportionnelle à la valeur de la source de nourriture (richesses, distance et facilité

d'exploitation) actuellement exploitées par elles, ainsi la source de nourriture la plus riche a plus de probabilité de voir des abeilles recrutées vers son voisinage [32].

2) Optimisation par les essaims de particules (PSO) :

La méthode d'optimisation par essaims de particules (PSO) a été introduite pour la première fois en 1995 par Kennedy et Eberhart, motivés par le comportement social d'organismes tels que les bancs de poissons et les volées d'oiseaux figure 2.7 [33].

Un essaim est composé d'individus ou particules en mouvement. Chaque particule est modélisée par sa position dans l'espace de recherche et par sa vitesse. A chaque instant, toutes les particules ajustent leurs positions et vitesses, donc leurs trajectoires, par rapport à leurs meilleures positions, et à la particule ayant la meilleure position dans l'essaim. Au cours du processus de la recherche, chaque particule change sa position dans l'espace de recherche en fonction de sa vitesse actuelle, sa position actuelle, sa meilleure position trouvée au cours des itérations [28] Cette méthode souffre d'un inconvénient primaire traditionnel est la convergence prématurée lorsque les paramètres ne sont pas choisis correctement surtout en manipulant des problèmes avec beaucoup d'optima locaux [34].



(a) Poissons

(b) oiseaux

FIGURE 2.7 – Groupe de : (a) poissons, (b) oiseaux [35]

3) Optimisation par colonies de fourmis (ACO)

La première version de l'OCF nommée « Ant System » est basée sur des études du comportement collectif des fourmis dans la recherche de la nourriture. Les algorithmes de colonies de fourmis sont nés à la suite d'une constatation : les insectes sociaux en général, et les fourmis en particulier, résolvent naturellement des problèmes relativement complexes [34].

L'optimisation par colonie de fourmis est une classe d'algorithmes probabilistes modélisés après le comportement pathogène des fourmis [33]. Ces insectes, lors de leurs déplacements de recherche, secrètent une substance chimique volatile appelée phéromone, formant des pistes odorantes pour marquer leur trajet entre la fourmilière et la nourriture. Cette substance constitue leur moyen de communication essentiel. En effet, plus un chemin est concentré en phéromones, plus il est attractif et devient le chemin le plus emprunté. Ce

type de communication indirecte par modification de l'environnement est connu sous le nom de stigmergie.

Chaque fourmi se déplace de façon aléatoire indépendamment des autres fourmis. cependant, le choix de la direction dépend de la concentration locale en phéromones. Ce comportement peut être décrit selon les principales étapes suivantes :

- Une fourmi éclaireuse crée un chemin initial peu marqué en phéromones.
- Les fourmis suivantes explorent aléatoirement l'ensemble des chemins.
- Le chemin le plus court se renforce plus rapidement en phéromones et devient plus attractif.
- L'évaporation de la phéromone efface les autres chemins [28].

4) Algorithmes génétiques (AG)

Les algorithmes génétiques (GA), également appelés algorithmes évolutionnaires [28], ce sont une méthode de programmation qui repose sur le principe d'évolution pour effectuer la recherche d'une solution adéquate à un problème [35]. Il manipule un ensemble de points dans l'espace de recherche, appelé population d'individus.

Chaque individu ou chromosome représente une solution possible du problème posé. Il est constitué d'éléments, appelés gènes, dont les valeurs sont appelées allèles. Les algorithmes génétiques font évoluer cette population d'individus par générations successives, en utilisant des opérateurs inspirés de la théorie de l'évolution qui sont la sélection, le croisement et la mutation (figure 2.8) [33].

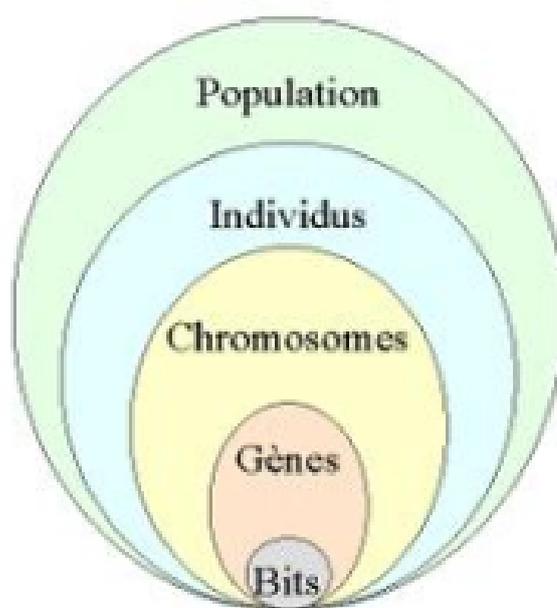


FIGURE 2.8 – Les niveaux d'organisation d'un AG

Quatre caractéristiques les distinguent des autres techniques d'optimisation :

- Ils utilisent un codage des paramètres et non les paramètres eux-mêmes.
- Ils travaillent sur une population d'individus (ou de solutions).
- Ils n'utilisent que les valeurs de la fonction à optimiser, pas sa dérivée, ou une autre connaissance auxiliaire.
- Ils utilisent des règles de transition probabilistes et non déterministes [24].

2.5.2.2.B Organisation générale des méthodes méta heuristique

D'une manière générale, les méta- heuristiques s'articulent autour de trois notions :

- **Diversification /exploration** : désigne les processus visant à récolter de l'information sur le problème à optimiser.
- **L'intensification/exploitation** : vise à utiliser l'information déjà récoltée pour définir et parcourir les zones intéressantes de l'espace de recherche.
- **La mémoire** : est le support de l'apprentissage, qui permet à l'algorithme de ne tenir compte que des zones où l'optimum global est susceptible de se trouver, évitant ainsi les optimums locaux [28].

2.5.3 Les méthodes hybrides

Une méthode hybride est une méthode de recherche constituée au moins deux méthodes de recherche distincte [34].

Les techniques d'hybridation sont une tendance actuelle dans les développements des approches d'optimisation. Cette technique vise à combiner les avantages de deux méthodes d'optimisation afin d'obtenir des méthodes efficaces pour la résolution des problèmes d'optimisation difficiles, nous pouvons combiner les méthodes comme suit :

- Exacte-exacte.
- Approchée-approchée.
- Approchée-exacte.

Le but d'agencement entre les algorithmes est rechercher la meilleure solution en moins de temps [28].

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, on a illustré le concept du problème d'optimisation, plus particulièrement le problème de dispatching économique et nous avons exposé des notions sur le dispatching économique avec les différents effets sur la fonction objectif de coût de production et en plus le problème de la répartition de la puissance optimale est aussi exposé et après la définition du dispatching économique nous avons étudiée les méthodes de résolution de ce problème qui ont été classées en deux catégories : les méthodes exactes (classiques) et les méthodes approchées (méta-heuristique).

Les méthodes classiques de résolution ne sont pas convenables pour un problème réel à cause des problèmes complexes (le dispatching économique présente les difficultés des contraintes pratiques des générateurs).pour surmonter les problèmes de dispatching économique on a fait recours aux méthodes méta-heuristiques plus particulièrement une méthode nouvellement développer qui exposé dans le chapitre 3 et qui s'appelle AOA.

Chapitre 3

L'Algorithme d'optimisation d'Archimède (AOA)

3.1 Introduction	35
3.2 Le principe de AOA	35
3.3 Algorithme d'optimisation d'Archimède (AOA)	37
3.4 Le pseudo code de l'algorithme AOA	43
3.5 Conclusion	43

3.1 Introduction

Les algorithmes méta-heuristique ont montré des performances prometteuses pour résoudre la plupart des problèmes d'optimisation complexe du monde réel et les plus efficaces inspiré de la nature et des comportements des animaux pour la découverte de nouvelles solutions qui s'adaptent au contraintes des problèmes qui sont extrêmement non linéaires et multimodaux.

À ce jour, diverses approches métaheuristiques ont été développée en concurrence dans le milieu de la recherche.

Pour cette raison, ce chapitre on trait une nouvelle algorithme basé sur la population appelé algorithme d'optimisation d'Archimède (AOA) inspiré de la loi de la physique connu sous le nom de principe d'Archimède. Il imite le principe de la force flottante exercée vers le haut sur un objet, partiellement ou totalement immergé dans le fluide, est proportionnelle au poids du fluide déplacé. Pour cela, les différentes parties traitées dans ce chapitre sont comme suit :

- (a) Le principe de AOA.
- (b) Les étapes de l'algorithmiques.
- (c) Organigramme de l'algorithme de recherche du AOA pour l'optimisation et le pseudo code de l'algorithme AOA.

3.2 Le principe de AOA

Le principe d'Archimède explique la loi de la flottabilité. Il énonce la relation entre un objet immergé dans un fluide (disons de l'eau) et la force de flottabilité appliquée sur celui-ci. En conséquence, la flottabilité d'un objet est soumise à une force ascendante égale au poids du fluide déplacé. Si le poids de l'objet est supérieur au poids du fluide déplacé, l'objet coulera. Sinon, il flottera lorsque le poids de l'objet et du fluide déplacé sera le même comme été représenté dans la figure 3.1. Dans l'AOA, les individus de la population sont les objets immergés dans le fluide. Ces objets ont une densité, un volume et une accélération qui jouent un rôle important dans la flottabilité d'un objet. L'idée de l'AOA est d'atteindre un point où les objets sont neutrement flottants, ce qui signifie que la force nette du fluide est égale à zéro.



FIGURE 3.1 – Eau déplacée lorsqu'un objet est immergé dans le fluide.

En supposant que dans le même fluide, plusieurs objets sont immergés, comme illustré sur la figure 3.2 et que chacun essaie d'atteindre l'état d'équilibre. Les objets immergés ont des densités et des volumes différents qui provoquent des accélérations différentes. L'objet sera dans l'état d'équilibre si la force flottante F_b est égale au poids de l'objet W_0 :

$$\begin{cases} F_b = W_0 \\ p_b v_b a_b = p_0 v_0 a_0 \end{cases} \quad (3.1)$$

où p : est la densité.

v : est le volume .

a : est le gravité ou accélération.

Les indices b et o sont pour le fluide et objet immergé, respectivement.

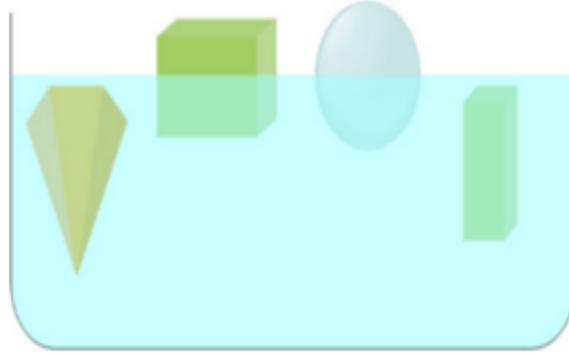


FIGURE 3.2 – Différents objets immergés dans le même fluide.

Cette équation peut être réorganisée comme suit :

$$a_0 = \frac{p_b v_b a_b}{p_0 v_0} \quad (3.2)$$

S'il y a une autre force influencée sur l'objet comme une collision avec un autre objet voisin (r), l'état d'équilibre sera :

$$\begin{cases} F_b = W_0 \\ W_b - W_r = W_0 \\ p_b v_b a_b - p_r v_r a_r = p_0 v_0 a_0 \end{cases} \quad (3.3)$$

3.3 Algorithme d'optimisation d'Archimède (AOA)

Dans l'approche proposée, les individus de la population sont les objets immergés. Comme d'autres algorithmes méta heuristiques basés sur la population, AOA commence également le processus de recherche avec une population initiale d'objets (solutions candidates) avec des volumes, des densités et des accélérations aléatoires. À ce stade, chaque objet est également initialisé avec sa position aléatoire dans le fluide. Après avoir évalué l'aptitude de la population initiale, l'AOA fonctionne par itérations jusqu'à ce que la condition du critère d'arrêt est atteinte. À chaque itération, AOA met à jour la densité et le volume de chaque objet. L'accélération de l'objet est mise à jour en fonction de l'état de sa collision avec tout autre objet voisin. La densité, le volume et l'accélération mis à jour déterminent la nouvelle position d'un objet. L'évolution détaillée des étapes de la AOA sont comme suite :

3.3.1 Les étapes de l'algorithmiques

Dans cette section, nous présentons la formulation mathématique de l'algorithme AOA. Théoriquement, l'AOA peut être considéré comme un algorithme d'optimisation global

car il englobe à la fois les processus d'exploration et d'exploitation. Mathématiquement, les étapes de l'AOA proposée sont détaillées comme suit :

Étape 1 : Initialisation

Initialisez les positions de tous les objets à l'aide de (3.4) :

$$O_i = lb_i + rand \times (ub_i - lb_i); \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3.4)$$

où O_i est le i ème objet d'une population de N objets.

lb_i et ub_i sont les limites inférieure et supérieure de l'espace de recherche, respectivement.

Initialiser le volume (vol_i) et la densité (den_i) pour chaque i ème objet en utilisant (3.5) :

$$\begin{cases} den_i = rand \\ vol_i = rand \end{cases} \quad (3.5)$$

où $rand$ est un vecteur de dimension D génère aléatoirement un nombre compris entre $[0, 1]$. Et enfin, initialisez l'accélération (acc_i) de l'objet en utilisant (3.6) :

$$acc_i = lb_i + rand \times (ub_i - lb_i) \quad (3.6)$$

Dans cette étape, évaluez la population initiale et sélectionnez l'objet avec la meilleure valeur de fitness. Affectez x_{best} , den_{best} , vol_{best} et acc_{best} .

Étape 2 : Mettre à jour les densités, les volumes

La densité et le volume de l'objet i pour l'itération $t + 1$ sont mis à jour en utilisant (3.7) :

$$\begin{cases} den_i^{t+1} = den_i^t + rand \times (den_{best} - den_i^t) \\ vol_i^{t+1} = vol_i^t + rand \times (vol_{best} - vol_i^t) \end{cases} \quad (3.7)$$

où vol_{best} et den_{best} sont le volume et la densité associés au meilleur objet trouvé jusqu'à présent.

Étape 3 : Opérateur de transfert et facteur de densité

Au début, une collision entre objets se produit et après un certain temps, les objets tentent d'atteindre l'état d'équilibre. Ceci est mis en oeuvre dans AOA avec l'aide de l'opérateur de transfert TF qui transforme la recherche de l'exploration à l'exploitation, défini en utilisant (3.8) :

$$TF = \exp\left(\frac{t - t_{max}}{t_{max}}\right) \quad (3.8)$$

où TF augmente progressivement avec le temps jusqu'à atteindre 1. Ici, t et t_{max} sont respectivement l'itération courante et le nombre maximal des itérations. De même, le facteur décroissant de densité d aide également l'AOA pour passer de la recherche globale à la recherche locale. Il diminue avec le temps en utilisant (3.9) :

$$d^{t+1} = \exp\left(\frac{t_{max} - t}{t_{max}}\right) - \left(\frac{t}{t_{max}}\right) \quad (3.9)$$

où d^{t+1} diminue avec le temps qui donne la capacité de converger dans une région prometteuse déjà identifiée. Notez qu'une bonne gestion de cette variable assurera l'équilibre entre l'exploration et l'exploitation dans l'AOA.

Étape 4.1 : Phase d'exploration (collision entre les objets)

Si $TF \leq 0.5$, une collision entre objets se produit, sélectionnez un matériau aléatoire (mr) et mettez à jour l'accélération de l'objet pour l'itération $t + 1$ en utilisant (3.10) :

$$acc_i^{t+1} = \frac{den_{mr} + vol_{mr} \times acc_{mr}}{den_i^{t+1} \times vol_i^{t+1}} \quad (3.10)$$

où den_i , vol_i et acc_i sont respectivement la densité, le volume et l'accélération de l'objet i . Alors que acc_{mr} , den_{mr} et vol_{mr} sont respectivement l'accélération, la densité et le volume d'un matériau aléatoire. Il est important de mentionner que $TF \leq 0.5$ assure l'exploration pendant un tiers des itérations.

L'application d'une valeur autre que 0,5 modifiera le comportement d'exploration-exploitation.

Étape 4.2 : Phase d'exploitation (pas de collision entre les objets)

Si $TF > 0.5$, il n'y a pas de collision entre les objets, mettez à jour l'accélération de l'objet pour l'itération $t + 1$ en utilisant (3.11) :

$$acc_i^{t+1} = \frac{den_{best} + vol_{best} \times acc_{best}}{den_i^{t+1} \times vol_i^{t+1}} \quad (3.11)$$

Où acc_{best} est l'accélération du meilleur objet.

Étape 4.3 : Normaliser l'accélération

Normaliser l'accélération pour calculer le pourcentage de changement à l'aide de (3.12) :

$$acc_{i-norm}^{t+1} = u \times \frac{acc_i^{t+1} - \min(acc)}{\max(acc) - \min(acc)} + l \quad (3.12)$$

Où l et u sont la plage de normalisation définie sur $[0,1 \ 0,9]$. La norme acc_{i-norm}^{t+1} détermine le pourcentage de pas que chaque agent doit la changer. Si l'objet i est loin de l'optimum global, la valeur d'accélération sera élevée, ce qui signifie que l'objet sera en phase d'exploration . sinon, en phase d'exploitation. Cela illustre comment la recherche passe de la phase d'exploration à la phase d'exploitation. Dans le cas normal, le facteur d'accélération commence avec une grande valeur et diminue avec le temps (Nombre des itérations). Cela aide les agents de recherche à se diriger vers la meilleure solution globale et en même temps, ils s'échappent des solutions locales. Mais, il faut noter qu'il peut rester quelques agents de recherche qui ont besoin de plus de temps pour rester en phase d'exploration que le cas normal. Par conséquent, l'AOA atteint l'équilibre entre l'exploration et l'exploitation.

Étape 5 : Mettre à jour la position Si $TF \leq 0.5$ (phase d'exploration)

La mise à jour de la position du i ème objet pour l'itération suivante $t + 1$ est assurée en utilisant (3.13) :

$$x_i^{t+1} = x_i^t + C_1 \times rand \times acc_{i-norm}^{t+1} \times d \times (x_{rand} - x_i^t) \quad (3.13)$$

où C_1 est constant est égal à 2. Sinon, si $TF > 0,5$ (phase d'exploitation), les objets mettent à jour leurs positions à l'aide de (3.14).

$$x_i^{t+1} = x_{best}^t + F \times C_2 \times rand \times acc_{i-norm}^{t+1} \times d \times (T \times x_{best} - x_i^t) \quad (3.14)$$

où C_2 est une constante égale à 6. T augmente avec le temps et il est directement proportionnel à l'opérateur de transfert et il est défini en utilisant $T = C_3 \times TF$. T augmente avec le temps dans la plage $[C_3 \times 0.3, 1]$ et prend un certain pourcentage de la meilleure position, initialement. Cela commence avec un faible pourcentage car cela entraîne une grande différence entre la meilleure position et la position actuelle, par conséquent la taille des pas de marche aléatoire sera élevée. Au fur et à mesure que la recherche progresse, ce pourcentage augmente progressivement pour réduire la différence entre la meilleure position et la position actuelle. Cela conduit à atteindre un équilibre approprié entre

l'exploration et l'exploitation. L'indice F est l'indicateur pour changer la direction du mouvement en utilisant (3.15) :

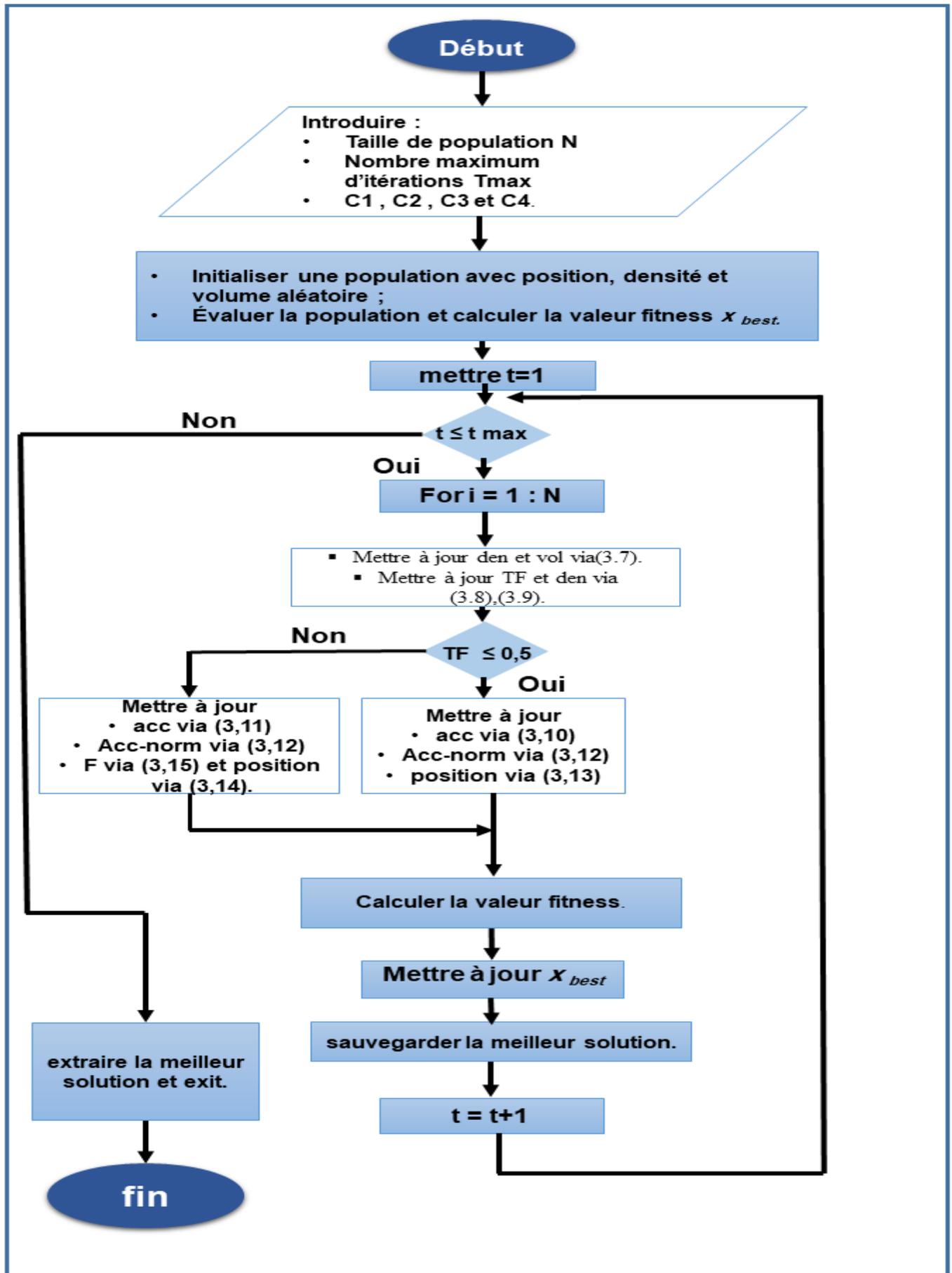
$$F = \begin{cases} +1 & \text{if } P \leq 0.5 \\ -1 & \text{if } P > 0.5 \end{cases} \quad \text{where} \quad P = 2 \times rand - C_4 \quad (3.15)$$

Étape 6 : Évaluation

Évaluez chaque objet à l'aide de la fonction objective f et mémoriser la meilleure solution trouvée jusqu'à présent. Affectez x_{best} , den_{best} , vol_{best} et acc_{best} .

Si la condition d'arrêt de l'algorithme est vérifiée ($t > t_{max}$) faire l'extraction de la meilleure solution [36].

Organigramme de l'algorithme de recherche du AOA pour l'optimisation



3.4 Le pseudo code de l'algorithme AOA

AOA algorithme de base

Définir les valeurs des paramètres AOA (taille de population N , itérations maximales t_{max} , $C1$, $C2$, $C3$ et $C4$)

Initialiser la population d'objets avec des positions, des densités et des volumes aléatoires en utilisant (3.4), (3.5) et (3.6), respectivement.

Évaluez la population initiale et sélectionner l'individu avec meilleure position \mathbf{X}_{best} .

Initialiser le compteur d'itération $t = 1$

Tant que $t < t_{max}$

Pour chaque objet i faire :

Mettre à jour la densité et le volume de chaque objet en utilisant (3.7).

Mettre à jour l'opérateur de transfert TF et le facteur de densité d en utilisant (3.8) et (3.9), respectivement.

Si $TF < 0,5$: Phase d'exploration

Mettre à jour l'accélération à l'aide de (3.10) et l'accélération normalisée à l'aide de (3.12)

Mettre à jour la position à l'aide de (3.13)

Sinon : Phase d'exploitation

Mettre à jour l'accélération à l'aide de (3.11) et l'accélération normalisée à l'aide de (3.12).

Mettre à jour l'indicateur de direction F à l'aide de (3.15).

Mettre à jour la position à l'aide de (3.14)

Fin si

Fin pour

Évaluer chaque objet et sélectionner celui qui a la meilleure valeur de fitness de \mathbf{X}_{best} .

Faire $t = t + 1$

Fin tant que

3.5 Conclusion

Ce chapitre a proposé un nouvel outil d'optimisation méta-heuristique à base de population de solutions pour résoudre les problèmes d'optimisation, il s'agit de l'algorithme d'Archimède (AOA) inspiré du phénomène physique : poussé d'Archimède.

Nous avons présenté tout d'abord une vue générale sur l'algorithme d'Archimède, son principe, ses paramètres et ses principales opérations. Cet algorithme est simple du point de vue conception pour résoudre des problèmes assez complexes avec une bonne précision. Cependant, il doit être vérifié du point de vue limites et difficultés. Ces difficultés reposent sur le choix du critères d'arrêt : la taille de la population, le nombre de générations, les

paramètre C1, C2, C3 et C4. Le bon choix de ses paramètres exige une bonne connaissance du système à étudier et le problème à résoudre.

Un ensemble de tests de la méthode s'applique pour la résolution du problème de dispatching économique plus particulièrement sur trois réseaux électriques de test.

Chapitre 4

Résultats de l'application de AOA au dispatching économique

4.1 Introduction	48
4.2 Application de l'algorithme AOA sur un système 6 unités sans effets de rampe et de zones interdites	48
4.3 Application de l'algorithme AOA sur un système 15 unités	53
4.4 Application de l'algorithme AOA sur un système 40 unités	62
4.5 Conclusion	67

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, la nouvelle approche AOA est proposée pour résoudre le problème de dispatching économique et cela comme une contribution principale, en tenant compte des contraintes pratiques des unités de production, ces contraintes rendent le problème de dispatching économique plus complexe en raison des zones de production interdites, l'effet de rampe, des pertes de transmission actives et des effets des vannes.

L'efficacité et la robustesse de l'approche AOA ont été testées sur trois systèmes électriques de référence : 06 unités, 15 unités et 40 unités de production .Différents tests vont nous permettre de tester la courbe de convergence de l'algorithme en respectant les contraintes d'égalité et d'inégalité du problème.

Une étude comparative est mise au point pour évaluer l'efficacité de l'algorithme avec des méthodes appliquées au même problème (DE) et qui existent dans les littératures.

4.2 Application de l'algorithme AOA sur un système 6 unités sans effets de rampe et de zones interdites

Dans un premier temps, la technique AOA proposée est appliquée sur le premier système d'essai 06 unités avec une puissance active demandé 1263 MW.

Les paramètres de choix de AOA sont donnés comme suit :

- ❖ Le nombre de population : $N=100$.
- ❖ Le nombre des itérations maximal : $iter_max =200$.

Le tableau 4.1 illustre les résultats de simulation du système 6 unités sans effet de rampe et de zones interdites.

TABLE 4.1 – Les résultats de simulation de réseau électrique 6 générateurs.

Objectives et résultats	Evaluation
Puissance totale générée (MW)	1274.9963
Cout total de production(\$/h)	15437.2069
pertes totales (MW)	12.3763
Temps d'exécution (sec)	2.555

A-Répartition optimale de la puissance totale générée avec la vérification de la contrainte d'inégalité sont reportés sur le graphe de la figure 4.1

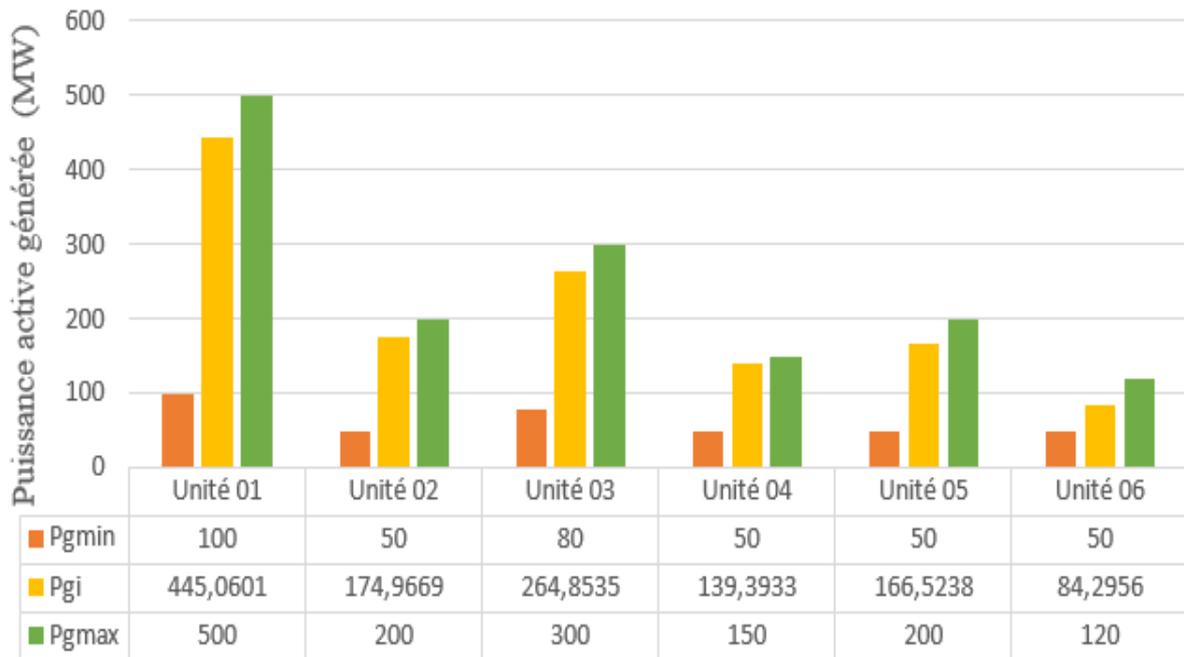


FIGURE 4.1 – Répartition optimale de la puissance totale générée avec visualisation des limites min et max de génération.

B-La variation du coût optimal en fonction du nombre des essais

50 exécution ont été appliqué avec différents résultats comme il est illustré dans la figure 4.2.

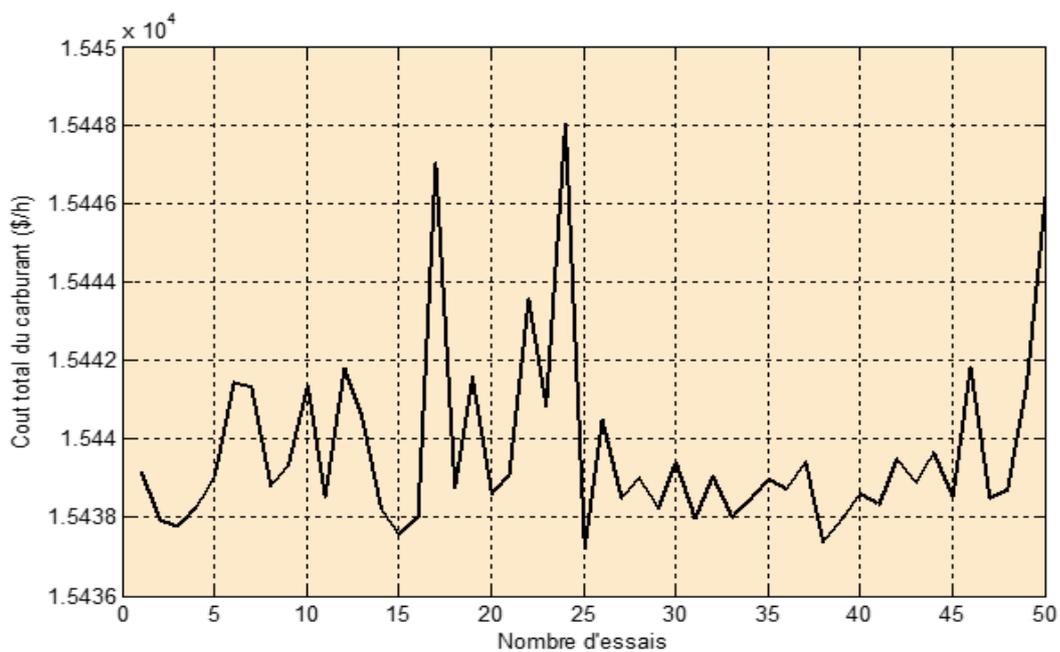


FIGURE 4.2 – Variation de coût optimal pour 50 essais.

C-Convergence de l'algorithme AOA pour un réseau de 6 générateurs

La meilleure exécution est de numéro 25 comme il est représenté sur la figure 4.2 , sa courbe de convergence est décrite sur la figure 4.3.

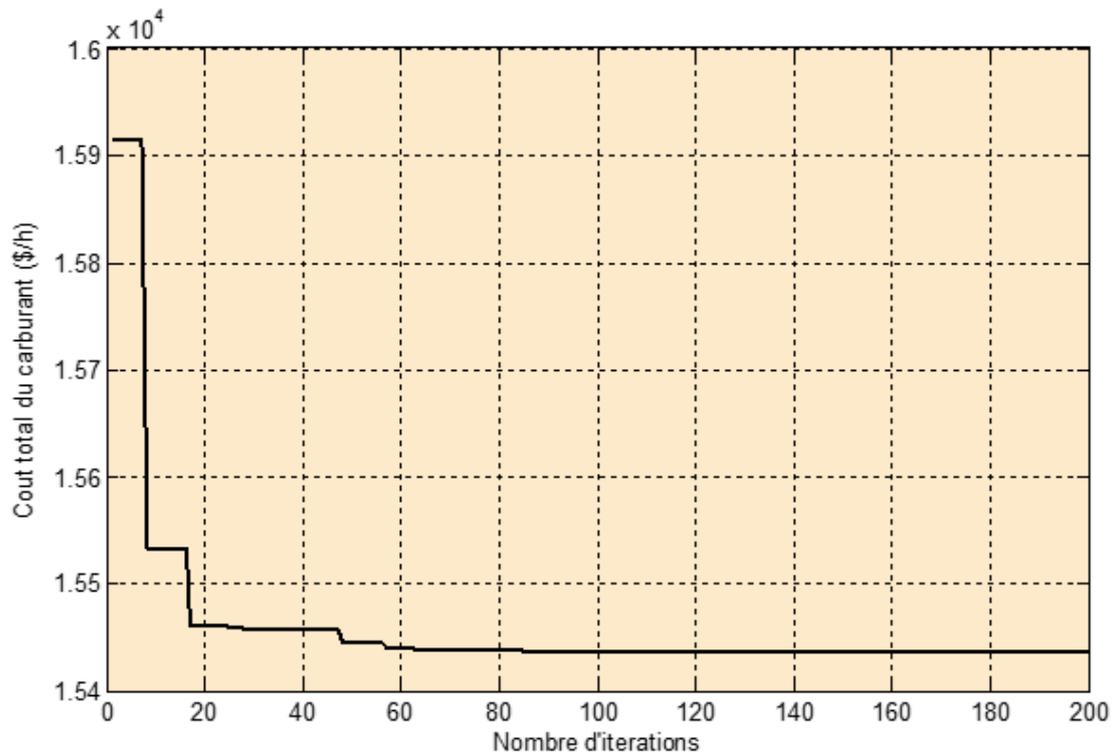


FIGURE 4.3 – Caractéristique de convergence de l'algorithme AOA.

D-Comparaison des résultats de AOA avec les autres méthodes pour 50 essais

Pour vérifier la robustesse de la méthode, on applique 50 essais de l'algorithme (pour chaque essai, on mémorise la meilleure solution trouvée).

Pour le $\min(FC_{t_essai})$, $\text{moyen}(FC_{t_essai})$ et $\max(FC_{t_essai})$ nous utilisons la figure 4.4

- $\min(FC_{t_essai})$ le coût minimum ce que nous avons pour 50 essais.
- $\text{moyen}(FC_{t_essai})$ le coût moyen de ce que nous avons pour 50 essais.
- $\max(FC_{t_essai})$ le coût maximum que nous avons pour 50 essais.



FIGURE 4.4 – Comparaison des résultats de système de six unités.

Le tableau 4.2 compare les résultats obtenus par l'algorithme AOA avec celles trouvées par d'autres méthodes (SSA, CSA, AEO et ABC), ce tableau présente le cout minimal et les puissances générées optimales et la puissance totale générée et aussi les pertes dans le système de 06 unités.

TABLE 4.2 – Résultats de système à 6 unités sans effets de rampe et de zones interdites

Puissance générée (MW)	Méthode				
	AOA	SSA[24]	CSA[13]	AEO[28]	ABC[39]
Pg 01	445.0601	447.50	454.70	447.4775	400.00
Pg 02	174.9669	173.13	170.29	173.1739	186.55
Pg 03	264.8535	263.46	256.86	263.1037	289.00
Pg 04	139.3933	139.06	125.59	138.6317	150.00
Pg 05	166.5238	165.47	178.16	166.3032	200.00
Pg 06	84.2956	87.13	90.10	86.3625	50.00
Puissance totale (MW)	1274.9963	1275.95	1275.76	1275.05	1275.73
Pertes totales (MW)	12.3763	12.95	12.76	12.40	12.55
Coût total (\$/h)	15437.2069	15449.89	15446.17	15437.66	15452

Interprétation des résultats

La figure 4.4 illustre la comparaison des résultats de système à six unités de la méthode AOA avec d'autres méthodes telles que PSO[37],SSA[24],AEO[28], GABC[38]. Les résultats obtenus par la méthode AOA en termes de coût de carburant minimal, moyen et maximal sont nettement meilleurs que ceux obtenus par ces méthodes.

On note dans la figure 4.1 que les valeurs optimales des puissances actives pour les six générateurs sont dans leurs limites de fonctionnement admissibles cela signifie que la contrainte d'inégalité est vérifiée. La figure 4.3 illustre la caractéristique de convergence de l'algorithme de AOA qui montre l'évolution de la fonction coût total du combustible (fonction objectif) en fonction des nombres des itérations.

On remarque que l'algorithme AOA converge vers la meilleure solution dans un nombre des itérations moins de 60, donc nous notons qu'une vitesse de convergence rapide est assignée pour cette application vers la meilleure solution et la convergence est obtenue.

Les résultats de tableau 4.2 montre que le coût total optimal trouvé par la méthode AOA qui est égale 15437.2069 (\$/h) et de valeur réduite par rapport à celle trouvée par la méthode SAA ;CSA ;AEO et ABC .Les pertes actives dans les lignes de transmission trouvées par AOA qui de l'ordre 12.3763 MW sont inférieur à celles trouvé par les autres méthodes . Ces premiers résultats montrent que AOA est un algorithme puissant avec un grand pouvoir de convergence vers l'optimum global.

4.2.1 Analyse paramétrique sur un système 6 unités

Les algorithmes métaheuristiques sont de nature stochastique qui génèrent des résultats optimales différents à chaque exécution et cela en fonction des paramètres de l'algorithme lui même.

Les paramètres qui contrôlent la convergence de l'algorithme AOA sont C1,C2,C3 et C4. Dans cette partie d'étude, Une étude paramétrique dans le but de vérifier la convergence de l'AOA en fonction de ces constantes.

- **min fct(test)** : le coût minimum ce que nous avons pour 50 essais.
- **moyenne fct(test)** : le coût moyen de ce que nous avons pour 50 essais.
- **max fct(test)** : le coût maximum que nous avons pour 50 essais.

les Senarios

TABLE 4.3 – Senario 01

				min fct(test)	mean fct(test)	max fct(test)
C1=2	C2=6	C3=1	C4=0.5	15439	15446	15474
C1=2	C2=6	C3=1.5	C4=0.5	15438	15444	15451
C1=2	C2=6	C3=2	C4=0.5	15437.2	15439.7	15448

TABLE 4.4 – Senario 02

				min fct(test)	mean fct(test)	max fct(test)
C1=2	C2=6	C3=2	C4=0.75	15438	15444	15486
C1=2	C2=6	C3=2	C4=1	15438	15445	15455

TABLE 4.5 – Senario 03

				min fct(test)	mean fct(test)	max fct(test)
C1=2	C2=6	C3=0.5	C4=0.5	15438	15444	15486
C1=2	C2=6	C3=0.75	C4=0.5	15438	15445	15455

Nous aboutissons aux meilleures valeurs de C1,C2,C3 et C4 qui nous donnent le meilleur cout total de génération et qui comme suit : C1 = 2, C2 = 6, C3 = 2 et C4 = 0,5.

4.3 Application de l'algorithme AOA sur un système 15 unités

Dans cette étude de cas, le même algorithme est appliqué sur un système de test plus large composé des 15 unités. La puissance demandée totale est 2630 MW . En visualisant les statistiques des 50 essais de l'algorithme.

Les paramètres de choix de AOA sont donnés comme suit :

- ❖ Le nombre de population : N=250.
- ❖ Le nombre des itérations maximal : iter_max =300.

L'application de la méthode AOA au DE est faite selon deux cas :

- cas 1** système de 15 unités sans effets de rampe et de zones interdites.
- cas 2** système de 15 unités avec effets de rampe et de zones interdites.

4.3.1 Système de 15 unités sans effets de rampe et de zones interdites

Le tableau 4.6 illustre les résultats de simulation du système 15 unités sans effet de rampe et de zones interdites.

TABLE 4.6 – Résultats de système à 15 unités sans effets de rampe et de zones interdites

Objectives et résultats	Evaluation
Puissance totale générée (MW)	2657.1998
Cout total de production (\$/h)	32579.8957
pertes totales (MW)	27.4998
Temps d'exécution (sec)	13.395

A-Répartition optimale de la puissance totale générée avec la vérification de la contrainte d'inégalité sont reportés sur le graphe de la figure 4.5

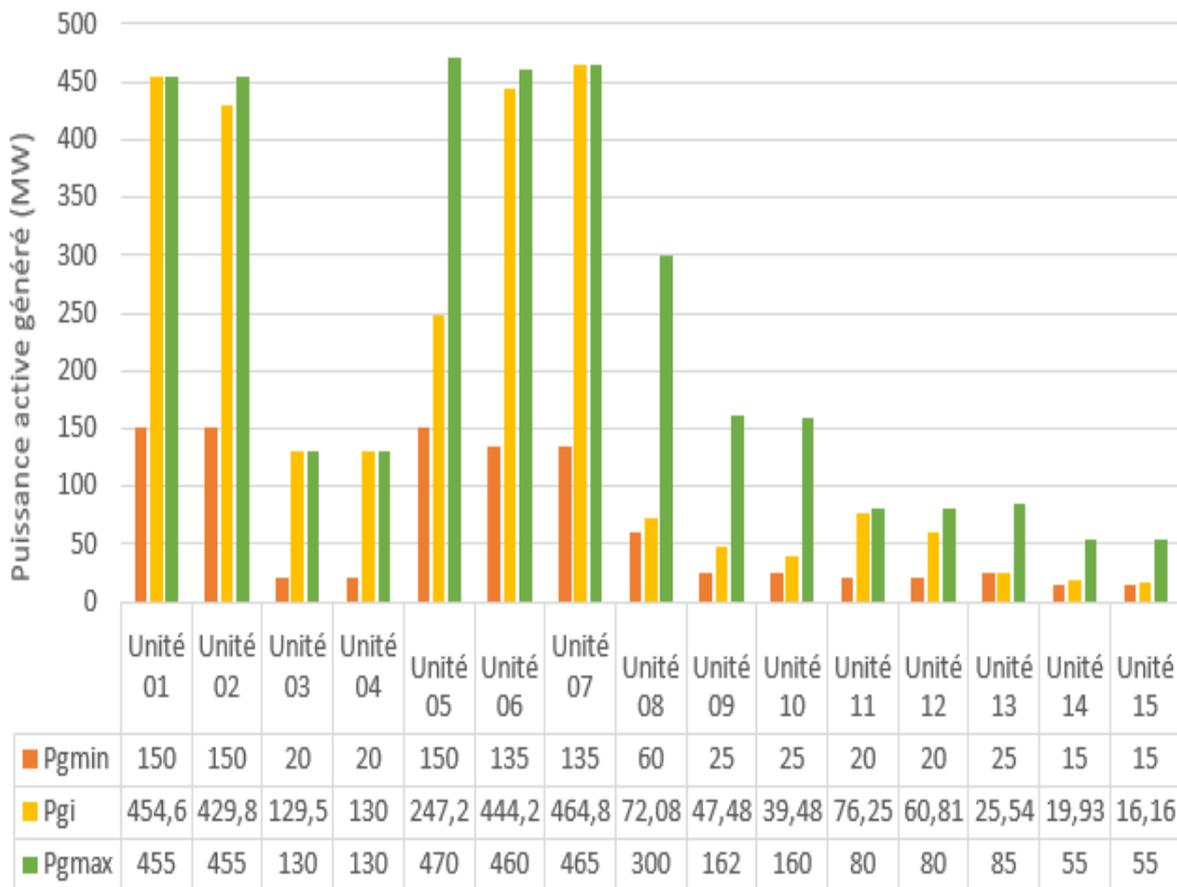


FIGURE 4.5 – Répartition optimale de la puissance totale générée avec visualisation des limites min et max de génération. Cas de système à 15 unités sans effets de rampe et sans zones interdites.

B-La variation du coût optimal en fonction du nombre des essais :

50 exécutions ont été appliquées avec différents résultats comme il est illustré dans la figure 4.6.

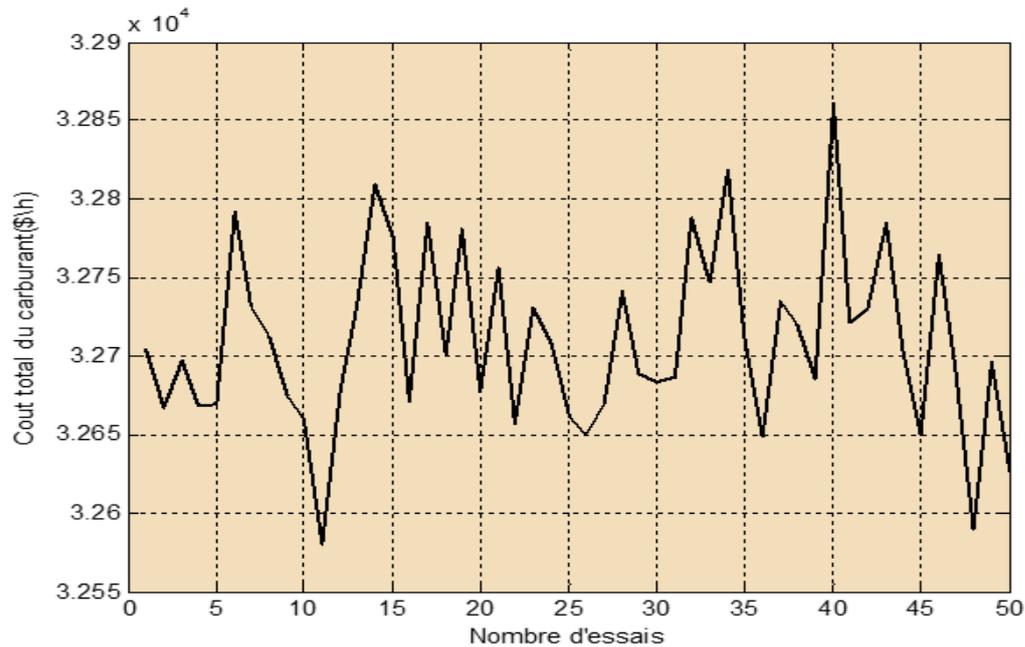


FIGURE 4.6 – Variation de coût optimal pour 50 essais. Cas de système à 15 unités sans effets de rampe et sans zones interdites

C-Convergence de l’algorithme AOA pour le système de 15 unités sans effets de rampe et sans zones interdites.

La meilleure exécution est de numéro 11 comme il est représenté sur la figure 4.6 , sa courbe de convergence est décrite sur la figure 4.7.

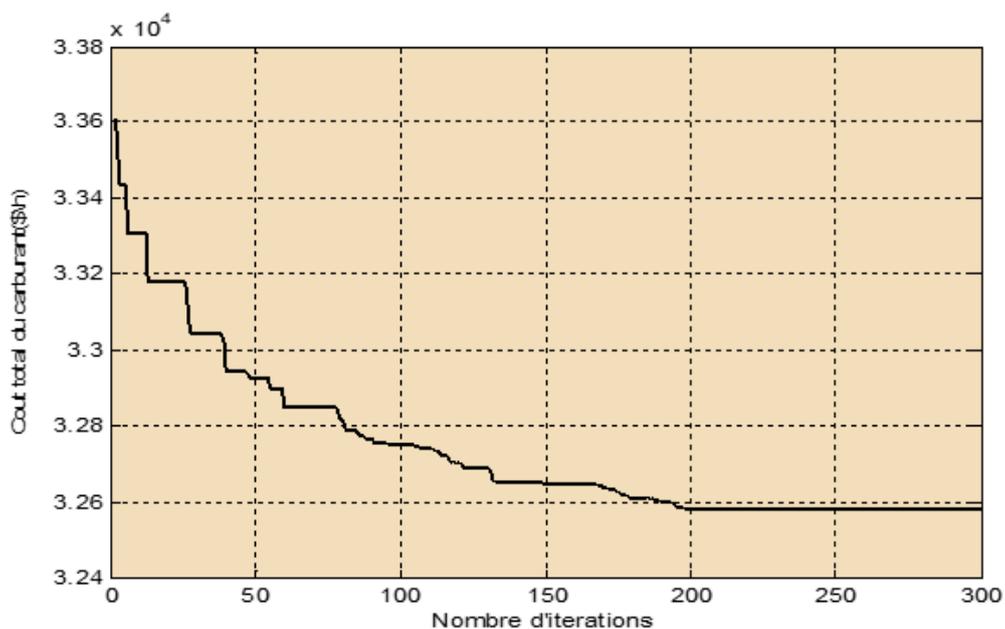


FIGURE 4.7 – Caractéristique de convergence de l’algorithme AOA. Cas de système à 15 unités sans effets de rampe et sans zones interdites.

D-Comparaison des résultats de AOA avec les autres méthodes pour 50 essais

Pour vérifier la robustesse de la méthode, on applique 50 essais de l'algorithme (pour chaque essai, on mémorise la meilleure solution trouvée).

Pour le $\min(FC_{t_essai})$, $\text{moyen}(FC_{t_essai})$ et $\max(FC_{t_essai})$ nous utilisons la figure 4.8

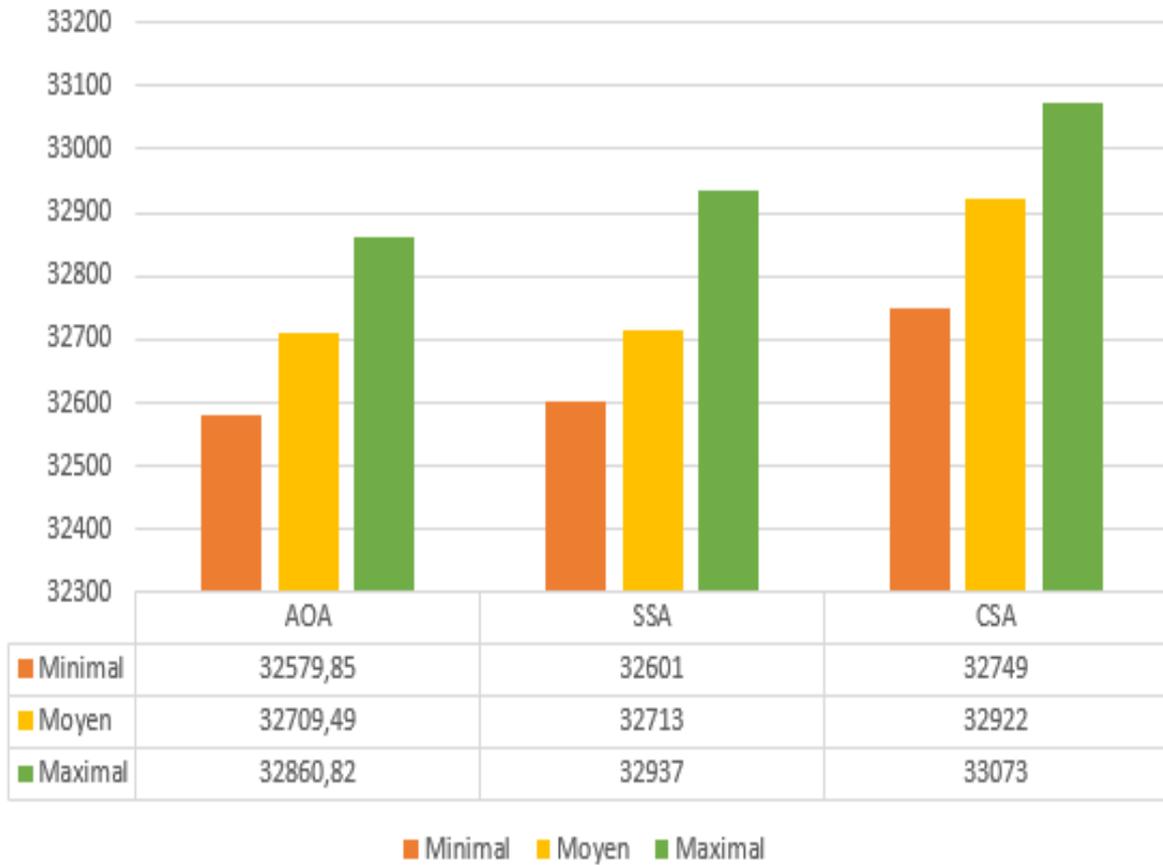


FIGURE 4.8 – Comparaison des résultats de système de 15 unités. Cas sans effets de rampe et zones interdites pour 50 essais

Le tableau 4.7 compare les résultats obtenus par algorithme AOA avec celles trouvées par des autres méthodes (DE-PSO, PSO, SSA, CTSO), ce tableau présente le coût minimal et les puissances générées optimales à chaque unité et la puissance totale générée et aussi les pertes dans le system de 15 unités.

TABLE 4.7 – Résultats de système à 15 unités sans effets de rampe et de zones interdites

Puissance générée (MW)	Méthode				
	AOA	DE-PSO[41]	PSO[37]	SSA[24]	CTSO[40]
Pg 01	454.7869	455.000	312.73	454.5597	450
Pg 02	449.0152	420.000	455	454.1909	380
Pg 03	128.5270	130.000	120.35	129.9987	130
Pg 04	129.9991	130.000	108.42	126.8809	130
Pg 05	220.3787	270.000	438.10	210.7831	170
Pg 06	444.05202	460.000	225.42	459.8215	350
Pg 07	461.7778	430.000	375.34	459.8215	350
Pg 08	65.3988	60.000	182.07	60	80
Pg 09	37.0640	25.000	124.30	25.0838	162
Pg 10	61.6824	62.966	94.69	61.83.64	160
Pg 11	74.8914	80.000	42.80	56.4894	80
Pg 12	73.2668	80.000	24.73	64.3740	80
Pg 13	25.5359	25.000	55.05	25.0002	25
Pg 14	25	15.000	36.22	17.2336	55
Pg 15	16.0670	15.000	34.69	52.8743	15
Puissance totale (MW)	2657.1998	2657.966	2630	2658.26	2567
Pertes totales (MW)	27.4998	27.976	-	29.15	31.54
Cout total (\$/h)	32579.8957	32588.81	32912.12	32601.06	33304.98

Interprétation des résultats :

Dans la figure 4.8 les résultats statistiques du minimum, moyen et maximal du coût total optimal obtenu par l'algorithme AOA est comparé avec les résultats rapportés SSA[24] et CSA[13] .

Les résultats comparatifs montrent clairement que la méthode AOA est capable de produire une solution de meilleure qualité que les autres méthodes. Les puissances générées optimales sont reportées sur la figure 4.5. Nous notons que les contraintes d'inégalité sont validées car la puissance optimale produite ne dépasse pas les limites de génération propres à chaque unité.

La figure 4.7 représente les variations de la fonction du coût total de génération (fonction objectif) en fonction des nombres des itérations. On remarque que l'algorithme AOA converge vers la meilleure solution dans un nombre des itérations moins de 200 .

Les résultats de tableau 4.7 montre que le coût total optimal trouvé par la méthode AOA qui est égale 32579.8957 (\$/h) et de valeur réduite par rapport à celle trouvée par la méthode DE-PSO, PSO, SSA et CTSO.

4.3.2 Système de 15 unités avec effets de rampe et de zones interdites

Le tableau 4.8 illustre les résultats de simulation du système 15 unités avec effet de rampe et de zones interdites.

TABLE 4.8 – Résultats de système à 15 unités avec effets de rampe et de zones interdites.

Objectives et résultats	Evaluation
Puissance totale générée (MW)	2660.8344
Cout total de production (\$/h)	32731.47531
pertes totales (MW)	31.1344
Temps d'exécution (sec)	15.505

A-Répartition optimale de la puissance totale générée avec la vérification de la contrainte d'inégalité sont reportés sur le graphe de la figure4.9

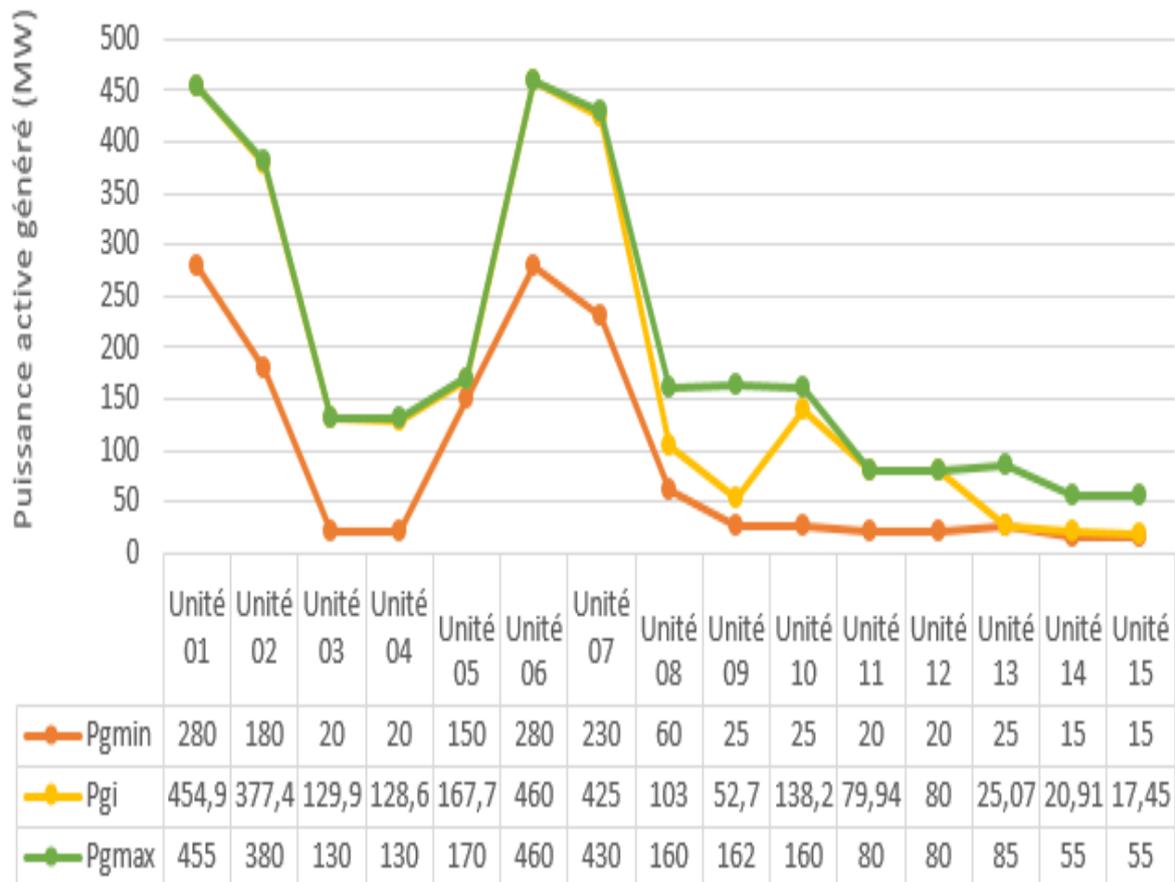


FIGURE 4.9 – Répartition optimale de la puissance totale générée avec visualisation des limites min et max de génération. Cas de système à 15 unités avec effets de rampe et zones interdites.

B-La variation du coût optimal en fonction du nombre des essais :

50 exécutions ont été appliquées avec différents résultats comme il est illustré dans la figure 4.10.

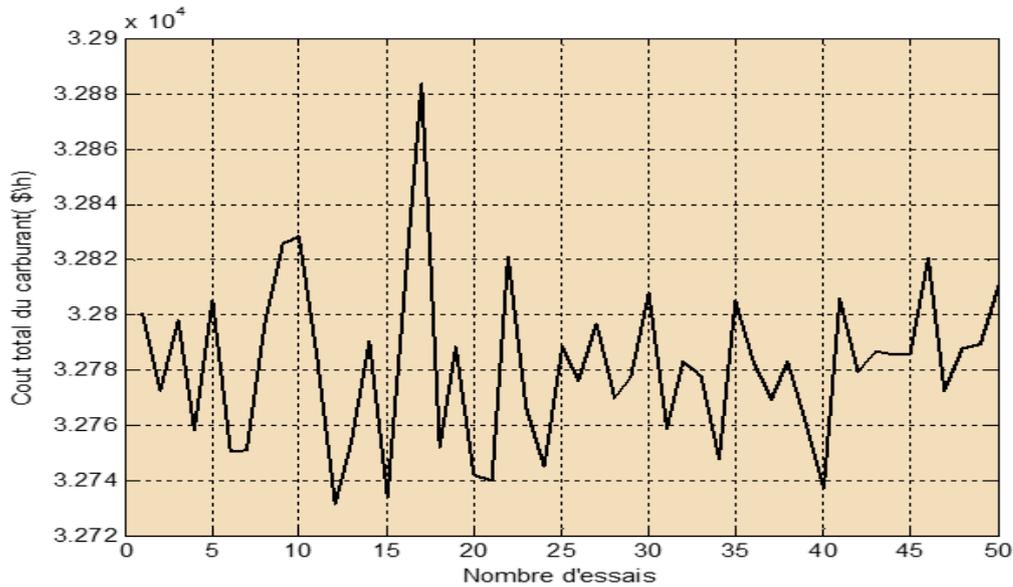


FIGURE 4.10 – Variation de coût optimal pour 50 essais. Cas de système à 15 unités avec effets de rampe et sans zones interdites

C-Convergence de l’algorithme AOA pour le système de 15 unités avec effets de rampe et zones interdites :

La meilleure exécution est de numéro 12 comme il est représenté sur la figure 4.10 , sa courbe de convergence est décrite sur la figure 4.11.

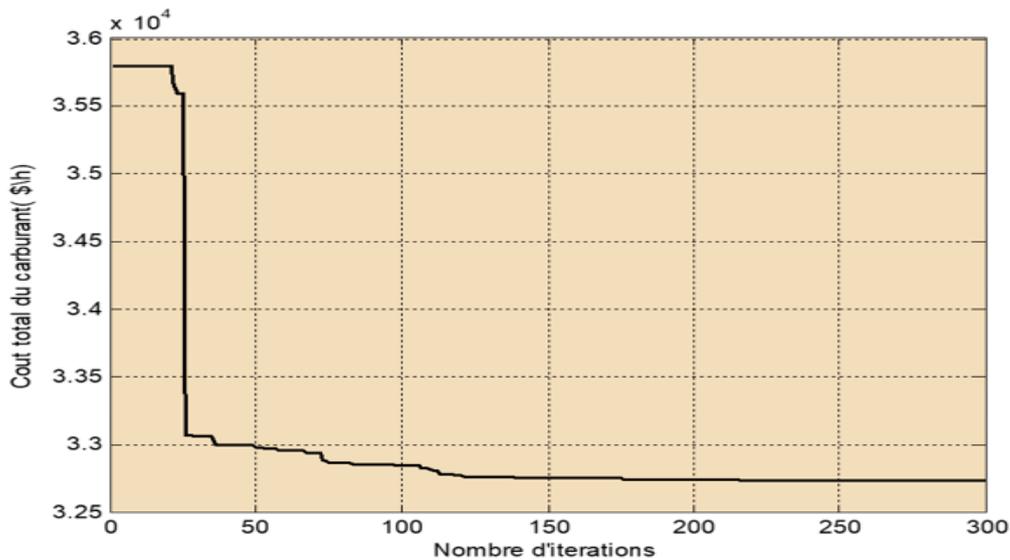


FIGURE 4.11 – Caractéristique de convergence de l’algorithme AOA. Cas de système à 15 unités avec effets de rampe et zones interdites.

D-Comparaison des résultats de AOA avec les autres méthodes pour 50 essais :

Pour vérifier la robustesse de la méthode, on applique 50 essais de l'algorithme (pour chaque essai, on mémorise la meilleure solution trouvée).

Pour le $\min(FC_{t_essai})$, $\text{moyen}(FC_{t_essai})$ et $\max(FC_{t_essai})$ nous utilisons la figure 4.12.

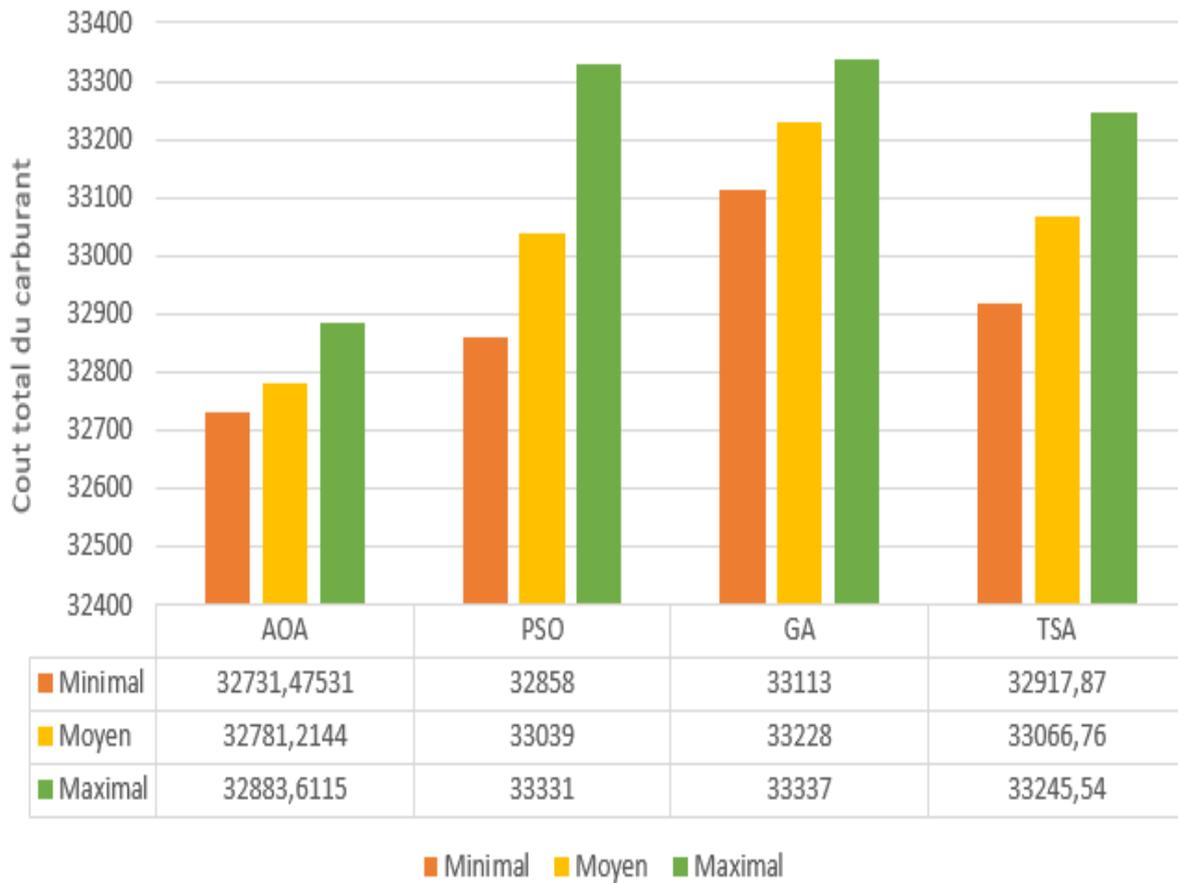


FIGURE 4.12 – Comparaison des résultats de système de 15 unités. Cas avec effets de rampe et zones interdites pour 50 essais

Le tableau 4.9 compare les résultats obtenus par algorithme AOA avec celles trouvées par des autres méthodes (APSO,PVHS,MPSO et AIS), ce tableau présente le cout minimal et la puissance générée à chaque unité et la puissance totale générée et aussi les pertes dans le system de 15 unités.

TABLE 4.9 – Résultats de système à 15 unités avec effets de rampe et de zones interdites

Puissance générée (MW)	Méthode				
	AOA	APSO[44]	PVHS[43]	MPSO[45]	AIS[46]
Pg 01	454.9129	455.000	455.000	455.00	441.159
Pg 02	377.4491	380.010	373.82	390.81	409.587
Pg 03	129.8921	130.000	130.000	112.70	117.298
Pg 04	128.6459	130.000	130.000	124.33	131.258
Pg 05	167.6955	170.010	166.31	356.60	151.011
Pg 06	459.9581	460.000	456.54	443.31	466.258
Pg 07	424.9957	428.280	428.27	433.16	423.368
Pg 08	102.9591	60.000	66.059	91.12	99.948
Pg 09	52.7035	25.000	120.49	66.00	110.684
Pg 10	138.2457	159.790	146.95	30.25	100.229
Pg 11	79.9406	80.000	43.22	24.14	32.057
Pg 12	79.9999	80.000	80.000	51.60	78.815
Pg 13	25.0670	33.700	27.97	45.03	23.568
Pg 14	20.9140	55.700	20.95	23.30	40.258
Pg 15	17.4546	15.000	16.67	15.00	36.906
Puissance totale (MW)	2660.8344	2658.32	2662.2	2662.43	2662.04
Pertes totales (MW)	31.13445	28.3700	32.1	32.4	32.4075
Coût total (\$/h)	32731.4753	32742.78	32780	32780	32854.00

Interprétation des résultats :

Dans la figure 4.12 les résultats statistiques du minimum, moyen et maximal du coût total optimal obtenu par l'algorithme AOA est comparé avec les résultats rapportés PSO[37] GA[37] et TSA[42].

Les résultats comparatifs montrent clairement que la méthode AOA est capable de produire une solution de meilleure qualité que les autres méthodes.

Les puissances générées optimales sont reportées sur la figure 4.9. Nous notons que les contraintes d'inégalité sont validées car la puissance optimale produite ne dépasse pas les limites de génération propres à chaque unité.

La figure 4.11 représente les variations de la fonction du coût total de génération (fonction objectif) en fonction des nombres des itérations. On remarque que l'algorithme AOA converge vers la meilleure solution dans un nombre des itérations moins de 200 .

Les résultats de tableau 4.9 montre que le coût total optimal trouvé par la méthode AOA qui est égale 32731.4753 (\$/h) et de valeur réduite (plus meilleure) par rapport à celle trouvée par la méthode APSO,PVHS,CIPSO et AIS.

4.4 Application de l'algorithme AOA sur un système 40 unités

Pour étudier l'efficacité de l'algorithme AOA dans les systèmes de test plus large, un réseau de test de 40 unités est proposé avec 40 variables de décision, sans pertes de transmission et avec les effets des vannes d'admission (qui rendent le problème de DE plus complexe). La puissance active demandée est 10 500 MW. Les paramètres de choix de AOA sont donnés comme suit :

- ❖ Le nombre de population : $N=350$.
- ❖ Le nombre des itérations maximal : $iter_max = 1200$.

Le tableau 4.10 illustre les résultats liés à l'application de l'algorithme (AOA) sur un réseau de 40 unités sans pertes de transmission et prend en compte l'effet de vannes d'admission. Les puissances générées optimales sont reportées sur le tableau 4.11.

TABLE 4.10 – Résultats de système à 40 unités avec effet de vannes

Objectives et résultats	Evaluation
Puissance totale générée (MW)	10500
Cout total de production (\$/h)	122427.4687
Temps d'exécution(sec)	71.22

A-Répartition optimale de la puissance totale générée avec la vérification de la contrainte d'inégalité sont reportés sur le graphe de la figure 4.13

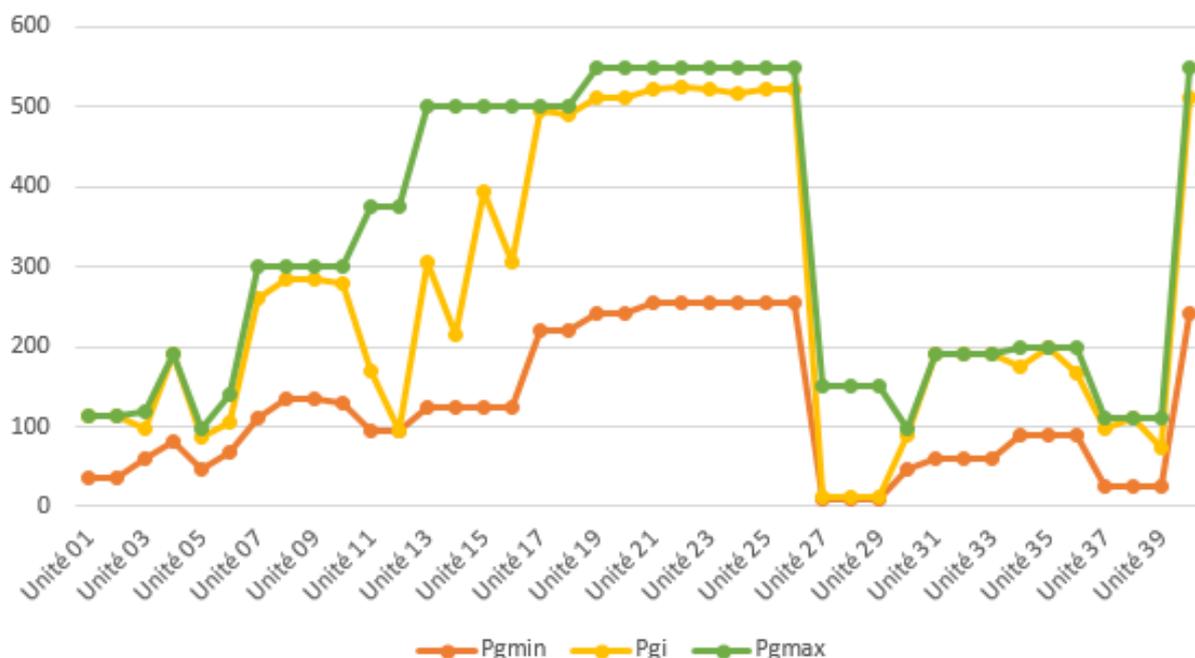


FIGURE 4.13 – Répartition optimale de la puissance totale générée avec visualisation des limites min et max de génération. Cas de système à 40 unités avec effet de vannes.

TABLE 4.11 – Valeurs des puissances générées par chaque unité. Cas de système de 40 unités avec effet d'ouverture de vannes

Unité	Pgmin	Pgi	Pgmax
1	36	113.9999	114
2	36	113.9924	114
3	60	97.4691	120
4	80	189.6985	190
5	47	87.5754	97
6	68	105.8904	140
7	110	259.8710	300
8	135	285.6727	300
9	135	284.6487	300
10	130	279.6020	300
11	94	168.8053	375
12	94	94.0018	375
13	125	304.5230	500
14	125	214.7688	500
15	125	394.2717	500
16	125	304.5231	500
17	220	495.2894	500
18	220	489.3023	500
19	242	511.2978	550
20	242	511.2823	550
21	254	523.2783	550
22	254	524.1312	550
23	254	523.2990	550
24	254	546.6380	550
25	254	523.3534	550
26	254	523.4111	550
27	10	12.3961	150
28	10	10.4621	150
29	10	10.7506	150
30	47	89.3775	97
31	60	189.9922	190
32	60	189.9997	190
33	60	189.9996	190
34	90	176.0271	200
35	90	199.9971	200
36	90	166.7016	200
37	25	98.4675	110
38	25	109.9981	110
39	25	73.8579	110
40	242	511.2783	550

B-La variation du coût optimal en fonction du nombre des essais :

50 exécutions ont été appliquées avec différents résultats comme il est illustré dans la figure 4.14.

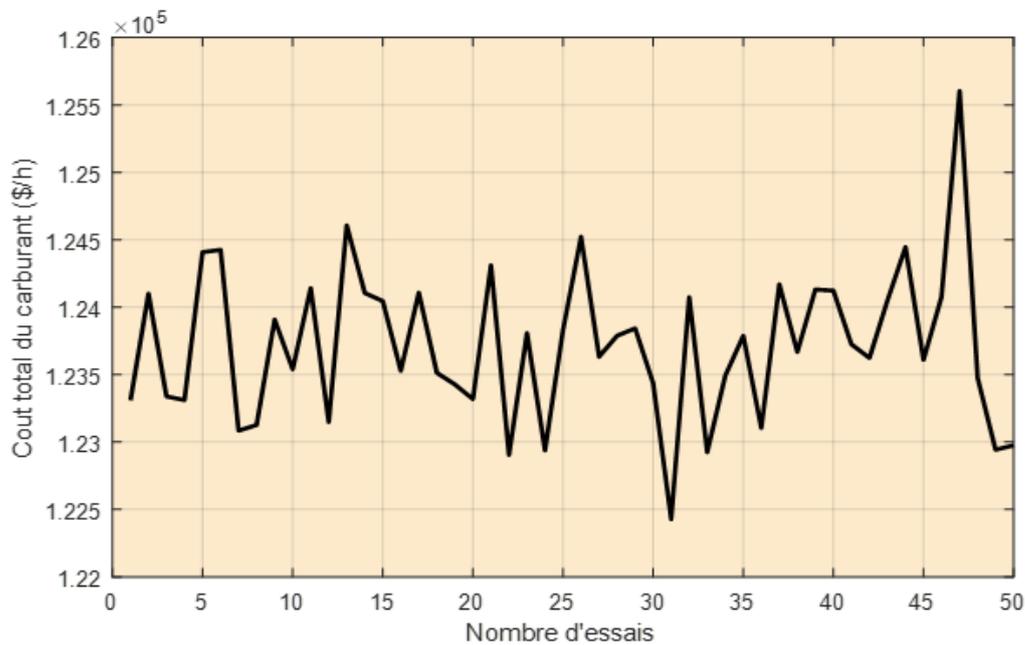


FIGURE 4.14 – Variation de coût optimal pour 50 essais. Cas de système à 40 unités avec effet de vannes

C-Convergence de l'algorithme AOA pour le système de 40 unités avec effet de vannes :

La meilleure exécution est de numéro 31 comme il est représenté sur la figure 4.14 , sa courbe de convergence est décrite sur la figure 4.15.

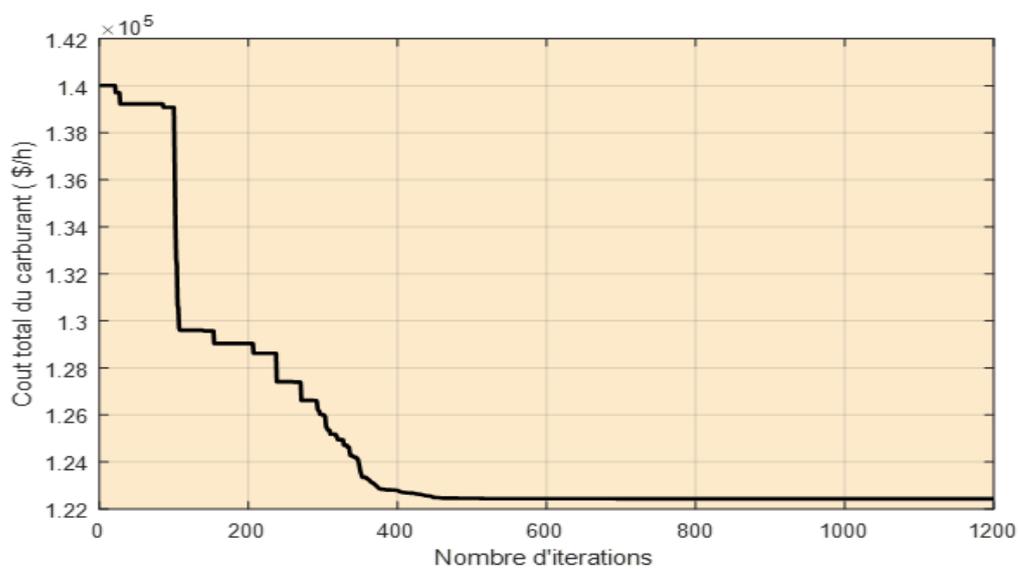


FIGURE 4.15 – Caractéristique de convergence de l'algorithme AOA. Cas de système à 40 unités avec effet de vannes.

D-Comparaison des résultats de AOA avec les autres méthodes pour 50 essais

Pour vérifier la robustesse de la méthode, on applique 50 essais de l'algorithme (pour chaque essai, on mémorise la meilleure solution trouvée).

Pour le $\min(FC_{t_essai})$, $\text{moyen}(FC_{t_essai})$ et $\max(FC_{t_essai})$ nous utilisons la figure 4.16.

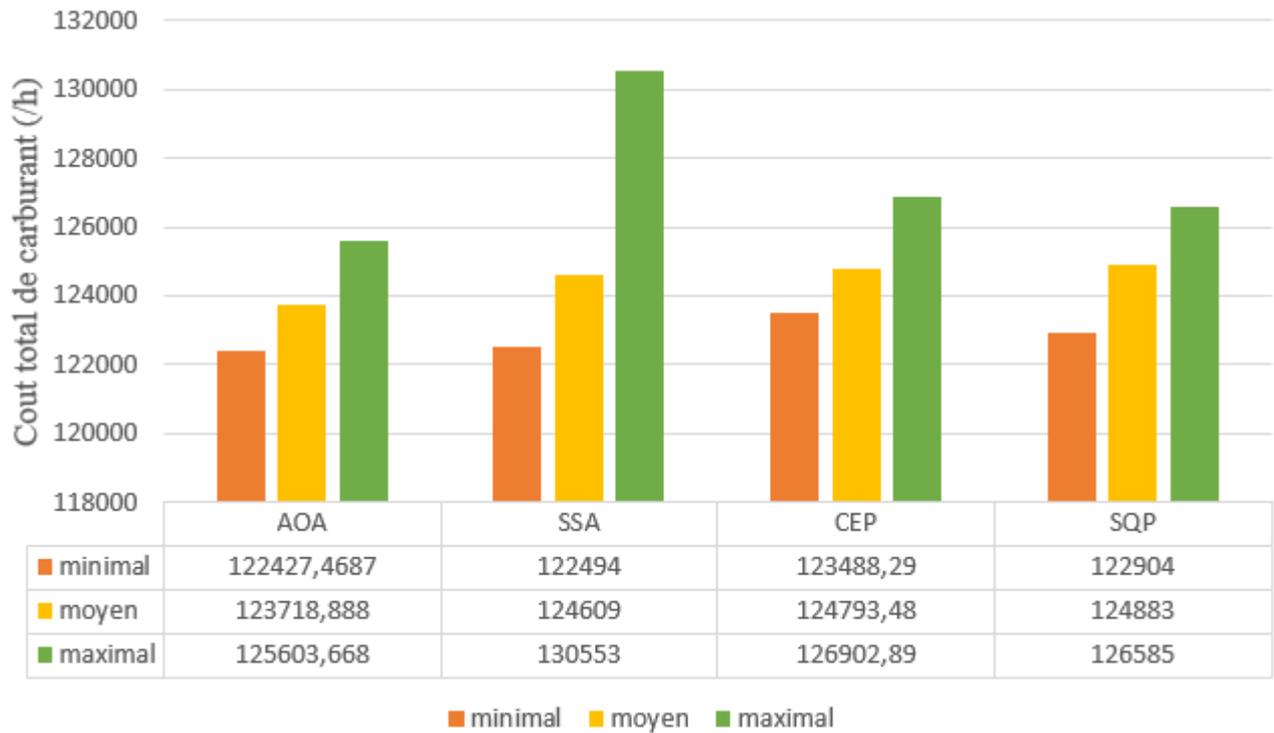


FIGURE 4.16 – Comparaison des résultats de système de 40 unités. Cas avec effet de vannes

TABLE 4.12 – Comparaison des résultats entre différentes méthodes. Cas de système de 40 unités avec effet d'ouverture de vannes

Puissance générée (MW)	Méthode				
	AOA	CSA	SSA	IA_EDP	AEO
Pg 01	113.9999	85.27	72.19	111.11	111.0466
Pg 02	113.9924	104.75	113.80	110.77	112.5560
Pg 03	97.4691	65.67	120.00	97.37	97.4161
Pg 04	189.6985	111.08	179.75	179.75	179.7324
Pg 05	87.5754	69.05	95.63	96.99	92.3887
Pg 06	105.8904	138.08	70.85	139.99	105.6597
Pg 07	259.8710	208.82	264.46	259.60	259.9439
Pg 08	285.6727	273.38	216.33	284.59	284.6152
Pg 09	284.6487	216.28	289.27	284.89	284.5999
Pg 10	279.6020	175.92	226.90	130	204.2955
Pg 11	168.8053	158.44	107.41	94	243.5930
Pg 12	94.001830	279.12	96.22	168.67	243.5989
Pg 13	304.5230	484.03	484.03	214.70	214.7599
Pg 14	214.7688	500.00	394.27	394.21	394.2795
Pg 15	394.2717	339.54	394.27	304.43	394.2800
Pg 16	304.5231	422.47	304.52	394.06	214.7616
Pg 17	495.2894	448.20	489.30	489.36	489.2797
Pg 18	489.3031	486.47	489.33	489.31	489.2786
Pg 19	511.2978	464.14	511.37	511.25	511.2807
Pg 20	511.2823	550.00	511.28	511.12	511.4368
Pg 21	523.2783	535.13	527.83	523.28	523.2857
Pg 22	524.1312	448.88	523.29	523.27	523.2817
Pg 23	523.2990	549.99	527.51	523.22	523.2794
Pg 24	546.6380	441.82	523.76	523.27	523.2789
Pg 25	523.3534	530.62	550.00	523.26	523.2826
Pg 26	523.4111	485.07	523.44	523.26	523.2909
Pg 27	12.3961	35.66	10.50	10	10
Pg 28	10.4621	100.29	10.31	10	10
Pg 29	10.7506	69.02	13.22	10	10
Pg 30	89.3775	82.53	88.76	88	67.1108
Pg 31	189.9922	115.18	190	190	189.9998
Pg 32	189.9997	109.91	182.86	190	159.8110
Pg 33	189.9996	188.69	114.14	190	162.2057
Pg 34	176.0271	184.61	200	164.83	176.8453
Pg 35	199.9971	175.04	169.66	199.99	165.0528
Pg 36	166.7016	108.13	129.15	199.99	164.8089
Pg 37	98.4675	55.67	98.29	109.99	109.9998
Pg 38	109.9981	89.10	81.24	109.99	89.1896
Pg 39	73.8579	97.45	92.76	109.99	94.8394
Pg 40	511.2783	514.31	511.92	511.28	511.2794
Puissance total généré (MW)	1050506	10500	10500	10500	10500
Le Cout total (\$/h)	122427.4687	129804.52	122494.87	121436.97	122358.8672

Interprétation des résultats :

Dans la figure 4.16 les résultats statistiques du minimum, moyen et maximal du coût total optimal obtenu par l'algorithme AOA est comparé avec les résultats rapportés SSA[24] CEP[47] ,et SQP[48].

Les résultats comparatifs montrent clairement que la méthode AOA est capable de produire une solution de meilleure qualité que les autres méthodes.

Selon la figure 4.13 et le tableau 4.11 nous pouvons dire que les puissances optimales générées sont dans les limites admissibles cela signifie que la contrainte d'inégalité est vérifiée. La figure 4.15 illustre la caractéristique de convergence de l'algorithme de AOA qui montre l'évolution de la fonction coût total du combustible (fonction objectif) en fonction des nombres des itérations.

On remarque que l'algorithme AOA converge vers la meilleure solution dans un nombre des itérations moins de 400,Ce test vient renforcer les résultats des tests précédents en soulignant les capacités remarquables de convergence de la méthode AOA.

Les résultats de tableau 4.12 montre que le coût total optimal trouvé par la méthode AOA qui est égale 122427.4687 (\$/h) et de valeur réduite (plus meilleure) par rapport à celle trouvée par la méthode CSA[13];SSA[24].

Cependant les méthodes AEO[28] et IA_EDP[46] marque une légère amélioration par rapport à AOA.

Ces résultats confirment que l'algorithme proposé est capable de trouver une solution prometteuse et faisable, même en présence des unités dont les courbes de coût considèrent l'effet d'ouverture des vannes d'admission.

4.5 Conclusion

Dans ce dernier chapitre on a appliqué l'algorithme de AOA pour la résolution du problème de dispatching économique. En testant ses performances sur trois type de réseaux électriques 06-unités et 15-unités et 40 unités .En réalisant diverses simulations selon le plan d'expérimentation suivant :

- Système de six unités sans effets de rampe et de zones interdites.

- Système de 15 unités sans effets de rampe et de zones interdites et avec effets de rampe et de zones interdites.

à chaque fois la capacité de convergence et le respect des contraintes d'égalité et d'inégalité de l'algorithme est évaluée, en comparant les résultat obtenus avec ceux d'autre méthodes qui existe dans les littératures.

Enfin, un système de 40 unités est considéré en intégrant l'effet d'ouverture de vannes d'admission (pour un problème plus complexe) et une étude paramétrique a été réalise pour les trois systèmes de test.

Sur la base des résultats de la simulation et après la comparaison entre l'algorithme AOA

et les autres méthodes nous pouvons noter que le coût total optimal du combustible de la méthode AOA est plus réduit (plus meilleure.) par rapport à celui des autres méthodes pour chacun des réseaux contenant 6 ,15 et 40 unités de production.

Conclusion générale

Ce travail de recherche présenté dans ce mémoire a pour objectif de résoudre l'un des problèmes les plus importants dans le domaine de fonctionnement, exploitation et planification des réseaux électriques qui est le problème de dispatching économique (DE). Il consiste à répartir la puissance générée totale sur les différentes centrales électriques d'une manière que le coût total de production soit minimal.

Ce problème a été résolu par des méthodes classiques et en raison de l'incapacité de ces méthodes pour résoudre des problèmes complexes c'est-à-dire l'incapacité de traiter le problème de DE considérant les contraintes pratiques des unités électriques de production (effet de vanne, les limites de rampe et zones interdites), on a cherché des méthodes alternative (méta heuristiques) inspiré de la nature et utilisés pour résoudre le problème de DE même si les fonctions objectives et les contraintes ne sont pas des fonctions dérivables et continues.

Dans ce mémoire, une nouvelle technique de recherche stochastique nommée Algorithme d'optimisation d'Archimède (AOA) a été appliquée et testé pour résoudre le problème de DE. A travers l'application de l'algorithme AOA au DE, l'aptitude de convergence de l'algorithme vers des solutions prometteuses a été testée pour le traitement des problèmes de DE complexes et la capacité de recherche (d'exploitation et d'exploration) considérant les systèmes de test 06-unités, 15-unités et 40-unités, afin de prouver l'efficacité de l'algorithme proposé :

- Réseau de 6 unités avec pertes de transmission.
- Réseau de 15 unités avec pertes de transmission sans considération de l'effet de rampe et zone interdite et avec l'effet de rampe et zone interdite.
- Réseau de 40 unités sans pertes de transmission en considérant l'effet des vannes.

Les résultats de simulation de la méthode AOA ont été comparés avec ceux des différents algorithmes connus et récents : Particle Swarm Optimization (PSO), Salp Swarm Algorithm (SSA), GeneticAlgorithm (AG) et Artificial Immune System (AIS). Il est remarquable que AOA est capable de surmonter les techniques d'optimisation auxquelles elle a été comparée. Sur la base des simulations et de l'analyse présentées, l'opérateur de transfert TF est le facteur responsable du passage de la recherche de l'exploration à l'exploitation.

Nous pouvons assumer que l'algorithme AOA présente des avantages parmi les algorithmes

d'optimisation existants et une grande aptitude pour la recherche des solutions globales.
Comme perspectives :

- Nous pouvons appliquer cette méthode dans les différents domaines de réseaux électriques comme l'analyse des performances des réseaux de transport et de distribution.
- Appliquer l'algorithme proposé sur des tailles des réseaux plus importants.

Bibliographie

- [1] Dj. MECHAHEB, Md. HAMMACHE, "Répartition économique de l'énergie électrique à l'aide de la technique des réseaux de neurones artificiels" .Projet de fin d'étude, Université Abderrahmane MIRA de Bejaïa, 2012.
- [2] ÉLEKTRON. "http://dev.blinckers-groups.com/BBoux/Elektron/distribution_electrique3.php".(consulté le 20 février 2022)
- [3] PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ. "<https://www.opg.com/documents/guide-de-leleve-de-9e-annee-pdf/>".(consulté le 24 février 2022)
- [4] M. FATAH AMIR, "Etude du fonctionnement des centres de production dans un système de marché libre de l'énergie électrique" .Thèse de magister, université de Batna ,2011/2012.
- [5] CHOISIR. "<https://www.choisir.com/energie/articles/128603/etat-des-lieux-de-la-centrale-solaire>".(consulté le 25 février 2022)
- [6] ECO INFOS. "<https://www.les-energies-renouvelables.eu/conseils/eolienne/principe-fonctionnement-eolienne/>".(consulté le 2 Mars 2022)
- [7] H. CAMBLONG, "Minimisation De L'impact Des Perturbation D'origine Eolienne Dans La Génération D'électricité Par Des Aérogénérateurs A Vitesse Variable" .Ecole Nationale Supérieur d'Art et Métier, Centre de Bordeaux, 2003.
- [8] FUTURA PLANÈTE. "<https://www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/energie-renouvelable-barrage-fonctionne-centrale-hydroelectrique-1360/>".(consulté le 3 Mars 2022)
- [9] LE BLOG DE LENDOPOLIS. "<https://blog.lendopolis.com/energies-renouvelables/fonctionnement-centrale-biomasse/>".(consulté le 5 Mars 2022)
- [10] O. KHAMED, "Dispatching économique dynamique des réseaux électriques par les méthodes méta-heuristique " .Mémoire master, Université Biskra, 02Juin 2013.
- [11] A. TEDJANI, M. GUEZZOUN, "Application des algorithmes génétiques au dispatching économique des réseaux électriques" .Mémoire master, Université 'El Oued, 2016.
- [12] Y.HAZMANI,F.HENANOU, "Résolution du problème de dispatching économique par les méthodes métaheuristiques" .Mémoire magister, Université Mohamed Khider de Biskra ,2019-2020.
- [13] B.YAHIA, "Méthode de recherche du corbeau améliorée et appliquée au dispatching économique" .mémoire de master, université de Biskra,2018/2019.

- [14] M. KRAIMIA, "Optimisation du coût de production des réseaux interconnectés " .Mémoire magister, Université Batna ,2011.
- [15] I. L'ABED, "Dispatching Economique Dynamique des Réseaux Electriques par Les Méthodes Méta-Heuristique " .Mémoire magister, Université Constantine1, 2013.
- [16] DOSSIER DE LA COMMÉMORATION DU RECOUVREMENT DE LA SOUVERAINETÉ NATIONALE . "https ://www.aps.dz/economie/129825-augmentation-de-5-de-la-consommation-nationale-d-energie-a-la-fin-du-mois-de-septembre".(consulté le 21 Mars 2022)
- [17] Dr. TEBANI HOCINE, "Production de l'Energie Electrique" .Université Hassiba Benbouali Chlef Faculté de Technologie Département d'Electrotechnique ,2019-2020.
- [18] SONELGAZ. "https ://www.sonelgaz.dz/fr/4999/ reorganisation-du-groupe-sonelgaz".(consulté le 26 Mars 2022)
- [19] M. DRAIDI ABDELLAH , "Répartition économique de l'énergie électrique utilisant les techniques d'intelligence artificielle" .Mémoire magister,Université Mentouri de Constantine,2010.
- [20] S.ZEGGAR, "Dispatching Economique D'Energie électrique Par Essaims De Particules Et Algorithmes Génétiques" .(Mémoire),Université Constantine 1, 2012/2013 .
- [21] M.HAMED, "Dispatching Economique Dynamique par Utilisation de Méthodes d'optimisation globales" .(Mémoire),université de Biskra,14/01/2013.
- [22] Z.AUCHARKI,Ou.BELACEL, "Dispatching Economique de la puissance dans un Réseau Electrique en utilisant les Algorithmes Génétiques " .(Mémoire magister),Université MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, 24 /09/2017.
- [23] I.ZIANE, "contribution à l'application de l'optimisation multi-objective par la méthode de recuit simulé au dispatching dynamique" .Thèse de Doctorat, Université djillali liabes-sidi-bel-abbés , 2018.
- [24] A.LAIMECHE, "Application de l'algorithme des essaims de salpes au dispatching économique" .mémoire de master, université de Biskra,2018.
- [25] B.R. ADARSH, T. RAGHUNATHAN, T. JAYABARATHI, X-S YANG, "Economic Dispatch using chaotic bat algorithm" .Energy, 2016.
- [26] F.LOUETRI,I. MESBAHI, "Dispatching Economique par Utilisation de Méthodes d'Optimisation Méta heuristiques" .Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued Faculté de Technologie,2019.
- [27] N.DOUIDA, "Algorithme de recherche du corbeau dédié à l'optimisation appliqué au dispatching économique" .mémoire de master,université de TIZI-OUZOU, 2017.
- [28] A. BOUHANIK,E.MCHOUNCHI, "Algorithme d'Ecosystème Artificiel destiné à l'Optimisation appliqué au Dispatching Economique (AEO)" .mémoire de master, université de Biskra,2019/2020.
- [29] R. CHERKAOUI, "Méthodes heuristiques pour la recherche de configurations optimales d'un réseau électrique de distribution" .Thèse de Doctorat de l'EPF de Lausanne, 1992.

- [30] H. HACHIMI, "Hybridations d'algorithmes méta heuristiques en optimisation globale et leurs applications" .Thèse de Doctorat, INSA de Rouen, 2013.
- [31] R.CHERKAOUI, "Hybridations d'algorithmes méta heuristiques en optimisation globale et leurs applications" .Thèse de Doctorat, INSA de Rouen, 2013.
- [32] A.ZENDARI, " Algorithme des abeilles pour la recherche d'information" .mémoire de master à université de Ghardaïa, 2019.
- [33] Y.KORI,A.MAHAMMEDI, " Effet d'intégration d'énergies renouvelables sur la répartition économique de puissance " .mémoire de master à université Khemis Miliana , 2021.
- [34] N.KHERFANE, "La gestion optimale des réseaux électriques par l'intelligence collective " .Thèse de doctorat à université SIDI-BEL-ABBES,2017.
- [35] A.ZAOUI; W.REGOUTA, "Répartition Optimale Des puissances Dans Un réseau électrique Par L'intelligence Artificielle " .mémoire de master à université EL-Oued,2021.
- [36] HASHIM F, HUSSAIN K,HOUSSEIN E, MABROUK M, AL-ATABANY W, "Archimedes optimization algorithm : a newmetaheuristic algorithm for solving optimization problems" .Springer Science+Business Media, LLC, part of Springer Nature 2020.
- [37] M.ALOUI, "Application de la méthode des essaims particules au dispatching économique" .mémoire de master, université de Biskra,2012/2013.
- [38] E.SALHI, "résolution du problème de dispatching économique avec la méthode de colonie artificielle des abeilles (ABC Algorithme)" .mémoire de master, université de Biskra,2014/2015.
- [39] R. SUBRAMANIAN,K. THANUSHKODIT, "An Efficient Meta Heuristic Algorithm to Solve Economic Load Dispatch Problems" .Iranian Journal of Electrical Electronic Engineering, Vol. 9, No. 4, Dec. 2013,
- [40] K.MANJU, H.HABEEBULLAH, "Comparative Analyses of Particle Swarm Optimization for Non-convex Economic DispatchProblems" .Transactions on Engineering and Sciences,June 2014.
- [41] S. SAYAH , A. HAMOUDA, "A hybrid differential evolution algorithm based on particle swarm optimization for non-convex economic dispatch problem " .Applied Soft Computing journal, vol. 13, no.4, pp.1608-1619, 2013.
- [42] KHAMSAWANG S, JIRIWIBHAKORN S. DSPSO-TSA for . ENERGY CONVERS MANAGE 2010 ;51(2) :365-75. "economic dispatch problem with nonsmooth and noncontinuous cost functions" .Energy Convers Manage 2010 ;51(2) :365-75.
- [43] B K PANIGRAHI,V RAVIKUMAR PANDI,SAWAGATAM DAS ,ZHIHUA CUI,RENU SHARMA "Economic Load Dispatch Using Population-Variance Harmony Search Algorithm" .Department of Electrical Eng.India,August 2012.
- [44] B. K. PANIGRAHI, V. R. PANDI, S.DAS, "Adaptive particle swarm optimization approach for static and dynamic economic load dispatch" . Energy Conversion Manage., vol. 49, no. 6 pp. 1407-1415, 2008.

- [45] ZWE-LEE GAING, "Particle Swarm Optimization to Solving the Economic Dispatch Considering the Generator Constraints" . IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 18, NO. 3, AUGUST 2003.
- [46] ESQUIVEL,ARAGON,COELLO COELLO "An immune algorithm with power redistribution for solving economic dispatch problems" .journal Information Sciences,22 October 2014.
- [47] SINHA N, CHAKRABARTI R, CHATTPADHYAY PK, "Evolutionary programming techniques for economic load dispatch" .IEEE Trans Evol Comput 2003;7(1) :83-94.
- [48] LEANDRO DOS SANTOS COELHO,VIVIANA COCO MARIANI, "Combining of Chaotic Differential Evolution and Quadratic Programming for Economic Dispatch Optimization With Valve-Point Effect" .IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, MAY 2006.

Annexe

Annexe A1 : Données de système test de six unités

Unité	Coefficients du cout			Puissances limites		UR (MW/h)	DR (MW/h)	P0 (MW)
	a	b	c	Pmax(MW)	Pmin(MW)			
1	240	7	0.0070	500	100	80	120	440
2	200	10	0.0095	200	80	50	90	170
3	220	8.5	0.0090	300	50	65	100	200
4	200	11	0.0090	150	50	50	90	150
5	220	10	0.0080	200	50	50	90	190
6	190	12	0.0075	120	50	50	90	110

Zones interdites		
Unité	Zone-I (MW)	Zone-II (MW)
1	[210-240]	[350-380]
2	[90-110]	[140-160]
3	[150-170]	[210-240]
4	[80-90]	[110-120]
5	[90-110]	[140-150]
6	[75-85]	[100-105]

$B_{ij}=[0.0017 \ 0.0012 \ 0.0007 \ -0.0001 \ -0.0005 \ -0.0002; \dots$
 $0.0012 \ 0.0014 \ 0.0009 \ 0.0001 \ -0.0006 \ -0.0001; \dots$
 $0.0007 \ 0.0009 \ 0.0031 \ 0.0000 \ -0.0010 \ -0.0006; \dots$
 $-0.0001 \ 0.0001 \ 0.0000 \ 0.0024 \ -0.0006 \ -0.0008; \dots$
 $-0.0005 \ -0.0006 \ -0.0010 \ -0.0006 \ 0.0129 \ -0.0002; \dots$
 $-0.0002 \ -0.0001 \ -0.0006 \ -0.0008 \ -0.0002 \ 0.0150];$
 $B_{oi}=1e-3*[-0.3908 \ -0.1297 \ 0.7047 \ 0.0591 \ 0.2161 \ -0.6635];$
 $B_{oo}=0.056;$

Annexe A2 : Données de système test de 15 unités

Unité	Coefficients du cout			Puissances limites		DR (MW/h)	UR (MW/h)	P0 (MW)
	a	b	c	Pmax(MW)	Pmin(MW)			
1	670	10.1	0.000299	455	150	120	80	400
2	574	10.2	0.000183	455	150	120	80	300
3	374	8.8	0.001126	130	20	130	130	105
4	374	8.8	0.001126	130	20	130	130	100
5	461	10.4	0.000205	470	150	120	80	90
6	630	10.1	0.000301	460	135	120	80	400
7	548	9.8	0.000364	465	135	120	80	350
8	227	11.2	0.000338	300	60	100	65	95
9	173	11.2	0.000807	162	25	100	60	105
10	175	10.7	0.001203	160	25	100	60	110
11	186	10.2	0.003586	80	20	80	80	60
12	230	9.9	0.005513	80	20	80	80	40
13	225	13.1	0.000371	85	25	80	80	30
14	309	12.1	0.00199	55	15	55	55	20
15	323	12.4	0.004447	55	15	55	55	20

Zones interdites			
Unité	Zone-I (MW)	Zone-II (MW)	Zone-III (MW)
2	[185-225]	[305-335]	[420-450]
5	[180-200]	[305-335]	[390-420]
6	[230-255]	[365-395]	[430-455]
12	[30-40]	[55-65]	-

$B_{ij}=1e-3*[$ 1.4 1.2 0.7 -0.1 -0.3 -0.1 -0.1 -0.1 -0.3 0.5 -0.3 -0.2 0.4 0.3 -0.1 ;
1.2 1.5 1.3 0.0 -0.5 -0.2 0.0 0.1 -0.2 -0.4 -0.4 0.0 0.4 1.0 -0.2 ;
0.7 1.3 7.6 -0.1 -1.3 -0.9 -0.1 0.0 -0.8 -1.2 -1.7 0.0 -2.6 11.1 -2.8 ;
-0.1 0.0 -0.1 3.4 -0.7 -0.4 1.1 5.0 2.9 3.2 -1.1 0.0 0.1 0.1 -2.6 ;
-0.3 -0.5 -1.3 -0.7 9.0 1.4 -0.3 -1.2 -1.0 -1.3 0.7 -0.2 -0.2 -2.4 -0.3 ;
-0.1 -0.2 -0.9 -0.4 1.4 1.6 0.0 -0.6 -0.5 -0.8 1.1 -0.1 -0.2 1.7 0.3 ;
-0.1 0.0 -0.1 1.1 -0.3 0.0 1.5 1.7 1.5 0.9 -0.5 0.7 0.0 -0.2 -0.8 ;
-0.1 0.1 0.0 5.0 -1.2 -0.6 1.7 16.8 8.2 7.9 -2.3 -3.6 0.1 0.5 -7.8 ;
-0.3 -0.2 -0.8 2.9 -1.0 -0.5 1.5 8.2 12.9 11.6 -2.1 -2.5 0.7 -1.2 -7.2 ;
-0.5 -0.4 -1.2 3.2 -1.3 -0.8 0.9 7.9 11.6 20.0 -2.7 -3.4 0.9 -1.1 -8.8 ;
-0.3 -0.4 -1.7 -1.1 0.7 1.1 -0.5 -2.3 -2.1 -2.7 14.0 0.1 0.4 -3.8 16.8 ;
-0.2 0.0 0.0 0.0 -0.2 -0.1 0.7 -3.6 -2.5 -3.4 0.1 5.4 -0.1 -0.4 2.8 ;

```
0.4 0.4 -2.6 0.1 -0.2 -0.2 0.0 0.1 0.7 0.9 0.4 -0.1 10.3 -10.1 2.8;  
0.3 1.0 11.1 0.1 -2.4 -1.7 -0.2 0.5 -1.2 -1.1 -3.8 -0.4 -10.1 57.8 -9.4;  
-0.1 -0.2 -2.8 -2.6 -0.3 0.3 -0.8 -7.8 -7.2 -8.8 16.8 2.8 2.8 -9.4 128.3];  
Boi=1e-3*[-0.1 -0.2 2.8 -0.1 0.1 -0.3 -0.2 -0.2 0.6 3.9 -1.7 0.0 -3.2 6.7 -6.4];  
Boo=0.0055;
```

Annexe A3 : Données de système test de 40 unités

Unité	Coefficients du cout			Puissances limites		d	e
	a	b	c	Pmax(MW)	Pmin(MW)		
1	94.705	6.73	0.00690	114	36	100	0.084
2	94.705	6.73	0.00690	114	36	100	0.084
3	309.54	7.07	0.02028	120	60	100	0.084
4	369.03	8.18	0.00942	190	80	150	0.063
5	148.89	5.35	0.01140	97	47	120	0.077
6	222.33	8.05	0.01142	140	68	100	0.084
7	278.71	8.03	0.00357	300	110	200	0.042
8	391.98	6.99	0.00492	300	135	200	0.042
9	455.76	6.60	0.00573	300	135	200	0.042
10	722.82	12.9	0.00605	300	130	200	0.042
11	635.20	12.9	0.00515	375	94	200	0.042
12	654.69	12.8	0.00569	375	94	200	0.042
13	913.40	12.5	0.00421	500	125	300	0.035
14	1760.4	8.84	0.00752	500	125	300	0.035
15	1728.3	9.15	0.00708	500	125	300	0.035
16	1728.3	9.15	0.00708	500	125	300	0.035
17	647.85	7.97	0.00313	500	220	300	0.035
18	649.69	7.95	0.00313	500	220	300	0.035
19	647.83	7.97	0.00313	550	242	300	0.035
20	647.81	7.97	0.00313	550	242	300	0.035
21	785.96	6.63	0.00298	550	254	300	0.035
22	785.96	6.63	0.00298	550	254	300	0.035
23	794.53	6.66	0.00284	550	254	300	0.035
24	794.53	6.66	0.00284	550	254	300	0.035
25	801.32	7.10	0.00277	550	254	300	0.035
26	801.32	7.10	0.00277	550	254	300	0.035
27	1055.1	3.33	0.52124	150	10	120	0.077
28	1055.1	3.33	0.52124	150	10	120	0.077
29	1055.1	3.33	0.52124	150	10	120	0.077
30	148.89	5.35	0.01140	97	47	120	0.077
31	222.92	6.43	0.00160	190	60	150	0.063
32	222.92	6.43	0.00160	190	60	150	0.063
33	222.92	6.43	0.00160	190	60	150	0.063
34	107.87	8.62	0.00010	200	90	200	0.042
35	116.58	8.62	0.00010	200	90	200	0.042
36	116.58	8.62	0.00010	200	90	200	0.042
37	307.45	5.88	0.01610	110	25	80	0.098
38	307.45	5.88	0.01610	110	25	80	0.098
39	307.45	5.88	0.01610	110	25	80	0.098
40	647.83	7.97	0.00313	550	242	300	0.035