



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Génie Electrique
Electrotechnique

Réf. : Entrez la référence du document

Présenté et soutenu par :
CHARIF MOHAMED AYMEN et DRISSI DJOUHAYNA

Le : lundi 26 mai 2025

Résolution du problème de dispatching économique environnemental par utilisation de la méthode NGO en présence des sources éoliennes

Jury :

Dr	ROUINA Abdelhamid	Pr	GENIE ELECTRIQUE	Président
Dr	BECHA Habiba	MCA	GENIE ELECTRIQUE	Examineur
Dr	MAHDAD Belkacem	Pr	GENIE ELECTRIQUE	Encadreur



Année universitaire : 2025/2026

Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
SCIENCE ET TECHNOLOGIE
RESEAU ELECTRIQUE

Réf. : Entrez la référence du document

Résolution du problème de dispatching économique environnemental par utilisation de la méthode NGO en présence des sources éoliennes.

Le : lundi 26 mai 2025

Présenté par :
de l'encadreur :
CHARIF Mohamed Aymen
DRISSI Djouhayna

Avis favorable

Pr. MEHDAD Belkacem

Signature Avis favorable du Président du Jury

DR. ROUINA Abdelhamid

Cachet et signature

Remercîment
Bewertung

Remercîment

Louange à Dieu, par la grâce duquel les bonnes œuvres s'accomplissent, et par la faveur duquel le succès et la justesse sont atteints.

Nous Le louons et Le remercions pour la patience et la guidance qu'Il nous a accordées, pour nous avoir facilité les voies de la connaissance et pour nous avoir aidés à franchir ce parcours scientifique pas à pas.

Nous exprimons nos plus sincères remerciements et notre gratitude à notre distingué professeur, Mehdad Belkacem, pour tout le soutien, les conseils et les orientations qu'il nous a prodigués, ainsi que pour sa patience envers nous tout au long de ce travail. Il fut véritablement un guide généreux et un père scientifique responsable.

Nous tenons également à remercier particulièrement nos chers parents, qui ont été notre véritable pilier, par leur patience, leurs prières et leur soutien à chaque étape de fatigue et d'inquiétude. Vous avez été notre appui lorsque notre détermination faiblissait, et notre motivation lorsque le fardeau devenait lourd.

Enfin, nous adressons un mot de gratitude à nous-mêmes, car nous avons traversé cette expérience avec toutes ses difficultés et ses défis, et nous y avons fait face avec une détermination commune et une résolution sereine. Le chemin n'a pas été facile, mais nous avons choisi de ne pas abandonner, de persévérer et de nous relever à chaque fois. Et nous voici aujourd'hui, récoltant les fruits de ce que nous avons semé ensemble.

Drissi Djouhayna

Charif Mohamed Aymen

Dédicace
Dédicace

Dédicace

*Nous dédions cette remise de diplôme à **nos chers parents et à nos frères et sœurs bien-aimés**, Vous êtes la lumière qui a éclairé nos chemins quand l'obscurité s'est installée, La main qui a tenu les nôtres quand nous trébuchions, Et grâce à votre amour, votre patience et votre soutien, nous avons pu surmonter toutes les difficultés. Ce succès est le vôtre avant d'être le nôtre, Nous vous adressons nos mots de gratitude et de reconnaissance les plus profonds, du fond du cœur.*

C'est à vous que nous dédions chaque succès, chaque pas que nous avons fait, car vous êtes l'origine et la continuité.

*Nous dédions également ce travail à **notre professeur, Mehdad Belkacem**, En reconnaissance de tout le soutien et les connaissances qu'il nous a apportés.*

À ceux qui nous ont accompagnés en silence, et nous ont aidés sans rien demander en retour, À ceux qui ont été une source de réconfort dans nos moments les plus difficiles.

*Et à **nous-mêmes**, parce que nous avons choisi de continuer malgré toutes les embûches, Et parce que nous avons cru que l'effort porte ses fruits, et que tout labeur a sa récompense.*

*Nous dédions cette remise de diplôme à **chaque cœur qui a souffert avec nous... et a cru en nous.***

Drissi Djouhayna

Charif Mohamed Aymen

Sommaire

Sommaire :

1 Contents

1. Chapitre 1 : Production d'énergie électrique	1
1.1 Introduction :.....	1
1.2 Structure générale des réseaux de transport :	1
1.2.1 Réseaux de transport THT :	2
1.2.2 Réseaux de répartition HT :	2
1.2.3 Réseaux de distribution :.....	2
1.3 L'énergie fossiles :.....	3
1.3.1 Définition des énergies fossiles :.....	3
1.3.2 Les principales sources d'énergie fossile :	3
1.3.3 Unité de production :	4
1.3.4 Production d'énergie basée sur les énergies fossiles :	4
1.3.5 Avantages et inconvénients des énergies fossiles :.....	5
A. Avantages :	5
B. Inconvénients :	6
1.4 Production d'énergie basée sur les énergies renouvelables :.....	6
1.4.1 L'énergie solaire photovoltaïque :	6
A. Les avantages :	7
B. Les Inconvénients :	7
1.4.2 Energie éolienne :	8
A. Avantages : les avantages des sources éolienne sont structurés comme suit :.....	9
B. Inconvénients :	9
1.5 Centre de conduite :.....	10
D. Défis et évolutions :.....	11
1.6 Conclusion :	12
2 Chapitre 2 : Modélisation du problème de dispatching économique.	13
2.1 Introduction :.....	13
2.2 Fonctions objectives :	14
2.2.1 La fonction de coût :	15
2.2.2 Fonction quadratique :.....	15
2.2.3 Fonction coût à effet de valve :.....	16
2.2.4 Multi fuel :	17
2.2.5 Effet de la zone interdite (prohibited zone) :	18

2.3	Minimisation des Émissions de Gaz :	18
2.4	Formulation mathématique du problème de minimisation du coût :.....	19
2.4.1	Contraintes :.....	19
2.5	Dispatching économique en présence des sources renouvelables :	21
2.6	Modélisation de l'incertitude de l'énergie éolienne :.....	21
2.6.1	La distribution de Weibull :.....	21
2.6.2	Description de la distribution de la vitesse du vent :	21
2.6.3	Estimation de la production d'énergie éolienne :	22
2.7	Production de l'énergie éolienne :	22
2.7.1	Coût direct:.....	23
2.7.2	Coût de surestimation :	23
2.7.3	Coût de sous-estimation :	24
2.7.4	Coût total des sources éoliennes :	24
2.8	Conclusion :	25
3	Chapitre 3 : Techniques d'optimisation métaheuristiques.....	24
3.1	Introduction :.....	24
3.2	Définition de l'Optimisation :	24
3.3	Définition des Méthodes Méta heuristiques :	24
3.4	Classification des algorithmes méta heuristiques :.....	24
3.5	Algorithme génétique :.....	25
3.5.1	Les opérateurs des algorithmes génétiques :	26
3.5.2	Mécanisme de recherche de l'algorithme génétique :	28
3.5.3	Organigramme de la méthode Algorithme génétique :	29
3.5.4	Les avantages des algorithmes génétiques :[30]	29
3.6	Optimisation par la méthode Northern Goshawk (NGO) :	30
3.6.1	Inspiration et comportement de l'autour des palombes :	30
3.6.2	L'algorithme et le modèle mathématique :	30
3.7	Termes techniques associés l'optimisation : [40]	35
3.7.1	La fonction d'objective :	35
3.7.2	Variables de décision :	35
3.7.3	Définition des contraintes :	35
3.7.4	Optimisation multi objective :.....	35
3.8	Conclusion :	36
4	Chapitre 4 : Analyse des résultats d'optimisation.	36
4.1	Introduction :.....	36

4.2	Description du réseau test :	36
4.3	L'algorithme génétique :	37
4.3.1	Méthodologie d'optimisation par l'algorithme génétique :	37
4.3.2	Données techniques :	39
4.4	Dispatching sans intégration des sources renouvelables :	40
4.4.1	Minimisation du cout de combustible :	40
4.4.2	Interprétation des résultats :	44
4.5	Méthode NGO :	46
4.5.1	Analyse 1 :	46
4.5.2	Interprétation globale :	55
4.6	Optimisation du Dispatching économique avec intégration des sources renouvelables :	56
4.6.1	Caractéristiques de l'éolienne :	59
4.6.2	Interprétation :	60
4.6.3	Minimisation du cout global par la méthode NGO avec considérant l'intégration de l'énergie éolienne :	60
4.6.4	Interprétation :	65
4.7	Minimisation du cout total par application de la méthode AG avec intégration de l'énergie éolienne :	65
4.7.1	Interpération :	66
4.7.2	Etude comparative :	66
4.7.3	Interprétation :	67
4.7.4	Comparaison des résultats d'optimisation entre AG et NGO :	67
4.7.5	Interprétation :	68
4.8	Conclusion :	69

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX :

Tableau 1 : coefficients de la fonction cout quadratique des unités de production thermique.	39
Tableau 2 : coefficients de la fonction émission de gaz	39
Tableau 3:coefficients de la fonction coût à effet de valve des unités de production thermique.	39
Tableau 4: résultats de minimisation de cout de combustible : fonction cout quadratique. .	40
Tableau 5: résultats de minimisation de cout de combustible : fonction cout à l'effet de valve	42
Tableau 6: résultats de minimisation de l'émission de gaz	43
Tableau 7: Caractéristiques des fonctions de types uni modales et multimodales.	46
Tableau 8: Résultat de validation de la méthode NGO : minimisation des fonctions F1, F2, F13 et F23	47
Tableau 9: Résultat de validation de la méthode NGO : Minimisation des fonctions : F1, F2, F13 et F23	52
Tableau 10: Paramètres PDF et coefficients couts liés aux deux fermes éoliennes (JB5- JB11).	57
Tableau 11: Résultat de validation de la méthode NGO avec l'intégration de l'énergie éolienne.	62
Tableau 12: Résultat de validation de la méthode NGO ave l'intégration de de deux fermes éoliennes.	64
Tableau 13: résultats de minimisation de cout de combustible : fonction cout à l'effet de valve avec l'intégration de l'Energie renouvelable (éolienne) {Itmax=100, Pop=10}	66
Tableau 14:Etude comparative : optimisation du cout total sans et avec intégration des sources éoliennes.	67
Tableau 15 : Comparaison des performances : algorithme génétique (AG) versus méthode NGO suite à l'intégration de l'éolien {Itmax=100, Pop=10}.....	68

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES :

Figure 1-1 : Structure topologique d'un réseau moderne [3].....	2
Figure 1-2: centrales électriques alimentées par des combustibles fossiles [8]	3
Figure 1-3 : Structure de l'unité de production [10].....	4
Figure 1-4 : Principe de base de fonctionnement d'une centrale thermique [12].....	5
Figure 1-5 : Le principe de fonctionnement d'une centrale nucléaire [13].....	5
Figure 1-6 : Connexion d'une source PV au réseau électrique [15]	6
Figure 1-7: Centrale de solaire photovoltaïque [17].....	8
Figure 1-8: Conversion de l'énergie cinétique du vent.	9
Figure 1-9 : Ferme éolienne	10
Figure 1-10:vue globale d'un centre de dispatching national	10
Figure 2-1:Stratégie de planification des réseaux électriques.	14
Figure 2-2:La variation du coût en fonction de la puissance générée.	15
Figure 2-3:: Courbe de coût du combustible d'une unité thermique avec vannes d'admission de vapeur.....	16
Figure 2-4:Caractéristique de l'effet de multi fuel.....	17
Figure 2-5:Caractéristique de l'effet de la zone interdite.	18
Figure 2-6:Rejets d'une centrale à charbon.	19
Où : p_{wr} est la puissance de sortie maximale d'une seule éolienne dans des conditions idéales, v_{in} , v_{ret} et v_{out} sont respectivement la vitesse de démarrage, la vitesse nominale et la vitesse de coupure de l'éolienne.	
La Figure 2-8 représente la Variation de la puissance générée de l'éolienne en fonction de la vitesse du vent.	
	2
2	
Figure 2-7:la Variation de la puissance générée de l'éolienne en fonction de la vitesse du vent.	23
Figure 3-1:classification des méthodes méta heuristiques	25
Figure 3-2: Niveaux d'organisation des AG.	26
Figure 3-3 : Croisement en un seul point.	27
Figure 3-4 : Croisement en multipoints ($m = 4$).	27
Figure 3-5: Principe de la mutation.....	28
Figure 3-6 : Principe de fonctionnement de l'AG.....	29
Figure 3-7 : Autour des palombes (Northern Goshawk).	30
Figure 3-8 : Schéma d'identification et d'évasion des proies par l'autour des palombes	33
Figure 3-9 : Organigramme de recherche standard de l'algorithme NGO	34
Figure 4-1:Stratégie de dispatching économiques environnementale.	36
Figure 4-1:Stratégie de dispatching économiques environnementale.	37
Figure 4-2: Méthodologie d'optimisation par l'algorithme génétique	38
Figure 4-3: Caractéristique de convergence de l'AG : Minimisation du coût quadratique. ...	41
Figure 4-4: Caractéristique de convergence de l'AG : Minimisation du coût à effet de valve.	42
Figure 4-5: Caractéristique de convergence de l'AG : Minimisation de l'émission de gaz....	44
Figure 4-6: Convergence de la fonction unimodale F1 par application de la méthode NGO: {Itmax=100, Pop=10 et 30}	48

Figure 4-7: Convergence de la fonction unimodale F2 par application de la méthode NGO: {Itmax=100, Pop=10 et 30}	49
Figure 4-8 : Convergence de la fonction multimodale F13 par application de la méthode NGO: {It max=100, Pop=10 et 30=}	50
Figure 4-9: Convergence de la fonction multimodale F23 par application de la méthode NGO: {It max=100, Pop=10 et 30}	51
Figure 4-10: Convergence de la fonction unimodale F1 par application la méthode NGO: {It max=500, Pop=10 et 30=}	53
Figure 4-11: Convergence de la fonction unimodal F2 par application la méthode NGO: {Itmax=500, Pop=10 et 30=}	54
Figure 4-12 : Convergence de la fonction multimodale F13 par application la méthode NGO: {It max=500, Pop=10 et 30=}	54
Figure 4-13: Convergence de la fonction multimodale F23 par application la méthode NGO: {It max=500, Pop=10 et 30=}	55
Figure 4-14: Stratégie de dispatching économiques environnementale avec intégration des sources renouvelables	57
Figure 4-15: Analyse de la distribution des vitesses de vent des fermes éoliennes connectées aux jeux de barres 5 et 11.	58
Figure 4-16: Distribution de Weibull de deux fermes éoliennes installées aux jeux de barres 5 et 11.	58
Figure 4-18: Caractéristiques de variation des couts de l'éolienne en fonction de la puissance générée : ferme éolienne installée au jeu de barres JB11.	59
Figure 4-19 : Caractéristique de convergence de NGO avec l'intégration de deux fermes éoliennes : {Itmax=100, Pop=10}	63
Figure 4-20: Caractéristique de convergence de NGO avec l'intégration de deux fermes éoliennes	64

Listes Des

Index

Listes Des Index :

Pgt : Puissance totale générée par les unités thermiques.

Pgw : Puissance générée par les sources éoliennes.

Pgt min : Puissance minimale générée par les unités thermiques.

Pgt max : Puissance maximale générée par les unités thermiques.

Ctot : Coût total.

Ctot v : Coût total (valve-point effect considéré)

Cglobale : Coût global total de la production (toutes sources)

Cout.Q. nopt : Coût quadratique sans optimisation.

Cout-max : Coût maximal.

Cout-min : Coût minimal.

Cwind : Coût direct lié à la production éolienne.

Cwov : Coût de surestimation de l'énergie éolienne.

Cwun : Coût de sous-estimation de l'énergie éolienne.

Cwd : Coût total des sources éoliennes (direct + surestimation + sous-estimation)

Em : Quantité totale d'émissions de gaz (ex : CO₂, NO_x) produite.

Em-moy : Émission moyenne.

Em-max : Émission maximale.

Em-op : Émission optimale obtenue après optimisation

Em-nop : Émission sans optimisation.

Er : error.

SD : standard deviation.

It max : Nombre maximal d'itérations dans les algorithmes d'optimisation.

Pop : Taille de la population utilisée dans l'algorithme (AG ou NGO).

Résumé

Résumé :

Ce travail de recherche se penche sur la gestion de l'énergie électrique, avec un accent particulier sur le dispatching économique environnemental. L'objectif principal est de parvenir à une réduction des coûts de production et des émissions de gaz, grâce à l'intégration de sources d'énergie renouvelables. L'énergie éolienne est spécifiquement modélisée en utilisant la distribution de Weibull pour gérer son incertitude intrinsèque. Afin de simuler le comportement réel des unités de production, la contrainte pratique de l'effet de valve est prise en compte. Pour résoudre ce problème d'optimisation complexe, des algorithmes métaheuristiques ont été adaptés et appliqués. Parmi ceux-ci, l'algorithme génétique et l'algorithme NGO, inspiré du comportement de chasse de l'autour des palombes, ont été testés avec succès sur un réseau standard IEEE 30-Bus. Les résultats d'optimisation obtenus confirment la robustesse de l'algorithme proposé, tant en termes de qualité de solution que de vitesse de convergence.

Mots clés : Gestion de l'énergie électrique, Énergies renouvelables, Distribution de Weibull, Dispatching économique environnemental, Algorithmes métaheuristiques, Algorithme génétique, Algorithme NGO, Énergie éolienne, Réduction des coûts, Réduction des émissions.

تلخيص: يهدف هذا العمل إلى استكشاف إدارة الطاقة الكهربائية، مع التركيز على التوزيع الاقتصادي البيئي. الهدف هو التقليل المتزامن لتكاليف الإنتاج وانبعثات الغازات من خلال دمج مصادر الطاقة المتجددة، ولا سيما طاقة الرياح التي تم نمذجتها باستخدام توزيع ويبل لمحاكاة تذبذب سرعة الرياح. لإيجاد حلول تطبيقية لإشكالية التوزيع الأمثل للطاقة المنتجة فقد تم الأخذ بعين الاعتبار القيود التقنية المتعلقة بوحدات الإنتاج مثل تأثير الصمامات. لحل هذه المشكلة المعقدة، تم استخدام خوارزميات البحث المدرجة ضمن فئة الطرق الشاملة (métaheuristique) مثل الخوارزمية الجينية وخوارزمية NGO المستوحاة من سلوك صيد الطيور الجارحة واختبارها بنجاح على شبكة قياسية IEEE 30-Bus، النتائج المتحصل عليها أثبتت فعالية خوارزمية NGO مقارنة بالخوارزمية الجينية من حيث نوعية النتائج وسرعة التقارب،

الكلمات المفتاحية: إدارة الطاقة الكهربائية، الطاقات المتجددة، توزيع ويبل، التوزيع الاقتصادي البيئي، خوارزميات البحث الشاملة، الخوارزمية الجينية، خوارزمية NGO، طاقة الرياح، تخفيض التكاليف، تخفيض الانبعثات.

Introduction Générale

Introduction Générale :

L'électricité est devenue un pilier incontournable de la société moderne. Elle alimente les foyers, soutient les activités industrielles et commerciales, et contribue largement à la qualité de vie. Pour répondre à une demande énergétique sans cesse croissante, il est essentiel de comprendre non seulement comment cette énergie est consommée, mais surtout comment elle est produite, distribuée et optimisée.

La production d'énergie électrique repose sur un large éventail de sources, renouvelables comme le solaire, l'éolien et l'hydraulique, mais aussi non renouvelables telles que le charbon, le gaz naturel ou encore le nucléaire. Chaque technologie présente des avantages et des contraintes économiques, environnementales et techniques. La diversité des moyens de production exige donc une gestion optimale afin de garantir la fiabilité, la sécurité et la durabilité du système électrique. Ce premier aspect est abordé dans le Chapitre 1, qui dresse un panorama des différentes technologies de production et de leur impact sur l'environnement.

Cependant, produire l'électricité ne suffit pas. Il faut également l'acheminer et l'utiliser efficacement, ce qui introduit la notion de dispatching économique : une optimisation de la répartition de la production parmi les différentes unités génératrices, pour minimiser les coûts tout en répondant à la demande. Le Chapitre 2 traite de la formulation mathématique de ce problème, en considérant plusieurs fonctions objectives (coût de production, émissions de gaz, pertes de puissance) ainsi que diverses contraintes opérationnelles.

La résolution de ce type de problème est particulièrement complexe du fait de sa nature non linéaire, multi-objective et soumise à incertitude, notamment en présence de sources renouvelables. Les méthodes classiques d'optimisation trouvent rapidement leurs limites. C'est pourquoi le Chapitre 3 est consacré aux techniques d'optimisation métaheuristiques, telles que les algorithmes génétiques (GA) ou encore l'algorithme d'optimisation du tour des palombes (NGO), des approches bio-inspirées capables d'explorer efficacement des espaces de recherche complexes et de fournir des solutions de bonne qualité dans un temps raisonnable.

Enfin, le chapitre 4 est consacré à l'application de deux techniques d'optimisation à savoir l'algorithme génétique et la méthode NGO pour la minimisation du coût de production et l'émission de gaz tout en considérant l'intégration des sources éoliennes. L'efficacité de la méthode proposée NGO est validée sur le réseau test IEEE 30-Bus. Une étude comparative entre les deux méthodes est effectuée, les résultats d'optimisation démontrent clairement

l'efficacité de la méthode NGO par rapport à l'algorithme génétique en termes de qualité de solution et convergence.

En conclusion, cette étude a permis de mettre en évidence les enjeux liés à la planification et à la gestion optimisée des systèmes de production et de distribution d'énergie. Une perspective prometteuse pour les travaux futurs consiste à appliquer des méthodes d'optimisation multi-objectifs afin de minimiser simultanément le coût global du système tout en assurant une intégration efficace des systèmes photovoltaïques, en coordination avec les sources éoliennes. Cette approche permettrait de renforcer la flexibilité, la durabilité et la rentabilité des réseaux énergétiques hybrides.

Chapitre 1 : Production d'énergie électrique.

1. Chapitre 1 : Production d'énergie électrique

1.1 Introduction :

L'électricité est aujourd'hui indispensable à notre vie quotidienne. Elle alimente nos habitations, nos industries, nos moyens de transport et nos appareils électroniques. Mais avant d'arriver jusqu'à nos prises, cette énergie doit être produite à partir de différentes sources. Ce chapitre explore les principaux moyens de production d'énergie électrique, qu'ils soient d'origine renouvelable (comme le soleil, le vent ou l'eau) ou non renouvelable (comme le charbon, le gaz naturel ou le nucléaire). Comprendre ces modes de production, leurs avantages, leurs inconvénients et leur impact sur l'environnement est essentiel pour imaginer un avenir énergétique plus durable.

1.2 Structure générale des réseaux de transport :

Le rôle principal du réseau de transport est la liaison entre les grands centres de consommation et les moyens de productions. Il est à haute et très haute tension pour raison économique notamment, afin de minimiser les pertes de la ligne [1]. Ce rôle est particulièrement important car on ne peut pas stocker l'énergie électrique à grande échelle à l'heure actuelle. Un réseau de transport doit être exploité d'une manière particulière : il doit être exploité dans les limites de fonctionnement autorisées. Ces limites ou contraintes du réseau sont exprimées par des valeurs ou minimales sur certaines variables du réseau (fréquence, débit de puissance maximale sur les lignes ou transformateurs, niveau de tension, etc.). Si ces limites sont dépassées, le réseau risque de devenir instable. Outre les sources classiques qui alimentent nos réseaux actuels (centrale thermique, nucléaires, hydrauliques) on trouve les sources renouvelables d'énergie, telles que les centrales solaires, les fermes éoliennes ...etc. La Figure1-1 représente une structure topologique d'un réseau moderne [2].

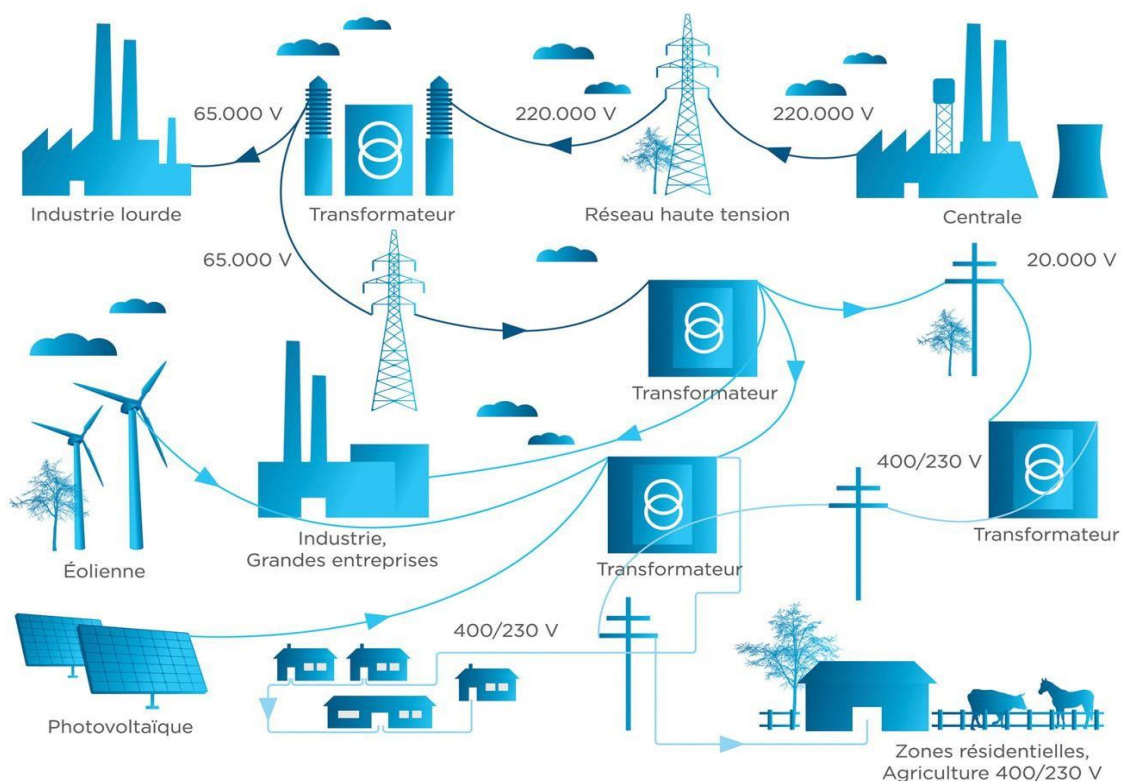


Figure 1-1 : Structure topologique d'un réseau moderne [3]

1.2.1 Réseaux de transport THT :

Les réseaux de transport sont à très haute tension entre 150 kV, 220 kV et dernièrement 420 kV [4].

1.2.2 Réseaux de répartition HT :

Ce réseau se caractérise par des niveaux de tension de 63 kV et 90 kV. Il assure principalement l'acheminement de l'énergie électrique depuis les postes du réseau de transport à très haute tension vers les postes sources qui alimentent le réseau de distribution [5].

1.2.3 Réseaux de distribution :

Le réseau de distribution constitue la phase finale de la structure du système électrique. Sa principale mission est d'alimenter l'ensemble des consommateurs en énergie électrique. Il se divise en deux sous-niveaux de tension [6] :

- Les réseaux à moyenne tension (de 3 à 33 kV)
- Les réseaux à basse tension (de 110 à 600 V).

1.3 L'énergie fossiles :

1.3.1 Définition des énergies fossiles :

Les énergies fossiles sont des sources d'énergie organiques formées sur des millions d'années et utilisées pour le transport et la production d'électricité. Cependant, elles causent de la pollution et des émissions nocives, et représentent l'une des principales causes de la crise environnementale en raison de la limitation de leurs réserves [7]. La Figure1-2 représente des centrales électriques alimentées par des combustibles fossiles.



Figure 1-2: centrales électriques alimentées par des combustibles fossiles [8]

1.3.2 Les principales sources d'énergie fossile :

Les énergies fossiles comprennent trois principales sources : le pétrole, le charbon et le gaz naturel.

- Le pétrole : est raffiné pour produire plusieurs carburants :
- L'essence, qui contient du plomb nocif pour l'environnement.
- Le gazole, utilisé dans les moteurs Diesel, plus performant mais plus polluant.
- Le kérosène, carburant des avions.

- **Le charbon :**

Issu de la fossilisation de forêts, est utilisé pour produire de l'électricité.

- **Le gaz naturel :**

Formé par la décomposition de micro-organismes, est un combustible utilisé pour le chauffage et la cuisine. Il est le moins polluant des énergies fossiles, bien qu'il produise du CO₂ [9].

1.3.3 Unité de production :

L'alternateur synchrone constitue l'élément principal dans la chaîne de production de l'électricité. L'alternateur est entraîné par des turbines à vapeur, à gaz ou hydrauliques en fonction de l'énergie primaire utilisée. Les centrales sont connectées sur le réseau de transport via des transformateurs élévateur, la structure de base d'une unité de production est présentée dans la figure 1-3 [10].

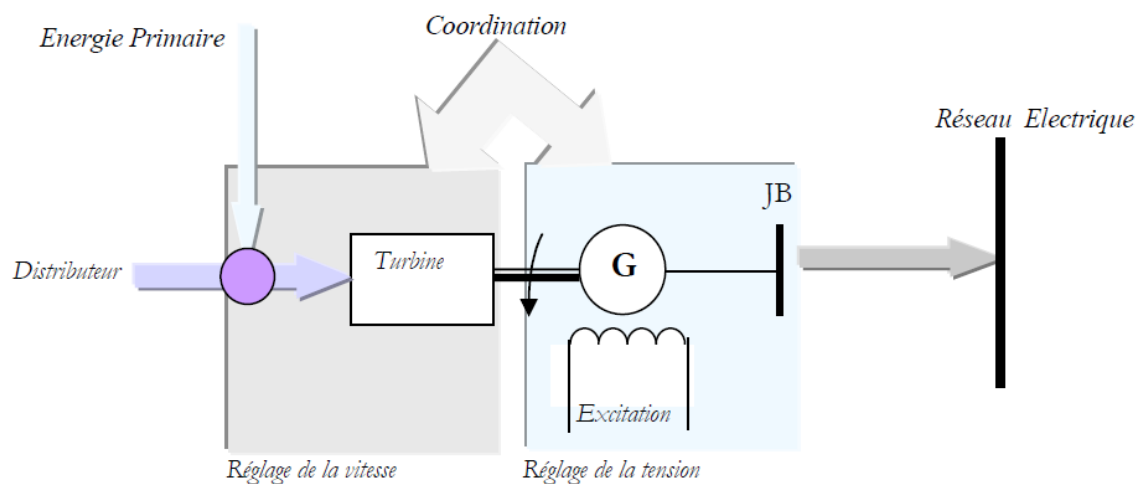


Figure 1-3 : Structure de l'unité de production [10]

1.3.4 Production d'énergie basée sur les énergies fossiles :

1.3.4.1 Centrales thermiques classiques :

Dans les centrales thermiques, la production d'électricité est basée sur la chaleur produite par la combustion du combustible dans le brûleur. [11]. La Figure 1-4 montre le principe de base de fonctionnement d'une centrale thermique.

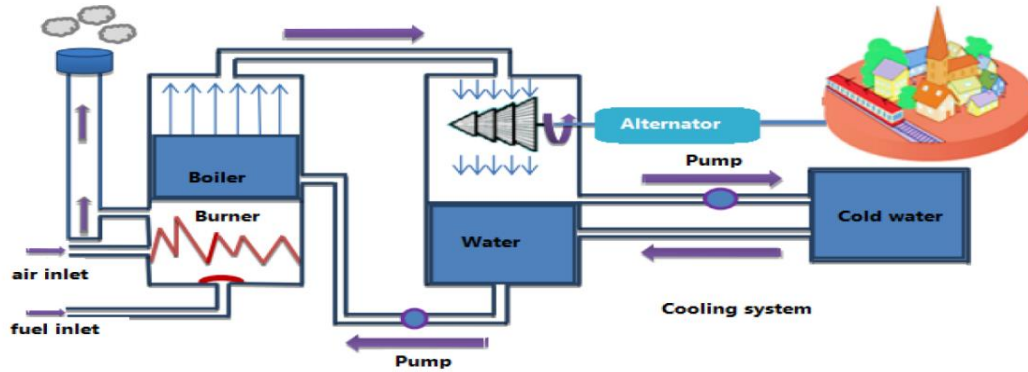


Figure 1-4 : Principe de base de fonctionnement d'une centrale thermique [12]

1.3.4.2 Centrale classiques nucléaire :

Les centrales nucléaires sont des usines de production d'électricité (Figure 1-5). Ce sont des centrales thermiques dont la source de chaleur est l'énergie dégagée par la fission d'un matériau nucléaire, le combustible. Cette chaleur est transformée en énergie mécanique, puis électrique [12].

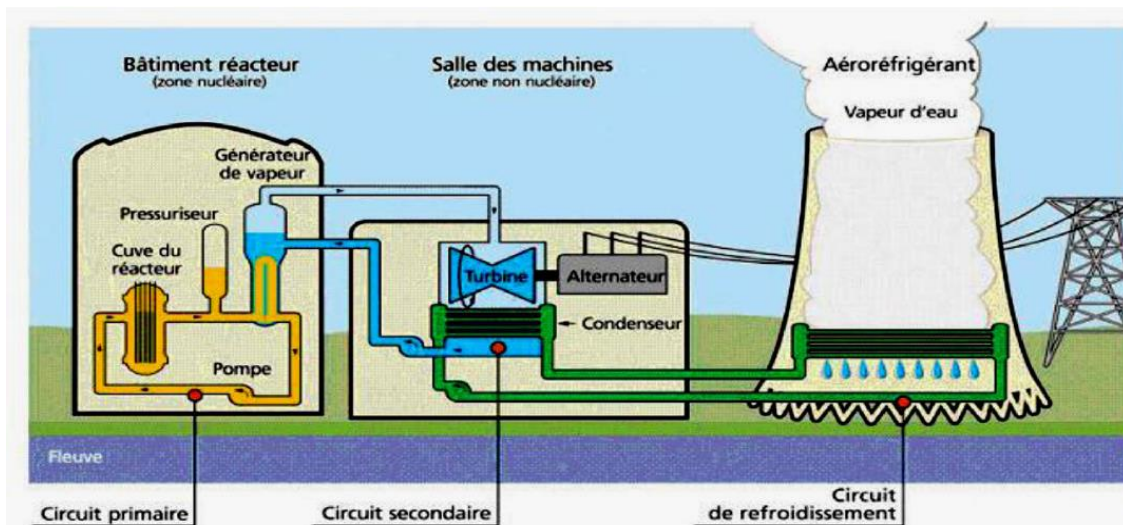


Figure 1-5 : Le principe de fonctionnement d'une centrale nucléaire [13]

1.3.5 Avantages et inconvénients des énergies fossiles :

A. Avantages :

- Disponibilité : Elles sont abondantes et accessibles dans certaines régions du monde, avec une extraction et une transformation relativement simple.
- Fiabilité : Elles assurent une production d'énergie continue et modulable, sans contrainte de temps ou de localisation.

- Coût : Historiquement peu coûteuses, elles ont favorisé le développement énergétique mondial, bien que leurs prix augmentent récemment.

B. Inconvénients :

- Pollution : Leur combustion génère des polluants atmosphériques nocifs pour la santé et l'environnement.
- Épuisement des ressources : Leur extraction devient plus difficile et coûteuse, entraînant des risques de pénuries.

Face à ces inconvénients, les énergies renouvelables suscitent un intérêt croissant, offrant des solutions plus durables pour répondre aux défis climatiques [7].

1.4 Production d'énergie basée sur les énergies renouvelables :

1.4.1 L'énergie solaire photovoltaïque :

Le système photovoltaïque convertit directement l'énergie solaire en électricité à l'aide de cellules en silicium cristallin, un matériau abondant et non toxique. Ces systèmes sont durables, fiables, silencieux et ne nécessitent pas de carburant [14]. La figure 1-6 montre la connexion d'une source PV au réseau électrique.

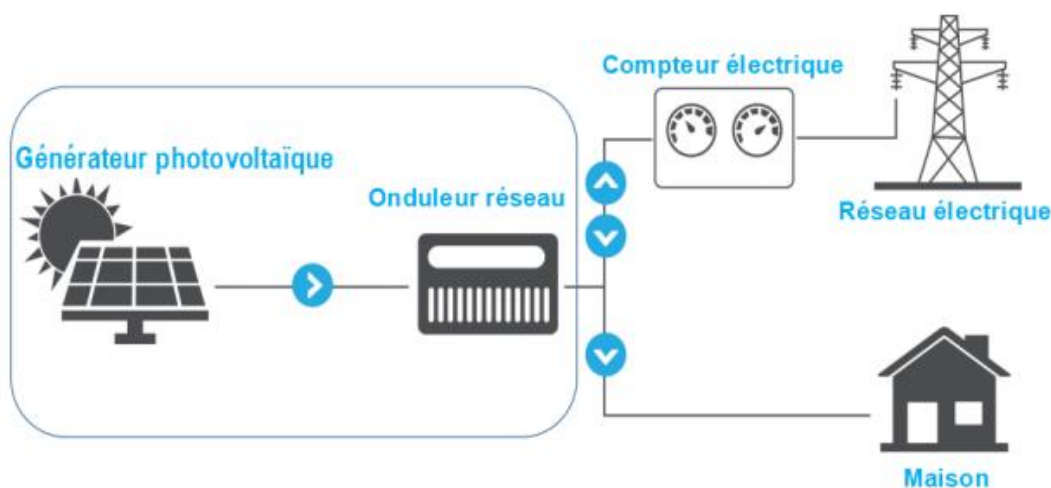


Figure 1-6 : Connexion d'une source PV au réseau électrique [15]

1.4.1.1 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque [15] :

A. Les avantages :

Nous pouvons citer quelques avantages de l'énergie photovoltaïque :

- La source de carburant est vaste, largement accessible et essentiellement infinie
- Pas d'émissions, la combustion ou les déchets radioactifs (ne contribuent pas sensiblement au changement climatique mondial ou de la pollution de l'air et l'eau)
- Faibles coûts de fonctionnement vu les entretiens réduits, et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- Haute fiabilité des modules solaires (les garanties des fabricants dépassent 30 ans)

B. Les Inconvénients :

Comme nous pouvons citer quelques inconvénients de l'énergie photovoltaïque :

- La source de carburant est diffusée (la lumière du soleil a une énergie relativement de faible densité).
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible.
- Le coût initial d'installation est élevé.
- Le rendement horaire ou journalier imprédictible.

À titre d'exemple, dans le cadre de la concrétisation de son programme d'exploitation de l'énergie solaire, l'Algérie a confié à la Sonelgaz la réalisation de la centrale électrique hybride de Hassi R'Mel. Mise en service en 2011 à Tilghemt, dans la wilaya de Laghouat (au sud du pays), cette centrale combine une capacité de production de 150 mégawatts, répartie entre 30

MW issus de la technologie solaire thermodynamique et 120 MW provenant du gaz naturel [16]. La figure 1-7 illustre une vue d'ensemble d'une centrale solaire photovoltaïque.



Figure 1-7: Centrale de solaire photovoltaïque [17]

1.4.2 Énergie éolienne :

Une éolienne transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, soit cette énergie est utilisée directement comme dans les éoliennes de pompage ou les anciens moulins à vent, soit elle est transformée en électricité via une génératrice. Dans ce cas, on parle d'aérogénérateurs [18]. La Figure 1-8 représente la conversion de l'énergie cinétique du vent.

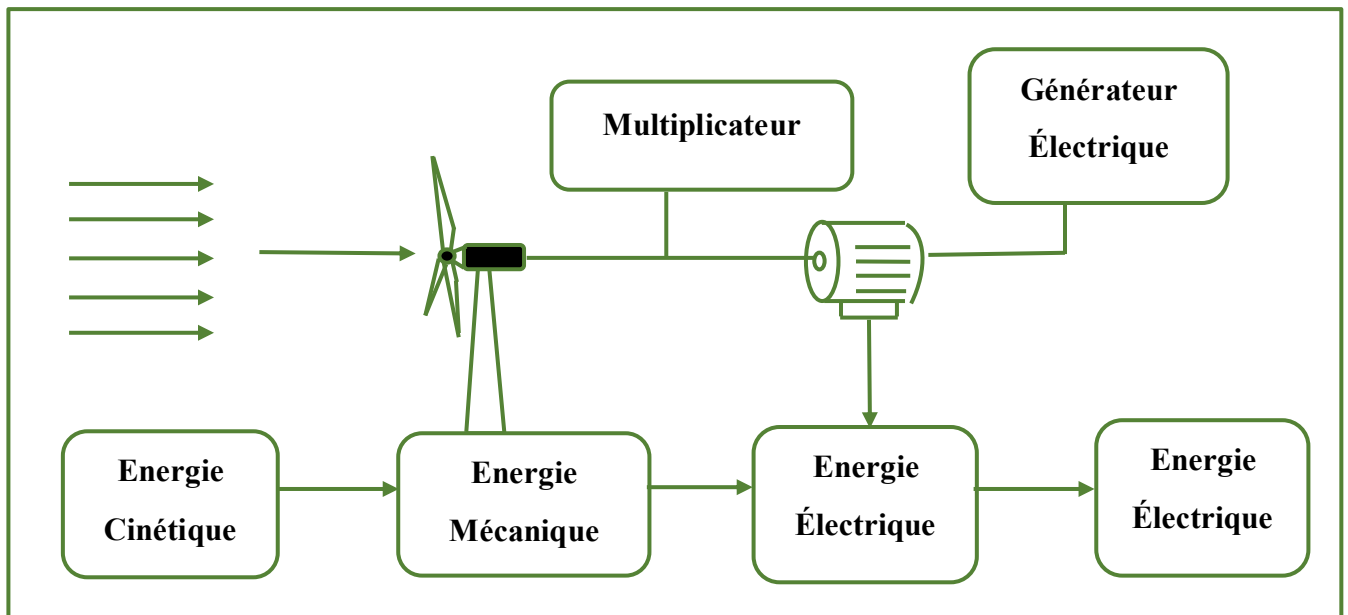


Figure 1-8: Conversion de l'énergie cinétique du vent.

1.4.2.1 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne [19] :

A. Avantages : les avantages des sources éolienne sont structurés comme suit :

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est-à-dire que contrairement aux Énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées.
- L'énergie éolienne est une énergie propre.
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.

B. Inconvénients :

- La nature stochastique du vent a une influence sur la qualité de la puissance électrique produite, ce qui représente une contrainte pour le raccordement au réseau.
- Le coût de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie classiques surtout sur les sites moins ventés.

- Le bruit : la source essentielle du bruit dans les éoliennes est le multiplicateur, ce dernier commence à disparaître après l'apparition des éoliennes à attaque directe.

À titre d'exemple, en décembre 2024, l'Algérie a lancé un projet ambitieux visant à produire jusqu'à 1000 MW d'énergie éolienne à travers 10 sites stratégiques. Ce projet, mené en partenariat avec la Banque mondiale, s'inscrit dans le plan national de transition énergétique qui vise à atteindre une capacité de 15 000 MW d'ici 2035. La figure 1-9 représente ferme éolienne :



Figure 1-9 : Ferme éolienne

1.5 Centre de conduite :

Le centre de dispatching économique est une composante essentielle de la gestion des réseaux électriques. La figure 1-10 présente une vue globale d'un centre de dispatching national. Voici une description détaillée de ses fonctions, de ses défis et de ses évolutions [20]:



Figure 1-10:vue globale d'un centre de dispatching national

A. Optimisation de la production :

- Le dispatching économique détermine la répartition optimale de la production entre les différentes centrales électriques, afin de minimiser le coût total de production.
- Il prend en compte les coûts de production de chaque centrale, les contraintes techniques du réseau (limites de transport, stabilité), et les prévisions de demande.
- Cela implique de calculer en temps réel la puissance à produire par chaque centrale, en tenant compte des variations de la demande et des aléas de production (énergies renouvelables).

B. Gestion des contraintes économiques :

- Le dispatching économique intègre les coûts de production, les prix du marché de l'électricité, et les contraintes réglementaires.
- Il peut également gérer les échanges d'électricité avec les réseaux voisins, en optimisant les importations et les exportations.

C. Intégration des énergies renouvelables :

- Avec le développement des énergies renouvelables intermittentes (éolien, solaire), le dispatching économique doit intégrer ces sources de production dans ses calculs.
- Cela implique de prévoir les variations de production, et d'adapter la production des autres centrales pour maintenir l'équilibre offre-demande.

D. Défis et évolutions :

1. Complexité croissante :

- La complexité des réseaux électriques augmente avec l'intégration des énergies renouvelables, la décentralisation de la production, et le développement des réseaux intelligents.
- Le dispatching économique doit gérer un nombre croissant de données et de contraintes, et adapter ses algorithmes d'optimisation.

2. Temps réel et prévision :

- Le dispatching économique doit fonctionner en temps réel, pour réagir aux variations de la demande et de la production.

- Il doit également réaliser des prévisions à court et moyen terme, pour anticiper les besoins du réseau et planifier les opérations de maintenance.

1.6 Conclusion :

Ce chapitre a d'abord présenté la structure générale du réseau électrique. Ensuite, il a exposé le principe de fonctionnement de quelques centrales à énergie fossile, en détaillant leurs avantages et leurs inconvénients. Dans une seconde partie, les principales sources d'énergie renouvelable, à savoir le photovoltaïque et l'éolien, ont été brièvement décrites. Enfin, le rôle du centre de conduite a été expliqué de manière succincte. Le chapitre suivant sera consacré à la formulation mathématique du problème de dispatching économique et environnemental.

Chapitre 2 :

Modélisation du problème de dispatching économique

2 Chapitre 2 : Modélisation du problème de dispatching économique.

2.1 Introduction :

La production et la distribution d'énergie électrique sont complexes, confrontées à des défis techniques et économiques. Les fournisseurs doivent garantir un service continu et de qualité pour répondre à la demande des consommateurs, tout en assurant une alimentation fiable et à un coût minimal.

Le problème de dispatching économique (PDE) vise à déterminer la répartition optimale de la production entre les différentes unités de production d'un système électrique, de manière à minimiser les coûts de production tout en satisfaisant la demande en électricité. Le dispatching économique traditionnel présente une limitation majeure : il est statique. Il optimise l'allocation de la production d'électricité uniquement pour une demande à un instant précis. Or, la demande d'électricité varie constamment au cours d'une journée. Pour une optimisation dynamique, il est crucial de prendre en compte l'état des centrales électriques et les coûts associés aux changements d'état (démarrage, arrêt, etc.).

L'objectif de ce chapitre est de fournir une introduction générale à la modélisation du dispatching économique environnemental, en mettant l'accent sur l'intégration des énergies renouvelables [21].

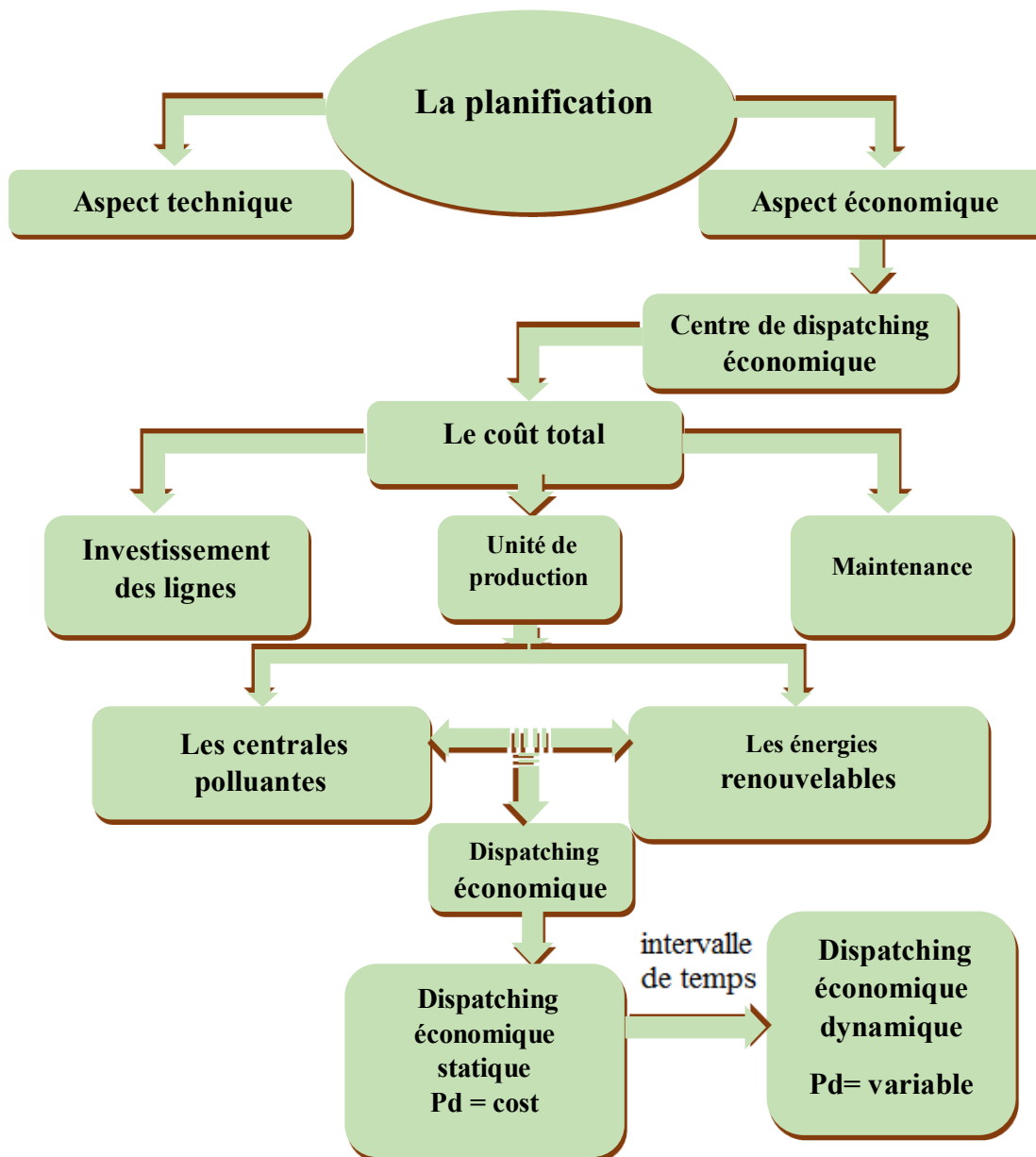


Figure 2-1: Stratégie de planification des réseaux électriques.

2.2 Fonctions objectives :

Les fonctions objectives associées à ce problème sont donc centrées sur la minimisation des coûts, mais peuvent également inclure d'autres considérations tel que la minimisation de l'émission de gaz.

2.2.1 La fonction de coût :

Le coût de production d'une centrale est habituellement modélisé par une fonction polynomiale de second degré en PG (puissance active générée par la centrale) la figure 2-2 présente la variation du coût en fonction de la puissance générée. Où les coefficients sont des constants propres à chaque centrale. Par conséquent, le coût de la puissance produite peut être formulé sous la forme d'une équation quadratique [12].

2.2.2 Fonction quadratique :

$$C_{quad} = \sum_{i=1}^{ng} C_i(P_{gi}) = \sum_{i=1}^{ng} (a_i + b_i P_{gi} + c_i P_{gi}^2) \quad (2.1)$$

Avec :

C_{quad} : Le coût total quadratique de la production en (\$/h).

ng : Le nombre des unités de production.

P_{gi} : La puissance active générée de l'unité de production i .

a_i, b_i, c_i , sont des coefficients spécifiques à chaque centrale thermique.

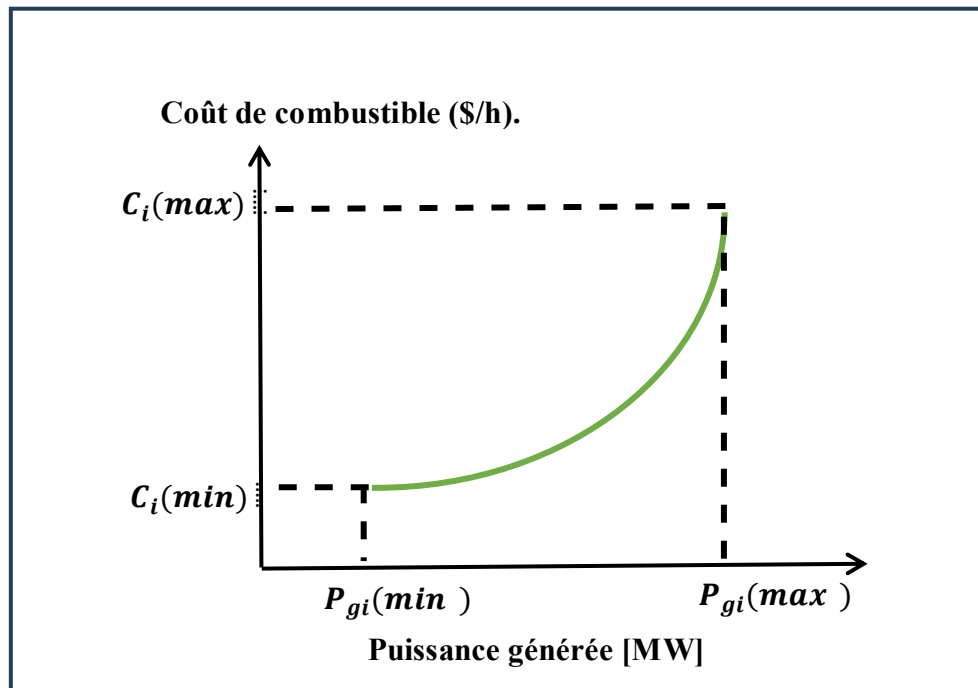


Figure 2-2: La variation du coût en fonction de la puissance générée.

2.2.3 Fonction coût à effet de valve :

Un système en temps réel comprend plusieurs unités de production d'énergie. Les générateurs équipés de grandes turbines à vapeur régulent leur production d'énergie grâce à l'ouverture séquentielle de plusieurs vannes d'admission de vapeur. Lorsque la charge de l'unité augmente, l'apport de vapeur augmente et le taux de chaleur incrémental diminue entre les points d'ouverture de deux vannes consécutives. Cependant, l'ouverture de la première vanne entraîne une augmentation rapide des pertes par étranglement, ce qui impacte le taux de chaleur incrémental [22]. L'effet d'ouverture de vanne est souvent modélisé en ajoutant une composante sinusoïdale à la fonction quadratique de base. On a la figure 2-3 montre la Courbe de coût du combustible d'une unité thermique avec vannes d'admission de vapeur.

$$C_{valve}(P_{gi}) = \sum_{i=1}^{ng} (a_i + b_i P_{gi} + c_i P_{gi}^2) + d_i \sin(e_i (P_{gi}^{min} - P_{gi})) \quad (2.2)$$

- $C_{valve}(P_{gi})$: est le coût de production de la centrale i pour une production P_{gi} exprimée en MW.
- a_i, b_i, c_i, d_i, e_i et sont des coefficients spécifiques à chaque centrale thermique.

Le terme: $d_i \sin(e_i (P_{gi}^{min} - P_{gi}))$ représente l'effet de valve, introduisant une non-linéarité dans la fonction de coût, avec des "pics" ou "creux" de coûts à certains niveaux de production [2].

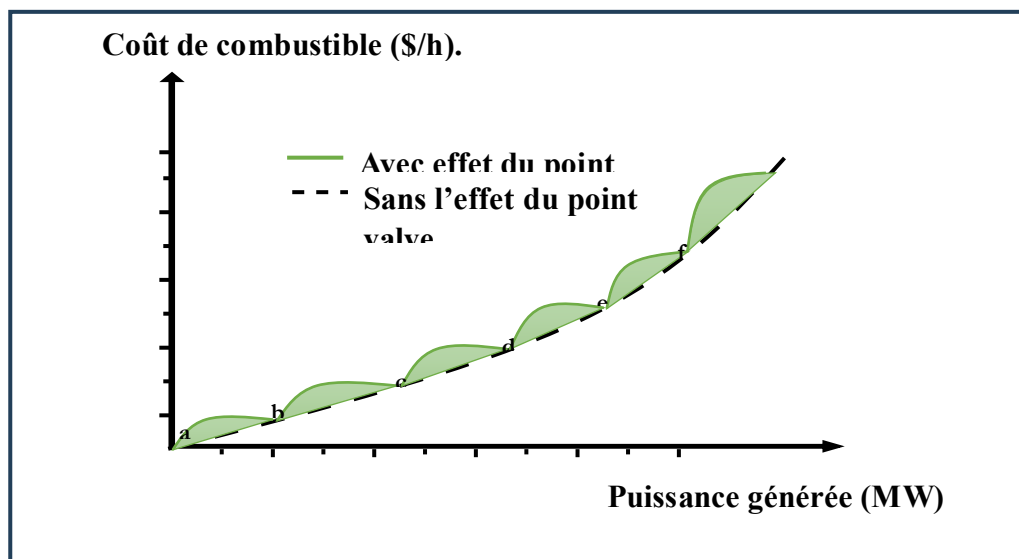


Figure 2-3:: Courbe de coût du combustible d'une unité thermique avec vannes d'admission de vapeur.

$$c_i(P_{gi}) = \begin{cases} a_{i,1} + b_{i,1}P_{gi} + c_{i,1}P_{gi}^2 & \text{combustible 1, } P_{gi}(\min) \leq P_{gi} \leq P_{gi,1} \\ a_{i,2} + b_{i,2}P_{gi} + c_{i,2}P_{gi}^2 & \text{combustible 2, } P_{gi,1} \leq P_{gi} \leq P_{gi,2} \\ \vdots & \vdots \\ a_{i,k} + b_{i,k}P_{gi} + c_{i,k}P_{gi}^2 & \text{combustible k, } P_{gi,k-1} \leq P_{gi} \leq P_{gi}(\max) \end{cases} \quad (2.3)$$

2.2.4 Multi fuel :

Parfois, les unités thermiques sont capables de fonctionner avec plusieurs types de combustibles. Dans ces conditions, la caractéristique de coût est constituée de plusieurs morceaux de fonctions quadratiques qui s'écrivent :

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

Et a , b et c des coefficients constants propres de la centrale qui sont obtenus par le constructeur.

P_{gi} : La puissance active générée de l'unité de production i .

Ce modèle est communément appelé « modèle quadratique par morceaux ». Le combustible le plus économique est représenté par le morceau inférieur à la courbe la figure 2- 4.

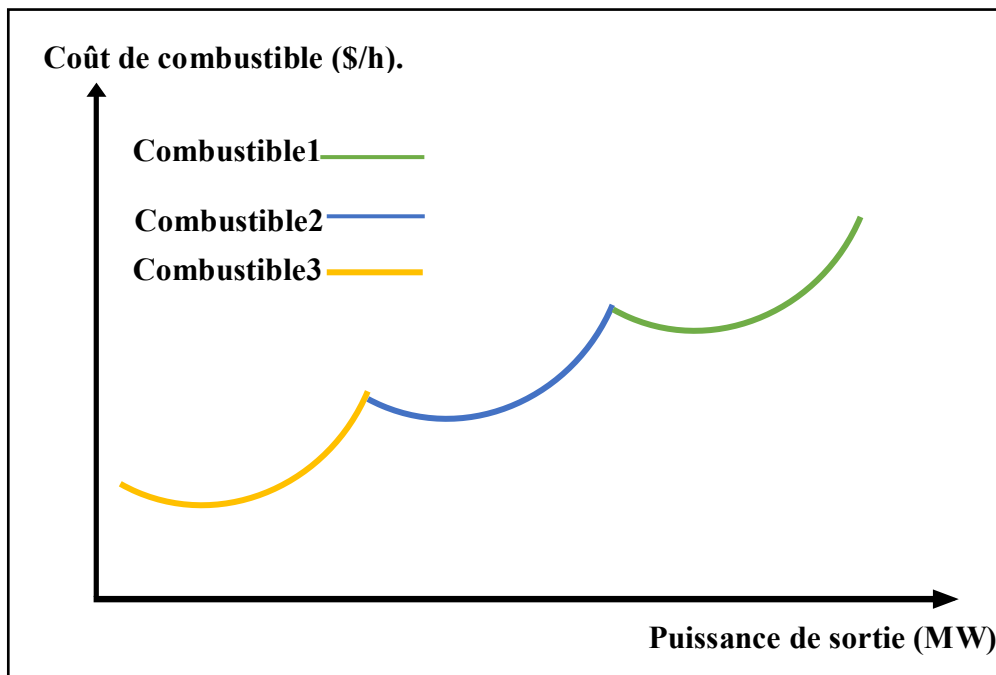


Figure 2-4:Caractéristique de l'effet de multi fuel.

Pour un système de production d'énergie électrique composée de plusieurs centrales, le coût total de la production de ce système est exprimé comme suit [23] :

$$C_{tot} = \sum_{i=1}^{ng} C_i \quad (\$/h). \quad (2.4)$$

C_{tot} : coût total de la production.

2.2.5 Effet de la zone interdite (prohibited zone) :

Il existe des zones de fonctionnement indésirables causées par des problèmes d'instabilité ou des limitations physiques des composants des machines. Ces zones entraînent des discontinuités dans la courbe du coût du combustible [10].

Ce type de fonctionnement se traduit par un espace de solution non convexe. La caractéristique de l'effet des zones interdites est illustrée dans la figure2- 5.

La formulation mathématique associée à cet effet est exprimée comme suit :

$$P_{gi} \in \begin{cases} P_{gi}(\min) \leq P_{gi} \leq P_{gi,1}^1 \\ P_{gi,k-1}^u \leq P_{gi} \leq P_{gi,k}^1, k = 2, \dots, z_i \\ P_{gi,z_i}^u \leq P_{gi} \leq P_{gi}(\max) \end{cases} \quad (2.5)$$

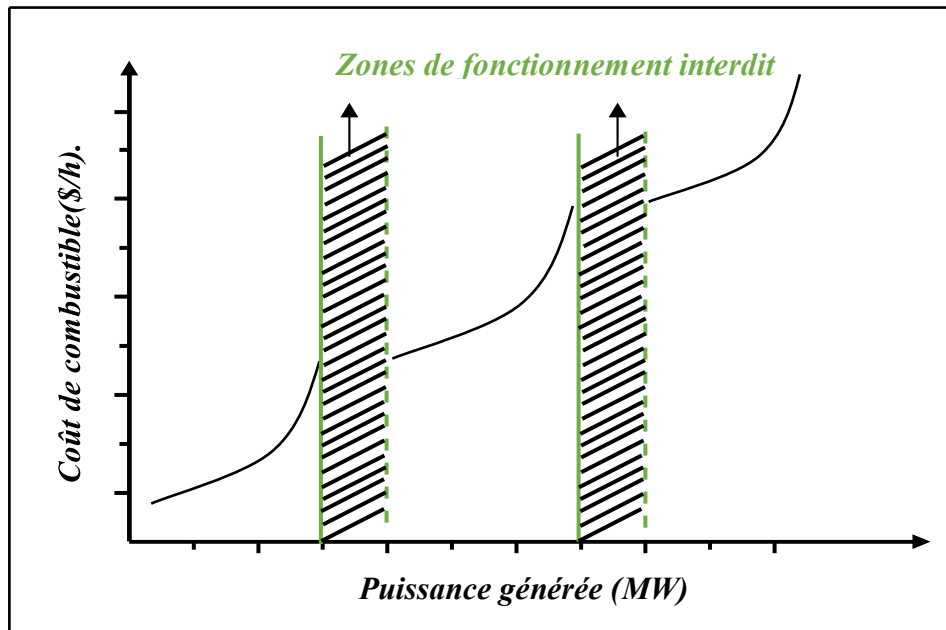


Figure 2-5:Caractéristique de l'effet de la zone interdite.

2.3 Minimisation des Émissions de Gaz :

La fonction de l'émission est une fonction non linéaire qui est modélisée par l'équation suivante

$$G(P_{gi}) = \sum_{i=1}^{ng} 10^{-2}(\alpha_i + \beta_i P_{gi} + \gamma_i P_{gi}^2) + \exp(\lambda_i P_{gi}) \quad (ton/h). \quad (2.6)$$

C'est une équation qui représente le total des émissions de CO₂ et le gaz NOX générés par les unités de production en (ton/h).

$\alpha, \beta, \gamma, \xi, \lambda$: les coefficients sont les coefficients des émissions de générateurs de productions [24]. La figure 2-6 montre les rejets d'une centrale à charbon.

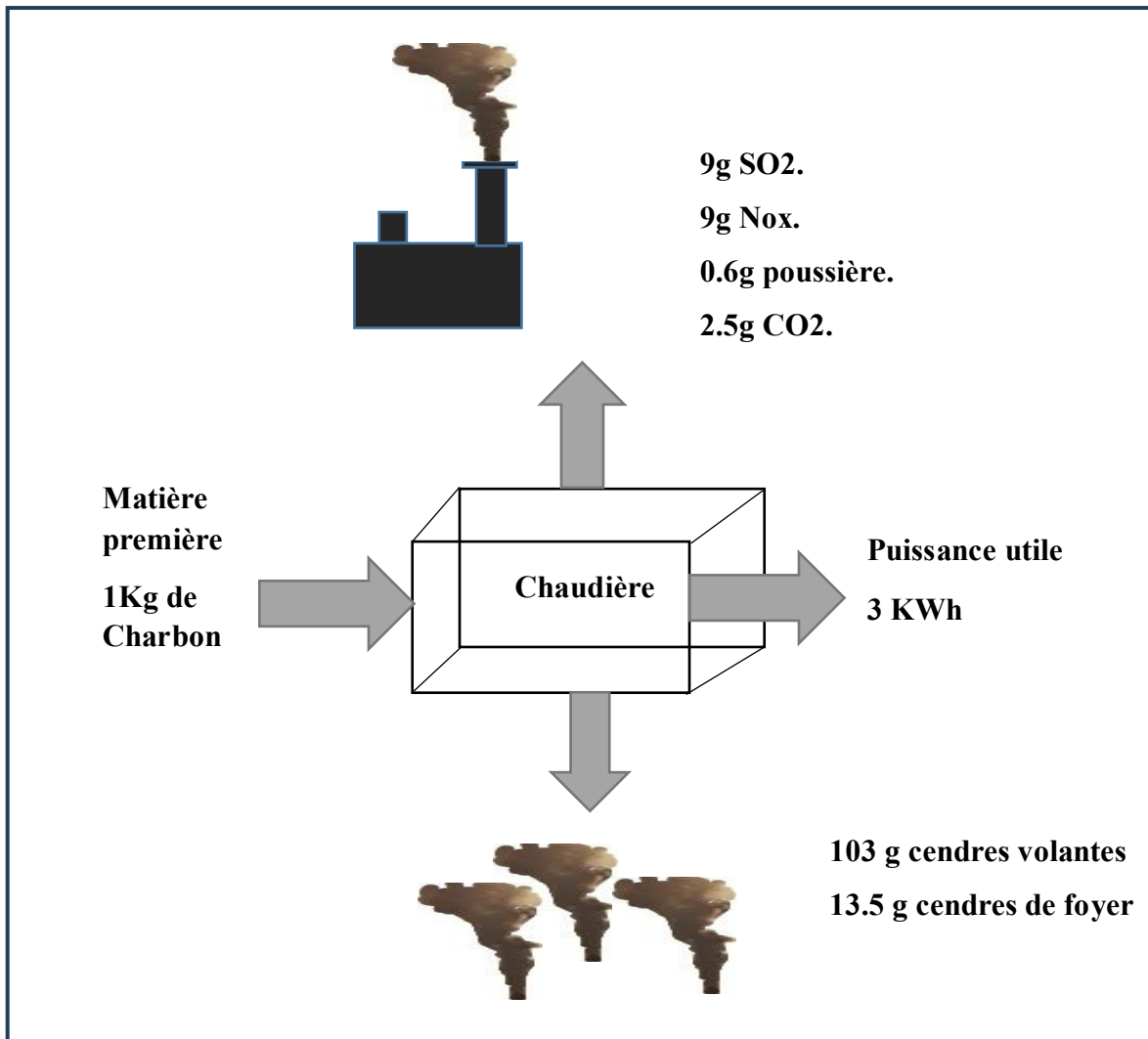


Figure 2-6:Rejets d'une centrale à charbon.

2.4 Formulation mathématique du problème de minimisation du coût :

2.4.1 Contraintes :

On peut classer les contrariantes en deux catégories :

2.4.1.1 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 [25] :

$$\sum_{i=1}^{Ng} P_{gi} = P_d \quad (2.7)$$

P_d : puissance demander.

➤ **Cas d'un système avec pertes :**

Dans les systèmes réels, le transport de l'énergie électrique vers les jeux de barre de charge est souvent accompagné par des pertes de transmission. Le problème du dispatching économique devient un peu compliqué par rapport au cas précédent où les pertes ont été négligées. Si on désigne par P_L les pertes totales de puissances actives, la contrainte d'égalité devient [26]. :

$$\sum_{i=1}^{Ng} P_{gi} = P_d + P_L \quad (2.8)$$

P_L : Pertes de puissance, souvent modélisées comme une fonction quadratique des flux de puissance

2.4.1.2 Les contraintes d'inégalités :

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

$$P_{gi}(\min) \leq P_{gi} \leq P_{gi}(\max) \quad (2.9)$$

Il faut bien évidemment respecter les valeurs limites de productions des centrales pour le maintien de la sécurité du système. Donc, les contraintes d'inégalité s'intéressent par le domaine de fonctionnement admissible, possible (limitation des ressources, sécurité...) [27].

2.5 Dispatching économique en présence des sources renouvelables :

L'intégration des sources éoliennes dans le dispatching économique vise à minimiser le coût total de production en tenant compte de l'intermittence du vent. La formulation mathématique du problème s'exprime comme suit [28].

2.6 Modélisation de l'incertitude de l'énergie éolienne :

Ce paragraphe se concentre sur la modélisation de la nature aléatoire de l'énergie éolienne en utilisant la distribution de Weibull, afin de comprendre l'impact des variations imprévues de la production sur les coûts, qu'ils résultent de sous-estimations ou de surestimations [29].

2.6.1 La distribution de Weibull :

La distribution de Weibull constitue un outil essentiel dans le domaine de l'énergie éolienne, car elle fournit des informations précieuses sur les vitesses du vent. Ces données facilitent la prise de décisions éclairées pour la conception et l'exploitation des parcs éoliens. La fonction de densité de probabilité (PDF) de Weibull, présentée à l'équation (2.10), est couramment utilisée pour modéliser la distribution des vitesses du vent.

$$f_v(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{(k-1)} e^{-(v/c)^k} \text{ for } 0 < v < \infty \quad (2.10)$$

Où $f_v(v)$ est la fonction de densité de probabilité (PDF), k et c sont respectivement, les paramètres de forme et d'échelle, et v est la vitesse du vent.

2.6.2 Description de la distribution de la vitesse du vent :**• Modélisation précise :**

La distribution de Weibull permet de représenter avec exactitude la répartition des vitesses du vent sur un site spécifique, en offrant une vision claire des fréquences associées à chaque plage de vitesse. Elle sert ainsi à décrire les variations de la vitesse du vent sur une période déterminée.

• Paramètres de Weibull :

La distribution de Weibull est définie par deux paramètres fondamentaux : le paramètre de forme (k) et le paramètre d'échelle (c).

Le paramètre de forme (k) influence la courbure de la distribution, tandis que le paramètre d'échelle (c) est étroitement lié à la vitesse moyenne du vent.

Ces paramètres peuvent être estimés à partir des données historiques de vitesse du vent, ce qui permet de modéliser de manière fiable la distribution du vent sur un site donné.

2.6.3 Estimation de la production d'énergie éolienne :

- **Calcul de la densité de puissance du vent :**

- En utilisant la distribution de Weibull, la densité de puissance du vent peut être calculée, qui est une mesure de l'énergie disponible à partir du vent sur le site.
- Cela aide à déterminer la faisabilité de la construction d'un parc éolien sur le site.

- **Prévision de la production d'énergie :**

- La distribution de Weibull peut être utilisée pour estimer la production d'énergie attendue des turbines éoliennes sur le site.
- Cela aide à évaluer le rendement économique d'un projet d'énergie éolienne.

- **Analyse des performances :**

Elle aide à analyser les performances des turbines éoliennes, permettant d'identifier les conditions dans lesquelles les turbines atteignent leur production maximale.

2.7 Production de l'énergie éolienne :

La production d'énergie éolienne est modélisée comme suit :

$$p_{w,}(v) = \begin{cases} 0, & \text{for } v < v_{in} \text{ and } v > v_{out} \\ p_{wr} \left(\frac{v-v_{out}}{v_r-v_{out}} \right)^3 & \text{for } v_{in} \leq v \leq v_r \\ p_{wr} & \text{for } v_r < v \leq v_{out} \end{cases} \quad (2.11)$$

Où : p_{wr} est la puissance de sortie maximale d'une seule éolienne dans des conditions idéales, v_{in} , v_r et v_{out} sont respectivement la vitesse de démarrage, la vitesse nominale et la vitesse de coupure de l'éolienne. La Figure 2-7 représente la Variation de la puissance générée de l'éolienne en fonction de la vitesse du vent.

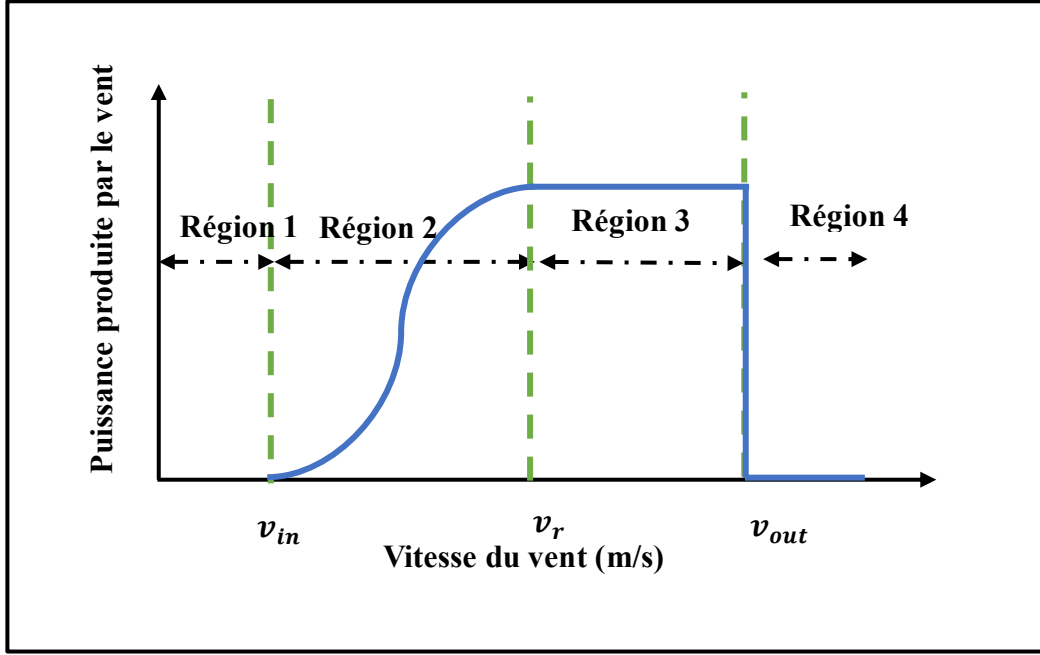


Figure 2-8: la Variation de la puissance générée de l'éolienne en fonction de la vitesse du vent.

2.7.1 Coût direct:

Le coût direct de l'éolien, associé à la quantité d'énergie produite ($P_{ws,j}$), est donné comme suit :

$$C_{w,j}(P_{ws,j}) = g_{wj}P_{ws,j} \quad (2.12)$$

Avec ; g_{wj} représente le facteur de coût direct lié à la j^{th} unité de production.

2.7.2 Coût de surestimation :

Si la production programmée d'un parc éolien excède sa production réelle, l'Opérateur de Système Indépendant (OSI) est obligé de se procurer des réserves de puissance additionnelles pour assurer la stabilité du réseau. Il en résulte un coût d'engagement de réserve, qui peut être formulé mathématiquement de la manière suivante :

$$C_{R,wj}(P_{w,sj} - P_{w,avj}) = K_{R,wj}(P_{w,sj} - P_{w,avj}) = K_{R,wj} \int^{P_{w,sj}} (P_{w,sj} - p_w) f_{wj}(p_w) dp_w \quad (2.13)$$

Ou $K_{R,wj}$ représente le coefficient du coût de réserve lié à la j^{th} unité de puissance éolienne, $P_{w,avj}$ est la puissance réelle disponible de l'unité éolienne, $f_{wj}(p_w)$ représente la PDF (fonction

de densité de probabilité) de la centrale. L'expression détaillée relative au coût de surévaluation peut être obtenue à partir de l'équations (2.12).

2.7.3 Coût de sous-estimation :

Ce cas de figure apparaît lorsque les puissances planifiées sont inférieures à la puissance générée par le parc éolien. En conséquence, l'électricité excédentaire est perdue si le système ne peut pas l'absorber. Dans cette situation incertaine, un coût de pénalité est ajouté pour tenir compte de la sous-estimation de la puissance éolienne, et il est formulé mathématiquement comme suit :

$$C_{Pwj}(P_{w.avj} - P_{w.sj}) = K_{P.wj}(P_{w.avj} - P_{w.sj}) = K_{Pwj} \int_{P_{wsj}}^{P_{wrj}} (P_w - P_{wsj}) f_{wj}(P_w) dP_w \quad (2.14)$$

Ou, $K_{P.wj}$ designe le facteur de pénalité du coût associé au j^{th} unité.

2.7.4 Coût total des sources éoliennes :

Les trois coûts des sources d'énergie éolienne sont pris en compte dans une fonction objectif globale définie par l'équation (15).

$$F_{obj.4} = C_{TW}(P_W) = \min \left(\sum_{j=1}^{Nwg} [C_{wj}(P_{wsj}) + C_{R.wj}(P_{w.sj} - P_{w.avj}) + C_{Pwj}(P_{w.avj} - P_{w.sj})] \right) \quad (2.15)$$

Avec : **Nwg** est le nombre des sources éoliennes.

2.8 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons exploré les principes fondamentaux du dispatching économique, notamment la fonction de coût, les contraintes pratiques et la formulation du problème de dispatching économique. Nous avons également étudié la distribution de Weibull, un outil essentiel dans le domaine de l'énergie éolienne, qui fournit des informations cruciales sur les vitesses du vent. Enfin, nous avons présenté les différents coûts associés à l'énergie éolienne. Le chapitre suivant sera consacré à l'étude des techniques d'optimisation globales pour la résolution de ce problème complexe.

Chapitre 3 : Techniques d'optimisation métaheuristiques.

3 Chapitre 3 : Techniques d'optimisation métaheuristiques

3.1 Introduction :

L'avènement de la quatrième révolution industrielle place les algorithmes d'optimisation au cœur de la résolution des problèmes complexes et de grande envergure. Dans ce contexte, les techniques d'optimisation, notamment les méthodes métaheuristiques, deviennent des outils essentiels pour affronter ces défis considérables. Dans ce chapitre, nous avons exploré les méthodes métaheuristiques et leur classification. Nous nous sommes ensuite concentrés sur les algorithmes génétiques et une nouvelle technique d'optimisation, l'algorithme d'optimisation du tour des palombes, afin de souligner leur pertinence et leurs applications pratiques dans le domaine de gestion des réseaux électriques modernes en particulier l'optimisation du dispatching économique environnementale en présence des sources renouvelables.

3.2 Définition de l'Optimisation :

Un problème d'optimisation se définit comme la recherche du minimum ou du maximum (de l'optimum) d'une fonction donnée [30]. Les méthodes d'optimisation sont classées en trois catégories : Les méthodes mathématiques, les méthodes méta heuristiques et les méthodes hybrides.

3.3 Définition des Méthodes Méta heuristiques :

Les méta heuristiques sont des algorithmes d'optimisation inspirés de la nature, conçus pour résoudre des problèmes complexes. Elles trouvent leur origine dans divers domaines comme la physique (recuit simulé), la biologie évolutive (algorithmes génétiques) ou le comportement animal (colonies de fourmis, essais particuliers). [23].

3.4 Classification des algorithmes méta heuristiques :

Les algorithmes méta heuristiques sont classés selon leur mode de recherche de solutions. On distingue trois grandes catégories :

- **Méthodes à solution unique :** Ces approches améliorent progressivement une seule solution. Parmi elles, le recuit simulé (SA) accepte temporairement des solutions moins bonnes pour échapper aux optima locaux, la recherche tabou (TS) utilise une mémoire pour éviter les répétitions, et la recherche à voisinage variable (VNS) adapte dynamiquement le voisinage pour renforcer l'exploration.
- **Méthodes basées sur une population :** Elles travaillent sur un ensemble de solutions évolutives. Les algorithmes génétiques (GA) s'appuient sur la sélection naturelle,

l'optimisation par essaim particulaire (PSO) simule le comportement collectif, l'évolution différentielle (DE) utilise les différences entre individus pour générer de nouvelles solutions, et les systèmes immunitaires artificiels (AIS) s'inspirent des mécanismes d'adaptation du système immunitaire.

- **Méthodes hybrides** : Ces algorithmes combinent différentes stratégies pour améliorer la performance et la qualité de l'optimisation.

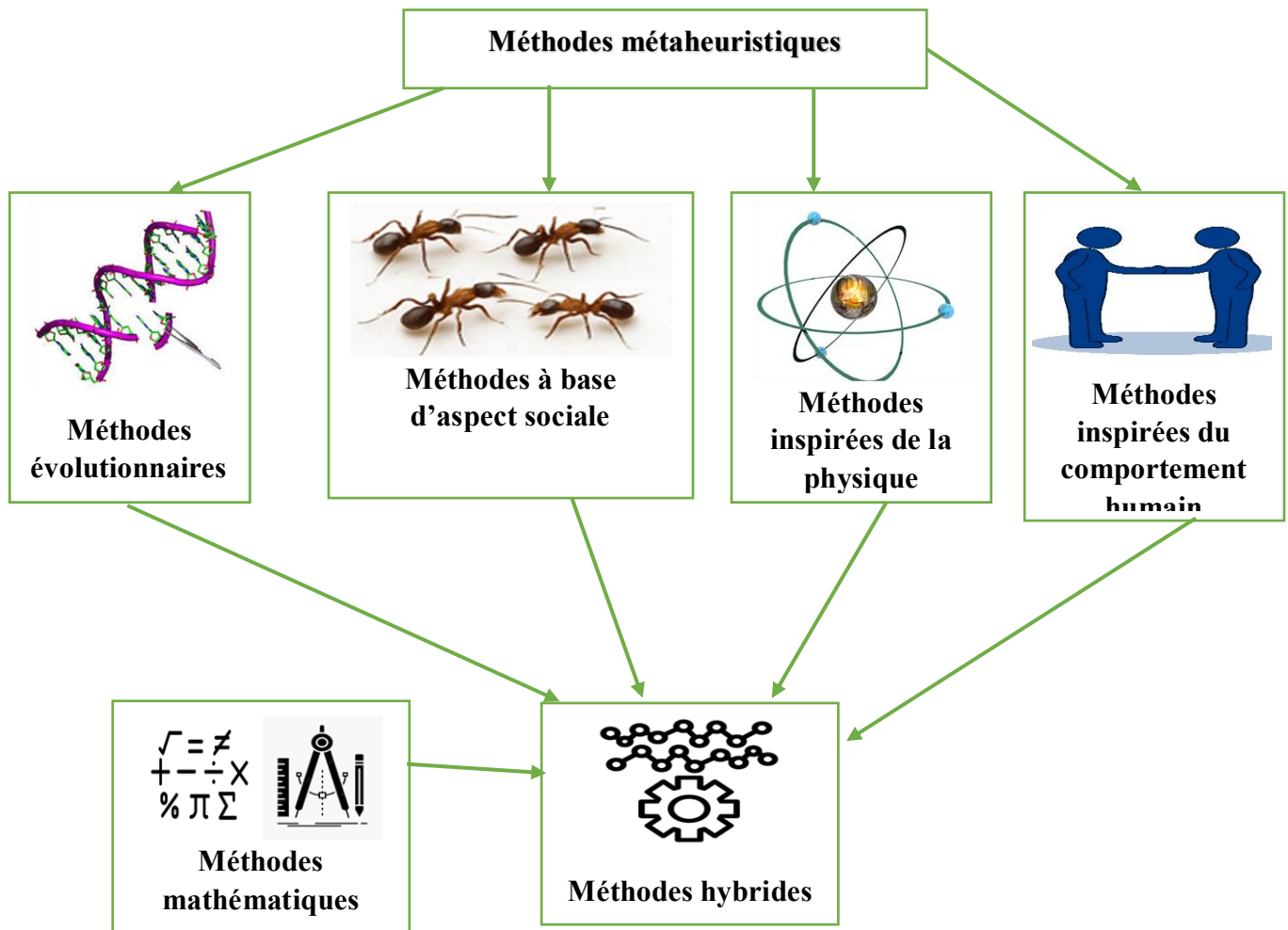


Figure 3-1:classification des méthodes méta heuristiques

3.5 Algorithme génétique :

Les algorithmes génétiques (AG) constituent une classe de techniques d'optimisation stochastiques qui s'inspirent des mécanismes de la génétique et de la sélection naturelle. En tant que membres des algorithmes évolutionnistes, un sous-ensemble des métaheuristiques, les AG démontrent une grande polyvalence et sont employés dans divers domaines tels que l'optimisation de fonctions, la planification et bien d'autres applications, voici, quelques termes de base de l'algorithme génétique [31] :

- Population : ensemble fini d'individus (*de solution*).
- Individu : solution potentielle du problème ou expression des chromosomes.
- Chromosome : solution potentielle du problème sous une forme codée (forme de Chaîne de caractères) ou ensemble des gènes.
- Gène : partie élémentaire (*caractère*) non divisible d'un chromosome.
- Fitness : terme qui désigne la fonction d'évaluation d'un individu. Cette Fonction est liée à la fonction à optimiser et permet de définir le degré de performance d'un individu. [32]

Chaque gène représente un paramètre d'une solution, et ses allèles sont les différentes valeurs possibles. Un chromosome est une suite de gènes, un individu est un ensemble de chromosomes, et une population regroupe plusieurs individus. Un codage unique des allèles doit être défini pour assurer une correspondance entre leur valeur réelle et leur représentation codée [33]. On aboutit ainsi à une structure présentant quatre niveaux d'organisation figure 3-2 :

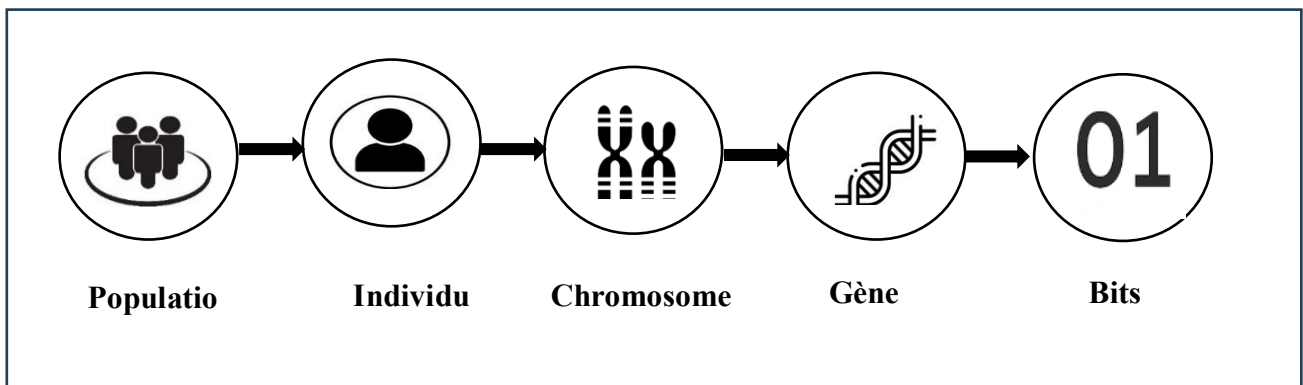


Figure 3-2: Niveaux d'organisation des AG.

3.5.1 Les opérateurs des algorithmes génétiques :

a Le codage :

Le codage dans un algorithme génétique transforme les variables en une forme exploitable, imitant la transcription génotype-phénotype. Différents types existent (binaire, réel, Gray, dynamique), mais le plus utilisé reste le codage réel [34].

b La sélection :

La sélection est la première étape du fonctionnement d'un algorithme génétique. Cette étape permet de choisir les individus qui vont accéder à la génération intermédiaire, pour se reproduire et former la nouvelle génération. [33]

c Le croisement :

Est un opérateur clé des algorithmes génétiques, permettant la création de nouvelles solutions en combinant des parties de deux parents [35]. Ce processus favorise la diversité génétique et améliore la recherche de solutions optimales [32].

- **Le croisement en un seul point** : une coupure est faite à une position aléatoire sur les chromosomes des parents, et les segments sont échangés pour générer deux nouveaux Enfants [32], La figure 3-3 montre la classification des méthodes méta heuristiques :

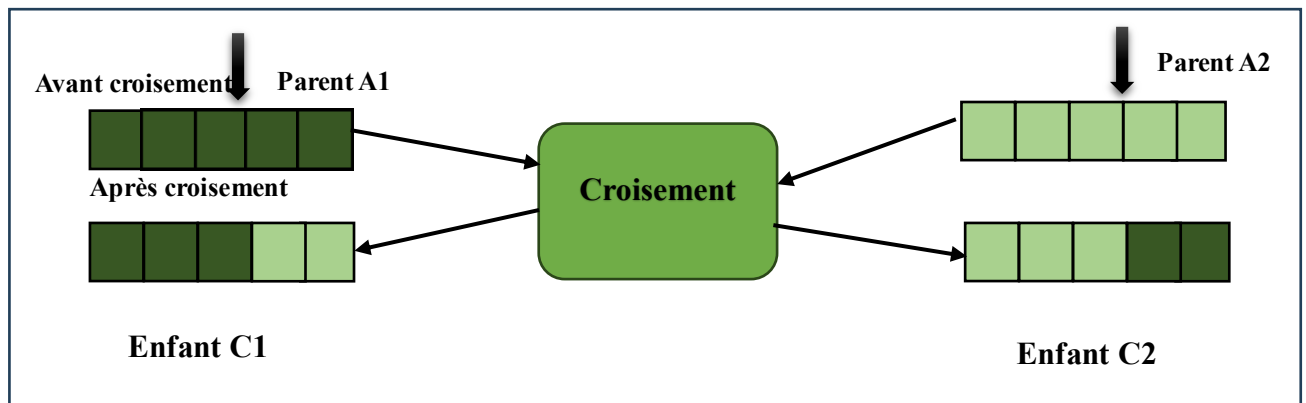


Figure 3-3 : Croisement en un seul point.

- **Le croisement multipoints** : plusieurs points de coupure sont choisis, rendant l'échange plus varié et augmentant la diversité génétique [35], La figure 3-4 présente :

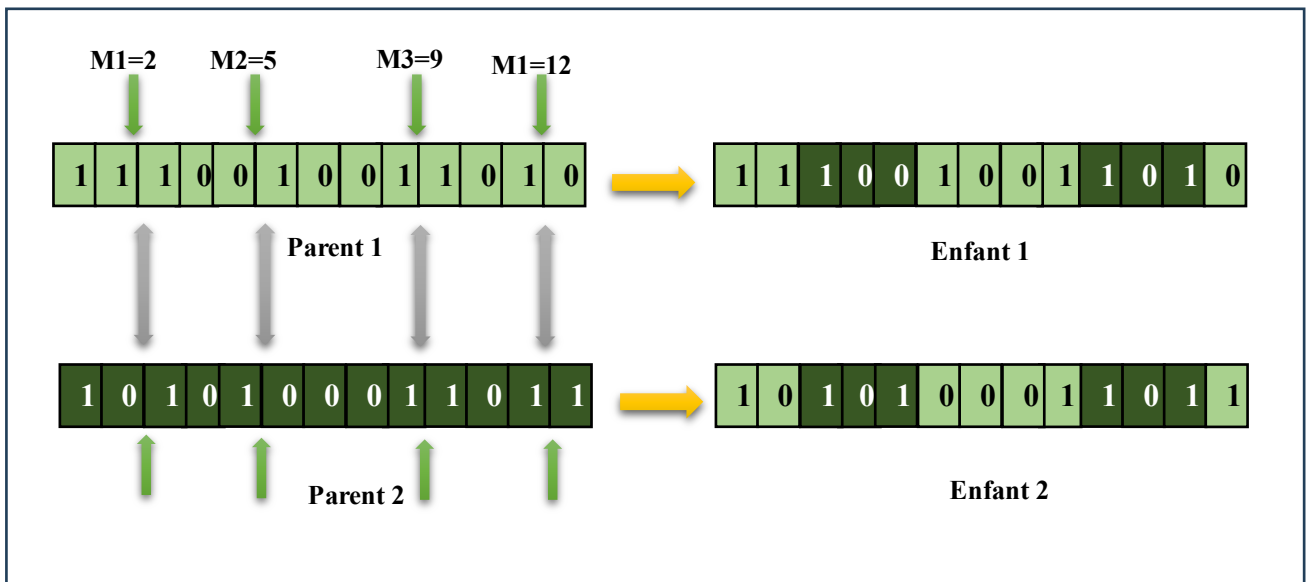


Figure 3-4 : Croisement en multipoints ($m = 4$).

d La mutation :

La mutation est un opérateur qui modifie un ou plusieurs gènes d'un chromosome enfant afin d'introduire de la diversité et d'explorer de nouvelles solutions [36] La figure 3-5 montre le

Principe de la mutation, Elle est régie par une probabilité de mutation (P_m) qui détermine si un individu doit subir une modification [37].

- Une valeur élevée de P_m transforme l'algorithme en une recherche aléatoire, rendant difficile la convergence [36].
- Une valeur trop faible empêche l'exploration efficace de l'espace des solutions et peut mener à une stagnation dans un optimum local [36].

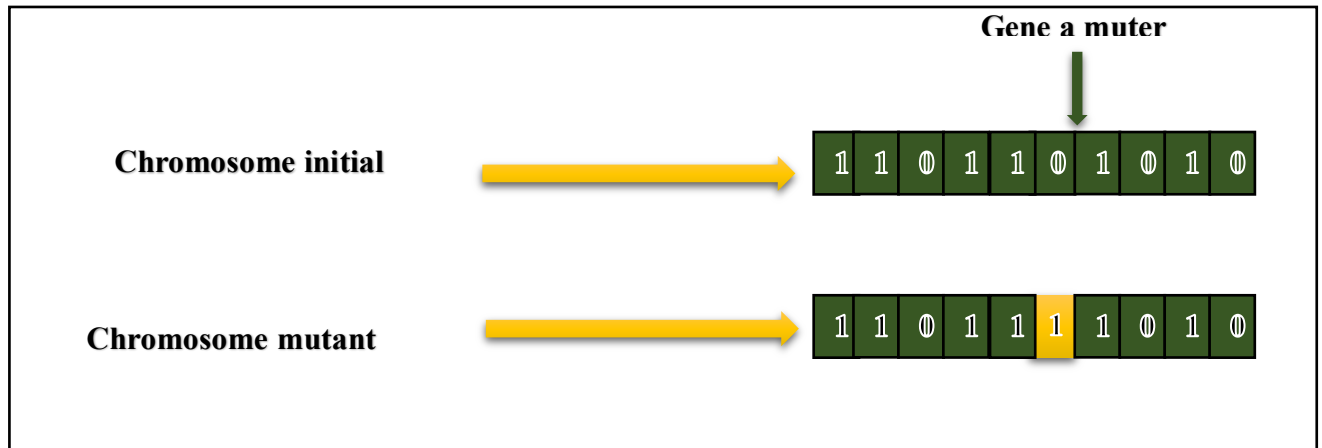


Figure 3-5: Principe de la mutation

3.5.2 Mécanisme de recherche de l'algorithme génétique :

L'algorithme génétique (AG) est une technique d'optimisation métaheuristique inspirée du mécanisme de sélection naturelle. Il repose sur une série d'étapes successives :[30]

- Initialisation : création aléatoire d'une population d'individus, représentant des solutions potentielles.
- Évaluation : chaque individu est évalué à l'aide d'une fonction de performance (fitness) qui mesure sa qualité.
- Sélection : les individus les plus performants sont retenus pour la reproduction.
- Croisement : les gènes des parents sont combinés pour produire une nouvelle génération.
- Mutation : des modifications aléatoires sont introduites pour maintenir la diversité génétique.
- Remplacement : les nouveaux individus remplacent tout ou partie de l'ancienne population.

- Arrêt : le processus se répète jusqu'à atteindre un critère prédéfini (nombre de générations, qualité de la solution, ou durée maximale)

3.5.3 Organigramme de la méthode Algorithme génétique :

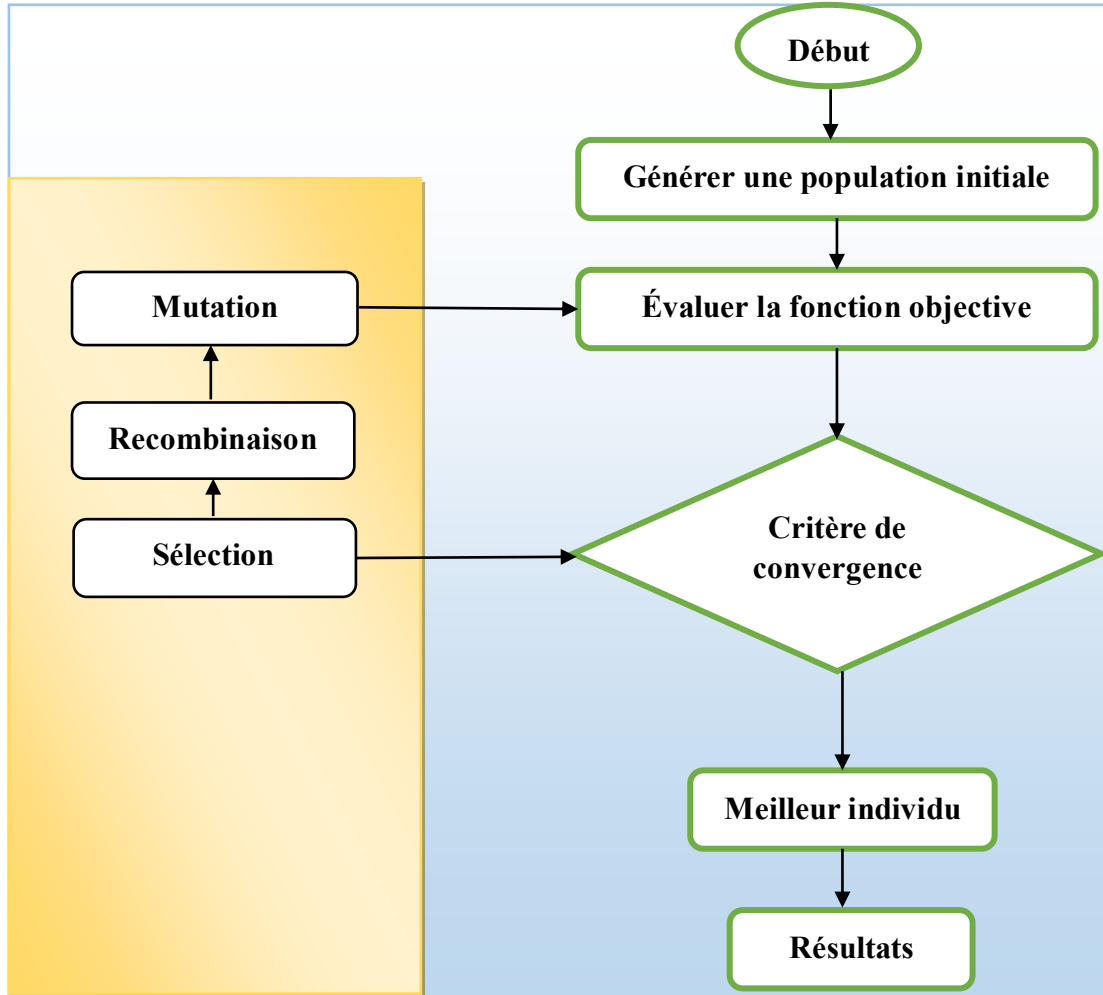


Figure 3-6 : Principe de fonctionnement de l'AG

3.5.4 Les avantages des algorithmes génétiques :[30]

- Les algorithmes génétiques équilibrent exploitation (solutions existantes) et exploration (nouvelles solutions).
- La recherche d'un optimum se fait à partir d'une population, pas d'un point unique.
- Ce fonctionnement parallèle permet de proposer plusieurs solutions finales.

3.6 Optimisation par la méthode Northern Goshawk (NGO) :

3.6.1 Inspiration et comportement de l'autour des palombes :

Un nouvel algorithme basé sur l'intelligence en essaim, appelé algorithme d'optimisation du autour des palombes (NGO), est présenté. Il simule le comportement du autour des palombes pendant la chasse à sa proie. Cette stratégie de chasse comprend deux phases : l'identification de la proie, et la phase de poursuite et d'attrape. Les différentes étapes de l'algorithme NGO proposé sont décrites, puis sa modélisation mathématique est présentée pour être utilisée dans la résolution de problèmes d'optimisation. La capacité du NGO à résoudre des problèmes d'optimisation est évaluée sur soixante-huit fonctions objectives différentes [38], Figure 3-7 représente l'Autour des palombes.



Figure 3-7 : Autour des palombes (Northern Goshawk).

3.6.2 L'algorithme et le modèle mathématique :

3.6.2.1 Initialisation d'algorithme :

L'algorithme NGO proposé est une méthode d'optimisation basée sur une population, où les autours des palombes jouent le rôle de chercheurs dans cet algorithme. Dans l'algorithme NGO, chaque individu de la population représente une solution potentielle au problème, définissant ainsi les valeurs des variables correspondantes. Mathématiquement, chaque membre de la population est représenté sous forme de vecteur, et l'ensemble de ces vecteurs constitue une matrice représentant la population de l'algorithme. Au début du processus, les membres de la population sont générés de manière aléatoire dans l'espace de recherche. L'ensemble initial des autours des palombes peut être représenté par la matrice X ci-dessous.

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_i \\ \vdots \\ X_N \end{bmatrix}_{N \times m} = \begin{bmatrix} X_{1.1} & \dots & X_{1.d} & \dots & X_{1.m} \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots \\ X_{i.1} & \dots & X_{i.d} & \dots & X_{i.m} \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{N.1} & \dots & X_{N.d} & \dots & X_{N.m} \end{bmatrix}_{N \times m} \quad (3.1)$$

Avec :

- X : est la population d'autour des palombes.
- X_i : est la solution proposée.
- $X_{i,j}$: est la valeur de $i^{ème}$ variable spécifiée par $i^{ème}$ solution proposée.
- N : est le nombre de membres de la population.
- m : est le nombre de variables du problème.

La fonction objective du problème peut être évaluée en fonction de chaque membre de la population. Ces valeurs obtenues pour la fonction objective peuvent être représenté par un vecteur suivant :

$$F(X) = \begin{bmatrix} F_1 = (X_1) \\ \vdots \\ F_i = (X_i) \\ \vdots \\ F_N = (X_N) \end{bmatrix}_{N \times 1}, \quad (3.2)$$

Où :

- F : est le vecteur des valeurs de fonction objectif obtenues.
- F_i : est la valeur de la fonction objective obtenue par $i^{ème}$ solution proposée.

3.6.2.2 Identification des proies (Exploration) :

Dans la première phase, l'autour des palombes sélectionne la proie et tente de l'attaquer. Parce que la proie est choisie au hasard, ce comportement peut refléter la capacité d'exploration globale de l'algorithme dans l'espace réalisable [39]. Un schéma du comportement de l'autour des palombes dans cette phase impliquant la sélection des proies et l'attaque est illustré à la figure (3.8.a). Les concepts exprimés sont modélisés mathématiquement par les équations suivantes :

$$P_{i,j} = X_k, i = 1, 2, \dots, N, \quad K = 1, 2, \dots, i - 1, i + 1, \dots, N, \quad (3.3)$$

$$X_{i,j}^{new,PI} = \begin{cases} X_{i,j} + r(p_{i,j} - IX_{i,j}), & F_{pi} < F_i, \\ X_{i,j} + r(X_{i,j} - p_{i,j}), & F_{pi} \geq F_i, \end{cases} \quad (3.4)$$

$$X_i = \begin{cases} X_{i,j}^{new,PI}, & F_i^{new,PI} < F_i \\ X_{i,j}, & F_i^{new,PI} \geq F_i \end{cases} \quad (3.5)$$

Où :

- $P_{i,j}$: est la position de proie pour $i^{ème}$ l'autour des palombes.
- F_{pi} : est sa valeur de fonction objective.
- K : est un nombre naturel aléatoire dans l'intervalle $[1, N]$.
- $X_i^{new,PI}$: est le nouveau statut de l' $i^{ème}$ solution proposée.
- $X_{i,j}^{new,PI}$: est son $i^{ème}$ dimension.
- $F_i^{new,PI}$: est la valeur de la fonction objective basée sur la première phase de l'NGO.
- r : est un nombre aléatoire dans l'intervalle $[0, 1]$.
- I : est un nombre aléatoire qui peut être 1 ou 2.

Les paramètres r et I sont des nombres aléatoires utilisés pour générer un comportement aléatoire des NGO lors de la recherche et de la mise à jour.

3.6.2.3 Opération de poursuite et d'évasion (Exploitation) :

Lorsque l'autour des palombes repère sa proie et lance son attaque, celle-ci, prise de panique, tente de s'enfuir. À ce moment-là, le rapace doit poursuivre sa cible sans relâche. Grâce à sa grande vitesse de poursuite, il est capable de traquer et de capturer ses proies dans la plupart des situations. Le processus de poursuite entre l'autour des palombes et sa proie est illustré à la figure 3-8 La modélisation de ce comportement améliore l'efficacité de l'algorithme pour l'exploration locale de l'espace de recherche. Cette phase peut être représentée par l'équation suivante [12] :

$$X_{i,j}^{new,P2} = X_{i,j} + R \times (2r - 1)X_{i,j}, \quad (3.6)$$

$$R = 0.02 \times \left(1 - \frac{t}{T}\right), \quad (3.7)$$

$$X_i = \begin{cases} X_{i,j}^{new,P2}, & F_i^{new,P2} < F_i \\ X_i, & F_i^{new,P2} \geq F_i \end{cases} \quad (3.8)$$

Où :

- t : est le compteur d'itérations.
- T : est le nombre maximal d'itérations.
- $F_i^{new,P2}$: est le nouveau statut de $i^{ème}$ solution proposée.
- $X_{i,j}^{new,P2}$: est son $i^{ème}$ dimension.

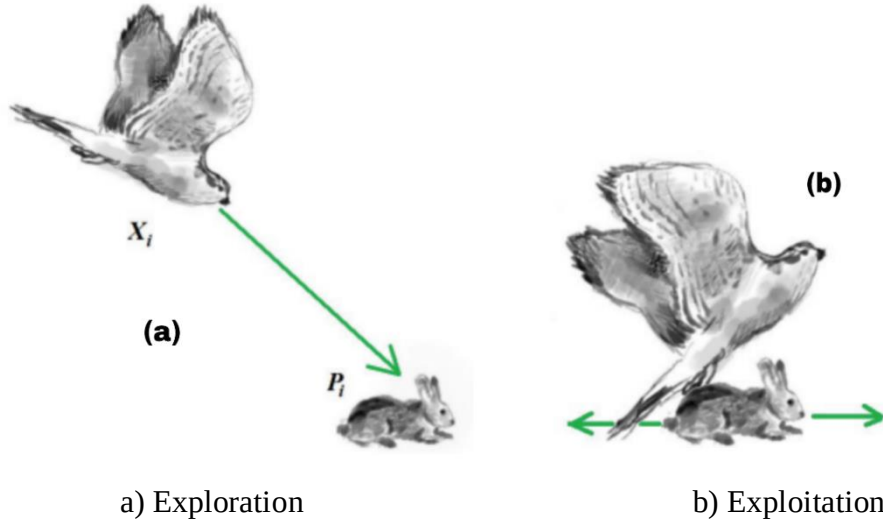


Figure 3-8 : Schéma d'identification et d'évasion des proies par l'autour des palombes

L'organigramme de recherche de l'algorithme NGO est présenté dans la figure3- 9.

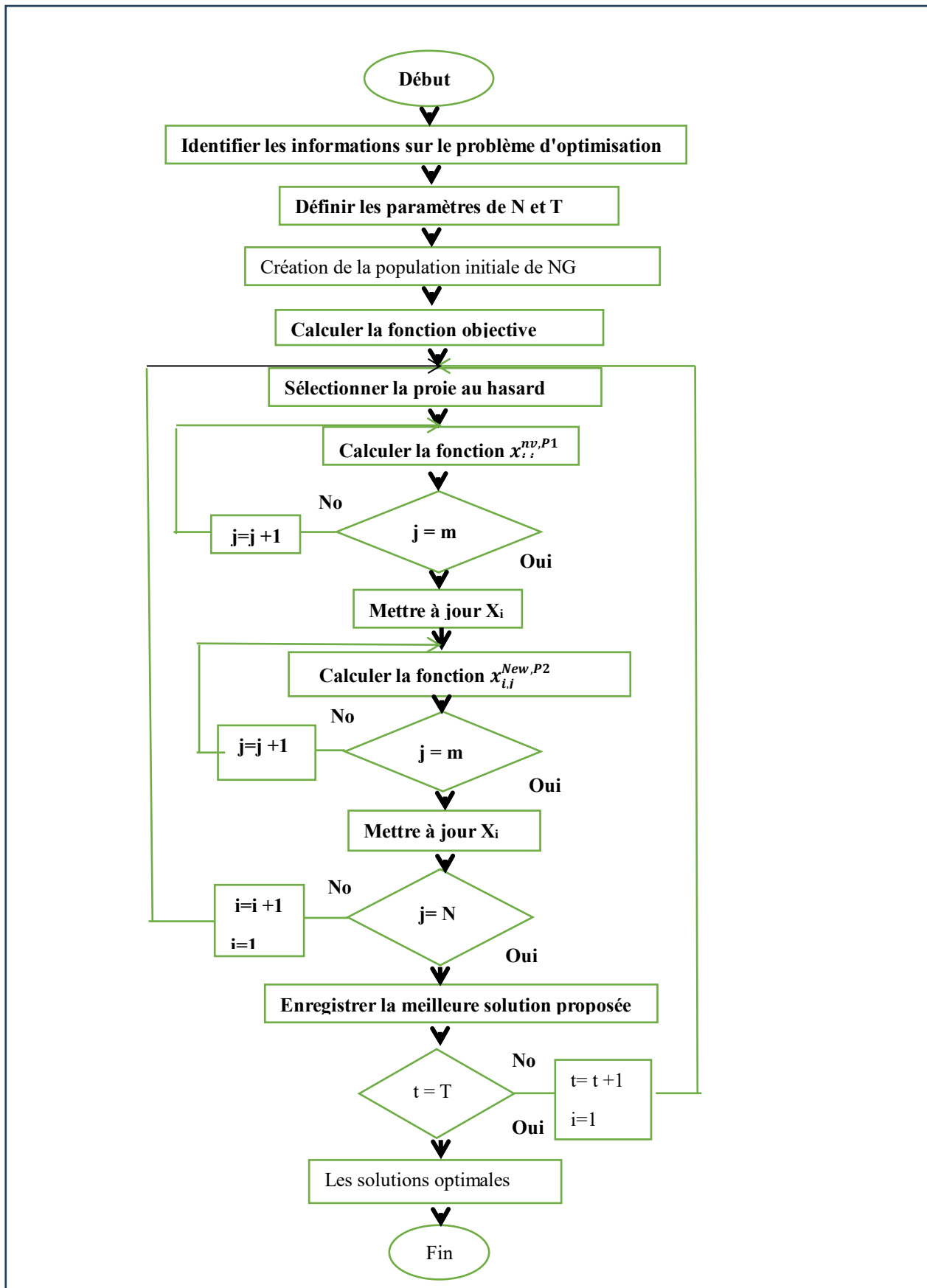


Figure 3-9 : Organigramme de recherche standard de l'algorithme NGO

3.7 Termes techniques associes l'optimisation : [40]

3.7.1 La fonction d'objective :

C'est le nom donné à la fonction f (on l'appelle aussi fonction de coût ou critère d'optimisation). C'est cette fonction que l'algorithme d'optimisation va devoir optimiser (trouver un optimum).

3.7.2 Variables de décision :

Elles sont regroupées dans le vecteur $\vec{x}$. C'est en faisant varier ce vecteur que l'on recherche un optimum de la fonction f .

3.7.3 Définition des contraintes :

Définit des conditions sur l'espace d'état que les variables doivent satisfaire. Ces contraintes sont souvent des contraintes d'inégalité ou d'égalité.

3.7.4 Optimisation multi objective :

L'optimisation multi objective (OM) est une branche de l'optimisation qui traite des problèmes où plusieurs fonctions objectives doivent être optimisées simultanément. Contrairement à l'optimisation mono-objective où l'on cherche une seule solution optimale, l'OM vise à trouver un ensemble de solutions qui représentent les meilleurs compromis possibles entre les objectifs conflictuels. Cet ensemble de solutions est souvent appelé l'ensemble de Pareto ou la frontière de Pareto.

3.8 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons d'abord introduit les fondements des problèmes d'optimisation. Ensuite, nous avons brièvement décrit une classification des méthodes méta heuristiques. Par la suite, nous avons exposé le mécanisme de recherche de l'algorithme génétique ainsi que le principe de fonctionnement d'une nouvelle technique prometteuse, l'algorithme d'optimisation du autour des palombes (NGO). Il convient de souligner que la robustesse et la précision de ces approches dépendent étroitement de la formulation du problème et de la sélection pertinente des paramètres. L'adaptation et l'application pratique de ces méthodes feront l'objet d'une discussion et d'une analyse approfondie dans le chapitre suivant.

Chapitre 4 :

Analyse des

résultats

d'optimisation.

4 Chapitre 4 : Analyse des résultats d'optimisation.

4.1 Introduction :

Ce chapitre explore l'application de la méthode génétique et de l'algorithme nommé NGO pour résoudre le problème de dispatching économique environnemental, qui consiste à répartir la production d'électricité de manière optimale pour minimiser les coûts. La méthode génétique permet de résoudre des problèmes complexes en cherchant des solutions optimales en s'inspirant de l'évolution naturelle. L'algorithme NGO vise à améliorer l'efficacité des systèmes énergétiques tout en réduisant les coûts. Dans ce chapitre, nous découvrirons comment appliquer la méthode génétique et les NGO au dispatching économique, en mettant l'accent sur leurs avantages et leurs résultats concrets.

4.2 Description du réseau test :

Ce réseau électrique de test qui représente une portion du système de puissance électrique Américain, et constitué de 30 jeux de barres, composé de six nœuds de générateurs localisés aux jeux de barres 2, 5, 8, 11 et 13, alors que le jeu de barres de référence est localisé au jeu de barre 1. Ce réseau est constitué de 41 branches, de 4 transformateurs réglables en charge installées aux jeux de barres (4-12, 6-9, 6-10 et 27-28), et de 24 charges. La puissance apparente demandée est de $283.4 + j126.2$ MVA. Le schéma équivalent du réseau test à considérer pour résoudre le problème de dispatching économique est dans notre présenté dans la figure 4-1.

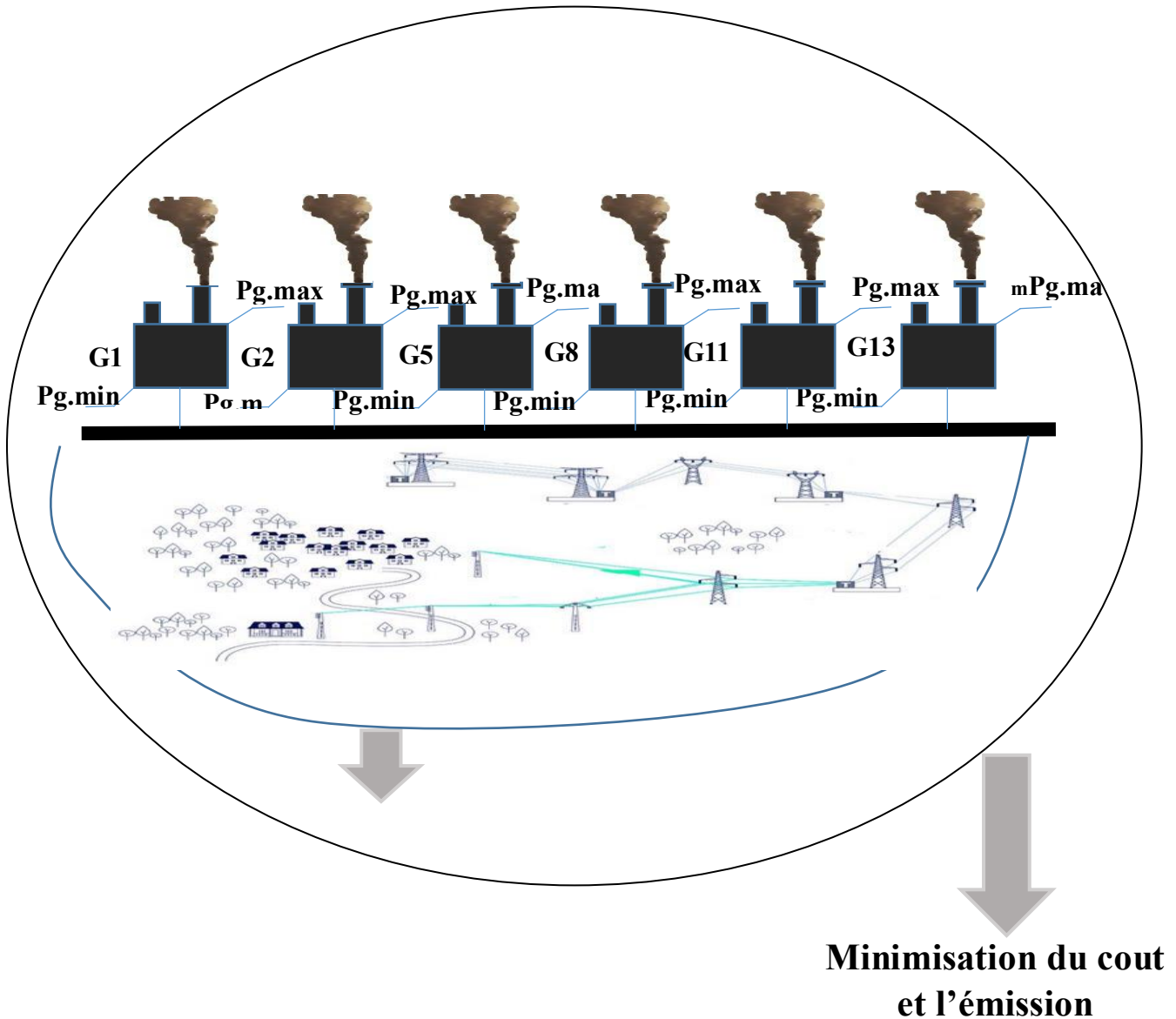


Figure 4-2: Stratégie de dispatching économiques environnementale.

4.3 L'algorithme génétique :

4.3.1 Méthodologie d'optimisation par l'algorithme génétique :

L'organigramme de la figure 4-2 illustre la méthodologie d'optimisation par l'algorithme génétique dédié à la résolution du problème de dispatching économique environnementale.

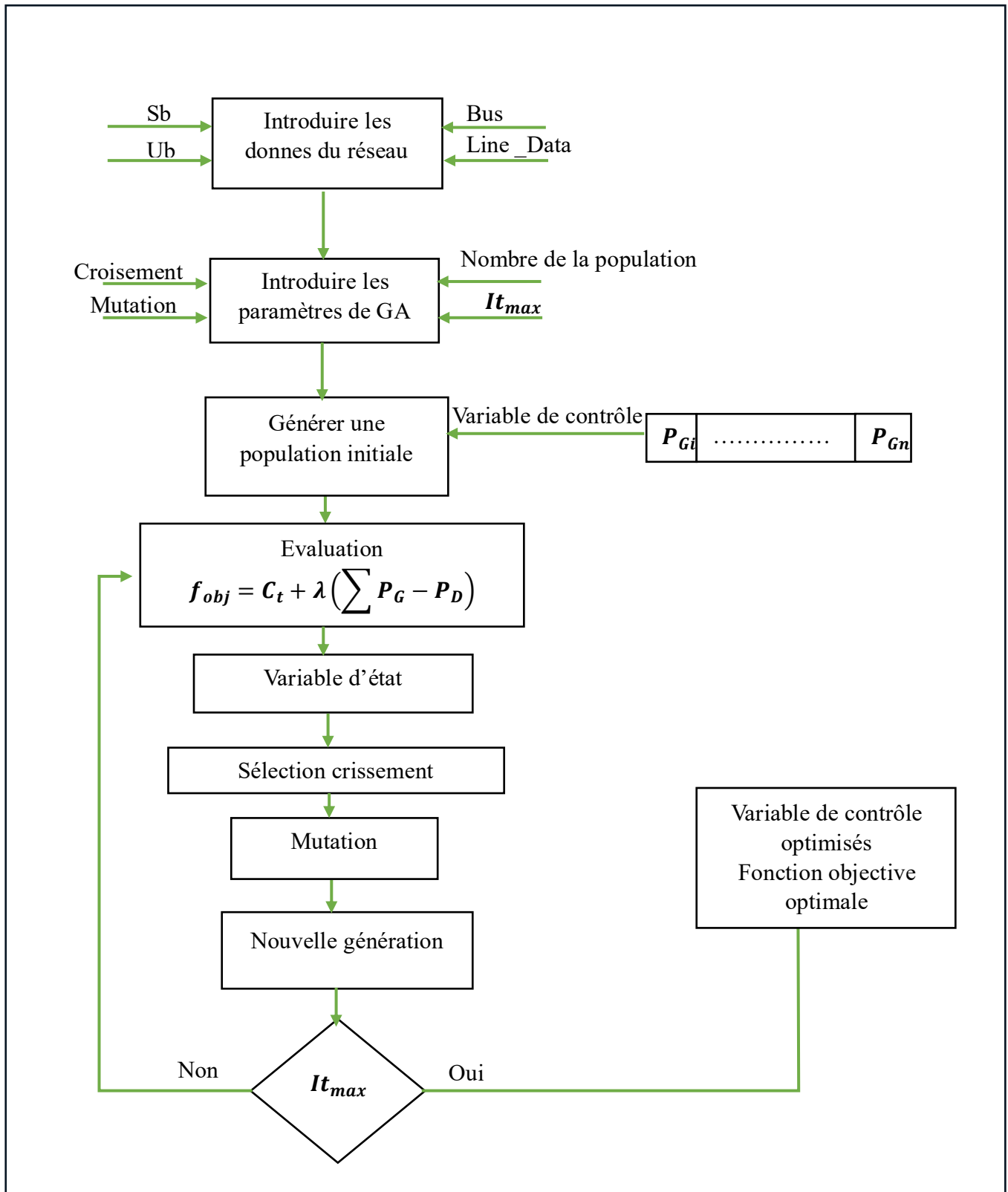


Figure 4-3: Méthodologie d'optimisation par l'algorithme génétique

4.3.2 Données techniques :

Les données techniques du réseau en termes de coefficients de cout quadratique et avec effet de valve, et émission sont récapitulés dans les tableaux 1, 2 et 3.

Bus	c	b	a	pgt _{min}	pgt _{max}
1	0.00375	2	0	50	200
2	0.0175	1.75	0	20	80
5	0.0625	1	0	15	50
8	0.00834	3.25	0	10	35
11	0.025	3	0	10	30
13	0.025	3	0	12	40

Tableau 1 : coefficients de la fonction cout quadratique des unités de production thermique.

Bus	$\gamma .10^{-2}$	$\beta .10^{-4}$	$\alpha .10^{-6}$	$\xi .10^{-4}$	$\lambda .10^{-2}$
1	4.091	-5.554	6.49	2.0	2.857
2	2.543	-6.047	5.638	5.0	3.333
5	4.258	-5.094	4.586	0.01	8.0
8	5.326	-3.55	3.38	20.0	2.0
11	4.258	-5.094	4.586	0.01	8.0
13	6.131	-5.555	5.151	10.00	6.667

Tableau 2 : coefficients de la fonction émission de gaz

Bus	c	b	a	d	e	pgt _{min}	pgt _{max}
1	0.00375	2	0	18.0000	0.0370	50	200
2	0.0175	1.75	0	16.0000	0.0380	20	80
5	0.0625	1	0	14.0000	0.0400	15	50
8	0.00834	3.25	0	12.0000	0.0450	10	35
11	0.025	3	0	13.0000	0.0420	10	30
13	0.025	3	0	13.5000	0.0410	12	40

Tableau 3:coefficients de la fonction coût à effet de valve des unités de production thermique.

4.4 Dispatching sans intégration des sources renouvelables :

Cette première partie est dédiée à la résolution du problème de dispatching économique en utilisant l'algorithme génétique, sans prendre en compte l'intégration des sources renouvelables. Deux fonctions objectives seront considérées : la minimisation du coût des unités utilisant des énergies fossiles et la réduction des émissions de gaz.

4.4.1 Minimisation du cout de combustible :

4.4.1.1 Fonction objective quadratique :

Ce premier test consiste à optimiser le cout quadratique associes aux unités de production à base d'énergie fossile. Due à l'aspect stochastique l'algorithme génétique est exécuter plusieurs fois pour localiser la valeur optimale. Pour ce cas, le cout quadratique optimiser est de 771.92 \$/h, en conséquence, l'émission de gaz devient 0.34 ton/h. Les résultats d'optimisation achever par GA pour dix exécutions sont récapitulés dans le tableau 4. La figure 4-3 illustre la convergence de l'algorithme génétique lors de la minimisation de la fonction quadratique.

VC	Run 1	Run2	Run3	Run4	Run5	Run6	Run7	Run8	Run9	Run10
Pgt1	166.9637	164.6460	164.0870	164.1376	168.3350	167.7821	172.3086	168.4861	161.5319	170.9456
Pgt2	45.8665	43.9004	48.6465	45.5363	51.8582	46.0623	48.2801	45.7591	52.0952	46.3509
Pgt5	27.6282	29.1909	25.1296	27.8581	21.9931	27.3396	24.0391	25.0061	27.3479	22.6975
Pgt8	14.0032	15.3105	15.7646	15.4223	14.7974	13.2256	12.4129	13.5385	13.5724	15.0453
Pgt11	10.8339	10.1675	10.0618	10.8350	11.1149	10.3078	10.0004	10.7795	10.4245	11.6019
Pgt13	18.1046	20.1848	19.7105	19.6108	15.3015	18.6826	16.3589	19.8307	18.4280	16.7588
Ctot (\$/h)	775.9726	779.4891	775.1521	777.6356	771.0792	775.7201	771.2896	774.3306	777.0740	771.3361
Em(ton/h)	0.3422	0.3364	0.3362	0.3354	0.3474	0.3445	0.3569	0.3463	0.3308	0.3526
Er (*10-5)	-0.9742	-0.8132	-0.9997	-0.9997	-0.2624	-0.8819	-0.9363	-0.8273	-0.9995	-0.9885
Cout-Min(\$/h)	771.0792									
Cout-Moy(\$/h)	774.9079									
Cout-Max(\$/h)	779.4891									
SD	2.9024									
Em-n-op	0.3474									
Cglobale(\$/h)	962.3785									

Tableau 4: résultats de minimisation de cout de combustible : fonction cout quadratique.

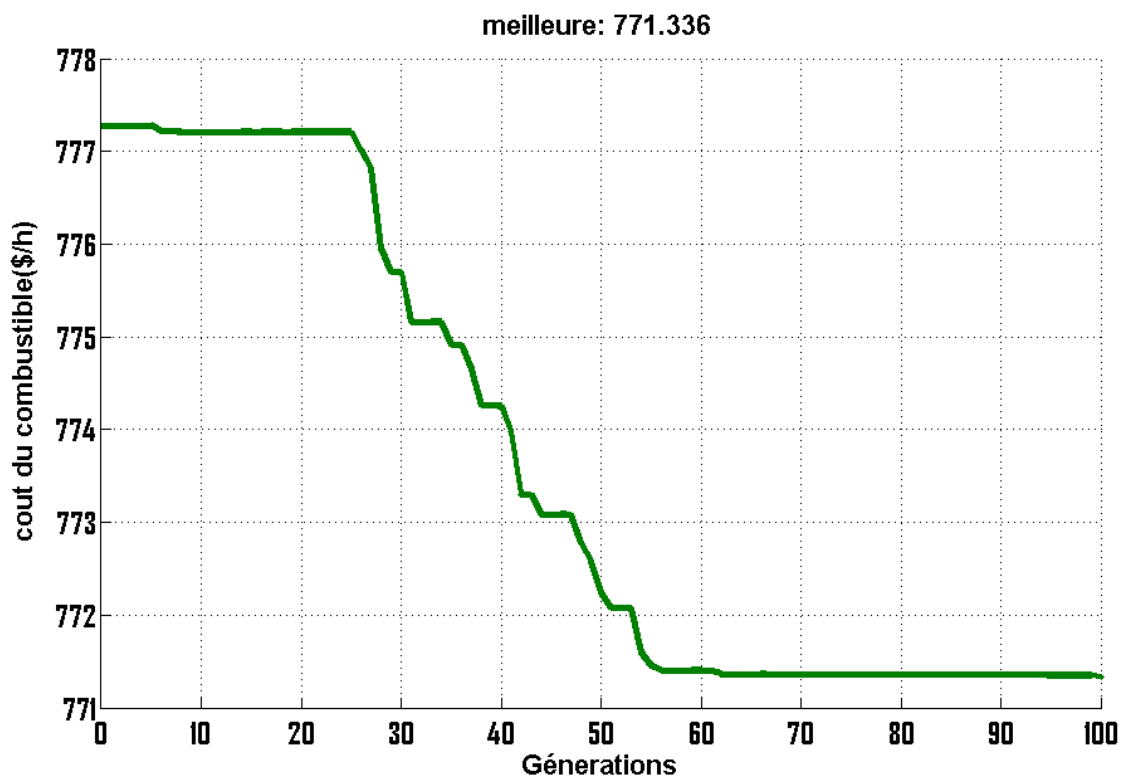


Figure 4-4: Caractéristique de convergence de l'AG : Minimisation du coût quadratique.

4.4.1.2 Fonction objective à effet de valve :

Ce premier test a pour objectif d'optimiser le coût lié à l'effet de valve des unités de production fonctionnant à partir d'énergie fossile. En raison de la nature stochastique du problème, l'algorithme génétique est exécuté à plusieurs reprises afin de déterminer la valeur optimale. Dans ce cas, le coût optimal prenant en compte l'effet de valve est de 810.9662 (\$/h), ce qui entraîne une émission de gaz de 0,3535 tonne/h. Les résultats obtenus par l'algorithme génétique lors des dix exécutions sont résumés dans le tableau 5. La figure 4- 4 illustre la convergence de l'algorithme génétique dans le cadre de la minimisation de la fonction objective intégrant l'effet de valve.

VC	Run 1	Run2	Run3	Run4	Run5	Run6	Run7	Run8	Run9	Run10
Pgt1	172.0862	166.2499	168.6222	164.5463	162.6469	170.0816	170.9105	171.7837	172.7193	164.5220
Pgt2	43.9962	47.1900	52.8962	46.4752	45.8411	49.6754	50.0377	45.1020	43.1090	47.1746
Pgt5	23.4676	27.6234	22.8537	28.4079	29.0727	24.3437	21.2621	25.2809	26.7646	26.8783
Pgt8	15.0046	12.2378	15.0228	13.8183	14.8170	12.8162	13.8885	13.4032	13.1117	15.6499
Pgt11	11.4400	11.9097	10.4613	164.5463	162.6469	170.0816	11.5064	10.5068	10.0636	10.6437
Pgt13	17.4054	18.1891	13.5438	46.4752	45.8411	49.6754	15.7949	17.3234	17.6318	18.5314
Ctot (\$/h)	813.3966	818.8020	811.3159	821.2987	823.0828	812.5610	810.9662	814.0885	815.4388	819.0181
Em(ton/h)	0.3552	0.3405	0.3485	0.3367	0.3318	0.3511	0.3535	0.3546	0.3568	0.3366
Er (*10 ⁻⁵)	-0.9988	-0.9959	-0.8092	-0.9940	0.9245	-0.8368	-0.9797	-0.8733	-0.8465	-0.7408
Cout-Min(\$/h)	810.9662									
Cout-Moy(\$/h)	815.9968									
Cout-Max(\$/h)	823.0828									
SD	4.2825									
Em-nop(ton/h)	0.3535									
Cglobale(\$/h)	1005.6									

Tableau 5: résultats de minimisation de cout de combustible : fonction cout à l'effet de valve

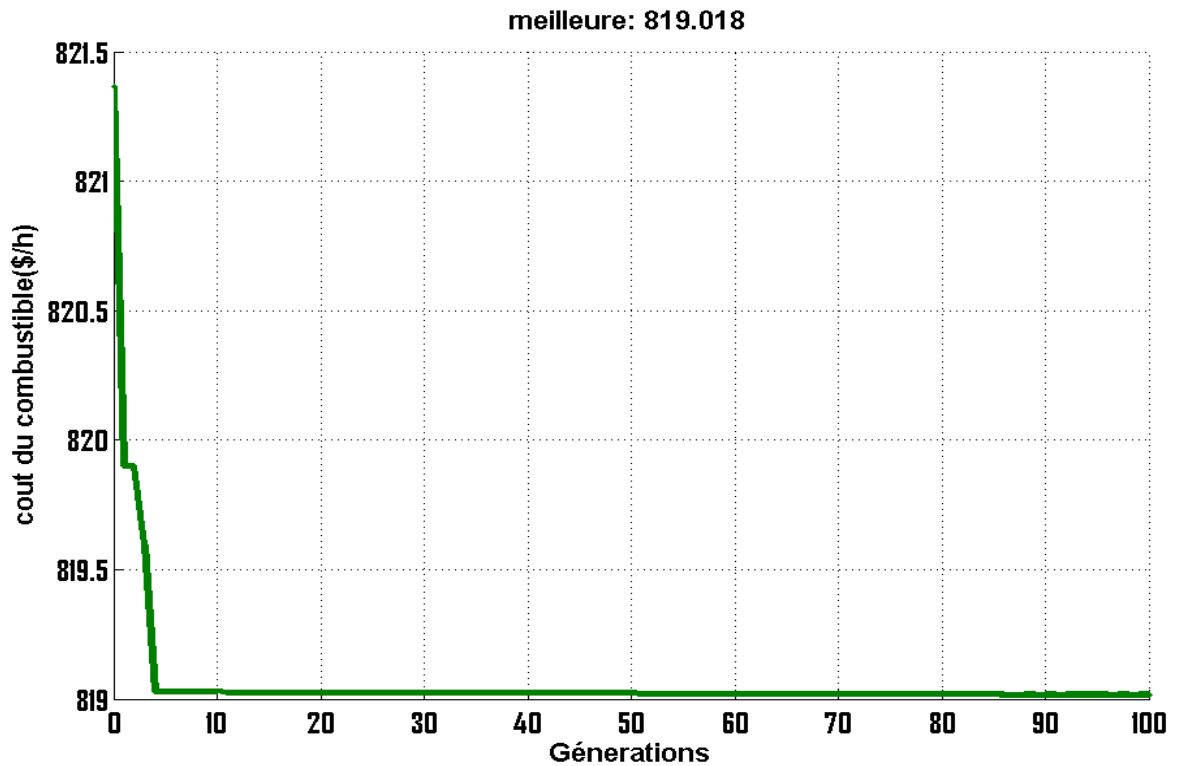


Figure 4-5: Caractéristique de convergence de l'AG : Minimisation du coût à effet de valve.

4.4.1.3 Minimisation de l'émission de gaz :

Ce troisième test vise à optimiser les émissions de gaz toxiques générées par les unités de production fonctionnant à base d'énergie fossile. En raison du caractère stochastique du problème, l'algorithme génétique est exécuté plusieurs fois afin d'identifier la solution optimale. Dans ce cas, l'émission de gaz optimisée atteint 0,2170 tonne/h, ce qui entraîne un coût quadratique de 914,1451 \$/h. Les résultats obtenus lors des dix exécutions de l'algorithme génétique sont présentés dans le tableau 6. La figure 4-6 illustre la convergence de l'algorithme génétique pour la minimisation des émissions de gaz.

VC	Run 1	Run2	Run3	Run4	Run5	Run6	Run7	Run8	Run9	Run10
Pgt1	68.6487	69.0751	72.0001	68.1843	66.2013	71.6548	67.7272	69.0587	67.9058	67.4262
Pgt2	65.4865	67.4069	62.9246	68.2570	64.1534	63.0541	65.1231	64.4945	64.7454	69.8832
Pgt5	49.9644	49.7994	49.9997	49.9683	49.8583	49.9815	49.5739	49.8795	49.8895	49.5466
Pgt8	34.9753	34.9741	34.8360	34.9379	34.9244	34.9167	34.8959	34.7337	34.8947	34.6975
Pgt11	29.8359	29.2930	29.9987	29.9336	29.9972	29.9669	29.9644	29.8609	29.9927	29.8895
Pgt13	34.4892	32.8516	33.6409	32.1189	38.2654	33.8261	36.1155	35.3728	35.9719	31.9571
Ctot (\$/h)	919.4510	917.0508	914.1451	918.8827	925.9201	914.6822	920.8729	919.2556	921.5124	918.8491
Em(ton/h)	0.2168	0.2169	0.2170	0.2165	0.2177	0.2170	0.2171	0.2171	0.2170	0.2167
Er (*10-5)	-0.9988	-0.9959	-0.8092	-0.9940	0.9245	-0.8368	-0.9797	-0.8733	-0.8465	-0.7408
Em.op (ton/h)	0.2170									
Cout.Q.nopt(\$/h)	918.8827									
Cout.V.nopt(\$/h)	989.7274									
Em-moy(ton/h)	0.2170									
Em-max(ton/h)	0.2177									
SD	3.1552e-04									
Cglobale(\$/h)	1.0381e+03									

Tableau 6: résultats de minimisation de l'émission de gaz

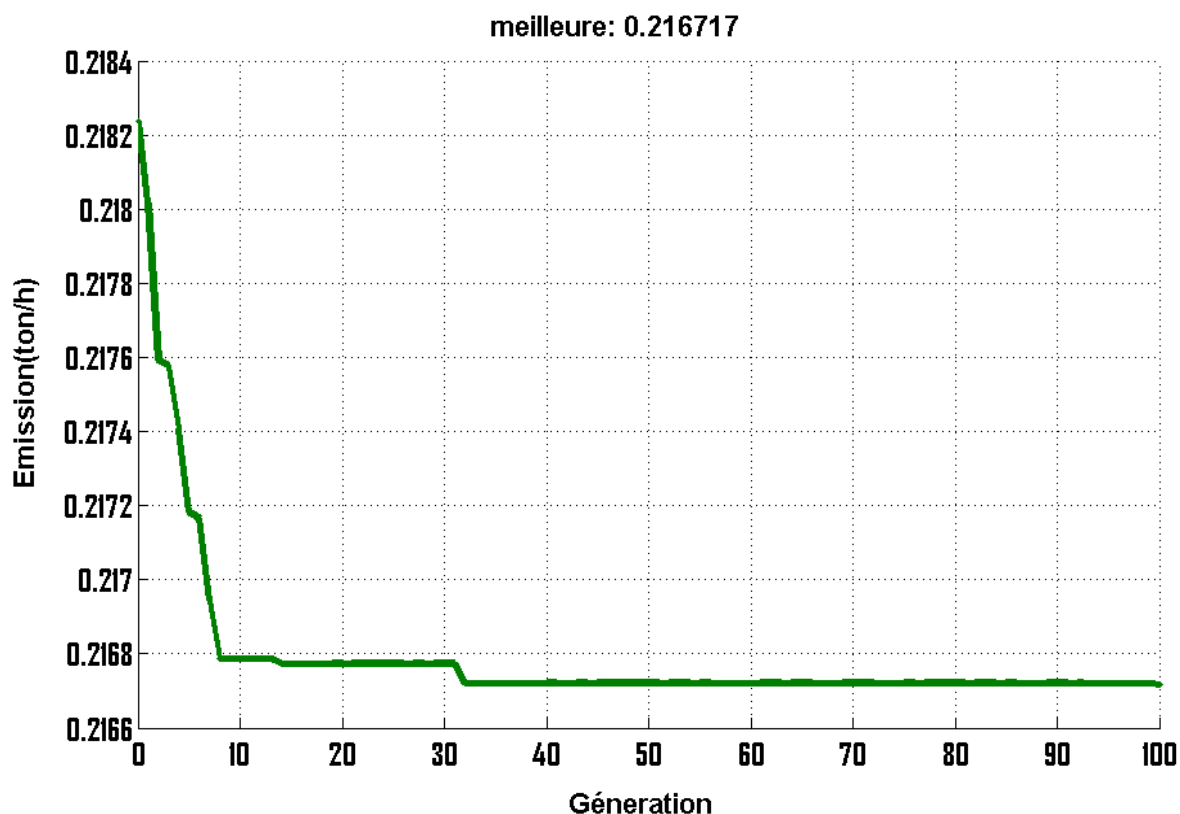


Figure 4-6: Caractéristique de convergence de l'AG : Minimisation de l'émission de gaz.

4.4.2 Interprétation des résultats :

Test 01 :

Le Test 1 a été mené dans l'objectif d'optimiser le coût de production du réseau électrique en s'appuyant sur une fonction quadratique. Les résultats obtenus, présentés dans le Tableau 4, mettent en évidence les puissances générées de manière optimale, le coût minimal associé à cette optimisation, les émissions non optimisées, ainsi que le coût total de production. Grâce à cette approche, le coût de production a pu être réduit à 771,0792 \$/h, tout en respectant les contraintes opérationnelles du système. Par ailleurs, les émissions de gaz résultantes affichent une moyenne de 0,34 tonne/h.

La Figure 4-3 illustre la courbe de convergence de l'algorithme génétique utilisé pour la minimisation du coût, soulignant sa capacité à atteindre rapidement une solution optimale. Ce test met ainsi en lumière l'efficacité de l'optimisation du coût de combustible via une fonction quadratique simple, permettant d'améliorer significativement la performance économique du réseau électrique.

Test 02 :

Le deuxième test introduit un niveau de complexité supplémentaire en intégrant l'effet de valve dans la fonction objective. Ce phénomène, caractéristique des turbines thermiques, engendre des irrégularités dans le coût de production, rendant la modélisation plus fidèle au comportement réel des unités de production. L'objectif de ce test est donc de minimiser les coûts tout en tenant compte de ces variations non linéaires. Les résultats, présentés dans le Tableau 5, révèlent une augmentation du coût par rapport au Test 1, ce qui est cohérent avec la complexité accrue du modèle. Le coût minimal atteint 810,9662 \$/h, tandis que le coût moyen s'élève à 815,9968 \$/h, représentant une hausse d'environ 6 % par rapport au cas sans effet de valve. Les émissions, quant à elles, restent relativement stables, avoisinant 0,35 tonne/h.

La Figure 4-4 met en évidence une convergence légèrement plus dispersée, illustrée par un écart-type du coût plus élevé (4,28 contre 2,90 dans le Test 1). Ce test souligne ainsi l'importance d'intégrer des phénomènes pratiques dans la modélisation : bien que le coût soit plus élevé, les résultats obtenus se rapprochent davantage de la réalité physique, ce qui constitue un atout majeur pour une planification opérationnelle fiable.

Test 03 :

Le troisième test s'est concentré sur l'optimisation des émissions de gaz dans le réseau électrique. Le tableau 6 présente les puissances générées optimisées, les émissions de gaz optimisées, les coûts non optimisés, ainsi que le coût total. Les résultats montrent une diminution significative des émissions de gaz, avec une valeur minimale atteignant 0,2167 tonne/heure et une moyenne de 0,2170 tonne/heure. Cela indique que l'algorithme d'optimisation a permis une amélioration notable par rapport à la situation non optimisée, tout en maintenant les coûts dans des limites acceptables (le coût total le plus bas étant de 914,1451 \$/h, contre 918,8491 \$/h dans le cas non optimisé).

La figure 4-5 illustre la courbe de convergence du coût d'émission des gaz. Cette courbe montre comment le coût des émissions de gaz évolue au fur et à mesure de l'avancement du processus d'optimisation. On observe une diminution rapide des émissions durant les premières générations, avec une stabilisation des valeurs autour de 0,2167 tonne/heure à partir d'environ la trentième génération. Cette courbe démontre l'efficacité du processus d'optimisation pour atteindre rapidement une solution optimale, en trouvant un équilibre entre la réduction des émissions et la diminution des coûts, afin d'assurer un fonctionnement efficace du système.

4.5 Méthode NGO :

Cette section vise à appliquer l'algorithme d'optimisation appelé NGO pour résoudre le problème de dispatching économique environnemental.

4.5.1 Analyse 1 :

L'objectif de cette première analyse est de démontrer l'efficacité de l'algorithme pour la minimisation de fonctions de types unimodales et multimodales. Plusieurs tests ont été élaborés pour déterminer les paramètres de base qui influent sur l'efficacité de la méthode NGO.

Objective Function	Range	Dim	Fmin
$F_1(X) = \sum_{i=1}^m x_i^2$	$[-100,100]$	30	0
$F_2(X) = \sum_{i=1}^m x_i + \prod_{i=1}^m x_i $	$[-10,10]$	30	0
$F_{13}(X) = 0.1 \left(\sin^2(3\pi x_1) \right.$ $\quad + \sum_{i=2}^m (x_i - 1)^2 [1 + \sin^2(3\pi x_i + 1)]$ $\quad + (x_n - 1)^2 [1 + \sin^2(2\pi x_m)]$ $\quad \left. + \sum_{k=1}^m u(x_i, 5, 100, 4), \text{ where} \right.$ $u(x_i, a, i, n) = \begin{cases} k(x_i - a)^n, & x_i > a_i \\ 0_i & -a \leq x_i \leq a; \\ k(-x_i - a)^n, & x_i < -a. \end{cases}$	$[-50,50]$	30	0
$F_{23}(X) = - \sum_{i=1}^{10} [(X - a_i) \cdot (X - a_i)^T + 6c_i]^{-1}$	$[0,10]$	4	-10.5364

Tableau 7: Caractéristiques des fonctions de types uni modales et multimodales.

Test 1 :

Ce premier test consiste à fixer le nombre d'itération maximale à 100 et de faire varier la population. Les paramètres utilisés pour l'algorithme NGO sont les suivants :

- Nombre population : 10 et 30 ;
- Nombre maximal d'itérations : 100 ;
- Nombre maximal d'exécutions : 30 ;
- Application sur les fonctions unimodales F1 et F2 ainsi que sur les fonctions multimodales F13 et F23 (ces fonctions sont détaillées dans tableau 7.

Le Tableau 8 récapitule les résultats de minimisation des fonctions mathématiques F1, F2, F13 et F23.

			Itmax=100			
Fonction objective			F1	F2	F13	F23
Nombre de membres de la population	10	Best	6.0204e-14	4.2292e-08	2.0945	-9.7097
		Mean	1.3402e-13	7.3933e-08	2.2337	-5.9118
		Max	2.2159e-13	1.0176e-07	2.2835	-3.8352
	30	Best	2.1688e-15	2.5299e-08	1.5763	-10.5362
		Mean	7.2370e-15	4.5809e-08	1.7453	-6.6059
		Max	1.7458e-14	7.0595e-08	2.0479	-2.0706

Tableau 8: Résultat de validation de la méthode NGO : minimisation des fonctions F1, F2, F13 et F23

Ces figures 4-6,7,8 et 9 illustrent la performance de convergence de la méthode NGO appliquée à la fonction F1, F2, F13, F23 avec deux tailles de population différentes (10 et 30 individus), sur un total de 100 itérations.

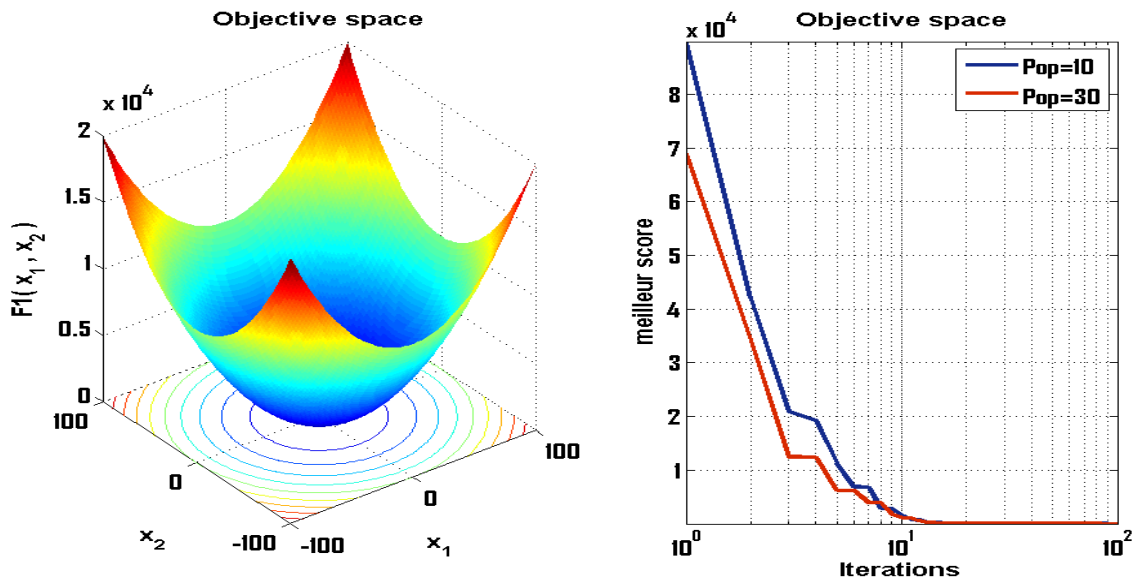


Figure 4-7: Convergence de la fonction unimodale F1 par application de la méthode NGO: {Itmax=100, Pop=10 et 30}

Remarque :

- Pour la minimisation de la fonction F1, et Pour Pop = 30 : la courbe de convergence présentée dans la figure 4-6 correspondante montre généralement une meilleure convergence ; elle atteint une valeur de fonction plus faible plus rapidement, ce qui indique une exploration plus efficace de l'espace de recherche.
- Pour Pop = 10 : la courbe convergence également, mais plus lentement, et elle atteint une solution moins optimale à la fin des 100 itérations.

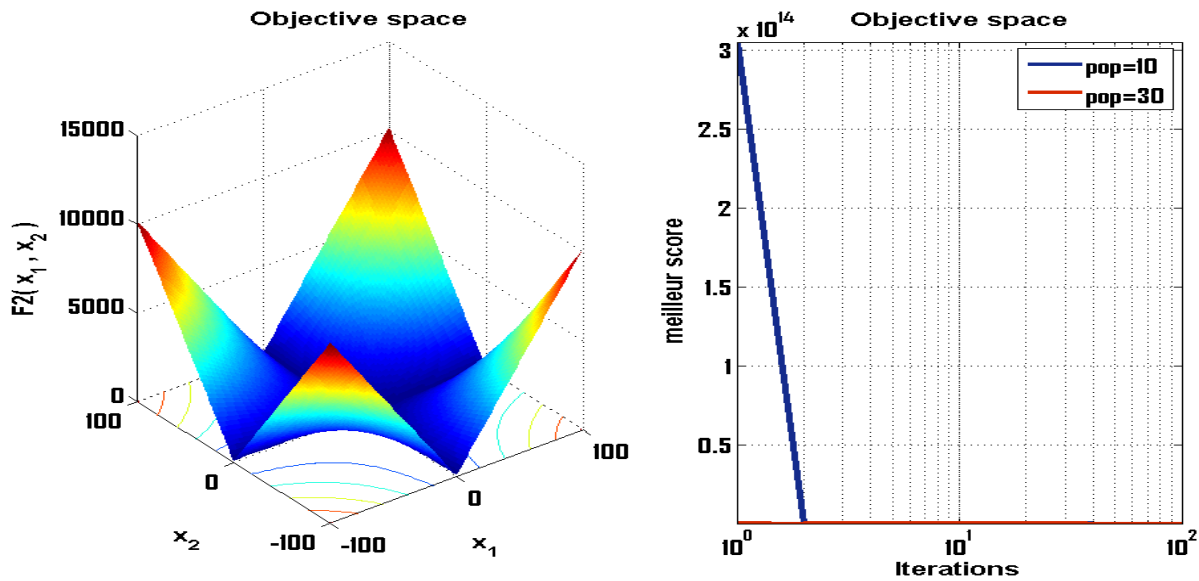


Figure 4-8: Convergence de la fonction unimodale F2 par application de la méthode NGO:
 $\{Itmax=100, Pop=10 \text{ et } 30\}$

Remarque :

Pour la minimisation de la fonction F2, et pour une $Pop = 30$, la courbe de convergence présentée dans la figure 4-7, montre une convergence rapide et stable vers une valeur minimale de la fonction. Cela indique que l'algorithme explore efficacement l'espace de recherche grâce à une meilleure diversité initiale.

- Pour une $Pop = 10$: Bien que la courbe converge également, elle est plus lente et peut rester bloquée sur un niveau de performance inférieur, ce qui reflète une exploration moins efficace ou un risque plus élevé de stagnation dans un minimum local.

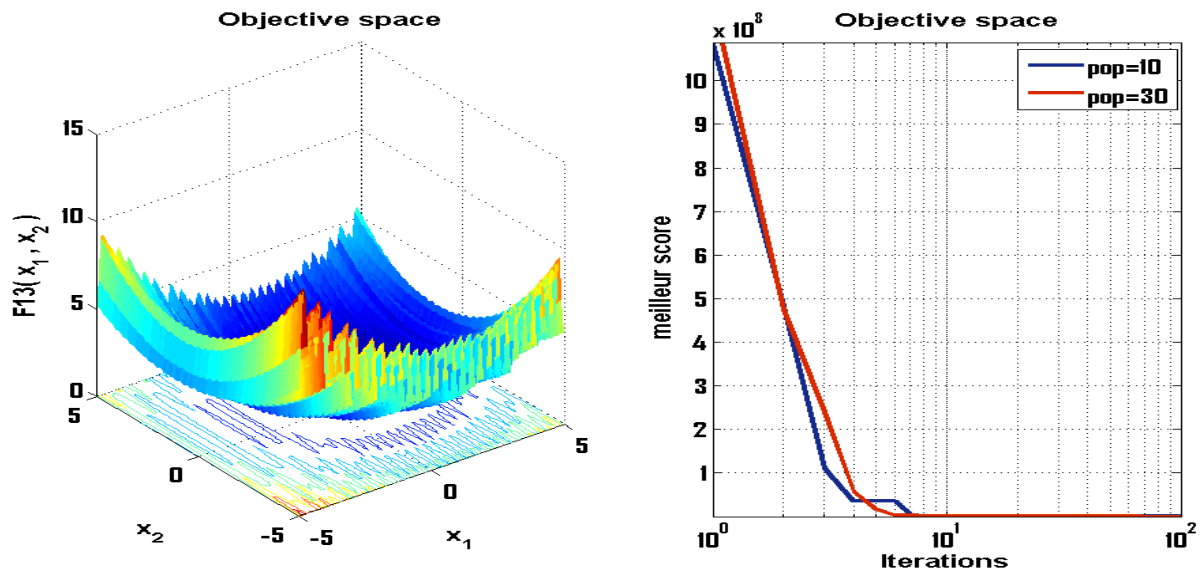


Figure 4-9 : Convergence de la fonction multimodale F13 par application de la méthode NGO: {It max=100, Pop=10 et 30=}

Remarque :

- Pour la minimisation de la fonction multi modal F13, on remarque que dans la figure 4-8 et pour une Pop = 30, l'algorithme converge vers un optimum local (Best=2.0945), il n'a pas pu atteindre l'optimum global qui est (0) car le nombre de population et l'itération maximum ne sont pas suffisant pour localiser l'optimum globale.

- Pour $\text{Pop} = 10$ la courbe converge aussi, mais plus lentement et souvent vers une solution moins optimale, probablement en raison de la diversité insuffisante de la population, ce qui favorise la stagnation prématurée.

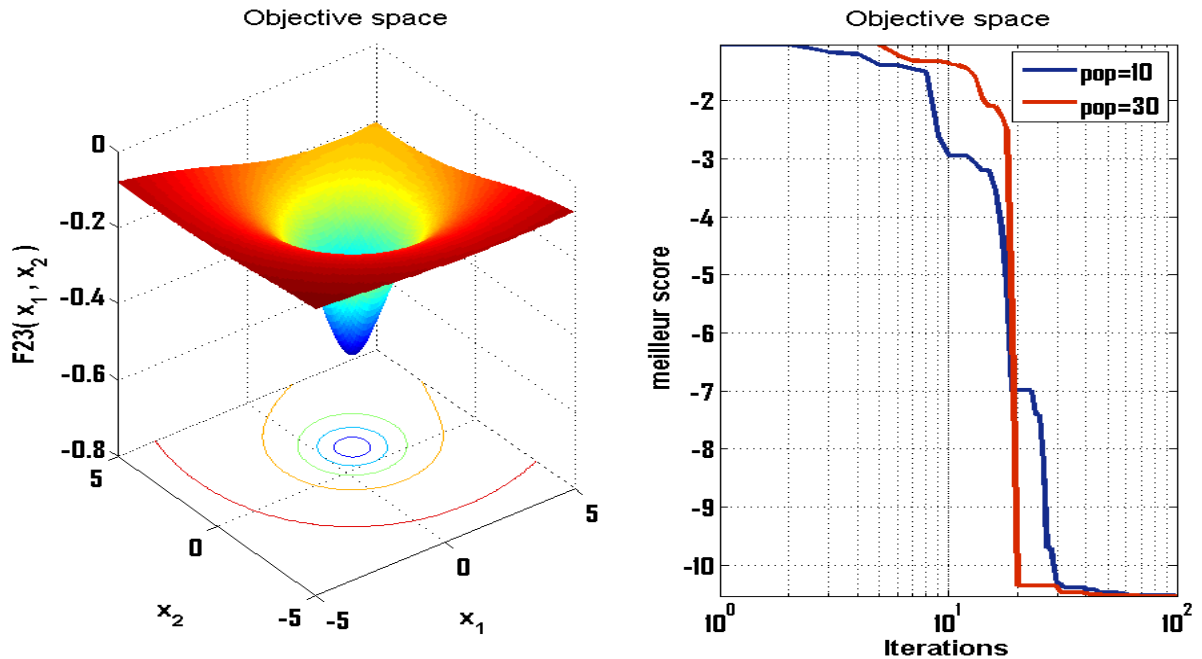


Figure 4-10: Convergence de la fonction multimodale F23 par application de la méthode NGO: $\{\text{It max}=100, \text{Pop}=10 \text{ et } 30\}$

Remarque :

- Pour la minimisation de la fonction multimodal F23 et pour $\text{Pop} = 30$: la courbe de convergence présentée dans la figure 4-9 montre une convergence plus rapide et plus efficace. L'algorithme atteint une valeur de fonction plus faible, ce qui indique qu'il a su éviter les pièges des nombreux minima locaux typiques d'une fonction multimodale et explorer efficacement l'espace de recherche.
- $\text{Pop} = 10$: La convergence est plus lente et moins performante, la courbe s'approchant d'une solution moins optimale. Cela peut être dû à une diversité limitée dans la population, rendant l'algorithme plus vulnérable à la stagnation dans des solutions locales

Test 2 :

Ce deuxième test consiste à fixer le nombre d'itération maximale à 500 et de faire varier la population. Les paramètres utilisés pour l'algorithme NGO sont les suivants :

- Nombre population : 10 et 30 ;
- Nombre maximal d'itérations : 500 ;
- Nombre maximal d'exécutions : 30 ;
- Application sur les fonctions unimodales F1 et F2 ainsi que sur les fonctions multimodales F13 et F23 (ces fonctions sont détaillées dans les annexes.

Le Tableau 9 récapitule les résultats de minimisation de des fonctions F1, F2, F13 et F23.

Fonction objective			F1	F2	F13	F23
Nombre de membres de la population	10	Best	6.8370e-83	7.8761e-45	1.5510	-10.5364
		Mean	1.7486e-82	1.1894e-44	1.5528	-10.5364
		Max	2.5041e-82	1.5270e-44	1.5533	-10.5364
	30	Best	7.1073e-90	6.1338e-46	0.0016	-10.5364
		Mean	1.7559e-89	1.1646e-45	0.0019	-5.5434
		Max	3.2769e-89	1.5791e-45	0.0024	-2.4217

Tableau 9: Résultat de validation de la méthode NGO : Minimisation des fonctions :

F1, F2, F13 et F23

La méthode NGO est plus performante avec 30 membres pour F1, F2 et F13, mais plus stable avec 10 membres pour F23.

Ces figures 10,11,12, et13 illustrent la performance de convergence de la méthode NGO appliquée à la fonction F1, F2, F13, F23 avec deux tailles de population différentes (10 et 30 individus), sur un total de 500 itérations.

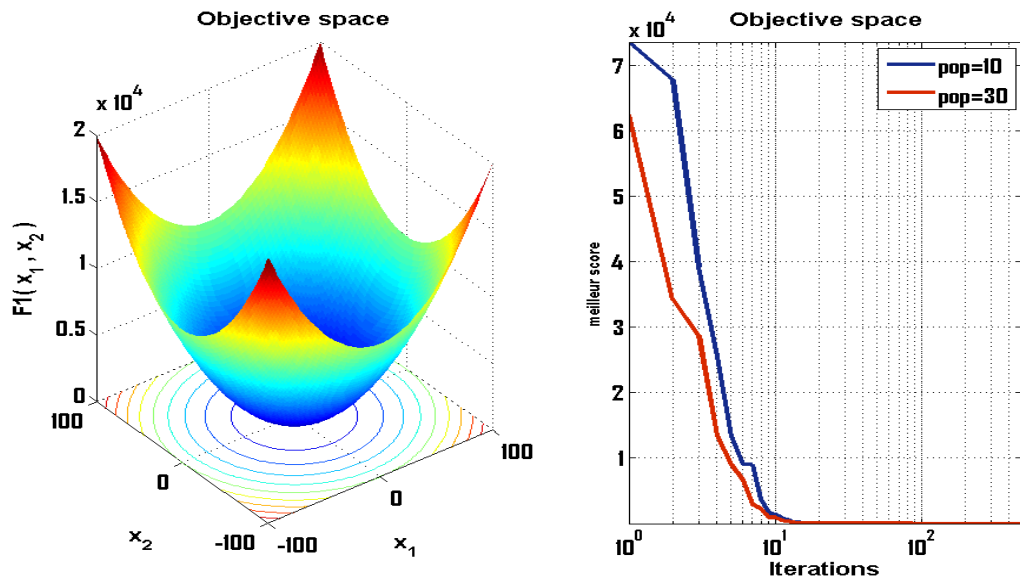


Figure 4-11: Convergence de la fonction unimodale F1 par application la méthode NGO: {It max=500, Pop=10 et 30=}

Remarque :

- Pour la minimisation de la fonction unimodales F1 et Pour Pop = 30, la courbe de convergence présentée dans la figure 4-10 montre une convergence plus rapide vers une valeur minimale. La courbe descend rapidement, ce qui signifie que l'algorithme trouve une solution optimale en moins d'itérations.
- Pour Pop = 10, la courbe est moins abrupte, ce qui indique une convergence plus lente. La méthode semble atteindre une solution moins précise ou stagner avant d'atteindre l'optimum.

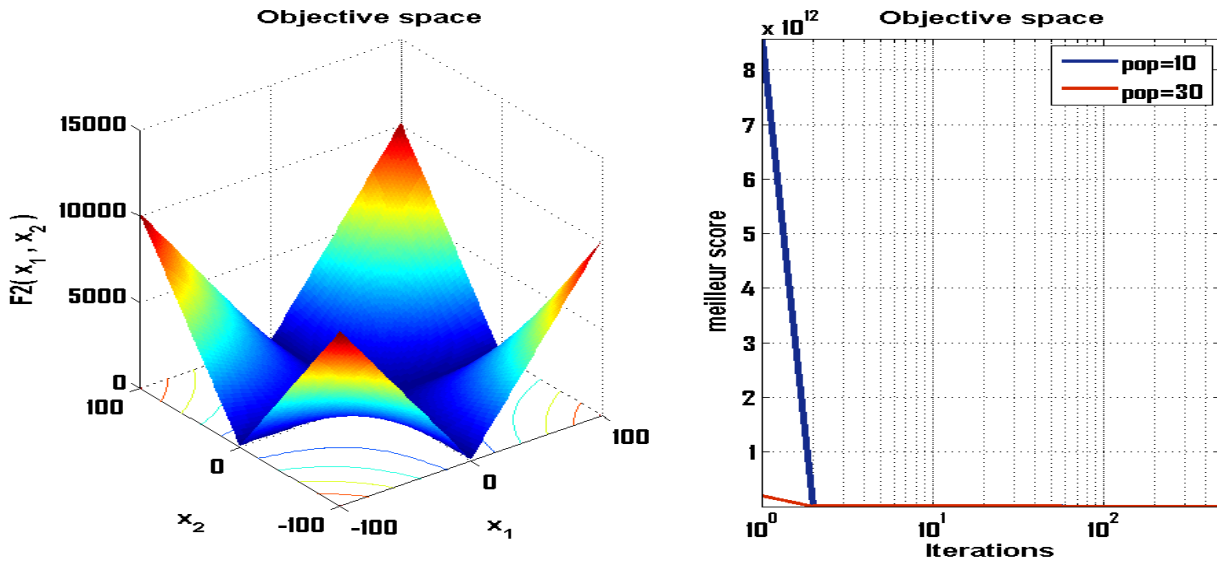


Figure 4-12: Convergence de la fonction unimodal F2 par application la méthode NGO: $\{It_{max}=500, Pop=10 \text{ et } 30=\}$

Remarque :

- Pour la minimisation de la fonction unimodales F2 et Pour Pop = 30, la courbe de convergence présentée dans la figure 4- 11montre une convergence rapide et fluide vers une valeur minimale. Cela indique que la méthode parvient à atteindre une solution optimale plus efficacement.
- Pour Pop = 10, la convergence est plus lente et semble stagner à une valeur supérieure, ce qui traduit une moindre capacité d'exploration de l'espace de recherche.

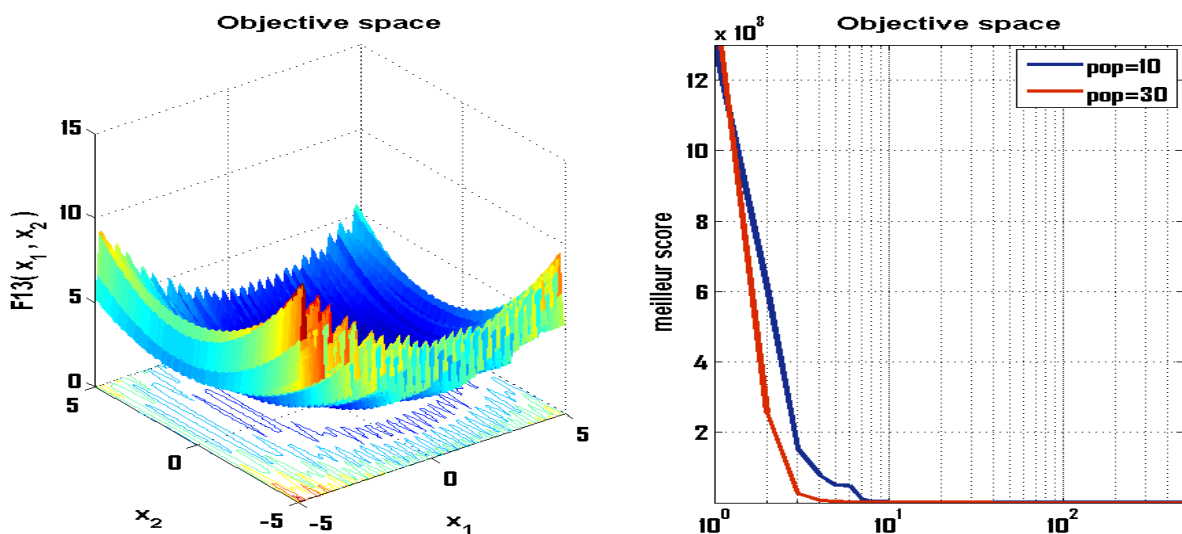


Figure 4-13 : Convergence de la fonction multimodale F13 par application la méthode NGO: $\{It_{max}=500, Pop=10 \text{ et } 30=\}$

Remarque :

- Pour la minimisation de la fonction multimodal F13 et pour Pop = 30 : la courbe de convergence présentée dans la figure 4-12 montre une convergence plus rapidement vers une valeur minimale et parvient à éviter les pièges des minima locaux, ce qui est crucial pour les fonctions multimodales.
- Pour Pop = 10, la courbe montre une convergence plus lente et un risque de stagnation dans un minimum local, avec une solution finale moins optimale

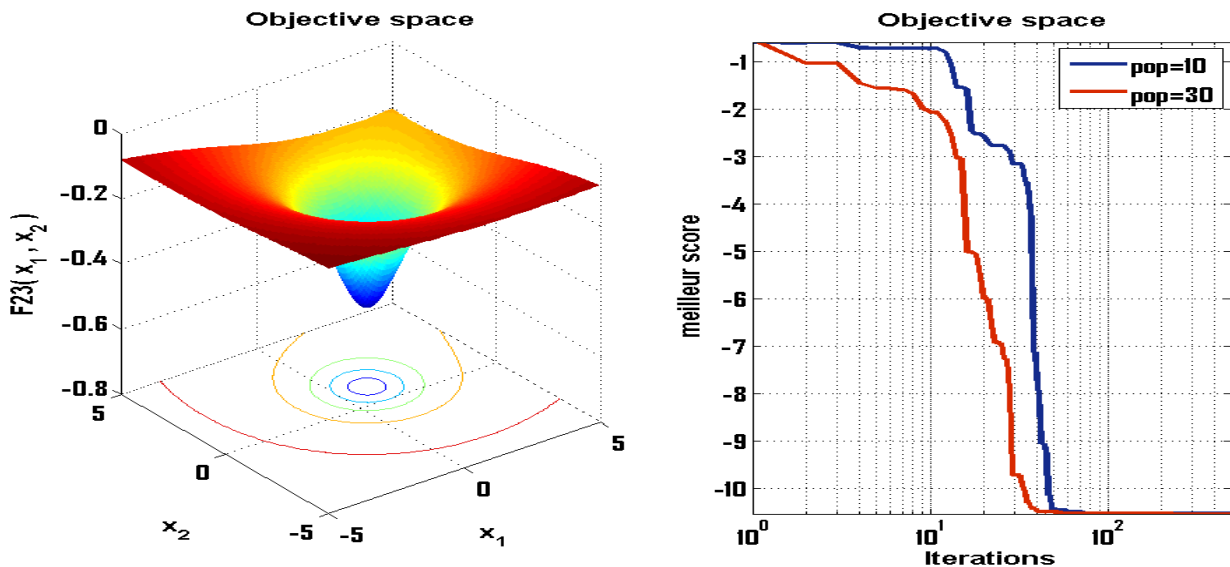


Figure 4-14: Convergence de la fonction multimodale F23 par application la méthode NGO: {It max=500, Pop=10 et 30=}

Remarque :

- Pour la minimisation de la fonction multimodal F23 et pour Pop = 30 : la courbe de convergence présentée dans la figure 4-13 montre une convergence une converger rapidement vers une valeur minimale et la méthode montre à meilleure capacité. La courbe est plus abrupte et plus stable, indiquant une meilleure performance globale.
- Pour Pop = 10, la convergence est plus lente, et la méthode semble stagner à un niveau plus élevé, ce qui peut signifier qu'elle est restée piégée dans un minimum local.

4.5.2 Interprétation globale :

À partir des résultats préliminaires obtenus lors de l'optimisation de certaines fonctions mathématiques, il apparaît que la méthode NGO parvient à localiser l'optimum global des fonctions F1, F2, F13 et F23 avec une population minimale de 30 et un nombre maximal de

500 générations. Cette analyse permet de définir les paramètres standards de l'algorithme, en vue de son application à la résolution du problème de dispatching économique environnemental.

4.6 Optimisation du Dispatching économique avec intégration des sources renouvelables :

Analyse 2 :

Cette deuxième analyse est consacrée à résoudre le problème de dispatching économique avec considération l'intégration de deux fermes éoliennes. L'objectif est de voir l'impact d'intégrer des sources éoliennes sur le coût de production et l'émission de gaz. La fonction objective principale considère est la minimisation du coût de production associées aux sources à base d'énergie fossiles et les sources renouvelables ou considérant le coût engendré par l'émission de gaz. Le schéma représente du problème de dispatching économique est présenté sur la figure 4-14. Le Tableau 10 représente les caractéristiques techniques des sources éoliennes. La figure 4-15 montre la distribution des vitesses de la ferme éolienne installée au jeu de barres 5 et 11. La figure 4-16 révèle la distribution de Weibull du parc éolien implanté aux jeux de barres 5 et 11.

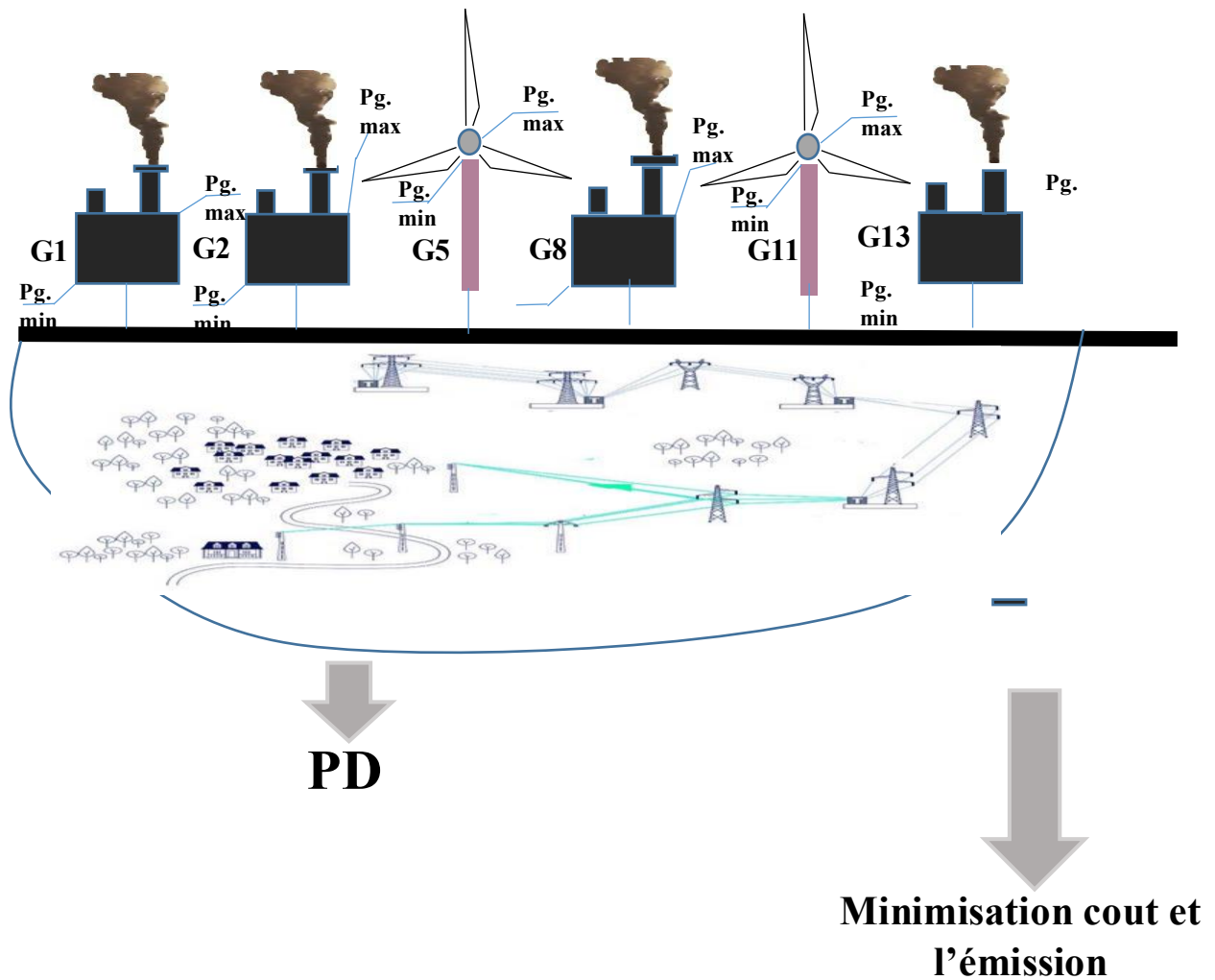
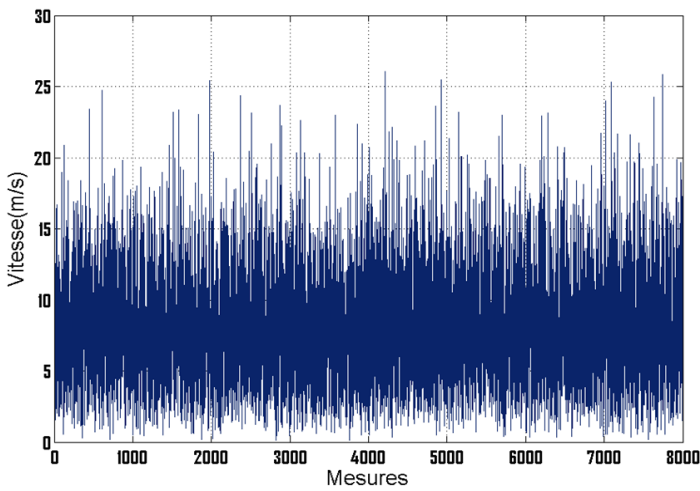


Figure 4-15: Stratégie de dispatching économiques environnementale avec intégration des sources renouvelables

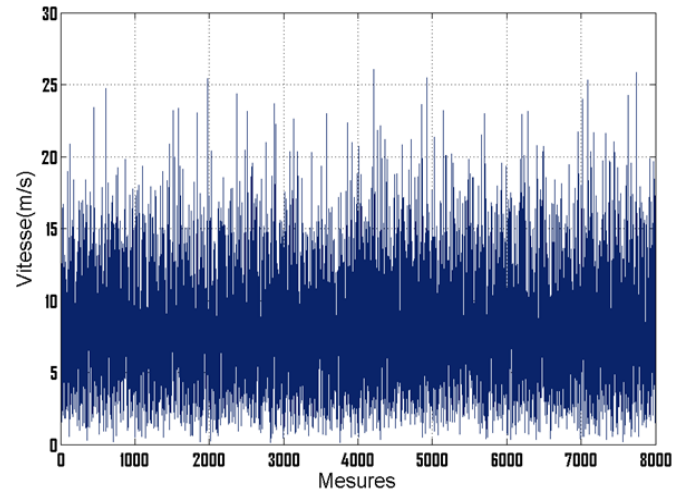
La présente section est consacrée à la résolution du problème de dispatching économique, en considérant l'intégration de deux parcs éoliens localisés aux jeux de barres 5 et 11.

Désignation des fermes éoliens	N° de turbines	Puissance maximale $P_{wr}(MW)$	Paramètres de Weibull		Coefficients de coût (\$/MWh)		
			α	β	Direct, g_w	Reserve, K_{Rw}	Pénalité, K_{Pw}
W.G_5	25	75	9	2	1,60	3,0	1,50
W.G_11	20	60	10	2	1,75	3,0	1,50

Tableau 10: Paramètres PDF et coefficients couts liés aux deux fermes éoliennes (JB5- JB11).

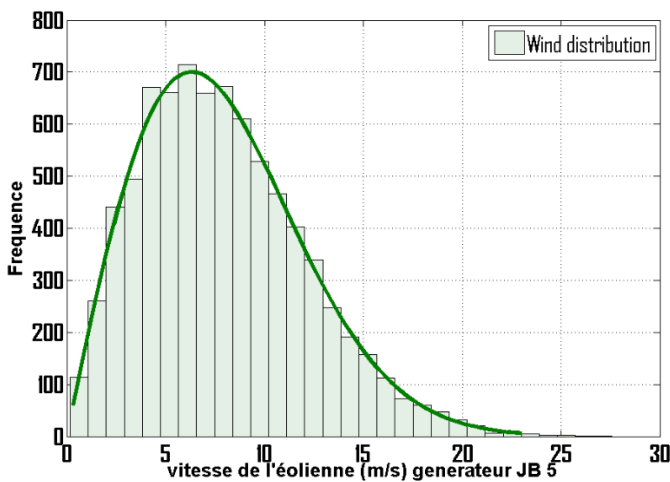


Jeu de barres 5

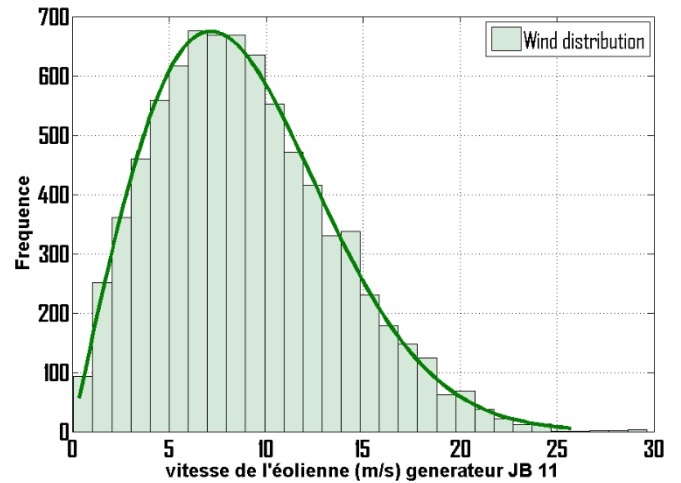


Jeu de barres 11

Figure 4-16: Analyse de la distribution des vitesses de vent des fermes éoliennes connectées aux jeux de barres 5 et 11.



Jeu de barres 5



Jeu de barres 11

Figure 4-17: Distribution de Weibull de deux fermes éoliennes installées aux jeux de barres 5et 11.

4.6.1 Caractéristiques de l'éolienne :

Les figures 17,18 illustrant la variation des coûts en fonction de la puissance générée pour les fermes éoliennes situées aux jeux de barres (JB5) et (JB11) permettent d'apprécier le comportement économique des générateurs éoliens dans différentes conditions de vent et de fonctionnement.

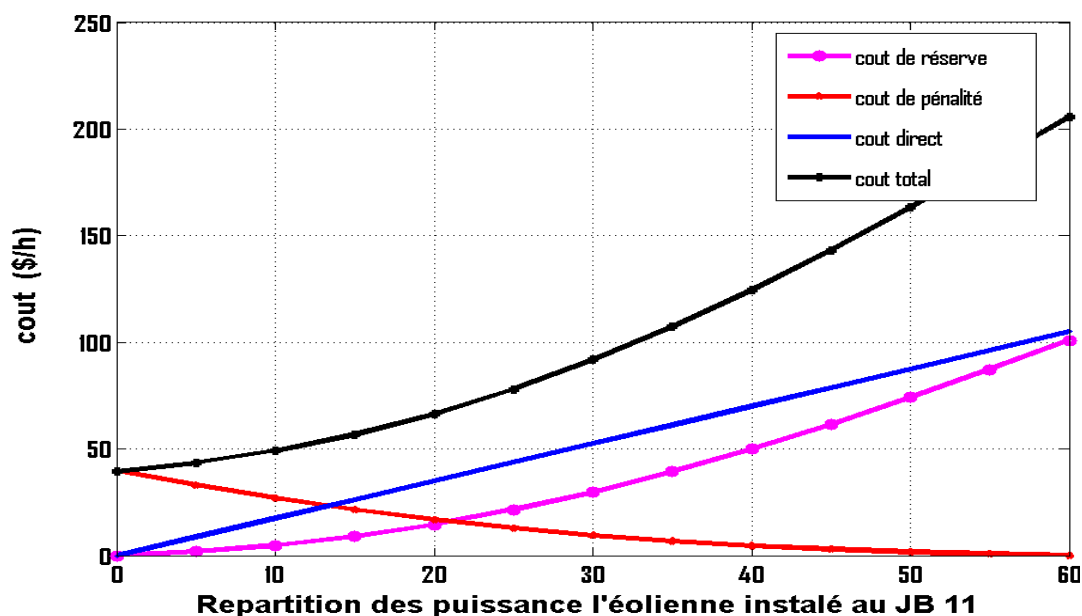


Figure 4-17 : Caractéristiques de variation des coûts de l'éolienne en fonction de la puissance générée

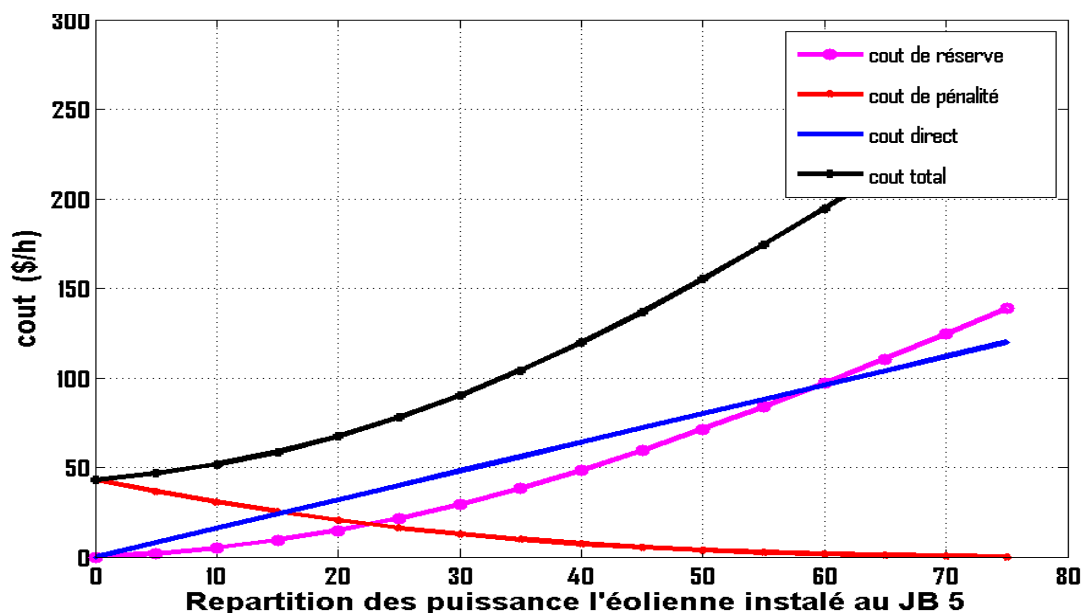


Figure 4-18: Caractéristiques de variation des coûts de l'éolienne en fonction de la puissance générée : ferme éolienne installée au jeu de barres JB11.

4.6.2 Interprétation :

Les graphiques présentés mettent en évidence la variation des coûts associés à l'énergie éolienne en fonction de la puissance générée par l'intégration des sources éoliennes aux jeux de barres 5 et 11.

- **Le coût de réserve :** augmente progressivement avec la puissance éolienne installée, car une capacité éolienne plus élevée nécessite davantage de réserves pour compenser l'intermittence.
- **Le coût de pénalité :** diminue d'abord puis se stabilise, car une capacité éolienne accrue réduit le recours aux pénalités pour compenser les défaillances de production.
- **Le coût direct :** augmente linéairement avec la puissance installée en raison des coûts d'exploitation et de maintenance plus élevés.
- **Le coût total :** est la somme des coûts précédents et augmente de manière non linéaire en raison de la combinaison des différentes composantes.

4.6.3 Minimisation du cout global par la méthode NGO avec considérant l'intégration de l'énergie éolienne :

4.6.3.1 Étapes de l'algorithme NGO :

1. initialisation :

- Générer une population initiale de M solutions candidates (autours) $X = \{X_1, X_2, \dots, X_M\}$,

Où chaque $X_j = [P_{1,j}, P_{2,j}, \dots, P_{N,j}]$, Représente une répartition da puissance respectant les limites de génération.

- Évaluer le fitness de cheque solution X_j en calculant le coût total de production $F_T(X_j) = \sum_{i=1}^N F_i(P_{i,j})$.

2. Phase d'exploration (identification et attaque de la proie) :

- Pour chaque autour X_j :
- Sélectionner aléatoirement une proie $X_k (k \neq j)$.
- Mise à jour de la position :
- Si $F_T(X_k) < F_T(X_j)$: $X_{j,new} = X_j + r \cdot 1 \times (X_k - X_j)$

- Si $F_T(X_k) \geq F_T(X_j)$: $X_{j,new} = X_j - r_1 \times (X_k - X_j)$ où r_1 , est un nombre aléatoire dans $[0, 1]$.
- Gestion des contraintes : Ajuster $X_{j,new}$ pour respecter les limites de génération et le bilan de puissance (par exemple, en utilisant des facteurs d'échelle ou des méthodes de réparation).
- **Évaluer** $F_T(X_{j,new})$
- Sélection gourmande : Si $F_T(X_{j,new}) < F_T(X_j)$ alors $X_j = X_{j,new}$

3. Phase d'exploitation (Poursuite et chasse) :

- Pour chaque autour X_j :
- Identifier la meilleure solution actuelle X_{best} .
- Mise à jour de la position: $X_{j,new} = X_j + r_2 \times (X_{best} - X_j)$ ou r_2 est un nombre aléatoire dans $[0, d]$, et d est un facteur de diminution au fil des itérations (simulant la diminution de la portée de la chasse).
- Gestion des contraintes : Ajuster $X_{j,new}$ se pour respecter les limites de génération et le bilan de puissance.
- Évaluer $F_T(X_{j,new})$
- Sélection gourmande: Si $F_T(X_{j,new}) < F_T(X_j)$ alors $X_j = X_{j,new}$.

4. Condition de terminaison: Répéter les étapes 2 et 3 jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit satisfait (nombre maximal d'itérations, seuil de fitness atteint, etc.).

5.Sortie :la meilleure Solution X_{best} trouvée représente la répartition de puissance optimale ou quasi-optimale.

A. Cas d'étude 1 : Ce premier cas d'étude consiste à optimiser la fonction cout globale avec considération l'intégration des deux fermes éoliennes. Les paramètres de l'algorithme sont (pop=10, Itmax=100). Les résultats d'optimisation en termes de cout globale, cout engendre par les fermes éoliennes, ainsi que les puissances générées optimisées sont récapitulées dans le Tableau 11, la courbe de convergence est présentée dans la figure 4-19.

VC	Run 1	Run2	Run3	Run4	Run5	Run6	Run7	Run8	Run9	Run10
Pgt1	141.8531	141.8531	141.8391	135.9863	139.6450	135.6748	141.8531	141.5279	137.1117	141.3622
Pgt2	39.3509	43.7435	43.7379	42.2072	43.7434	42.1464	43.7435	43.0280	42.5179	42.7424
Pgw5	39.6066	34.1201	34.1431	44.1077	37.9421	44.0276	46.1209	40.0247	44.5145	45.8324
Pgt8	12.0003	12.0003	12.0000	11.8695	10.3809	11.8658	12.0003	11.9894	11.7329	10.7657
Pgw11	36.5065	37.5206	37.5184	35.2759	37.5205	35.6695	25.5201	32.7262	33.6556	29.6797
Pgt13	14.0826	14.1616	14.1615	13.9519	14.1615	14.0162	14.1616	14.1038	13.8649	13.0157
Cglobal(\$/h)	915.1639	918.9491	917.7341	910.8499	922.8124	908.6748	921.3537	915.8915	913.9091	918.4280
CWind(\$/h)	230.8181	217.3627	217.4221	241.8753	228.9612	242.9034	220.1476	219.8440	238.0271	230.5478
Cwd(\$/h)	127.2570	120.2532	120.2862	132.3051	126.3682	132.8658	118.4535	121.3104	130.1205	125.2714
Cwov(\$/h)	90.0304	81.2569	81.2953	97.3069	88.7344	97.9321	84.3135	83.3165	94.9843	90.5730
Cwun(\$/h)	13.5307	15.8526	15.8406	12.2633	13.8585	12.1056	17.3805	15.2171	12.9222	14.7035
Em (ton/h°)	0.2257	0.2254	0.2253	0.2164	0.2222	0.2159	0.2254	0.2249	0.2181	0.2252

Tableau 11: Résultat de validation de la méthode NGO avec l'intégration de l'énergie éolienne.

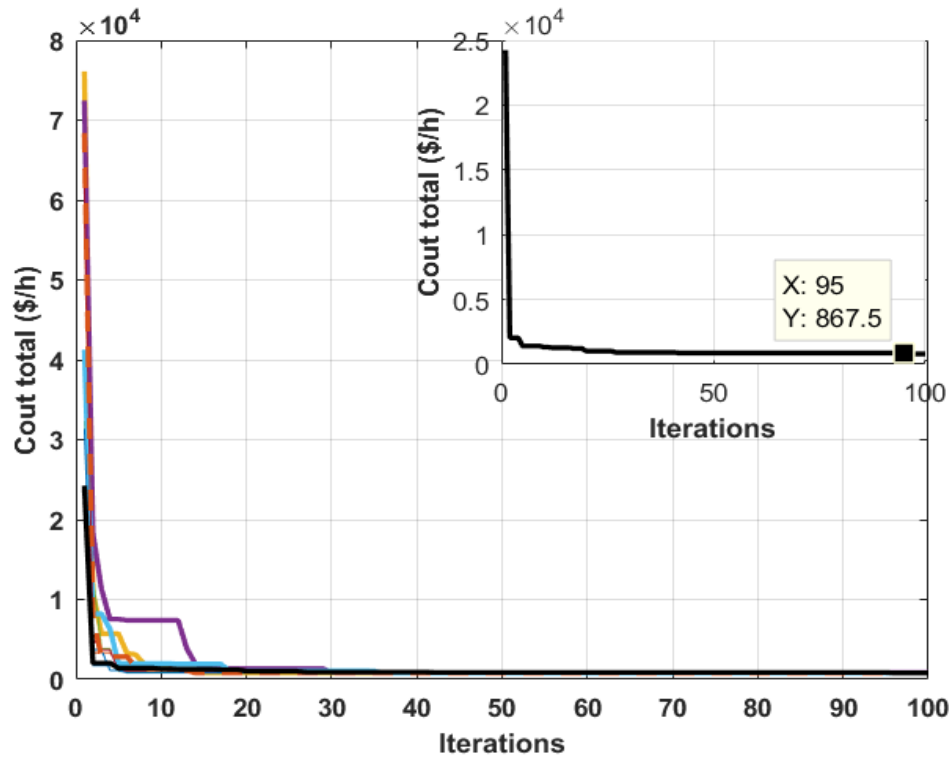


Figure 4-19 : Caractéristique de convergence de NGO avec l'intégration de deux fermes éoliennes :
{Itmax=100, Pop=10}

B. Cas d'étude 2 :

Ce deuxième cas d'étude consiste à optimiser la fonction cout globale avec considération l'intégration des deux fermes éoliennes. Les paramètres de l'algorithme sont (pop=30, Itmax=50). Les résultats d'optimisation en termes de cout globale, cout engendre par les fermes éoliennes, ainsi que les puissances générées optimisées sont recapitulées dans le Tableau12, la courbe de convergence est présentée dans la figure 4-20.

VC	Run 1	Run2	Run3	Run4	Run5	Run6	Run7	Run8	Run9	Run10
Pgt1	137.5648	141.2348	136.1172	141.8443	139.9986	141.7699	137.8877	137.0451	138.5307	135.8290
Pgt2	40.4683	35.3523	43.7263	32.8275	43.1525	43.6661	43.5762	40.8645	42.9284	41.8240
Pgw5	45.6207	45.2628	40.8913	46.0992	45.5158	44.0023	45.7656	44.9936	45.2953	44.0943
Pgt8	10.3163	11.9323	12.0000	11.9992	11.8507	11.9990	11.9839	11.5861	11.1460	11.8321
Pgw11	35.6758	35.4914	36.6445	37.5172	28.8960	27.8059	30.0492	34.7866	31.3433	35.8718
Pgt13	13.7542	14.1262	14.0208	13.1126	13.9864	14.1567	14.1374	14.1241	14.1562	13.9488
Cglobal(\$/h)	909.5172	914.2100	909.1378	914.4509	915.6129	918.4764	912.9009	909.7236	912.5092	908.3293
CWind(\$/h)	248.5430	246.6564	235.5064	256.5076	227.1611	218.7668	231.3890	243.3768	233.5777	243.8123
Cwd(\$/h)	135.4256	134.5306	129.5538	139.4137	123.3934	119.0640	125.8110	132.8663	127.3233	133.3266
Cwov(\$/h)	101.5845	100.3814	93.0473	106.5555	88.4669	83.1532	91.0766	98.3304	92.3514	98.4998
Cwun(\$/h)	11.5329	11.7445	12.9053	10.5384	15.3009	16.5495	14.5014	12.1801	13.9030	11.9859
Em (ton/h)	0.2785	0.2845	0.2761	0.2857	0.2832	0.2863	0.2795	0.2776	0.2805	0.2755

Tableau 12: Résultat de validation de la méthode NGO avec l'intégration de de deux fermes éoliennes.

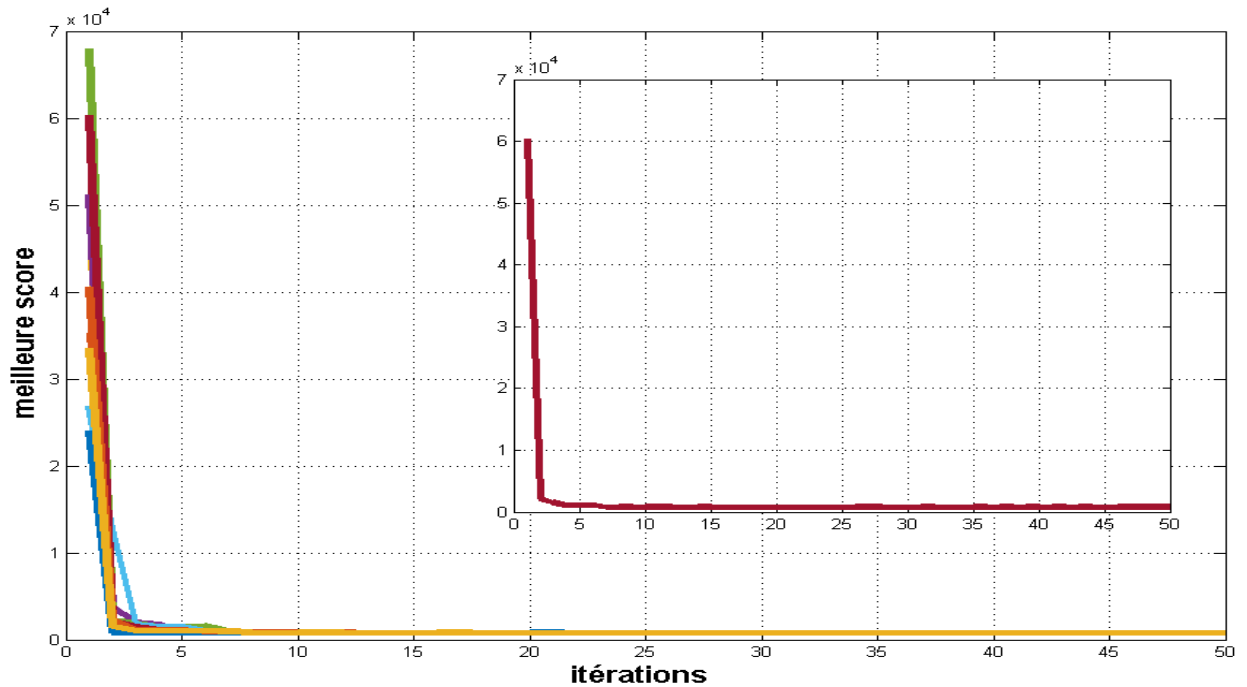


Figure 4-20: Caractéristique de convergence de NGO avec l'intégration de deux fermes éoliennes .

4.6.4 Interprétation :

- Pour le cas d'étude 1, et pour une faible population, l'algorithme NGO optimise la fonction cout avec un temps réduit, la valeur du cout total achevé est de 910.8499 \$/h qui est compétitive, mais Il faut noter que la contrainte d'égalité qui représente l'équilibre entre la puissance demandée est la somme des puissances générées est vérifier avec une précision faible de l'ordre de 10^{-3} .
- Dans le cas d'étude 2, les résultats obtenus se distinguent par une stabilité notable entre les différentes exécutions, soulignant la robustesse de l'algorithme. Le coût total oscille entre 908 \$/h et 918 \$/h, la meilleure performance étant observée lors de l'exécution 10 (908.3293 \$/h), ce qui représente un bon compromis à ce stade. De plus, les émissions demeurent faibles, variant de 0.2755 ton/h à 0.2857 ton/h, un avantage environnemental significatif comparé au cas sans intégration.
- Il est notable que la valeur décroît rapidement au cours des cinq premières itérations, ce qui signifie que l'algorithme converge promptement vers une solution optimale ou quasi optimale. La stabilisation des courbes observée après environ cinq itérations suggère l'absence d'améliorations significatives ultérieures, reflétant ainsi la bonne stabilité et la performance de l'algorithme dans le cadre de l'intégration de l'énergie éolienne.

4.7 Minimisation du cout total par application de la méthode AG avec intégration de l'énergie éolienne :

L'analyse des 10 simulations de l'algorithme d'optimisation, dont les résultats sont présentés dans le tableau 13, révèle qu'en minimisant le coût de combustible pour la production d'électricité tout en considérant l'effet de valve et l'intégration éolienne, un coût optimal de 810.8740 (\$/h) est atteint, générant une émission de gaz de 0.2134 (tonne/h).

VC	Run 1	Run2	Run3	Run4	Run5	Run6	Run7	Run8	Run9	Run10
Pgt1	135.4391	136.3596	137.7647	136.3130	133.0658	134.9124	134.9308	137.9760	135.6716	131.9820
Pgt2	50.9047	51.7800	56.0863	54.9978	48.4805	49.0470	51.2956	52.0889	54.4820	54.4963
Pgw5	38.9510	35.3347	34.7589	36.3747	39.8601	36.1278	36.8302	33.5454	36.5531	36.2876
Pgt8	17.7520	19.6159	14.8490	19.7332	20.8338	20.9548	18.2331	17.6358	21.3511	24.7438
Pgw11	20.5946	16.6360	14.9984	14.8828	20.3249	16.2354	16.3350	17.8827	16.2702	19.8514
Pgt13	19.7587	23.6737	24.9428	21.0985	20.8349	26.1226	25.7754	24.2711	19.0719	16.0389
Cglobal(\$/h)	928.3800	941.9459	947.4772	942.7626	930.5056	943.7094	942.1376	942.5132	938.2426	932.4273
Ctotv (\$/h)	810.8740	823.9318	827.5472	824.5873	815.2881	827.0015	825.1252	822.9464	820.6597	817.7634
CWind(\$/h)	183.9808	164.7841	160.1544	164.8148	186.3389	166.4426	168.7753	161.9027	167.8050	173.7407
Cwd(\$/h)	98.3621	85.6485	81.8614	84.2445	99.3448	86.2164	87.5145	84.9674	86.9578	92.5267
Cwov(\$/h)	61.5012	49.6043	46.8291	49.8476	63.0577	50.7238	52.2156	47.5948	51.5980	55.0041
Cwun(\$/h)	24.1174	29.5313	31.4638	30.7227	23.9364	29.5023	29.0453	29.3405	29.2492	26.2099
Em (ton/h)	0.2134	0.2143	0.2178	0.2146	0.2092	0.2119	0.2125	0.2171	0.2135	0.2082

Tableau 13: résultats de minimisation de cout de combustible : fonction cout à l'effet de valve avec l'intégration de l'Energie renouvelable (éolienne) {Itmax=100, Pop=10}

4.7.1 Interopération :

Ce test cherche à minimiser le coût global de production d'électricité par l'intégration de l'éolien et. Il en résulte un coût global de 928.3800 \$/h et des émissions de 0,2134 ton/h. L'algorithme génétique utilisé optimise la distribution de la production entre les sources thermiques et éoliennes, fournissant plusieurs solutions performantes qui satisfont les contraintes techniques.

4.7.2 Etude comparative :

La présente section a pour but d'effectuer une comparaison des résultats de l'algorithme génétique (AG) dans deux configurations : sans et avec l'intégration de sources éoliennes. L'objectif principal est d'analyser l'effet de cette intégration sur le coût global et le niveau d'émission de gaz. Le Tableau 14 présente une récapitulation des résultats obtenus à l'aide de l'algorithme génétique pour la minimisation du coût total dans ces deux cas, en détaillant la production des générateurs et les coûts correspondants.

Générateur	Sans l'intégration de l'énergie renouvelable	Avec l'intégration de l'énergie renouvelable
Pgt1(MW)	170.9105	135.4391
Pgt2(MW)	50.0377	50.9047
Pgw5(MW)	21.2621	38.9510
Pgt8(MW)	13.8885	17.7520
Pgw11(MW)	11.5064	20.5946
Pgt13(MW)	15.7949	19.7587
Cout de l'effet de valve (\$/ton)	810.9662	810.8740
Émission (ton/h)	0.3535	0.2134
Cout global(\$/h)	1005.6	928.3800
Taux d'intégration %	/	21.04%

Tableau 14:Etude comparative : optimisation du cout total sans et avec intégration des sources éoliennes.

4.7.3 Interprétation :

L'intégration de deux sources d'énergie éolienne se traduit par une diminution notable du coût global, atteignant un niveau compétitif de 928,3800 \$/h. Ce chiffre contraste avantageusement avec le coût de 1005,6 \$/h observé en l'absence d'intégration. Parallèlement, les émissions de gaz connaissent une baisse significative, passant de 0,3535 tonne/h à seulement 0,2134 ton/h grâce à cette intégration. Le taux d'intégration des sources éoliennes pour cette configuration spécifique s'établit à 21,04%. D'un point de vue pratique, il est crucial d'évaluer le taux d'intégration des énergies renouvelables en considérant attentivement l'état du réseau électrique, et en particulier sa stabilité transitoire.

4.7.4 Comparaison des résultats d'optimisation entre AG et NGO :

Cette section compare l'algorithme génétique et l'algorithme NGO en évaluant la qualité de leurs solutions et leur convergence. Le tableau 15 présente une comparaison des performances de l'algorithme génétique (AG) et de la méthode NGO en termes de production électrique et de coûts associés, détaillant la puissance générée par différents groupes et les coûts totaux et globaux.

Générateur	Résultats de AG	Résultats de NGO
Pgt1(MW)	135.4391	135.9863
Pgt2(MW)	50.9047	42.2072
Pgw5(MW)	38.9510	44.1077
Pgt8(MW)	17.7520	11.8695
Pgw11(MW)	20.5946	35.2759
Pgt13(MW)	19.7587	13.9519
Cout global(\$/h)	928.3800	910.8499
Émission (ton/h)	0.2134	0.2164
Taux d'intégration %	21.04%	28.05%

Tableau 15 : Comparaison des performances : algorithme génétique (AG) versus méthode NGO suite à l'intégration de l'éolien {Itmax=100, Pop=10}.

4.7.5 Interprétation :

- La méthode NGO est plus performante que l'algorithme génétique (AG), avec un coût global plus bas 910.8499 \$/h, mais l'AG réduit légèrement les émissions (0.2134 ton/h contre 0.2164 ton/h).
- Le taux d'intégration des énergies renouvelables est de 28.05 % achevé par l'application de l'algorithme NGO, contre 21.04 % achevé par utilisation de AG.

Il faut noter que les contraintes d'égalités et d'inégalités sont vérifiées

4.8 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons appliqué deux techniques d'optimisation, à savoir l'algorithme génétique et l'algorithme NGO, afin de minimiser deux fonctions objectives : le coût global et les émissions de gaz. Deux fermes éoliennes ont été intégrées à deux jeux de barres 5 et 11 dans le but de réduire le coût global dû à l'effet de valve, le coût généré par les fermes éoliennes, et le coût supplémentaire engendré par les émissions de gaz. Les résultats obtenus confirment clairement l'efficacité de l'algorithme NGO en termes de qualité de solution et de vitesse de convergence.

Conclusion

générale.

Conclusion générale :

Le dispatching économique environnemental constitue un enjeu crucial pour les systèmes électriques modernes, appelés à concilier fiabilité, efficacité économique et respect des contraintes environnementales. À travers cette étude, nous avons présenté une formulation rigoureuse du problème de dispatching, intégrant des fonctions objectives complexes, comme la minimisation des coûts de production, la prise en compte des effets de valve, ainsi que la réduction des émissions polluantes. L'intégration des sources renouvelables, notamment l'énergie éolienne, accentue cette complexité, du fait de l'intermittence et de l'incertitude de la production.

Pour répondre à ces défis, nous avons exploré et appliqué deux approches d'optimisation métaheuristiques : l'algorithme génétique (AG) et l'algorithme inspiré du comportement de l'autour des palombes (NGO). Ces deux méthodes ont montré leur capacité à trouver des solutions optimales ou quasi-optimales dans des espaces de recherche complexes et non convexes. L'algorithme génétique a démontré sa robustesse à travers la diversité de ses opérateurs (sélection, croisement, mutation) et sa performance sur des fonctions objectives non linéaires. L'algorithme NGO, quant à lui, a révélé un excellent potentiel de convergence, notamment dans les problèmes multi-modaux et en présence d'incertitudes, grâce à son mécanisme de recherche inspiré de la chasse.

Les résultats obtenus ont mis en évidence des réductions significatives des coûts de production et des émissions de gaz, tant dans les scénarios classiques que dans ceux intégrant des sources renouvelables. L'analyse comparative montre que l'algorithme NGO est particulièrement performant avec une taille de population adéquate et un nombre suffisant d'itérations, lui permettant d'éviter les minima locaux. Ainsi, cette étude confirme l'intérêt stratégique des méthodes métaheuristiques pour résoudre des problèmes énergétiques complexes. Ces techniques, en perpétuelle évolution, constituent un levier puissant pour améliorer l'efficacité des systèmes électriques intelligents, intégrant des énergies renouvelables dans un cadre de transition énergétique durable.

En guise de perspective, nous envisageons d'étendre cette étude en adoptant une approche prometteuse basée sur l'optimisation multi-objectifs. L'objectif sera de minimiser le coût global du système tout en assurant une intégration optimale des systèmes photovoltaïques en synergie avec les sources éoliennes. Cette stratégie vise à accroître la flexibilité, la durabilité et la rentabilité des réseaux énergétiques hybrides.

Références

Références :

- [1] Mohamed okba ‘ l’obtention du diplôme de Master en réseaux électrique Dispatching économique dynamique des réseaux électriques par les méthodes métha-heuristique’.University Mohamed Khider Biskra. .Mémoire De Master .2013.
- [2] Mostefa Hamed, Dispatching Economique Dynamique par Utilisation de Méthodes d’Optimisation globales ‘. Université De Biskra .Thèse De Doctorat. 2013
- [3] Benamor Abdelmonaim – Hamza Mouadh.’ Planification du réseau de distribution (30kV) des zones agricoles de la région de Tolga (Ourel)’. Université Mohamed Khider.Memoire De Master. Biskra . 2020
- [4] Djebblahi Zahia, Touti Fatima Zohra, Planification optimale du réseau de transport électrique algérien par les méthodes méta heuristiques, mémoire Master, Université de Biskra 2020.
- [5] Kazouz Mohammed ,Lamine Henine et Nadjat et Lamri Merwane.’ Simulation et étude de l’coulement de puissnce optimal dans un reseau electrique avec l’integration des sources a energier renouvelable, application sur le reseau electrique algérien’. Université De Salhi Ahmed Naama . Memoire De Master 2021.
- [6] Merahi Amir Polycopié Cours UEF - ELTF 214 intitulé Analyse des réseaux de transport et de distribution .2019
- [7]<https://youmatter.world/fr/definition/energies-fossiles-definition-exemples-histoire-reserves/>
- [8] www.futura-sciences.com
- [9] Maafa_cours st énergie et environnement_ fac.umc.edu .dz.
- [10] Mahdad Belkacem Cours et exercices corrigés Dispatching Economique par Matlab 1ère partie : Méthodes mathématiques .
- [11] Raghdhi Mostafa Solving various optimal power management problems using Pelican Optimizer Sciences and Technologies Electrical Engineering Electrical Networks (Réseaux Electriques), Mohamed Khider University of Biskra ,master’s thesis, 2023.

- [12] Bessekri Rania& Belhadef Brahim, ' L'étude De Dispatching Economique par une méthode Méta-heuristique 'Université Saad Dahlab De Blida 1.Mémoire de Master.2023
- [13] Khadraoui boubaker et bengachouche azzeddine , 'Optimisation économique et environnementale des réseaux électriques par la méthode des Algorithmes Génétiques en présence d'une production photovoltaïque dans la production électrique'. Universite Kasdi Merbah Ouargla, mémoire de master'.2022
- [14] Toumi Ilham, Contribution à l'amélioration de performance d'une chaîne Énergétique hybride (éolienne/ photovoltaïque) basée sur des techniques d'intelligence artificielle, Université Kasdi Merbah Ouargla, Thèse De Doctorat .2023
- [15] Benmir Abdelkader, 'Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque en couche mince à hétérojonction : CdS/CIGS et CdS/CZTS'. Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen. Mémoire master, 2017.
- [16] Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER). (2011)
- [17] SONEGAS. (2011). Bulletin d'information – Note de la Direction Générale n°5 : Mise en service de la centrale hybride de Hassi R'Mel. Alger : Société Nationale de l'Électricité et du Gaz.
- [18] Djellad Abdelhak, Modélisation et optimisation d'un système de production d'énergie photovoltaïque-éolienne. Université de Boumerdès, Département de Génie Électrique. Mémoire de master, 2020.
- [19] Khelfat Lotfi et Maataoui Lakhdar. ' Étude et Simulation d'une éolienne à base d'une Machine Asynchrone Doublement Alimenté'. Memoire de master .juin 2017
- [20] Wood, A. J., Wollenberg, B. F., & Sheblé, G. B. (2013). Power Generation, Operation, and Control (3rd ed.). Wiley.
- [21] Nesrat Djebbari Et Soltani El Bachir, Résolution du problème de puissance active dans un réseau d'énergie utilisant les techniques métaheuristiques, Université Hamma Lakhder D'eloued, Mémoire master. 2018,
- [22] S. Hemamalini S.P. Simon Maclaurin series-based Lagrangian method for economic dispatch with valve-point effect.

- [23] Souhil Mouassa, Optimisation de l'écoulement de puissance par une méthode méta heuristiques (technique des abeilles) en présence d'une source renouvelable (éolienne) et des dispositifs FACTS, Université de Ferhat Abbas SETIF, mémoire magister 2012
- [24] Hamed Mostefa Contribution à l'optimisation multi objective Dynamique du cout et l'émission de gaz considérant les contraintes pratiques et de sécurités., Université Mohamed Kheider de Biskra, Thèse de Doctorat 2019.
- [25] Younes Hazmani - Fethi Henanou. Résolution du problème de dispatching économique par les méthodes métaheuristiques, Université Mohamed Khider Biskra, Mémoire Master 2020.
- [26] Jizhong Zhu, optimization of power system operation, second edition IEE press
- [27] Guemmou Sid Ahmed et Khenfer Samir, ' Etude d'un dispatching économique par une technique métaheuristique', Universite Kasdi Merbah Ouargla, Mémoire Master, 2021.
- [28] A. J. Wood, B. F. Wollenberg, and G. B. Sheble, Power Generation, Operation, and Control, 3rd ed., Wiley, 2013.
- [29] Mahdad, Optimizing Power Management for Wind Energy Integration with SVC Support using Hybrid Optimization, Electrical Engineering, 2024.
- [30] Berrim, Ali Dhia Eddine, Abd Alhak Megdoud. Prédiction de la tension de contournement par l'approche d'optimisation PSO, Université D'el-Oued, Mémoire Master, 2018
- [31] Sahli Zahir 'Optimal planning of reactive power in electrical networks using metaheuristics', University Ferhat Abbes Setif 1, Memoire Doctorat ,2024.
- [32] NAIMI Djemai, Cours de génie électrique, Université de Biskra, Département de Génie Électrique, 2012.
- [33] Dupont, J., Martin, A. « Étude sur l'optimisation des réseaux électriques », Quatrième Conférence Internationale sur le Génie Electrique (CIGE'10), Université de Béchar, Algérie, 2010, pp. 123–130.
- [34] Nicolas Durand. Algorithmes génétiques et autres outils d'optimisation appliqués à la gestion de trafic aérien. 2004.
- [35] Chipper Field A, Fleming P, Pohlheim H Et Fonsca C, Genetic Algorithm Toolbox User's Guide, University of Sheffield UK, article, 1994.
- [36] Aloui Lilia, Dispatching de la puissance réactive avec considération des contraintes du

- Marché d'électricité dérégulé, Université Mohamed Khider Biskra, Mémoire De Master, 2019.
- [37] Oussama Hamdi, 'Dispatching de la puissance réactive', université de Biskra, mémoire de master, 2012.
- [38] M. Dehghani, S. Hubálovský, P. Trojovský, "Northern Goshawk Optimization: A New Swarm-Based Algorithm for Solving Optimization Problems", IEEE, vol.9, 2021.
- [39] Liang, Y.; Hu, X.; Hu, G.; Dou, W. "An Enhanced Northern Goshawk Optimization Algorithm and Its Application in Practical Optimization Problems". *Mathematics* 2022, 10, 4383.
- [40] K. Deb, Multi-objective optimization using evolutionary algorithms, Wiley, 2001.