

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA
Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Electrique



Mémoire
MASTER ACADEMIQUE
Domaine : Sciences et technologies
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Réseaux électriques
Présenté par :

BENSARI Abdelouahab

BENZID Mohieddine

Thème :

**Optimisation de l'intégration de la
production décentralisée renouvelable
dans le réseau de distribution par un
algorithme métaheuristique**

M^r KHERFANE Riad Lakhdar

MCA

Président

UKM Ouargla

M^r BOUKAROURA Abdelkader

MCB

Encadreur/rapporteur

UKM Ouargla

M^r SADAOUI Fares

MCA

Examineur

UKM Ouargla

Année universitaire 2022/2023

Remerciements

Mes remerciements vont tout premièrement, à Dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage pour réaliser ce travail.

Nous tenons, avant tout, à exprimer nos profondes gratitudees à notre encadreur Dr. BOUKAROURA Abdelkader.

Nous tenons à remercier également les membres du jury pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Nous adressons aussi nos remerciements à tous nos amis et collègues surtout ceux qui nous ont apportés un soutien moral.

Enfin, nous tenons à remercier nos familles pour leurs encouragements et leurs soutiens incondionnelles et toute personne ayant contribué pour la réalisation de ce mémoire.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A mes parents que dieu les garde

A ma grand-mère

A mes oncles et leurs familles

A mon cher frère et ma chère sœur.

A mes cousins et toute la famille BENSARI

Et tous mes amis sans exception.

A toute la promotion 2023 d'électrotechnique.

A toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

BENSARI Abdelouahab

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A mes parents que dieu les garde

A ma grand-mère

A mes oncles et leurs familles

A mon cher frère et ma chère sœur.

A mes cousins et toute la famille BENZID

Et tous mes amis sans exception.

A toute la promotion 2023 d'électrotechnique.

A toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

BENZID Mohieddine

Sommaire

Liste d'abréviations et symboles

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale.....	1
Chapitre 1 : Impacts de l'intégration de la production décentralisée au réseau de distribution	
1.1. Introduction.....	3
1.2 Fonctionnement des réseaux électriques.....	3
1.2.1. Production.....	3
1.2.2. Transport.....	3
1.2.3. Distribution.....	3
1.2.4 Consommation.....	4
1.3 Production décentralisée.....	5
1.4 Impacts de L'intégration de la production décentralisée dans le réseau de distribution.....	7
1.4.1 Impact sur le sens de transit de puissance.....	7
1.4.2 Impact sur la stabilité du réseau.....	7
1.4.3 Impact sur le plan de protection.....	7
1.4.4 Impact sur l'observabilité et la contrôlabilité du système.....	8
1.4.5 Impact sur la continuité de service.....	8
1.4.6 Impact sur la qualité d'énergie.....	8
1.5 Solutions pour limiter les impacts de la production décentralisée.....	8
1.5.1 Renforcement du réseau.....	8
1.5.2 Optimisation de la planification de la production décentralisée.....	8
1.6 Conclusion.....	9
Chapitre 2 : Intégration optimale de la production décentralisée au réseau de distribution	
2.1 Introduction.....	10
2.2 Modélisation des moyens de production décentralisée.....	10
2.3 Formulation du problème d'optimisation.....	10
2.3.1 Fonction objectif.....	11
2.3.2 Contraintes d'égalités.....	11
2.3.3 Contraintes d'inégalités.....	11
2.4 Les méthodes d'optimisation.....	12
2.4.1 Les méthodes conventionnelles.....	12
2.4.1.1 Techniques analytiques.....	12
2.4.1.2 Techniques déterministes.....	12
2.4.2 Les méthodes méta-heuristiques.....	13
2.4.2.1 Algorithmes Génétiques.....	14
2.4.2.2 Essaims de Particules.....	14
2.5 Algorithme d'optimisation du pygargue à tête blanche (Bald Eagle Search (BES)).....	14
2.5.1 Sélectionner l'espace de recherche.....	15
2.5.2 Recherche dans l'espace.....	15
2.5.3 Plonger.....	15
2.6 Application de l'algorithme de pygargue à tête blanche (BES).....	16
2.7 Conclusion.....	17
Chapitre 3 : Résultats de simulation	
3.1 Introduction.....	18
3.2 Applications numériques.....	18
3.2.1 Application au réseau test IEEE 33 jeux de barres.....	18
3.2.1.1 Cas 1 : Sans intégration de DG.....	19

3.2.1.2 Cas 2 : Avec intégration d'une DG.....	22
3.2.1.3 Cas 3 : Avec intégration de deux DGs.....	24
3.2.1.4 Cas 4 : Avec intégration de trois DGs.....	26
3.2.2 Application au réseau test IEEE 69 jeux de barres.....	29
3.2.2.1 Cas 1 : Sans intégration de DG.....	30
3.2.2.2 Cas 2 : Avec intégration d'une DG.....	31
3.2.2.3 Cas 3 : Avec intégration de deux DGs.....	33
3.2.2.4 Cas 4 : Avec intégration de trois DGs.....	35
3.3 Conclusion.....	37
Conclusion générale.....	38
Bibliographie.....	39
Annexe.....	42

Liste d'abréviations et symboles

Abréviations

HT	: Haute Tension
MT	: Moyenne Tension
BT	: Basse Tension
HTA	: Haute Tension A
HTB	: Haute Tension B
BTA	: Basse Tension A
BTB	: Basse Tension B
TBT	: Très Basse Tension
FACTS	: Flexible Alternating Current Transmission System
DG	: Distributed Generation
BES	: Bald Eagle Search
AEO	: Artificial Ecosystem-based Optimization
PSO	: Particle Swarm Optimizer
SKHA	: Stud Krill Heard Algorithm
HHO	: Harris Hawks Optimizer
IHHO	: Improved Harris Hawks Optimizer
CSCA	: Chaotic Sine Cosine Algorithm
SFSA	: Stochastic Fractal Search Algorithm
CTLBO	: Comprehensive Teaching Learning -Based Optimization
$P_{DG \min}$: La puissance minimale de DG
$P_{DG \max}$: La puissance maximale de DG
P_{DG}	: La puissance totale de DG
V_i	: La tension du jeu barres
p.u	: Unité relative(per unit)
JB	: Jeu de barres
P_i	: la position de l'aigle
Njb	: Nombre de jeu de barres
Nbr	: Nombre de branches
DGjb	: position du DG

Symboles

ΔV	: Variation de tension
P	: Puissance active
Q	: Puissance réactive
X	: Réactance de la ligne
R	: Résistance de la ligne
P_{Loss}	: Pertes de puissance active
I_i	: Le courant de la branche i
$I_{i,max}$: Le courant maximal de la branche i
α	: Paramètre de forme
Q_{Loss}	: Pertes de puissance réactive

Liste des figures

Figure 1.1 : Architecture générale du réseau électrique en Algérie	4
Figure 1.2 : Normalisation des différents niveaux de tension.....	5
Figure 2.1 : Etapes de la chasse du pygargue à tête blanche (BES).....	16
Figure 3.1 : Schéma unifilaire du réseau de 33 jeux de barres	19
Figure 3.2 : Profile de tension du réseau IEEE 33 jeux de barres.....	20
Figure 3.3 : Pertes de puissances active et réactive dans les branches du réseau IEEE 33 jeux de barres.....	22
Figure 3.4 : Courbe de convergence de BES du réseau IEEE 33 jeux de barres (Cas 2).....	23
Figure 3.5 : Profile de tension du réseau IEEE 33 jeux de barres (Cas 2)	23
Figure 3.6 : Pertes de puissance active dans le réseau IEEE 33 jeux de barres (Cas 2).....	24
Figure 3.7 : Caractéristique de convergence de BES du réseau IEEE 33 jeux de barres (Cas 3).....	25
Figure 3.8 : Profile de tension du réseau IEEE 33 jeux de barres (Cas 3)	25
Figure 3.9 : Pertes de puissance active dans le réseau IEEE 33 jeux de barres (Cas 3).....	26
Figure 3.10 : Courbe de convergence de BES du réseau IEEE 33 jeux de barres (Cas 4).....	27
Figure 3.11 : Profile de tension du réseau IEEE 33 jeux de barres (Cas 4)	27
Figure 3.12 : Pertes de puissance active dans le réseau IEEE 33 jeux de barres (Cas 4).....	28
Figure 3.13 : Représentation simplifiée du réseau de distribution IEEE 69 jeux de barres. ...	29
Figure 3.14 : Profile de tension du réseau IEEE 69 jeux de barres.....	30
Figure 3.15 : Pertes de puissances active et réactive dans les branches du réseau IEEE 69 jeux de barres (Cas 1).....	31
Figure 3.16 : Courbe de convergence de BES du réseau IEEE 69 jeux de barres (Cas 2).....	32
Figure 3.17 : Profile de tension du réseau IEEE 69 jeux de barres (Cas 2)	32
Figure 3.18 : Pertes de puissance active dans le réseau IEEE 69 jeux de barres (Cas 2).....	33
Figure 3.19 : Courbe de convergence de BES du réseau IEEE 69 jeux de barres (Cas 3).....	33
Figure 3.20 : Profile de tension du réseau IEEE 69 jeux de barres (Cas 3)	34
Figure 3.21 : Pertes de puissance active dans le réseau IEEE 69 jeux de barres (Cas 3).....	34
Figure 3.22 : Caractéristique de convergence de BES du réseau IEEE 69 jeux de barres (Cas 4)	35
Figure 3.23 : Profile de tension du réseau IEEE 69 jeux de barres (Cas 4)	36
Figure 3.24 : Pertes de puissance active dans le réseau IEEE 69 jeux de barres (Cas 4).....	36

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Tableau des domaines de tension.....	5
Tableau 3.1 : Résultats de l'identification de la topologie du réseau IEEE 33 jeux de Barres....	19
Tableau 3.2 : Ecoulement de puissances pour le réseau de distribution IEEE 33 jeux de barres.	20
Tableau 3.3 : Pertes de puissances active et réactive dans les branches du réseau IEEE 33 Jeux de barres.....	21
Tableau 3.4 Résultats de simulation du réseau IEEE 33 jeux de barres (Cas 2)	24
Tableau 3.5 : Résultats de simulation du réseau IEEE 33 jeux de barres (Cas 3).....	26
Tableau 3.6 : Résultats de simulation du réseau IEEE 33 jeux de barres (Cas 4)	28
Tableau 3.7 : Identification de la topologie du réseau de distribution IEEE 69 Jeux de barres...	29
Tableau 3.8 : Résultats de simulation du réseau IEEE 69 jeux de barres (Cas 2).....	33
Tableau 3.9 : Résultats de simulation du réseau IEEE 69 jeux de barres (Cas 3)	34
Tableau 3.10 : Résultats de simulation du réseau IEEE 69 jeux de barres (Cas 4).....	37
Tableau A.1 : Caractéristiques techniques des branches du réseau de distribution IEEE 33 jeux de barres.....	42
Tableau A.2 : Caractéristiques techniques des jeux de barres du réseau de distribution IEEE 33 jeux de barres.....	43
Tableau A.3 : Caractéristiques techniques des branches du réseau de distribution IEEE 69 jeux de barres.....	44
Tableau A.4 : Caractéristiques techniques des jeux de barres du réseau de distribution IEEE 69 jeux de barres.....	46

Introduction générale

Ces dernières années, la demande d'énergie électrique à augmenter considérablement dans la majorité des pays. Cette croissance est généralement liée à celle de la population et à l'amélioration du mode de vie [1]. Pour satisfaire cette augmentation des besoins énergétiques, de nombreux investissements associés à une politique énergétique adéquate sont nécessaires, la construction de nouvelles unités de production du type renouvelable favorisant au niveau du réseau de distribution. La question de fond est de savoir comment l'intégration de ces sources d'énergie doit être réalisée afin de profiter au maximum de ces dernières, d'une part, et pour limiter leurs influences négatives sur le réseau d'autre part. L'insertion de ces sources d'énergie au niveau de ces réseaux peut avoir des conséquences importantes sur la circulation des flux énergétiques, le profil de tension, les pertes de puissance ainsi que sur les systèmes de protection [2].

Dans ce travail, nous nous intéressons au problème de l'intégration de productions décentralisées du type photovoltaïque dans les réseaux de distribution.

L'objectif principal de ce travail de consister à appliquer un algorithme d'optimisation méta-heuristique pour l'intégration de productions décentralisées (DG) dans les réseaux de distribution. Cette méthode vise à faciliter l'intégration des énergies renouvelables dans les réseaux de distribution en minimisant les pertes totales de puissance active et par conséquent améliorer le profil de tension du réseau de distribution.

Ce travail comprend trois chapitres. Le premier chapitre est consacré à quelques généralités sur les réseaux électriques plus particulièrement les réseaux de distribution. Il s'agit par la suite de présenter les différentes technologies des DG. Enfin, nous indiquons leurs impacts sur les réseaux électriques.

Le deuxième chapitre décrit la méthodologie de planification optimale des DGs dans les réseaux de distribution en s'appuyant sur l'application d'un algorithme d'optimisation méta-heuristique appelé algorithme d'optimisation de pygargue à tête blanche (Bald Eagle Search (BES)) dans l'objectif final de minimiser les pertes actives dans le réseau de distribution.

Le troisième chapitre regroupe l'ensemble des résultats de simulation obtenue suite à l'intégration optimal de DGs sur deux réseaux test IEEE 33 et IEEE 69 jeux de barres. Nous avons en effet appliqué l'algorithme BES pour définir l'emplacement et la taille des DGs dans la perspective de minimiser une fonction mono-objectif considérée dans notre travail. Les

performances de la méthodologie proposées sont été comparées à d'autres travaux de recherche récents. Nous avons conclu notre travail par une conclusion générale qui regroupe les résultats les plus pertinent de notre travail. Quelques perspectives out été avancées comme suite de ce projet de master.

1.1 Introduction

Les réseaux électriques sont les infrastructures qui permettent d'acheminer l'énergie électrique des installations de production jusqu'aux consommateurs. En Algérie, les réseaux électriques utilisent le courant alternatif triphasé sinusoïdal à la fréquence de 50 Hz. Il comprend des milliers de composants (Générateurs, transformateurs, lignes, système de protection, etc.) [1].

La libéralisation du marché de l'énergie électrique, les préoccupations environnementales liées au changement climatique et l'arrivée massive de la production décentralisée (DGs) amènent des transformations importantes sur ces réseaux. Pour faire face à ces défis, les autorités prennent des mesures pour moderniser les infrastructures du réseau électrique afin d'assurer la gestion, la sécurité et la fiabilité de ce dernier.

Dans ce premier chapitre, on présentera dans un premier lieu la structure des réseaux électriques. Ensuite, l'insertion des DGs aux réseaux de distribution sera discutée en basant sur les impacts de ce type de production et les solutions proposées pour limiter ces impacts.

1.2 Fonctionnement des réseaux électriques

Physiquement, le réseau électrique est organisé en différents niveaux de tension : le réseau de transport et de répartition, auxquels sont connectés les grands groupes de production centralisée et le réseau de distribution alimentant la plupart des consommateurs [2].

1.2.1 Production

Les grands groupes de production d'énergie électrique sont en général basés sur des alternateurs synchrones de grandes tailles entraînés par des turbines à vapeur, à gaz ou hydrauliques. Ils sont connectés sur le réseau de transport via un transformateur élévateur.

1.2.2 Transport

Les réseaux de transport assurent le transport de l'énergie électrique sur de grandes distances. Afin de minimiser, entre autre, les pertes joules sur les lignes, ces réseaux sont à très haute tension (de 63 kV à 400 kV).

1.2.3 Distribution

Les réseaux de distribution constituent l'architecture la plus importante du réseau électrique. Ils assurent la distribution de l'énergie électrique au niveau local. Leur tension est inférieure ou égale à 50 kV (HTA). Ils sont constitués de deux types de réseaux : le réseau moyenne tension (HTA) avec un niveau de 10 kV et 30 kV connecté au réseau de transport, et le réseau basse tension (BT) de tension de 0.4 kV.

1.2.4 Consommation

La production d'énergie thermique, lumineuse et mécanique sont les trois usages classiques de l'énergie électrique. Elles se retrouvent aussi bien chez les consommateurs résidentiels qu'industriels.

La figure 1.2 illustre l'architecture générale des réseaux électriques en Algérie.

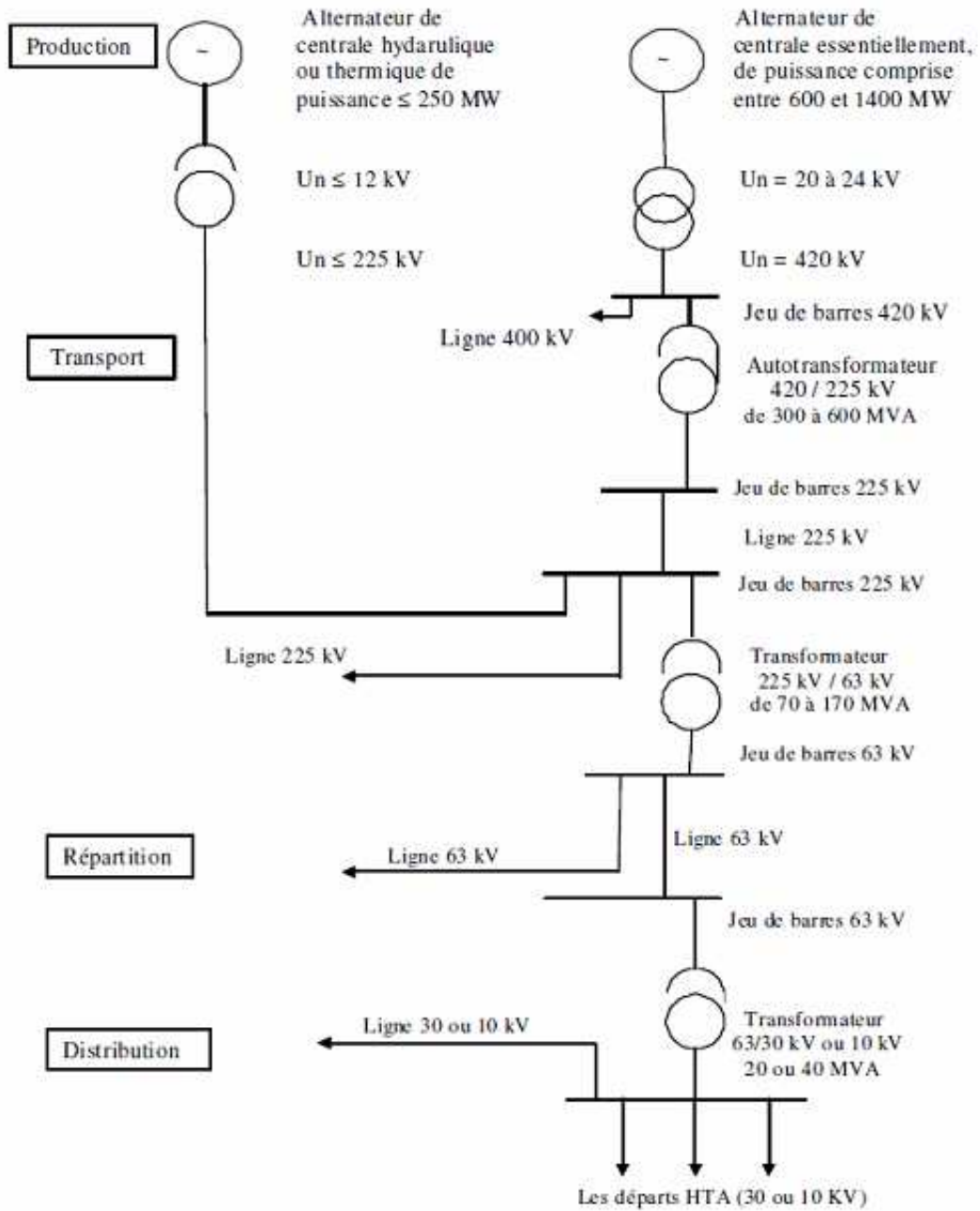


Figure 1.1 : Architecture générale du réseau électrique en Algérie

La nouvelle norme en vigueur en Algérie (SONELGAZ) définit les niveaux de tension comme suit :

Tableau 1.1 : Tableau des domaines de tension [3]

Domaines de tension		Valeur de la tension composée nominale (U_n en Volts)	
		Tension Alternative	Tension Continue
Très Basse Tension (TBT)		$U_n < 50$	$U_n < 120$
Basse Tension (BT)	BTA	$50 < U_n < 500$	$120 < U_n < 750$
	BTB	$500 < U_n < 1000$	$750 < U_n < 1500$
Haute Tension (HT)	HTA ou MT	$1000 < U_n < 50\ 000$	$1500 < U_n < 75\ 000$
	HTB	$U_n > 50\ 000$	$U_n > 75\ 000$

Les appellations normalisées des différents niveaux de tension sont présentées dans la figure 1.3 :

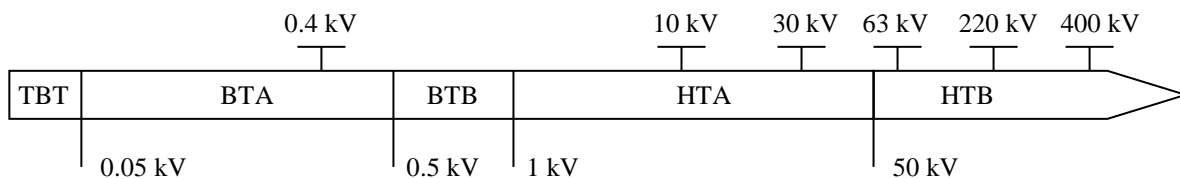


Figure 1.2 : Normalisation des différents niveaux de tension [3].

1.3 Production décentralisée

La production décentralisée désigne l'ensemble des générateurs d'électricité de faible puissance, connectés aux réseaux de distribution. Ce terme est construit par opposition au terme production centralisée désignant les grandes centrales de production connectées au réseau de transport [4].

Selon les origines des énergies primaires utilisées, les moyens de production sont divisés en deux catégories : la première catégorie comporte les technologies basées sur les énergies renouvelables qui se caractérisent par l'intermittence de la source primaire, alors que la deuxième regroupe les énergies fossiles programmables [5].

Les principales technologies de l'énergie non renouvelables sont : Le thermique à flamme (qui est basé sur des turbines ou micro turbines à vapeur), les moteurs à combustibles fossiles (Les turbines à gaz et les groupes diesel) et les piles à combustible produisent directement de l'électricité à partir d'hydrogène et d'oxygène par réaction inverse de l'électrolyse de l'eau.

Les principales de l'énergie renouvelables sont :

- **Energie éolienne :**

L'énergie éolienne (du mot grec Eole, le Dieu du vent) est l'énergie produite par le vent. Est une source d'énergie renouvelable, inépuisable et gratuite obtenue à partir de la force du vent, elle est basée sur la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Soit cette énergie est utilisée directement comme dans les éoliennes de pompage, soit elle est transformée en électricité via une génératrice. Dans ce cas, on parle d'aérogénérateurs. Les termes « parc éolien » ou « ferme éolienne » sont utilisés pour décrire les unités de production groupées, installées à terre ou dans la mer [6].

- **Énergie photovoltaïque :**

L'énergie solaire photovoltaïque désigne l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque. Plusieurs cellules sont reliées entre elles et forment un panneau solaire (ou module) photovoltaïque. Plusieurs modules qui sont regroupés dans une centrale solaire photovoltaïque sont appelés champ photovoltaïque. Le terme photovoltaïque peut désigner soit le phénomène physique (l'effet photovoltaïque) ou la technologie associée [7].

La première cellule photovoltaïque a été développée aux États-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés". C'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs. Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques disponibles à un niveau industriel. Le silicium est fabriqué à partir de sable quartzéux (dioxyde de silicium). Celui-ci est chauffé dans un four électrique à une température de 1700 °C. Divers traitements du sable permettent de purifier le silicium. Le produit obtenu est un silicium dit métallurgique, pur à 98% seulement [7].

- **Énergie hydroélectrique :**

L'hydroélectricité, est une énergie électrique renouvelable qui est issue de la conversion de l'énergie hydraulique en électricité. L'énergie cinétique du courant d'eau est transformée en énergie mécanique par une turbine, puis en énergie électrique par un alternateur.

L'hydroélectricité constitue la première source renouvelable et la troisième source générale de production électrique au monde (15.3 % en 2021) [8].

- **Énergie géothermique :**

L'énergie géothermique est une source d'énergie renouvelable qui est obtenue à partir de la chaleur du sous-sol. Cette énergie thermique peut être obtenue sans la combustion de combustibles

fossiles ou de tout autre matériau. C'est une forme d'énergie propre sans émission de dioxyde de carbone.

Les installations géothermiques présentent l'avantage d'occuper peu d'espace en surface et d'être non polluantes. Elles ne consomment pas d'eau puisque celle-ci est renvoyée en sous-sol. Après la phase d'investissement, les coûts d'exploitation sont faibles.

1.4 Impacts de L'intégration de la production décentralisée dans le réseau de distribution

Le taux de pénétration croissant de la production décentralisée n'est pas sans impacts prévisibles sur l'exploitation future des réseaux de distribution. L'intégration d'une DG au réseau de distribution peut avoir des effets importants sur le réseau tels que l'écoulement de puissance, la régulation de tension, la fiabilité, etc. Les principaux impacts à rappeler sont les suivants :

1.4.1 Impact sur le sens de transit de puissance

L'un des impacts liés à l'introduction de la production distribuée dans un réseau de distribution concerne la modification des transits de puissance. Les réseaux sont dimensionnés pour recevoir les flux d'énergie du réseau de transport vers la distribution. L'insertion des DGs dans les niveaux de tension autres que le réseau de transport peut créer une injection de puissance dans le sens contraire, c'est-à-dire de la distribution vers le transport. Les équipements, notamment les protections doivent alors être bidirectionnels. Ainsi, sachant que les réseaux aux niveaux de tension inférieure sont normalement surdimensionnés afin de faire face à l'accroissement de consommation, on n'aura peut-être pas, à court terme, de problèmes liés à des limites de la capacité de transfert d'énergie ; mais à long terme, lorsque le taux de pénétration de la production distribuée augmentera, la modification du sens de transit de puissance pourra éventuellement provoquer des congestions locales [9].

1.4.2 Impact sur la stabilité du réseau :

Les génératrices de productions décentralisées peuvent être de type synchrone ou asynchrone. L'insertion de générateurs synchrones dans le réseau va changer le temps critique d'élimination de défaut (correspondant à la durée maximale d'une perturbation à laquelle le réseau peut résister sans perte de stabilité). Ceci influencera directement la limite de la stabilité dynamique du système en considération [10].

1.4.3 Impact sur le plan de protection :

L'intégration des DGs au réseau modifiera également les courants de court-circuit et donc le réglage des seuils des protections. D'ailleurs, ce changement peut provoquer une mauvaise sélectivité, des déclenchements intempestifs ou l'aveuglement du système de protection [10].

1.4.4 Impact sur l'observabilité et la contrôlabilité du système :

Les DGs, notamment celles à type énergie renouvelable, sont caractérisées par l'intermittence des sources primaires. Cela sera difficile pour l'opérateur d'estimer la puissance de sortie de ces producteurs, donc la puissance fournie du système, par conséquent [10].

1.4.5 Impact sur la continuité de service :

Pour la même raison concernant la caractéristique d'intermittence, l'indisponibilité des DGs lors que le système les sollicite peut occasionner la rupture d'électricité par manque de puissance [10].

1.4.6 Impact sur la qualité d'énergie :

Les DGs de type machine asynchrone consomment de la puissance réactive afin de magnétiser leur circuit magnétique. Lors de la connexion au réseau, elles appellent un courant fort, ce qui contribue au creux de tension. D'ailleurs, la présence d'interfaces d'électronique de puissance peut faire augmenter le taux des harmoniques qui nuisent gravement à la qualité de d'énergie fournie [10].

1.5 Solutions pour limiter les impacts de la production décentralisée

1.5.1 Renforcement du réseau :

La méthode de renforcement consiste à remplacer des conducteurs existants par des conducteurs de section plus importante. Ainsi, lors d'une étude de raccordement des DGs, les conducteurs du réseau sont alors renforcés [11].

D'autres solutions basées sur l'ajout de matériels réseau pour des raisons de réglage ou de protection sont proposées, un peut citer [11] :

- Les auto-transformations et les régleurs en charge ;
- Les capacités série et parallèle pour la compensation de certaines lignes ;
- Les dispositifs d'électronique de puissance de type D-FACTS (Distribution Flexible AC Transmission System).

Cependant, ces modifications ne peuvent pas se faire instantanément vu le coût associé.

1.5.2 Optimisation de la planification de la production décentralisée

Afin de profiter au maximum de la génération d'énergie dispersée et pour d'augmenter globalement la fiabilité et la sécurité du réseau de distribution, ce type de production doit être intégré d'une manière optimale dans les réseaux de distribution.

Chapitre 1 Impacts de l'intégration de la production décentralisée au réseau de distribution

Les gestionnaires du réseau, souhaitent, dans la mesure du possible, d'une part avoir le plus d'énergie fournie par les DGs, et d'autre part à limiter leurs influences négatives sur le réseau. Pour atteindre ce double objectif une bonne planification des DGs par le gestionnaire est primordiale.

1.6 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons présentée une vue générale sur les réseaux de distribution d'énergie électrique, du point de vue leurs structures de base ainsi que leurs évolutions d'une structure classique vers une structure plus développée avec l'intégration des sources d'énergie renouvelables. Aussi, nous avons exposé d'une part les différents impacts de ce type de production ainsi que les solutions proposées pour limiter ces impacts et d'autre part les solutions à mettre en place pour limiter ces impacts.

2.1 Introduction

L'intégration de la production décentralisée dans le réseau de distribution joue un rôle important dans l'amélioration des performances techniques du réseau. Par contre, l'intégration non optimale de ces sources d'énergie peut apparaître dans l'augmentation des pertes techniques, dans l'augmentation de la déviation de tension et dans la stabilité du réseau.

Afin de garantir une meilleure intégration des DGs dans le réseau de distribution, nous proposons, dans ce travail, l'utilisation d'un algorithme d'optimisation méta-heuristique appelé algorithme d'optimisation de pygargue à tête blanche (Bald Eagle Search (BES)). Cet algorithme est adapté pour l'optimisation de l'emplacement et de la taille des DGs afin d'obtenir le minimum des pertes totales de la puissance active dans le réseau.

Dans ce chapitre, nous allons tout d'abord présenter les différentes techniques d'optimisation et enfin nous allons exposer l'algorithme BES utilisé.

2.2 Modélisation de la production décentralisée

La production décentralisée peut être aussi classée en quatre grands types basés sur la capacité de fournir de la puissance active et réactive [10].

- **Type 1** : Ce type de DG est capable de fournir que la puissance active tels que les photovoltaïques, les micro-turbines, les piles à combustible, qui sont intégrés au réseau à l'aide des convertisseurs/onduleurs.
- **Type 2** : Ce type de DG est capable de délivrer des puissances active et réactive. Les unités à base de machines synchrones (cogénération, turbines à gaz, etc) font partie de ce type.
- **Type 3** : Ce type de DG est capable de fournir que la puissance réactive. Les compensateurs synchrones tels que les turbines à gaz sont un exemple de ce type fonctionnant avec facteur de puissance nul.
- **Type 4** : Ce type de DG est capable de délivrer une puissance active en consommant de la puissance réactive. Principalement les générateurs à induction, qui sont utilisés dans des parcs éoliens, entrent dans cette catégorie.

Dans son travail, nous procédons à l'intégration de production décentralisée de type 1.

2.3 Formulation du problème d'optimisation

Dans cette étude, le problème d'optimisation de l'emplacement et de la taille des DGs (Type 1 (photovoltaïques)) a pour objectif de minimiser les pertes totales de puissance active tout en respectant les contraintes d'égalités et d'inégalités.

2.3.1 Fonction objectif

La fonction objectif considérée est la minimisation des pertes totales de puissance du réseau de distribution. Elle s'exprime par l'équation suivante :

$$F = \min \sum_i^{nbr} P_{loss,i} \quad (2.1)$$

Où $P_{loss,i}$ représente les pertes de puissance active au niveau de la branche, nbr est le nombre de branches du réseau de distribution.

2.3.2 Contraintes d'égalités

Les équations d'équilibre des puissances active et réactive sont définies comme des contraintes d'égalité. Ces contraintes s'expriment par [11] :

$$\begin{cases} P_{G,i} - P_{L,i} = \sum_{i=1}^{Nbr} P_{Loss,i} \\ Q_{G,i} - Q_{L,i} = \sum_{i=1}^{Nbr} Q_{Loss,i} \end{cases} \quad (2.2)$$

Où $P_{G,i}$ et $Q_{G,i}$ sont, respectivement, les sorties de puissance active et réactive du $i^{ème}$ générateur; $P_{L,i}$ et $Q_{L,i}$ sont respectivement les puissances active et réactive du $i^{ème}$ jeu de barres de charge.

2.3.3 Contraintes d'inégalités

Les contraintes d'inégalités s'expriment par [12] :

- **Tension du jeu de barres :**

L'amplitude de la tension de chaque jeu de barres est limitée comme suit :

$$V_{\min} \leq |V_i| \leq V_{\max} \quad i = 1, 2, 3, \dots, N_{jb} \quad (2.3)$$

- **Courant de branche**

Le courant de chaque branche est limité comme suit :

$$I_i \leq I_{i,\max} \quad i = 1, 2, \dots, N_{br} \quad (2.4)$$

- **Puissances générées par les DGs**

Les limites des puissances générées par les DGs :

$$P_{DG}^{\min} \leq |P_{DGI}| \leq P_{DG}^{\max} \quad (2.5)$$

Où P_{DG}^{\max} est égale à 3000 kW dans notre étude.

- **Position de DG**

$$2 \leq |DG_{JB}| \leq N_{JB} \quad (2.6)$$

Où V_{\min} et V_{\max} sont considérées comme 0,95 et 1,05 (p.u) respectivement ; N_{JB} est le nombre total de jeux de barres ; DG_{JB} est le numéro de jeu de barres de l'installation de DG; V_i est la tension du jeu de barres ; I_i est le courant de la branche i ; $I_{i,\max}$ est le courant maximal de la branche i ; P_{DG} est la puissance totale de DG et N_{br} est le nombre total de branches.

2.4 Les méthodes d'optimisation

Un problème d'optimisation se définit comme la recherche du minimum ou du maximum (de l'optimum) d'une fonction donnée. On peut aussi trouver des problèmes d'optimisation pour lesquelles les variables de la fonction à optimiser sont contraintes d'évoluer dans une certaine partie de l'espace de recherche. Dans ce cas, on a une forme particulière de ce que l'on appelle un problème d'optimisation sous contraintes [14].

Les méthodes d'optimisation peuvent être divisées en deux groupes : Les méthodes conventionnelles et les méthodes méta-heuristiques.

2.4.1 Les méthodes conventionnelles

2.4.1.1 Techniques analytiques

Ce type de techniques représente le système par un ensemble d'équations numériques et calcule sa solution directe. De telles méthodes se caractérisent par leur simplicité de mise en œuvre et leur capacité de convergence vers la solution optimale [15].

Cependant, leur efficacité de calcul peut être affectée par la taille et la complexité du système considéré.

2.4.1.2 Techniques déterministes

Il s'agit d'une classe de méthodes d'optimisation mathématique basées sur l'amélioration itérative de la solution initiale. Il existe de nombreux algorithmes déterministes tels que la programmation non linéaire [16].

La sensibilité au nombre de variables de décision, le temps de calcul important et le piégeage par un optimum local sont les principaux inconvénients de ces techniques [15].

2.4.2 Les méthodes méta-heuristiques

Le mot méta-heuristique a été introduit par Glover en 1986. Il est composé de deux mots grecs, le premier signifie : « au-delà ou dans un niveau supérieur » et le deuxième : « trouver ou découvrir » [17].

Les méta-heuristiques sont généralement des algorithmes stochastiques itératifs, qui progressent vers un optimum global, c'est-à-dire l'extremum global d'une fonction, par échantillonnage d'une fonction objectif. Elles se comportent comme des algorithmes de recherche, tentant d'apprendre les caractéristiques d'un problème afin d'en trouver une approximation de la meilleure solution. Il existe un grand nombre de méta-heuristiques, allant de la simple recherche locale à des algorithmes complexes de la recherche globale. Ces méthodes utilisent cependant un haut niveau d'abstraction, leur permettant d'être adaptées à une large gamme de problèmes différents [18].

Les méthodes d'optimisation peuvent alors être partagées en deux catégories : les méthodes locales, qui permettent de déterminer un minimum local, et les méthodes de la recherche globale, qui s'efforcent de déterminer un optimum global. Afin d'améliorer les performances d'une recherche, plusieurs auteurs ont pensé à combiner ces deux approches [19].

L'algorithme résultant possède alors deux phases : l'exploration et l'exploitation. L'exploration permet à l'algorithme de rechercher de nouvelles solutions dans l'espace de la recherche. Lors de cette phase, on cherchera des solutions dans des espaces encore non explorés afin de trouver d'éventuels optimums locaux. La phase d'exploitation, quant à elle, utilise les résultats obtenus lors de la phase d'exploration, afin de sélectionner le sous-espace de recherche le plus prometteur, et de "plonger" vers l'optimum local le plus proche.

Les méthodes d'optimisation méta-heuristiques disposent les caractéristiques communes suivantes [20].

- Elles sont généralement non-déterministes et elles peuvent ne pas trouver la solution optimale, et encore moins prouver l'optimalité de la solution trouvée ;
- Elles sont inspirées par des analogies avec la physique (recuit simulé), avec la biologie (algorithmes évolutionnaires) ou encore l'éthologie (l'intelligence en essaim) ;
- Elles sont stochastiques, ce qui permet de faire face à l'explosion combinatoire des possibilités et ce qui limite le piégeage dans les optima locaux ;
- Elles sont à l'origine dédiées aux problèmes combinatoires, où les paramètres ne peuvent prendre que des valeurs discrètes.

Cependant, elles ont l'inconvénient d'avoir plusieurs paramètres à régler, et le temps de calcul est élevé.

L'arrivée de nouvelle classe de méthodes d'optimisation marque une grande révolution dans le domaine de l'optimisation. En effet, celles-ci s'appliquent à toutes sortes de problèmes combinatoires, et elles peuvent également s'adapter aux problèmes continus.

Ces méthodes permettent de trouver une solution de bonne qualité en un temps de calcul en général raisonnable, sans garantir l'optimalité de la solution obtenue. Ces méthodes sont avantageusement utilisées pour la résolution des problèmes de grande taille.

Parmi les méthodes d'optimisation méta-heuristiques les plus utilisées et les plus connues en trouve :

2.4.2.1 Algorithmes Génétiques

Les algorithmes génétiques (GA) sont une méthode d'optimisations stochastiques basées sur les mécanismes de la sélection naturelle. La solution optimale est cherchée à partir d'une population de solutions en utilisant des processus aléatoires. La recherche de la meilleure solution est effectuée en créant une nouvelle génération de solutions par application successive, à la population courante, de trois opérateurs : la sélection, le croisement, et la mutation. Ces opérations sont répétées jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit atteint [21].

2.4.2.2 Essaims de Particules

L'optimisation par essaim de particules (Particle Swarm Optimization : PSO) est une technique d'optimisation parallèle développée par Kennedy et Eberhart [22]. Elle est inspirée du comportement social des individus qui ont tendance à imiter les comportements réussis qu'ils observent dans leur entourage, tout en y apportant leurs variations personnelles. A la différence des algorithmes génétiques, qui miment les mécanismes génétiques de l'évolution, PSO s'inspire plutôt de la formation d'une culture.

2.5 Algorithme d'optimisation du pygargue à tête blanche ((Baled Eagle Search (BES))

L'algorithme de recherche Baled Eagle Search (BES), qui a été introduit par Alsattar et al. en 2020 [23]. Cette méthode d'optimisation s'inspire du comportement de chasse des pygargues à tête blanche, qui sont connus pour leur intelligence. L'algorithme suit un processus en trois étapes : choix de l'espace de recherche, recherche dans l'espace et plongée.

Dans la première étape, l'aigle choisit l'espace de recherche qui contient le plus grand nombre de poissons. Dans la deuxième étape, l'aigle explore cet espace pour trouver des poissons. Enfin, dans la troisième étape, l'aigle plonge vers la position là mieux identifiée dans la deuxième étape pour attraper sa proie.

Cet algorithme commence avec une collection initiale de solutions candidates générée aléatoirement et s'améliore au cours de plusieurs itérations jusqu'à ce que l'optimum global soit atteint. En résumé, BES est un algorithme d'optimisation puissant qui tire parti de l'intelligence des

pygargues à tête blanche pour résoudre des problèmes complexes dans différents domaines d'application.

2.5.1 Choisir l'espace de recherche

Dans cette étape, l'aigle sélectionne l'endroit offrant la plus grande quantité de poissons. Ce comportement peut être mathématiquement représenté par l'équation suivante [23] :

$$P_{new,i} = P_{best} + \alpha \times r (P_{mean} - P_i) \quad (2.7)$$

Ou P_{best} représente l'espace de recherche actuel choisi par les pygargues à tête blanche en fonction de la meilleure position trouvée lors de leur dernière recherche ; α est le paramètre de contrôle des changements de position qui prend une valeur comprise entre 1,5 et 2 ; r est un nombre aléatoire avec une valeur comprise entre 0 et 1 ; P_{mean} désigne que ces aigles ont épuisé toutes les informations des points précédents ; P_i est la position actuelle de l'aigle.

2.5.2 Recherche dans l'espace

Après avoir sélectionné l'espace de recherche, les aigles commencent leur recherche de proies dans cet espace en se déplaçant en forme de spirale pour accélérer le processus. Dans cette étape, l'aigle met à jour sa position en fonction de l'équation suivante [23] :

$$P_{new,i} = P_i + y(i) \times (P_i - P_{i+1}) + x(i) \times (P_i - P_{mean}) \quad (2.8)$$

$$\text{Ou} \quad x(i) = \frac{xr(i)}{\max(|xr|)}; \quad y(i) = \frac{yr(i)}{\max(|yr|)}; \quad xr(i) = r(i) \times \sin(\theta(i)); \quad yr(i) = r(i) \times \cos(\theta(i));$$

$$\theta(i) = a \times \pi \times rand; \quad r(i) = \theta(i) \times R \times rand.$$

Ou a et R sont des coefficients qui prennent des valeurs dans les plages [5 10] et [0,5 2], respectivement.

2.5.3 Plonger

Dans cette étape, l'aigle se balance de la position là mieux identifiée dans la deuxième étape vers sa cible. Ce comportement est décrit par l'équation suivante [23] :

$$P_{new,i} = rand \times P_{best} + x_1(i) \times (P_i - c_1 \times P_{mean}) + y_1(i) \times (P_i - c_2 \times P_{best}) \quad (2.9)$$

$$\text{Ou} \quad x_1(i) = \frac{xr(i)}{\max(|xr|)}; \quad y_1(i) = \frac{yr(i)}{\max(|yr|)}; \quad xr(i) = r(i) \times \sinh(\theta(i)); \quad yr(i) = r(i) \times \cosh(\theta(i));$$

$$\theta(i) = a \times \pi \times rand; \quad r(i) = \theta(i); \quad c_1, c_2 \in [1, 2].$$

Sur la base de ces étapes, la collection initiale de solutions candidates générée aléatoirement est améliorée au cours de plusieurs itérations jusqu'à ce que l'optimum global soit atteint.

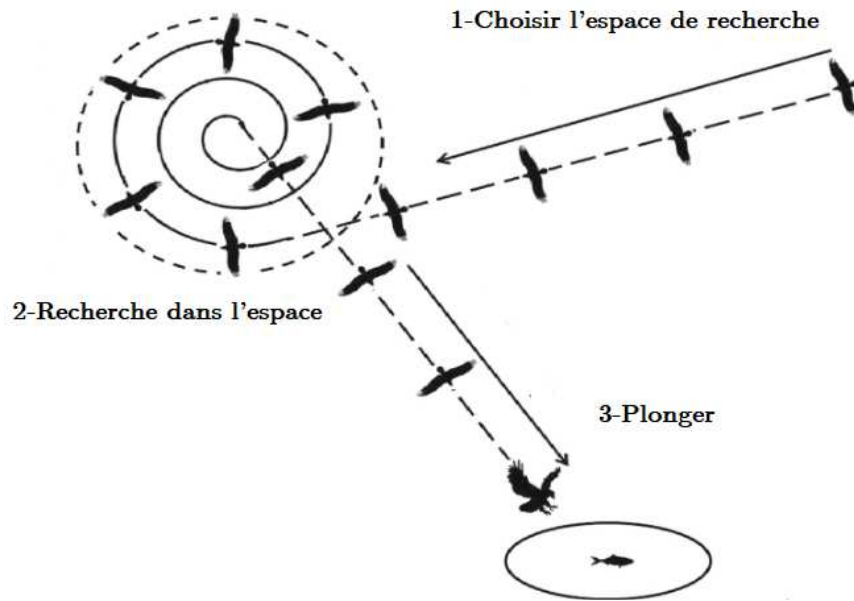


Figure 2.1 : Etapes de la chasse du pygargue à tête blanche (BES)

2.6 Application de l'algorithme de pygargue à tête blanche (BES)

Le processus d'insertion de l'algorithme BES afin de résoudre le problème d'optimisation de l'emplacement et de la taille des DGs pour fonction mono-objectif est présenté dans les étapes ci-dessous.

Dans notre travail, les paramètres de BES ont été pris comme suit [23] :

- Nombre de la population = 50 ;
- Nombre maximum des itérations = 100 ;
- $\alpha=2$, $a=10$ et $R=1.5$;
- $c_1=1.5$ et $c_2=1.5$;
- Nombre de DGs insérées : une seule DG, deux DGs et trois DGs ;
- Taille de DG : $0,01 \text{ MW} \leq P_{DG} \leq 3 \text{ MW}$.

Etape 1 : Lire les données du réseau de distribution ;

Etape 2 : Lire les limites P_{DGmin} et P_{DGmax} ;

Etape 3 : Définir les paramètres de l'algorithme BES et les limites des variables de décision (Emplacements et tailles des DGs) ;

Etape 4 : Générer la population initiale pour les variables de décision ;

Etape 5 : Ecoulement de puissance (Backward Forward Sweep) en la présence des DGs ;

Etape 6 : Calculer les pertes totales de puissance active(fonction objectif) ;

Etape 7 : Mise à jour de les position des pygargues ;

Etape 8 : Répéter les étapes 5 à 8 jusqu'à le nombre maximal des itérations ;

Etape 9 : Affiche la solution optimale (Emplacements et tailles optimaux des DGs).

2.7 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les différentes familles des méthodes d'optimisation. Ensuite, les formules mathématiques décrivant le problème d'optimisation de l'emplacement et de la taille des DGs sont établies. Enfin, nous avons détaillé le mécanisme de la méthode de pygargue à tête blanche (BES) et qui sera utilisée, dans le chapitre suivant, pour résoudre le problème d'optimisation de l'emplacement et de la taille des DGs dans les réseaux de distribution.

3.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'évaluation de l'algorithme de pygargue à tête blanche (Baled Eagle Search (BES)) dans l'optimisation de l'emplacement et de la taille des DGs (1DG, 2DGs et 3DGs) dans les réseaux de distribution.

Nous présentons, dans un premier lieu, les réseaux de distribution de test IEEE 33 et IEEE 69 jeux de barres utilisés pour l'évaluation de la méthode d'optimisation BES. Ensuite, nous exposons et discutons les résultats de l'application de cet algorithme sur ces deux réseaux test.

3.2 Applications numériques

L'intégration des DGs (Production décentralisée de type 1 (photovoltaïque)) dans les réseaux de distribution IEEE 33 jeux de barres et IEEE 69 jeux de barres sera effectuée selon les cas suivants :

- **Cas 1** : Sans intégration de DG ;
- **Cas 2** : Avec intégration d'une DG ;
- **Cas 3** : Avec intégration de deux DGs ;
- **Cas 4** : Avec intégration de trois DGs.

Les tensions de tous les jeux de barres du réseau sont dans les limites admissibles dans l'intervalle [0.95 p.u., 1.05 p.u.].

3.2.1 Application au réseau test IEEE 33 jeux de barres

Les caractéristiques du réseau de distribution IEEE 33 jeux de barres de la Figure 3.1 sont données comme suit [24] :

- Nombre de jeux de barres =33 ;
- Nombre de branches =32 ;
- Jeu de barres de référence N° =1 ;
- Puissance de base = 100 MVA ;
- Tension de base =12,66 kV ;
- Les puissances active et réactive totale demandées du réseau sont 3.7150 MW et 2.3000 MVA_r.

Les données du réseau test sont présentées dans l'annexe.

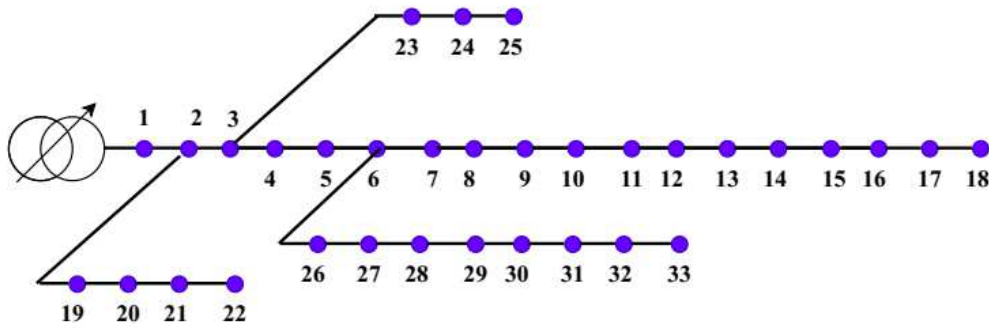


Figure 3.1 : Représentation simplifiée du réseau de distribution IEEE 33 jeux de barres

Le tableau 3.1 représente le type de chaque jeu de barres et de chaque ligne constituant le réseau de distribution IEEE 33 jeux de barres.

Tableau 3.1: Identification de la topologie du réseau de distribution IEEE 33 Jeux de barres

JB de référence	1
JB terminaux	18, 22, 25 ,33
JB intermédiaires	4,5,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,19,20,21,23,24,26,27,28,29,30,31,32
JB communs	2, 3, 6
Ligne principale	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18
Lignes latérales	2, 19, 20, 21,22
	3, 23, 24,25
	6, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32,33

3.2.1.1 Cas 1 : Sans intégration de DG

Le Tableau 3.2 montre les modules et les angles des tensions au niveau de chaque jeu de barres.

La Figure 3.2 représentent le module de tension au niveau de chaque jeu de barres. La valeur de tension la plus basse est 0.9134 p.u. qui se trouve au niveau du jeu de barres 18.

Tableau 3.2 : Ecoulement de puissances pour le réseau de distribution IEEE 33 jeux de barres

JB	Tension (pu)	Phase (rad)	JB	Tension (pu)	Phase (rad)	JB	Tension (pu)	Phase (rad)
1	1.0000	0	12	0.9271	0.0032	23	0.9794	0.0012
2	0.9970	0.0003	13	0.9210	-0.0048	24	0.9727	-0.0004
3	0.9830	0.0017	14	0.9187	-0.0063	25	0.9694	-0.0012
4	0.9755	0.0029	15	0.9173	-0.0069	26	0.9479	0.0032
5	0.9682	0.0041	16	0.9160	-0.0074	27	0.9453	0.0043
6	0.9498	0.0025	17	0.9140	-0.0088	28	0.9339	0.0059
7	0.9463	-0.0015	18	0.9134	-0.0089	29	0.9257	0.0074
8	0.9415	-0.0009	19	0.9965	0.0001	30	0.9222	0.0093
9	0.9352	-0.0023	20	0.9929	-0.0011	31	0.9180	0.0079
10	0.9294	-0.0035	21	0.9922	-0.0015	32	0.9171	0.0075
11	0.9286	-0.0033	22	0.9916	-0.0018	33	0.9168	0.0074

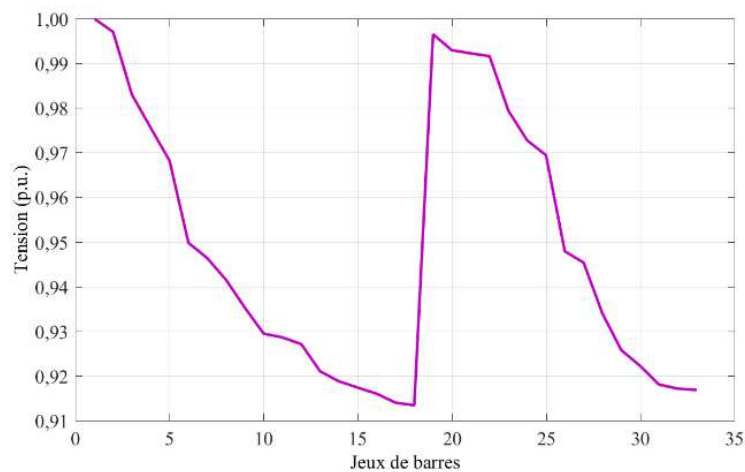


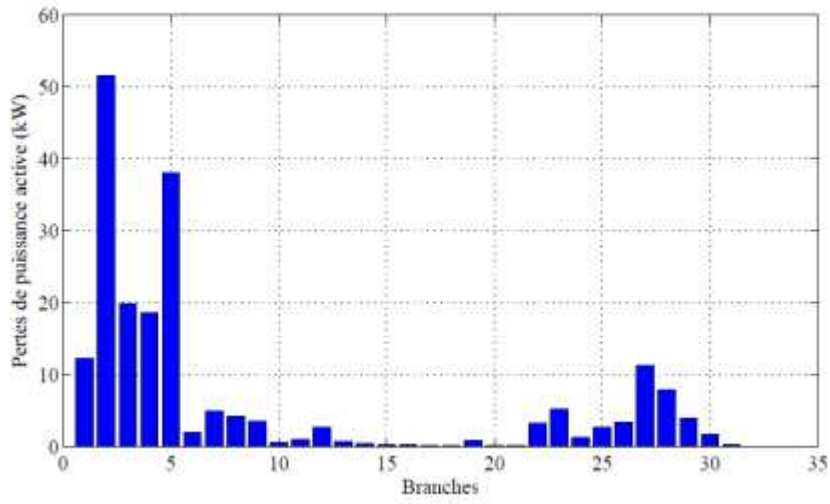
Figure 3.2 : Profile de tension du réseau IEEE 33 jeux de barres

Le Tableau 3.3 montre les pertes de puissance active et réactive dans chaque branche du réseau IEEE 33 jeux de barres.

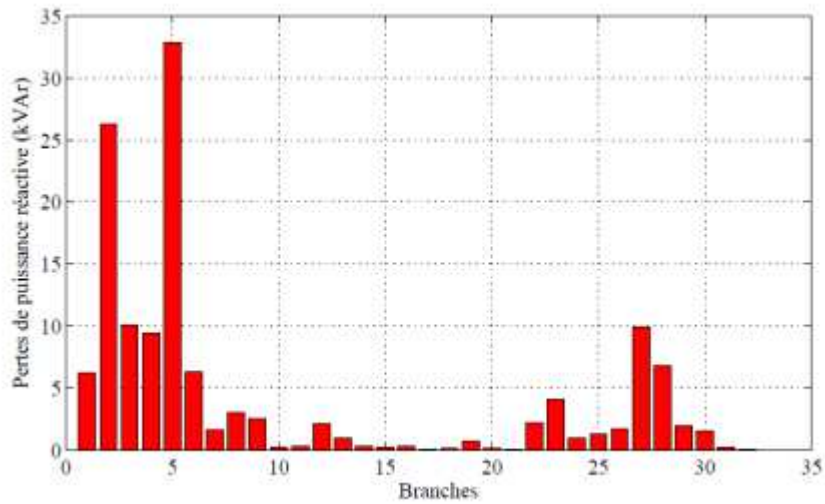
Tableau 3.3 : Pertes de puissances active et réactive dans les branches du réseau IEEE 33 Jeux de barres

Branche	Pertes active (kW)	Pertes réactive (kVAr)	Branche	Pertes active (kW)	Pertes réactive (kVAr)
1	12.1927	6.2154	17	0.0531	0.0416
2	51.5711	26.2668	18	0.1610	0.1536
3	19.7934	10.0806	19	0.8322	0.7498
4	18.5931	9.4697	20	0.1008	0.1177
5	38.0256	32.8256	21	0.0436	0.0577
6	1.9131	6.3238	22	3.1812	2.1737
7	4.8342	1.5976	23	5.1432	4.0613
8	4.1773	3.0012	24	1.2873	1.0073
9	3.5575	2.5216	25	2.5940	1.3213
10	0.5531	0.1829	26	3.3211	1.6909
11	0.8802	0.2911	27	11.2766	9.9424
12	2.6638	2.0958	28	7.8180	6.8108
13	0.7286	0.9590	29	3.8881	1.9805
14	0.3569	0.3176	30	1.5928	1.5742
15	0.2813	0.2054	31	0.2131	0.2484
16	0.2515	0.3358	32	0.0132	0.0205
Pertes de puissance active				201.8925 kW	
Pertes de puissance réactive				134.6413 kVAr	

La Figure 3.3 a et b représente les pertes de puissance active et réactive au niveau de chaque branche. Pour les pertes actives, la plus grande valeur 51.5711 kW se trouve au niveau de la branche numéro 2, alors que la plus grande valeur des pertes réactives 32.8256 kVAr se trouve au niveau de la branche numéro 5. Cela est dû aux valeurs des courants traversant ces branches ainsi qu'aux caractéristiques électriques, résistance et réactance relatives à chaque branche du réseau. Les pertes totales active et réactive du réseau sont respectivement 201.8925 kW et 134.6413 kVAr représentant 5.42 % et 5.85 % de la puissance demandée.



a. Pertes de puissance active



b. Pertes de puissance réactive

Figure 3.3 : Pertes de puissances active et réactive dans les branches du réseau IEEE 33 jeux de barres

Dans un premier temps, un cas de référence est simulé afin d’illustrer par la suite l’intérêt de l’optimisation de l’emplacement et de la taille des DGs.

La Figure 3.2 représente le profil de tension du réseau IEEE 33 jeux de barres sans intégration de DGs. On remarque que la valeur de la tension la plus basse est 0.9134 p.u et elle apparaitre au niveau du jeu de barres N°18. Cette valeur est inférieure à la limite admissible de tension 0.95 p.u.

3.2.1.2 Cas 2 : Avec intégration d’une DG

Dans ce cas, une DG doit être intégrée au réseau. La Figure 3.4 représente la courbe de convergence de l’algorithme BES.

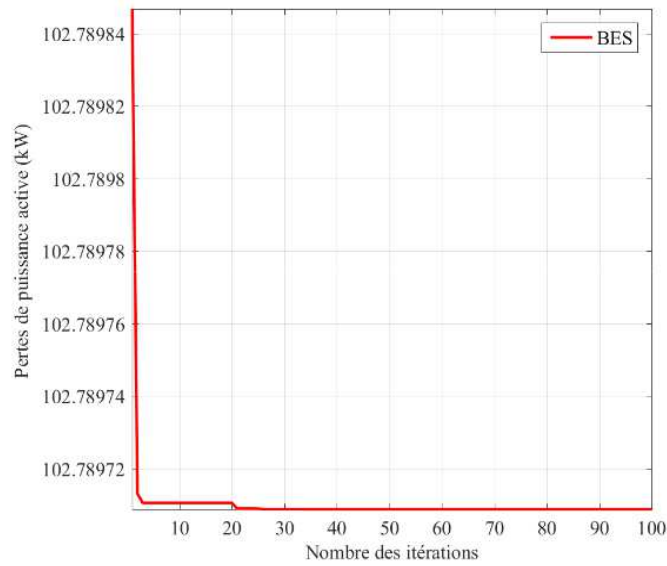


Figure 3.4 : Courbe de convergence de BES du réseau IEEE 33 jeux de barres (Cas 2)

La Figure 3.5 compare sur la même courbe de profil de tension du réseau IEEE 33 jeux de barres sans et avec l’insertion d’une DG. Il est clair, d’après cette figure, que le profil de tension est amélioré après l’intégration d’une DG.

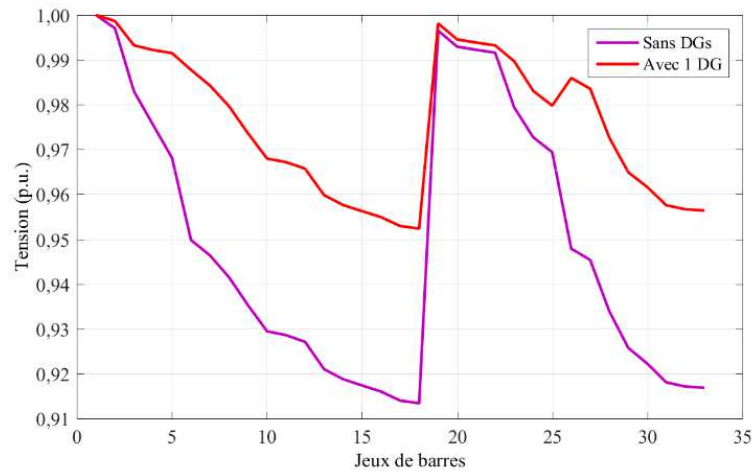


Figure 3.5 : Profil de tension du réseau IEEE 33 jeux de barres (Cas 2)

La Figure 3.6 représente les pertes de puissance active au niveau de chaque branche du réseau IEEE 33 jeux de barres. Les pertes totales active sont de l’ordre de 102.7897 kW.

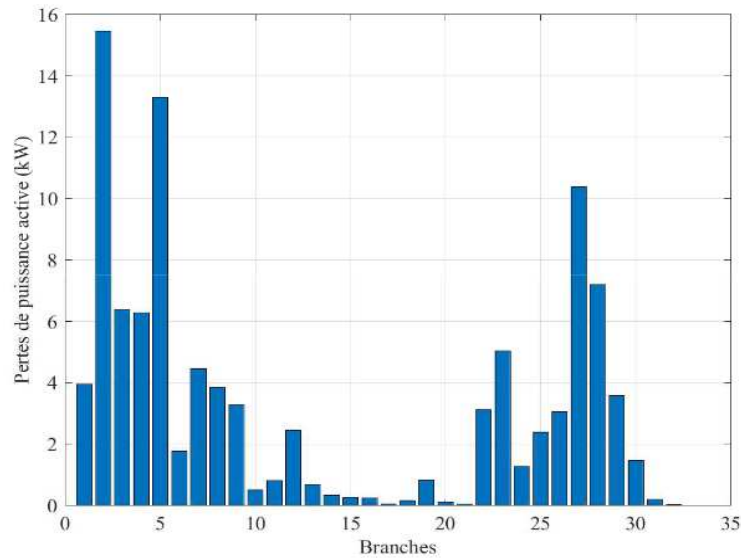


Figure 3.6 : Pertes de puissance active dans le réseau IEEE 33 jeux de barres (Cas 2)

Le tableau 3.4 représente les résultats de l’optimisation obtenus par l’application de l’algorithme BES. L’emplacement optimal de la DG est au niveau du jeu de barres numéro 6. La taille optimale de cette DG est égale à 2.5887 MW. Les pertes de puissance active du réseau sont diminuées de 49.0869 % par rapport au premier cas.

Les résultats de comparaison de BES avec d’autres algorithmes, montrent l’efficacité de l’algorithme BES dans l’optimisation de l’emplacement et de la taille des DGs.

Tableau 3.4 : Résultats de simulation du réseau IEEE 33 jeux de barres (Cas 2)

Cas étudié	Méthode d’optimisation	Emplacement optimal	Taille total des DGs (MW)	Pertes de puissance active (kW)	Réduction des pertes (%)
Cas 2 : 1 DG	BES	6	2.5887	102.7897	49.0869
	AEO [25]	6	2.5900	111.0100	47.3300
	SKHA [26]	6	2.5902	111.0188	47.3814
	PSO [27]	6	2.5900	111.0300	47.3800

3.2.1.3 Cas 3 : Avec intégration de deux DGs

Dans ce troisième cas, deux DGs sont intégrées au réseau IEEE 33 jeux de barres. La figure 3.7 représente la courbe de convergence de l’algorithme BES pour cas de l’intégration de deux DGs.

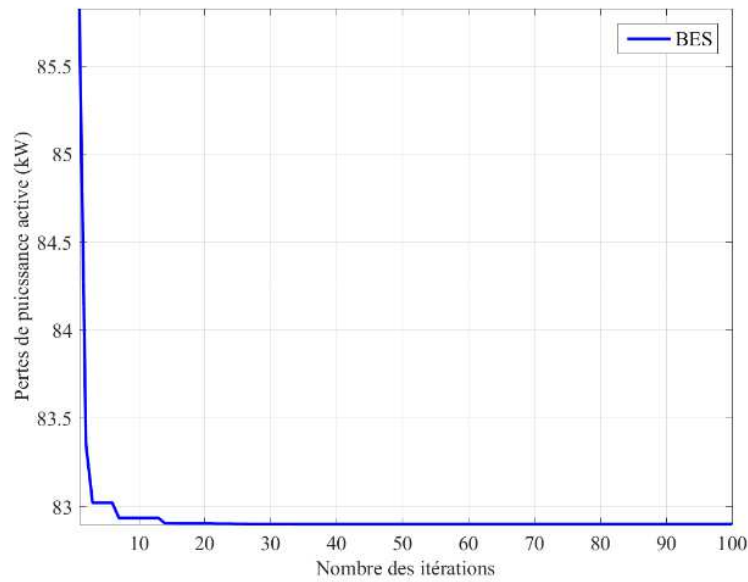


Figure 3.7 : Caractéristique de convergence de BES du réseau IEEE 33 jeux de barres (Cas 3)

La figure 3.8 représente les profils de tension du réseau IEEE 33 jeux de barres sans, avec une DG et avec deux DGs. Il est clair, d'après cette figure, que l'insertion de deux DGs améliore le profil de tension du réseau mieux qu'une seule DG.

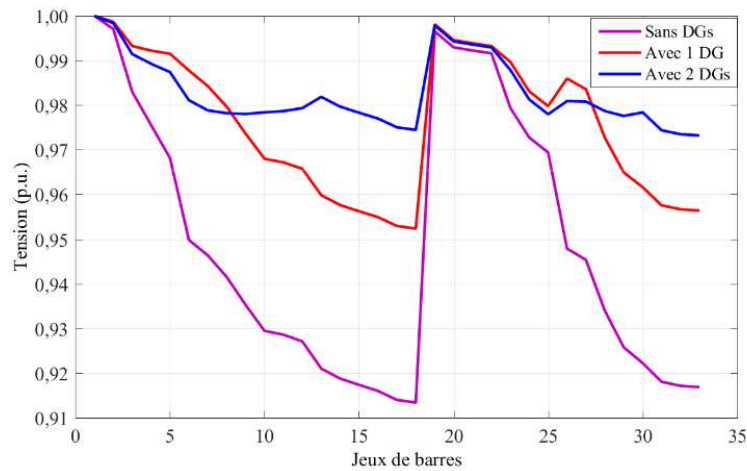


Figure 3.8 : Profile de tension du réseau IEEE 33 jeux de barres (Cas 3)

La figure 3.9 représente les pertes de puissance active au niveau de chaque branche du réseau IEEE 33 jeux de barres. Les pertes de puissance active totale sont de l'ordre de 82.8988 kW.

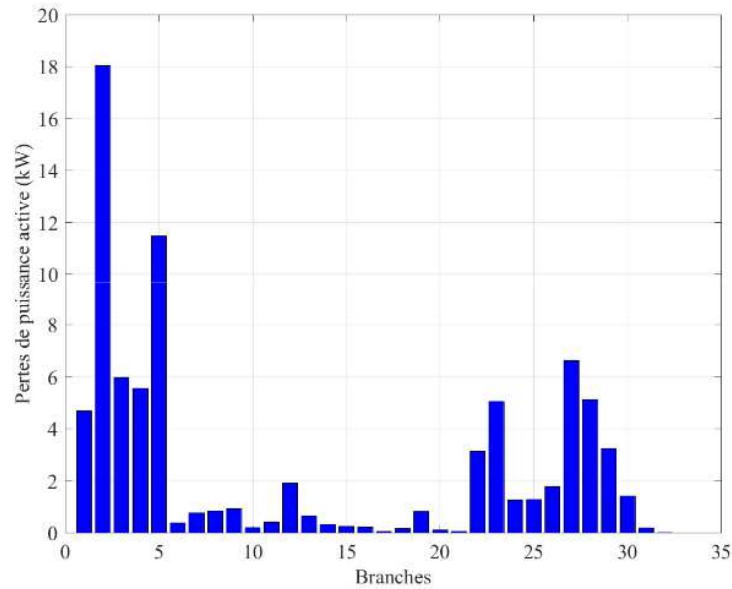


Figure 3.9 : Pertes de puissance active dans le réseau IEEE 33 jeux de barres (Cas 3)

Le tableau 3.5 représente les résultats de l’optimisation par l’application de l’algorithme BES, l’emplacement optimal des DGs est au niveau des jeux de barres numéro 13 et 30. Les tailles optimales sont, respectivement, 0.8499 MW et 1.1919 MW. Les pertes de puissance active du réseau sont diminuées de 58.9391 % par rapport au premier cas.

La comparaison des résultats de l’algorithme BES avec d’autres algorithmes, montrent l’efficacité de l’algorithme BES dans l’optimisation de l’emplacement et de la taille des DGs.

Tableau 3.5 : Résultats de simulation du réseau IEEE 33 jeux de barres (Cas 3)

Cas étudié	Méthode d’optimisation	Emplacement optimal des DGs	Taille optimale des DGs (MW)	Taille total des DGs (MW)	Pertes de puissance active (kW)	Réduction des pertes (%)
Cas 3 : 2 DGs	BES	13	0.8499	2.0418	82.8988	58.9391
		30	1.1919			
	AEO [25]	13	0.8500	2.0000	87.1600	58.6800
		30	1.1500			
	SKHA [26]	13	0.8516	2.0091	87.1656	58.6869
		30	1.1575			
PSO [27]	13	0.8500	2.0100	87.1700	58.6900	
	30	1.1600				

3.2.1.4 Cas 4 : Avec intégration de trois DGs

La figure 3.10 représente la caractéristique de convergence de l’algorithme BES dans le quatrième Cas.

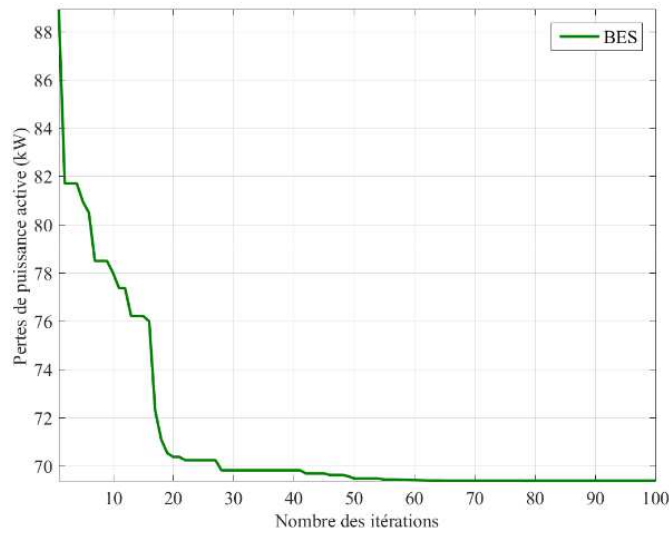


Figure 3.10 : Courbe de convergence de BES du réseau IEEE 33 jeux de barres (Cas 4)

La Figure 3.11 représente le profil de tension après l’intégration de trois DGs. Il est clair, d’après cette figure, que le profil de tension est amélioré. Le meilleur profil de tension est obtenu par l’intégration de trois DGs.

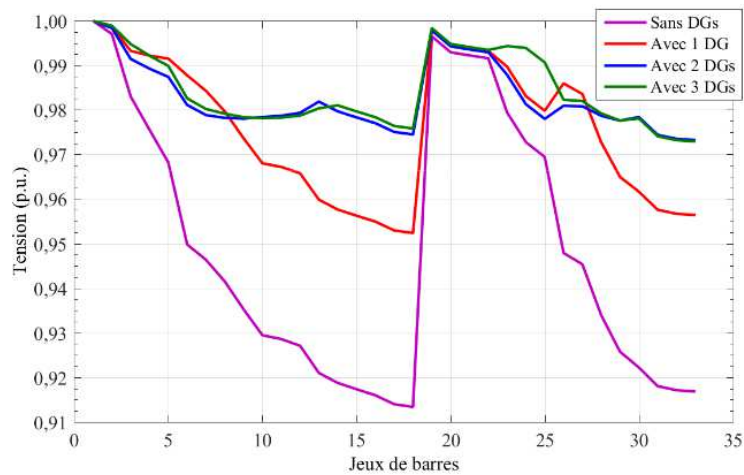


Figure 3.11 : Profile de tension du réseau IEEE 33 jeux de barres (Cas 4)

La Figure 3.12 représente les pertes de puissance active au niveau de chaque branche du réseau après l’intégration de trois DGs. Les pertes active totales sont égales à 69.3833 kW.

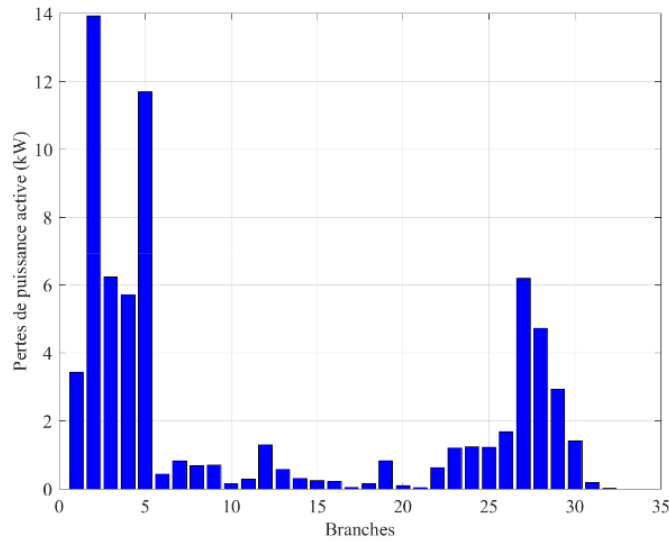


Figure 3.12 : Pertes de puissance active dans le réseau IEEE 33 jeux de barres (Cas 4)

Les résultats d’optimisation sont représentés sur le Tableau 3.4. Les jeux de barres 14, 24 et 30 sont obtenues comme les meilleurs emplacements pour l’installation des DGs. Les tailles optimales de ces DGs sont, respectivement, 0.7589 MW, 1.0708 MW et 1.1000 MW. Les pertes de puissance active du réseau sont diminuées de 65.6335 % par rapport au premier cas.

Les résultats de comparaison de BES avec d’autres algorithmes, montrent l’efficacité de l’algorithme BES dans l’optimisation de l’emplacement et de la taille des DGs.

Tableau 3.6 : Résultats de simulation du réseau IEEE 33 jeux de barres (Cas 4)

Cas étudié	Méthode d’optimisation	Emplacement optimal des DGs	Taille optimal des DGs (MW)	Taille total des DGs (MW)	Pertes de puissance active (kW)	Réduction des pertes (%)
Cas 4: 3 DGs	BES	14	0.7589	2.9297	69.3833	65.6335
		24	1.0708			
		30	1.1000			
	AEO [25]	13	0.8000	2.9400	72.7800	65.5000
		24	1.0900			
		30	1.0500			
	HHO [28]	14	0.7400	2.8900	72.9800	65.4000
		24	1.0200			
		30	1.1300			
	IHHO [28]	14	0.7700	2.9100	72.7900	65.5000
		24	1.0800			
		30	1.0600			
	CSCA [29]	13	0.8700	2.9100	71.9400	64.5000
		24	1.0900			
		30	0.9500			
SFSa [13]	13	0.8000	2.9400	72.8700	65.5000	
	24	1.0900				
	30	1.0500				

	CTLBO [30]	13	0.8000	2.9400	72.7800	65.5000
		24	1.0900			
		30	1.0500			
	SKHA [31]	13	0.8018	2.9468	72.7853	65.5026
		24	1.0914			
		30	1.0536			
	PSO [27]	14	0.7700	2.9300	72.7900	65.5000
		24	1.0900			
		30	1.0700			

3.2.2 Application au réseau test IEEE 69 jeux de barres

Les caractéristiques du réseau de distribution IEEE 69 jeux de barres de la Figure 3.13 sont données comme suit [31] :

- Nombre de jeux de barres =69 ;
- Nombre de branches =68 ;
- Jeu de barres de référence N° =1 ;
- Puissance de base = 100 MVA ;
- Tension de base =12,66 kV ;
- Les puissances active et réactive totale demandées du réseau sont 3.8019 MW et 2.6941 MVAR.

Les données du réseau test sont présentées dans l’annexe.

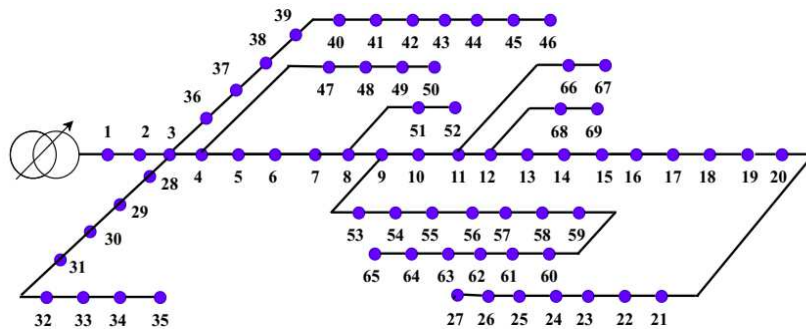


Figure 3.13 : Représentation simplifiée du réseau de distribution IEEE 69 jeux de barres

Le Tableau 3.7 représente le type de chaque jeu de barres et de chaque ligne constituant le réseau de distribution IEEE 69 jeux de barres.

Tableau 3.7: Identification de la topologie du réseau de distribution IEEE 69 Jeux de barres

JB de référence	1
JB terminaux	27, 35, 46, 50, 52, 65, 67,69
JB intermédiaires	2, 5, 6, 7, 10, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 47, 48, 49, 51, 53,54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 66, 68.

JB communs	3, 4, 8, 9, 11, 12
Ligne principale	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27
Lignes latérales	3, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35
	3, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46
	4, 47, 48, 49, 50
	8, 51, 52
	9, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65
	11, 66, 67
	12, 68, 69

3.2.2.1 Cas 1 : Sans intégration de DG

La Figure 3.14 représentent le module de tension au niveau de chaque jeu de barres. La valeur de tension la plus basse est 0.9102 p.u. qui se trouve au niveau du jeu de barres 65.

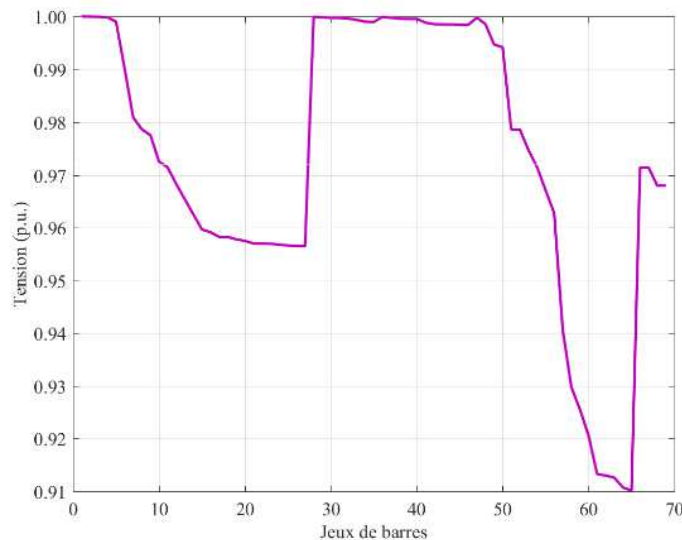
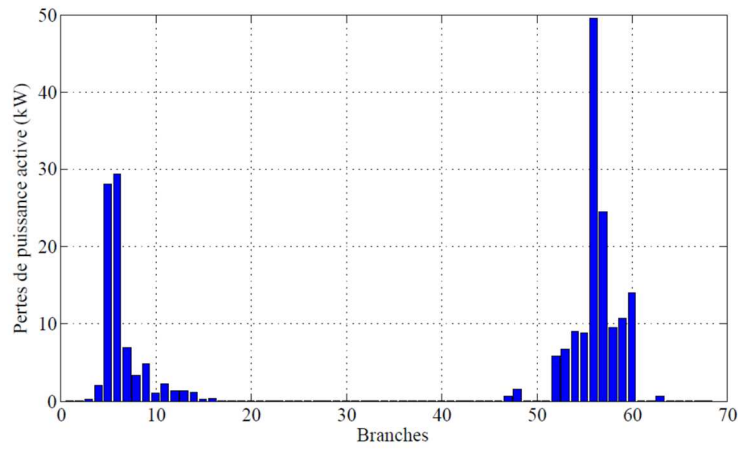
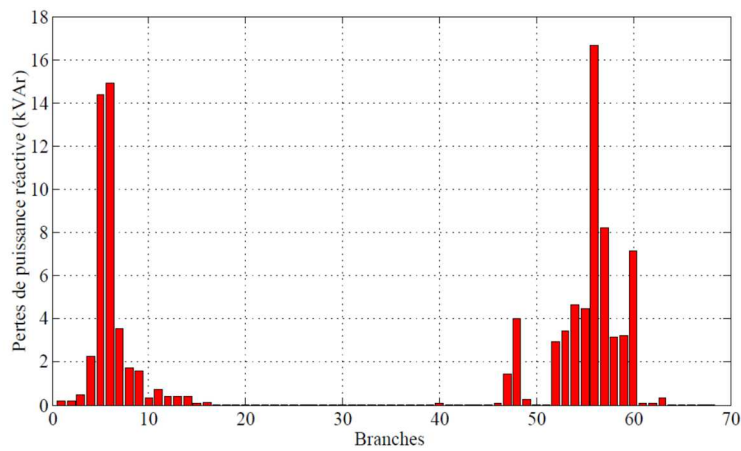


Figure 3.14 : Profile de tension du réseau IEEE 69 jeux de barres

La figure 3.15 a et b représente les pertes de puissance active et réactive au niveau de chaque branche. Les plus grandes valeurs de pertes de puissance active 49.5807 kW et réactive 16.6423 kVAr sont apparues au niveau de la 56^{ème} branche. Cela est justifié par les valeurs du courant ainsi que les caractéristiques (résistance et réactance) de chaque branche. Les pertes totales active et réactive du réseau sont respectivement 224.5533 kW et 101.9725 kVAr représentant 5.90 % et 3.78 % de la puissance demandée.



a. Pertes de puissance active



b. Pertes de puissance réactive

Figure 3.15: Pertes de puissances active et réactive dans les branches du réseau IEEE 69 jeux de barres (Cas 1)

La Figure 3.14 représente le profil de tension du réseau IEEE 69 jeux de barres sans intégration de DGs. On remarque que la valeur de la tension la plus basse est 0.9102 p.u. qui se trouve au niveau du jeu de barres 65. Cette valeur est inférieure à la limite admissible de tension 0.95 p.u.

3.2.2.2 Cas 2 : Avec intégration d’une DG

La Figure 3.16 représente la caractéristique de convergence de l’algorithme BES. La Figure 3.17 compare les profils de tension avant et après l’insertion d’une DG. Il est clair, d’après cette figure, que le profil de tension est amélioré après l’intégration d’une DG.

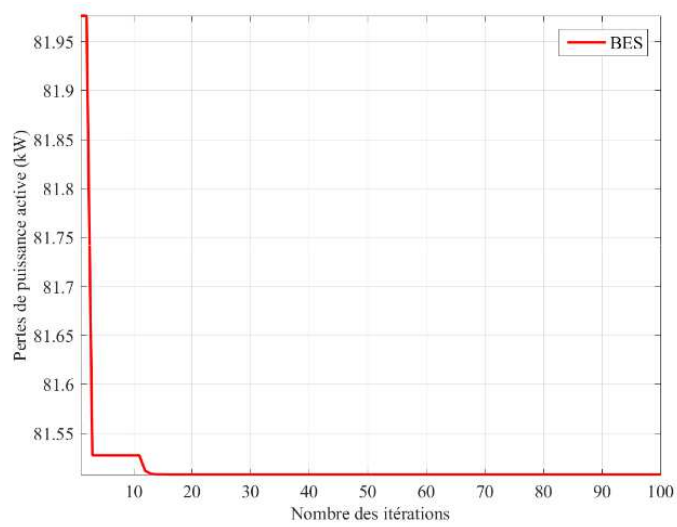


Figure 3.16 : Courbe de convergence de BES du réseau IEEE 69 jeux de barres (Cas 2)

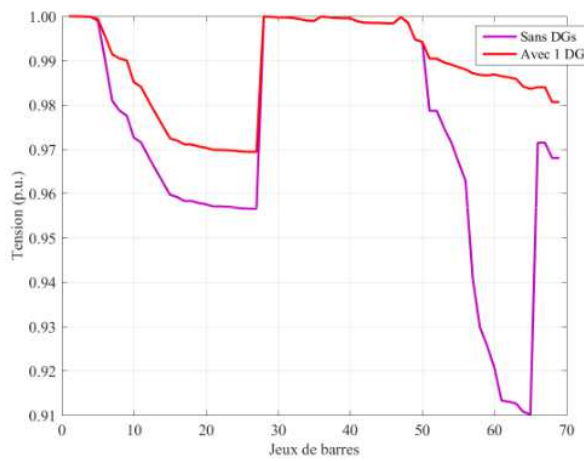


Figure 3.17 : Profile de tension du réseau IEEE 69 jeux de barres (Cas 2)

La Figure 3.18 représente les pertes de puissance active au niveau de chaque branche du réseau IEEE 69 jeux de barres. Les pertes totales de la puissance active sont de l'ordre de 81.5076 kW.

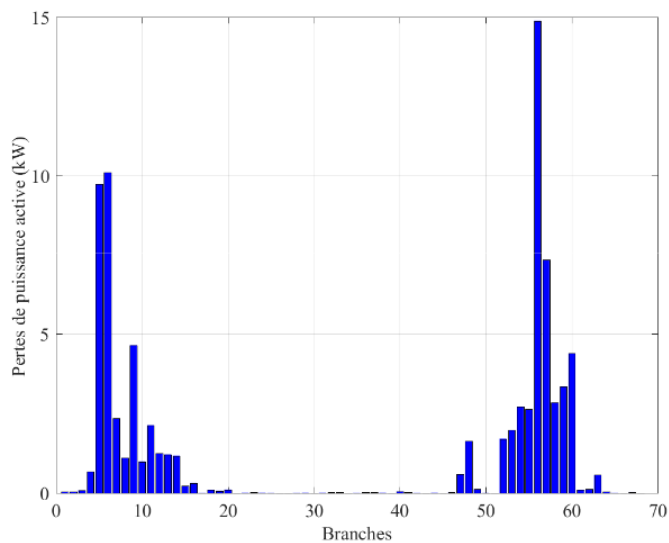


Figure 3.18 : Pertes de puissance active dans le réseau IEEE 69 jeux de barres (Cas 2)

Le Tableau 3.8 montre les résultats d’optimisation obtenus par l’algorithme BES. L’emplacement optimal de DG est au niveau du jeu de barres numéro 61. La taille optimale de cette DG est 1.8889 MW. Les pertes de puissance active du réseau sont diminuées de 63.7023 % par rapport au premier cas.

Les résultats de comparaison de BES avec d’autres méthodes, montrent l’efficacité de l’algorithme BES dans l’optimisation de l’emplacement et de la taille des DGs.

Tableau 3.8 : Résultats de simulation du réseau IEEE 69 jeux de barres (Cas 2)

Cas étudié	Méthode d’optimisation	Emplacement optimal des DGs	Taille total des DGs (MW)	Pertes de puissance active (kW)	Réduction des pertes (%)
Cas 2: 1 DG	BES	61	1.8889	81.5076	63.7023
	AEO [25]	61	1.8700	83.1700	63.0200
	SKHA [26]	61	1.8646	81.6003	62.9988
	PSO [27]	61	1.8700	83.2200	63.0100

3.2.2.3 Cas 3 : Avec intégration de deux DGs

La Figure 3.19 représente la courbe de convergence de l’algorithme BES dans le cas de deux DGs. La Figure 3.20 représente une comparaison entre les profils de tension sans et après l’intégration d’une et de deux DGs. Comme il est montré dans cette figure, le meilleur profil de tension est obtenu après l’intégration de deux DGs.

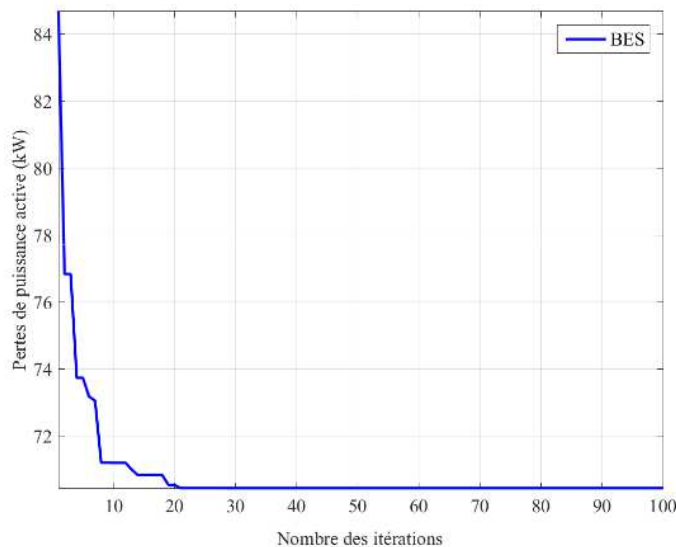


Figure 3.19 : Courbe de convergence de BES du réseau IEEE 69 jeux de barres (Cas 3)

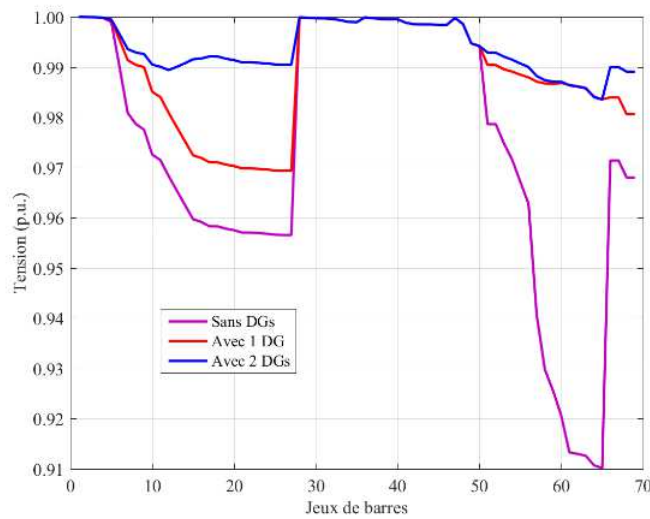


Figure 3.20 : Profile de tension du réseau IEEE 69 jeux de barres (Cas 3)

La Figure 3.21 représente les pertes de puissance active dans le réseau IEEE 69 jeux de barres. Les pertes totales de la puissance active sont égales à 70.4376 kW.

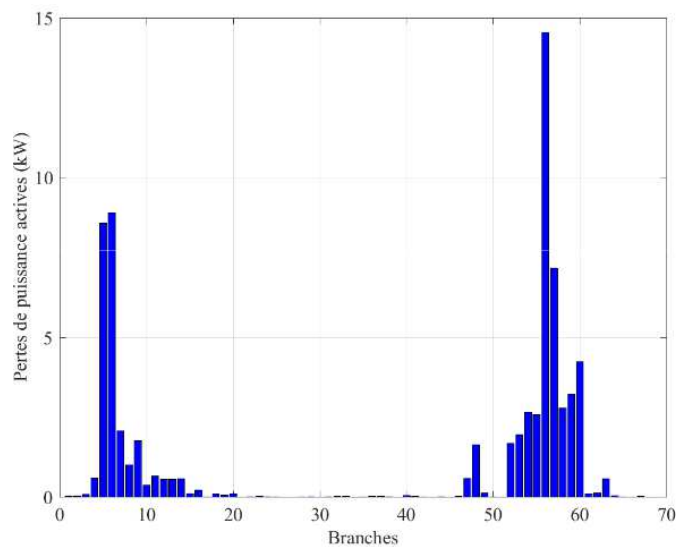


Figure 3.21 : Pertes de puissance active dans le réseau IEEE 69 jeux de barres (Cas 3)

Le Tableau 3.9 représente les résultats de l’optimisation de l’algorithme BES. Les emplacements optimaux des DGs sont aux niveaux des jeux de barres 17 et 61. Les tailles optimales sont, respectivement, 0.5244 MW et 1.7957 MW. Les pertes de puissance active du réseau sont diminuées de 68.6321 % par rapport au premier cas.

La comparaison de l’algorithme BES avec d’autres algorithmes, montre la supériorité de l’algorithme BES.

Tableau 3.9 : Résultats de simulation du réseau IEEE 69 jeux de barres (Cas 3)

Cas étudié	Méthode d'optimisation	Emplacement optimal des DGs	Taille optimal des DGs (MW)	Taille total des DGs (MW)	Pertes de puissance active (kW)	Réduction des pertes (%)
Cas 3: 2 DG	BES	17	0.5244	2.3201	70.4376	68.6321
		61	1.7957			
	AEO [25]	17	0.5300	2.4000	71.6400	68.1500
		61	1.8700			
	SKHA [26]	17	0.5229	2.3018	70.4092	68.0733
		61	1.7789			
	PSO [27]	17	1.8700	2.3100	71.6800	68.1400
		61	0.5300			

3.2.2.4 Cas 3 : Avec intégration de trois DGs

La figure 3.22 représente la caractéristique de convergence de l’algorithme BES dans ce quatrième cas. La figure 3.23 représente le profil de tension après l’intégration de trois DGs. Il est clair, d’après ces figures, que le profil de tension est amélioré après l’intégration des DGs et le meilleur profil de tension est obtenu par l’intégration de trois DGs.

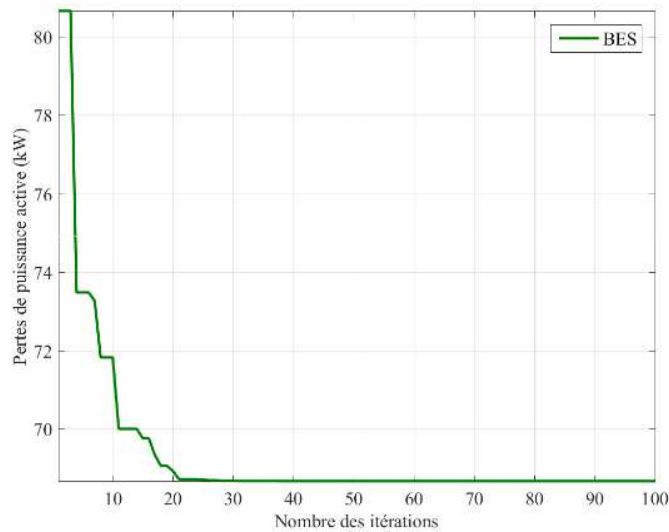


Figure 3.22 : Caractéristique de convergence de BES du réseau IEEE 69 jeux de barres (Cas 4)

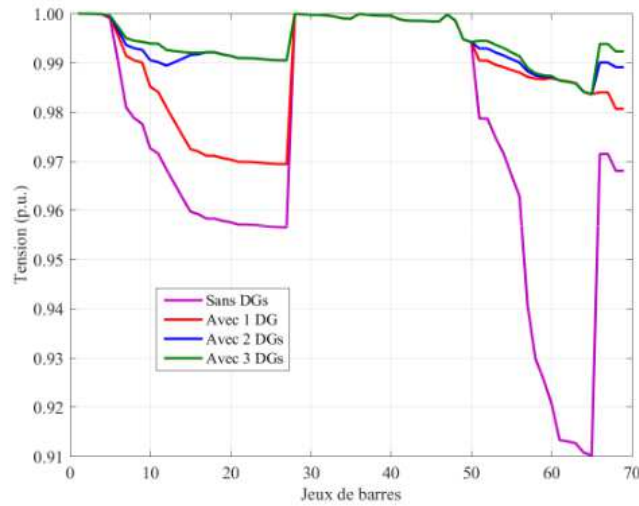


Figure 3.23 : Profile de tension du réseau IEEE 69 jeux de barres (Cas 4)

La Figure 3.24 représente les pertes de puissance active au niveau de chaque branche du réseau IEEE 69 jeux de barres. La somme des pertes actives est égale à 68.6606 kW.

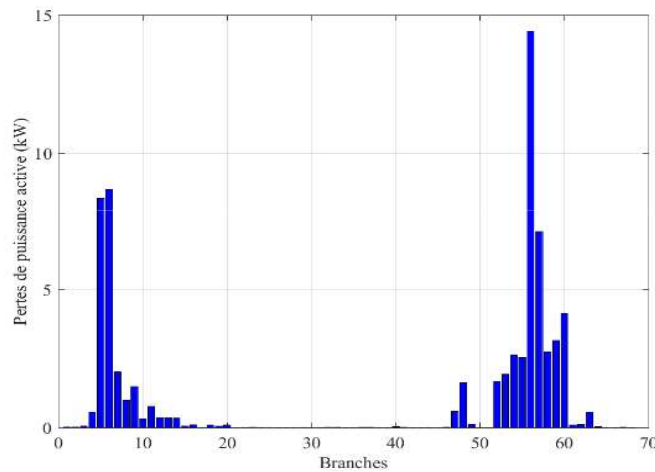


Figure 3.24 Pertes de puissance active dans le réseau IEEE 69 jeux de barres (Cas 4)

Le Tableau 3.10 représente les résultats d’optimisation obtenus par l’application de l’algorithme BES. Les emplacements optimaux des DGs sont aux niveaux des jeux de barres numéro 11, 18 et 61. Les tailles optimales sont, respectivement, 0.4723 MW, 0.3879 MW et 1.7380 MW. Les pertes de puissance active du réseau sont diminuées de 69.4235 %.

Les résultats de comparaison de BES avec d’autres méthodes montrent l’efficacité de l’algorithme BES dans l’optimisation de l’emplacement et de la taille des DGs.

Tableau 3.10 : Résultats de simulation du réseau IEEE 69 jeux de barres (Cas 4)

Cas étudiés	Méthode d'optimisation	Emplacement optimal des DGs	Taille optimal des DGs (MW)	Taille total des DGs (MW)	Pertes de puissance active (kW)	Réduction des pertes (%)
Cas 4: 3 DGs	BES	11	0.4723	2.5982	68.6606	69.4235
		18	0.3879			
		61	1.7380			
	AEO [25]	11	0.52	2.6000	69.3900	69.1500
		18	0.37			
		61	1.71			
	HHO [28]	11	0.37	2.5500	69.7300	69.0000
		17	0.48			
		61	1.70			
	IHHO [28]	11	0.52	2.6100	69.4100	69.1500
		17	0.38			
		61	1.71			
	CSCA [29]	17	0.36	2.6800	70.0700	68.8500
		61	1.67			
		67	0.65			
	SFSA [13]	11	0.52	2.6100	69.4200	69.1400
		18	0.38			
		61	1.71			
	CTLBO [30]	11	0.52	2.6100	69.3800	69.1500
		18	0.38			
		61	1.7191			
	SKHA [31]	11	0.5272	2.6172	68.1523	69.0967
		17	0.3709			
		61	1.71			
	PSO [27]	11	0.51	2.5600	69.5400	69.0600
		17	0.38			
		61	1.67			

3.3 Conclusion

Tout au long de ce chapitre, nous avons évalué par simulations les performances de l'algorithme de pygargue à tête blanche ((Baled Eagle Search(BES)) par rapport à d'autres algorithmes connus.

Les résultats de simulations ont montré que l'optimisation de l'emplacement et de la taille des DGs (1 DG, 2 DGs et 3 DGs) permet d'améliorer l'utilisation globale de l'énergie en réduisant de manière considérable les pertes de puissance active dans le réseau de distribution. Ces résultats ont, également, prouvé la performance de la méthode d'optimisation BES en comparaisant avec d'autres méthodes.

Conclusion générale

L'intégration optimale de la production décentralisée (Distributed Generation (DG)) dans le réseau de distribution, des techniques utilisées pour la planification optimale des réseaux de distribution dans l'objectif de minimiser les pertes totales de puissance en assurant un bon profil de tension, sont réalisées en se basant sur l'optimisation par une méthode métaheuristique dite algorithme de pygargue à tête blanche (Bald Eagle Search (BES)) pour optimiser l'emplacement et la taille des DGs. Cet algorithme selon une comparaison faite entre différentes méthodes métaheuristicques permet de réaliser un bon compromis efficacité et taux de réussite pour trouver rapidement la solution la plus proche de l'optimum.

Le premier chapitre de ce mémoire présente une vue générale sur les réseaux électriques. Dans un premier temps, nous avons présenté la structure des réseaux électriques conventionnels. Ensuite, nous avons exposé les différentes technologies de la production de l'énergie à travers des sources renouvelables. Enfin, nous avons passé en revue les impacts de l'intégration de ces types des sources d'énergie au réseau électrique.

Dans le deuxième chapitre, nous avons parlé de concept des méthodes d'optimisation. Ensuite, nous avons présenté la méthode d'optimisation BES pour l'optimisation de l'insertion de production distribuée (Distributed Generation (DG)) dans les réseaux de distribution. L'objectif principal de cette méthode est de trouver les meilleurs emplacement et taille des DGs pour avoir le minimum possible des pertes de puissance active dans le réseau.

Dans le troisième chapitre, l'algorithme BES est examinée et validée sur deux réseaux test : le réseau IEEE-33 jeux de barres et le réseau IEEE-69 jeux de barres. Les résultats obtenait montrent l'efficacité de cette méthode d'optimisation.

De nombreuses perspectives s'ouvrent dans l'avenir à savoir, parmi lesquelles on peut citer :

- Utilisation des techniques d'optimisation pour l'amélioration de performance du réseau électrique en présence des véhicules électriques, des batteries de stockage, des maisons intelligente et d'autres technologies du Smart Grids.
- Le développement de nouvelles méthodes d'optimisation pour l'optimisation de l'intégration des DGs aux réseaux de distribution.

Bibliographie

- [1] D. Labeled, “Production décentralisée et couplage au réseau”, Thèse de doctorat, Université de Constantine, 2008.
- [2] W. C. B. Vicente, “Modélisation des réseaux de distribution sous incertitude”, Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2012.
- [3] V. Gouin, “Evaluation de l’impact du Smart Grid sur les pratiques de planification en cas d’insertion de production décentralisée et de charges flexibles”, Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2015.
- [4] N. Ketfi, “Contribution à la gestion des réseaux de distribution en présence de génération d’énergie dispersée”, Thèse de doctorat, Université de Batna, 2014.
- [5] G. Guerard, “Optimisation de la diffusion de l’énergie dans les Smart Grids”, Thèse doctorat, Ecole doctorale sciences et technologies, Université de Versailles, France, 2014.
- [6] S. Touré, “Optimisation des réseaux : réseau actif et flexible”, Thèse de doctorat, Grenoble, 2014.
- [7] H. Kanchev, “Gestion des flux énergétiques dans un système hybride de sources d’énergie renouvelable : Optimisation de la planification opérationnelle et ajustement d’un micro réseau électrique urbain ”, Thèse de doctorat Ecole Centrale de Lille, 2014.
- [8] B. Naama, “La production décentralisée”, Polycopie du cours, Université des Sciences et de la Technologie d’Oran-Mohamed Boudiaf, 2017.
- [9] Global Electricity Review 2022, Ember, Mars 2022.
- [10] T. T. H. Phan, “Influences de la production décentralisée sur la gestion des infrastructures critiques des réseaux de puissance”, Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2006.
- [11] M. Hérault, “Architectures des réseaux de distribution du futur en présence de production décentralisée ”, Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2009.
- [12] A. Boukaroura, “Contribution à la modélisation et à l’optimisation des réseaux de distribution sous incertitudes”, Thèse de doctorat, Université de Oum El Bouaghi, 2021.
- [13] M. Kefayat, A. Lashkar Ara, and S. A. Nabavi Niaki, “A hybrid of ant colony optimization and artificial bee colony algorithm for probabilistic optimal placement and sizing of distributed energy resources”, *Energy Conversion and Management*, Vol. 92, pp. 149–161, 2015.
- [14] T. P. Nguyen and D. N. Vo, “A novel stochastic fractal search algorithm for optimal allocation of distributed generators in radial distribution systems”, *Applied Soft Computing*, Vol. 70, pp. 773–796, 2018.
- [15] V. V. S. N. Murthy and A. Kumar, “Comparison of optimal DG allocation methods in radial distribution systems based on sensitivity approaches”, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 53, pp. 450–467, 2013.

- [16] L. Farida, “Optimisation du plan de tension et de la répartition de la puissance réactive par les techniques intelligentes hybrides améliorées”, Thèse de Docteur de l’Université de Skikda, 2019.
- [17] Z. Abdmouleh, A. Gastli, L. Ben-Brahim, M. Haouari, N. A. Al-Emadi, “Review of optimization techniques applied for the integration of distributed generation from renewable energy sources”, *Renewable Energy*, Vol. 113, pp. 266–280, 2017
- [18] Y. M. Atwa, E. F. El-Saadany, M. M. A. Salama and R. Seethapathy, “Optimal Renewable Resources Mix for Distribution System Energy Loss Minimization”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 25, No. 1, pp. 360–370, 2010.
- [19] K. Sorensen, M. Sevaux, F. Glover F, “A history of metaheuristics”, *Handbook of Heuristics*, Springer, 2-2, pp. 791–808, 2018.
- [20] O. Hajji, “Contribution au développement de méthodes d’optimisation stochastiques. Application à la conception des dispositifs Electrotechniques”, Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille, 2003.
- [21] F. Glover, “Tabu search - part I”, *ORSA Journal on Computing*, Vol. 1, No. 3, pp. 190–206, 1989.
- [22] O. Herbadji, “Contribution à l’optimisation des réseaux électriques en présence des Multi-FACTS par des méthodes méta-heuristiques hybrides”, Thèse de doctorat, Université de Sétif, 2019.
- [23] J. Holland, “Adaptation in natural and artificial systems university of Michigan Press”. Ann Arbor, 1975.
- [24] R. Eberhart, and J. Kennedy, “Particle Swarm Optimization”, *Proc of IEEE International Conf. on Neural Networks*, Vol. 4, pp. 1942-1948, 1995.
- [25] A. Alsattar, A. Zaidan, B. Zaidan, “Novel meta-heuristic bald eagle search optimization algorithm”, *Artif Intell Rev*, Vol. 53, pp. 2237–2264, 2020.
- [26] M. E. Baran and F. F. Wu, “Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 4, No. 2, pp. 1401–1407, 1989.
- [27] A. Eid, S. Kamel, A. Korashy and T. Khurshaid, “An Enhanced Artificial Ecosystem-Based Optimization for Optimal Allocation of Multiple Distributed Generations”, *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 178493–178513, 2020.
- [28] S. A. Chithra Devi, L. Lakshminarasimman and R. Balamurugan, “Stud Krill herd Algorithm for multiple DG placement an sizing in a radial distribution system”, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Vol. 20, No. 2, pp. 748–759, 2017.
- [29] S. Kansal, V. Kumar and B. Tyagi, “Hybrid approach for optimal placement of multiple DGs of multiple types in distribution networks”, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2016, Vol. 75, pp. 226–235, 2016.

- [30] A. Selim, S. Kamel, A. S. Alghamdi and F. Jurado, “Optimal Placement of DGs in Distribution System Using an Improved Harris Hawks Optimizer Based on Single- and Multi-Objective Approaches”, *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 52815–52829, 2020.
- [31] A. Selim, S. Kamel and F. Jurado, “Efficient optimization technique for multiple DG allocation in distribution networks”, *Applied Soft Computing Journal*, Vol. 86, 105938, 2019.
- [32] I. A. Quadri, S. Bhowmick and D. Joshi, “A comprehensive technique for optimal allocation of distributed energy resources in radial distribution systems”, *Applied Energy*, Vol. 211, pp. 1245–1260, 2018.
- [33] A. Khodabakhshian and M. H. Ardishgar, “Simultaneous placement and sizing of DGs and shunt capacitors in distribution systems by using IMDE algorithm”, *International Journal of Electric Power and Energy Systems*, Vol. 82, pp. 599–607, 2016.

Annexe

Tableau A.1 : Caractéristiques techniques des branches du réseau de distribution IEEE 33 jeux de barres

Branche N°.	Jeu de barres de départ	Jeu de barres d'arrivée	Résistance (Ω)	Réactance (Ω)
1	1	2	0.0922	0.0470
2	2	3	0.4930	0.2512
3	3	4	0.3661	0.1864
4	4	5	0.3811	0.1941
5	5	6	0.8190	0.7070
6	6	7	0.1872	0.6188
7	7	8	0.7115	0.2351
8	8	9	1.0299	0.7400
9	9	10	1.0440	0.7400
10	10	11	0.1967	0.0651
11	11	12	0.3744	0.1298
12	12	13	1.4680	1.1549
13	13	14	0.5416	0.7129
14	14	15	0.5909	0.5260
15	15	16	0.7462	0.5449
16	16	17	1.2889	1.7210
17	17	18	0.7320	0.5739
18	2	19	0.1640	0.1565
19	19	20	1.5042	1.3555
20	20	21	0.4095	0.4784
21	21	22	0.7089	0.9373
22	3	23	0.4512	0.3084
23	23	24	0.8980	0.7091
24	24	25	0.8959	0.7071
25	6	26	0.2031	0.1034
26	26	27	0.2842	0.1447
27	27	28	1.0589	0.9338
28	28	29	0.8043	0.7006
29	29	30	0.5074	0.2585
30	30	31	0.9745	0.9629
31	31	32	0.3105	0.3619
32	32	33	0.3411	0.5302

Tableau A.2 : Caractéristiques techniques des jeux de barres du réseau de distribution IEEE 33 jeux de barres

Jeu de barres N°.	P (MW)	Q (MVA _r)
1	0	0
2	0.1000	0.0600
3	0.0900	0.0400
4	0.1200	0.0800
5	0.0600	0.0300
6	0.0600	0.0200
7	0.2000	0.1000
8	0.2000	0.1000
9	0.0600	0.0200
10	0.0600	0.0200
11	0.0450	0.0300
12	0.0600	0.0350
13	0.0600	0.0350
14	0.1200	0.0800
15	0.0600	0.0100
16	0.0600	0.0200
17	0.0600	0.0200
18	0.0900	0.0400
19	0.0900	0.0400
20	0.0900	0.0400
21	0.0900	0.0400
22	0.0900	0.0400
23	0.0900	0.0500
24	0.4200	0.2000
25	0.4200	0.2000
26	0.0600	0.0250
27	0.0600	0.0250
28	0.0600	0.0200
29	0.1200	0.0700
30	0.2000	0.6000
31	0.1500	0.7000
32	0.2100	0.1000
33	0.0600	0.0400

Tableau A.3 : Caractéristiques techniques des branches du réseau de distribution IEEE 69 jeux de barres

Branche N°.	Jeu de barres de départ	Jeu de barres d'arrivée	Résistance (Ω)	Réactance (Ω)
1	1	2	0.0005	0.0012
2	2	3	0.0005	0.0012
3	3	4	0.0015	0.0036
4	4	5	0.0251	0.0294
5	5	6	0.3660	0.1864
6	6	7	0.3811	0.1941
7	7	8	0.0922	0.0470
8	8	9	0.0493	0.0251
9	9	10	0.8190	0.2707
10	10	11	0.1872	0.0619
11	11	12	0.7114	0.2351
12	12	13	1.0300	0.3400
13	13	14	1.0440	0.3450
14	14	15	1.0580	0.3496
15	15	16	0.1966	0.0650
16	16	17	0.3744	0.1238
17	17	18	0.0047	0.0016
18	18	19	0.3276	0.1083
19	19	20	0.2106	0.0690
20	20	21	0.3416	0.1129
21	21	22	0.0140	0.0046
22	22	23	0.1591	0.0526
23	23	24	0.3463	0.1145
24	24	25	0.7488	0.2475
25	25	26	0.3089	0.1021
26	26	27	0.1732	0.0572
27	3	28	0.0044	0.0108
28	28	29	0.0640	0.1565
29	29	30	0.3978	0.1315
30	30	31	0.0702	0.0232
31	31	32	0.3510	0.1160
32	32	33	0.8390	0.2816
33	33	34	1.7080	0.5646
34	34	35	1.4740	0.4873
35	3	36	0.0044	0.0108
36	36	37	0.0640	0.1565

37	37	38	0.1053	0.1230
38	38	39	0.0304	0.0355
39	39	40	0.0018	0.0021
40	40	41	0.7283	0.8509
41	41	42	0.3100	0.3623
42	42	43	0.0410	0.0478
43	43	44	0.0092	0.0116
44	44	45	0.1089	0.1373
45	45	46	0.0009	0.0012
46	4	47	0.0034	0.0084
47	47	48	0.0851	0.2083
48	48	49	0.2898	0.7091
49	49	50	0.0822	0.2011
50	8	51	0.0928	0.0473
51	51	52	0.3319	0.1114
52	9	53	0.1740	0.0886
53	53	54	0.2030	0.1034
54	54	55	0.2842	0.1447
55	55	56	0.2813	0.1433
56	56	57	1.5900	0.5337
57	57	58	0.7837	0.2630
58	58	59	0.3042	0.1006
59	59	60	0.3861	0.1172
60	60	61	0.5075	0.2585
61	61	62	0.0974	0.0496
62	62	63	0.1450	0.0738
63	63	64	0.7105	0.3619
64	64	65	1.0410	0.5302
65	11	66	0.2012	0.0611
66	66	67	0.0047	0.0014
67	12	68	0.7394	0.2444
68	68	69	0.0047	0.0016

Tableau A.4 : Caractéristiques techniques des jeux de barres du réseau de distribution IEEE 69 jeux de barres

Jeu de barres N°.	P (MW)	Q (MVAr)
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	0
6	0.0026	0.0022
7	0.0404	0.0300
8	0.0750	0.0540
9	0.0300	0.0220
10	0.0280	0.0190
11	0.1450	0.1040
12	0.1450	0.1040
13	0.0080	0.0050
14	0.0080	0.0055
15	0	0
16	0.0455	0.0300
17	0.0600	0.0350
18	0.0600	0.0350
19	0	0
20	0.0010	0.0006
21	0.1140	0.0810
22	0.0050	0.0035
23	0	0
24	0.0280	0.0200
25	0	0
26	0.0140	0.0100
27	0.0140	0.0100
28	0.0260	0.0186
29	0.0260	0.0186
30	0	0
31	0	0
32	0	0
33	0.0140	0.0100
34	0.0195	0.0140
35	0.0060	0.0040
36	0.0260	0.0186
37	0.0260	0.0186

38	0	0
39	0.0240	0.0170
40	0.0240	0.0170
41	0.0012	0.0010
42	0	0
43	0.0060	0.0043
44	0	0
45	0.0392	0.0263
46	0.0392	0.0263
47	0	0
48	0.0790	0.0564
49	0.3847	0.2745
50	0.3847	0.2745
51	0.0405	0.0283
52	0.0036	0.0027
53	0.0043	0.0035
54	0.0264	0.0190
55	0.0240	0.0172
56	0	0
57	0	0
58	0	0
59	0.1000	0.0720
60	0	0
61	1.2440	0.8880
62	0.0320	0.0230
63	0	0
64	0.2270	0.1620
65	0.0590	0.0420
66	0.0180	0.0130
67	0.0180	0.0130
68	0.0280	0.0200
69	0.0280	0.0200

ملخص

مع الدمج المتزايد لمصادر الإنتاج اللامركزي للطاقة وخاصة الطاقات المتجددة في شبكات التوزيع الكهربائية، تحولت إلى هذه الأخيرة إلى شبكات نشطة يتم فيها التحكم في تدفقات الطاقة والجهد الكهربائي ليس فقط بواسطة المستهلك، بل وأيضاً بواسطة مصادر الطاقة. ومن أجل تقليل الضياعات في الطاقة الفعالة في شبكات التوزيع وتحسين الجهد، يجب تحديد بطريقة مثلى الموقع والحجم لتنصيب مصادر الطاقة اللامركزية. في هذه المذكرة، تم استخدام خوارزمية النسر الأصلع من أجل حل هذه المشكلة. هذه الخوارزمية التي تعتبر من الخوارزميات الجديدة المستوحاة من الطبيعة، يتم الإدراج الأمثل لمصادر الطاقة اللامركزية في شبكة التوزيع من حيث الموقع والحجم بهدف تقليل الضياعات في الطاقة الفعالة. لإثبات أداء خوارزمية النسر الأصلع، شبكتين توزيع كهربائيتين 33 عقدة و69 عقدة أستعملت كأنظمة إختبار. تؤكد النتائج التي تم الحصول عليها على نجاعة خوارزمية النسر الأصلع.

الكلمات المفتاحية : شبكات التوزيع، مصادر الإنتاج اللامركزي المتجددة، خوارزمية النسر الأصلع، الأمثلة.

Abstract

With the increasing integration of decentralized power generation or distributed generation (DG), particularly using renewable sources into distribution network, it become an active circuit in which power flows and voltages will be governed not only by loads, but also by sources. In order to reduce active power losses in distribution network and to improve voltage profile, the location and sizing of the DGs should be determined in an optimal way. In this work, an optimization algorithm namely bald eagle search (BES) is proposed to solve the DGs allocation problem. The BES algorithm is a new meta-heuristic algorithm. In this work, the optimal integration of DGs is carried out for an objective minimization of active power losses. In order to show the effectiveness of the BES algorithm, two distribution networks: IEEE 33-bus and IEEE 69-bus are used. The results confirm the performance of the BES algorithm.

Key-words: Radial Distribution Networks, Renewable Distributed Generation, Bald Eagle Search Algorithm, optimization.

Résumé

Avec l'intégration croissante de la production décentralisée ou distribuée (Distributed Generation (DG)) d'électricité dans les réseaux de distribution, ces derniers deviennent un ensemble de circuits électrique actifs dans lesquels les flux de puissance et les tensions seront gouvernés non seulement par les charges, mais aussi par les sources. Afin de réduire les pertes de puissance active dans les réseaux de distribution et d'améliorer le profil de tension, il faut déterminer d'une façon optimale l'emplacement et la taille des DGs. Dans cette thèse un algorithme d'optimisation dit algorithme de pygargue à tête blanche (Bald Eagle Search (BES)) est utilisé pour résoudre ce problème. L'algorithme BES est un nouvel algorithme méta-heuristique. Dans ce travail, l'intégration optimale de la production décentralisée est effectuée pour un objectif de minimisation des pertes de puissance active. Afin de démontrer la performance de l'algorithme BES, deux réseaux de distribution IEEE 33 jeux de barres et IEEE 69 jeux de barres sont utilisés. Les résultats obtenus confirment la performance de l'algorithme BES.

Mots clés : Réseau de distribution radial, Production décentralisée renouvelable, Algorithme de pygargue à tête blanche, Optimisation.