

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 :  
REMLI Abdelhakim SAIDANE Mohammed Islam  
Thème :

**Insertion optimale de la  
production décentralisée renouvelable dans le réseau  
de distribution pour l'amélioration de  
ses co-économiques**

KHERFANE Riad Lakhdar	MCA	Président	UKM Ouargla
BOUKAROURA Abdelkader	MCB	Encadreur/rapporteur	UKM Ouargla
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 gratitudee à notre encadreur Dr : BOUKAROURA Abdelkader.

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

Nos remerciements vont également à tous les enseignants de département de Génie Électrique.

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 inconditionnelles et toute personne ayant contribué pour la réalisation de ce mémoire.

## Dédicace

---

Je dédie ce modeste travail avec mes chaleureux sentiments

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 REMLI

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.

REMLI Abdelhakim

## Dédicace

---

Je dédie ce modeste travail avec mes chaleureux sentiments.

A mon Très Cher père Omar et ma très Chère Mère Merzaka Meghazi pour leur sacrifice, et qui n'ont jamais cessé de m'encourager que Dieu me les garde.

A Mes très chères sœurs.

A Mes frères.

À mes amis Dr : Belahcene taha lemdjed, Oussama Gadri, Oussama hadri et Ismail Harzeli.

A mon encadreur Dr: BOUKAROURA Abdelkader.

A Mes chères familles Meghazi et Saidane.

Pour nos très chers amis et camarades.

A tous mes enseignants depuis le primaire jusqu'à l'Université surtout nos enseignants du département de Génie Electrique Ouargla.

SAIDANE Mohammed Islam

## Sommaire

---

---

### Liste d'abréviations et symboles

### Liste des figures

### Liste des tableaux

### Introduction générale..... 1

### Chapitre 1 : Impacts de l'insertion de la production décentralisée au réseau de distribution

#### 1.1 Introduction.....2

#### 1.2 Structure du réseau électrique ..... 2

##### 1.2.1 Production ..... 2

##### 1.2.2 Transport ..... 3

##### 1.2.3 Distribution ..... 4

##### 1.2.4 Consommation ..... 5

#### 1.3 Insertion de la production décentralisée ou réseau de distribution ..... 5

##### 1.3.1 production décentralisée ..... 5

##### 1.3.2 Types de la production décentralisée..... 6

###### 1.3.2.1 L'énergie éolienne ..... 6

###### 1.3.2.2 L'énergie photovoltaïque ..... 6

###### 1.3.2.3 L'énergie hydroélectrique ..... 6

###### 1.3.2.4 L'énergie géothermique ..... 7

##### 1.3.3 Impacts de la production décentralisée sur les réseaux de distribution ..... 7

###### 1.3.3.1 Impact sur le sens de transit de puissance ..... 7

###### 1.3.3.2 Impact sur la stabilité du réseau..... 7

###### 1.3.3.3 Impact sur le plan de protection..... 8

###### 1.3.3.4 Impact sur l'observabilité et la contrôlabilité du système ..... 8

###### 1.3.3.5 Impact sur la continuité de service..... 8

###### 1.3.3.6 Impact sur la qualité d'énergie ..... 8

##### 1.3.4 Solutions pour limiter les impacts de la production décentralisée ..... 8

###### 1.3.4.1 Renforcement du réseau ..... 8

###### 1.3.4.2 Optimisation de la planification de la production décentralisée..... 9

#### 1.4 Conclusion ..... 9

### Chapitre 2 : Insertion optimale de la production décentralisée au réseau de distribution

#### 2.1 Introduction..... 10

#### 2.2 Modélisation de la 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 ..... 12

#### 2.4 Les Méthodes d'optimisation ..... 12

##### 2.4.1 Les Méthodes conventionnelles ..... 13

###### 2.4.1.1 Méthodes analytiques..... 13

###### 2.4.1.2 Méthode déterministes ..... 13

##### 2.4.2 Les Méthodes méta-heuristiques ..... 13

###### 2.4.2.1 Programmation Évolutionnaire..... 14

###### 2.4.2.2 Colonie de fourmis..... 15

#### 2.5 Algorithme d'optimisation du pygargue à tête blanche ((Baled Eagle Search(BES))..... 15

##### 2.5.1 Choisir l'espace de recherche..... 15

##### 2.5.2 Recherche dans l'espace ..... 16

##### 2.5.3 Plonger ..... 16

#### 2.6 Application de l'algorithme de pygargue à tête blanche (BES)..... 17

2.7 Conclusion .....	18
<b>Chapitre 3 : Résultats de simulation</b>	
3.1 Introduction.....	19
3.2 Applications numériques .....	19
3.2.1 Application au réseau test IEEE 33 jeux de barres .....	19
3.2.1.1 Cas 1 : Sans insertion de DG .....	20
3.2.1.2 Cas 2 : Avec insertion d'une DG .....	22
3.2.1.3 Cas 3 : Avec insertion de deux DGs .....	24
3.2.1.4 Cas 4 : Avec insertion de trois DGs.....	26
3.2.2 Application au réseau test IEEE 69 jeux de barres .....	28
3.2.2.1 Cas 1 : Sans insertion de DG .....	30
3.2.2.2 Cas 2 : Avec insertion d'une DG .....	31
3.2.2.3 Cas 3 : Avec insertion de deux DGs .....	33
3.2.2.4 Cas 4 : Avec insertion de trois DGs.....	35
3.3 Conclusion .....	37
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>38</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>39</b>
<b>Annexe .....</b>	<b>41</b>

## Liste d'abréviations et symboles

---

### Abréviations

HT	: Haute Tension
MT	: Moyne 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 Alternation Curent Transmission System
D-FACTS	: Distribution Flexible Alternation Curent Transmission System
YEL	: Pertes économiques totales
DG	: Distributed Generation
BES	: Bald Eagle Search
WOA	: Wale Optimization Algorithm
OCDE	: Opposition based Chaotic Differential Evolution
JB	: Jeu de barres
DG <sub>JB</sub>	: Position du DG
N <sub>DG</sub>	: Nombre du DG
L <sub>DG</sub>	: Durée de vie de DG en ans
C <sub>DG</sub>	: Coût de la puissance du DG
C <sub>e</sub>	: Coût des pertes d'énergie active
N <sub>JB</sub>	: Nombre total de jeux de barres
N <sub>br</sub>	: Nombre total de branches
P <sub>DG</sub>	: Puissance totale de DG
P <sub>DG</sub> <sup>min</sup>	: Puissance totale minimale de DG
P <sub>DG</sub> <sup>max</sup>	: Puissance totale maximale de DG

### Symboles

$\Delta V$	: Variation de tension
$P$	: Puissance active
$Q$	: Puissance réactive
$X$	: Réactance de la ligne
P <sub>Loss</sub>	: Pertes de puissance active
Q <sub>Loss</sub>	: Pertes de puissance réactive





## Liste des figures

---

---

<b>Figure 1.1</b> : Schéma de l'organisation des réseaux électriques en fonction de leur tension.....	2
<b>Figure 1.2</b> : Sources de la production mondiale d'électricité en 2021 .....	3
<b>Figure 1.3</b> : Structure maillé d'un réseau de transport électrique.....	4
<b>Figure 1.4</b> : Schéma arborescent d'une station de distribution .....	4
<b>Figure 2.1</b> : Etapes de la chasse au pygargue à tête blanche (BES) .....	17
<b>Figure 3.1</b> : Représentation simplifiée du réseau de distribution IEEE 33 jeux de barres.....	20
<b>Figure 3.2</b> : Profile de tension du réseau IEEE 33 jeux de barres .....	21
<b>Figure 3.3</b> : Pertes de puissances active et réactive dans les branches du réseau IEEE 33 jeux de barres .....	22
<b>Figure 3.4</b> : Courbe de convergence de BES du réseau IEEE 33 jeux de barres .....	23
<b>Figure 3.5</b> : Profile de tension du réseau IEEE 33 jeux de barres .....	23
<b>Figure 3.6</b> : Pertes de puissance active dans le réseau IEEE 33 jeux de barres .....	24
<b>Figure 3.7</b> : Caractéristique de convergence de BES du réseau IEEE 33 jeux de barres .....	25
<b>Figure 3.8</b> : Profile de tension du réseau IEEE 33 jeux de barres .....	25
<b>Figure 3.9</b> : Pertes de puissance active dans le réseau IEEE 33 jeux de barres .....	26
<b>Figure 3.10</b> : Courbe de convergence de BES du réseau IEEE 33 jeux de barres .....	27
<b>Figure 3.11</b> : Profile de tension du réseau IEEE 33 jeux de barres .....	27
<b>Figure 3.12</b> : Pertes de puissance active dans le réseau IEEE 33 jeux de barres .....	28
<b>Figure 3.13</b> : Représentation simplifiée du réseau de distribution IEEE 69 jeux de barres....	29
<b>Figure 3.14</b> : Profile de tension du réseau IEEE 69 jeux de barres .....	30
<b>Figure 3.15</b> : Pertes de puissances active et réactive dans les branches du réseau IEEE 69 jeux de barres .....	31
<b>Figure 3.16</b> : Courbe de convergence de BES du réseau IEEE 69 jeux de barres .....	31
<b>Figure 3.17</b> : Profile de tension du réseau IEEE 69 jeux de barres .....	32
<b>Figure 3.18</b> : Pertes de puissance active dans le réseau IEEE 69 jeux de barres .....	32
<b>Figure 3.19</b> : Courbe de convergence de BES du réseau IEEE 69 jeux de barres .....	33
<b>Figure 3.20</b> : Profile de tension du réseau IEEE 69 jeux de barres .....	34
<b>Figure 3.21</b> : Pertes de puissance active dans le réseau IEEE 69 jeux de barres .....	34
<b>Figure 3.22</b> : Caractéristique de convergence de BES du réseau IEEE 69 jeux de barres .....	35
<b>Figure 3.23</b> : Profile de tension du réseau IEEE 69 jeux de barres .....	36
<b>Figure 3.24</b> : Pertes de puissance active dans le réseau IEEE 69 jeux de barres .....	36

## Liste des tableaux

---

---

<b>Tableau 1.1</b> : Tableau des domaines de tension .....	5
<b>Tableau 3.1</b> : Identification de la topologie du réseau de distribution IEEE 33 Jeux de barres ..	20
<b>Tableau 3.2</b> : Ecoulement de puissances pour le réseau de distribution IEEE 33 jeux de barres.	21
<b>Tableau 3.3</b> : Résultats de simulation du réseau IEEE 33 jeux de barres (Cas 2).....	24
<b>Tableau 3.4</b> : Résultats de simulation du réseau IEEE 33 jeux de barres (Cas 3).....	26
<b>Tableau 3.5</b> : Résultats de simulation du réseau IEEE 33 jeux de barres (Cas 4).....	28
<b>Tableau 3.6</b> : Identification de la topologie du réseau de distribution IEEE 69 Jeux de barres ..	29
<b>Tableau 3.7</b> : Résultats de simulation du réseau IEEE 69 jeux de barres (Cas 2).....	33
<b>Tableau 3.8</b> : Résultats de simulation du réseau IEEE 69 jeux de barres (Cas 3).....	35
<b>Tableau 3.9</b> : Résultats de simulation du réseau IEEE 69 jeux de barres (Cas 4).....	37
<b>Tableau A.1</b> : Caractéristiques techniques des branches du réseau de distribution IEEE 33 jeux de barres .....	41
<b>Tableau A.2</b> : Caractéristiques techniques des jeux de barres du réseau de distribution IEEE 33 jeux de barres .....	42
<b>Tableau A.3</b> : Caractéristiques techniques des branches du réseau de distribution IEEE 69 jeux de barres .....	43
<b>Tableau A.4</b> : Caractéristiques techniques des jeux de barres du réseau de distribution IEEE 69 jeux de barres .....	45

## Introduction générale

---

---

Le développement de nouvelles sources de production décentralisée ou de génération dispersée (en anglais : Distributed Generation (DG)) est désormais une réalité dans plusieurs pays à travers le monde, grâce à la libéralisation du marché de l'énergie ainsi qu'aux évolutions technologiques des moyens de production de petite puissance [1]. Cependant, ces moyens de production décentralisée introduisent des changements radicaux notamment sur les réseaux de distribution qui n'ont pas été conçus pour accueillir ce type de production.

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, les pertes économiques ainsi que sur les systèmes de protection [2].

Dans ce travail, nous nous intéressons au problème de l'insertion de la production décentralisée dans les réseaux de distribution.

L'objectif principal de ce travail est l'application d'un algorithme d'optimisation méta-heuristique pour l'insertion de production décentralisée, dans les réseaux de distribution. Cette méthode vise à faciliter l'insertion des énergies renouvelables dans les réseaux de distribution en minimisant les pertes de puissance et les pertes économiques 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. Nous présentons par la suite le différent type de production décentralisée. Enfin, nous dérivons les impacts des DGs sur les réseaux électriques.

Dans le deuxième chapitre nous dérivons une méthodologie de planification optimale des DGs dans les réseaux de distribution par le moyen d'un algorithme d'optimisation méta-heuristique appelé algorithme d'optimisation de pygargue à tête blanche (Bald Eagle Search (BES)).

Dans le troisième chapitre, nous présentons les deux réseaux tests IEEE 33 et IEEE 69 jeux de barres utilisés pour l'évaluation de la méthode d'optimisation BES. Ensuite, nous présentons et discutons les résultats de l'application de cet algorithme sur ces réseaux tests.

Enfin, ce mémoire se terminera par une conclusion générale et quelques perspectives.

## 1.1 Introduction

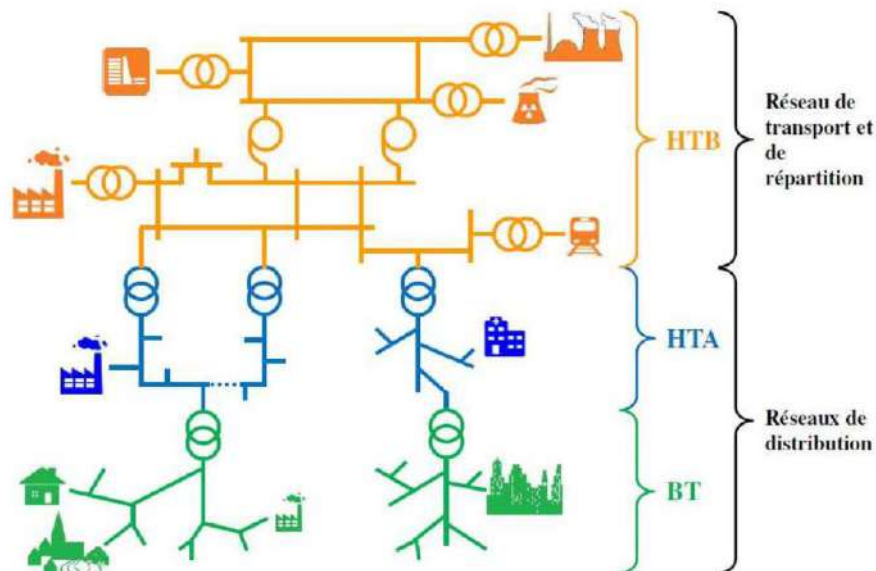
La demande mondiale en énergie ne cesse de s'accroître ce qui a conduit à l'épuisement des sources d'énergies existantes, Par conséquent, les regards sont dirigés vers une nouvelle solution qui est l'exploitation des énergies renouvelables qui sont des sources d'énergie dont le renouvellement naturel est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle du temps humain [1].

Ce chapitre consiste, tout d'abord, à présenter le réseau électrique en tant qu'infrastructure utilisé actuellement dans le monde. Ensuite, l'insertion des DGs aux réseaux de distribution sera discuter en basant sur les impacts de ce type de production et les solutions proposées pour limiter ces impacts.

## 1.2 Structure des réseaux électriques

Un réseau électrique est un ensemble d'outils destiné à produire, transporter, distribuer l'énergie électrique et veiller sur la qualité de cette énergie, notamment la continuité de service et la qualité de la tension. L'architecture du réseau est un facteur clé pour assurer ces objectifs [2].

L'organisation des réseaux de transport et de distribution est subdivisée en fonction du niveau de tension comme l'indique la figure 1.1.



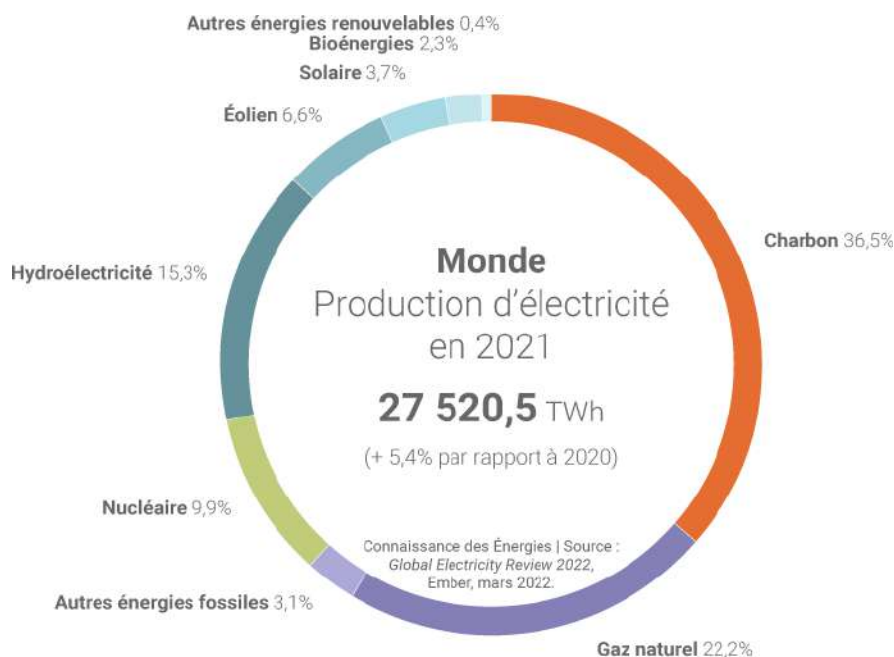
**Figure 1.1** : Schéma de l'organisation des réseaux électriques en fonction de leur tension [3].

### 1.2.1 Production

La production de l'énergie électrique découle de diverses transformations. Elle s'effectue dans plusieurs types de centrales électriques. Ces dernières, se diffèrent par les sources d'énergie primaire utilisées. Dans une centrale thermique, l'électricité est produite par la combustion de matière fossile

comme le charbon, le pétrole, le gaz ou l'uranium pour les centrales nucléaires. Une centrale hydraulique utilise la force de l'eau comme source d'énergie primaire pour produire de l'électricité. D'autres sources comme le vent, le soleil, la biomasse et la géothermie sont aussi utilisées pour produire l'énergie électrique. La gamme de puissance produite par ces centrales varie de quelques dizaines de MW pour les petites centrales hydrauliques à plus d'un GW pour les centrales nucléaires les plus puissantes [4].

La Figure (1.2) représente l'apport de chaque source dans la production mondiale d'électricité en 2021. Selon cette figure, deux tiers de la production électrique dans le monde proviennent d'énergies fossiles.



**Figure** Error! No text of specified style in document..2 : Sources de la production mondiale d'électricité en 2021 [4].

En Algérie, la production totale d'électricité a été de 57,4 TWh, en 2012, provient essentiellement des combustibles fossiles avec plus de 99,2%, en particulier du gaz naturel. La structure de la production électrique du pays laisse donc peu de place (0,8%) aux filières renouvelables qui se résument pratiquement à une production hydroélectrique avec 0,7% et le solaire 0,1% [5].

### 1.2.2 Transport

Les réseaux de transport assurent le transport de l'énergie électrique sur de grandes distances. Afin de minimiser les pertes joules sur les lignes et avoir plus de puissance transportée, ces réseaux sont à très haute tension (de 63 kV à 400 kV) [6].

Du point de vue topographique, pour des raisons de sécurité de fonctionnement, les réseaux de transport sont des réseaux maillés ou interconnectés auxquels sont connectées les centrales importantes afin de collecter l'électricité produite et de l'acheminer par grand flux vers les zones de consommation, et de permettre une exploitation économique et sûre des moyens de production [7].

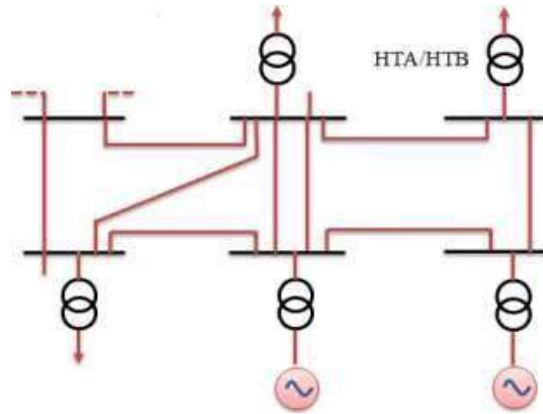


Figure Error! No text of specified style in document..3 : Structure maillé d'un réseau de transport électrique.

### 1.2.3 Distribution

Les réseaux de distribution constituent l'architecture la plus importante du système électrique. Ils assurent la distribution de l'énergie électrique au niveau local. Leurs tensions sont inférieures ou égales à 50 KV (HTA). Ils sont constitués de deux types de réseaux : le réseau moyenne tension (MT) avec un niveau de 10 et 30 KV connecté au réseau de transport, et le réseau basse tension (BT) de tension 0,4 KV [8].

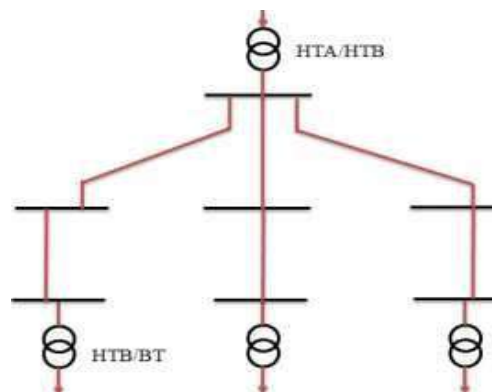


Figure Error! No text of specified style in document..4 : Schéma arborescent d'une station de distribution.

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

**Tableau 1.1** : Tableau des domaines de tension [8].

Domaines de tension		Valeur de la tension composée nominale ( $U_n$ en Volts)	
		Tension Alternative Valeur efficace	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	$U_n > 50\ 000$	$U_n > 75\ 000$

#### 1.2.4 Consommation

Dans les réseaux, les consommateurs appelés charges sont caractérisées par leurs puissances active et réactive consommées. De ces puissances mesurées sur un certain intervalle de temps sont déduites les puissances maximales (de pointe) et moyennes. Par la mesure des courants dans les postes de transformation entre les réseaux de transport et de distribution, des courbes de consommation appelées courbes de charge sont tracées pour connaître l'évolution des charges au cours du temps [9]. Elles permettent aux gestionnaires de réseau de prédire l'évolution de la consommation sur les réseaux et donc, entre autre, de définir les plans prévisionnels de production.

### 1.3 Intégration de la production décentralisée au réseau de distribution

#### 1.3.1 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 [10].

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 [11].

Les principales sources de l'énergie renouvelable sont : l'hydraulique (qui transforme l'énergie potentielle de l'eau en énergie électrique), l'éolien (qui tire leur énergie du vent), le solaire

photovoltaïque (qui transforme directement l'énergie reçue par rayonnement solaire en énergie électrique) et le solaire thermique (basé sur des centrales thermiques utilisant des turbines à vapeur).

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 diesels) 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.

### **1.3.2 Types de la production décentralisée**

#### **1.3.2.1 L'énergie éolienne**

L'énergie éolienne (du mot grec Eole, le Dieu du vent) est l'énergie produite par le vent. C'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 (Aérogénérateurs). Les termes « parc éolien » ou « ferme éolienne » sont utilisés pour décrire les unités de production groupées, installées à terre ou dans la mer [12].

#### **1.3.2.2 L'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 [13].

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 [13].

#### **1.3.2.3 L'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) [4].

#### **1.3.2.4 L'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.

### **1.3.3 Impacts de la production décentralisée sur les réseaux 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 :

#### **1.3.3.1 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 [14].

#### **1.3.3.2 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 [15].

### 1.3.3.3 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 [15].

### 1.3.3.4 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 [15].

### 1.3.3.5 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 [15].

### 1.3.3.6 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 [15].

## 1.3.4 Solutions pour limiter les impacts de la production décentralisée

### 1.3.4.1 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 qui sont contraints sont alors renforcés [16].

D'autres solutions basées sur l'ajout de matériel réseau pour des raisons de réglage ou de protection sont proposées, on peut citer [16] :

- Les auto-transformations et les régulateurs 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 vues le coût associé.

**1.3.4.2 Optimisation de la planification de la production décentralisée**

Afin de profiter au maximum de la génération d'énergie dispersée et pour l'augmentation globale de la fiabilité et de la sécurité du réseau de distribution, ce type de production doit être intégré d'une manière optimale dans les réseaux 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 veulent d'autre part limiter leurs influences négatives sur le réseau. Cet impératif demande une très bonne connaissance et une bonne planification des DGs dans le réseau.

**1.4 Conclusion**

Ce chapitre présente 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. Ensuite, il expose les différents impacts de ce type de production ainsi que les solutions proposées pour limiter ces impacts.

## 2.1 Introduction

L'insertion de la production décentralisée dans le réseau de distribution joue un rôle important dans l'amélioration des performances techno-économique du réseau. Par contre, l'insertion non optimale de ces sources d'énergie peut engendrer une augmentation des pertes techniques et économiques, et une augmentation de la déviation de tension et de variation de la stabilité du réseau.

Afin de garantir une meilleure insertion 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 la taille des DGs afin d'obtenir le minimum des pertes totales de la puissance active et le minimum des pertes totales économiques dans le réseau de distribution.

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 classées en quatre grands types basés sur la capacité de fournir de la puissance active et réactive [16].

- **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.

## 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 et les pertes totales économiques tout en respectant les contraintes d'égalités et d'inégalités.

Mathématiquement, la fonction objectif et les contraintes d'égalités et d'inégalités peuvent être formulées comme suit :

### 2.3.1 Fonction objectif

La fonction objectif qui a comme but la minimisation des pertes totales de puissance active et la minimisation des pertes totales économiques du réseau de distribution peut être exprimer par l'équation suivante [17] :

$$F = \min(w_1 * PI + w_2 * CI) \quad \text{Avec} \quad w_1 = 0.45 \text{ et } w_2 = 0.55 \quad (2.1)$$

$$PI = \frac{P_{L\_AvecDG}}{P_{L\_SansDG}} \quad (2.2)$$

$$P_L = \sum_{i=1}^{Nbr} P_{Loss,i} \quad (2.3)$$

$$CI = \frac{YEL_{AvecDG}}{YEL_{SansDG}} \quad (2.4)$$

$$YEL_{SansDG} = P_{L\_SansDG} \times C_e \times 8760 \quad (2.5)$$

$$YEL_{AvecDG} = P_{L\_AvecDG} \times C_e \times 8760 + \frac{C_{DG} \sum_{i=1}^{N_{DG}} P_{DG,i}}{L_{DG}} \quad (2.6)$$

Où :

- $P_L$  représente les pertes totales de puissance active du réseau de distribution ;
- $YEL$  représente les pertes économiques totales du réseau de distribution.
- $C_e=0.05$  \$/kWh est le coût des pertes d'énergie active par kWh ;
- $N_{DG}=1, 2$  et  $3$  est le nombre DGs ;
- $C_{DG}=30$  \$/kW est le coût de la puissance du DG par kW qui comprend l'investissement en capital du DG, ainsi que les coûts d'installation, d'exploitation et de maintenance et  $L_{DG}=10$  ans est la durée de vie de DG.

### 2.3.2 Contraintes d'égalités

Les équations d'équilibre de puissance active sont définies comme des contraintes d'égalité. Ces contraintes s'expriment par [18] :

$$\begin{cases} P_{G,i} - P_{L,i} = \sum_{i=1}^{Nbr} P_{Loss,i} \\ Q_{G,i} - Q_{L,i} = \sum_{i=1}^{Nbr} Q_{Loss,i} \end{cases} \quad (2.7)$$

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

### 2.3.3 Contraintes d'inégalités

Les contraintes d'inégalités s'expriment par [19] :

- **Tension du jeu de barres :**

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

$$V_{\min} \leq |V_i| \leq V_{\max} \quad i = 1, 2, 3, \dots, N_{jb} \quad (2.8)$$

- **Courant de branche :**

Le courant de chaque branche est limité comme suit :

$$I_i \leq I_{i,\max} \quad i = 1, 2, \dots, N_{br} \quad (2.9)$$

- **Puissances générées par les DGs :**

Les limites des puissances générées par les DGs :

$$P_{DG}^{\min} \leq |P_{DGI}| \leq P_{DG}^{\max} \quad (2.10)$$

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

- **Position de DG :**

$$2 \leq |DG_{JB}| \leq N_{JB} \quad (2.11)$$

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  $i$  ;  $I_i$  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 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 [20].

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

### 2.4.1 Méthodes conventionnelles

#### 2.4.1.1 Méthodes analytiques

Ce type de méthodes 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 [21]. Cependant, leur efficacité de calcul peut être affectée par la taille et la complexité du système considéré.

#### 2.4.1.2 Méthodes 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 [22].

La sensibilité au nombre de variables de décision, le temps de calcul important et le piègeage par un optimum local sont les principaux inconvénients de ces techniques [21].

### 2.4.2 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 » [23].

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 [24].

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 [25].

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 des caractéristiques communes suivantes [26].

- 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 piègeage 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 Programmation Évolutionnaire

Développée par J. Fogel en 1962 [27] qui a utilisé la mutation comme seul opérateur de recherche. Appliquée aux problèmes d'optimisation continue, la programmation évolutionnaire (Evolutionary Programming : EP) est similaire aux Stratégies d'Évolution [28], tous deux représentant les individus avec des vecteurs de valeurs réelles incluant les paramètres de stratégie. Elle utilise une mutation de distribution normale et une sélection déterministe ou stochastique.



### 2.4.2.2 Colonie de fourmis

La méthode de colonie de fourmis (Ant Colony Optimization : ACO) s'inspire du comportement des colonies de fourmis réelles [29]. La méthode se caractérise par la combinaison d'une approche de construction et des mécanismes d'apprentissage fondés sur la mémorisation. Le principe de cette méthode est le suivant : Malgré la vision très limitée de chaque fourmi, une colonie de fourmis parvient à minimiser la longueur du chemin conduisant à une source de nourriture, grâce aux traces chimiques (phéromones) laissées par chacune des fourmis.

Un principe analogue a été utilisé pour traiter des problèmes d'optimisation. La méthode consiste à répéter un algorithme de construction (assimilé à l'action d'une fourmi) dans lequel chacun des choix est déterminé en tenant compte à la fois de la nature aléatoire du mouvement d'une fourmi et des traces laissées par les fourmis précédentes. Ainsi, une fourmi qui a emprunté une arête incite les fourmis suivantes à emprunter cette même arête à leur tour.

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

L'algorithme de recherche Baled Eagle Search (BES), été introduit par Alsattar et al. en 2020 [30]. 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 [30] :

$$P_{new,i} = P_{best} + \alpha \times r (P_{mean} - P_i) \quad (2.12)$$

Où  $P_{best}$  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 ;  $\alpha$  est le paramètre de contrôle des

changements de position  $1.5 \ll \alpha \ll 2$  ;  $r$  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 [30] :

$$P_{new,i} = P_i + y(i) \times (P_i - P_{i+1}) + x(i) \times (P_i - P_{mean}) \quad (2.13)$$

$P_i$  : l'espace de recherche.

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

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

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

### 2.5.3 Plonger

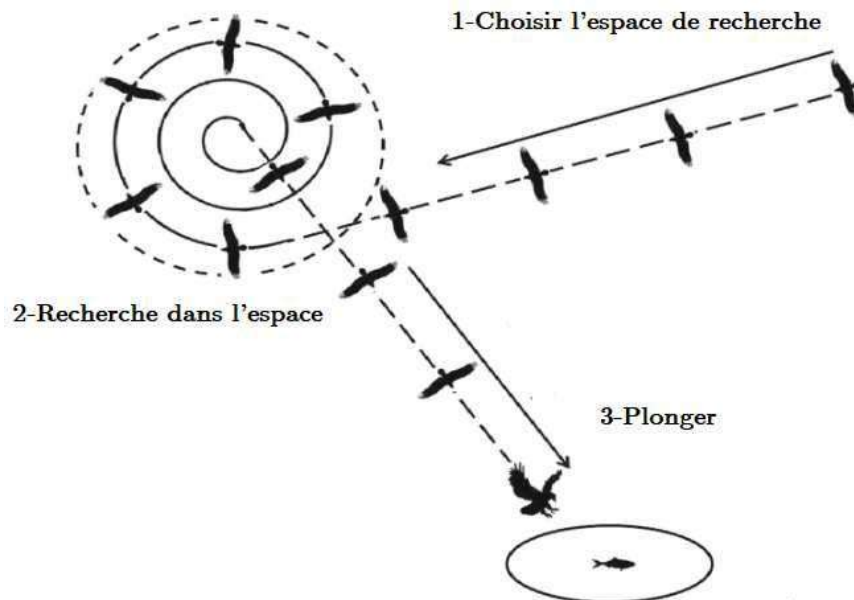
Dans cette étape, l'aigle se balance de la position là mieux identifiée dans la deuxième étape vers sa cible. Ce comportement est décrit par l'équation suivante [30] :

$$P_{new,i} = rand \times P_{best} + x_1(i) \times (P_i - c_1 \times P_{mean}) + y_1(i) \times (P_i - c_2 \times P_{best}) \quad (2.14)$$

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

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

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 au 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 multi-objectifs est présenté dans les étapes ci-dessous.

Dans notre travail, les paramètres de BES sont [30] :

- Nombre de la population = 50 ;
- Nombre maximum des itérations = 200 ;
- $\alpha=2$ ,  $a=10$  et  $R=1,5$  ;
- 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 et lire les limites  $P_{DGmin}$  et  $P_{DGmax}$  ;

**Etape 2** : Définir les paramètres de l'algorithme BES et les limites des variables de décision (Emplacements et tailles des DGs) ;

**Etape 3** : Générer la population initiale pour les variables de décision (Emplacements et taille des DGs) ;

**Etape 4** : Ecoulement de puissance (Backward Forward Sweep) en présence des DGs ;

**Etape 5** : Calculer les pertes totales de puissance active et les pertes totales économiques ;

**Etape 6** : Calculer la fonction multi-objectifs ;

**Etape 7** : Mise à jour la fonction multi-objectif ;

**Etape 8** : Répéter les étapes 4 à 7 jusqu'à le nombre maximal des itérations ;

**Etape 9** : La solution optimale (Emplacements et tailles optimale des DGs).

**2.7 Conclusion**

Nous avons présenté dans ce chapitre les différentes classes des méthodes d'optimisation. Ensuite, les formules mathématiques décrivant le problème d'optimisation de l'emplacement et de la taille des DGs étant établies. Enfin, nous avons détaillé le mécanisme de l'une des plus importantes méthodes méta-heuristiques d'aujourd'hui appelée la méthode de pygargue à tête blanche (BES) et qui doit être 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.

Dans le chapitre suivant, nous évaluons les performances de cette méthode sur les réseaux test IEEE 33 Jeux de barres et IEEE 69 Jeux de barres.

### 3.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'application de l'algorithme de pygargue à tête blanche (Baled Eagle Search (BES)) dans l'optimisation techno-économique 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 tests.

### 3.2 Applications numériques

L'insertion 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 insertion de DG (cas de base) ;
- **Cas 2** : Avec insertion d'une DG ;
- **Cas 3** : Avec insertion de deux DGs ;
- **Cas 4** : Avec insertion de trois DGs.

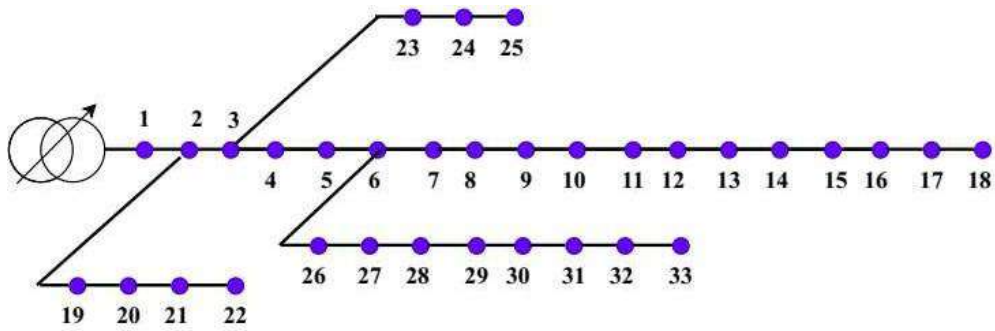
Les tensions de tous les jeux de barres du réseau sont dans les limites admissibles dans l'intervalle [0,95p.u. 1,05 p.u.].

#### 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 [31] :

- 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 MVar.

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 insertion 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

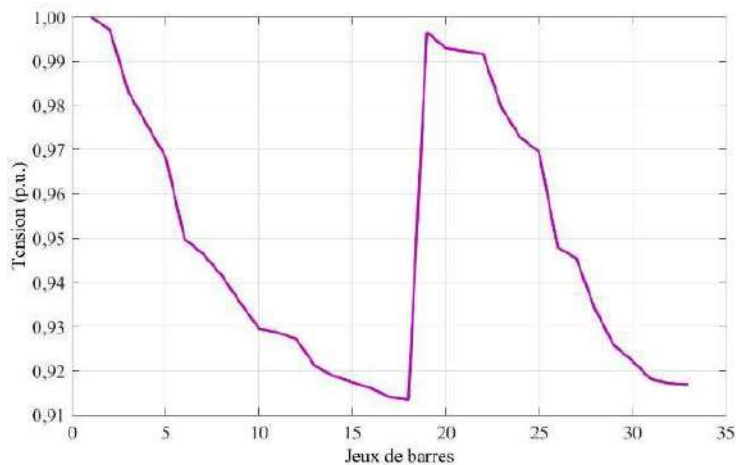
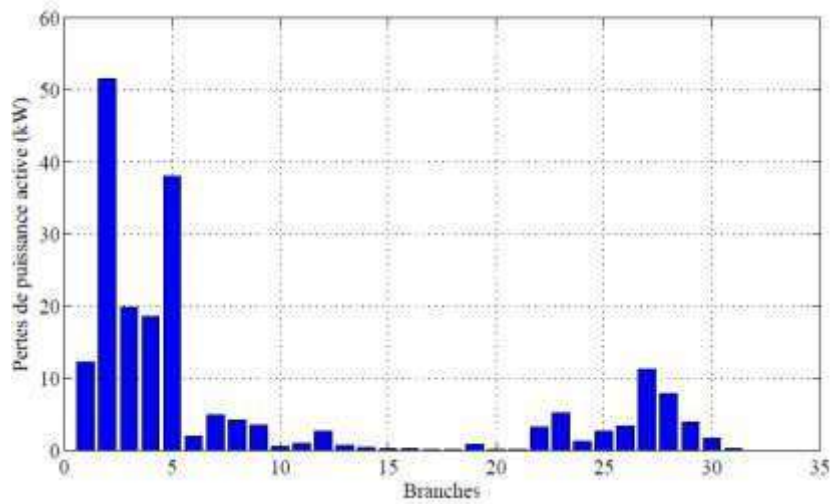
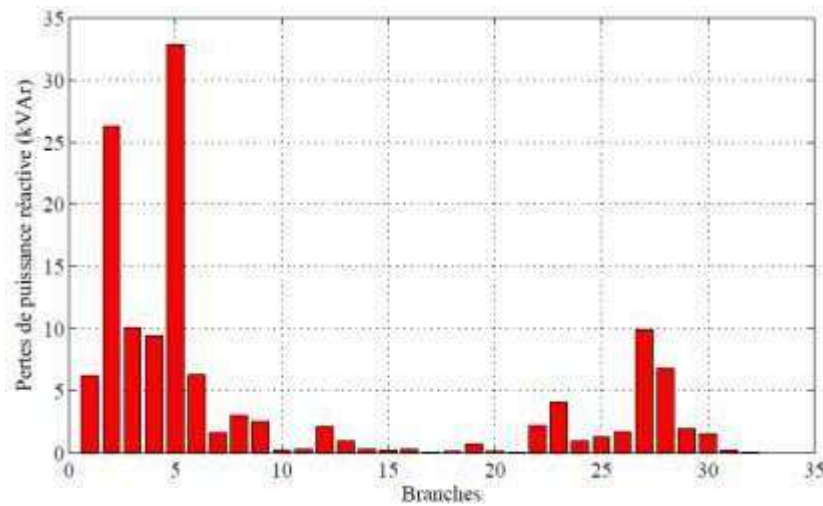


Figure 3.2 : Profile de tension du réseau IEEE 33 jeux de barres.

La Figure 3.3 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. Les pertes économiques annuelles sont 88428,915 \$.



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 techno-économique 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 insertion 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 18. Cette valeur est inférieure à la limite admissible de tension 0,9500 p.u.

### 3.2.1.2 Cas 2 : Avec insertion d'une DG

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



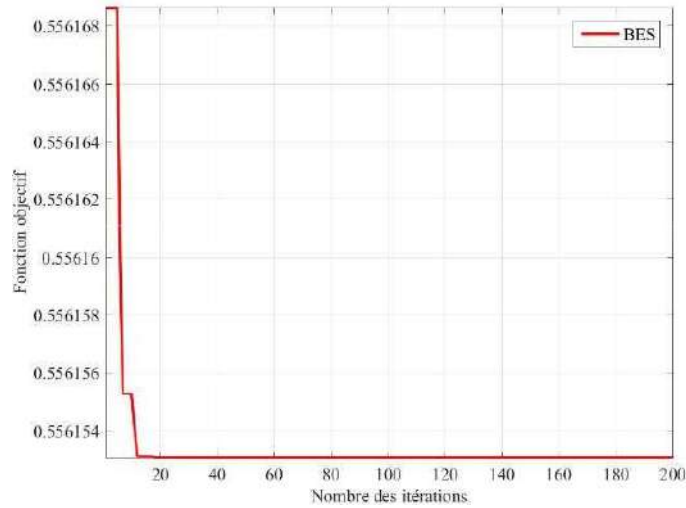


Figure 3.4 : Courbe de convergence de BES du réseau IEEE 33 jeux de barres (Cas 2).

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’insertion d’une DG.

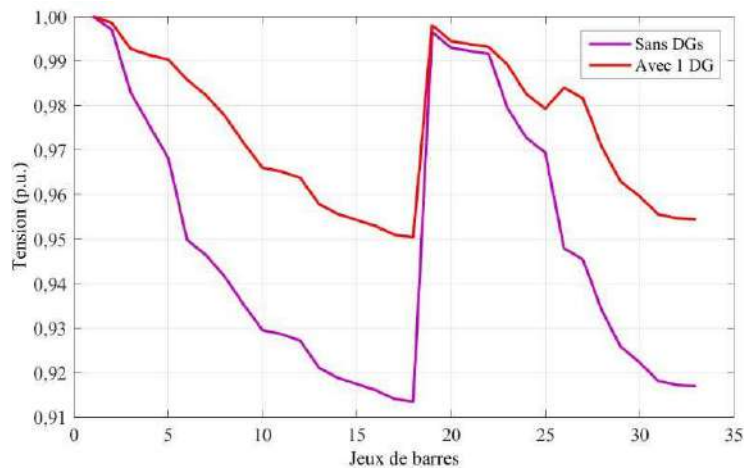


Figure 3.5 : Profil de tension du réseau IEEE 33 jeux de barres (Cas 2).

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 actives sont de l’ordre de 103,0471 kW. Les pertes économiques annuelles avec une DG sont 52490,00 \$.

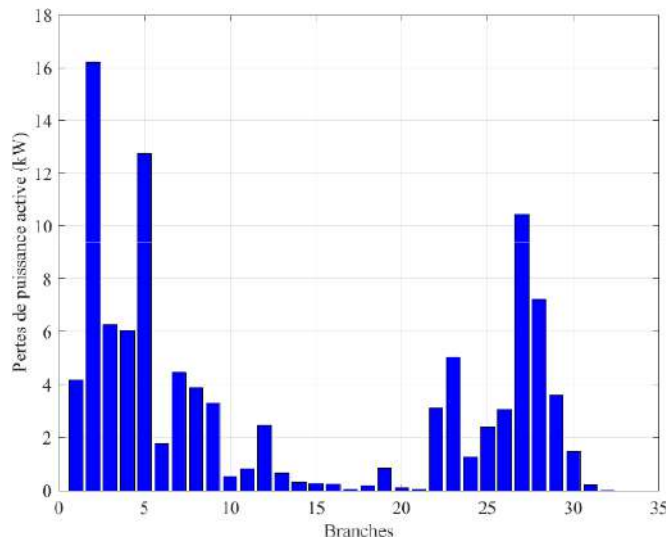


Figure 3.6 : Pertes de puissance active dans le réseau IEEE 33 jeux de barres (Cas 2).

Le tableau 3.3 représente les résultats de l’optimisation techno-économique 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 2,4518 MW. Les pertes de puissance active du réseau sont diminuées de 48,9594 % par rapport au premier cas. Les pertes économiques totales sont 52490,00 \$. Les pertes économiques sont diminuées de 40,6415 % par rapport au premier cas.

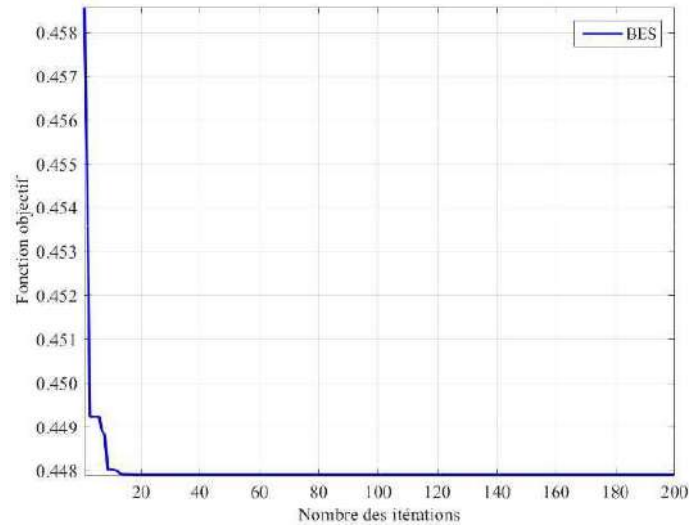
Les résultats de l’algorithme BES montrent l’efficacité de l’algorithme BES dans l’optimisation techno-économique de l’emplacement et de la taille des DGs.

Tableau 3.3 : Résultats de simulation du réseau IEEE 33 jeux de barres (Cas 2).

Cas étudié	Emplacement optimale	Taille totale des DGs (MW)	Pertes de puissance active (kW)	Réduction des pertes de puissance active (%)	Pertes économiques totales (\$)	Réduction des pertes économiques (%)
Cas 2 : 1 DG	6	2.4518	103.0471	48.9594	52490.00	40.6415

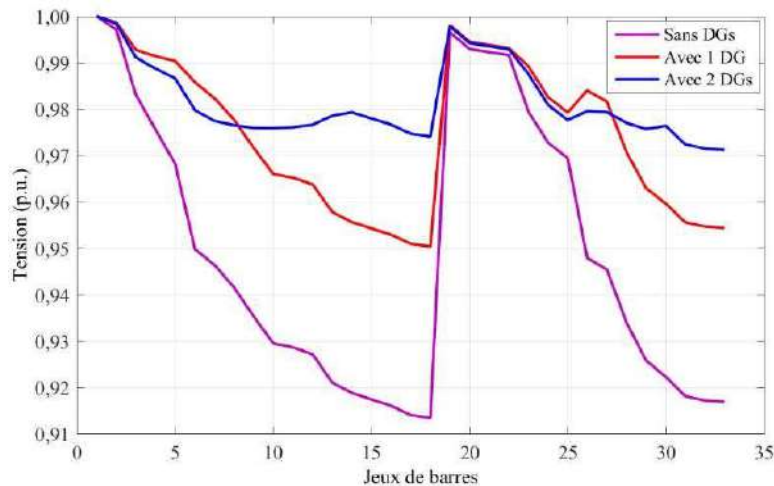
### 3.2.1.3 Cas 3 : Avec insertion de deux DGs

Dans ce troisième cas, deux DGs sont insérer au réseau de distribution IEEE 33 jeux de barres. La figure 3.7 représente la courbe de convergence de l’algorithme BES pour cas de l’insertion 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 83,0884 kW. Les pertes économiques annuelles avec deux DGs sont 42238,00 \$.

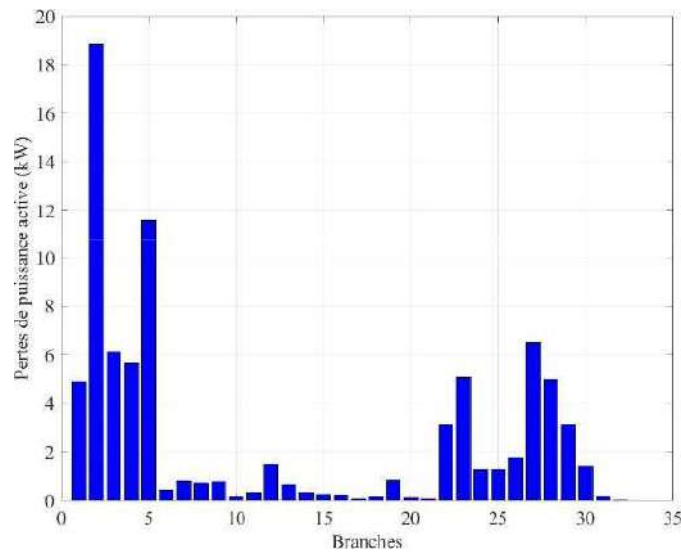


Figure 3.9 : Pertes de puissance active dans le réseau IEEE 33 jeux de barres (Cas 3).

Le tableau 3.4 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 14 et 30. Les tailles optimales sont, respectivement, 0,7895 MW et 1,1589 MW. Les pertes de puissance active du réseau sont diminuées de 58,8452 % par rapport au premier cas. Les pertes économiques totales sont 42238,00 \$. Les pertes économiques sont diminuées de 52,2351 % par rapport au premier cas.

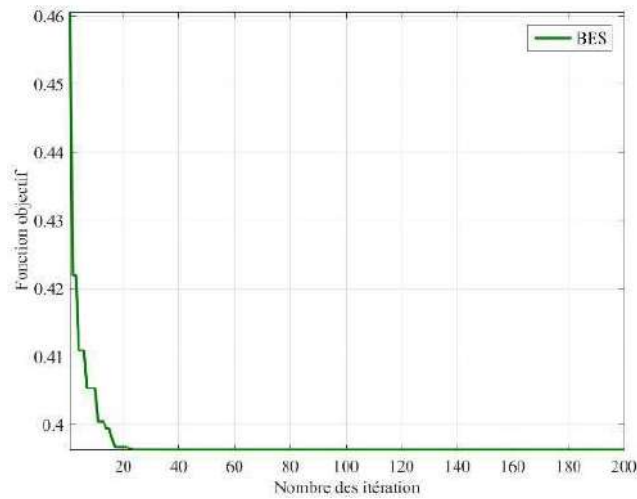
Les résultats de l’algorithme BES montrent l’efficacité de l’algorithme BES dans l’optimisation techno-économique de l’emplacement et de la taille des DGs.

Tableau 3.4 : Résultats de simulation du réseau IEEE 33 jeux de barres (Cas 3).

Cas étudié	Emplacement optimal des DGs	Taille optimale des DGs (MW)	Taille totale des DGs (MW)	Pertes de puissance active (kW)	Réduction des pertes de puissance active (%)	Pertes économiques totales (\$)	Réduction des pertes économiques (%)
Cas 3 : 2 DGs	14 30	0.7895 1.1589	1.9484	83.0884	58.8452	42238.00	52.2351

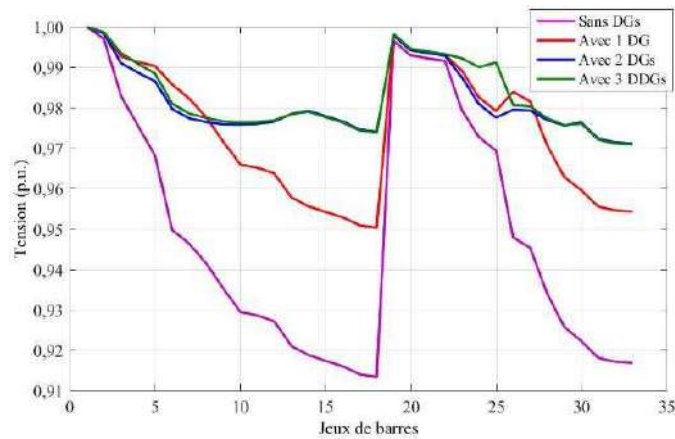
3.2.1.4 Cas 4 : Avec insertion de trois DGs

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’insertion 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’insertion 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’insertion de trois DGs. Les pertes actives totales sont égales à 70,2168 kW. Les pertes économiques annuelles avec trois DGs sont 38550,00 \$.

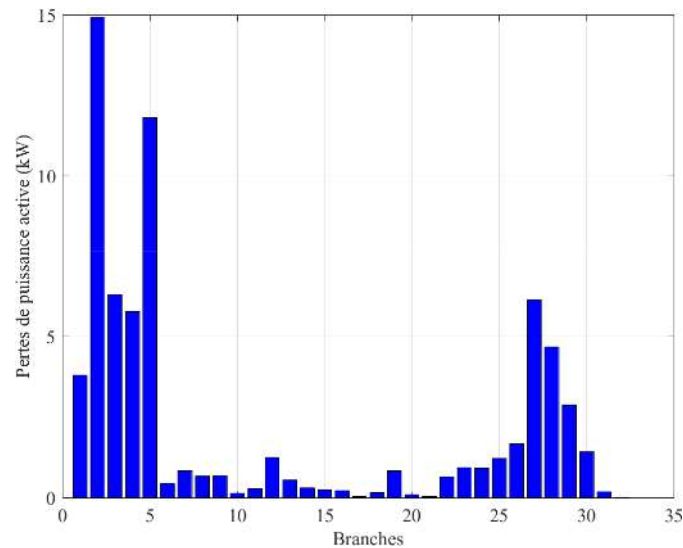


Figure 3.12 : Pertes de puissance active dans le réseau IEEE 33 jeux de barres (Cas 4).

Les résultats d’optimisation techno-économiques sont représentés sur le Tableau 3.5. Les jeux de barres 14, 25 et 30 sont obtenues comme les meilleurs emplacements pour l’installation des DGs. Les tailles optimales de ces DGs sont, respectivement, 0,7494 MW, 0,7671 MW et 1,0819 MW. Les pertes de puissance active du réseau sont diminuées de 65,2207 % par rapport au premier cas. Les pertes économiques totales sont 38550,00 \$. Les pertes économiques sont diminuées de 56,4057 % 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 techno-économique de l’emplacement et de la taille des DGs.

Tableau 3.5 : Résultats de simulation du réseau IEEE 33 jeux de barres (Cas 4).

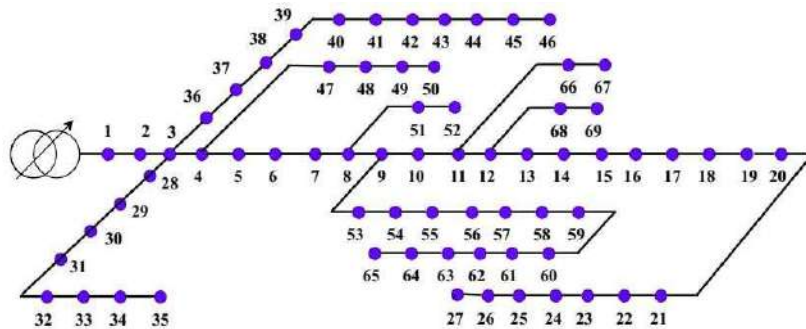
Cas étudié	Méthode d’optimisation	Emplacement optimal des DGs	Taille optimale des DGs (MW)	Taille totale des DGs (MW)	Pertes de puissance active (kW)	Réduction des pertes de puissance active (%)	Pertes économiques totales (\$)	Réduction des pertes économiques (%)
Cas 4: 3 DGs	<b>BES</b>	14	0.7494	2.5980	70.2168	<b>65.2207</b>	<b>38550.000</b>	<b>56.4057</b>
		25	0.7671					
		30	1.0819					
	WOA [17]	14	0.7489	2.4724	74.4500	64.7115	40029.000	56.6863
		25	0.7076					
		30	1.0159					
	OCDE [33]	14	0.7584	2.7772	73.0760	64.8793	40338.942	56.1476
		24	0.9865					
		30	1.0323					

### 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 [32] :

- 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 3.6 représente le type de chaque jeu de barres et de chaque ligne constituant le réseau de distribution IEEE 69 jeux de barres.

**Tableau 3.6** : 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 insertion 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.

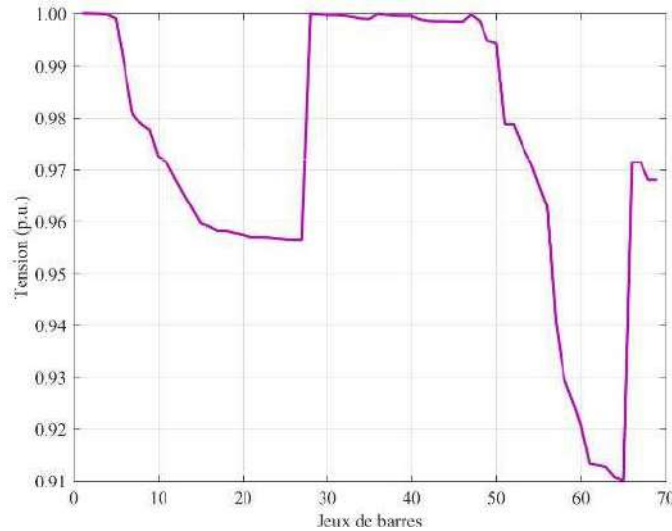
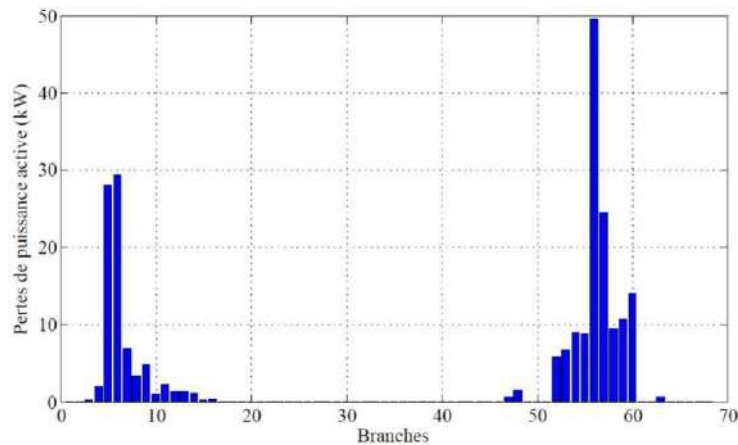


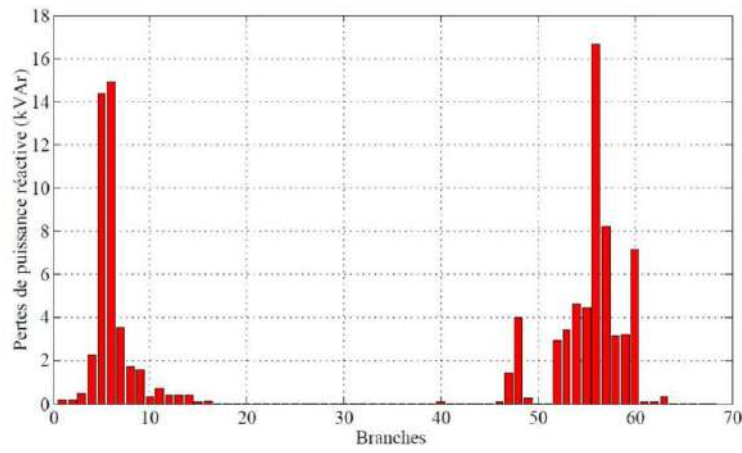
Figure 3.14 : Profile de tension du réseau IEEE 69 jeux de barres.

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<sup>ème</sup> 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. Les pertes économiques annuelles sont 98354,3454 \$.



a. Pertes de puissance active





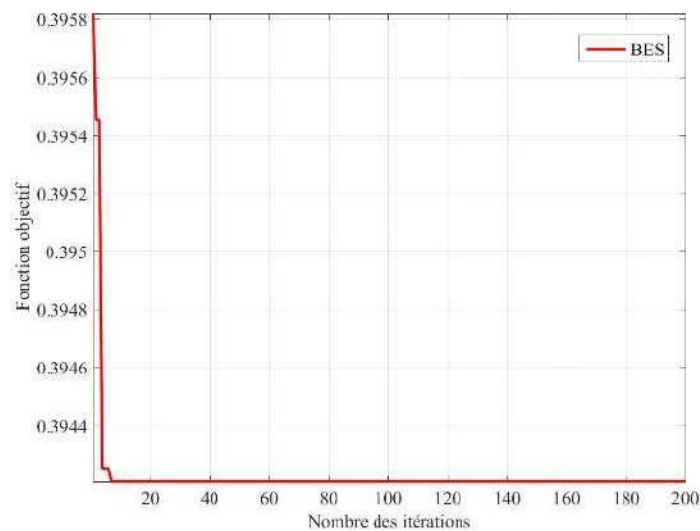
b. Pertes de puissance réactive

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

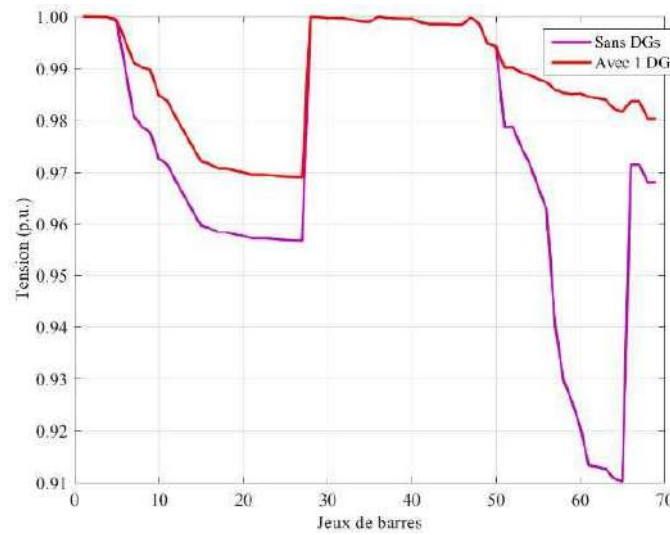
La Figure 3.14 représente le profil de tension du réseau IEEE 69 jeux de barres sans intégration de DGs. On remarque que la valeur de la tension la plus basse est 0,9102 p.u. qui se trouve au niveau du jeu de barres 65. Cette valeur est inférieure à la limite admissible de tension 0,9500 p.u.

**3.2.2.2 Cas 2 : Avec insertion 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.

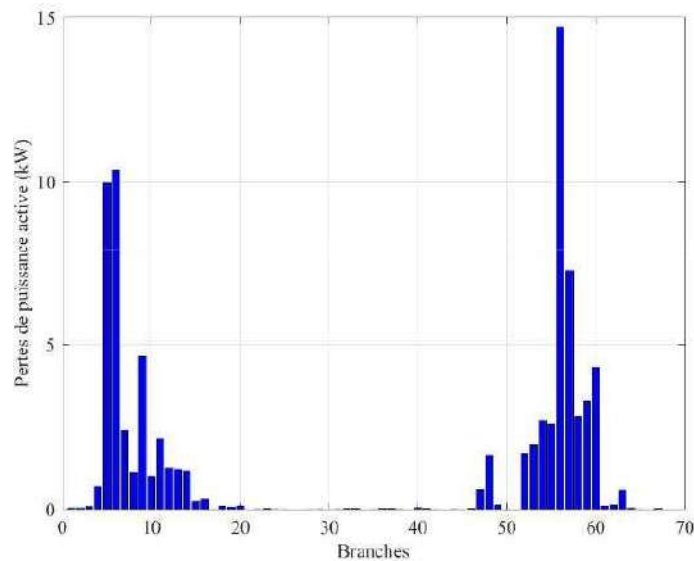


**Figure 3.16 :** Courbe de convergence de BES du réseau IEEE 69 jeux de barres (Cas 2).



**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 81,6099 kW. Les pertes économiques annuelles avec une DG sont 41249,00 \$.



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

Le Tableau 3.7 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 1,8345 MW. Les pertes de puissance active du réseau sont diminuées de 63,6568 % par rapport au premier cas. Les pertes économiques totales sont 41249,00 \$. Les pertes économiques sont diminuées de 58,0608 % par rapport au premier cas.

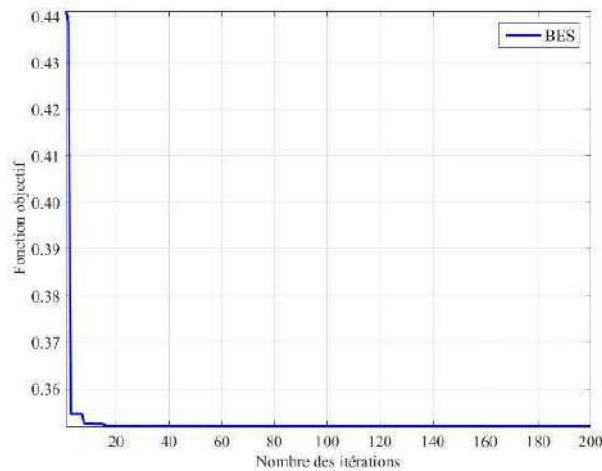
Les résultats de BES montrent l'efficacité de l'algorithme BES dans l'optimisation technico-économique de l'emplacement et de la taille des DGs.

**Tableau 3.7** : Résultats de simulation du réseau IEEE 69 jeux de barres (Cas 2).

Cas étudié	Emplacement optimale des DGs	Taille totale des DGs (MW)	Pertes de puissance active (kW)	Réduction des pertes de puissance active (%)	Pertes économiques totales (\$)	Réduction des pertes économiques (%)
Cas 2: 1 DG	61	1.8345	81.6099	63.6568	41249.00	58.0608

### 3.2.2.3 Cas 3 : Avec insertion 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'insertion de deux DGs.



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

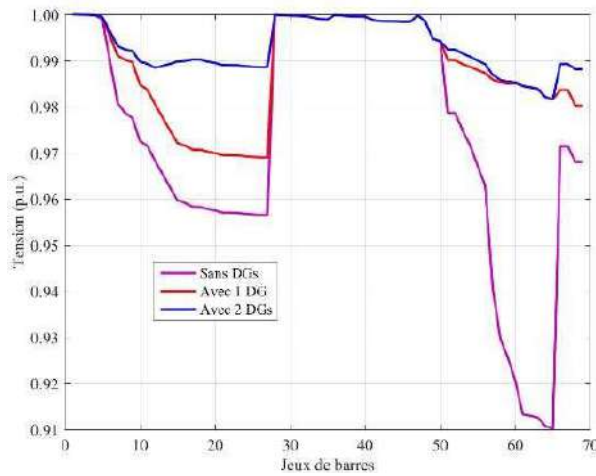


Figure 3.20 : Profile de tension du réseau IEEE 69 jeux de barres (Cas 3).

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 70,6027 kW. Les pertes économiques annuelles avec deux DGs sont 37621,00 \$.

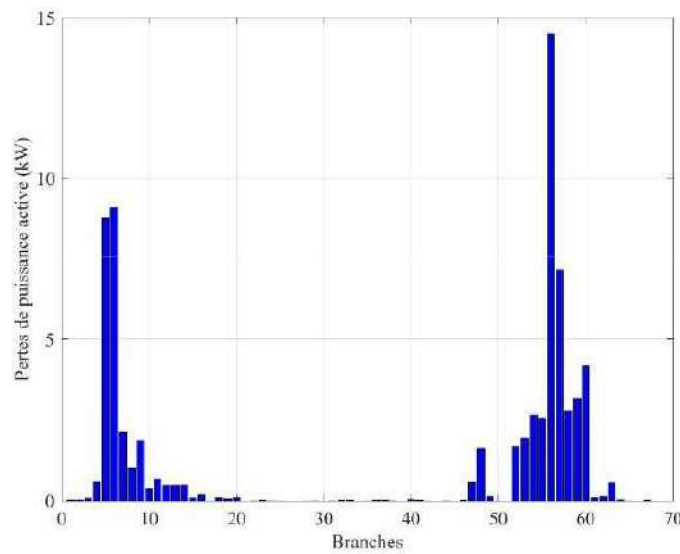


Figure 3.21 : Pertes de puissance active dans le réseau IEEE 69 jeux de barres (Cas 3).

Le Tableau 3.8 représente les résultats de l'optimisation de l'algorithme BES. Les emplacements optimaux des DGs sont aux niveaux des jeux de barres 18 et 61. Les tailles optimales sont, respectivement, 0,4839 MW et 1,7485 MW. Les pertes de puissance active du réseau sont diminuées de 68,5586 % par rapport au premier cas. Les pertes économiques totales sont 37621,00 \$. Les pertes économiques sont diminuées de 61,7495 % par rapport au premier cas.

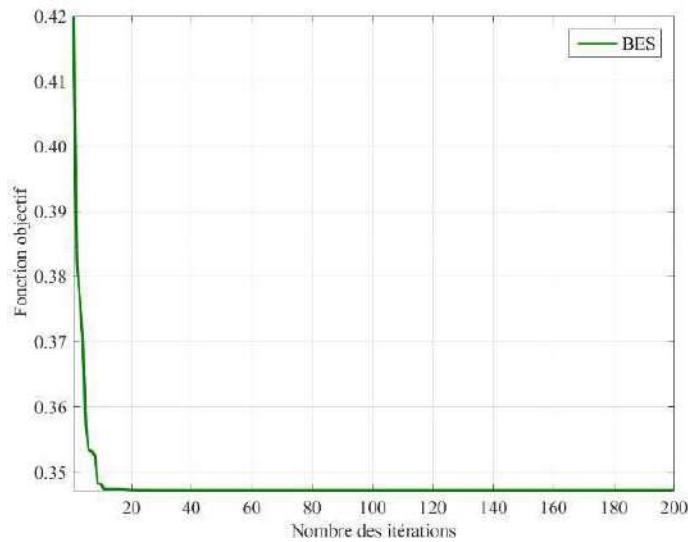
Les résultats de BES montrent l'efficacité de l'algorithme BES dans l'optimisation techno-économique de l'emplacement et de la taille des DGs.

**Tableau 3.8** : Résultats de simulation du réseau IEEE 69 jeux de barres (Cas 3).

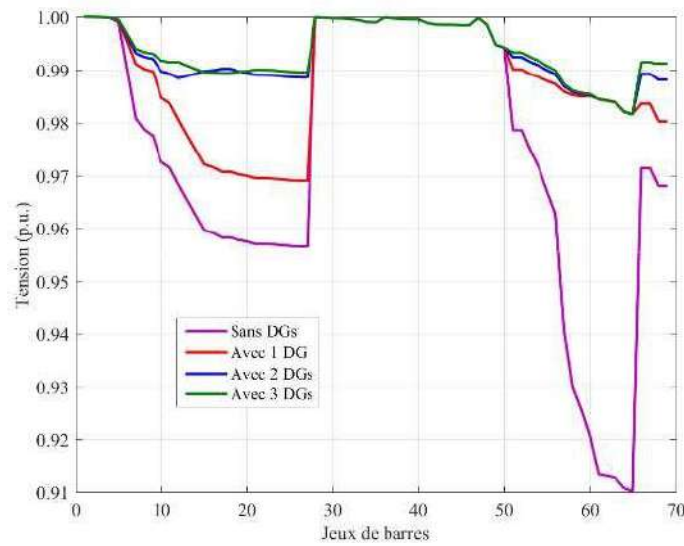
Cas étudié	Emplacement optimal des DGs	Taille optimal des DGs (MW)	Taille totale des DGs (MW)	Pertes de puissance active (kW)	Réduction des pertes de puissance active (%)	Pertes économiques totales (\$)	Réduction des pertes économiques (%)
Cas 3 2 DG	18 61	0.4839 1.7485	2.2324	70.6027	68.5586	37621.00	61.7495

**3.2.2.4 Cas 3 : Avec insertion 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’insertion des DGs et le meilleur profil de tension est obtenu par l’insertion de trois DGs.

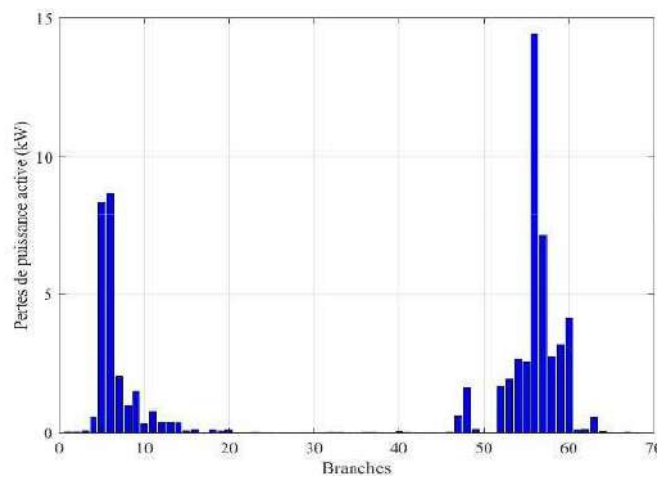


**Figure 3.22** : Caractéristique de convergence de BES du réseau IEEE 69 jeux de barres (Cas 4).



**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 68,9546 kW. Les pertes économiques annuelles avec trois DGs sont 37380,00 \$.



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

Le Tableau 3.9 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 12, 21 et 61. Les tailles optimales sont, respectivement, 0,3572 MW, 0,3199 MW et 1,7153 MW. Les pertes de puissance active du réseau sont diminuées de 69,2925 %. Les pertes économiques totales sont 37380,00 \$. Les pertes économiques sont diminuées de 61,9946 % par rapport au premier cas.

Les résultats de BES montrent l’efficacité de l’algorithme BES dans l’optimisation de l’emplacement et de la taille des DGs.

**Tableau 3.9** : Résultats de simulation du réseau IEEE 69 jeux de barres (Cas 4).

Cas étudiés	Méthode d'optimisation	Emplacement optimal des DGs	Taille optimale des DGs (MW)	Taille totale des DGs (MW)	Pertes de puissance active (kW)	Réduction des pertes de puissance active (%)	Pertes économiques totales (\$)	Réduction des pertes économiques (%)
Cas 4: 3 DGs	<b>BES</b>	12	0.3572	2.3924	<b>68.9546</b>	<b>69.2925</b>	<b>37380.00</b>	<b>61.9946</b>
		21	0.3199					
		61	1.7153					
	WOA [17]	18	0.3996	2.5880	70.5200	68.6578	37891.00	61.5515
		61	1.7264					
		66	0.4624					
	OCDE [33]	12	0.4065	2.4284	69.7800	68.9770	37847.32	61.5839
		21	0.3147					
		61	1.7072					

### 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 techno-économique 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 et les pertes économiques dans le réseau de distribution. Ces résultats ont également prouvé la performance de la méthode d'optimisation BES en comparaisant avec d'autres algorithmes.

## Conclusion générale

---

---

La libéralisation du marché de l'électricité et l'augmentation de la consommation d'énergie ont conduit les chercheurs à développer des techniques pour l'insertion des nouvelles sources de génération d'énergie au niveau du réseau de distribution. Ce type de source de production est généralement connu sous la nomination production décentralisée (Distributed Generation (DG)).

Le travail présenté dans ce mémoire s'est porté sur la planification optimale de la production décentralisée dans les réseaux de distribution.

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'insertion de ces types de 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 de pygargue à tête blanche (Bald Eagle Search (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 emplacements et taille des DGs pour avoir le minimum possible des pertes de puissance active et les pertes économiques 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 algorithmes d'optimisation pour l'amélioration techno-économique 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 nouveaux algorithmes d'optimisation pour l'optimisation de l'insertion de la production décentralisée aux réseaux de distribution.



## Bibliographie

---

- [1] A. Sami et O. Oussama, “Etude de l’intégration de la production décentralisée dans un réseau électrique”, Mémoire de master, Université de Sétif 1, 2020.
- [2] M. F. Hamoudi, “Architectures des réseaux électriques”, PhD, Electrotechnique, Université Khenchela, Algérie, 2018.
- [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] Global Electricity Review 2022, Ember, Mars 2022.
- [5] Quinzième inventaire-Edition 2013, disponible sur le site : <http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/html/inventaire/pdf/15e-inventaire-Chap03-3.9.1Algerie.pdf>.
- [6] E. D. N and M. M. Cosson, “Stabilité du réseau électrique de distribution. Analyse du point de vue automatique d’un système complexe”, Thèse de doctorat de l’université Paris-Saclay, Septembre 2016
- [7] P. H. Andersen, J. A. Mathews, and M. Rask, “Integrating private transport into renewable energy policy: The strategy of creating intelligent recharging grids for electric vehicles”, *Energy Policy*, vol. 37, no. 7, pp. 2481–2486, 2009.
- [8] N. Ketfi, “Contribution à la gestion des réseaux de distribution en présence de génération d’énergie dispersée”, Thèse de doctorat, Université de Batna, 2014.
- [9] Opérateur du système électrique OSE, <http://www.ose.dz/courbes.php>.
- [10] 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.
- [11] S. Touré, “Optimisation des réseaux : réseau actif et flexible”, Thèse de doctorat, Grenoble, 2014.
- [12] 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 école centrale de Lille, 2014.
- [13] N. Bakhta, “La production décentralisée ”, thèse doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d’Oran-Mohamed Boudiaf, 2017.
- [14] 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.
- [15] M. C. Alvarez-hérault, “Architectures des réseaux de distribution du futur en présence de production décentralisée ”, Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2009.
- [16] 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.
- [17] H. C. Prasad, K. Subbaramaiah and P. Sujatha, “Optimal DG unit placement in distribution networks by multi-objective whale optimization algorithm & its techno-economic analysis”, *Electric Power Systems Research*, Vol. 214, 108869, 2023.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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
- [22] 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.
- [23] K. Sorensen, M. Sevaux, F. Glover F, “A history of metaheuristics », *Handbook of Heuristics*, Springer, 2-2, pp. 791–808, 2018.
- [24] 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.
- [25] F. Glover, “Tabu search - part I », *ORSA Journal on Computing*, Vol. 1, No. 3, pp. 190– 206, 1989.
- [26] 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.
- [27] R. Eberhart, and J. Kennedy, “Swarm Intelligence ». Morgan Kaufmann Publishers, 2001.
- [28] L. J. Fogel, A. J. Owens, and M. J. Walsh, “Artificial Intelligence Through Simulated Evolution ». Wiley and sons. NY, 1966.
- [29] J.A. Doucet, “La Restructuration des Marchés de l’Électricité : un Portrait de la Situation Mondiale ». Document synthèse, La Régie de l’énergie, Montréal, 1997.
- [30] A. Alsattar, A. Zaidan, B. Zaidan, “Novel meta-heuristic bald eagle search optimization algorithm”, *Artif Intell Rev*, Vol. 53, pp. 2237–2264, 2020.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] S. Kumar, K. Kamal and N. Chakraborty, “Optimal DG placement by multi-objective opposition based chaotic differential evolution for techno-economic analysis”, *Applied Soft Computing Journal*, Vol. 78, pp. 70–83, 2019.

## 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 ( $\Omega$ )	Réactance ( $\Omega$ )
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 <sub>r</sub> )
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 ( $\Omega$ )	Réactance ( $\Omega$ )
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 (MVA <sub>r</sub> )
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



يزداد الطلب على الطاقة الكهربائية بشكل كبير في العديد من البلدان حول العالم بسبب الزيادة السكانية والنمو الاقتصادي والنشاط البشرية. ونظرا لهذا، تسعى الشركات المتخصصة في توزيع الطاقة الكهربائية لتشجيع الاستثمار على مصادر الإنتاج اللامركزية للطاقة في شبكات التوزيع. ومن أجل تقليل الضغوطات في الطاقة العالية في شبكات التوزيع وتحسين الجودة، يجب تحديد بترية ملى الموضع والحجم لثيت مصادر الطاقة اللامركزية. في هذه المذكرة، تم استخدام خوارزمية الذر الصلح من أجل حل هذه المشكلة. هذه الخوارزمية التي تعتبر من الخوارزميات الجديدة المستوحاة من الطبيعة، يتم الدراج المثل لمصادر الطاقة اللامركزية في شبكة التوزيع من حيث الموضع والحجم لهدف تقليل الضغوطات في الطاقة العالية وتقليل الخسائر الاقتصادية. النتائج أداء خوارزمية الذر الصلح، شبكتين توزيع كهربائيتين 33 عقدة و69 عقدة أسهمت كأظمة إختيار. تؤكد النتائج التي تم الحصول عليها على نجاعة خوارزمية الذر الصلح.

**الكلمات المفتاحية :** شبكات التوزيع، مصادر الإنتاج اللامركزية، خوارزمية الذر الصلح، الأمثلة المعقدة الأهداف.

## Abstract

The electrical energy demand is increasing dramatically in many countries around the world due to population increasing, economic development and human activities of modern life. Due to this significant demand increasing, electricity distribution companies seek to promote decentralized production or distributed generation (DG). 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 insertion of DGs is carried out for two objectives minimization of active power losses and minimization of economic 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, Distributed Generation, Bald Eagle Search Algorithm, Multi objectives optimization.

## Résumé

La demande d'énergie électrique augmente considérablement dans plusieurs pays du monde en raison d'augmentation de la population, du développement économique et des activités humaines de la vie moderne. Les entreprises de distribution d'électricité cherchent à favoriser la dépendance à la production décentralisée ou distribuée (Distributed Generation (DG)) dans le réseau de distribution. 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'insertion optimale de la production décentralisée est effectuée pour un deux objectif de minimisation des pertes de puissance active et minimisation des pertes économiques. 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, Algorithme de pygargue à tête blanche, Optimisation multi-objectifs.