الجممورية الجزائرية الديمةراطية الشعبية وزارة التعليم العالي والبدش العلمي

#### UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY

Faculté : TECHNOLOGIE Département : Électrotechnique Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIES Filière : Électrotechnique Spécialité : Réseaux électriques

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

## Thème:

Intégration optimale des sources d'énergie renouvelable dans le réseau de distribution en utilisant l'algorithme PSO

Présenté par : Ghelis Islem

Soualem Said

Encadrant : Samir Settoul

MAB

Université Badji Mokhtar - Annaba

جامعة باجي مختار –

عناد

## Jury de Soutenance :

Ronciali Nadia	Prof	Université Badji Mokhtar -	Prácidant	
Densian Naula	FIOI	Annaba	Freshuent	
Sottoul Somir	MAD	Université Badji Mokhtar -	Encadrant	
Settour Samm	MAD	Annaba		
Mohammadi Maufid	ΜζΑ	Université Badji Mokhtar -	Examinatour	
Monammedi Moulid	MCA	Annaba	Examinateur	

Année Universitaire : 2023/2024

## Remerciements

En ce moment de réussite, je rends grâce à Allah pour Sa guidance tout au long de mon parcours académique.

Je voudrais offrir ma sincère gratitude à mon superviseur, Dr. « Settoul Samir », pour ses conseils, sa patience et ses critiques très utiles. Je tiens également à remercier Prof. « BENSIALI Nadia » et Dr. « Mohmmedi Moufid » d'avoir pris le temps d'évaluer mon travail et de diriger l'examen de cette thèse.

Enfín, je tiens à remercier infiniment ceux qui ont contribué à ce succès, que ce soit par leur soutien moral, leurs encouragements ou leur présence bienveillante, je vous adresse mes plus sincères remerciements. Que cette réussite soit le fruit de notre collaboration et de notre dévouement collectif. Merci du fond du cœur.

# Dédicace

J'offre ce modeste travail:

A mes chers parents,

Mais aucune dédicace ne serait témoin de mon profond amour, mon immense gratitude et mon plus grand respect, car je ne pourrais jamais oublier la tendresse et l'amour dévoué par lesquels ils m'ont toujours entourer depuis mon enfance.

Je dédie aussi ce modeste taravail :

A tous mes amis, et à tous ceux que j'aime et à toutes les personnes qui m'ont Prodigué des encouragements et se sont données la peine de me soutenir durant cette année de formation.

A mes chers formateurs et formatrices, sans aucune exception.

# Dédicace

## Je dédie cet ouvrage

A ma maman qui m'a soutenu et encouragé durant ces années d'études.
Qu'elle trouve ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.
A mes frères, mes grands parents et Ceux qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail. Ils m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours.
A ma famille, mes proches et à ceux qui me donnent de l'amour et de la vivacité.

A ma femme qui m'as toujours encouragé, et à qui je souhaite plus de

succès.

## **Table Des Matières**

REMERCIEMENTS	II
DEDICACE	
DEDICACE	IV
TABLE DES MATIERES	v
TABLE DES FIGURES	VII
TABLE DES TABLEAUX	VIII
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1: ÉTUDE ET MODELISATION DES RESEAUX ELECTRIQUES ET SOURCES PHOTOVOLTAÏQUE	S3
1.1 INTRODUCTION	3
1.2 Les reseaux electriques	4
1.2.1 Composition des réseaux électriques	4
1.2.2 Fonctionnement et défis	5
1.2.3 Enjeux et perspectives	5
1.3 Les sources d'energie photovoltaïques	6
1.3.1 Fonctionnement des cellules photovoltaïques	6
1.3.2 Avantages de l'énergie photovoltaïque	7
1.3.3 Applications de l'énergie photovoltaïque	7
1.3.4 Défis et perspectives de l'énergie photovoltaïque	7
1.4 Modelisation de source photovoltaïque	8
1.4.1 Pourquoi modéliser les sources photovoltaïques	8
1.4.2 Modèles de source photovoltaïque	8
1.4.3 Choix d'un modèle de source photovoltaïque	9
1.4.4 Outils de modélisation de source photovoltaïque	9
1.4.5 Cellule photovoltaïque	9
1.5 CONCLUSION	11
CHAPITRE 2: : FORMULATION DU PROBLEME D'OPTIMISATION ET ECOULEMENT DE PUISSANCE	12
2.1 INTRODUCTION	12
2.2 ÉCOULEMENT DE PUISSANCE	13
2.2.1 Solution d'écoulement de puissance la méthode de Newton-Raphson	13
2.3 RESULTATS D'ECOULEMENT DE PUISSANCE AVANT L'INTEGRATION DE PV	17
2.3.1 Réseau IEEE 33-JB	17
2.3.2 Résultats d'écoulement de puissance avant PV	18
2.3.3 Réseau IEEE 69-JB	20
2.3.4 Résultats d'écoulement de puissance avant PV	21
2.4 Formulation du probleme d'optimisation pour l'integration de PV	23
2.4.1 Définition de l'optimisation	23
2.4.2 Problème d'optimisation mono-objectif	24
2.4.3 Modélisation de la ligne de distribution	24
2.4.4 Fonctions objectifs	24
2.4.5 Fonction mono-objectif	25

2.4.6 Fonction multi-objectifs	25
2.4.7 Contraintes du réseau de distribution et de PV	
2.4.7.1 Contraintes du réseau de distribution	
2.4.7.2 Contraintes de PV	27
2.5 Principe de l'Algorithme PSO	27
2.6 Conclusion	29
CHAPITRE 3: RESULTATS ET DISCUTIONS	
3.1 INTRODUCTION	
3.2 RESULTATS D'OPTIMISATION MONO-OBJECTIF	
3.3 RESULTATS D'OPTIMISATION MULTI-OBJECTIFS	35
3.4 Conclusion	
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	48
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	49
ANNEXE	52
RESUME	55
ABSTRACT	56
ملخص	57

## **Table Des Figures**

Figure 1.1 : Reseau electrique [1]	4
Figure 1.2 : La structure generale de reseau electrique [3]	5
Figure 1.3 : Panneaux photovoltaïques [5]	6
Figure 1.4 : Fonctionnement des cellules photovoltaïques.	6
Figure 1.5 : Schema equivalent d'une cellule PV	10
Figure 2.1 : Schema unifilaire de reseau IEEE 33-JB	
FIGURE 2.2 : PROFIL DE LA TENSION AVANT PV : IEEE 33-JB	19
FIGURE 2.3 : PERTES DE PUISSANCE ACTIVE : IEEE 33-JB	20
FIGURE 2.4 : PERTES DE PUISSANCE REACTIVE : IEEE 33-JB	20
Figure 2.5 : Schema unifilaire de reseau IEEE 69-JB	21
FIGURE 2.6 : PROFIL DE LA TENSION AVANT PV : IEEE 69-JB	22
FIGURE 2.7 : PERTES DE PUISSANCE ACTIVE AVANT PV : IEEE 69-JB.	23
FIGURE 2.8 : PERTES DE PUISSANCE REACTIVE AVANT PV : IEEE 69-JB	23
Figure 2.9 : Schema unifilaire d'une ligne de distribution	24
FIGURE 2.10: (A). VOL D'OISEAUX EN GROUPE, (B). BANCS DE POISSONS	28
FIGURE 3.1 : CARACTERISTIQUE DE CONVERGENCE MONO-OBJECTIF POUR 1 PV	31
FIGURE 3.2 : CARACTERISTIQUE DE CONVERGENCE MONO-OBJECTIF POUR 3 PV	
FIGURE 3.3 : CARACTERISTIQUE DE CONVERGENCE DE FMO POUR 1 PV	
FIGURE 3.4 : CARACTERISTIQUE DE CONVERGENCE DE FMO POUR 3 PV.	
FIGURE 3.5 : PROFILS DES TENSIONS POUR L'OPTIMISATION MULTI-OBJECTIFS	
FIGURE 3.6 : PERTES ACTIVE POUR L'OPTIMISATION MULTI-OBJECTIFS	41
FIGURE 3.7 : PERTES REACTIVE POUR L'OPTIMISATION MULTI-OBJECTIFS.	
FIGURE 3.8 : LA TENSION MINIMALE EN EN CONSIDERATION DE VARIATION DE LA CHARGE	43
FIGURE 3.9 : LES PERTES ACTIVE EN EN CONSIDERATION DE VARIATION DE LA CHARGE.	44
FIGURE 3.10 : LES PERTES ACTIVE EN EN CONSIDERATION DE VARIATION DE LA CHARGE.	45
FIGURE 3.11 : LES PROFILS DES TENSIONS EN CONSIDERATION DE VARIATION DE LA CHARGE	46

## **Table Des Tableaux**

TABLEAU 2.1 : RESULTATS D'ECOULEMENT DE PUISSANCE AVANT PV	18
TABLEAU 2.2 : RESULTATS D'ECOULEMENT DE PUISSANCE AVANT PV	21
TABLEAU 3.1 : RESULTATS D'OPTIMISATION MONO-OBJECTIF : IEEE 33-JB.	32
TABLEAU 3.2 : RESULTATS D'OPTIMISATION MONO-OBJECTIF : IEEE 69-JB	34
TABLEAU 3.3 : RESULTATS D'OPTIMISATION MULTI-OBJECTIFS : RESEAU IEEE 33-JB	37
TABLEAU 3.4 : RESULTATS D'OPTIMISATION MULTI- : RESEAU IEEE 69-JB	38

## Introduction générale

L'électricité est devenue un élément indispensable de nos vies modernes, alimentant nos foyers, nos industries et nos villes. Pour répondre à la demande croissante en énergie, les réseaux électriques, ces infrastructures complexes qui acheminent l'électricité de sa production à sa consommation, jouent un rôle crucial. Cependant, la production traditionnelle d'électricité, souvent basée sur des combustibles fossiles, pose des défis environnementaux majeurs tels que les émissions de gaz à effet de serre et la pollution atmosphérique.

Face à ces défis, les énergies renouvelables, comme l'énergie photovoltaïque, offrent une alternative prometteuse et durable. L'énergie photovoltaïque, qui convertit directement l'énergie du soleil en électricité grâce à des cellules photovoltaïques, présente de nombreux avantages :

**Inépuisable et propre** : Contrairement aux combustibles fossiles, l'énergie solaire est une ressource inépuisable et ne produit aucune émission polluante.

Abondante et accessible : Le soleil est une source d'énergie abondante et accessible partout sur la planète.

**Modulaire et évolutive** : Les installations photovoltaïques peuvent être facilement installées sur des toits, des bâtiments ou des terrains, et leur capacité peut être augmentée progressivement.

L'intégration des énergies renouvelables dans les réseaux électriques pose cependant des défis techniques et économiques, notamment en termes de gestion de la variabilité et de l'intermittence de la production. C'est dans ce contexte que la modélisation et l'optimisation des réseaux électriques avec l'intégration de sources photovoltaïques prennent toute leur importance. L'objectif de cette étude est de développer des modèles et des méthodes d'optimisation pour améliorer l'efficacité et la fiabilité des réseaux électriques intégrant des sources d'énergie photovoltaïque.

Dans cette étude, deux réseaux standards ont été examinés : les réseaux IEEE 33-JB et IEEE 69-JB. Ces réseaux sont couramment utilisés comme références dans les études de simulation et d'optimisation des systèmes de distribution électrique. Ils permettent de tester et de comparer les performances des méthodes proposées dans des conditions réalistes et variées.

Les fonctions objectifs considérées dans cette étude incluent la minimisation des pertes de puissance active et réactive, ainsi que l'amélioration du profil de tension dans le réseau de distribution. Ces objectifs sont cruciaux pour assurer une distribution efficace et stable de l'électricité, surtout avec l'intégration de sources d'énergie renouvelable qui peuvent introduire des variations significatives dans les flux de puissance.

Ce mémoire se concentre sur l'utilisation de l'algorithme Particle Swarm Optimization (PSO) pour améliorer l'intégration des sources PV dans les réseaux de distribution électriques. Le PSO est une technique d'optimisation basée sur l'intelligence collective des essaims, où chaque particule représente une solution potentielle dans l'espace de recherche. Les particules se déplacent dans cet espace en suivant des règles simples inspirées du comportement des essaims d'oiseaux ou des bancs de poissons, et en échangeant des informations sur les positions et les

1

vitesses optimales. Le PSO est particulièrement adapté pour les problèmes d'optimisation multiobjectifs grâce à sa capacité à explorer efficacement de vastes espaces de solutions et à converger vers des solutions optimales globales.

Le premier chapitre offre une vue d'ensemble des réseaux électriques et des sources photovoltaïques, en incluant une description détaillée de leur fonctionnement, de leurs avantages et des défis associés, ainsi qu'une modélisation précise. Il commence par présenter les réseaux électriques traditionnels et leur architecture, en détaillant les différents composants et leur rôle dans le système de distribution. Ensuite, il explore les sources photovoltaïques, en discutant de la technologie des cellules solaires, des systèmes PV et des défis techniques liés à leur intégration dans les réseaux existants. Enfin, ce chapitre aborde la modélisation des sources PV et des réseaux électriques, fournissant les bases théoriques nécessaires pour les analyses ultérieures.

Le deuxième chapitre se consacre à la formulation du problème d'optimisation et à l'analyse de l'écoulement de puissance dans les réseaux de distribution. Il commence par une analyse des méthodes d'écoulement de puissance, avec un accent particulier sur la méthode de Newton-Raphson, qui est couramment utilisée pour résoudre les équations d'écoulement de puissance dans les systèmes électriques. Ensuite, il présente les résultats d'écoulement de puissance avant l'intégration des PV pour différents réseaux de test, mettant en lumière les performances actuelles et les limitations des réseaux. La section se termine par la définition et la formulation du problème d'optimisation, en détaillant les fonctions objectives, les contraintes et le principe de l'algorithme PSO. Cette formulation est cruciale pour structurer les simulations et les analyses de performance qui suivent.

Le troisième chapitre présente les résultats des simulations d'optimisation mono-objectif et multi-objectifs pour l'intégration des sources photovoltaïques dans les réseaux de distribution. Il analyse les caractéristiques de convergence de l'algorithme PSO et compare les performances avant et après l'optimisation. Les simulations sont réalisées sur plusieurs réseaux de test de différentes tailles et complexités pour illustrer l'efficacité et la robustesse de l'algorithme PSO. Les discussions portent sur les améliorations observées en termes de réduction des pertes d'énergie, de stabilité de la tension et de réponse aux variations de la charge. Les résultats montrent que l'optimisation par l'algorithme PSO permet d'améliorer significativement les performances des réseaux de distribution intégrant des sources photovoltaïques, confirmant l'efficacité de l'approche proposée.

L'importance de cette recherche réside dans sa capacité à proposer des solutions viables pour l'intégration des énergies renouvelables, contribuant ainsi à la transition vers des systèmes énergétiques plus durables. En outre, les conclusions et recommandations issues de ce travail peuvent servir de base pour de futures études et innovations dans le domaine des réseaux intelligents et des énergies renouvelables. Ce mémoire vise à contribuer à l'évolution des réseaux intelligents et à la promotion des énergies renouvelables pour un avenir énergétique plus durable, en démontrant l'efficacité des techniques d'optimisation avancées pour surmonter les défis.

# Chapitre 1: Étude et modélisation des réseaux électriques et sources photovoltaïques

## **1.1 Introduction**

L'électricité est devenue un élément indispensable de nos vies modernes, alimentant nos foyers, nos industries et nos villes. Pour répondre à la demande croissante en énergie, les réseaux électriques, ces infrastructures complexes qui acheminent l'électricité de sa production à sa consommation, jouent un rôle crucial. Cependant, la production traditionnelle d'électricité, souvent basée sur des combustibles fossiles, pose des défis environnementaux majeurs, tels que les émissions de gaz à effet de serre et la pollution atmosphérique.

Face à ces défis, les énergies renouvelables, comme l'énergie photovoltaïque, offrent une alternative prometteuse et durable. L'énergie photovoltaïque, qui convertit directement l'énergie du soleil en électricité grâce à des cellules photovoltaïques, présente de nombreux avantages :

**Inépuisable et propre :** Contrairement aux combustibles fossiles, l'énergie solaire est une ressource inépuisable et ne produit aucune émission polluante.

Abondante et accessible : Le soleil est une source d'énergie abondante et accessible partout sur la planète.

**Modulaire et évolutive :** Les installations photovoltaïques peuvent être facilement installées sur des toits, des bâtiments ou des terrains, et leur capacité peut être augmentée progressivement.

L'intégration des énergies photovoltaïques dans les réseaux électriques existants ouvre de nouvelles perspectives pour un système énergétique plus durable et résilient. Cependant, cette intégration présente également des défis techniques et opérationnels :

**Variabilité de la production :** La production d'énergie solaire est intermittente et dépend de la météo, ce qui peut entraîner des fluctuations dans l'alimentation du réseau.

**Gestion de la demande :** Il est nécessaire de gérer la demande en électricité pour s'adapter à la production variable d'énergie solaire.

**Stabilité du réseau :** L'injection d'énergie solaire dans le réseau doit être gérée pour maintenir la stabilité de la tension et de la fréquence.

L'alliance des réseaux électriques et des énergies photovoltaïques offre un avenir prometteur pour un système énergétique plus durable, résilient et respectueux de l'environnement. Les défis techniques et opérationnels liés à l'intégration des énergies renouvelables peuvent être surmontés grâce à l'évolution des réseaux vers des réseaux intelligents. En combinant les avantages des réseaux électriques et des énergies photovoltaïques, nous pouvons construire un avenir énergétique plus propre et plus durable pour les générations à venir.

#### **1.2 Les réseaux électriques**

Les réseaux électriques constituent l'épine dorsale de notre civilisation moderne, reliant les producteurs d'électricité aux consommateurs à travers un vaste réseau d'infrastructures complexes. Ils assurent l'alimentation en énergie indispensable à nos foyers, industries, commerces et institutions, permettant ainsi le fonctionnement de nos vies quotidiennes.



Figure 1.1 : Réseau électrique [1].

#### 1.2.1 Composition des réseaux électriques

Un réseau électrique se compose de plusieurs éléments clés [2] :

- **Centrales électriques :** Elles produisent l'électricité en utilisant différentes sources d'énergie, telles que les combustibles fossiles, l'énergie nucléaire, les énergies renouvelables (solaire, éolienne, hydraulique, etc.).
- Lignes de transport : Elles transportent l'électricité sur de longues distances à haute tension, reliant les centrales électriques aux nœuds de distribution.
- **Postes électriques :** Ils permettent de transformer la tension de l'électricité, de la haute tension à la moyenne tension, et de la distribuer dans les zones de consommation.
- Réseaux de distribution : Ils acheminent l'électricité à basse tension jusqu'aux compteurs des consommateurs.
- **Consommateurs :** Ils représentent l'ensemble des appareils électriques qui utilisent l'énergie, tels que les éclairages, les appareils électroménagers, les ordinateurs, les moteurs industriels, etc.



Figure 1.2 : La structure générale de réseau électrique [3].

#### 1.2.2 Fonctionnement et défis

Le fonctionnement d'un réseau électrique repose sur un équilibre délicat entre la production et la consommation d'électricité. La production doit répondre en permanence à la demande des consommateurs, en tenant compte des variations de consommation tout au long de la journée et des saisons [2].

Les réseaux électriques modernes font face à de nombreux défis, notamment [2] :

- Intégration des énergies renouvelables : L'intégration croissante des sources d'énergie renouvelables, intermittentes par nature, pose des défis en termes de gestion de la production et de la stabilité du réseau.
- Augmentation de la demande : La croissance de la population et l'électrification croissante des usages entraînent une augmentation constante de la demande en électricité.
- Vieillissement des infrastructures : De nombreux réseaux électriques sont vieillissants et nécessitent des investissements importants pour leur modernisation et leur renforcement.
- **Cyberattaques :** Les réseaux électriques sont des cibles privilégiées pour les cyberattaques, qui peuvent causer des perturbations majeures et des pannes d'électricité.

#### **1.2.3 Enjeux et perspectives**

L'avenir des réseaux électriques passe par leur modernisation et leur transformation en réseaux intelligents. Ces réseaux intelligents, grâce à l'utilisation de technologies numériques avancées, permettront [2] :

- Une gestion plus efficace de la production et de la consommation d'électricité.
- Une meilleure intégration des énergies renouvelables.
- Une réduction des pertes d'énergie.
- Une amélioration de la fiabilité et de la sécurité des réseaux.
- Un développement de nouveaux services et applications liées à l'électricité.
- Les réseaux électriques sont des systèmes vitaux pour notre société, et leur évolution est au cœur des enjeux énergétiques et technologiques du 21ème siècle. Les efforts de recherche et d'innovation se poursuivent pour développer des réseaux électriques

plus intelligents, plus durables et plus résilients, capables de répondre aux besoins croissants de notre société en matière d'énergie.

#### 1.3 Les sources d'énergie photovoltaïques

L'énergie photovoltaïque, souvent abrégée en PV, est une source d'énergie renouvelable qui tire parti de la lumière du soleil pour produire de l'électricité. Cette technologie utilise des cellules photovoltaïques, composées de matériaux semi-conducteurs comme le silicium, pour convertir directement l'énergie solaire en électricité [4].



Figure 1.3 : Panneaux photovoltaïques [5].

#### 1.3.1 Fonctionnement des cellules photovoltaïques

Au cœur des cellules photovoltaïques se trouve un principe physique appelé effet photovoltaïque. Lorsque la lumière du soleil frappe la surface d'une cellule, ses photons, ces minuscules paquets d'énergie, arrachent des électrons aux atomes du matériau semi-conducteur. Ces électrons libres circulent ensuite dans la cellule, générant un courant électrique [6].



Figure 1.4 : Fonctionnement des cellules photovoltaïques.

#### 1.3.2 Avantages de l'énergie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque présente de nombreux avantages qui en font une source d'énergie prometteuse pour l'avenir [6] :

- Inépuisable et propre : Contrairement aux combustibles fossiles, l'énergie solaire est une ressource inépuisable et ne produit ni émissions polluantes ni gaz à effet de serre.
- Abondante et accessible : Le soleil est une source d'énergie abondante et accessible partout sur la planète.
- **Modulaire et évolutive :** Les installations photovoltaïques peuvent être facilement installées sur des toits, des bâtiments ou des terrains, et leur capacité peut être augmentée progressivement.
- **Faible maintenance :** Les panneaux solaires ne nécessitent que peu d'entretien et ont une longue durée de vie, pouvant atteindre 25 à 30 ans.
- **Production d'électricité décentralisée :** L'énergie photovoltaïque permet de produire de l'électricité au plus près des consommateurs, réduisant ainsi les pertes d'énergie sur les réseaux de transport.

#### 1.3.3 Applications de l'énergie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque trouve son application dans une large gamme de domaines [7]:

- **Production d'électricité à grande échelle :** Des centrales solaires photovoltaïques de grande envergure peuvent être construites pour alimenter des villes entières ou des réseaux électriques.
- **Production d'électricité pour les particuliers et les entreprises :** Des installations photovoltaïques sur les toits des maisons, des bâtiments commerciaux ou des industries permettent aux particuliers et aux entreprises de produire leur propre électricité.
- Électrification rurale : L'énergie photovoltaïque peut être utilisée pour électrifier des zones rurales isolées du réseau électrique national.
- Alimentation des équipements hors réseau : Des panneaux solaires portables ou des mini-réseaux solaires peuvent alimenter des équipements isolés du réseau électrique, tels que des pompes à eau, des réfrigérateurs médicaux ou des stations de télécommunications.

#### 1.3.4 Défis et perspectives de l'énergie photovoltaïque

Malgré ses nombreux avantages, l'énergie photovoltaïque fait face à certains défis :

• **Coût initial :** Le coût d'installation des panneaux solaires peut encore être élevé, bien qu'il ait considérablement diminué ces dernières années.

- Variabilité de la production : La production d'énergie solaire dépend de la météo, ce qui nécessite des systèmes de stockage ou une gestion intelligente du réseau pour garantir une alimentation stable.
- Efficacité de conversion : L'efficacité de conversion de l'énergie solaire en électricité par les cellules photovoltaïques est encore perfectible.

Cependant, les perspectives de l'énergie photovoltaïque sont très prometteuses. Le coût des panneaux solaires continue de baisser, l'efficacité des cellules photovoltaïques s'améliore et les technologies de stockage d'énergie progressent. L'énergie photovoltaïque est appelée à jouer un rôle majeur dans la transition vers un système énergétique durable et respectueux de l'environnement [7].

#### 1.4 Modélisation de source photovoltaïque

La modélisation de source photovoltaïque est un domaine crucial pour comprendre et optimiser le comportement des systèmes d'énergie solaire. Elle permet de simuler la production d'électricité d'une installation photovoltaïque en fonction de divers facteurs, tels que l'irradiation solaire, la température ambiante et les caractéristiques des cellules photovoltaïques [7].

#### 1.4.1 Pourquoi modéliser les sources photovoltaïques

La modélisation offre de nombreux avantages [8] :

**Conception et dimensionnement de systèmes photovoltaïques :** Elle permet de prédire la production d'électricité d'une installation en fonction de sa taille et de son emplacement, facilitant ainsi la conception et le dimensionnement optimaux.

Études de faisabilité et analyses économiques : Elle permet d'évaluer la viabilité économique d'un projet photovoltaïque en estimant sa production d'énergie et ses revenus potentiels.

Gestion et optimisation des systèmes photovoltaïques : Elle permet de surveiller et d'optimiser les performances d'une installation en temps réel, en identifiant d'éventuels problèmes et en ajustant les paramètres de fonctionnement.

**Simulations et recherche :** Elle permet de réaliser des simulations complexes pour étudier le comportement des systèmes photovoltaïques dans différentes conditions et développer de nouvelles technologies.

#### 1.4.2 Modèles de source photovoltaïque

Il existe une grande variété de modèles de source photovoltaïque, allant des modèles simples et empiriques aux modèles plus complexes et détaillés. Le choix du modèle dépend de l'application et du niveau de précision requis [10].

Modèles empiriques : Ces modèles utilisent des relations mathématiques simples basées sur des observations expérimentales, comme le modèle de puissance constante ou le modèle de facteur de capacité. Modèles physiques : Ces modèles s'appuient sur les principes physiques qui régissent le fonctionnement des cellules photovoltaïques, comme le modèle de la diode équivalente ou le modèle à plusieurs diodes.

Modèles numériques : Ces modèles utilisent des simulations numériques complexes pour prendre en compte des effets plus fins, comme les effets de la température ou l'ombrage.

#### 1.4.3 Choix d'un modèle de source photovoltaïque

Le choix d'un modèle de source photovoltaïque approprié dépend de plusieurs facteurs [9]

**Précision requise :** Le niveau de détail et de précision du modèle doit correspondre aux besoins de l'application.

**Disponibilité des données :** La complexité du modèle peut être limitée par la disponibilité des données sur l'irradiation solaire, la température et les caractéristiques des cellules photovoltaïques.

**Ressources de calcul :** Les modèles plus complexes peuvent nécessiter des ressources de calcul importantes pour être exécutés.

**Objectif de la modélisation :** Le choix du modèle dépend de l'objectif de la modélisation, qu'il s'agisse de la conception d'un système, de l'optimisation des performances ou de la recherche.

#### 1.4.4 Outils de modélisation de source photovoltaïque

De nombreux outils de modélisation de source photovoltaïque sont disponibles, allant des logiciels open-source aux solutions commerciales sophistiquées. Ces outils permettent de simplifier le processus de modélisation et de simuler le comportement des systèmes photovoltaïques dans divers scénarios [10].

#### 1.4.5 Cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est constituée de matériaux semi-conducteurs qui absorbent et transforment l'énergie lumineuse en énergie électrique. De nombreux modèles électriques ont été proposés dans la littérature pour identifier le comportement électrique d'une cellule photovoltaïque. La complexité des modèles dépend de nombre de paramètres à identifier. Pour modéliser mathématiquement la cellule PV, le modèle électrique à une diode et cinq paramètres ont été choisis, qui est le répandu dans la littérature à cause de sa simplicité. Ce modèle est composé d'une source de courant qui génère un courant ( $I_{ph}$ ) proportionnel à l'éclairement, une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule et deux résistances série et parallèle R sh pour les pertes, comme montrée dans la Figure 1.5 [11].



Figure 1.5 : Schéma équivalent d'une cellule PV.

Le courant généré par la cellule PV est donné par :

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \tag{1.1}$$

Le courant *I<sub>ph</sub>* est exprimé par :

$$I_{ph} = [I_{ph,n} + k_i(T - Tn)] \frac{G}{G_n}$$
(1.2)

Le courant de la diode  $I_d$  est donné par l'équation suivante :

$$I_d = I_{sd} \left[ exp\left(\frac{V+RI}{\alpha.V_t}\right) - 1 \right]$$
(1.3)

La tension thermique Vt est déterminée à partir de l'équation suivante :

$$V_t = \frac{K.T}{q} \tag{1.4}$$

Le courant aux bornes de la résistance parallèle est donné par :

$$I_{sh} = \frac{V + R_s.I}{R_{sh}} \tag{1.5}$$

L'équation caractéristique d'une cellule PV est donnée par :

$$I = I_{ph} - I_{sd} \left[ \exp\left(\frac{V + RI}{\alpha . V_t}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s . I}{R_{sh}}$$
(1.6)

Où :

*I* : Courant délivré par la cellule, *V* : Tension aux bornes de cellule *PV*,  $I_{ph}$  : Courant photogénéré par l'éclairement, *G* : Éclairement(W/m 2 ),  $G_n$  : Éclairement nominal (W/m 2 ),  $I_{sd}$ courant de saturation de la diode,  $\alpha$  : Facteur d'idéalité de la diode,  $V_t$  : Tension thermique,  $R_s$  : résistance série,  $R_{sh}$  : résistance shunt, *T* : Température de la cellule (K), *Tn* : Température de la cellule (K), K constante de Boltzman (1.3806503 × 10 – 23 J/k), q: la charge d'électron (1.60217646 × 10 – 19 C),  $K_i$  Coefficient de courant court-circuit / Température

## **1.5 Conclusion**

L'alliance des réseaux électriques et des énergies photovoltaïques offre un avenir prometteur pour un système énergétique plus durable, résilient et respectueux de l'environnement. Les défis techniques et opérationnels liés à l'intégration des énergies renouvelables peuvent être surmontés grâce à l'évolution des réseaux vers des réseaux intelligents. En combinant les avantages des réseaux électriques et des énergies photovoltaïques, nous pouvons construire un avenir énergétique plus propre et plus durable pour les générations à venir.

# Chapitre 2: : Formulation du problème d'optimisation et écoulement de puissance

## **2.1 Introduction**

Ce chapitre pose les bases pour l'optimisation du placement des unités de production photovoltaïques dans les réseaux électriques. Il commence par une introduction aux équations d'écoulement de puissance et à leur résolution par la méthode de Newton-Raphson. Cette méthode est appliquée aux réseaux IEEE étudiés dans le cadre de cette recherche, avant l'intégration des PV.

Ensuite, le chapitre présente les fonctions objectifs et les contraintes à prendre en compte pour l'optimisation du placement des PV. Les fonctions objectifs visent à minimiser les pertes de puissance dans le réseau, à améliorer la stabilité du tension et à réduire les coûts d'exploitation. Les contraintes, quant à elles, concernent la capacité des lignes électriques, les limites de tension et les exigences de fiabilité du réseau. Le chapitre présente également les concepts de base de l'algorithme méta-heuristique PSO utilisé pour résoudre le problème d'optimisation du placement des PV.

L'analyse d'écoulement de puissance est un outil crucial pour la planification des réseaux électriques. Elle permet d'estimer les performances du système en prédisant les courants circulant dans les lignes et les tensions aux différents points de connexion (appelés "nœuds" ou "jeux de barres"). Ces estimations s'appuient sur la structure du réseau, les puissances injectées par les générateurs et les puissances consommées par les charges.

Grâce à cette analyse, il est possible de déterminer le fonctionnement optimal d'un système électrique et les flux d'énergie entre les différents acteurs, tels que les producteurs et les distributeurs d'électricité.

Le système électrique est modélisé comme un ensemble de jeux de barres interconnectés par des impédances. Ces jeux de barres peuvent être reliés à des sources (générateurs) qui injectent des puissances complexes (combinaison de puissance active et de puissance réactive) ou à des charges qui absorbent des puissances complexes. Les divers types de jeux de barres sont comme suit :

Jeu de barre de référence (slack bus) : Il s'agit d'un jeu de barre particulier dont l'amplitude et l'angle de la tension (V et  $\theta$ ) sont fixés. La puissance active (P) et la puissance réactive (Q) injectées à ce jeu de barre sont des variables à déterminer. Ce jeu de barre sert de référence pour les calculs d'écoulement de puissance.

Jeux de barres PQ : La puissance active (P) et la puissance réactive (Q) du jeu de barre sont connues, tandis que l'amplitude et l'angle de la tension (V et  $\theta$ ) sont inconnus. Ce type de jeu de barre est généralement associé aux charges.

**Jeux de barres PV :** La puissance active (P) du générateur et l'amplitude de la tension (V) sont connues, tandis que la puissance réactive (Q) et l'angle de la tension ( $\theta$ ) sont inconnus. Ce type de jeu de barre est généralement associé aux générateurs.

#### 2.2 Écoulement de puissance

Pour amorcer l'analyse d'écoulement de puissance, on commence par établir la matrice d'admittance nodale  $Y_{bus}$ . Cette matrice est construite à partir des données des lignes et des transformateurs du réseau électrique [12].

La matrice  $Y_{bus}$  joue un rôle crucial dans l'analyse, car elle permet d'exprimer la relation fondamentale entre les courants et les tensions dans le réseau électrique. Cette relation est formalisée par l'équation 2.1 :

$$I_{i} = \sum_{j=1}^{n} Y_{ij} V_{j} \qquad (i, j = 1, 2, ..., n)$$
Où :
$$Y_{ii} = \sum_{i,j=1}^{n} y_{ij} \qquad \text{et} \qquad Y_{ij} = Y_{ji} = -y_{ij} \qquad (2.2)$$

L'équation 2.1 nous permet de déterminer la puissance apparente complexe  $S_i$  au niveau d'un jeu de barres *i*. Cette puissance est exprimée par la formule suivante :

$$S_i^* = P_i - jQ_i = V_i^* I_i = \sum_{i,j=1}^n V_i^* V_j Y_{ij} \qquad (i,j = 1,2,...n)$$
(2.3)

L'équation 2.3 nous fournit la base pour le calcul des puissances active  $P_i$  et réactive  $Q_i$  au niveau du jeu de barres *i*. Ces puissances sont déterminées à l'aide des équations 2.4 et 2.5, comme indiqué ci-dessous :

$$P_{i} = \sum_{j=1}^{n} |V_{i}|| |V_{j}|| Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \sigma_{i} + \sigma_{j})$$
 (i, j = 1,2, ... n) (2.4)

$$Q_i = -\sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \sigma_i + \sigma_j) \qquad (i, j = 1, 2, ..., n)$$
(2.5)

 $V_i = |V_i| < \sigma_i : \text{est la tension au jeu de barre } i.$   $V_j = |V_j| < \sigma_j : \text{est la tension au jeu de barre } j.$  $Y_{ij} = |Y_{ij}| < \sigma_{ij} : \text{est l'admittance shunt entre le jeu de barre } i \text{ et jeu de barre } j.$ 

#### 2.2.1 Solution d'écoulement de puissance la méthode de Newton-Raphson

La méthode de Newton-Raphson s'impose comme un outil incontournable dans le domaine du calcul d'écoulement de puissance. Son efficacité réside dans sa capacité à résoudre des équations simultanées non linéaires complexes, en les approchant par des systèmes d'équations linéaires plus simples [13].

Cette méthode itérative repose sur le développement en série de Taylor, en limitant les termes à la première approximation. Elle permet ainsi de transformer un ensemble d'équations non linéaires en un système linéaire, facilitant considérablement sa résolution [14].

Parmi ses atouts majeurs, la méthode Newton-Raphson se distingue par ses puissantes caractéristiques de convergence, surpassant ainsi d'autres méthodes alternatives. Sa fiabilité est également remarquable, lui permettant de résoudre des cas problématiques qui engendrent des divergences avec d'autres approches populaires [15].

Dans le contexte du calcul d'écoulement de puissance, la méthode Newton-Raphson intervient pour déterminer les tensions et les courants dans un réseau électrique. Pour chaque jeu de barre, les termes  $\Delta P_i^{(k)}$  et  $\Delta Q_i^{(k)}$  représentent les résidus de puissance, calculés selon les équations 2.6 et 2.7.

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i^0 - P_i^{(k)} \tag{2.6}$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i^0 - Q_i^{(k)}$$
(2.7)

Conformément à la méthode de Newton-Raphson, les équations 2.6 et 2.7 peuvent être exprimées sous forme de séries de Taylor. Cette approche permet d'obtenir une approximation du premier ordre de l'équation 2.8, comme nous allons le voir.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \sigma \\ \Delta |V| \end{bmatrix}$$
(2.8)

$$\begin{array}{l}
\text{Où}:\\
J = \begin{bmatrix} J_1 & J_2\\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \\
\end{array}$$
(2.9)

Dans le cadre du calcul d'écoulement de puissance, la matrice Jacobienne joue un rôle crucial en établissant une relation linéaire entre les variations infimes de certains paramètres clés du réseau électrique.

Représentée par la lettre J, la matrice Jacobienne décrit la relation mathématique entre deux ensembles de variations infiniment petites :

D'une part, les variations de tension :

Changements d'angle de tension  $\Delta \sigma_i^{(k)}$  pour chaque bus i.

Variations d'amplitude de tension  $|\Delta V_n^{(k)}|$  pour chaque bus n.

D'autre part, les variations de puissance :

Changements de puissance active  $\Delta P_i^{(k)}$  pour chaque bus i.

Changements de puissance réactive  $\Delta Q_i^{(k)}$  pour chaque bus i.

En d'autres termes, la matrice Jacobienne permet de quantifier l'impact des variations de tension sur les variations de puissance et vice versa, et ce, pour chaque bus du réseau électrique.

Si l'on considère le jeu de barre 1 comme jeu de barre de référence, l'équation 2.8, telle que présentée dans [17], peut être exprimée sous la forme suivante [16] :

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \sigma_2} & \cdots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \sigma_n} & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \cdots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \sigma_2} & \cdots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \sigma_n} & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \cdots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \sigma_2} & \cdots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \sigma_n} & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \cdots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \sigma_2} & \cdots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \sigma_n} & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \cdots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \sigma_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta \sigma_n^{(k)} \\ \Delta |V_n^{(k)}| \end{bmatrix}$$
(2.10)

Les éléments de la matrice Jacobienne sont des dérivées partielles des équations 2.4 et 2.5 par rapport aux modules et angles de phase des tensions. Ils peuvent être calculés comme suit :

• Les éléments de la diagonale et hors de la diagonale de *J1* 

$$\frac{\partial P_i}{\partial \sigma_j} = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \sigma_i + \sigma_j)$$
(2.11)

$$\frac{\partial P_i}{\partial \sigma_j} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \sigma_i + \sigma_j)$$
(2.12)

• Les éléments de la diagonale et hors de la diagonale de J2

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = 2 \left| V_i \right| |Y_{ij} \left| \cos(\theta_{ii}) + \sum_{i} |V_j||_{Y_{ij}} \left| \cos(\theta_{ij} - \sigma_i + \sigma_j) \right| \right|$$
(2.13)

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = |V_i| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \sigma_i + \sigma_j)$$
(2.14)

• Les éléments de la diagonale et hors de la diagonale de J3

$$\frac{\partial P_i}{\partial \sigma_j} = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \sigma_i + \sigma_j)$$
(2.15)

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \sigma_j} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \sigma_i + \sigma_j)$$
(2.16)

• Les éléments de la diagonale et hors de la diagonale de J4

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = 2|V_i||Y_{ii}|\sin(\theta_{ii}) + \sum |V_j||V_{ij}|\sin(\theta_{ij} - \sigma_i + \sigma_j)$$
(2.17)

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = |V_i||Y_{ij}|\cos(\theta_{ij} - \sigma_i + \sigma_j)$$
(2.18)

L'équation 2.18, qui représente le flux de puissance dans un réseau électrique, est résolue de manière itérative. Cela signifie que la solution est approchée par des étapes successives, où chaque étape améliore la précision du résultat. A chaque itération, les incréments de tension à chaque jeu de barre, représentés par  $\Delta V$ , sont mis à jour. Ces incréments représentent la différence entre la tension estimée et la tension réelle à un point donné du réseau.

En utilisant les valeurs mises à jour des incréments de tension, les nouvelles estimations des tensions de jeu de barre peuvent être calculées à l'aide des équations 2.19 obtenus. Ces équations, appelées équations de puissance active et réactive, relient les tensions, les courants et les impédances des éléments du réseau [17].

$$\begin{bmatrix} \Delta \sigma \\ \Delta |V| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}$$
(2.19)

Les nouvelles estimations des tensions des jeux de barres sont :

$$\sigma_i^{k+1} = \sigma_i^k + \Delta \sigma_i^k \tag{2.20}$$

$$|V_i^{k+1}| = |V_i^k| + \Delta |V_i^k|$$
(2.21)

Le processus d'itération se poursuit jusqu'à la convergence est procédé.

Étant donné que les systèmes de distribution de la fin des années 60 sont radiaux et qu'ils contiennent seulement des jeux de barres de charge PQ et les jeux de barres PV sont absents [12], le calcul d'écoulement de puissance au réseau de distribution ne concerne que les jeux de barres PQ. Les étapes de la méthode de Newton-Raphson sont comme suit [18]:



#### 2.3 Résultats d'écoulement de puissance avant l'intégration de PV

Afin de démontrer les bénéfices de l'intégration des unités de production photovoltaïques (*PV*) dans les réseaux électriques, nous avons mené une étude approfondie sur réseaux de distribution IEEE standard 33-JB et 69-JB. Le choix de ces systèmes s'explique par leur large utilisation dans la littérature consacrée à la planification et à l'exploitation des réseaux de distribution [19].

#### 2.3.1 Réseau IEEE 33-JB

Le premier système testé dans ce travail est le réseau de distribution IEEE 33-JB, ce réseau est composé de 33 jeux de barres et 32 lignes, avec des charges de 3715 kW et 2300 kVar, et une tension nominale de 12.66 kV. Le schéma unifilaire de ce réseau est représenté sur la Figure 2.1 et les données des paramètres des lignes et des charges sont représentées en annexe A.1.



Figure 2.1 : Schéma unifilaire de réseau IEEE 33-JB.

#### 2.3.2 Résultats d'écoulement de puissance avant PV

Le Tableau 2.1 présente les résultats d'écoulement de puissance avant l'intégration des panneaux photovoltaïques (PV) sur le réseau IEEE 33-JB

Paramètres	Valeurs
P <sub>d</sub> (kW)	3715
Q <sub>d</sub> (kVar)	2300
PPertes(kW)	210.9875
Q <sub>Pertes</sub> (kVar)	143.1284
V <sub>max</sub> (p.u.)	1.0000
Vmin(p.u.)	0.9038

Tableau 2.1 : Résultats d'écoulement de puissance avant PV.

La puissance active demandée ( $P_d$ ) est de 3715 kW, représentant la charge active totale du réseau, soit la quantité d'énergie utilisée par les consommateurs pour effectuer un travail utile, tandis que la puissance réactive demandée ( $Q_d$ ) est de 2300 kVar, correspondant à la charge réactive totale du réseau, nécessaire principalement pour maintenir les champs électriques et magnétiques des équipements inductifs comme les moteurs et les transformateurs. Les pertes de puissance active ( $P_{Pertes}$ ) s'élèvent à 210.9875 kW, se produisant principalement sous forme de chaleur dans les conducteurs et équipements électriques en raison de la résistance électrique, et les pertes de puissance réactive ( $Q_{Pertes}$ ) sont de 143.1284 kVar, affectant la capacité du réseau à maintenir une tension stable et à fournir une puissance réactive suffisante aux équipements inductifs. La tension maximale ( $V_{max}$ ) dans le réseau est de 1.0000 p.u., tandis que la tension minimale ( $V_{min}$ ) est de 0.9038 p.u., soit environ 90.38 % de la valeur nominale, ce qui peut indiquer des problèmes de qualité de l'énergie tels que des chutes de tension significatives pouvant affecter la performance des équipements électriques.

La figure 2.2 représente le profil de la tension dans le réseau de IEEE 33-JB avant l'intégration des (PV). Le profil de tension permet d'identifier les jeux de barres où la tension est maximale et minimale. Une tension maximale proche de 1.0000 p.u. indique que certaines parties du réseau sont bien régulées, tandis qu'une tension minimale de 0.9038 p.u. révèle des chutes de tension significatives, potentiellement problématiques pour la performance des équipements. Les points où la tension chute en dessous de 0.95 p.u. sont considérés critiques car ils peuvent entraîner des problèmes de performance des équipements électriques et affecter la qualité de l'énergie.

Le profil de tension avant l'intégration des PV montre la nécessité d'améliorer la qualité de la tension pour les nœuds éloignés de la source. Cela peut se faire par diverses méthodes, telles que l'installation de régulateurs de tension, l'amélioration des infrastructures de distribution, ou encore l'intégration de sources de production distribuée comme les PV.



Figure 2.2 : Profil de la tension avant PV : IEEE 33-JB.

La Figure 2.3 montre les pertes de puissance active en kW le long des différents segments du réseau IEEE 33-JB, révélant la répartition des pertes dues à la résistance des conducteurs et des équipements, avec des segments critiques où l'efficacité énergétique est faible, nécessitant des améliorations ciblées. La Figure 2.4 illustre les pertes de puissance réactive en kVar dans le même réseau, identifiant les segments avec des pertes élevées en raison de l'inductance des conducteurs et équipements avant l'intégration des *PV*, ces figures servent de référence pour évaluer l'efficacité et la gestion de la puissance réactive du réseau, avec une attente de réduction des pertes et d'amélioration de la performance globale après l'installation des PV, qui devraient diminuer les pertes de distribution et améliorer la gestion de la puissance réactive.



Figure 2.3 : Pertes de puissance active : IEEE 33-JB.



Figure 2.4 : Pertes de puissance réactive : IEEE 33-JB.

#### 2.3.3 Réseau IEEE 69-JB

Le deuxième système est le réseau IEEE 69-JB, qui est composé de 69 jeux de barres et 68 lignes de distribution avec une charge active de 3791.89 kW et une charge réactive de 2694.10 kVar, leur tension nominale est de 12.66 kV, le schéma unifilaire de ce réseau est illustré sur la Figure 2.5 et les données des paramètres des lignes et charges sont représentées en annexe A.2.



Figure 2.5 : Schéma unifilaire de réseau IEEE 69-JB.

#### 2.3.4 Résultats d'écoulement de puissance avant PV

Le Tableau 2.2 présente les résultats d'écoulement de puissance avant l'intégration des panneaux photovoltaïques (*PV*) sur le réseau IEEE 69-JB.

Tableau 2.2 :	Résultats d	'écoulement de	puissance	avant PV.
I abicau 2.2 .	itesuitats a	ccouldment ut	Puissance	avant 1 v.

Paramètres	Valeurs
$P_d(kW)$	3791.89
$Q_d(kVar)$	2694.10
PPertes (kW)	224.9480
Q <sub>Pertes</sub> (kVar)	102.1406
V <sub>max</sub> (p.u.)	1.0000
Vmin (p.u.)	0.9092

Mettant en évidence plusieurs paramètres cruciaux. La puissance active demandée  $(P_d)$ s'élève à 3791.89 kW, tandis que la puissance réactive demandée  $(Q_d)$  est de 2694.10 kVar. Les pertes de puissance active  $(P_{Pertes})$  obtenues sont 224.9480 kW, et les pertes de puissance réactive  $(Q_{Pertes})$  sont 102.1406 kVar. La tension maximale  $(V_{max})$  est maintenue à 1.0000 p.u., mais la tension minimale  $(V_{min})$  de 0.9092 p.u. révèle une légère chute de tension dans le réseau. Ces données fournissent une base de référence pour évaluer l'efficacité et la stabilité du réseau avant l'intégration des PV. Après leur installation, les PV pourraient potentiellement réduire les pertes de puissance et améliorer la stabilité de la tension en produisant de l'énergie localement, contribuant ainsi à l'optimisation globale du réseau. La Figure 2.6 illustre le profil de la tension sur les différents bus du réseau IEEE 69-JB avant l'intégration des PV, mettant en évidence la variation de la tension à chaque point de connexion. La tension maximale observée est de 1.0000 p.u., tandis que la tension minimale de 0.9038 p.u. révèle des chutes de tension significatives à certains jeux de barres, ce qui peut entraîner des problèmes de qualité de l'énergie et des performances réduites des équipements électriques. Identifier ces jeux de barres critiques où la tension chute en dessous de 0.95 p.u. est crucial pour planifier des mesures correctives telles que l'installation de *PV*. Avant l'installation des PV, ce profil de tension sert de référence pour évaluer l'efficacité du réseau; après l'intégration, on s'attend à ce que les PV stabilisent la tension en produisant localement de l'énergie,. Cette analyse est essentielle pour optimiser la performance et la stabilité du réseau IEEE 69-JB.



Figure 2.6 : Profil de la tension avant PV : IEEE 69-JB.

La Figure 2.7 montre les pertes de puissance active dans le réseau IEEE 69-JB avant l'intégration des panneaux photovoltaïques (PV). Les pertes de puissance active sont causées par la résistance des conducteurs et des équipements dans le réseau. La figure montre clairement que certaines branches du réseau IEEE 69-JB souffrent de pertes de puissance active plus importantes que d'autres. Ces pertes peuvent être attribuées à la résistance intrinsèque des matériaux conducteurs, la longueur des lignes, et les charges connectées. Les branche 5, 6 , et 56 présentent des pertes de puissance active élevées, La Figure 2.8 illustre les pertes de puissance réactive sont dues aux effets inductifs et des conducteurs et des équipements. Les branche 5, 6 , 48, 56 et 60 présentent des pertes de puissance réactive élevées



Figure 2.7 : Pertes de puissance active avant PV : IEEE 69-JB.



Figure 2.8 : Pertes de puissance réactive avant PV : IEEE 69-JB.

## 2.4 Formulation du problème d'optimisation pour l'intégration de PV

#### 2.4.1 Définition de l'optimisation

L'optimisation, véritable quête de l'excellence, se définit comme le processus méthodique de conception, d'implémentation et de test d'algorithmes ingénieux destinés à résoudre une multitude de problèmes numériques [20].

En d'autres termes, il s'agit d'un voyage fascinant à la recherche des conditions optimales qui permettent d'atteindre la valeur maximale ou minimale d'une fonction objectif bien définie. Ce périple est toutefois soumis à un ensemble de contraintes d'égalité et d'inégalité qui gouvernent les variables de décision, ajoutant une dose de complexité à la quête.

Si la majorité des méthodes d'optimisation se sont concentrées sur la résolution de problèmes mono-objectif, c'est-à-dire impliquant un seul objectif à maximiser ou minimiser, la

réalité est bien plus riche et complexe. En effet, de nombreux cas d'application nécessitent l'optimisation simultanée de plusieurs objectifs, souvent contradictoires les uns avec les autres. C'est pour répondre à ce défi que des algorithmes multi-objectifs ont vu le jour, ouvrant de nouvelles perspectives dans le domaine de l'optimisation [20].

#### 2.4.2 Problème d'optimisation mono-objectif

Ce type d'optimisation consiste à optimiser une seule fonction objectif, dont la forme générale peut être définie par la relation 2.22 :

$$\begin{cases} \min f(x) \\ g(x) = 0 \\ h(x) \le 0 \end{cases}$$

$$(2.22)$$

Où f(x) est la fonction objectif, g(x) et h(x) sont respectivement les contraintes d'égalité et d'inégalité.

#### 2.4.3 Modélisation de la ligne de distribution

Le circuit équivalent simple pour une ligne de distribution radiale entre deux jeux de barres i et j est illustré à la Figure 2.2 :



Figure 2.9 : Schéma unifilaire d'une ligne de distribution.

#### 2.4.4 Fonctions objectifs

Deux approches distinctes sont proposées pour optimiser l'intégration de la génération distribuée :

**Approche mono-objectif :** Elle vise à minimiser les Pertes de Puissance Active ( $P_{pertes}$ ). Cette approche se concentre sur la réduction des pertes de puissance dans le système électrique, ce qui peut améliorer son efficacité et sa rentabilité.

**Approche multi-objectifs :** Cette approche plus complète prend en compte trois objectifs simultanément :

- <u>Minimisation des Pertes de Puissance Active (P<sub>Pertes</sub>)</u> comme dans l'approche monoobjectif.
- <u>Minimisation des Pertes de Puissance Réactive (*Q<sub>Pertes</sub>*) Cela permet de
  </u>
- <u>Maximisation de la Stabilité de la Tension (VSI) : La maximisation de la stabilité de la tension permet d'évaluer et d'améliorer la stabilité de la tension du réseau</u>
- <u>Réduction de la Variation de Tension Totale (*VTT*).</u> Cela permet de maintenir une tension stable dans le réseau, ce qui est important pour la qualité de l'alimentation électrique et la protection des équipements.
- <u>Minimisation du Coût Annuel des Pertes (CAP</u>). Cette approche prend en compte les coûts économiques liés aux pertes d'énergie, permettant de trouver une solution optimale en termes de coûts et d'efficacité.

#### 2.4.5 Fonction mono-objectif

La fonction mono-objective proposée est basée sur la formule des pertes de puissance actives totales selon [21] :

$$FO = \min \sum_{i=1}^{Nbr} \sum_{j=2}^{NJB} P_{pertes}(i,j)$$
(2.23)

Où : : Nbr : nombre de branche, NJB : nombre de jeu de barre

Avec :

$$P_{pertes}(i,j) = R_{ij} \frac{\left(P_{ij}^2 + Q_{ij}^2\right)}{V_i^2}$$
(2.24)

#### 2.4.6 Fonction multi-objectifs

La fonction multi-objectifs

$$FMO = w_1 \times \frac{F_1}{F_1^{max}} + w_2 \times \frac{F_2}{F_2^{max}} + w_3 \times \frac{F_3}{F_3^{max}} + w_4 \times \frac{F_4}{F_4^{max}} + w_5 \times \frac{F_5}{F_5^{max}}$$
(2.25)

$$F_1 = P_{pertes} \tag{2.26}$$

$$F_2 = Q_{pertes} \tag{2.27}$$

$$F_3 = \frac{1}{VSI}$$
 (2.28)

$$F_4 = CAP \tag{2.29}$$

$$Q_{pertes}(i,j) = X_{ij} \frac{\left(P_{ij}^2 + Q_{ij}^2\right)}{V_i^2}$$
(2.30)

Le *VSI* est un indicateur qui mesure la capacité du système à maintenir des niveaux de tension stables face à des perturbations ou des variations de charge. Un *VSI* élevé indique une bonne stabilité, tandis qu'un VSI faible signale une proximité à des conditions d'instabilité [21] :

$$VSI_j = V_i^4 - 4. (P_j X_i - Q_j R_i)^2 - 4. (P_j R_i - Q_j X_i)^2. V_i^2$$
(2.31)

Le *CAP* peut être calculé comme montre l'équation, où  $K_p$  est le coût incrémental de la perte de puissance est égal à 0.06 \$/kW, et *T* est le nombre d'heures par an est égal à 8760 h [11] :

$$CAP(i,j) = P_{pertes}(i,j) \times K_p \times T$$
(2.32)

#### 2.4.7 Contraintes du réseau de distribution et de PV

#### 2.4.7.1 Contraintes du réseau de distribution

Équilibre entre la production et la demande : Pour chaque jeu de barres, la quantité d'électricité fournie (puissance active et réactive) doit correspondre exactement à la consommation totale des appareils qui y sont branchés [21].

$$P_G + P_{PV} = P_D + P_{Pertes} \tag{2.33}$$

$$Q_G = Q_D + Q_{Pertes} \tag{2.34}$$

**Limites des tensions :** L'amplitude de la tension sur chaque jeu de barre doit être limitée dans l'intervalle 0.95 *p.u.* 1.05 *p.u.* pour les deux réseaux [11] :

$$V_{min} \le |V| \le V_{max} \tag{2.35}$$

**Limite de chute de tension :** Les limites de la chute de tension ( $\Delta V$ ) peuvent être formulées comme suit [21] :

$$|V_1 - V_i| \le \Delta V_{max} \tag{2.36}$$

**Capacité de la ligne :** L'écoulement de puissance à travers tout départ de distribution doit être conforme à la capacité thermique de la ligne [22] :

$$|S_{ij}| \le |S_{max}| \tag{2.37}$$

#### 2.4.7.2 Contraintes de PV

Limites de capacité de PV : Les PV utilisées doivent avoir la taille autorisée dans leur plage telle que [11] :

$$P_{PV}^{min} \le P_{PV} \le P_{PV}^{max} \tag{2.38}$$

$$Q_{PV}^{min} \le Q_{PV} \le Q_{PV}^{max} \tag{2.39}$$

**Position des PG :** Tous les jeux de barres sont valables pour l'installation des PV, à l'exclusion du jeu de barre de référence (jeu de barre 1) [24] :

$$2 \leq PV_{Position} \leq NJB \tag{2.40}$$

**Nombre de PG :** Le nombre de PV installées dans le réseau de distribution est limité par le nombre maximum  $N_{PV.max}$  [25] :

$$N_{PV} \leq N_{PV,max} \tag{2.41}$$

**Emplacement des PG :** Cette contrainte est liée au fait de n'avoir qu'une seule PG installée à un certain emplacement [26] :

$$N_{PV}/Emplacement \le 1$$
 (2.42)

#### 2.5 Principe de l'algorithme PSO

L'algorithme d'optimisation par essaim de particules (PSO), introduit en 1995 par James Kennedy et Russell Eberhart, s'inspire du comportement des bancs de poissons ou des nuées d'oiseaux. Contrairement aux algorithmes génétiques basés sur les opérateurs génétiques, le PSO fait évoluer les solutions par la coopération et la compétition entre les individus au fil des générations.

Chaque individu, nommée particule, représente une solution potentielle au problème. Le mouvement des particules est influencé par trois composantes :

**Composante d'inertie :** Elle influence le mouvement dans la direction actuelle de la particule.

**Composante cognitive :** Elle attire la particule vers sa meilleure position trouvée jusqu'à présent (*Pbest*).

**Composante sociale :** Elle oriente la particule vers la meilleure position trouvée par l'ensemble du groupe (*Gbest*).



Figure 2.10: (A). Vol d'oiseaux en groupe, (B). Bancs de poissons.

Dans l'algorithme PSO, chaque particule i est modélisée par un vecteur de position Xi et un vecteur de changement de position Vi appelé (vélocité) dans un espace de d dimension. La meilleure position de chaque particule est enregistrée et représentée comme *Pbest*, tandis que la meilleure particule parmi toutes les particules de la population est représentée par *Gbest* [29]. À chaque itération k, chaque particule est déplacée selon les équations 2.36 et 2.37 :

$$V_i(k + 1) = \omega V_i(k) + c_1 r_1(P_{best}(k) - X_i(k)) + c_2 r_2(G_{best}(k) - X_i(k))$$
(2.43)

$$X_i(k+1) = X_i(k) + V_i(k+1)$$
(2.44)

Où  $c_1$  et  $c_2$  sont des coefficients qui contrôlent la vitesse d'exploration de nouvelles solutions, tandis que  $r_1$  et  $r_2$  sont des valeurs aléatoires qui introduisent une part de hasard dans le processus. Le paramètre  $\omega$ , appelé poids d'inertie, permet d'équilibrer l'exploration et l'exploitation, c'est-à-dire la recherche de nouvelles solutions prometteuses et l'exploitation des solutions déjà trouvées. Il influence également l'impact de la vitesse actuelle ( $V_i$ ) sur la vitesse lors de la prochaine itération, il s'exprime par [30] :

$$\omega = \omega_{max} - (\omega_{max} - \omega_{min})(\frac{k}{k_{max}})$$
(2.45)

Où,  $\omega_{max}$  et  $\omega_{min}$  sont les valeurs de poids d'inertie maximum et minimum, respectivement.  $k_{max}$  est le nombre maximum d'itérations et k représente l'itération actuelle.

## 2.6 Conclusion

Ce chapitre a présenté une analyse détaillée de l'écoulement de puissance dans les réseaux de distribution avant l'intégration des systèmes photovoltaïques (PV), ainsi qu'une formulation d'un problème d'optimisation pour faciliter cette intégration. La méthode de Newton-Raphson a été utilisée pour résoudre les problèmes d'écoulement de puissance, fournissant une base solide pour les analyses ultérieures.

Dans un premier temps, les résultats d'écoulement de puissance ont été examinés pour deux réseaux standards, à savoir le réseau IEEE 33-JB et le réseau IEEE 69-JB. Les simulations ont permis de déterminer le comportement des réseaux sans la présence de sources PV, fournissant des points de référence cruciaux pour l'évaluation des impacts futurs de l'intégration PV.

Ensuite, une formulation détaillée du problème d'optimisation pour l'intégration de PV a été développée. Celle-ci comprenait la définition d'objectifs mono- et multi-objectifs, ainsi que l'identification des contraintes spécifiques aux réseaux de distribution et aux systèmes PV. Ces formulations permettent de définir des stratégies optimales pour intégrer des sources d'énergie renouvelable tout en maintenant la stabilité et l'efficacité du réseau.

Enfin, le principe de l'algorithme essaim de L'algorithme d'essaim de particules (Particle Swarm Optimization, PSO) a été introduit comme une méthode prometteuse pour résoudre le problème d'optimisation formulé. L'algorithme PSO, avec sa capacité à explorer efficacement de grands espaces de solutions, se montre adapté pour trouver des solutions optimales dans des contextes de complexité accrue comme l'intégration de PV dans les réseaux de distribution.

En somme, ce chapitre a fourni une base théorique et méthodologique robuste pour comprendre et optimiser l'intégration des systèmes PV dans les réseaux de distribution. Les approches et résultats présentés ouvrent la voie à des analyses plus approfondies et à la mise en œuvre de solutions innovantes pour répondre aux défis posés par la transition énergétique.

## Chapitre 3: Résultats et discutions

#### **3.1 Introduction**

Ce chapitre présente et analyse les résultats des simulations effectuées pour l'optimisation de l'intégration des systèmes photovoltaïques (PV) dans les réseaux de distribution. Les résultats sont segmentés en deux parties principales : les résultats d'optimisation mono-objectif et les résultats d'optimisation multi-objectifs. Ces analyses permettront d'évaluer l'efficacité des solutions proposées en termes de performance et de conformité aux contraintes définies dans le chapitre précédent.

#### 3.2 Résultats d'optimisation mono-objectif

Les résultats d'optimisation mono-objectif sont obtenus en se concentrant sur un seul critère à qui est la minimisation des pertes de puissance active. Les simulations sont réalisées en utilisant l'algorithme essaim de particules (PSO), et les résultats sont analysés pour les deux réseaux IEEE 33 et 69-JB. Les scénarios étudiés incluent l'intégration d'un et de trois systèmes PV.

La Figure 3.1 montre la convergence des pertes de puissance active ( $P_{pertes}$ ) pour un PV sur les réseaux IEEE 33-JB et 69-JB au fil des itérations, On observe une réduction rapide des pertes au début, suivie d'une stabilisation après environ 50 itérations. Cela indique une amélioration rapide de l'efficacité énergétique au début de l'optimisation, puis une phase de convergence vers une valeur optimale

La Figure 3.3 confirme que le PSO reste le plus performant avec trois PV, atteignant une réduction des pertes de puissance encore plus significative et une stabilisation rapide. L'avantage de la convergence rapide et stable du PSO est évident, permettant d'atteindre une solution optimale ou proche de l'optimale en moins d'itérations par rapport aux autres algorithmes.



(a) **IEEE 33-JB** 



(b) **IEEE 69-JB** 

Figure 3.1 : Caractéristique de convergence mono-objectif pour 1 PV



(a) **IEEE 33-JB** 



Figure 3.2 : Caractéristique de convergence mono-objectif pour 3 PV

Le tableau 3.2 présente les résultats d'optimisation mono-objectif pour le réseau IEEE 33-JB, en considérant différents scénarios d'intégration de systèmes photovoltaïques (PV). Les scénarios étudiés incluent l'intégration d'un et de trois systèmes PV (1 PV, 3 PV). L'objectif spécifique d'optimisation est la réduction des pertes de puissance. Les principaux résultats pour chaque scénario sont les suivants :

Les résultats d'un seul PV sont comparés aux résultats obtenus en utilisant divers algorithmes de : l'Optimisation par Essaim Particulaire Adaptatif Dynamique (DAPSO) [31], l'Algorithme de Recherche par Retour en Arrière (BSOA) [32], l'Algorithme de l'Abeille Artificielle Guidée par le Gbest (GABC) [33], l'Algorithme de Recherche Symbiotique des Organismes (SOS) [34], et l'Algorithme d'Apprentissage Incrémental Basé sur la Population (PBIL) [35].

Tandis que les résultats de trois PV son comparés avec BSOA [32], l'Optimisation Basée sur l'Enseignement et l'Apprentissage (TLBO) [36], le Flux de Charge Répété (RLF) [37], l'Optimisation par Mauvaise Herbe Envahissante (IWO) [38], l'Algorithme du Troupeau de Krill (KHA) [39], et l'algorithme hybride PSO-GSA [40].

a)	1	PV
aj		1 1

	DAPSO	BSOA	GABC	SOS	PBIL	PSO
<b>P</b> <sub>Pertes</sub> (kW)	127.170	118.120	125.150	115.010	129.400	114.298
$\Delta P_{Pertes}$ (%)	39.726	44.016	40.684	45.490	38.669	45.827

	<i>P<sub>PV</sub></i> (kW) (JB)		121	2.00 1857.5 8) (8)		57.50 8)	1543.00 (30)		3132.20 (6)		1200.00 (13)		2847.80 (7)				
	<i>V<sub>min</sub></i> ( <b>p.u.</b> ) 0.9349		0.9	0.9441 0.9		270	0.9500		0.9347		7 <b>0.949</b>						
							b)	3 P	V								
	BSOA TLBO RLF						F	IW	O	O KHA			PSO-GSA		SO		
<b>P</b> Perte	es (kW)	89.0	50	74.1	01	85.9	989	85.860		75.412		75.412		83.	83.840 7		.832
$\Delta P_{Pe}$	ertes (%)	57.7	94	64.8	379         59.244         59.306         64.258         60.263		263	65.	.480								
		632	2.0	880	).8	260	0.0	624	<b>I</b> .7	810	).7	50	0.0	79	94.7		
		(13	3)	(12	2)	(6	)	(14	4)	(13	3)	(	8)	(1	13)		
$P_{PV}$	(kW)	487	0.0	105	9.2	400	0.0	104.9		836.8		600.0		10	55.9		
(.	JB)	(28	3)	(24	4)	(16	5)	(18)		(25)		(13)		(2	24)		
		550	0.0	107	1.4	600	0.0	1056.0		0 841.0		81	0.0	10	90.1		
		(31	l)	(29	<del>)</del> )	(25	5)	(32		(30)		(3	1)	(3	30)		
Vmin	(p.u.)	0.95	54	0.96	646	0.96	528	0.96	557	0.96	510	0.9	637	0.9	687		

Pour un seul (PV), différents algorithmes d'optimisation ont été comparés. Les résultats montrent que l'algorithme PSO a les meilleures performances en termes de réduction des pertes de puissance (114.298 kW) et une amélioration de la tension minimale (0.9494 p.u.). En comparaison, le DAPSO a des pertes de puissance légèrement supérieures (127.170 kW) et une tension minimale plus basse (0.9349 p.u.).

Avec trois PV, l'algorithme PSO reste le plus efficace en réduisant les pertes de puissance à 72.832 kW et en maintenant une tension minimale élevée de 0.9687 p.u. Les autres algorithmes, comme BSOA et TLBO, ont des pertes de puissance respectives de 89.050 kW et 74.101 kW, montrant une amélioration significative par rapport aux configurations à un PV, mais toujours inférieures au PSO.

Le tableau 3.3 présente les résultats d'optimisation mono-objectif pour le réseau IEEE 69-JB, en considérant les tois scénarios d'intégration de systèmes PV. Les principaux résultats pour chaque scénario sont les suivants :

Les résultats d'un seul PV sont comparés avec : Algorithme d'Optimisation Basé sur l'Enseignement et l'Apprentissage Modifié (MTLBO) [41], l'Algorithme Big-Bang Big-Crunch (BB-BC) [42], l'Algorithme Génétique de Lagrangien Augmenté (ALGA) [43], l'Algorithme de Recherche du Coucou (CSA) [44], l'Algorithme de Recherche Hyper Sphérique (HSSA) [45], et l'Algorithme d'Optimisation de la Baleine (WOA) [46]. Les résultats de trois PV sont compar s avec L'algorithme d'optimisation par recherche de nourriture des bactéries (BFOA) [47], Goutte d'Eau Intelligente (IWD) [48], IWO [38], AGA [49], l'Optimisation par Flamme de Papillon (MFO) [50], et l'algorithme PSO-GSA [51].

Tableau 3.2 : Résultats d'optimisation mono-objectif : IEEE 69-JB

	MTLBO	BB_BC	ALGA	CSA	HSSA	WOA	PSO
P <sub>Pertes</sub> (kW)	83.323	83.220	83.180	83.210	99.397	83.227	83.179
Δ P <sub>Pertes</sub> (%)	62.959	63.004	63.022	63.009	55.813	63.001	63.023
<i>P<sub>PV</sub></i> (kW) (JB)	1819.7 (61)	1872.5 (61)	1872.0 (61)	1800.0 (61)	1207.0 (61)	1872.8 (61)	1872.6 (61)
Vmin (p.u.)	0.9680	0.9683	0.9683	0.9679	0.9554	0.9683	0.9683

a) 1 PV

	BFOA	IWD	IWO	AGA	MFO	PSO-GSA	PSO
P <sub>Pertes</sub> (kW)	75.230	73.550	74.590	70.669	73.495	72.991	70.277
$\Delta P_{Pertes}$ (%)	66.556	67.303	66.841	68.584	67.327	67.552	68.758
	295.4	299.9	123.81	272.0	300.0	400.0	520.1
	(27)	(17)	(27)	(12)	(21)	(17)	(18)
PPV (kW)	1345.1	1320.0	433.4	310.0	1450.0	1280.0	552.0
(JB)	(61)	(60)	(65)	(21)	(61)	(61)	(50)
	447.6	438.8	1326.6	1861.0	300.0	400.0	1824.4
	(65)	63	(61)	(61)	(65)	(65)	(61)
Vmin (p.u.)	0.9808	0.9730	0.9740	0.9820	0.9788	0.9775	0.9804

(C) 3 PV

Pour le réseau IEEE 69-JB avec un PV, l'algorithme PSO montre les meilleures performances avec des pertes de puissance réduites à 114.2986 kW et une tension minimale améliorée à 0.9494 p.u. Comparativement, l'algorithme MTLBO affiche des pertes de puissance plus élevées (127.170 kW) et une tension minimale inférieure (0.9349 p.u.).

Pour trois PV, l'algorithme PSO continue de montrer les meilleures performances avec des pertes de puissance réduites à 72.8469 kW et une tension minimale de 0.9695 p.u. Les autres algorithmes, bien que performants, n'atteignent pas les mêmes niveaux d'efficacité que le PSO.

Les résultats des tableaux montrent que l'algorithme PSO est le plus efficace pour réduire les pertes de puissance et améliorer la tension minimale dans les réseaux IEEE 33-JB et IEEE 69-JB. L'ajout de panneaux photovoltaïques améliore globalement les performances des réseaux, avec des gains significatifs observés lorsque le nombre de PV augmente.

## 3.3 Résultats d'optimisation multi-objectifs

Les résultats d'optimisation multi-objectifs permettent de considérer simultanément plusieurs critères d'optimisation, tels que la réduction des pertes de puissance, l'amélioration de la stabilité du réseau, et la maximisation de l'intégration des systèmes photovoltaïques (PV). Cette approche offre une vue d'ensemble des compromis possibles entre différents objectifs, fournissant des solutions équilibrées pour l'intégration optimale des PV dans les réseaux de distribution. Les simulations ont été réalisées en utilisant l'algorithme essaim de particules (PSO), et les résultats sont présentés pour les réseaux IEEE 33-JB et IEEE 69-JB avec l'intégration de un, et de trois systèmes PV.

La Figure 3.4 présente la convergence des pertes de puissance active et réactive pour une optimisation multi-objectif avec un seul PV. L'algorithme PSO montre une convergence rapide et stable, atteignant des solutions optimales ou proches des optimales en moins d'itérations par rapport aux autres algorithmes. La convergence rapide signifie que l'algorithme peut trouver des solutions efficaces en peu de temps.

La Figure 3.6 montre la convergence des pertes de puissance pour trois PV démontre que le PSO continue de montrer une performance supérieure. La convergence est non seulement rapide mais aussi stable, atteignant des solutions optimales ou proches des optimales avec un nombre réduit d'itérations.







Figure 3.3 : Caractéristique de convergence de FMO pour 1 PV.



#### (b) **IEEE 69-JB**

#### Figure 3.4 : Caractéristique de convergence de FMO pour 3 PV.

Le tableau 3.4 présente les résultats de l'optimisation multi-objectif pour le réseau IEEE 33-JB avec différents nombres PV.

Paramètres	Avant PV	1PV	3PV	
P <sub>PV</sub> (kW)		2847.8	829.4 1103.6 1066.4	
JB		7	13 24 30	
P <sub>Pertes</sub> (kW)	210.9875	114.2986	72.8469	
Q <sub>Pertes</sub> (kVar)	143.1284	89.9468	50.7182	
VTT (p.u.)	1.8047	0.8013	0.5916	
VSI (p.u.)	25.9238	29.1993	29.8585	
CAP (k\$)	92.413	50.063	31.907	
V <sub>min</sub> (p.u.)	0.9038	0.9494	0.9695	

Tableau 3.3 : Résultats d'optimisation multi-objectifs : réseau IEEE 33-JB

La puissance PV varie avec le nombre de PV. Avec un seul PV, la puissance est de 2847.8 kW au JB 7. Avec trois PV, les puissances sont de 829.4 kW, 1103.6 kW et 1066.4 kW aux jeux de barres 13, 30, et 24 respectivement. L'augmentation du nombre de PV permet une répartition plus équilibrée de la production d'énergie.

 $P_{pertes}$  diminuent considérablement avec l'ajout de PV, passant de 210.9875 kW avant l'optimisation à 114.2986 kW avec un PV, et 72.8469 kW avec trois PV. Cela montre l'efficacité de l'optimisation dans la réduction des pertes.

 $Q_{pertes}$  suivent une tendance similaire. Elles passent de 143.1284 kVar avant optimisation à 89.9468 kVar avec un PV, et 50.7182 kVar avec trois PV. Cette réduction progressive montre l'efficacité croissante des PV supplémentaires.

Le *VTT* diminue avec l'ajout de PV, indiquant une meilleure stabilité du réseau. Les valeurs passent de 1.8047 p.u. avant optimisation à 0.8013 p.u. avec un PV, et 0.5916 p.u. avec trois PV.

Le *VSI* augmente avec l'ajout de PV, passant de 25.9238 p.u. avant optimisation à 29.1993 p.u. avec un PV, et 29.8585 p.u. avec trois PV, ce qui montre une amélioration continue de la stabilité du réseau.

Le *CAP* diminue avec l'ajout de PV, passant de 92.413 k\$ avant optimisation à 50.063 avec un PV, et 31.907 k\$ avec trois PV, indiquant une réduction significative des coûts opérationnels.

Le Tableau 3.5 présente les résultats de l'optimisation multi-objectif pour le réseau IEEE 69-JB avec différents nombres de PV.

Paramètres	Avant PV	1PV	3PV	
P <sub>PV</sub> (kW)		1942.1	583.0 716.9 1782.7	
JB		61	16 50 61	
PPertes (kW)	224.9480	83.3476	70.2542	
QPertes (kVar)	102.1406	40.4819	32.2115	
VTT (p.u.)	1.8704	1.2031	1.0229	
VSI (p.u.)	61.3961	64.8608	66.2244	
CAP (k\$)	98.527	36.506	30.771	
Vmin (p.u.)	0.9092	0.9687	0.9793	

Tableau 3.4 : Résultats d'optimisation multi- : réseau IEEE 69-JB

Avec un PV, la puissance est de 1942.1 kW au JB 61. Avec trois PV, les puissances sont de 583.0 kW, 716.9 kW et 1782.7 kW au JB 16, 50 et 61. La répartition montre une amélioration de la distribution énergétique.

 $P_{pertes}$  diminuent significativement avec l'ajout de PV, passant de 224.9480 kW avant l'optimisation à 83.3476 kW avec un PV, et 70.2542 kW avec trois PV.

 $Q_{pertes}$  suivent une tendance similaire. Elles passent de 102.1406 kVar avant optimisation à 40.4819 kVar avec un PV, et 32.2115 kVar avec trois PV.

Le *VTT* diminue avec l'ajout de PV, passant de 1.8704 p.u. avant optimisation à 1.2031 p.u. avec un PV, et 1.0229 p.u. avec trois PV.

Le *VSI* augmente avec l'ajout de PV, passant de 61.3961 p.u. avant optimisation à 64.8608 p.u. avec un PV, 66.2655 p.u. et 66.2244 p.u. avec trois PV.

Le *CAP* diminue avec l'ajout de PV, passant de 98.527 k\$ avant optimisation à 36.506 k\$ avec un PV, et 30.771 k\$ avec trois PV.

La tension minimale du réseau s'améliore également, passant de 0.9092 p.u. avant optimisation à 0.9687 p.u. avec un PV, et 0.9793 p.u. avec trois PV.

Pour le réseau IEEE 33-JB, le profil de tension sans l'ajout de systèmes photovoltaïques (PV) reste relativement bas, indiquant une possible instabilité et une qualité inférieure de l'alimentation électrique. Lorsqu'un seul système PV est ajouté, on observe une amélioration notable des profils de tension, mais des variations persistent. L'ajout de trois systèmes PV stabilise considérablement la tension, rapprochant les valeurs des niveaux optimaux et assurant ainsi une meilleure qualité de l'alimentation. De manière similaire, pour le réseau IEEE 69-JB, le profil de tension initial sans PV est bas, suggérant des inefficacités dans la distribution de l'énergie. Avec l'ajout d'un PV, il y a une amélioration, mais certaines fluctuations demeurent. L'ajout de trois PV montre une amélioration significative de la tension, offrant une meilleure stabilité et une qualité d'alimentation améliorée. En résumé, l'ajout de PV dans les deux réseaux améliore progressivement les profils de tension, et la présence de plusieurs PV assure une meilleure stabilité par rapport à un seul PV.



(a) **IEEE 33-JB** 





Figure 3.5 : Profils des tensions pour l'optimisation multi-objectifs

Dans le réseau IEEE 33-JB, les pertes actives sont initialement élevées, reflétant une inefficacité dans la distribution de l'énergie. L'ajout d'un PV réduit les pertes actives, mais elles restent significatives. En revanche, trois PV réduisent notablement ces pertes, indiquant une meilleure efficacité énergétique. Pour le réseau IEEE 69-JB, les pertes actives sont également élevées sans PV. Un PV réduit les pertes, mais des améliorations sont encore nécessaires. L'ajout de trois PV montre une réduction significative des pertes, démontrant une gestion énergétique optimisée. Globalement, l'intégration de plusieurs PV dans les deux réseaux réduit considérablement les pertes actives, augmentant l'efficacité énergétique globale.





Figure 3.6 : Pertes active pour l'optimisation multi-objectifs

Dans le réseau IEEE 33-JB, les pertes actives sont initialement élevées, reflétant une inefficacité dans la distribution de l'énergie. L'ajout d'un PV réduit les pertes actives, mais elles restent significatives. En revanche, trois PV réduisent notablement ces pertes, indiquant une meilleure efficacité énergétique. Pour le réseau IEEE 69-JB, les pertes actives sont également élevées sans PV. Un PV réduit les pertes, mais des améliorations sont encore nécessaires. L'ajout de trois PV montre une réduction significative des pertes, démontrant une gestion énergétique optimisée. Globalement, l'intégration de plusieurs PV dans les deux réseaux réduit considérablement les pertes actives, augmentant l'efficacité énergétique globale.



(a) **IEEE 33-JB** 



(b) **IEEE 69-JB** 

Figure 3.7 : Pertes réactive pour l'optimisation multi-objectifs.

Pour le réseau IEEE 33-JB, la tension minimale sans PV est relativement basse, ce qui peut entraîner des problèmes de performance sous des charges variables. Avec un PV, la tension minimale augmente, bien que des variations persistent. L'ajout de trois PV améliore significativement la tension minimale, garantissant une meilleure stabilité même sous des charges variables. Le réseau IEEE 69-JB montre également une basse tension minimale sans PV. Un PV améliore cette tension, mais les fluctuations subsistent. Trois PV augmentent la tension minimale de manière significative, assurant une performance optimale sous différentes charges. L'ajout de PV améliore donc la tension minimale et assure une meilleure stabilité sous des charges variables dans les deux réseaux.







Figure 3.8 : La tension minimale en en considération de variation de la charge.

Dans le réseau IEEE 33-JB, les pertes actives sont élevées et varient considérablement avec la charge. L'ajout d'un PV réduit ces pertes, mais des variations persistent. Trois PV réduisent significativement les pertes actives même sous des charges variables, montrant une meilleure efficacité énergétique. Le réseau IEEE 69-JB présente également des pertes actives élevées sans PV. Un PV aide à les réduire, mais elles restent élevées sous certaines charges. Trois PV réduisent considérablement ces pertes, assurant une gestion énergétique plus efficace. L'ajout de PV, surtout en nombre, améliore donc l'efficacité énergétique sous des charges variables dans les deux réseaux



(a) **IEEE 33-JB** 





Figure 3.9 : Les pertes active en en considération de variation de la charge.

Les pertes réactives dans le réseau IEEE 33-JB sont élevées sans PV et fluctuent avec la charge. L'ajout d'un PV réduit ces pertes, mais des variations existent encore. Avec trois PV, les pertes réactives diminuent de manière significative, même sous des charges variables. Le réseau IEEE 69-JB montre une tendance similaire où les pertes réactives sont élevées sans PV. Un PV réduit ces pertes, mais elles restent élevées sous certaines charges. Trois PV réduisent significativement les pertes réactives, optimisant la gestion de l'énergie sous des charges variables. L'ajout de PV, en particulier en nombre, est plus efficace pour minimiser les pertes réactives et améliorer la gestion énergétique.



(a) **IEEE 33-JB** 



#### (b) IEEE 69-JB

Figure 3.10 : Les pertes active en en considération de variation de la charge.

Les profils de tension dans le réseau IEEE 33-JB sans PV sont bas et fluctuants avec la charge, affectant la qualité de l'alimentation. Avec un PV, les profils de tension s'améliorent, mais des variations subsistent. Trois PV stabilisent significativement ces profils, même sous des charges variables, assurant une meilleure qualité de l'alimentation. De même, le réseau IEEE 69-JB montre des profils de tension bas sans PV. Un PV améliore les profils de tension, mais les fluctuations persistent. Trois PV stabilisent considérablement les profils de tension, assurant une performance optimale sous différentes charges. En résumé, l'ajout de PV améliore les profils de tension et assure une meilleure stabilité et qualité de l'alimentation sous des charges variables dans les deux réseaux.





(a) **IEEE 33-JB** 

Figure 3.11 : Les profils des tensions en considération de variation de la charge

#### **3.4 Conclusion**

En conclusion, les résultats présentés dans ce chapitre démontrent clairement l'efficacité des approches d'optimisation mono-objectif et multi-objectifs appliquées aux systèmes électriques étudiés. Les caractéristiques de convergence observées montrent une amélioration significative des paramètres optimisés, que ce soit pour la réduction des pertes actives et réactives ou pour l'amélioration des profils de tension.

Pour l'optimisation mono-objectif, les résultats obtenus confirment la capacité de cette approche à cibler et améliorer un paramètre spécifique du système. Les figures telles que la caractéristique de convergence pour un seul point de production photovoltaïque (PV) illustrent comment les solutions convergent vers des valeurs optimales, assurant une meilleure performance du système.

En ce qui concerne l'optimisation multi-objectifs, les résultats montrent que cette méthode permet de trouver un équilibre optimal entre plusieurs critères, offrant ainsi une solution plus globale et satisfaisante pour les différents aspects du système. Les profils de tension et les pertes actives et réactives, présentés dans les figures, démontrent les avantages de cette approche en termes de performance globale.

Les résultats obtenus sont prometteurs et indiquent que les méthodes d'optimisation utilisées peuvent être appliquées avec succès à des systèmes plus complexes ou à d'autres domaines nécessitant des optimisations similaires. Les données quantitatives et les illustrations fournies dans ce chapitre soutiennent nos conclusions et valident les méthodes employées.

Ces analyses ouvrent la voie à de nouvelles recherches, notamment pour explorer des améliorations potentielles des algorithmes d'optimisation, l'application à d'autres types de réseaux électriques, ou l'intégration de nouvelles technologies énergétiques. En somme, les résultats et discussions présentés dans ce chapitre fournissent une base solide pour des développements futurs dans le domaine de l'optimisation des systèmes électriques

## **Conclusion générale et perspectives**

L'intégration optimale des sources d'énergie photovoltaïque dans les réseaux de distribution constitue un enjeu crucial pour la transition énergétique mondiale. Ce mémoire a exploré cette problématique en utilisant l'algorithme Particle Swarm Optimization (PSO), démontrant son efficacité pour surmonter les défis associés à cette intégration. Les travaux réalisés ont permis de mettre en lumière plusieurs points clés.

Premièrement, l'étude des réseaux électriques et des sources photovoltaïques a révélé la complexité et l'interconnexion des systèmes énergétiques modernes. La modélisation précise de ces systèmes est essentielle pour comprendre les interactions et les impacts des nouvelles technologies, telles que les sources photovoltaïques. Deuxièmement, la formulation du problème d'optimisation et l'analyse des écoulements de puissance ont fourni une base solide pour appliquer des méthodes d'optimisation avancées. L'algorithme PSO, par sa nature heuristique et son aptitude à gérer des problèmes multi-objectifs, s'est avéré être un outil puissant pour optimiser l'intégration des PV.

Les résultats des simulations ont montré une amélioration notable des performances des réseaux de distribution après l'optimisation. Les principaux bénéfices incluent une réduction significative des pertes d'énergie, une meilleure stabilité des tensions et une optimisation des coûts d'exploitation. Ces améliorations sont cruciales pour assurer la fiabilité et l'efficacité des réseaux électriques, surtout dans un contexte où la demande en énergie renouvelable ne cesse de croître.

En conclusion, cette recherche a non seulement démontré la viabilité de l'algorithme PSO pour l'intégration des sources d'énergie photovoltaïque, mais elle a également souligné l'importance de continuer à développer et à appliquer des méthodes d'optimisation avancées dans le domaine de l'énergie. Les implications de ce travail sont vastes, touchant à la fois les aspects techniques, économiques et environnementaux de la gestion des réseaux électriques. Pour l'avenir, il sera essentiel de poursuivre les efforts de recherche et d'innovation pour faire face aux défis de la transition énergétique et pour exploiter pleinement le potentiel des énergies renouvelables

## **Références bibliographiques**

- [1] L. Abbassen, "Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque," Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri, 2011.
- [2] M. Megdiche, "Sûreté de fonctionnement des réseaux de distribution en présence de production décentralisée," Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2004.
- [3] M. A. E. Alali, "Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension," Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur-Strasbourg I, 2002.
- [4] A. Labouret and M. Villoz, Energie solaire photovoltaïque, vol. 3. Paris: Dunod, 2006.
- [5] A. Berrah, N. Kherrazi, M. Yaichi, et al., "Caractérisation et étude du fonctionnement d'un générateur photovoltaïque," Thèse de doctorat, Université Ahmed Draïa-Adrar, 2019.
- [6] B. I. Souhila, "Optimisation du fonctionnement d'un générateur photovoltaïque par guidage automatique des panneaux solaires," Thèse de doctorat, Université Djillali Liabes, 2018.
- [7] A. Azizi, "Modélisation et optimisation d'un système de production d'énergie photovoltaïque avec un système de stockage hybride," Thèse de doctorat, Université de Annaba-Badji Mokhtar, 2019.
- [8] F. Hananou and A. Rouabah, "Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque," Thèse de doctorat, 2014.
- [9] S. Motahhir, A. El Ghzizal, and A. Derouich, "Modélisation et commande d'un panneau photovoltaïque dans l'environnement PSIM (Modeling and Control of a Photovoltaic Panel in the PSIM Environment)," 2015.
- [10] J. J. Maugis, "Etude de réseaux de transport et de distribution de fluide," RAIRO-Operations Research, vol. 11, no. 2, pp. 243-248, 1977.
- [11] SETTOUL, Samir, "Stratégies d'Intégration optimale de sources des énergies renouvelables dans le réseau de distribution électrique en considérant des indices techniques et économiques". 2022. Thèse de doctorat. Université Frères Mentouri-Constantine 1.
- [12] J. C. Das, Load Flow Optimization and Optimal Power Flow, Power Systems Handbook, vol. 2. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis Group, 2018.
- [13] O. A. Afolabi, W. H. Ali, P. Cofie, J. Fuller, P. Obiomon, and E. S. Kolawole, "Analysis of the Load Flow Problem in Power System Planning Studies," *Energy and Power Engineering*, vol. 07, no. 10, pp. 509–523, 2015.
- [14] U. H. Ramadhani, M. Shepero, J. Munkhammar, J. Widén, and N. Etherden, "Review of probabilistic load flow approaches for power distribution systems with photovoltaic generation and electric vehicle charging," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 120, p. 106003, Sep. 2020.
- [15] J. Zhu, *Optimization of Power System Operation*, 2nd ed., IEEE Press Series on Power Engineering. Hoboken, New Jersey: IEEE Press: Wiley; Piscataway, NJ, 2015.
- [16] S. Bhowmick, Flexible AC Transmission Systems (FACTS): Newton Power-Flow Modeling of Voltage-Sourced Converter Based Controllers. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2016.
- [17] L. Powell, Power System Load Flow Analysis. New York; London: McGraw-Hill, 2005.
- [18] R. J. R. Kumar and A. Jain, "Load flow methods in distribution systems with dispersed generations: A brief review," in 2015 1st Conference on Power, Dielectric and Energy Management at NERIST (ICPDEN), Itanagar, India: IEEE, Jan. 2015, pp. 1–4.
- [19] S. Settoul, R. Chenni, H. A. Hasan, M. Zellagui, and M. N. Kraimia, "MFO Algorithm for Optimal Location and Sizing of Multiple Photovoltaic Distributed Generations Units for Loss Reduction in

Distribution Systems," in 2019 7th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), Agadir, Morocco: IEEE, Nov. 2019, pp. 1–6.

- [20] R. Baños et al., "Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 4, pp. 1753–1766, May 2011.
- [21] S. Settoul, M. Zellagui, A. Y. Abdelaziz, and R. Chenni, "Optimal Integration of Renewable Distributed Generation in Practical Distribution Grids based on Moth-Flame Optimization Algorithm", 1<sup>st</sup> International Conference on Advanced Electrical Engineering (ICAEE), Algiers, Algeria, 19-21 November 2019.
- [22] S. Nagaballi and V. S. Kale, "Pareto optimality and game theory approach for optimal deployment of DG in radial distribution system to improve techno-economic benefits," *Applied Soft Computing*, vol. 92, p. 106234, Jul. 2020.
- [23] R. T. Marler and J. S. Arora, "The weighted sum method for multi-objective optimization: New insights," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 41, no. 6, pp. 853–862, Jun. 2010.
- [24] P. Ngatchou, A. Zarei, and A. El-Sharkawi, "Pareto Multi Objective Optimization," in Proceedings of the 13th International Conference on, Intelligent Systems Application to Power Systems, Arlington, Virginia, USA: IEEE, 2005, pp. 84–91.
- [25] L. Zadeh, "Optimality and non-scalar-valued performance criteria," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 8, no. 1, pp. 59–60, Jan. 1963.
- [26] M. A. Darfoun and M. E. El-Hawary, "Multi-objective Optimization Approach for Optimal Distributed Generation Sizing and Placement," *Electric Power Components and Systems*, vol. 43, no. 7, pp. 828–836, Apr. 2015.
- [29] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," in *Proceedings of ICNN'95 International Conference on Neural Networks*, vol. 4, Nov. 1995, pp. 1942–1948 vol.4.
- [30] Y. Shi and R. Eberhart, "A modified particle swarm optimizer," in 1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings. IEEE World Congress on Computational Intelligence (Cat. No.98TH8360). Anchorage, AK, USA: IEEE, 1998, pp. 69–73.
- [31] 49 H. Manafi, N. Ghadimi, M. Ojaroudi, and P. Farhadi, "Optimal placement of distributed generations in radial distribution systems using various PSO and DE algorithms", *Elektronika ir Elektrotechnika*, vol. 19, no. 10, pp. 53-57, 2013.
- [32]6 A. El-Fergany, "Optimal allocation of multi-type distributed generators using backtracking search optimization algorithm", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 64, pp. 1197-1205, 2015.
- [33] M. Dixit, P. Kundu, and H. R. Jariwala, "Incorporation of distributed generation and shunt capacitor in radial distribution system for techno-economic benefits", *Engineering Science and Technology*, vol. 20, no. 2, pp. 482-493, 2017.
- [34] 20 M. Dixit, P. Kundu, and H. R. Jariwala, "Incorporation of distributed generation and shunt capacitor in radial distribution system for techno-economic benefits", *Engineering Science and Technology*, vol. 20, no. 2, pp. 482-493, 2017.
- [35] L. F. Grisales-Noreña, D. G. Montoya, and C. A. Ramos-Paja, "Optimal sizing and location ofdistributed generators based on PBIL and PSO techniques", *Energies*, vol. 11, 2018.
- [36] S. Sultana, and P.K. Roy, "Multi-objective quasi-oppositional teaching learning-based optimization for optimal location of distributed generator in radial distribution systems", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 63, pp. 534-545, 2014.
- [37] 53 A. D. Singh, B. Y. Raj Sood, and C. A. Kumar Barnwal, "Case studies on optimal location and sizing of renewable energy generators in distribution system", *Journal of Renewable Sustainable Energy*, vol. 8, no. 6, pp. 1-16, 2016.

- [38] 11 D. R. Prabha and T. Jayabarathi, "Optimal placement and sizing of multiple distributed generating units in distribution networks by invasive weed optimization algorithm", *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 7, no. 2, pp. 683-694, 2016.
- [39] 16 E. S. Ali, S. A. Elazim, and A. Y. Abdelaziz, "Ant lion optimization algorithm for optimal location and sizing of renewable distributed generations", *Renewable Energy*, vol. 101, pp. 1311-1324, 2017.
- [40] 33 M. A. Tolba, Ahmed A. Z. Diab, A. S. Vanin, V. N. Tulsky, and A. Y. Abdelaziz, "Integration of renewable distributed generation in distribution networks including a practical case study based on a hybrid PSOGSA optimization algorithm", *Electric Power Components and Systems*, pp.1-14, 2019.
- [41] 55 J. García, and A. Mena, "Optimal distributed generation location and size using a modified teaching learning-based optimization algorithm", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 50, pp. 65-75, 2013.
- [42] 9 A. Abdelaziz, Y. Hegazy, W. El-Khattam, and M. Othman, "A multi-objective optimization for sizing and placement of voltage-controlled distributed generation using supervised big bang-big crunch method", *Electric Power Components and Systems*, vol. 43, no. 1, pp. 105-117, 2015.
- [43] 10 A. A. Hassan, F. H. Fahmy, A. Nafeh, and M. A. Abuelmagd, "Genetic single objective optimization for sizing and allocation of renewable DG systems", *International Journal of Sustainable Energy*, vol. 36, no. 9, pp. 545-56, 2015.
- [44] 21 T. Yuvaraj, K. Ravi, and K. R. Devabalaji, "Optimal allocation of DG and DSTATCOM in radial distribution system using cuckoo search optimization algorithm", *Modelling and Simulation in Engineering*, vol. 2017, pp. 1-11, 2017.
- [45] 29 M. A. Mohamed, A. Elnozahy, and A. Y. Abdelaziz, "Optimal energy saving of photovoltaic distributed generation system with considering environment condition via hyper-spherical search algorithm", WSEAS Transactions on Power Systems, vol. 15, pp. 311-325, 2018.
- [46] 30 P. D. P. Reddy, V. C. V. Reddy, and T. G. Manohar, "Optimal renewable resources placement in distribution networks by combined power loss index and whale optimization algorithms", *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, vol. 5, no. 2, pp. 175-191, 2018.
- 47 A. M. Imran, and M. Kowsalya, "Optimal size and siting of multiple distributed generators in distribution system using bacterial foraging optimization", *Swarm and Evolutionary Computation*, vol. 15, pp. 58-65, 2014.
- 48 D.R. Prabha, T. Jayabarathi, R. Umamageswari, and S. Saranya, "Optimal location and sizing of distributed generation unit using intelligent water drop Algorithm", *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 11, pp. 106-113, 2015.
- 49 E. S. Ali, S. A. Elazim, and A. Y. Abdelaziz, "Ant lion optimization algorithm for optimal location and sizing of renewable distributed generations", *Renewable Energy*, vol. 101, pp. 1311-1324, 2017.
- 50 T. Yuvaraj, K. Ravi, and K. R. Devabalaji, "Optimal allocation of DG and DSTATCOM in radial distribution system using cuckoo search optimization algorithm", *Modelling and Simulation in Engineering*, vol. 2017, pp. 1-11, 2017.
- 51 G. Deb, K. Chakraborty, and S. Deb, "Spider monkey optimization technique-based allocation of distributed generation for demand side management", *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 29, pp. 1-17, 2019.

## Annexe

A.1. Réseau IEEE -JB

				Réactance (Ω)	Charge		
N° de branche	JB 1	JB 2	Résistance (Ω)		Puissance active (kW)	Puissance réactive (kVar)	
1	1	2	0.0922	0.0477	100	60	
2	2	3	0.4930	0.2511.	90	40	
3	3	4	0.3660	0.1864	120	80	
4	4	5	0.3811	0.1941	60	30	
5	5	6	0.8190	0.7070	60	20	
6	6	7	0.1872	0.6188	200	100	
7	7	8	17.114	12.351	200	100	
8	8	9	10.300	0.7400	60	20	
9	9	10	10.400	0.7400	60	20	
10	10	11	0.1966	0.06500	45	30	
11	11	12	0.3744	0.1238	60	35	
12	12	13	1.468	11.550	60	35	
13	13	14	0.5416	0.7129	120	80	
14	14	15	0.5910	0.5260	60	10	
15	15	16	0.7463	0.5450	60	20	
16	16	17	12.890	17.210	60	20	
17	17	18	0.7320	0.5740	90	40	
18	18	19	0.1640	0.1565	90	40	
19	19	20	15.042	13.554	90	40	
20	20	21	0.4095	0.4784	90	40	
21	21	22	0.7089	0.9373	90	40	
22	22	23	0.4512	0.3083	90	50	
23	23	24	0.8980	0.7091	420	200	
24	24	25	0.8960	0.7011	420	200	
25	25	26	0.2030	0.1034	60	25	
26	26	27	0.2842	0.1447	60	25	
27	27	28	10.590	0.9337	60	20	
28	28	29	0.8042	0.7006	120	70	
29	29	30	0.5075	0.2585	200	600	
30	30	31	0.9744	0.9630	150	70	
31	31	32	0.3105	0.3619	210	100	
32	32	33	0.3410	0.5302	60	40	

Tableau A.1 Données du réseau IEEE 33-JB

#### A.2. Réseau IEEE 69-JB

Tableau A.2 Données du réseau IEEE 69-JB

	e he JB 1 JB 2 Résistance Réactance (Ω)				Charge		
N° de branche		Réactance (Ω)	Puissance active (kW)	Puissance réactive (kVar)			
1	1	2	0.0005	0.0012	0	0	
2	2	3	0.0005	0.0012	0	0	
3	3	4	0.0015	0.0036	0	0	
4	4	5	0.0251	0.0294	0	0	
5	5	6	0.366	0.1864	2.6	2.2	
6	6	7	0.3811	0.1941	40.4	30	
7	7	8	0.0922	0.047	75	54	
8	8	9	0.0493	0.0251	30	22	
9	9	10	0.819	0.2707	28	19	
10	10	11	0.1872	0.0619	145	104	
11	11	12	0.7114	0.2351	145	104	
12	12	13	1.03	0.34	8	5	
13	13	14	1.044	0.345	8	5.5	
14	14	15	1.058	0.3496	0	0	
15	15	16	0.1966	0.065	45.5	30	
16	16	17	0.3744	0.1238	60	35	
17	17	18	0.0047	0.0016	60	35	
18	18	19	0.3276	0.1083	0	0	
19	19	20	0.2106	0.069	1	0.6	
20	20	21	0.3416	0.1129	114	81	
21	21	22	0.014	0.0046	5	3.5	
22	22	23	0.1591	0.0526	0	0	
23	23	24	0.3463	0.1145	28	20	
24	24	25	0.7488	0.2475	0	0	
25	25	26	0.3089	0.1021	14	10	
26	26	27	0.1732	0.0572	14	10	
27	3	28	0.0044	0.0108	26	18.6	
28	28	29	0.064	0.1565	26	18.6	
29	29	30	0.3978	0.1315	0	0	
30	30	31	0.0702	0.0232	0	0	
31	31	32	0.351	0.116	0	0	
32	32	33	0.839	0.2816	14	10	
33	33	34	1.708	0.5646	9.5	14	

#### Annexe

34	34	35	1.474	0.4873	6	4
35	3	36	0.0044	0.0108	26	18.55
36	36	37	0.064	0.1565	26	18.55
37	37	38	0.1053	0.123	0	0
38	38	39	0.0304	0.0355	24	17
39	39	40	0.0018	0.0021	24	17
40	40	41	0.7283	0.8509	1.2	1
41	41	42	0.31	0.3623	0	0
42	42	43	0.041	0.0478	6	4.3
43	43	44	0.0092	0.0116	0	0
44	44	45	0.1089	0.1373	39.22	26.3
45	45	46	0.0009	0.0012	39.22	26.3
46	4	47	0.0034	0.0084	0	0
47	47	48	0.0851	0.2083	79	56.4
48	48	49	0.2898	0.7091	384.7	274.5
49	49	50	0.0822	0.2011	384.7	247.5
50	8	51	0.0928	0.0473	40.5	28.3
51	51	52	0.3319	0.1114	3.6	2.7
52	9	53	0.174	0.0886	4.35	3.5
53	53	54	0.203	0.1034	26.4	19
54	54	55	0.2842	0.1447	24	17.2
55	55	56	0.2813	0.1433	0	0
56	56	57	1.59	0.5337	0	0
57	57	58	0.7837	0.263	0	0
58	58	59	0.3042	0.1006	100	72
59	59	60	0.3861	0.1172	0	0
60	60	61	0.5075	0.2585	1244	888
61	61	62	0.0974	0.0496	32	23
62	62	63	0.145	0.0738	0	0
63	63	64	0.7105	0.3619	227	162
64	64	65	1.041	0.5302	59	42
65	11	66	0.2012	0.0611	18	13
66	66	67	0.0047	0.0014	18	13
67	12	68	0.7394	0.2444	28	20
68	68	69	0.0047	0.0016	28	20

## Résumé

Ce mémoire présente une étude approfondie sur l'intégration des sources photovoltaïques (PV) dans les réseaux de distribution électrique. L'objectif principal est d'optimiser l'emplacement et la taille des sources PV pour minimiser les pertes de puissance et améliorer la stabilité du réseau. Deux fonctions d'optimisation sont proposées : une fonction mono-objectif visant à minimiser les pertes de puissance active, et une nouvelle fonction multi-objectifs formulée pour minimiser les pertes du réseau, améliorer le profil de tension et réduire les coûts. Les réseaux IEEE 33-nœuds (33-JB) et 69-nœuds (69-JB) ont été étudiés pour évaluer l'efficacité de l'algorithme d'optimisation proposé. Les résultats montrent que l'ajout de sources PV réduit significativement les pertes actives et réactives, améliore les profils de tension et diminue les coûts d'alimentation électrique. L'algorithme PSO (Particle Swarm Optimization) a été utilisé pour résoudre les problèmes d'optimisation proposés. Les résultats obtenus indiquent que l'algorithme est efficace pour trouver des solutions optimales, tant pour les fonctions mono-objectif que multi-objectifs. En résumé, l'intégration de sources PV dans les réseaux de distribution, en particulier pour les réseaux IEEE 33-JB et 69-JB, améliore significativement leur performance et stabilité

## Abstract

This thesis presents an in-depth study on the integration of photovoltaic (PV) sources into electrical distribution networks. The main objective is to optimize the placement and size of PV sources to minimize power losses and improve network stability. Two optimization functions are proposed: a single-objective function aimed at minimizing active power losses, and a new multi-objective function formulated to minimize network losses, improve voltage profiles, and reduce costs. The IEEE 33-bus (33-JB) and 69-bus (69-JB) networks were studied to evaluate the effectiveness of the proposed optimization algorithm. The results show that the addition of PV sources significantly reduces active and reactive power losses, improves voltage profiles, and decreases electricity supply costs. The Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm was used to solve the proposed optimization problems. The obtained results indicate that the algorithm is effective in finding optimal solutions for both single-objective and multi-objective functions. In summary, the integration of PV sources into distribution networks, particularly for the IEEE 33-JB and 69-JB networks, significantly improves their performance and stability.

#### ملخص

تقدم هذه الأطروحة دراسة معمقة حول دمج مصادر الطاقة الكهروضوئية (PV) في شبكات التوزيع الكهربائية. الهدف الرئيسي هو تحسين موقع وحجم مصادر الطاقة الكهروضوئية لتقليل فقدان الطاقة وتحسين استقرار الشبكة. تُقترح وظيفتان للتحسين: وظيفة هدف واحد تهدف إلى تقليل فقدان الطاقة النشطة، ووظيفة جديدة متعددة الأهداف مصممة لتقليل فقدان الشبكة، وتحسين ملفات الجهد، وتقليل التكاليف. تمت دراسة شبكات IEEE ذات 33 عقدة و69 عقدة لتقييم فعالية خوارزمية التحسين المقترحة. تظهر النتائج أن إضافة مصادر الطاقة الكهروضوئية تقلل بشكل كبير من فقدان الطاقة النشطة والتفاعلية، وتحسن ملفات الجهد، وتقليل التكاليف. تمت دراسة شبكات IEEE ذات 33 عقدة و69 عقدة لتقييم فعالية والتفاعلية، وتحسن ملفات الجهد، وتقليل التكاليف. تمت دراسة شبكات وطوئية تقلل بشكل كبير من فقدان الطاقة النشطة والتفاعلية، وتحسن ملفات الجهد، وتقلل تكاليف إمدادات الكهرباء. تم استخدام خوارزمية تحسين سرب الجسيمات (PSO) لحل مشاكل التحسين المقترحة. تشير النتائج المحصل عليها إلى أن الخوارزمية فعالة في العثور على حلول مثلى لكل من وطائف الهدف الواحد والأهداف المتعددة. باختصار، فإن دمج مصادر الطاقة الكهروضوئية فعالة في العثور على حلول مثلى لكل من وطائف الهدف الواحد والأهداف المتعددة. بختصار، فإن دمج مصادر الطاقة الكهروضوئية فعالة في العثور على حلول مثلى لكل من وظائف الهدف الواحد والأهداف المتعددة. باختصار، فإن دمج مصادر الطاقة الكهروضوئية في العثور على حلول مثلى لكل من وظائف الهدف الواحد والأهداف المتعددة. باختصار، فإن دمج مصادر الطاقة الكهروضوئية في ألفي التوزيع، لا سيما في شبكات BEE 33-JB