



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

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Électrotechnique
Réseau électrique

Réf. : Entrez la référence du document

Présenté et soutenu par :
Mancer Aboubaker

Le : lundi 26 mai 2025

Optimisation des performances de réseau de distribution par l'utilisation de l'algorithme de Slime Mould (SMA)

Jury :

Mr.	Mahdad Belkacem	Pr	Université de Biskra	Encadreur
Mr.	Necira Abdelouahab	MCB	Université de Biskra	Président
Mr.	Rouina Abdlehafid	MCA	Université de Biskra	Examineur

Année universitaire : 2024/2025



Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Électrotechnique
Réseau électrique

Réf. : Entrez la référence du document

Optimisation des performances de réseau de distribution par l'utilisation de l'algorithme de Slime Mould (SMA)

Le :

Présenté par :
Mancer Aboubaker

Avis favorable de l'encadreur :
Pr. Mahdad Belkacem

Signature Avis favorable du Président du Jury

Cachet et signature

Sommaire

Sommaire	i
Résumé	iii
Remerciements.....	iv
Liste des figures	vi
Liste des tableaux	viii
Liste des symboles	ix
Introduction générale.....	x
Chapitre I : Structure des réseaux de distribution moderne	1
I.1 Introduction.....	1
I.2 La définition de réseau électrique.....	1
I.4 Types des réseaux électriques	2
I.3 Les normes des réseaux électriques.....	2
I.5 Les topologies de réseau de distribution :.....	3
I.6 Les postes des réseaux de distribution.....	4
I.7 Intégration des sources distribuées	5
I.8 Conclusion	8
Chapitre II : Méthodes d'analyse des réseaux de distribution.....	9
II.1. Introduction.....	9
II.2. Ecoulement de puissance du réseau de distribution radiale	9
II.3. Technique d'analyse des réseaux de distribution :	10
II.3.1. Technique de Newton-Raphson	10
II.3.2. Technique de Balayage arrière avant (Backward Forward Sweep) :	10
II.4. Techniques de gestions des réseaux de distribution	14
II.4.1 Compensation de la puissance réactive :	14
II.4.2 Régulateurs de tension.....	18
II.4.3 Technique de Reconfiguration des Réseaux Électriques	19
II.5 Conclusion	19
Chapitre III : Méthodes d'optimisation métaheuristiques.....	21
III.1 Introduction	21
III.2 Définition de l'Optimisation.....	21
III.3 Définition des méthodes métaheuristiques	21
III.4 Classification des méthodes métaheuristiques.....	21
III.4.1 Algorithmes génétiques.....	22
III.4.3 Définition de l'Algorithme de la Moissure Visqueuse (SMA).....	24
III.5 Formulation du problème d'optimisation.....	30

III.5.1 Fonction objectif simple	30
III.6 Conclusion.....	32
Chapitre IV : Analyse des résultats	33
IV.1 Introduction :.....	33
IV.2 Première Phase : Analyse sans optimisation :	33
IV.2.1 Cas normal :.....	34
IV.2.2 Cas anormal :	37
IV.2.3 Interprétation des Résultats du Réseau IEEE 69 Jeux de Barres	39
IV.3 Validation de la méthode SMA	40
IV.3.1 Validation sur des fonctions mathématiques	40
IV.3.2 Interprétation des Résultats	45
IV.4 Deuxième phase : Analyse avec l'optimisation :.....	46
IV.4.1 Étapes d'optimisation à base de l'algorithme SMA	46
IV.4.2 Validation de la méthode Slime mould à l'optimisation de l'intégration du système de compensation	49
IV.4.2.1 Application de l'algorithme de slime mould:	50
IV.4.3 Intégration des sources distribuées	57
IV.4.3.1 Application de l'algorithme de Slime Mould	57
IV.5 Conclusion	61
Conclusion Générale	62
Reference	63
Annexe.....	65

Résumé

Face à l'expansion rapide des réseaux électriques, à la croissance soutenue de la demande énergétique et à l'intégration massive de sources d'énergie renouvelable distribuées, les gestionnaires de réseaux de distribution sont confrontés à des défis de plus en plus complexes. Ce mémoire propose une approche d'optimisation métaheuristique, basée sur l'Algorithme de la Moissure Visqueuse (SMA), afin d'améliorer la gestion et les performances des réseaux de distribution intégrant des unités de production décentralisées et des dispositifs de compensation de l'énergie réactive.

L'algorithme de la Moissure Visqueuse, inspiré des mécanismes d'évolution biologique, est implémenté sous l'environnement MATLAB pour résoudre le problème d'optimisation. L'objectif est de minimiser à la fois les pertes actives totales et les écarts de tension dans le réseau. Le réseau de test IEEE 69 bus a été utilisé pour valider l'efficacité de la méthode proposée. Les résultats de simulation révèlent une bonne capacité de convergence, une amélioration significative des indicateurs de performance, et démontrent l'importance de l'intégration des sources distribuées en coordination avec le système de compensation permettant d'améliorer les performances des réseaux de distribution.

Mots clés : Optimisation, Métaheuristique, Algorithme de la Moissure Visqueuse (SMA), Sources distribuées (DG), les pertes active totales, la déviation de tension, Compensation d'énergie réactive, Réseau de distribution IEEE 69 bus.

الملخص

في ظل التوسع السريع لشبكات الكهرباء، والزيادة المستمرة في الطلب على الطاقة، والتكامل المتنامي لمصادر الطاقة المتجددة الموزعة، يواجه مشغلو شبكات التوزيع تحديات متزايدة في مجال الإدارة المثلى لهذه الشبكات. يقترح هذا العمل مقارنة تدرج ضمن الطرق الشاملة (Métaheuristiques) وهي خوارزمية العفن اللزج (SMA)، بهدف تحسين أداء شبكات التوزيع التي تضم مصادر إنتاج موزعة وأجهزة تعويض القدرة غير الفعالة.

تعتمد خوارزمية العفن اللزج، المستوحاة من آليات التطور البيولوجي، على محاكاة العمليات الطبيعية، وتم تنفيذها باستخدام بيئة MATLAB. يهدف هذا التطبيق إلى التقليل من الخسائر الحقيقية للطاقة وكذا الانحراف الكلي للجهد ضمن الشبكة. تم استخدام شبكة الاختبار القياسية IEEE 69-bus لتقييم فعالية الطريقة المقترحة. وقد أظهرت نتائج المحاكاة قدرة جيدة على التقارب وتحسناً ملحوظاً في مؤشرات الأداء، مما يؤكد فعالية الخوارزمية المقترحة في تحسين دمج المصادر الموزعة (DG) وأجهزة تعويض القدرة غير الفعالة في شبكات التوزيع الكهربائية الحديثة.

الكلمات المفتاحية: تحسين، الطرق الشاملة، خوارزمية العفن اللزج (SMA)، المصادر الموزعة (DG)، الخسائر

الحقيقية للطاقة، الانحراف الكلي للجهد، تعويض القدرة غير الفعالة، شبكة التوزيع IEEE 69-bus

Remerciements

Ce travail n'aurait pu être mené à bien sans la grâce et le soutien divins, pour lesquels nous témoignons notre reconnaissance infinie à « Allah ». Nous tenons également à exprimer notre vive gratitude à notre encadreur, Monsieur le Professeur MAHDAD Belkacem, dont l'accompagnement éclairé et la disponibilité furent des piliers tout au long de cette étude. Nos remerciements s'étendent à toutes les personnes, qu'elles soient nommées ou anonymes, dont la contribution, directe ou indirecte, a permis la réalisation de ce modeste projet. Enfin, nous adressons notre plus sincère appréciation aux membres du corps professoral et administratif de la Faculté des Sciences et de la

Technologie, notamment ceux du
département de Génie électrique, pour
la richesse de leur enseignement et
de leur encadrement.

Liste des figures

Figure I.1 : Structure des réseaux électriques	1
Figure I.2 : schéma simplifié d'un poste de transformation HTB/HTA [7]	4
Figure I.3 : schéma simplifié d'un poste HTA/HTA [7]	5
Figure I.4 : Structure d'un réseau moderne : intégration des sources distribuées et le système de compensation	6
Figure I.5 : classification des sources distribuées intégrées dans le réseau de distribution	7
Figure II.1 : Organigramme de la méthode backward /forward	13
Figure II.2: a) schéma unifilaire de compensation par condensateurs, b) batterie de Condensateurs haute tension 0.6 - 5 MVar : max.36 kV	15
Figure II.3: une bobine monophasée sur noyau de fer de 16,7 Hz et 15 kV 700kVA.....	15
Figure II.4: a) compensateur synchrone de puissance réactive refroidi à l'hydrogène de 125 MVar à 750 tr/min, 22 kV et 3,28 kA, b) génératrice avec compensateur synchrone	15
Figure II.5 : a) les systèmes FACTS, b) schéma équivalent sur système SVC	16
Figure II.6 : Schéma de principe de la compensation shunt (batterie de condensateur)	16
Figure II.7 : Installation d'un régulateur de tension avec le transformateur de distribution	18
Figure III.1 : classification des méthodes métaheuristiques	21
Figure III.2: Les quatre niveaux d'organisation des paramètres d'un AG	22
Figure III.3: Le mécanisme de recherche de l'algorithme génétique	22
Figure III.4: Morphologie de recherche de nourriture de la moisissure gluante [24]	23
Figure III.5: Estimation de la valeur de fitness	26
Figure III.6: le processus intuitif et détaillé du SMA [24]	27
Figure III.7: la méthodologie de l'algorithme de SMA [25]	28
Figure IV.1: Schéma unifilaire de réseau de distribution IEEE-69 JB	33
Figure IV.3: résultats d'analyse de l'état du réseau cas anormal : a) profil de tension, b) Courant transité, c) pertes actives, d) pertes réactives	36
Figure IV.4: résultats d'analyse de l'état du réseau cas anormal : a) profil de tension, b) Courant transité, c) pertes actives, d) pertes réactives	37
Figure IV.5: le profil de tension en cas normal et anormal en fonction de JB	37
Figure IV.6: Description des fonctions mathématiques standard : unimodal et multimodal	39
Figure IV.7: Convergence de la fonction uni-modale F1 par la méthode SMO	42
Figure IV.8: Convergence de la fonction uni-modale F2 par la méthode SMO	42
Figure IV.9: Convergence de la fonction multimodale F8 par la méthode SMO	43
Figure IV.10: Convergence de la fonction multimodale F23 par la méthode SMO	43
Figure IV.11: l'organigramme de l'algorithme de SMA	48
Figure IV.12: a) Courbe de convergence, b) tension aux jeux de barre pour cas normal minimisation des pertes totales : pour nombre de population = 30 et nombre d'itération maximal = 100	50
Figure IV.13: a) Courbe de convergence, b) tension aux jeux de barre pour cas anormal minimisation des pertes totales : pour nombre de population = 30 et nombre d'itération maximal = 100	50
Figure IV.14: a) Courbe de convergence, b) tension aux jeux de barre pour cas normal minimisation des pertes totales : pour nombre de population = 30 et nombre d'itération maximal = 100	51

Figure IV.15: a) Courbe de convergence, b) tension aux jeux de barre pour cas anormal minimisation des pertes totales : pour nombre de population = 30 et nombre d'itération maximal = 100	52
Figure IV.16: a) Courbe de convergence, b) tension aux jeux de barre pour cas anormal minimisation des pertes totales : pour nombre de population = 30 et nombre d'itération maximal = 100	53
Figure IV.17: a) Courbe de convergence, b) tension aux jeux de barre pour cas anormal minimisation la déviation de tension: pour nombre de population = 30 et nombre d'itération maximal = 100	53
Figure IV.18: a) Courbe de convergence, b) tension aux jeux de barre pour cas normal minimisation la déviation de tension: pour nombre de population = 30 et nombre d'itération maximal = 100	54
Figure IV.19: a) Courbe de convergence, b) tension aux jeux de barre pour cas anormal minimisation la déviation de tension: pour nombre de population = 30 et nombre d'itération maximal = 10	55
Figure IV.20: résultats d'analyse de l'état du réseau cas normal : a) profil de tension, b) courant transité, c) pertes actives, d) pertes réactives	33
Figure IV.20: a) Courbe de convergence, b) tension aux jeux de barre pour cas normal minimisation des pertes totales : pour nombre de population = 30 et nombre d'itération maximal = 50	57
Figure IV.21: a) Courbe de convergence, b) tension aux jeux de barre pour cas anormal minimisation des pertes totales : pour nombre de population = 30 et nombre d'itération maximal = 50	57
Figure IV.22: Étude comparative des pertes actives totales dans tous les cas d'études d'optimisation	59

Liste des tableaux

Table I.1: Classification selon la norme CEI-38 (Commission Électrotechnique Internationale).....	2
Table I.2: Classification selon la norme NF C 15-100 (norme française).....	3
Table I.3: Les types des topologies dans le réseau de distribution avec leurs Avantages et Inconvénients.	4
Table I.4: les Avantages et inconvénients de L'intégration des sources d'énergie distribuées dans les réseaux électriques.	8
Table IV.5: Les tension et les courants et les pertes active et réactive de réseau	36
Table IV.6 : résultat d'analyse de l'état du réseau en cas normal et anormal.....	39
Table IV.7: Résultats de minimisation des fonctions F1, F2, F8 et F23 par utilisation de la méthode SMO : {pop=10 a 30, Itmax=100}	41
Table IV.8: Résultats de minimisation des fonctions F1, F2, F8 et F23 par utilisation de la méthode SMO : {pop=10 a 30, Itmax=50}	42
Table IV.9: Résultats de minimisation des fonctions F1, F2, F8 et F23 par utilisation de la méthode SMO : {pop=10 a 30, Itmax=500}	42
Table IV.10: résultat d'optimisation des trois batteries de condensateurs par l'SMA : Minimisation des pertes actives totales.....	50
Table IV.11: résultat d'optimisation des 6 batteries de condensateurs par l'SMA : Minimisation des pertes actives totales.....	52
Table IV.12: résultat d'optimisation des trois batteries de condensateurs par l'SMA : Minimisation la Déviation de tension	53
Table IV.13: résultat d'optimisation des 6 batteries de condensateurs par l'SMA : Minimisation la Déviation de tension	55
Table IV.14 : résultat d'optimisation des trois sources distribuées par l'SMA : Minimisation des Pertes actives totales	58

Liste des symboles

HT	Haut tension
BT	Base tension
MT	Moyenne tension
THT	Très Haut tension
HTB	Haut tension type B
HTA	Haut tension type A
BTB	Base tension type B
BTA	Base tension type A
TBT	Très basse tension
NFC	Normes françaises CEI Commission Électrotechnique Internationale
T	Transformateur
JB	Jeu de barres
BF	Backward-Forward
SVC	Static Var Compensator
D-STATCOM	Distribution Statique Synchrones Compensation
VSC	Convertisseurs en source de tension
TCR	Thyristor contrôle réacteur
TSC	Thyristor switcher capacité
Qc	La puissance réactive fournie par le condensateur
DG	Générateur de distribution
AG	Algorithmes génétiques
PSO	Optimisation par essaims de particules swarm
SMO	Slime Mould Optimisation
IEEE	Institut des ingénieurs électriciens et électroniciens
DVT	Déviaton de tension totale
ΔPT	Pertes actives totale
STDV	standard deviation
kVAR	Kilovoltampère Réactive
p.u	unité relative
KW	kilowatt
\$	Dollar
A	Ampère
MVA	méga voltampère
KV	Kilovolt
kWh	Kilowatt heures
PV	Panneau photovoltaïque
s	Second

Introduction générale

L'histoire de l'électricité remonte à plus de deux millénaires, débutant avec la découverte de l'électricité statique par les Grecs anciens. Le développement de cette science s'est accéléré grâce à des avancées majeures telles que l'invention de la pile voltaïque (1800), la mise en évidence de l'effet électromagnétique (Oersted, 1820), et la création du générateur électrique (1866).

Aujourd'hui, l'électricité constitue une source d'énergie essentielle, omniprésente dans les secteurs domestique, industriel, médical et des transports. Elle est principalement produite à partir de ressources conventionnelles (charbon, gaz, pétrole, nucléaire) et de plus en plus via des sources d'énergie renouvelable comme le solaire et l'éolien.

La distribution de cette énergie se fait à travers des réseaux de transmission et de distribution. Cependant, l'intégration croissante de sources distribuées pose des défis en matière de gestion et d'optimisation énergétique, notamment la réduction des pertes, l'amélioration du profil de tension, et la garantie de la fiabilité de l'alimentation.

Pour relever ces défis, les méthodes d'optimisation métaheuristiques telles que les Algorithmes Génétiques (AG), l'essaim de particule (PSO), Colonie de fourmi, et l'algorithme de Slime Mould (SMO). Ce travail vise à appliquer un algorithme récemment proposée nommée l'algorithme de Slime Mould (SMO) pour optimiser la gestion des réseaux de distribution, en intégrant à la fois des unités de compensation (batteries de condensateurs) et des sources d'énergie renouvelable de manière stratégique.

Le mémoire est structuré en quatre chapitres :

- Le premier chapitre a établi les fondements des réseaux électriques, notamment de distribution, en détaillant leur structure, leurs niveaux de tension et le rôle des postes de transformation. Une attention particulière a été portée à l'intégration des sources d'énergie distribuées, soulignant leurs avantages et les défis techniques associés. Ces bases sont essentielles pour la suite de l'étude.
- Le deuxième chapitre traite des techniques d'amélioration des performances, incluant les régulateurs de tension, les compensateurs shunt (à base de condensateurs), en particulier la méthode itérative de calcul de l'écoulement de puissance comme Newton-Raphson et Backward-Forward.
- Le troisième chapitre explique le fonctionnement des méthodes d'optimisation métaheuristiques, notamment l'algorithme de Slime Mould.
- Le quatrième chapitre qui représente la partie pratique de ce mémoire, a été consacré à valider l'efficacité de l'algorithme de Slime Mould (SMO) pour résoudre le problème d'emplacement

de batteries de compensation et l'intégration des sources renouvelables dans les réseaux de distribution. La validation de l'efficacité de la méthode proposée est effectuée sur le réseau de distribution IEEE 69 jeux de barres. L'algorithme a été adaptés en vue de l'optimisation de deux fonctions objectives, à savoir la minimisation de la valeur des pertes actives totales et la minimisation de la déviation de tension.

Chapitre I : Structure des réseaux de distribution moderne

I.1 Introduction

Les réseaux électriques constituent des infrastructures complexes assurant le transport de l'énergie depuis les sites de production jusqu'aux utilisateurs finaux. Ils intègrent divers composants, notamment les lignes de transport, les transformateurs, les postes de distribution et les dispositifs de protection. Une analyse approfondie de ces réseaux s'avère indispensable pour assurer leur performance, leur fiabilité et leur sécurité.

Ce premier chapitre est consacré à l'étude des réseaux électriques. Nous y décrirons dans un premier temps la structure des réseaux conventionnels, en mettant l'accent sur les réseaux de distribution classiques. Par la suite, nous allons décrire Avantages et Inconvénients de l'Intégration des Sources d'Énergie Distribuées dans les Réseaux de Distribution moderne.

I.2 La définition de réseau électrique

Un réseau électrique désigne l'ensemble des infrastructures (lignes, transformateurs, postes) assurant l'acheminement de l'électricité depuis la production jusqu'aux consommateurs finaux. Il comprend trois niveaux essentiels : le transport en THT, la répartition en HT/MT et la distribution en MT/BT. L'évolution vers des réseaux intelligents (smart grids) permet d'optimiser la gestion de l'énergie et d'intégrer efficacement les énergies renouvelables [1].

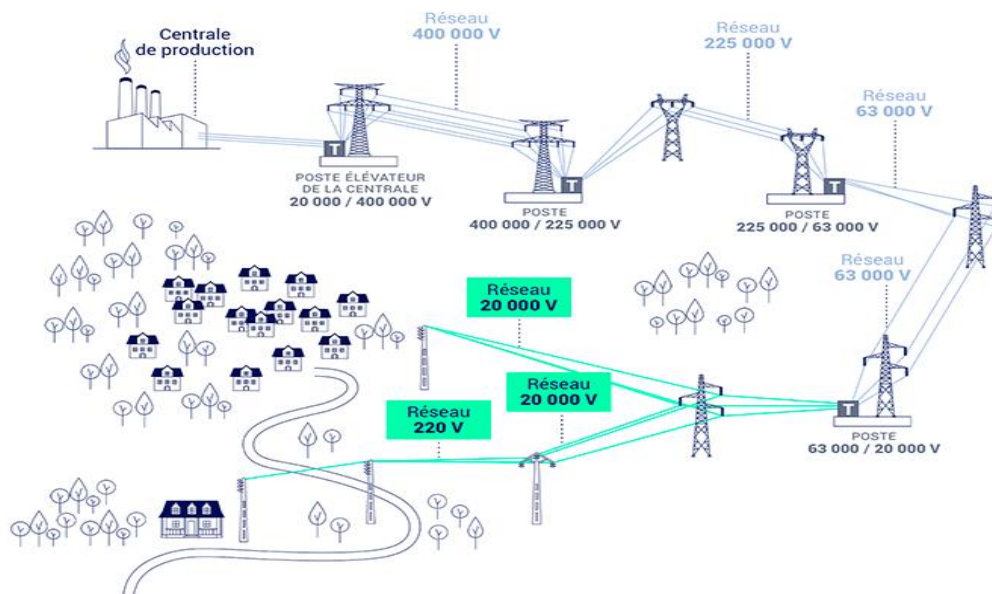


Figure I.1 : Structure des réseaux électriques

I.4 Types des réseaux électriques

Les réseaux électriques sont organisés en plusieurs niveaux, chacun ayant un rôle spécifique dans le transport et la distribution de l'énergie [4] :

- **Réseau de transport** : Il assure l'acheminement de l'énergie électrique depuis les sites de production jusqu'aux grands centres de consommation, sur de longues distances et à très haute tension.
- **Réseau d'interconnexion** : C'est une forme particulière du réseau de transport, permettant l'échange d'énergie entre différentes régions ou pays, garantissant ainsi la stabilité et la fiabilité du système électrique.
- **Réseau de répartition** : Il constitue un maillon intermédiaire, chargé de livrer l'énergie à des consommateurs industriels de grande puissance, en transformant la tension à un niveau adapté.
- **Réseau de distribution** : Ce réseau final alimente directement les utilisateurs (particuliers, entreprises, etc.). En Algérie, par exemple, la société Sonelgaz distribue l'électricité à travers des niveaux de tension standardisés : 30 kV, 10 kV et 0,4 kV.

I.3 Les normes des réseaux électriques

Les niveaux de tension dans les réseaux électriques sont définis par différentes normes nationales et internationales. Ces classifications permettent de standardiser les installations et d'assurer la sécurité et la compatibilité des équipements. Deux normes principales sont présentées ci-dessous : la norme française NF C 15-100 et la norme internationale CEI-38 [3].

Niveau de tension	Tension	Valeurs usuelles
Base tension	$100 \leq U \leq 1000 \text{ V}$	400 V – 690 V – 1000 V
Moyenne tension	$1 \leq U \leq 35 \text{ kV}$	3.3 kV – 6.6 kV – 11 kV – 22 kV – 33 kV
Haut tension	$35 \text{ kV} \leq U \leq 230 \text{ kV}$	45 kV – 66 kV – 110 kV – 132 kV – 220 kV

Table I.1: Classification selon la norme CEI-38 (Commission Électrotechnique Internationale)

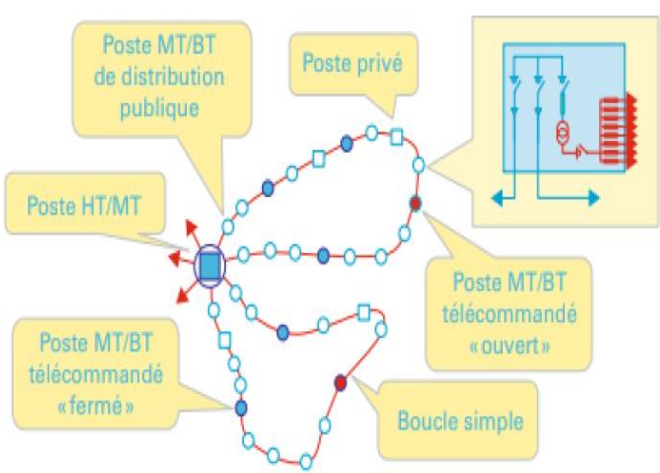
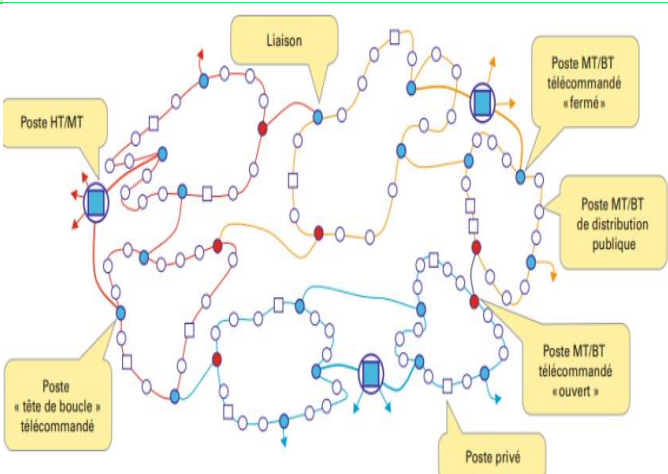
Niveau de tension		Tension alternative
	HTB	$U \geq 50000 \text{ V}$

Haut tension	HTA	$1000 \leq U \leq 50000 \text{ V}$
Base tension	BTB	$500 \leq U \leq 1000 \text{ V}$
	BTA	$50 \leq U \leq 500 \text{ V}$
Très Basse tension	TBT	$U \leq 50 \text{ V}$

Table I.2: Classification selon la norme NF C 15-100 (norme française)

I.5 Les topologies de réseau de distribution :

Le système de distribution, qu'il soit connecté par des lignes aériennes ou des câbles souterrains, présente différentes topologies de réseau. Les configurations de réseau décrivent la manière dont les charges sont reliées à la source d'énergie. Les trois configurations générales utilisées dans les réseaux de distribution ainsi que leurs avantages et inconvénients sont présentés dans le tableau ci-dessous [5] [6] :

	Configuration du réseau	Description
Réseau radial		Avantages : - Configuration simple car la source est alimentée à une extrémité - Coordination facile de la protection et surveillance du réseau - Coût d'investissement faible Inconvénients : - Fluctuation de tension pour les consommateurs situés en bout de ligne - Coupures en cas de défaut sur le départ ou le distributeur
Réseau bouclée		Avantages : - L'énergie est fournie des deux extrémités - Moins de chute de tension et plus de fiabilité - Connexion de plus d'utilisateurs finaux Inconvénients : - Coût d'investissement élevé - Coordination de protection complexe - Localisation des défauts plus difficile

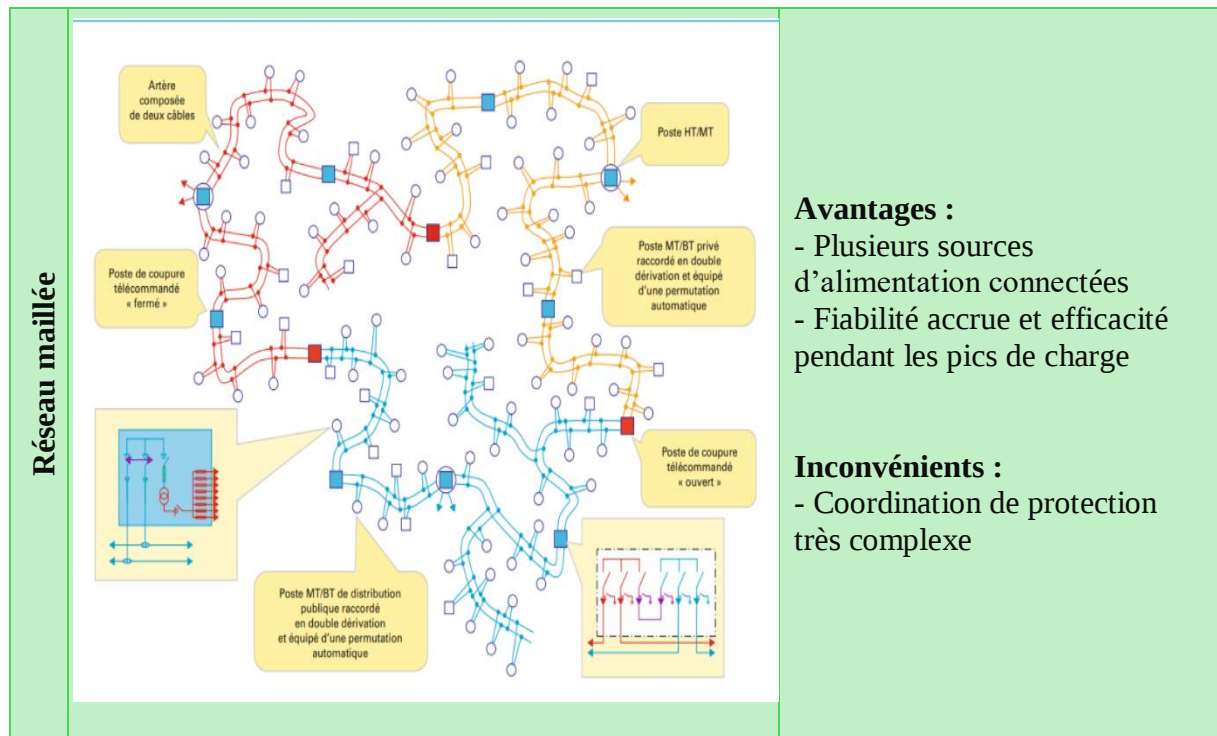


Table I.3: Les types des topologies dans le réseau de distribution avec leurs Avantages et Inconvénients.

I.6 Les postes des réseaux de distribution

1. Les poste (HTB / HTA)

Ces postes reçoivent l'électricité en très haute tension HTB et la transforment en haute/moyenne tension HTA pour l'adresser au réseau de distribution [7].

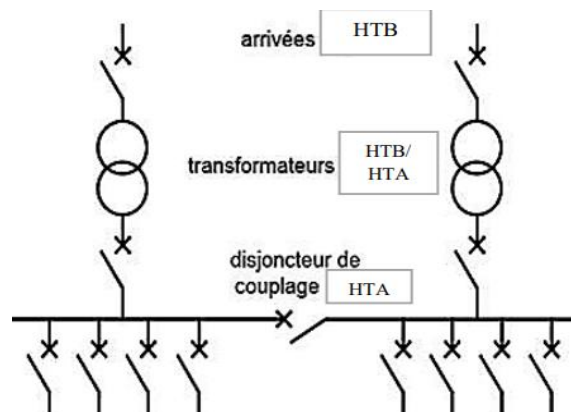


Figure I.2 : schéma simplifier d'un poste de transformation HTB/HTA [7].

I.6.1 Les postes (HTA / HTA)

Ils relient plusieurs réseaux HTA ou différentes zones géographiques, assurant des boucles de secours et l'équilibrage des flux énergétiques en distribution [7].

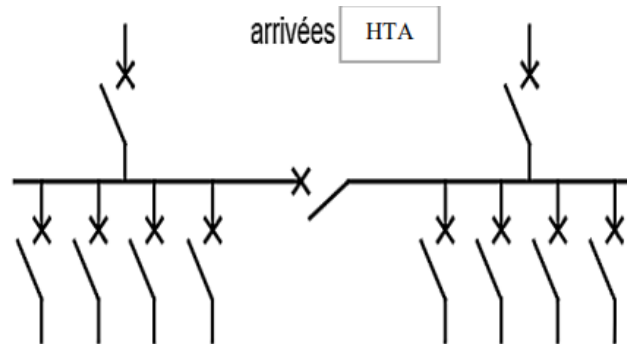


Figure II.3 : schéma simplifié d'un poste HTA/HTA [7].

I.7 Intégration des sources distribuées

Les sources distribuées, dans le contexte des réseaux électriques, désignent des unités de production d'électricité de petite ou moyenne taille, connectées directement au réseau de distribution, contrairement aux grandes centrales de production centralisées. Elles jouent un rôle croissant dans la transition énergétique et la modernisation des réseaux électriques [20][22].

Caractéristiques des sources distribuées :

- **Petite taille :** Leur puissance de production est généralement inférieure à celle des grandes centrales.
- **Connexion au réseau de distribution :** Elles sont connectées directement au réseau de distribution, à moyenne ou basse tension.
- **Production intermittente :** La production de certaines sources renouvelables, comme le solaire et l'éolien, varie en fonction des conditions météorologiques.
- **Décentralisation :** Elles sont réparties sur l'ensemble du territoire, rapprochant la production de la consommation.

Types de sources distribuées :

➤ Énergies renouvelables :

- ✓ **Panneaux solaires photovoltaïques (PV) :** Ils convertissent directement la lumière du soleil en électricité [21][23].
- ✓ **Éoliennes :** Elles utilisent la force du vent pour produire de l'électricité.

- ✓ **Petites centrales hydrauliques** : Elles exploitent l'énergie de l'eau des rivières et des cours d'eau.
- ✓ **Bioénergie** : Elle utilise la biomasse (déchets organiques, bois, etc.) pour produire de l'électricité.
- **Unités de cogénération** : Elles produisent simultanément de l'électricité et de la chaleur, améliorant ainsi l'efficacité énergétique.
- **Groupes électrogènes** : Ils sont utilisés comme sources de secours ou pour la production d'électricité dans les zones isolées.
- **Stockage d'énergie** :
 - ✓ Batteries : Elles stockent l'électricité pour une utilisation ultérieure.
 - ✓ Volants d'inertie : Ils stockent l'énergie cinétique.

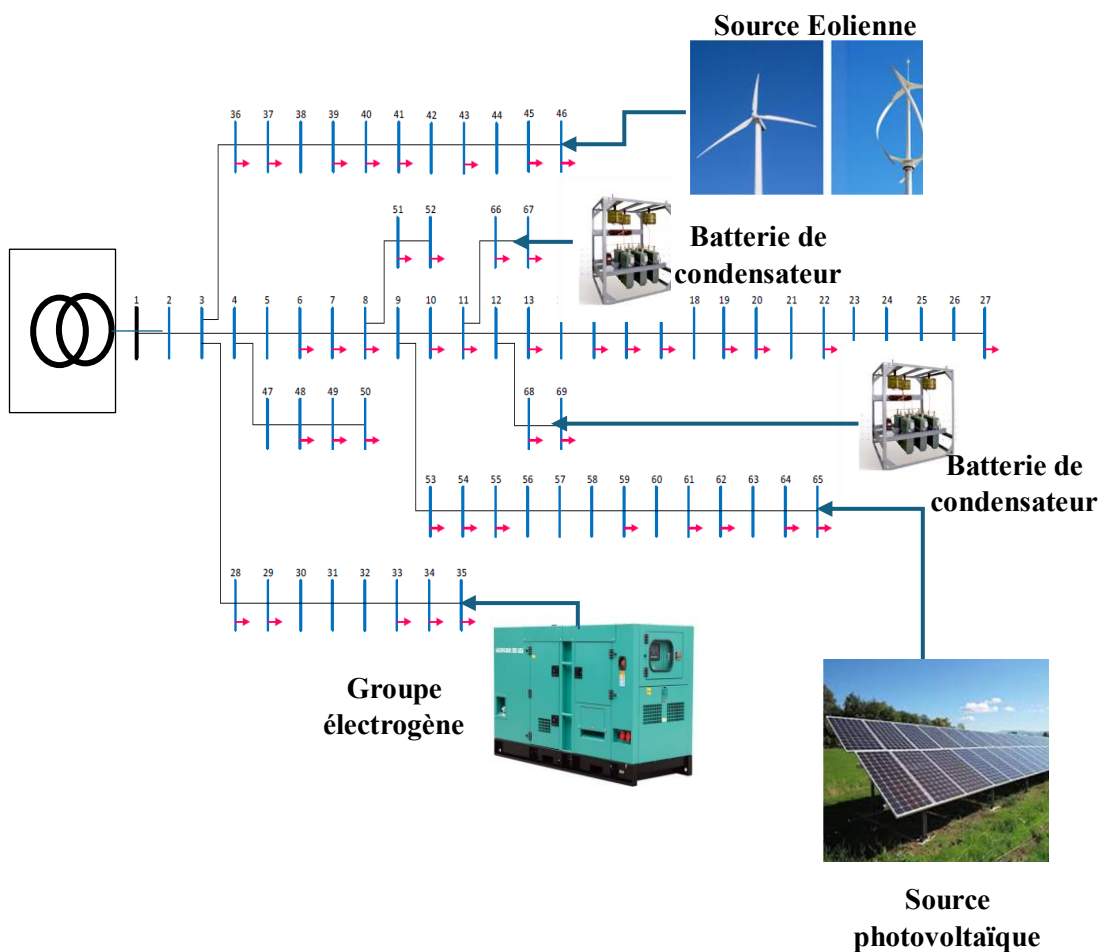


Figure III.4 : Structure d'un réseau moderne : intégration des sources distribuées et le système de compensation

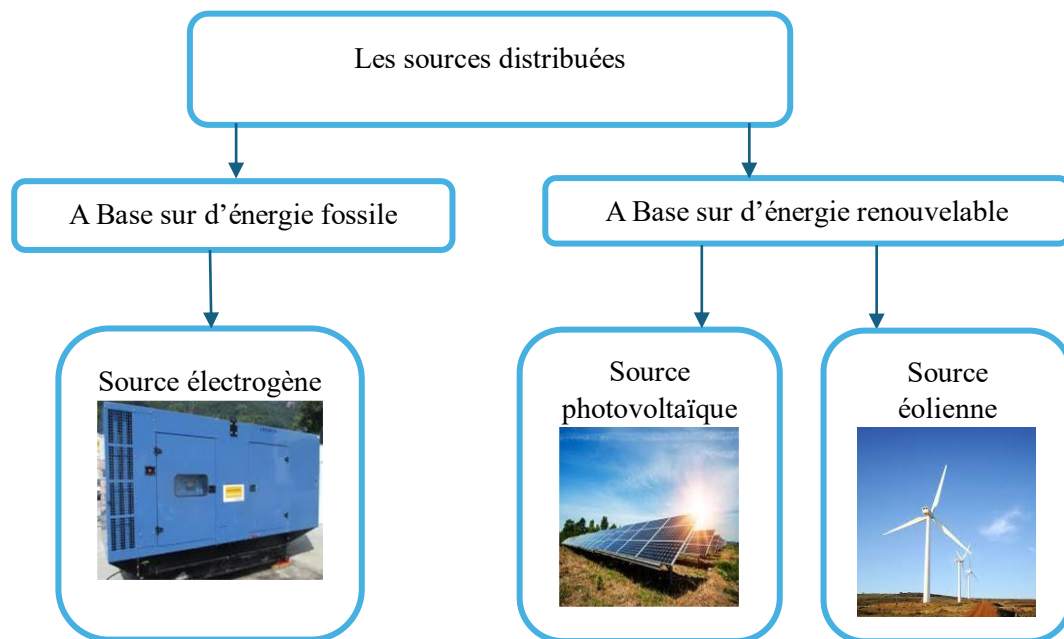


Figure I.5 : classification des sources distribuées intégrer dans le réseau de distribution.

Avantages et Inconvénients de l'Intégration des Sources d'Énergie Distribuées dans les Réseaux de Distribution

L'intégration des sources d'énergie distribuées dans les réseaux électriques modernes permet de répondre efficacement à la demande énergétique tout en garantissant une alimentation stable et de qualité. Le déploiement optimal des énergies renouvelables au sein du réseau de distribution offre plusieurs avantages, mais présentent également certaines Inconvénients tous sont présentés dans le tableau ci-dessous [8] :

Avantages	Inconvénients
✓ Réduction des pertes de puissance et amélioration du profil de tension. ✓ Stabilité accrue du réseau. ✓ Réduction des coûts d'expansion des infrastructures électriques. ✓ Diminution des investissements à long terme. ✓ Réduction significative des émissions de CO₂.	✗ Coûts initiaux élevés pour l'installation des sources distribuées. ✗ Complexité de gestion du réseau avec des sources multiples. ✗ Nécessité d'adaptation des protections et du contrôle du réseau. ✗ Intermittence de certaines sources (solaire, éolien) pouvant affecter la stabilité.

	X Besoin de systèmes de stockage ou de secours pour garantir la continuité.
--	---

Table I.4: les Avantages et inconvénients de L'intégration des sources d'énergie distribuées dans les réseaux électriques.

I.8 Conclusion

Ce premier chapitre a permis de poser les bases essentielles sur la structure et le fonctionnement des réseaux électriques, en particulier les réseaux de distribution. Nous avons présenté les différents niveaux de tension, les types de topologies utilisées ainsi que les postes de transformation assurant le transit de l'énergie depuis la production jusqu'au consommateur final. Une attention particulière a été accordée à l'intégration des sources d'énergie distribuées, en soulignant leurs caractéristiques, leurs avantages en termes de performance énergétique et de durabilité, ainsi que les défis techniques qu'elles posent. Ces éléments constituent un socle fondamental pour aborder, dans les chapitres suivants, les techniques d'analyse et d'optimisation visant à améliorer les performances des réseaux modernes face aux enjeux actuels de la transition énergétique.

Chapitre II : Méthodes d'analyse des réseaux de distribution

II.1. Introduction

L'objectif premier de l'écoulement de puissance est de calculer les tensions et les flux de puissance à chaque point du réseau. Cela permet de s'assurer que le réseau fonctionne dans des limites de sécurité et d'efficacité acceptables. Afin de réaliser ces calculs, diverses méthodologies sont à notre disposition. Dans ce contexte, nous introduirons deux techniques majeures : la première, basée sur le principe de balayage avant et arrière, et la seconde, la méthode de Newton-Raphson.

Ce chapitre se consacrera à l'explication détaillée du calcul de l'écoulement de puissance en appliquant la technique des balayages avant et arrière (Backward Forward sweeps).

II.2. Ecoulement de puissance du réseau de distribution radiale

L'identification de la topologie du réseau par la détermination des vecteurs des types des jeux de barres et des lignes est exploitée dans la solution de l'écoulement de puissance pour calculer [9] :

- La tension au niveau de chaque jeu de barre.
- Le courant transité dans chaque ligne.
- Les puissances actives et réactives injectées aux jeux de barres et celles qui transitent dans les lignes.
- Les pertes transitées dans chaque ligne.

But de l'Étude de l'Écoulement de Puissance

1. Détermination des Paramètres Électriques : Calculer les tensions aux différents nœuds (jeux de barres) et les flux de puissance dans les lignes et les transformateurs [10].

2. Vérification des Limites Opérationnelles : S'assurer que les tensions et les courants restent dans les limites admissibles pour éviter les surcharges et les dommages aux équipements [11].

3. Planification et Expansion du Réseau : Évaluer l'impact de l'ajout de nouvelles charges, générateurs ou lignes sur le réseau existant [12].

4. Optimisation des Performances du Réseau : Identifier les points faibles du réseau et proposer des solutions pour améliorer l'efficacité, comme l'ajout de compensateurs de puissance réactive [13].

II.3. Technique d'analyse des réseaux de distribution :

Les Techniques d'analyse des réseaux peuvent être regroupées en catégories sont :

- 1) Technique de Newton-Raphson.
- 2) Technique de Balayage arrière avant (Backward Forward Sweep).

II.3.1. Technique de Newton-Raphson

La méthode de Newton-Raphson est une technique itérative utilisée pour trouver les racines d'une équation non linéaire. Elle est basée sur l'approximation linéaire de la fonction à résoudre [14].

2. Avantages de la Méthode de Newton-Raphson**2.1. Rapidité de Convergence**

- La méthode converge rapidement vers la solution, en particulier lorsque l'estimation initiale est proche de la racine [15].

2.2. Précision

- Elle fournit des résultats très précis, ce qui est essentiel pour les calculs de flux de puissance dans les réseaux électriques [11].

2.3. Polyvalence

- Elle peut être appliquée à une grande variété de problèmes non linéaires, pas seulement dans le domaine électrique [16].

3. Limites de la Méthode de Newton-Raphson**3.1. Dépendance à l'Estimation Initiale**

- La convergence dépend fortement de l'estimation initiale. Une mauvaise estimation peut conduire à une divergence [14].

I.3.2. Technique de Balayage arrière avant (Backward Forward Sweep) :

La méthode de balayage avant-arrière (Backward/Forward sweep) est une technique itérative utilisée pour résoudre les équations d'écoulement de puissance dans les réseaux de distribution radiaux ou faiblement maillés. Son principe repose sur une approche de calcul séquentielle, divisée en deux étapes principales : le balayage arrière (Backward sweep) et le balayage avant (Forward sweep) [17].

II.3.2.1. Balayage arrière (Backward sweep)

- **Objectif** : Calculer les courants dans chaque branche du réseau, en partant des charges situées aux extrémités et en remontant vers la source.
- **Principe** :
 - Les courants de charge sont initialisés aux nœuds terminaux du réseau.
 - En remontant le long des branches, les courants sont calculés en additionnant les courants de charge et les courants des branches suivantes.
 - Ce processus est répété jusqu'à atteindre le nœud de référence (source).

II.3.2.2. Balayage avant (Forward sweep)

- **Objectif** : Calculer les tensions à chaque nœud du réseau, en partant de la source et en descendant vers les charges.
- **Principe** :
 - La tension du nœud de référence est supposée connue.
 - En utilisant les courants calculés lors du balayage arrière, les chutes de tension dans chaque branche sont calculées.
 - Les tensions des nœuds suivants sont déterminées en soustrayant les chutes de tension de la tension du nœud précédent.
 - Ce processus est répété jusqu'à atteindre les nœuds terminaux.

Processus itératif

- Les balayages arrière et avant sont répétés de manière itérative jusqu'à ce que la convergence soit atteinte.
- La convergence est généralement déterminée en vérifiant que les variations des tensions et des courants entre les itérations successives sont inférieures à une tolérance prédéfinie.

II.3.2.3. Flux de puissance de balayage avant-arrière :

Dans cette section une approche rétrospective est introduite. En considérant un échantillon Système de distribution. Le courant injecté au $I^{\text{ème}}$ nœud peut être Calculé comme l'équation. (II.1) :

$$J_i^{k+1} = \left(\frac{s_i}{\dot{V}_i^{(k)}} \right)^* - \dot{y}_i \dot{V}_i^{(k)} \quad (\text{II.1})$$

$-J_i^{k+1}$: Courant injecté au nœud i dans (k + 1)ème itération).

$\dot{V}_i^{(k)}$: Tension du nœud i dans la kième itération.

$-s_i$: Injection de puissance du nœud i

$-\dot{y}_i$: Admission parallèle du nœud i.

II.3.2.3.1 Balayage vers l'arrière :

Dans cette étape, la somme de tous les courants injectés dans la branche i est obtenue à partir de l'équation. (II.2).

$$I_i^{k+1} = -J_i^{k+1} + \sum_{j \in c_i} I_j^{k+1} \quad (\text{II.2})$$

Avec :

I_i^{k+1} : courant de la branche i dans (k + 1) ème itération

I_j^{k+1} : Courant de la branche j dans (k + 1) ème itération

II.3.2.3.2 Balayage vers l'avant :

Dans ce processus, selon le courant obtenu dans le processus arrière, nouvelle valeur du bus
La tension est formulée par Eq. (II.3).

$$\dot{V}_j^{k+1} = \dot{V}_i^{k+1} - I_j^{k+1} \times Z_j \quad (\text{II.3})$$

Tel que :

$\dot{V}_j^{k+1}$: Tension du bus j dans (k + 1) ème itération

$\dot{V}_i^{k+1}$: tension du bus i dans (k + 1) ème itération

Z_j : impédance de la branche j

Enfin, La perte de puissance active totale est calculée.

$$F_{pertes} = \sum_{i,j \neq i}^{ni} g_{j,i} [V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos(\theta_i - \theta_j)] \quad (\text{II.4})$$

F_{pertes} : perte de puissance réelle totale en tant que fonction objective.

ni : Conductance de la branche i à j .

$g_{j,i}$: La magnitude de la tension des bus i et j , respectivement.

θ_i : Angle de tension des bus i et j , respectivement.

V_i : Nombre total de succursales.

II.3.2.4. La méthodologie de la méthode backward /forward sweep

La figure II.6 ci-dessous illustre la structure générale de cette méthode ainsi que les étapes de son application dans le réseau de distribution électrique.

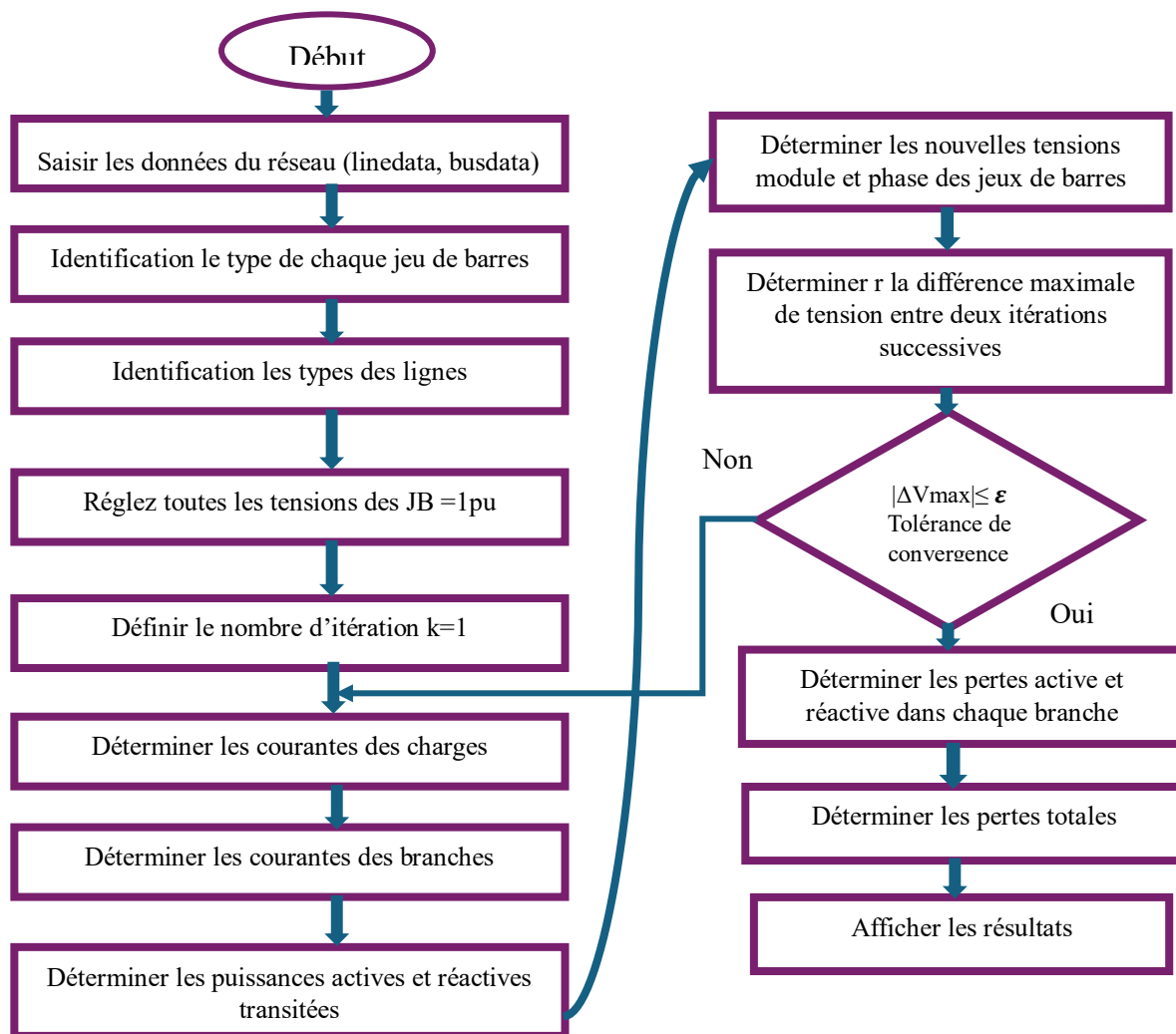


Figure II.1: Organigramme de la méthode backward /forward.

II.4. Techniques de gestions des réseaux de distribution

Cette partie est consacrée à exposer les techniques permettant d'améliorer la qualité d'énergie dans réseaux de distribution.

II.4.1 Compensation de la puissance réactive :

II.4.1.1 Qu'est-ce que la puissance réactive ?

La compensation de la puissance réactive est une technique essentielle dans les réseaux électriques, visant à améliorer l'efficacité et la stabilité du transport et de la distribution de l'électricité. Voici un aperçu des aspects clés de cette pratique :

- La puissance réactive est une composante de la puissance électrique qui ne produit pas de travail utile, mais qui est nécessaire au fonctionnement de certains équipements électriques, tels que les moteurs et les transformateurs.
- Elle est mesurée en volts-ampères réactifs (VAR).
- Un excès de puissance réactive peut entraîner des pertes d'énergie, des chutes de tension et une réduction de la capacité de transport des lignes électriques [18].

II.4.1.2 Objectifs de la compensation de la puissance réactive :

- **Amélioration du facteur de puissance :** Le facteur de puissance est le rapport entre la puissance active (utile) et la puissance apparente (totale). Une compensation efficace permet de rapprocher le facteur de puissance de 1.
- **Réduction des pertes d'énergie :** En minimisant la circulation de la puissance réactive, on réduit les pertes par effet Joule dans les lignes et les transformateurs.
- **Stabilisation de la tension :** La compensation permet de maintenir la tension dans des limites acceptables, ce qui est crucial pour le bon fonctionnement des équipements.
- **Augmentation de la capacité de transport :** En réduisant la charge réactive sur les

II.4.1.3 Types de compensation de la puissance réactive

a. Compensation par batterie de condensateurs

Les condensateurs sont les dispositifs les plus couramment utilisés pour compenser la puissance réactive, voir la figure II.7. Ils fournissent de la puissance réactive capacitive, ce qui compense la puissance réactive inductive des charges.

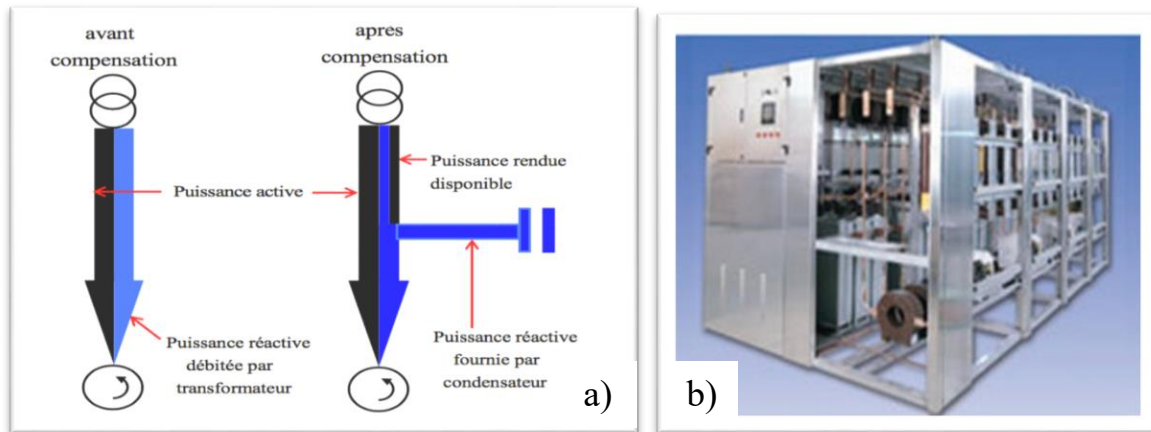


Figure II.2: a) schéma unifilaire de compensation par condensateurs, b) batterie de Condensateurs haute tension 0.6 - 5 MVar : max.36 kV.

b. Compensation par bobines d'inductance (réacteurs)

Les réacteurs sont utilisés pour compenser les effets capacitifs dans les réseaux à haute tension, notamment dans les câbles souterrains ou les lignes longues.



Figure II.3: une bobine monophasée sur noyau de fer de 16,7 Hz et 15 kV 700 kVar

c. Compensation synchrone (machines synchrones)

les machines synchrones (générateurs ou moteurs) peuvent être utilisées pour fournir ou absorber de la puissance réactive en ajustant leur excitation, voir la figure II.8.

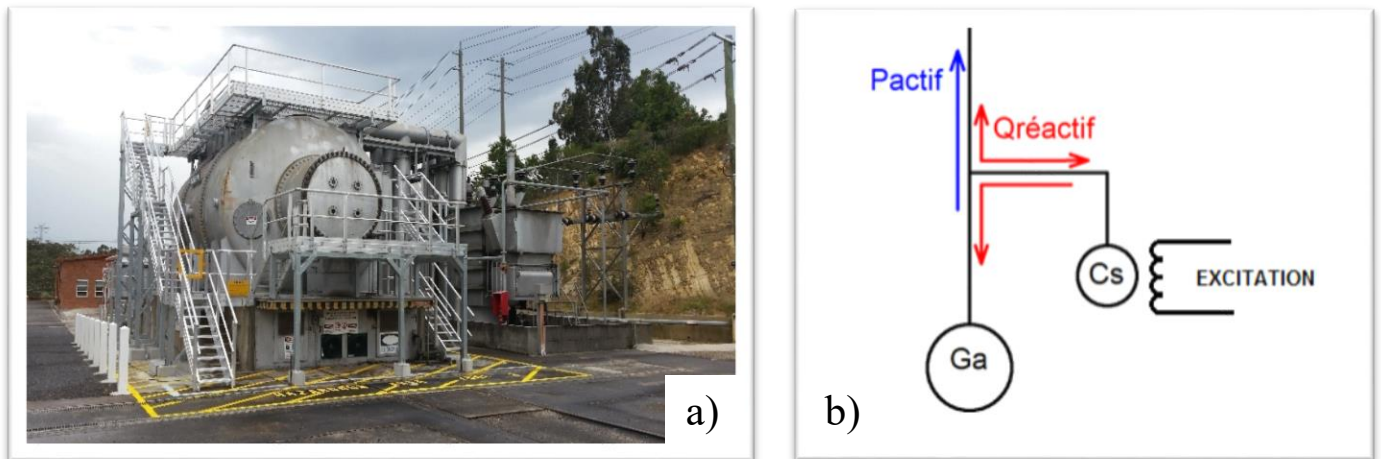


Figure II.4: a) compensateur synchrone de puissance réactive refroidi à l'hydrogène de 125 MVar à 750 tr/min, 22 kV et 3,28 kA, b) génératrice avec compensateur synchrone.

d. Compensation par dispositifs FACTS (Flexible AC Transmission Systems)

Les dispositifs FACTS, comme les STATCOM (Static Synchronous Compensator) ou les SVC (Static Var Compensator), sont des systèmes électroniques de puissance utilisés pour réguler la tension, voir la figure II.9.

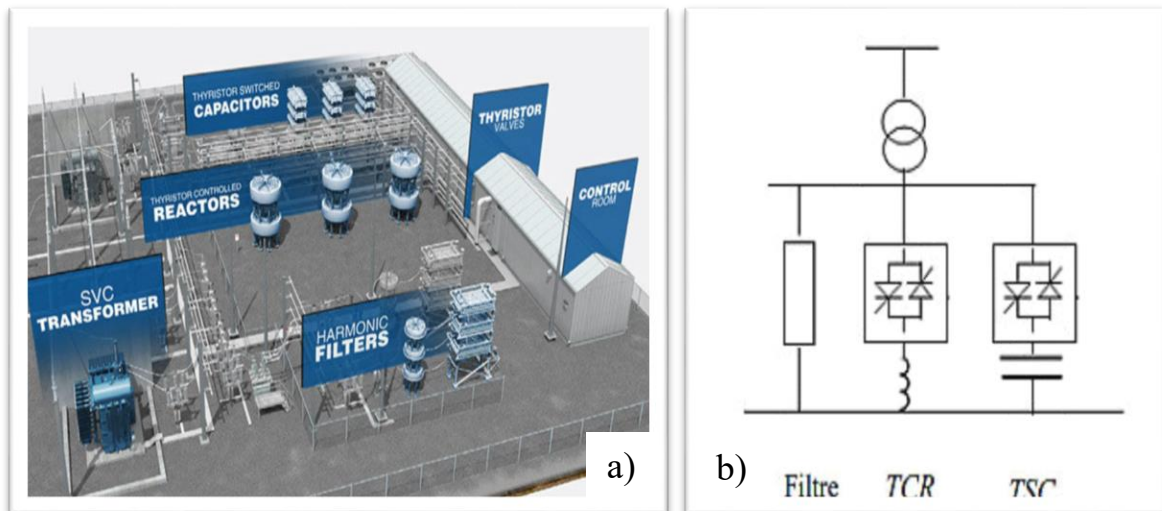


Figure II.5 : a) les systèmes FACTS, b) schéma équivalent sur système SVC.

II.4.1.4 Principe de Compensation shunt

La compensation shunt est une technique qui consiste à injecter ou absorber la puissance réactive à un jeu de barres spécifique afin de régler la tension au voisinage de la valeur admissible. On distingue deux types de la compensation shunt : les batteries de condensateur sont destinées pour réduire les chutes de tension, alors que les batteries d'inductances sont dessinées pour réduire les surtensions. La figure II.10 montre le principe de la compensation shunt à base des batteries de condensateurs.

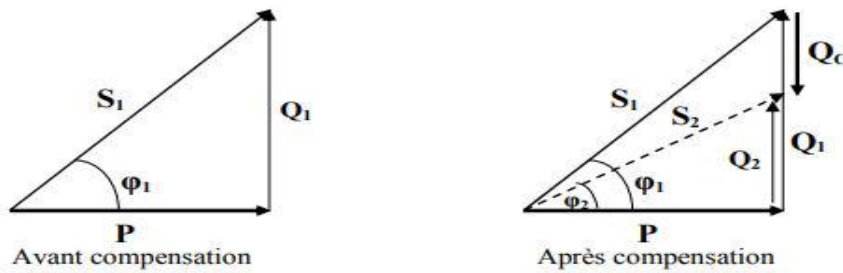


Figure II.6 : Schéma de principe de la compensation shunt (batterie de condensateur)

P : La puissance active.

S₁ : La puissance apparente après la compensation.

Q₁ : La puissance réactive avant la compensation.

Cosφ₁ : Le facteur de puissance avant la compensation.

S₂ : La puissance apparente après compensation.

Q₂ : La puissance réactive après compensation.

Cosφ₂ : Le facteur de puissance après compensation.

Q_C : La puissance réactive fournie par le condensateur

Réglage de la tension : on se basant sur le schéma de la figure, on à :

- Avant compensation :

$$\Delta U_{12} = \frac{P_{12} \times R_{12} + Q_{12} \times X_{12}}{U_1} \quad (\text{II.5})$$

- Après compensation :

$$\Delta U_{12}^C = \frac{P_{12} \times R_{12} + Q_{12}^C \times X_{12}}{U_1} = \frac{P_{12} \times R_{12} + (Q_{12} - Q_{sh}) \times X_{12}}{U_1} \quad (\text{II.6})$$

$$\Delta U_{12}^C = \frac{P_{12} \times R_{12} + Q_{12} \times X_{12}}{U_1} - \frac{Q_{sh} \times X_{12}}{U_1} = \Delta U_{12} - \Delta U_c \quad (\text{II.7})$$

Avec :

$$\Delta U_c = \frac{Q_{sh} \times X_{12}}{U_1} \quad (\text{II.8})$$

Avec,

Q_{12} , P_{12} = Puissance active et réactive transitée dans la ligne (1-2).

R_{12} , X_{12} : Résistance et réactance de la ligne (1-2).

U_1 : Tension de la source.

Q_{sh} : Puissance réactive injectée par la batterie de condensateur.

ΔU_{12} : Chute de tension avant la compensation

ΔU_{12}^C : Chute de tension après la compensation

ΔU_c : Tension à contrôler

Q_{12}^C : Puissance réactive après la compensation.

II.4.2 Régulateurs de tension

Un régulateur de tension est un dispositif largement utilisé pour le réglage de la tension dans les réseaux électriques. Les régulateurs de tension (VR) incorporé avec le transformateur maintiennent les tensions d'une alimentation dans une plage compatible aux normes techniques, en générale cette marge est de -5% à 5% de la tension nominale. La figure II.11 montre l'installation d'un régulateur de tension avec le transformateur de distribution.



Figure II.7 : Installation d'un régulateur de tension avec le transformateur de distribution.

II.4.3 Technique de Reconfiguration des Réseaux Électriques

La reconfiguration des réseaux électriques est une technique d'optimisation cruciale pour améliorer l'efficacité, la fiabilité et la sécurité des systèmes de distribution d'électricité. Elle consiste à modifier la topologie du réseau en ouvrant et en fermant des interrupteurs ou des sectionneurs, afin de redistribuer les charges et de minimiser les pertes.

II.4.3.2 Objectifs de la reconfiguration :

- **Réduction des pertes de puissance :** En optimisant la configuration du réseau, on peut minimiser les pertes d'énergie dues à la résistance des lignes.
- **Amélioration du profil de tension :** La reconfiguration permet de maintenir la tension dans des limites acceptables, assurant ainsi une alimentation de qualité pour les consommateurs.
- **Équilibrage des charges :** Elle permet de répartir les charges de manière plus uniforme entre les différents circuits, évitant ainsi les surcharges et les déséquilibres.
- **Amélioration de la fiabilité :** En cas de défaut ou de panne, la reconfiguration peut permettre d'isoler rapidement la zone touchée et de rétablir l'alimentation pour les autres consommateurs.
- **Adaptation aux énergies renouvelables :** L'intégration croissante des énergies renouvelables, qui sont souvent intermittentes, nécessite une reconfiguration flexible des réseaux pour maintenir la stabilité et l'efficacité.

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé en détail les principales méthodes d'analyse des réseaux de distribution, en mettant l'accent sur le calcul de l'écoulement de puissance à l'aide des techniques de balayage arrière/avant et de la méthode de Newton-Raphson. Ces approches permettent de déterminer avec précision les tensions, courants transités dans les lignes et pertes dans les réseaux. Nous avons également exploré les techniques de gestion des réseaux telles que la compensation de la puissance réactive, le réglage de la tension et la reconfiguration du réseau, qui visent à améliorer la qualité de l'énergie, la stabilité et les performances globales du système de distribution. Ces outils constituent une base essentielle pour les travaux d'optimisation à venir. Dans le chapitre suivant, nous nous intéresserons à l'application d'algorithmes métaheuristiques pour l'optimisation des performances des réseaux de distribution.

Chapitre III : Méthodes d'optimisation métaheuristiques

III.1 Introduction

Les algorithmes métaheuristiques (MA) sont devenus prédominants dans de nombreuses disciplines appliquées au cours des dernières décennies en raison de leurs performances supérieures et de la capacité et du temps de calcul requis inférieurs à ceux des algorithmes déterministes dans divers problèmes d'optimisation. Les MA sont généralement inspirés de phénomènes du monde réel pour trouver de meilleures solutions heuristiques aux problèmes d'optimisation en simulant des règles physiques ou des phénomènes biologiques. Récemment, un nouvel optimiseur stochastique, appelé algorithme de la moisissure gluante (SMA), a été proposé sur la base du mode d'oscillation de la moisissure gluante dans la nature [24]. Cette nouvelle technique a été appliquée pour résoudre divers problèmes d'optimisation, en particulier l'amélioration de la gestion de l'énergie des systèmes électriques pratiques [25].

III.2 Définition de l'Optimisation

L'optimisation est un domaine des mathématiques et de l'informatique qui vise à trouver la meilleure solution possible à un problème donné en respectant certaines contraintes [27]. Elle consiste à maximiser ou minimiser une fonction objective, représentant une mesure de performance, en explorant un ensemble de solutions possibles [28]. L'optimisation peut être linéaire ou non linéaire, statique ou dynamique, et peut concerner des variables continues ou discrètes, selon la nature du problème étudié [29].

III.3 Définition des méthodes métaheuristiques

Une méthode métaheuristique est une approche algorithmique de haut niveau conçue pour résoudre des problèmes d'optimisation complexes en guidant des heuristiques plus simples [26]. Contrairement aux méthodes exactes, les métaheuristiques ne garantissent pas l'optimalité, mais fournissent des solutions approchées en un temps acceptable pour des problèmes non linéaires complexes [27]. Parmi les algorithmes métaheuristiques les plus connus, on retrouve l'Algorithme génétique, l'optimisation par essaims particulaires (PSO) et l'Algorithme de la moisissure gluante ou SMA.

III.4 Classification des méthodes métaheuristiques

Les métaheuristiques sont classées en cinq catégories, voir la figure (III.1) :

- ✓ **Méthodes évolutives** : Algorithme génétique, évolution différentielle
- ✓ **Méthodes inspirées du comportement sociale** : essaim de particule, colonie de fourmi
- ✓ **Méthodes inspirées de la physique** :

- ✓ **Méthodes issues du comportement humain:** Seeker search algorithm, Teaching-Learning-Based Optimization (TLBO)
- ✓ **Méthodes hybrides :** hybridation entre les méthodes métaheuristiques ou entre les méthodes métaheuristiques et mathématiques

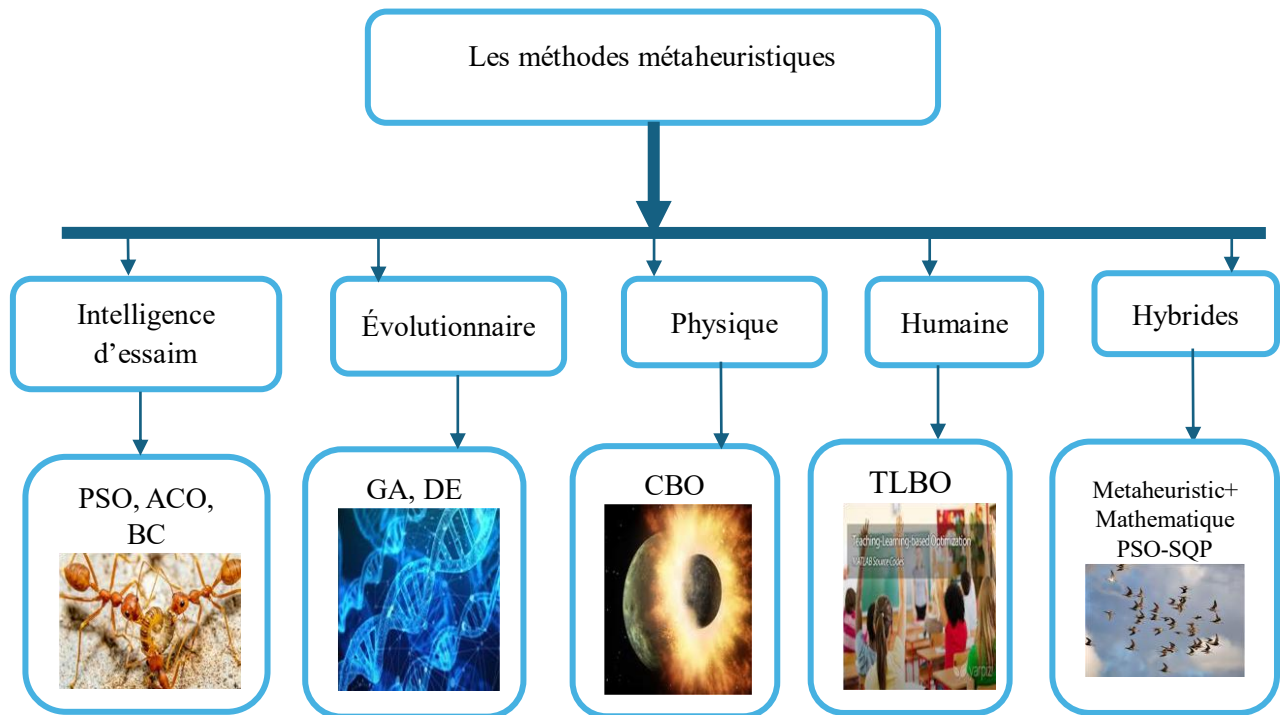


Figure III.1 : classification des méthodes métaheuristiques

III.4.1 Algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques sont des techniques d'optimisation inspirées de la théorie de l'évolution de Charles Darwin, notamment des concepts de sélection naturelle et de génétique. Ils appartiennent à la famille des algorithmes évolutionnistes et sont utilisés pour trouver des solutions approximatives à des problèmes complexes d'optimisation [26]. La figure (III.2) montre les quatre niveaux d'organisation des paramètres d'un AG:

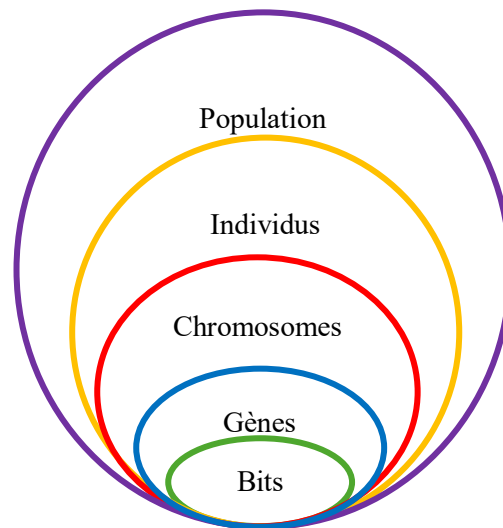


Figure III.2: Les quatre niveaux d'organisation des paramètres d'un AG

III.4.1.1 Mécanisme de recherche des Algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques fonctionnent en générant une population initiale de solutions potentielles. Chaque individu est évalué par une fonction objective (fitness), puis les meilleurs sont sélectionnés pour se reproduire. Le croisement et la mutation introduisent de la diversité, et les nouvelles générations remplacent les anciennes jusqu'à atteindre un critère d'arrêt, voir la figure (III.3) [30].

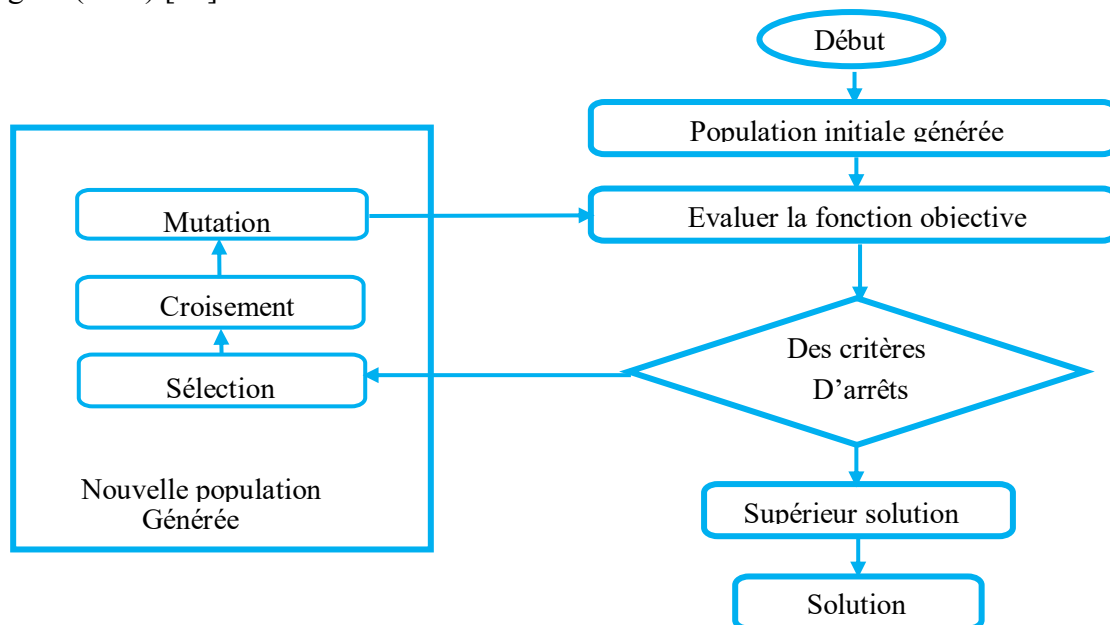


Figure III.3: Le mécanisme de recherche de l'algorithme génétique.

III.4.3 Définition de l'Algorithme de la Moisissure Visqueuse (SMA)

L'algorithme de la moisissure visqueuse (Slime Mould Algorithm – SMA) est un algorithme d'optimisation métaheuristique stochastique proposé en 2020 par Seyedali Mirjalili et ses collègues. Il s'inspire du comportement biologique remarquable de la moisissure visqueuse voir la figure (III.4), un organisme unicellulaire appelé (*Physarum polycephalum*).

SMA vise à modéliser ce comportement naturel pour trouver des solutions optimales à des problèmes d'optimisation complexes, où la solution exacte est difficile (voire impossible) à obtenir analytiquement. Il équilibre efficacement :

- **L'exploration** : recherche de nouvelles régions prometteuses.
- **L'exploitation** : affinement des solutions existantes.

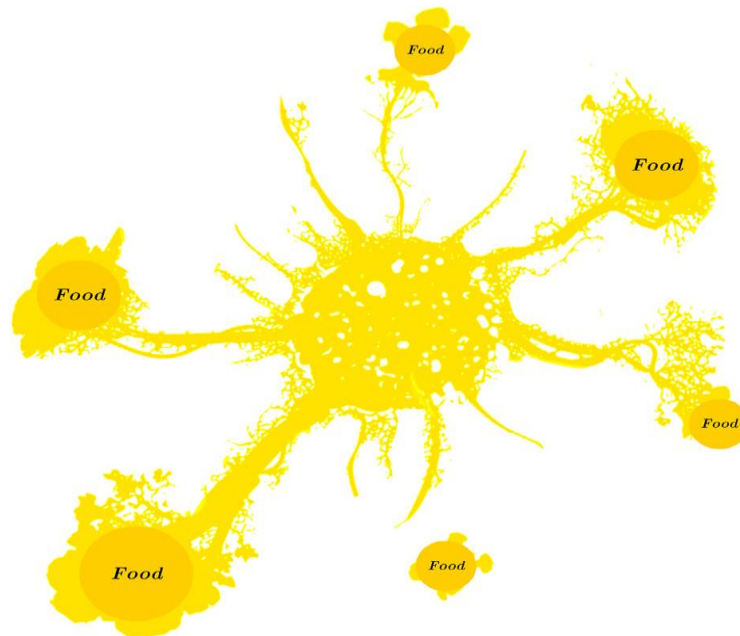


Figure III.4: Morphologie de recherche de nourriture de la moisissure gluante [24].

III.4.3.1 Modèle mathématique

Dans cette partie, le modèle mathématique et la méthode proposés seront décrits en détail.

III.4.3.1.1 Approche de la nourriture

La moisissure gluante peut s'approcher de la nourriture en fonction de l'odeur présente dans l'air. Afin d'exprimer son comportement d'approche sous forme de formules mathématiques, les formules suivantes sont proposées pour imiter le mode de contraction [25] :

$$\overrightarrow{X(t+1)} = \begin{cases} \overrightarrow{X_b(t)} + \overrightarrow{vb} \cdot (\overrightarrow{W} \cdot \overrightarrow{X_A(t)} - \overrightarrow{X_B(t)}), r < p \\ \overrightarrow{vc} \cdot \overrightarrow{X(t)}, r \geq p \end{cases} \quad (\text{III. 1})$$

Avec :

$\overrightarrow{vb}$: Un paramètre qui simule la force de contraction des veines de la moisissure. Sa valeur oscille généralement dans un intervalle $[-a, a]$.

$\overrightarrow{vc}$: Un facteur aléatoire ou un coefficient d'exploration. Il permet à la moisissure de faire des mouvements plus aléatoires et découvrir une plus grande partie de l'espace de recherche.

t : représente l'itération actuelle.

$\overrightarrow{X_b(t)}$: C'est la position de la meilleure source de nourriture trouvée jusqu'à présent par l'ensemble de la colonie.

$\overrightarrow{X(t+1)}$: Représente la nouvelle position d'un individu de la colonie de moisissures au prochain pas de temps (itération $t+1$).

$\overrightarrow{X(t)}$: Représente la position actuelle de cet individu de moisissure à l'itération t .

$\overrightarrow{X_A(t)}$ et $\overrightarrow{X_B(t)}$: Ce sont les positions de deux individus de la moisissure sélectionnés aléatoirement dans la population actuelle.

$\overrightarrow{w}$: représente le poids de la moisissure gluante.

$(\overrightarrow{W} \cdot \overrightarrow{X_A(t)} - \overrightarrow{X_B(t)})$ = Représente la direction et l'amplitude du mouvement influencées par l'odeur de la nourriture (via $\overrightarrow{w}$) et les positions d'autres moisissures ($\overrightarrow{X_A(t)}$ et $\overrightarrow{X_B(t)}$).

r : Un nombre aléatoire généré à chaque itération pour chaque moisissure, typiquement entre 0 et 1.

P : Un paramètre seuil (souvent noté z dans les publications sur SMA, par exemple $z=0.03$).

- La formule de P est présente par :

$$P = \tanh|S(i) - DF| \quad ()$$

Avec :

$S(i)$: Représente la valeur de fitness de $\vec{X}$ et $i \in 1, 2, \dots, n$.

DF : représente le meilleur fitness obtenu lors de toutes les itérations.

- La formule de $\overrightarrow{vb}$ est présente par :

$$\overrightarrow{vb} = [-a, a] \quad (\text{III. 2})$$

Avec :

a : C'est un paramètre très important qui contrôle l'exploration et l'exploitation au sein de l'algorithme.

- La formule de a est présente par :

$$a = \operatorname{arctanh} \left(- \left(\frac{t}{\max_t} \right) + 1 \right) \quad (\text{III.3})$$

Avec :

$\max_t$: Représente le nombre maximum d'itérations pour lequel l'algorithme doit s'exécuter.

- La formule de $\vec{W}$ est présente par :

$$\overline{W(\text{SmellIndex}(i))} = \begin{cases} 1 + r \cdot \log \left(\frac{bF - S(i)}{bF - wF} + 1 \right), & \text{condition} \\ 1 - r \cdot \log \left(\frac{bF - S(i)}{bF - wF} + 1 \right), & \text{others} \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

$$\text{SmellIndex} = \text{sort}(S) \quad (\text{III.5})$$

bF : désigne la meilleure valeur de fitness obtenue lors du processus itératif en cours.

wF : désigne la pire valeur de fitness obtenue lors du processus itératif en cours.

SmellIndex : désigne la séquence des valeurs de fitness triées.

$\text{sort}(S)$: Cette opération signifie que les valeurs de fitness (S) de toutes les moisissures visqueuses sont triées

III.4.3.1.2 Enveloppement de la nourriture

L'algorithme de la moisissure gluante (SMA) s'inspire de la recherche de nourriture de la moisissure. Une population de solutions potentielles (particules) se déplace dans l'espace de recherche. Le mouvement est biaisé vers les meilleures solutions trouvées, avec une probabilité dépendant de leur qualité, et la figure III.5 Montre le processus d'évaluation des valeurs de fitness pour la moisissure. Les particules ajustent leur "poids" en fonction du succès local, favorisant l'exploitation des bonnes zones et l'exploration de nouvelles, permet de converger vers des solutions optimales en imitant l'efficacité de la moisissure à trouver les meilleures sources de nourriture. La formule mathématique pour la mise à jour de la position de la moisissure gluante est la suivante [25] :

$$\vec{X}^* = \begin{cases} \text{rand} \cdot (UB - LB) + LB, & \text{rand} < z \\ \vec{X}_b(t) + \vec{vb} \cdot (W \cdot \vec{X}_A(t) - \vec{X}_B(t)), & r < p \\ \vec{vc} \cdot \vec{X}(t), & r \geq p \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

Avec :

$\vec{X}^*$: Représente le nouveau vecteur de position de l'individu de la moisissure visqueuse pour la prochaine itération. C'est la position mise à jour.

rand: Un nombre aléatoire généré uniformément entre 0 et 1 (généralement $\in [0,1]$).

UB: Le vecteur des bornes supérieures de l'espace de recherche (Upper Bound).

LB: Le vecteur des bornes inférieures de l'espace de recherche (Lower Bound).

z: Un seuil ou une probabilité (par exemple 0.03 ou 0.05).

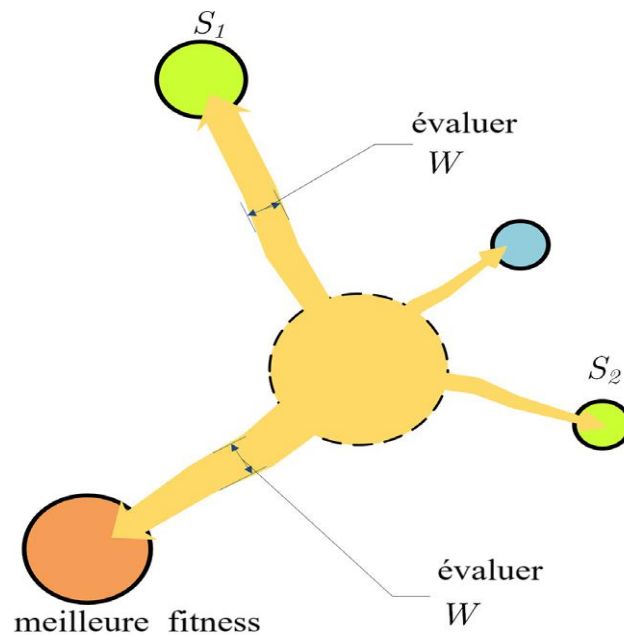


Figure III.5: Estimation de la valeur de fitness.

III.4.3.2 Mécanismes de recherche l'algorithme de SMA

Le pseudo-code de l'algorithme SMA est présenté dans l'Algorithme 1, et le processus intuitif et détaillé du SMA est illustré dans la Figure III.6, avec la logique générale du SMA est également représentée dans la Figure III. 7 [24] :

Algorithme 1 Pseudo-code de SMA

Initialiser les paramètres popsize, Max_iteration ;
 Initialiser les positions de la moisissure visqueuse X_i ($i = 1, 2, \dots, n$) ;
While ($t \leq \text{Max_iteration}$)
 Calculer le fitness de toutes les moisissures visqueuses ;
 mettre à jour la meilleure fitness, X_b
 Calculer le poids W par Eq. (III.4) ;
For portion de recherche
 mettre à jour p , v_b , v_c ;
 mettre à jour les positions par Eq. (III.6) ;
End For
 $t = t + 1$;
End While
Retourner best Fitness, X_b ;

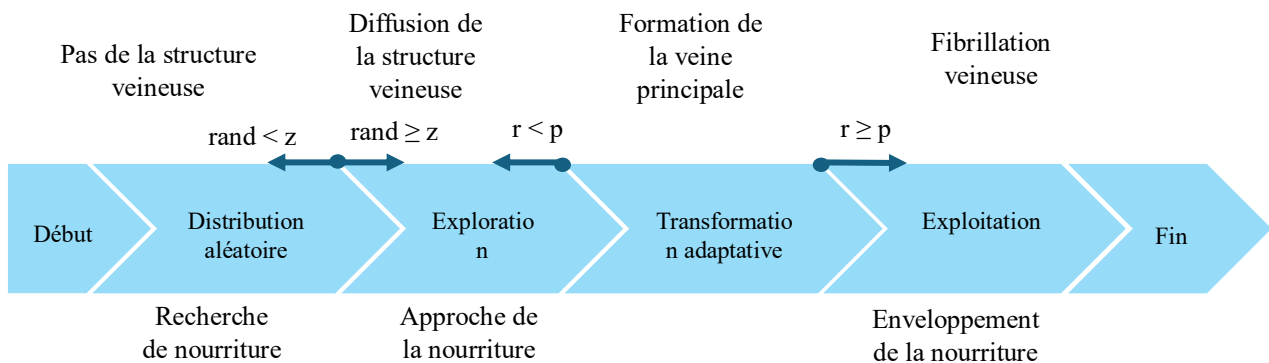
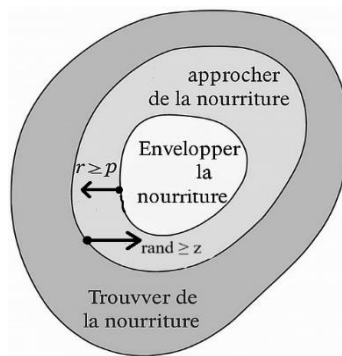


Figure III.6 : le processus intuitif et détaillé du SMA [24].

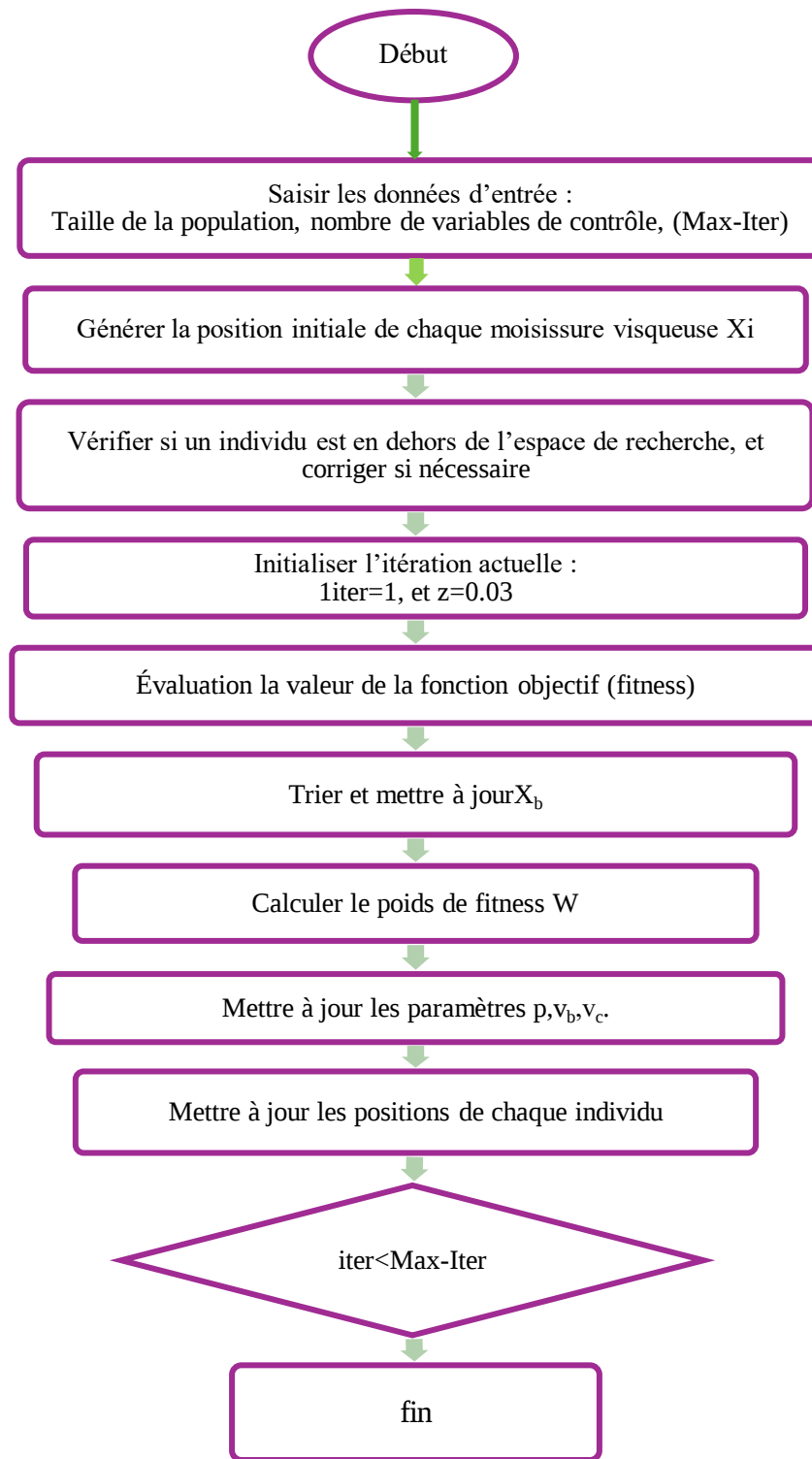


Figure III.7 : la méthodologie de l'algorithme de SMA [25].

III.5 Formulation du problème d'optimisation

La formulation d'un problème d'optimisation consiste à traduire un défi réel en un modèle mathématique. Elle définit les variables, la fonction à optimiser et les contraintes, posant ainsi les bases essentielles à la recherche de la meilleure solution.

III.5.1 Fonction objectif simple

Dans la littérature de recherche sur la gestion de l'énergie des réseaux de distribution électriques nouveaux (RDEN), plusieurs fonctions objectives sont proposées pour être optimisées individuellement et simultanément afin d'assurer un fonctionnement fiable des RDEN modernes, en tenant compte de l'intégration de divers types de sources d'énergie renouvelable basées sur la production décentralisée (DG).

❖ Minimisation des pertes totales réelles (P_{loss})

Les pertes totales réelles (P_{loss}) sont un indice important pour évaluer la performance des RDEN. L'expression mathématique de la P_{loss} est donnée comme suit :

$$J_1 = \min(P_{loss}) = \min \left(\sum_{k=1}^{nbr} P_{loss}(m, m+1) \right) \quad (III. 7)$$

Avec J_1 , est la fonction objective associée à la minimisation des pertes actives.

❖ Minimisation de la déviation totale de tension (TVD)

La déviation de la tension totale (TVD) est un indice important qui reflète la qualité de l'énergie fournie aux consommateurs. L'expression mathématique de la TVD est formulée comme suit :

$$J_2 = \min(TVD) = \min \left(\sum_{k=1}^{nb} |V_{ref} - V_k| \right) \quad (III. 8)$$

Avec J_2 , est la fonction objective associée à la minimisation de TVD.

Contraintes d'exploitation et de sécurité

 **Contraintes d'égalité** : Deux contraintes d'égalité liées à la puissance active et réactive doivent être satisfaites :

$$P_{tr,ss} + \sum_{i=1}^{ndg} P_{dgi} = \sum_{i=1}^{NI} P_{di} + \sum_{m=1}^{nbr} P_{loss,m} \quad (III. 9)$$

$$Q_{tr,ss} + \sum_{i=1}^{ndg} Q_{dgi} = \sum_{i=1}^{Nl} Q_{di} + \sum_{m=1}^{nbr} Q_{loss,m} \quad (III. 10)$$

Avec,

$P_{tr,ss}$, $Q_{tr,ss}$: sont les puissance actives et réactives fournies par la sous station.

P_{di} , Q_{di} : représentent les puissances demandées actives et réactives au jeu de barres i .

P_{dgi} , Q_{dgi} : sont les puissances actives et réactives fournies par les sources distribuées localisées aux jeux de barres i .

Nl : est le nombre de charge, nbr , représente le nombre de branches.

$P_{loss,m}$, $Q_{loss,m}$: les pertes actives et réactives dans la branche m .

❖ Contraintes d'exploitation:

 **Contrainte sur la magnitude de la tension** : Les magnitudes de tension à tous les nœuds doivent être maintenues dans leurs limites de sécurité.

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max}, i = 1, 2, \dots, nbus \quad (III. 11)$$

$V_i^{\min}$, $V_i^{\max}$, la tension minimale et maximale au jeu de barres i

 **Contraintes liées aux sources distribuées (DG)** :

La puissance active fournie par les DG doit rester dans les limites admissibles spécifiées.

$$P_{dg,i}^{\min} \leq P_{dg,i} \leq P_{dg,i}^{\max}, i = 1, 2, \dots, ndg \quad (III. 12)$$

$P_{dg,i}^{\min}$, $P_{dg,i}^{\max}$, la puissance active minimale et maximale des sources distribuées injectées au jeu de barres i .

 **Contraintes liées aux batteries de condensateurs** :

Les dispositifs de compensation shunt nommé batteries de condensateur doivent échanger la puissance réactive avec le réseau dans les limites de sécurité définies comme suit :

$$Q_{Stc,i}^{\min} \leq Q_{Stc,i} \leq Q_{Stc,i}^{\max}, i = 1, 2, \dots, nStc \quad (III. 13)$$

$Q_{dg,i}^{\min}$, $Q_{dg,i}^{\max}$, la puissance réactive minimale et maximale des sources distribuées injectées au jeu de barres i .

 **Courant dans les lignes** :

Les courants circulant dans les branches doivent être contrôlés en dessous de leur valeur limite de sécurité.

$$I_k \leq I_k^{\max}, k = 1, 2, \dots, \text{nbr} \quad (\text{III. 14})$$

I_k , courants circulant dans la branche nombre k .

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté dans la première partie une classification des méthodes métaheuristiques utilisées pour résoudre divers problèmes d'optimisation. Puis on a exposé en bref le principe de l'algorithme génétique (GA). Dans la deuxième partie on a présenté en détails l'algorithme de la moisissure visqueuse (SMA). L'algorithme SMA se distingue par sa nouveauté et sa capacité à équilibrer l'exploration et l'exploitation, avec une modélisation mathématique rigoureuse. Nous avons également abordé la formulation du problème d'optimisation dans le contexte des réseaux de distribution électrique, en définissant les fonctions objectives comme la minimisation des pertes et l'amélioration du profil de tension, ainsi que les contraintes opérationnelles. Dans le prochain chapitre, nous appliquerons l'algorithme proposé nommée SMA à l'amélioration des performances techniques d'un réseau de distribution typique IEEE 69bus.

Chapitre IV : Analyse des résultats

IV.1 Introduction :

Le chapitre en question se compose de deux parties bien coordonnées. La première focalise à l'analyse préliminaire du réseau radial 69-JB en utilisant une méthode itérative BACKWARD FORWARD pour déterminer l'état initial du réseau. La deuxième partie est consacrée à l'amélioration des performances techniques du réseau de distribution en termes de réduction des pertes totales et en réduisant la déviation totale de la tension. Cela est réalisé en appliquant deux méthodes d'optimisation métaheuristiques, à savoir l'algorithme génétique standard, et une nouvelle technique d'optimisation nommée Slime Mould. Tous les cas d'études achevés dans ce travail ont été implémentés sous l'environnement MATLAB

IV.2 Première Phase : Analyse sans optimisation :

Dans cette partie, nous avons appliqué la méthode itérative de BF sur le réseau de distribution IEEE 69 jeux de barres. Cette analyse nous a permis de déterminer les puissances actives et réactives de générateur, les pertes totales en puissance active et réactive, les courants dans chaque barrette, ainsi que le profil de tension pour chaque jeu de barres.

Le réseau de distribution IEEE 69 est composé de 69 jeux de barres et 68 branches comme indiqué dans la Figure (IV.1). La puissance apparente demandée dans le régime normal est de MVA. Les données des JB et des lignes sont données dans l'ANNEXES. Les caractéristiques du ce réseau sont données comme suit :

- $S_{base} = 100 \text{ MVA}$
- $V_{base} = 12,66 \text{ kV}$
- La puissance active totale consommée = 224.9606 kW
- La puissance réactive totale consommée = 102.1470 kVAr

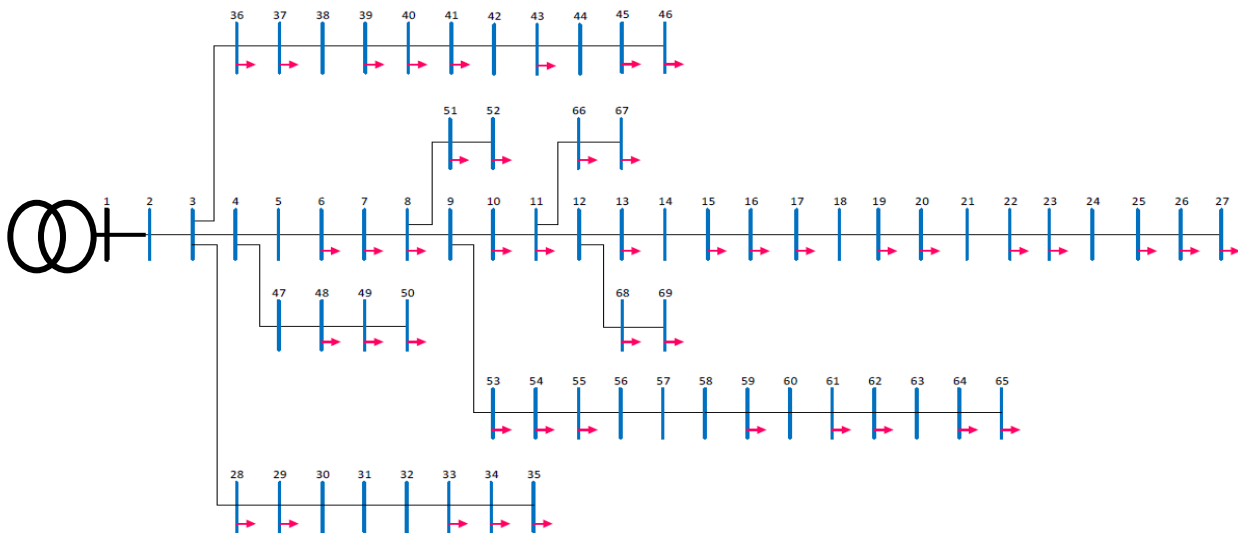


Figure IV.1 : Schéma unifilaire de réseau de distribution IEEE-69 JB.

IV.2.1 Cas normal :

Cette première partie est consacrée à l'analyse du réseau de distribution en régime d'exploitation normal. La méthode d'analyse BF est appliquée pour déterminer l'état du réseau électrique en termes de profils de tension, les pertes actives totales, les pertes dans les branches, et les courants transités dans les branches. Les résultats d'analyses sont récapitulés dans la Tableau.

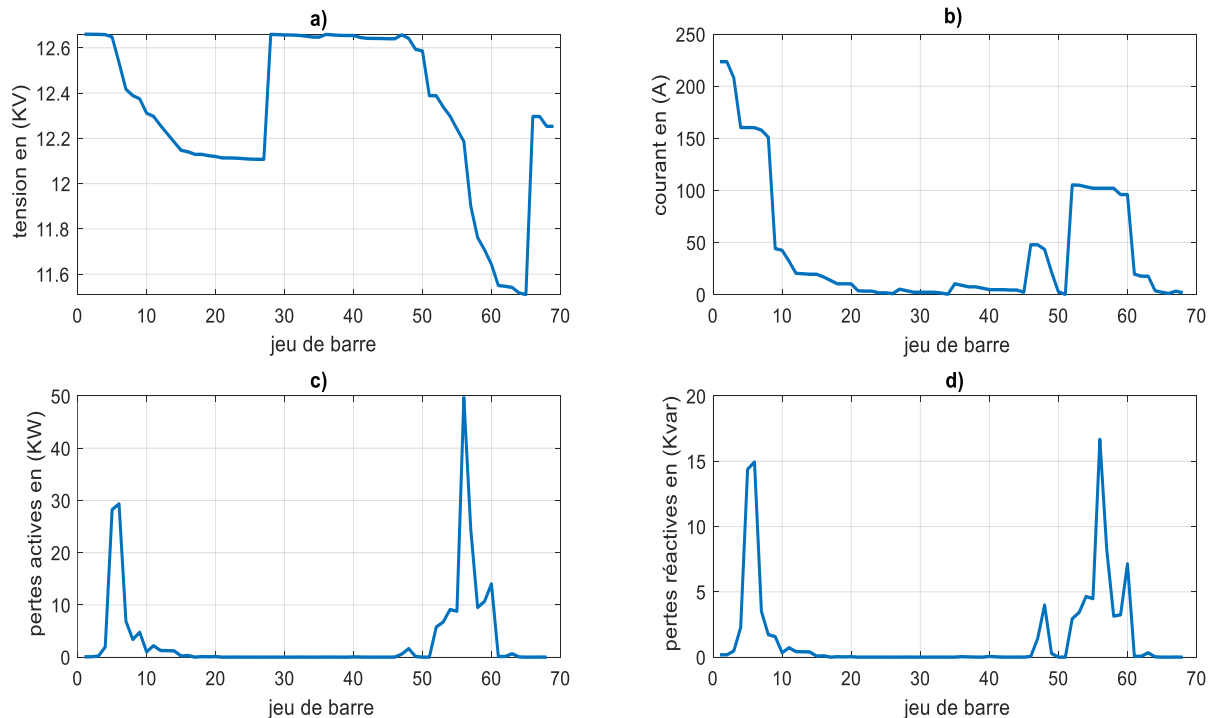


Figure IV.2: résultats d'analyse de l'état du réseau cas normal : a) profile de tension, b) courant transité, c) pertes actives, d) pertes réactive

N° Branch	Perte active (KW)	Perte réactive (Kvar)	Tension (KV)	Courant (A)
1	0.0750	0.1799	12.660	223.5751
2	0.0750	0.1799	12.659	223.5751
3	0.1949	0.4678	12.658	208.1309
4	1.9364	2.2681	12.648	160.3600
5	28.2354	14.3800	12.534	160.3600
6	29.3431	14.9449	12.417	160.2039
7	6.8933	3.5139	12.389	157.8656
8	3.3744	1.7180	12.374	151.0475
9	4.7728	1.5775	12.311	44.0743
10	1.0138	0.3352	12.297	42.4874
11	2.1892	0.7235	12.257	32.0280
12	1.2843	0.4239	12.220	20.3868
13	1.2454	0.4116	12.184	19.9412
14	1.2046	0.3980	12.147	19.4812
15	0.2238	0.0740	12.141	19.4812
16	0.3204	0.1059	12.129	16.8895
17	0.0026	0.0009	12.129	13.5892
18	0.1041	0.0344	12.123	10.2928
19	0.0669	0.0219	12.120	10.2928
20	0.1074	0.0355	12.114	10.2374
21	0.0005	0.0002	12.113	3.5721
22	0.0051	0.0017	12.113	3.2812
23	0.0112	0.0037	12.111	3.2812
24	0.0060	0.0020	12.108	1.6408
25	0.0025	0.0008	12.108	1.6408
26	0.0003	0.0001	12.107	0.8204
27	0.0003	0.0009	12.659	5.1261
28	0.0026	0.0063	12.658	3.6681
29	0.0058	0.0019	12.657	2.2100
30	0.0010	0.0003	12.656	2.2100
31	0.0051	0.0017	12.655	2.2100
32	0.0123	0.0041	12.652	2.2100
33	0.0104	0.0034	12.648	1.4249
34	0.0005	0.0002	12.647	0.3292
35	0.0014	0.0034	12.659	10.3185

36	0.0151	0.0369	12.657	8.8620
37	0.0173	0.0202	12.655	7.4052
38	0.0050	0.0058	12.654	7.4052
39	0.0002	0.0002	12.654	6.0635
40	0.0487	0.0569	12.645	4.7219
41	0.0201	0.0235	12.642	4.6509
42	0.0027	0.0031	12.641	4.6509
43	0.0005	0.0006	12.641	4.3139
44	0.0061	0.0077	12.640	4.3139
45	0.0000	0.0000	12.640	2.1570
46	0.0233	0.0575	12.657	47.7793
47	0.5828	1.4266	12.642	47.7793
48	1.6335	3.9970	12.593	43.3462
49	0.1159	0.2835	12.586	21.6790
50	0.0018	0.0009	12.388	2.5122
51	0.0000	0.0000	12.388	0.2097
52	5.7812	2.9438	12.339	105.2386
53	6.7114	3.4185	12.298	104.9781
54	9.1247	4.6458	12.241	103.4514
55	8.7901	4.4779	12.186	102.0590
56	49.6845	16.6771	11.902	102.0590
57	24.4892	8.2183	11.762	102.0590
58	9.5057	3.1436	11.707	102.0590
59	10.6710	3.2392	11.644	95.9824
60	14.0262	7.1444	11.550	95.9824
61	0.1121	0.0571	11.547	19.5826
62	0.1349	0.0687	11.542	17.6122
63	0.6612	0.3368	11.518	17.6122
64	0.0412	0.0210	11.510	3.6327
65	0.0026	0.0008	12.297	2.0850
66	0.0000	0.0000	12.297	1.0425
67	0.0233	0.0077	12.253	3.2427
68	0.0000	0.0000	12.253	1.6213

Table IV.5: Les tension et les courants et les pertes active et réactive de réseau

IV.2.2 Cas anormal :

Cette deuxième partie est consacré à l'analyse du réseau de distribution en régime d'exploitation anormal (augmentation de la charge **10%, 50%**). La méthode d'analyse BF est appliqués pour déterminer l'état du réseau électrique en termes de profiles de tension, les pertes actives totales, les pertes dans les branches, et les courants transités dans les branches. Les résultats d'analyses sont recapitulés dans les figures.

2.1 augmentations de la charge pour 10% :

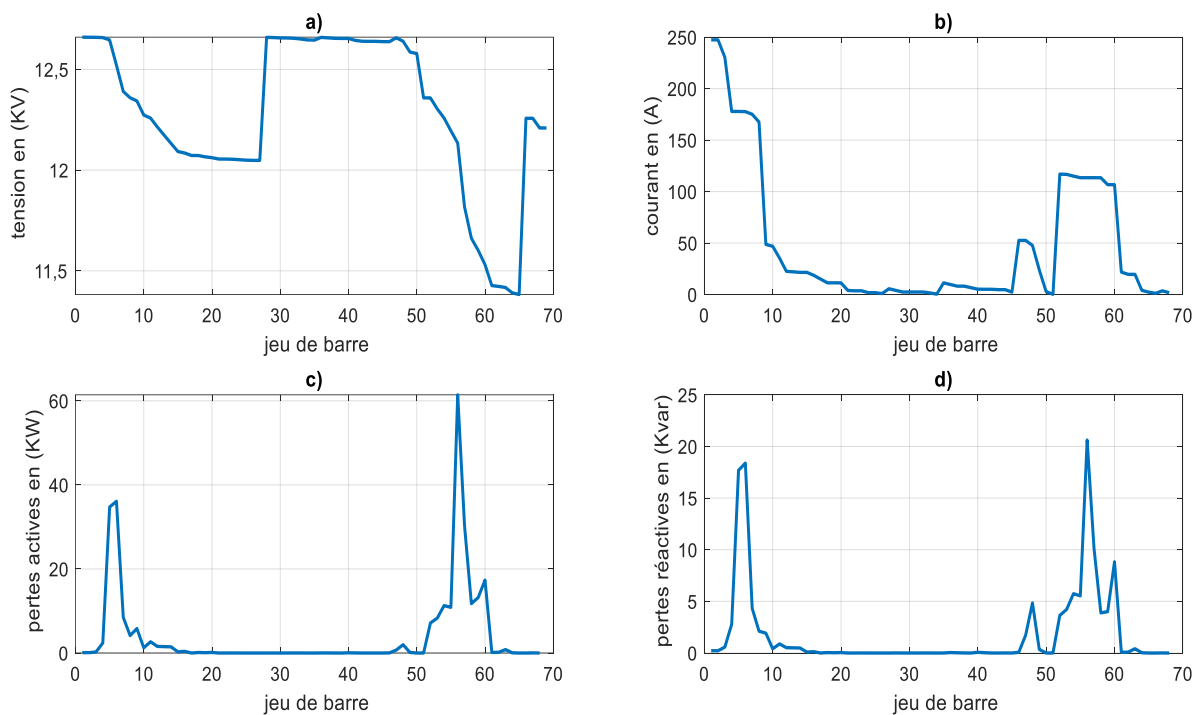


Figure IV.3 : résultats d'analyse de l'état du réseau cas anormal : a) profile de tension, b) courant transité, c) pertes actives, d) pertes réactive.

Augmentations de la charge pour 50% :

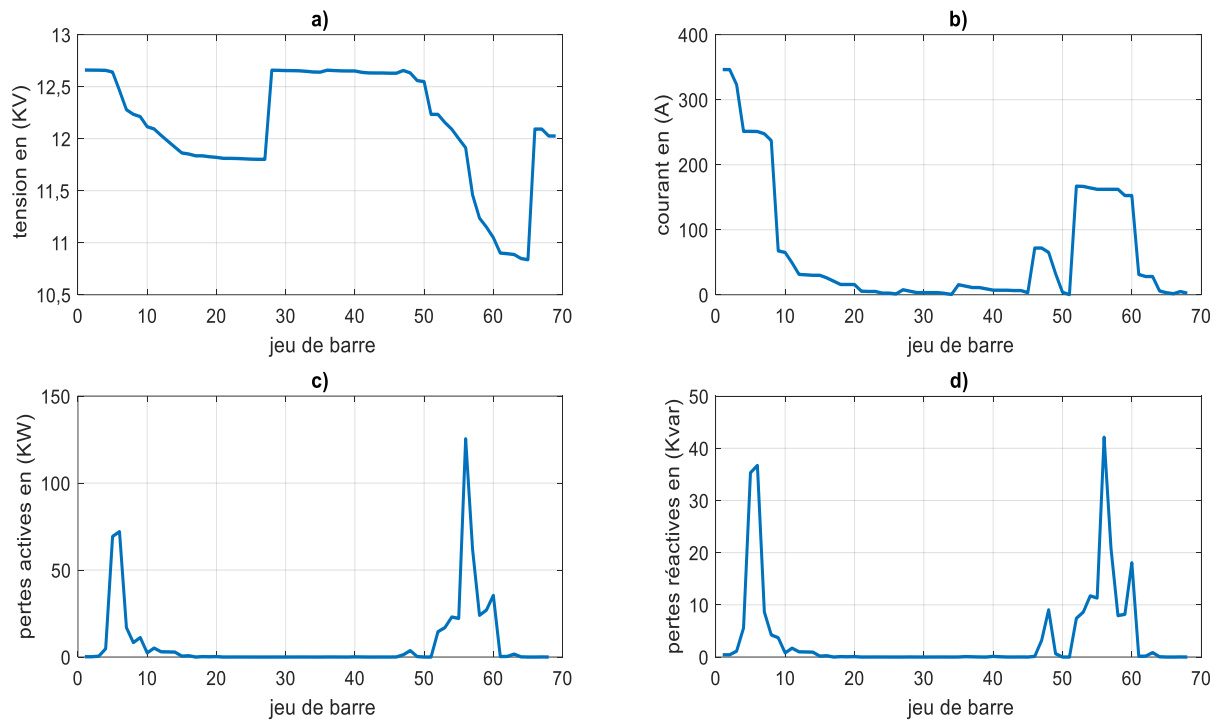


Figure IV.4 : résultats d'analyse de l'état du réseau cas anormal : a) profile de tension, b) courant transité, c) pertes actives, d) pertes réactive

3. Le profil de tension en cas normal et anormal

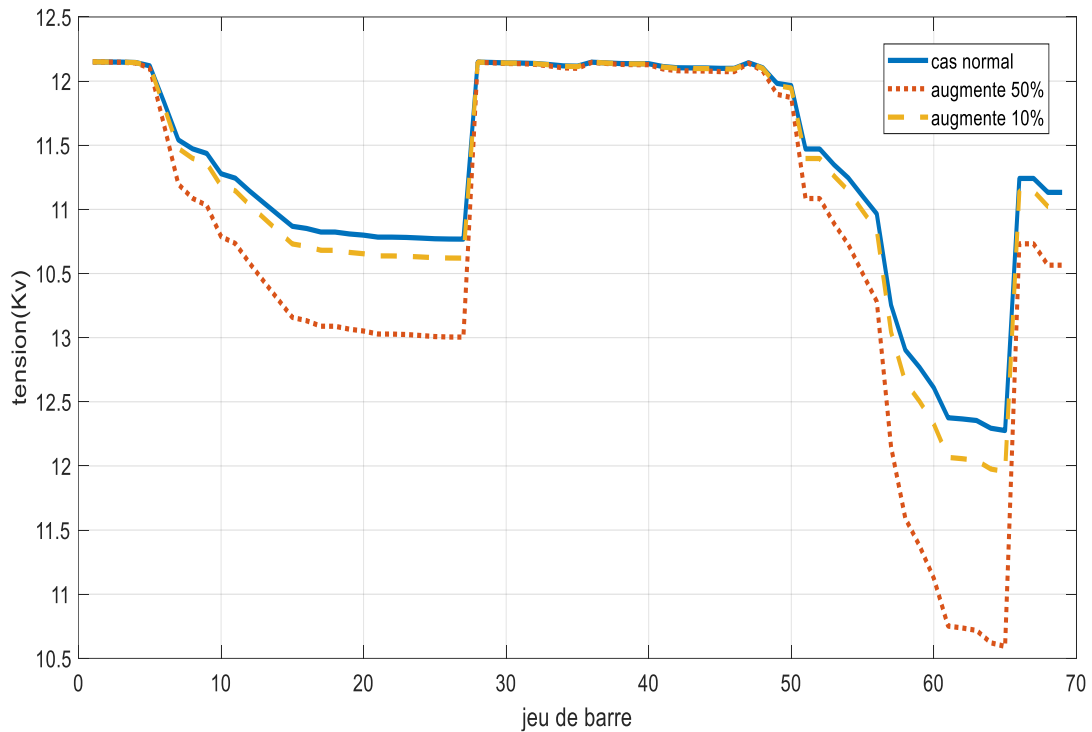


Figure IV.5 : le profil de tension en cas normal et anormal en fonction de JB.

IV.2.3 Interprétation des Résultats du Réseau IEEE 69 Jeux de Barres

Les résultats d'analyse de l'état du réseau en cas normal et anormal sont récapitulés dans le Tableau 4.2

Analyse sans Optimisation (Cas Normal)

1. La déviation de tension totale est élevée, indiquant des problèmes de stabilité, surtout dans les jeux de barres éloignés
2. Le courant maximal est observé dans les premières branches (ex : 223.57 A dans la branche 1), ce qui est cohérent avec la proximité de la source.
3. Les courants diminuent progressivement vers les branches terminales (ex : 1.0425 A dans la branche 66).
4. Pertes actives totales dans les lignes : Cumul élevé, avec des pertes localisées importantes (ex : 49.6845 kW dans la branche 56), Pertes réactives totales dans les lignes : Également significatives (ex : 16.6771 kVAR dans la branche 56), Ces pertes représentent un pourcentage non négligeable de la puissance totale consommée.

Cas Anormal : Augmentation de la Charge

1. La chute de tension s'aggrave avec l'augmentation de la charge. Par exemple : JB 59 : Passe de 11.644 kV (cas normal) à une valeur inférieure en cas de charge +50%.
2. La déviation totale de tension augmente, menaçant la stabilité du réseau.
3. Les courants dans les branches critiques (ex : branche 1) augmentent proportionnellement à la charge, ce qui peut entraîner une surchauffe des lignes.
4. Les pertes actives et réactives dans les lignes croissent de manière non linéaire avec la charge. Par exemple : Branche 56 : Les pertes actives pourraient dépasser 70 kW en cas de charge +50%, Cela se traduit par un coût annuel plus élevé.

	Kl=1	Kl=1.1	Kl=1.5
Tension minimale (p.u)	0.9092	0.8991	0.8560
Pertes actives totales (kW)	224.9606	277.4018	560.4328
Déviaton de tension totale (p.u)	1.8365	2.0371	2.8805
Coût annule des pertes (\$)	118240	145800	294560
Jeu de barre critique	65	65	65

Table IV.6 : résultat d'analyse de l'état du réseau en cas normal et anormal

IV.3 Validation de la méthode SMA

Avant d'appliquer cette technique à résoudre le problème d'intégration des sources distribués en coordination avec le système de compensation, la méthode Slime mould est validée pour la minimisation de plusieurs fonctions mathématique non linéaire de types modal et multi modal. Le Tableau recapitule une description des fonctions mathématiques.

IV.3.1 Validation sur des fonctions mathématiques

Cette partie consiste à appliquer l'algorithme d'optimisation nommée SMO pour minimiser des fonctions mathématiques. Ce test est effectué pour démontrer l'efficacité de l'algorithme à minimiser des fonctions de types uni-modales et multimodales à savoir, les fonctions F1, F2, F8 et F23. L'algorithme a été testé pour différentes valeur de population et de nombre de générations. Trois indices de statistiques (min, max, moyenne et déviation standard) ont été utilisés pour évaluer la robustesse de l'algorithme. La description des fonctions de test est récapitulée dans le Tableau 1.

Functions	Dim	Range	f_{min}
$f_1(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2$	n	$[-100,100]$	0
$f_2(x) = \sum_{i=1}^n x_i + \prod_{i=1}^n x_i $	n	$[-10,10]$	0
$f_3(x) = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^i x_j \right)^2$	n	$[-100,100]$	0
$f_4(x) = \max_i \{ x_i , 1 \leq i \leq n\}$	n	$[-100,100]$	0
$f_5(x) = \sum_{i=1}^{n-1} \left[100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (x_i - 1)^2 \right]$	n	$[-30,30]$	0
$f_6(x) = \sum_{i=1}^n (x_i + 0.5)^2$	n	$[-100,100]$	0
$f_7(x) = \sum_{i=1}^n ix_i^4 + \text{random}[0, 1]$	n	$[-128,128]$	0
$f_8(x) = \sum_{i=1}^n -x_i \sin(\sqrt{ x_i })$	n	$[-500,500]$	-418.9829^n
$f_9(x) = \sum_{i=1}^n [x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) + 10]$	n	$[-5.12, 5.12]$	0
$f_{10}(x) = -20 \exp(-0.2(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2)^{0.5}) - \exp(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos(2\pi x_i)) + 20 + e$	n	$[-32,32]$	0
$f_{11}(x) = \frac{1}{4000} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \prod_{i=1}^n \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right) + 1$	n	$[-600,600]$	0
$f_{12}(x) = \frac{\pi}{n} \left\{ 10 \sin(\pi y_1) + \sum_{i=1}^{n-1} (y_i - 1)^2 [1 + 10 \sin^2(\pi y_{i+1})] + (y_n - 1)^2 \right\} + \sum_{i=1}^n u(x_i, 10, 100, 4), y_i = 1 + \frac{x_i + 1}{4}$	n	$[-50,50]$	0
$u(x_i, a, k, m) = \begin{cases} k(x_i - a)^m x_i & x_i > a \\ 0 & -a < x_i < a \\ k(-x_i - a)^m x_i & x_i < -a \end{cases}$	n	$[-50,50]$	0
$f_{13}(x) = 0.1 \left\{ \sin^2(3\pi x_1) + \sum_{i=1}^n (x_i - 1)^2 [1 + \sin^2(3\pi x_i + 1)] + (x_n - 1)^2 [1 + \sin^2(2\pi x_n)] \right\} + \sum_{i=1}^n u(x_i, 5, 100, 4)$	n	$[-50,50]$	0

Figure IV.6 : Description des fonctions mathématiques standard : unimodal et multimodal

Test 1 : pour ce test le nombre d'itération est fixé à 100 et on fait varier la population de 10 à 30. Vue l'aspect stochastique de toutes les méthodes métaheuristiques, le programme SMO est exécuté 30 fois

afin de localiser la meilleure solution. Les paramètres de l'algorithme SMO sont présentés comme suite :

- Nombre de population : 10 et 30.
- Nombre d'itération maximal : 100
- Nombre d'exécution maximal : 30.
- Taille de la dimension (n) : 3.

Les résultats de minimisation des fonctions standard F1, F2, F8 et F23 sont présentés dans le Tableau.

Itmax=100						
Fonction objectif			F1	F2	F8	F23
Nombre de membres de la population	30	Best	7.9378e-154	7.4198e-66	-1.2569e+04	-10.5361
		Mean	8.3157e-83	4.0027e-52	-1.2540e+04	-10.5348
		Max	8.3157e-82	3.9862e-51	-1.2518e+04	-10.5329
		Stdv (standard déviation)	2.6297e-82	1.2600e-51	19.5637	9.2249e-04
	10	Best	4.2738e-137	5.0558e-67	-1.2569e+04	-10.5325
		Mean	9.6193e-107	1.3320e-56	-1.2008e+04	-8.8963
		Max	9.6131e-106	1.3294e-55	-8.9189e+03	-5.1253
		Stdv	3.0397e-106	4.2029e-56	1.1232e+03	2.5907

Table IV.7: Résultats de minimisation des fonctions F1, F2, F8 et F23 par utilisation de la méthode SMO : {pop=10 a 30, Itmax=100}

Test 2 : pour ce test le nombre d'itération est fixé à 50 et on fait varier la population de 10 à 30. Vue l'aspect stochastique de toutes les méthodes métaheuristiques, le programme SMO est exécuté 30 fois afin de localiser la meilleure solution. Les paramètres de l'algorithme SMO sont présentés comme suite :

- Nombre de population : 10 et 30.
- Nombre d'itération maximal : 50
- Nombre d'exécution maximal : 30.
- Taille de la dimension (n) : 3.

Les résultats de minimisation des fonctions standard F1, F2, F8 et F23 sont présentés dans le Tableau.

			Itmax=50			
Fonction objectif			F1	F2	F8	F23
Nombre de membres de	30	Best	6.8832e-72	4.1131e-36	-1.2569e+04	-10.5337
		Mean	5.4102e-31	3.4113e-23	-1.2508e+04	-9.9883
		Max	5.4095e-30	3.3498e-22	-1.2350e+04	-5.1720

	10	Stdv (standard deviation)	1.7106e-30	1.0573e-22	82.3464	1.6923
		Best	6.6459e-71	1.1452e-36	-1.2564e+04	-10.5064
		Mean	3.2856e-47	7.1178e-25	-1.1751e+04	-8.3239
		Max	2.7487e-46	7.1169e-24	-8.9638e+03	-5.1048
		Stdv	8.6693e-47	2.2505e-24	1.1179e+03	2.7367

Table IV.8: Résultats de minimisation des fonctions F1, F2, F8 et F23 par utilisation de la méthode SMO : {pop=10 a 30, Itmax=50}

Test 3 : pour ce test le nombre d'itération est fixé à 500 et on fait varier la population de 10 à 30. Vue l'aspect stochastique de toutes les méthodes métaheuristiques, le programme SMO est exécuté 30 fois afin de localiser la meilleure solution. Les paramètres de l'algorithme SMO sont présentés comme suite :

- Nombre de population : 10 et 30.
- Nombre d'itération maximal : 500
- Nombre d'exécution maximal : 30.
- Taille de la dimension (n) : 3.

Les résultats de minimisation des fonctions standard F1, F2, F8 et F23 sont présentés dans le Tableau.

			Itmax=500			
Fonction objectif			F1	F2	F8	F23
Nombre de membres de la population	30	Best	0	3.6213e-303	-1.2569e+04	-10.5363
		Mean	1.2391e-320	5.9665e-135	-1.2569e+04	-10.5360
		Max	3.7172e-319	1.7900e-133	-1.2568e+04	-10.5340
		Stdv (standard deviation)	0	3.2680e-134	0.3453	4.4412e-04
	10	Best	0	4.9580e-271	-1.2569e+04	-10.5363
		Mean	1.2517e-221	2.4722e-136	-1.2566e+04	-10.3551
		Max	3.7551e-220	7.2769e-135	-1.2557e+04	-5.1281
		Stdv	0	1.3279e-135	2.7554	0.9872

Table IV.9: Résultats de minimisation des fonctions F1, F2, F8 et F23 par utilisation de la méthode SMO : {pop=10 a 30, Itmax=500}

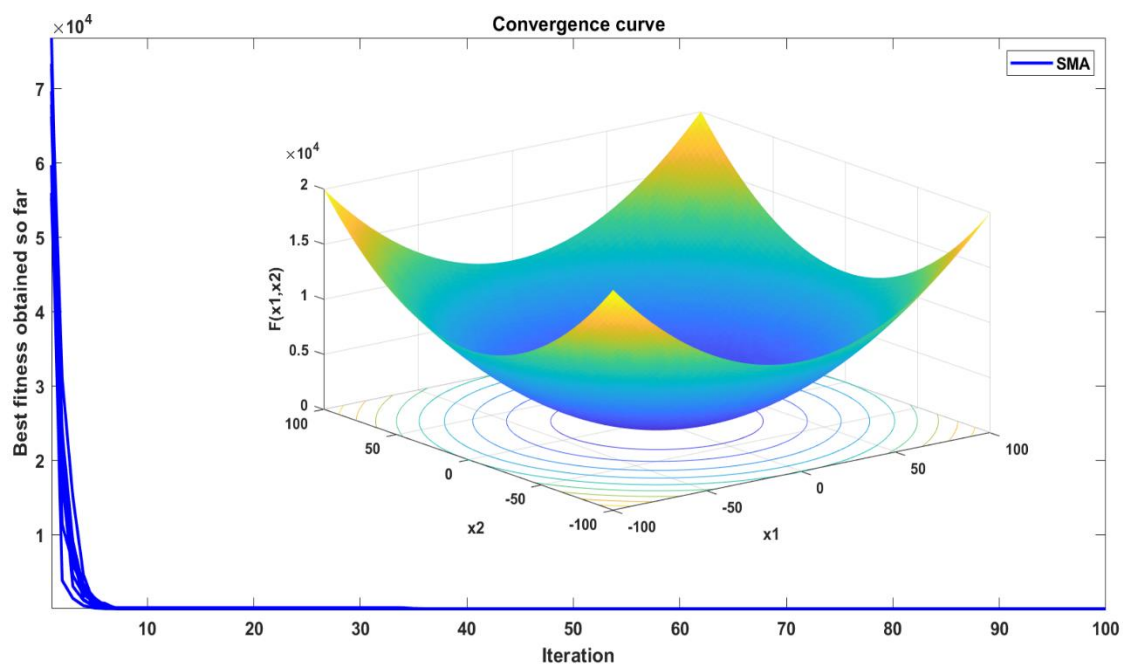


Figure IV.7: Convergence de la fonction uni-modale F_1 par la méthode SMO

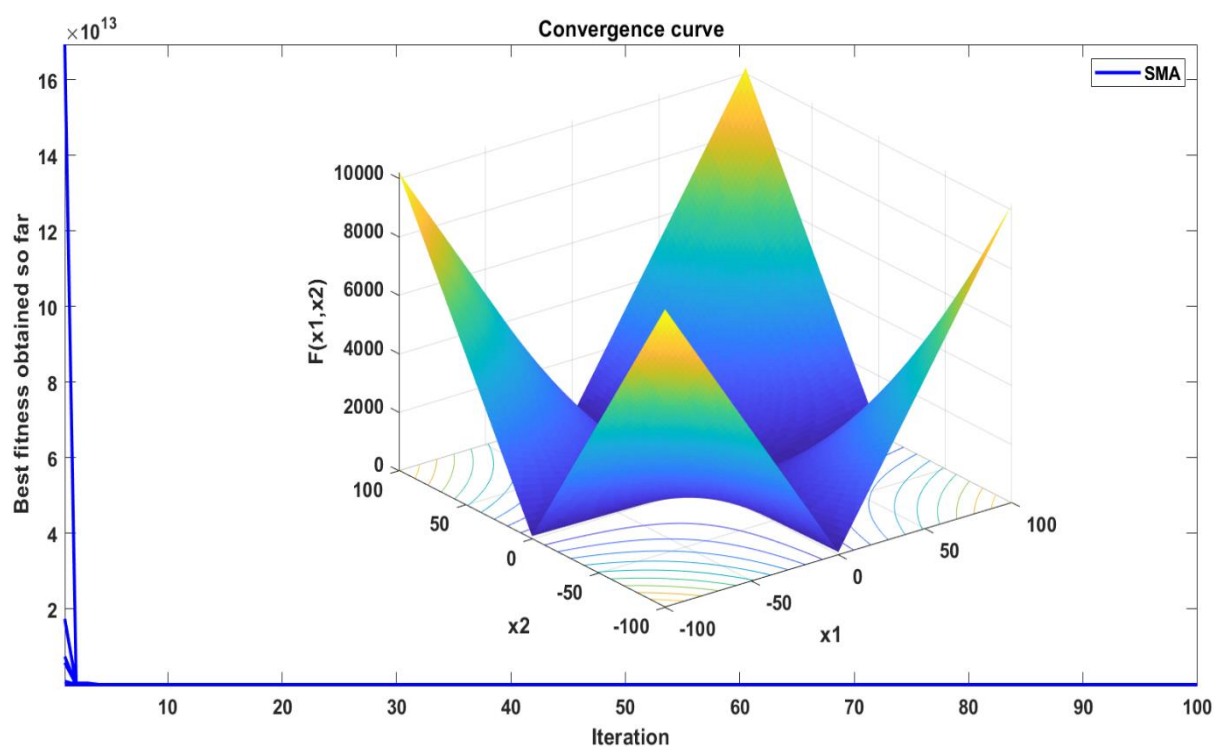


Figure IV.8: Convergence de la fonction uni-modale F_2 par la méthode SMO

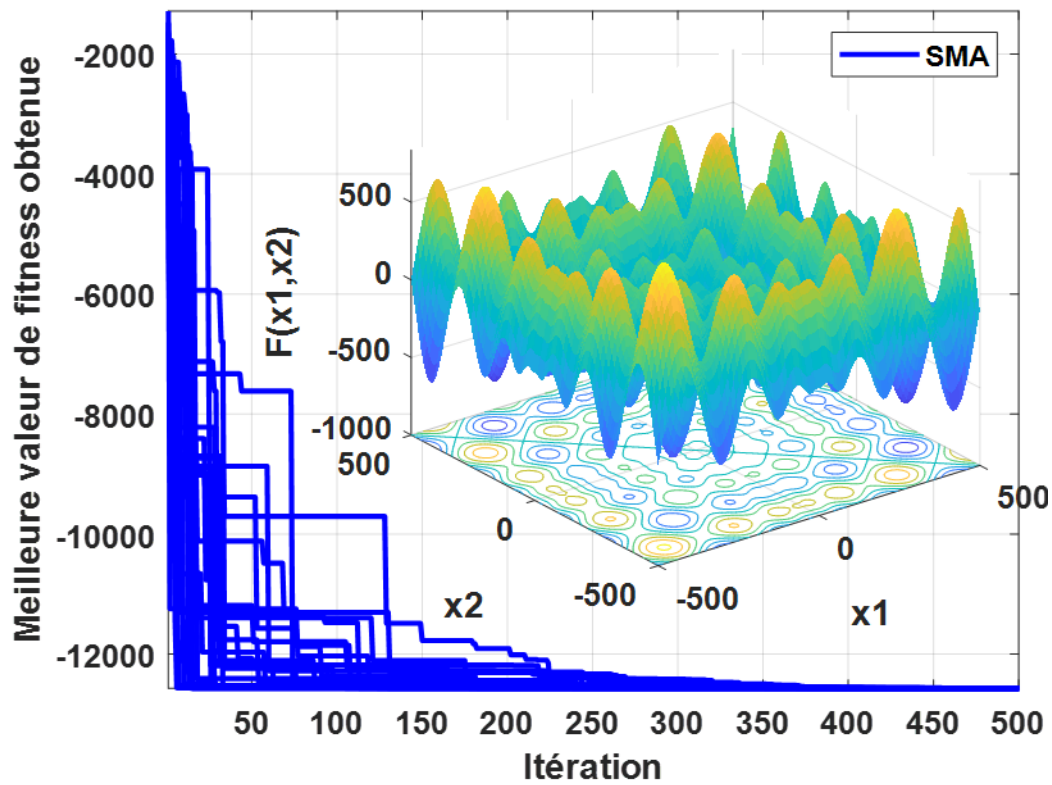


Figure IV.9: Convergence de la fonction multimodale F8 par la méthode SMO

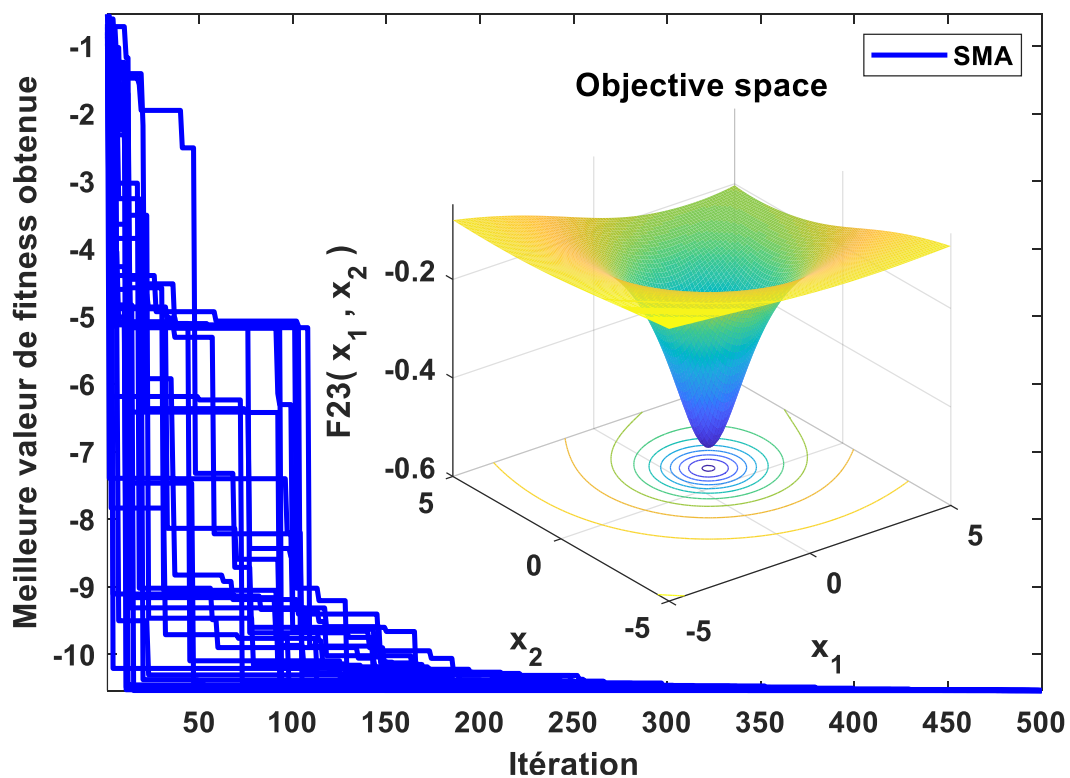


Figure IV.10: Convergence de la fonction multimodale F23 par la méthode SMO

IV.3.2 Interprétation des Résultats

1. Une convergence rapide est observée pour les fonctions unimodales (F1 et F2), indiquant une excellente capacité à atteindre des solutions optimales sans stagnation dans des minima locaux.
2. Pour les fonctions multimodales (F8 et F23), la recherche parvient à explorer efficacement l'espace des solutions, évitant ainsi le piègeage dans des optima locaux,
3. L'augmentation du nombre population de 10 à 30 améliore les performances permettant ainsi d'améliorer les indices statistiques, en particulier, pour le premier test, le SD décroît de $1.1232e+03$ à 19.5637, lors de la minimisation de la fonction F8, traduisant une meilleure diversité de recherche.
4. La réduction du nombre maximal d'itérations de 100 à 50 entraîne une légère détérioration des résultats, notamment pour les fonctions complexes, indiquant une baisse de précision dans un environnement de recherche limité.
5. Les valeurs de Best et Mean augmentent, particulièrement pour F23, traduisant une exploration incomplète de l'espace des solutions, ce qui nous oblige à augmenter le nombre de population ou le nombre d'itération à une valeur adéquate permettant à l'algorithme de localiser l'optimum global.
6. Malgré ces limitations, les performances restent relativement acceptables, attestant d'une bonne résilience même avec un nombre d'itérations restreint.

IV.4 Deuxième phase : Analyse avec l'optimisation :

Dans cette partie, nous nous concentrons sur l'optimisation de l'intégration des batteries de condensateurs et des sources distribuées dans le réseau de distribution 69-Bus. Pour atteindre cet objectif, nous appliquons la méthodes métaheuristiques nommée algorithme slime mould (SAM).

Cette technique d'optimisation a été appliquée avec succès pour résoudre plusieurs problèmes d'optimisation dans différents domaines [], et en particulier la planification des réseaux électriques. Récemment cette technique est appliquée pour améliorer les performances du réseau de transport Algérien 114 jeux de barres [].

IV.4.1 Étapes d'optimisation à base de l'algorithme SMA

L'algorithme SMA procède par une série d'étapes successives bien définies pour atteindre une solution optimale. Ci-dessous, une présentation détaillée de ces différentes étapes :

❖ Étape 1 : Définition des Données du Réseau Électrique Radial

✓ Collecter les données du système :

- Impédances de toutes les branches (résistance R_{mn} et réactance X_{mn} pour chaque branche entre les nœuds m et n).
- Demande de puissance active (P_d) et réactive (Q_d) à chaque nœud de charge.
- Configuration topologique du réseau (matrice d'incidence ou liste des branches).
- Tension de référence au nœud source.
- Emplacements candidats pour l'installation des batteries de condensateurs (S_C).
- Tailles discrètes ou continues disponibles pour les condensateurs.
- Emplacements candidats pour l'installation des unités de production distribuée (S_{DG}).
- Capacités (puissance active maximale P_{max}) et coûts associés des unités de PG.

❖ Étape 2 : Initialisation des Paramètres de L'Algorithme de la Moissure Gluante (AMS)

• Définir les paramètres de contrôle de l'AMS :

- Taille de la population de moissures gluantes (N).
- Nombre maximal d'itérations ($MaxIter$).
- Paramètres d'exploration et d'exploitation spécifiques à l'AMS (par exemple, les paramètres a , b , c dans certaines formulations).

❖ Étape 3 : Génération de la Population Initiale de Moissures Gluantes

- Créer une population initiale de N solutions potentielles (moissures gluantes). Chaque moissure gluante représente une configuration possible pour l'emplacement et le dimensionnement des condensateurs et des unités de PG.

- Encoder la position de chaque moisissure gluante : Un vecteur représentant les décisions d'emplacement et de taille. Par exemple :

$$X_i = [\text{loc}_{C,1}, \text{size}_{C,1}, \dots, \text{Loc}_{C,n_c}, \text{size}_{C,n_c}, \text{loc}_{DG,1}, \text{size}_{DG,1}, \dots, \text{Loc}_{DG,n_{dg}}, \text{size}_{DG,n_{dg}}]$$

Où n_c et n_{dg} sont le nombre maximal de condensateurs et d'unités de PG que l'on considère.

Les valeurs d'emplacement peuvent être tirées des indices des nœuds candidats, et les valeurs de taille peuvent être des valeurs discrètes ou continues dans les limites spécifiées.

❖ Étape 4 : Évaluation de l'Adaptation de Chaque Moisissure Gluante

- Pour chaque moisissure gluante X_i dans la population :

1. Décoder la position : Extraire les informations sur l'emplacement et la taille des condensateurs et des unités de PG à partir du vecteur X_i .

2. Effectuer une analyse de flux de puissance : Simuler le fonctionnement du réseau radial avec la configuration actuelle des condensateurs et des unités de PG. Une méthode de flux de puissance adaptée aux réseaux radiaux (comme la méthode de balayage avant-arrière) peut être utilisée.

3. Calculer les pertes actives totales (P_{loss}) : Utiliser les résultats du flux de puissance (courants dans chaque branche I_{mn} et résistances R_{mn}) pour calculer les pertes totales dans le réseau :

$$P_{\text{loss}} = \sum_{(m,n) \in \text{Branches}} |I_{mn}|^2 \times R_{mn} \quad (\text{IV.15})$$

4. Assigner la valeur d'adaptation : L'adaptation de la moisissure gluante i est directement la valeur des pertes actives :

$$\text{fitness}_i = P_{\text{loss}} \quad (\text{IV. 16})$$

L'objectif étant de minimiser les pertes, une adaptation plus faible est meilleure.

❖ Étape 5 : Mise à Jour de la Meilleure Adaptation et de la Meilleure Position

- Comparer l'adaptation de chaque moisissure gluante avec la meilleure adaptation trouvée jusqu'à présent.
- Si une moisissure gluante a une adaptation inférieure (pertes actives plus faibles), mettre à jour la meilleure adaptation globale et la position de la meilleure moisissure (X_b).

❖ Étape 6 : Mise à Jour des Poids des Moisissures Gluantes

- Calculer les poids de chaque moisissure gluante en fonction de leur adaptation. Les moisissures avec des pertes actives plus faibles devraient avoir des poids plus élevés, influençant davantage le mouvement des autres moisissures.

• La formule de mise à jour des poids peut varier légèrement en fonction de la formulation spécifique de l'AMS utilisée, mais elle tend généralement à favoriser les solutions avec une meilleure adaptation.

❖ Étape 7 : Mise à Jour des Positions des Moisissures Gluantes

- **Pour chaque moisissure gluante (à l'exception de la meilleure) :**

➤ Appliquer les règles de mouvement de l'AMS pour mettre à jour sa position dans l'espace de recherche. Ces règles impliquent généralement une combinaison d'exploration (recherche de nouvelles zones) et d'exploitation (raffinement des solutions autour des meilleures zones trouvées). Les équations de mouvement utilisent :

- Les poids des moisissures gluantes.
- La position de la meilleure moisissure.
- Potentiellement les positions d'autres moisissures.

❖ Étape 8 : Vérification des Critères d'Arrêt

- **Vérifier si les conditions d'arrêt sont satisfaites, les Critères d'Arrêt courants incluent :**
 - Atteindre le nombre maximal d'itérations (MaxIter).

❖ Étape 9 : Sortie des Résultats Optimaux

- **Une fois les critères d'arrêt atteints la position de la meilleure moisissure gluante (X_b) représente la solution optimale trouvée.**
 - **Décoder la position optimale pour obtenir :**
 - Les emplacements optimaux pour l'installation des batteries de condensateurs
 - Les tailles optimales des batteries de condensateurs à ces emplacements
 - Les emplacements optimaux pour l'installation des unités de production distribuée
 - Les capacités optimales (puissance active) des unités de PG à ces emplacements
 - Calculer les pertes actives minimales obtenues avec cette configuration optimale.

Itération : Les étapes 4 à 8 sont répétées jusqu'à ce que les critères d'arrêt soient satisfaits.

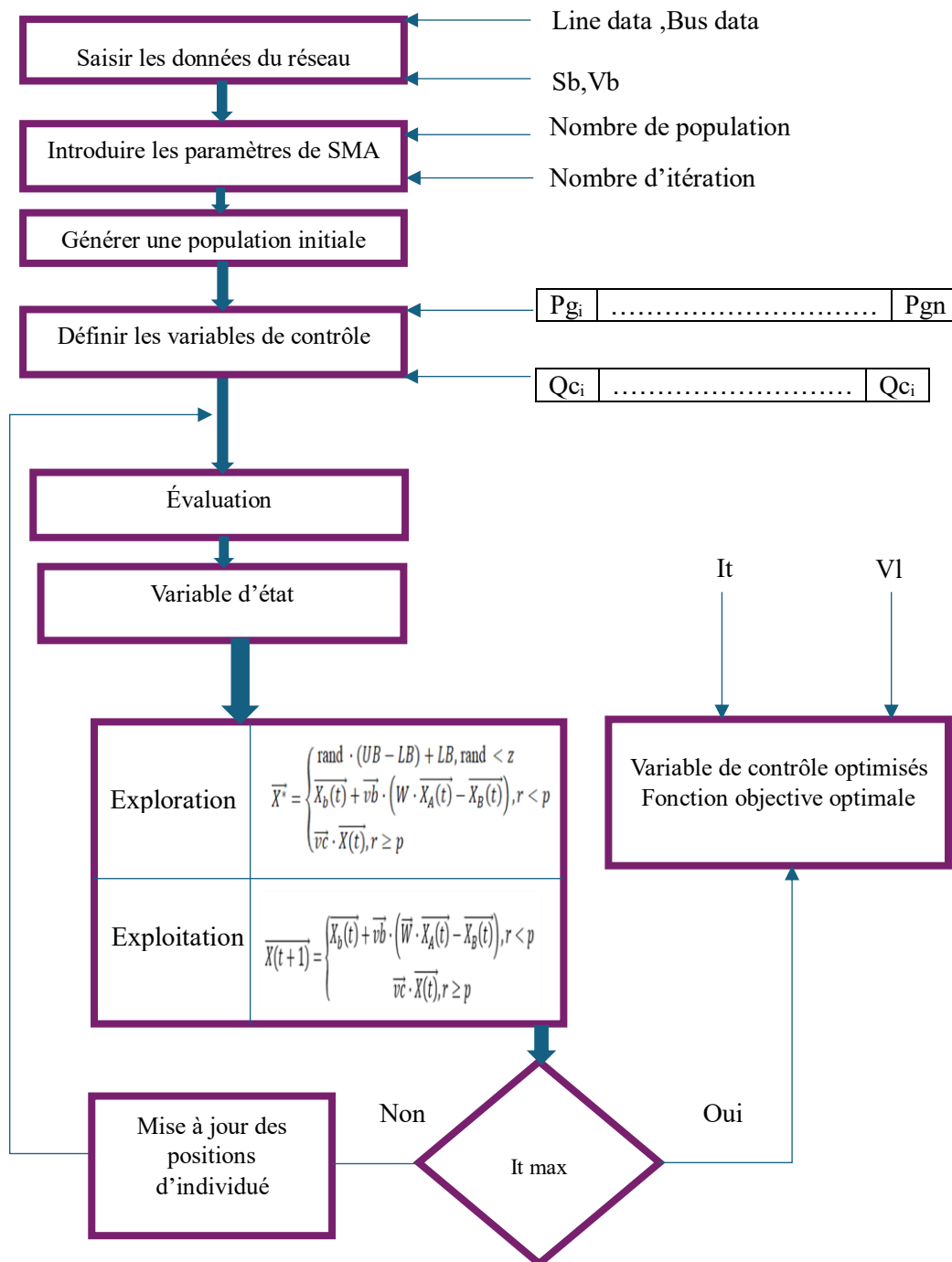


Figure IV.11: l'organigramme de l'algorithme de SMA

IV.4.2 Validation de la méthode Slime mould à l'optimisation de l'intégration du système de compensation

On choisit les batteries de condensateurs à installer aux jeux de barres les plus éloignés dans le réseau test IEEE 69-JB. Premièrement on injecte trois batteries de condensateurs Q_{c1} , Q_{c2} et Q_{c3} sont respectivement installés aux jeux de barres 65, 27 et 69 puis on ajoute trois autres batteries de condensateurs Q_{c4} , Q_{c5} et Q_{c6} dans les jeux de barre 50, 35, 46 avec Q_c limité entre 0 kVAR et 500 kVAR.

IV.4.2.1 Application de l'algorithme de slime mould:

On utilise l'algorithme de slime mould pour définir les valeurs optimales des puissances réactives des batteries à injecter pour optimiser les deux fonctions objectives à savoir, les pertes actives totales et la déviation totale de tension.

IV.4.2.1.1 Minimisation des pertes actives totales (injecter 3 batteries de condensateurs)

	Kl=1		Kl=1.1		Kl=1.5	
Q_c (kVAR)	Q_{c1}	500	Q_{c1}	500	Q_{c1}	500
	Q_{c2}	64.29968	Q_{c2}	73.03673	Q_{c2}	98.05226
	Q_{c3}	346.2505	Q_{c3}	386.4692	Q_{c3}	500
Tension minimale (p.u)	0.9210		0.8991		0.8704	
Pertes actives totales (kW)	174.5741		217.7981		455.6706	
Déviations de tension totale (p.u)	1.5777		2.0364		2.8794	
Coût annuel des pertes (\$)	91756		114470		239500	
Temps d'exécution (s)	7.737593		8.323976		9.303128	

Table IV.10: résultat d'optimisation des trois batteries de condensateurs par l'SMA : Minimisation des pertes actives totales

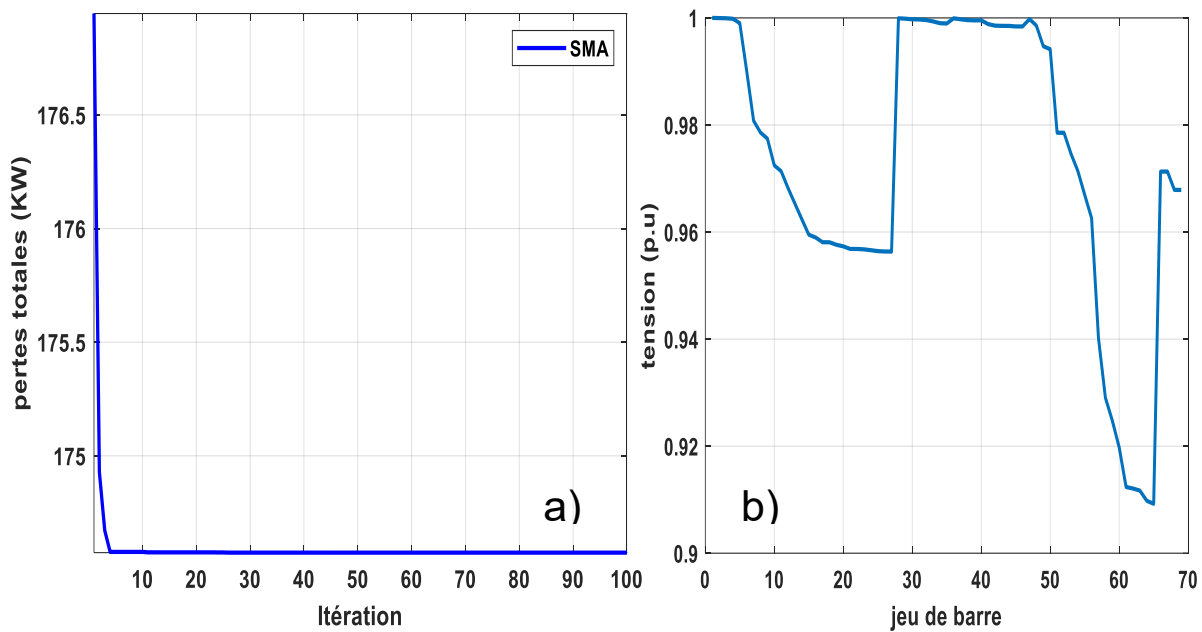


Figure IV.12 : a) Courbe de convergence, b) tension aux jeux de barre pour cas normal minimisation des pertes totales : pour nombre de population = 30 et nombre d'itération maximal = 100.

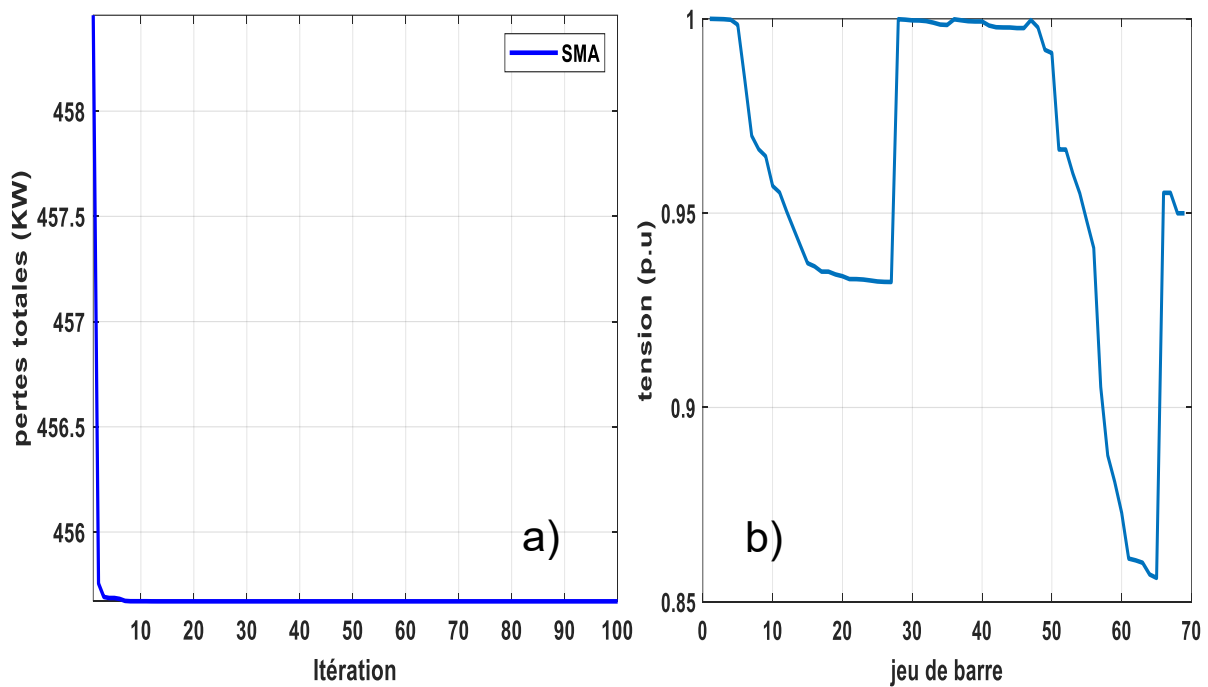


Figure IV.13 : a) Courbe de convergence, b) tension aux jeux de barre pour cas anormal minimisation des pertes totales : pour nombre de population = 30 et nombre d'itération maximal = 100.

IV.4.2.1.2 Minimisation des pertes actives totales (Injecter 6 batteries de condensateurs)

	Kl=1		Kl=1.1		Kl=1.5	
Qc (kVAR)	QC ₁	500	QC ₁	500	QC ₁	500
	QC ₂	65.75547	QC ₂	69.66645	QC ₂	97.08845
	QC ₃	209.0081	QC ₃	242.02	QC ₃	411.9515
	QC ₄	500	QC ₄	500	QC ₄	500
	QC ₅	14.85475	QC ₅	14.3173	QC ₅	27.48224
	QC ₆	488.1438	QC ₆	500	QC ₆	500
Tension minimale (p.u)	0.9222		0.9126		0.8719	
Pertes actives totales (kW)	169.5222		211.3669		442.9782	
Déviaton de tension totale (p.u)	1.5139		1.8345		2.4536	
Coût annule des pertes (\$)	89101		111100		232830	
Temps d'exécution (s)	12.734788		15.399843		21.701794	

Table IV.10: résultat d'optimisation des 6 batteries de condensateurs par l'SMA :

Minimisation des pertes actives totales

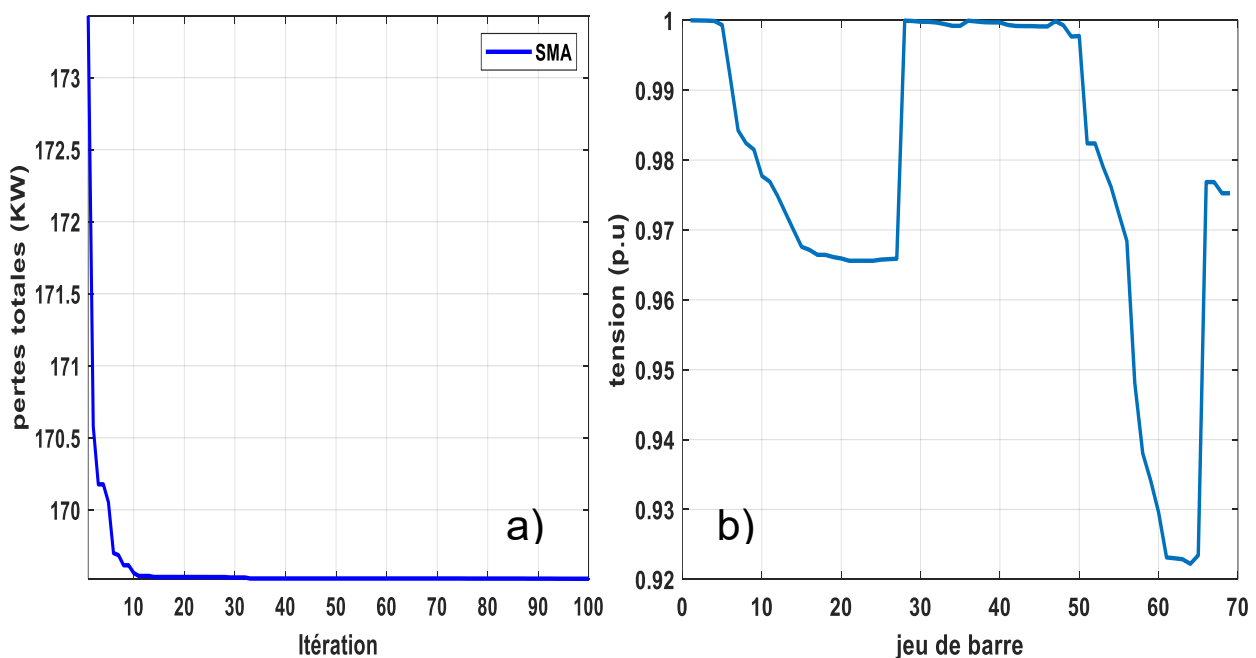


Figure IV.14: a) Courbe de convergence, b) tension aux jeux de barre pour cas normal minimisation des pertes totales : pour nombre de population = 30 et nombre d'itération maximal = 100.

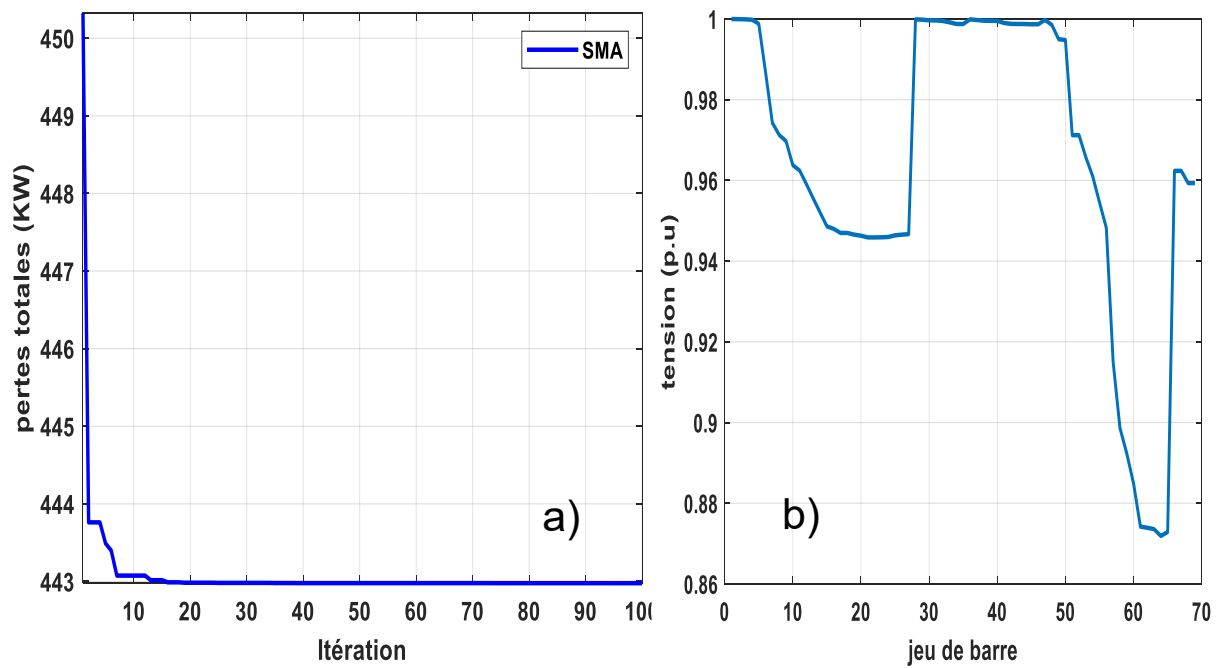


Figure IV.15: a) Courbe de convergence, b) tension aux jeux de barre pour cas anormal minimisation des pertes totales : pour nombre de population = 30 et nombre d'itération maximal = 100.

IV.4.2.1.3 Minimisation la Déviation de tension (injecter 3 batteries de condensateurs)

	Kl=1		Kl=1.1		Kl=1.5	
Qc (kVAR)	Qc ₁	500	Qc ₁	500	Qc ₁	500
	Qc ₂	142.3169	Qc ₂	0	Qc ₂	0.004282377
	Qc ₃	500	Qc ₃	500	Qc ₃	500
Tension minimale (p.u)	0.9109		0.8991		0.8685	
Pertes actives totales (kW)	215.6457		277.4018		476.1352	
Déviatiion de tension totale (p.u)	1.524		1.7284		2.5459	
Coût annule des pertes (\$)	113343		145802		250256	
Temps d'exécution (s)	10.885837		14.352847		14.538905	

Table IV.11: résultat d'optimisation des trois batteries de condensateurs par l'SMA : Minimisation la Déviation de tension

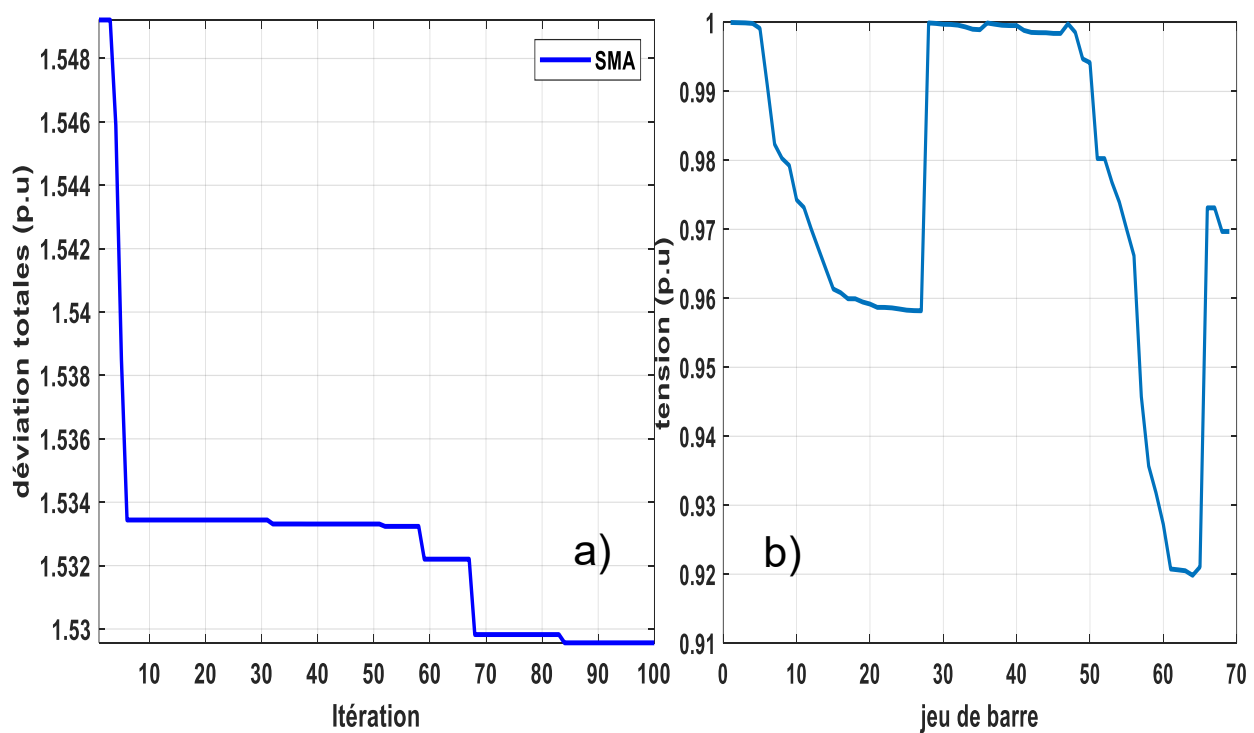


Figure IV.16: a) Courbe de convergence, b) tension aux jeux de barre pour cas normal minimisation la Déviation de tension: pour nombre de population = 30 et nombre d'itération maximal = 100.

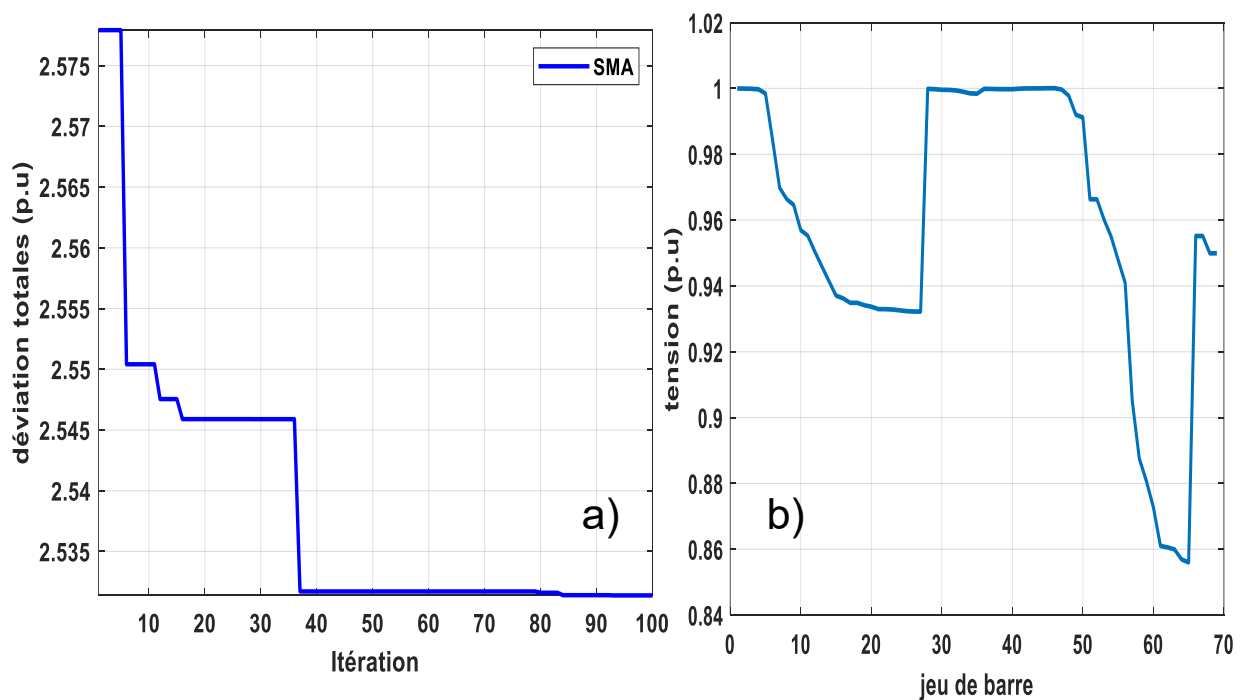


Figure IV.17: a) Courbe de convergence, b) tension aux jeux de barre pour cas anormal minimisation la Déviation de tension : pour nombre de population = 30 et nombre d'itération maximal = 100.

IV.4.2.1.4 Minimisation de Déviation de tension (injecter 6 batteries de condensateurs)

	Kl=1		Kl=1.1		Kl=1.5	
Qc (kVAR)	QC ₁	499.9808	QC ₁	500	QC ₁	500
	QC ₂	76.58224	QC ₂	68.49449	QC ₂	139.2257
	QC ₃	500	QC ₃	500	QC ₃	500
	QC ₄	29.24008	QC ₄	47.16316	QC ₄	0
	QC ₅	0	QC ₅	0	QC ₅	0
	QC ₆	500	QC ₆	498.9288	QC ₆	500
Tension minimale (p.u)	0.9092		0.8991		0.8580	
Pertes actives totales (kW)	224.8351		277.3983		560.4327	
Déviatiion de tension totale (p.u)	1.4266		1.6159		2.4303	
Coût annule des pertes (\$)	118173		145800		294563	
Temps d'exécution (s)	24.834667		27.783128		43.640981	

Table IV.12: résultat d'optimisation des 6 batteries de condensateurs par l'SMA : Minimisation la Déviation de tension

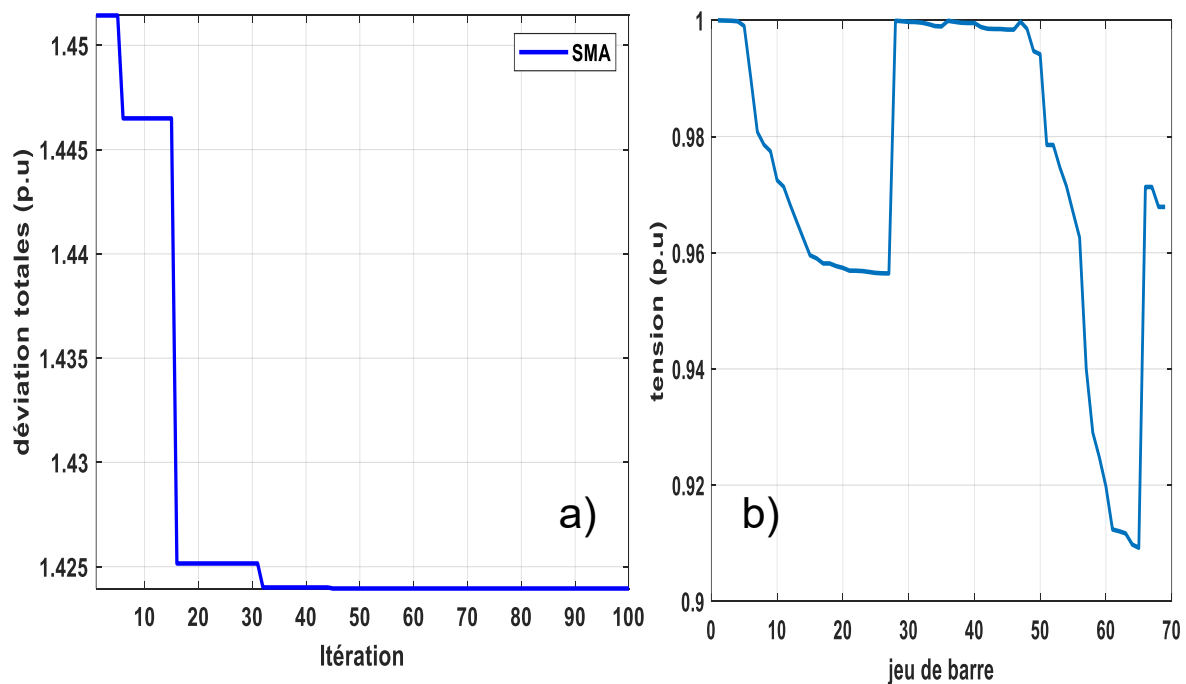


Figure IV.18: a) Courbe de convergence, b) tension aux jeux de barre pour cas normal minimisation la Déviation de tension: pour nombre de population = 30 et nombre d'itération maximal = 100

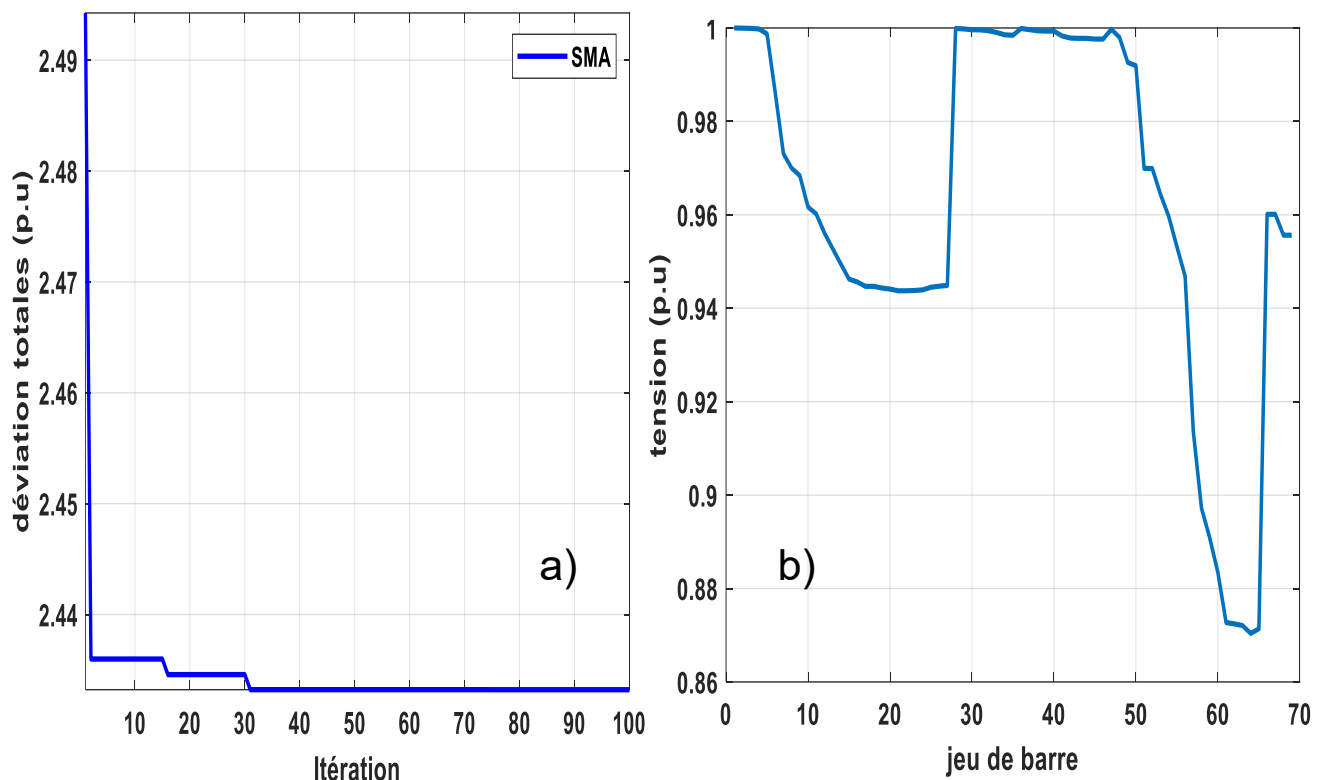


Figure IV.19: a) Courbe de convergence, b) tension aux jeux de barre pour cas anormal minimisation la Déviation de tension: pour nombre de population = 30 et nombre d'itération maximal = 100

IV.4.2.2 Interprétation des résultats

- L'injection de batteries de condensateurs améliore significativement la tension minimale aux jeux de barres, particulièrement dans les cas de forte charge (**KI=1.5**). Par exemple avec l'intégration de trois batteries de condensateurs dans les jeux de barres (**65,69,27**), la tension minimale passe de **0.8560 p.u** (cas sans optimisation) à **0.8704 p.u**.
- Pour une exploitation dans le régime normal (**KI=1**), les pertes actives totales diminuent de 224.9606 kW à **154.0799 kW** après l'intégration des trois batteries de condensateurs, traduisant une **réduction des pertes à d'effet Joule** dans les lignes électriques ce qui permet d'améliorer le rendement du réseau
- La déviation totale de tension (**ΔV**) est significativement réduite, ce qui améliore la **stabilité de tension** dans tout le réseau. Par exemple La déviation de tension abaissée de **2.8805 p.u** (cas sans optimisation) à **1.4266 p.u** (l'intégration de 6 batteries de condensateurs) pour **KI=1**.
- L'installation de 6 batteries de condensateurs permet d'améliorer encore la tension et réduit davantage la déviation de tension, en maintenant les **niveaux de tension proches de la valeur nominale (1 p.u)**.

- Lorsque l'objectif est de minimiser la déviation de tension, on observe parfois une légère augmentation des pertes actives, soulignant l'existence d'un conflit entre les deux fonctions objectives.
- La réduction des pertes se traduit par une diminution notable du **coût annuel des pertes énergétiques**, passant par exemple de **145800 \$** à environ **80984 \$** après optimisation.
- Les courbes montrent une convergence rapide vers les solutions optimales, ce qui démontre une bonne capacité de contrôle et de stabilisation des **profils de tension** dans un réseau de distribution.

IV.4.3 Intégration des sources distribuées

Pour le réseau test IEEE 69-bus, des sources distribuées ont été placées aux jeux de barre (65, 69 et 27 pour PG1, PG2 et PG3 respectivement). Chaque source combine d'une puissance active issue de sources renouvelables (PV1, PV2, PV3, avec une capacité de 0 à 1000 kW), et une compensation de puissance réactive via des batteries de condensateurs (Qc1, Qc2, Qc3, limitées à 0 à 500 kVAR). Le but est d'optimiser les puissances injectées par ces sources distribuées afin de réduire au minimum les pertes de puissance active totales.

IV.4.3.1 Application de l'algorithme de Slime Mould

Pour trouver les meilleures valeurs de puissance des sources distribuées, l'algorithme de Slime Mold est employé. L'objectif est d'optimiser et minimiser les pertes de puissance active totales. Les paramètres configurés pour cet algorithme génétique sont les suivants :

- Nombre de population : 30.
- Nombre d'itération maximal : 50.

	Kl=1		Kl=1.1		Kl=1.5	
Qc (kVAR)	Qc ₁	500	Qc ₁	500	Qc ₁	500
	Qc ₂	471.67676	Qc ₂	500	Qc ₂	500
	Qc ₃	211.5201	Qc ₃	239.18244	Qc ₃	411.26512
	PV1	1000	PV1	1000	PV1	1000
	PV2	600.17711	PV2	694.93237	PV2	1000
	PV3	305.07535	PV3	333.59492	PV3	503.09367
Tension minimale (p.u)	0.9278		0.9002		0.8685	
Pertes actives totales (kW)	52.4089		70.1359		182.1956	
Déviaton de tension totale (ΔV) en (p.u)	0.9805		2.0194		2.8671	
Coût annule des pertes (\$)	27546		36863		95762	

Temps d'exécution (s)	9.852384	12.653930	18.002996
-----------------------	----------	-----------	-----------

Table IV.13 : résultat d'optimisation des trois sources distribuées par l'SMA : Minimisation des Pertes actives totales

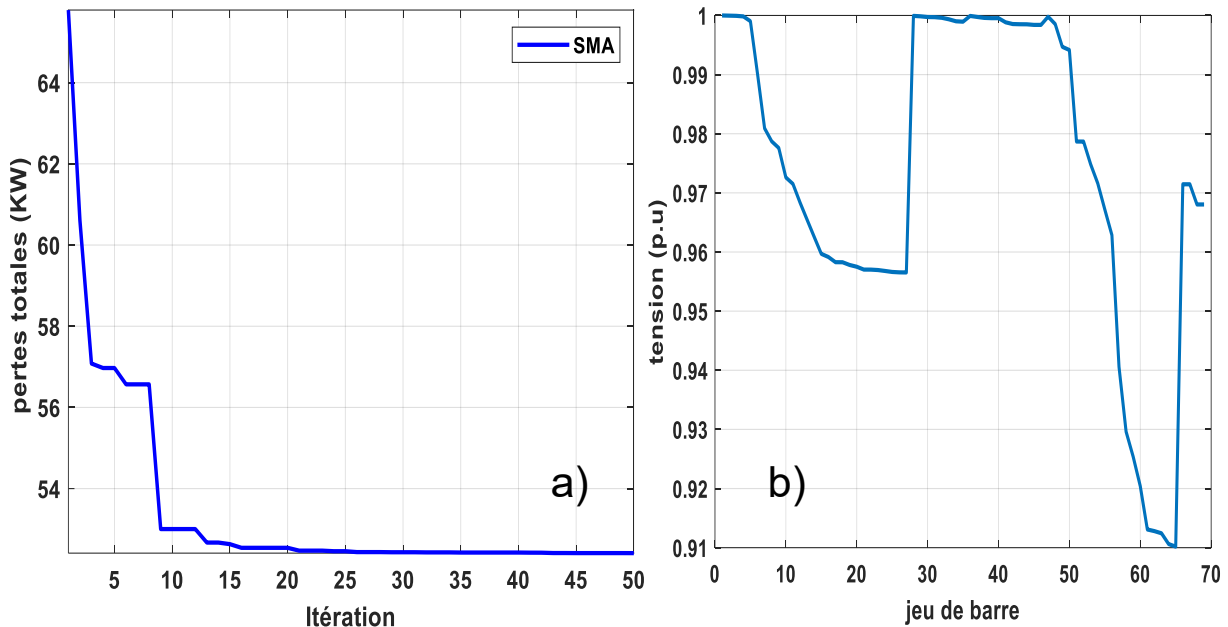


Figure IV.20: a) Courbe de convergence, b) tension aux jeux de barre pour cas normal minimisation des pertes totales : pour nombre de population = 30 et nombre d'itération maximal = 50

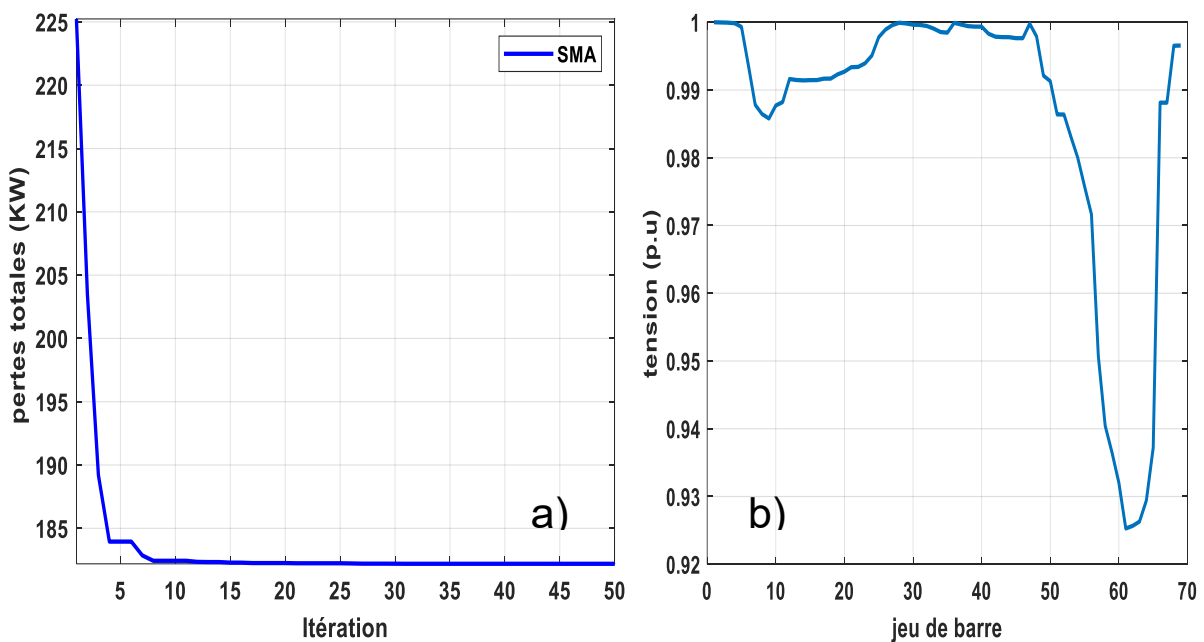


Figure IV.21: a) Courbe de convergence, b) tension aux jeux de barre pour cas anormal minimisation des pertes totales : pour nombre de population = 30 et nombre d'itération maximal = 50

IV.4.3.1.1 Interprétation des résultats

- L'injection de sources distribuée dans les jeux de barre **65,69,27** améliore significativement la tension minimale aux réseaux de distribution, particulièrement dans les cas de forte charge (**KI=1.5**). Par exemple, la tension minimale passe de **0.8560 p.u** (cas sans optimisation) à **0.8685 p.u** (cas avec optimisation).
- Pour une exploitation dans le régime normal (**KI=1**), les pertes actives totales diminuent de **224.9606 kW** à **52.4089 kW** après l'intégration des trois sources distribuées, traduisant une forte réduction des pertes par effet Joule dans les lignes électriques, ce qui permet d'améliorer considérablement le rendement énergétique du réseau.
- La déviation totale de tension (**ΔV**) est significativement réduite, ce qui améliore la stabilité de tension dans l'ensemble du réseau. Par exemple, pour **KI=1**, la déviation de tension est abaissée de **2.8805 p.u** (sans optimisation) à **0.9805 p.u** (avec l'intégration des sources distribuées).
- L'installation de trois batteries de condensateurs permet également d'améliorer la tension et de réduire la déviation de tension, en maintenant les niveaux de tension plus proches de la valeur nominale (1 p.u), bien que les performances restent inférieures à l'injection PV.
- Lorsque l'objectif est uniquement de minimiser la déviation de tension, on observe parfois une légère augmentation des pertes actives, soulignant l'existence d'un compromis entre la stabilité de tension et le rendement énergétique dans les fonctions objectives multiples.
- Le coût annuel des pertes d'énergie est fortement réduit dans le cas de l'optimisation avec injection PG, passant de **118240 \$** (sans optimisation) à seulement **27546 \$** pour **KI=1**. Cela illustre un avantage économique clair lié à l'utilisation des énergies renouvelables avec stratégie d'optimisation.
- Le temps de calcul augmente légèrement dans les cas avec optimisation PG (jusqu'à **18** secondes pour **KI=1.5**), ce qui reflète la complexité des calculs associés à une meilleure performance énergétique et tensionnelle.
- En l'absence d'optimisation, tous les indicateurs (tension, pertes, coût, stabilité) se dégradent fortement, soulignant l'importance de mettre en place des stratégies actives de régulation et de compensation pour garantir la fiabilité du réseau électrique.

- L'optimisation basée sur l'injection PG est particulièrement efficace sous des charges croissantes, contrairement aux batteries de condensateurs dont les performances stagnent ou diminuent dans les scénarios à forte charge.

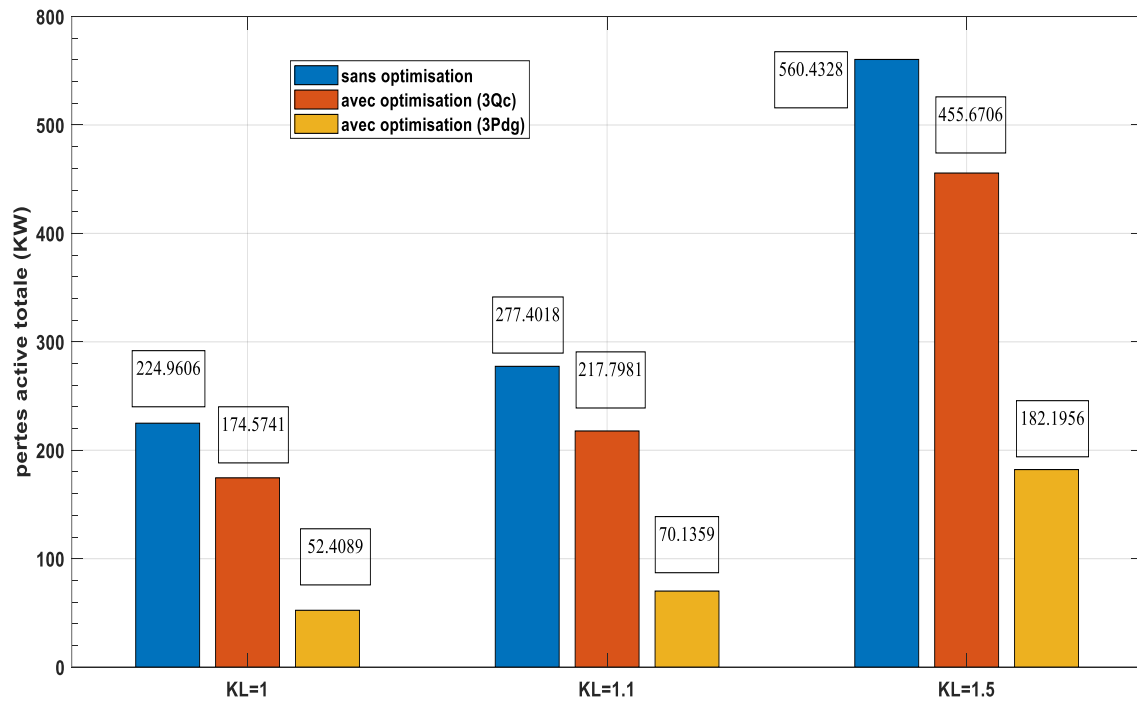


Figure IV: Etude comparative des pertes actives totales dans tous les cas d'études d'optimisation

IV.5 Conclusion

Ce chapitre a présenté une étude approfondie de l'optimisation des performances techniques du réseau de distribution IEEE 69-bus en intégrant des sources distribuées et des batteries de compensation shunt. Dans un premier temps, l'état du réseau a été analysé sans optimisation à l'aide de la méthode Backward/Forward Sweep, révélant des pertes importantes et une dégradation du profil de tension sous différentes conditions de charge.

Ensuite, l'algorithme de la Moissure Visqueuse (SMA) a été appliqué avec succès pour optimiser l'intégration des batteries de condensateurs et des sources renouvelables. Les résultats ont montré une réduction significative des pertes actives, une amélioration de la stabilité de tension et une diminution notable du coût annuel des pertes énergétiques. L'approche SMA s'est révélée particulièrement efficace dans les scénarios de forte charge, surpassant les méthodes classiques par sa capacité à équilibrer les deux fonctions objectives principales : minimisation des pertes et amélioration du profil de tension.

Ainsi, l'étude démontre l'intérêt des techniques métaheuristiques, et en particulier du SMA, pour une gestion intelligente et durable des réseaux de distribution modernes intégrant les énergies renouvelables.

Conclusion Générale

Ce mémoire a exploré de manière approfondie l'optimisation des réseaux de distribution électrique modernes en intégrant les défis posés par l'expansion rapide du secteur énergétique et l'intégration croissante des sources d'énergie renouvelable distribuées. L'étude a démontré la pertinence des méthodes métaheuristiques, notamment l'Algorithme de la Moissure Visqueuse (SMA), pour répondre efficacement aux besoins d'optimisation complexes de ces réseaux.

L'analyse détaillée a commencé par la présentation des structures et normes des réseaux électriques, en mettant en évidence les topologies et composants des réseaux de distribution modernes, ainsi que les avantages et inconvénients de l'intégration des sources d'énergie distribuées. Ensuite, les techniques d'analyse classiques, telles que l'écoulement de puissance basé sur les méthodes Backward/Forward et Newton-Raphson, ont été étudiées pour évaluer les performances des réseaux.

La contribution principale réside dans l'application de l'algorithme SMA pour l'optimisation, visant à minimiser les pertes actives totales et à réduire les écarts de tension dans le réseau IEEE 69 bus. Les résultats expérimentaux, obtenus via des simulations sous l'environnement MATLAB, ont montré des améliorations significatives des performances du réseau, prouvant l'efficacité et la robustesse de l'approche proposée. L'intégration des sources distribuées et des systèmes de compensation a permis d'atteindre un équilibre optimal entre performance, stabilité et fiabilité du réseau.

En conclusion, ce travail met en lumière l'importance des techniques métaheuristiques, et en particulier de l'algorithme SMA, comme outils prometteurs pour l'optimisation des réseaux électriques modernes. Il ouvre également la voie à des perspectives de recherche futures, telles que l'intégration d'autres types d'optimisation, l'adaptation à des réseaux de plus grande échelle, et le couplage avec des technologies émergentes telles que l'intelligence artificielle et les réseaux intelligents.

Reference

- [1] A.Abdelbaki, D.Belkhiri, Y.Lahouassa, « Calcul de courant de court-circuit dans les réseaux électriques », Mémoire d'ingéniorat de l'université de M'sila, Département d'Electronique, 2012.
- [2] Les architectures de réseaux, Schneider Electric,
- [3] Jean-Claude Sabonnadière et Nouredine Hadjsaid, « Lignes et réseaux électriques 1 : lignes d'énergie électrique » vol. 1, 2 vols, Lavoisier, Paris : Hermès Science, 2007.180p.
- [4] Mahdad Belkacem, « cours Dispatching Economique par Matlab ».
- [5] Y. Latreche, H.R.E.H. Bouchekara, K. Naidu, H. Mokhlis, W.M. Dahalan, Comprehensive Review of Radial Distribution Test Systems, DOI: 0.36227/techrxiv.12578648.v1
- [6] Alain COIFFIER, Structure des réseaux de distribution, Techniques de l'Ingénieur, 2021
- [7] Ben Deradji Selsabil, « Calcul des protections d'un départ HTA (30kv) », Mémoire master académique, Université Kaski Merbah, Ouargla, 84p, 2013-2014.
- [8] SETTOUL Samir, « Stratégies d'Intégration Optimale de Sources des Énergies Renouvelables dans le Réseau de Distribution Électrique en Considérant des Indices Techniques et Économiques », Thèse de doctorat en sciences en électrotechnique, UNIVERSITÉ DES FRÈRES MENTOURI - CONSTANTINE 1,2022.
- [9] Meisam Yahyazadeh, Hojat Rezaeeye, Optimal Placement and Sizing of Distributed Generation Using Wale Optimization Algorithm Considering Voltage Stability and Voltage Profile Improvement, Power Loss and Investment Cost Reducing, Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering, 2019.
- [10] Glover, J. D., Sarma, M. S., & Overbye, T. J. (2012). Power System Analysis and Design.
- [11] Saadat, H. (2010). Power System Analysis.
- [12] Grainger, J. J., & Stevenson, W. D. (1994). Power System Analysis.
- [13] Kundur, P. (1994). Power System Stability and Control.
- [14] Burden, R. L., & Faires, J. D. (2010). Analyse numérique.
- [15] Chapra, S. C., & Canale, R. P. (2014). Méthodes numériques pour ingénieurs.
- [16] Press, W. H., et al. (2007). Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing.

- [17] T. Gonen, "Electric Power Distribution System Engineering", CRC Press, 2014.
- [18] Arrillaga, J., & Watson, N. R. (2001). *Power System Quality Assessment*. Wiley.
- [19] Becquerel, A. E. (1839). "Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires". Comptes Rendus de l'Académie des Sciences.
- [20] Green, M. A. (1982). "Solar Cells: Operating Principles, Technology, and System Applications". Prentice-Hall.
- [21] International Energy Agency (IEA). (2020). "Trends in Photovoltaic Applications".
- [22] Hasni Aissa Haroun, « Gestion optimale de l'intégration des sources PV au réseau distribution par utilisation des méthodes : GA, PSO, GWO », MÉMOIRE DE MASTER en électrotechnique, Université Mohamed Khider de Biskra ;2022
- [23] BERRACHED Mohammed et LARAMI Baha Eddine, "Gestion optimale des réseaux de distribution en présence des source distribuées", MEMOIRE DE MASTER, Université Mohamed Khider de Biskra, 2023.
- [24] Shimin Li, Huiling Chen*, Mingjing Wange, Ali Asghar Heidari, Seyedali Mirjalili, "Slime mould algorithm: A new method for stochastic optimization", *Future Generation Computer Systems* 111 (2020) 300–323.
- [25] SOUHIL MOUASSA, AHMED ALTHOBAITI², FRANCISCO JURADO, SHERIF S. M. GHONEIM, "Novel Design of Slime Mould Optimizer for the Solution of Optimal Power Flow Problems Incorporating Intermittent Sources: A Case Study of Algerian Electricity Grid", Vol 10, pp. 22646- 22661, 2022
- [26] Talbi, E.-G. (2002). *A unified taxonomy of hybrid metaheuristics*. Thèse de doctorat, Université de Lille.
- [27] Dupont, L. (2015). *Optimisation par métaheuristiques appliquée aux problèmes de tournées*. Mémoire de Master, Université Paris-Dauphine.
- [28] Boyd, S., & Vandenberghe, L. (2004). *Convex Optimization*. Cambridge University Press.
- [29] Nocedal, J., & Wright, S. J. (2006). *Numerical Optimization*. Springer.
- [30] Bazaraa, M. S., Jarvis, J. J., & Sherali, H. D. (2013). *Linear Programming and Network Flows*. Wiley

- [31] Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). "Particle Swarm Optimization", Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, pp. 1942-1948.

Annexe

Branch N°	Bus From	Bus To	R (p.u.)	X (p.u.)	PL (Bus To) (kW)	QL (Bus To) (kVAR)	V (Bus To) (pu) NR	V (Bus To) (pu) PQSUM
1	1	2	0.0000	0.0001	0.00	0.00	1.0000	1.0000
2	2	3	0.0000	0.0001	0.00	0.00	0.9999	0.9999
3	3	4	0.0001	0.0002	0.00	0.00	0.9998	0.9998
4	4	5	0.0016	0.0018	0.00	0.00	0.9990	0.9990
5	5	6	0.0228	0.0116	2.60	2.20	0.9901	0.9901
6	6	7	0.0238	0.0121	40.40	30.00	0.9808	0.9808
7	7	8	0.0058	0.0029	75.00	54.00	0.9786	0.9786
8	8	9	0.0031	0.0016	30.00	22.00	0.9774	0.9774
9	9	10	0.0511	0.0169	28.00	19.00	0.9724	0.9724
10	10	11	0.0117	0.0039	145.00	104.00	0.9713	0.9713
11	11	12	0.0444	0.0147	145.00	104.00	0.9682	0.9682
12	12	13	0.0643	0.0212	8.00	5.50	0.9653	0.9653
13	13	14	0.0651	0.0215	8.00	5.50	0.9624	0.9624
14	14	15	0.0660	0.0218	0.00	0.00	0.9595	0.9595
15	15	16	0.0123	0.0041	45.50	30.00	0.9590	0.9590
16	16	17	0.0234	0.0077	60.00	35.00	0.9581	0.9581
17	17	18	0.0003	0.0001	60.00	35.00	0.9581	0.9581
18	18	19	0.0204	0.0068	0.00	0.00	0.9576	0.9576
19	19	20	0.0131	0.0043	1.00	0.60	0.9573	0.9573
20	20	21	0.0213	0.0070	114.00	81.00	0.9568	0.9568
21	21	22	0.0009	0.0003	5.30	3.50	0.9568	0.9568
22	22	23	0.0099	0.0033	0.00	0.00	0.9567	0.9567
23	23	24	0.0216	0.0071	28.00	20.00	0.9566	0.9566
24	24	25	0.0467	0.0154	0.00	0.00	0.9564	0.9564
25	25	26	0.0193	0.0064	14.00	10.00	0.9563	0.9563
26	26	27	0.0108	0.0036	14.00	10.00	0.9563	0.9563
27	3	28	0.0003	0.0007	26.00	18.60	0.9999	0.9999
28	28	29	0.0040	0.0098	26.00	18.60	0.9999	0.9999
29	29	30	0.0248	0.0082	0.00	0.00	0.9997	0.9997
30	30	31	0.0044	0.0014	0.00	0.00	0.9997	0.9997
31	31	32	0.0219	0.0072	0.00	0.00	0.9996	0.9996
32	32	33	0.0523	0.0176	14.00	10.00	0.9993	0.9993
33	33	34	0.1066	0.0352	19.50	14.00	0.9990	0.9990
34	34	35	0.0920	0.0304	6.00	4.00	0.9989	0.9989
35	3	36	0.0003	0.0007	26.00	18.60	0.9999	0.9999
36	36	37	0.0040	0.0098	26.00	18.60	0.9997	0.9997
37	37	38	0.0066	0.0077	0.00	0.00	0.9996	0.9996
38	38	39	0.0019	0.0022	24.00	17.00	0.9995	0.9995
39	39	40	0.0001	0.0001	24.00	17.00	0.9995	0.9995
40	40	41	0.0454	0.0531	1.20	1.00	0.9988	0.9988

41	41	42	0.0193	0.0226	0.00	0.00	0.9986	0.9986
42	42	43	0.0026	0.0030	6.00	4.30	0.9985	0.9985
43	43	44	0.0006	0.0007	0.00	0.00	0.9985	0.9985
44	44	45	0.0068	0.0086	39.20	26.30	0.9984	0.9984
45	45	46	0.0001	0.0001	39.20	26.30	0.9984	0.9984
46	4	47	0.0002	0.0005	0.00	0.00	0.9998	0.9998
47	47	48	0.0053	0.0130	79.00	56.40	0.9985	0.9985
48	48	49	0.0181	0.0442	384.70	274.50	0.9947	0.9947
49	49	50	0.0051	0.0125	384.70	274.50	0.9942	0.9942
50	8	51	0.0058	0.0030	40.50	28.30	0.9785	0.9785
51	51	52	0.0207	0.0070	3.60	2.70	0.9785	0.9785
52	9	53	0.0109	0.0055	4.30	3.50	0.9747	0.9747
53	53	54	0.0127	0.0065	26.40	19.00	0.9714	0.9714
54	54	55	0.0177	0.0090	24.00	17.20	0.9669	0.9669
55	55	56	0.0176	0.0089	0.00	0.00	0.9626	0.9626
56	56	57	0.0992	0.0333	0.00	0.00	0.9401	0.9401
57	57	58	0.0489	0.0164	0.00	0.00	0.9290	0.9290
58	58	59	0.0190	0.0063	100.00	72.00	0.9248	0.9248
59	59	60	0.0241	0.0073	0.00	0.00	0.9197	0.9197
60	60	61	0.0317	0.0161	1244.00	888.00	0.9123	0.9123
61	61	62	0.0061	0.0031	32.00	23.00	0.9120	0.9120
62	62	63	0.0090	0.0046	0.00	0.00	0.9117	0.9117
63	63	64	0.0443	0.0226	227.00	162.00	0.9098	0.9098
64	64	65	0.0650	0.0331	59.00	42.00	0.9092	0.9092
65	11	66	0.0126	0.0038	18.00	13.00	0.9713	0.9713
66	66	67	0.0003	0.0001	18.00	13.00	0.9713	0.9713
67	12	68	0.0461	0.0152	28.00	20.00	0.9678	0.9678
68	68	69	0.0003	0.0001	28.00	20.00	0.9678	0.9678

