

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la
Recherche Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Électromécanique

Thème

**Intégration d'un PVS sur les réseaux
électriques**

Réalisé par :

- Gueniaa bilal.
- Bourouba abdelkrim.
- Ahmouda miloud.
- Ahmed Matouh

Encadré par :

- Dr. REMHA Souhaib

Co-Encadré par :
LAOUAMER Mosbah

Année Universitaire 2022-2023



Remerciements

Au nom de mes amis diplômés, je suis accompagné de Bourouba Abd El Karim, Matouh Ahmed et Gueniaa Bilal.

Loué soit Dieu, qui nous a accordé le succès et la direction, nous a accordé la fermeté et nous a aidés à terminer ce travail après avoir voyagé pour mettre des points sur les lettres et révéler ce qui se cache derrière le rideau de la connaissance et de la connaissance, car voici les fruits de nos connaissances qui ont mûri et il est temps de les récolter

Ce sont nos paroles éparées, que nous chuchotons à l'oreille de chacun qui ouvrira cette note, pour y boire ce qu'il veut et désire, et critiquer ce qu'il rejette et désire.

Ce sont aussi des mots de remerciement à tous ceux qui nous ont poussés et insufflé l'espoir et la volonté en nous, à tous les honorables professeurs, REMHA Souhaib, MILOUDI Khaled, MAHMMOUDI Abdelkader, et à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin.

Mes simples mots ne rempliront pas le droit de tous ceux qui m'ont aidé, mais ils sont une preuve de gratitude de ma part et de vous.

Mes chers parents, les mots du monde n'ont pu décrire l'étendue de ma gratitude envers vous.

Je souhaite le succès et le succès permanent à moi et à vous tous.

Merci à tous



Sommaire

Sommaire	i
Liste des figures	iv
Liste des tableaux	vi
Acronymes et abréviations	vii
Nomenclature	viii
Introduction générale	1

Chapitre 1 : Généralités sur les réseaux électriques et la GED

1.1 Introduction	3
1.2 Organisation des réseaux électriques	4
1.2.1 Production	4
1.2.2 Transport	6
1.2.3 Distribution	7
1.2.4 Consommation	8
1.3 Réseaux électriques de distribution	9
1.3.1 Postes source HTB / HTA	9
1.3.2 Architectures des réseaux de distribution HTA	10
1.3.2.1 Réseaux ruraux	10
1.3.2.2 Réseaux urbains	11
1.3.2.2.1 Structure en double dérivation	11
1.3.2.2.2 Structures en coupure d'artère	12
1.4 Production décentralisée	16
1.4.1 Définition	16
1.4.2 Types de production décentralisée	16
1.4.2.1 Classification en fonction du type d'énergie primaire utilisée	17
1.4.2.2 Classification de GED à base de type de puissance délivrée	19
1.7 Impact de la GED sur le réseau de distribution	20

1.9 Conclusion	22
----------------------	----

Chapitre 2 : Ecoulement de puissance dans les réseaux de distribution

2.1 Introduction	23
2.2 Unité relative	23
2.3 Modélisation des branches et des charges du réseau de distribution	24
2.3.1 Modélisation des branches	24
2.3.2 Modélisation des charges	24
2.3.2.1 Modèle périodique de charge constante	25
2.3.2.2 Modèle de la charge statique	25
2.4 Modèle de calcul d'écoulement de puissance	26
2.4.1 Modèle AC de calcul d'écoulement de puissance	26
2.4.2 Algorithme de balayage avant et arrière	27
2.4.3 Organigramme de la solution d'écoulement de puissance	30
2.5 Applications numériques	31
2.5.1 Réseau test IEEE 33 nœuds	31
2.5.3 Résultats d'EP (différents niveaux de charge).....	32
2.6 Conclusion	34

Chapitre 3 : Optimisation par les méthodes métaheuristiques

3.1 Introduction.....	35
3.2 Méthodologie de conception	35
3.2.1 Formulation du problème d'optimisation	35
3.2.2.1 Fonction objectif	36
3.2.2 Paramètres de conception	36
3.3 Méthodes d'optimisation	36
3.3.1 Méthodes conventionnelles	37
3.3.1.1 Techniques analytiques	37
3.3.1.2 Techniques déterministes	37
3.3.2 Méthodes métaheuristiques	37
3.4 Algorithmes des métaheuristiques les plus répandues	38
3.4.1 Algorithmes génétiques	38
3.4.2 Algorithme à essaim de particules	39

3.4.3 Algorithme d'optimisation de colonie de fourmis	41
3.4.4 Algorithme d'optimisation de colonie d'abeilles artificielles	43
3.4.5 Algorithme d'évolution différentielle	43
3.4.6 Algorithme par sauts de grenouilles	46
3.4.7 Algorithme de coucou (CSA)	48
3.4.8 Algorithme des chauves-souris	49
3.5 Conclusion	52

Chapitre 4 : Insertion optimale des PVS dans le réseau de distribution

4.1 Introduction	53
4.2 Organisation du réseau de distribution en présence des unités PVS	53
4.3 Formulation du problème d'optimisation.....	54
4.3.1 Fonction objectif	54
4.3.2 Contraintes	54
4.3.3 Variables de contrôle	56
4.4 Applications	57
4.4.1 Résultats et discussions.	57
4.5 Conclusion	62
Conclusion générale.....	63
Bibliographie.....	64

Liste des figures

Figure 1.1 Architecture verticale d'un réseau d'énergie électrique	4
Figure 1.2 Source de la production mondiale d'électricité pour l'année 2018	5
Figure 1.3 Puissance installée par type de centrale électrique à la fin de l'année 2017...	6
Figure 1.4 Courbe de charge de la journée du 03 février 2021, source OSE	8
Figure 1.5 Architecture des postes HTB/HTA	10
Figure 1.6 Réseau rural radial	11
Figure 1.7 Structure en double dérivation.....	12
Figure 1.8 Structure en coupure d'artère	12
Figure 1.9 Structure en fuseau.....	13
Figure 1.10 Structure en épi	13
Figure 1.11 Structure maillée ou la grille	14
Figure 1.12 Structure maille	15
Figure 1.13 Boucles ou pétales de marguerite	15
Figure 1.14 Classification des GEDs sur la base de la puissance nominale.....	16
Figure. 1.15 Type des parcs éoliens.....	18
Figure 2.1 Représentation de deux nœuds dans un réseau de distribution radial.....	24
Figure 2.2 Organigramme de l'algorithme de balayage arrière / avant.....	30
Figure 2.4 Représentation simplifiée du réseau de distribution IEEE 33 nœuds.....	32
Figure 2.5 Profil de tension pour les trois niveaux de charge du réseau IEEE 33 nœuds.....	33
Figure 2.6 Pertes totales de puissance active et réactive du réseau IEEE 33 nœuds pour les trois niveaux de charge.....	34
Figure 3.1 Démarches de résolution d'un problème d'optimisation.....	35
Figure 3.2 Schéma de principe du déplacement d'une particule.....	40
Figure 3.3 Expérience de sélection des branches par une colonie de fourmis.....	42
Figure 3.4 Exemple de croisement ($D = 7$).....	45
Figure 3.5 Règle originale du saut de grenouille.....	47
Figure 3.6 Pseudo code de l'algorithme CS.....	48
Figure 3.7 Pseudo code de l'algorithme des chauves-souris (BA).....	51
Figure 4.1 Organisation du réseau de distribution en présence des PVS.....	53
Figure 4.2 Principe d'optimisation de l'emplacement et de la capacité des PVS.....	56

Figure 4.3 Caractéristique de convergence des pertes actives par BA en présence des PVS avec une charge faible.....	57
Figure 4.4 Caractéristique de convergence des pertes actives par BA en présence des PVS avec une charge nominale.....	58
Figure 4.5 Caractéristique de convergence des pertes actives par BA en présence des PVS avec une charge forte.....	58
Figure 4.6 Profil de tension avant et après installation des PVS pour une charge faible.....	60
Figure 4.7 Profil de tension avant et après installation des PVS pour une charge nominale.....	60
Figure 4.8 Profil de tension avant et après installation des PVS pour une charge forte.....	60
Figure 4.9 Pertes totales de puissance active avant et après installation des PVS avec leurs réductions pour les trois niveaux de charge.....	61
Figure 4.10 Pertes totales de puissance réactive avant et après installation des PVS avec leurs réductions pour les trois niveaux de charge.....	61



Liste des tableaux

Tableau 1.1 Evolution de l'énergie électrique produite sur la période 1980-2017, par type de centrale électrique.....	6
Tableau 1.2 Tableau des domaines de tension	7
Tableau 1.3 Répartition des clients et leur consommation d'électricité en Algérie pour l'année 2017.....	9
Tableau 2.1 Solution de l'écoulement de puissances du réseau IEEE 33 nœuds pour différents niveaux de charge.	33
Tableau 4.1 Résultats obtenus par BA pour différents niveaux de charge.....	59
Tableau 5.5 Amplitudes de tension après installation des PVS dans le réseau de distribution IEEE 33 nœuds pour trois niveaux de charge	59
Tableau 4.3 Résultats obtenus par BA comparés à CSA, SLFA et à GA.....	62

Acronymes et abréviations

HT	Haute Tension
HTB	Haute Tension catégorie B
HTA	Haute Tension catégorie A
BTB	Basse Tension catégorie B
BTA	Basse Tension catégorie A
TBT	Très Basse Tension
SONELGAZ	Société Nationale d'Electricité et du Gaz
OSE	Opérateur du Système Electrique
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
AIE	Agence Internationale de l'Energie
GED	Génération d'Energie Décentralisée
LP	Linear Programming
NLP	Non-Linear Programming
GA	Genetic Algorithm
ACO	Ant Colony Optimisation
ABC	Artificial Bee Colony
SFLA	Shuffled Frog-Leaping Algorithm
CSA	Cuckoo Search Algorithm
PSO	Particle Swarm Optimization
BA	Bat Algorithm
p.u	Per Unit

Nomenclature

S_{Base}	Puissance de base
V_{Base}	Tension de base
R_i	Résistance de la branche i
X_i	Réactance de la branche i
P_G, Q_G	Puissances active et réactive générées au nœud de source
P_{Li}, Q_{Li}	Puissances active et réactive demandées au nœud i
$P_{loss,i}, Q_{loss,i}$	Pertes de puissance active et réactive de la ligne i .
P_{PVS_i}, Q_{PVS_i}	Puissances active et réactive générées par la $i^{\text{ème}}$ PVS
$P_{PVS_i}^{Min}, Q_{PVS_i}^{Min}$	Puissances active et réactive minimales générées par la $i^{\text{ème}}$ PVS
$P_{T,Loss,wo}$	Perte totale de puissance active du cas de base
V_i	Tension du nœud i
$V_{min,i}, V_{max,i}$	Tension minimale et maximale du nœud i
V_{ref}	Tension de référence
VD	Déviations de la tension
S_{li}	Puissance apparente transmise dans la $i^{\text{ème}}$ ligne
S_{li}^{max}	Puissance apparente maximale transmise dans la $i^{\text{ème}}$ ligne
Nb	Nombre total des branches du réseau
Nn	Nombre total des charges du réseau
$NPVS$	Nombre total des sources photovoltaïques
X^T	Vecteur des variables d'état du système
K_V	Facteur de pénalité de tension
K_S	Facteur de pénalité de puissance
$H(V)$	Fonction de pénalisation des violations de la tension des nœuds
$H(S)$	Fonction de pénalisation des violations de la puissance parcourant la ligne
F_{Obj}	Fonction objectif

Introduction générale

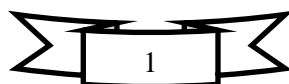
Le système électrique classique est caractérisé par un nombre relativement faible de grandes centrales électriques, dites centralisées, pour répondre à la demande d'énergie électrique. Ces centrales sont construites en fonction de l'estimation de la demande pour une certaine période de temps. Cependant, certaines contraintes limitent l'expansion et l'utilisation de ces grandes centrales et peuvent induire un déplacement vers une utilisation plus étendue de la production décentralisée (génération d'énergie dispersée (GED)). Cette manière de production d'énergie est destinée à être produite localement (au plus près des centres de consommation) [1], généralement insérées au niveau du réseau de distribution.

Cette forme de production a entraîné des changements radicaux sur les métiers de la génération, du traitement et de la distribution de l'énergie électrique et remet en cause la planification, la conception, le fonctionnement et l'exploitation de ces réseaux. En effet, l'introduction de ce type de production dans les réseaux de distribution peut avoir des conséquences importantes sur la circulation des flux énergétiques et donc sur la philosophie et l'implémentation du système de gestion et de protection du réseau, et cela est dû au fait que ces réseaux ne sont pas conçus pour accueillir cette forme de production. Par ailleurs, l'introduction de la production décentralisée dans les réseaux de distribution a pour objectif de rapprocher la production des points de consommation afin de réduire la charge fournie par le réseau de transport, réduire les transites de puissances sur les lignes de transport et donc le coût de l'énergie, soulager les transformateurs des postes sources, améliorer la sécurité du réseau de distribution et lui permettre d'être indépendant du réseau de transport en cas d'urgence [2].

Cette introduction de production au sein des réseaux existants n'est pas sans impacts négatifs sur ceux-ci (le dépassement des capacités de transits des ouvrages, l'emplacement non optimal des GEDs pouvant influencer sur le profil de tension qui peut dépasser les limites acceptables, le dysfonctionnement des protections contre les courts-circuits, etc.). Pour cela, ces problèmes doivent être examinés profondément entre les producteurs et les gestionnaires de réseaux.

Le problème de l'optimisation de l'emplacement et de la capacité des unités GEDs dans le réseau de distribution ne peut être séparé de l'écoulement de puissance.

Le travail présenté dans ce mémoire est organisé en quatre chapitres répartis comme suit :



Introduction générale

Le premier chapitre est consacré à quelques généralités sur les réseaux électrique et plus particulièrement à l'étude des réseaux de distribution et la production décentralisée.

Le deuxième chapitre s'intéresse à la présentation d'une technique basée sur le balayage avant et arrière de la ligne du réseau pour le calcul de l'écoulement de puissance dans les réseaux de distribution. Cette technique est appliquée sur un réseau de distribution IEEE 33 nœuds avec trois niveau de charge.

Le troisième chapitre est réservé à la présentation des méthodes d'optimisation les plus utilisés dans le domaine de l'électrotechnique et plus particulièrement à l'algorithme des chauves-souris (BA) employé dans nos étude.

Le quatrième chapitre se concentre sur l'application de algorithme proposé dans l'optimisation de l'emplacement et de la capacité des PVS. Une seule fonction objective est considérée dans ce problème (minimisation des pertes de puissance active). La méthode proposée est appliquée sur un réseau de distribution IEEE 33 nœuds avec trois niveaux de charge.

Finalement, pour clôturer ce travail, une conclusion générale, perspectives et propositions envisagées pour poursuivre cette recherche sont présentées.

Chapitre 1

Généralités sur les réseaux électriques et la GED

1.1 Introduction

Aujourd'hui, l'énergie électrique joue un rôle très important dans tous les aspects de notre vie quotidienne (transport, éclairage,...) et chaque pays considère cette énergie nécessaire pour son développement social et économique. Même les moindres problèmes d'origine électriques influent considérablement sur la continuité des activités économiques. Par conséquent, la possession d'un réseau électrique fiable et économique fonctionnant convenablement et assurant une continuité du service et une bonne qualité d'énergie est devenu primordial afin de contribuer positivement au développement de notre société moderne.

Les réseaux électriques sont utilisés à l'origine pour acheminer l'énergie depuis les grands centres de production jusqu'aux centres de consommation en passant par les réseaux électriques de transport et de distribution. Le réseau de distribution est l'une des parties les plus importantes du réseau électrique et l'un des principaux éléments du système électrique, qui peut être défini comme une liaison électrique entre le réseau de transport et les consommateurs finaux.

Les réseaux de distribution actuels doivent changer vers des réseaux intelligents et flexibles qui intègrent au mieux les énergies renouvelables et les producteurs locaux. La libéralisation du marché et les préoccupations environnementales croissantes ont conduit à des changements majeurs dans les réseaux électriques, en particulier les réseaux de distribution avec l'arrivée massive de production décentralisée. Ce changement peut être envisagée en développant des systèmes intelligents, capables d'atténuer les impacts induits par l'introduction de productions décentralisées et/ou par la recherche de nouvelles architectures. Ces deux solutions devraient permettre l'augmentation du taux de production décentralisée dans le réseau de distribution dans les meilleures conditions économiques et de sécurité [3].

Ce chapitre s'organise autour de sept parties. Après avoir parlé de la structure générale du système électrique verticalement intégré, une description plus détaillée des réseaux de distribution et des différentes architectures associées à ce type de réseau sera donnée en deuxième partie. Les différents types de production décentralisée selon le type d'énergie primaire utilisée et le type de puissance délivrée seront ensuite passés en revue. Enfin, les impacts de la production décentralisée sur le fonctionnement de réseau de distribution seront discutés.

1.2 Organisation des réseaux électriques

La figure 1.1 illustre un réseau électrique dans sa structure verticale (transport, répartition, distribution). Physiquement, Le réseau électrique est organisé en différents niveaux de tension : le réseau de transport et de répartition auxquels sont connectés les grandes installations de production centralisée et le réseau de distribution alimentant les consommateurs finaux.

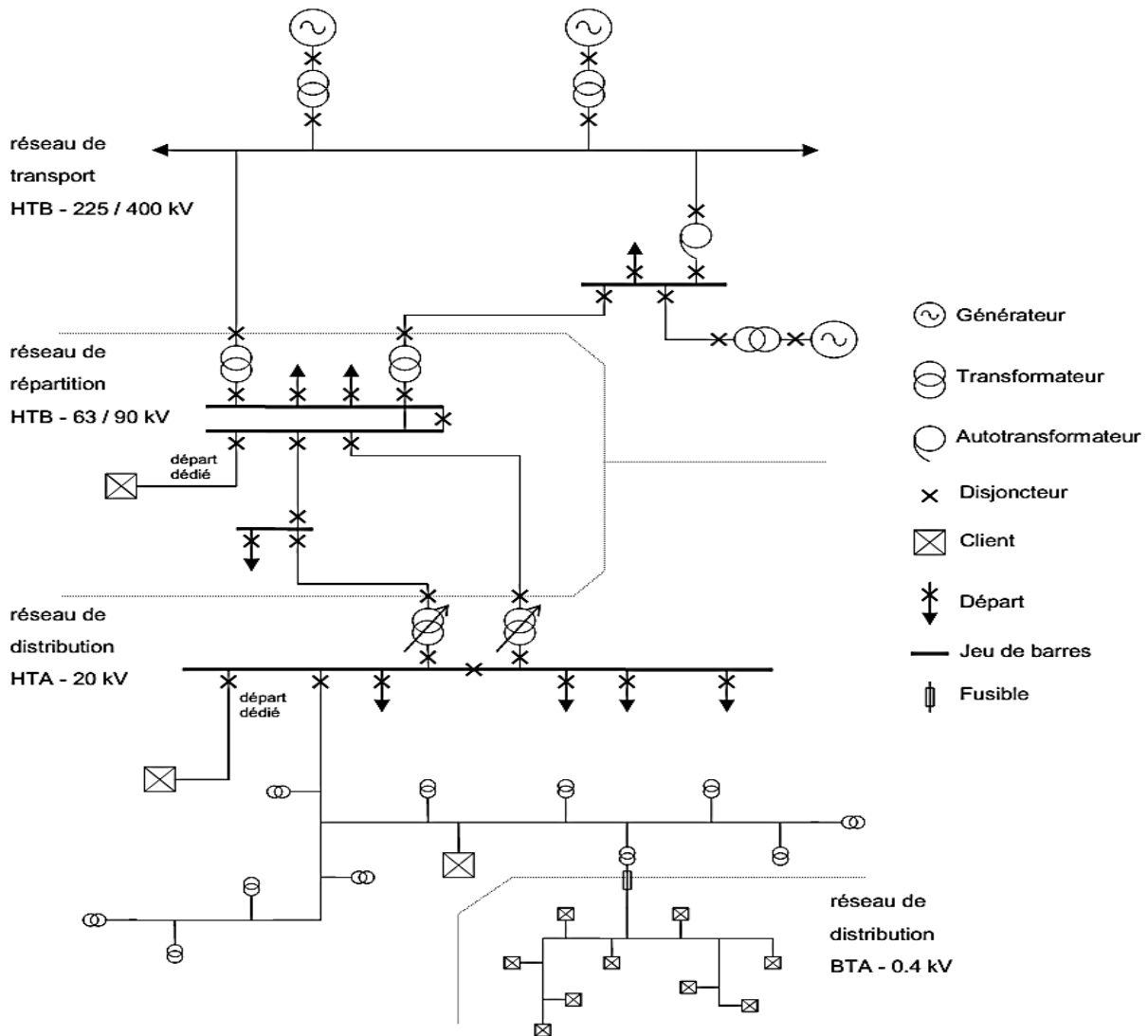


Figure 1.1 : Architecture verticale d'un réseau d'énergie électrique [4].

1.2.1 Production

Les installations de production d'énergie électrique classique sont généralement basées sur des alternateurs synchrones de grandes tailles entraînés par des différents types de turbines (à vapeur, à gaz ou hydrauliques). Ils sont connectés sur le réseau de transport via un

transformateur de groupe. L'ordre de grandeur de la puissance active produite par ces installations est compris entre 100MW pour les centrales thermiques de faibles puissances et 1650MW pour les plus puissantes tranches des centrales nucléaires [5]. La production peut être classée suivant le type d'énergie primaire utilisée pour générer de l'électricité. Selon une étude statistique menée par l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) en 2018, les deux tiers de la production électrique dans le monde proviennent d'énergies non renouvelables (fossiles). La figure 1.2 montre le diagramme circulaire de la répartition des modes de production dans le monde. Le charbon représente 38 % du total des matières premières utilisées pour produire de l'électricité dans le monde contre seulement 7 % pour le solaire et l'éolien. Le choix des modes de production d'énergie électrique dans tous les pays du monde dépend des critères géostratégiques, économiques, politiques, etc.

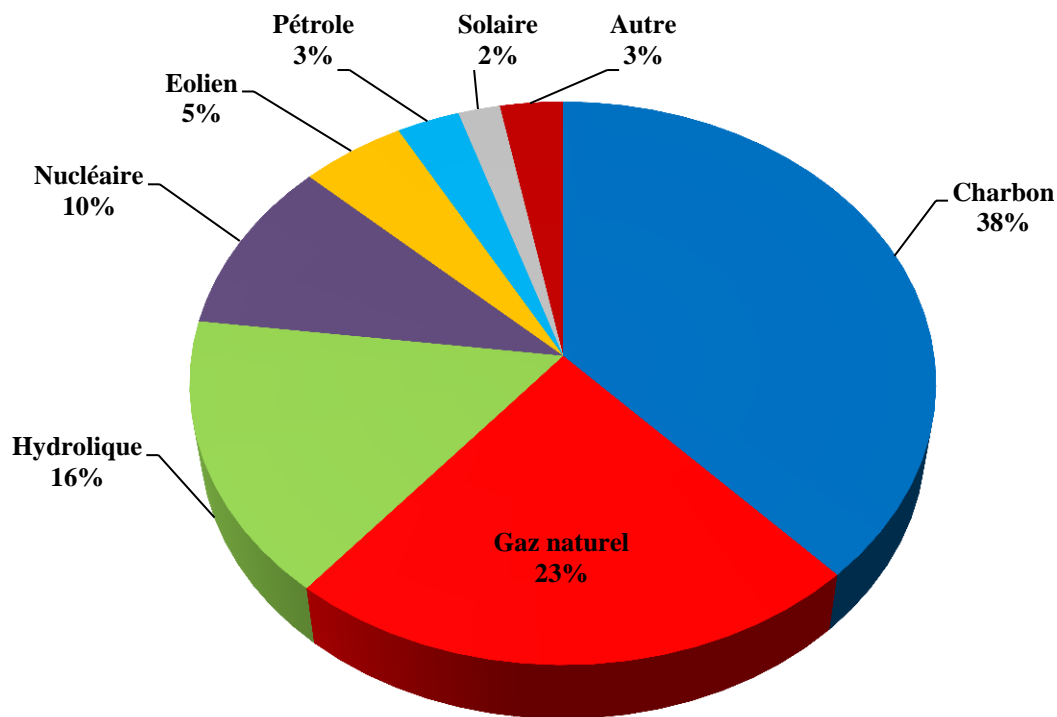


Figure 1.2 : Source de la production mondiale d'électricité pour l'année 2018 [6].

En Algérie, Le parc de production national d'électricité a connu une évolution très importante de la puissance de production d'électricité installée sur la période 2006-2017, elle est passée de 7 906 MW à 19 586 MW, soit plus de 11 000 MW additionnelle mise en service en onze ans. La figure 1.3 représente le diagramme circulaire de la puissance installée par type de centrale électrique. Ces dernières années, la production d'électricité est passée de

34 922 GWh en 2006 à 71 470 GWh en 2017. Le tableau 1.1 présente cette évolution sur la période 1980-2017 en GWh [7].

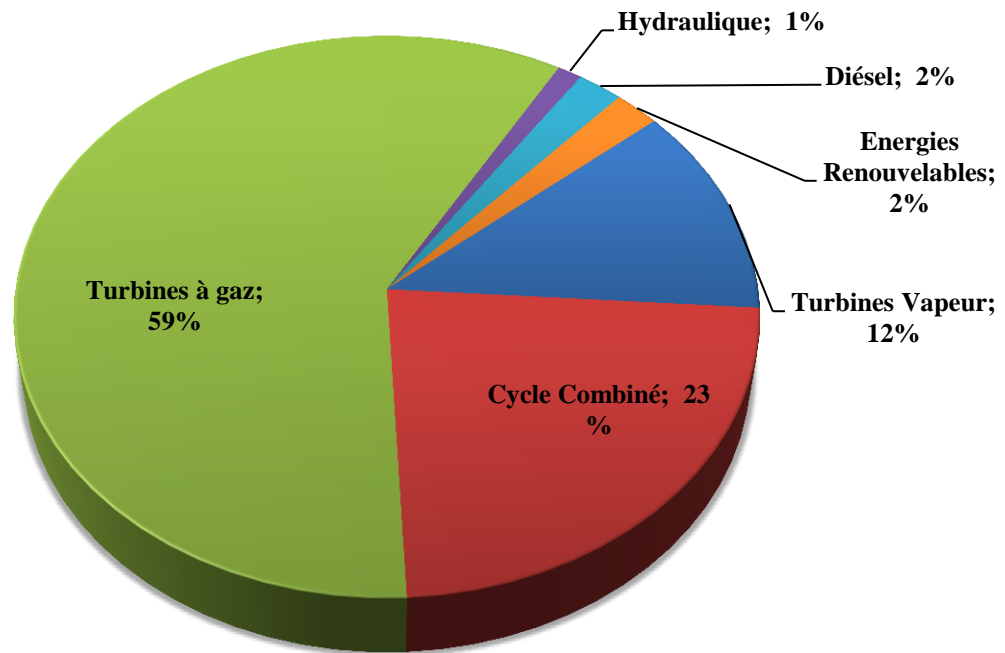


Figure 1.3 : Puissance installée par type de centrale électrique à la de fin d'année 2017 [7].

Tableau 1.1: Evolution de l'énergie électrique produite sur la période 1980-2017, par type de centrale électrique [7].

Type de centrale	1980	1990	2000	2006	2010	2016	2017
Thermique vapeur	3 621	8 397	15 757	14 558	9 692	11 512	10 074
Thermique gaz	2 223	6 704	8 830	16 463	19 564	24 441	31 009
Cycle combiné	-	-	-	3 419	15 341	28 899	29 508
Hydraulique	251	135	54	218	173	72	71
Diesel	125	216	368	264	403	281	286
Eolien	-	-	-	-	-	19	21
Photovoltaïque	-	-	-	-	-	205	500
Total	6 220	15 452	25 008	34 922	45 174	66 263	71 470

1.2.2 Transport

Le réseau de transport achemine en très haute tension (de 63 kV à 400 kV) de grandes quantités d'énergie sur de longues distances depuis des installations de production vers les réseaux de distribution ainsi que les clients industriels importants avec un minimum de pertes et de chutes de tension. Du point de vue topographique, pour des raisons de sécurité de fonctionnement, les réseaux de transport sont des réseaux maillés. Les flux de puissance sont

bidirectionnels. D’une manière générale, les réseaux de transport, comparativement aux réseaux de distribution, sont très supervisés afin de pouvoir effectuer des contrôles de la tension, de la fréquence, la répartition des flux de puissance et des coûts de production, etc.

En Algérie, le réseau national de transport de l’électricité représente plus de 29 233 km de lignes électriques en fin de 2017 [7]. Les sociétés du groupe SONELGAZ ont aussi programmé des investissements sur la période 2018-2028, pour installer 22 526 km de réseaux de transport supplémentaires à l’horizon 2028 [8]. Le tableau suivant présente les gammes de tension utilisées par le groupe SONELGAZ.

Tableau 1.2: Tableau des domaines de tension [9].

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

1.2.3 Distribution

Les réseaux de distribution, domaine de notre étude, constituent le dernier maillon de la chaîne d’acheminement de l’énergie, qui débute par les installations de production et qui se termine chez les consommateurs finaux. Ces réseaux exploitent à une tension inférieure ou égale à 50 kV. Ils sont constitués de deux types de réseaux : le réseau de distribution moyenne tension (MT) dit aussi réseau haute tension de catégorie A (HTA) avec un niveau de 10 kV et 30 kV connecté au réseau de transport, et le réseau de distribution basse tension catégorie A (BTA) de tension de 230/400 V.

Le réseau BTA représente le dernier niveau dans système électrique a pour mission de fournir l’énergie auprès les clients résidentiels. Ses tronçons sont raccordés au réseau MT dans des postes de distribution HTA/BTA. Ces niveaux de tension offrent un compromis technico-économique qui permet à la fois, de diminuer les chutes de tension, de minimiser le nombre de postes source (poste de connexion HTB/HTA) mais également de limiter les contraintes techniques et économiques inhérentes aux hautes tensions.

A la fin d'année 2017, le réseau Algérien de distribution de l'électricité représente 328 996 km de lignes électriques[5]. L'État a aussi programmé un plan de développement de réseau de distribution électrique sur la période 2018-2028 pour installer 106 563 km de lignes de distribution supplémentaires à l'horizon 2028 [8].

1.2.4 Consommation

Les utilisations de l'énergie électrique pour les consommateurs résidentiels et industriels se limitent à la production d'énergie lumineuse (éclairage), thermique (chauffage) et mécanique (moteurs électriques). Dans les réseaux électriques, les consommateurs sont appelés charges, déterminées par leurs puissances active et réactive consommées. De ces puissances mesurées sur un intervalle de temps sont déduites les puissances maximale (puissances de pointe) et moyenne. Pour connaître l'évolution de la consommation électrique au cours du temps, les courants sont mesurés au niveau des postes de transformation entre les réseaux de transport et de distribution. Par ces mesures, des courbes de consommation dit aussi courbes de charge sont tracées. Ces courbes permettent aux gestionnaires de réseau de prédire l'évolution de la charge sur les réseaux électriques et donc, entre autres, de définir les plans prévisionnels de production. La figure suivante présente l'évolution de la consommation électrique de la journée du 03 février 2021.

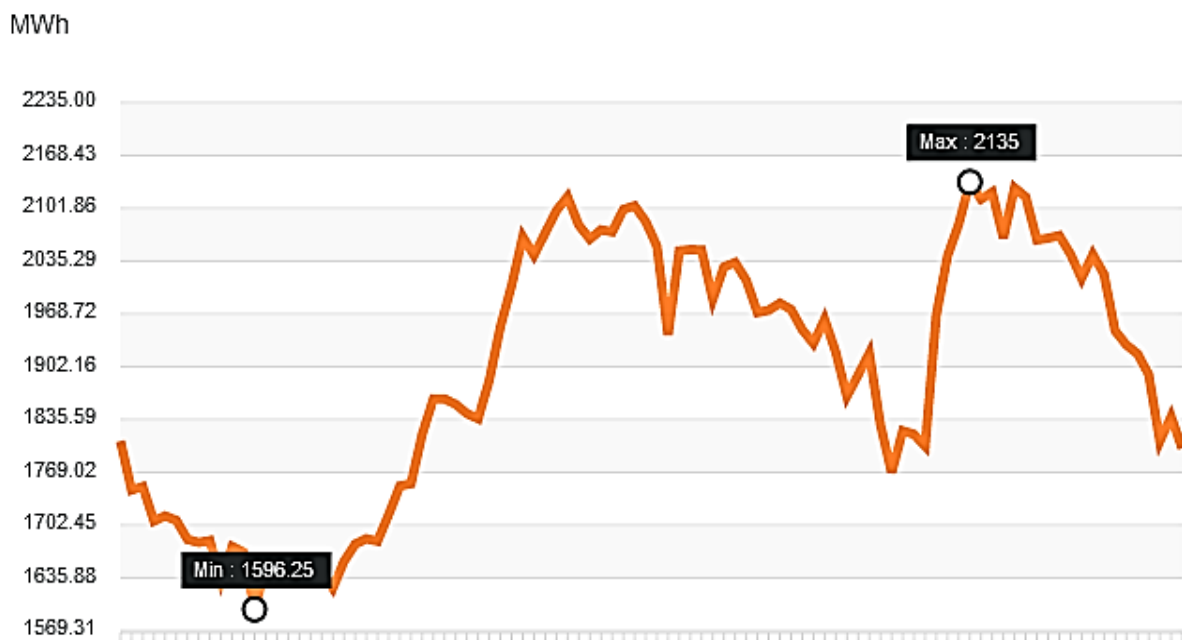


Figure 1.4 : Courbe de charge de la journée du 03 février 2021, source OSE [10].

En 2017, la consommation nationale d'électricité s'élevait à 55 148,9 GWh, répartis sur 9 184 962 consommateurs [7]. Le tableau ci-dessous présente le nombre de consommateurs et leur consommation d'électricité dans l'Algérie pour l'année 2017.

Tableau 1.3: Répartition de clients et leur consommation d'électricité en Algérie pour l'année 2017 [7].

	Nombre de clients	Consommation (GWh)
Haute Tension	115	10 801,7
Moyenne Tension	57 539	15 752,8
Basse Tension	9 127 308	32 869,2
Total	9 184 962	53 423,7

1.3 Le réseaux électriques de distribution

Les réseaux de distribution constituent l'infrastructure énergétique la plus importante du système d'énergie car c'est l'interface finale qui mène à la plupart des consommateurs d'électricité. Ils sont en général plus vastes et plus denses que les réseaux de transport qui les alimentent à travers les postes de source HTB/HTA.

1.3.1 Postes source HTB / HTA

Les postes sources HTB/HTA représentent la frontière physique entre le réseau de transport et le réseau de distribution. Le primaire des transformateurs de ces postes sources est alimenté par une arrivée HTB. Pour des raisons de fiabilité, la plupart des postes de transformation HTB sont composés de deux transformateurs fonctionnant en régime radial, donc de façon indépendante en opération normale. En cas de défaillance, des interrupteurs permettent d'isoler le transformateur en défaut et de basculer la charge sur le transformateur restant. Le réseau de transport étant maillé, le primaire des postes HTB/HTA est généralement alimenté à une deuxième arrivée HTB. Au secondaire, un ou plusieurs jeux de barre alimentent les départs HTA. La figure 1.5 indique les principales architectures des postes HTB/HTA.

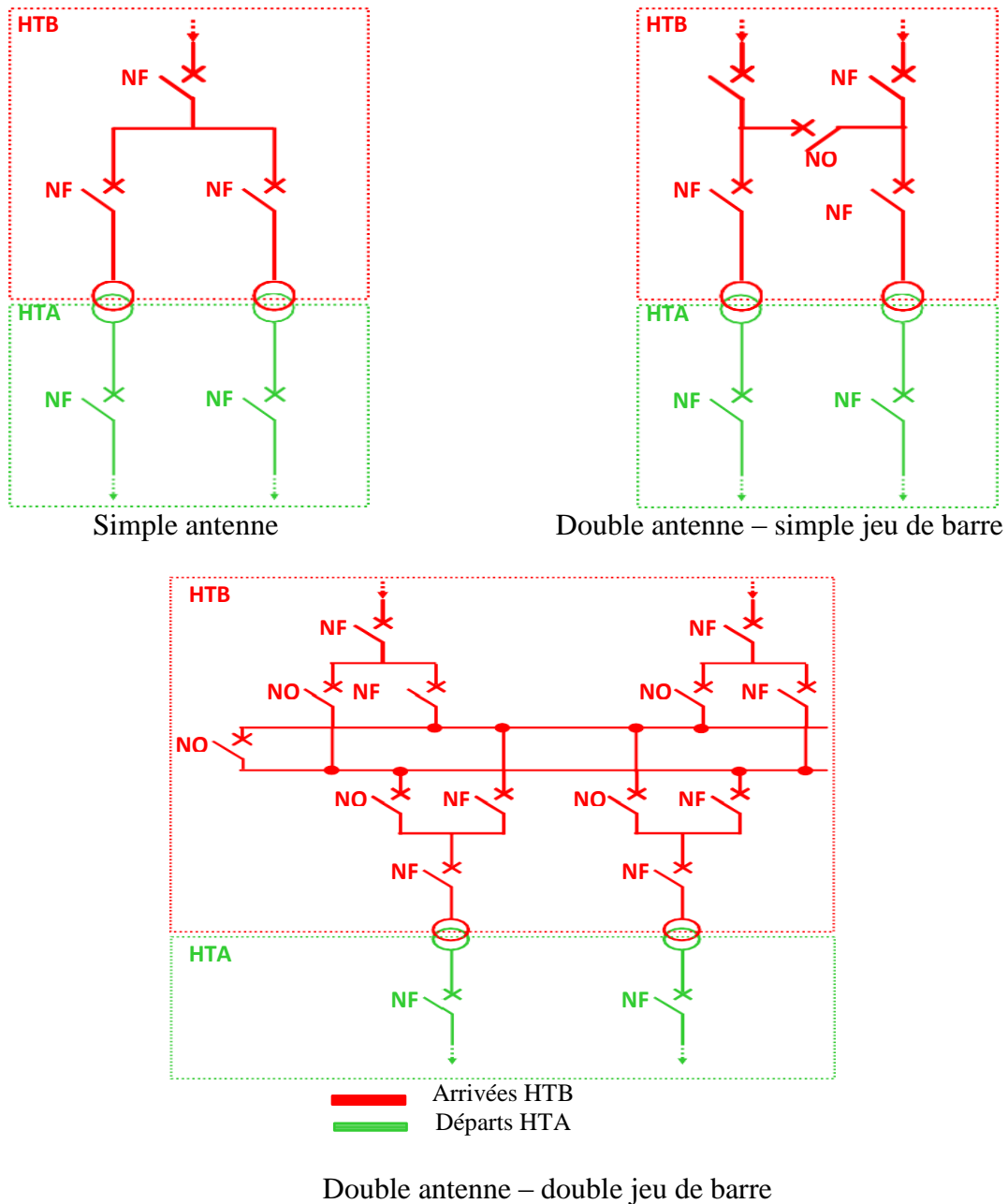


Figure 1.5 : Architecture des postes HTB/HTA [3]

1.3.2 Architectures des réseaux de distribution HTA

Dans le cas des réseaux de distribution HTA, on distingue les réseaux ruraux de types aériens et les réseaux urbains de types souterrains.

1.3.2.1 Réseaux ruraux

Les réseaux ruraux se caractérisent par une densité des charges hétérogènes et en général faibles réparties sur des grandes zones géographiques. De plus, les longueurs de conducteurs à

parcourir pour desservir les charges sont souvent grandes. En ces réseaux, on trouve des structures arborescentes bouclables mais exploitées en radial. Les boucles peuvent se situer soit entre deux départs voisins de même poste source HTB/HTA ou entre départs de différents postes sources. Ainsi, les problèmes qui peuvent intervenir dans ces réseaux sont principalement liés aux chutes de tension admissibles à l'extrémité de ligne. La figure 1.6 schématise ce type de réseau.

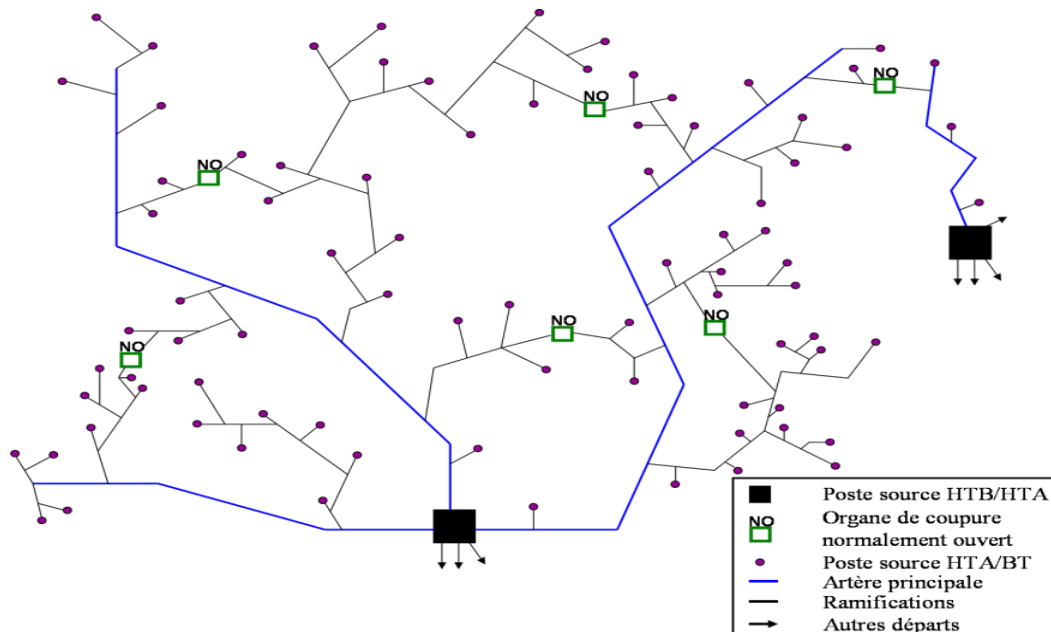


Figure 1.6 : Réseau rural radial [3]

1.3.2.2 Réseaux urbains

Contrairement aux réseaux ruraux, les réseaux urbains sont caractérisés principalement par une forte densité des charges. Dans ce type de réseau, nous trouvons de nombreuses structures. On peut distinguer les deux groupes de structures principales : les réseaux en dérivations multiples et les réseaux en coupure d'artère.

1.3.2.2.1 Structure en double dérivation

Cette structure se constitue de deux postes source HTB/HTA qui sont raccordés par deux ou plusieurs circuits triphasés placés en parallèle. Chaque poste de transformateur HTA/BTA est alimenté par un circuit principal. En cas de défaut, la charge (le poste HTA/BTA) peut être basculée sur un second circuit qui peut être un circuit de secours dédié. C'est une structure qui permet de garantir une bonne continuité d'alimentation et une reprise automatique du service. La figure 1.7 présente la structure en double dérivation d'un réseau urbain.

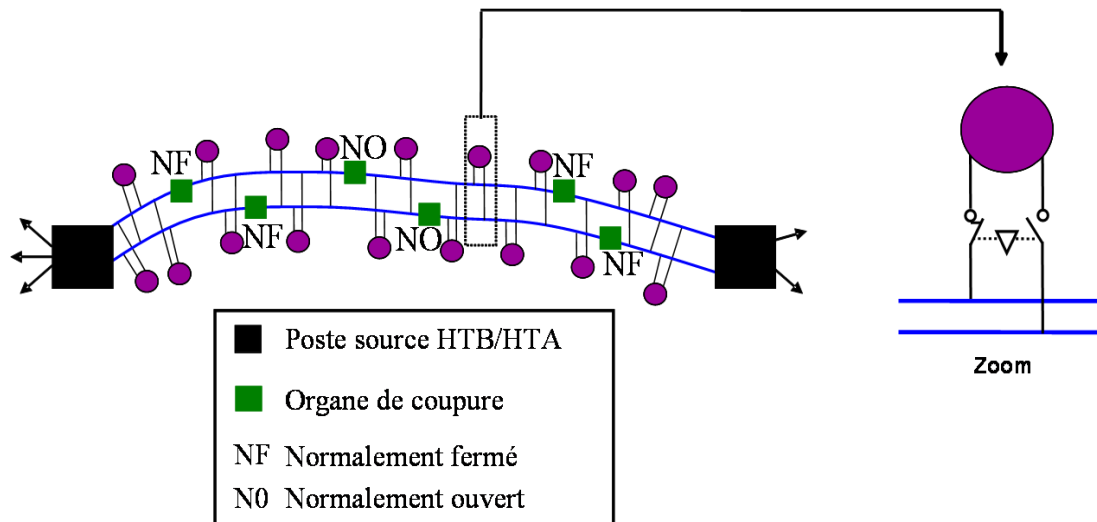


Figure 1.7 Structure en double dérivation [3]

1.3.2.2.2 Structures en coupure d'artère

Dans le cas de la structure en coupure d'artère (figure 1.8), les postes HTB/HTA sont liés deux à deux par des circuits dit artères. Chaque poste de transformateur HTA/BTA est alimenté directement à une artère qui contient un ou plusieurs organes de coupure ayant l'état normalement ouvert ou fermé afin de réaliser l'exploitation dans une structure radiale. Dans certains cas, le raccordement entre les postes sources HTB/HTA peut être renforcé par un câble de secours. Il existe plusieurs variantes de cette structure qui sont détaillés ci-dessous.

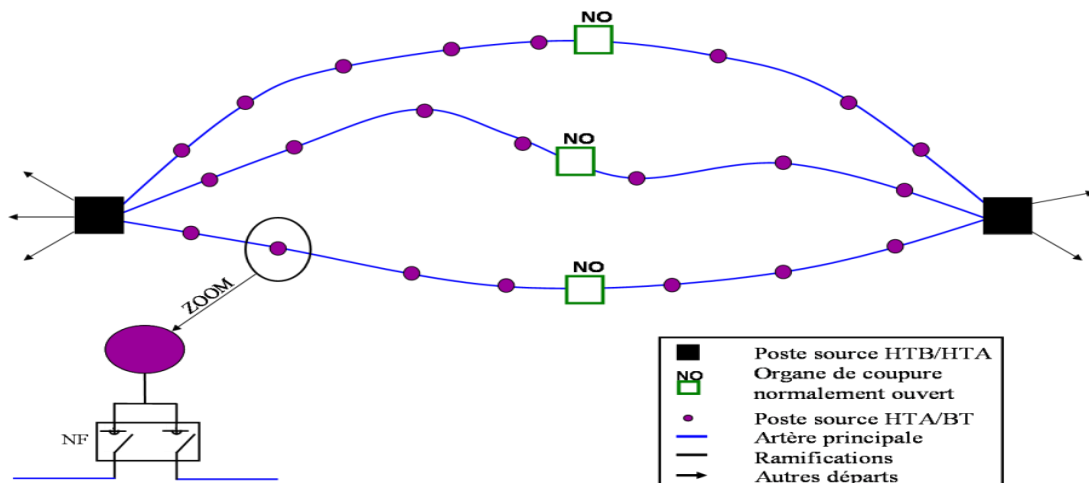


Figure 1.8 : Structure en coupure d'artère [3]

a) Structure en fuseau

Dans ce réseau, les extrémités de tous les câbles de distribution issus d'un même poste convergent vers un point unique dit point de réflexion (PR). Ce dernier (le PR) peut être

considéré comme un lieu privilégié pour créer de nouvelles postes de transformation HTB/HTA dans le futur. Le point de réflexion peut être aussi raccordé par un câble secours avec le poste HTB/HTA. C'est une structure simple et son exploitation facile. De plus, elle permet une bonne qualité de fourniture. La figure 1.9 présente la structure en fuseau du réseau urbain.

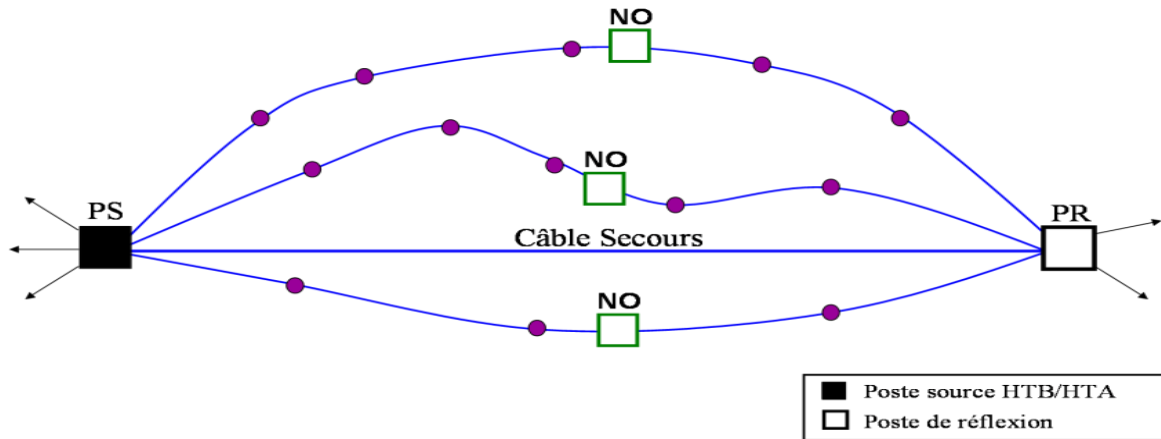


Figure 1.9 Structure en fuseau [3].

b) Structure en épi

La caractéristique de cette structure est qu'il y a plusieurs postes de réflexion, qui sont raccordés par le câble de secours les uns après les autres, puis connectés au poste source HTB/HTA par des câbles. La structure en épi permet de développer le réseau de manière plus économique et flexible autour d'un même poste de travail que celle en fuseau. De plus, elle prend en compte la répartition réelle de la charge et minimise finalement la longueur totale des lignes par rapport à la structure en fuseau. La structure en épi du réseau urbain est représentée dans la figure 1.10.

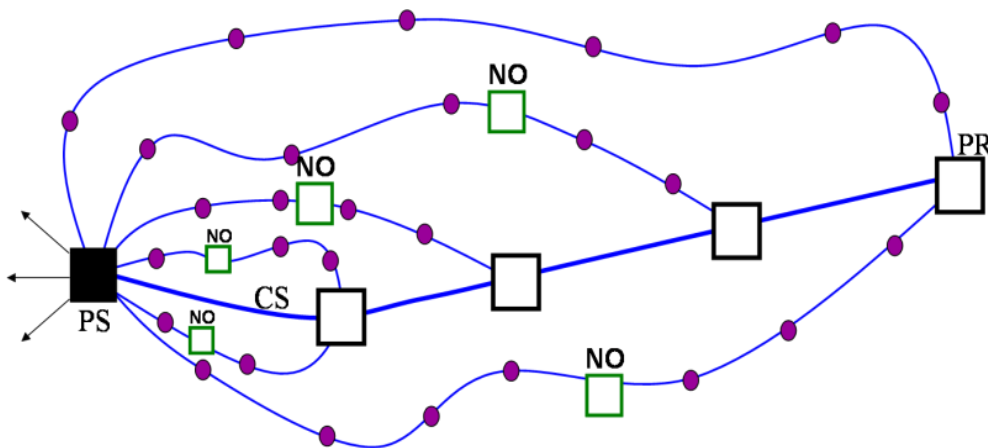


Figure 1.10 Structure en épi [3].

c) Structure maillée

La structure maillée ou la grille est une variante de structure en coupure d'artères. La différence de cette structure est qu'il existe un grand nombre de boucles, qui sont formées par les conducteurs, les charges et les connexions intermédiaires qui relient les postes HT/MT les uns aux autres. L'exploitation de structure maillée se réalise en radial grâce au placement des organes de coupure normalement ouverts dans cette structure. L'existence de nombreuses connexions entre les artères principales permet une excellente qualité de service, mais rend le coût de construction de ce type de réseau très coûteux. La figure 1.11 montre la structure maillée.

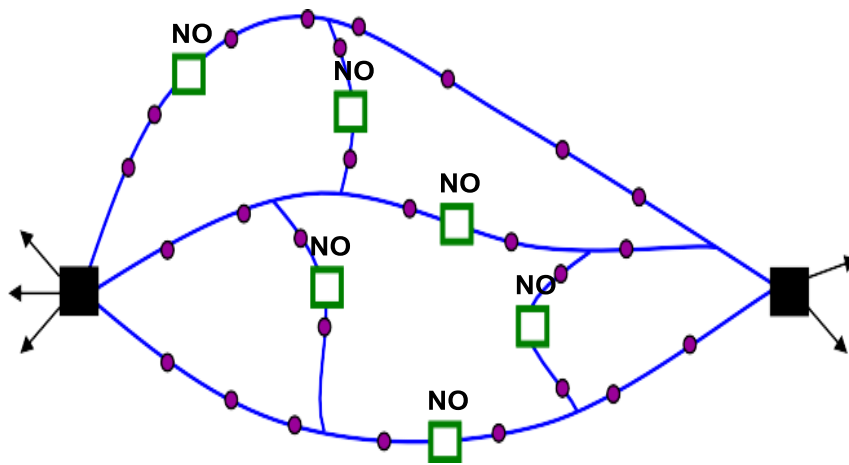


Figure 1.11 Structure maillée ou la grille [3].

d) Structure maille

Dans ce réseau (figure 1.12), chaque boucle doit être alimentée par un poste source HTB/HTA ou par un poste tête de boucle qui est alimenté par le poste source HTB/HTA via un conducteur de section importante appelé câble de structure. Le poste tête de boucle a la même structure que le poste source sauf qu'il n'y a pas de transformateur HTB/HTA. Des liaisons entre les boucles permettent des secours mutuels en cas de perte d'un câble de structure.

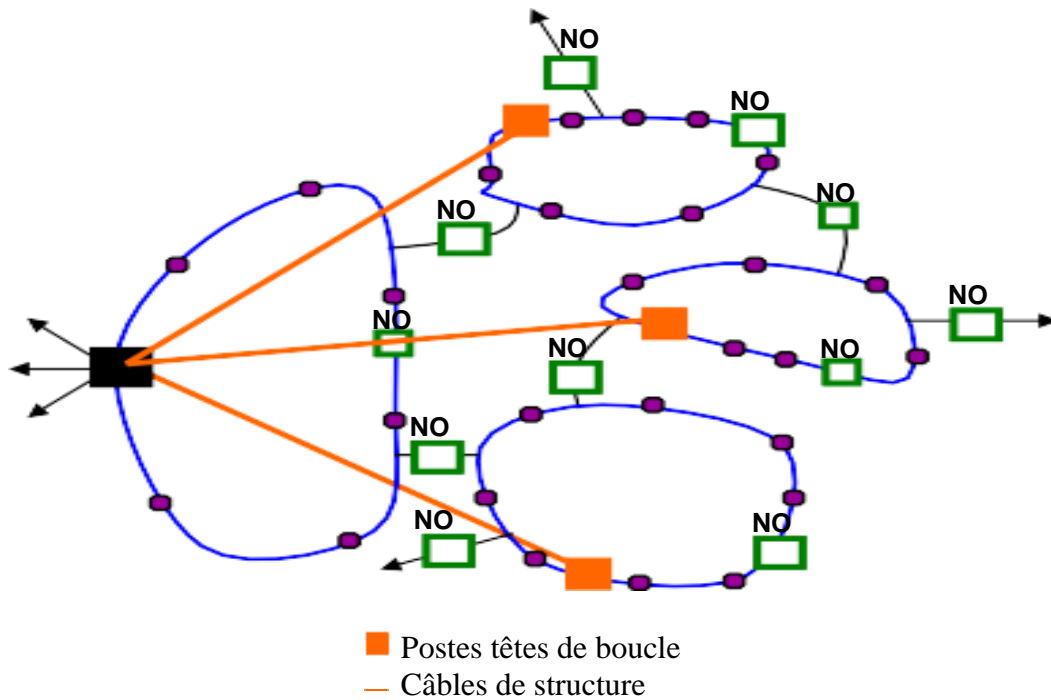


Figure 1.12 : Structure maille [3].

e) Structure boucles (ou pétales de marguerite)

La structure boucles (voir la figure 1.13) est exploitée lorsque le centre de gravité des charges est loin par rapport au poste HTB/HTA. Dans cette structure, chaque ligne qui forme une boucle doit être alimentée à partir d'un poste nommé poste tête de pétales par un ou deux câbles issus du poste HTB/HTA. C'est une structure moins flexible au niveau de la possibilité de reporter la charge d'une boucle à l'autre en cas de défaut par rapport au structure maille.

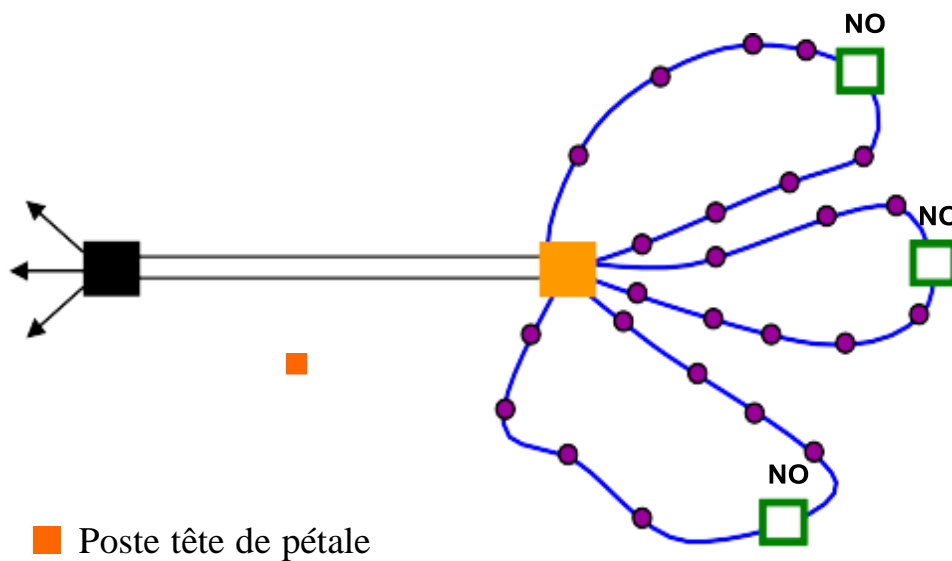


Figure 1.13 : Boucles ou pétales de marguerite [3].

1.4 Production décentralisée

1.4.1 Définition

Dans la littérature, de nombreux termes sont utilisés par rapport à la production décentralisée tel que : Génération d'Énergie Décentralisée ou Distribuée, Génération d'Énergie Dispersée, Production Distribuée [11]. Le terme "Génération d'Énergie Dispersée" sera utilisé pour appeler la production décentralisée dans la suite de cette thèse. La littérature montre qu'il n'y a pas une seule définition de la production décentralisée, chaque pays a sa propre définition. Certains pays définissent la GED sur la base du niveau de tension auquel sont raccordés ces générateurs, tandis que d'autres partent du principe que la GED est injectée directement au niveau des charges. D'autres pays définissent la GED comme ayant certaines caractéristiques de base (par exemple, l'utilisation d'énergies renouvelables, la cogénération, non-dispatchable...).

Les unités de la GED se distinguent des unités de production classique par le fait qu'elles sont le plus souvent raccordées au réseau de distribution, et par leur petite taille [4]. La classification sur la base de la capacité de production [11] [12] est indiquée sur la figure 1.14.

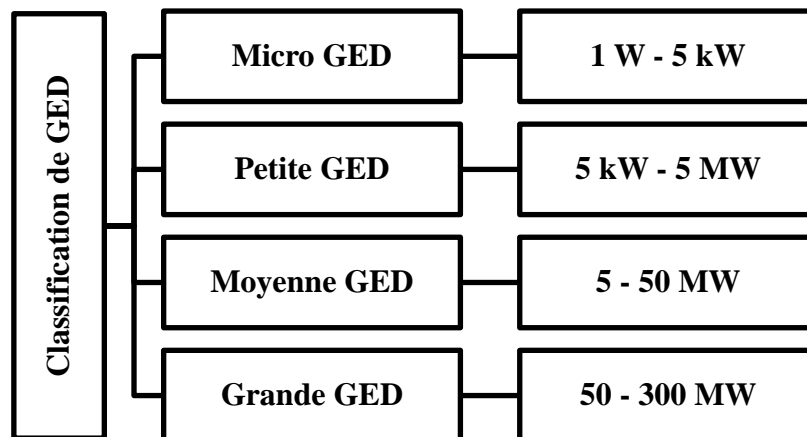


Figure 1.14 : Classification de GED à la base de la puissance nominale

1.4.2 Types de production décentralisée

Plusieurs de GEDs utilisent des technologies matures ou en phase de développement. Les énergies primaires utilisées sont également très variées, d'origine renouvelable ou fossile. Des classifications sont faites en fonction du type d'énergies primaires utilisée [4] [5] et en fonction de type de puissance délivrée [15].

1.4.2.1 Classification en fonction du type d'énergies primaires utilisée

a) Les énergies non renouvelables

Deux types de technologies non renouvelables peuvent être décrits :

Energies fossiles (gaz, charbon, pétrole)

Le principe de cette technologie est le même que celui utilisé dans les grandes installations thermiques de la production centralisée. La combustion de combustibles fossiles (gaz, charbon, pétrole) génère de la chaleur elle-même transformée en électricité. Les principales technologies utilisées sont le thermique à flamme, les turbines à gaz et les moteurs diesel... Ces systèmes, et notamment les turbines à gaz, permettent aussi d'être utilisés pour produire simultanément de la chaleur et de l'électricité. On parle alors de cogénération ou production combinée. Ces applications permettent d'avoir un rendement global excellent.

Hydrogène

Les piles à combustible sont des technologies nouvelles qui produisent de l'électricité à partir de l'interaction entre l'hydrogène et l'oxygène. Aujourd'hui, deux technologies sont des objets de recherches intensives : Les piles à combustible à membrane échangeuse de proton (PEMFC : Proton Exchange Membrane Fuel Cell) pour les utilisations de faibles puissances et les piles à combustible à l'oxyde solide (SOFC : Solid Oxid Fuel Cell) pour les utilisations stationnaires de cogénération. Bien que ces sont des technologies relativement très coûteuses et donc peu répandues, elles sont aussi écologiques.

b) Les énergies renouvelables

Les principales sources d'énergies renouvelables sont :

Hydraulique

Les centrales hydrauliques produisent de l'électricité par le mouvement d'une masse d'eau d'un réservoir supérieur à un niveau inférieur, où plusieurs turbines hydrauliques et des générateurs électriques sont couplées. Ce mouvement peut être obtenu, à partir du débit d'eau d'une rivière, d'un fleuve ou d'un lac. Pour la GED, des microcentrales hydrauliques sont utilisées avec une puissance électrique de 5MW.

Le principal avantage de ce type de production est qu'elle n'est pas intermittente et leur énergie primaire gratuite. Le coût élevé de l'investissement initial et l'impact sur l'environnement sont ses principaux inconvénients.

Solaire

L'énergie rayonnement solaire peut être convertie en énergie électrique soit directement à courant continu par les installations photovoltaïques soit indirectement via la production de chaleur (appelé solaire thermique) via des réseaux de miroirs paraboliques, concentrateurs...

L'utilisation de ces types de production est encouragée par la disponibilité de l'énergie solaire, une longue durée de vie et la maintenance nécessaire est simple. Cependant, les inconvénients principaux de cette technologie que la production est invariablement liée aux conditions météorologiques et leurs coûts élevés d'investissement initial limitent leur adoption à grande échelle.

Eolien

Les aérogénérateurs ou éoliennes sont des dispositifs qui transforment l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Ensuite cette énergie transmet en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice électrique. Il existe également deux possibilités d'installation des parcs éoliens : éolien en mer (offshore) comportent une capacité très importante, et éolien sur terre (onshore) (voir figure 1.15). Pour la GED, les éoliennes sont utilisées avec une puissance électrique variant entre 200 kW et 5 MW.



Eolienne offshore



Eolienne onshore

Figure. 1.15 : Type des parcs éoliens.

Le principal avantage de cette source d'énergie est que son coût d'installation est moins cher que les autres sources d'énergie renouvelables. Cependant, l'énergie éolienne est intermittente et l'installation de parcs éoliens aura des impacts sur le paysage et le bruit.

Géothermie

Les centrales géothermiques captent la chaleur à travers un fluide qui circule dans le sol pour produire l'énergie électrique au moyen des turbines classiques. Ce fluide peut être celui des nappes d'eau souterraine naturelle, de l'eau injectée dans les roches chaudes ou dans des puits spéciaux. Dans tous les cas, le fluide se réchauffe et remonte avec une température supérieure. Cette source d'énergie a l'avantage de préserver l'environnement et d'être indépendante des conditions climatiques, elle est donc fiable et stable. Malheureusement, cette source d'énergie nécessite des forages dont les résultats sont parfois aléatoires et dont le temps de mise en place de l'installation pour son utilisation est assez important.

Biomasse

Certaines centrales thermiques à flamme utilisent des issus de la biomasse comme source primaire des combustibles. Les déchets agricoles, bois, biogaz ou les déchets industriels et domestiques peuvent être utilisés pour produire de la chaleur, puis de l'électricité. Cette technologie est de plus en plus utilisée dans les zones rurales.

1.4.2.2 Classification de GED à base de type de puissance délivrée

Les unités de la GED peuvent être classées en quatre types sur la base de la capacité de fourniture de la puissance active et réactive.

GED-Type 1 : Ce type est capable d'injecter uniquement de la puissance active comme les micro-turbines, les photovoltaïques, les piles à combustible, qui sont connectés au réseau à l'aide des convertisseurs / onduleurs.

GED-Type 2 : Ce type est capable de délivrer uniquement de puissance réactive comme les compensateurs synchrones et les condensateurs.

GED-Type 3 : Ce type est capable d'injecter des puissances active et réactive comme les petites turbines hydrauliques, turbines à gaz, cogénération, etc.

GED-Type 4 : Ce type est capable de délivrer de la puissance active en consommant de la puissance réactive. Principalement les générateurs à induction, qui sont utilisés dans des parcs éoliens, entrent dans cette catégorie.

1.5 Impact de la GED sur le réseau de distribution

L'interconnexion de la GED dans les réseaux électriques présente de nouveaux défis pour l'exploitation et la planification des réseaux de distribution, principalement parce que la configuration des lignes électriques et les dispositifs de protection dans la plupart des réseaux de distribution traditionnels supposent un sens d'énergie unidirectionnel et sont conçus et exploités sur cette hypothèse. Dans ce qui suit, plusieurs problèmes concernant l'impact d'intégration des productions décentralisées sur les réseaux de distribution sont analysés.

a) Sens de transit de puissance

Traditionnellement, les réseaux sont dimensionnés pour recevoir les flux d'énergie du réseau haute tension vers le réseau basse tension à travers les postes de transformation HTA/HTB. L'insertion des productions décentralisées dans les réseaux de distribution peut inverser le sens de transit de puissance, c'est-à-dire du réseau basse tension vers le réseau haute tension. Dans cette situation, les équipements, notamment les protections doivent avoir un caractère bidirectionnel pour assurer la surveillance dans les deux sens.

D'autre part, à court terme, les réseaux de distribution peuvent ne pas rencontrer de problèmes liés à des limites de la capacité de transfert d'énergie ; mais à long terme, lorsque le taux d'introduction des GEDs augmentera au niveau de ces réseaux, la modification du sens de transit de puissance pourra éventuellement provoquer des congestions locales [16, 17].

b) Les pertes

L'insertion de la GED au niveau du réseau de distribution peut contribuer à la réduction ou l'augmentation des pertes de ce réseau [18], ce problème est basé principalement sur l'emplacement, la capacité, le type de GED, la structure et la configuration du réseau de distribution. Il est donc essentiel que ces éléments soient parfaitement pris en compte lors de l'évaluation de l'impact de la GED sur les pertes [19].

c) Plan de tension

La présence de la GED dans un réseau de distribution entraîne une modification du plan de tension sur ce réseau avec une élévation possible de la tension le long d'un départ [20]. Cette élévation de la tension dépend du nombre des GEDs et leurs emplacements et capacités ainsi que du facteur de puissance et de la structure du réseau. Cette élévation peut provoquer des surtensions dépassant les limites permises, en particulier lorsque la charge du réseau est faible [5].

Pour cette raison, la tension est contrôlée au niveau du réseau de distribution par les régulateurs de tension installés sur les lignes de distribution. Ces dispositifs peuvent également équilibrer les plans de tension modifiés par insertion de la GED. Cependant, dans certaines situations, même en présence de la GED, ces régulateurs ne peuvent pas mettre les plans de tension dans la plage autorisée.

d) Stabilité du système

Certaines sources de productions décentralisées peuvent être connectées directement au réseau, par des générateurs synchrones ou asynchrones. La stabilité du système est liée à l'interaction de ces générateurs dans le réseau immédiatement après un défaut. En particulier, une unité de GED doit être en mesure de rester connectée au réseau suite à un défaut dans le système. En cas de déclenchement, il devrait y avoir peu de place aux perturbations dues à la défaillance du générateur de rester en synchronisme.

e) Puissance de court-circuit

L'insertion des GEDs au réseau de distribution, en particulier via des générateurs et d'autres machines en rotation, entraîne en général une modification du niveau de courants de court-circuit [20]. Cette modification de courants de court-circuit peut alors créer des problèmes pour le fonctionnement des différents composants de réseau de distribution comme les lignes et les dispositifs de protection, s'ils ont été dimensionnés pour supporter des courants de court-circuit inférieurs. Ces composants, lorsqu'ils transportent des courants de défaut persistant, sont soumis à des contraintes thermiques et mécaniques. Pour cette raison, il est essentiel de vérifier le niveau de courants de court-circuit par rapport aux capacités limites des composants avant de connecter physiquement une GED au réseau de distribution.

Pour les conducteurs de ligne, en fonction des caractéristiques du conducteur, du type de défaut et sa durée, la surintensité maximale admissible durant le temps nécessaire pour éliminer le défaut doit être déterminée. Il est également important de vérifier que l'injection de courant par les installations de la GED ne conduise pas au déclenchement intempestif des relais de surintensité utilisés pour la protection des lignes de distribution [20].

Dans le cas où ces vérifications ne sont pas satisfaisantes, d'autres solutions pourraient être trouvées, telles que le renforcement ou la mise à jour des composants ou l'infrastructure du réseau ou même le changement des endroits d'intégration de la GED.

Les emplacements les plus critiques pour l'insertion de la GED sont ceux où les courants de court-circuit atteignent leurs valeurs maximales, c'est-à-dire, aux premières lignes issues du poste source et protégées par des relais de surintensité.

f) Qualité de service

La présence de la GED de type asynchrone dans un réseau peut contribuer à une diminution brutale de la tension due à l'appel d'un courant fort lors de la connexion au réseau. Ces types de GED consomment de la puissance réactive afin de magnétiser leur circuit magnétique. D'ailleurs, la présence d'interfaces d'électronique de puissance peut faire augmenter le taux des harmoniques qui nuisent gravement à la qualité de service fournie [16].

1.8 Conclusion

La GED a amené d'important changement dans les réseaux de distribution en bouleversant profondément leur fonctionnement. Un certain nombre d'effets bénéfiques pour le consommateur, le producteur, le régulateur et plus largement la société sont à venir. En contrepartie, un certain nombre d'effets néfastes pour le réseau électrique sont à prévoir.

En particulier, parmi les impacts de l'insertion de la GED dans le réseau de distribution, les pertes de puissance, le profil de tension, ainsi que la stabilité de tension.

Chapitre 2

Ecoulement de puissance dans les réseaux de distribution

2.1 Introduction

Le réseau de distribution électrique se caractérise par le changement de la demande de charge, ce qui influe sur les pertes de puissance dans les branches et le profil de la tension au niveau des nœuds formant le réseau.

Plusieurs méthodes d'écoulement de puissance sont utilisées par les chercheurs dans la littérature. Ces méthodes peuvent être divisées en deux catégories: les méthodes newtoniennes [22] et les méthodes de balayage arrière avant [23]. Le premier type de méthodes est généralement utilisé pour résoudre le problème de l'écoulement de puissance dans les réseaux de transport où de transmission. Parmi ces méthodes on peut citer la méthode Newton Raphson et la méthode découplée rapide qui ont prouvé leur efficacité dans le traitement de ce problème. L'application de ce type de méthodes dans les réseaux de distribution prouvé dans la majorité des cas un échec dans leur divergence et ce du fait des caractéristiques typiques différentes par rapport aux réseaux de transport [24]. D'autre part, le second type de méthodes est basé sur un balayage vers l'arrière pour le calcul du courant des branches et un balayage vers l'avant pour le calcul de la tension des nœuds [25,26]. Ce type de méthodes, est utilisé le problème de l'écoulement de puissance dans les réseaux de distribution.

Dans ce chapitre, nous allons utiliser la méthode de balayage arrière avant pour calculer l'écoulement de puissance dans le réseau de distribution. Nous allons tester la performance de la méthode proposée sur le réseau de distribution IEEE 33 nœuds avec différents niveaux de charge.

2.2. Unité relative

Le système unité relative (per unit) est un système de grandeurs réduites qui permet d'avoir constamment à l'esprit des ordres de grandeurs relatifs de certains paramètres indépendamment des niveaux de tension et de puissance [27].

Pour une puissance de base (S_{Base}) en kVA, une tension de base (V_{Base}) en kV et une résistance R en Ω , la résistance normalisée (R_{pu}) est obtenue par :

$$R_{pu} = R \frac{S_{Base}}{10^{-3}V_{Base}^2} \quad (2.1)$$

Les puissances active et réactive de charge normalisées sont obtenues respectivement à l'aide des formules (2.2) et (2.3) :

$$P_{pu} = \frac{P}{S_{Base}} \quad (2.2)$$

$$Q_{pu} = \frac{Q}{S_{Base}} \quad (2.3)$$

2.3. Modélisation des branches et des charges du réseau de distribution

2.3.1 Modélisation des branches

Le réseau de distribution radiale est constitué d'un ensemble de branches. Chaque branche de ce réseau est modélisée comme une résistance en série avec une inductance pure. L'impédance d'une branche i quelconque de ce réseau (voir Figure 2.1) s'écrit comme suit :

$$Z_i = R_i + X_i \quad (2.4)$$

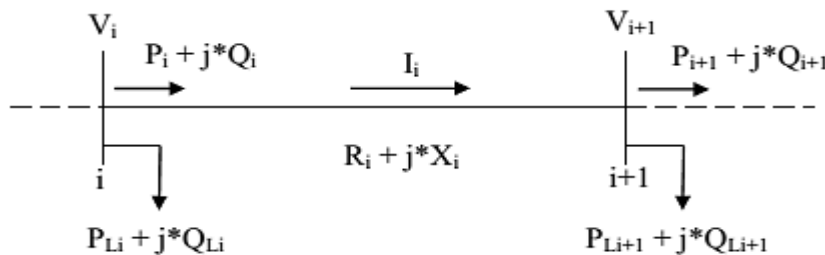


Figure 2.1 : Représentation de deux nœuds dans le réseau de distribution radial

2.3.2 Modélisation des charges

La charge est le paramètre le plus incertain dans le réseau électrique de distribution, elle est constamment variable. Pendant un an, la charge peut varier considérablement d'une saison à une saison, d'un jour à l'autre et d'une heure à l'autre. Elle est le paramètre le plus sensible qui peut influencer la solution du problème de planification des réseaux de distribution. La plupart des chercheurs dans la littérature supposent un modèle de charge constante dans leurs études du problème de planification du réseau de distribution. Les décisions et les résultats basés sur cette hypothèse ne sont pas techniquement réalisables pour les systèmes réels de distribution où la charge n'est pas constante. Dans cette étude, afin de réaliser une analyse efficace, deux types de charge seront considérés

2.3.2.1 Modèle périodique de charge constante

Ce modèle de charge est caractérisé par la consommation d'énergie électrique de manière relativement constante au cours de certains intervalles de temps avec une variation qui dépend très peu des conditions météorologiques. La demande d'énergie est assez stable de jour en jour et de saison en saison. Le niveau de consommation peut changer considérablement d'une à trois fois au maximum au cours de la journée. Les grands utilisateurs et de nombreux clients industriels appartiennent à ce modèle de charge.

Mathématiquement, les puissances actives et réactives pendant chaque niveau de la demande α sont calculées respectivement par les relations (2.5) et (2.6) :

$$P_{\alpha} = P_0 \times D_{\alpha} \quad (2.5)$$

$$Q_{\alpha} = Q_0 \times D_{\alpha} \quad (2.6)$$

Où :

- P_0 et Q_0 sont respectivement les puissances active et réactive nominales ;
- D_{α} est le facteur de niveau de charge.

2.3.2.2 Modèle de la charge statique

Le modèle statique représente les caractéristiques des charges en régime permanent. Il décrit en général la relation entre la puissance active et réactive avec le niveau de tension dans une période de temps déterminée. Dans ce modèle de charge, les puissances active et réactive sont représentées sous forme exponentielle. Ce modèle est aussi utilisé pour faire une approximation des caractéristiques dynamiques des charges. Ce modèle de charge est exprimé par les équations suivantes [28] :

$$P_i = P_0 \left(\frac{V_i}{V_0} \right)^{\alpha} \quad (2.7)$$

$$Q_i = Q_0 \left(\frac{V_i}{V_0} \right)^{\beta} \quad (2.8)$$

Où :

- P_0 et Q_0 sont les puissances active et réactive nominales ;
- V_0 est la tension nominale ;

- P_i et Q_i sont les puissance active et réactive de la charge au nœud i pour une tension égale à V_i ;
- Les coefficients α et β déterminent le caractère de la charge.

Les valeurs des coefficients dépendent des caractéristiques agrégées des composants de la charge. Lorsque les coefficients α et β les deux égaux à 0, la charge se comporte comme une charge de puissance constante, ce type de charge est un modèle dont la puissance ne varie pas lorsque la tension varie. Si par contre les coefficients sont égaux à 1, la charge se comporte comme une charge de courant constant, ce type de charge est un modèle dont la puissance varie proportionnellement avec la tension. Si les coefficients sont égaux à 2, la charge se comporte comme une charge d'impédance constante, ce type de charge est un modèle dont la puissance varie proportionnellement avec le carré de la tension.

2.4 Modèle de calcul d'écoulement de puissances

2.4.1 Modèle AC de calcul d'écoulement de puissances

Les calculs d'écoulement de puissances, ou encore calculs de répartition de charges dans un problème de planification de réseau électrique sont très importante ayant pour but de déterminer les pertes d'énergie pour n'importe quels états du réseau qui peuvent se présenter et vérifier si ces états satisfont les contraintes d'exploitation du réseau.

La principale caractéristique de calcul d'écoulement de puissances dans un problème de planification de réseau électrique est qu'il se répète plusieurs fois surtout pour les méthodes d'optimisation que nous utiliserons ultérieurement dans ce travail. L'utilisation d'une méthode de calcul d'écoulement de puissances rapide et précis est très nécessaire pour accomplir cette tâche.

L'état du réseau électrique peut être défini si les amplitudes et les phases des tensions à tous les nœuds du réseau sont connues. Ces tensions peuvent être obtenues par la résolution du système d'équations d'écoulement de puissances données par les formules (2.9) et (2.10).

$$P_i = V_i \sum_{j=1}^{N_n} V_j (G_{ij} \cdot \cos \delta_{ij} + B_{ij} \cdot \sin \delta_{ij}) \quad (2.9)$$

$$Q_i = V_i \sum_{j=1}^{N_n} V_j (G_{ij} \cdot \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cdot \cos \delta_{ij}) \quad (2.10)$$

Où :

- P_i et Q_i sont respectivement les puissances active et réactive nettes injectées au nœud i ,

- V_i est module de la tension au nœud i ,
- δ_{ij} est l'angle entre les vecteurs de tension V_i et V_j ,
- G_{ij} et B_{ij} sont les parties réelles et imaginaires de la matrice admittance du réseau,
- N_n est le nombre total de nœuds.

Cependant, les réseaux électriques de distribution ont certaines caractéristiques typiques différentes en comparaison avec les réseaux de transport. Ils sont caractérisés par [29] :

- Une structure généralement radiale ou faiblement maillée,
- Un rapport résistance réactance R / X élevé,
- Grand nombre des branches et des nœuds,
- Des charges déséquilibrées,

De nombreux algorithmes sont disponibles dans la littérature [30,31]. Ils ont été développés spécialement pour résoudre le problème d'écoulement de puissances dans les réseaux électriques de distribution. L'algorithme le plus commun est l'algorithme de balayage avant et arrière (Backward and Forward Sweep Algorithm) [32] qui sera exposé dans la section suivante.

2.4.2 Algorithme de balayage avant et arrière

Au cours des dernières décennies, de nombreuses méthodes basées sur l'algorithme de balayage avant et arrière ont été développées dans un certain nombre d'études rapportées dans la littérature [33-35] pour des raisons d'accélérer le calcul d'écoulement de puissances dans les réseaux de distribution et d'obtenir une bonne convergence en évitant la résolution simultanée des systèmes d'équations et l'utilisation des matrices de grandes dimensions. Contrairement aux méthodes courantes telles que Gauss-Seidel et Newton-Raphson, l'algorithme de balayage présente l'avantage d'utiliser moins d'effort de calcul et de temps.

Dans cette section, nous allons expliquer le principe de l'algorithme itératif de la méthode de balayage avant et arrière. C'est un algorithme qui calcul le courant sur chaque branche et la tension pour chaque nœud. A chaque itération, deux balayages sont exécutés :

- Le balayage arrière « Backward Sweep » consiste à déterminer les courants dans les branches du réseau par l'utilisation de la première loi de Kirchhoff.
- Le balayage avant « Forward Sweep » consiste à calculer les tensions aux nœuds du réseau à l'aide de calcul de chutes de tension le long des branches.

L'algorithme de balayage arrière et avant se caractérise par sa simplicité, sa rapidité et sa précision. Il s'exécute en trois étapes

Etape 1 : Calcul des courants d'injection

Après avoir lire les données du réseau de distribution et initialiser toutes les tensions des nœuds, on calcule le courant injecté en chaque nœud en fonction de la puissance absorbée par la charge connectée et de la tension en ce nœud. Pour un nœud i , le courant injecté peut s'écrire :

$$I_i = \frac{S_i^*}{V_i^*} \quad (2.11)$$

Où :

- S_i^* est la puissance complexe absorbée par la charge au nœud i .
- V_i^* est la tension complexe au nœud i .

Etape 2 : Balayage arrière

Au cours de la deuxième étape, un balayage arrière est effectué de manière descendante depuis les nœuds terminaux du réseau vers le nœud source (poste source) pour calculer les courants de branches par sommation des courants aux différents nœuds du réseau. Les courants des branches sont calculés à l'aide de la formule (2.12) :

$$[J] = [BIBC][I] \quad (2.12)$$

Où :

- BIBC est la matrice des courants injectés dans les nœuds (Bus Injection Branch Current) qui est une matrice triangulaire supérieure contenant les valeurs 0 et 1 uniquement.

Etape 3 : Balayage avant

Pendant la troisième étape, un balayage avant est effectué de manière ascendante depuis du nœud source vers les nœuds terminaux du réseau pour calculer la tension pour chaque nœud au moyen de calcul de la chute tension sur chaque branche.

$$V_{jr} = V_{js} - Z_j \cdot J_j, \quad j = 1, 2, \dots, N_b \quad (2.13)$$

Où :

- js, jr sont le début et la fin de la branche i .
- Z_j est l'impédance série de la branche i .

Critère de convergence

Les trois étapes de l'algorithme se répètent jusqu'à la convergence. Les différences de tension aux nœuds dans les itérations précédentes et présentes sont utilisées comme critère de convergence pour arrêter le calcul itératif :

$$|V_i^{k+1} - V_i^k| < \varepsilon, \quad i = 1, 2, \dots, N_n \quad (2.14)$$

Où ε représente la précision que l'on veut atteindre.

Les pertes active et réactive

Les pertes de puissance active au niveau d'une branche sont calculées par la relation (2.15):

$$P_{Loss,i} = R_i \cdot \frac{P_i^2 + Q_i^2}{|V_i|^2} \quad (2.15)$$

Les pertes totales de puissance active dans les branches du réseau de distribution sont calculées par l'équation (2.16) :

$$P_{T,Loss} = \sum_{i=1}^{N_b} P_{Loss,i} = \sum_{i=1}^{N_b} R_i \cdot \frac{P_i^2 + Q_i^2}{|V_i|^2} \quad (2.16)$$

Les pertes de puissance réactive au niveau d'une branche sont calculées par la relation (2.17) :

$$Q_{Loss,i} = X_i \cdot \frac{P_i^2 + Q_i^2}{|V_i|^2} \quad (2.17)$$

Les pertes totales de puissance réactive dans les lignes du réseau de distribution sont calculées par l'équation (2.18) :

$$Q_{T,Loss} = \sum_{i=1}^{N_b} Q_{Loss,i} = \sum_{i=1}^{N_b} X_i \cdot \frac{P_i^2 + Q_i^2}{|V_i|^2} \quad (2.18)$$

2.4.3 Organigramme de la solution d'écoulement de puissance

L'organigramme de l'algorithme de balayage avant et arrière est décrit dans la figure 2.2.

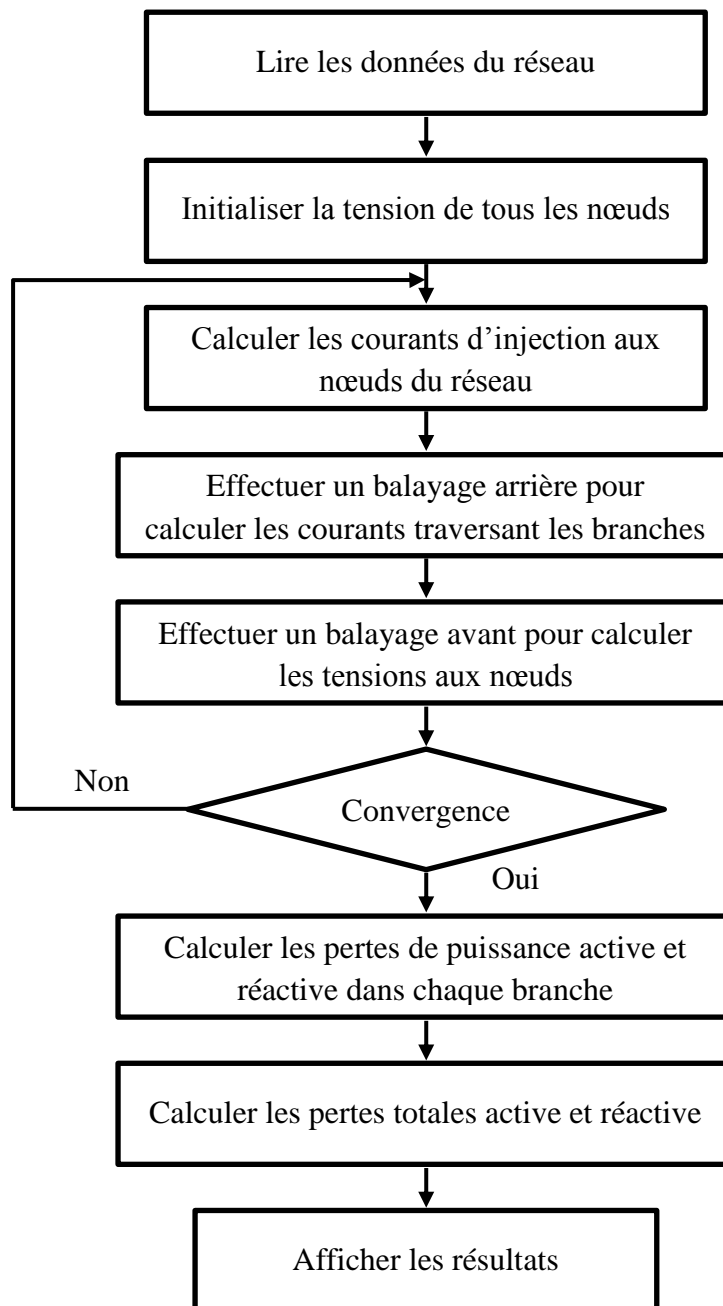


Figure 2.2 Organigramme de l'algorithme de balayage arrière / avant

Étape 1 : Entrer les données du réseau : linedata (nœud de départ, nœud d'arrivé, les résistances et les réactances des branches), busdata (Les puissances actives et réactives des charges). Initialiser les tensions de tous les nœuds [1pu] et déterminer la valeur de tolérance.

- Étape 2 : Appliquer l'équation (2.11) pour calculer les courants d'injection au niveau de tous les nœuds.
- Étape 3 : Calculer les courants des branches en utilisant le balayage arrière (l'équation (2.12)).
- Étape 4 : Calculer les tensions au niveau de tous les nœuds en utilisant le balayage avant (l'équation (2.13)).
- Étape 5 : Tester la convergence de tension pour des itérations consécutives. Si la convergence de tension est obtenue, passer à l'étape suivante. Sinon, aller à l'étape 2.
- Étape 6 : Calculer les pertes de puissance active et réactive pour toutes les branches en utilisant les équations (2.15) et (2.17) et les pertes totales de puissance active et réactive du réseau en utilisant les équations (2.16) et (2.18).
- Étape 7 : Afficher les tensions aux nœuds, les pertes de puissance active et réactive des branches et les pertes totales de puissance active et réactive du réseau.

2.5 Applications numériques

Afin de tester l'efficacité de la technique proposée pour la solution de l'écoulement de puissance, on a fait des applications sur le réseau test IEEE 33 nœuds pour différents niveaux de charge.

2.5.1 Réseau test IEEE 33 nœuds

La Figure 2.3 représente le réseau de distribution IEEE 33 nœuds. Les caractéristiques de ce réseau sont données comme suit :

- Nombre de nœuds =33 ;
- Nombre de branches =32 ;
- Nombre d'interrupteurs ouverts =5 ;
- Nœud de référence $N^{\circ}=1$;
- Puissance de base = 100MVA ;
- Tension de base =12,66kV.

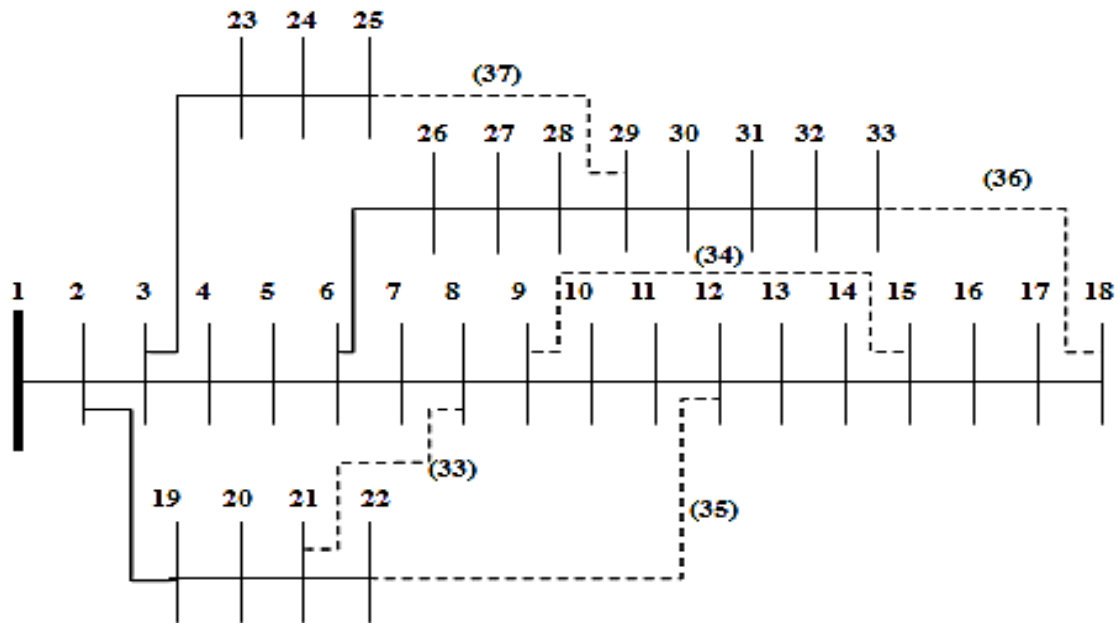


Figure 2.4 : Représentation simplifiée du réseau de distribution IEEE 33 nœuds

2.5.2 Résultats d'EP (différents niveaux de charge)

Les résultats montrés dans la sous-section suivante correspondent à une étude sur le réseau IEEE 33 nœuds pour différents niveaux de charge. Trois niveaux de charge électrique sont utilisés dans cette étude : charge faible ($D\alpha = 0.75$), charge nominale ($D\alpha = 1$) et charge forte ($D\alpha = 1.25$). Le tableau 2.1 montre les amplitudes de tension au niveau de chaque nœud pour les trois niveaux de charge du réseau de distribution IEEE 33 nœuds. Les profils de la tension du réseau pour les trois niveaux de charge sont illustrés sur la figure 2.5. Il est clair, d'après le tableau 2.1 et la figure 2.5, que les valeurs minimales de tensions respectivement, pour les trois niveaux de charge faible, nominale et forte, sont 0.9361 p.u, 0.9130 p.u, 0.8888 p.u obtenues au niveau du nœud terminal 18 de la ligne principale.

La figure 2.6 représente les pertes totales de puissance active et réactive du réseau de distribution IEEE 33 nœuds pour différents niveaux de charge. Les pertes totales de puissances active et réactive en charge faible, nominale et forte sont respectivement (109.77 kW, 76.62 kVAr), (202.70 kW, 135.24 kVAr) et (329.90 kW, 220.24 kVAr). D'après cette figure, on remarque que les pertes totales de puissance active et réactive en charge forte dépassent plus de trois fois celles en charge faible.

Tableau 2.1 : Solution de l'écoulement de puissances du réseau IEEE 33 nœuds pour différentes niveau charges.

N° des Nœuds	C. Faible	C. Nominale	C. Forte	N° des Nœuds	C. Faible	C. Nominale	C. Forte
1	1,0000	1,0000	1,0000	18	0,9361	0,9130	0,8888
2	0,9978	0,9970	0,9962	19	0,9974	0,9965	0,9956
3	0,9874	0,9829	0,9783	20	0,9947	0,9929	0,9911
4	0,9819	0,9754	0,9687	21	0,9942	0,9922	0,9902
5	0,9765	0,9680	0,9593	22	0,9937	0,9916	0,9894
6	0,9630	0,9496	0,9358	23	0,9847	0,9793	0,9738
7	0,9604	0,9462	0,9313	24	0,9798	0,9727	0,9654
8	0,9568	0,9413	0,9251	25	0,9773	0,9693	0,9612
9	0,9522	0,9350	0,9171	26	0,9615	0,9477	0,9333
10	0,9480	0,9292	0,9096	27	0,9597	0,9452	0,9300
11	0,9473	0,9284	0,9085	28	0,9513	0,9337	0,9153
12	0,9462	0,9269	0,9066	29	0,9452	0,9255	0,9048
13	0,9417	0,9207	0,8987	30	0,9426	0,9219	0,9003
14	0,9401	0,9185	0,8958	31	0,9396	0,9178	0,8949
15	0,9391	0,9170	0,8940	32	0,9389	0,9169	0,8938
16	0,9381	0,9157	0,8922	33	0,9387	0,9166	0,8934
17	0,9366	0,9136	0,8896				

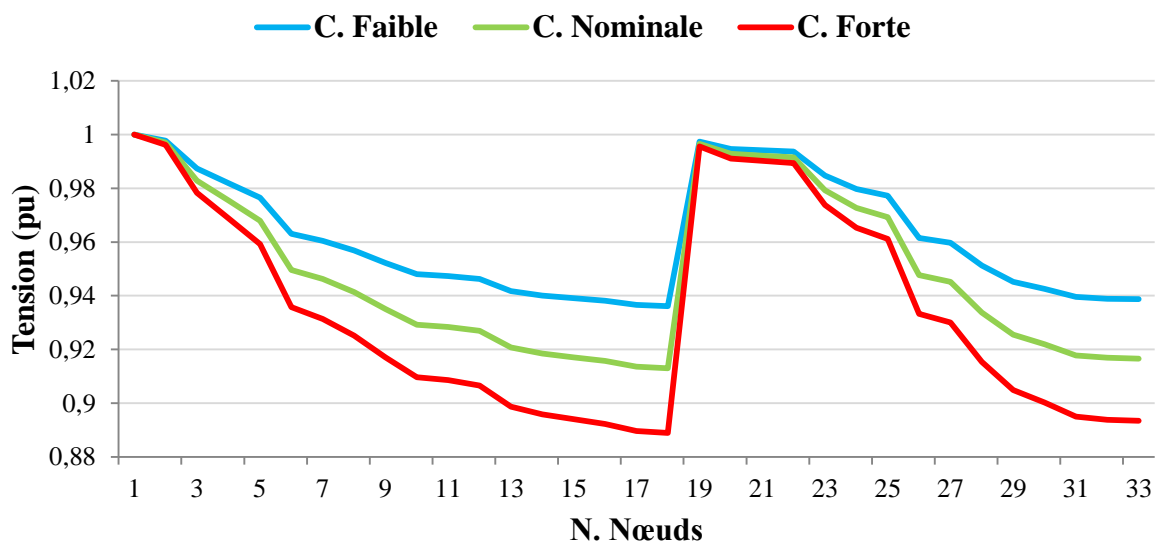


Figure 2.5 : Profil de tension pour les trois niveaux de charge du réseau IEEE 33 nœuds.

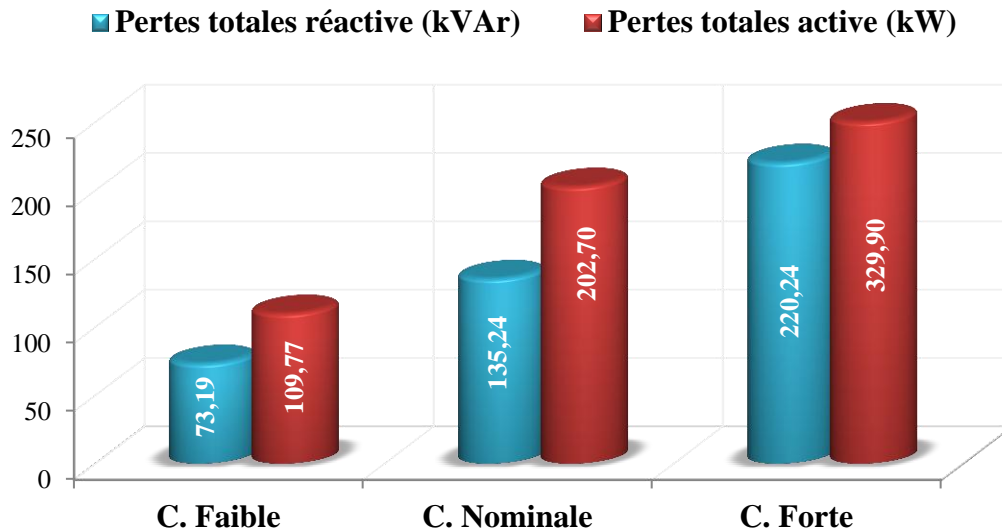


Figure 2.6: Pertes totales de puissance active et réactive du réseau IEEE 33 nœuds pour les trois niveaux de charge.

2.6 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'étude de l'écoulement de puissance dans les réseaux de distribution. Dans un premier temps, nous avons présenté les différents modèles pour modéliser les différents éléments du réseau de distribution. Nous avons aussi présenté une méthode itérative très reconnue dans la littérature, connu sous le nom Backward/Forward sweep algorithm, pour le calcul d'écoulement de puissance spécifique aux réseaux de distribution radiale. La méthode proposée est exécutée en deux phases. La première phase (un balayage arrière) pour déterminer les courants de branches et la deuxième phase (un balayage avant) pour calculer les tensions des nœuds. Finalement, nous avons examiné l'efficacité de cette méthode sur le réseau de distribution test IEEE 33 nœuds et ceci pour différents niveaux de charges.

Chapitre 3

Optimisation par les méthodes métaheuristiques

3.1 Introduction

Les problèmes d'optimisation occupent actuellement une place importante dans la communauté scientifique. La résolution d'un problème d'optimisation consiste à explorer un espace de recherche afin de minimiser ou maximiser une fonction donnée. Les complexités relatives de l'espace de recherche et de la fonction objectif ont conduit à développer un grand nombre de méthodes de résolutions différentes.

Dans ce chapitre, nous allons se pencher à donner les définitions et le principe ainsi que les algorithmes des méthodes métaheuristiques les plus répandues dans la littérature scientifique d'électrotechnique et plus particulièrement la méthode basé sur l'algorithme des chauves-souris (BA), où tous nos travaux d'optimisation seront effectués en se basant sur cet algorithme d'optimisation métaheuristique.

3.2 Méthodologie de conception

L'optimisation est souvent réduite aux techniques de résolution mathématiques auxquelles sont attribués par la suite les échecs rencontrés. Or, comme pour la plupart des problèmes à résoudre, l'optimisation doit faire l'objet d'une démarche systématique qui comporte quatre phases récapitulées dans la figure 3.1. Les phases peuvent s'enchaîner séquentiellement mais les itérations et les retours sont bien souvent indispensables [21].

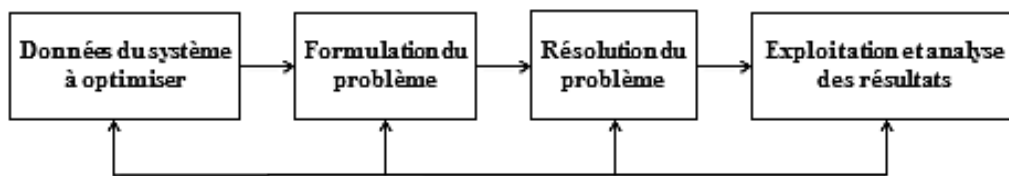


Figure 3.1 Démarches de résolution d'un problème d'optimisation

3.2.1 Formulation du problème d'optimisation

La formulation du problème d'optimisation est fondamentale dans le processus de conception parce qu'elle conditionne le succès des étapes suivantes. Elle n'est pas facile à aborder car le choix des variables de conception n'est jamais unique et les moyens de calcul actuels ne peuvent en gérer qu'un nombre limité. Le problème de conception, décrit par le cahier des charges, doit être formulé en un problème mathématique équivalent. C'est l'étape la plus délicate du processus de conception car, là aussi, la formulation d'un problème n'est jamais unique, en particulier la définition des fonctions caractérisant les performances du système. Elle consiste à définir de façon précise [36] :

- La fonction objectif.
- Les paramètres de conception.
- Les éventuelles contraintes liées à la fabrication ou à l'utilisation du dispositif exprimé dans le cahier des charges.
- Les contraintes ajoutées par le concepteur.

3.2.2.1 Fonction objectif

La fonction objectif est une des réponses de l'objet qui définit l'objectif à atteindre et peut être de deux natures : un coût à minimiser (coût de fabrication, consommation, coût d'exploitation, durée de développement) ou une performance à maximiser (profit, rendement, facteur de transmission). Son choix conditionne la définition du problème d'optimisation et inclut les moyens qui en permettent le calcul, c'est-à-dire la modélisation retenue pour l'objet. Dans le cas d'un objectif unique, le choix de cette fonction est évident. Par exemple, dans le cas où le but est de trouver les caractéristiques d'un dispositif produisant des performances dont les valeurs sont spécifiées, la fonction objectif peut prendre comme expression l'écart entre les performances et les spécifications. Cependant, les problèmes d'optimisation doivent souvent satisfaire des objectifs multiples dont certains sont concurrents [21].

3.2.2 Paramètres de conception

Les paramètres ou variables de conception sont des facteurs contrôlés qui permettent d'influencer les performances. Ils peuvent être de natures diverses : dimensions géométriques, propriétés des matériaux, choix structurels, etc. Ils peuvent être quantitatifs ou qualitatifs, continus ou discrets. Le choix et le nombre des paramètres conditionnent aussi la définition du problème d'optimisation. Il peut être intéressant de faire varier un grand nombre de facteurs afin d'augmenter l'espace de recherche mais le processus d'optimisation sera alors plus long. Des contraintes peuvent être ajoutées par le concepteur pour avoir, par exemple, une forme géométrique convenable, s'assurer de la validité de la modélisation retenue et de son bon fonctionnement ... etc. [21].

3.3 Méthodes d'optimisation

L'optimisation est l'une des branches mathématiques qui cherchant à modéliser, analyser et résoudre analytiquement ou numériquement des problèmes qui consistent à minimiser ou maximiser une fonction sur un ensemble. Les problèmes d'optimisation en électrotechnique

présentent plusieurs difficultés liées aux besoins de l'utilisateur, aux caractéristiques du problème à résoudre et au temps de calcul. De nombreux travaux s'appuient sur des méthodes de résolution exactes permettant d'obtenir une solution dont l'optimalité est garantie. Dans certaines situations, on peut cependant chercher des solutions d'une bonne qualité, sans garantie d'optimalité, mais au profit d'un temps de calcul plus réduit [37, 38].

Plusieurs méthodes de résolution des problèmes de différentes complexités ont été proposées. Ainsi, une grande variété et des différences remarquables au niveau du principe, de la stratégie et des performances ont été discernées. Cette variété et ces différences ont permis de diviser les méthodes d'optimisation en deux catégories: les méthodes conventionnelles et les méthodes méta-heuristiques.

3.3.1 Méthodes conventionnelles

3.3.1.1 Techniques analytiques

Ce type de techniques représente le système avec un ensemble d'équations numériques dont on calcule la solution directe. Ces méthodes se caractérisent par l'avantage d'un temps de calcul court et d'une facilité de mise en œuvre tout en assurant la convergence du problème [39]. Cependant, leur précision et leur efficacité de calcul peut être affectée par la taille et la complexité du problème.

3.3.1.2 Techniques déterministes

Il s'agit d'une classe de méthodes d'optimisation mathématique basées sur l'amélioration itérative de la solution initiale. Beaucoup des méthodes déterministes existent dans la littérature. Ces méthodes peuvent être classées en deux grandes catégories : programmation linéaire (LP) et programmation non-linéaire (NLP). La sensibilité au nombre de variables de décision, le temps de calcul important et le piègeage par un optimum local sont les points faibles de ces techniques [39,40].

3.3.2 Méthodes métaheuristiques

Le terme méta-heuristique a été inventé par F. Glover en 1986. Il est dérivé de la composition de deux mots grecs, méta qui signifie : « au-delà ou dans un niveau supérieur » et heuristique qui signifie : « trouver ou découvrir » [41].

Les métaheuristiques forment une famille d'algorithmes d'optimisation (également appelés algorithmes d'approximation) visant à résoudre des problèmes d'optimisation difficile issus de la recherche opérationnelle pour lesquels nous ne connaissons pas de méthode classique plus efficace. Elles permettent de résoudre des problèmes d'optimisation auxquels

les ingénieurs et les décideurs sont régulièrement confrontés. Les métaheuristiques sont généralement des algorithmes stochastiques itératifs, qui progressent vers un optimum par échantillonnage d'une fonction objectif. L'exécution des métaheuristiques se déroule en trois phases : Diversification, Intensification et Mémorisation [42].

La diversification permet de bien couvrir l'espace des solutions et de déterminer les zones « prometteuses », l'intensification permet d'approfondir la recherche à l'intérieur de chacune des zones prometteuses localisées. La mémorisation est le support de l'apprentissage permettant à l'algorithme de ne tenir compte que des zones où l'optimum est susceptible de se trouver et de garder en mémoire les résultats passés pour guider l'optimisation aux itérations suivantes. Les métaheuristiques progressent itérativement et alternativement entre les phases de diversification, d'intensification et d'apprentissage. La phase originale est souvent choisie aléatoirement puis l'algorithme continue jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt (fonctions objectifs = optimums) soit atteint. Les métaheuristiques sont souvent inspirées par des systèmes naturels, qu'ils soient pris en physique (cas du recuit simulé), en biologie de l'évolution (cas des algorithmes génétiques) ou encore en éthologie (cas des algorithmes de colonies de fourmis ou de l'optimisation par essaims de particules).

3.4 Algorithmes des métaheuristiques les plus répandues

3.4.1 Algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques (GA : Genetic Algorithms) sont des méthodes basées sur des mécanismes biologiques tels que les lois de Mendel et sur le principe fondamental (sélection) de C. Darwin. Holland exposa les principes de ces algorithmes pour permettre aux ordinateurs "d'imiter les êtres vivants " en évoluant pour rechercher la solution à un problème [43].

Ces algorithmes accordent une grande importance à la distinction entre la représentation génétique d'un individu (génotype) et sa représentation réelle (phénotype). L'opérateur principal utilisé par les algorithmes génétiques pour la construction de nouvelles solutions est l'opérateur de recombinaison appelé aussi croisement. Cet opérateur récupère des parties du génotype de deux ou plusieurs solutions ou parents qu'il combine pour construire un ou plusieurs nouveaux génotypes ou enfants, héritant ainsi de certaines de leurs caractéristiques. L'utilisation de la recombinaison, seule, ne permet pas d'introduire du matériel génétique nouveau puisque cet opérateur combine le matériel déjà présent dans la population. Pour remédier à ce problème, les algorithmes génétiques utilisent la mutation, comme opérateur secondaire permettant d'introduire de nouveaux gènes inexistant dans la population [38].

Les algorithmes génétiques simulent le processus d'évolution d'une population. A partir d'une population $P(t)$ de solutions du problème représentant des individus, on applique des opérateurs simulant les interventions sur le génome tel que le croisement (cross-over) ou la mutation pour arriver à une population de solutions de mieux en mieux adaptée au problème. Cette adaptation est évaluée grâce à une fonction coût. Les étapes du principe de l'algorithme génétique sont présentées comme suit :

Etape 1 : Initialisation de la population $P(t)$

Etape 2 : Evaluation de chaque individu de la population $P(t)$

Etape 3 : Faire $t=t+1$

Sélectionner $P(t+1)$ à partir de $P(t)$

Croisement de $P(t+1)$

Muter $P(t+1)$

Evaluer $P(t+1)$

Tant que le critère d'arrêt n'est pas atteint

Etape 4 : Afficher le meilleur cas trouvé.

La procédure de sélection consiste à favoriser la propagation des meilleures solutions parmi la population, tout en préservant la diversité génétique, afin d'explorer de nouvelles régions de l'espace de recherche. Le but de la procédure de croisement est de maintenir la diversité en manipulant les composantes des individus (chromosomes). De nouveaux individus, appelés enfants, sont créés en échangeant des parties des individus de la population (parents). Cet échange se fait en sélectionnant un point de découpage, aléatoirement (avec une densité de probabilité uniforme), et en échangeant ensuite les deux sous chaînes de chacun des deux parents. La procédure de mutation consiste à tirer aléatoirement un gène dans le chromosome et à le remplacer par une valeur aléatoire. La mutation est l'opérateur qui apporte aux algorithmes génétiques l'aléa nécessaire à une exploration efficace de l'espace de recherche.

3.4.2 Algorithme à essaim de particules

L'optimisation par essaim de particules (PSO : Particle Swarm Optimization) a été introduite par J. Kennedy et R. Eberhart en 1995 comme une alternative à l'algorithme génétique standard [44]. Cet algorithme est inspiré des essaims d'insectes ou des nuées d'oiseaux ou des bancs de poissons et de leurs mouvements coordonnés. En effet, tout comme ces animaux se déplacent en groupe pour trouver de la nourriture ou éviter les prédateurs, les

algorithmes à essaim de particules recherchent des solutions pour un problème d'optimisation. Les individus de l'algorithme sont appelés particules et la population est appelée essaim.

Un essaim de particules, qui sont des solutions potentielles au problème d'optimisation, survole, l'espace de recherche, en quête de l'optimum global. Le déplacement d'une particule est influencé par les trois composantes suivantes :

- Une composante physique : la particule tend à suivre sa direction courante de déplacement.
- Une composante cognitive : la particule tend à se diriger vers le meilleur site par lequel elle est déjà passée.
- Une composante sociale : la particule tend à se diriger vers le meilleur site déjà atteint par ses voisins. Dans le cas d'un problème d'optimisation, la qualité d'un site de l'espace de recherche est déterminée par la valeur de la fonction objectif en ce point.

La figure 3.2 illustre le schéma vectoriel du déplacement d'une particule qui détermine de nouvelle position d'une particule dans un processus PSO. Les trois flèches grisées représentent la combinaison vectorielle des trois effets pris en compte [45].

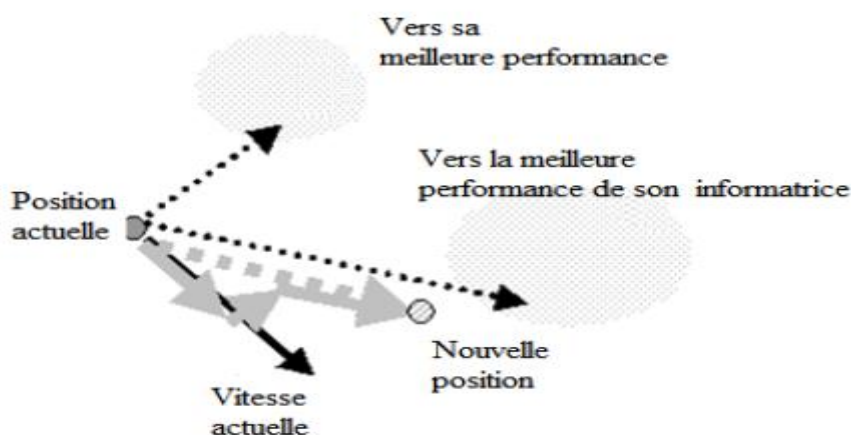


Figure 3.2 : Schéma de principe du déplacement d'une particule.

L'algorithme de la technique PSO est donné comme suit :

Etape 1 : Initialisation des coefficients d'accélération C_1 et C_2 , le facteur d'inertie w .

Etape 2 : La création de la population initiale aléatoirement et le calcul du fitness de chaque particule p_{best} : meilleure position de la particule i dans la population actuelle ; p_{gbest} : meilleure position dans toute les populations (la meilleure des meilleures).

Etape 3 : Le calcul de la nouvelle vitesse et la nouvelle position de chaque particule se fait comme suit :

$$v_{ij}(t + 1) = wv_{ij}(t) + c_1r_1(p_{besti} - v_{ij}(t)) + c_2r_2(p_{gbest} - v_{ij}(t)) \quad (3.1)$$

$$p_{ij}(t + 1) = p_{ij}(t) + v_{ij}(t + 1) \quad (3.2)$$

Avec $j=1, \dots, N$, N est la dimension de l'espace de recherche. r_1 et r_2 sont des nombres aléatoires uniformément distribués dans l'intervalle $[0,1]$. Le paramètre d'inertie w contrôle l'influence de l'ancienne vitesse sur la vitesse courante, afin de permettre aux particules d'éviter les minima locaux. De la même façon, c_1 contrôle le comportement de la particule dans sa recherche autour de sa meilleure position et c_2 contrôle l'influence de l'essaim sur le comportement de la particule.

Etape 4 : Le calcul du meilleur fitness de la population initiale est comparé par la précédente pour trouver la meilleure de toutes les populations.

Etape 5 : Incrémentation du nombre d'itérations $t = t+1$.

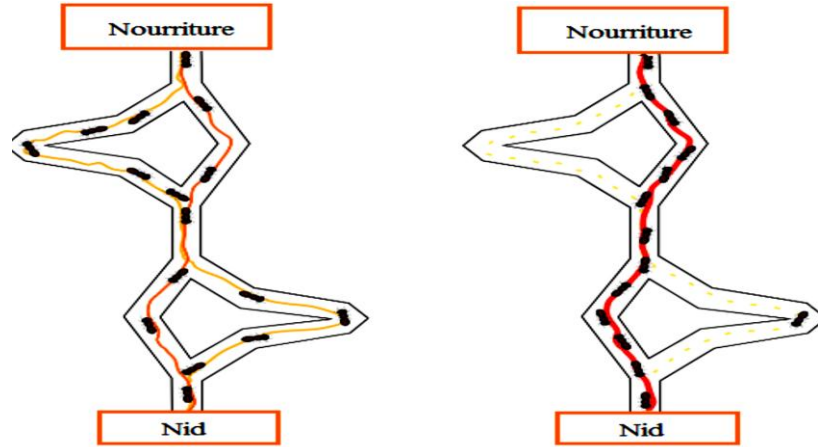
Etape 6 : Si le critère d'arrêt est satisfait alors passer à la 7^{ème} étape. Autrement, aller à la 3^{ème} étape.

Etape 7 : La position enregistrée est la solution optimale.

3.4.3 Algorithme d'optimisation de colonie de fourmis

L'algorithme d'optimisation ACO (Ant Colony Optimisation) est une méthode d'intelligence en essaim dont le principe est basé sur la manière dont les fourmis cherchent leurs nourritures et retrouvent leur chemin pour retourner dans la fourmilière [46].

Initialement, les fourmis explorent les environs de leur nid de manière aléatoire. Les fourmis peuvent déposer des phéromones au sol, grâce à une glande située dans leur abdomen et former, ainsi, des pistes odorantes qui pourront être suivies par leurs congénères (figure 3.3).



(a) au début de l'expérience (b) à la fin de l'expérience.

Figure 3.3 : Expérience de sélection des branches par une colonie de fourmis

Une colonie est capable de choisir le plus court chemin vers une source à exploiter, sans que les individus aient une vision globale du trajet.

Les étapes de l'algorithme de colonies de fourmis sont comme suit :

Etape 1 : Pour $t=1, \dots, tmax$

Pour chaque fourmis $k = 1 \dots, m$, choisir une ville au hasard.

Etape 2 : Choix d'une ville non visitée

Choisir une ville j , dans la liste des villes restantes, selon la formule suivante :

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{(\tau_{ij}(t))^\alpha \cdot (\eta_{ij})^\beta}{\sum_{L \in J_i^k} (\tau_{iL}(t))^\alpha \cdot (\eta_{iL})^\beta} & \text{si } j \in J_i^k \\ 0 & \text{si } j \notin J_i^k \end{cases} \quad (3.3)$$

Où α et β deux paramètres contrôlant l'importance relative de l'intensité de la piste τ_{ij} , et de la visibilité η_{ij} .

Etape 3 : Déposer une piste $\Delta\tau_{ij}(t)$ sur le trajet $T^k(t)$ conformément à l'équation :

$$\Delta\tau_i^k(t) = \begin{cases} \frac{Q}{L^k(t)} & \text{si } (i, j) \in T^k(t) \\ 0 & \text{si } (i, j) \notin T^k(t) \end{cases} \quad (3.4)$$

Où $T^k(t)$: Le trajet effectué par la fourmi k à l'itération t ;

$L^k(t)$: La longueur du tour et Q un paramètre fixé.

Etape 4 : Évaporer les pistes selon la formule :

$$\tau_{ij}(t + 1) = (1 - \rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t) \quad (3.5)$$

Où $\rho \in [0, 1]$ est le taux d'évaporation des phéromones.

3.4.4 Algorithme d'optimisation de colonie d'abeilles artificielles

L'algorithme d'optimisation de colonie d'abeilles artificielles (ABC : Artificiel Bee Colony) est développé en 2005 par Karaboga et Basturk, en inspectant les comportements des abeilles réelles pour trouver la source de nourriture (le nectar) et partager l'information des sources de nourriture aux autres abeilles dans le nid [47].

Dans l'algorithme ABC, les abeilles artificielles sont définies et classifiées en trois types, abeilles ouvrières (qui recherche la nourriture), spectatrices (abeilles d'observation) et exploratrices (éclaireuses) sont chargées de trouver de nouvelles nourritures (le nectar de nouvelles sources).

Pour chaque source de nourriture, il y a seulement une abeille ouvrière. Le nombre d'abeilles ouvrières est égal au nombre de sources de nourriture [48]. Si l'abeille ouvrière ne réussit pas à trouver une source de nourriture à un site, elle doit forcément devenir un scout pour rechercher aléatoirement de nouvelles sources de nourriture. Les abeilles ouvrières partagent l'information avec les abeilles spectatrices dans une ruche de sorte que les abeilles spectatrices puissent choisir une source de nourriture pour l'explorer. Le processus de cet algorithme est présenté comme suit :

Etape 1 : Initialisation

Sélectionner la population de façon aléatoire dans l'espace de recherche en utilisant l'équation ci-dessous où chaque abeille porte un vecteur U de n solutions.

$$U_j = U_j^{min} + n_j * (U_j^{max} - U_j^{min}) \quad n_j \in [0,1] \quad (3.6)$$

Calculer la valeur Fitness pour chaque vecteur en utilisant l'équation suivante :

$$Fitness = \frac{1}{F_{objectif} + 1} \quad (3.7)$$

Une fois que ces populations sont placées dans l'espace de recherche, elles prennent le nom des abeilles employeuses.

Etape 2 : Déplacement des abeilles employeuses

La probabilité du choix d'une source de nourriture est donnée par l'équation suivante :

$$P_i = \frac{0.9 * Fitness_i}{\max(Fitness_i)} + 0.1 \quad (3.8)$$

Sélectionner une source de nourriture et déterminer ses quantités de nectar. L'équation de mouvement des abeilles observatrices est donnée comme suit :

$$m_{ij}(t + 1) = x_{kj} + y \left(x_{ij}(t) - x_{kj}(t) \right) \quad y \in [0,1] \quad (3.9)$$

Tel que m_{ij} est la $j^{\text{ème}}$ position de l'abeille spectatrice, t est le nombre d'itérations, x_{ij} est l'abeille utilisée choisie aléatoirement, j représente la dimension du vecteur de solution qui produit une série de variables aléatoires dans la gamme $[-1,1]$; où $k \in 1, 2, 3, \dots, N$ et $j \in 1, 2, \dots, D$ sont choisis aléatoirement avec k différent de i ; D est le nombre de paramètres à optimiser.

Etape 3 : Déplacements des scouts

Si les valeurs de fitness des abeilles employeuses ne sont pas améliorées par un nombre d'itérations prédéterminé, ces sources de nourriture sont abandonnées, et l'abeille trouvée dans cet emplacement passera aléatoirement pour explorer d'autres nouveaux emplacements. Le modèle mathématique est donné par l'équation [56] :

$$V_{ij} = V_{ij}^{\min} + \varphi_{ij} * (V_{ij}^{\max} - V_{ij}^{\min}) \quad \varphi_{ij} \in [0,1] \quad (3.10)$$

Etape 4 : Mettre à jour la meilleure source de nourriture trouvée jusqu'ici : Apprendre la meilleure valeur de fitness et la position, qui sont trouvées par les abeilles, et les mémoriser.

Etape 5 : Critère d'arrêt

Vérifier le processus de calcul jusqu'à ce que le nombre d'itérations atteigne la valeur maximale prédéfinie ou qu'une solution de la fonction objectif acceptable soit trouvée.

3.4.5 Algorithme d'évolution différentielle

Cette méthode d'optimisation est développée en 1995 par R. Storn et K. Price [49]. L'idée principale de cette méthode consiste à utiliser la différence entre deux vecteurs choisis aléatoirement pour générer un nouveau vecteur de solutions. Pour chaque solution dans la population originale, une solution désirée est générée en effectuant la procédure de croisement. Les anciennes solutions (parents) et les nouvelles sont comparées et les meilleures apparaîtront dans la prochaine génération. L'algorithme de l'évolution différentielle s'effectue selon les étapes suivantes :

Etape 1 : La génération de la population initiale qui consiste à créer un vecteur de population initiale de N_p individus (solutions). La population initiale a pour but de donner naissance à des générations successives. Le vecteur de population initiale est sélectionné aléatoirement comme suit :

$$X_{j,i}^G = X_{j,\min} + rand[0.1] \times (X_{j,\max} - X_{j,\min}); \quad i = 1, 2, \dots, N_p; \quad j = 1, 2, \dots, D_f \quad (3.11)$$

Où :

N_p : Nombre d'individus (taille de population) ;

D_f : Nombre de paramètres de la fonction objectif ;

$rand$: nombres aléatoires distribués uniformément sur l'ensemble [0,1].

Etape 2 : La mutation qui est considérée comme la première étape vers la génération de nouvelles solutions. Un vecteur de mutation $V_i^{(G+1)}$ est généré en utilisant la formule suivante :

$$V_i^{(G+1)} = X_a^G + F \times (X_b^G - X_c^G) \tag{3.12}$$

Où : X_a , X_b et X_c sont des vecteurs sélectionnés aléatoirement avec $a \neq b \neq c \neq i$. F est la constante d'échelle utilisée pour ajuster la taille de perturbation dans l'opérateur de mutation et elle est déterminée par l'utilisateur, et sa valeur typique est dans l'intervalle [0.4, 1] [50].

Etape 3 : Le croisement, qui est appliqué sur la population du vecteur résultant de mutation et la population du vecteur parent (population initiale), où un nouveau vecteur dit vecteur désiré est généré. L'opération de croisement est effectuée selon le critère suivant :

$$U_{j,i}^{G+1} = \begin{cases} V_{j,i}^{G+1} & \text{si } (rand, [0,1]) \leq CR \\ X_{j,i}^G & \text{si } (rand, [0,1]) > CR \end{cases} \tag{3.13}$$

CR : le facteur de croisement qui a une valeur constante entre 0 et 1 déterminé aussi par l'utilisateur.

Dans le cas où $rand$ est inférieur ou égale à CR , la nouvelle solution est une combinaison des trois vecteurs choisis aléatoirement (X_a , X_b et X_c), autrement, cette nouvelle solution n'est que l'ancienne solution (parents), comme montre la figure 3.4.

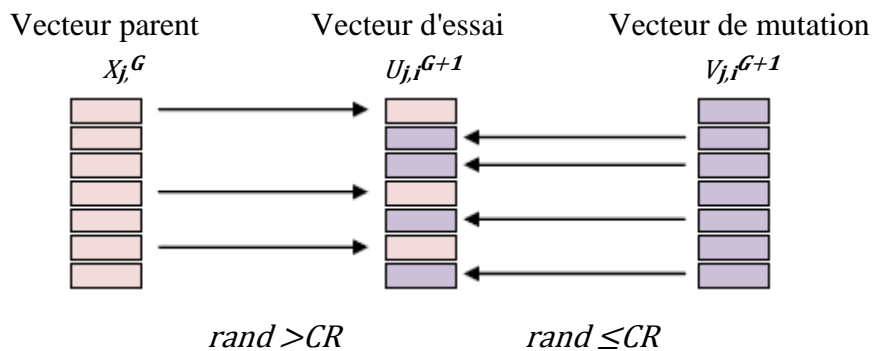


Figure 3.4 : Exemple de croisement ($D = 7$)

Etape 4 : La sélection doit être appliquée pour déterminer les individus devant participer à la prochaine génération. La sélection est effectuée par une comparaison entre la fonction du vecteur de la population initiale (vecteur parent) et la fonction du vecteur d'essai, et celui qui

donne des résultats meilleurs doit participer à la prochaine génération. La nouvelle population doit alors remplacer la population actuelle et une nouvelle boucle lancée.

3.4.6 Algorithme par sauts de grenouilles

L'algorithme par sauts de grenouilles (SFLA : Shuffled Frog-Leaping Algorithm) est une méthode métaheuristique qui simule l'évolution d'un groupe de grenouilles en cherchant un endroit qui dispose d'une quantité maximale de nourriture étalée aléatoirement sur des pierres dans un étang [51].

Dans cette méthode, les grenouilles peuvent communiquer entre elles est améliorer leurs mêmes par contamination (passant l'information). Chaque grenouille, représente une solution au problème. La population entière des grenouilles est divisée à un certain nombre de groupes de grenouilles appelées communautés qui évoluent indépendamment pour parcourir l'espace des solutions dans les différentes directions. Chaque communauté représente un type de même conduisant localement à l'exploration de l'espace des solutions selon des stratégies spécifiques qui permettent le transfert des mêmes parmi les individus locaux.

L'information entre les différentes communautés circule par l'intermédiaire d'un processus de saut.

Supposons que la population initiale est constituée de F grenouilles définie aléatoirement dans l'espace $(X, i = 1, 2, \dots, F)$. L'adaptabilité ou le fitness fi de la $i^{\text{ème}}$ grenouille représente la valeur de la fonction objectif. Toutes les grenouilles sont triées dans un ordre décroissant et sont divisées en m communautés contenant chacune n grenouilles ($F=m \times n$), de telle manière que la première grenouille appartient à la première communauté, la deuxième grenouille est affectée à la deuxième communauté.

Dans chaque communauté, les grenouilles fournissant la meilleure et la plus mauvaise solution sont identifiées et notées par X_b et X_w respectivement. La grenouille donnant la meilleure solution dans la population entière est notée par X_g .

Pendant l'évolution d'une communauté, c.-à-d., pendant l'exploration locale, la plus mauvaise grenouille effectue un saut vers la meilleure X_b (figure 3.5) :

$$X'_w = X_w + S \quad (S = r \times (X_b - X_w)) \quad (3.14)$$

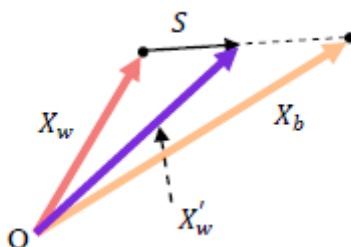


Figure 3.5 : Règle originale du saut de grenouille

Où S représente la valeur du saut, r est un nombre aléatoire compris entre $[0,1]$, S_{max} est le saut maximal autorisé.

Si le saut produit une meilleure solution, alors cette solution X'_w remplace la plus mauvaise X_w . Sinon, on applique la même règle en remplaçant cette fois-ci X_b par la solution globale X_g . Si la nouvelle solution X'_w reste moins bonne que X , on génère alors aléatoirement une autre solution meilleure que celle de X_w et on remplace X_w par X'_w . Chaque communauté évolue ainsi en un certain nombre d'itérations.

Les m communautés sont ensuite mélangées pour former à nouveau la population et le processus de tri, partitionnement de la population en communautés, la recherche locale et le mélange des communautés est répété jusqu'à satisfaire un critère d'arrêt.

L'algorithme ci-dessous décrit le principe de SFLA :

Etape 1 : Fixer la taille F de la population, le nombre m de communautés et le nombre N d'itérations.

Etape 2 : Générer aléatoirement une population de F solutions et évaluer chaque solution.

Etape 3 : Trier la population et déterminer la meilleure solution X_g .

Etape 4 : Partitionner la population en m communautés.

Etape 5 : Recherche locale

Pour chaque communauté, répéter pour N itérations :

- ✓ Détermination de la meilleure solution X_b et la mauvaise solution X_w
- ✓ Calcul de la solution X'_w à partir de X_b
- ✓ Si X'_w est meilleure que X_w , remplacer X_w par X'_w
- ✓ Sinon calculer X'_w à partir de X_g et remplacer X_w par X'_w
- ✓ Si X'_w est meilleure que X_w , remplacer X_w par X'_w
- ✓ Sinon générer aléatoirement X'_w et remplacer X_w

Etape 6 : Regrouper les m communautés pour former à nouveau la population

Etape 7 : Aller à l'étape 3 si le critère d'arrêt n'est pas atteint

3.4.7 Algorithme des coucou (CSA)

La recherche par coucou est l'un des derniers algorithmes métaheuristiques inspirés de la nature, proposés par X. Yang et S. Deb en 2009 [52]. Elle s'inspire de la reproduction agressive d'espèces de coucous en combinaison avec le comportement de Levy Flight. Le coucou femelle pond ses œufs fécondés dans les nids d'autres oiseaux hôtes. De cette façon, les oiseaux hôtes élèvent involontairement leur couvée. Si on découvre un œuf de coucou dans le nid d'un oiseau hôte, l'oiseau hôte le jettera ou abandonnera son nid.

Dans l'algorithme CS, chaque œuf d'oiseaux hôtes dans un nid représente une solution, et un œuf de coucou représente une nouvelle solution. Si une nouvelle solution est meilleure que celle du nid, la pire sera remplacée. Pour simplifier la description de la CS, nous utilisons maintenant les trois règles idéalisées suivantes [53] :

- Chaque coucou pond un œuf à la fois et le dépose dans un nid choisi au hasard.
- Les meilleurs nids avec des œufs de haute qualité seront transférés aux générations suivantes.
- Le nombre de nids d'hôtes disponibles est fixe et l'œuf pondu par un coucou est découvert par l'oiseau hôte avec une probabilité $p_a \in (0, 1)$. Dans ce cas, l'oiseau hôte peut soit se débarrasser de l'œuf, soit simplement abandonner le nid et construire un nid complètement nouveau.

Sur la base de ces trois règles, les étapes de base du CS peuvent être résumées sous la forme du pseudo-code suivant :

```

Génération d'une population initiale de  $n$  nids hôtes  $x_i$ 
Tant que le critère d'arrêt n'est pas satisfait, répéter :
    Générer un coucou par Levy Flight et évaluer sa fonction de coût  $F_i$  ,
    Choisir aléatoirement un nid parmi les  $n$  nids hôtes,
    Si  $F_i < F_j$ 
        Remplacer  $F_j$  par cette nouvelle solution,
    Fin Si
    Une fraction  $p_a$  des pires nids sont abandonnés et d'autres sont générés à la place, et
    faire une sélection.
    Classer les solutions et trouver la meilleure solution
Fin Tant que
  
```

Figure 3.6 : Pseudo code de l'algorithme CS

Lors de la génération de nouvelles solutions $x^{(t+1)}$ en réalisant des Levy Flight.

$$x_i^{(t+1)} = x_i^{(t)} + \alpha \otimes Lévy(\lambda) \quad (3.15)$$

Où $\alpha > 0$ est le pas qui doit être associé au problème des échelles d'intérêts ; α peut être réglé sur la valeur 1 dans la plupart des situations. L'équation précédente est essentiellement l'équation stochastique de la marche aléatoire, qui est une chaîne de Markov dont le prochain statut ou emplacement ne dépend que du statut ou de l'emplacement actuel, et de la probabilité de transition, qui sont respectivement le premier et le deuxième terme. Le produit \otimes représente la multiplication par entrée, qui est similaire à celles utilisées dans PSO. En termes d'exploration de l'espace de recherche, la marche aléatoire via le de Lévy est plus efficace car sa longueur de pas est beaucoup plus longue à long terme. [61]

La longueur de pas aléatoire du Lévy Flight, qui fournit fondamentalement une marche aléatoire, est dérivée d'une distribution de Lévy avec une variance infinie et une moyenne infinie.

$$Lévy \sim u = t^{-\lambda}, \quad (1 < \lambda \leq 3) \quad (3.16)$$

Ici, les sauts séquentiels d'un coucou forment fondamentalement un processus de marche aléatoire avec une distribution de longueur de pas en loi de puissance avec une queue lourde [61]. De nombreuses nouvelles solutions devraient être générées par marche de Lévy près de la meilleure solution obtenue, puisque cette procédure accélérera l'exploration locale. Cependant, pour confirmer que l'algorithme ne sera pas piégé dans un optimum local, une partie substantielle des nouvelles solutions doit être générée par randomisation en champ lointain, de sorte que les emplacements soient suffisamment éloignés de la meilleure solution actuelle.

3.4.8 Algorithme des chauves-souris

L'algorithme des chauve-souris (BA: Bat Algorithm) est un algorithme d'optimisation métaheuristique inspiré de la nature, basé sur le comportement de l'écholocation de microchiroptères. Il a été proposé par le docteur X. Yang en 2010 [54].

Pour des raisons d'optimisation, le docteur X. Yang a idéalisé le comportement des chauves-souris par l'utilisation de trois règles idéalisées suivantes [54] :

- 1- Toutes les chauves-souris utilisent l'écholocation pour déterminer l'environnement autour d'eux, ils peuvent détecter la distance et l'orientation de la cible (proie) ainsi que l'emplacement des obstacles.

- 2- Les chauves-souris volent aléatoirement avec une vitesse v_i à une position x_i avec une fréquence fixée f_{min} , en variant la longueur d'onde λ et l'intensité A_0 de recherche de proie. Elles peuvent ajuster automatiquement la longueur d'onde (ou la fréquence) ainsi que le taux d'émission de pulsation $r \in [0,1]$, selon la proximité de leurs proies.
- 3- Bien que l'intensité puisse varier de plusieurs manières, nous supposons que l'intensité varie dans un intervalle de $A \in [A_0, A_{min}]$.

Mouvement des chauves-souris virtuelles

Dans les simulations, nous utilisons naturellement des chauves-souris virtuelles. Nous devons définir les règles, comment mettre à jour leurs positions x_i et les vitesses v_i , dans un espace de recherche bidimensionnel, à chaque itération t . Les nouvelles solutions x_i^t et les vitesses v_i^t au pas de temps t sont données par :

$$f_i = f_{min} + (f_{max} - f_{min})\beta \quad (3.17)$$

$$v_i^t = v_i^{t-1} + (x_i^t - x^*)f_i \quad (3.18)$$

$$x_i^t = x_i^{t-1} + v_i^t \quad (3.19)$$

$\beta \in [0,1]$ est un vecteur aléatoire issu d'une distribution uniforme. x^* est la meilleure position (solution) globale courante qui est déterminée en comparant toutes les solutions parmi tous les n chauves-souris. Alors que λf_i est l'augmentation de vitesse, nous utilisons f_i pour régler la vitesse tout en fixant l'autre facteur λ_i . La plage de valeurs de f_i diffère d'un problème à l'autre en fonction du domaine, de la taille, etc. Initialement, chaque chauve-souris reçoit de manière aléatoire une fréquence qui est dérivée uniformément de $[f_{min}, f_{max}]$.

Pour la recherche locale, une fois une solution est sélectionnée parmi les meilleures solutions courantes, une nouvelle solution pour chaque chauve-souris est générée localement en utilisant le parcours aléatoire.

$$x_{new} = x_{old} + \varepsilon A^t \quad (3.20)$$

Où $\varepsilon \in [-1,1]$ est un nombre aléatoire, tandis que $A^t = \langle A_i^t \rangle$ est la moyenne d'intensité de toutes les chauves-souris à cette étape de traitement.

La mise à jour des vitesses et des positions des chauves-souris présente une certaine similitude avec la procédure d'optimisation standard des essaims de particules. Étant donné le contrôle de la portée du mouvement des particules envahissantes, l'algorithme de chauves-souris peut être considéré comme étant une combinaison équilibrée de l'optimisation standard

des essaims de particules et de la recherche locale intensive, contrôlée par le volume et le taux de pulsation.

L'intensité et le pouls

En outre, l'intensité A_i et le pouls r_i doivent être mis à jour à chaque itération. Au fur et à mesure que l'intensité diminue une fois que la chauve-souris a trouvé sa proie, alors que le pouls r_i augmente, l'intensité peut être choisie comme valeur de commodité. Lorsque l'intensité atteint le minimum A_{min} , cela signifie que la chauve-souris a trouvé la proie et a cessé d'émettre un son. Les équations suivantes montrent comment l'intensité A_i et le pouls r_i sont mis à jour pendant les itérations.

$$A_i^{t+1} = \alpha A_i^t \quad (3.21)$$

$$r_i^{t+1} = r_i^0 [1 - \exp(-\gamma t)] \quad (3.22)$$

Où α et γ sont des constantes. Le facteur α constant est similaire au facteur de refroidissement dans le recuit simulé. Pour tout $0 < \alpha < 1$ et $\gamma > 0$ tel que

$$A_i^t \rightarrow 0 \quad \text{et} \quad r_i^t \rightarrow r_i^0 \quad \text{lorsque} \quad t \rightarrow \infty \quad (3.23)$$

Le choix des paramètres nécessite une certaine expérimentation. Chaque chauve-souris devrait avoir différentes valeurs de sonorité et taux d'émission d'impulsion. L'intensité et le taux d'émission ne sont mis à jour que si les nouvelles solutions sont améliorées, ce qui signifie que ces chauves-souris se déplacent vers la solution optimale.

Le pseudo-code de l'algorithme des chauves-souris (BA) peut être décrit comme suit :

<p>Fonction objectif : $f(x)$, $x = (x_1, \dots, x_d)^T$</p> <p>Initialiser la population de chauve-souris x_i et la vitesse v_i, $i = 1, 2, \dots, n$</p> <p>Définir la fréquence d'impulsions f_i de chaque position x_i</p> <p>Initialiser le pouls r_i et l'intensité A_i</p> <p>Tant que ($t < \text{nombre maximum d'itérations}$)</p> <p>Générer de nouvelles solutions en ajustant la fréquence et en actualisant les vitesses et les positions / solutions (équations (3.17), (3.18) et (3.19)).</p> <p>Si ($rand > r_i$)</p> <p style="padding-left: 20px;">Sélectionnez une solution parmi les meilleures solutions</p> <p style="padding-left: 20px;">Générer une solution locale autour de la meilleure solution sélectionnée x^* (équation 3.20)</p>
--

```
Fin si
Si ( $rand < A_i$  et  $f(x_i) < f(x^*)$ )
    Accepter de nouvelles solutions
    Augmenter  $r_i$  et réduire  $A_i$  (équations (3.21), (3.22))
Fin si
Trouver la meilleure solution  $x^*$ 
Fin tant que
Afficher les résultats donnés par la meilleure solution  $x^*$ 
Fin de l'algorithme
```

Figure 3.7 : Pseudo code de l'algorithme des chauves-souris (BA)

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté au départ quelques méthodes d'optimisation métaheuristiques les plus utilisées en électrotechnique. Ensuite, nous avons choisi et détaillé la méthode d'optimisation basée sur l'algorithme des chauves-souris (BA) pour sa précision, simplicité et vitesse de convergence par rapport aux autres méthodes. Cet algorithme sera par la suite utilisé dans le chapitre suivant dans le but de résoudre le problème d'intégration optimale des PVS afin d'améliorer les performances du réseau de distribution étudié du point de vue pertes totales de puissance et du profil de tension.

Chapitre 4

Insertion optimale des PVS dans le réseau de distribution

4.1 Introduction

Les réseaux électriques subissent des changements radicaux et rapides, en raison de l'augmentation de la consommation d'énergie électrique. Par conséquent, les gestionnaires des réseaux électriques font de grands efforts pour intégrer les productions décentralisées afin de satisfaire la demande des consommateurs.

La production décentralisée se définit par opposition à la production classique centralisée qui est caractérisée par des unités de grandes puissances raccordées au réseau électrique haute tension. Les réseaux de distribution représentent le maillon du système de puissance où le développement de la production décentralisée est le plus attendu [2]. Cependant, l'interconnexion à grande échelle de ces systèmes aux réseaux de distribution pourrait créer de nombreux problèmes techniques tels que: la modification du transit de puissance, la variation de la tension, et la perte de la stabilité du réseau [12].

Dans ce chapitre, on s'intéressera à l'étude du réseau de distribution en présence des unités de PVS (Photovoltaic Sources) et à l'optimisation en utilisant une méthode méta-heuristique BA pour déterminer l'emplacement et la capacité.

4.2 Organisation du réseau de distribution en présence des unités PVS

Afin que l'intégration des unités de PVS dans le réseau de distribution soit efficace et rentable, il faut que l'insertion de ces nouvelles productions décentralisées soit optimale de point de vue capacité et emplacement en respectant les caractéristiques du réseau.

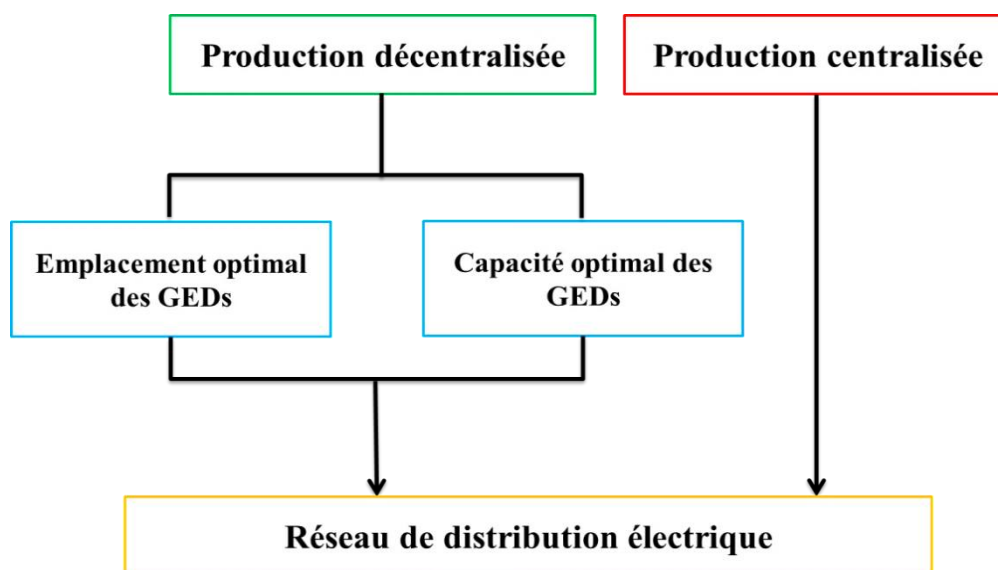


Figure 4.1 : Organisation du réseau de distribution en présence des PVS

Emplacement des unités de PVS

Les unités de PVS doivent être introduites de manière à permettre la réduction du coût de transport d'énergie électrique, les pertes de puissance en lignes et l'appel de puissance réactive au niveau du poste source. De ce fait, il faut que l'emplacement de ces unités dans le réseau de distribution soit optimal de telle sorte que les tensions dans tous les nœuds soient dans les limites acceptables et les pertes de puissance soient minimales.

Capacité des unités de PVS

L'insertion non-planifiée des PVS peut provoquer un effet inverse sur les pertes de puissance et le plan de tension de réseau de distribution, il faut que la puissance injectée par chaque PVS intégrée soit optimale pour équilibrer entre la puissance générée et la puissance demandée pendant les différentes périodes de charges. Donc notre problème consiste à optimiser aussi les capacités des unités de PVS insérées dans le réseau de distribution.

4.3 Formulation du problème d'optimisation

4.3.1 Fonction objectif

La fonction objectif prise pour les quatre scénarios à étudier dans ce chapitre est de réduire les pertes de puissance active totale. Mathématiquement, la fonction objectif peut être formulée comme suit [55]:

$$F_{Obj} = \min \sum_{i=1}^{Nb} P_{loss,i} \quad (5.1)$$

Où :

- Nb est le nombre de branches dans le réseau de distribution ;
- $P_{loss,i}$ est la perte de puissance active dans une branche.

4.3.2 Contraintes

a) Contraintes égalités

Les contraintes égalités sont définies par les équations d'écoulement de puissance, correspondant à un point de fonctionnement du réseau, pour une puissance demandée et une puissance de génération donnée. Ces contraintes sont représentées par des équations non linéaires. Ils doivent assurer que la somme des puissances active et réactive injectées dans chaque nœud soit égale à zéro. Ces contraintes s'expriment par [55]:

$$\begin{cases} P_G + \sum_{i=1}^{NPVS} P_{PVS_i} + \sum_{i=1}^{Nn} P_{Li} - \sum_{i=1}^{Nb} P_{loss} = 0 \\ Q_G + \sum_{i=1}^{NPVS} Q_{PVS_i} + \sum_{i=1}^{Nn} Q_{Li} - \sum_{i=1}^{Nb} Q_{loss} = 0 \end{cases} \quad (5.2)$$

Où :

- Nb est le nombre total des branches ;
- Nn est le nombre total des nœuds de charge ;
- $NPVS$ est le nombre total des PVS ;
- P_G, Q_G , sont respectivement la puissance active et réactive générée provenant de la source ;
- P_{PVS_i}, Q_{PVS_i} sont respectivement la puissance active et réactive générée par la PVS au nœud i ;
- P_{loss}, Q_{loss} sont respectivement les pertes de puissance active et réactive dans une branche.

b) Contraintes inégalités

- **Contrainte de tension** : Le niveau de tension de chaque nœud doit être conservée dans les limites spécifiées comme suit [55]:

$$V_{min,i} \leq V_i \leq V_{max,i} \quad (5.3)$$

Où $V_{min,i}$ et $V_{max,i}$ sont respectivement les valeurs minimale et maximale d'amplitude de la tension au niveau du nœud i .

- **Contrainte de puissances transmise des lignes** : La puissance apparente de chaque ligne doit être toujours inférieure ou égale à la valeur maximale admissible.

$$|S_{li}| \leq S_{li}^{max} \quad (5.4)$$

Où :

- S_{li} est la puissance apparente transmise dans la ligne li ;
- S_{li}^{max} est la puissance apparente maximale transmise dans la ligne li .
- **Contrainte de capacité de PVS** : La puissance active injectée par les PVS doit être toujours entre leurs limites min et max .

$$P_{PVS_i}^{Min} \leq P_{PVS_i} \leq P_{PVS_i}^{Max} \quad (5.5)$$

Où

- P_{PVS_i} , est la puissance active injectée par la PVS au nœud i .

4.3.3 Variables de contrôle

La localisation des unités PVS aux emplacements appropriés réduisent les pertes du système, améliorent le profil de tension du système et réduisent la surcharge des lignes de distribution. Les variables de contrôle du problème sont les emplacements des PVS et les capacités des PVS, qui contrôlent la fonction objectif.

Le vecteur d'état X^T pour la résolution des deux scénarios (deuxième et troisième) comporte les puissances actives générées par les PVS et leurs emplacements dans le réseau de distribution. Le vecteur d'état est exprimé comme suit :

$$X^T = [L^1 L^2 \dots L^n \quad S^1 S^2 \dots S^n] \quad (5.8)$$

Où :

- L^1, L^2 jusqu'à L^n sont les emplacements optimaux des PVS.
- S^1, S^2 jusqu'à S^n sont les capacités optimales des PVS.

La figure ci-dessous présente le principe de la détermination de l'emplacement et la capacité optimaux des PVS dans les réseaux de distribution par la méthode d'optimisation.

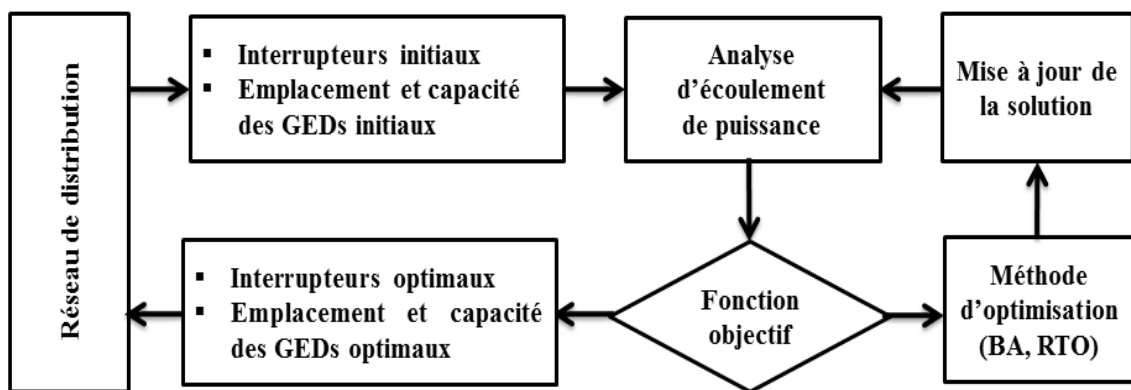


Figure 4.2 : Principe d'optimisation de l'emplacement et de la capacité des PVS.

Les différentes étapes de la recherche d'une configuration optimale du système et la localisation optimale des PVS dans le réseau de distribution en utilisant des méthodes d'optimisation métaheuristique sont données comme suit :

Etape 1 : Lire les données du réseau de distribution.

Etape 2 : Exécuter l'écoulement de puissance en considérant la configuration initiale et calculer les pertes totales.

Etape 3 : Initialiser les paramètres de la méthode d'optimisation utilisée.

Etape 4 : Générer aléatoirement un nombre des individus qui forment une population initiale, ceci représente les emplacements et les capacités des PVS, $P^0 = [X_1, X_2, \dots, X_i]$. Initialiser le compteur d'itération ($t = 0$).

Etape 5 : Calculer l'écoulement de puissance pour chaque variable d'état et évaluer la fonction objectif.

Etape 6 : Après le calcul de l'écoulement de puissance, vérifier les contraintes de sécurité du système et de topologie.

Etape 7 : Générer les nouvelles solutions selon le processus de la méthode d'optimisation utilisée, et allez à l'étape 5.

Etape 8 : Répéter la procédure de l'étape 5 à 7 jusqu'à ce que le nombre maximum des générations soit atteint.

Etape 9 : Choisir le meilleur individu et afficher les résultats (les emplacements des PVS, les capacités des PVS, les pertes totales et le profil de tension).

4.4 Applications

L'optimisation de la configuration du système, l'emplacement et la capacité des PVS se fait par l'algorithme métaheuristique BA, programmé sous MATLAB et testé sur le réseau de distribution IEEE 33 nœuds avec trois niveaux de charge.

4.4.1 Résultats et discussions

L'évolution de la fonction objectif durant le processus d'optimisation par l'approche proposée pour les différents niveaux de charge sont présentées aux figures 4.3 à 4.5.

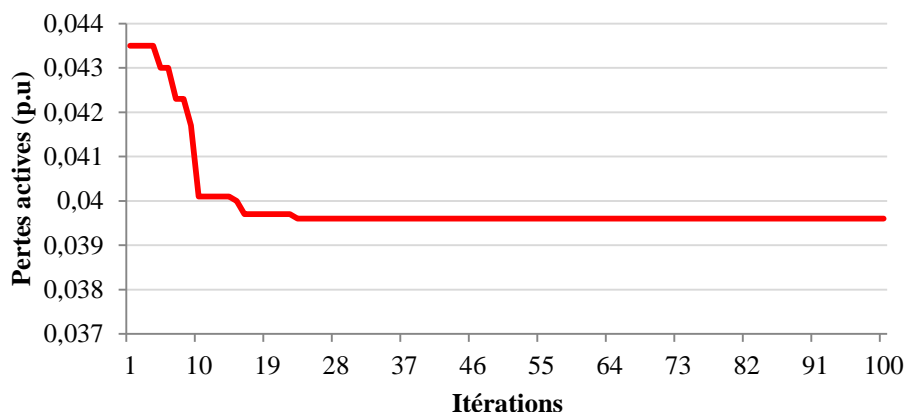


Figure 4.3 : Caractéristique de convergence des pertes actives par BA en présence des PVS avec une charge faible.

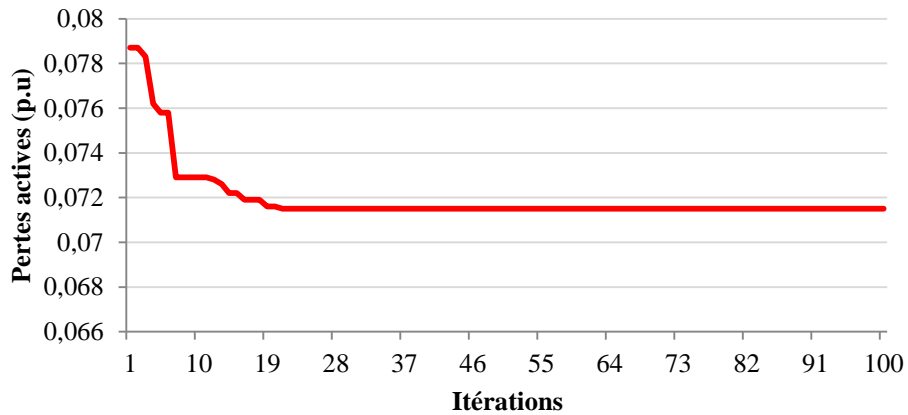


Figure 4.4 : Caractéristique de convergence des pertes actives par BA en présence des PVS avec une charge nominale.

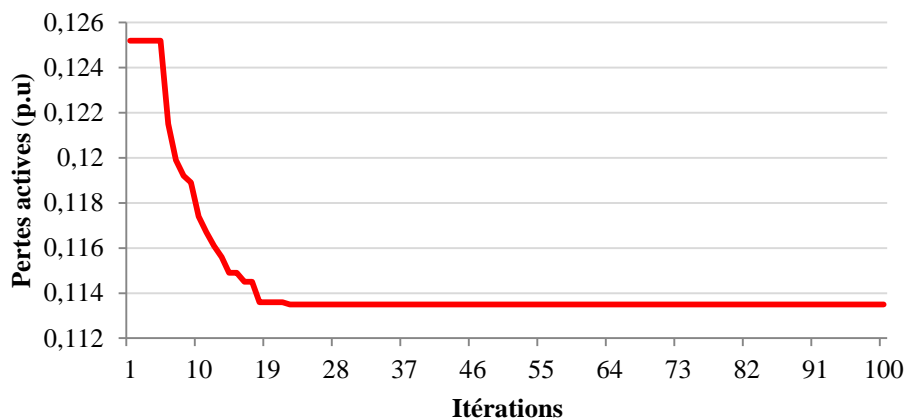


Figure 4.5 : Caractéristique de convergence des pertes actives par BA en présence des PVS avec une charge forte.

Le tableau 4.1 résume le choix optimal d’emplacement et la capacité des PVS installées pour les trois niveaux de charge. D’après les résultats de simulation on remarque clairement que l’installation des PVS peut diminuer les pertes de puissance du réseau de distribution électrique.

Le tableau 4.2 montre les amplitudes de tension au niveau de chaque nœud pour les trois niveaux de charge après l’installation des PVS dans le réseau. Les profils de la tension avant et après l’installation des PVS dans le réseau pour différents niveaux de charge sont illustrés sur les figures 4.6 à 4.8. D’après le tableau 4.2 et par rapport au cas initial, nous remarquons que les tensions minimales 0,9361 pu (C. Faible), 0,913 pu (C. Nominale) et 0,8888 pu (C. Forte) sont obtenues au niveau du nœud 18 dans le cas initial. Après l’installation des PVS, des nouveaux profils de tensions avec des valeurs minimales de 0,9764 pu (C. Faible), 0,9686 pu (C. Nominale) et 0,9607 pu (C. Forte) sont obtenus au niveau du nœud 33.

Tableau 4.1 : Résultats obtenus par BA pour différents niveaux de charge.

		Cas initial	BA
C. Faible	Emplacement optimal		30 - 24 - 14
	Capacité optimale (MW)		0.7931 - 0.8183 - 0.5643
	Pertes actives (kW)	109.77	39.58
C. Nominale	Emplacement optimal		30 - 24 - 14
	Capacité optimale (MW)		1.0712 - 1.1008 - 0.7543
	Pertes actives (kW)	202.70	71.47
C. Forte	Emplacement optimal		30 - 24 - 14
	Capacité optimale (MW)		1.3487 - 1.3815 - 0.9531
	Pertes actives (kW)	329.90	113.46

Tableau 4.2 : Amplitudes de tension après installation des PVS dans le réseau de distribution IEEE 33 nœuds pour trois niveaux de charge

N. Nœuds	C. Faible	C. Nominale	C. Forte	N. Nœuds	C. Faible	C. Nominale	C. Forte
1	1,0000	1,0000	1,0000	18	0,9796	0,9727	0,9661
2	0,9991	0,9988	0,9985	19	0,9987	0,9983	0,9978
3	0,9957	0,9943	0,9928	20	0,9960	0,9947	0,9934
4	0,9935	0,9913	0,9891	21	0,9955	0,9940	0,9925
5	0,9915	0,9886	0,9858	22	0,9950	0,9934	0,9917
6	0,9854	0,9806	0,9756	23	0,9954	0,9939	0,9923
7	0,9836	0,9781	0,9726	24	0,9951	0,9935	0,9919
8	0,9827	0,9769	0,9711	25	0,9927	0,9903	0,9879
9	0,9820	0,9760	0,9699	26	0,9851	0,9801	0,975
10	0,9816	0,9755	0,9694	27	0,9847	0,9796	0,9744
11	0,9817	0,9756	0,9696	28	0,9819	0,9759	0,9698
12	0,9820	0,9760	0,9701	29	0,9802	0,9736	0,9669
13	0,9830	0,9773	0,9718	30	0,9802	0,9737	0,9671
14	0,9834	0,9778	0,9725	31	0,9773	0,9698	0,9622
15	0,9824	0,9765	0,9708	32	0,9766	0,9689	0,9611
16	0,9814	0,9752	0,9692	33	0,9764	0,9686	0,9607
17	0,9800	0,9733	0,9668				

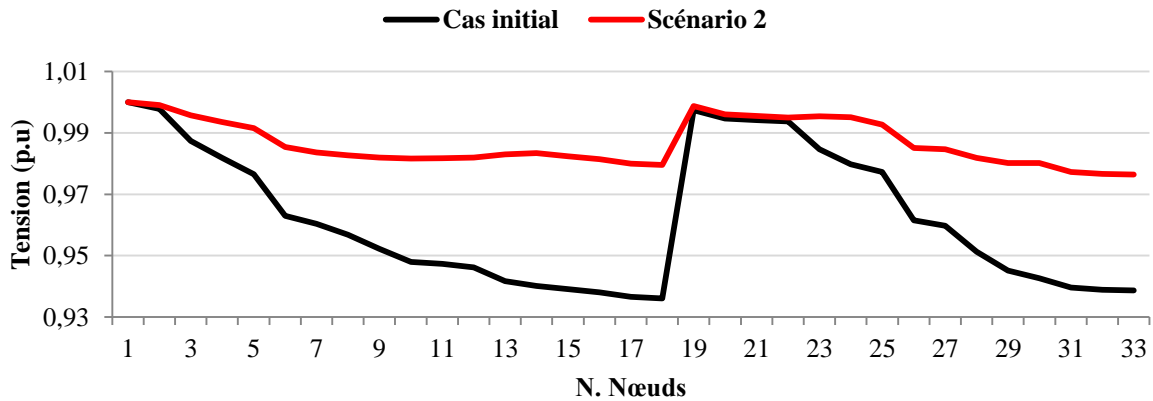


Figure 4.6 : Profil de tension avant et après installation des PVS pour une charge faible.

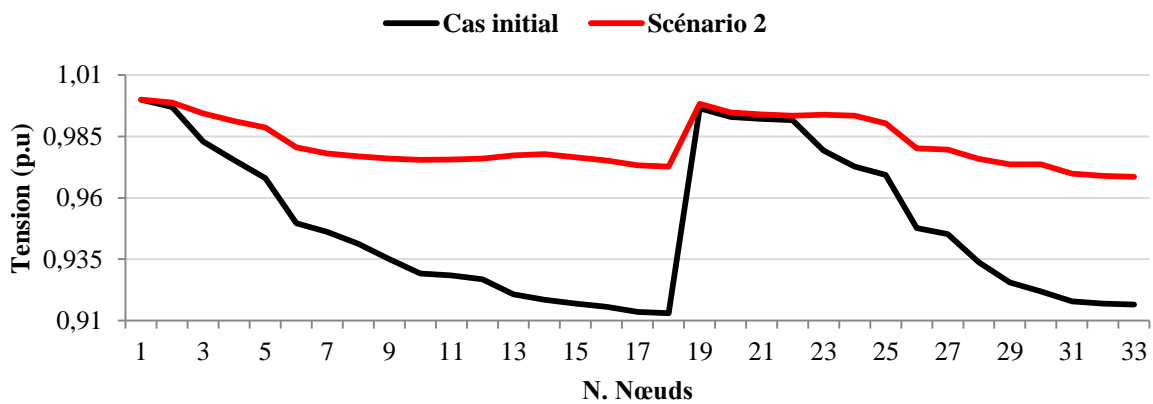


Figure 4.7 : Profil de tension avant et après installations de PVS pour une charge nominale.

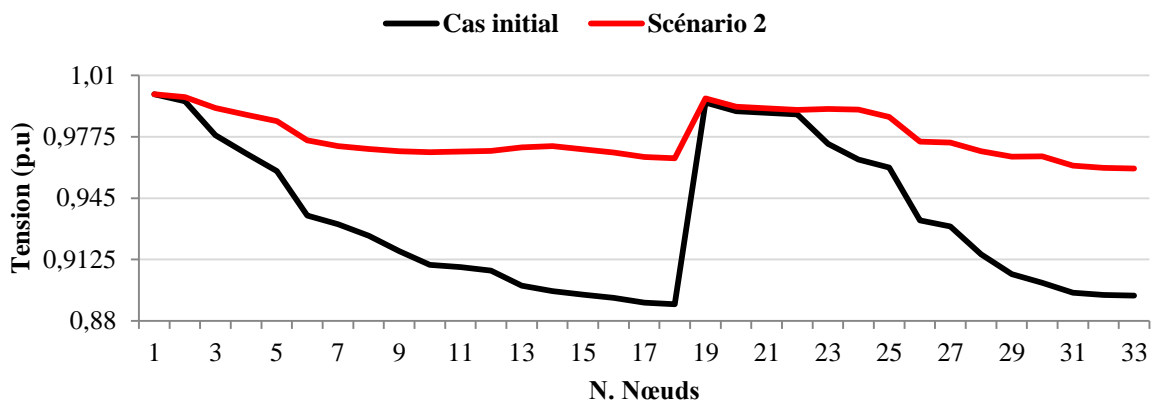


Figure 4.8 : Profil de tension avant et après installation des PVS pour une charge forte.

Les figures 4.9 et 4.10 représentent respectivement les pertes totales de puissance active et réactive avant et après d'installation des PVS avec leurs pourcentages de réduction pour différents niveaux de charge. Il est clair, d'après ces figures, que les pertes totales de puissances actives et réactives sont réduites avec un pourcentage de minimisation de (63,94% et 62,62%) pour charge faible, (64,74% et 63,46%) pour charge nominale et

(65,61% et 64,37%) pour charge forte en comparaison avec le cas initial. Les résultats reflètent clairement l'impact de l'installation optimale des PVS sur la réduction des pertes totales de puissance du réseau IEEE 33 nœuds.

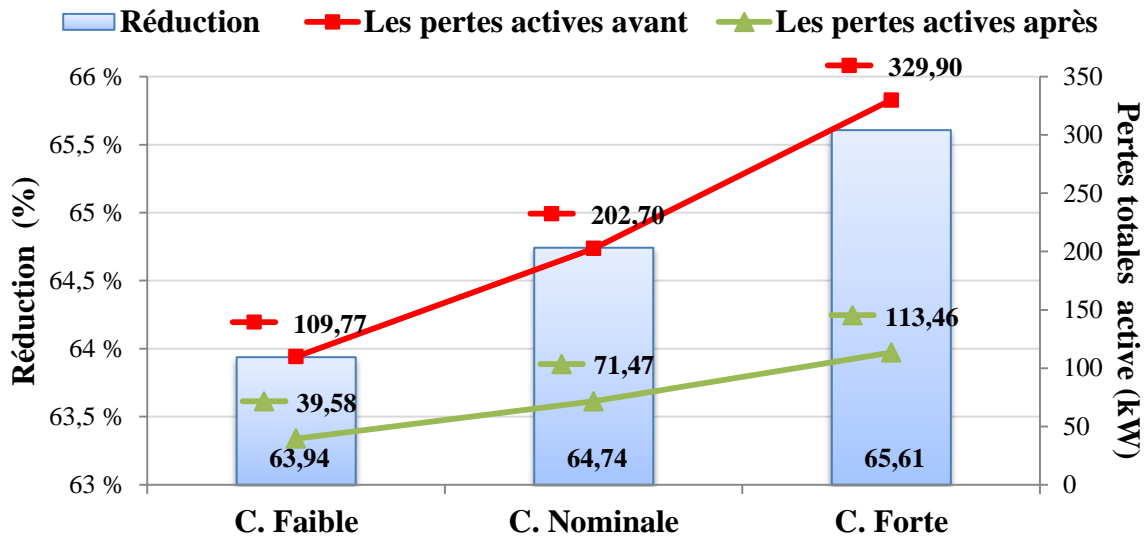


Figure 4.9 : Pertes totales de puissance active avant et après installation des PVS avec leurs réductions pour les trois niveaux de charge.

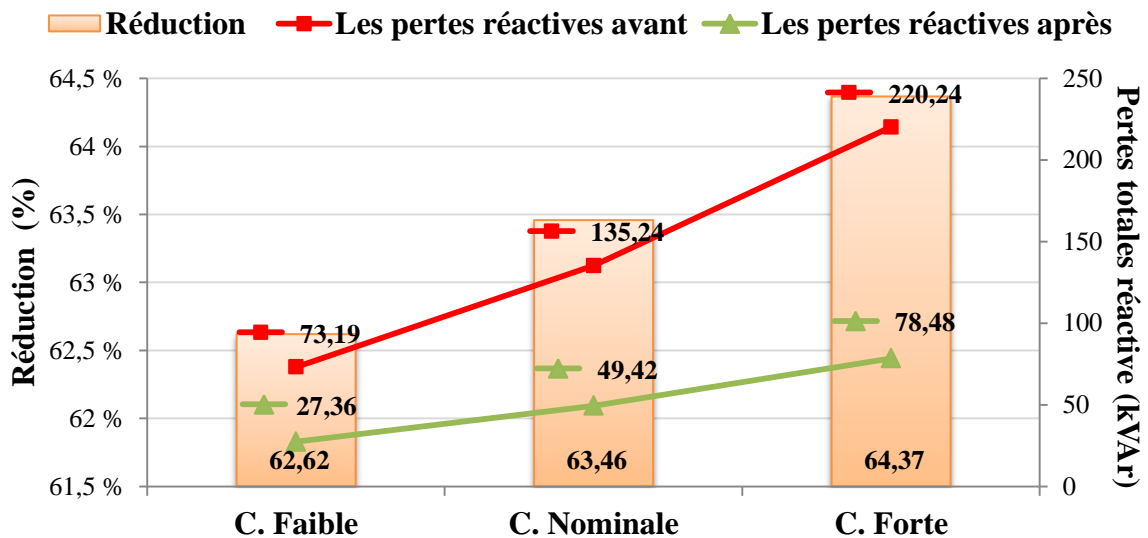


Figure 4.10 : Pertes totales de puissance réactive avant et après installation des PVS avec leurs réductions pour les trois niveaux de charge.

Le tableau 4.3 présente une étude comparative entre les résultats obtenus par les algorithmes BA (Algorithme de chauve-souris), ACSA (Algorithme de la recherche coucou adaptatif) [56], SLFA (Algorithme de saut de grenouilles) [57] et GA (Algorithme génétique) [58] faite au niveau de tous les scénarios étudiés du point de vue capacité totale des PVS, pertes de puissance actives totales, taux de réduction des pertes totales et minimum de

tension. À partir du tableau, nous pouvons remarquer que le performance du BA est meilleure que celles du ACSA, du SLFA et du GA en termes de minimisation des pertes de puissance.

Tableau 4.3 : Résultats obtenus par BA comparés à ACSA, SLFA et à GA.

		BA	ACSA [56]	SLFA [57]	GA [58]
Scénario 2	Capacité optimale (MW)	2.9263	3.2545	1.3965	1.6044
	Pertes actives (kW)	71.47	74.26	83.37	100.1
	Réduction (%)	64.74	63.26	58.86	50.60
	Minimum de tension (p.u)	0.9686	0.9778	0.9770	0.9605

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'application d'une méthode métaheuristique appelée l'algorithme de chauve-souris (BA) pour résoudre le problème de l'emplacement et la capacité optimale des PVS installées dans un réseau de distribution. L'algorithme BA a été inclus avec le calcul de l'écoulement de puissance dans l'objectif de minimiser les pertes totales de puissance et d'améliorer le profil de tension.

Cette méthode a été appliquée sur un réseau de distribution IEEE 33 nœuds avec trois niveaux de charge (faible, nominale, forte). Les résultats présentés montrent que l'installation des PVS dans le réseau de distribution peut réduire les pertes totales de puissance et améliorer le profil de tension.

La comparaison des résultats obtenus a montré aussi l'efficacité de l'algorithme BA par rapport aux algorithmes ACSA, SLFA et GA pour résoudre ce type de problème.

Conclusion générale

L'optimisation de l'insertion des unités GEDs dans le réseau de distribution ainsi que la reconfiguration de ce dernier sont deux facteurs essentiels pour l'amélioration de l'efficacité du fonctionnement et la gestion des réseaux de distribution. Dans ce travail et dans le cadre de l'optimisation, l'amélioration des performances de fonctionnement des réseaux de distribution en présence de GEDs a été traitée. Pour cela, nous avons procédé comme suit :

- Une présentation d'une technique basée sur le balayage avant et arrière de la ligne du réseau pour le calcul de l'écoulement de puissance dans les réseaux de distribution a été faite. La technique a été implémenté sur le réseau de distribution IEEE 33 nœuds avec différentes conditions de charge.
- Une application de l'algorithme des chauves-souris (BA) dans l'optimisation de l'emplacement et de la capacité des PVS dans le réseau de distribution a été faite. Le programme développé a été appliqué sur le réseau de distribution IEEE 33 nœuds avec trois niveaux de charge: charge faible, charge nominale et charge forte. Nous avons formulé le problème d'optimisation avec un seul objectif qui est la minimisation des pertes de puissance active. Nous avons remarqué à partir des résultats obtenus que l'insertion des unités GEDs, a un rôle important dans l'amélioration des performances du réseau de distribution. Les résultats obtenus ont également montré l'efficacité des algorithmes proposés par rapport à d'autres algorithmes dans la littérature.

Ce sujet de recherche peut être développé et continué selon plusieurs axes dans une perspective qui s'en résume dans les points suivants :

- Considérer d'autres objectifs dans le problème de l'intégration optimale de la GED telle que la minimisation des coûts d'investissement, d'opération et de maintenance de la GED.
- Appliquer des nouvelles métaheuristiques et leurs hybridations améliorer les solutions.
- Implémenter cette étude sur un réseau de distribution Algérien.

Bibliographie

- [1] V.T Khanh, “Interconnexion des sources d'énergie renouvelable au réseau de distribution électrique”, Thèse de doctorat, Université du Québec à Trois Rivières, 2009.
- [2] M. Mosbah, S. Arif, R. D. Mohammedi, A. Khattara, “Optimal sizing and placement of distributed generation in transmission systems” 4th International Conference on Renewable Energy, Belfort, France, 8-10 Feb 2016.
- [3] M.C Alvarez, “Architectures des réseaux de distribution du futur en présence de production décentralisée”, Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, Décembre 2009.
- [4] O. Richardot, “Réglage coordonné de tension dans les réseaux de distribution à l'aide de la production décentralisée”, Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 2006.
- [5] Boris Berseneff, “Réglage de la tension dans les réseaux de distribution du futur” , Thèse de doctorat de L'Université de Grenoble, Décembre 2010
- [6] Agence internationale de l'énergie (AIE), <https://www.iea.org>
- [7] Ministère de l'énergie et des mines, <https://www.energy.gov.dz/?rubrique=electricite-et-gaz>.
- [8] Plan de développement 2018-2028 du Sonelgaz, https://www.energy.gov.dz/Media/galerie/plan_de_developpement_2018-2028_5fcf84faf379f.pdf.
- [9] M. Zellagui, « Etude des protections des réseaux électriques MT (30 & 10 kV) », Mémoire de Magistère, Université Mentouri Canstantine, 2010.
- [10] Opérateur du Système Electrique OSE, <https://www.os.dz>.
- [11] T. Ackermann, G. Andersson and L. Söder, “Distributed generation: a definition” Electric Power Systems Research, Vol. 57, pp. 195-204, April 2001.
- [12] Wendy Carolina BRICEÑO VICENTE, “Modélisation des réseaux de distribution sous incertitudes”, Thèse docteur de l'Université de Grenoble, 20 septembre 2012.
- [13] H. R. Esmailian, O. Darijany, M. Mohammadian, “Optimal placement and sizing of DG units and capacitors simultaneously in radial distribution networks based on the voltage stability security margin”, Turkish Journal of Electrical Engineering &

Computer Sciences 2012.

- [14] T. Funabashi, “Integration of distributed energy resources in power systems implementation, operation, and control. ”, Institute of Materials and Systems for Sustainability Nagoya University, Nagoya, Japan, 2016.
- [15] G.B. Gharehpetian, M. Mousavi, “Distributed generation systems, Design, Operation and Grid Integration”, Butterworth-Heinemann, 2017.
- [16] B. Robyns, A. Davigny, C. Saudemont, A. Ansel, V. Courtecuisse, S. Plumel, J. Deuse, “Impact de l'éolien sur le réseau de transport et la qualité de l'énergie ”, Actes des journées du club EEA, Gif sur Yvette, 26-28 Mai 2004, Paris, Hermès, p. 53-68.
- [17] G. Joos, B. Ooi, D. McGillis, F. Galiana, R. Marceau, “The potential of distributed generation to provide ancillary services”, Power Engineering Society Summer Meeting, (2000). IEEE, Volume 3, Page(s):1762 - 1767.
- [18] V. H. M. Quezada, J. R. Abbad, T. G. S. Roman, “Assessment of energy distribution losses for increasing penetration of distributed generation,” IEEE Trans. Power Systems, vol. 21, no. 2, pp. 533-540, May 2006.
- [19] R.C. Dugan, S.K. Price, “Issues for Distributed Generation in the US”, Proc. of IEEE PES Winter Meeting 2002, New York (USA), 27-31 January 2002, Vol. 1, pp. 121-126.
- [20] J. F. Canard, “Impact de la génération d'énergie dispersée dans les réseaux de distribution”, Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 12 décembre 2000
- [21] K. Nadhir, “Contribution à la gestion des réseaux de distribution en présence de génération d'énergie dispersée ”, Thèse de Doctorat en sciences, décembre 2014.
- [22] W. F. Tinney, C. E. Hart, “Power Flow Solution by Newton's Method”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-86, No. 11, pp. 1449–1460, 1967.
- [23] K. V. Kumar, M. P. Selvan, “A simplified Approach for Load Flow Analysis of Radial Distribution Network”, International Journal of Electrical and Computer Engineering, Vol. 2, No. 3, pp. 439–450, 2008.
- [24] S. Singh and T. Chose, “Improved radial load flow method”, International Journal of Electric Power and Energy Systems, Vol. 44, No. 1, pp. 721–727, 2013.
- [25] A. R. Abul'Wafa, “A network-topology-based load flow for radial distribution networks with composite and exponential load”, Electric Power Systems Research, Vol. 91, pp. 37– 43, 2012.
- [26] V. V. K. Reddy, M. Sydulu, “Index and GA based Optimal Location and Sizing of Distribution System Capacitors”, IEEE Power Engineering Society General Meeting, Tampa, FL, pp. 1–4, 2007.

- [27] J. D. Glover, M. S. Sarma, T. Overbye, “Power System Analysis and Design”, Cengage Learning, 3 janv. 2011
- [28] D. Singh, D. Singh, K.S. Verma, “Multiobjective optimization for DG planning with load models, IEEE Transactions on Power Systems 24 (1) (2009) 427–436.
- [29] K. D. Singh, S. Ghosh, “A New Efficient Method for Load-Flow Solution for Radial Distribution Networks”, PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY (Electrical Review), ISSN 0033-2097, R. 87 NR 12a/2011.
- [30] M.S. Srinivas, “Distribution Load Flow: A Brief Review”, IEES PES Winter Meeting 2000.
- [31] Eminoglu, U. Hocaoglu, M.H. “Distribution Systems Forward / Backward Sweep based Algorithms: A Review and Comparison Study”, Electric Power Components and Systems, 2009, 37, pp. 91-110.
- [32] A.G. Esposito, E.R. Ramos, “Reliable Load Flow Technique for Radial Distribution Networks”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol.14, No.3, August 1999, pp.1063-1069.
- [33] U. Eminoglu, M. H. Hocaoglu, “A new power flow method for radial distribution systems including voltage dependent load models”, Electric Power Systems Research, 2005, 76, pp.106-114.
- [34] G. W. Chang, S. Y. Chu, H. L. Wang, “An Improved Backward/Forward Sweep Load Flow Algorithm for Radial Distribution Systems”, IEEE Trans. on Power Systems, 2007, 22, (2), pp.882-884.
- [35] J. Liu, M. M. A. Salama, R.R.Mansour, “An efficient power flow algorithm for distribution systems with polynomial load”, International Journal of Electrical Engineering Education, 2002, 39, (4), pp372-386.
- [36] O. Hajji, “ Contribution au développement de méthodes d’optimisation stochastiques. Application à la conception des dispositifs Electrotechniques ”, Thèse de doctorat en génie électrique, Ecole centrale de Lille, Université des sciences et technologies de Lille, 2003
- [37] A. Bourzami, “Contribution à l’étude de la stabilité des grands réseaux électriques dans un marché de l’électricité dérégulé en présence des sources d’énergie renouvelable par la logique floue”, Thèse de doctorat, Université de Sétif, 2019.
- [38] L. Slimani, “Contribution à l’application de l’optimisation par des méthodes métaheuristiques à l’écoulement de puissance optimal dans un environnement de l’électricité dérégulé”, Thèse de doctorat, Université de Batna, 2009.
- [39] Z. Abdmouleh, A. Gastli, L. Ben-Brahim, M. Haouari, N. A. Al-Emadi, “Review of optimization techniques applied for the integration of distributed generation from renewable energy sources”, Renewable Energy, Vol. 113, pp. 266–280, 2017.
- [40] R. H. A. Zubo, G. Mokryani, H. S. Rajamani, J. Aghaei, T. Niknam, P. Pillai, “Operation and planning of distribution networks with integration of renewable

- distributed generators considering uncertainties: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 72, pp. 1177–1198, 2017.
- [41] K. Sorensen, M. Sevaux, F. Glover F, “A history of metaheuristics”, *Handbook of Heuristics*, Springer, 2-2, pp. 791–808, 2018.
- [42] R. D. Mohammedi, “Visualisation de l'information par le développement d'interfaces graphiques pour la conduite des réseaux électriques” Thèse de Doctorat, Université Amar Telidji Laghouat, 2016.
- [43] J. Holland, “Adaptation in Natural and Artificial Systems”, University of Michigan Press MIT, 1975.
- [44] A. O. Salau, Y. W. Gebru, and D. Bitew, “Optimal network reconfiguration for power loss minimization and voltage profile enhancement in distribution systems”, *Heliyon*, vol. 6, no. 6, p. e04233, 2020, doi: 10.1016/j.heliyon. 2020.e04233.
- [45] R. Fanish, J. S. Bhadoriya, “Optimal Placement of Multi DG in 33 Bus,” *Ijareeie*, vol. 4, no. 4, pp. 3758–3764, 2015.
- [46] T. L. A. De Carvalho, N. R. Ferreira, “Optimal allocation of distributed generation using ant colony optimization in electrical distribution system,” *SBSE 2018 - 7th Brazilian Electr. Syst. Symp.*, pp. 1 –6, 2018, doi: 10.1109/SBSE.2018.8395672.
- [47] A. I. Tajudin, A. A. Abd Samat, P. Saedin, M. A. Mohamad Idin, “Application of Artificial Bee Colony Algorithm for Distribution Network Reconfiguration,” *Appl. Mech. Mater.*, vol. 785, pp. 38–42, 2015 ,doi: 0.4028/www.scientific.net/amm.785.38.
- [48] S. Anantasate, C. Chokpanyasuwan, W. Pattaraprakorn, P. Bhasaputra, “Multiobjective Optimal Placement of Distributed Generation Using Bee Colony Optimization,” *GMSARN Int. J.*, vol. 3, no. 2, pp. 55–64, 2009.
- [49] Z. Huang, “An improved differential evolution algorithm based on statistical log-linear model,” *Sensors and Transducers*, vol. 159, no. 11, pp. 277–281, 2013.
- [50] K. B. Kela, L. D. Arya, “Reliability Optimization of Radial Distribution Systems Employing Differential Evolution and Bare Bones Particle Swarm Optimization,” *J. Inst. Eng. Ser. B*, vol. 95, no. 3, pp. 231 –239, 2014, doi: 10.1007/s40031-014-0094-z.
- [51] L. D. Arya, A. Koshti, “Modified Shuffled Frog Leaping Optimization Algorithm Based Distributed Generation Rescheduling for Loss Minimization,” *J. Inst. Eng. Ser. B*, vol. 99, no. 4, pp. 397–405, 2018, doi: 10.1007/s40031-018-0334-8.
- [52] X.S. Yang, S. Deb, Cuckoo search via levy flights. In *Nature and Inspired Biologically Computing*, World Congress. 2009;210-214.
- [53] X.S. Yang, S. Deb, “Engineering optimization by cuckoo search. *Int J. Mathematically Modelling and Numerical Optimization*. 2010; 1:330-343.
- [54] X.S. Yang, “A new metaheuristic bat-inspired algorithm. ” *Nature inspired cooperative strategies for optimization (NICSO 2010)*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010. 65-74.

- [55] S. Remha, S. Chettih, S. Arif, S. “Optimal placement of different DG units type in distribution networks based on voltage stability maximization and minimization of power losses. In: 2016 8th international conference on modelling, identification and control (ICMIC). IEEE, 2016. p. 867-873.
- [56] T. T. Nguyen, A. V. Truong, T. A. Phung, “A novel method based on adaptive cuckoo search for optimal network reconfiguration and distributed generation allocation in distribution network. ” International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 78, 801-815, 2016.
- [57] A. Onlam, D. Yodphet, R. Chatthaworn, C. Surawanitkun, A. Siritaratiwat, P. Khunkitti, “Power loss minimization and voltage stability improvement in electrical distribution system via network reconfiguration and distributed generation placement using novel adaptive shuffled frogs leaping algorithm. ”, Energies 12.3 (2019): 553.
- [58] R. S. Rao, K. Ravindra, K. Satish, S. V. L. Narasimham, “Power loss minimization in distribution system using network reconfiguration in the presence of distributed generation.”, IEEE transactions on power systems 28.1 (2012) : 317-325.

Résumé

Compte tenu du nombre répandu des utilisateurs du réseau électrique et également l'augmentation de la charge du réseau, les entreprises de distribution d'électricité tentent de fournir de l'énergie requise par la bonne conception et exploitation du réseau. En ce qui concerne l'utilisation répandue de la production décentralisée dans le réseau de distribution, ses impacts techniques dans le réseau de distribution doivent être soigneusement analysés. Dans ce mémoire, des productions décentralisées sont placés d'une façon optimale au niveau du réseau de distribution radial et pour différents niveaux de charge, dans l'objectif de réduire les pertes totales des puissances active. Ainsi que l'effet des productions décentralisées sur l'amélioration du profil de tension a été pris en considération dans ce mémoire. Un algorithme d'optimisation dit algorithme de Chauve-Souris est utilisé pour trouver des solutions optimales. La performance de l'algorithme proposé est évaluée sur un réseau de distribution IEEE 33.

Mots clés : Réseau de Distribution, productions décentralisées, Algorithme de Chauve-Souris.

Abstract

Given the widespread number of users from the mains and also the increase in network load, the electricity distribution companies attempt to provide the energy required by good design and operation of the network .With regard to the widespread use of distributed generation in the distribution network , technical impacts in the distribution system must be carefully analyzed. In this memoir, decentralized production is placed optimally at the radial distribution network and for different load levels , with the aim to reduce the total loss of active power. And the effect of decentralized production on improving the voltage profile has been considered in this memoir. An optimization algorithm known algorithm BAT is used to find optimal solutions. The performance of the proposed algorithm is evaluated on an IEEE 33 distribution network.

Keywords: Distribution network, decentralized production, Bat algorithm.

ملخص

نظرا لازدياد الطلب على الطاقة الكهربائية وكذلك الزيادة في حمولة الشبكة، تسعى شركات توزيع الطاقة الكهربائية لتوفير الطاقة الكافية لسد جميع الاحتياجات وذلك التشجيع على الانتاج اللامركزي لهذ الطاقة. كما يجب تحليل آثارها الفنية في شبكة التوزيع بعناية. في هذه المذكرة، يتم دمج الانتاج اللامركزي للطاقة الكهربائية بشكل مثالي على مستوى شبكة التوزيع شعاعية ومن اجل مستويات مختلفة للحمل، بهدف التقليل من نسبة الضياعات النشطة وكذلك تحسين التوتر الكهربائي يجب تحديد المكان الامثل لتثبيت هذ المصادر.

في هذه المذكرة تم استخدام خوارزمية معروفة اسم خوارزمية الخفاش من اجل تحديد الحلول المثلى. تم تقييم اداء الخوارزمية المقترحة على شبكة توزيع معيارية 33 عقدة.

كلمات مفتاحية: شبكة التوزيع، التوزيع اللامركزي، خوارزمية الخفاش.