



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Echahid Hamma Lakhdar - El Oued



Faculté de Technologie  
Département de Génie Mécanique

## MÉMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

## MASTER

**Spécialité : Électromécanique**

**Présenté par :**

- GHAMAM HAMED Zohir
- SAREG Salim.
- MOSTEFAOUI Oussama.

**Intitulé :**

**Optimisation de l'intégration de la génération dispersée  
dans le réseau de distribution par un algorithme  
métaheuristique**

Soutenue le : 03/06 /2024

Devant le jury composé de :

<b>Dr : LAOUAMER Mosbah</b>	Président	Université
<b>Dr : GUIA Hossam Eddine</b>	Examineur	Université
<b>Dr : REMHA Souhaib</b>	Encadreur	Université d'El Oued

**Année académique : 2023/2024**

# Sommaire

<b>Sommaire</b> .....	<b>ii</b>
<b>Liste des figures</b> .....	<b>vi</b>
<b>Liste des tableaux</b> .....	<b>x</b>
<b>Acronymes et abréviations</b> .....	<b>xii</b>
<b>Nomenclature</b> .....	<b>xiii</b>
<b>Introduction générale</b> .....	<b>1</b>

## **Chapitre 1 : Généralités sur les réseaux électriques et la DG**

1.1 Introduction .....	3
1.2 Organisation des réseaux électriques .....	4
1.2.1 Production .....	4
1.2.2 Transport .....	5
1.2.3 Distribution .....	6
1.2.4 Consommation .....	6
1.3 Réseaux électriques de distribution .....	7
1.3.1 Postes source HTB / HTA .....	7
1.3.2 Lignes et départ HTA .....	8
1.4 Production décentralisée .....	10
1.4.1 Définition .....	10
1.4.2 Types de production décentralisée .....	12
1.4.2.1 Classification en fonction du type d'énergie primaire utilisée .....	12
1.4.2.2 Classification de DG à base de type de puissance délivrée .....	14
1.5 Insertion du DG au réseau électrique .....	15
1.6 Apports de la DG .....	15
1.7 Impact de la DG sur le réseau de distribution .....	17
1.8 Conclusion .....	18

## **Chapitre 2 : Ecoulement de puissance dans les réseaux de distribution**

2.1 Introduction .....	20
2.2 Unité relative .....	20
2.3 Modélisation des branches et des charges du réseau de distribution .....	21
2.3.1 Modélisation des branches .....	21
2.3.2 Modélisation des charges .....	21
2.3.2.1 Modèle périodique de charge constante .....	22
2.3.2.2 Modèle de la charge statique .....	22
2.4 Modèle de calcul d'écoulement de puissance .....	23
2.4.1 Modèle AC de calcul d'écoulement de puissance .....	23
2.4.2 Algorithme de balayage arrière / avant .....	24
2.4.3 Organigramme de la solution d'écoulement de puissance .....	27
2.5 Applications numériques .....	28
2.5.1 Réseau test IEEE 33 nœuds .....	28
2.5.2 Différents types de charge statique .....	29
2.6 Conclusion .....	32

## **Chapitre 3 : Insertion optimale de la génération dispersée**

3.1 Introduction .....	33
3.2 Intégration optimale des unités de DGs dans le RED.....	33
3.2.1 Emplacement des unités de DGs .....	34
3.2.2 Capacité des unités de DGs .....	34
3.3 Algorithme des chauves-souris .....	34
3.4 Formulation du problème d'optimisation .....	37
3.4.1 Fonctions objectifs .....	37
3.4.1.1 Minimisation des pertes actives .....	37
3.4.1.2 Minimisation du profil de tension .....	38
3.4.1.3 Maximisation de l'indice de stabilité de tension .....	38
3.4.2 Fonction objectif globale .....	39
3.4.3 Contraintes .....	39
3.4.4 Variables de contrôle .....	41
3.5 Applications .....	43

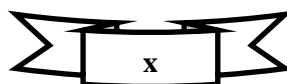
3.6 Conclusion .....	49
<b>Conclusion générale.....</b>	
<b>Bibliographie.....</b>	
<b>Annexes .....</b>	

# Liste des figures

<b>Figure 1.1</b> Architecture verticale d'un réseau d'énergie électrique .....	4
<b>Figure 1.2</b> Source de la production mondiale d'électricité pour l'année 2018 .....	5
<b>Figure 1.3</b> Courbe de charge de la journée du 03 février 2021, source OSE .....	7
<b>Figure 1.4</b> Schéma de principe des postes sources HTB/HTA .....	8
<b>Figure 1.5</b> Schéma simple dérivation .....	9
<b>Figure 1.6</b> Variation de la tension le long d'un départ HTA .....	9
<b>Figure 1.7</b> Structure en double dérivation.....	10
<b>Figure 1.8</b> Schéma de coupure d'artère .....	10
<b>Figure 1.9</b> Écoulement de puissance .....	18
<b>Figure 1.10</b> Ecoulement de puissance pour une condition de fonctionnement .....	18
<b>Figure 2.1</b> Représentation de deux nœuds dans un réseau de distribution radial.....	21
<b>Figure 2.2</b> Organigramme de l'algorithme de balayage arrière / avant.....	27
<b>Figure 2.3</b> Représentation simplifiée du réseau de distribution IEEE 33 nœuds.....	29
<b>Figure 2.4</b> Profil de tension du réseau de distribution IEEE 33 nœuds pour les différents types de charge .....	31
<b>Figure 2.5</b> Pertes totales de puissance active et réactive du réseau IEEE 33 nœuds pour les quatre types de charge.....	32
<b>Figure 3.1</b> Organisation du RED en présence des DGs .....	34
<b>Figure 3.2</b> Principe d'optimisation de l'emplacement et les capacités des DG .....	42
<b>Figure 3.3</b> Caractéristiques de convergence de la fonction objectif par BA dans le cas d'installation des DGs pour les différents types de charge.....	45
<b>Figure 3.4</b> Profil de tension pour les quatre types de charge dans le cas d'installation des DGs .....	47
<b>Figure 3.5</b> Profil de VSI dans le cas d'installation des DGs pour les quatre types de charge.....	47
<b>Figure 3.6</b> Pertes totales de puissance active avec leurs réductions pour les différents types de charge dans le cas d'installation des DGs.....	48
<b>Figure 3.7</b> Pertes totales de puissance réactive avec leurs réductions pour les différents types de charge dans le cas d'installation des DGs .....	48

# Liste des tableaux

<b>Tableau 1.1</b> Tableau des domaines de tension .....	6
<b>Tableau 2.1</b> Valeurs d'exposant de chaque type de charge.....	29
<b>Tableau 2.2</b> Solution de l'écoulement de puissances pour les quatre types de charge.....	30
<b>Tableau 3.1</b> Résultats d'optimisation de l'emplacement des DGs pour les quatre types de charge. ....	44
<b>Tableau 3.2</b> Valeurs de tension et VSI pour les différents types de charge dans le cas d'installation des DGs .....	46



# Acronymes et abréviations

<b>HT</b>	Haute Tension
<b>HTB</b>	Haute Tension catégorie B
<b>HTA</b>	Haute Tension catégorie A
<b>BTB</b>	Basse Tension catégorie B
<b>BTA</b>	Basse Tension catégorie A
<b>TBT</b>	Très Basse Tension
<b>RED</b>	Réseau Electrique de Distribution
<b>SONELGAZ</b>	Société Nationale d'Electricité et du Gaz
<b>OSE</b>	Opérateur du Système Electrique
<b>SCADA</b>	Supervisory Control And Data Acquisition
<b>AIE</b>	Agence Internationale de l'Energie
<b>EPRI</b>	Electric Power Research Institute
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<b>CIGRE</b>	Conseil International des Grands Réseaux Electriques
<b>PD</b>	Production Décentralisée
<b>DG</b>	Génération Dispersée
<b>BA</b>	Bat Algorithm
<b>VSI</b>	Voltage Stability Index
<b>p.u</b>	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 $i$ .
$P_{GED_i}, Q_{GED_i}$	Puissances active et réactive générées par la $i^{\text{ème}}$ GED
$P_{GED_i}^{Min}, Q_{GED_i}^{Min}$	Puissances active et réactive minimales générées par la $i^{\text{ème}}$ GED
$P_{GED_i}^{Max}, Q_{GED_i}^{Max}$	Puissances active et réactive maximales générées par la $i^{\text{ème}}$ GED
$P_{T,Loss,wo}$	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
$NGED$	Nombre total des générations d'énergie décentralisée
$X^T$	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
$PE$	Fonction de pénalisation totale
$F_{Obj}$	Fonction objectif
$MOF$	Fonction objectif globale
$w_1, w_2, w_3$	Facteurs de pondération



### Introduction générale

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

Dans ce travail, nous nous intéressons au problème de l'insertion de productions décentralisées du type 1 dans les réseaux de distribution (REDs).

L'objectif principal de ce travail de consister à appliquer un algorithme d'optimisation méta-heuristique pour l'insertion des unités DGs dans les REDs. Cette méthode vise à faciliter l'insertion des énergies renouvelables dans les REDs en minimisant les pertes totales de puissance active et par conséquent améliorer le profil de tension du RED.

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

Le deuxième chapitre s'intéresse à l'application d'une technique basée sur le balayage avant / arrière de la ligne du réseau pour le calcul de l'écoulement de puissance dans les REDs. Cette technique est appliquée sur un réseau test IEEE 33 nœuds avec différentes type de charge.

Le troisième chapitre se concentre sur l'application l'algorithme des chauves-souris (en anglais : Bat Algorithm (BA)) dans l'optimisation de l'emplacement et de la capacité des DGs. Nous formulons le problème d'optimisation avec la combinaison des trois fonctions objectifs (minimisation des pertes de puissance active, minimisation de la déviation de tension

et maximisation de la stabilité de tension). La validation de méthode proposée est effectuée sur un réseau test IEEE 33 nœuds avec quatre types de charge.

Enfin, 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 DG**

**1.1 Introduction**

Dans le monde d'aujourd'hui, l'électricité est un élément indispensable à notre vie quotidienne, alimentant tout, du transport à l'éclairage en passant par d'innombrables autres fonctions essentielles. Chaque nation reconnaît le rôle essentiel de l'électricité dans le progrès 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 servent d'épine dorsale pour acheminer l'électricité des centrales de production à grande échelle vers les centres de consommation. Le RED 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 (REDs) actuels doivent se convertir 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 REDs avec l'arrivée massive de production décentralisée (PD). Ce changement peut être envisagée en développant des systèmes intelligents, capables d'atténuer les impacts induits par l'introduction de PDs et/ou par la recherche de nouvelles architectures. Ces deux solutions devraient permettre l'augmentation du taux de PD dans le RED 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 REDs et des différentes architectures associées à ce type de réseau sera donnée en deuxième partie. Les différents types de PD selon le type d'énergie primaire utilisée et le type de puissance délivrée seront ensuite passés en revue. Enfin, les apports et les impacts de la PD sur le fonctionnement de RED seront discutés.

## 1.2 Organisation des réseaux électriques

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

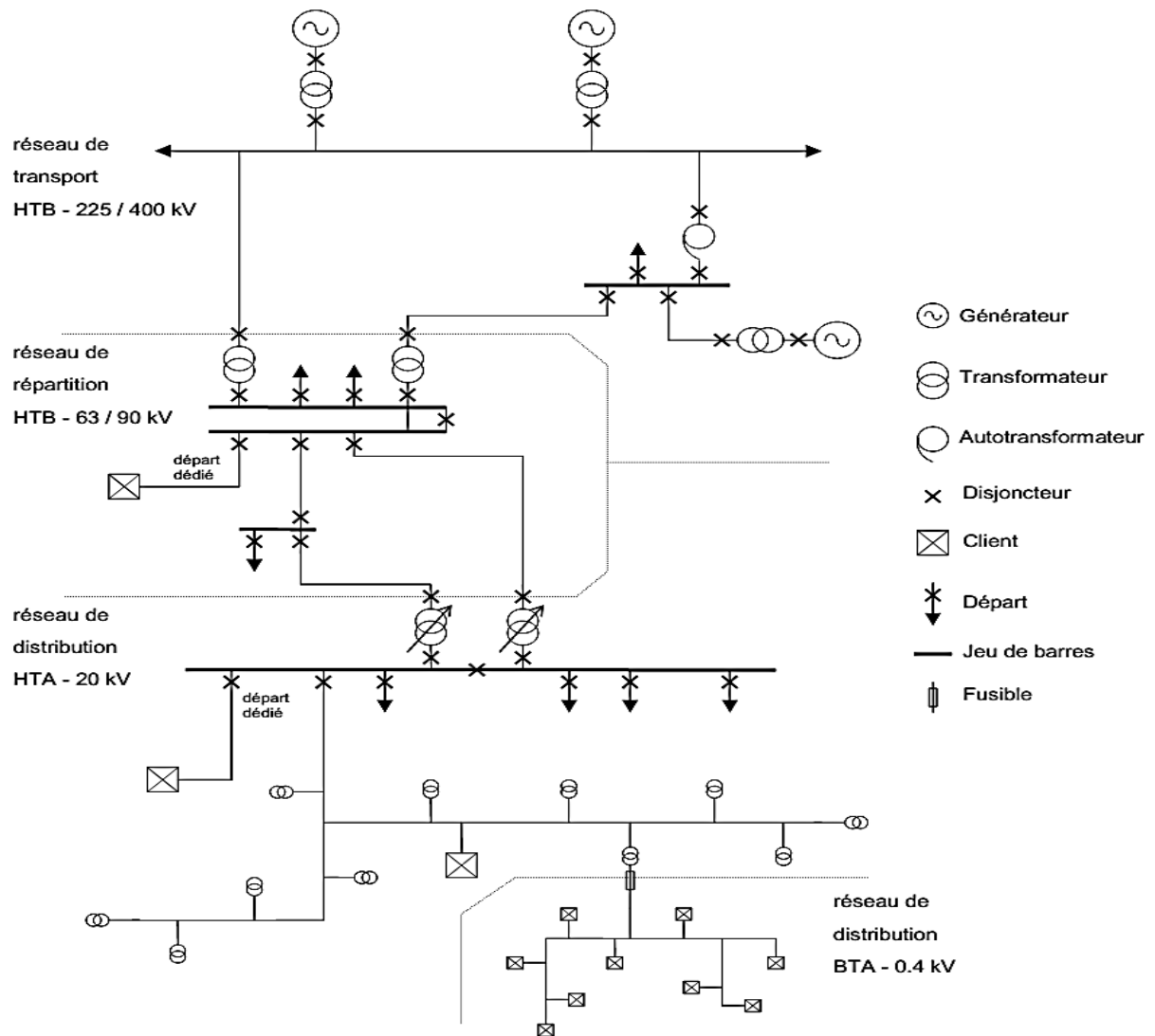


Figure 1.1 : Architecture verticale d'un réseau d'énergie électrique [4].

### 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 100 MW pour les centrales thermiques de faibles puissances et 1 650 MW 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 représente 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.

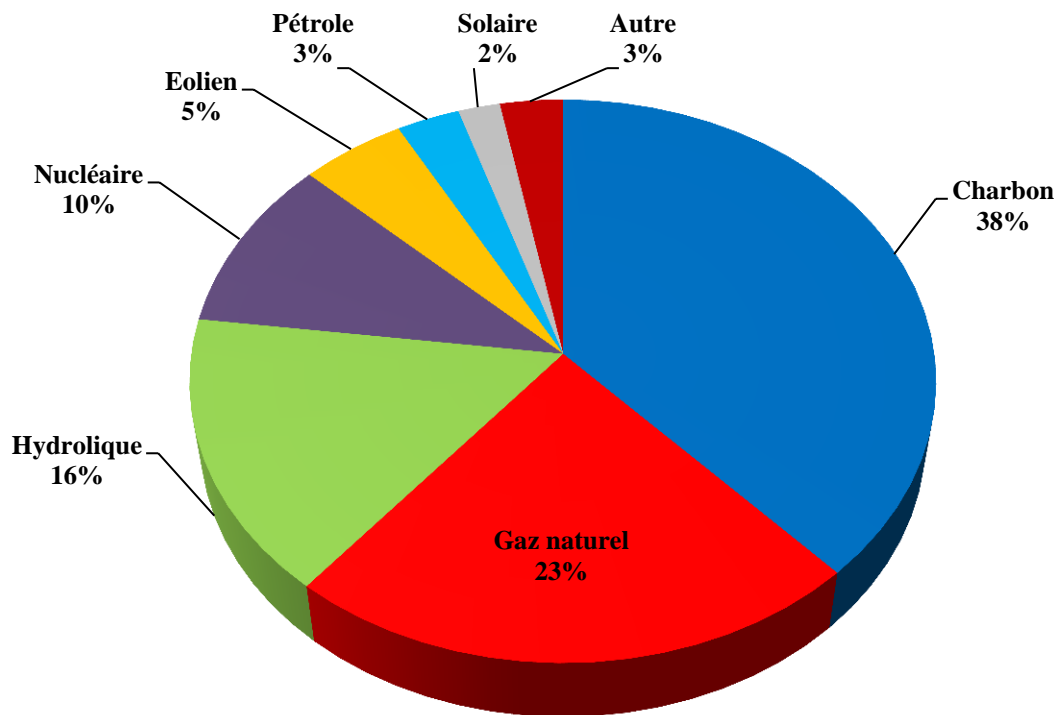


Figure 1.2 : Source de la production mondiale d'électricité pour l'année 2018 [6].

### 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 REDs 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 REDs, 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. Le tableau 1.1 suivant présente les gammes de tension utilisées par le groupe SONELGAZ.

Tableau 1.1: Tableau des domaines de tension [7].

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 REDs, 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 RED 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 RED 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.

**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 le langage du réseau électrique on utilise le terme charges au lieu du terme consommateurs, 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 1.3 suivante présente l'évolution de la consommation électrique de la journée du 03 février 2021.

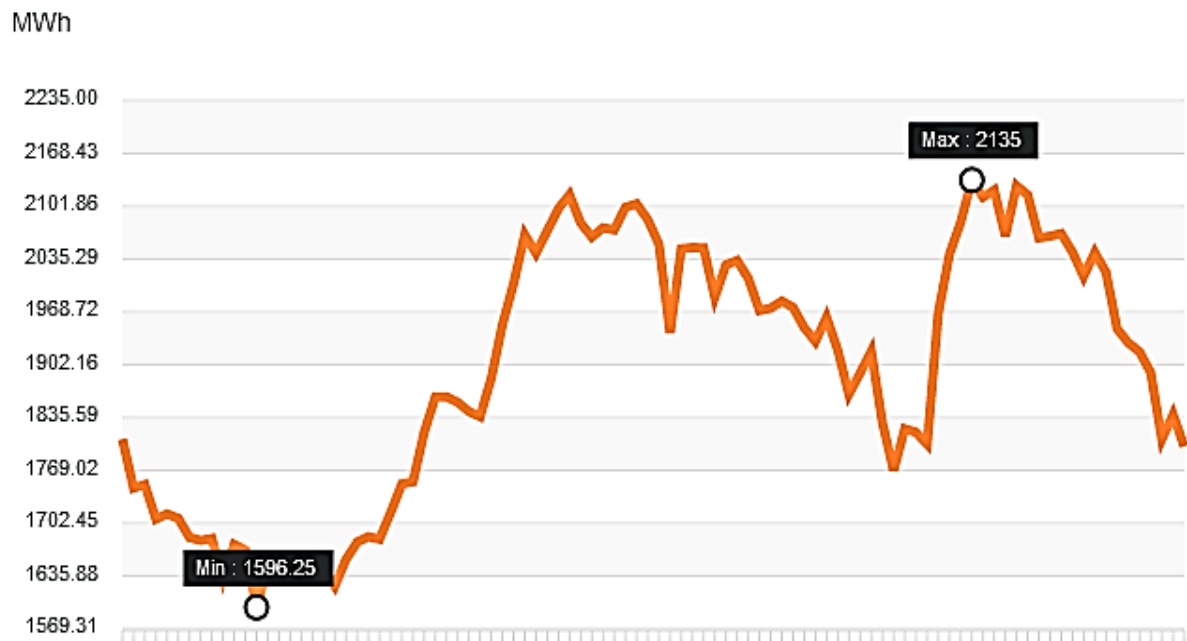


Figure 1.3 : Courbe de charge de la journée du 03 février 2021, source OSE [8].

### 1.3 Réseaux électriques de distribution

Les REDs 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 RED sont alimentés par un poste source HTB/HTA constitué en phase initiale d'un transformateur alimenté par une arrivée HTB (HT1) et alimentant lui-même un ou deux jeux de barres (figure 1.4.a). En seconde phase, avec l'augmentation des charges à desservir, un deuxième transformateur est ajouté formant avec le premier un groupe appelés transformateurs demi-rame et côté HTA, un autre jeu de barres alimente les différents départs du RED. Les transformateurs fonctionnent en régime radial mais en cas de défaillances, il est possible d'isoler un des transformateurs et de répartir la charge sur celui qui reste sans dépasser en régime nominal normalement 50% de sa capacité maximale (figure 1.4.b). Le poste est généralement raccordé à une deuxième arrivée HTB (HT2) appelée "garantie ligne". En phase finale, un troisième transformateur et quelquefois plus est ajouté en double attache (figure 1.4.c). Les départs HTA sont regroupés par demi-rame en fonction de leur nature (aérien ou souterrain) et de la similarité de leur courbe de charge, c'est-à-dire du type de clients raccordés[5]

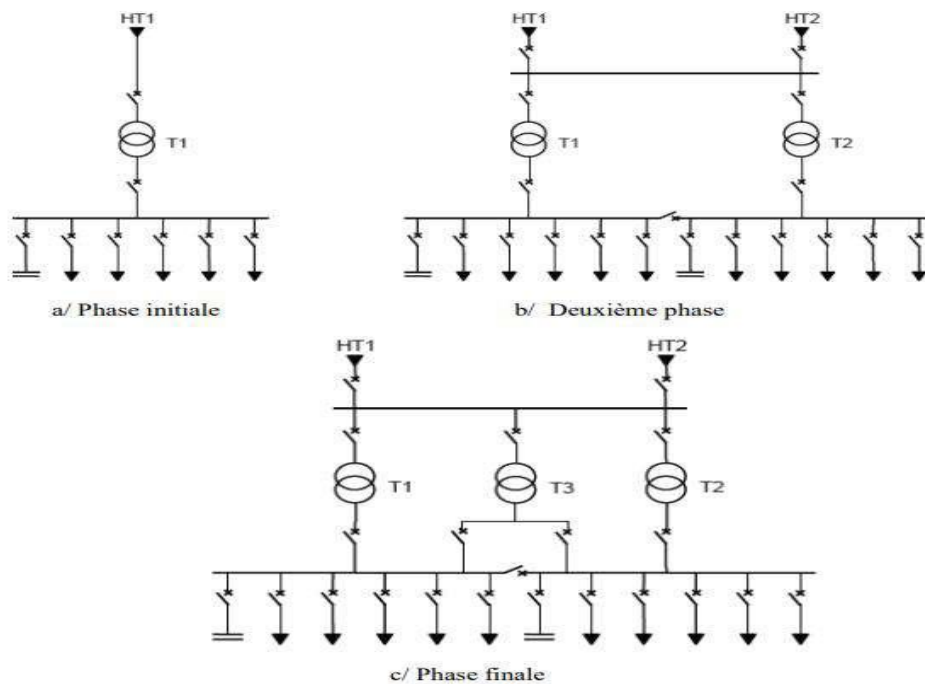


Figure 1.4 : Schéma de principe des postes sources HTB/HTA

### 1.3.2 Lignes et départ HTA

En milieu rural de faible densité, les REDs sont principalement constitués de lignes aériennes en simple dérivation (figure 1.5), traditionnellement moins coûteuses que les câbles enterrés. Le dimensionnement du réseau est lié aux chutes de tension maximales admissibles en raison de l'éloignement des charges à desservir. La tension décroît progressivement en fonction de l'impédance des câbles et des charges (figure 1.6).

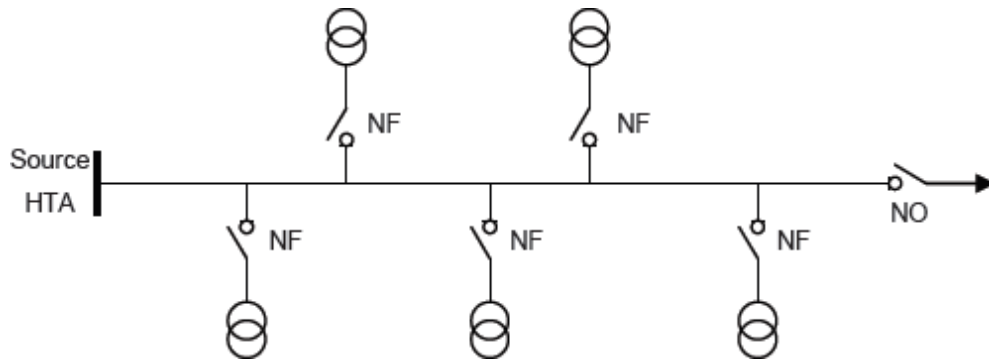


Figure 1.5 : Schéma simple dérivation

NF et NO sont respectivement interrupteur normalement fermé et interrupteur normalement ouvert.

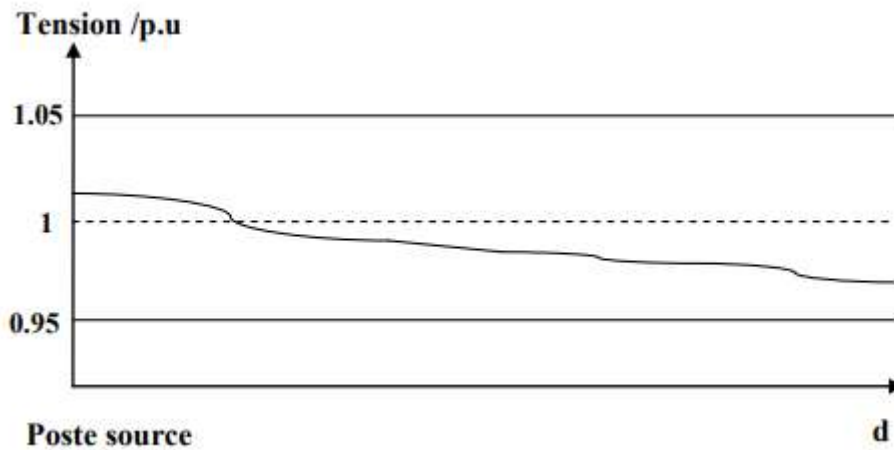


Figure 1.6 : Variation de la tension le long d'un départ HTA

Les REDs en zones urbaines ou mixtes de forte densité de charge sont constitués principalement par des câbles HTA enterrés en double dérivation (figure 1.7) ou en Coupure d'artère (figure 1.8) moins sensibles aux chutes de tension à cause de leur capacité homopolaire et de leur plus petite longueur. Le facteur impactant sur le dimensionnement des

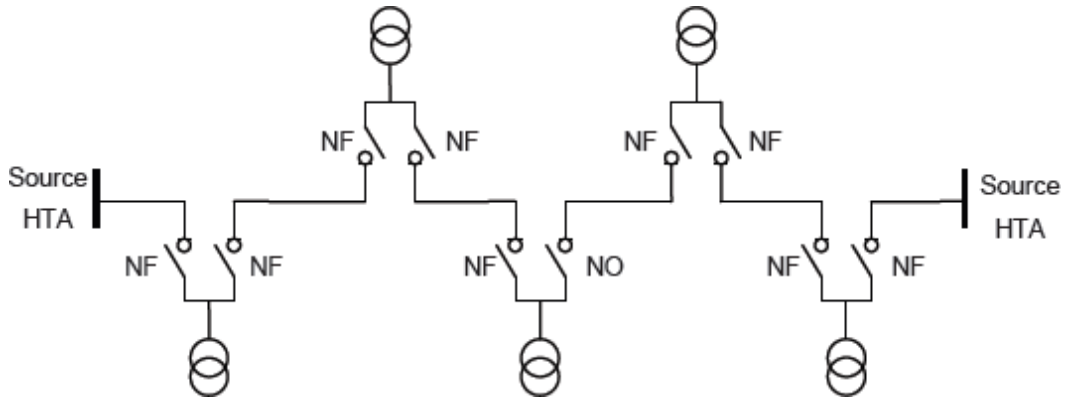


Figure 1.7 : Schéma de double dérivation

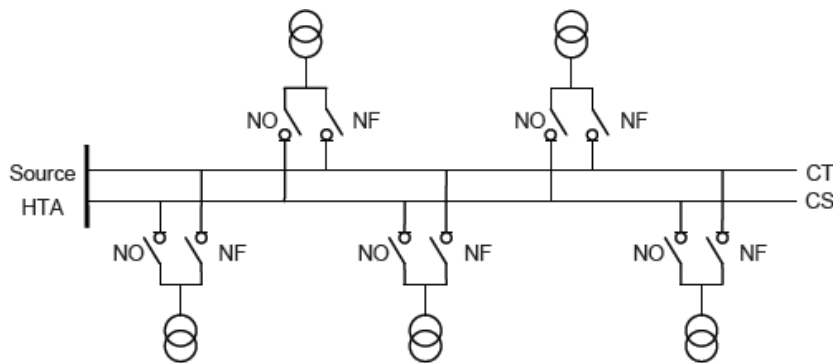


Figure 1.8 : Schéma de coupure d'artère

CT et CS sont respectivement câble de travail et câble de secours permettant de garantir la continuité du service en cas du défaut.

## 1.4 Production décentralisée

### 1.4.1 Définition

Dans la littérature, de nombreux termes sont utilisés par rapport à la PD tel que : Génération d'Énergie Décentralisée ou Distribuée, Génération d'Énergie Dispersée, Production Distribuée [9]. Le terme "Génération Dispersée" sera utilisé pour appeler la PD dans la suite de cette mémoire. La littérature montre qu'il n'y a pas une seule définition de la PD, chaque pays a sa propre définition. Certains pays définissent la DG sur la base du niveau de tension auquel sont raccordés ces générateurs, tandis que d'autres partent du principe que la DG est injectée directement au niveau des charges. D'autres pays définissent la DG comme ayant certaines caractéristiques de base (par exemple, l'utilisation d'énergies renouvelables, la

cogénération, non-dispatchable...). Cette section passe en revue les différentes définitions actuelles de la GED, proposées par des instituts, des compagnies et des auteurs.

- L'Electric Power Research Institute (EPRI) définit la génération d'énergie dispersée comme de petites unités de production de quelques kilowatts (kW) jusqu'à 50 MW et/ou des dispositifs de stockage d'énergie, typiquement situés près des charges ou des postes de distribution et des sous-stations de transport [9].
- L'Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) définit la génération d'énergie dispersée comme l'énergie électrique produite par des unités qui sont suffisamment plus petites que les installations de production centralisée pour permettre leur attachement à presque n'importe quel point du réseau électrique [10].
- Le Conseil International des Grands Réseaux Electriques (CIGRE) définit la génération d'énergie dispersée comme un ensemble des sources de production avec une capacité maximale de 50 MW à 100 MW, qui sont habituellement branchées au RED et qui ne sont ni pilotables par le gestionnaire de réseau (ni observables, ni dispatchables) [9].
- L'Agence Internationale de l'Energie (AIE) définit la génération d'énergie dispersée comme un type de centrale électrique qui est reliée à proximité des sites ou des clients pour répondre à ses besoins spécifiques et en même temps pour soutenir le RED. Ces technologies comprennent les moteurs à pistons, les turbines, les piles à combustible et les systèmes photovoltaïques [11].
- Chambers [12] définit la génération d'énergie dispersée comme une petite source de production, généralement a une puissance inférieure ou égale de 30 MW, ces sources étant localisées près des clients pour répondre à leurs besoins spécifiques ou afin de soutenir le fonctionnement du RED.
- Ackermann et al. [12] définissent la génération d'énergie dispersée en termes d'interconnexion et d'emplacement plutôt qu'en termes de leur puissance générée. Ils définissent une source de PD en tant que source de production d'énergie électrique connectée directement au RED ou en aval du compteur du client. Cette dernière définition est la plus générique, car il ne met aucune limite à la technologie ou la capacité de l'application potentielle de production distribuée.

Les unités de la DG se distinguent des unités de production classique par le fait qu'elles sont le plus souvent raccordées au RED, et par leur petite taille [4]. Les DG peuvent être classées en quatre grands types basés sur la capacité de fournir de la puissance active et réactive [9] [13].

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

### 1.4.2 Types de production décentralisée

Plusieurs de DGs 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 [16].

#### 1.4.2.1 Classification en fonction du type d'énergies primaires utilisée

##### a) Energies non renouvelables

Deux types de technologies non renouvelables peuvent être décrits :

- ✚ **Energies fossiles :** Le principe est le même que celui utilisé dans les centrales thermiques de grande puissance. La combustion de combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz) génère de la chaleur elle même transformée en électricité. Les principales technologies sont le thermique à flamme (avec turbine à vapeur), les turbines à gaz et les moteurs atmosphériques (moteurs diesel). Ces systèmes, et notamment les turbines à gaz, peuvent aussi être utilisés pour générer à la fois de l'électricité et de la chaleur. On

parle alors de cogénération. Ces systèmes permettent d'avoir un rendement global très proche de l'unité.

- ✚ **Energie hydrogène** : Les piles à combustible produisent directement de l'électricité à partir d'hydrogène et d'oxygène par réaction inverse de l'électrolyse de l'eau. C'est une énergie sur laquelle beaucoup d'espoirs sont fondés, bien que l'hydrogène ne se trouve pas sous forme directement exploitable dans la nature, il faut en effet de l'énergie pour le produire.

## b) Energies renouvelables

Les principales sources d'énergies renouvelables sont :

- ✚ **Energie 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....
- ✚ **Energie 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.
- ✚ **Energie éolien** : L'énergie éolienne est l'énergie produite par le vent. Est une source d'énergie renouvelable, inépuisable et gratuite obtenue à partir de la force du vent, elle est basée sur la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Soit cette énergie est utilisée directement comme dans les éoliennes de pompage, soit elle est transformée en électricité via une génératrice. Dans ce cas, on parle d'aérogénérateurs. Les termes « parc éolien » ou « ferme éolienne » sont utilisés pour décrire les unités de production groupées, installées à terre ou dans la mer [6].
- ✚ **Energie géothermie** : L'énergie géothermique est une source d'énergie renouvelable qui est obtenue à partir de la chaleur du sous-sol. Cette énergie thermique peut être obtenue sans la combustion de combustibles fossiles ou de tout autre matériau. C'est une forme d'énergie propre sans émission de dioxyde de carbone.
- ✚ **Energie 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 DG à base de type de puissance délivrée**

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

**DG-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.

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

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

**DG-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 Insertion de DG au réseau électrique**

Contrairement aux réseaux traditionnels, le renforcement des réseaux modernes se fait par l'insertion des PDs aux réseaux électriques, en particulier sur les REDs. L'intégration des sources de PD conduit à une transition vers une nouvelle structure dans laquelle, ces sources de production sont souvent raccordées au RED. L'insertion de ces unités sur le réseau, conduit à des flux d'énergie bidirectionnels dans les réseaux (entre transport et distribution). Les REDs deviennent donc des réseaux actifs. Au contraire, les REDs dépourvus des unités GEDs sont passifs puisque l'énergie électrique est fournie par le réseau de transport aux consommateurs raccordés dans les REDs.

De nombreuses motivations techniques, économiques et environnementales qui ont contribué au développement et à l'encouragement de l'introduction des unités de PD [14, 15] :

- A cause de la demande croissante d'énergie électrique et du l'épuisement à l'horizon des réserves de combustibles fossiles, qui sont les sources primaires des installations de production conventionnelle. Par conséquent, la plupart des pays cherchent à trouver des sources alternatives d'énergie.

- En raison du coût financier très élevé pour l'installation de nouvelles grandes centrales de production et la construction des lignes de transport et distribution, et de l'opposition grandissante du public à ces nouvelles installations.
- Le poids croissant, accordé à la réduction des émissions de gaz, afin de limiter le réchauffement climatique (Protocole de Kyoto en 1997). Dans le cadre de ce protocole, de nombreux pays travaillent sur des nouvelles politiques de production basée sur l'utilisation des sources d'énergies nouvelles et renouvelables comme source principale de production d'énergies électriques pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. L'utilisation des DGs peut contribuer à la production d'énergie propre et respectueuse de l'environnement avec de très faibles émissions environnementales.
- Contrairement à la production centralisée, les DGs sont généralement des sources modulaires de faibles capacités, ces dernières sont situées généralement près des consommateurs. Les DGs peuvent être installées par module ou bloc de modules pour répondre aux besoins immédiats et futurs de la demande. Cette modularité permet de réduire le délai de construction et l'investissement.
- La dérégulation et l'ouverture du marché d'électricité par intégration de nombreux nouveaux producteurs d'énergie de manière décentralisée pourrait favoriser la concurrence, ce qui garantit l'amélioration de la qualité de service et la réduction du prix de l'énergie.

### 1.6 Apports de la DG

Les avantages de l'introduction de la DG dans le système électrique se situent à trois niveaux : technique, économique et écologique, qui se résument comme suit [14, 15] :

**Réduction des pertes de lignes :** Les installations de la DG sont en générale la fourniture de l'énergie près de la consommation, limitant ainsi la transmission coûteuse et inefficace de la puissance électrique sur les longues lignes de transport. Malgré les coûts élevés d'installation et de maintenance des réseaux électriques, il reste nécessaire de fournir l'énergie là où elle est consommée. D'autre part, la transmission de la puissance électrique sur des longues distances aboutit à des pertes joules importantes au niveau des lignes de transport. Pour cela, la production et la distribution au niveau local peuvent améliorer l'efficacité du réseau électrique et réduire les coûts.



**Diminution de la demande de pointe :** Dans des conditions de pointe, la production d'électricité implique des coûts plus élevés. Par conséquent, des ressources à faible coût devraient être utilisées pour faire face à la demande de pointe. La production d'électricité par des GEDs aux heures de pointe, en plus d'être économiquement efficace, peut réduire la capacité des lignes de transport et des transformateurs. La réduction du courant dans les équipements du réseau principal réduira leur température et par conséquent augmentera la durée de vie des équipements.

**Le temps de construction des installations :** La construction des installations centralisées peut prendre un long temps entre 7 à 10 ans pour répondre aux nouveaux besoins. Au contraire, quelques installations des DGs pourraient prendre un temps plus court, jusqu'à moins de 6 mois, ce qui permet une réponse plus rapide lorsqu'une puissance supplémentaire est nécessaire.

**Amélioration de la sécurité énergétique :** En cas d'urgence, il peut y avoir un black-out dans une partie du réseau, l'utilisation de DG au point de consommation peut réduire une partie de la charge du réseau. Ainsi, l'utilisation de ces ressources peut réduire le nombre de pannes électriques.

**Impact sur le démarrage rapide du réseau électrique :** Après le black-out, le réseau électrique doit être démarré à zéro. À cette étape, les DGs peuvent être utilisées pour alimenter une certaine partie du réseau afin de réduire la charge totale du réseau. D'autre part, ces ressources peuvent également être utilisées pour démarrer les centrales électriques.

**Soutenir les énergies renouvelables :** Les réseaux intelligents peuvent encourager l'introduction de la production d'énergie renouvelable à des niveaux élevés, ce qui diminue la dépendance aux combustibles fossiles et les émissions de gaz. Les réseaux électriques modernes incorporant de l'énergie locale propre peuvent supporter pleinement les flux électriques.

**Amélioration de la fiabilité de l'alimentation :** Alors qu'une fiabilité élevée est requise pour les charges sensibles à la puissance dans un RED, l'utilisation de deux alimentations indépendantes semble être essentielle. Avec l'installation de sources DG à proximité de telles charges sensibles, elles peuvent immédiatement démarrer pour alimenter ces charges.

**Diminution du prix de l'électricité :** L'introduction généralisée des PDs, que ce soit au niveau régional ou national conduira généralement à une baisse du prix de l'électricité. La

centrale virtuelle, qui se compose de plusieurs DGs, permettra aux gestionnaires du réseau de disposer de réserves des énergies électriques. Dans certains cas, ces réserves pourraient être moins chères à mobiliser que d'utiliser le marché d'ajustement.

**Réduction de pollution environnementale :** Dans les grandes centrales électriques, toutes sortes de gaz à effet de serre sont produites. Mais dans les systèmes de DGs, même ceux qui consomment du carburant, les émissions polluantes sont très faibles. Cet avantage fait la facilité d'utilisation des sources DGs dans les zones résidentielles.

### **1.7 Impact de la DG sur le réseau de distribution**

L'insertion d'une DG au RED peut avoir des effets importants sur le système tels que l'écoulement de puissance, la régulation de tension, la fiabilité, etc. L'installation d'une DG modifie les caractéristiques traditionnelles du RED. La plupart des systèmes de distribution sont conçus de telle sorte que l'écoulement de puissance se fait dans un seul sens. L'installation d'une DG introduit une autre source dans le système.

Lorsque la puissance délivrée par la DG est supérieure à la charge en aval, le reste de puissance est envoyé en amont en inversant le sens d'écoulement de puissance et à un certain point entre la DG et le poste source, l'écoulement de puissance réel devient nul due au retour de l'écoulement de puissance de la DG. La figure (1.9) montre la différence entre le maximum et le minimum d'écoulement de puissance dans le réseau, avec et sans DG [9]. On peut observer que, sans générateur installé, l'écoulement maximal s'effectue lorsque la consommation atteint son maximum et l'écoulement minimal se produit lorsque la consommation atteint son minimum. Cependant, après l'installation d'une DG, l'écoulement maximal se produit lorsque la consommation atteint son minimum et l'écoulement minimal a lieu lorsque la consommation atteint son maximum. Cette observation est particulièrement pertinente lorsque l'on analyse la chute de tension dans le RED.

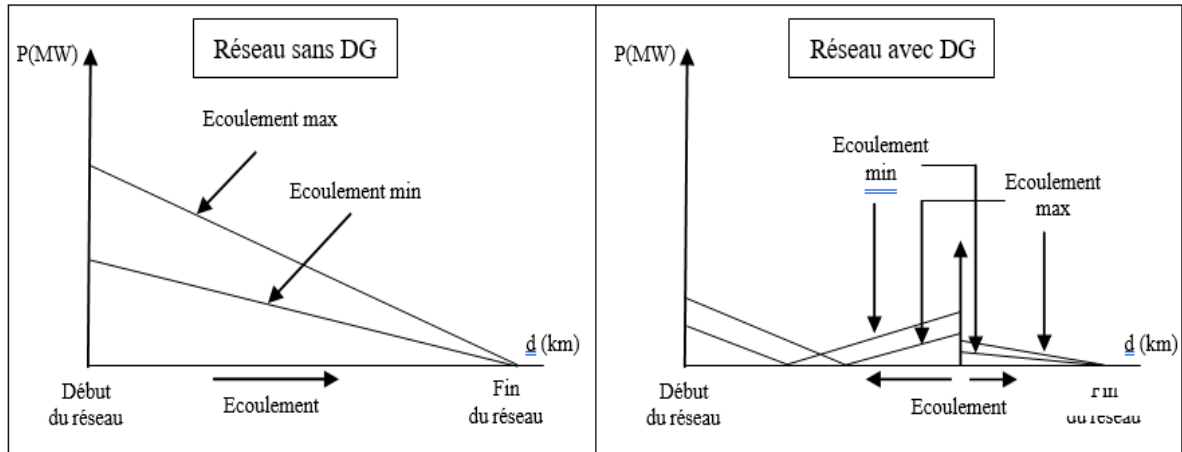


Figure 1.9 : Écoulement de puissance

La figure (1.10) divise le réseau en deux sections principales, *ag* en allant du début du réseau vers le générateur, et *gc* en passant par le générateur jusqu'à la fin du réseau. La section *ag* peut présenter une section d'écoulement passant par le point zéro entre l'énergie qui provient du début du réseau et celle qui provient du générateur. D'autre part, l'énergie circulant dans la section *gc* peut être la somme de l'énergie qui provient du réseau et celle du générateur [9].

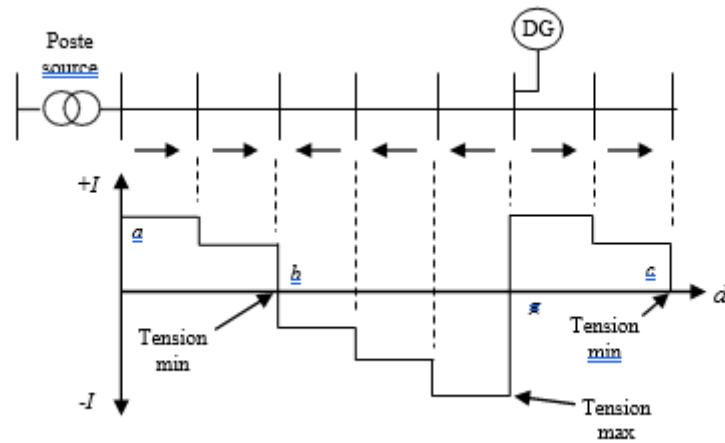


Figure 1.10 : Écoulement de puissance pour une condition de fonctionnement

### 1.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le fonctionnement général des systèmes électriques traditionnels. Nous avons également mis l'accent plus particulièrement sur le RED (HTA) et les différentes structures associées à ce type de réseau. Nous avons aussi exposé les impacts de la dérégulation sur l'organisation de ce système et l'apparition d'une nouvelle catégorie de

producteur appelée production décentralisée (DG) au niveau du RED. Nous avons, ensuite, présenté les différentes classifications des DGs. De plus, nous avons examiné les apports et les impacts de l'interconnexion des DGs au RED. Finalement, nous avons exposé les intérêts et les impacts de l'interconnexion de la DG au RED sur l'amélioration de performance du RED.

# **Chapitre 2**

## **Ecoulement de puissance dans les réseaux de distribution**

## 2.1 Introduction

Le réseau de distribution électrique se caractérise par des variations constantes de la demande de charge, affectant les pertes de puissance dans les branches et le profil de tension aux nœuds du réseau. Pour analyser ces phénomènes, diverses méthodes de calcul d'écoulement de puissance sont utilisées, se classant principalement en deux catégories : les méthodes newtoniennes et les méthodes de balayage arrière/avant.

Les méthodes newtoniennes, telles que la méthode de Newton-Raphson et la méthode découplée rapide, sont principalement employées pour les réseaux de transport ou de transmission. Cependant, leur application aux réseaux de distribution échoue souvent en raison des différences caractéristiques entre les réseaux de distribution et de transport.

Les méthodes de balayage arrière/avant sont spécifiquement conçues pour les réseaux de distribution. Elles fonctionnent en deux étapes : un balayage vers l'arrière pour calculer le courant des branches et un balayage vers l'avant pour déterminer les tensions aux nœuds. Cette approche est adaptée aux problèmes d'écoulement de puissance dans les réseaux de distribution.

Dans ce chapitre, nous utiliserons la méthode de balayage arrière/avant pour calculer l'écoulement de puissance dans un réseau de distribution. Nous testerons la performance de cette méthode sur le réseau de distribution IEEE 33 nœuds sous différentes conditions 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 [16].

Pour une puissance de base ( $S_{Base}$ ) en kVA, une tension de base ( $V_{Base}$ ) en kV et une résistance  $R$  en  $\Omega$ , 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 :

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

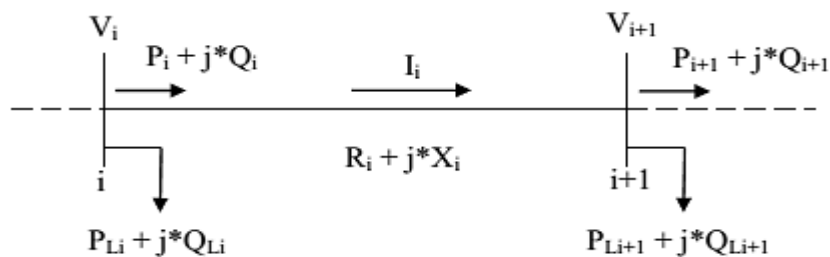


Figure 2.1 : Représentation de deux nœuds dans le réseau de distribution radial

#### 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  $\alpha$  sont calculées respectivement par les relations (2.5) et (2.6) :

$$P_\alpha = P_0 \times D_\alpha \tag{2.5}$$

$$Q_\alpha = Q_0 \times D_\alpha \tag{2.6}$$

Où :

- $P_0$  et  $Q_0$  sont respectivement les puissances active et réactive nominales ;
- $D_\alpha$  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 [17] :

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

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

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  $\alpha$  et  $\beta$  déterminent le caractère de la charge.

Les valeurs des coefficients dépendent des caractéristiques agrégées des composants de la charge. Lorsque les coefficients  $\alpha$  et  $\beta$  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  $i$ ,
- $\delta_{ij}$  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 [18] :

- 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 [19,20]. 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 arrière / avant (Backward / Forward Sweep Algorithm) [21] qui sera exposé dans la section suivante.

#### **2.4.2 Algorithme de balayage arrière / avant**

Au cours des dernières décennies, de nombreuses méthodes basées sur l'algorithme de balayage arrière / avant ont été développées dans un certain nombre d'études rapportées dans la littérature [22-23] 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 arrière / avant. 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 / avant se caractérise par sa simplicité, sa rapidité et sa précision. Il s'exécute en trois étapes

**Étape 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 :

$$I_i = \frac{S_i^*}{V_i^*} \tag{2.11}$$

Où :

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

**Étape 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) :

$$[J] = [BIBC][I] \tag{2.12}$$

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.

**Étape 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.

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

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  $\varepsilon$  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 arrière / avant est décrit dans la figure 2.2.

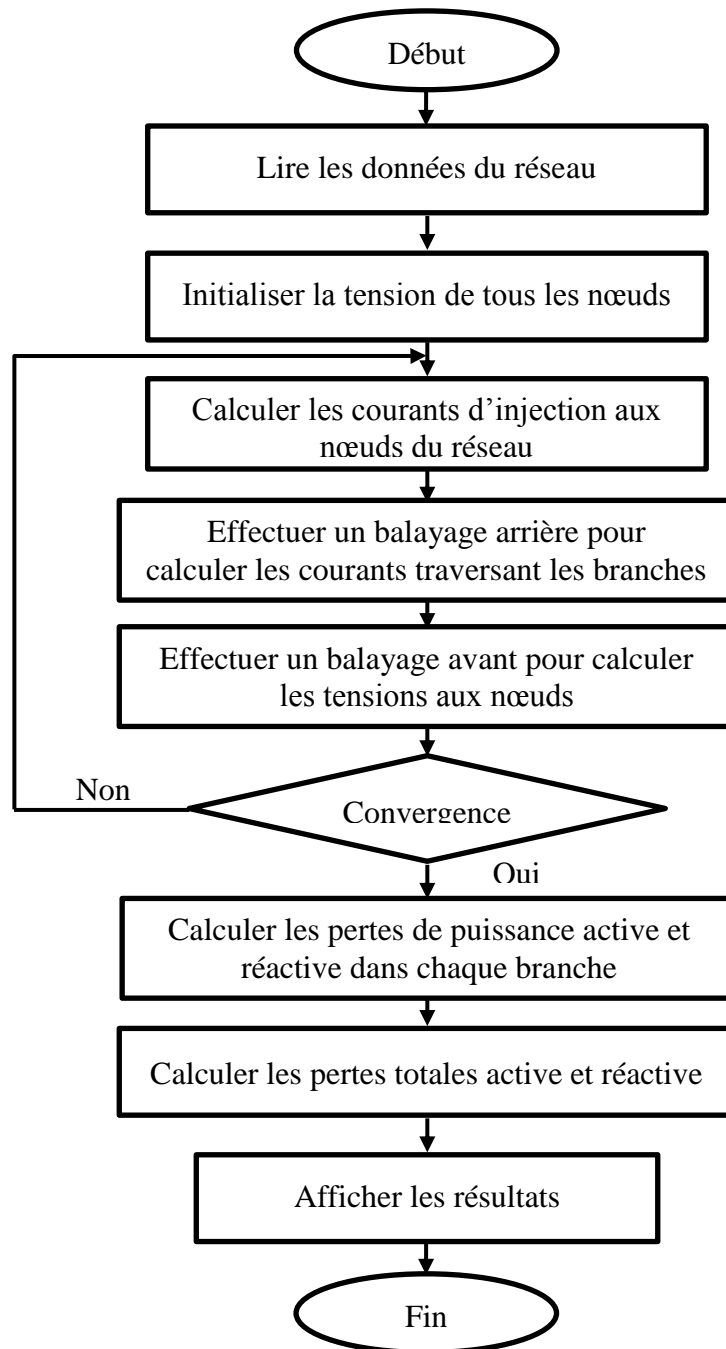


Figure 2.2 Organigramme de l'algorithme de balayage arrière / avant

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 et types 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 = 100 MVA ;
- Tension de base =12,66 kV.

Les données de ligne et de charge sont fournies dans l'annexe 1.

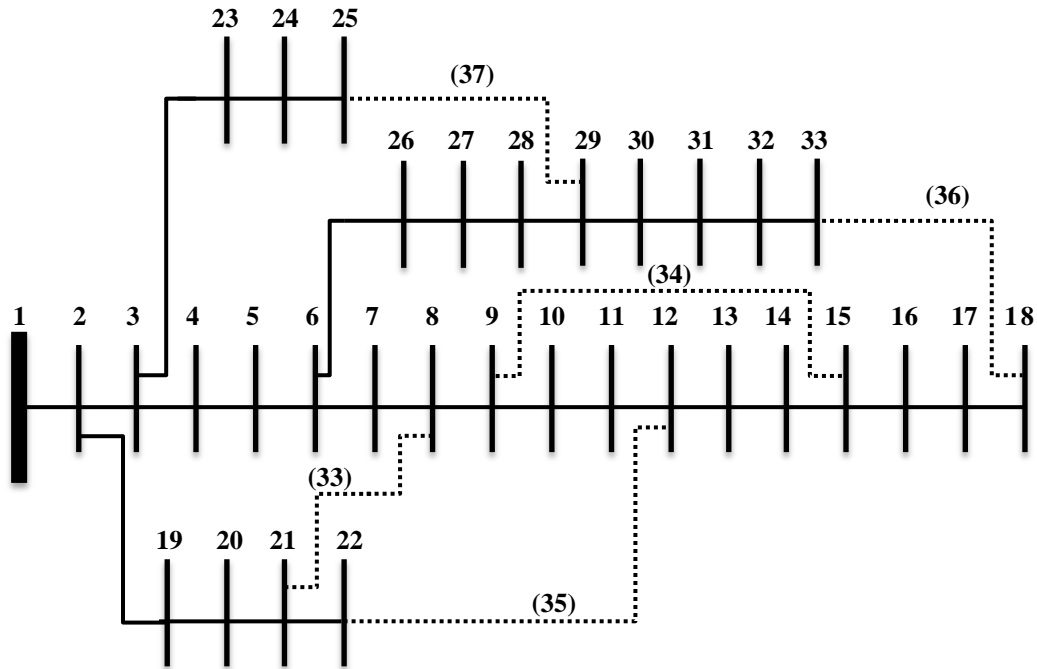


Figure 2.3 : Représentation simplifiée du réseau de distribution IEEE 33 nœuds

**2.5.2 : Différents types de charge statique**

Les résultats montrés dans la sous-section suivante correspondent à une étude sur le même réseau en considérant différents types de charge statique. Quatre types de charge statique sont utilisés dans cette étude : charge constante, charge industrielle, charge résidentielle et charge commerciale. Les valeurs des exposants de puissance active et réactive de chaque type de charge sont présentées dans le tableau 2.1 suivant :

Tableau 2.1: Valeurs d'exposant de chaque type de charge [17].

Type de charge	$\alpha$	$\beta$
Constante	0	0
Industrielle	0.18	6.0
Résidentielle	0.92	4.04
Commerciale	1.51	3.4

Le tableau 2.1 montre les amplitudes de tension au niveau de chaque nœud pour les quatre types de charge du réseau de distribution IEEE 33 nœuds. Les profils de la tension du réseau pour les quatre types de charge sont illustrés sur la figure 2.4. Il est clair, d'après le tableau 2.2 et la figure 2.4, que les valeurs minimales de tensions respectivement, pour les quatre types de charge constante, industrielle, résidentielle et commerciale, sont 0,913 pu,

0,9227 pu, 0,9233 pu et 0,9246 pu obtenues au niveau du nœud terminal 18 de la ligne principale.

Tableau 2.2: Solution de l'écoulement de puissances pour les quatre types de charge

Numéro de nœud	Tension (p.u)			
	C. Constante	C. Industrielle	C. Résidentielle	C. Commerciale
1	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
2	0,9970	0,9972	0,9973	0,9973
3	0,9829	0,9843	0,9844	0,9847
4	0,9754	0,9776	0,9778	0,9781
5	0,9680	0,9710	0,9712	0,9717
6	0,9496	0,9552	0,9553	0,9560
7	0,9462	0,9524	0,9524	0,9530
8	0,9413	0,9479	0,9480	0,9488
9	0,9350	0,9422	0,9425	0,9434
10	0,9292	0,9371	0,9374	0,9384
11	0,9284	0,9363	0,9366	0,9376
12	0,9269	0,9349	0,9353	0,9363
13	0,9207	0,9294	0,9299	0,9311
14	0,9185	0,9275	0,9280	0,9292
15	0,9170	0,9262	0,9268	0,9280
16	0,9157	0,9250	0,9256	0,9268
17	0,9136	0,9233	0,9238	0,9251
18	0,9130	0,9227	0,9233	0,9246
19	0,9965	0,9967	0,9967	0,9968
20	0,9929	0,9932	0,9932	0,9933
21	0,9922	0,9925	0,9925	0,9926
22	0,9916	0,9919	0,9919	0,9919
23	0,9793	0,9809	0,9810	0,9813
24	0,9727	0,9745	0,9747	0,9750
25	0,9693	0,9714	0,9715	0,9718
26	0,9477	0,9535	0,9537	0,9543
27	0,9452	0,9513	0,9515	0,9521
28	0,9337	0,9420	0,9419	0,9426
29	0,9255	0,9354	0,9351	0,9358
30	0,9219	0,9324	0,9320	0,9328



31	0,9178	0,9288	0,9285	0,9292
32	0,9169	0,9280	0,9277	0,9285
33	0,9166	0,9278	0,9275	0,9282

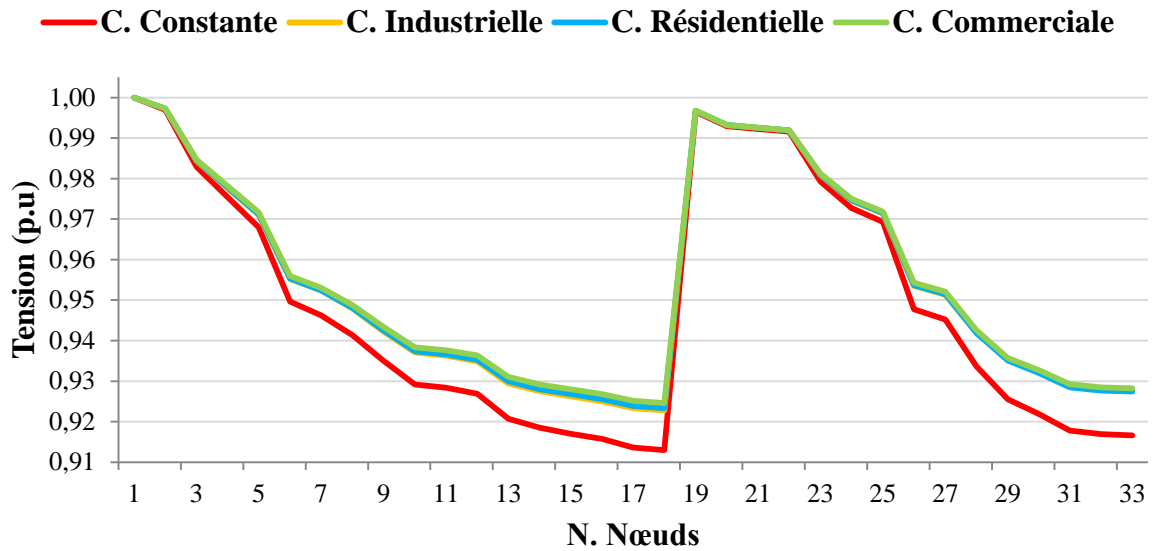


Figure 2.4: Profil de tension du réseau de distribution IEEE 33 nœuds pour les différents types de charge.

La figure 2.5 représente les pertes totales de puissance active et réactive du réseau de distribution IEEE 33 nœuds pour les quatre types de charge. Les pertes totales de puissances active et réactive en types de charge constante, industrielle, résidentielle et commerciale sont respectivement (202.71 kW, 135.25 kVAr), (161.72 kW, 107.58 kVAr), (159.35 kW, 105.94 kVAr) et (154.95 kW, 102.97 kVAr).

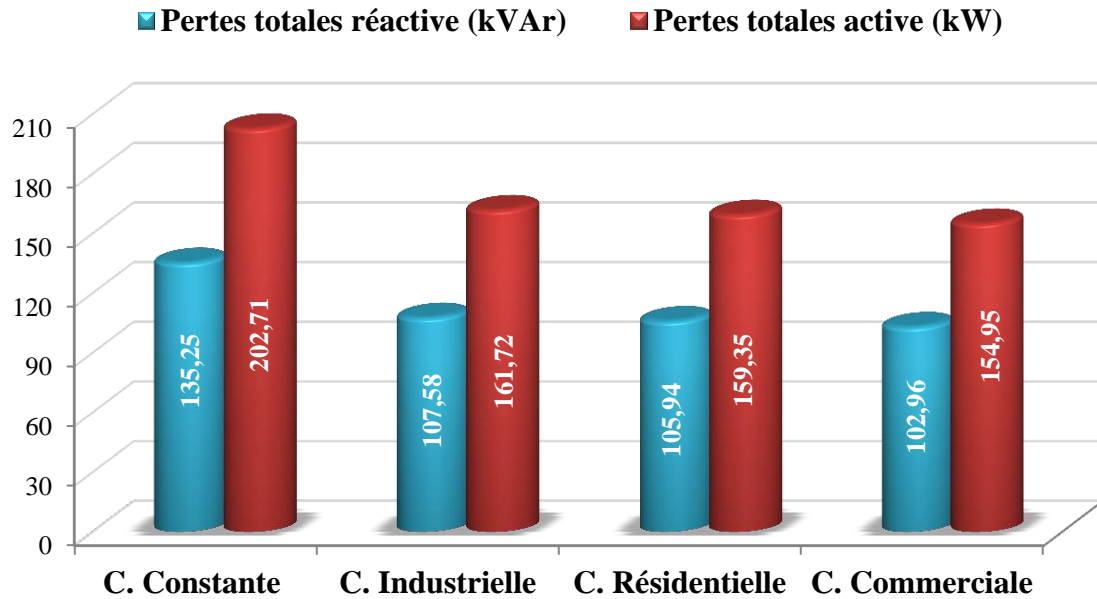


Figure 2.5: Pertes totales de puissance active et réactive du réseau IEEE 33 nœuds pour les quatre types de charge.

## 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 types de charges.

# **Chapitre 3**

## **Insertion optimale de la génération dispersée**

### **3.1 Introduction**

L'intégration de la DG dans un RED, comme a été mentionné dans la premier chapitre, joue un rôle important dans l'amélioration des performances du réseau. Cependant, l'insertion non optimale de ces unités peut apparaître dans l'augmentation des pertes, l'augmentation de la déviation de tension ainsi que dans la stabilité du réseau.

Afin d'assurer une meilleure insertion des DGs dans le RED, nous proposons dans ce chapitre, l'utilisation d'un algorithme dénommé algorithme des chauves-souris (en anglais : Bat Algorithm (BA)) pour optimiser l'emplacement et la capacité des DGs. Diverses trois fonctions objectifs seront considérées à savoir la minimisation des pertes de puissance active, l'amélioration de la déviation de tension et de la stabilité de tension. Nous formulons le problème d'optimisation par la combinaison des trois objectifs susmentionnés.

Dans ce chapitre, nous allons d'abord exposer l'insertion optimale de DGs dans le RED, ensuite présenter et détailler la méthode BA utilisée et enfin évaluer les performances de cette méthode sur le réseau IEEE 33 nœuds.

### **3.2 Intégration optimale des unités de DGs dans le RED**

Le RED traditionnel repose complètement sur la production centralisée comme seule source d'énergie pour satisfaire les besoins des clients, ce qui en fait un circuit électrique passif. Actuellement, et dans le but de renforcer le réseau et limiter cette dépendance en assurant la qualité et la quantité de la puissance demandée, une nouvelle technologie de production connue sous le nom de production décentralisée ou génération d'énergie dispersée (DG) est connectée au niveau du RED. Afin que cette connexion soit efficace et rentable et aura un impact positif sur le comportement du réseau, il faut que son insertion soit optimale en respectant les caractéristiques du réseau [24].

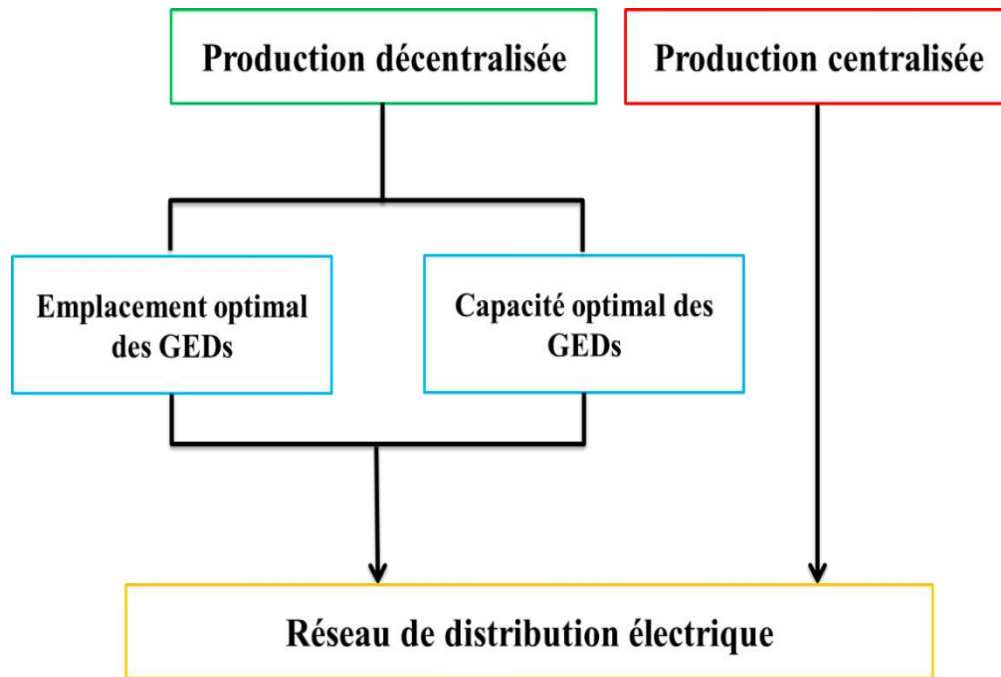


Figure 3.1: Organisation du RED en présence des DGs

### 3.2.1 Emplacement des unités de DGs

Les unités de DGs 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 RED soit optimal de telle sorte que les tensions dans tous les nœuds soient dans les limites acceptables et les pertes de puissance soient minimales.

### 3.2.2 Capacité des unités de DGs

L'insertion non-planifiée des DGs peut provoquer un effet inverse sur les pertes de puissance et le plan de tension de RED, il faut que la puissance injectée par chaque DG 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 DGs insérées dans le RED.

## 3.3 Algorithme des chauves-souris

L'algorithme des chauves-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 [25].

Pour des raisons d'optimisation, le docteur X. Yang a idéalisé le comportement des chauves-souris par l'utilisation de trois règles idéalisées suivantes [25] :

- 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  $\lambda$  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  $A \in [A_0, A_{min}]$ .

#### A- 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 :

$$f_i = f_{min} + (f_{max} - f_{min})\beta \quad (3.1)$$

$$v_i^t = v_i^{t-1} + (x_i^t - x^*)f_i \quad (3.2)$$

$$x_i^t = x_i^{t-1} + v_i^t \quad (3.3)$$

$\beta \in [0,1]$  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  $\lambda f_i$  est l'augmentation de vitesse, nous utilisons  $f_i$  pour régler la vitesse tout en fixant l'autre facteur  $\lambda_i$ . 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.

$$x_{new} = x_{old} + \varepsilon A^t \quad (3.4)$$

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.

**B- 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.

$$A_i^{t+1} = \alpha A_i^t \tag{3.5}$$

$$r_i^{t+1} = r_i^0 [1 - \exp(-\gamma t)] \tag{3.6}$$

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

$$A_i^t \rightarrow 0 \text{ et } r_i^t \rightarrow r_i^0 \text{ lorsque } t \rightarrow \infty \tag{3.7}$$

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 : <math>f(x)</math>, <math>x = (x_1, \dots, x_d)^T</math></p> <p>Initialiser la population de chauve-souris <math>x_i</math> et la vitesse <math>v_i</math>, <math>i = 1, 2, \dots, n</math></p> <p>Définir la fréquence d'impulsions <math>f_i</math> de chaque position <math>x_i</math></p> <p>Initialiser le pouls <math>r_i</math> et l'intensité <math>A_i</math></p> <p>Tant que (<math>t &lt; \text{nombre maximum d'itérations}</math>)</p>
---

Générer de nouvelles solutions en ajustant la fréquence et en actualisant les vitesses et les positions / solutions (équations (3.1), (3.2) et (3.3)).

Si ( $rand > r_i$ )

Sélectionnez une solution parmi les meilleures solutions

Générer une solution locale autour de la meilleure solution sélectionnée  $x^*$  (équation 3.4)

Fin si

Si ( $rand < A_i$  et  $f(x_i) < f(x^*)$ )

Accepter de nouvelles solutions

Augmenter  $r_i$  et réduire  $A_i$  (équations (3.5), (3.6))

Fin si

Trouver la meilleure solution  $x^*$

Fin tant que

Afficher les résultats donnés par la meilleure solution  $x^*$

Fin de l'algorithme

### 3.4 Formulation du problème d'optimisation

#### 3.4.1 Fonctions objectifs

Dans cette étude, nous définissons l'emplacement et la capacité des DGs à mettre dans le RED dont l'objectif est de minimiser les pertes de puissance active et les déviations de la tension et de maximiser l'indice de stabilité de tension, détaillés ci-dessous :

##### 3.4.1.1 Minimisation des pertes actives

Les pertes de puissance dans un RED constituent l'un des paramètres clés qui déterminent les coûts de la fourniture d'électricité et les problèmes techniques du réseau. Cet objectif vise à minimiser les pertes actives totales du réseau. La DG liée au réseau devrait être capable de réduire les pertes actives sans causer un problème. Les pertes actives totales peuvent être calculées par l'équation suivante [26] :

$$P_{T,Loss} = \sum_{i=1}^{N_b} P_{Loss}(i) \quad (3.8)$$

La première fonction objectif peut être décrite par la formule suivante :



$$F_{Obj1} = \min \left( \frac{P_{T,Loss}}{P_{T,Loss,wo}} \right) \quad (3.9)$$

Où  $P_{T,Loss,wo}$  est la perte de puissance active du cas de base (avant l'ajout des DGs).

### 3.4.1.2 Minimisation du profil de tension

La tension des nœuds est l'une des plus importants indices d'évaluation de la qualité de service. L'amélioration du profil de tension peut être obtenue en réduisant au minimum les déviations de la tension des nœuds de charge de 1.0 p.u. La déviation de la tension peut être calculée par l'équation suivante [27] :

$$VD = \sum_{i=1}^{Nb} (V_i - V_{ref})^2 \quad (3.10)$$

Où :

- $V_i$  est l'amplitude de la tension sur le nœud  $i$ ,
- $V_{ref}$  est la tension de référence (1.0 p.u).

La deuxième fonction objectif peut être exprimée comme suit :

$$F_{Obj2} = \min \left( \frac{VD}{VD_{wo}} \right) \quad (3.11)$$

Où  $VD_{wo}$  est la déviation de la tension du cas initial.

### 3.4.1.3 Maximisation de l'indice de stabilité de tension

L'indice de stabilité de la tension peut être calculé à l'aide de l'équation (3.12) [90]. Ensuite, la maximisation de l'indice de stabilité de tension ( $VSI$ ) peut être transformée en minimisation en utilisant l'équation (3.13) [28].

$$VSI_j = |V_i|^4 - 4 \times (P_j X_i - Q_j R_i)^2 - 4 \times (P_j R_i + Q_j X_i) \times |V_i|^2 \quad (3.12)$$

$$\max(VSI_j) = \min \left( \frac{1}{VSI_j} \right) \quad (3.13)$$

Enfin, la troisième fonction objectif pourrait être formulée par l'équation suivante :

$$F_{Obj3} = \min \left( \frac{VSI_{wo}}{VSI_j} \right) \quad (3.14)$$

Où  $VSI_{wo}$  est l'indice de stabilité de tension du cas initial.

### 3.4.2 Fonction objectif globale

La fonction objectif globale est formulée en utilisant le modèle de somme pondérée comme suit :

$$MOF = \min(w_1 \times F_{Obj1} + w_2 \times F_{Obj2} + w_3 \times F_{Obj3}) \quad (3.15)$$

Où  $w_1$ ,  $w_2$  et  $w_3$  sont les facteurs de pondération. Dans ce travail, les valeurs de  $w_1$ ,  $w_2$  et  $w_3$  sont, respectivement, 1, 0.65 et 0.35 [ 29].

### 3.4.3 Contraintes

#### a) Contraintes d'égalités

Les contraintes égalités sont définies par les équations d'EP, 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 :

$$\begin{cases} P_G + \sum_{i=1}^{NDG} P_{DG_i} + \sum_{i=1}^{Nn} P_{Li} - \sum_{i=1}^{Nb} P_{loss} = 0 \\ Q_G + \sum_{i=1}^{NDG} Q_{DG_i} + \sum_{i=1}^{Nn} Q_{Li} - \sum_{i=1}^{Nb} Q_{loss} = 0 \end{cases} \quad (3.16)$$

Où:

- $Nb$  est le nombre total des branches ;
- $Nn$  est le nombre total des nœuds de charge ;
- $NDG$  est le nombre total des DGs ;
- $P_G$ ,  $Q_G$  sont respectivement les puissances active et réactive générées provenant de la source ;
- $P_{DG_i}$ ,  $Q_{DG_i}$  sont respectivement les puissances active et réactive générées par la DG au nœud  $i$  ;
- $P_{Loss}$ ,  $Q_{Loss}$  sont respectivement les pertes de puissance active et réactive dans une branche.

#### b) Contraintes d'inégalité

- **Contrainte de tension :** Le niveau de tension de chaque nœud doit être conservé dans les limites spécifiées comme suit :

$$V_{Min,i} \leq V_i \leq V_{Max,i} \quad (3.17)$$

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

- **Contrainte de capacité de DG :** Les puissances active et réactive injectées par les DGs doivent être toujours entre leurs limites *min* et *max*.

$$P_{DG_i}^{Min} \leq P_{DG_i} \leq P_{DG_i}^{Max} \quad (3.18)$$

$$Q_{DG_i}^{Min} \leq Q_{DG_i} \leq Q_{DG_i}^{Max} \quad (3.19)$$

Où

- $P_{DG_i}$ ,  $Q_{DG_i}$  sont respectivement les puissances active et réactive injectées par la DG au nœud  $i$ .
- $P_{DG_i}^{Min}$ ,  $P_{DG_i}^{Max}$  sont respectivement les valeurs minimale et maximale de puissances actives injectées par la DG.
- $Q_{DG_i}^{Min}$ ,  $Q_{DG_i}^{Max}$  sont respectivement les valeurs minimale et maximale de puissances réactives injectées par la DG.

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

$$|S_{li}| \leq S_{li}^{max} \quad (3.20)$$

Où :

- $S_{li}$  est la puissance apparente parcourant la ligne  $li$ ,
- $S_{max}$  est la puissance apparente maximale parcourant la ligne  $li$ .

### c) Manipulation des contraintes

Il existe plusieurs formes possibles de fonctions de pénalités, le choix d'une forme particulière dépend de la nature et de la complexité du problème à traiter. Dans notre cas, les fonctions des pénalisations des violations de la tension des nœuds de charge et de la puissance parcourant la ligne sont présentées comme suit [29] :

$$H(V) = \sum_{i=1}^{Nb} H(V_i) = \begin{cases} K_V \times (V_i^{min} - V_i)^2 & \text{si } V_i < V_i^{min} \\ 0 & \text{si } V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max} \\ K_V \times (V_i - V_i^{max})^2 & \text{si } V_i > V_i^{max} \end{cases} \quad (3.21)$$

$$H(S) = \sum_{i=1}^{Nl} H(S_{li}) = \begin{cases} 0 & ; S_{li} < S_{li}^{min} \\ K_S \times (S_{li} - S_{li}^{max})^2 & ; S_{li} > S_{li}^{max} \end{cases} \quad (3.22)$$

Où  $K_V$  et  $K_S$  sont les facteurs de pénalité.

Donc, la fonction de pénalisation totale  $PE$  est présentée comme suit :

$$PE = H(V) + H(S) \quad (3.23)$$

Ainsi, en cas de violation d'une ou plusieurs contraintes de sécurité, la fonction objectif du problème d'optimisation après violation est présentée comme suit :

$$F^P = F + PE \quad (3.24)$$

Où :

- $F^P$  et  $F$  sont les fonctions objectifs après et avant pénalisation,
- $PE$  représente la fonction de pénalisation totale.

### 3.4.4 Variables de contrôle

Le vecteur de solution  $X^T$  pour résoudre le problème de l'emplacement optimal des DGs dans le RED est donné ci-dessous :

$$X^T = \left\{ \underbrace{L^1 \ L^2 \ L^3}_{\text{Emplacements}} \ \underbrace{S^1 \ S^2 \ S^3}_{\text{Capacités}} \right\} \quad (3.25)$$

Le vecteur de contrôle  $X^T$  comporte les capacités des DGs (les puissances actives générées par les DGs)  $S^i$  et leurs emplacements  $L^i$  dans le RED.

La figure ci-dessous présente le principe de la détermination des emplacements et les capacités optimaux des DGs par les méthodes d'optimisation.

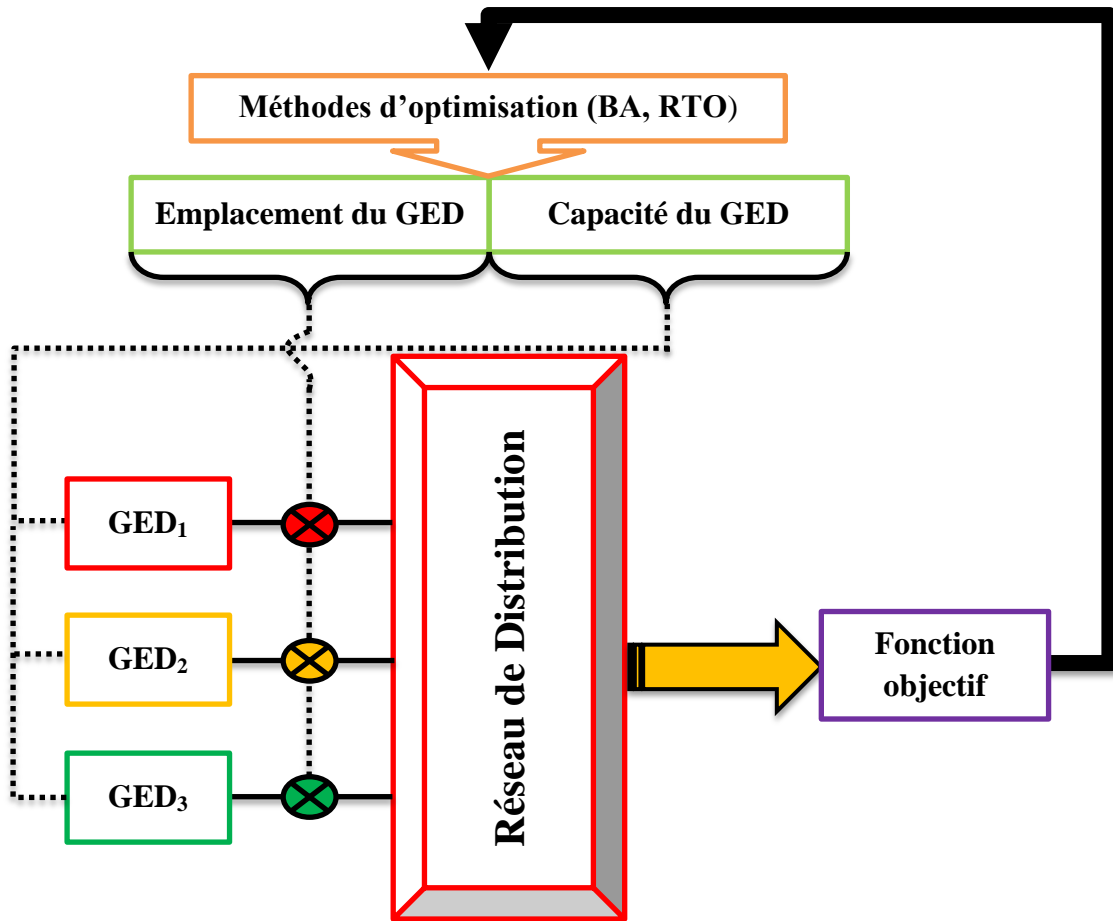


Figure 3.2 : Principe d'optimisation de l'emplacement et les capacités des DG

Les différentes étapes de la recherche de la localisation optimale des DGs en utilisant des méthodes d'optimisation métaheuristiques sont données comme suit :

Etape 1 : Lire les données du RED et initialiser les paramètres de la méthode d'optimisation utilisée.

Etape 2 : Générer aléatoirement un nombre des individus qui forment une population initiale, ceci représente les emplacements et les capacités des DG,  $P^0 = [X_1, X_2, \dots, \dots, X_i]$ . Initialiser le compteur d'itération ( $t = 0$ ).

Etape 3 : Calculer l'écoulement de puissance pour chaque variable d'état et évaluer la fonction objectif ( $f$  en utilisant la formule (3.13)).

Etape 4 : Après le calcul d'EP, vérifier les contraintes de tensions et de lignes en utilisant les formules (3.15) et (3.18). Si ces contraintes sont satisfaites passer à l'étape suivante sinon pénaliser la fonction objectif en utilisant la formule (3.22).

Etape 5 : Générer les nouvelles solutions selon le processus de la méthode d'optimisation utilisée, et allez à l'étape 3.

Etape 6 : Répéter la procédure de l'étape 3 à 5 jusqu'à ce que le nombre maximum des générations soit atteint.

Etape 7 : Choisir le meilleur individu et afficher les résultats.

### **3.5 Applications**

L'optimisation de l'emplacement et la capacité des DGs se fait par la algorithmes métaheuristique BA, programmé sous MATLAB et testé sur le réseau IEEE 33 nœuds.

Le tableau 3.1 représente l'emplacement optimal des DGs pour minimiser les pertes totales de puissance active et la déviation de la tension et maximiser le VSI pour les quatre types de charge. La figure 3.6 représente la caractéristique de convergence de la méthode BA. D'après le tableau 3.1, les meilleures solutions calculées par l'algorithme BA sont égales à 0.6714 pour charge constante, 0.7118 pour charge industrielle, 0.7575 pour charge résidentielle et 0.7577 pour charge commerciale et ceci pour la fonction objectif globale (MOF).

Tableau 3.1 : Résultats d'optimisation de l'emplacement des DGs pour les quatre types de charge.

		Emplacement	Capacité (MW)	Capacité totale (MW)	PL (MW)	VD (p.u)	SI (p.u)	MOF
<b>C. Constante</b>	<b>C.B</b>	-	-	-	0,2027	0,117	0,6950	-
	<b>BA</b>	30	1,3374	3,3935	0,0758	0,00595	0,9198	0,6714
		24	1,1478					
13	0,9083							
<b>C. Industrielle</b>	<b>C.B</b>	-	-	-	0,16172	0,0915	0,7250	-
	<b>BA</b>	31	0,8845	3,1084	0,0607	0,00802	0,9084	0,7118
		12	1,1136					
24	1,1103							
<b>C. Résidentielle</b>	<b>C.B</b>	-	-	-	0,15935	0,0909	0,7268	-
	<b>BA</b>	6	1,2858	2,7339	0,0693	0,00638	0,9188	0,7575
		14	0,6942					
31	0,7540							
<b>C. Commerciale</b>	<b>C.B</b>	-	-	-	0,15495	0,0884	0,7308	-
	<b>BA</b>	13	0,9006	3,1499	0,0659	0,00694	0,9089	0,7577
		24	1,0994					
30	1,1499							

**C.B** : cas de base (avant l'ajout des DGs).

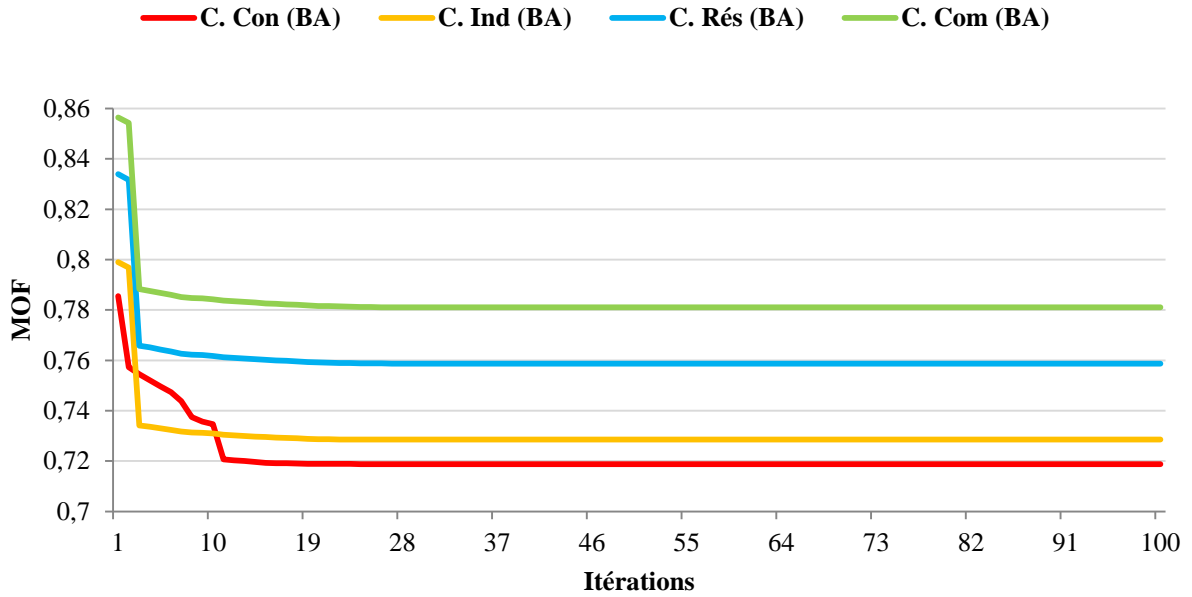


Figure 3.3 : Caractéristiques de convergence de la fonction objectif par BA dans le cas d'installation des DGs pour les différents types de charge.

Les profils de tension et l'indice de la stabilité de tension se sont considérablement améliorés avec l'intégration des DGs. Le tableau 3.2 représente les valeurs de tension et VSI au niveau de chaque nœud dans le cas de l'installation des DGs dans le réseau 33 nœuds pour les quatre types de charge en utilisant la méthode BA. Figure 3.4 montrent les profils de tension et VSI pour les mêmes cas étudiés. D'après ces figures 3.5, nous remarquons qu'il y a une similitude dans les profils de tensions et VSI pour chacune des charges constantes et commerciale, presque en tous les nœuds, et exceptionnellement au niveau des nœuds 27 à 33. Cette similitude est liée au lieu placement des GEDs (qui sont les nœuds numéro 13, 24 et 30) et à la capacité des GEDs (qui sont respectivement de 3,3935 et 3,1499 MW pour la charge constante et commerciale).

D'autre part, les profils de tensions et VSI de la charge industrielle et résidentielle sont différents par rapport aux autres charges en raison de l'emplacement de leurs DGs (qui sont respectivement les nœuds numéro 12, 24, 31 et 6, 14, 31 pour la charge industrielle et résidentielle) et leurs capacités de DGs (qui sont respectivement de 3,1084 et 2,7339 MW pour la charge industrielle et résidentielle). En plus, les valeurs minimales de la tension et VSI sont (0,9793 et 0,9198 p.u), (0,979 et 0,9188 p.u) et (0,9764 et 0,9089 p.u) obtenues au niveau du nœud terminal 33 de la ligne latérale et (0,9763 et 0,9084 p.u) obtenue au niveau du nœud intermédiaire 30 de la même ligne respectivement pour les charges constante, résidentielle, commerciale et industrielle.



Tableau 3.2 : Valeurs de tension et VSI pour les différents types de charge dans le cas d'installation des DGs

	C. Constante		C. Industrielle		C. Résidentielle		C. Commerciale	
	V	VSI	V	VSI	V	VSI	V	VSI
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0,9991	0,9963	0,9990	0,9959	0,9988	0,9951	0,9990	0,9960
3	0,9960	0,9836	0,9954	0,9814	0,9940	0,9759	0,9956	0,9821
4	0,9940	0,9760	0,9931	0,9726	0,9934	0,9736	0,9934	0,9737
5	0,9923	0,9694	0,9911	0,9647	0,9931	0,9725	0,9915	0,9663
6	0,9864	0,9459	0,9848	0,9399	0,9904	0,9615	0,9853	0,9419
7	0,9841	0,9380	0,9830	0,9336	0,9881	0,9531	0,9832	0,9345
8	0,9836	0,9361	0,9835	0,9354	0,9867	0,9479	0,9828	0,9329
9	0,9836	0,9361	0,9849	0,9410	0,9855	0,9432	0,9829	0,9334
10	0,9842	0,9381	0,9870	0,9488	0,9848	0,9405	0,9836	0,9359
11	0,9845	0,9393	0,9876	0,9511	0,9849	0,9408	0,9839	0,9372
12	0,9852	0,9422	0,9888	0,9560	0,9851	0,9418	0,9847	0,9401
13	0,9880	0,9525	0,9832	0,9344	0,9860	0,9452	0,9876	0,9509
14	0,9859	0,9446	0,9812	0,9269	0,9864	0,9466	0,9855	0,9433
15	0,9845	0,9396	0,9799	0,9221	0,9851	0,9417	0,9842	0,9385
16	0,9833	0,9347	0,9787	0,9175	0,9839	0,9370	0,9830	0,9338
17	0,9814	0,9276	0,9769	0,9107	0,9820	0,9300	0,9812	0,9269
18	0,9808	0,9255	0,9764	0,9087	0,9815	0,9280	0,9807	0,9249
19	0,9985	0,9942	0,9985	0,9939	0,9982	0,9930	0,9985	0,9940
20	0,9950	0,9800	0,9949	0,9798	0,9947	0,9789	0,9950	0,9799
21	0,9943	0,9773	0,9942	0,9771	0,9940	0,9763	0,9943	0,9773
22	0,9936	0,9748	0,9936	0,9747	0,9934	0,9738	0,9936	0,9748
23	0,9957	0,9829	0,9951	0,9803	0,9906	0,9627	0,9952	0,9809
24	0,9956	0,9826	0,9949	0,9795	0,9842	0,9379	0,9950	0,9799
25	0,9924	0,9698	0,9917	0,9670	0,9810	0,9260	0,9918	0,9674
26	0,9862	0,9460	0,9842	0,9381	0,9896	0,9591	0,9850	0,9414
27	0,9862	0,9459	0,9834	0,9354	0,9886	0,9553	0,9848	0,9404
28	0,9843	0,9382	0,9793	0,9194	0,9834	0,9351	0,9822	0,9301
29	0,9834	0,9348	0,9766	0,9094	0,9799	0,9220	0,9807	0,9246
30	0,9843	0,9387	0,9763	0,9084	0,9792	0,9193	0,9812	0,9268
31	0,9804	0,9239	0,9780	0,9149	0,9801	0,9227	0,9775	0,9128
32	0,9796	0,9208	0,9772	0,9120	0,9793	0,9197	0,9767	0,9098
33	0,9793	0,9198	0,9770	0,9110	0,9790	0,9188	0,9764	0,9089

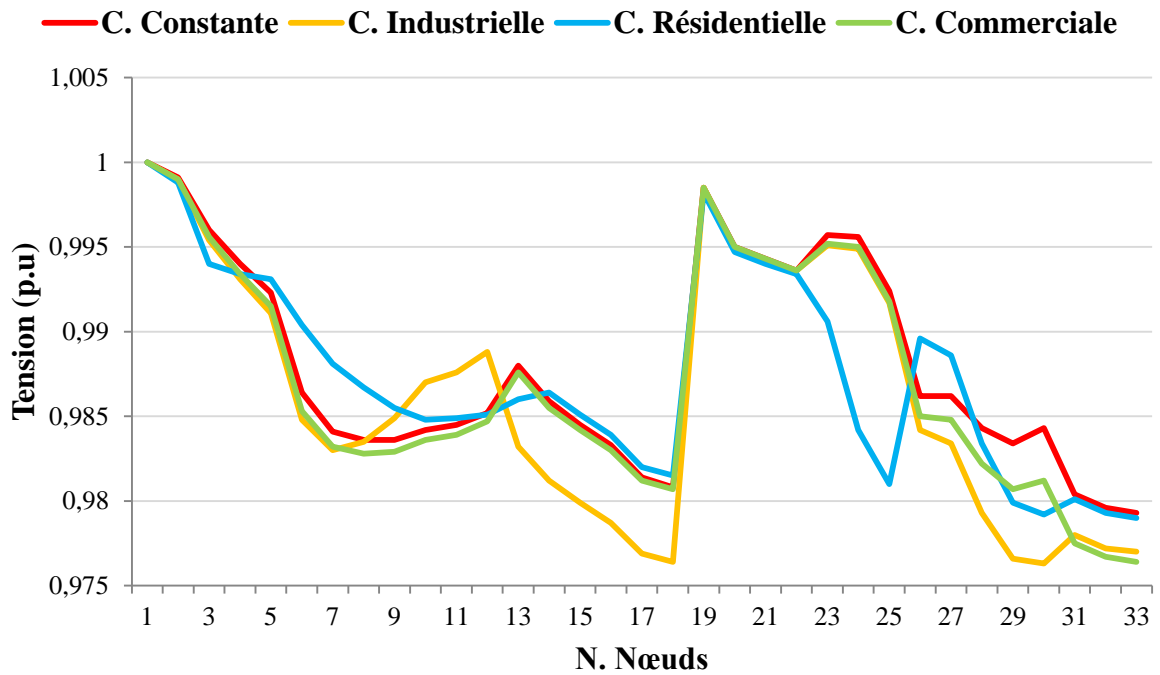


Figure 3.4 : Profil de tension pour les quatre types de charge dans le cas d'installation des DGs

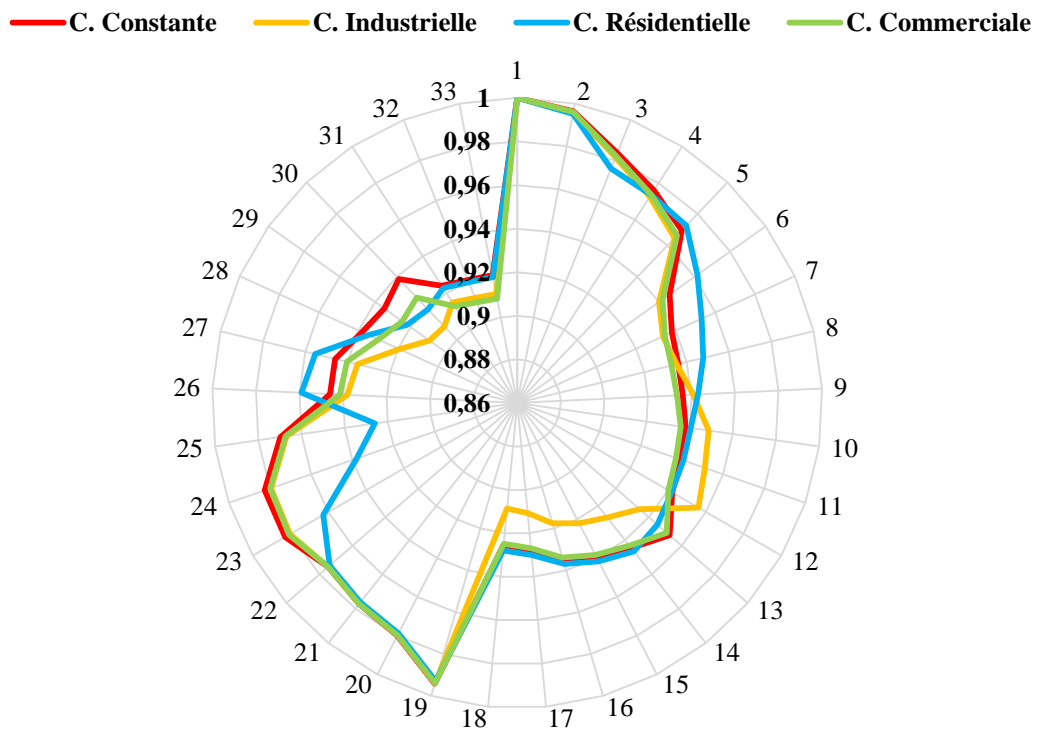


Figure 3.5 : Profil de VSI dans le cas d'installation des DGs pour les quatre types de charge

Les figures 3.6 et 3.7 présentent respectivement les pertes totales de puissance active et réactive avant et après l'intégration des DGs et leurs pourcentages de réduction pour les quatre types de charge. D'après ces figures, on remarque qu'il y a une réduction des pertes totales de

puissances active et réactive avec un pourcentage de minimisation de (62,60% et 61,07%), (62,46% et 69,15%), (56,50% et 64,31%) et (57,48% et 66,27%) respectivement pour les quatre types de charge.

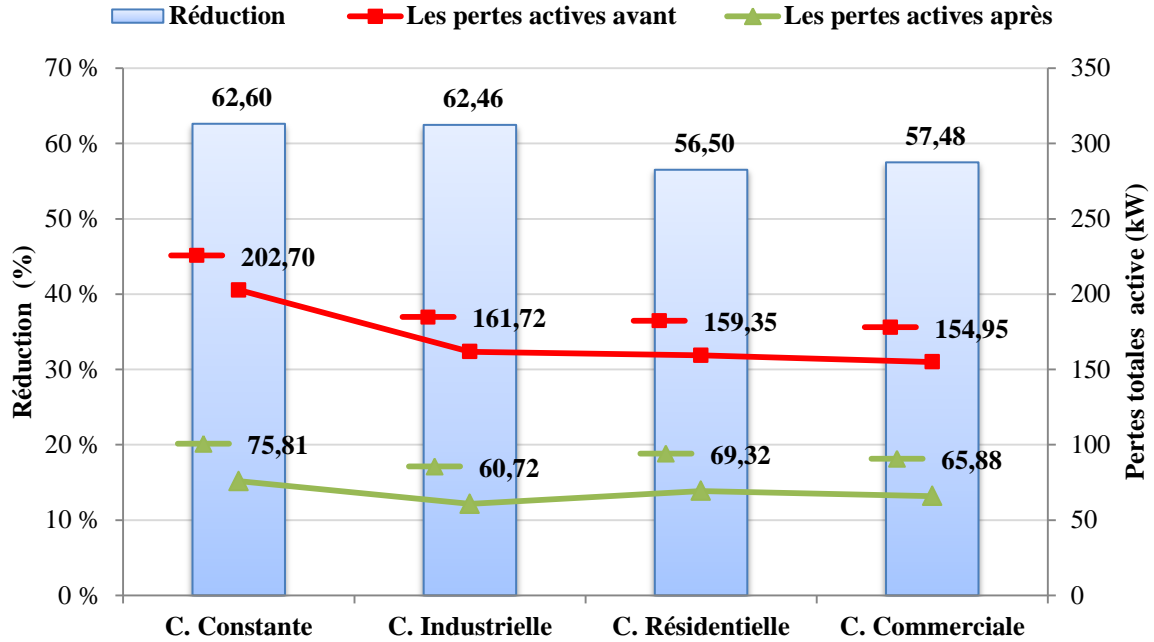


Figure 3.6 : Pertes totales de puissance active avec leurs réductions pour les différents types de charge dans le cas d'installation des DGs

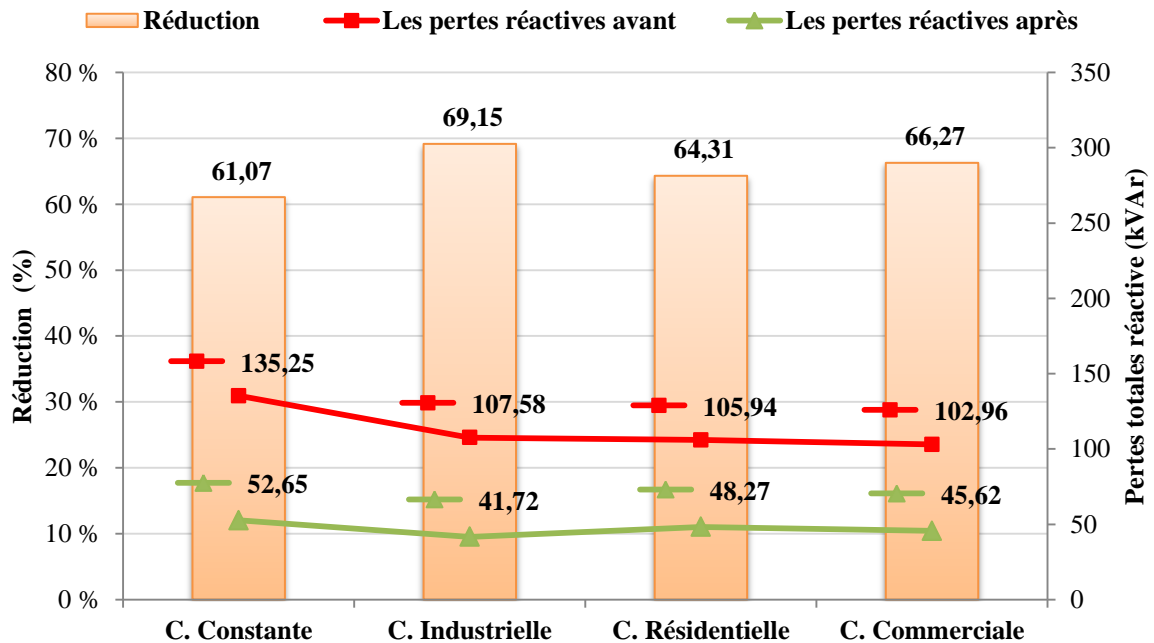


Figure 3.7 : Pertes totales de puissance réactive avec leurs réductions pour les différents types de charge dans le cas d'installation des DGs

**3.6 Conclusion**

Dans ce chapitre l'algorithme de chauve-souris (BA) a été appliqué pour résoudre le problème de localisation optimale de trois DGs dans le réseau distribution IEEE 33 nœuds. Trois fonctions objectifs ont été considérées dans l'installation optimale des DGs à savoir : la minimisation des pertes actives totales, la minimisation de la déviation de la tension aux nœuds de charge et la maximisation de l'indice de stabilité de tension. Ces objectifs ainsi qu'un objectif utilisant le modèle de somme pondérée ont été étudiés tout en satisfaisant les différentes contraintes opérationnelles. L'efficacité d'algorithme proposé pour résoudre le problème de localisation optimale des DGs a été vérifiée sur quatre différents types de charge du réseau distribution étudié.

### Conclusion générale

L'optimisation de la connexion des DGs (Distributed Generation (DG)) dans le réseau électrique de distribution (RED) ainsi que la reconfiguration de ce dernier sont deux facteurs essentiels pour l'amélioration de l'efficacité du fonctionnement et la gestion des REDs. Dans ce travail et dans le cadre de l'optimisation, l'amélioration des performances de fonctionnement des REDs en présence de DGs a été traitée. Pour cela, nous avons procédé comme suit :

- Une présentation d'une technique basée sur le balayage arrière et avant de la ligne (Backward / Forward Sweep Algorithm) du réseau pour le calcul de l'écoulement de puissance dans les REDs a été faite. La technique a été implémenté sur le réseau test IEEE 33 nœuds avec quatre types de charge.
- Une application de l'algorithme des chauves-souris (BA) dans l'optimisation de l'emplacement et de la capacité des DGs dans le RED a été faite. Le programme développé a été appliqué sur le même RED mais avec quatre types de charge: constante, industrielle, résidentielle et commerciale. Nous avons formulé le problème d'optimisation avec la combinaison de trois objectifs qui sont la minimisation des pertes de puissance active, l'amélioration de la déviation de tension et l'amélioration de la stabilité de tension. Nous avons remarqué à partir des résultats obtenus que l'insertion des DGs, a un rôle important dans l'amélioration des performances du RED.

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'insertion optimale de la DG.
- Appliquer des nouvelles méthodes d'optimisation pour l'optimisation de l'insertion des DGs aux REDs.
- Implémenter cette étude sur un RED 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] M. Zellagui, « Etude des protections des réseaux électriques MT (30 & 10 kV) », Mémoire de Magistère, Université Mentouri Canstantine, 2010.
- [8] Opérateur du Système Electrique OSE, <https://www.os.dz>.
- [9] T. Ackermann, G. Andersson and L. Söder, “Distributed generation: a definition” Electric Power Systems Research, Vol. 57, pp. 195-204, April 2001.
- [10] IEEE, “IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric power systems IEEE 1547”, 2003.
- [11] International Energy Agency (IEA), 'Distributed Generation in Liberalized Electricity Markets', OECD/IEA, Paris, France, 2002.
- [12] A. Chambers, “Distributed generation: a nontechnical guide.” Penn Well, Tulsa, Oklahoma, p. 283, 2001.
- [13] Wendy Carolina BRICEÑO VICENTE, “Modélisation des réseaux de distribution sous incertitudes”, Thèse docteur de l'Université de Grenoble, 20 septembre 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] J. D. Glover, M. S. Sarma, T. Overbye, “Power System Analysis and Design”, Cengage Learning, 3 janv. 2011
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] M.S. Srinivas, “Distribution Load Flow: A Brief Review”, IEES PES Winter Meeting 2000.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] K. Nadhir, “Contribution à la gestion des réseaux de distribution en présence de génération d’énergie dispersée ”, Thèse de Doctorat en sciences, décembre 2014.
- [26] X.S. Yang, “A new metaheuristic bat-inspired algorithm. ” Nature inspired cooperative strategies for optimization (NICSO 2010). Springer, Berlin, Heidelberg, 2010. 65-74.
- [27] S. A. Nowdeh, I. F. Davoudkhani, M. H. MoGHADDAM, et al. “Fuzzy multi-objective placement of renewable energy sources in distribution system with objective of loss reduction and reliability improvement using a novel hybrid method. ”, Applied

- Soft Computing, 2019, vol. 77, p. 761-779.
- [28] M. CHAKRAVORTY, D. DAS, “Voltage stability analysis of radial distribution networks. ”, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2001, vol. 23, no 2, p. 129-135.
- [29] R. Jamil Mahfoud, Y. F. Sun, N. Alkayem, et al. “A novel combined evolutionary algorithm for optimal planning of distributed generators in radial distribution systems. ”, Applied Sciences, 2019, vol. 9, no 16, p. 3394.
- [30] M. G. Hemeida, S. Alkhalaf, A. A. A. Mohamed, A. A. Ibrahim, T. Senjyu, “Distributed generators optimization based on multi-objective functions using manta rays foraging optimization algorithm (MRFO).”, Energies, 2020, vol 13, no 15, p. 3847.



# Annexe

## Données du réseau de distribution IEEE 33 nœuds

N° Interrupteur	Nœud départ	Nœud d'arrivée	R(ohms)	X(ohms)	P(kW)	Q(kVAr)
1	1	2	0.0922	0.0477	100	60
2	2	3	0.4930	0.2511	90	40
3	3	4	0.3660	0.1864	120	80
4	4	5	0.3811	0.1941	60	30
5	5	6	0.8190	0.7070	60	20
6	6	7	0.1872	0.6188	200	100
7	7	8	0.7114	0.2351	200	100
8	8	9	1.0300	0.7400	60	20
9	9	10	1.0440	0.7400	60	20
10	10	11	0.1966	0.0650	45	30
11	11	12	0.3744	0.1238	60	35
12	12	13	1.4800	1.1550	60	35
13	13	14	0.5416	0.7129	120	80
14	14	15	0.5910	0.5260	60	10
15	15	16	0.7463	0.5450	60	20
16	16	17	1.2890	1.7210	60	20
17	17	18	0.7320	0.5740	90	40
18	2	19	0.1640	0.1565	90	40
19	19	20	1.5042	1.3554	90	40
20	20	21	0.4095	0.4784	90	40
21	21	22	0.7089	0.9373	90	40
22	3	23	0.4512	0.3083	90	50
23	23	24	0.8980	0.7091	420	200
24	24	25	0.8960	0.7011	420	200
25	6	26	0.2030	0.1034	60	25
26	26	27	0.2842	0.1447	60	25
27	27	28	1.0590	0.9337	60	20
28	28	29	0.8042	0.7006	120	70
29	29	30	0.5075	0.2585	200	600
30	30	31	0.9744	0.9630	150	70
31	31	32	0.3105	0.3619	210	100
32	32	33	0.3410	0.5302	60	40
33	8	21	2	2	-	-
34	9	15	2	2	-	-
35	12	22	2	2	-	-
36	18	33	0.5	0.5	-	-
37	25	29	0.5	0.5	-	-

## ملخص

نظرًا للعدد المتزايد لمستخدمي شبكة الكهرباء وزيادة حمل الشبكة، تسعى شركات توزيع الكهرباء جاهدة لتلبية الطلب على الطاقة من خلال تصميم الشبكة وتشغيلها بكفاءة. مع صعود الإنتاج اللامركزي المدمج في شبكة التوزيع، من الضروري تحليل تأثيراته الفنية بعناية. في هذه المذكرة، تم وضع الأجيال المشتة بطريقة مثلى على مستوى شبكة التوزيع الشعاعي ولأنواع مختلفة من الأحمال (ثابت، صناعي، سكني، تجاري)، وذلك بهدف تقليل فقدان الطاقة النشطة، وتقليل انحرافات الجهد. وتعظيم مؤشر استقرار الجهد. يتم استخدام خوارزمية تحسين تسمى خوارزمية الخفافيش للعثور على الحلول المثلى. تم تقييم أداء الخوارزمية المقترحة على شبكة معيارية IEEE 33 عقدة.

**الكلمات المفتاحية:** شبكة التوزيع، توليد الطاقة المشتة، خوارزمية الخفافيش.

## Résumé

Étant donné le nombre croissant d'utilisateurs du réseau électrique et l'augmentation de la charge du réseau, les entreprises de distribution d'électricité s'efforcent de répondre à la demande énergétique en concevant et en exploitant le réseau de manière efficace. Avec l'essor de la production décentralisée (DG) intégrée au réseau de distribution, il est crucial d'analyser attentivement ses impacts techniques. Dans ce mémoire, des générations dispersées sont placés d'une façon optimale au niveau du réseau de distribution radial et pour différents type de charge (constante, industrielle, résidentielle, commerciale), dans l'objectif de minimisation de la perte de puissance active, la minimisation des déviations de tension et la maximisation de l'indice de stabilité de la tension. 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, Génération Dispersée, Algorithme de Chauve-Souris.

## Abstract

Given the growing number of electricity grid users and increasing grid load, electricity distribution companies are striving to meet energy demand by designing and operating the grid efficiently. With the rise of decentralized generation (DG) integrated into the distribution network, it is crucial to carefully analyze its technical impacts. In this memoir, dispersed generations are placed in an optimal manner at the level of the radial distribution network and for different types of load (constant, industrial, residential, commercial), with the objective of minimizing the loss of active power, minimizing voltage deviations and maximizing the voltage stability index. An optimization algorithm called the Bat algorithm is used to find optimal solutions. The performance of the proposed algorithm is evaluated on an IEEE 33 distribution network.

**Keywords:** Distribution network, Dispersed Generation, Bat algorithm.