

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA
Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Electrique



Mémoire
MASTER ACADEMIQUE
Domaine : Sciences et technologies
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Réseaux électriques
Présenté par :

Bendouma Raid

Belbey Okba

Thème:

***Optimisation de l'emplacement et de la taille
d'une production décentralisée dans un réseau
de distribution par l'algorithme génétique***

Soutenu publiquement

Le: 13/06/2022

Devant le jury :

M ^r Bouhadouza Boubekour	MAA	Président	UKM Ouargla
M ^r Sadaoui Fares	MCA	Encadreur/rapporteur	UKM Ouargla
M ^r Hachemi Ahmed Tidjani	Doctorant	Co-encadreur	UKM Ouargla
M ^r Boukaroura Abdelkader	MAB	Examineur	UKM Ouargla

Année universitaire 2021/2022

ملخص.

الهدف من هذه الذاكرة هو تقليل الضياع النشطة لشبكة التوزيع من خلال ادماج الأمثل للإنتاج اللامركزي. لهذا، قمنا بتطبيق الخوارزمية الجينية للعثور على الموقع والحجم الأمثل لـ DG . تظهر النتائج التي تم الحصول عليها بعد تطبيق الخوارزمية على شبكة توزيع اختبار IEEE 33 عقدة أن تكامل DG واحد في 6 عقد بحجم 2.5902 ميجاوات أدى إلى تقليل الضياع في الطاقة النشطة بقيمة 202.67 كيلوواط في غياب DG إلى 111.03199 kW في حضور DG. يتم الحصول على تحسن كبير في الجهد بعد هذا الدمج الأمثل لل DG.

الكلمات المفتاحية: شبكات التوزيع، الإنتاج اللامركزي، الخوارزمية الجينية، تدفق الطاقة، الجهد.

Résumé.

L'objectif de ce mémoire est de minimiser les pertes actives d'un réseau de distribution par l'intégration Optimale d'une production décentralisée. Pour cela, nous avons appliqué l'algorithme génétique afin de retrouver l'emplacement optimal du DG ainsi que la puissance active injectée par ce dernier. Les résultats obtenus suite à l'application de l'algorithme sur un réseau de distribution test IEEE 33 jeux de barres montrent que l'intégration d'une seul DG au jeux de barres 6 de taille de 2,5902 MW a conduit à réduire les pertes active, d'une valeur de 202.67 kW en absence de DG à 111,03199 kW en présence du DG. Une amélioration considérable des amplitudes de tension est obtenue suite à cette intégration optimale du DG.

Mots clés : réseaux de distribution, production décentralisée, algorithme génétique, écoulement de puissance, profil de tension.

Summary.

The objective of this thesis is to minimize the active losses of a distribution network by the Optimal integration of a decentralized production. For this, we applied the genetic algorithm to find the optimal location of the DG as well as the active power injected by the latter. The results obtained following the application of the algorithm on an IEEE 33-node test distribution network show that the integration of a single DG at 6 nodes of size 2.5902 MW led to a reduction in active losses of a value of 202.67 kW in the absence of DG to 111.03199 kW in the presence of DG. A considerable improvement in the voltage amplitudes is obtained as a result of this optimal integration of the DG.

Keywords : distribution networks, distributed generation, genetic algorithm, power flow, voltage profile.

Remerciements

Nous tenons à remercier tout premièrement Dieu le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donné durant toutes ces longues années.

Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur Dr. Sadaoui fares pour avoir d'abord proposé ce thème, pour suivi continuel tout le long de la réalisation de ce mémoire et qui n'a pas cessé de nous donner ses conseils.

Nous tenons à remercier vivement toutes personnes qui nous ont Aidés à élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à accomplir ce travail.

Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants du département d'Électrotechnique qui ont contribués à notre formation Nos sincères remerciements à tous les membres du jury qui on Accepté de juger notre travail.

En fin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos Amis et collègues pour le soutien moral et matériel...

Dédicaces

Avant tous, je remercie dieu le tout puissant de
m' avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce
Travail malgré toutes les difficultés rencontrées.

Je dédie ce modeste travail :

A ma mère et mon père

A mes très chers frères et mes sœurs.

A toute ma famille

A toute la famille Belbay et BenDouma

A mes chers amis

A tous ceux que j'aime et qui m'aiment.

A tous les amis d'études surtout ceux

D'électrotechnique

Symboles et abréviations

JBref	Jeu de barres de référence
JB term	Jeu de barres terminal
JBcom	Jeu de barres commun
JBinter	Jeu de barres intermédiaire
LP	Ligne principale
LL	Ligne latérale
LSL	Ligne sous-latérale
LM	Ligne mineure
OJBT1	Ordre du premier jeu de barres terminal
ldata	Données des branches du réseau
busdata	Données des jeux de barres du réseau
P_i	Puissance active sortante du jeu de barres i
Q_i	Puissance réactive sortante du jeu de barres i
P_{i+1}	Puissance active sortante du jeu de barres $i+1$
Q_{i+1}	Puissance réactive sortante du jeu de barres $i+1$
P_{Li}	Puissance active de la charge i branchée au jeu de barres i
Q_{Li}	Puissance réactive de la charge i branchée au jeu de barres i
JBDM _m	Jeu de barres de départ de la $m^{\text{ème}}$ ligne mineure
JBTM _m	Jeu de barres terminal de la $m^{\text{ème}}$ ligne mineure
JBDSL _{sl}	Jeu de barres de départ de la $sl^{\text{ème}}$ ligne sous-latérale
JBTSL _{sl}	Jeu de barres terminal de la $sl^{\text{ème}}$ ligne sous-latérale
JBDL _l	Jeu de barres de départ de la $l^{\text{ème}}$ ligne latérale
JBTL _l	Jeu de barres terminal de la $l^{\text{ème}}$ ligne latérale
JBTP _p	Jeu de barres terminal de la ligne principale
$P_{\text{Loss } i}$	Pertes de puissance active au niveau de la branche i
$Q_{\text{Loss } i}$	Pertes de puissance réactive au niveau de la branche i
$P_{\text{T Loss}}$	Pertes totales de puissance active
$Q_{\text{T Loss}}$	Pertes totales de puissance réactive
BIBC	Bus injection to brunch current matrix
DG	Génération d'énergie dispersée (Distributed generation)

Liste des figures

Chapitre 1

Figure 1.1 : Architecture générale du réseau d'énergie électrique en Algérie	5
Figure 1.2 : Production d'électricité par source en 2011	6
Figure 1.3 : Appellations normalisées des différents niveaux de tension.	8
Figure 1.4 : Courbe de charge de la journée du 14 juin 2013, source OSE	9
Figure 1.5 : Schéma de principe des postes sources HTB/HTA	11
Figure 1.6 : Schéma simple dérivation	12
Figure 1.7 : Variation de la tension le long d'un départ HTA	12
Figure 1.8 : Schéma double dérivation	13
Figure 1.9 : Schéma coupure d'artère	13
Figure 1.10 : Ecoulement de puissance	17
Figure 1.11 : Ecoulement de puissance pour une condition de fonctionnement	18

Chapitre 2

Figure 2.1 : Représentation de deux jeux de barres d'un réseau de distribution.	21
Figure 2.2 : Réseau de distribution simple.	29
Figure 2.3 : L'organigramme de l'algorithme génétique	39

Chapitre 3

Figure 3.1 : Représentation simplifiée du réseau de distribution IEEE 33-bus	41
Figure 3.2 : Tension à chaque jeu de barres du réseau de distribution IEEE 33-bus	44
Figure 3.3 : Pertes de puissances active et réactive dans les branches du réseau IEEE33-bus	45
Figure 3.4 : Tension à chaque jeu de barres du réseau de distribution IEEE 33-bus	45
Figure 3.5 : Pertes de puissances active et réactive dans les branches du réseau IEEE33-bus	46
Figure 3.6 : Courbe de convergence de méthode GA	47
Figure 3.7: Les pertes actives avant et après intégration de GED	48
Figure 3.8 : Profile de tension avant et après intégration de GED	48

Liste des tableaux

Chapitre 1

Tableau 1.1 : Tableau des domaines de tension	7
---	---

Chapitre 3

Tableau 3.1: Identification de la topologie du réseau de distribution IEEE 33-bus	42
Tableau 3.2 : Solution de l'écoulement de puissances du réseau de distribution IEEE 33-bus	42
Tableau 3.3 : Pertes de puissances active et réactive dans les branches du réseau IEEE 33-bus	43

Sommaire

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre 1: Généralités sur les réseaux de distribution et sur les productions décentralisées

1.1 Introduction.....	3
1.2 Evolution du réseau électrique.....	3
1.3 Fonctionnement des systèmes électriques.....	5
1.3.1 Production.....	6
1.3.2 Transport.....	7
1.3.3 Distribution.....	8
1.3.4 Consommation.....	8
1.3.5 Supervision.....	9
1.4 Les réseaux de distribution.....	9
1.4.1 Caractéristiques techniques générales.....	9
1.4.2 Schémas d'exploitations.....	10
1.4.2.1 Poste source HTB/HTA.....	10
1.4.2.2 Lignes et départ HTA.....	11
1.5 La production décentralisée.....	13
1.5.1 Définition.....	13
1.5.2 Les différents types de production décentralisée.....	14
1.5.2.1 Classifications en fonction du type de source d'énergie utilisée.....	14
1.5.2.2 Classifications en fonction du type de puissance délivrée.....	16
1.5.3 Impacts de la production décentralisée sur les réseaux de distribution.....	16
1.6 Conclusion.....	18

Chapitre 2: Écoulement de puissance optimal Par algorithme génétique

2.1 Introduction.....	19
2.2 Calcul de l'écoulement de puissance.....	19
2.2.1 Unité relative.....	19
2.2.2 Algorithmes d'écoulement de puissance.....	20
2.2.3 Algorithme de balayage avant et arrière.....	20
2.3 Équations de l'écoulement de puissance.....	20
2.3.1 Calcul des tensions des jeux de barres.....	21
2.3.2 Calcul des courants et des puissances transitées.....	23
2.3.2.1 Identification du type des jeux de barres.....	23
2.3.2.2 Identification et formation des lignes.....	24

2.3.2.3 Courants et puissances transitées dans des branches	25
2.3.3 Méthode directe de calcul d'écoulement de puissance	28
2.3.3.1 Principe de la méthode	28
2.3.3.2 Construction des matrices BIBC et BCBV	31
2.3.3.3 Pertes de puissance	31
2.4 Algorithmes de l'écoulement de puissance	32
2.4.1 Algorithme du balayage avant et arrière	32
2.4.2 Algorithme de la méthode directe d'écoulement de puissance	33
2.5 Méthode d'optimisation	33
2.5.1 Formule du problème	33
2.5.2 Fonction objectif	33
2.5.3 Contraintes d'égalité :	34
2.5.4 Contraintes d'inégalité :	34
2.6 Algorithme génétique	35
2.6.1 Principes des algorithmes génétiques	35
2.6.2 Caractéristiques des algorithmes génétiques	36
2.6.2.1 Le codage et l'espace de recherche des solutions	36
2.6.2.2 La fonction d'évaluation et le hasard	37
2.6.3 Organigramme de l'algorithme génétique	37
2.7 Conclusion	40

Chapitre 3: Résultat de simulations et discussion

3.1 Introduction	41
3.2 Analyse de l'écoulement de puissance	41
3.3 Résultats de l'écoulement de puissance par la méthode avant et arrière	41
3.4 Analyse de l'écoulement de puissance par la méthode directes	45
3.5 Optimisation de l'emplacement et de la taille d'une production décentralisée	46
3.6 Conclusion	49
Conclusion générale	50

Introduction générale

Introduction générale

De nos jours, l'énergie électrique est un bien de consommation à part entière devenu indispensable, non seulement pour la vie quotidienne de chacun mais, également, pour l'économie des pays. En effet, les moindres pannes électriques ou la non satisfaction du besoin en puissance ont des conséquences économiques et sociétales considérables. Ainsi la nécessité d'avoir des réseaux électriques fiables et économiques est un enjeu de plus en plus important [1]. Les réseaux d'énergie, structures vastes et complexes, ont le rôle d'acheminer l'électricité depuis les centres de production jusqu'aux lieux de consommation souvent sur de longues distances. Cependant dans beaucoup de réseaux électriques, la croissance de la demande d'électricité ne s'accompagne pas en parallèle d'une augmentation des capacités de transport et de production.

Le développement de nouvelles sources de production décentralisée ou de génération dispersée (DG) est désormais une réalité dans plusieurs pays à travers le monde grâce à la déréglementation du marché de l'énergie ainsi qu'aux évolutions technologiques des moyens de production de petite puissance.

La production décentralisée insérée généralement au niveau du réseau de distribution introduit des changements radicaux sur les métiers de la génération, du traitement et de la distribution de l'énergie électrique et remet en cause la planification, la conception, le fonctionnement et l'exploitation de ces réseaux. En effet, les réseaux de distribution n'ont pas été conçus pour accueillir ce type de production puisque l'insertion de ces sources d'énergie au sein de ces réseaux peut avoir des conséquences importantes sur la circulation des flux énergétiques et donc sur la philosophie et l'implémentation du système de gestion et de protection du réseau. Par ailleurs, une meilleure pénétration de la production décentralisée permettra au réseau de distribution tout entier de dépendre moins du réseau de transport. L'insertion de ces nouvelles productions n'est pas sans effets négatifs sur des réseaux auxquels elles sont interconnectées et qui n'ont pas été conçus à cet effet. Par conséquent, pour éviter les différents problèmes causés suite à l'insertion de productions décentralisées, il faut impérativement assurer une intégration optimale des DGs dans le réseau de distribution. En effet, notre présent travail s'inscrit dans ce cadre, précisément nous cherchons à déterminer l'emplacement et la taille optimaux d'une production décentralisée de type photovoltaïque en utilisant l'algorithme génétique. Résoudre un tel problème d'optimisation nécessite en préalable le calcul de de l'écoulement de puissance avant et après intégration du DG.

Le présent travail est structuré en trois chapitres. Dans le premier chapitre, nous présentons des généralités sur les réseaux électriques en particulier les réseaux de distribution. Nous décrivons par la suite les différents types de production décentralisée. Le deuxième chapitre sera consacré à

l'analyse de l'écoulement de puissance dans un réseau de distribution. Deux méthodes de résolution seront décrites à savoir, la méthode avant et arrières et la méthode directe. Le problème d'optimisation sera aussi présenté en décrivant l'algorithme génétique utilisée pour la résolution de notre problème d'optimisation. Au dernier chapitre, nous présentons les différents résultats de simulation obtenus pour un réseau de distribution test IEEE à 33 jeux de barres.[2][3]

Chapitre 1

**Généralités sur les réseaux de
distribution et sur les productions
décentralisées**

1.1 Introduction

Le réseau de distribution doit évoluer vers un réseau flexible et intelligent qui intègre au mieux les énergies locales et/ou renouvelables. L'ouverture du marché de l'énergie électrique et les préoccupations environnementales grandissantes, liées au changement climatique planétaire amènent des changements importants en particulier sur les réseaux de distribution avec l'arrivée massive de productions décentralisées. Cette évolution peut être envisagée en développant des systèmes intelligents, capables de minimiser les impacts engendrés par l'insertion de productions décentralisées. Cette solution devrait permettre l'augmentation du taux de production décentralisée dans le réseau de distribution dans les meilleures conditions économiques et de sécurité.

Dans ce chapitre, nous présentons d'abord l'évolution du réseau électrique avec un bref rappel du fonctionnement technique et économique général des systèmes électriques., une description plus détaillée des réseaux de distribution. Par la suite, nous décrivons en détails les réseaux de distribution. Les différents types de productions décentralisées selon le type de source d'énergie utilisée et la capacité de fournir de la puissance active et de la puissance réactive sont ensuite passés en revue.

1.2 Evolution du réseau électrique

Le réseau électrique a évolué de façon désorganisée à partir premièrement de petits réseaux formés jusqu'aux grands réseaux continentaux d'aujourd'hui. Le système électrique est ainsi au centre du développement de nos sociétés modernes et son bon fonctionnement est donc primordial pour la continuité des activités économiques. Afin de réaliser des économies d'échelle, il a évolué vers une structure verticalement intégrée, c'est-à-dire que la puissance est produite par des grandes centrales électriques potentiellement très éloignée des centres de consommation. Ces réseaux ont la particularité d'être des réseaux de grandes dimensions, interconnectés et conçus pour fonctionner avec de la génération centralisée de forte puissance. La production d'énergie est principalement basée sur des sources primaires contrôlables telles que : les centrales thermiques utilisant les combustibles fossiles, les centrales thermonucléaires, les centrales hydro-électriques, etc, fonctionnant avec des machines de grande taille. Ces sources permettent de contrôler la production d'énergie en fonction des critères de sécurité et d'économie. Le réseau est exploité de sorte que des événements sévères ne provoquent pas la perte totale du système ou la propagation des défaillances sur les réseaux voisins. Il doit aussi permettre la reprise rapide de la portion du

réseau électrique affecté par des événements majeurs[4] .

Dans les structures traditionnelles, l'énergie électrique est transportée des centrales électriques vers les consommateurs à travers une structure du réseau hiérarchique, de la très haute tension HTB ($U_n > 50 \text{ kV}$), à la moyenne tension HTA ($1 \text{ kV} < U_n < 50 \text{ kV}$) puis à la basse tension BT ($U_n < 1 \text{ kV}$). Les réseaux de transport HTB sont maillés pour assurer la fiabilité et la disponibilité de l'énergie, en cas de défauts sur des ouvrages. Par contre, les réseaux de distribution HTA et BT sont majoritairement passifs sans éléments actifs de production de puissance ni charges actives avec une configuration exploitée en structure radiale qui permet l'utilisation de plans de protection simples et robustes. La topologie du système fait que le flux d'énergie électrique est unidirectionnel, de la production vers la consommation. Le réseau doit fonctionner sous la contrainte que la puissance électrique produite doit être, à chaque instant, égale à la puissance consommée. Par conséquent, le fonctionnement du réseau repose sur un contrôle temps réel de la production d'énergie et son adaptation aux fluctuations de la charge, selon les restrictions imposées par le gestionnaire du réseau de transport d'électricité. Une telle structure verticalement intégrée du système d'alimentation apporte des avantages, tels que la réduction du coût d'exploitation, la mutualisation des marges de réserve des générateurs, une meilleure efficacité énergétique des grands générateurs, une réduction du risque de défaillances [5] .

La libéralisation du marché de l'énergie électrique et les préoccupations environnementales grandissantes, liées au changement climatique planétaire amènent des changements importants sur ces réseaux électriques, en particulier sur les réseaux de distribution avec l'arrivée massive de productions décentralisée. L'insertion de la production décentralisée conduit à une transition vers une nouvelle structure dans laquelle, les petites et moyennes unités de production sont souvent reliées au réseau de distribution. La connexion de ces unités sur les réseaux HTA et BT, conduit à un fort bouleversement de l'ancienne structure verticale du système électrique. Le flux de puissance n'est plus distribué verticalement de la haute tension à la basse tension, mais aussi horizontalement, avec même la capacité d'inverser ces flux de puissance entre les réseaux HTA ou BT ou même avec les niveaux de tension supérieurs. Les systèmes de distribution deviennent donc des réseaux actifs.

Encore, vue la difficulté de mettre en œuvre l'installation de nouvelles grandes centrales et la construction des lignes HTB et HTA en raison du coût d'investissement, du manque d'espace physique disponible et de l'opposition grandissante du public à ces nouvelles installations, le développement de nouvelles unités de production d'énergie non conventionnelles est encouragé pour les causes suivantes :

L'épuisement à l'horizon des combustibles fossiles qui sont les sources primaires des centrales de production d'énergie thermo-électrique.

Le Protocole de Kyoto adopté basé sur l'utilisation des sources d'énergies nouvelles et renouvelables comme source principale de production d'électricité.

L'image publique négative sur l'énergie nucléaire.

La construction de barrages et de bassins pour la production d'énergie hydroélectrique induit d'importantes conséquences sur l'environnement et bouleverse la vie quotidienne des habitants.

Donc, la production d'énergie à proximité des charges offre la possibilité d'alimenter des charges critiques pendant les périodes d'incident de fortes perturbations. Par ailleurs, un certain nombre de technologies de production d'électricité à petite échelle ont atteint un stade de développement qui permet leurs implantations massives dans le réseau électrique [4] [6].

1.3 Fonctionnement des systèmes électriques

Physiquement, le réseau électrique est organisé en différents niveaux de tension : le réseau de transport et de répartition, auxquels sont connectés les grands groupes de production centralisée, et le réseau de distribution alimentant la plupart des consommateurs. La figure 1.1 illustre l'architecture ou l'organisation physique générale des réseaux électriques en Algérie.

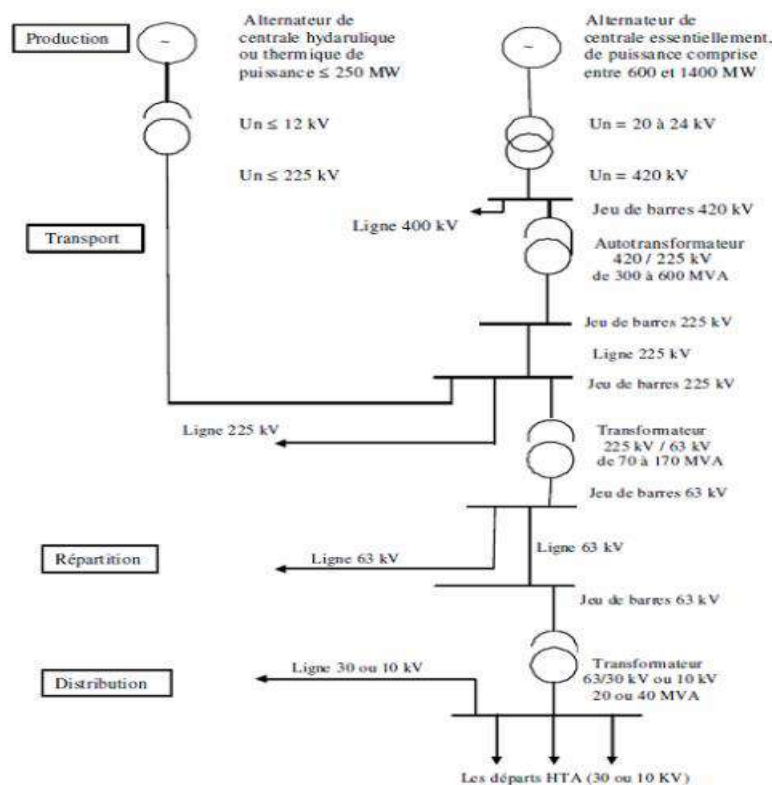


Figure 1.1 : Architecture générale du réseau d'énergie électrique en Algérie

1.3.1 Production

Les grands groupes de production d'énergie électrique sont en général basés sur des alternateurs synchrones de grandes tailles entraînés par des 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 groupes est compris entre 100MW pour les centrales thermiques de faibles puissances et 1650MW pour les plus puissantes tranches des centrales nucléaires [4]. La production peut être classée suivant le type d'énergie primaire utilisée pour générer de l'électricité.

La figure (1.2) représente la production d'électricité par source en 2011 [7]. En moyenne, 41% de la production d'électricité est réalisée à partir de charbon, suivie de 22% de la production à partir du gaz naturel. Les sources de production d'électricité varient d'un pays à l'autre prenant comme exemple, la Chine produisait 78,9% de son électricité à partir de charbon tandis que la France produisait 79,4% de son électricité à partir de combustible nucléaire [7]. Les raisons de ces choix technologiques sont multiples : géostratégiques, économiques, politiques, etc

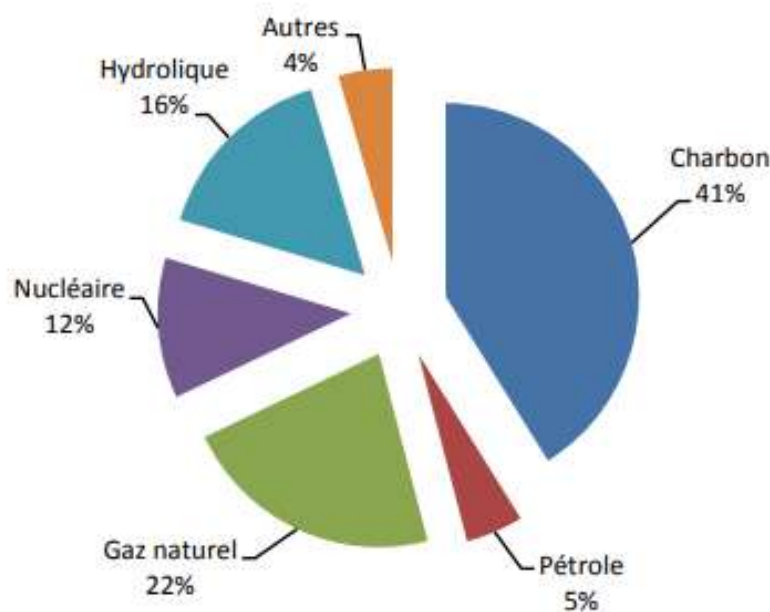


Figure 1.2 : Production d'électricité par source en 2011

1.3.2 Transport

Les réseaux de transport assurent le transport de l'énergie électrique sur de grandes distances. Afin de minimiser, entre autre, les pertes joules sur les lignes ces réseaux sont à très haute tension (de 63 kV à 400 kV). Du point de vue topographique, pour des raisons de sécurité de fonctionnement, les réseaux de transport sont des réseaux maillés ou interconnectés afin de collecter l'électricité produite par les centrales importantes et de l'acheminer par grand flux vers les zones de consommation (fonction transport), et de permettre une exploitation économique et sûre des moyens de production en assurant une compensation des différents aléas (fonction interconnexion). La structure de ces réseaux est essentiellement de type aérien. Les protections de ces réseaux doivent être très performantes car ces lignes sont vitales pour la stabilité et la sécurité du système tout entier. Les flux de puissance peuvent ainsi être répartis entre toutes les lignes du réseau. Leur gestion est par

contre complexe : les transferts de puissance entre zones de production et zones de consommation sont très importants et variables. Ils rendent l'optimisation technico-économique des réseaux difficiles. Par conséquent, de manière générale, les réseaux de transport, comparativement aux réseaux de distribution, sont très supervisés afin de pouvoir effectuer des contrôles de la tension, de la fréquence, la répartition des flux de puissance et des coûts de production, etc.

La nouvelle norme en vigueur en Algérie (SONELGAZ) définit les niveaux de tension représentés sur le tableau ci-dessou.

Tableau 1.1 : Tableau des domaines de tension

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

Les appellations normalisées des différents niveaux de tension sont présentées dans la figure (1.3).

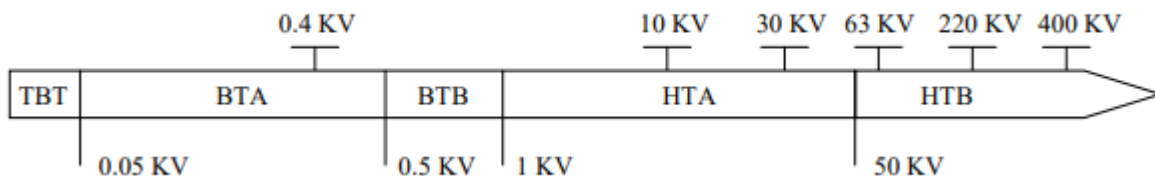


Figure 1.3 : Appellations normalisées des différents niveaux de tension.

1.3.3 Distribution

Les réseaux de distribution constituent l'architecture la plus importante du système électrique. Ils assurent la distribution de l'énergie électrique au niveau local. Leur tension est inférieure ou égale à 50 kV (HTA). Ils sont constitués de deux types de réseaux : le réseau moyenne tension (MT) avec un niveau de 10 kV et 30 kV connecté au réseau de transport, et le réseau basse tension (BT) de tension de 0.4 kV.

Le réseau BT constitue le dernier maillon du système électrique. Ses tronçons sont raccordés au réseau MT dans des postes de transformation HTA/BT. 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.

1.3.4 Consommation

La production d'énergie thermique, lumineuse et mécanique sont les trois usages classiques de l'énergie électrique. Elles se retrouvent aussi bien chez les consommateurs résidentiels qu'industriels. Dans les réseaux, les consommateurs appelés charges sont caractérisées par leurs puissances active et réactive consommées. De ces puissances mesurées sur un certain intervalle de temps sont déduites les puissances maximales (de pointe) et moyennes. Par la mesure des courants dans les postes de transformation entre les réseaux de transport et de distribution, des courbes de consommation appelées courbes de charge sont tracées pour connaître l'évolution des charges au cours du temps (figure 1.4) [8]. Elles permettent aux gestionnaires de réseau de

prédire l'évolution de la consommation sur les réseaux et donc, entre autre, de définir les plans prévisionnels de production.

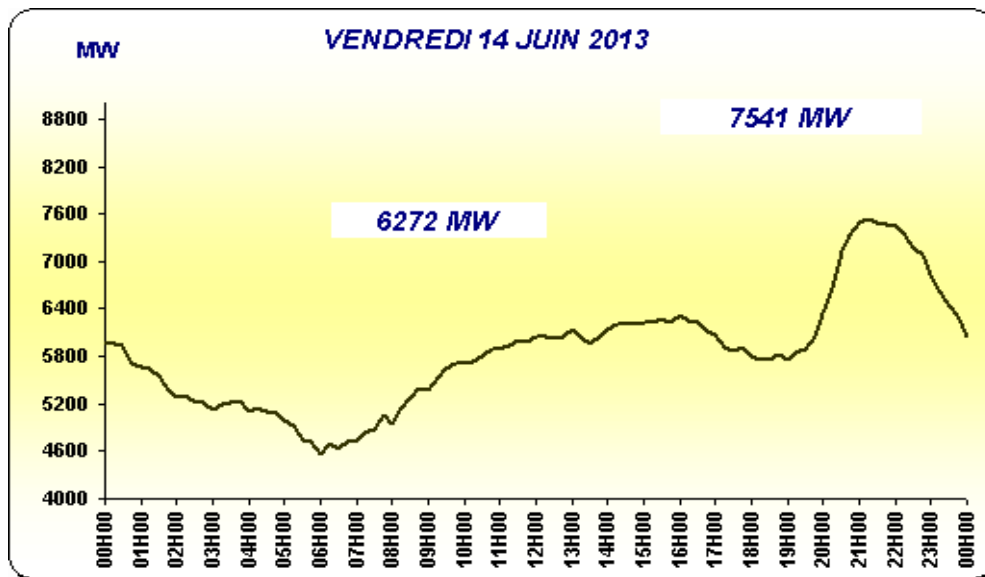


Figure 1.4 : Courbe de charge de la journée du 14 juin 2013, source OSE

1.3.5 Supervision

Le système électrique est géré continuellement à différents niveaux. Deux gestionnaires de réseaux sont distingués : les gestionnaires de réseaux de transport électrique (GRTE) et les gestionnaires de réseaux de distribution électrique (GRDE) assurant le pilotage des réseaux dans des centres de dispatching répartis sur le territoire national dans une structure hiérarchique, depuis un dispatching national gérant le système électrique au niveau du pays vers des unités régionales puis locales gérant les réseaux de transport et de distribution. La supervision permet notamment de garantir un équilibre entre production et demande et donc d'assurer le réglage de fréquence et ainsi la stabilité globale du système électrique. Une autre fonction importante réalisée par les centres de dispatching est le réglage de la tension. La tension est réglée localement en modifiant les prises de transformateurs réglables et en modulant la production ou l'absorption de puissance réactive des différents dispositifs du réseau tels que les compensateurs synchrones ou statiques.

1.4 Les réseaux de distribution

1.4.1 Caractéristiques techniques générales

Les réseaux de distribution constituent l'infrastructure la plus importante du système électrique car c'est l'interface finale qui mène à la plupart des clients. Ils sont exploités dans des gammes

de tensions inférieures à 50 kV, soit le domaine de la HTA et de la BT. En Algérie, la tension nominale des réseaux de distribution HTA est de 10 kV et 30 kV. Ces niveaux de tension permettent un bon compromis pour limiter les chutes de tension, minimiser le nombre de postes source (poste de connexion HTB/HTA) et réduire les contraintes inhérentes aux hautes tensions (coûts des investissements, protection des biens et des personnes).

Les réseaux de distribution sont, dans la très grande majorité des cas, exploités de manière radiale. Cette structure simplifie notamment le système de protections puisque le transit de puissance se fait de manière unilatérale du poste source (HTB/HTA) vers les postes HTA/BT et les consommateurs finaux pour la détection et l'élimination rapide des défauts et permet facilement d'assurer la maintenance du réseau, ainsi que le comptage de l'énergie aux postes sources. Des schémas d'exploitation de secours entre postes sources sont bien entendu prévus et permettent de minimiser le nombre de clients coupés en cas de défaillances.

1.4.2 Schémas d'exploitations

1.4.2.1 Poste source HTB/HTA

Les réseaux de distribution 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 1.5.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 réseau de distribution. 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 1.5.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 1.5.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]

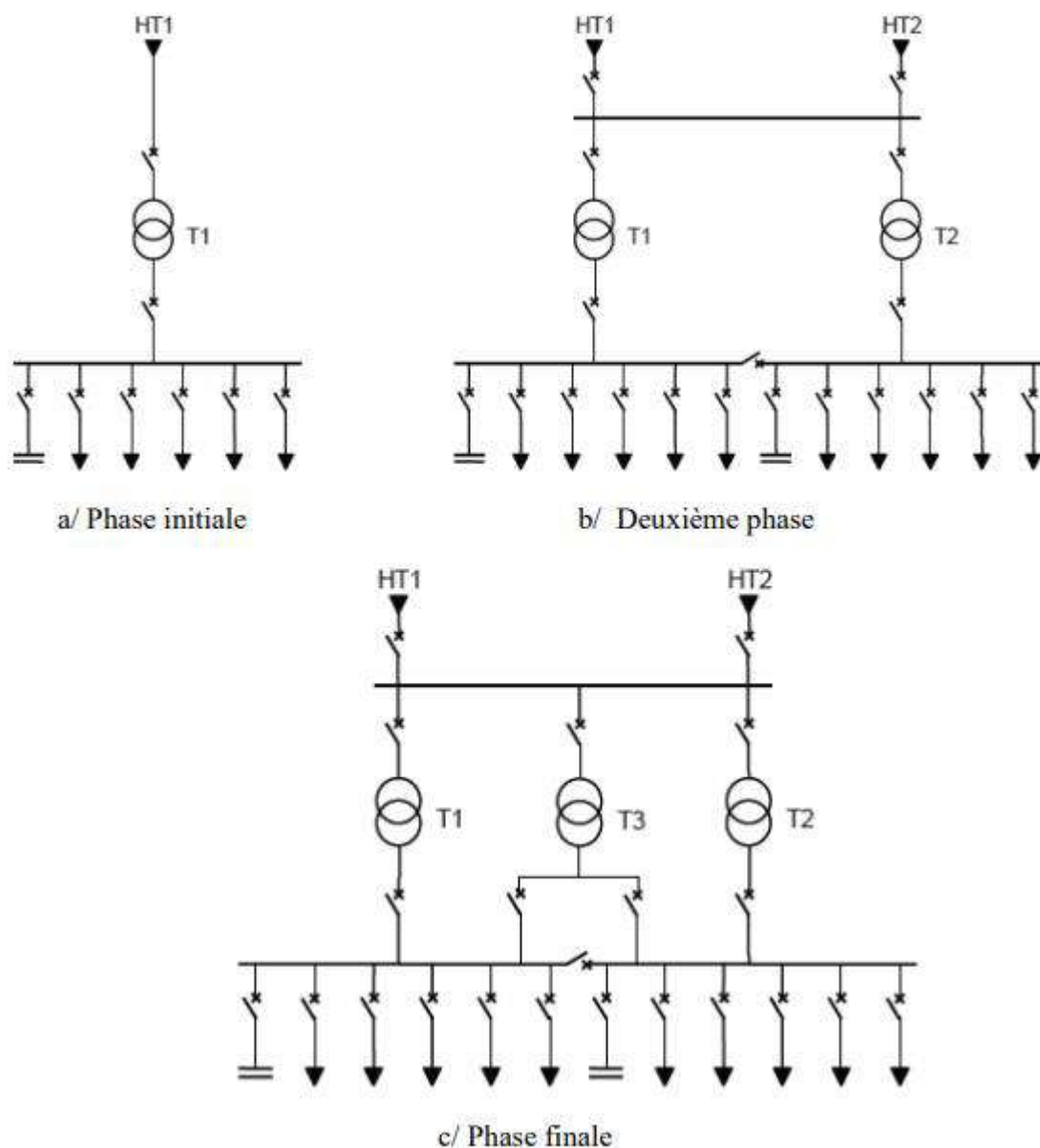


Figure 1.5 : Schéma de principe des postes sources HTB/HTA

1.4.2.2 Lignes et départ HTA

En milieu rural de faible densité, les réseaux de distribution sont principalement constitués de lignes aériennes en simple dérivation (figure 1.6), 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 1.7).

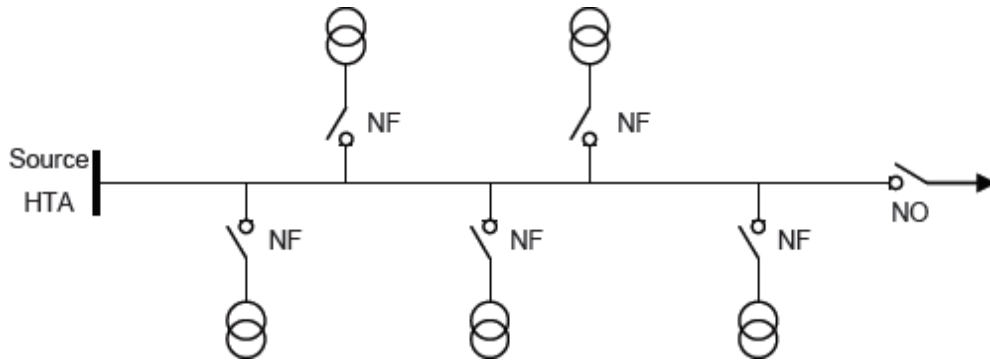


Figure 1.6 : Schéma simple dérivation

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

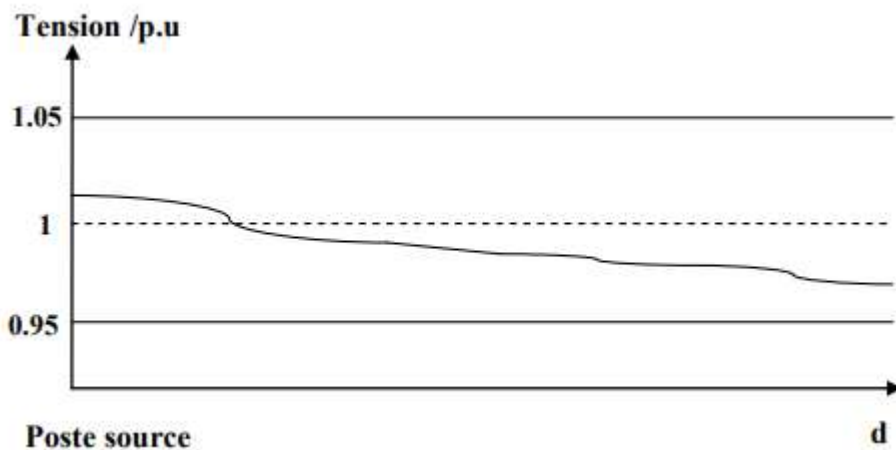


Figure 1.7 : Variation de la tension le long d'un départ HTA

Les réseaux de distribution en zones urbaines ou mixtes de forte densité de charge sont constitués principalement par des câbles HTA enterrés en double dérivation (figure 1.8) ou en coupure d'artère (figure 1.9) 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

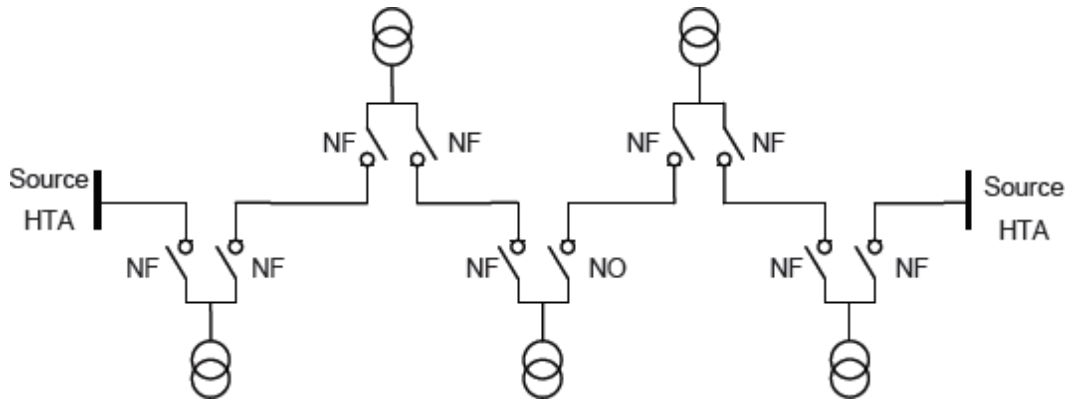


Figure 1.8 : Schéma de double dérivation

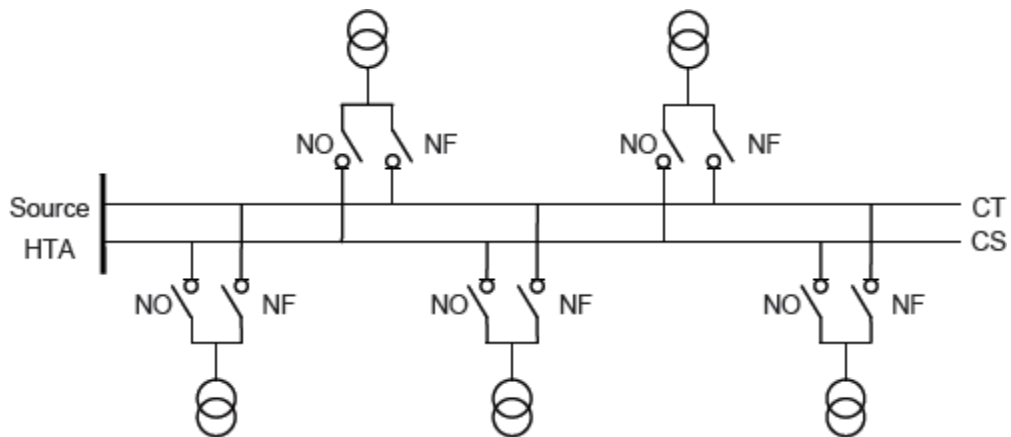


Figure 1.9 : Schéma de coupure d'artère

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

1.5 La production décentralisée

1.5.1 Définition

Depuis le début des années 1990, l'organisation du système électrique est remise en cause par divers facteurs économiques, écologiques et politiques. Le ralentissement de la croissance de demande d'énergie électrique conduit à freiner les lourds investissements dans des installations de grande taille. Ce phénomène est accentué par le poids de l'opinion

publique : chacun veut une électricité à faible coût, mais personne n'accepte la construction d'une grande centrale à sa porte. D'autre part, l'intérêt croissant accordé à l'environnement pousse les producteurs à développer la production décentralisée d'électricité un terme qui est construit par opposition au terme production centralisée désignant les grandes centrales de production connectées au réseau de transport [4].

La production décentralisée basée sur l'utilisation de sources d'énergies primaires renouvelables et de la cogénération afin d'augmenter le rendement énergétique des installations de production, ce qui contribue à produire une énergie plus propre en développant une nouvelle catégorie de producteurs : la génération d'énergie dispersée (DG).

La littérature montre qu'il n'y a pas de définition universellement partagée du terme «production décentralisée». Certains pays définissent la production décentralisée suivant le niveau de tension auquel sont connectés ces générateurs d'énergie décentralisée ou dispersés, tandis que d'autres partent du principe que la production décentralisée fournit directement les charges. D'autres pays, enfin, définissent la génération distribuée comme ayant une certaine caractéristique de base (par exemple, reposant sur des sources renouvelables, la co-génération, non-dispatchable, entre autres caractéristiques).

Les unités de production décentralisée se distinguent des unités de production centralisée par le fait qu'elles sont le plus souvent raccordées au réseau de distribution, et par leur petite taille [5]. Elle peut être classifiée [6] [9] sur la base de la puissance nominale. Ainsi la capacité d'une micro DG varie de 1 W à 5 kW, une petite DG de 5 kW à 5 MW, une moyenne DG de 5 MW à 50 MW, strictement raccordée au réseau de distribution et la production centralisée de 50 MW à 300 MW.

1.5.2 Les différents types de production décentralisée

Des classifications sont faites en fonction du type de source d'énergie utilisée [4] [5] et en fonction de la capacité de fournir des puissances actives et réactives [10].

1.5.2.1 Classifications en fonction du type de source d'énergie utilisée

a) Les énergies renouvelables

Les principales sources d'énergies renouvelables sont :

- **Hydraulique** : Les centrales hydrauliques fonctionnent grâce à l'énergie potentielle de pesanteur de l'eau des rivières, des lacs ou des fleuves. La puissance produite

dépend de la hauteur de chute et du débit d'eau. Pour la production décentralisée, des

microcentrales hydrauliques sont employées avec un ordre de grandeur de puissance de 5MW. Ce type de production présente comme avantages la gratuité de l'énergie primaire et la régularité de la production électrique. Les inconvénients principaux sont le prix élevé de l'investissement initial et l'impact sur l'environnement.

- **Eolien** : Les aérogénérateurs, ou éoliennes, transforment l'énergie cinétique du vent en énergie électrique en la transmettant par le rotor et le multiplicateur de vitesse à une génératrice. Cette source d'énergie est de plus en plus répandue grâce à son développement technologique et son fort attrait écologique. Les coûts d'investissements sont relativement importants, surtout pour l'éolien offshore mais là encore, l'énergie primaire est gratuite et l'impact environnemental assez réduit.

- **Géothermie** : Le principe de la géothermie est d'utiliser la chaleur de nappes d'eau souterraine qui peuvent atteindre 350 °C dans les zones les plus favorables pour générer directement par prélèvement ou indirectement par échange de chaleur de la vapeur d'eau. La vapeur produite entraîne par la suite des turbines dans une installation thermique classique.

- **Solaire** : le rayonnement solaire est converti soit directement en énergie électrique à courant continu par les installations photovoltaïques utilisées pour l'alimentation de sites isolés (non connectés au réseau) en association avec un système de stockage, et indirectement en énergie électrique via la production de chaleur produite par chauffage de l'eau via un fluide caloporteur en concentrant le rayonnement solaire sur un échangeur par des miroirs paraboliques. Ce principe est appelé solaire thermique existant avec différentes technologies (réseau de miroirs paraboliques, concentrateurs...) mais cette source d'énergie reste encore aujourd'hui marginale.

- **Biomasse** : Certaines centrales thermiques à flamme emploient comme source primaire des combustibles issus de la biomasse. Les déchets agricoles, urbains renouvelables, biogaz et déchets issus de l'exploitation forestière peuvent être utilisés pour générer de la chaleur, puis de l'énergie électrique. Cette technologie est de plus en plus utilisée dans les zones rurales.

b) Les énergies non renouvelables

Deux types de technologies non renouvelables peuvent être décrits :

- **Energies fossiles (gaz, charbon, pétrole)** : 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.

- **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. Aujourd'hui, deux technologies sont principalement étudiées: PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) pour des applications de faibles puissances et SOFC (Solid Oxid Fuel Cell) pour des applications stationnaires de cogénération. Ces technologies restent cependant coûteuses et donc peu répandues.

1.5.2.2 Classifications en fonction du type de puissance délivrée

Les DG peuvent être classées en quatre grands types basés sur la capacité de fournir de la puissance active et réactive.

a) **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.

b) **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.

c) **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.

d) **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.

1.5.3 Impacts de la production décentralisée sur les réseaux de distribution

L'interconnexion d'une DG au réseau de distribution 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 réseau de distribution. 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 (1.10) montre la différence entre le maximum et le minimum d'écoulement de puissance dans le réseau, avec et sans DG [11]. 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 réseau de distribution.

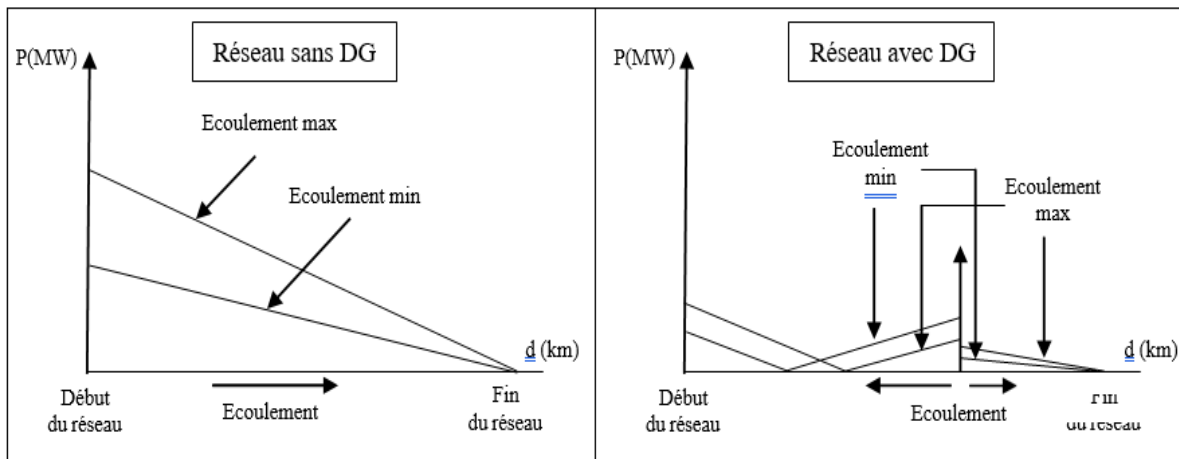


Figure 1.10 : Écoulement de puissance

La figure (1.11) 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 [11].

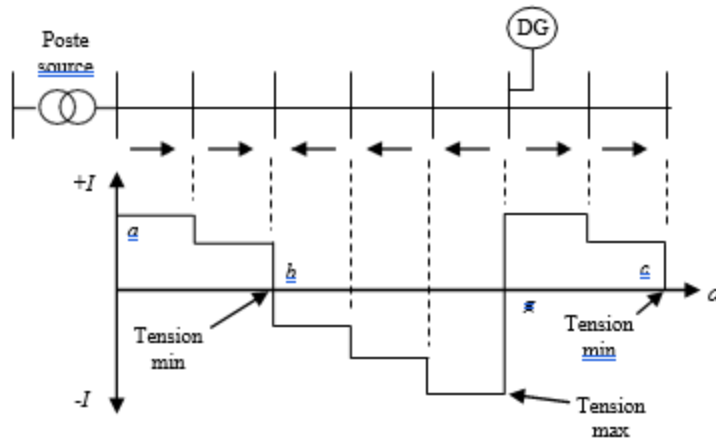


Figure 1.11 : Ecoulement de puissance pour une condition de fonctionnement

1.6 Conclusion

L'intégration de productions décentralisées va engendrer d'importants changements dans les réseaux de distribution en bouleversant profondément leur fonctionnement. Un certain nombre d'effets bénéfiques pour le consommateur, le producteur, le régulateur et plus largement la société sont à venir. En contrepartie, un certain nombre d'effets néfastes pour le système électrique sont à prévoir. En particulier, l'insertion de la production décentralisée peut induire une augmentation de pertes de puissance actives ainsi que la détérioration du profil de tension. L'objet du chapitre suivant est l'étude de l'écoulement de puissance dans un réseau de distribution.

Chapitre 2

**Écoulement de puissance optimal Par
l'algorithme génétique**

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser au calcul de l'écoulement de puissance dans le réseau de distribution. Deux méthodes de calcul sont présentées, la première dite balayage avant et arrière qui consiste à déterminer les courants et les puissances transitées dans les lignes pendant le balayage arrière. Les tensions des jeux de barres sont calculées en fonction de la tension du jeu de barres de référence pendant la phase de balayage avant. La deuxième méthode utilisée dite directe présente d'excellentes caractéristiques de convergence. Elle se base sur la construction de deux matrices, la première pour le calcul des courants des branches obtenue par l'utilisation des lois de Kirchhoff et la deuxième pour le calcul des tensions aux jeux de barres à partir des courants de branches. Enfin, nous étudions un problème d'écoulement de puissance optimal en appliquant la méthode d'algorithme génétique.

2.2 Calcul de l'écoulement de puissance

Le calcul de l'écoulement de puissance dans un réseau de distribution permet de déterminer les tension et angles de l'ensemble des jeux de barres ainsi que les pertes actives et réactives dans toutes les branches du réseau. En effet, L'étude de l'écoulement de puissance est essentielle dans la gestion d'énergie des réseaux électriques. Elle constitue aussi une étape cruciale lors de la planification d'une éventuelle extension du réseau afin de satisfaire l'augmentation de la demande en énergie [12].

2.2.1 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. Ce système associe, à une variable quelconque A , une valeur de base A_{base} et la compare à sa valeur A_{vraie} de manière à l'exprimer dans un système adimensionnel « pu » (ou en pourcentage de sa valeur de base) dont les ordres de grandeur sont bien connus [13].

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

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

La puissance active normalisée P_{pu} en unité relative en fonction de la puissance active P en MW est obtenue par :

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

La puissance réactive normalisée Q_{pu} en unité relative en fonction de la puissance réactive Q en MVAR est obtenue par :

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

2.2.2 Algorithmes d'écoulement de puissance

Les méthodes classiques de calcul de l'écoulement de puissance des réseaux de transport à savoir Gauss-Seidel, Newton-Raphson et découplée rapide [12,] [14.] sont inappropriées et inefficaces dans l'étude des réseaux de distribution à cause des caractéristiques spécifiques de ces réseaux qui sont :

- Le rapport entre la résistance et la réactance de lignes R/x est élevé ;
- La configuration radiale des réseaux de distribution ;

Afin de calculer efficacement l'écoulement de puissance dans un réseau de distribution, plusieurs méthodes basées sur le concept de balayage avant et arrière (Backward Forward sweeps) ont été développées [15,16,17,18,19]

2.2.3 Algorithme de balayage avant et arrière

Le déroulement des algorithmes de balayage avant et arrière se fait en deux phases :

- Un balayage arrière (Backward sweep) est essentiellement appliqué pour déterminer les courants et/ou les puissances transitées dans les branches ;
- Par contre, un balayage avant (Forward sweep) est effectué pour calculer les tensions des jeux de barr du réseau à partir de la tension du poste source; situé généralement au nœud 1; jusqu'aux jeux de barres terminaux de toutes les lignes du réseau.

2.3 Équations de l'écoulement de puissance

On considère deux jeux de barres i et $i + 1$ d'un réseau de distribution reliés par une branche i , de résistance R_i et d'une réactance X_i , comme illustré sur la figure 2.1.

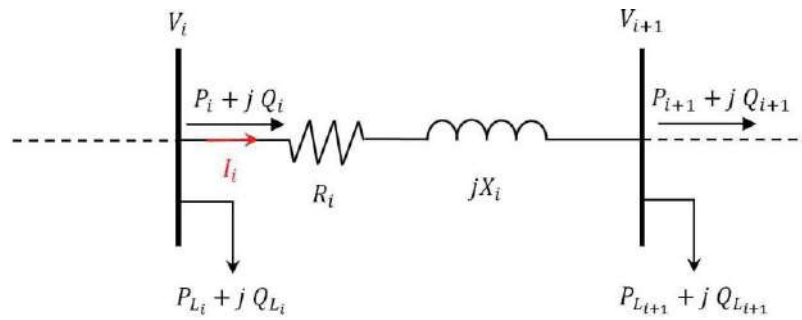


FIGURE 2.1 – Représentation de deux jeux de barres d'un réseau de distribution.

2.3.1 Calcul des tensions des jeux de barres

Les puissance active et réactive qui transitent du nœud i vers le nœud $i + 1$ dans la branche i peuvent être calculées par balayage arrière comme suit :

$$P_i = (P_{i+1} + P_{L_{i+1}}) + R_i \frac{(P_{i+1} + P_{L_{i+1}})^2 + (Q_{i+1} + Q_{L_{i+1}})^2}{V_{i+1}^2} \quad (2.4)$$

$$Q_i = (Q_{i+1} + Q_{L_{i+1}}) + X_i \frac{(P_{i+1} + P_{L_{i+1}})^2 + (Q_{i+1} + Q_{L_{i+1}})^2}{V_{i+1}^2} \quad (2.5)$$

Avec :

- P_i, Q_i sont les puissances active et réactive qui transitent dans la branche i ;
- P_L, Q_L sont les puissances active et réactive de la charge au nœud i .

Le courant qui circule dans la branche i vaut :

$$I_i = \frac{V_i \angle \theta_i - V_{i+1} \angle \theta_{i+1}}{R_i + jX_i} \quad (2.6)$$

où encore :

$$I_i = \frac{S_i^*}{V_i^*} = \frac{P_i - jQ_i}{V_i \angle \theta_{i+1}} \quad (2.7)$$

En égalisant les équations (2.6) et (2.7), on obtient :

$$\frac{V_i \angle \theta_i - V_{i+1} \angle \theta_{i+1}}{R_i + jX_i} = \frac{P_i - jQ_i}{V_i \angle \theta_{i+1}} \quad (2.8)$$

$$V_i^2 - V_i V_{i+1} \angle(\theta_{i+1} - \theta_i) = (P_i R_i + Q_i X_i) - j(Q_i R_i - P_i X_i) \quad (2.9)$$

En séparant les deux parties réelles et imaginaires, on obtient :

$$V_i V_{i+1} \cos(\theta_{i+1} - \theta_i) = V_i^2 - (P_i R_i + Q_i X_i) \quad (2.10)$$

et :

$$V_i V_{i+1} \sin(\theta_{i+1} - \theta_i) = Q_i R_i - P_i X_i \quad (2.11)$$

La somme des carrés des équations (2.10) et (2.11) donne :

$$V_i^2 V_{i+1}^2 = [V_i^2 - (P_i R_i + Q_i X_i)]^2 + (Q_i R_i - P_i X_i)^2 \quad (2.12)$$

d ou

$$V_i^2 V_{i+1}^2 = V_i^4 - 2V_i^2 (P_i R_i + Q_i X_i) + (P_i^2 + Q_i^2)(R_i^2 + X_i^2) \quad (2.13)$$

Donc, l'amplitude de la tension au nœud $i + 1$ vaut :

$$V_{i+1} = \sqrt{V_i^2 - 2(P_i R_i + Q_i X_i) + \frac{(P_i^2 + Q_i^2)(R_i^2 + X_i^2)}{V_i^2}} \quad (2.14)$$

L'angle θ_{i+1} de la tension V_{i+1} peut être obtenu en divisant l'équation (2.11) sur l'équation (2.10) :

$$\tan(\theta_{i+1} - \theta_i) = \frac{(Q_i R_i - P_i X_i)}{[V_i^2 - (P_i R_i + Q_i X_i)]} \quad (2.15)$$

Par conséquent :

$$\theta_i = \theta_i + \arctan \left[\frac{(Q_i R_i - P_i X_i)}{[V_i^2 - (P_i R_i + Q_i X_i)]} \right] \quad (2.16)$$

Autrement, la tension V_{i+1} peut être calculer à partir de la loi de Kirchhoff (loi de maille) comme suit :

$$V_{i+1} \angle \theta_{i+1} = V_i \theta_i - (R_i + jX_i) I_i \delta_i \quad (2.17)$$

Les différents algorithmes de balayage avant et arrière peuvent être classés en deux groupes selon le calcul de la tension des noeuds :

— Les algorithmes basés sur les lois de Kirchhoff : les tensions de tous les jeux de barres du réseau se calculent en utilisant l'équation (2.17). Le courant de branche est calculé pendant la phase de balayage arrière ;

— Les algorithmes basés sur l'équation quadratique : dans ces cas les tensions se déduisent à partir de l'équation (2.14). Les puissances actives et réactives transitées dans les

branchesse calculent lors de la phase de balayage arrière.

2.3.2 Calcul des courants et des puissances transitées

Le calcul des puissances actives et réactives qui transitent dans chacune des branches ainsi que les courant qui y circulent est réalisé lors de la phase du balayage arrière. Ce calcul nécessite avant tout l'identification du type de tous les jeux de barres et la construction des différents types de lignes du réseau considéré.

2.3.2.1 Identification du type des jeux de barres

Deux méthodes sont décrites pour identifier le type des jeux de barres :

— **Méthode de comparaison** : Pour identifier les différents types de jeux de barres, à partir des données du réseau, on procède à la comparaison de tous les jeux de barres d'arrivée aux jeux de barres de départ et on comptabilise ainsi le nombre d'égalité N_{eq} . Si :

— $N_{eq} = 0$: le nœud i est lié avec une seule branche et considéré comme un nœud terminal ;

— $N_{eq} = 1$: le nœud i est lié avec deux branches et constitue donc un nœud intermédiaire ;

— $N_{eq} > 1$: le nœud i est un nœud commun et il est lié avec au moins trois branches.

— **Méthode matricielle** : Afin d'identifier le type des jeux de barres, une matrice M est conçue à partir de la configuration du réseau de distribution étudié.

Pour un réseau de distribution à n_{bus} jeux de barres, la matrice M est de dimensions $(n_{bus}, n_{bus} - 1)$. Les lignes i de la matrice M correspondent aux jeux de barres de départ et les colonnes représentent les jeux de barres d'arrivés. Les éléments de la matrice sont soit 0 ou 1, tels que :

— Si une branche entre un nœud de départ i et un nœud d'arrivé j existe, donc :

$$M(i, j) = 1 \quad (2.18)$$

— Sinon, dans le cas où la branche n'existe pas :

$$M(i, j) = 0 \quad (2.19)$$

Le type du nœud i est défini selon le nombre d'éléments non nuls $N_{neqn}(i)$ (égal à 1) de

la ligne i de la matrice M :

- Si $N_{neqn}(i) = 0$, le nœud i est un nœud terminal ;
- Si $N_{neqn}(i) = 1$, le nœud i représente un nœud intermédiaire ;
- Si $N_{neqn}(i) > 1$, dans ce cas le nœud i est un nœud commun.

A l'issue de la procédure d'identification du type de jeux de barres, les trois vecteurs ci-dessous sont définis :

- Vecteur de jeux de barres terminaux ;
- Vecteur de jeux de barres intermédiaires ;
- Vecteur de jeux de barres communs.

2.3.2.2 Identification et formation des lignes

La procédure à suivre pour former les lignes du réseau est décrite selon le type de la ligne.

- **Ligne principale** : la ligne principale est constituée du premier nœud terminal et de tous les jeux de barres situés en aval de celui-ci et cela jusqu'au jeux de barres 1 qui est le nœud de référence.
- **Ligne latérale** : pour construire les lignes latérales, on procède comme suit :
 - Déterminer les jeux de barres de la ligne principale qui appartiennent au vecteur des jeux de barres communs. Ce qui nous donne le nombre de lignes latérales N_{ll} ;
 - Chacun de ces jeux de barres représente un nœud de départ d'une ligne latérale. Tous les jeux de barres situés entre ce nœud de départ et le prochain nœud terminal sont les jeux de barres de la ligne latérale. Ainsi, toutes les lignes latérales sont formées.
- **Ligne sous-latérale** : on détermine d'abord les jeux de barres communs qui appartiennent aux lignes latérales que nous appellerons jeux de barres commun latérale. Cela nous permettra d'avoir le nombre de lignes sous-latérales N_{lsl} . Ensuite, chaque ligne sous-latérale contient les jeux de barres compris entre le jeux de barres commun latérale et le prochain nœud terminal ;

— **Ligne mineure** : On définit les jeux de barres commun appartenant aux lignes sous-latérales. Le nombre de ces jeux de barres représente le nombre de lignes mineurs N_{lm} . Une ligne mineure est formée des jeux de barres compris entre le nœud commun sous-latérale et le nœud terminal qui suit.

2.3.2.3 Courants et puissances transitées dans des branches

— **Les branches de la ligne mineure** : le courant qui circulent dans la branche i d'une ligne latérale j ainsi que les puissances active et réactive qui y transitent sont exprimés par :

Pour les N_{lm} lignes mineur et $\forall 1 \leq j \leq N_{lm}$

$$\begin{cases} I_{i+1} & i = JBt_{lmj} \\ I_{i+1} + I_{Li+1} & JB2_{lmj} - 1 \leq i \leq JBt_{lmj} - 1 \end{cases} \quad (2.20)$$

$$P_i = \begin{cases} P_{Li+1} + R_i \frac{P_{Li+1}^2 + Q_{Li+1}^2}{V_{i+1}^2} & i = JBt_{lmj} \\ (P_{i+1} + P_{Li+1}) + R_i \frac{(P_{i+1} + P_{Li+1})^2 + (Q_{i+1} + Q_{Li+1})^2}{V_{i+1}^2} & JB2_{lmj} - 1 \leq i \leq JBt_{lmj} - 1 \end{cases} \quad (2.21)$$

$$Q_i = \begin{cases} Q_{Li+1} + X_i \frac{P_{Li+1}^2 + Q_{Li+1}^2}{V_{i+1}^2} & i = JBt_{lmj} \\ (Q_{i+1} + Q_{Li+1}) + X_i \frac{(P_{i+1} + P_{Li+1})^2 + (Q_{i+1} + Q_{Li+1})^2}{V_{i+1}^2} & JB2_{lmj} - 1 \leq i \leq JBt_{lmj} - 1 \end{cases} \quad (2.22)$$

Où

- $JB2_{lm}$ est le deuxième nœud de la ligne mineure j ;
- JBt_{lm} est le nœud terminale de la ligne mineure j .

Le courant qui circule dans la première branche de la ligne mineure j et les puissances qui y transitent (c'est à dire $i = JB2_{lmj} - 1$) sont posés égales à :

$$\begin{cases} I_i = I_{lmj} \\ P_i = P_{lmj} \\ Q_i = Q_{lmj} \end{cases} \quad 1 \leq j \leq N_m \quad (2.23)$$

— **Les branches de la ligne sous-latérale** : le courant qui circulent dans la branche

i d'une ligne sous-latérale j ainsi que les puissances active et réactive qui y transitent sont exprimés par :

Pour les N_{lsl} lignes sous-latérales et $\forall 1 \leq j \leq N_{lsl}$

$$I_i = \begin{cases} I_i & i = JBt_{lslj} \\ I_{i+1} + I_{Li+1} & JB2_{lslj} - 1 \leq i \leq JBt_{lslj} - 1, i \neq JBD_{lmk} - 1 \forall 1 \leq k \leq N_{lm} \\ I_{i+1} + I_{Li+1} + \sum I_{lmj} & JB2_{lslj} - 1 \leq i \leq JBt_{lslj} - 1, i = JBD_{lmk} - 1 \forall 1 \leq k \leq N_{lm} \end{cases} \quad (2.24)$$

Pour $i = JBt_{lslj}$:

$$\begin{cases} I_i = I_{Li+1} \\ P_i = P_{Li+1} + R_i \frac{P_{Li+1}^2 + Q_{Li+1}^2}{V_{i+1}^2} \\ Q_i = Q_{Li+1} + X_i \frac{P_{Li+1}^2 + Q_{Li+1}^2}{V_{i+1}^2} \end{cases} \quad (2.25)$$

Pour $JB2_{lslj} - 1 \leq i \leq JBt_{lslj} - 1, i \neq JBD_{lmk} - 1 \forall 1 \leq k \leq N_{lm}$:

$$\begin{cases} I_i = I_{i+1} + I_{Li+1} \\ P_i = (P_{i+1} + P_{Li+1}) + R_i \frac{(P_{i+1} + P_{Li+1})^2 + (Q_{i+1} + Q_{Li+1})^2}{V_{i+1}^2} \\ Q_i = (Q_{i+1} + Q_{Li+1}) + X_i \frac{(P_{i+1} + P_{Li+1})^2 + (Q_{i+1} + Q_{Li+1})^2}{V_{i+1}^2} \end{cases} \quad (2.26)$$

Pour $JB2_{lslj} - 1 \leq i \leq JBt_{lslj} - 1, i = JBD_{lmk} - 1 \forall 1 \leq k \leq N_{lm}$

$$\begin{cases} I_i = I_{i+1} + I_{Li+1} + \sum I_{lmj} \\ P_i = (P_{i+1} + P_{Li+1} + \sum P_{lmk}) + R_i \frac{(P_{i+1} + P_{Li+1} + \sum P_{lmk})^2 + (Q_{i+1} + Q_{Li+1} + \sum Q_{lmk})^2}{V_{i+1}^2} \\ Q_i = (Q_{i+1} + Q_{Li+1} + \sum Q_{lmk}) + X_i \frac{(P_{i+1} + P_{Li+1} + \sum P_{lmk})^2 + (Q_{i+1} + Q_{Li+1} + \sum Q_{lmk})^2}{V_{i+1}^2} \end{cases} \quad (2.27)$$

ou

- $JB2_{lsl}$ est le deuxième nœud de la ligne sous-latérale j ;
- JBt_{lsl} est le nœud terminale de la ligne mineure j .
- JBD_{lm} est le nœud de départ de la ligne mineure k .

Le courant qui circule dans la première branche de la ligne sous-latérale j et les puissances qui y transitent

$$\begin{cases} I_i = I_{lslj} \\ P_i = P_{lslj} \quad 1 \leq j \leq N_{lsl} \\ Q_i = Q_{lslj} \end{cases} \quad (2.28)$$

— **Les branches de la ligne latérale :**

Pour les N_{ll} lignes latérales et $\forall 1 \leq j \leq N_{ll}$ Pour $i = JBt_{llj}$:

$$\begin{cases} I_i = I_{Li+1} \\ P_i = P_{Li+1} + R_i \frac{P_{Li+1}^2 + Q_{Li+1}^2}{V_{i+1}^2} \\ Q_i = Q_{Li+1} + X_i \frac{P_{Li+1}^2 + Q_{Li+1}^2}{V_{i+1}^2} \end{cases} \quad (2.29)$$

Pour $JB2_{llj} - 1 \leq i \leq JBt_{llj} - 1$, $i \neq JBD_{lslk} - 1 \quad \forall 1 \leq k \leq N_{lsl}$:

$$\begin{cases} I_i = I_{i+1} + I_{Li+1} \\ P_i = (P_{i+1} + P_{Li+1}) + R_i \frac{(P_{i+1} + P_{Li+1})^2 + (Q_{i+1} + Q_{Li+1})^2}{V_{i+1}^2} \\ Q_i = (Q_{i+1} + Q_{Li+1}) + X_i \frac{(P_{i+1} + P_{Li+1})^2 + (Q_{i+1} + Q_{Li+1})^2}{V_{i+1}^2} \end{cases} \quad (2.30)$$

Pour $JB2_{llj} - 1 \leq i \leq JBt_{llj} - 1$, $i = JBD_{lslk} - 1 \quad \forall 1 \leq k \leq N_{lsl}$

$$\begin{cases} I_i = I_{i+1} + I_{Li+1} + \sum I_{lslk} \\ P_i = (P_{i+1} + P_{Li+1} + \sum P_{lmlk}) + R_i \frac{(P_{i+1} + P_{Li+1} + \sum P_{lslk})^2 + (Q_{i+1} + Q_{Li+1} + \sum Q_{lslk})^2}{V_{i+1}^2} \\ Q_i = (Q_{i+1} + Q_{Li+1} + \sum Q_{lmlk}) + X_i \frac{(P_{i+1} + P_{Li+1} + \sum P_{lslk})^2 + (Q_{i+1} + Q_{Li+1} + \sum Q_{lslk})^2}{V_{i+1}^2} \end{cases} \quad (2.31)$$

Où

- $JB2_{ll}$ est le deuxième nœud de la ligne latérale j ;
- JBt_{ll} est le nœud terminale de la ligne latérale j .
- JBD_{lsl} est le nœud de départ de la ligne sous-latérale k .

Le courant qui circule dans la première branche de la ligne latérale j et les puissances qui y transitent

$$\begin{cases} I_i = I_{lj} \\ P_i = P_{lj} \quad 1 \leq j \leq N_{lj} \\ Q_i = Q_{lj} \end{cases} \quad (2.32)$$

— Les branches de la ligne principale :

Pour $i = JBt_{lp}$:

$$\begin{cases} I_i = I_{Li+1} \\ P_i = P_{Li+1} + R_i \frac{P_{Li+1}^2 + Q_{Li+1}^2}{V_{i+1}^2} \\ Q_i = Q_{Li+1} + X_i \frac{P_{Li+1}^2 + Q_{Li+1}^2}{V_{i+1}^2} \end{cases} \quad (2.33)$$

Pour $1 \leq i \leq JBt_{lp} - 1$, $i \neq JBD_{lj} - 1 \quad \forall 1 \leq j \leq N_{lj}$:

$$\begin{cases} I_i = I_{i+1} + I_{Li+1} \\ P_i = (P_{i+1} + P_{Li+1}) + R_i \frac{(P_{i+1} + P_{Li+1})^2 + (Q_{i+1} + Q_{Li+1})^2}{V_{i+1}^2} \\ Q_i = (Q_{i+1} + Q_{Li+1}) + X_i \frac{(P_{i+1} + P_{Li+1})^2 + (Q_{i+1} + Q_{Li+1})^2}{V_{i+1}^2} \end{cases} \quad (2.34)$$

Pour $1 \leq i \leq JBt_{lp} - 1$, $i = JBD_{lj} - 1 \quad \forall 1 \leq j \leq N_{lj}$

$$\begin{cases} I_i = I_{i+1} + I_{Li+1} + \sum I_{lslk} \\ P_i = (P_{i+1} + P_{Li+1} + \sum P_{lmk}) + R_i \frac{(P_{i+1} + P_{Li+1} + \sum P_{lslk})^2 + (Q_{i+1} + Q_{Li+1} + \sum Q_{lslk})^2}{V_{i+1}^2} \\ Q_i = (Q_{i+1} + Q_{Li+1} + \sum Q_{lmk}) + X_i \frac{(P_{i+1} + P_{Li+1} + \sum P_{lslk})^2 + (Q_{i+1} + Q_{Li+1} + \sum Q_{lslk})^2}{V_{i+1}^2} \end{cases} \quad (2.35)$$

où :

- JBt_{lp} est le nœud terminale de la ligne principale.
- JBD_{lj} est le nœud de départ de la ligne latérale j .

2.3.3 Méthode directe de calcul d'écoulement de puissance

2.3.3.1 Principe de la méthode

Teng [20] a proposé un algorithme de résolution du problème d'écoulement de puissance en utilisant le principe de balayage avant et arrière connue sous le nom méthode directe du calcul d'écoulement de puissance (en anglais Direct load flow DLF).

L'algorithme est basé sur la construction de deux matrices dérivées :

- La matrice BIBC ;
- La matrice BCBV.

Pour illustrer cette méthode, nous avons utilisé le réseau de distribution simple, représenté sur la figure (2.2).

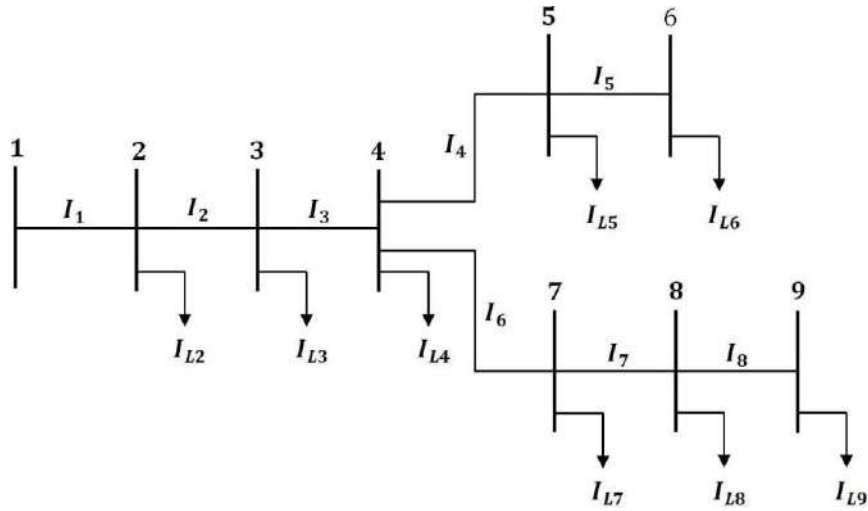


FIGURE 2.2 – Réseau de distribution simple.

Les courants de charges I_{Li} sont déterminés en utilisant l'équation (2.7). Les expressions des courants de branche sont déduites à partir de la loi de Kirchoff :

$$\begin{aligned}
 I_1 &= I_{L2} + I_{L3} + I_{L4} + I_{L5} + I_{L6} + I_{L7} + I_{L8} + I_{L9} \\
 I_2 &= I_{L3} + I_{L4} + I_{L5} + I_{L6} + I_{L7} + I_{L8} + I_{L9} \\
 I_3 &= I_{L4} + I_{L5} + I_{L6} + I_{L7} + I_{L8} + I_{L9} \\
 I_4 &= I_{L5} + I_{L6} + \\
 I_5 &= I_{L6} \\
 I_6 &= I_{L7} + I_{L8} + I_{L9} \\
 I_7 &= I_{L8} + I_{L9} \\
 I_8 &= I_{L9}
 \end{aligned}
 \tag{2.36}$$

La relation entre les courants de branche et les courant de charge peut être exprimée par :

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \\ I_7 \\ I_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{L2} \\ I_{L3} \\ I_{L4} \\ I_{L5} \\ I_{L6} \\ I_{L7} \\ I_{L8} \\ I_{L9} \end{bmatrix}
 \tag{2.37}$$

L'équation (2.37) sous une forme générale s'écrit :

$$[I] = [BIBC][IL] \quad (2.38)$$

où $[BIBC]$ est la matrice des courants de branches en fonction des courants de charge (en anglais Bus-injection to branche-current matrix). C'est une matrice triangulaire supérieure d'éléments 1 ou 0.

Les tensions aux jeux de barres du réseau peuvent s'exprimer en fonction des courants de branche comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_2 = V_1 - I_1 Z_1 \\ V_3 = V_2 - I_2 Z_2 = V_1 - I_1 Z_1 - I_2 Z_2 \\ V_4 = V_3 - I_3 Z_3 = V_1 - I_1 Z_1 - I_2 Z_2 - I_3 Z_3 \\ V_5 = V_4 - I_4 Z_4 = V_1 - I_1 Z_1 - I_2 Z_2 - I_3 Z_3 - I_4 Z_4 \\ V_6 = V_5 - I_5 Z_5 = V_1 - I_1 Z_1 - I_2 Z_2 - I_3 Z_3 - I_4 Z_4 - I_5 Z_5 \\ V_7 = V_6 - I_6 Z_6 = V_1 - I_1 Z_1 - I_2 Z_2 - I_3 Z_3 - I_6 Z_6 \\ V_8 = V_7 - I_7 Z_7 = V_1 - I_1 Z_1 - I_2 Z_2 - I_3 Z_3 - I_6 Z_6 - I_7 Z_7 \\ V_9 = V_8 - I_8 Z_8 = V_1 - I_1 Z_1 - I_2 Z_2 - I_3 Z_3 - I_6 Z_6 - I_7 Z_7 - I_8 Z_8 \end{array} \right. \quad (2.39)$$

où V_i et Z_i sont respectivement la tension au nœud i et l'impédance de la branche i située entre les jeux de barres i et $i + 1$.

Les tensions des jeux de barres sont écrites en fonction de la tension du poste source V_1 , des courants de branche et des paramètres des lignes :

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_1 \\ V_1 \\ V_1 \\ V_1 \\ V_1 \\ V_1 \\ V_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \\ V_7 \\ V_8 \\ V_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_1 & Z_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_1 & Z_2 & Z_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_1 & Z_2 & Z_3 & Z_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_1 & Z_2 & Z_3 & Z_4 & Z_5 & 0 & 0 & 0 \\ Z_1 & Z_2 & Z_3 & Z_4 & Z_5 & Z_6 & 0 & 0 \\ Z_1 & Z_2 & Z_3 & Z_4 & Z_5 & Z_6 & Z_7 & 0 \\ Z_1 & Z_2 & Z_3 & Z_4 & Z_5 & Z_6 & Z_7 & Z_8 \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

Cette équation sous sa forme générale donne :

$$[\Delta V] = [BCBV][I] \quad (2.41)$$

où $[BCBV]$ est la matrice des tensions des jeux de barres en fonction des courants de branche (en anglais branch-current to bus voltage matrix).

L'équation (2.41) devient :

$$[\Delta V] = [BCBV][BIBC][IL] \quad (2.42)$$

$$[\Delta V] = [DLF][IL] \quad (2.43)$$

A chaque itération k , pour calculer les nouvelles tensions des jeux de barres, on procède

comme suit :

$$I_{Li}^k = \left(\frac{P_i + jQ_i}{V_i^k} \right) \quad (2.44)$$

$$[\Delta V^{k+1}] = [DLF][I_L^K] \quad (2.45)$$

$$[V^{k+1}] = [V_1] + [\Delta V^{k+1}] \quad (2.46)$$

2.3.3.2 Construction des matrices BIBC et BCBV

On considère un réseau de distribution de m branches et de n jeux de barres.

La matrices dérivée BIBC est dans ce cas de dimensions $m(n - 1)$. Pour construire cette matrice, on procède comme suit :

- Pour la première branche $k = 1$ située entre les jeux de barres 1 et 2, tous les éléments de la première colonne sont nuls sauf le premier élément (élément de la première ligne et de la première colonne) qui est égal à 1.
- Pour les autres branches $k = 2, 3, \dots, m$, si la branche k est située entre le nœud i et le nœud j , copier la colonne $i - 1$ de la matrice BIBC à la la colonne $j - 1$. L'élément de de ligne k et de colonne j est remplacé par 1.

Les étapes à suivre pour construire la matrice BCBV de dimension $(n - 1)m$ sont :

- Pour la première branche $k = 1$, tous les éléments de la première ligne de la matrice BCBV sont égaux à 0 sauf le premier élément qui est égal à l'impédance de la la premièrebranche Z_1 ;
- Pour la branche k , avec $k = 2, 3, \dots, m$, située entre le nœud i et j copier la ligne $i - 1$ de la matrice BCBV à la ligne $j - 1$. Ensuite, l'élément situé à la ligne k et colonne $j - 1$ est pris égal à 1.

2.3.3.3 Pertes de puissance

Les pertes actives et réactive de puissance dans la branche k sont données par :

$$P_{Lossk} = |I_k|^2 R_k \quad (2.47)$$

$$Q_{Lossk} = |I_k|^2 X_k \quad (2.48)$$

Où

- P_{Lossk} est les pertes actives dans la branche k ;

- Q_{Lossk} est les pertes réactives dans la branche k ;
- $|I_k|$ est l'amplitude du courant circulant dans la branche k ;
- R_k est la résistance de la branche k ;
- X_k est la réactance de la branche k .

Les pertes actives et réactives totales dans le réseau est la somme des pertes dans chaquebranche du réseau.

$$P_{Loss} = \sum_{k=1}^{n_{br}} P_{Lossk} \tag{2.49}$$

$$Q_{Loss} = \sum_{k=1}^{n_{br}} Q_{Lossk} \tag{2.50}$$

2.4 Algorithmes de l'écoulement de puissance

2.4.1 Algorithme du balayage avant et arrière

L'algorithme du backward and forward sweep appliqué pour le calcul de l'écoulement de puissance d'un réseau de distribution est décrit ci-dessous ;

- **Étape 1** : Lire les données du réseau de distribution testé et l'erreur de convergence ϵ_d et initialiser les tension des bus à 1 pu.
- **Étape 2** : Identifier le type des bus et des lignes par la méthode matricielle.
- **Étape 3** : Calculer les courants de la dernière à la première branche, les puissances transitées dans les branches ainsi que les pertes actives et réactives (backward sweep).
- **Étape 4** : Calculer les nouvelles tensions du premier jusqu'au dernier nœud (forward sweep).
- **Étape 5** : Calcul l'écart de tension maximal :

$$\epsilon_{max} = \max |V_i^{i+1} - V_i^{i+1}|$$

- **Étape 6** : Si L'écart de tension ϵ_{max} est inférieur ou égal à l'erreur de convergence ϵ_d , afficher les nouvelles tensions et phases, ainsi que les pertes actives et réactives. Sinon, actualiser les valeurs des tensions de bus et retourner à l'étape 3.

2.4.2 Algorithme de la méthode directe d'écoulement de puissance

- **Étape 1** : Lire les données du réseau de distribution testé et l'erreur de convergence ε_d et initialiser les tension des bus à 1 pu.
- **Étape 2** : Construire les deux matrices dérivées BIBC et BCBV.
- **Étape 3** : Calculer les courants de charge en utilisant l'équation (2.44).
- **Étape 4** : Calculer les courants de branche en utilisant l'équation (2.38).
- **Étape 5** : Calcul les nouvelles tensions de l'ensemble des jeux de barres en utilisant les équations(2.45) et (2.46).

$$\varepsilon_{max} = \max |V_i^{i+1} - V_i^{i+1}|$$

Étape 6 : Si L'écart de tension ε_{max} est inférieur ou égal à l'erreur de convergence ε_d :

- Afficher les nouvelles tensions et phases des jeux de barres du réseau ;
- Calculer les pertes actives et réactives dans les branches en utilisant respectivement les équations (2.47) et (2.48) et les afficher.

Sinon, actualiser les valeurs des tensions de bus et retourner à l'étape 3.

2.5 Méthode d'optimisation

2.5.1 Formulation du problème

Trouver le dimensionnement et le placement optimaux du générateur distribué est un problème d'optimisation avec fonction objectif non linéaire qui a des contraintes d'égalité et d'inégalité. La proposition la fonction objective comprend : la réduction des pertes de puissance réelles (actives), l'amélioration de la stabilité de la tension de le système et aider à équilibrer le courant du système dans un réseau de distribution radial donné

2.5.2 Fonction objectif

L'objectif principal de l'optimisation de la puissance active est d'optimiser une fonction objective bien définie tous en respectons les limites de fonction de dispositifs de contrôle, on peut citer la minimisation des pertes actives, la minimisation de cout et la maximisation de la puissance active pour la production de l'énergie électrique au profit de la demande du consommateur.

2.5.3 Contraintes d'égalité :

Ces contraintes sont traduites par les lois physiques gouvernant le système électrique. En régime stationnaire, la puissance générée doit satisfaire la demande de charge plus les pertes de transmission. Elles sont représentées par les équations non-linéaires de l'écoulement de puissance, et qui sont formulées par :

$$P_G + \sum_{i=1}^{N_{DG}} P_{DG_i} = \sum_{i=2}^{N_L} P_{L_i} + \sum_{i=1}^{N_L} P_{lous_i} \quad (2.51)$$

$$Q_G + \sum_{i=1}^{N_{DG}} Q_{DG_i} = \sum_{i=2}^{N_L} Q_{L_i} + \sum_{i=1}^{N_L} Q_{lous_i} \quad (2.52)$$

Où :

N_s : est l'ensemble des jeux de barres du système (excepté le JB de référence),

N_t : est l'ensemble des jeux de barres de charge.

2.5.4 Contraintes d'inégalité :

Les contraintes d'inégalités habituelles peuvent inclure les limites sur les dispositifs physiques dans le système électrique tels que, les générateurs ainsi que les limites créées pour assurer la sécurité de système.

➤ Les limites de puissance du DG.

$$P_{DG_i}^{min} \leq P_{DG_i} \leq P_{DG_i}^{max}, \quad \forall i \in [1, N_{DG}]$$

$P_{DG_i}^{min}$: est la limite minimale de puissance active générée par le DG au niveau du JB i ,

$P_{DG_i}^{max}$: est la limite maximale de puissance active générée par le DG au niveau du JB i ,

N_{DG_i} : est l'ensemble des indices de tous les jeux de barres générateurs.

➤ Pour garder la qualité de service électrique et la sécurité du système, il faut limiter les violations sur les contraintes de tension qui doivent être dans leurs limites admissibles.

$$V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max}, \quad \forall i \in N$$

Où :

V_i^{min} : est la limite minimale du module de tension au niveau du JB i ,

V_i^{max} : est la limite maximale du module de tension au niveau du JB i .

N : est l'ensemble des JB du système.

2.6 Algorithme génétique

John Holland, ses collègues et ses étudiants ont développé à l'université de Michigan les Algorithmes Génétiques (AGs), métaphores biologiques inspirées des mécanismes de l'évolution darwinienne (sélection naturelle) et de la génétique. Ces métaphores prennent la forme d'algorithmes de recherche appelés "algorithmes génétiques".

Ces algorithmes font partie de la classe des algorithmes dits stochastiques. En effet une grande partie de leur fonctionnement est basée sur le hasard. Bien qu'utilisant le hasard, les AGs ne sont pas purement aléatoires. Ils exploitent efficacement l'information obtenue précédemment pour spéculer sur la position de nouveaux points à explorer, avec l'espoir d'améliorer la performance.

Les algorithmes génétiques permettent à une population de solutions de converger vers les solutions optimales. Pour ce faire, ils vont utiliser un mécanisme de sélection des individus de la population (les solutions potentielles). Les individus sélectionnés vont être croisés entre eux (exploitation), et certains vont être mutés (exploration). Ces mécanismes d'exploitation et d'exploration vont permettre de converger vers les bonnes solutions en évitant, autant que faire se peut, les optima locaux.

2.6.1 Principes des algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques (AG) introduits par John Holland (1975) et ses étudiants à l'université de Michigan sont fondés sur la théorie de la survie des espèces de Charles Darwin. Comme dans la nature où les êtres se reproduisent, dans le modèle des algorithmes génétiques, les spécimens se reproduiront aussi; en particulier ceux jugés les plus forts se reproduiront à un rythme plus rapide. Des opérateurs génétiques seront appliqués sur des candidats en espérant engendrer ainsi de nouveaux candidats plus performants.

En biologie, on manipule des gènes et des chromosomes; il en va de même dans le cas des AG. Les problèmes et les solutions seront encodés. L'encodage prend souvent la forme d'une chaîne de bits. Ces chaînes de bits sont comparables aux chromosomes des systèmes biologiques, tandis que les bits ou caractères qui composent ces chaînes sont comparables aux gènes. L'ensemble de ces chaînes forme une population, alors qu'en biologie on parle de génotype.

Dans la recherche de solutions à un problème, les AG utilisent une grande part de hasard. En effet, les candidats à la reproduction sont choisis de façon probabiliste; les chromosomes de la population sont croisés de façon aléatoire dans la progéniture; et les gènes d'un chromosome sont mutés selon une certaine probabilité. En appliquant ainsi

de génération en génération les opérateurs génétiques sur des candidats jugés performants, on cherche à obtenir une progéniture plus performante que celle de la génération précédente, ce qui permet de s'approcher ainsi d'une solution optimale.

2.6.2 Caractéristiques des algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques se caractérisent par quatre aspects : le codage des paramètres du problème, l'espace de recherche, la fonction d'évaluation servant à sélectionner les chromosomes parents, et le hasard qui joue un rôle important dans l'évolution des chromosomes de génération en génération. Nous allons passer en revue ces différents aspects.

2.6.2.1 Le codage et l'espace de recherche des solutions

La première particularité des AG réside dans le fait qu'ils n'agissent pas directement sur l'espace des solutions : les solutions sont codées sous la forme de chaînes de longueur finie à partir d'un alphabet fini (Pirlot, 1996). C'est grâce aux codes et aux similitudes de ces codes que l'on arrive à trouver une solution satisfaisante à un problème et à comprendre pourquoi cette solution fonctionne. De génération en génération, les chromosomes qui forment la population ont une valeur d'aptitude de plus en plus élevée, et ont des gènes de même valeur aux mêmes positions dans la chaîne.

La plupart des méthodes d'optimisation effectuent une recherche point à point. Les règles de transition d'un point à un autre sont souvent déterministes et la solution trouvée est souvent un optimum local au lieu d'être un optimum global. Les AG, quant à eux, effectuent la recherche à partir d'une population de chaînes générées aléatoirement. Dans cette population, on retrouvera à la fois des candidats très performants et d'autres qui le sont moins. Le parallélisme induit est un avantage évident car l'approche de la recherche à partir d'une population peut être perçue comme une recherche locale dans un sens généralisé. Ce n'est pas le voisinage d'une seule solution qui est explorée, mais le voisinage de toute la population; ce qui ne devrait pas être assimilé à une simple union des voisinages individuels (Pirlot, 1996). Ainsi donc, une population initiale

diversifiée offre plus de chances de bien cerner la recherche et de mieux se rapprocher de la solution optimale, sinon on risque d'obtenir des espèces dégénérées et la probabilité de converger vers un minimum global est ainsi fortement réduite.

2.6.2.2 La fonction d'évaluation et le hasard

Contrairement à bon nombre de méthodes qui requièrent beaucoup d'informations pour pouvoir fonctionner efficacement, les AG nécessitent peu d'informations : ils fonctionnent essentiellement de manière aveugle. Pour effectuer une recherche de solutions meilleures, ils n'ont besoin que des valeurs des fonctions objectives associées aux chaînes individuelles. Ces valeurs sont déterminées par une fonction objectif et serviront au processus de sélection des candidats aptes à la reproduction et au processus de survie des espèces.

Par ailleurs, les AG utilisent des règles de transition probabilistes plutôt que déterministes pour guider leur recherche. Le choix des chromosomes à perturber est réalisé de façon probabiliste. Dans le processus de croisement, le lieu de croisement est choisi aléatoirement à l'intérieur du chromosome. De même, le gène devant subir une mutation à l'intérieur d'un chromosome est choisi selon une certaine probabilité. Le hasard occupe donc une place importante dans le fonctionnement des AG.

2.6.3 Organigramme de l'algorithme génétique

Le but primordial de l'algorithme génétique est de trouver une solution pour la fonction à minimiser dite fonction objectif, il s'agit donc d'un algorithme itératif de recherche global dont le but est de minimiser l'erreur quadratique moyenne entre les valeurs expérimentales et calculées.

Pour atteindre cet objectif l'algorithme travaille parallèlement sur une population de chromosomes, distribués dans le domaine de l'espace de recherche.

Nous commençons le processus de l'ajustage de précision par l'algorithme génétique en définissant un chromosome comme un choix de valeurs de paramètres à optimiser. Le chromosome est défini par le vecteur de paramètres donnés par $[I_{ph}, I_s, R_s, R_{sh}, n]$.

Pour commencer l'algorithme génétique, nous définissons une population initiale des chromosomes appelée IPOP définie par la matrice donnée par :

$$IPOP = (h_i - l_o). \text{rando}[N_{ipop}, N_{par}] + l_o$$

N_{ipop} : Nombre des chromosomes à la population Initiale;

N_{par} : Nombre des paramètres à estimer ;

random [N_{ipop} , N_{par}] : Une fonction qui produit une matrice

$N_{\text{ipop}} * N_{\text{par}}$ à partir de nombres aléatoires uniformes entre zéro(0) et un (1) ;

h_i : La plus grande valeur de chacun des paramètres;

l_o : La plus petite valeur de chacun des paramètres.

L'algorithme démarre alors avec une population initiale cherchant la combinaison optimale des paramètres correspondant à la meilleure solution. A chaque génération, une nouvelle population est créée avec le même nombre de chromosomes. Au fur et à mesure des générations, les chromosomes vont tendre en général vers l'optimum de la fonction fitness (fonction à minimiser).

L'organigramme de notre approche algorithmique proposée pour trouver les paramètres optimaux convenables à ceux de l'expérimental est présenté par la figure

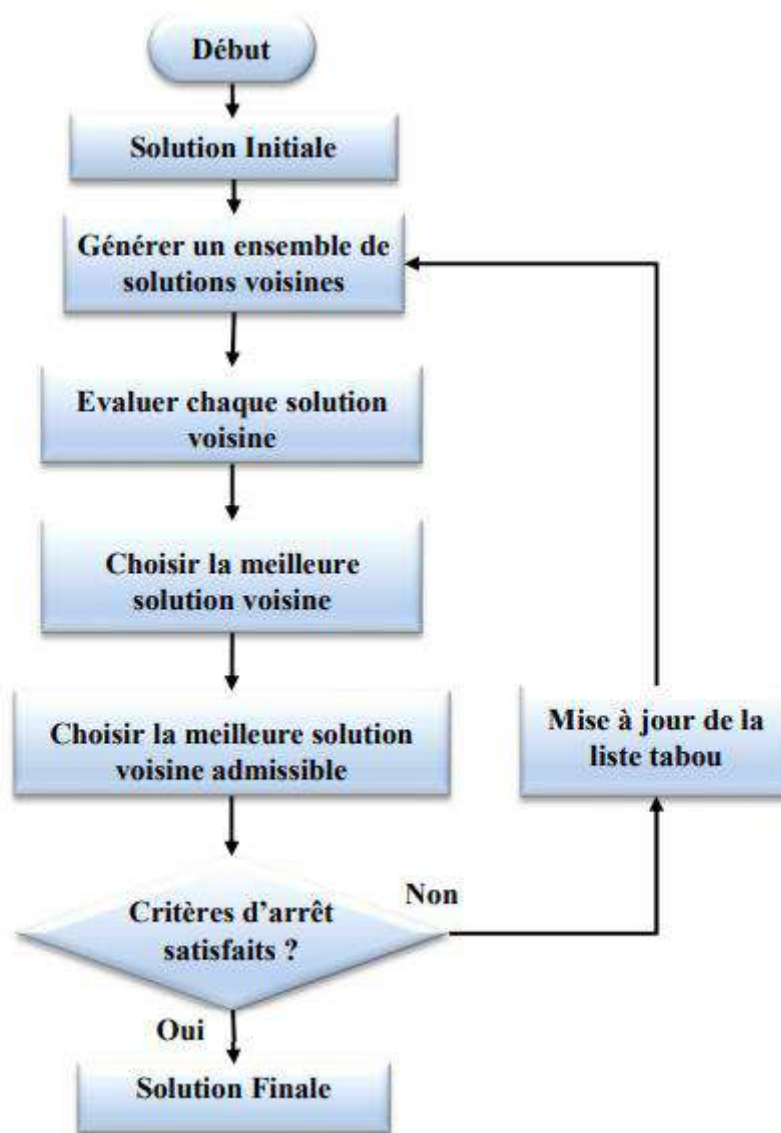


Figure 2.3 : L'organigramme de l'algorithme génétique.

2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons appliqué deux méthodes pour résoudre le problème d'écoulement de puissance dans le réseau de distribution. La première dite balayage arrière et avant qui consiste à déterminer les courants et les puissances transitées dans les lignes pendant le balayage arrière. Les tensions des jeux de barres sont calculées en fonction de la tension du jeu de barres de référence pendant la phase de balayage avant. La deuxième méthode utilisée dite directe présente d'excellentes caractéristiques de convergence. Elle se base sur la construction de deux matrices, la première pour le calcul des courants des branches obtenue par l'utilisation des lois de Kirchhoff et la deuxième pour le calcul des tensions aux jeux de barres à partir des courants de branches. Enfin, nous avons décrit le problème d'optimisation d'écoulement de puissance ainsi que le principe de l'algorithme génétique utilisé pour résoudre notre problème d'optimisation.

Chapitre 3

Résultats de simulations et discussions

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de simulation de l'écoulement de puissance dans un réseau de distribution test IEEE à 33 jeux de barres obtenus par les deux méthodes d'écoulement décrites au chapitre précédent. En effet, le profil de tension de l'ensemble des jeux de barres ainsi que les pertes de puissance actives et réactives dans toutes les branches du réseau seront présentés et discutés. La méthode d'algorithme sera ensuite appliquée pour retrouver l'emplacement et la taille optimale d'une production décentralisée de type 1.

3.2 Analyse de l'écoulement de puissance

L'analyse de l'écoulement de puissance est effectuée sur un réseau de distribution standard IEEE à 33 jeux de barres [20]. Les caractéristiques du réseau illustré sur la figure (3.1) sont les suivantes :

- ❖ Nombre de jeux de barres =33 ;
- ❖ Nombre de branches =32 ;
- ❖ Jeu de barres de référence N° =1 ;
- ❖ Tension de base =12,66kV ;
- ❖ Puissance de base = 100MVA .

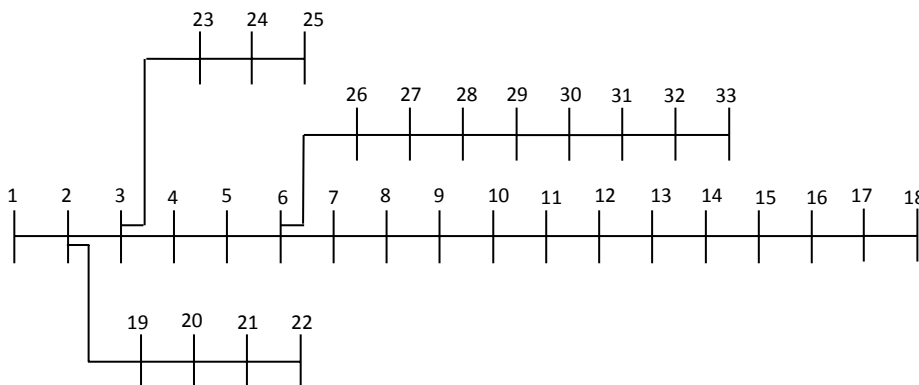


Figure 3.1 : Représentation simplifiée du réseau de distribution IEEE 33 jeux de barres

3.3 Résultats de l'écoulement de puissance par la méthode avant et arrière

Le tableau (3.1) représente le type de chaque jeu de barres et de chaque ligne constituant le réseau de distribution IEEE 33-bus.

Tableau 3.1 : Identification de la topologie du réseau de distribution IEEE 33-bus

JB de référence	1
JB terminaux	18, 22, 25 ,33
JB intermédiaires	4,5,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,19,20,21,23,24,26,27,28,29,30,31,32
JB communs	2 , 3 , 6
Ligne principale	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18
Lignes latérales	2, 19, 20, 21,22
	3, 23, 24,25
	6, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32,33

Tableau 3.2 : Solution de l'écoulement de puissances du réseau de distribution IEEE33-bus

jeux de barre	Tension (p.u)	Phase (rad)	jeux de barre	Tension (p.u)	Phase (rad)
1	1	0	18	0,91309	-0,00864
2	0,99703	0,00025	19	0,99650	0,00006
3	0,98293	0,00167	20	0,99292	-0,00110
4	0,97545	0,00282	21	0,99222	-0,00144
5	0,96806	0,00398	22	0,99158	-0,00179
6	0,94965	0,00233	23	0,97935	0,00113
7	0,94617	-0,00168	24	0,97268	-0,00041
8	0,94133	-0,00105	25	0,96935	-0,00117
9	0,93506	-0,00232	26	0,94773	0,00302
10	0,92924	-0,00342	27	0,94516	0,00400
11	0,92838	-0,00329	28	0,93372	0,00545
12	0,92688	-0,00309	29	0,92550	0,00681
13	0,92077	-0,00468	30	0,92195	0,00864
14	0,91850	-0,00606	31	0,91779	0,00717
15	0,91709	-0,00671	32	0,91687	0,00677
16	0,91572	-0,00712	33	0,91659	0,00663
17	0,91370	-0,00847			

Le tableau (3.2) présente les modules et les angles des tensions au niveau de chaque jeu de barres.

La valeur de tension la plus basse est 0.9131 pu qui se trouve au niveau du jeu de barres 18 (figure 3.2).

Les pertes de puissance active et réactive dans chaque branche du réseau IEEE à 33 jeux de barres sont présentées dans Le tableau (3.3). Nous remarquons que les plus grandes pertes de puissance active sont obtenues dans la branche 2 de valeur de 51,78865 kW, alors que la plus grande valeur des pertes réactives 33,01580483 kVAr se trouve au niveau de la branche numéro 5. Cela est dû aux valeurs des courants traversant ces branches ainsi qu'aux caractéristiques électriques, résistance et réactance relatives à chaque branche du réseau. Les pertes totales active et réactive du réseau sont respectivement 202.67 kW et 135.14 kVAr représentant 5.42 % et 5.85 % de la puissance demandée.

Tableau 3.3 : Pertes de puissances active et réactive dans les branches du réseau IEEE 33-bus

Branche	Pertes active (kW)	Pertes réactive (kVAr)	Branche	Pertes active (kW)	Pertes réactive (kVAr)
1	12,23988	6,23941	17	0,05313	0,04166
2	51,78865	26,37754	18	0,16095	0,15359
3	19,89919	10,13445	19	0,83217	0,74985
4	18,69769	9,52301	20	0,10075	0,11771
5	38,24603	33,01580	21	0,04363	0,05769
6	1,91439	6,32814	22	3,18158	2,17394
7	4,83763	1,59871	23	5,14360	4,06161
8	4,18023	3,00327	24	1,28743	1,00738
9	3,56064	2,52383	25	2,60071	1,32469
10	0,55365	0,18305	26	3,32875	1,69482
11	0,88106	0,29133	27	11,30002	9,96301
12	2,66602	2,09758	28	7,83276	6,82372
13	0,72910	0,95970	29	3,89537	1,98414
14	0,35694	0,31768	30	1,59351	1,57487
15	0,28144	0,20552	31	0,21317	0,24846
16	0,25161	0,33593	32	0,01316	0,02047
Pertes de puissance active				202.67	
Pertes de puissance réactive				135.14	

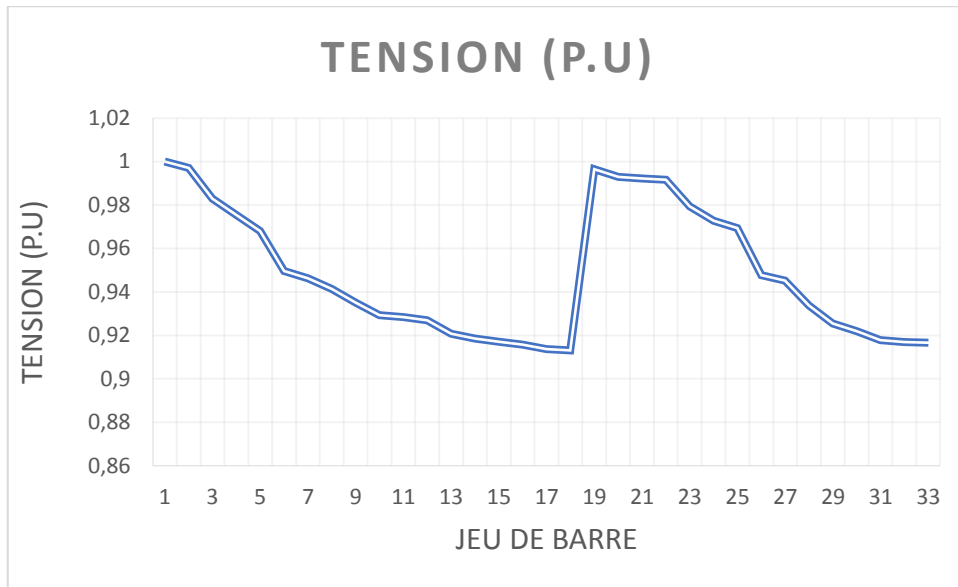
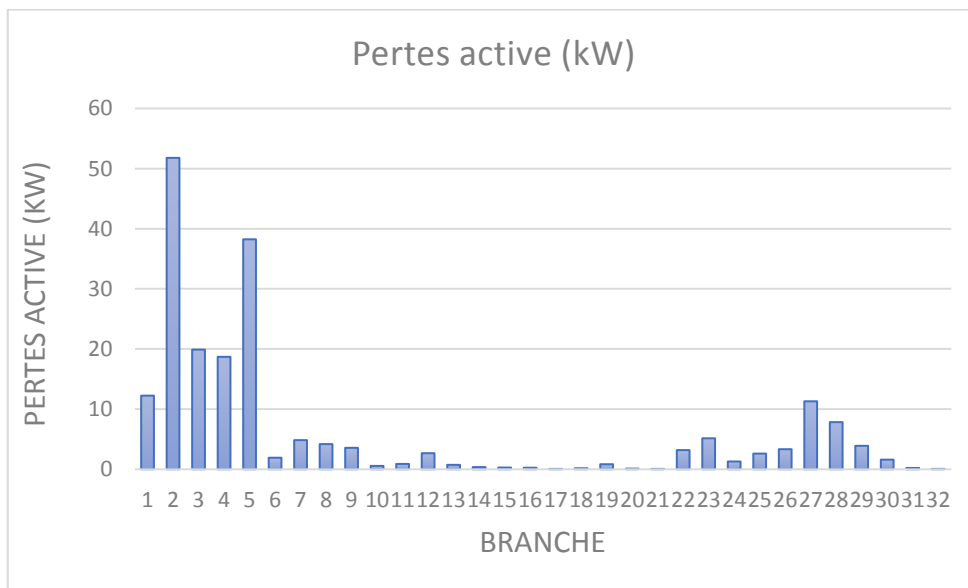
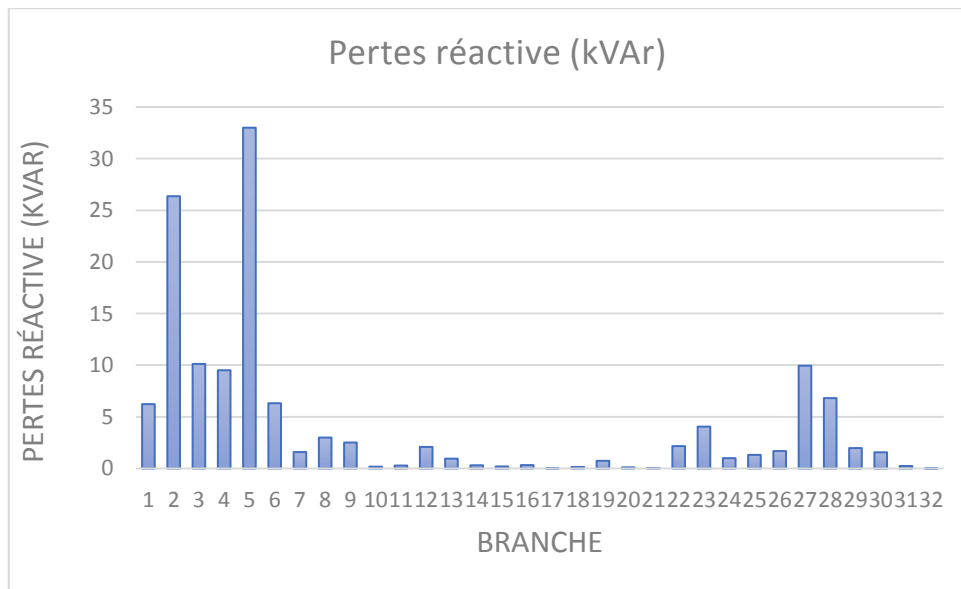


Figure 3.2 : Tension à chaque jeu de barres du réseau de distribution IEEE 33-bus



a/ Pertes de puissance active



b/ Pertes de puissance réactive

Figure 3.3 : Pertes de puissances active et réactive dans les branches du réseau IEEE33-bus

3.4 Analyse de l'écoulement de puissance par la méthode directe

Les résultats de l'écoulement de puissance obtenus par la méthode directe sont similaires à ceux obtenue par la première méthode. L'avantage de la méthode directe réside dans la simplicité de son algorithme. Le profil de tension ainsi que les pertes de puissance active et réactive sont présentés dans les figures ci-dessous.

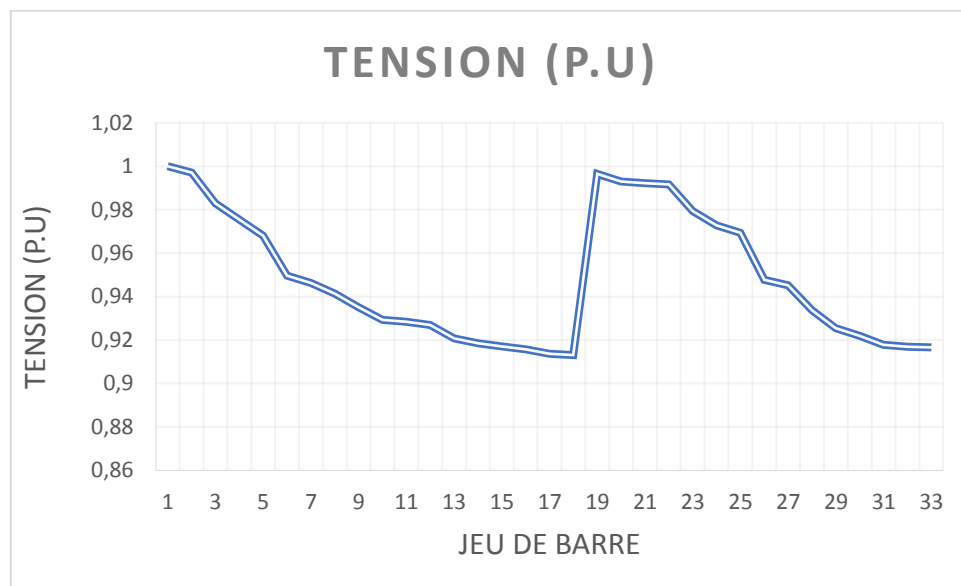
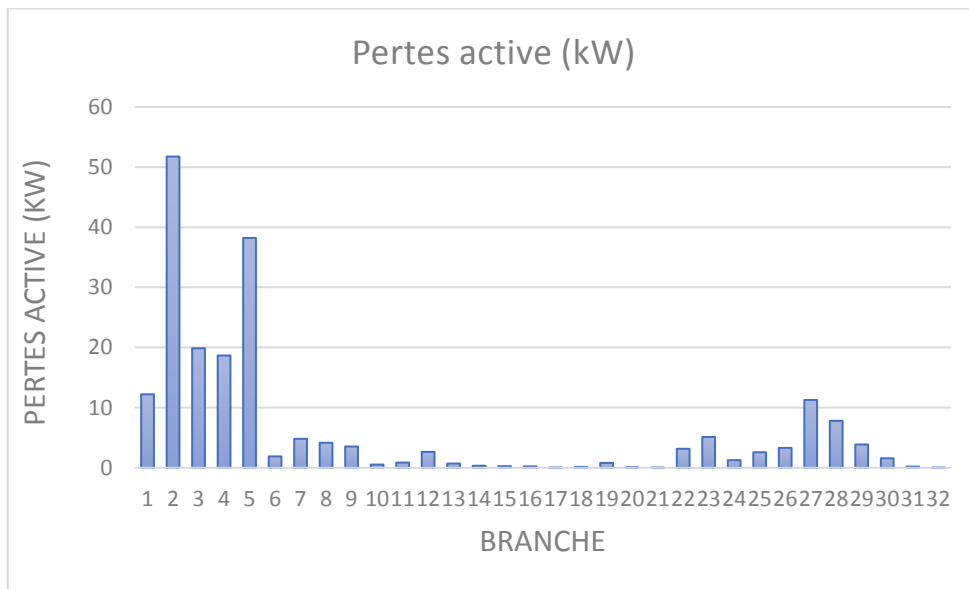
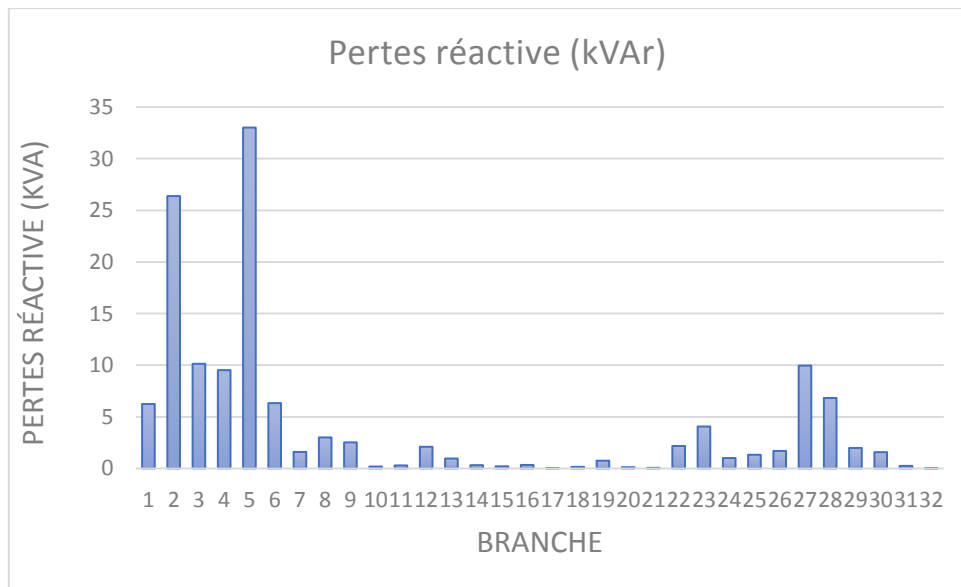


Figure 3.4 : Tension à chaque jeu de barres du réseau de distribution IEEE 33-bus



a/ Pertes de puissance active



b/ Pertes de puissance réactive

Figure 3.5 : Pertes de puissances active et réactive dans les branches du réseau IEEE33-bus

3.5 Optimisation de l'emplacement et de la taille d'une production décentralisée.

Afin de réduire les pertes actives dans le réseau de distribution, nous procédons à l'intégration d'une production décentralisée de type 1. Le problème d'optimisation à résoudre consiste à déterminer l'emplacement optimal de la production décentralisée ainsi que sa puissance active dans l'objectif est de minimiser les pertes actives dans le réseau étudié en utilisant la méthode d'algorithme génétique. La figure 3.6 représente la caractéristique de

convergence de la méthode d'algorithme génétique. Deux condition de convergence de l'algorithme est considéré à savoir le nombre d'itération maximale ainsi que l'écart entre la valeur moyenne des pertes de l'ensemble de la population et la valeur minimale des pertes actives enregistrées à chaque itération. L'intégration d'une production décentralisée au niveau du jeu de barres 6 d'une puissance de 2,5905 MW a permis de réduire les pertes actives, elles sont passées de 202,67 kW avant intégration à 111,032 kW après l'intégration du DG, c'est-à-dire une diminution de l'ordre de 45,22%.

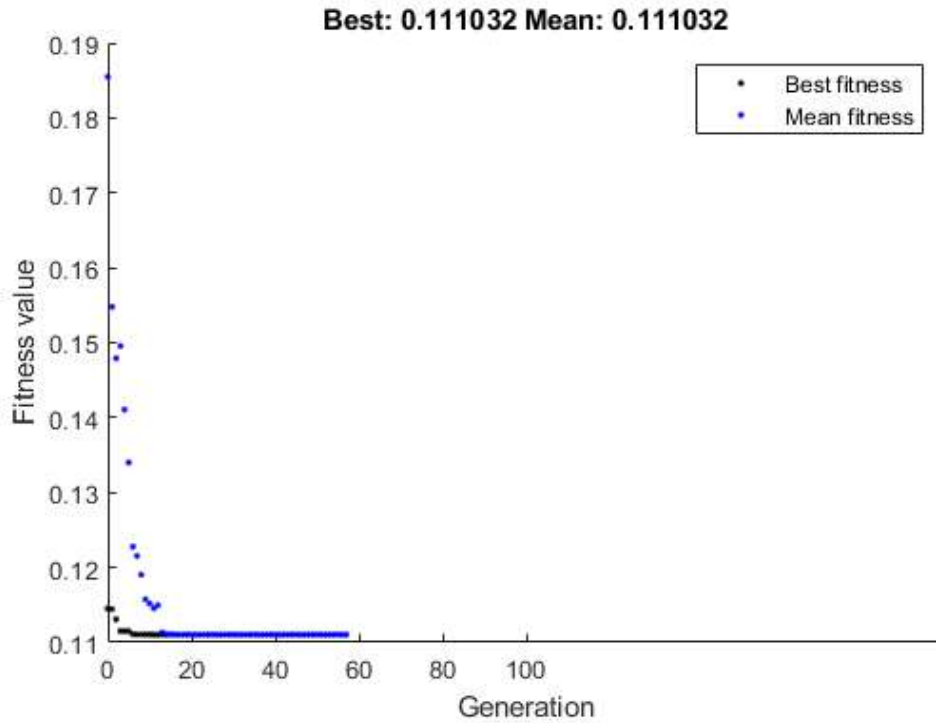


Figure 3.6 Courbe de convergence de méthode GA

La figure représente les valeurs des pertes réactives dans chaque ligne avant et après intégration de DG dans le bus du réseau électrique 33, où l'on constate une diminution des pertes réactives dans le réseau électrique lignes.

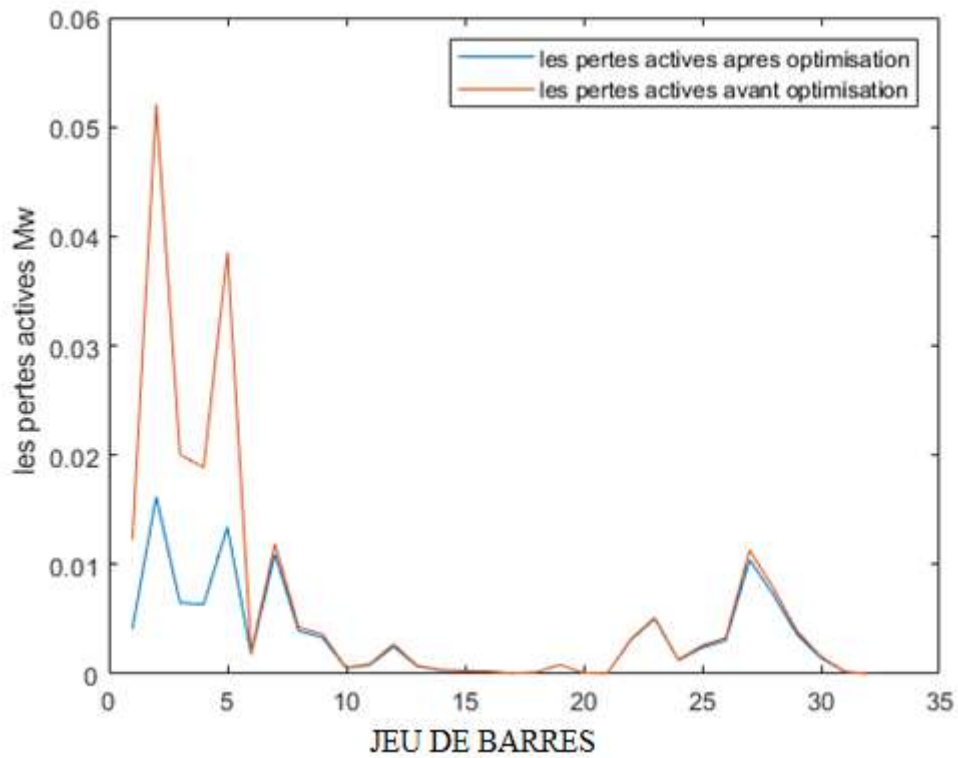


Figure 3.7 Les pertes actives avant et après intégration de GED

La figure 3.8 représente les valeurs de la tension aux jeux de barres avant et après intégration de DG dans le bus du réseau électrique 33. Nous constatons une amélioration du profil de tension de l'ensemble des jeux de barres du réseau.

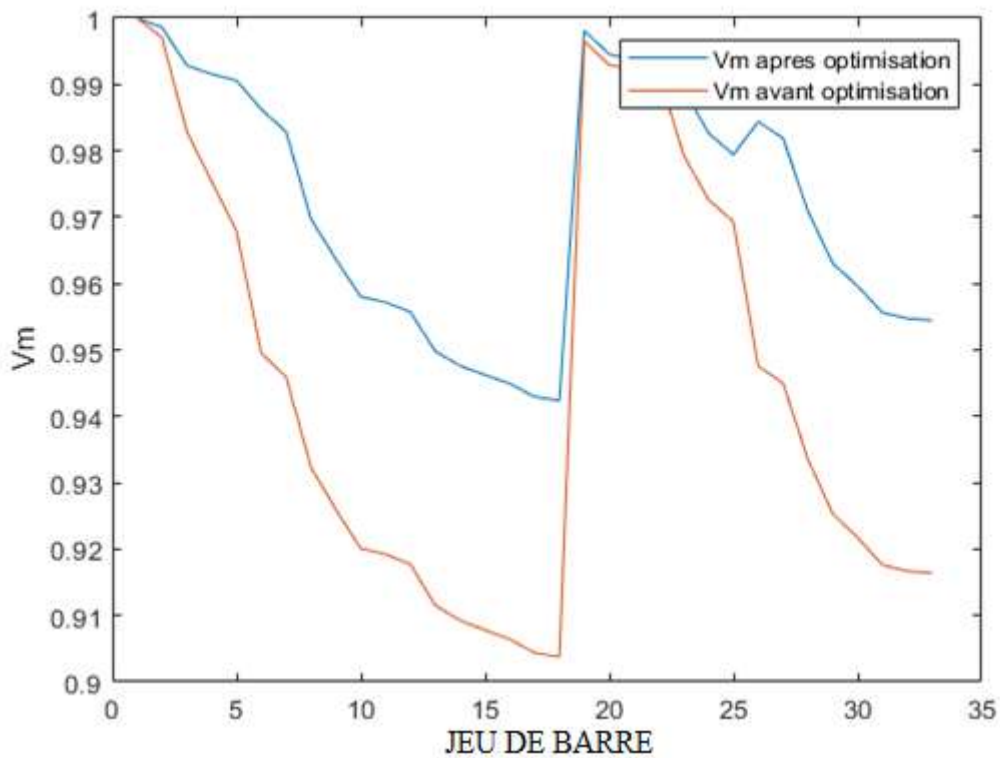


Figure 3.8 Profile de tension avant et après intégration de GED

3.6 Conclusion

Pour réduire les pertes actives dans un réseau de distribution, nous avons intégré une seule production décentralisée de type photovoltaïque. L'emplacement et la taille du DG permettant de minimiser les pertes actives sont déterminés par l'algorithme génétique. Pour un réseau test IEEE à 33 jeux de barres, nous avons remarqué que l'insertion d'un DG d'une puissance active de 2,5905 MW au niveau du jeu de barres 6 nous a permis de réduire l'erreur de 45,2%. Les pertes actives sont passées de 202,67 kW sans DG à 111,032 kW avec DG. L'intégration optimale du DG a permis aussi d'améliorer le profil de tension des jeux de barres du réseau.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail réalisé dans ce mémoire consiste à minimiser les pertes actives dans un réseau de distribution par l'intégration optimale d'une seule production décentralisée (DG) de type photovoltaïque. En effet, nous avons résolu un problème d'optimisation par l'algorithme génétique, dont la fonction objectif est la minimisation des pertes actives et les variables de contrôle sont la position et la taille du DG. La solution de notre problème d'optimisation doit aussi satisfaire quelques contraintes d'égalité et d'inégalité afin d'assurer un fonctionnement normal du réseau. Les pertes actives totales dans le réseau sont déduites à partir du calcul de l'écoulement de puissance qui représente une étape cruciale dans toute analyse de fonctionnement d'un réseau. Deux méthodes de calcul d'écoulement de puissance ont été appliquées. La première est basée sur un balayage avant et arrière, dont le courant circulant dans les lignes est d'abord calculé lors du balayage arrière, ensuite la tension de l'ensemble des jeux de barres est calculée à partir de la tension du jeu de barres source pendant le balayage arrière. La deuxième technique dite directe est basée sur la construction de deux matrices BIBC et BCBV selon la topologie et les données du réseau étudié. Un réseau standard IEEE à 33 jeux de barres est utilisé pour valider les méthodes considérées. D'après les résultats de simulation, nous concluons ce qui suit :

- Les deux méthodes d'écoulement de puissance appliquées nous donnent les mêmes résultats d'écoulement de puissance, à savoir les amplitudes de tension des jeux de barres, les pertes totales, les courants qui circulent dans les branches ainsi que les puissances actives et réactives transitant dans les lignes. Toutefois, il est à signaler que l'algorithme de la méthode dite directe est le plus simple.
- Une mauvaise intégration d'un DG au terme d'emplacement et de puissance active injectée peut réduire les performances du réseau, c'est-à-dire augmenter les pertes actives et détériorer le profil de tension.
- Une intégration d'un DG de type 1 au niveau du jeu de barres 6 d'une puissance active de 2,5902 MW a permis de minimiser les pertes actives totales de l'ordre de 45,02%.
- Une amélioration du profil de tension de l'ensemble des jeux de barres après l'intégration du DG.
- Une convergence systématique de la méthode d'algorithme génétique après un nombre d'itérations acceptable.

Bibliographie

- [1] 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.
- [2] V.T Khanh, "Interconnexion des sources d'énergie renouvelable au réseau de distribution électrique," Thèse de doctorat, Université du Québec à Trois- Rivières, 2009.
- [3] J.A Lopes, "Integration of dispersed generation on distribution networks impact studies," IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Vol. 1, pp. 323-328, 2002.
- [4] Boris Berseneff, "Réglage de la tension dans les réseaux de distribution du futur " , Thèse de doctorat de L'Université de Grenoble, Décembre 2010
- [5] Olivier Richardot, "Réglage Coordonné de Tension dans les Réseaux de Distribution à l'aide de la Production Décentralisée " , Thèse docteur de l'INP Grenoble 2006
- [6] Wendy Carolina BRICEÑO VICENTE, "Modélisation des réseaux de distribution sous incertitudes, Thèse docteur de l'Université de Grenoble, 20 septembre 2012
- [7] CEA, Mémento sur l'énergie 2013, Commissariat à l'Énergie Atomique, Tech.Rep.,209.http://www.cea.fr/content/download/23534/379632/_le/cea_memento_sur_l'energie_209.pdf
- [8] Opérateur du système électrique OSE, <http://www.ose.dz/courbes.php>
- [9] Thomas Ackermann, Goran Andersson, Lennart Soder," Distributed generation: a definition", Electric Power Systems Research 57 195–204, 2001.
- [10] Hamid Reza Esmaeilian, Omid Darijany, Mohsen Mohammadian, "Optimal placement and sizing of DG units and capacitors simultaneously in radial distribution networks based on the voltage stability security margin", Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences 2012
- [11] R.A. Mohr, R. Moreno, H. Rudnick, "Insertion of Distributed Generation into Rural Feeders", Cigré international council on large electric systems, Calgary 2009
- [12] William. F. Tinney and Clifford E. Hart. Power Flow Solution by Newton's Method. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-86(11), 1967.
- [13] J. Duncan Glover, Mulukutla Sarma, Thomas Overbye , "Power System Analysis and Design", Cengage Learning, 3 janv. 2011

- [14] B. Stott and O. Alsac. Fast Decoupled Load Flow. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-93(3) :859–869, 1974.
- [15] D. Das, D. P. Kothari, and A. Kalam. Simple and efficient method for load flow solution of radial distribution networks. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 17(5) :335–346, 1995.
- [16] D. Das, H.S. Nagi, and D.P. Kothari. Novel method for solving radial distribution networks. *Transmission and Distribution IEE Proceedings - Generation*, 141(4) :291–298, 1994.
- [17] S. Ghosh and D. Das. Method for load-flow solution of radial distribution networks. *Trans-mission and Distribution IEE Proceedings - Generation*, 146(6) :641–648, 1999.
- [18] Efficient load flow method for distribution systems with radial or mesh configuration - *IET Journals & Magazine*.
- [19] M. H. Haque. A general load flow method for distribution systems. *Electric Power Systems Research*, 54(1) :47–54, 2000.
- [20] Jen-Hao Teng. A direct approach for distribution system load flow solutions. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 18(3) :882–887, 2003.
- [21] Omessaad Hajji, “ Contribution au développement de méthodes d’optimisation stochastiques. Application à la conception des dispositifs Electrotechniques ”, Thèse de doctorat en génie électrique, Ecole centrale de Lille, Université des sciences et technologies de Lille, 2003
- [22] S. Sivanagaraju, J. Viswanatha Rao and M. Giridhar, “A loop based load flow method for weakly meshed distribution network”, *APRN Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol.3, No.4, pp.55-59, 2008.
- [23] Makwana Nirbhaykumar Navinchandra, “Load flow analysis of radial and weakly meshed distribution system”, Master of engineering in power systems and electric drives, Electrical and instrumentation engineering department, Thapar university, july-2012
- [24] E. Afzalan, M. A. Taghikhani and M. Sedighzadeh, "Optimal Placement and Sizing of DG in Radial Distribution Networks Using SFLA," *International Journal of Energy Engineering*, Vol. 2, pp. 73-77, 2012.