



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



**Université Amar Telidji- Laghouat**

**FACULTE : Technologie**

**DEPARTEMENT : Electrotechnique**

**MEMOIRE DE MASTER**

**Présenté par : Mebarki Abdelhakim**

**Bendjedid Mouhyieddine**

**DOMAINE : Sciences et Technologies**

**FILIERE : Electrotechnique**

**OPTION : Réseaux Electriques**

**Thème**

Impact d'une Production Décentralisée  
sur un Réseau Electrique de Distribution

Jury de soutenance :

<b>Nom et Prénom</b>	<b>Grade</b>	<b>Qualité</b>
LAHDEB Mohamed	MCA	Président
ARIF Salem	Prof	Examineur
CHETTIH Saliha	Prof	Rapporteur
BOUCHEIBA Oumelkheir	MAA	Co-Rapporteur

**Promotion : 2019-2020**

## ملخص

إن دمج الإنتاج اللامركزي في شبكات التوزيع الكهربائية له مزايا محتملة على التوليد التقليدي (المركزي). في هذه المذكرة ، تم تطوير دراسة تأثير دمج الإنتاج اللامركزي على شبكات التوزيع الكهربائية.

أولاً استخدمنا تقنية لحساب تدفق الطاقة في شبكة التوزيع ، تسمى تقنية المسح المزدوج (المسح الخلفي / للأمام). ثانياً ، تطبيق طريقة سرب الجسيمات لحل مشكلة تدفق الطاقة الأمثل ، للاختيار الأمثل لحجم وموقع الإنتاج اللامركزي ، أخيراً نقترح تحديد أبعاد النظام الكهروضوئية في منطقة الاغواط كمصدر انتاج لا مركزي ، يتم إجراء عمليات المحاكاة على شبكات التوزيع التي تم اختبارها (عقدة 69 et 33) IEEE. الكلمات المفتاحية: الإنتاج اللامركزي ، شبكات التوزيع الكهربائية، تقنية المسح المزدوج، طريقة سرب الجسيمات. النظام الكهروضوئية.

## Résumé

L'intégration de la production décentralisée dans les réseaux de distribution électriques présente des avantages potentiels par rapport à la production traditionnelle (centralisée).

Dans ce mémoire, une étude est développée au profit de l'impact d'intégration de la production décentralisée sur les réseaux électriques de distribution.

Premièrement nous avons utilisé une technique pour le calcul de l'écoulement de puissance dans un réseau de distribution, la technique est celle du double balayage de la ligne (BFS) (Backward /Forward Sweep),deuxièmement, une application de la méthode métaheuristique d'essaim de particules , pour résoudre le problème de l'OPF du choix optimal de la taille et de l'emplacement des DGs, finalement nous proposons un dimensionnement d'un système PV dans la région de Laghouat entant qu'une source DG. Les simulations sont effectuées sur des réseaux de distribution testés IEEE (33 et 69 jeux de barres).

**Mots- clés :** Production décentralisée, Réseaux de distribution électrique, Technique du double balayage de la ligne (BFS), Méthode métaheuristiques d'essaim de particules (PSO), Systèmes PV.

## Abstract

The integration of decentralized production into electricity distribution networks has potential advantages over traditional (centralised) production.

In this memory, a study is developed to benefit the integration impact of decentralized production on electricity distribution networks.

First, we used a technique for calculating power flow in a distribution network called the Double Line Sweep (BFS) technique (Backward /Forward Sweep). Second, the application of the particle swarm optimiser (PSO), To solve the OPF problem of optimal choice of size and location of DGs, finally we propose a sizing of a PV system in the Laghouat region as a DG source. The simulations are carried out on IEEE- tested distribution networks (33 and 69 bus).

**Keywords:** Decentralized production, electrical distribution networks, Backward forward sweep (BFS), particle swarm optimiser (PSO), PV systems.



## *REMERCIEMENTS*

*Avant tout nous tenons à remercier Allah qui nous a arrosés de la lumière de sa  
connaissance*

*et nous a protégés de l'ignorance, de nous avoir donné le courage et la patience pour  
mener à bien ce modeste travail.*

*Nous tenons à remercier;  
notre encadreur CHETTIH Saliha qui nous a permis de travailler dans les meilleures  
conditions;*

*Mme BOUCHEIBA Oumelkheir et Mr. TERBEH Houcine*

*Ainsi que notre chef d'option Pr. ARIF Salem pour ces efforts et acharnement  
afin de nous donner bonne formation académique,*

*Les membres de jury qui ont accepté de juger notre travail.*

*Nos familles, les amis et tous ceux qui nous ont aidés.*

*Nous remercions tout particulièrement nos parents pour leur soutien  
inconditionnel.*

*À tous ceux qui nous ont ouvert leurs portes,*

*À tous ceux qui nous ont aidées de près ou de loin, même avec un petit sourire,  
pour réaliser ce travail, nous leur disons merci beaucoup.*

## DÉDICACE

Je dédie ce modeste travail,

À ma mère, la source de la tendresse est une tendre infinie.

À mon père l'exemple du sacrifice.

À mes éminents professeurs, pour lesquels j'ai toute l'estime et le respect.

À l'âme de mon cher grand-père.

À mes chères sœurs.

À ma grande famille.

À tous mes collègues et amis.

À mon collègue Mebarki Abdelhakim pour m'avoir participé ce travail.

Je dédie le fruit de ce travail.

**Bendjedid Mohyieddine.**

## DÉDICACE

Je dédie ce modeste travail,

À ma chère mère et mon cher père,

Qui n'ont pas cessé de m'encourager,

De me soutenir dans les moments difficiles et qui ont su m'entourer de toute leur affection et leur amour pour que je puisse réussir,

Que Dieu les protège.

À mes chers frères et sœurs.

À ma famille, mes amis et collègues.

À ceux qui m'ont souhaité succès.

À tous ceux qui m'ont soutenu.

À mon collègue Bendjedid mohyieddine pour m'avoir participé ce travail.

À tous ceux qui m'ont souhaité bonne réussite.

**Mebarki Abdelhakim.**

**Table des matières**

**Résumé**  
**Remerciements**  
**Dédicaces**  
**Table des matières.....I**  
**Liste des Figures.....II**  
**Liste des Tableaux.....III**  
**Abréviations .....IV**  
**Introduction générale.....V**

**Chapitre I : Réseaux de distribution et écoulement des puissances**

I.1 Introduction.....4  
I.2 Réseau électrique.....4  
    I.2.1 Fonctionnement des différents types de réseaux électriques.....4  
        I.2.1.1 Production.....5  
        I.2.1.2 Réseaux de transport et de répartition.....5  
        I.2.1.3 Réseaux de distribution.....6  
        I.2.1.4 Consommation.....8  
    I.2.2 Gamme des tensions utilisées par le groupe SONELGAZ.....10  
    I.2.3 Topologies des réseaux électriques.....10  
        I.2.3.1 Réseau électrique maillé.....11  
        I.2.3.2 Réseau électrique bouclé.....11  
        I.2.3.3 Réseau électrique radial.....12  
I.3 Ecoulement de puissance dans les réseaux de distribution.....13  
    I.3.1 Eléments d'un réseau de distribution radial .....14  
        I.3.1.1 Types des jeux de barres.....14  
        I.3.1.2 Types des lignes.....15  
    I.3.2 Ecoulement de puissance dans le réseau de distribution radial.....16  
        I.3.2.1 Unité relative.....16  
        I.3.2.2 Puissance et courant dans les branches.....17  
        I.3.2.3 Courants des branches.....18  
        I.3.2.4 Amplitude et angle de la tension au niveau de chaque jeu de barres.....20  
        I.3.2.5 Pertes de puissances active et réactive.....21

I.3.3	Algorithme de base de l'EP par la technique du double balayage.....	22
I.4	Écoulement de puissance optimal dans les réseaux de distribution.....	24
I.4.1	Notion d'optimisation.....	24
I.4.2	Fonction objectif .....	25
I.4.3	Contraintes.....	25
I.4.4	Choix de la méthode d'optimisation.....	26
I.4.5	Algorithme à essaim de particules (PSO).....	26
I.5	Conclusion.....	28

## **Chapitre II : La production centralisée et décentralisée**

II.1	Introduction.....	30
II.2	Définition de la production décentralisée.....	30
II.3	Production Décentralisée et Production Centralisée.....	31
II.4	Différents types de la production décentralisée.....	33
II.4.1	Energies non renouvelables.....	33
II.4.1.1	Thermique à flamme.....	33
II.4.1.2	Moteurs à combustibles fossiles.....	33
II.4.1.3	Hydrogène.....	33
II.4.2	Ressources énergétiques renouvelables.....	33
II.4.2.1	Hydraulique.....	34
II.4.2.2	Eolienne.....	35
II.4.2.3	Géothermie .....	35
II.4.2.4	Solaire photovoltaïque.....	35
II.4.2.5	Solaire thermique.....	35
II.4.2.6	Biomasse et déchets .....	35
II.4.2.7	Marémotrice .....	35
II.4.2.8	Hydrolienne .....	35
II.4.3	Energie solaire photovoltaïque .....	36
II.4.3.1	Technologies des cellules solaires .....	36
II.4.3.2	Structure des panneaux photovoltaïques .....	37
II.4.3.3	Avantages et inconvénients d'une installation PV.....	38
II.4.3.4	Installations des systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique.....	39

II.4.3.5 Dimensionnement d'une station PV raccordée au réseau électrique.....	42
II.5 Importance des productions décentralisées.....	48
II.6 Impacts de la production décentralisée sur le réseau de distribution.....	49
II.6.1 Impacts sur le sens de transit de puissance.....	49
II.6.2 Impacts sur le profil de tension.....	50
II.6.3 Impacts sur la stabilité du système.....	50
II.6.4 Impacts sur le plan de protection.....	50
II.6.5 Impacts sur l'observabilité et de contrôlabilité du système.....	50
II.6.6 Impacts sur la continuité de service.....	50
II.6.7 Impacts sur la qualité de service.....	50
II.7 Conclusion.....	51

## **Chapitre III : Applications et interprétations**

III.1 Introduction.....	53
III.2 Réseau de distribution IEEE 33-bus.....	54
III.3 Réseau de distribution IEEE 69-bus.....	67
III.4 Dimensionnement photovoltaïque.....	76
III.4 Conclusion.....	80
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>82</b>
<b>Bibliographies.....</b>	<b>84</b>
<b>Annexes.....</b>	<b>87</b>

Liste des Figures

<b>Figure .I.1.</b> Courbe de charge de la journée du 14 juin 2013 en Algérie.....	8
<b>Figure .I.2.</b> Structure traditionnelle du réseau électrique Algérienne.....	9
<b>Figure .I.3.</b> Niveaux des tensions normalisées.....	10
<b>Figure .I.4.</b> Structure d'un réseau électrique Maillé.....	11
<b>Figure .I.5.</b> Structure d'un réseau électrique Bouclé.....	12
<b>Figure .I.6.</b> Structure d'un réseau électrique Radial.....	12
<b>Figure .I.7.</b> Synthèse des techniques d'EP pour les réseaux de distribution.....	13
<b>Figure .I.8.</b> Représentation d'un jeu de barres intermédiaire.....	14
<b>Figure .I.9.</b> Représentation d'un jeu de barres commun.....	14
<b>Figure .I.10.</b> Représentation d'un jeu de barres terminale.....	14
<b>Figure .I.11.</b> Représentation des différents types de ligne.....	15
<b>Figure .I.12.</b> Schéma unifilaire d'un réseau de distribution radial.....	17
<b>Figure .I.13.</b> Représentation de deux jeux de barres dans le réseau de distribution radial.....	17
<b>Figure .I.14.</b> Notion d'optimisation.....	24
<b>Figure .I.15.</b> Schéma de principe du déplacement d'une particule.....	27
<b>Figure .II.1.</b> Sous module constitué de Ncs cellules connectées en séries.....	37
<b>Figure .II.2.</b> Module constitué de Nssm sous modules montés en séries.....	37
<b>Figure .II.3.</b> Cycle de la matière brute au système photovoltaïque.....	38
<b>Figure .II.4.</b> Différentes topologies d'installations PV connectés à un réseau électrique.....	41
<b>Figure .II.5.</b> Structure de conversion multi-string mixte.....	41
<b>Figure .II.6.</b> Carte géographique d'ensoleillement mondiale.....	43
<b>Figure .II.7.</b> Photo descriptive (structure, string et module ou Panneau).....	45
<b>Figure .II.8.</b> Photo descriptive (string, L1, A1).....	46
<b>Figure .III.1.</b> Représentation simplifiée du réseau de distribution IEEE 33-bus.....	54
<b>Figure .III.2.</b> Tension à chaque jeu de barres du cas 01.....	56
<b>Figure .III.3.</b> Histogramme des pertes de puissance active et réactive du cas 01.....	58
<b>Figure .III.4.</b> Tension à chaque jeu de barre du cas 02.....	59
<b>Figure .III.5.</b> Histogramme des pertes de puissance active et réactive du cas 02.....	61
<b>Figure .III.6.</b> Nouvelle représentation du réseau de distribution IEEE 33-bus avec l'insertion optimale de la production décentralisée.....	62

<b>Figure .III.7.</b> Tension à chaque jeu de barres du cas 03.....	64
<b>Figure .III.8.</b> Tension à chaque jeu de barres du cas 04.....	66
<b>Figure .III.9.</b> Réduction des pertes totales active avec l'amélioration du profil de tension avant et après l'insertion de deux DGs (IEE33 bus).....	66
<b>Figure .III.10.</b> Représentation simplifiée du réseau de distribution IEEE 69-bus.....	67
<b>Figure .III.11.</b> Tension à chaque jeu de barres du cas 05.....	69
<b>Figure .III.12.</b> Histogramme des pertes de puissance active et réactive du cas 05.....	72
<b>Figure .III.13.</b> Nouvelle représentation simplifiée du réseau de distribution IEEE 69-bus avec l'insertion optimale de la production décentralisée.....	73
<b>Figure .III.14.</b> Tension à chaque jeu de barres du cas 06.....	75
<b>Figure .III.15.</b> Réduction des pertes totales active et amélioration de profil de tension avant et après l'insertion de deux DG (IEEE 69bus).....	75
<b>Figure .III.16.</b> Irradiation journalière globale entre (22-28/02/2020).....	77
<b>Figure .III.17.</b> Ligne de production du GPV connecté au réseau.....	78
<b>Figure .III.18.</b> Schéma vue de dessus du champ GPV (46 structure).....	79

**Liste des Tableaux**

<b>Tableau .I.1.</b> Domaines de tension.....	10
<b>Tableau .II.1.</b> Potentiel solaire en Algérie.....	43
<b>Tableau .II.2.</b> Productions décentralisées disponibles en Algérie.....	47
<b>Tableau .III.1.</b> Solution de l'écoulement de puissances du cas 01.....	55
<b>Tableau .III.2.</b> Pertes de puissances active et réactive du cas 01.....	56
<b>Tableau .III.3.</b> Solution de l'écoulement de puissances du cas 02.....	59
<b>Tableau .III.4.</b> Pertes de puissances active et réactive du cas 02.....	60
<b>Tableau .III.5.</b> Paramètres de la méthode PSO.....	62
<b>Tableau .III.6.</b> Solution de l'écoulement de puissances du cas 03.....	63
<b>Tableau .III.7.</b> Solution de l'écoulement de puissances du cas 04.....	65
<b>Tableau .III.8.</b> Solution de l'écoulement de puissances du cas 05.....	68
<b>Tableau .III.9.</b> Pertes de puissances active et réactive du cas 05.....	70
<b>Tableau .III.10.</b> Solution de l'écoulement de puissances du cas 06.....	74
<b>Tableau .III.11.</b> Coordonnées géographiques du site étudié.....	76
<b>Tableau .III.12.</b> Caractéristiques techniques du module GPV-YL250-29b.....	77
<b>Tableau .III.13.</b> Dimensionnement de sous champ de 500 Kw.....	79

**Abréviations**

<b>THT</b>	Très Haute Tension
<b>HTB</b>	Haute Tension catégorie B
<b>HTA/MT</b>	Haute Tension catégorie A ou Moyenne Tension
<b>BTB</b>	Basse Tension catégorie B
<b>BTA</b>	Basse Tension catégorie A
<b>TBT</b>	Très Basse Tension
<b>Un</b>	Tension composée nominale
<b>EP</b>	Ecoulement de Puissance
<b>GS</b>	Gauss Seidel
<b>NR</b>	Newton-Raphson
<b>FDLF</b>	Fast Decoupled Load Flow
<b>BFS</b>	Backward Forward Sweep
<b>PSO</b>	Particle Swarm Optimization
<b>GPSO-GM</b>	Guaranteed convergence Particle Swarm Optimization with Gaussian Mutation
<b>JB<sup>réf</sup></b>	Jeu de Barres de référence
<b>JB<sup>inter</sup></b>	Jeu de Barres intermédiaire
<b>JB<sup>com</sup></b>	Jeu de barres commun
<b>JB<sup>term</sup></b>	Jeu de barres terminal
<b>LP</b>	Ligne Principale
<b>LL</b>	Ligne Latérale
<b>LSL</b>	Ligne Sous-Latérale
<b>LM</b>	Ligne Mineure
<b>ldata</b>	Données des branches du réseau
<b>busdata</b>	Données des jeux de barres du réseau
<b>P<sub>i</sub></b>	Puissance active sortante du jeu de barres $i$
<b>Q<sub>i</sub></b>	Puissance réactive sortante du jeu de barres $i$
<b>P<sub>i+1</sub></b>	Puissance active sortante du jeu de barres $i+1$
<b>Q<sub>i+1</sub></b>	Puissance réactive sortante du jeu de barres $i+1$
<b>PL<sub>i</sub></b>	Puissance active de la charge $i$ branchée au jeu de barres $i$
<b>QL<sub>i</sub></b>	Puissance réactive de la charge $i$ branchée au jeu de barres $i$
<b>JBDMM</b>	Jeu de Barres de Départ de la Même ligne Mineure
<b>JBTMM</b>	Jeu de Barres Terminal de la Même ligne Mineure

<b>JBDSL</b>	Jeu de Barres de Départ de la SL <sup>ème</sup> ligne Sous-Latérale
<b>JBTSLSL</b>	Jeu de Barres Terminal de la SL <sup>ème</sup> ligne Sous-Latérale
<b>JBDLL</b>	Jeu de Barres de Départ de la L <sup>ème</sup> ligne Latérale
<b>JBTL</b>	Jeu de Barres Terminal de la L <sup>ème</sup> ligne Latérale
<b>JBTL</b>	Jeu de Barres Terminal de la ligne Principale
<b>PLoss<sub>i</sub></b>	Pertes de puissance active au niveau de la branche i
<b>QLoss<sub>i</sub></b>	Pertes de puissance réactive au niveau de la branche i
<b>PT Loss</b>	Pertes totales de puissance active
<b>QT Loss</b>	Pertes totales de puissance réactive
<b>EP&amp;PF</b>	Ecoulement de Puissance & Power Flow
<b>EPO&amp;OPF</b>	Ecoulement de Puissance Optimal & Optimal Power Flow
<b>F<sub>obj</sub></b>	Fonction objectif
<b>P<sub>DGi</sub></b>	Puissance active générée par la DG au jeu de barres i
<b>P<sub>Di</sub></b>	Puissance demandée au jeu de barres i
<b>PG</b>	Puissance générée provenant de la source
<b>GA</b>	Gravimetric Analysis
<b>ABC</b>	Algorithme de colonies d'abeilles
<b>SFLA</b>	Celebrated jumping frog calaveras county
<b>FA</b>	firefly Algorithm
<b>PC</b>	Production centralisée
<b>PD</b>	Production Décentralisée
<b>GED</b>	Génération d'Energie Distribuée ou Génération d'Energie Dispersée
<b>N<sub>cs</sub></b>	Nombre de cellules en séries
<b>NSS<sub>m</sub></b>	Nombre total des sous-modules connectés en série
<b>PV</b>	Photo Voltaïque
<b>eV</b>	Electronvolt
<b>GPV</b>	Générateur photovoltaïque
<b>DC</b>	Direct Current
<b>PPM</b>	Point de Puissance Maximum
<b>AC</b>	Alternating Current
<b>MPPT</b>	Maximum Power Point Tracking
<b>ASA</b>	Agence Spatiale Allemande
<b>N<sub>t</sub></b>	Nombre des panneaux ou modules
<b>P<sub>c</sub></b>	Puissance du sous-champ.

<b><math>P_n</math></b>	Puissance nominale du module PV
<b><math>P_m</math></b>	puissance produite par le générateur PV
<b><math>I_{pm}</math></b>	Courant à $P_{max}$ [A]
<b><math>I_{cc}</math></b>	Courant de Court-Circuit
<b><math>V_{pm}</math></b>	Tension à $P_{max}$ [V]
<b><math>V_{co}</math></b>	Tension de Circuit Ouverte
<b>DG</b>	Distributed Generation
<b>RD</b>	Réseau de Distribution

# Introduction générale

Un monde sans électricité dépasse notre imagination. Depuis la préhistoire, l'homme a fait beaucoup de progrès dans tous les domaines. Nous sommes habitués à tout accomplir en un clin d'œil, en appuyant sur un bouton ou en tournant un bouton. Si nous sommes devenus si habitués à profiter des avantages de l'électricité, il n'est pas facile d'imaginer comment l'électricité est transportée de sa source jusqu'à nos foyers et nos bureaux. Elle doit parfois parcourir de grandes distances à travers un réseau complexe de lignes de transmission et de sous-stations électriques pour nous fournir l'énergie et le plaisir que nous considérons comme acquis. Ce réseau, qui transporte l'électricité de sa source aux consommateurs, est appelé le réseau électrique.

Le réseau électrique est un terme collectif désignant différents composants tels que les transformateurs, les lignes de transmission, les sous-stations et les différents étages et sous-réseaux, production, transmission et distribution. Au cours de la dernière décennie, une attention particulière a été dédiée aux *réseaux de distributions* surtout après l'apparition des nouvelles sources non centralisées connus par *la génération dispersée ou décentralisées*.

Rappelons que les productions centralisées sont généralement des installations de grande taille, raccordées au niveau du réseau de transport. De plus, elles disposent d'une commande centralisée leur permettant de participer à la sûreté du système électrique [1].

Le système énergétique décentralisé se caractérise par la localisation des installations de production d'énergie à proximité de la consommation. Ce système permet également une utilisation optimale des énergies renouvelables qui réduisent l'utilisation des combustibles fossiles et augmente l'efficacité environnementale. Ils peuvent réduire l'inefficacité de la partie transport, ainsi que la distribution tout en affectant les coûts de production.

La production décentralisée introduit des changements radicaux sur les tâches de la génération, jusqu'à la distribution et remet en cause la planification, la conception, le fonctionnement et l'exploitation de ces réseaux. En effet, ces réseaux n'ont pas été conçus dans cette optique et la possibilité d'introduire ces sources d'énergie au sein de ces réseaux peut avoir des conséquences importantes sur le transit des puissances et donc sur la philosophie et l'implémentation du système de gestion et de la protection du réseau [2].

Malgré les effets et les impacts indésirables des DGs sur la stabilité et sécurité des réseaux électriques, les planificateurs et les consommateurs restent toujours intéressés par ces sources dites gratuites. Ce qui motivent les chercheurs à fouiner après ces installations et suivre leurs comportement vis-à-vis les incidents et les états sur normales pouvant affectés un système de puissance.

L'objet de notre étude est d'analyser le comportement d'un réseau de distribution soit radiale, vis-à-vis une insertion d'une production décentralisée, ainsi que l'influence de cette dernière sur la qualité d'énergie du même réseau perturbé.

Pour s'y faire une optimisation par un OPF est développée pour déterminer les tailles et les emplacements optimaux des DGs proposées à intégrer dans le réseau étudié. A partir des résultats de l'OPF, un dimensionnement d'une installation PV sera calculé pour chaque DGs à insérer.

Notre travail est divisé en trois chapitres :

Le premier chapitre présente une introduction au système électrique, ainsi que le développement mathématique des équations de l'écoulement de puissance, nous somme intéressées à la méthode BFS qui est simple et directe pour le calcul de l'écoulement de puissance dans les *réseaux de distribution radiaux*.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, on s'intéressera à une méthode d'optimisation dite PSO pour le choix optimal de la taille et de l'emplacement des DGs à intégrer.

Le deuxième chapitre, nous conduit à une présentation de la production décentralisée tout en indiquant son importance et son impact sur les réseaux électriques vis à vis les plans de protection et le rétablissement du système, avant de quitter cette section un dimensionnement d'une installation PV est détaillé concernant la région de Laghouat.

Dans le troisième chapitre, nous allons présenter et interpréter les résultats de nos calculs par simulations.

Enfin nous terminerons le présent mémoire par une conclusion générale.

**Chapitre I**

**Réseaux de distribution et écoulement  
des puissances**

## **I.1 Introduction**

Le réseau électrique est l'ensemble des circuits électriques complexes qui sont interconnectés pour transporter l'énergie vers les zones de consommation à partir de la source primaire.

L'étude de l'écoulement de puissance joue un rôle essentiel dans l'analyse des réseaux électriques. Ainsi, leur problématique qui consiste à trouver les puissances (actives et réactives) et les tensions d'un réseau pour un nœud donné. À chaque nœud, il y a quatre paramètres à connaître pour l'analyse : la puissance active et réactive, l'amplitude de la tension et son angle de phase. L'ensemble des équations représentant le réseau électrique est de nature non linéaire, de sorte que les solutions ne sont évidemment basées que sur des méthodes itératives.

Ce chapitre consiste, tout d'abord, à présenter une introduction au système électrique. Ensuite, nous allons essayer de présenter le développement mathématique d'une méthode traitant le problème de l'écoulement de puissance dans les réseaux de distribution. C'est une méthode simple, directe et facile à programmer. Elle est itérative et se base sur le principe du balayage en amont et en aval pour le calcul de la tension, puis nous allons présenter une méthode d'optimisation dite PSO pour le choix optimal de la taille et de l'emplacement des DGs à intégrer.

## **I.2 Réseau électrique**

Le réseau électrique est un système complexe conçu pour fournir l'intégralité de sa production d'électricité aux clients qui l'utilisent pour leurs besoins quotidiens et industriels. Ces systèmes sont passés de petits modèles locaux à des milliers de kilomètres et à des millions de maisons et d'entreprises connectés aujourd'hui. Le réseau est constitué de nombreuses interconnexions complexes, tout en se comportant de trois parties principales : la production, le transport et la distribution.

### **I.2.1 Fonctionnement des différents types de réseaux électriques**

La fonction principale d'un réseau électrique est d'acheminer l'énergie des centres de production jusqu'aux consommateurs. La fourniture d'électricité, en ce qui concerne la sûreté et la disponibilité, constitue un élément majeur de la gestion des réseaux électriques. Ceci est particulièrement vrai pour les réseaux de distribution, qui lient les réseaux de transport et de répartition avec les consommateurs. La gestion de tels réseaux est complexe due à leur architecture, du faible nombre de données disponibles et des perturbations variées qui peuvent s'y produire [3].

**I.2.1.1 Production**

La production d'électricité commence dans les centrales électriques qui ont pour fonction de convertir l'énergie mécanique d'une turbine en énergie électrique par l'utilisation d'un alternateur (à l'exception de l'énergie solaire, qui utilise des cellules photovoltaïques pour le faire). Pour ce faire, les centrales électriques ont besoin d'énergie provenant de combustibles tels que le charbon ou le gaz naturel, ou de débits tels que le vent et la lumière du soleil. Ces usines produisent beaucoup d'électricité et sont souvent loin de la demande en électricité, le système suivant (transport) résolvant ce problème.

**I.2.1.2 Réseaux de transport et de répartition**

Le transport de l'énergie électrique se fait par l'utilisation des lignes électriques. L'électricité qui sort de la centrale passe par une station de transport où la tension est augmentée avec une diminution proportionnelle du courant électrique. Cette augmentation de la tension est réalisée par un transformateur élévateur de tension. Cette énergie peut circuler sur de longues distances, la distance maximale typique étant d'environ 500 km. L'électricité sera transportée à haute tension par des transformateurs élévateurs et par l'utilisation des lignes à haute tension, pour la réduction des pertes de puissance transmise car en parcourant de longues distances par un fil de conduction, l'électricité perdra inévitablement de l'énergie au profit de la résistance des lignes.

Le réseau de transport comme tel est l'ensemble des lignes et des postes à très haute tension servant à transporter de grandes quantités d'énergie sur de longues distances vers les assemblages des charges. Le réseau de transport est aérien à cause des contraintes d'isolement à très haute tension. Étant donné le coût énorme et les contraintes inhérentes aux installations de transport à très haute tension, le nombre et l'emplacement des lignes et des postes est limité. En fait, le rôle de ce réseau est de canaliser la puissance vers quelques postes régionaux où le réseau de répartition prend la relève. Ces réseaux sont souvent interconnectés, réalisant la mise en commun de l'ensemble des moyens de production à la disposition de tous les consommateurs [4].

Le réseau de répartition est généralement à plus basse tension mais contraignant à installer et opérer. De plus, son rôle, comme son nom l'indique, est de répartir la puissance vers les centres de charges dans un rayon d'environ 100 kilomètres d'un poste de répartition. Le réseau de répartition est donc formé des lignes et des postes alimentant le réseau de distribution à partir du réseau de transport. Généralement, le réseau de répartition est aérien. Il existe aussi certaines installations de répartition souterraines. Notons aussi, que certaines entreprises grandes consommatrices d'énergie sont parfois branchées directement au réseau de répartition sans passer par le réseau de distribution [4].

### I.2.1.3 Réseaux de distribution

La distribution de l'électricité commence d'abord par les sous-stations de distribution qui utilisent des transformateurs abaisseurs, qui remplissent la tâche inverse des transformateurs éleveurs, les tensions de transmission sur longue distance sont dangereuses pour les personnes qui les manipulent, donc celles-ci retirent les transformateurs pour inverser la tension à des niveaux plus assurés. Le réseau de distribution relie ensuite ces sous-stations aux clients qui demandent de l'électricité, aux limites des grands bâtiments industriels et aux petites maisons. Un plus grand nombre de sous-stations et des transformateurs plus petits contribuent à abaisser encore les tensions et à répartir l'électricité entre les différentes branches et nœuds.

Le réseau de distribution est le réseau d'alimentation de l'ensemble de la clientèle, à l'exception de quelques gros clients industriels alimentés directement par le réseau de transport et de répartition. De la même façon que pour les autres caractéristiques, la structure du réseau de distribution dépend du pays où l'on se trouve. Le réseau peut être radial ou maillé [4].

#### ➤ **Caractéristiques des réseaux de distribution en Algérie**

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 [5].

#### **A- Réseau de distribution à moyenne tension MT/HTA**

L'objectif de ce réseau est d'acheminer l'électricité du réseau de répartition aux nœuds de moyenne consommation (supérieure à 250 KVA). Ces consommations sont :

- Soit du domaine public, avec accès aux postes de distribution publique MT/BT ;
- soit du domaine privé, avec accès aux postes de livraison aux abonnés à moyenne consommation.

Le nombre de ces abonnés ne représente qu'un faible pourcentage du nombre total des consommateurs livrés directement en BT. Ils sont essentiellement du secteur dit "tertiaire", tels les hôpitaux, les bâtiments administratifs, les petites industries, etc.

La structure de ces réseaux est du type aérien ou souterrain et les tensions sont comprises entre quelques kilovolts et 40 kV. Les protections sont moins sophistiquées que dans les autres réseaux [6].

**Ce réseau est caractérisé par**

- HTA (30 et 10 kV le plus répandu).
- Neutre à la terre par une résistance.
- Limitation à 300 A pour les réseaux aériens.
- Limitation à 1000 A pour les réseaux souterrains.
- Réseaux souterrains en boucle ouverte [7].

**B- Réseau de distribution à basse tension BT**

L'objectif de ce réseau est d'acheminer l'électricité du réseau de distribution MT aux points de faible consommation dans le domaine public avec l'accès aux abonnés BT. Il représente le dernier niveau dans une structure électrique. Ce réseau permet d'alimenter un nombre très élevé de consommateurs correspondant au domaine domestique. Sa structure, du type aérien ou souterrain, est souvent influencée par l'environnement. Les tensions sur ces réseaux sont comprises entre 100 et 440 V. Ces réseaux sont le plus souvent exploités manuellement [6].

**Ce réseau est caractérisé par**

- BTA (230 en tension simple/ 400 V tension composée).
- Neutre directement à la terre.
- Réseaux de type radial, maillés et bouclés [7].

### I.2.1.4 Consommation

Les trois usages classiques de l'énergie électrique sont la production d'énergie thermique (Chauffage), lumineuse (éclairage) et mécanique (moteurs électriques). Ces trois applications se retrouvent aussi bien chez les consommateurs résidentiels qu'industriels. Dans les réseaux, les consommateurs sont appelés charges. Ces charges sont caractérisées par leurs puissances actives et réactives consommées ou produites. De ces puissances mesurées sur un certain intervalle de temps sont déduites les puissances de pointe (puissance maximale) et moyennes. Pour connaître l'évolution des charges au cours du temps, des études statistiques sont menées sur les réseaux. En mesurant les courants dans les postes de transformation entre les réseaux de transport et de distribution, des courbes de consommation temporelle sont calculées. Ces courbes sont appelées courbes de charge (Figure.I.1). Elles permettent aux gestionnaires de réseau de prédire l'évolution de la consommation sur les réseaux et donc, entre autres, de définir les plans prévisionnels de production [8].

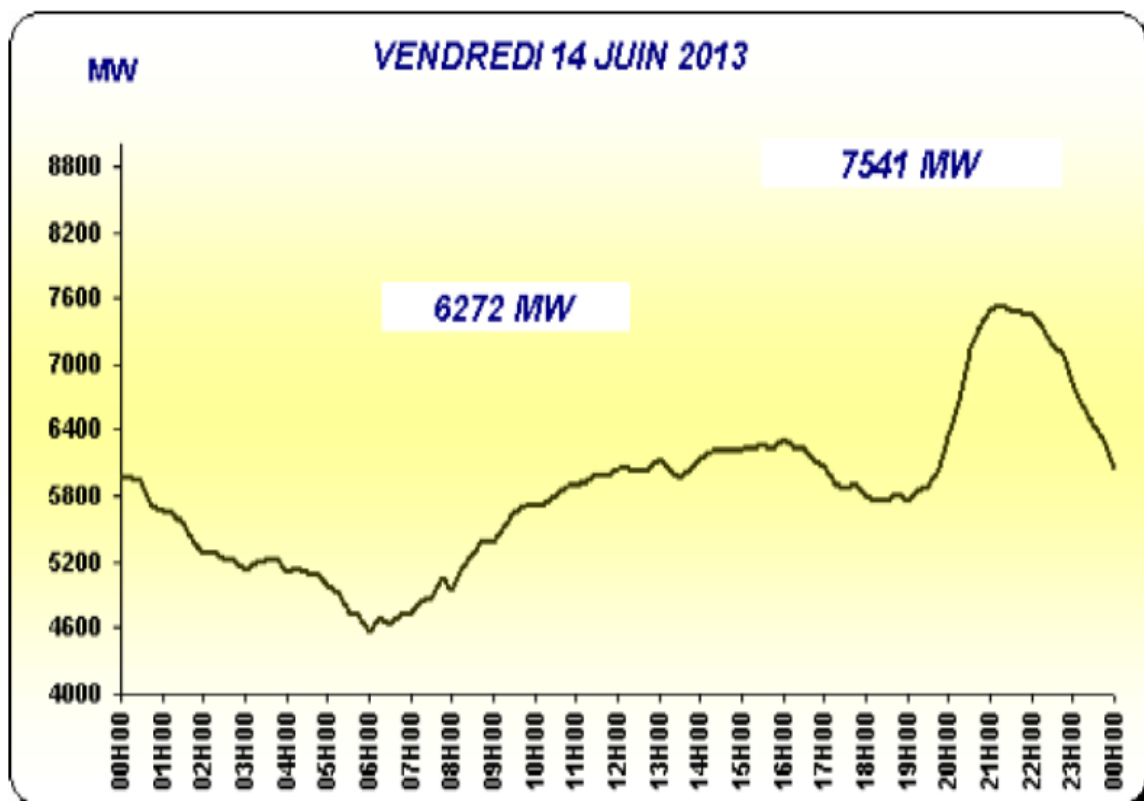


Figure. I.1. Courbe de charge de la journée du 14 juin 2013 [5]

La figure(I.2) représente la structure traditionnelle du réseau électrique Algérienne

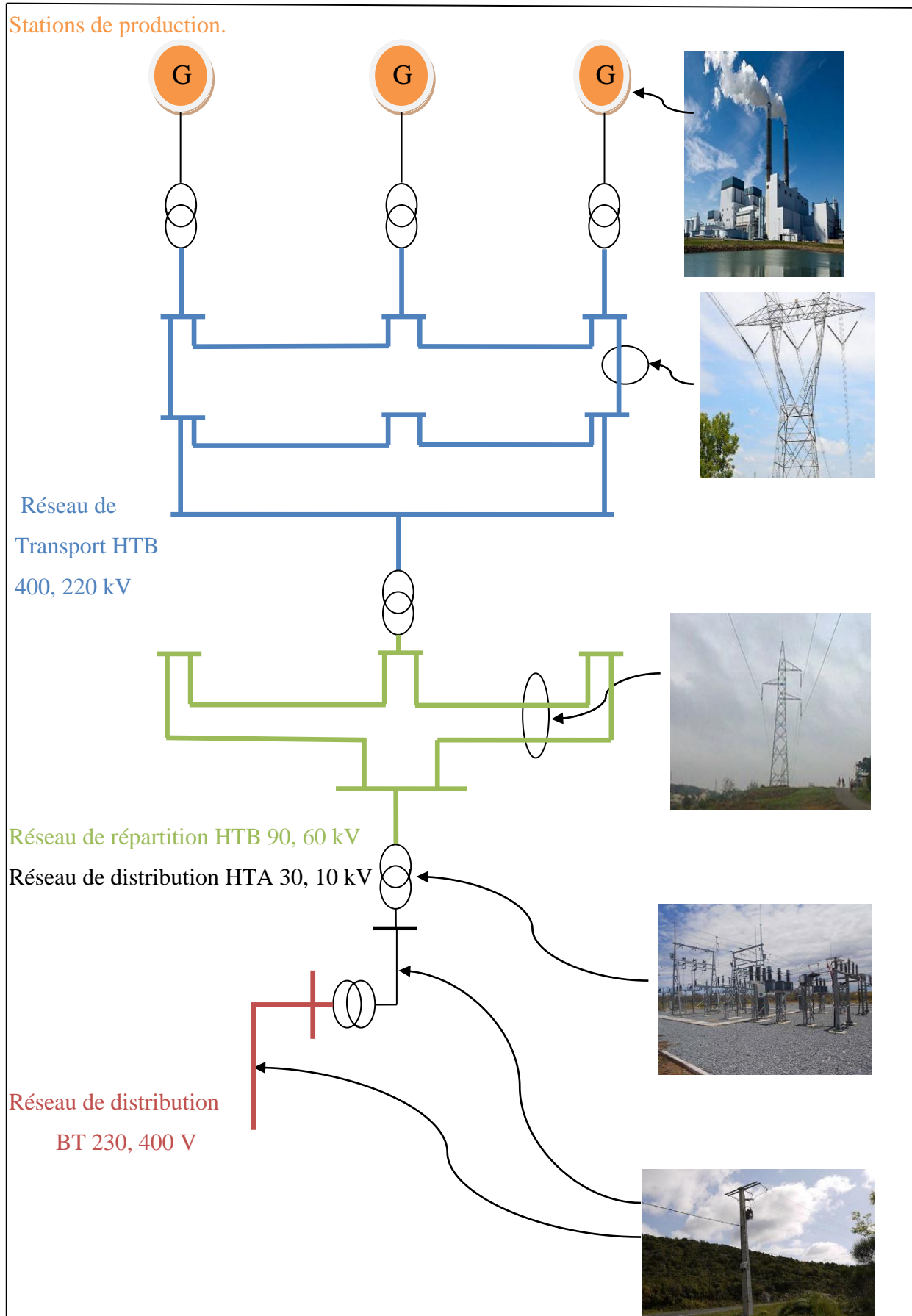


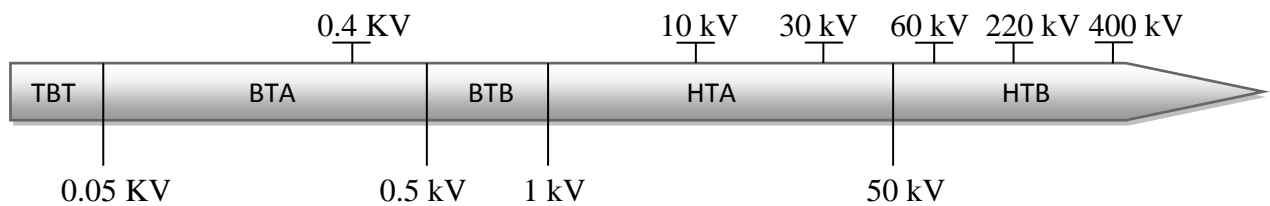
Figure I.2. Structure traditionnelle du réseau électrique Algérien [9]

**I.2.2 Gamme des tensions utilisées par le groupe SONELGAZ**

La nouvelle norme en vigueur en Algérie (SONELGAZ : Société de Distribution de l'Électricité et du Gaz) définit les niveaux de tension alternative comme le montre le tableau. I.1 et la figure. I.3.

**Tableau .I.1.** Domaines de tension [10]

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	$50 < U_n < 500$	$50 < U_n < 500$
	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	$U_n > 50\ 000$	$U_n > 75\ 000$



**Figure .I.3.** Niveaux des tensions normalisées [10]

**I.2.3 Topologies des réseaux électriques**

La topologie des réseaux électriques varie d'un réseau à l'autre en fonction du niveau de tension.

Le développement physique est souvent imposé par les terrains disponibles et leur géologie. La topologie logique peut varier en fonction des contraintes budgétaires, des exigences de fiabilité du réseau et des caractéristiques de charge et de production.

Les différentes topologies que l'on trouve habituellement sont [7]

### I.2.3.1 Réseau électrique maillé

Cette structure est caractérisée par de nombreuses connexions entre les nœuds du réseau, dans la mesure où elle permet, pour certains d'entre eux, des voies d'approvisionnement alternatives, visant non seulement à établir une connexion de réserve, mais aussi à améliorer la répartition de la charge dans les différentes branches et entre les différentes sources d'énergie.

Cette topologie (figure. I.4) est généralement utilisée dans les réseaux de transport. Les centres de production- ils sont interconnectés entre eux par des lignes THT dans les stations d'interconnexion.

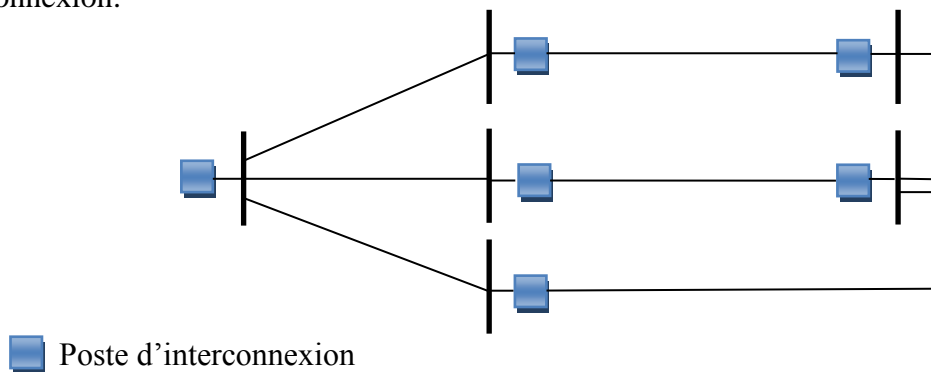


Figure .I.4. Structure d'un réseau électrique Maillé

### I.2.3.2 Réseau électrique bouclé

Si l'énergie transportée par un réseau vers un client passe par plusieurs sources, on parle de distribution en boucle [7].

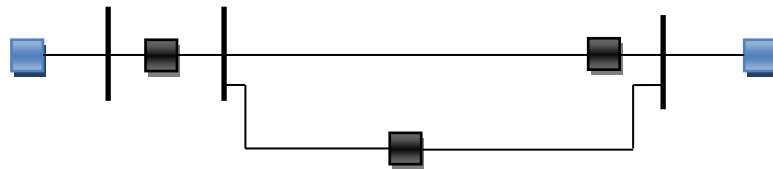
Un niveau de fiabilité du système similaire à celui des alimentations parallèles peut être atteint en utilisant un réseau de distribution en boucle, chaque transformateur de distribution est alimenté par au moins deux alimentations mais dans des chemins différents.

Les départs de ce système forment une boucle qui part des barres de la sous-station, traverse les transformateurs de distribution dans la zone de charge et retourne aux barres conductrices de la sous-station. Ce type de réseau (Figure .I.5.)est utilisé dans les réseaux de distribution MT et HT.

Ils sont principalement utilisés dans les réseaux où il existe des distances considérables entre les utilisateurs, caractérisés par de faibles puissances absorbées. En présence de charges d'installation importantes, la construction d'un réseau en boucle peut être plus coûteuse que d'autres types de réseaux.

Ce type de réseau présent deux avantages :

- Il y a moins de fluctuations de tension au niveau du consommateur.
- Le système est très fiable car chaque transformateur de distribution est alimenté par au moins deux départs. Cela signifie qu'en cas de défaut dans une section quelconque de la ligne d'alimentation, la continuité de l'approvisionnement est assurée à partir de la voie alternative.



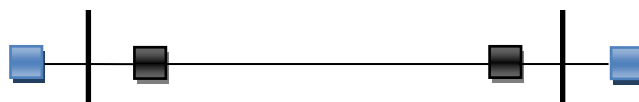
■ Poste d'interconnexion

■ Poste de distribution MT

Figure .I.5. Structure d'un réseau électrique Bouclé

### I.2.3.3 Réseau électrique radial

Si l'énergie transportée par un réseau vers un client est obtenue par une seule voie (sources), c'est la distribution radiale [7]. Ce système n'est utilisé que lorsque la sous-station ou l'unité centrale est située au centre des consommateurs. Dans ce système, différents points de vente rayonnent à partir d'une sous-station ou d'une unité centrale et alimentent les distributeurs à une extrémité. La principale caractéristique d'un système de distribution radiale est donc que le flux d'énergie est à sens unique. Cette structure (Figure .I.5.)se retrouve généralement dans la distribution MT et BT.



■ Poste d'interconnexion

■ Poste de distribution MT

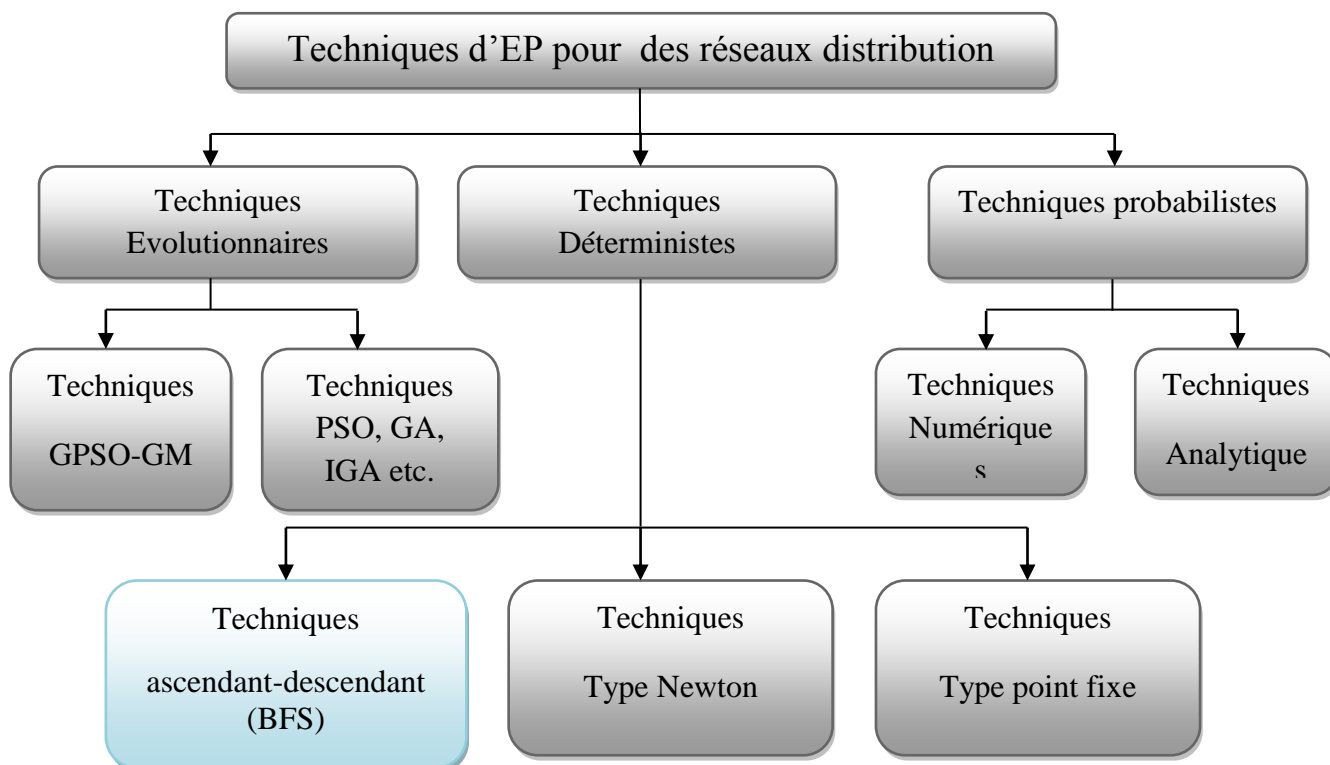
Figure .I.6. Structure d'un réseau électrique Radial

### I.3 Ecoulement de puissance dans les réseaux de distribution

Les études de l'écoulement de puissance sur les réseaux de transport sont bien développées en utilisant les méthodes tels que: Gauss Seidel (GS), Newton-Raphson (NR) et la technique de découplage rapide (FDLF). En raison de certaines caractéristiques particulières.

Les réseaux de distribution entrent dans la catégorie des systèmes d'énergie mal conditionnés pour ces méthodes conventionnelles de l'écoulement de puissance.

Les techniques d'EP pour les réseaux de distribution sont exprimées dans la figure .I.7 :



**Figure .I.7.** Synthèse des techniques d'EP pour les réseaux de distribution [11]

La topologie des réseaux de distribution a été exploitée par certains chercheurs pour développer la technique du double balayage de la ligne BFS (Backward /Forward Sweep). Ces dernières décennies un intérêt particulier a été accordé aux réseaux de distribution et au calcul de l'écoulement de puissance [12].

La méthode BFS est basée sur des balayages successifs vers les différents éléments du système jusqu'à convergence soit atteinte. Cette méthode peut être mise en œuvre en quatre étapes. La première étape consiste à identifier les éléments de ce système radial. La deuxième étape consiste à calculer l'injection du courant nodal pour chaque nœud. Dans cette étape, les tensions nodales sont considérées comme fixes. La troisième étape, appelée balayage vers l'arrière consiste à calculer la somme des courants, dans toutes les branches du système, en

commençant par l'élément inférieur et en remontant jusqu'aux supérieures. Dans la quatrième étape, appelée balayage vers l'avant, les tensions nodales sont corrigées inversement.

La deuxième, troisième et quatrième étapes sont répétées jusqu'à convergence [13].

### I.3.1 Eléments d'un réseau de distribution radial

Le réseau de distribution radiale contient souvent des jeux de barres liées entre elles par des lignes. Les types de ces jeux de barres et lignes sont définies dans cette partie [5].

#### I.3.1.1 Types des jeux de barres

Il existe trois types des jeux de barres plus le jeu de barres de référence (JB réf).

##### ➤ Jeu de barres intermédiaire (JB inter)

C'est le jeu de barre (Figure .I.8.) qui est lié uniquement avec deux liaisons (branches) de réseau, il peut trouver soit :

- Entre deux jeux de barres intermédiaires.
- Entre un jeu de barres intermédiaire et un jeu de barres commun.
- Entre un jeu de barres intermédiaire et un jeu de barres terminale.
- Entre deux jeux de barres communs.

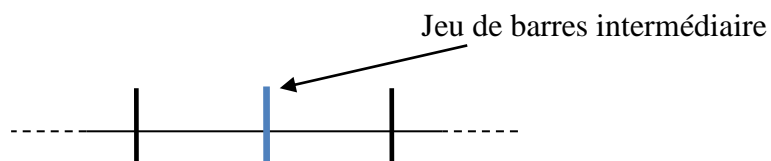


Figure .I.8. Représentation d'un jeu de barres intermédiaire

##### ➤ Jeu de barres commun (JB com)

C'est le jeu de barres qui est lié avec trois liaisons (branches) ou plus du réseau (Figure .I.9.).

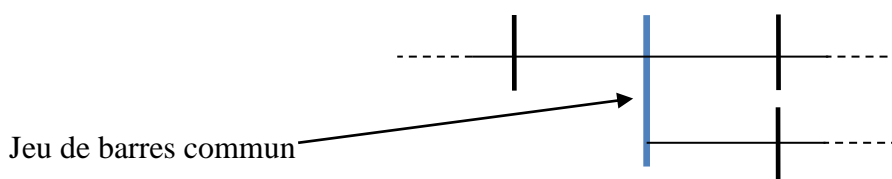


Figure .I.9. Représentation d'un jeu de barres commun

##### ➤ Jeu de barres terminal (JB term)

C'est le jeu de barres à une seule liaison du réseau (branche), situé à la fin de la ligne (Figure .I.10.).

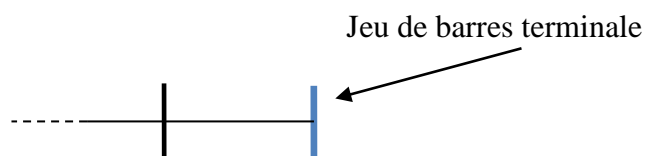


Figure .I.10. Représentation d'un jeu de barres terminale

### I.3.1.2 Types des lignes

La figure .I.11 représente les différents types des lignes dans un réseau de distribution radiale (Ligne principale, Ligne latérale, Ligne sous latérale et ligne mineure) [5].

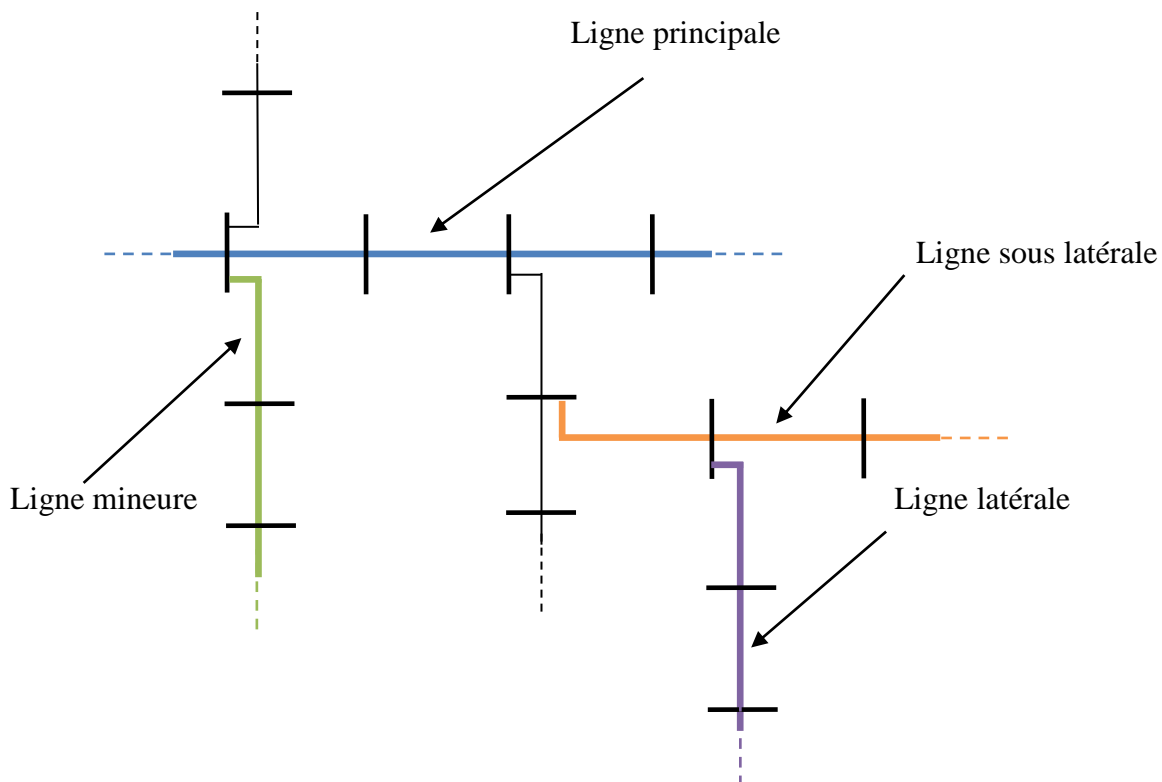


Figure .I.11. Représentation des différents types de ligne

➤ **Ligne Principale (LP)**

Une ligne principale est une ligne qui est liée au jeu de barres de référence (JBref).

➤ **Ligne Latérale (LL)**

Une ligne latérale est une ligne qui est liée à un jeu de barre commun (JB com) appartenant à la ligne principale.

➤ **Ligne Sous Latérale (LSL)**

Une ligne sous latérale est une ligne qui est liée à un jeu de barres commun (JB com) appartenant à la ligne latérale.

➤ **Ligne Mineure (LM)**

Une ligne mineure est une ligne qui est liée à un jeu de barres commun (JB com) appartenant à la ligne sous latérale.

### I.3.2 Ecoulement de puissance dans le réseau de distribution radial

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

- Le courant dans chaque branche.
- La puissance transitée dans chaque branche.
- Les pertes totales de puissance active et réactive dans le réseau.
- La tension de chaque jeu de barres [5].

#### I.3.2.1 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 [5].

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

$$R_{Pu} = R \frac{S_{base}}{10^3 \times V_{Base}} \quad (I.1)$$

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

$$P_{Pu} = \frac{P}{S_{base}} \quad (I.2)$$

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

$$Q_{Pu} = \frac{Q}{S_{base}} \quad (I.3)$$

I.3.2.2 Puissance et courant dans les branches

Considérons un réseau de distribution avec une configuration radiale (figure. I.12) constitué d'un ensemble de branches. Chaque branche de ce réseau est modélisée comme une résistance en série avec une inductance pure [5].

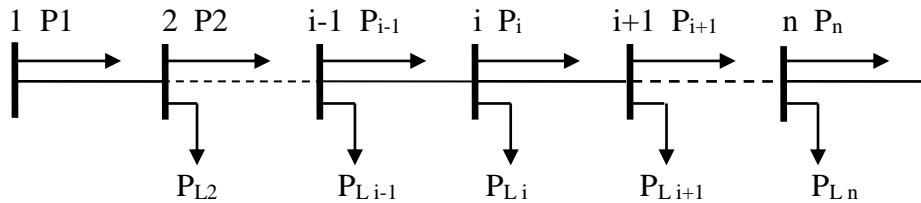


Figure I.12. Schéma unifilaire d'un réseau de distribution radial

L'impédance d'une branche « i » quelconque de ce réseau s'écrit comme suit :

$$Z_i = R_i + X_i \tag{I.4}$$

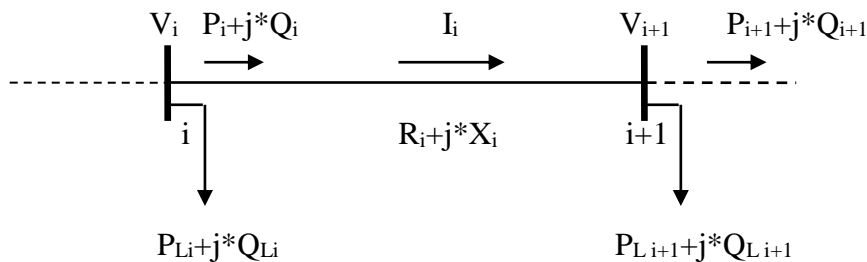


Figure I.13. Représentation de deux jeux de barres dans le réseau de distribution radial

Les puissances active et réactive transitées du jeu de barres i au jeu de barres i+1 peuvent être calculées comme suit :

$$P_i = P_{i+1}' + R_i \frac{(P_{i+1}'^2 + Q_{i+1}'^2)}{V_{i+1}^2} \tag{I.5}$$

$$Q_i = Q_{i+1}' + X_i \frac{(P_{i+1}'^2 + Q_{i+1}'^2)}{V_{i+1}^2} \tag{I.6}$$

Où :

$$P_{i+1}' = P_{i+1} + P_{Li+1}$$

$$Q_{i+1}' = Q_{i+1} + Q_{Li+1}$$

$P_{Li+1}$  et  $Q_{Li+1}$  sont les puissances actives et réactive de la charge au niveau du jeu de barres i+1.

$P_i$  et  $Q_i$  sont les puissances actives et réactive sortantes du jeu de barres (i).

Le courant traversant la branche (i) s'écrit comme suit :

$$I_i = \frac{(V_i \angle \delta_i - V_{i+1} \angle \delta_{i+1})}{R_i + jX_i} \quad (I.7)$$

### **I.3.2.3 Courants des branches**

Les courants des branches du réseau sont déterminés par l'application de la technique du balayage de la ligne en arrière (Backward/Sweep technique), en calculant tout d'abord les courants de toutes les charges branchées au niveau des jeux de barres, les courants traversant les branches en ordre des lignes mineures, des lignes sous-latérales, des lignes latérales et de la ligne principale [5].

#### **➤ Courant de charge**

Le courant injecté à chaque jeu de barres est lié à la puissance absorbée par la charge connectée et à la tension au niveau du jeu de barre. Pour un jeu de barre i, le courant injecté peut s'écrire :

$$I_{Li} = \frac{S_{Li}^*}{V_i^*} \quad (I.8)$$

Où  $i=1, 2, 3, \dots, N_i$ ,  $N_i$  est le nombre total des jeux de barres.

#### **➤ Courants des branches d'une ligne mineure**

Le courant traversant une branche appartenant à une ligne mineure peut être calculé comme suit :

$$I_b = I_{b+1} + I_{L(b+1)} \quad (I.9)$$

Où

$$\begin{cases} b = (JBDM_m - 1), \dots, (JBTM_m - 1) \forall m, m = 1, 2, \dots, N_m, \\ I_{b+1} = 0, \text{ si } (b + 1) = JBTM_m \\ I_{b,m} = I_b, \text{ si } b = b_{stm} \end{cases}$$

$N_m$  est le nombre total des lignes mineures.

$I_b, I_{b+1}$  sont respectivement les courants des branches  $b, b+1$ .

$JBDM_m$  est le jeu de barre de départ de la  $m^{\text{ème}}$  ligne mineure.

$JBTM_m$  est le jeu de barre terminal de la  $m^{\text{ème}}$  ligne mineure.

$I_{b,m}$ ,  $m$  est le courant de branche dans la  $m^{\text{ème}}$  ligne mineure.

$b_{stm}$  est le numéro de la branche connectant la ligne sous-latérale avec la  $m^{\text{ème}}$  ligne mineure.

➤ **Courants des branches d'une ligne sous-latérale**

Le courant traversant une branche appartenant à une ligne sous latérale s'écrit comme suit :

$$I_b = I_{b+1} + I_{L(b+1)} + \sum_{m=1}^{Nm} I_{bm,m} \quad (I.10)$$

Ou

$$\left\{ \begin{array}{l} b = (JBDSL_{sl} - 1), \dots, (JBDSL_{sl} - 1) \forall sl, sl = 1, 2, \dots, N_{sl} \\ I_{b+1} = 0, si (b + 1) = JBDSL_{sl} \\ I_b = 0, si (b + 1) \neq n_{stm} \forall, m = 1, 2 \dots N_m, \\ I_{b+1} = 0, si (b + 1) = JBDSL_{sl} \\ I_{b_{sl}, sl} = I_b, si b = b_{sl} \end{array} \right.$$

$N_{sl}$  est le nombre total des lignes sous-latérales ;

$JBDSL_{sl}$  est le jeu de barre de départ de la  $sl^{ème}$  ligne sous-latérale ;

$JBDSL_{sl}$  est le jeu de barre terminal de la  $sl^{ème}$  ligne sous-latérale ;

$n_{stm}$  est le numéro du jeu de barre commun dans la ligne sous-latérale par lequel débute la  $m^{ème}$  ligne mineure ;

$I_{b_{sl}, sl}$  est le courant de branche dans la  $sl^{ème}$  ligne sous-latérale ;

$b_{sl}$  est le numéro de la branche connectant la ligne latérale avec la  $sl^{ème}$  ligne sous-latérale.

➤ **Courants des branches d'une ligne latérale**

Le courant traversant une branche appartenant à une ligne latérale s'écrit selon l'équation suivante

$$I_b = I_{b+1} + I_{L(b+1)} + \sum_{l=1}^{N_l} I_{bl,l} \quad (I.11)$$

Où

$$\left\{ \begin{array}{l} b = (JBDL_l - 1) \text{ jusqu'à } (L_l - 1) \forall l, l = 1, 2, \dots, N_l, \\ I_{b_{sl}} = 0, si (b + 1) \neq n_{lsl} \forall sl, sl = 1, 2, \dots, N_{sl} \\ I_{b+1} = 0, si (b + 1) = JBTL_l \\ I_{bl,l} = I_b, si b = b_{pl} \end{array} \right.$$

$N_l$  est le nombre total des lignes latérales.

$JBDL_l$  est le jeu de barre de départ de la  $l^{ème}$  Ligne latérale.

$JBTL_l$  est le jeu de barre terminal de la  $l^{ème}$  ligne latérale.

$I_{bl,l}$  est le courant de branche dans la  $l^{ème}$  ligne latérale.

$b_{pl}$  est le numéro de la branche connectant la ligne principale avec la  $l^{ème}$  ligne latérale.

$n_{sl}$  est le numéro du jeu de barre commun dans la ligne latérale par lequel débute la  $sl^{\text{ème}}$  ligne sous-latérale.

➤ **Courants des branches de la ligne principale**

Le courant traversant une branche appartenant à une ligne principale s'écrit selon l'équation suivante :

$$I_b = I_{b+1} + I_{L(b+1)} + \sum_{l=1}^{N_l} I_{bl,l} \quad (\text{I.12})$$

Où:

$$\begin{cases} b = 1, 2, \dots (JBTP_P - 1) \\ I_b = 0, \text{ si } (b + 1) \neq n_{pl} \quad \forall, l = 1, 2 \dots N_l \\ I_{b+1} = 0, \text{ si } (b + 1) = JBTP_P \end{cases}$$

$JBTP_P$  est le jeu de barre terminal de la ligne principale ;

$n_{pl}$  est le numéro du jeu de barre commun dans la ligne principale par lequel débute la  $l^{\text{ème}}$  ligne latérale.

**I.3.2.4. Amplitude et angle de la tension au niveau de chaque jeu de barres**

D'après la figure (I.13), le courant dans la branche (i, i+1) s'écrit de deux façons [5]:

$$\begin{cases} I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i \angle -\delta_i} \\ I_i = \frac{(V_i \angle \delta_i - V_{i+1} \angle \delta_{i+1})}{R_i + jX_i} \end{cases} \quad (\text{I.13})$$

En assimilant les équations (I.13), on obtient :

$$\frac{(V_i \angle \delta_i - V_{i+1} \angle \delta_{i+1})}{R_i + jX_i} = \frac{P_i - jQ_i}{V_i \angle -\delta_i} \quad (\text{I.14})$$

En assimilant les parties réelles et imaginaires des deux côtés de l'équation (I.14), on aura :

$$V_i^2 - V_i V_{i+1} \angle (\delta_{i+1} - \delta_i) = (P_i - jQ_i)(R_i + jX_i) \quad (\text{I.15})$$

$$\begin{cases} V_i V_{i+1} \cos(\delta_{i+1} - \delta_i) = V_i^2 - (P_i R_i + Q_i X_i) \\ V_i V_{i+1} \sin(\delta_{i+1} - \delta_i) = Q_i R_i - P_i X_i \end{cases} \quad (\text{I.16})$$

En élevant les deux côtés des équations (I.16) à la puissance 2, on obtient :

$$\begin{cases} (V_i V_{i+1})^2 \cos(\delta_{i+1} - \delta_i)^2 = [V_i^2 - (P_i R_i + Q_i X_i)]^2 \\ (V_i V_{i+1})^2 \sin(\delta_{i+1} - \delta_i)^2 = (Q_i R_i - P_i X_i)^2 \end{cases} \quad (I.17)$$

En assemblant les équations (I.17) côté à l'autre, une nouvelle équation est obtenue :

$$(V_i V_{i+1})^2 = [V_i^2 - (P_i R_i + Q_i X_i)]^2 + (Q_i R_i - P_i X_i)^2 \quad (I.18)$$

$$V_{i+1}^2 = V_i^2 - 2(P_i R_i + Q_i X_i) + (P_i R_i + Q_i X_i)^2 + (Q_i R_i - P_i X_i)^2 \quad (I.19)$$

$$V_{i+1}^2 = V_i^2 - 2(P_i R_i + Q_i X_i) + (P_i R_i)^2 + (Q_i X_i)^2 + (Q_i R_i)^2 + (P_i X_i)^2 \quad (I.20)$$

Finalement, l'équation de l'amplitude de la tension au niveau de chaque jeu de barres du réseau de distribution radial est obtenue comme suit:

$$V_{i+1} = \left[ V_i^2 - 2(P_i R_i + Q_i X_i) + (R_i^2 + X_i^2) \times \frac{(P_i^2 + Q_i^2)}{V_i^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (I.21)$$

Toujours à partir des équations (I.16), l'angle de tension peut s'écrire :

$$\tan(\delta_{i+1} - \delta_i) = \frac{(Q_i R_i - P_i X_i)}{[V_i^2 - (P_i R_i + Q_i X_i)]} \quad (I.22)$$

$$\delta_{i+1} = \delta_i - \tan^{-1} \left( \frac{(Q_i R_i - P_i X_i)}{[V_i^2 - (P_i R_i + Q_i X_i)]} \right) \quad (I.23)$$

### I.3.2.5 Les pertes de puissances active et réactive

Les pertes de puissance active au niveau d'une branche (i) de la figure (I.13) s'écrivent comme suit[5]:

$$P_{Loss,i} = R_i \frac{(P_i^2 + Q_i^2)}{|V|_i^2} \quad (I.24)$$

Les pertes totales de puissance active dans le réseau peuvent être déterminées en additionnant les pertes de toutes les branches de l'équation (I.24) :

$$P_{T,Loss} = \sum_{i=1}^{N_{br}} P_{Loss,i} \quad (I.25)$$

Les pertes de puissance réactive au niveau d'une branche (i) s'écrivent comme suit:

$$Q_{Loss,i} = X_i \frac{(P_i^2 + Q_i^2)}{|V|_i^2} \quad (I.26)$$

Les pertes totales de puissance réactive dans le réseau peuvent être déterminées en additionnant les pertes de toutes les branches de l'équation (I.26):

$$Q_{T,Loss} = \sum_{i=1}^{N_{br}} Q_{Loss,i} \quad (I.27)$$

### I.3.3 Algorithme de base de l'EP par la technique du double balayage

L'algorithme de l'écoulement de puissance basée sur le balayage avant / arrière traite généralement les réseaux radiales. Dans ce type d'algorithmes, le balayage avant est principalement le calcul de la tension du nœud entre l'extrémité émettrice et l'extrémité distante de la ligne source, et le balayage arrière est principalement la somme des courants de dérivation et la puissance circulante dans les branches liant la source et les nœuds extrêmes [14].

La technique BFS est basée sur la connaissance de la topologie du réseau juste en lisant ses données. La connaissance se fait premièrement par l'identification du type de chaque jeu de barres, et deuxièmement, par l'identification du type de chaque ligne. La topologie sera exploitée dans le calcul de l'écoulement de puissance par l'application de cette technique.

L'algorithme de la technique du double balayage de la ligne sera présenté de manière globale par les étapes suivantes [5]

**Étape.1** : lecture des données

Lire les données du réseau : linedata (JB de départ, JB d'arrivé, les résistances et les réactances des branches) – busdata (la puissance active et réactive demandée au niveau de chaque JB).

**Étape.2** : identification des jeux de barres

Appliquer la méthode matricielle pour identifier le type de chaque jeu de barre (terminal, intermédiaire, commun).

**Étape.3** : identification des lignes

Identifier les types des lignes (principale, latérale, sous-latérale, mineure) en déterminant les vecteurs des jeux de barres appartenant à chaque type de ligne.

**Étape.4** : initialisation

Initialiser la tension de tous les jeux de barres à 1 pu.

**Étape.5** : calcul du courant de charge

Calculer le courant demandé par chaque charge en appliquant l'équation (I.8).

**Étape.6** : calcul du courant des branches de lignes mineures

Calculer les courants traversant les branches des lignes mineures en appliquant l'équation (I.9).

**Étape.7** : calcul du courant des branches des lignes sous-latérales

Calculer les courants traversant les branches des lignes sous-latérales en appliquant l'équation (I.10).

**Étape.8** : calcul du courant des branches des lignes latérales

Calculer les courants traversant les branches des lignes latérales en appliquant l'équation (I.11).

**Étape.9** : calcul du courant des branches de la ligne principale

Calculer les courants traversant les branches de la ligne principale en appliquant l'équation(I.12).

**Étape.10** : calcul des puissances de transit

Calculer les puissances actives et réactives transitées en appliquant les équations (I.5) et (I.6).

**Étape.11** : calcul des tensions et des angles

Calculer les nouvelles tensions module et phase au niveau de tous les jeux de barres en appliquant les équations (I.21) et (I.23).

**Étape.12** : test de sortie

La vérification si la condition suivante ' $\Delta V_{max} \leq \varepsilon$  Tolérance de convergence', vérifier ou non.

**Étape.12.1** : si oui

Si  $\Delta V_{max} \leq \varepsilon$  Tolérance de convergence.

**Étape.12.1.1** :

Calculer les pertes de puissance active et réactive dans chaque branche selon les équations (I.24) et (I.26).

**Étape.12.1.2** :

Calculer les pertes totales active et réactive selon les équations (I.25) et (I. 27).

**Étape.12.1.3** :

Afficher les résultats.

**Étape.12.2** : si non

Sinon refaire le calcul à partir de l'Étape.5.

## I.4 Écoulement de puissance optimal dans les réseaux de distribution

Nous allons présenter la notion d'optimisation et la méthode choisie en expliquant son algorithme.

### I.4.1 Notion d'optimisation

En mathématiques, l'optimisation recouvre toutes les méthodes qui permettent de déterminer l'optimum d'une fonction, avec ou sans contraintes.

L'optimisation cherche à analyser et à résoudre analytiquement ou numériquement les problèmes qui consistent à déterminer la meilleure solution du problème durant un temps de calcul raisonnable. Aujourd'hui, tous les systèmes susceptibles d'être décrits par un modèle mathématique sont optimisés. La qualité des résultats et des prédictions dépend de la pertinence du modèle, de l'efficacité de l'algorithme et des moyens pour le traitement numérique.

Certaines méthodes d'optimisation (Figure .I.14), qui partent d'une solution initiale et qui l'améliorent en explorant son voisinage immédiat, présentent l'inconvénient de s'arrêter au premier minimum local trouvé. Bien que d'autres méthodes contiennent souvent une technique ou une astuce permettant d'éviter de se retrouver piégé dans ces minima locaux, en explorant davantage tout l'espace des solutions, de façon à augmenter la probabilité de rencontrer le minimum optimal, c'est-à-dire le minimum global [15].

Dans ce cas, et afin d'éviter les problèmes cités auparavant, l'utilisation de méthodes qui offrent une solution de bonne qualité, quasi optimale, mais en un temps raisonnable s'avère intéressante.

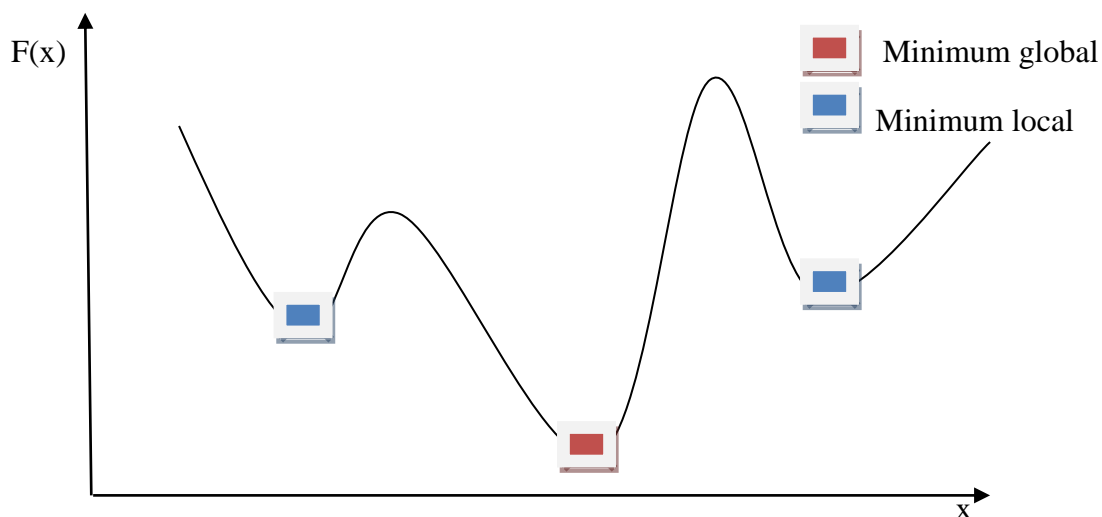


Figure .I.14. Notion d'optimisation

### I.4.2 Fonction objectif

Pour la détermination optimale de l'emplacement et de la taille de chaque DG installée dans le réseau de distribution, on a pris comme fonction objectif la minimisation des pertes Totales de puissance active en assurant un bon profil de tension [5].

$$F_{Obj} = \min \sum_{i=1}^{Nbr} P_{Loss}(i) \quad (I.28)$$

Où : Nbr est le nombre de branches dans le réseau de distribution,  $P_{Loss}$  : est la perte de puissance active dans une branche.

### I.4.3 Contraintes

- La limite de puissance transitée d'une branche située entre deux jeux de barres i et j

$$\left| P_{ij}^{Ligne} \leq P_{ij,max}^{Ligne} \right| \quad (I.29)$$

$P_{ij}^{Ligne}$  et  $P_{ij,max}^{Ligne}$  sont respectivement la puissance absolue et la valeur maximale admissible circulant dans la branche entre deux jeux de barres i et j.

- L'amplitude de la tension de chaque jeu de barre est limitée comme suit :

$$V_{min} \leq V_i \leq V_{max} \quad (I.30)$$

Où  $V_{min}$  et  $V_{max}$  sont respectivement les valeurs minimale et maximale d'amplitude de la tension au niveau de chaque jeu de barre.

- Les limites des puissances générées par les DGs :

$$P_{DGi}^{min} \leq P_{DGi} \leq P_{DGi}^{max} \quad (I.31)$$

$$Q_{DGi}^{min} \leq Q_{DGi} \leq Q_{DGi}^{max} \quad (I.32)$$

Où  $P_{DGi}$  et  $Q_{DGi}$  sont respectivement les puissances actives et réactives injectées par la DG au jeu de barre 'i'.

- Emplacement des DGs

$$JB^{min} \leq JB^i \leq JB^{max} \quad (I.33)$$

- Les contraintes d'équilibre de puissances:

$$P_G + \sum_{i=1}^{N_{DG}} P_{DGi} = \sum_{i=1}^{N_{JB}} P_{Di} + \sum_{i=1}^{Nbr} P_{Loss} \quad (I.34)$$

Où : Nbr est le nombre total des branches ;

$P_{Loss}$  sont les pertes de puissances actives totales dans le système ;

$P_{DG_i}$  est la puissance active générée par la DG au jeu de barre  $i$  ;

$P_{D_i}$  est la puissance demandée au jeu de barre  $i$  ;

$P_G$  est la puissance générée provenant de la source.

#### **I.4.4 Choix de la méthode d'optimisation**

Nombreuses méthodes ont été développées par des chercheurs qui se sont intéressés au problème de l'optimisation pour la compensation de l'énergie réactive.

Ces méthodes peuvent être classées en quatre catégories :

- Méthodes analytiques ;
- Méthodes numériques ;
- Méthodes heuristiques ;
- Méthodes métaheuristiques.

Actuellement la dernière catégorie est la plus utilisée dans le domaine d'optimisation de la taille et de l'emplacement des DGs dans le réseau de distribution. Parmi les algorithmes qui se basent sur des méthodes métaheuristiques, on trouve l'algorithme génétique(GA), les algorithmes d'optimisation par essaims de particules (PSO), l'algorithme de colonies d'abeilles (ABC), l'algorithme par sauts de grenouilles (SFLA) et l'algorithme des lucioles (FA) [15].

#### **I.4.5 Algorithme à essaim de particules (PSO)**

Les algorithmes d'optimisation par essaim de particules PSO (Particle Swarm Optimiser) ont été introduits en 1995 par Kennedy et Eberhart comme une alternative aux algorithmes génétiques standards. Ces algorithmes sont inspirés des essaims d'insectes (ou des bancs de poissons ou des nuées d'oiseaux) et de leurs mouvements coordonnés. En effet, tout comme ces animaux se déplacent en groupe pour trouver de la nourriture ou éviter les prédateurs, les algorithmes à essaim de particules recherchent des solutions pour un problème d'optimisation. Les individus de l'algorithme sont appelés particules et la population est appelée essaim [5].

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

- Une composante physique : la particule tend à suivre sa direction courante de déplacement ;
- Une composante cognitive : la particule tend à se diriger vers le meilleur site par lequel elle est déjà passée ;

- Une composante sociale : la particule tend se diriger vers le meilleur site déjà atteint par ses voisins. Dans le cas d'un problème d'optimisation, la qualité d'un site de l'espace de recherche est déterminée par la valeur de la fonction objective en ce point.

La Figure .I.15 illustre le schéma vectorielle du déplacement d'une particule qui détermine de nouvelle position d'une particule dans un processus PSO (les trois flèches grisées représentent la combinaison vectorielle des trois effets pris en compte).

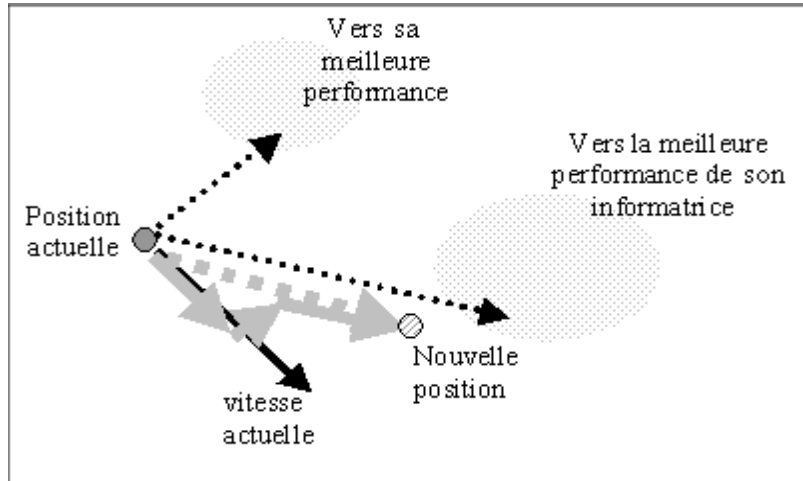


Figure .I.15. Schéma de principe du déplacement d'une particule [5]

L'algorithme de cette méthode peut être décrit comme suit :

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

**Etape 2 :** La création de la population initiale aléatoirement et le calcul de la fitness de chaque particule ( $P_{best_i}$ ) : la meilleure position de la particule  $i$  dans la population actuelle ;

( $g_{best_t}$ ) : La meilleure position dans toute les populations (la meilleure des meilleures).

**Etape 3 :** Le calcul de la nouvelle vitesse et la nouvelle position de chaque particule se fait à chaque étape Comme suit :

$$V_i^{K+1} = WV_i^K + C_1 * rand1 * (P_{best_i} - X_i^K) + C_2 * rand2 * (g_{best_t} - X_i^K) \quad (I.35)$$

$$X_i^{K+1} = X_i^K + V_i^{K+1} \quad (I.36)$$

Avec

$V_i^K$  : Vitesse de particule  $i$  à l'itération  $K$ .

$W$  : Facteur de population ou d'inertie. Sa fonction de calcul est donnée comme suite :

$$W = W_{max} \frac{W_{min} - W_{max}}{iter\ max} - iter \quad (I.37)$$

Avec ( $W_{max}$  : poids initial,  $W_{min}$  : poids final, iter max : nombre maximale d'itération, iter : nombre actuel d'itération)

$C_1$  : Facteur d'accélération lié à p best

$C_2$  : Facteur d'accélération lié à g best

rand : Nombre aléatoire entre 0 et 1

$X_i^K$  : Position actuelle de particule i à l'itération k.

$P_{best_i}$  : Meilleure position rencontrée par la particule i jusqu'à l'itération k

$g_{best_i}$  : Meilleure position rencontrée par l'essaim i jusqu'à l'itération k

Avec  $i=1, \dots, n$ , n (la taille de la population) est la dimension de l'espace de recherche.  $rand_1$  et  $rand_2$  sont des nombres aléatoires uniformément distribués dans l'intervalle  $[0,1]$ . Le paramètre d'inertie  $w$  contrôle l'influence de l'ancienne vitesse sur la vitesse courante, afin de permettre aux particules d'éviter les minima locaux. De la même façon,  $C_1$  contrôle le comportement de la particule dans sa recherche autour de sa meilleure position et  $C_2$  contrôle l'influence de l'essaim sur le comportement de la particule.

**Etape 4** : Le calcul de la meilleure fitness de la population initiale et comparer par la précédente pour trouver la meilleure de toutes les populations ( $P_{best_i}$ ).

**Etape 5** : incrémentation du nombre d'itération  $k = k+1$ .

**Etape 6** : Si le critère d'arrêt est satisfait alors passer à la 7<sup>ème</sup> étape. Autrement, aller à la 3<sup>ème</sup> étape.

**Etape 7** : La position enregistrée dans  $P_{g_{best}}$  est la solution optimale.

## **I.5 Conclusion**

Le présent chapitre, est consacré aux réseaux de distribution ainsi que leur EP et EPO, une méthode itérative a été présentée dite BFS. Cette méthode est exécutée en deux phases. Un balayage en montée, pour calculer les puissances, les pertes de puissance et les courants dans les branches de la ligne, et un balayage en descente, pour déterminer les tensions des nœuds et leurs phases à l'origine.

Cette méthode est simple à mettre en œuvre et rapide, converge systématiquement dans le cas des réseaux de distribution.

Une carte d'identification est présentée aussi pour la méthode métaheuristique d'optimisation PSO, proposée pour un écoulement de puissance optimale d'un réseau de distribution choisi.

## **Chapitre II**

# **La production centralisée et décentralisée**

### II.1 Introduction

Au cours de ces dernières années, c'est marquée l'apparition de nombreux producteurs dans les réseaux électriques de niveaux de tension inférieures.

On appelle ces nouveaux producteurs par plusieurs noms comme Production Décentralisée, Production Distribuée, Génération d'Énergies Distribuée ou Génération d'Énergies Dispersée, etc., ils sont placés près des nœuds de consommation et qui disposent des puissances installées allant de moins d'un kW à 50 MW [16].

La production décentralisée (dispersée) PD ou la GED (Générateur d'Énergie Dispersé) se définit par opposition à la production classique centralisée qui est caractérisée par des unités de grosses puissances raccordées au réseau électrique haute tension par contre la production décentralisée intégrée au réseau électrique de distribution (à moyenne tension HTA et à basse tension BT).

Dans ce chapitre, nous allons définir la production décentralisée et la comparée à la production centralisée car nous allons présenter divers types de production décentralisée, ainsi que son importance, et ses impacts. En dernier nous allons présenter une idée détaillée sur le dimensionnement d'une installation de production PV dans un site choisi.

### II.2 Définition de la production décentralisée

Le raccordement au réseau de nouveaux producteurs fait émerger de nouveaux concepts. Ainsi, pendant la dernière décennie, les termes de Production Décentralisée PD, Production Distribuée, Génération d'Énergie Distribuée, Génération Dispersée, Ressources d'Énergie Distribués ont envahi la littérature scientifique, politique et économique du système électrique.

Il n'y a pas un seul critère pour définir la signification de chaque terme ; chaque association, groupe de travail ou auteur a sa propre définition. Ainsi, le terme Production Décentralisée ne fait pas référence à tous les producteurs raccordés au système électrique. Seuls quelques-uns remplissant certaines conditions font partie de la Production Décentralisée. Généralement, le paramètre utilisé est le point de raccordement au réseau.

La Production Décentralisée est définie comme toute source d'énergie raccordée au réseau de transport, de répartition ou distribution et qui fait partie des énergies non conventionnelles (éolienne, solaire, piles à combustible entre autres) ou conventionnelles de petite puissance < 200MW (micro-turbines à gaz, cogénération, moyen de stockage de l'énergie entre autres), hors des grandes centrales.

Finalement, il faut retenir que la Production Décentralisée est représentée non seulement par les moyens de génération d'énergie mais aussi par les moyens de stockage capables de fournir une certaine puissance. Les technologies de stockage sont variées et vont des systèmes électrochimiques aux barrages hydro-électriques en passant par les super capacités, volants d'inertie, supraconducteurs entre autres[17].

### II.3 Production Décentralisée et Production Centralisée

Historiquement, le renforcement des réseaux électriques a été effectué avec l'insertion des nouvelles unités de production centralisées, la construction des nouvelles lignes électriques et l'extension de systèmes de distribution traditionnels [17].

Plusieurs raisons ont fait que les réseaux électriques ont longtemps été exploités de façon centralisée. La principale provient du coût financier très élevé de la construction et de l'entretien des infrastructures de production, de transport et de distribution de l'électricité. Ce coût financier implique une notion de monopole naturel du réseau. En effet, la construction de plusieurs réseaux concurrents serait dénuée de sens. C'est cet aspect de monopole naturel qui a souvent contribué à déboucher sur une gestion complète du réseau par une seule entité.

Une autre raison résulte des spécificités de l'industrie électrique qui est de remplir des missions de service public comme :

- l'obligation de fourniture,
- la continuité de service,
- l'égalité de traitement des usagers,
- l'adaptation du réseau aux besoins.

Afin de répondre à ces missions, la présence d'un organisme régulateur, dont le rôle est souvent joué par l'état, est obligatoire. Or la manière la plus simple de tenir ce rôle est de n'avoir qu'un seul interlocuteur, ce qui contribue également à centraliser l'exploitation des réseaux[18].

Cette structure a également été construite sur des bases d'économie, de sécurité du système et de qualité de fourniture de l'énergie. Cette structure, très centralisée et contrôlée par des centres de conduite hiérarchisés, permet de surveiller et de contrôler le réseau à tout instant. Ainsi, la production est ajustée à la consommation instantanément. La tension est également contrôlée sur une plage bien spécifiée aux moyens de dispositifs souvent coordonnés. Aujourd'hui, la libéralisation du marché de l'énergie de plus en plus généralisée, encourage l'intégration de nouveaux producteurs décentralisés. En comparant à la production centralisée, les avantages et inconvénients de la production décentralisée sont les suivants [17]

- Les nouveaux petits producteurs sont souvent basés sur des énergies renouvelables. Ils constituent des productions d'énergie moins polluantes que les centrales thermiques et nucléaires.
- Le temps nécessaire pour l'installation de la production centralisée et les lignes de transport inhérentes est normalement long (de 7 à 10 ans) à cause des études environnementales nécessaires à l'approbation des projets, l'expropriation des terrains, le dimensionnement et enfin la construction. Par contre, le temps d'installation d'une production décentralisée peut être assez court, jusqu'à moins de 6 mois.
- Les grandes centrales ont besoin d'infrastructures spéciales comme des routes pour fournir les équipements. Des lignes électriques dédiées sont quelquefois nécessaires pour fournir l'énergie durant les travaux.
- Le risque des investissements est moins critique dans le cas de la production décentralisée due à l'indépendance du prix des matières primaires, hors cogénération; cela a d'ailleurs été confirmé pendant la crise de 1979. Par ailleurs, la production décentralisée peut être placée là, où il y a un besoin d'énergie et elle suppose donc une réduction des pertes et un risque financier réduit.
- La dérégulation ou libéralisation ont élargi le cercle des acteurs de production décentralisée. Et même si pour l'instant, ce sont le mécanisme de subvention qui fait vivre la filière, cela représente un effet moteur pour les petites entreprises et l'économie du pays. Des accords éventuels entre petits producteurs pourraient former une offre globale dans le marché de l'énergie et activer les mécanismes de concurrence.
- Le temps pour mettre en service l'énergie est bien plus réduit que dans le cas de la production centralisée parce que la capacité de régulation de la production centralisée est bien plus restreinte. Ainsi les centrales nucléaires ont une capacité réduite de régulation et ils doivent, de ce fait, fonctionner dans une plage étroite par rapport à la puissance nominale,  $S > 85\% S_n$
- Toutefois, la production décentralisée ne peut être une alternative à elle seule car des impacts négatifs peuvent apparaître

**II.4 Différents types de la production décentralisée**

Il existe plusieurs technologies de productions d'énergies électriques raccordées au réseau de distribution. Celles-ci diffèrent cependant de par leur puissance ou encore de par le type de carburant qu'elles utilisent comme le gaz naturel, l'hydrogène, le diesel ou encore des énergies dites renouvelables comme le soleil ou le vent. Ces technologies de productions se différencient également par leur méthode de raccordement au réseau. D'une part, il y a les DGs utilisant un alternateur synchrone ou asynchrone directement connecté au réseau, d'autre part celles utilisant un interfaçage d'électronique de puissance, comme dans le cas des piles à combustibles ou des panneaux solaires.

On distingue ainsi les types suivants [19]

**II.4.1 Energies non renouvelables**

Energies fossiles (gaz, charbon, pétrole) : les technologies utilisant ces énergies primaires sont nombreuses et bien éprouvées, ce qui leur confère un grand intérêt économique. Les principales technologies sont:

**II.4.1.1 Thermique à flamme**

Basé sur des turbines ou micro turbines à vapeur.

**II.4.1.2 Moteurs à combustibles fossiles**

Les turbines à gaz et les groupes diesel sont des moyens de productions utilisant une génératrice synchrone pour transformer l'énergie mécanique développée par celles-ci en énergie électrique. Ce type de production est le plus souvent envisagé pour des cogénérations de quelques mégawatts.

**II.4.1.3 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. Les puissances disponibles de ce type de source varient en fonction de la technologie d'électrolyte considéré, de quelques kilowatts à quelque mégawatt.

**II.4.2 Ressources énergétiques renouvelables**

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. D'ici 20-30 ans, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables. Naturellement décentralisées, il est intéressant de les exploiter sur le lieu de

consommation, en les transformant directement soit en chaleur, soit en électricité selon les besoins. La production d'électricité décentralisée par sources d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement.

Cependant le caractère aléatoire de ces sources nous impose d'établir des règles de dimensionnement et d'utilisation de ces systèmes pour les exploiter au mieux.

Les générateurs d'origine renouvelable sont les générateurs dont la source primaire est inépuisable ce n'est pas le cas pour les combustibles fossiles et nucléaires.

L'utilisation des énergies renouvelables n'est pas nouvelle. Celles-ci sont exploitées par l'homme depuis la nuit des temps. Autrefois, moulins à eau, à vent, bois de feu, traction animale, bateau à voile ont largement contribué au développement de l'humanité. Elles constituaient une activité économique à part entière, notamment en milieu rural où elles étaient aussi importantes et aussi diversifiées que la production alimentaire. L'avantage principal de ces énergies est le fait qu'elles soient propres, c'est-à-dire, qu'elles supposent avoir un faible impact environnemental.

Leur principale limitation est leur caractère intermittent car la puissance de sortie dépend en tout instant de la disponibilité de la source primaire. On peut citer l'hydro-électricité, la biomasse, la valorisation des déchets et sous produits industriels, la géothermie, etc. mais les générateurs d'origine renouvelable les plus répandus (sources primaire réparties et disponible largement) et les mieux adaptés sont les générateurs éoliens et les générateurs photovoltaïques.

Les principales technologies existe pour les ressources énergétiques renouvelable sont:

### II.4.2.1 Hydraulique

Les centrales hydrauliques fonctionnent grâce à l'énergie potentielle de pesanteur de l'eau des rivières, des lacs ou des fleuves. Celle-ci est transformée en énergie électrique par un alternateur entraîné par une turbine mue par la force de l'eau qui est due soit à la hauteur de chute dans le cas de centrales alimentées par une conduite forcée, soit au débit dans le cas de centrales au fil de l'eau. L'énergie hydraulique est de loin l'énergie renouvelable la plus répandue puisqu'elle est également utilisée dans la production centralisée.

### II.4.2.2 Eolien

Les aérogénérateurs, ou éoliennes, tirent leur énergie du vent qui est transmise par le rotor et le multiplicateur de vitesse à une génératrice. Cette source d'énergie, qui commence à atteindre sa maturité technologique, est de plus en plus répandue grâce à son fort attrait écologique. Elle est passée devant la production géothermique au niveau mondial en 2000.

### II.4.2.3 Géothermie

Les centrales géothermiques utilisent la chaleur de nappes d'eau souterraines qui peuvent atteindre 350 °C dans les zones les plus favorables. Cette eau chaude est pompée vers la surface pour passer dans des échangeurs. La vapeur produite est turbinée dans une installation thermique classique.

### II.4.2.4 Solaire photovoltaïque

Les panneaux solaires convertissent directement l'énergie reçue par rayonnement solaire en énergie électrique à courant continu. Ils sont très utilisés pour l'alimentation de sites isolés (non connectés au réseau) en association avec un système de stockage.

### II.4.2.5 Solaire thermique

Les centrales solaires thermiques sont des centrales thermiques utilisant des turbines à vapeur, celle-ci étant produite par chauffage de l'eau via un fluide caloporteur en utilisant le rayonnement solaire concentré sur un échangeur par des miroirs paraboliques.

### II.4.2.6 Biomasse et déchets

Certaines centrales thermiques à flamme utilisent comme source primaire des combustibles issus de la biomasse (bois, biogaz, paille, déchets organiques, etc.) ou de déchets industriels et domestiques.

### II.4.2.7 Marémotrice

Les centrales marémotrices peuvent s'apparenter à des centrales hydrauliques au fil de l'eau à ceci près que les turbines sont réversibles pour profiter du flux et du reflux des marées. Cette source d'énergie, malgré sa disponibilité considérable, reste anecdotique car elle nécessite la construction de barrages qui modifient les sites côtiers en causant un ensablement ou un envasement du site.

### II.4.2.8 Hydrolienne

Les centrales hydroliennes utilisent l'énergie cinétique de la houle dont l'énergie provient du vent. De nombreuses solutions techniques ont été imaginées, mais l'hostilité du milieu sous-marin compromet sérieusement leur développement à l'heure actuelle.

Après ce bref bilan des ressources énergétiques exploitables, on va s'intéresser aux systèmes de production existants, en particulier relatifs aux sources éoliennes et solaires.

### **II.4.3 Energie solaire photovoltaïque**

L'énergie solaire photovoltaïque, bien que de plus en plus utilisée, reste aujourd'hui une énergie marginale. Malgré les progrès qui ont été réalisés sur le coût des modules photovoltaïques (divisés par quatre depuis 1980), l'énergie solaire reste une énergie chère et donc peu développée.

Le rendement énergétique (rapport entre l'énergie électrique créée et l'énergie solaire reçue) est actuellement d'environ 10 à 15 %.

Les centrales solaires sont encore rares (quelques démonstrateurs). Les principales applications sont de petite taille et sont réalisées pour des besoins bien spécifiques.

L'unité caractérisant la puissance photovoltaïque est le watt-crête (Wc). C'est la puissance délivrée par un module photovoltaïque dans les conditions de référence (intensité lumineuse de 1 kW/m<sup>2</sup>, température de 25°C). La tension de sortie est en général 12 ou 24 V en courant continu.

Le composant de base de la conversion lumière du soleil / énergie électrique est la cellule photovoltaïque. Une cellule photovoltaïque (PV) ne permet pas, par ses caractéristiques électriques (tension unitaire de 0,5 V et puissance voisine de 1,5 W), d'alimenter des appareils électriques dont les tensions sont normalisées (230 V). Ainsi, un certain nombre de cellules est relié pour obtenir un module photovoltaïque qui atteint en général une puissance de 50 Wc. Des modules sont ensuite connectés pour obtenir un panneau solaire atteignant la puissance souhaitée [20].

#### **II.4.3.1 Technologies des cellules solaires**

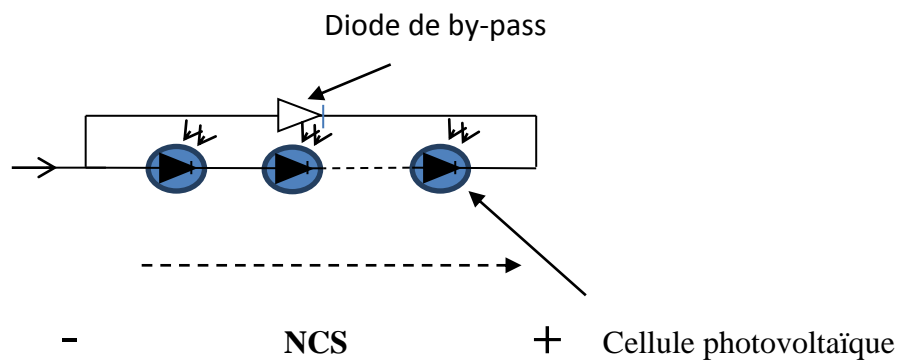
Les matériaux photovoltaïques se scindent en deux grandes familles, les matériaux solides cristallisés et les couches sublimes. Ces couches sublimes sont également solides, mais d'épaisseur nettement plus faible (de l'ordre du micron et en deçà) et déposées sur un support, alors que les photopiles cristallines sont massives et épaisses de 0.15 - 0.4 mm les cellules les plus répandues actuellement sont à base de silicium (différence de potentiel de 0,6 V). Il existe deux grands types de silicium qui sont le silicium cristallin et le silicium amorphe [21].

**II.4.3.2 Structure des panneaux photovoltaïques**

Généralement les cellules photovoltaïques sont associées pour constituer un panneau. Ces derniers sont regroupés en série ou bien en parallèle selon la puissance demandée pour protéger les modules PV contre le point chaud (hot-spot) à cause d'un déséquilibre d'éclairement [21].

➤ **Une série de cellules photo voltaïques (sous module ou branche)**

On dénomme sous module ou bien branche l'ensemble de cellules en séries connectées en parallèle avec une diode de protection (Figure .II.1)

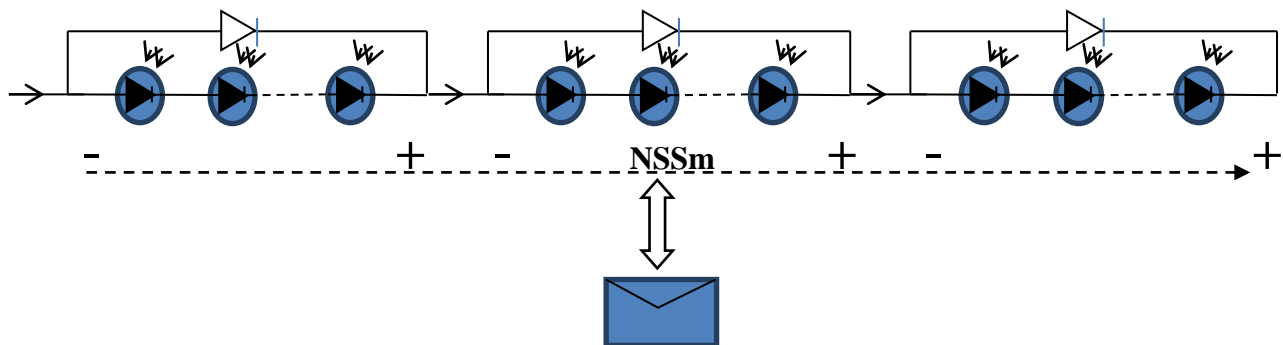


Avec : Ncs nombre de cellules en séries.

**Figure .II.1.** Sous module constitué de Ncs cellules connectées en séries

➤ **Module (panneau) photovoltaïque**

Le module est constitué d'un groupe de sous modules connectés en série (figure .II.2) pour avoir une tension plus ou moins élevée.



Nssm : Le nombre total des sous-modules connectés en série.

**Figure .II.2.** Module constitué de Nssm sous modules montés en séries

La figure II.3. présent le cycle de la matière brute jusqu'au le système photovoltaïque



Figure .II.3. Cycle de la matière brute au système photovoltaïque [22]

### II.4.3.3 Avantages et inconvénients d'une installation PV

Tous systèmes de production d'énergie à ses avantages et ses inconvénients [23]

#### ➤ Avantages

- D'abord, une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- ensuite, le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milli-Watt au Méga-Watt.
- le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.

- la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, sice n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

➤ **Inconvénients**

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 %, avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour les faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1 eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur.
- tributaire des conditions météorologiques.
- lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.
- le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.

#### **II.4.3.4 Installations des systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique**

Il existe différentes topologies de gestion de ces installations. Néanmoins, toutes ces approches reposent sur un GPV raccordé au réseau par le biais d'onduleurs qui transfèrent et mettent en forme l'énergie solaire électrique. Les progrès effectués ces dernières années dans le développement des onduleurs dédiés aux photovoltaïques ont permis de faire évoluer grandement ces systèmes de gestion.

Les onduleurs ne se limitent plus seulement à transformer la puissance continue (DC) générée par les panneaux solaires en puissance alternative sous forme d'une tension sinusoïdale de fréquence souhaitée (par ex. 230V/400V - 50Hz) mais ils exploitent également la puissance délivrée par le GPV en le forçant à fonctionner à son point de puissance maximum. De plus, ils assurent une surveillance fiable du réseau pour protéger ce dernier contre les pannes et interrompre l'alimentation en cas de problèmes survenant soit du réseau soit de l'installation. Actuellement, il existe principalement trois architectures d'onduleurs donnant de bonnes

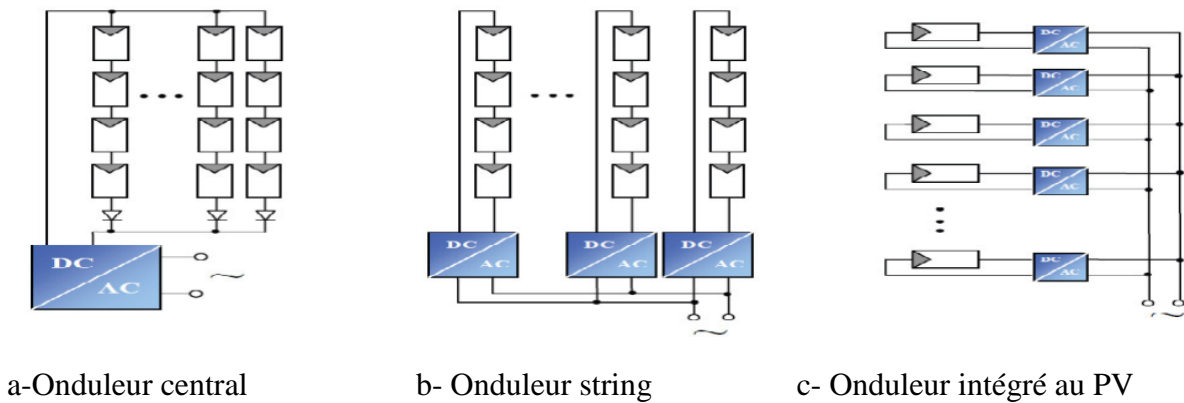
solutions techniques : l'onduleur central, les onduleurs strings et les onduleurs intégrés aux panneaux. Nous décrivons brièvement leur propriété ci-dessous [24].

- **L'onduleur central** : dans le cas d'onduleur central, les divers panneaux solaires pour une grande installation (>10kW) sont montés en rangées pour former une chaîne (String en anglais), elle-même couplée en parallèle avec des diodes anti-retours à plusieurs autres (Figure .II.4.a). Le générateur PV de forte puissance ainsi structuré est relié du côté DC à un seul onduleur. Cet onduleur central présente une grande efficacité énergétique à des coûts réduits. La fonction principale de cet appareil est de créer une tension alternative à partir d'une tension continue la plus compatible avec le réseau et d'examiner en permanence la présence ou non du réseau pour autoriser l'injection du courant. La structure classique de l'onduleur est souvent un circuit en pont permettant de relier chacun des deux pôles d'entrée à chacun des deux pôles de sortie par le biais d'interrupteurs de puissance.
- **Les onduleurs string** : de même que pour l'onduleur central, le champ PV est, ici aussi constitué de strings (chaînes). Chaque string est toutefois relié à un onduleur (Figure .II.4.b) Chaque string peut ainsi fonctionner à son PPM. Cette technologie réduit considérablement le risque de problèmes d'adaptation ainsi que les pertes dues aux effets d'ombrage, tout en éliminant celles occasionnées par les diodes anti-retour et un câblage prolongé vers le générateur DC. Ces propriétés techniques avantageuses accroissent la fiabilité de l'installation ainsi que sa production énergétique.

Mais il faut prendre en compte l'augmentation du nombre d'onduleurs de moyenne puissance disposant de rendement compris entre 92% et 96% nécessaires pour calculer le surcoût d'une telle architecture par rapport à la précédente.

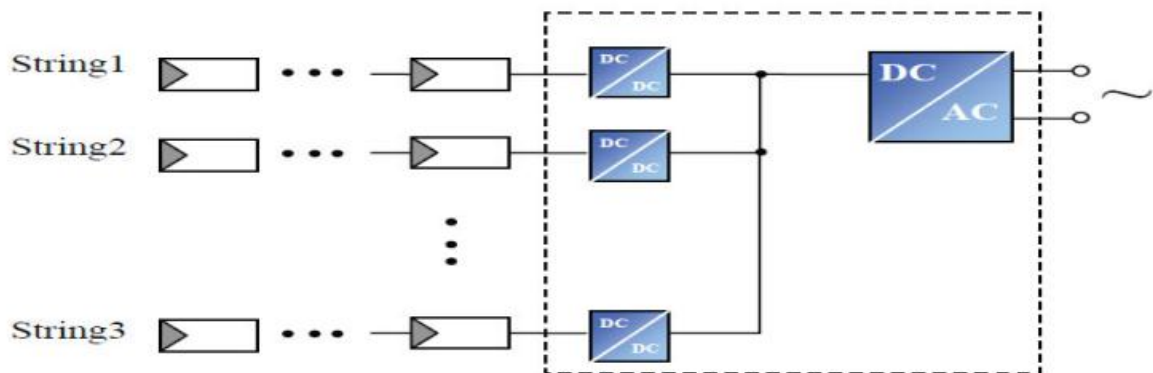
- **Les onduleurs intégrés aux panneaux photovoltaïques** : chaque panneau dispose ici de son propre onduleur (Figure .II.4.c), ce qui permet théoriquement d'éviter toutes pertes liées à la différence de puissance entre chaque module quelle que soit l'origine du défaut. Le rendement des onduleurs intégrés aux panneaux reste cependant en-deçà de celui de l'onduleur string à cause de la grande différence des tensions entre les GPV et la charge. De plus, les onduleurs intégrés aux panneaux induisent des coûts de câblage supplémentaires du côté AC, étant donné que chaque panneau de l'installation doit être relié au réseau 230 V. Le nombre nettement supérieur d'onduleurs intégrés aux panneaux nécessaires dans cette architecture entraîne un travail de couplage nettement plus conséquent.

Ce concept ne s'applique donc généralement qu'aux installations PV d'une puissance modeste allant de 50 W à 400 W.



**Figure .II.4.** Différentes topologies d’installations PV connectés à un réseau électrique

- La conversion multi-string :** En fait, la gestion multi-string est née de la combinaison entre la gestion par onduleur central et la gestion par strings. Comme illustré en (Figure .II.5), le principe de la conversion multi-string est basé sur de nombreux convertisseurs DC-DC modulables connectés à un onduleur central via un bus continu. Chaque convertisseur DC-DC dispose de sa propre commande MPPT permettant à chaque string de fonctionner à son PPM. Par conséquent, le dysfonctionnement d’un GPV peut être rapidement détecté et localisé. Le fonctionnement de l’ensemble du champ ne sera donc pas affecté par le dysfonctionnement d’un seul GPV. Grâce aux convertisseurs DC-DC, il est possible de travailler sur une plus large gamme de tension PV (tension plus faible en entrée des DC/DC) optimisant ainsi la production photovoltaïque.



**Figure .II.5.** Structure de conversion multi-string mixte

➤ **Critères de choix d'un onduleur solaire**

On a plusieurs critères pour choisir un onduleur solaire certains sont indispensables et d'autres sont optionnelles.

**a) critères indispensables sont**

- Puissance électrique.
- Tension d'entrée.
- Tension de sortie.
- Forme d'onde.

**b) critères optionnels sont généralement**

- Puissance de pic.
- Marge de tension d'entrée.
- Système de Protection.
- Incorporation d'un régulateur de charge (pompage photovoltaïque) [25].

#### **II.4.3.5 Dimensionnement d'une station PV raccordée au réseau électrique**

Il est évident qu'on parle de l'étude et dimensionnement des systèmes GPV, il faut bien choisir le site, la stratégie de l'installation des réseaux électriques et le cout. Dans ce type d'installation Le problème de stockage ne se pose pas, puisque la consommation est directement assurée par la production.

On peut alors dimensionner les panneaux photovoltaïques par rapport à leurs prix et sa surface accordée pour l'implémentation.

➤ **choix du site**

Le site est le lieu géographique dont la source d'énergie se trouve, le gisement solaire est le seul critère pouvant favoriser une région par rapport à une autre. Où un seuil normalisé est acceptable.

La figure .II.6 représente la carte géographique du gisement solaire mondial.

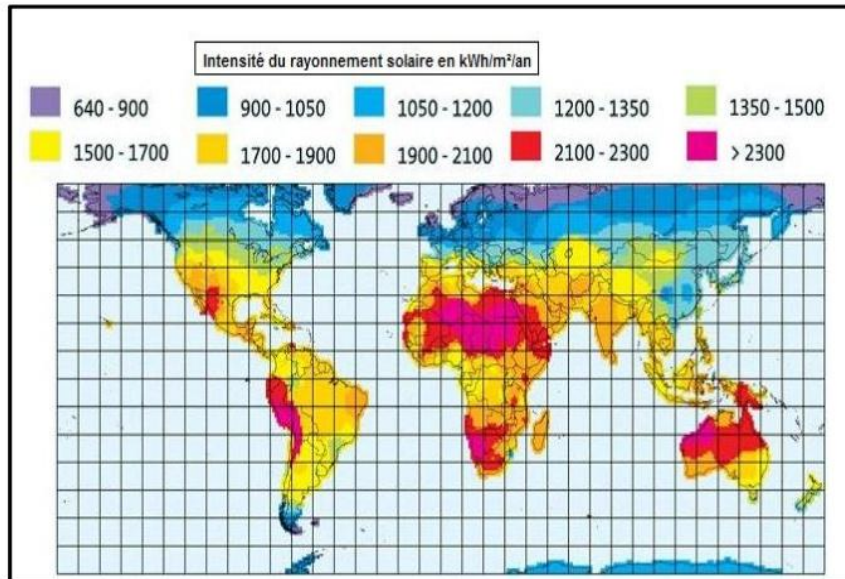


Figure .II.6. Carte géographique d’enseillement mondiale [26]

Suite à une évaluation par satellites, l’Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l’Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169.000 TWh/an pour le solaire thermique, 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque. Le potentiel solaire Algérien est l’équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découverts à Hassi R'Mel.

La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire Algérien est représentée dans le Tableau .II.1 selon l’enseillement reçu annuellement [26].

Tableau .II.1. Potentiel solaire en Algérie

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d’enseillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kWh/m2/an)	1700	1900	2650

Le dimensionnement de ces systèmes se fait suivant les topologies de la superficie donnée pour la station PV à implémenter.

Le sous-champ est l'unité constituant le champ GPV : C'est l'unité de base où on peut adopter la chaîne de production à ce niveau et sans la jonction de coordination à partir du début jusqu'à la fin par :

- **String GPV**

En série  $\sum_{i=1}^n$  (*modules ou panneaux GPV*) (II.1)

- **Structure GPV**

En parallèle  $\sum_{i=1}^n$  (*StringGPV*) où  $n \leq 3$  Max (II.2)

- **Sous-champ GPV**

En parallèle  $\sum_{i=1}^n$  (*StructureGPV*) (II.3)

- **Champ GPV**

En parallèle  $\sum_{i=1}^n$  (*sous – champGPV*) (II.4)

- **Multi- champ GPV**

Enparallèle  $\sum_{i=1}^n$  (*champGPV*) (II.5)

➤ **Nombres de module nécessaire pour une installation PV**

Suite au choix du site lieu qui satisfait le besoin en énergie solaire et en superficie, le nombre des modules dépend de la puissance du sous-champ.

$$N_t(\text{mod}) = \frac{P_c(\text{demander})}{P_n(\text{module})} \quad (\text{II.6})$$

Avec

$N_t$  : nombre des panneaux ou modules.

$P_c$  : la puissance du sous-champ.

$P_n$  : puissance nominale du module PV.

Alors, ils évident qu'on doit fixer ces modules sur des structures supports en face du rayonnement solaire incident ; les structures doit être fascinées en un plan incliné d'un angle  $\beta$  (angle d'inclinaison du panneau solaire sur le site lieu.



**Figure .II.7.** Photo descriptive (structure, string et module ou Panneau) [27]

➤ **Nombre de structure**

Le calcul du nombre de structures dépend du nombre de strings et du nombre des modules parallèles, le nombre de strings sera déterminé par la tension choisie suivant les critères du choix de l'onduleur car la puissance demandée est variable dans le cas d'une centrale, le nombre de modules en parallèles dépend de la puissance de sortie de cette structure. Il est nécessaire de connaître la tension d'entrée et de sortie de l'onduleur [27].

• **Nombre de modules par string**

Dépend de la tension de la structure et de sa puissance :  $V(\text{str}) \text{ volts} \leq [V_{\min}, V_{\max}]$ , qui est imposée par l'onduleur  $V_{(\text{ond})}$ .

$$N(\text{mod}/\text{string}) = \frac{V(\text{str})}{V(\text{mod})} \quad (\text{I.7})$$

• **Nombre de modules par structure**

La structure contient :

$$N(\text{mod}/\text{structure}) = N(\text{mod}/\text{string}) \times N(\text{string}/\text{str}) \quad (\text{I.8})$$

- **Nombre de structures:** Etant connu le nombre des modules par structure, on peut calculer le nombre des structures nécessaire pour satisfaire la puissance demandée.

$$N(\text{str}) = \frac{N_t(\text{mod})}{N(\text{mod}.\text{str})} \quad (\text{I.9})$$

Avec

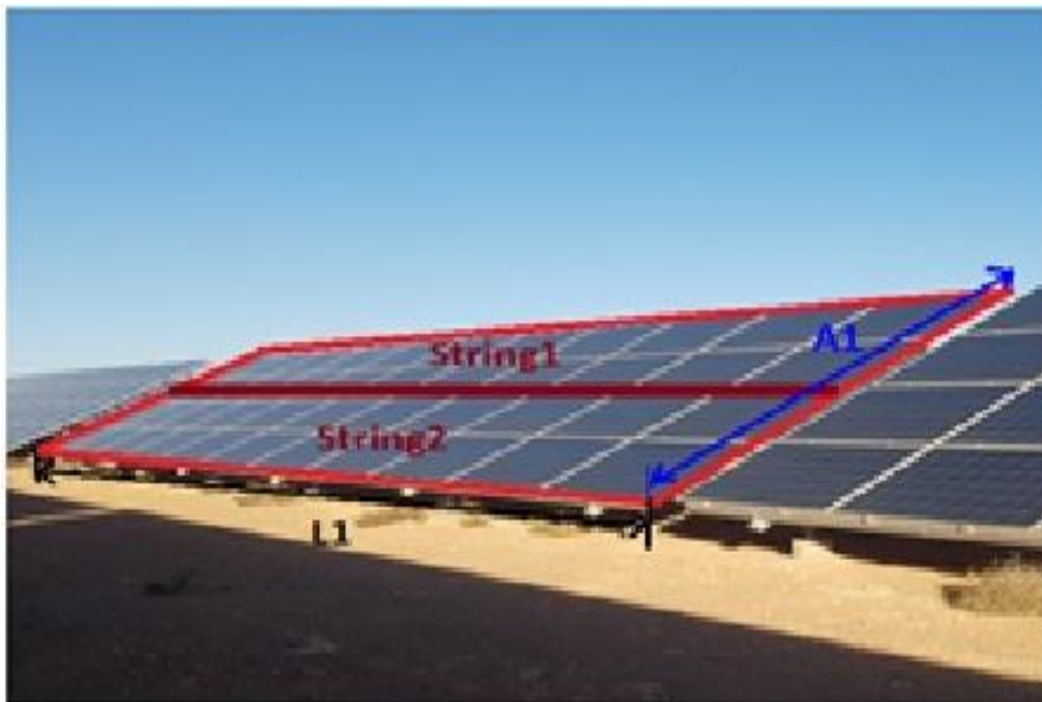
$V_{(str)}$ : tension de sortie de structure.

$V_{(mod)}$ : tension nominal du module.

$N_{(mod/string)}$ : nombre de modules par string.

$N_{(string/str)}$ : nombre de string par structure.





$N_{(str)}$  : nombre de structures.



**Figure .II.8.** Photo descriptive (string, L1, A1) [27]

Les Productions décentralisées disponibles en Algérie sont détaillés dans le tableau. II.2

Tableau .II.2 . Productions décentralisées disponibles en Algérie [9]

Types de production décentralisée disponible en Algérie.	
	
<p>Turbine à gaz mobile</p>	<p>Groupe diesel</p>
	
<p>Turbine éolienne</p>	<p>Source photovoltaïque</p>
	
<p>Turbine hydraulique</p>	

### II.5 Importance des productions décentralisées

Le système électrique traditionnel dépend uniquement de la production centralisée, mais l'arrivée des DGs présente de nombreux avantages, qui se résument comme suit [9]

- Réduction des pertes de transmission : Généralement, les DGs sont localisés près de la consommation. Par conséquent, nous pouvons éviter la transmission coûteuse et inefficace de l'énergie sur de longues distances. Etant donné qu'un réseau électrique est nécessaire pour acheminer l'énergie là où elle est consommée, les coûts d'installation et de maintenance du réseau électrique sont élevés. D'autre part, le transport de l'énergie sur de longues distances provoque des pertes importantes au niveau des lignes de transmission. Pour cela la production et la distribution au niveau local peuvent améliorer l'efficacité du réseau électrique et réduire les coûts.
- Diminution de la demande de pointe : En raison de la production du côté des consommateurs, les DGs peuvent réduire la demande de pointe d'un réseau électrique. C'est une solution efficace au problème des pics de consommation élevés.
- Impacts sur l'économie et les communautés locales : Les productions décentralisées renouvelables produisent de l'énergie localement, ce qui crée des possibilités d'emploi au sein de la communauté locale. Habituellement, les DGs offrent plus de possibilités d'emploi que les centrales électriques traditionnelles (productions centralisées). Les DGs peuvent se développer dans des espaces non utilisés comme les stationnements, les terrains inutilisés et les toits. Par conséquent, ils ne nécessitent pas des coûts associés à la construction de grandes centrales électriques sur des terrains non aménagés. De plus, les DGs peuvent jouer un rôle important dans l'approvisionnement en électricité aux régions éloignées et inaccessibles qui développent l'économie des collectivités éloignées. De plus, les maisons intelligentes gagnent en intérêt en tant que DG. La maison reçoit de l'électricité du réseau électrique lorsque la production est inférieure à la puissance demandée. D'autre part, la maison peut transmettre de l'électricité au réseau électrique lorsque la production est supérieure à la puissance demandée. Par conséquent, le propriétaire d'une maison peut bénéficier de la vente d'électricité supplémentaire à la compagnie d'électricité.
- Réponse plus rapide aux nouvelles demandes de puissance: La production centralisée nécessite un long temps d'installation pour répondre aux nouvelles exigences. Cependant, les DGs sont de petite taille et nécessitent souvent une période d'installation plus courte, ce qui permet une réponse plus rapide lorsque des demandes de puissance supplémentaires sont requises.

- Amélioration de la sécurité énergétique : Les DGs offrent une plus grande sécurité énergétique que les productions centralisées en cas des conditions météorologiques extrêmes, de catastrophes naturelles, d'erreurs humaines et d'actes de terrorisme. Si les productions centralisées s'effondrent, il peut y avoir un énorme black-out dans la grande zone résidentielle et cela devient néfaste pour les habitants.
- Amélioration de la fiabilité de l'alimentation et de la gestion d'énergie : Chaque DG du système électrique est contrôlée par l'utilitaire indépendant du système de réseau qui offre une maintenance facile de l'alimentation, de la tension et de la fréquence. Il offre également la possibilité de combiner des systèmes de stockage et de gestion de l'énergie avec une obstruction réduite.
- Amélioration du réseau électrique : Un réseau intelligent peut soutenir des niveaux élevés d'énergie renouvelable, ce qui réduit notre dépendance aux combustibles fossiles et les émissions de gaz à effet de serre. Un réseau électrique moderne incorporant de l'énergie locale propre peut supporter pleinement les flux électriques.

### II.6 Impacts de la production décentralisée sur le réseau de distribution

On trouve dans la littérature plusieurs études qui ont été faites afin d'identifier et d'évaluer les impacts de la production décentralisée sur le réseau de distribution. L'opérateur du réseau se préoccupe de ce type d'étude lors de la phase de planification ou de l'approbation d'un projet de raccordement des DGs.

Les principaux impacts à rappeler sont les suivants [16]

#### II.6.1 Impacts sur le sens de transit de puissance

Les réseaux sont dimensionnés pour recevoir les flux d'énergie du réseau de transport vers la distribution. L'insertion des DGs dans les niveaux de tension autres que le réseau de transport peut créer une injection de puissance dans le sens contraire, c'est-à-dire de la distribution vers le transport. Les équipements, notamment les protections doivent alors être bidirectionnelles. Ainsi, sachant que les réseaux aux niveaux de tension inférieure sont normalement surdimensionnés afin de faire face à l'accroissement de consommation, on n'aura peut-être pas, à court terme, de problèmes liés à des limites de la capacité de transfert d'énergie ; mais à plus long terme, lorsque le taux de pénétration de DG augmentera, la modification du sens de transit de puissance pourra éventuellement provoquer des congestions locales.

**II.6.2 Impacts sur le profil de tension**

On sait que les nœuds proches d'une source ont une tension plus élevée, la tension diminuant au fur et à mesure que l'on s'en éloigne. La connexion de sources de DG à proximité des charges modifiera donc naturellement le profil de tension sur le réseau.

**II.6.3 Impacts sur la stabilité du système**

Les génératrices de productions décentralisées peuvent être de type synchrone ou asynchrone. L'insertion de générateurs synchrones dans le réseau va changer le temps critique d'élimination de défaut (correspondant à la durée maximale d'une perturbation à la quelle le système peut résister sans perte de stabilité). Ceci influencera directement la limite de la stabilité dynamique du système en considération.

**II.6.4 Impacts sur le plan de protection**

La connexion de nouveaux générateurs au réseau modifiera également les courants de courts-circuits et donc le réglage des seuils des protections.

D'ailleurs, ce changement peut provoquer une mauvaise sélectivité, des déclenchements intempestifs ou l'aveuglement du système de protection.

**II.6.5 Impacts sur l'observabilité et de contrôlabilité du système**

Les DGs, notamment celles à type énergie nouvelle et renouvelable, sont caractérisées par l'intermittence des sources primaires. Cela sera difficile pour l'opérateur d'estimer la puissance de sortie de ces producteurs, donc la puissance fournie du système, par conséquent.

**II.6.6 Impacts sur la continuité de service**

Pour la même raison concernant la caractéristique d'intermittence, l'indisponibilité des DGs lors que le système les sollicite peut occasionner la rupture d'électricité par manque de puissance.

**II.6.7 Impacts sur la qualité de service**

Les DGs de type asynchrone consomment de la puissance réactive afin de magnétiser leur circuit magnétique. Lors de la connexion au réseau, elles appellent un courant fort, ce qui contribue au creux de tension (en profondeur).

D'ailleurs, la présence d'interfaces d'électronique de puissance peut faire augmenter le taux des harmoniques qui nuisent gravement à la qualité de service fournie.

**II.7 Conclusion**

Ce chapitre s'est intéressé aux différentes centrales de production d'énergie électrique dispersées, où nous avons présenté les types de ressources renouvelables et classiques.

Ensuite nous avons viré vers une installation type: PV dont nous avons proposé un exemple de calcul concernant le dimensionnement de cette dernière. Dans le but de l'utiliser dans ce qui suit de cette étude.

De plus, nous avons donné un abrégé sur les effets et les influences de ces DGs intégrées aux réseaux de distributions.

# **Chapitre III**

## **Applications et interprétations**

**III.1 Introduction**

Dans ce chapitre et pour traiter le problème de l'emplacement, et la taille optimale ainsi que le dimensionnement de la DG du type PG pour l'intégrer dans un réseau de distribution choisi, nous allons utiliser comme outils de simulation l'environnement MATLAB. Nos applications seront portées sur des réseaux de distribution IEEE standard : 33 et 69 nœuds. Tout en utilisant les données du gisement solaire de la région de LAGHOUAT.

Pour déterminer l'emplacement et le dimensionnement optimal des DGs, il est nécessaire de considérer quelques contraintes présentées dans le premier chapitre.

Toutes les simulations qui suivent ont été exécutées par un programme de calcul effectuant le PF par la méthode BFS puis par un OPF utilisant le PSO comme méthode d'optimisation, notons que ces deux méthodes sont présentées dans le premier chapitre.

Rappelons que ces calculs sont accomplis sous l'environnement MATLAB pour deux réseaux proposés et selon différents cas, à savoir:

Cas 01 : Un PF du réseau IEEE 33bus avec sa charge nominale.

Cas 02 : Un PF du réseau IEEE 33bus surchargé à 50%.

Cas 03 : Un OPF du réseau IEEE 33bus avec sa charge nominale.

Cas 04 : Un OPF du réseau IEEE 33bus surchargé à 50%.

Cas 05 : Un PF du réseau IEEE 69bus avec sa charge nominale.

Cas 06 : Un OPF du réseau IEEE 69bus avec sa charge nominale.

### III.2 Réseau de distribution IEEE 33-bus

Les caractéristiques du réseau de distribution IEEE 33-bus de la figure .III.1 sont données comme suit :

Nombre de jeux de barres =33;

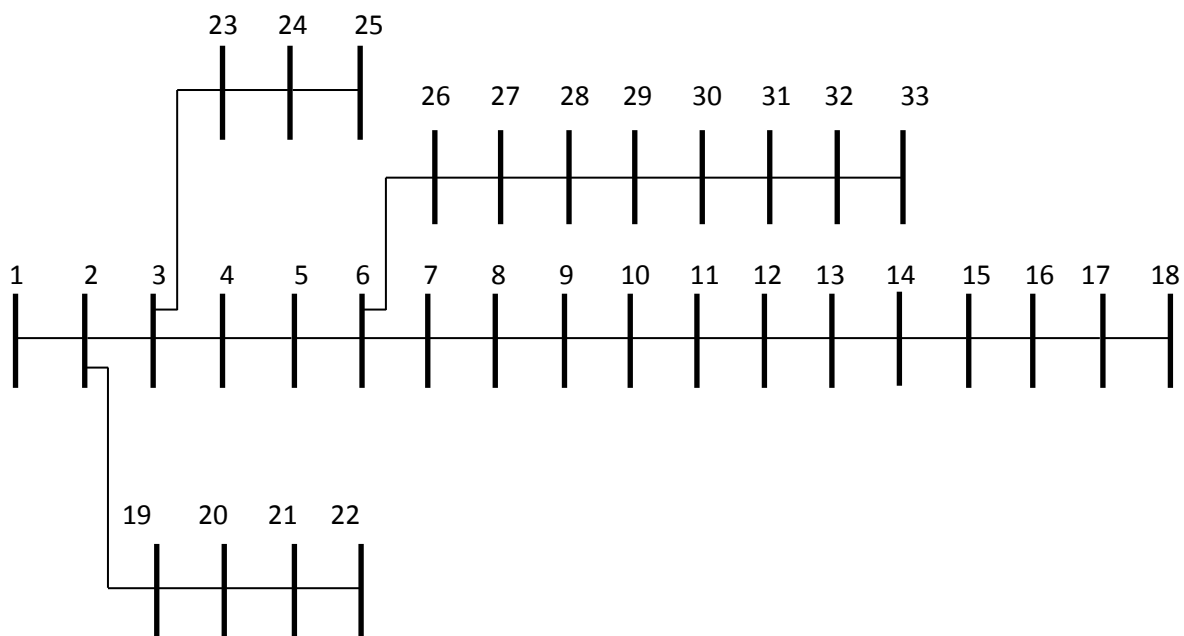
Nombre de branches =32;

Jeu de barres de référence N° =1;

Tension de base =12,66kV;

Puissance de base = 10MVA.

Les données du réseau test sont présentées dans l'annexe.



**Figure .III.1.** Représentation simplifiée du réseau de distribution IEEE 33-bus

## ➤ Résultats des calculs du cas 01

Tableau .III.1. Solution de l'écoulement de puissances du cas 01

JB	Tension V (Pu)	Phase $\varphi$ (rad)	JB	Tension V (Pu)	Phase $\varphi$ (rad)	JB	Tension V (Pu)	Phase $\varphi$ (rad)
1	1.0000	0.0000	12	0.9271	-0.0032	23	0.9794	0.0012
2	0.9970	0.0003	13	0.9210	-0.0048	24	0.9727	-0.0004
3	0.9830	0.0017	14	0.9187	-0.0063	25	0.9694	-0.0012
4	0.9755	0.0029	15	0.9173	-0.0069	26	0.9479	0.0032
5	0.9682	0.0041	16	0.9160	-0.0074	27	0.9453	0.0043
6	0.9498	0.0025	17	0.9140	-0.0088	28	0.9339	0.0059
7	0.9463	-0.0015	18	0.9134	-0.0089	29	0.9257	0.0074
8	0.9415	-0.0009	19	0.9965	0.0001	30	0.9222	0.0093
9	0.9352	-0.0023	20	0.9929	-0.0011	31	0.9180	0.0079
10	0.9294	-0.0035	21	0.9922	-0.0015	32	0.9171	0.0075
11	0.9286	-0.0033	22	0.9916	-0.0018	33	0.9168	0.0074

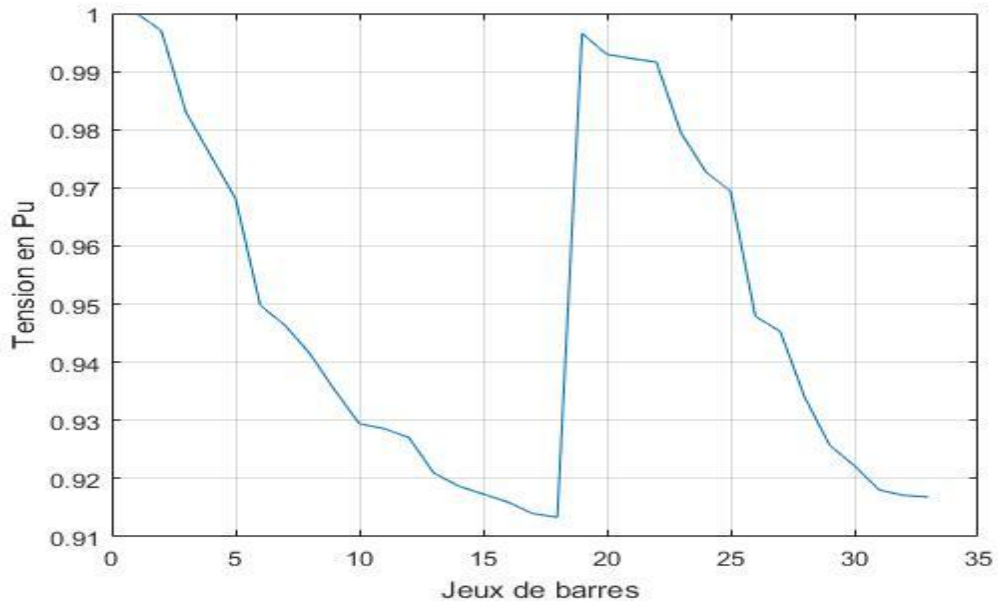


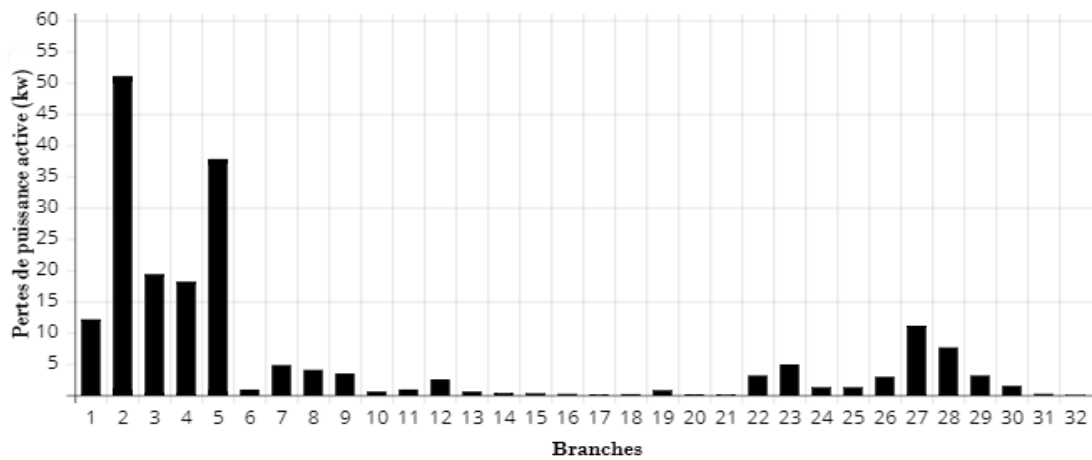
Figure .III.2. Tension à chaque jeu de barres du cas 01

Tableau .III.2. Pertes de puissances active et réactive du cas 01

Branche	Pertes active (kW)	Pertes réactive (kVar)	Branche	Pertes active (kW)	Pertes réactive (kVar)
1	12.1004	6.1683	17	0.0495	0.0388
2	51.0319	25.9921	18	0.1426	0.1361
3	19.3331	9.8461	19	0.7512	0.6769
4	18.1449	9.2415	20	0.0819	0.0957
5	37.7742	32.6085	21	0.0333	0.0440
6	0.8563	2.8306	22	3.1121	2.1265
7	4.7728	1.5773	23	4.8886	3.8603
8	4.0125	2.8828	24	1.2252	0.9587
9	3.4369	2.4361	25	1.2252	0.9587
10	0.5447	0.1801	26	2.9023	1.4777
11	0.8696	0.2875	27	11.0733	9.7631

12	2.5001	1.9670	28	7.5958	6.6173
13	0.5466	0.7195	29	3.1146	1.5865
14	0.2975	0.2648	30	1.4541	1.4371
15	0.2595	0.1895	31	0.1855	0.2162
16	0.1795	0.2397	32	0.0112	0.0174
Pertes de puissance active (kW)				195.5841	
Pertes de puissance réactive (kVar)				127.6563	
Nombre d'itérations				10	

A- Pertes de puissance active.



B - Pertes de puissance réactive.

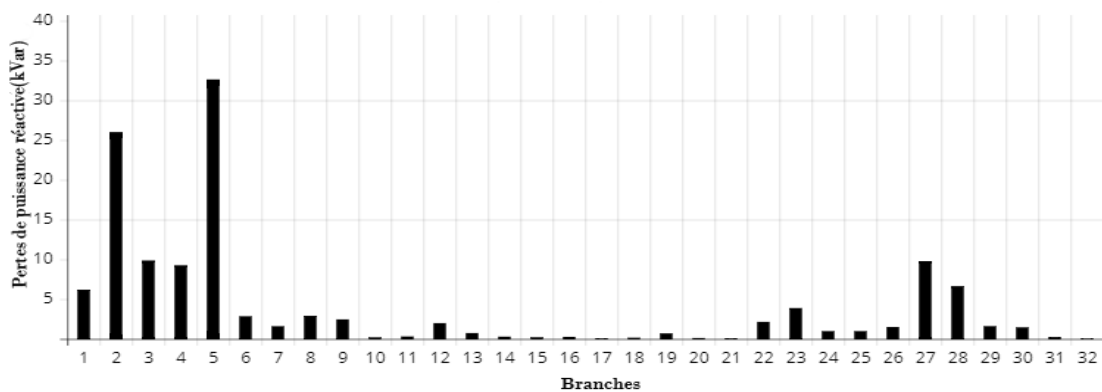


Figure .III.3. Histogramme des pertes de puissance active et réactive du cas 01

Le tableau .III.1. Montre les résultats de l'écoulement de puissance du premier cas. On remarque que la tension maximale est égales à 0.9970 pu au niveau du jeu de barres 2 et la tension minimale est égales à 0.9134 pu au niveau du jeu de barres 18.

Le tableau .III.2. Présente les pertes de puissance active et réactive dans chaque branche du réseau IEEE 33-Bus pour le même cas 01. La plus grande valeur marquée des pertes de puissance active est  $P_{loss_{max}}=51.0319$  kW au niveau de la branche 2 et les pertes réactive  $Q_{loss_{max}}= 32.6085$  kVar au niveau de la branche 5. Les pertes totales active et réactive du réseau sont respectivement 195.5841 KW et 127.6563 kVar.

➤ Résultats des calculs du cas 02

Tableau .III.3. Solution de l'écoulement de puissances du cas 02

JB	Tension V (Pu)	Phase φ (rad)	JB	Tension V (Pu)	Phase φ (rad)	JB	Tension V (Pu)	Phase φ (rad)
1	1.0000	0.0000	12	0.8835	-0.0072	23	0.9677	0.0017
2	0.9953	0.0004	13	0.8739	-0.0101	24	0.9575	-0.0007
3	0.9731	0.0025	14	0.8704	-0.0125	25	0.9524	-0.0019
4	0.9612	0.0043	15	0.8681	-0.0137	26	0.9169	0.0043
5	0.9494	0.0061	16	0.8660	-0.0144	27	0.9129	0.0060
6	0.9199	0.0031	17	0.8628	-0.0168	28	0.8949	0.0088
7	0.9144	-0.0040	18	0.8619	-0.0172	29	0.8820	0.0114
8	0.9063	-0.0033	19	0.9946	0.0001	30	0.8765	0.0146
9	0.8964	-0.0056	20	0.9892	-0.0017	31	0.8698	0.0124
10	0.8873	-0.0076	21	0.9881	-0.0022	32	0.8684	0.0117
11	0.8859	-0.0074	22	0.9872	-0.0028	33	0.8679	0.0115

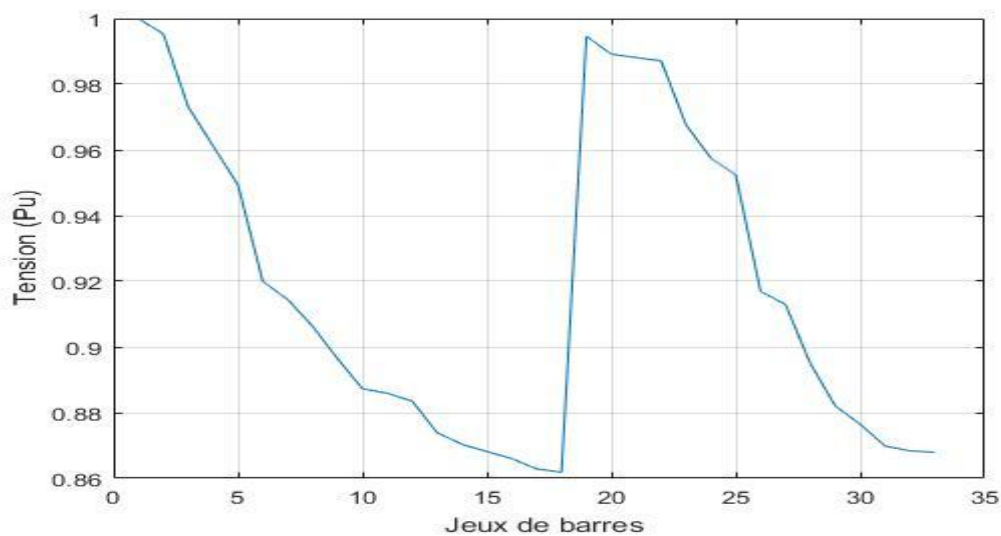
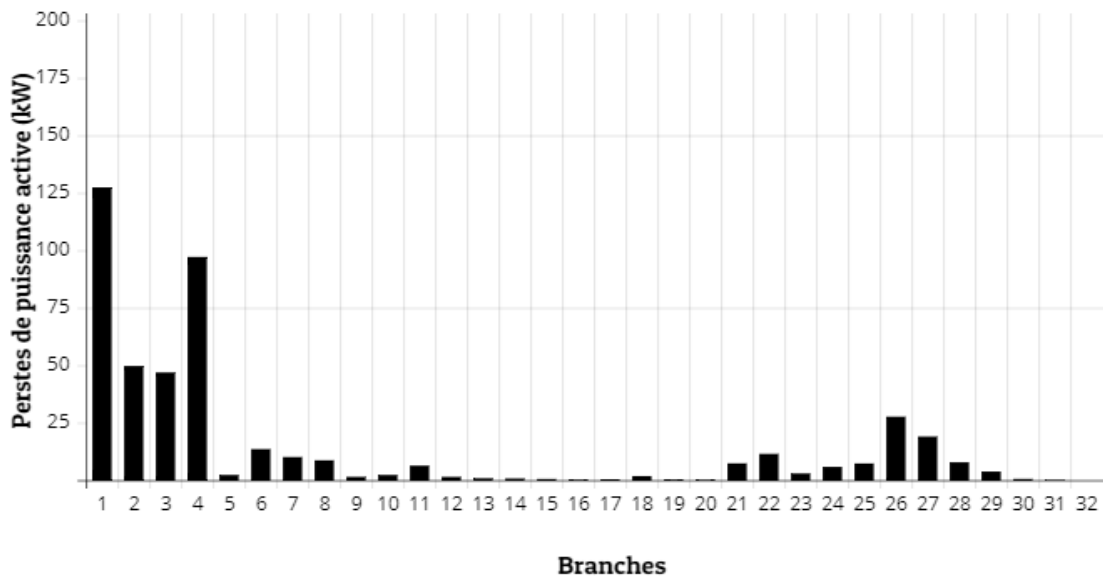


Figure .III.4. Tension à chaque jeu de barres du cas 02

Tableau .III.4. Pertes de puissances active et réactive du cas 02

Branche	Pertes active (kW)	Pertes réactive (kVar)	Branche	Pertes active (kW)	Pertes réactive (kVar)
1	29.8738	15.2285	17	0.1239	0.0971
2	127.3273	64.8517	18	0.3230	0.3082
3	49.6010	25.2613	19	1.7032	1.5347
4	46.7927	23.8322	20	0.1856	0.2168
5	97.0567	83.7840	21	0.0754	0.0997
6	2.1867	7.2284	22	7.2339	4.9429
7	13.4318	4.4389	23	11.3711	8.9791
8	9.9876	7.1756	24	2.8541	2.2333
9	8.5677	6.0729	25	5.6979	2.9023
10	1.3684	0.4524	26	7.1900	3.6608
11	2.1868	0.7231	27	27.5532	24.2932
12	6.2461	4.9143	28	18.9014	16.4664
13	1.3546	1.7831	29	7.7092	3.9267
14	0.7406	0.6591	30	3.6683	3.6254
15	0.6491	0.4740	31	0.4686	0.5462
16	0.4444	0.5933	32	0.0283	0.0440
Pertes de puissance active (kW)				492.9024	
Pertes de puissance réactive (kVar)				321.3497	
Nombre d'itérations				10	

A- Pertes de puissance active.



B - Pertes de puissance réactive.

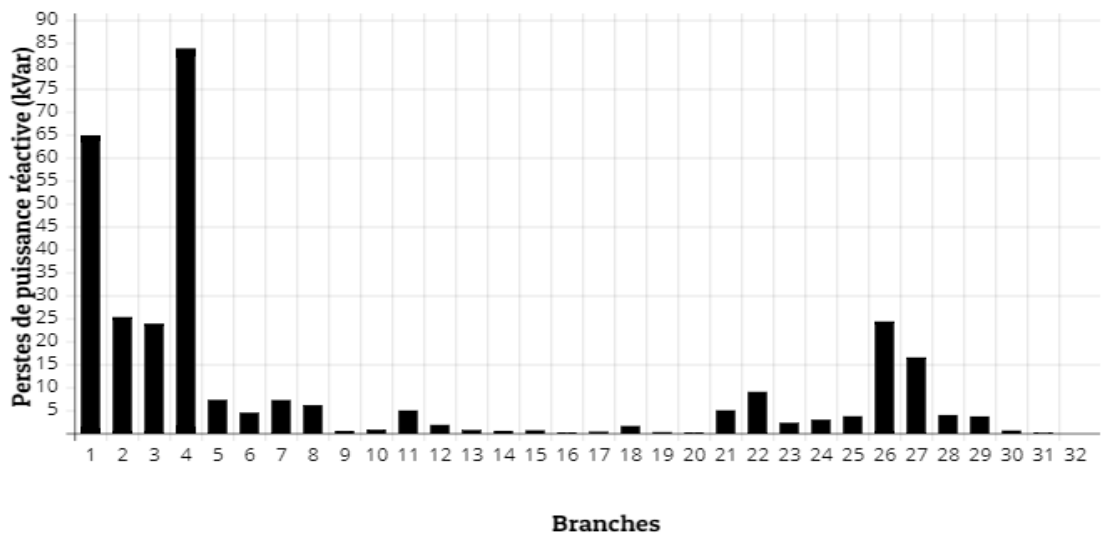


Figure .III.5. Histogramme des pertes de puissance active et réactive du cas 02

Le tableau .III.3 montre les résultats de l'écoulement de puissance du deuxième cas. On observe que la tension maximale est égale à 0.9953 pu marquée au jeu de barre 2 et la tension minimale a basculé à 0.8619 pu au même jeu de barre 18.

Le tableau .III.4 expose les pertes de puissance active et réactive dans chaque branche pour le cas 02. La plus grande valeur des pertes de puissance actives et réactives:  $P_{loss_{max}}=127.3273kW$  et  $Q_{loss_{max}}= 83.7840kVar$  au même branches 2 et 5 respectivement.

Les pertes totales actives et réactives du réseau sont respectivement 492.9024 kW et 321.3497kVar.

➤ Résultats des calculs du cas 03

Le cas suivant, consiste à installer deux DGs, par un OPF pour le calcul des tailles et des emplacements optimaux de ces dernières, la fonction objective de cette optimisation est la minimisation des pertes actives sous plusieurs contraintes. Notons que les résultats obtenus sont suite à une application de l’algorithme à essaim de particules PSO comme méthode d’optimisation choisie.

Paramètres de la méthode PSO appliquée

Pour l’ensemble des cas étudiés nous avons choisis les paramètres de la méthode suivants (Tableau.III.5):

Tableau .III.5. Paramètres de la méthode PSO

Facteurs d’inertie	$w_{min} = 0.4, w_{max} = 0.9$
Facteurs d’accélération	$C_1 = 2, C_2 = 2$
Population	20
Itérations maximal	30

La résolution de l’OPF a aboutie aux valeurs des tailles et des emplacements des DG proposées: 2633.686 kW, au nœud 6 et 741.694 kW au nœud 30.

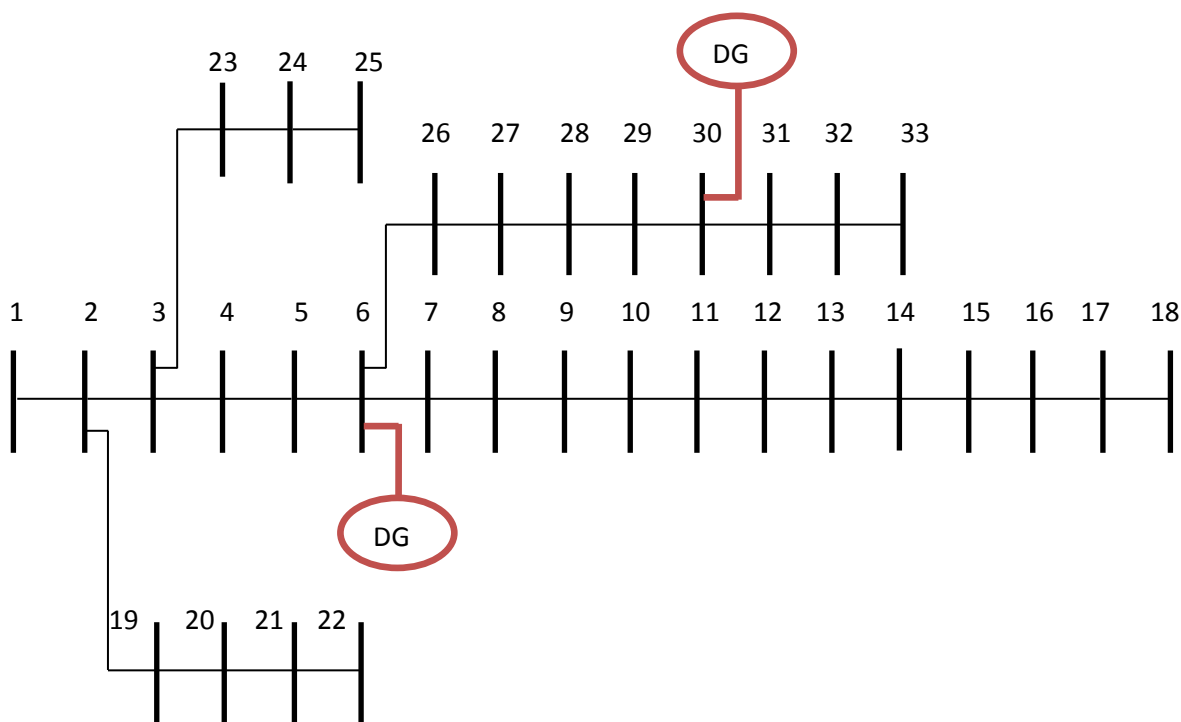
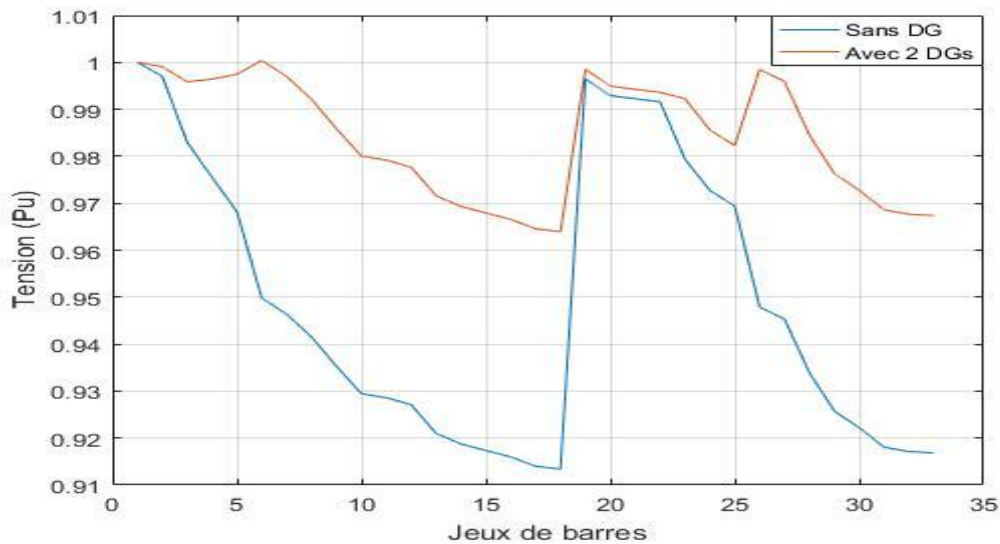


Figure .III.6. Nouvelle représentation du réseau de distribution IEEE 33-bus avec l’insertion optimale de la production décentralisée.

Tableau .III.6. Solution de l'écoulement de puissances du cas 03

JB	Tension V (Pu)	Phase $\varphi$ (rad)	JB	Tension V (Pu)	Phase $\varphi$ (rad)	JB	Tension V (Pu)	Phase $\varphi$ (rad)
1	1.0000	0.0000	12	0.9777	0.0047	23	0.9923	0.0006
2	0.9991	0.0000	13	0.9716	0.0062	24	0.9856	0.0022
3	0.9959	0.0001	14	0.9693	0.0076	25	0.9823	0.0029
4	0.9965	0.0000	15	0.9679	0.0082	26	0.9985	-0.0013
5	0.9975	0.0001	16	0.9666	0.0086	27	0.9959	-0.0022
6	1.0000	-0.0006	17	0.9645	0.0099	28	0.9845	-0.0037
7	0.9970	0.0032	18	0.9639	0.0101	29	0.9763	-0.0050
8	0.9921	0.0026	19	0.9985	0.0002	30	0.9728	-0.0068
9	0.9859	0.0039	20	0.9950	0.0014	31	0.9686	-0.0054
10	0.9800	0.0050	21	0.9943	0.0017	32	0.9677	-0.0050
11	0.9792	0.0049	22	0.9936	0.0021	33	0.9674	-0.0049
Pertes de puissance active : 118.2743 kW								
Nombre d'itérations : 5								



**Figure .III.7.** Tension à chaque jeu de barres du cas 03

Le tableau .III.6 montre les résultats de l'écoulement de puissance du cas 03. Où la tension maximale est égales à 1.0000 pu au niveau du jeu de barre 6 et la tension minimale est égales à 0.9639 pu au niveau du jeu de barre 18.

Les pertes totales actives du réseau dans ce cas sont réduites à presque 40% où elles sont égales à 118.2743kW.

### ➤ Résultats des calculs du cas 04

Le cas suivant, consiste à résoudre le problème de l'OPF en minimisant les pertes actives totales du système où les tailles et les emplacements des deux DGs proposées à intégrées dans le réseau étudié, sont considérées comme variables de contrôles.

En appliquant la méthode d'optimisation PSO adoptée pour ce problème, les valeurs des tailles et des emplacements optimaux sont 3597.215 kW, 980.551 kW, correspondant respectivement aux emplacements 6, 30.

**Tableau .III.7.** Solution de l'écoulement de puissances du cas 04

JB	Tension V (Pu)	Phase $\varphi$ (rad)	JB	Tension V (Pu)	Phase $\varphi$ (rad)	JB	Tension V (Pu)	Phase $\varphi$ (rad)
1	1.0000	0.0000	12	0.9640	0.0091	23	0.9882	0.0012
2	0.9986	0.0001	13	0.9543	0.0116	24	0.9780	0.0036
3	0.9936	0.0003	14	0.9508	0.0138	25	0.9729	0.0047
4	0.9945	0.0004	15	0.9485	0.0148	26	0.9974	-0.0011
5	0.9960	0.0006	16	0.9464	0.0155	27	0.9934	-0.0026
6	1.0000	-0.0001	17	0.9432	0.0176	28	0.9754	-0.0049
7	0.9949	0.0064	18	0.9422	0.0179	29	0.9624	-0.0071
8	0.9868	0.0057	19	0.9978	0.0003	30	0.9568	-0.0099
9	0.9769	0.0077	20	0.9924	0.0021	31	0.9502	-0.0077
10	0.9677	0.0095	21	0.9913	0.0026	32	0.9487	-0.0071
11	0.9664	0.0093	22	0.9904	0.0032	33	0.9483	-0.0069
Pertes de puissance active : 192.52 kW								
Nombre d'itérations : 6								

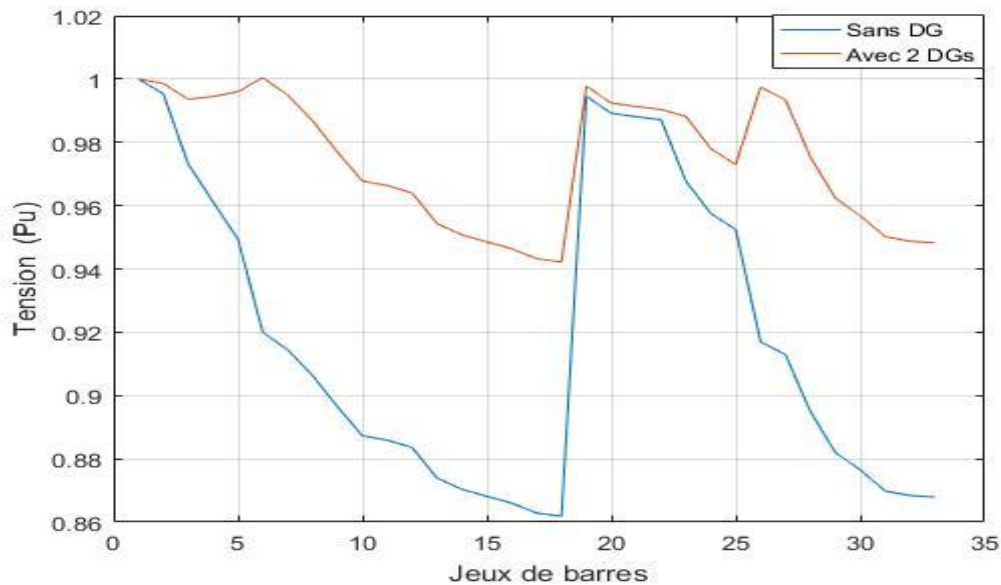


Figure III.8. Tension à chaque jeu de barres du cas 04

Nous remarquons d'après le tableau III.7 que la tension maximale est égales à 1.0000 pu est marquée au niveau du jeu de barres 6 et la tension minimale est égales à 0.9422 pu au niveau du jeu de barres 18.

Il est clair que Les pertes totales actives du réseau ont diminué de 60% où elles touchent les 192.52 kW. De plus la présence des DGs à nettement amélioré le profil de la tension du nœud le plus endommagé où la tension revient à sa stabilité par une amélioration de 9% et reste mieux que celle du réseau saint par 3%.

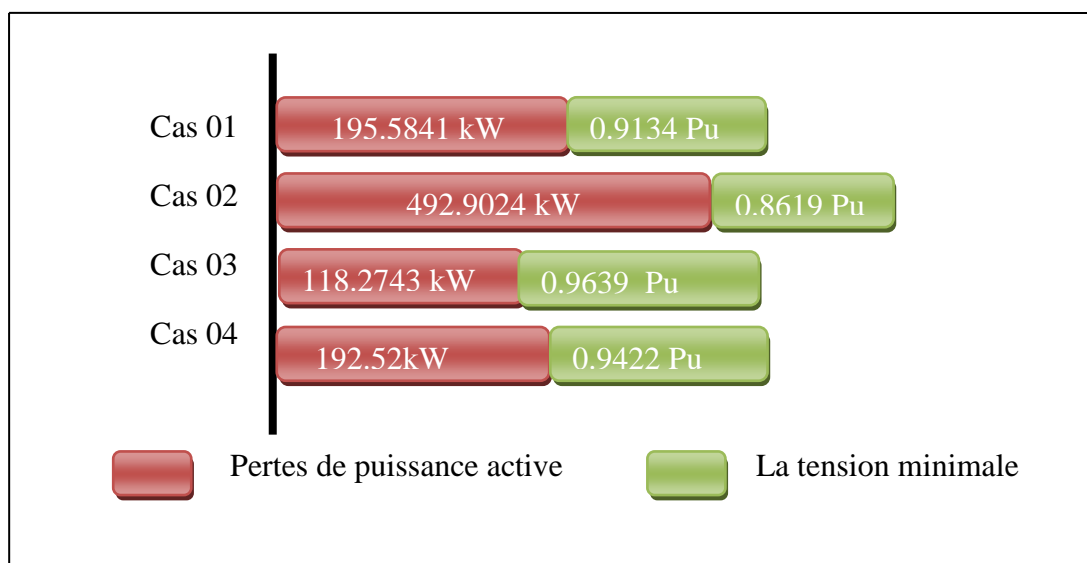


Figure III.9. Réduction des pertes totales active avec l'amélioration du profil de tension avant et après l'insertion de deux DGs (IEEE 33bus)

III.3 Réseau de distribution IEEE 69-bus

Les caractéristiques du réseau de distribution IEEE 69-bus de la figure (III.10) sont données comme suit :

Nombre de jeux de barres =69 ;

Nombre de branches =68 ;

Jeu de barres de référence N° =1 ;

Puissance de base = 100 MVA ;

Tension de base =12,66 kV.

Les données du réseau test sont présentées dans l'annexe 2.

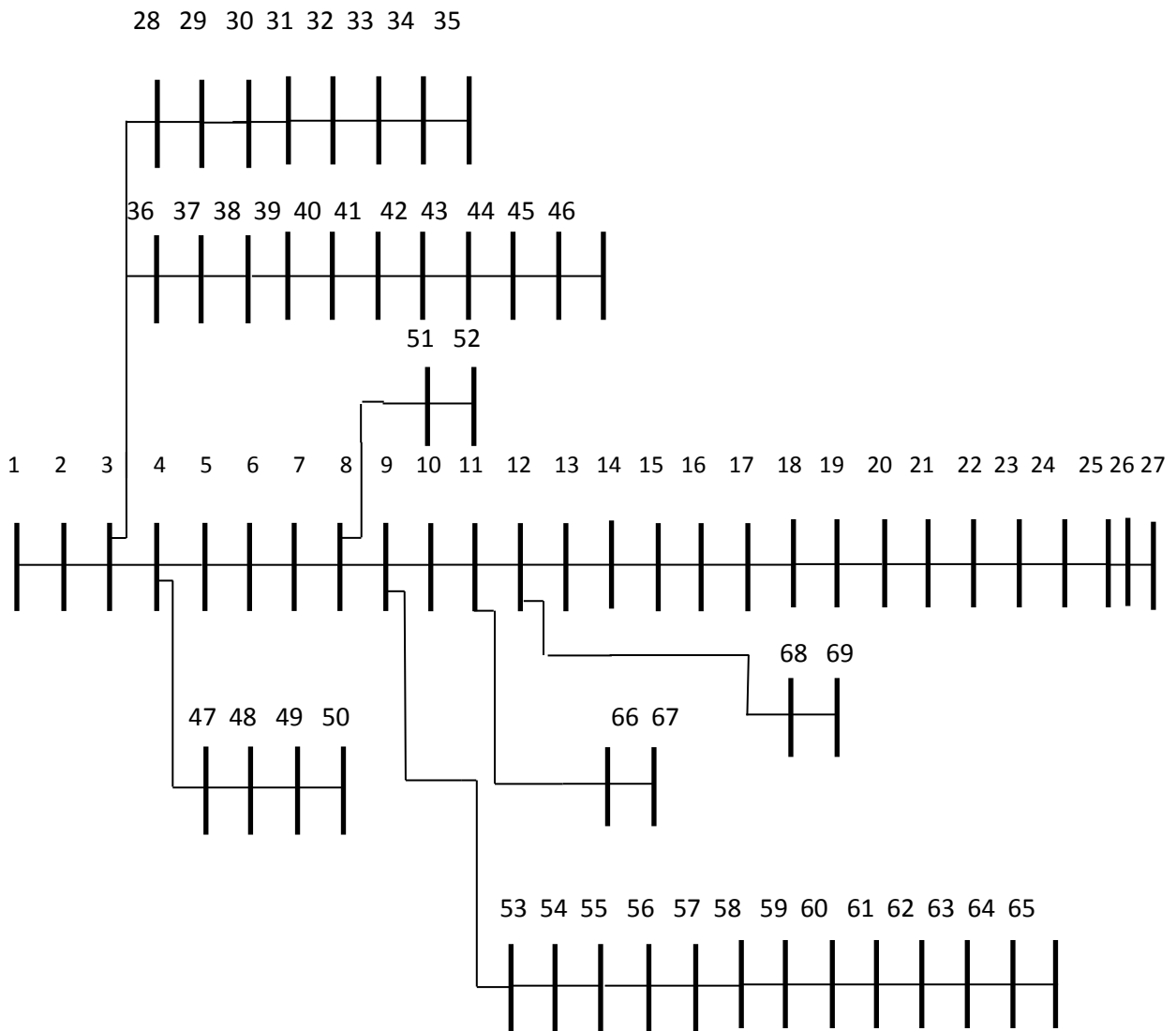


Figure .III.10. Représentation simplifiée du réseau de distribution IEEE 69-bus

## ➤ Résultats des calculs du cas 05

Tableau .III.8. Solution de l'écoulement de puissances du cas 05

JB	Tension V (Pu)	Phase $\varphi$ (rad)	JB	Tension V (Pu)	Phase $\varphi$ (rad)	JB	Tension V (Pu)	Phase $\varphi$ (rad)
1	1.0000	0.0000	24	0.9568	0.0097	47	0.9998	-0.0001
2	1.0000	-0.0000	25	0.9566	0.0097	48	0.9985	-0.0009
3	0.9999	-0.0000	26	0.9566	0.0098	49	0.9947	-0.0034
4	0.9998	-0.0001	27	0.9565	0.0098	50	0.9942	-0.0037
5	0.9990	-0.0003	28	0.9999	-0.0000	51	0.9786	0.0031
6	0.9901	0.0012	29	0.9999	-0.0001	52	0.9786	0.0031
7	0.9809	0.0027	30	0.9997	-0.0001	53	0.9748	0.0038
8	0.9787	0.0031	31	0.9997	-0.0000	54	0.9716	0.0044
9	0.9776	0.0033	32	0.9996	0.0000	55	0.9671	0.0052
10	0.9726	0.0048	33	0.9993	0.0001	56	0.9628	0.0060
11	0.9715	0.0052	34	0.9990	0.0002	57	0.9407	0.0140
12	0.9683	0.0062	35	0.9989	0.0002	58	0.9298	0.0180
13	0.9654	0.0070	36	0.9999	-0.0001	59	0.9256	0.0196
14	0.9625	0.0079	37	0.9997	-0.0002	60	0.9206	0.0217
15	0.9597	0.0087	38	0.9996	-0.0002	61	0.9133	0.0233
16	0.9592	0.0089	39	0.9995	-0.0002	62	0.9130	0.0233
17	0.9583	0.0092	40	0.9995	-0.0002	63	0.9126	0.0234
18	0.9583	0.0092	41	0.9988	-0.0004	64	0.9107	0.0238
19	0.9578	0.0093	42	0.9986	-0.0005	65	0.9102	0.0240
20	0.9575	0.0094	43	0.9985	-0.0005	66	0.9714	0.0052
21	0.9570	0.0096	44	0.9985	-0.0005	67	0.9714	0.0052
22	0.9570	0.0096	45	0.9984	-0.0005	68	0.9680	0.0063
23	0.9570	0.0096	46	0.9984	-0.0005	69	0.9680	0.0063

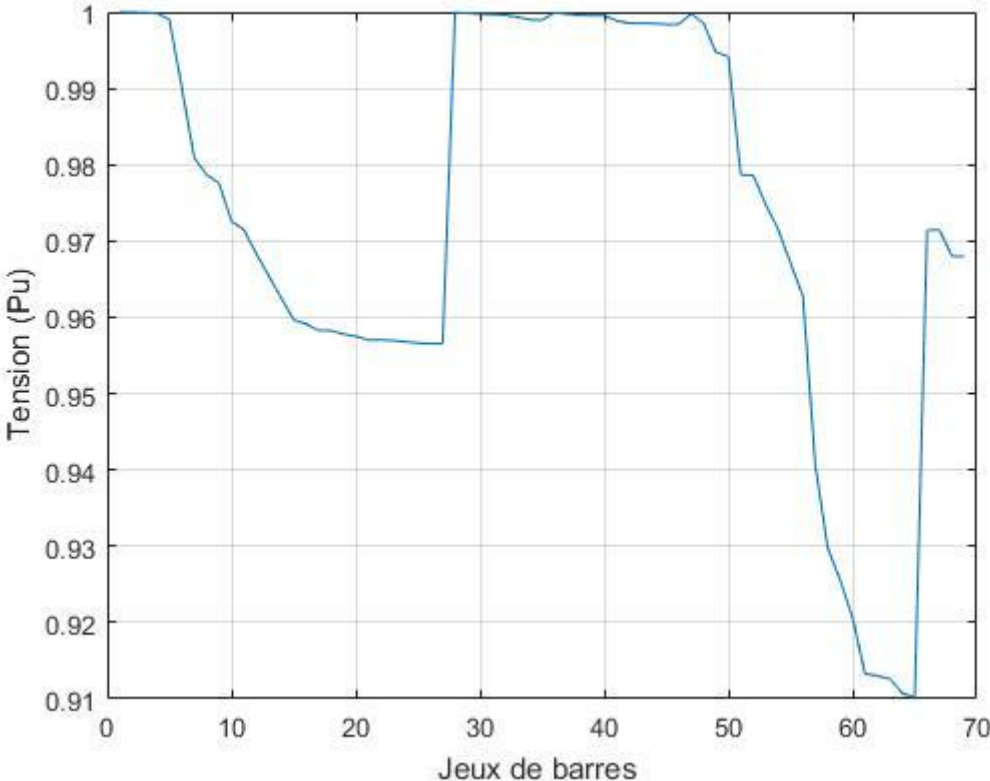


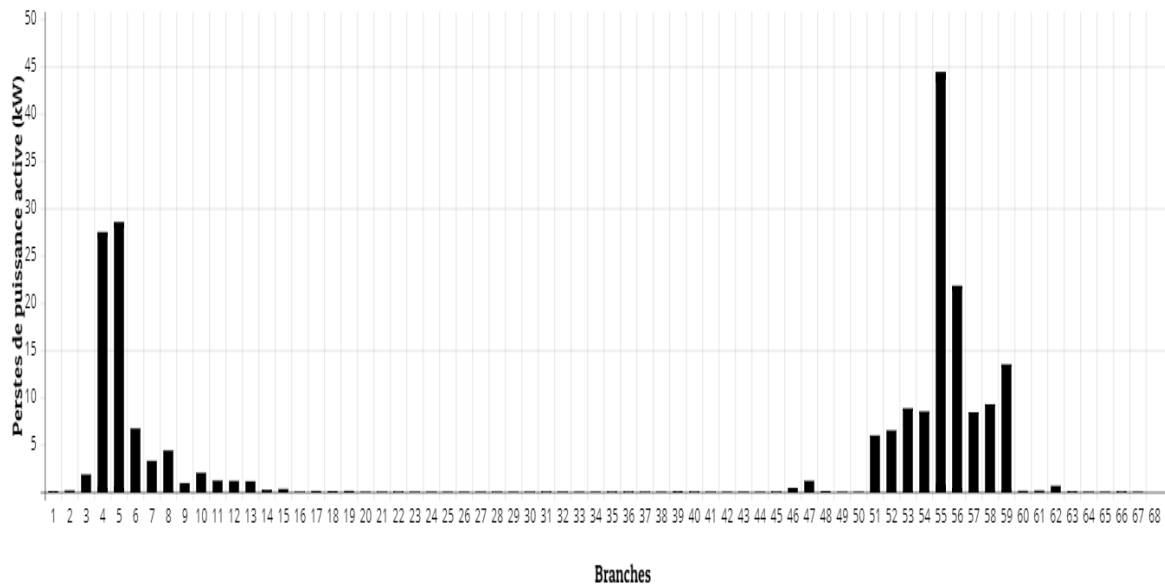
Figure .III.11. Tension à chaque jeu de barres du cas 05

Tableau .III.9. Pertes de puissances active et réactive du cas 05

Branche	Pertes active (kW)	Pertes réactive (kVar)	Branche	Pertes active (kW)	Pertes réactive (kVar)
1	0.0546	0.1310	35	0.0010	0.0024
2	0.0546	0.1310	36	0.0106	0.0259
3	0.1421	0.3411	37	0.0162	0.0189
4	1.8325	2.1464	38	0.0047	0.0055
5	27.4613	13.9857	39	0.0002	0.0002
6	28.5251	14.5282	40	0.0453	0.0529
7	6.6998	3.4153	41	0.0187	0.0218
8	3.2781	1.6690	42	0.0025	0.0029
9	4.3722	1.4451	43	0.0005	0.0006
10	0.9281	0.3069	44	0.0055	0.0069
11	2.0105	0.6644	45	0.0000	0.0000
12	1.1883	0.3923	46	0.0165	0.0408
13	1.1509	0.3803	47	0.4147	1.0150
14	1.1128	0.3677	48	1.1596	2.8374
15	0.2068	0.0684	49	0.0821	0.2009
16	0.2960	0.0979	50	0.0017	0.0009
17	0.0024	0.0008	51	0.0000	0.0000
18	0.0942	0.0311	52	5.5935	2.8482
19	0.0605	0.0200	53	6.4927	3.3071
20	0.0971	0.0321	54	8.8236	4.4925
21	0.0005	0.0002	55	8.4974	4.3287
22	0.0046	0.0015	56	44.3908	14.9002

23	0.0101	0.0033	57	21.7881	7.3118
24	0.0054	0.0018	58	8.4141	2.7826
25	0.0022	0.0007	59	9.2610	2.8112
26	0.0003	0.0001	60	13.4726	6.8624
27	0.0002	0.0006	61	0.1076	0.0548
28	0.0018	0.0045	62	0.1295	0.0659
29	0.0053	0.0018	63	0.6347	0.3233
30	0.0009	0.0003	64	0.0396	0.0202
31	0.0047	0.0016	65	0.0023	0.0007
32	0.0113	0.0038	66	0.0000	0.0000
33	0.0095	0.0031	67	0.0211	0.0070
34	0.0004	0.0001	68	0.0000	0.0000
Pertes de puissance active (kW)				209.0736	
Pertes de puissance réactive (kVar)				94.5278	
Nombre d'itérations				10	

A- Pertes de puissance active.



B - Pertes de puissance réactive.

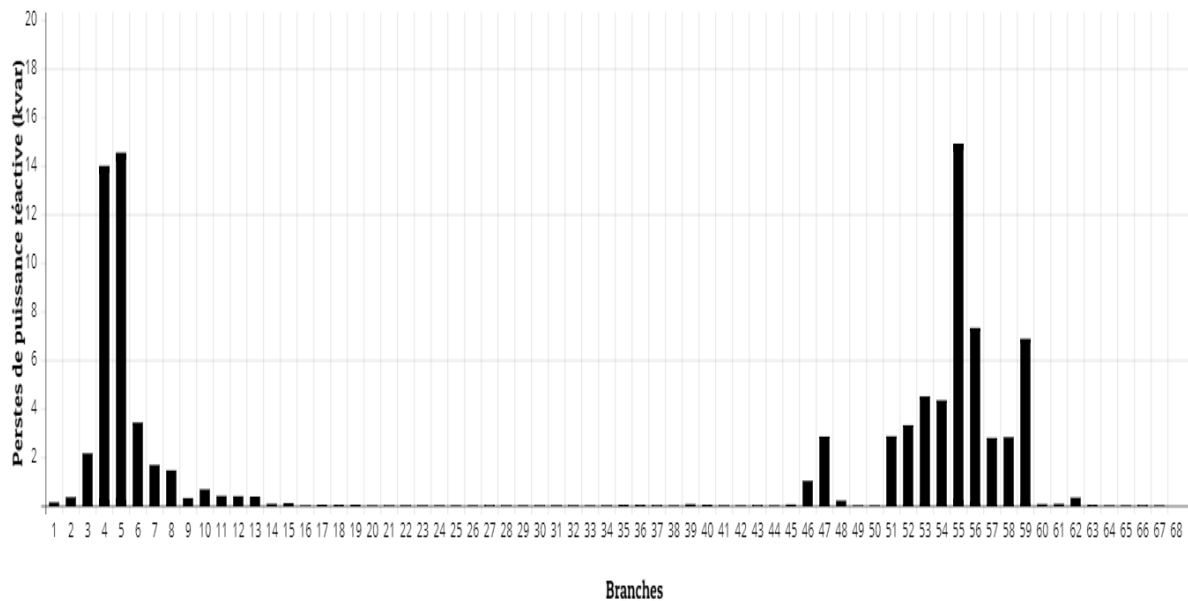


Figure .III.12. Histogramme des pertes de puissance active et réactive du cas 05

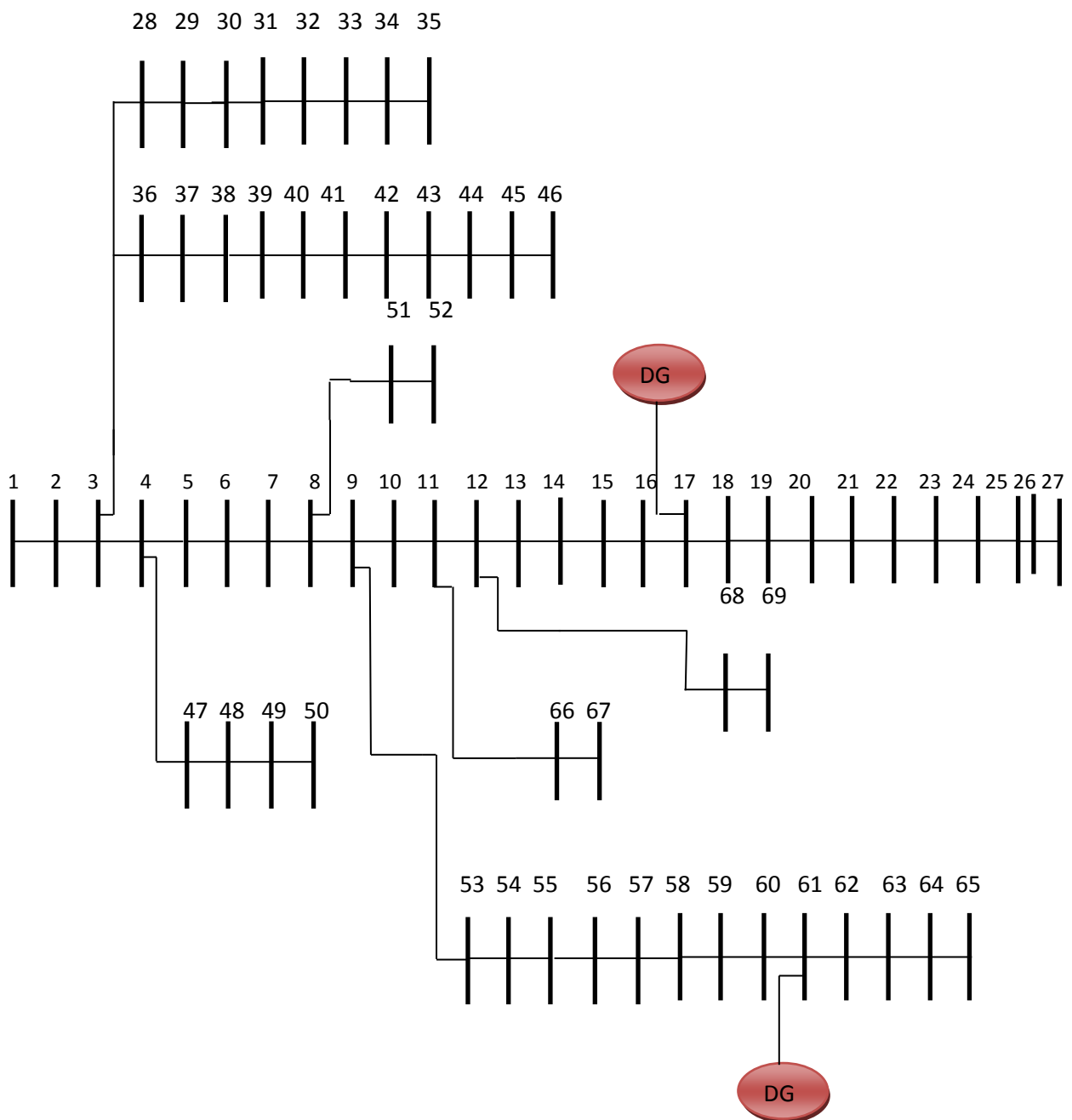
Le tableau .III.8 montre les résultats de l'écoulement de puissance du cas 05. Où la tension maximale est égales à 1.0000 pu pour le jeu de barres 2 et la tension minimale est égales à 0.9102pu pour le jeu de barres 65.

Le tableau .III.9 présente les pertes de puissance active et réactive du cas 05, dont les plus grandes valeurs sont:  $P_{loss_{max}} = 44.3908$  kW à la branche 56 et  $Q_{loss_{max}} = 14.9002$  kVar à la branche 56. Les pertes totales active et réactive du réseau sont respectivement 209.0736 kW et 94.5278 kVar.

➤ Résultats des calculs du cas 06

c'est la partie du calcul optimale de la fonction pertes active totale à minimiser sous les contraintes mentionnées au chapitre I tout en considérant comme variables de contrôles les tailles et les emplacement des DGs à intégrées dans ce réseau.

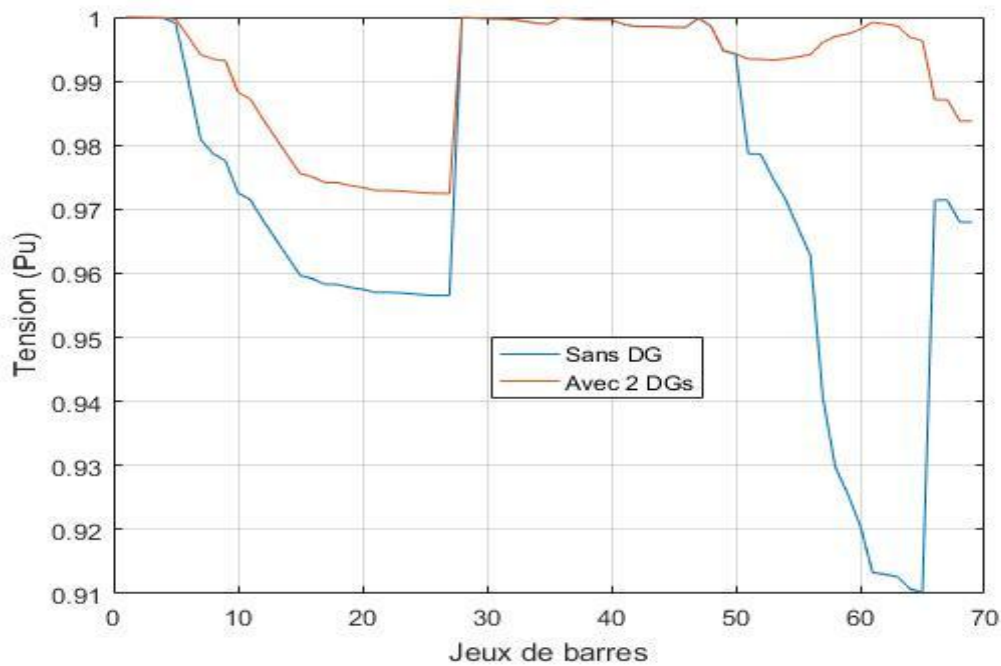
Les résultats de calcul ont donné : 672.659 kW, et 2139.018 kW, placées respectivement aux nœuds 17, 61.



**Figure .III.13.** Nouvelle représentation simplifiée du réseau de distribution IEEE 69-bus avec l’insertion optimale de la production décentralisée

Tableau .III.10. Solution de l'écoulement de puissances du cas 06

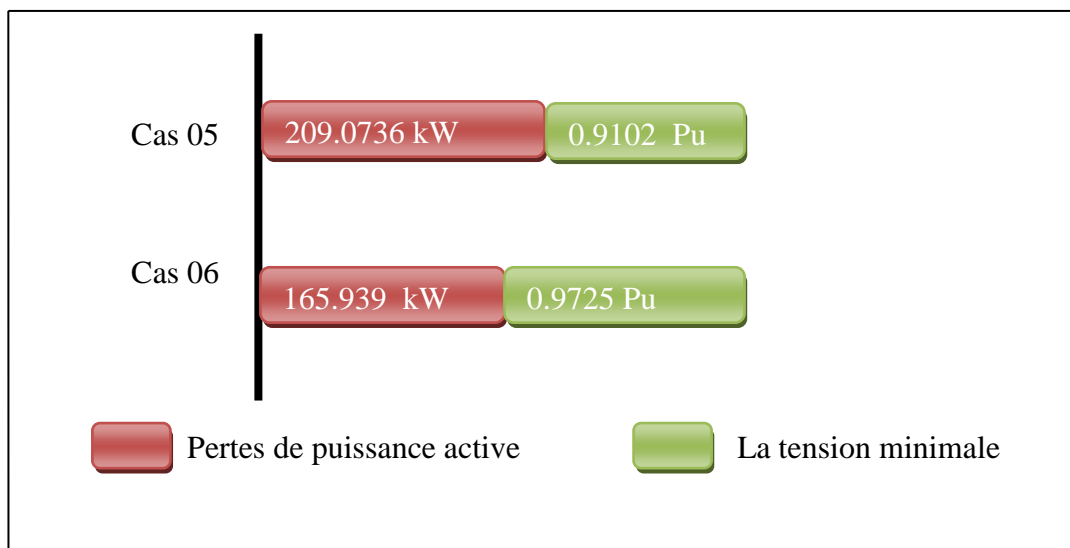
JB	Tension V (Pu)	Phase φ (rad)	JB	Tension V (Pu)	Phase φ (rad)	JB	TensionV (Pu)	Phase φ (rad)
1	1.0000	0.0000	24	0.9727	-0.0071	47	0.9999	0.0001
2	1.0000	0.0000	25	0.9725	-0.0072	48	0.9986	0.0009
3	1.0000	0.0000	26	0.9725	-0.0072	49	0.9948	0.0033
4	0.9999	0.0000	27	0.9725	-0.0072	50	0.9943	0.0037
5	0.9997	0.0001	28	1.0000	0.0000	51	0.9934	-0.0010
6	0.9969	-0.0004	29	0.9999	0.0001	52	0.9934	-0.0010
7	0.9941	-0.0009	30	0.9998	0.0000	53	0.9933	-0.0011
8	0.9935	-0.0010	31	0.9997	0.0000	54	0.9935	-0.0011
9	0.9932	-0.0010	32	0.9996	0.0000	55	0.9938	-0.0011
10	0.9883	-0.0025	33	0.9994	-0.0001	56	0.9941	-0.0011
11	0.9872	-0.0028	34	0.9990	-0.0002	57	0.9961	-0.0009
12	0.9841	-0.0038	35	0.9990	-0.0002	58	0.9970	-0.0008
13	0.9812	-0.0046	36	1.0000	0.0000	59	0.9974	-0.0008
14	0.9784	-0.0054	37	0.9998	0.0001	60	0.9981	-0.0006
15	0.9756	-0.0062	38	0.9996	0.0002	61	0.9992	-0.0005
16	0.9750	-0.0064	39	0.9996	0.0002	62	0.9989	-0.0006
17	0.9742	-0.0066	40	0.9996	0.0002	63	0.9986	-0.0006
18	0.9742	-0.0066	41	0.9989	0.0004	64	0.9968	-0.0009
19	0.9737	-0.0068	42	0.9986	0.0005	65	0.9963	-0.0010
20	0.9734	-0.0069	43	0.9985	0.0005	66	0.9871	-0.0029
21	0.9729	-0.0070	44	0.9985	0.0005	67	0.9871	-0.0029
22	0.9729	-0.0070	45	0.9984	0.0005	68	0.9838	-0.0039
23	0.9729	-0.0071	46	0.9984	0.0005	69	0.9838	-0.0039
Pertes de puissance active : 165.939 Kw								
Nombre d'itérations : 5								



**Figure .III.14.** Tension à chaque jeu de barres du cas 06

Le tableau .III.10 donne les résultats de simulations concernant l’OPF du cas 06 où nous remarquons que la tension maximale est égales à 1.0000 pu pour le jeu de barres 2 et la tension minimale est égales à 0.9725 pu pour le jeu de barres 27.

Dans la présence des DGs, Les pertes totales actives du réseau ont diminué de 21% où elles ont touché les 165.939 kW.



**Figure .III.15.** Réduction des pertes totales active et amélioration de profil de tension avant et après l’insertion des deux DGs (IEEE 69 bus)

Pour se rapprocher de la réalité entourant les RD et les DGs nous allons dimensionner ces dernières proposées par l'OPF essayant ainsi de résoudre un exemple de calcul complet d'une planification des réseaux de distribution, la projection proposée va être effectuée dans la région de Laghouat spécialement au site du Khneg.

Nous sommes intéressés à cette région, puisque la station de production *photovoltaïque* SKTM –Kheneg est intégrée dans le RD de cette région. Où nous pouvons exploiter facilement les données météo logiques et celles du RD, pour ce dimensionnement prévu.

L'étude avait pour but l'intégration de ces stations de production dimensionnées et ses impacts sur le RD de la région de Laghouat, malheureusement la pandémie du COVID19 nous a empêchées de récupérer toutes les données nécessaires pour cette étude de planification.

Ce qui nous a poussés à dimensionner les stations proposées par l'OPF du cas 04 à intégrer dans le réseau de distribution IEEE 33 bus, où l'état réel ne différera pas trop puisque c'est un réseau de moyenne taille, et le scénario de surcharge est de l'ordre des petites perturbations- c'est un problème de stabilité statique-.

### III.4 Dimensionnement photovoltaïque

Les coordonnées géographiques du site étudié et l'inclinaison des modules  $\beta$  sont représentées dans le tableau .III.11 [28]

**Tableau .III.11.** Coordonnées géographiques du site étudié

Latitude	33.78°
longitude	2.85°
l'altitude	767 m
angle d'inclinaison des modules ou panneaux	$\beta=33^\circ$

#### ➤ **Potentiel énergétique solaire de la région**

La durée d'ensoleillement moyenne dans le Sud Algérien est de l'ordre de 3500 h/an est la plus importante au monde, elle est de l'ordre de 9 h/J, le Sud-ouest présente le plus grand potentiel de tout le territoire Algérien.

Suivant les données d'une semaine de la station météo logique du SKTM –Kheneg Laghouat, le tracer de la courbe de l'irradiation globale en fonction de la durée d'ensoleillement journalière présenté par la Figure .III.16 (voir annexes 3)

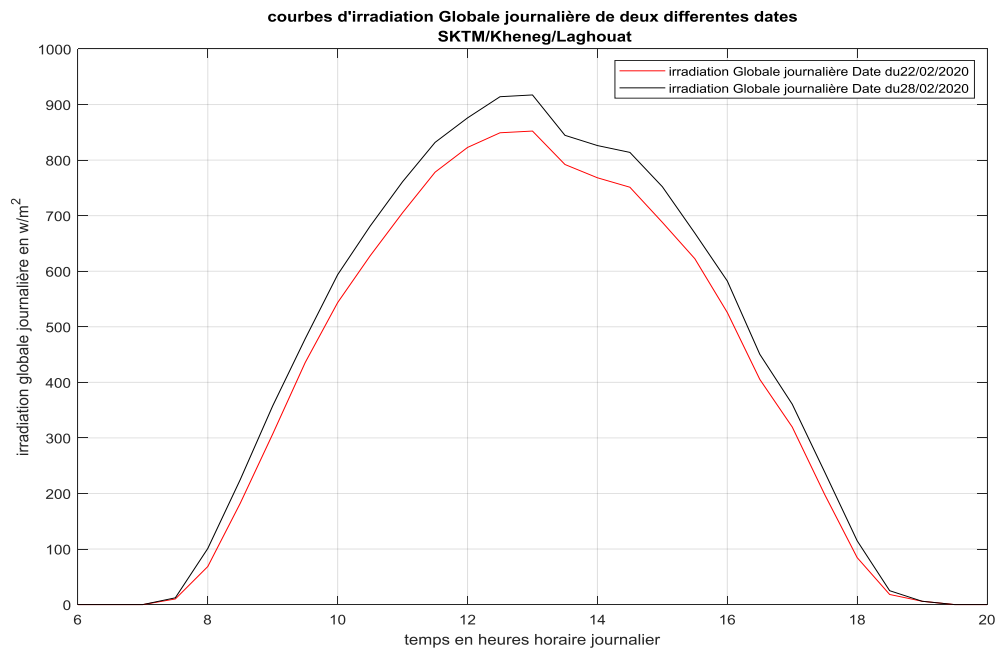


Figure .III.16. Irradiation journalière globale entre (22-28/02/2020)

➤ **Choix des modules GPV**

Suivant la disponibilité au marché des panneaux solaires, on a opté pour les deux références suivantes :

- On a choisie comme module de type, GPV-YL250-29b. les caractéristiques techniques de ce type sont présentées dans le tableau .III.12

Tableau .III.12. Caractéristiques techniques du module GPV-YL250-29b [29]

<b>Pm</b>	250 Watt crête	<b>Nombre des cellules</b>	60
<b>Impp</b>	8.24 Amps	<b>Efficacité de pointe</b>	15.3%
<b>Isc</b>	8.79 Amps	<b>NOCT</b>	46°C
<b>Vmpp</b>	30.4 Volts	<b>Calibre de fusible série</b>	15 Amps
<b>Voc</b>	38.4 Volts	<b>Maximunsys/voltage</b>	1000 volts
<b>Longueur</b>	1650 mm	<b>Poids</b>	19.1 Kg
<b>Largeur</b>	990 mm	<b>Garantie/80% de sortie de puissance</b>	25 Yrs
<b>Epaisseur</b>	40 mm	<b>Type</b>	polycrystallin
<b>Longueur du fil de sortie</b>	1100 mm	<b>Cage de cable de sortie</b>	12 AWG

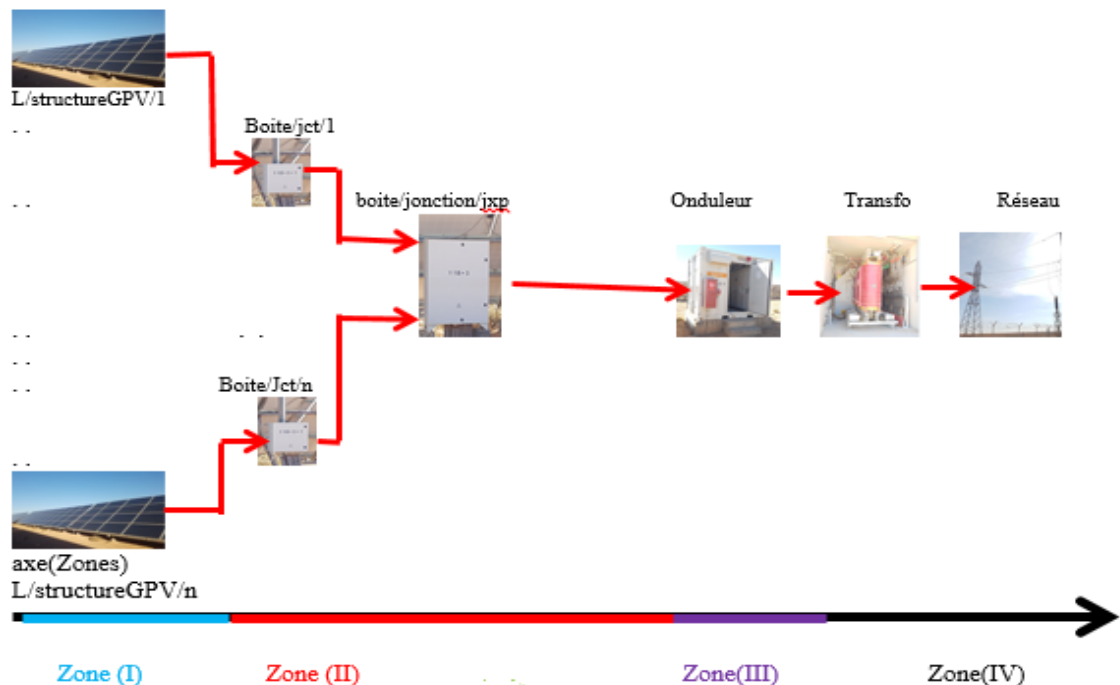
### ➤ GPV connecté au réseau

Les topologies d'installations des systèmes GPV suivant la partialité de la surface dédiée à centrale GPV, notre choix a été sur la technique des onduleurs centrale.

### ➤ Dimensionnement du sous-champ

Le sous-champ est l'unité constituant le champ GPV, nous pouvons choisir comme puissance pour chaque sous-champ 500KW.

Le schéma de la figure .III.17 montre les éléments et les étages de cette installation depuis le GPV jusqu'au réseau.



**Figure .III.17.** Ligne de production du GPV connecté au réseau

Selon le choix et selon la puissance demandée, la tension de string, la tension d'entrée de l'onduleur, les caractéristiques de module le dimensionnement du sous champ est illustré dans le tableau .III.12 :

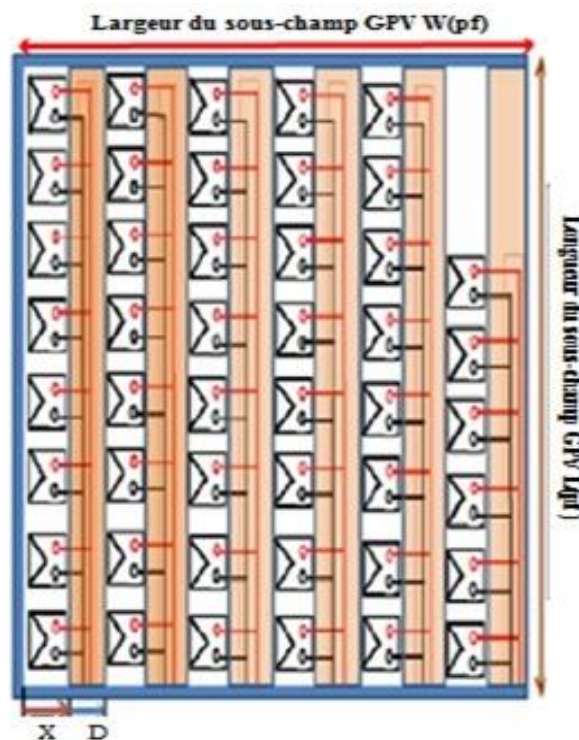
- $P_c$  installée (demandée) : 500kWc ;
- $P_n$  (module): 250W ;
- $V_m$ (module) : 30.4 Volts ;
- La tension d'entrée du module est entre 450- 860 (Voir l'annexe 3)

- $V_{string}$  : 655 volts ; on prend  $V_{string}$  comme la moyenne de 450 et 860 ;
- $N_{(string/structure)}$  : 2 ; on a choisi comme optimisation deux strings par structure vue les critères des contraintes sur support de la structure et pour la facilité de l'entretien et la maintenance.

**Tableau .III.13.** Dimensionnement de sous champ de 500 kW

Nombre total de module $N_t$	Nombre de module par string $N_{mod/str}$	Nombre de module par structure $N_{mod/stru}$	Nombre de structure $N_{stru}$
2000	22	44	46

La structure est une matrice de [11, 4] éléments ; ces éléments sont les modules. Chaque ligne de la matrice comprend onze modules connectés en série. Alors pour deux lignes raccordées en série (figure .III.18)



**Figure .III.18.** Schéma vue de dessus du champ GPV (46 structure)

Rappelons que les DGs proposées dans notre cas04 sont une à 3597.215 kW, qui sera majorée à 4000 kW et la deuxième est à 980.551 kW peut être majorée à 1000 kW, notons que le sur dimensionnement dans ce type de calcul est nécessaire.

- La première station PV sera constituée de 8 sous champ du type mentionnée au tableau.III.13
- La deuxième, sera formée de 2 sous champ du même type.

### **III.5 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons pu faire :

Un PF par la méthode BFS de deux réseaux de distribution choisis, celui IEEE 33 bus et IEEE 69 bus.

Un OPF par la méthode PSO pour les deux réseaux tout en insérant des DGs optimisées, cette étape nous a permis d'avoir une claire idée sur l'impact positif de l'intégration des DG sur le comportement du réseau.

Un autre OPF sur un réseau non stable où nous l'avons surchargé à 50% dans le but d'avoir une idée sur l'effet des DG dans le rétablissement des réseaux non stables, où les résultats ont montrés une efficacité signalée de ces DGs sur la stabilité statique du réseau.

Un dimensionnement des DG type PV est proposé pour aider à la planification des réseaux de distribution, le dimensionnement a été selon le site de Kheneg de la région de Laghouat.

# **Conclusion générale**

Dans le but d'éclaircir les effets et les impacts de la génération électrique dispersé dans les réseaux de distribution dite aussi la production décentralisée, ce travail porte sur le traitement et l'analyse du comportement des réseaux de distribution dans la présence de ces DGs.

Pour avoir une idée complète sur l'influence des sources de génération dispersé vis à vis le comportement des systèmes de puissances dans leurs états sables et instables, notre étude a visé deux réseaux dans leur état saint, et un réseau dans son état instable suite à une application d'un défaut de l'ordre des grandes perturbations, où nous avons opté pour une surcharge à 50% de sa charge nominale. Dans cette étape nous avons testé nos réseaux par un OPF optimisant les tailles et l'emplacement des DGs à intégrées dans ces réseaux étudier.

Pour résoudre les dégâts évolués suites à cette instabilité provoquée par la surcharge où la stabilité statique des réseaux a été perdue, un OPF par la méthode PSO est appliqué à ce réseau. Cette optimisation s'est fondée sur la minimisation des pertes actives totales du réseau sous certaines contraintes et vise une proposition des tailles et des emplacements des DGs à connecter.

La dernière étape de cette étude a viré vers le dimensionnement de ces DGs (PV) où nous avons pris comme site d'implantation des stations PV choisis comme choix motivé le site de Kheneg à la région de Laghouat.

Une fois notre travail s'est achevé, nous avons abouti à des conclusions et à des constatations:

- La production dispersée améliore visiblement le profil des tensions des réseaux électriques - RD saint et perturbé-
- La production dispersée diminue les pertes totales de puissance active des réseaux de distributions connus par leurs pertes élevées.
- les DGs sont très efficaces pour le rétablissement des réseaux et la récupération des nœuds affectés par l'instabilité.
- La présence des DGs dans les réseaux de distributions, assurent la compensation, réduit les pertes, remédient l'instabilité statique, et garantissent la production.
- L'étude de l'implémentation des sources de production dispersées PV, nécessite une motivation expliquée, un choix acceptable du site, un calcul rigoureux pour le dimensionnement, et choix pratique de l'architecture de cette station à intégrer, cette étape est importante pour la planification des réseaux.
- Le choix de l'architecture type string - adopté dans notre étude- est destiné aux grandes générations où il assure une meilleure continuité de service comparé à celle centralisée.

Il reste, toutefois, beaucoup à explorer afin de poursuivre et compléter notre travail, et qui se résumant dans les points suivants:

- Appliquer ces optimisations et ce dimensionnement au réseau de distribution de région de Laghouat, - c'était un de nos objectifs corrompu à cause de la pandémie du COVID19-.

- Voir avec d'autres types de stations de génération tels que l'éolienne ou l'hybride.

- Utiliser d'autres méthodes pour le PF et l'OPF.

- Essayer d'autres optimisations telles que la reconfiguration des réseaux de distribution en intégrant ces DGs.

- [1] : Mr .A.Vergnol, «Intégration dans le réseau électrique et le marché de l'électricité de production décentralisée d'origine renouvelable : Gestion des congestions locales». Thèse préparée dans le Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance de Lille Ecole Doctorale 2010.
- [2] : Mr .L. Djamel, « Production Décentralisée Et Couplage Au Réseau » .Thèse Doctorat, Université Mentouri Constantine, Année 2008.
- [3] : Mr .C. D. PHAM , «Détection et localisation de défauts dans les réseaux de distribution HTA en présence de génération d'énergie dispersée». Thèse Doctorat, 2005.
- [4] :Mr .T.K.V.DUNG, « Interconnexion des sources d'énergie renouvelable au réseau de distribution électrique» .Thèse Doctorat, Université QUÉBEC 2009.
- [5] : Mr.K. Nadhir, « Contribution à la gestion des réseaux de distribution en présence de génération d'énergie dispersée ».Mémoire de magister .Université de Batna,2014.
- [6] :C. Puret, « Les réseaux de distribution publique MT dans le monde », Cahier technique Schneider n° 155, 1991.
- [7] : Mm.B.Siham, «Planification du réseau électrique de la nouvelle ville Ighzer Azarif».Mémoire de fin d'étude. Université Abderrahmane MIRA de Bejaia. 2017.
- [8] : Mr.B Berseneff, «Réglage de la tension dans les réseaux de distribution du futur». Thèse Doctorat, 2010.
- [9] : Mr.M. Mustafa, « Optimisation de Fonctionnement des Réseaux de Distribution en Présence des Sources d'Energie Renouvelable ». .Thèse Doctorat,'UATL' Université Amar Telidji – Laghouat, 2018.
- [10] : Mm.F. Ouanassa Samia, «Optimisation du réseau d'un tertiaire alimenté par une source solaire». .Thèse Doctorat,'USTOMB', 2017.
- [11] : M. H. Moradi et al, «Power flow analysis in islanded Micro-Grids via modeling different operational modes of DGs: A review and a new approach». Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 69, pp. 248-262, March 2017.

- [12] : Mm.T. Wissame, «Compensation optimale de l' énergie réactive dans les réseaux de distribution».mémoire de magister. Université Ferhat Abbas - Sétif, 2012.
- [13] :Mr. L. R. de Araujo,Mm. D. R. R. Penido , Mr.S. C. Júnior , Mr.J. L. R. Pereira , Mr.P. A. N. Garcia , «Comparisons between the three-phase current injection method and the forward/backward sweep method».Article, . 2010.
- [14] : U. Eminoglu , M. H. Hocaogl, «Distribution Systems Forward/Backward Sweep-based Power Flow Algorithms: A Review and Comparison Study». Article University of Arizona2012,.
- [15] : Mr.D. Chabane, «Planification des réseaux de distribution en présence de la production décentralisée».Mémoire de magister. Université de Sétif1, 2014.
- [16]: Mr.T.T.H.PHAM, «influences de la production décentralise sur la gestion des infrastructures critiques des réseaux de puissance». Thèse doctorat, institut national polytechnique de grenoble. 2006.
- [17]:Mr. i. A. F. GARCIA, ingénieur ensieg, «interaction des reseaux de transport et de distribution en présence de production décentralisée». Thèse doctorat, institut national polytechnique de Grenoble. 2008.
- [18]: Mr.J.F. CANARD, «impact de la génération d'énergie dispersée dans les réseaux de distribution». thèse doctorat, institut national polytechnique de Grenoble. 2000.
- [19]: Mr.K. Foued, «etude des variations rapides de tension pour le raccordement d'une production decentralisee dans un reseau mt ». Mémoire de magister. Université mentouri de constantine.
- [20]: Mr.D. Thirault , «Architectures des Réseaux de Distribution pour l'Electrification rurale des Pays en Développement». Thèse Doctorat.Institut national polytechnique de grenoble. 2004.
- [21]: Mr.K. Riad, «Détection et isolation de défauts combinant des méthodes à base de données appliquées aux systèmes électro-énergétiques». Thèse Doctorat. Universite ferhat abbes -setif lufas(algerie)
- [22]: Mr.M.R.Razoug, «Etude et Réalisation d'un Système d'orientation et de conversion destiné à optimiser le rendement d'un système photovoltaïque». Thèse Doctorat. Universite des frères mentouri de constantine. 2018.

[23]: Mr.S. Belakehal, «Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables». Thèse Doctorat, université de constantine.

[24]: Mr.M. Nassim ,Mr.T. Elyazid , «Sur la maîtrise de l’insertion des ressources renouvelables aux réseaux électriques », mémoire master, université abderahmane mira de bejaia , année 2016 .

[25] : Mr.M. Houssam , Mr.S. Mouhssin , «Etude de faisabilité d’une installation solaire photovoltaïque autonome par PVSyst pour établissement scolaire », mémoire master ,université mohamed boudiaf - m’sila ,2019.

[26] : Mr.Mefti A., Mr.Bouroubi M.Y, Mimouni H, « Evaluation du potentiel énergétique solaire », Bulletin des Energies Renouvelables, N° 2, pp.2002.

[27] : Ghada Bel Hadj Ali , «Les installations Photovoltaïques Raccordées au réseau», Tunisie , 2014.

[28] : (PM 10:00) (20/7/2020) <https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>

[29] : [yingliSolar.com](http://yingliSolar.com).

## ANNEXE 1

**Table .A1.1.** Caractéristiques techniques des branches du réseau de distribution radial IEEE 33-bus

Branche N°	Jeu de barres de départ	Jeu de barres d'arrivées	Résistance ( $\Omega$ )	Réactance ( $\Omega$ )
1	1	2	0.0922	0.0470
2	2	3	0.4930	0.2511
3	3	4	0.3660	0.1864
4	4	5	0.3811	0.1941
5	5	6	0.8190	0.7070
6	6	7	0.1872	0.6188
7	7	8	0.7114	0.2351
8	8	9	1.0300	0.7400
9	9	10	1.0440	0.7400
10	10	11	0.1966	0.0650
11	11	12	0.3744	0.1238
12	12	13	1.4680	1.1550
13	13	14	0.5416	0.7129
14	14	15	0.5910	0.5260
15	15	16	0.7463	0.5450
16	16	17	1.2890	1.7210
17	17	18	0.7320	0.5740
18	2	19	0.1640	0.1565
19	19	20	1.5042	1.3554
20	20	21	0.4095	0.4784
21	21	22	0.7089	0.9373
22	3	23	0.4512	0.3083
23	23	24	0.8980	0.7091

24	24	25	0.8960	0.7011
25	6	26	0.2030	0.1034
26	26	27	0.2842	0.1447
27	27	28	1.0590	0.9337
28	28	29	0.8042	0.7006
29	29	30	0.5075	0.2585
30	30	31	0.9744	0.9630
31	31	32	0.3105	0.3619
32	32	33	0.3410	0.5302

**Table .A1.2.** Caractéristiques techniques des jeux de barres du réseau de distribution Radial IEEE 33-bus

Nœuds N°	P (kW)	Q (kVar)
1	0	0
2	100	60
3	90	40
4	120	80
5	60	30
6	60	20
7	200	100
8	200	100
9	60	20
10	60	20
11	45	30
12	60	35
13	60	35
14	120	80
15	60	10

---

16	60	20
17	60	20
18	90	40
19	90	40
20	90	40
21	90	40
22	90	40
23	90	50
24	420	200
25	420	200
26	60	25
27	60	25
28	60	20
29	120	70
30	200	600
31	150	70
32	210	100
33	60	40

## ANNEXE 2

**Table .A2.1.** Caractéristiques techniques des branches du réseau de distribution radial IEEE 69-bus

Branche N°	Jeu de barres de départ	Jeu de barres d'arrivées	Résistance ( $\Omega$ )	Réactance ( $\Omega$ )
1	1	2	0.0005	0.0012
2	2	3	0.0005	0.0012
3	3	4	0.0015	0.0036
4	4	5	0.0251	0.0294
5	5	6	0.366	0.1864
6	6	7	0.3811	0.1941
7	7	8	0.0922	0.047
8	8	9	0.0493	0.0251
9	9	10	0.819	0.2707
10	10	11	0.1872	0.0619
11	11	12	0.7114	0.2351
12	12	13	1.03	0.34
13	13	14	1.044	0.345
14	14	15	1.058	0.3496
15	15	16	0.1966	0.065
16	16	17	0.3744	0.1238
17	17	18	0.0047	0.0016
18	18	19	0.3276	0.1083
19	19	20	0.2106	0.0696
20	20	21	0.3416	0.1129
21	21	22	0.014	0.000003
22	22	23	0.1591	0.0526
23	23	24	0.3463	0.1145

24	24	25	0.7488	0.2475
25	25	26	0.3089	0.1021
26	26	27	0.1732	0.0572
27	3	28	0.0044	0.0108
28	28	29	0.064	0.1565
29	29	30	0.3978	0.1315
30	30	31	0.0702	0.0232
31	31	32	0.351	0.116
32	32	33	0.839	0.2816
33	33	34	1.708	0.5646
34	34	35	1.474	0.4873
35	3	36	0.0044	0.0108
36	36	37	0.064	0.1565
37	37	38	0.1053	0.123
38	38	39	0.0304	0.0355
39	39	40	0.0018	0.0021
40	40	41	0.7283	0.8509
41	41	42	0.31	0.3623
42	42	43	0.041	0.0478
43	43	44	0.0092	0.0116
44	44	45	0.1089	0.1373
45	45	46	0.0009	0.0012
46	4	47	0.0034	0.0084
47	47	48	0.0851	0.2083
48	48	49	0.2898	0.7091
49	49	50	0.0822	0.2011
50	8	51	0.0928	0.0473

---

51	51	52	0.3319	0.1114
52	9	53	0.174	0.0886
53	53	54	0.203	0.1034
54	54	55	0.2842	0.1447
55	55	56	0.2813	0.1433
56	56	57	1.59	0.5337
57	57	58	0.7837	0.263
58	58	59	0.3042	0.1006
59	59	60	0.3861	0.1172
60	60	61	0.5075	0.2585
61	61	62	0.0974	0.0496
62	62	63	0.145	0.0738
63	63	64	0.7105	0.3619
64	64	65	1.041	0.5302
65	11	66	0.2012	0.0611
66	66	67	0.0047	0.0014
67	12	68	0.7394	0.2444
68	68	69	0.0047	0.0016

**Table .A2.2.** Caractéristiques techniques des jeux de barres du réseau de distribution Radial IEEE 69-bus

Nœuds N°	P (kW)	Q (kVar)
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	0
6	2.6	2.2
7	40.40	30
8	75	54
9	30	22
10	28	19
11	145	104
12	145	104
13	8	5.5
14	8	5.5
15	0	0
16	45	30
17	60	35
18	60	35
19	0	0
20	1	0.6
21	114	81
22	5.3	3.5
23	0	0
24	28	20

25	0	0
26	14	10
27	14	10
28	26	18.6
29	26	18.6
30	0	0
31	0	0
32	0	0
33	14	10
34	19.5	14
35	6	4
36	26	18.25
37	26	18.25
38	0	0
39	24	17
40	24	17
41	1.2	1
42	0	0
43	6	4.3
44	0	0
45	39.22	26.3
46	39.22	26.3
47	0	0
48	79	56.4
49	384.7	274.5
50	384.7	274.5
51	40.5	28.3

---

52	3.6	2.7
53	4.35	3.5
54	26.4	19
55	24	17.2
56	0	0
57	0	0
58	0	0
59	100	72
60	0	0
61	1244	888
62	32	23
63	0	0
64	227	162
65	59	42
66	18	13
67	18	13
68	28	20
69	28	20

## ANNEXE 3

Tableaux .A3.1. Relevé des données météo(SKTM) Laghouat elKheneg

CENTRALE PV LAGHOUAT 60Mwc						
28/02/2020						
Time	Puissance	R Globale	Température	vitesse de vent	Humidité	Pression atmosphérique
	(MW)	(W/m2)	(-C)	(m/s)	(%)	(hpa)
06:00	-0,30	0,00	10,30	4,40	43,30	929,50
06:30	-0,30	0,00	11,00	4,60	41,70	929,70
07:00	-0,31	0,00	10,10	5,10	42,40	929,60
07:30	0,70	12,20	10,40	5,20	40,30	929,90
08:00	8,85	101,00	10,40	3,90	38,90	930,10
08:30	17,49	225,00	11,60	4,00	35,10	930,50
09:00	25,32	357,80	14,20	1,80	30,20	931,10
09:30	31,95	478,50	14,50	1,90	29,00	931,50
10:00	36,97	593,80	16,10	4,00	23,30	931,40
10:30	42,03	681,20	16,70	2,90	21,40	931,60
11:00	45,45	761,20	17,00	3,00	23,00	931,50
11:30	47,69	831,90	18,00	3,70	21,70	931,60
12:00	48,72	876,00	19,10	1,80	23,40	931,50
12:30	49,21	914,10	20,80	1,60	19,80	931,50
13:00	49,02	917,30	21,90	1,00	17,50	930,80
13:30	48,54	844,60	22,40	1,50	16,40	930,50
14:00	47,49	826,20	23,40	1,90	14,00	930,10
14:30	45,39	813,90	24,40	1,30	11,60	929,90
15:00	42,39	752,10	24,50	1,60	11,70	929,70
15:30	39,52	668,60	24,10	2,90	9,80	929,50
16:00	35,23	582,40	25,30	3,30	7,10	929,00
16:30	29,75	450,60	25,30	1,10	6,90	929,10
17:00	23,34	360,70	24,30	2,20	7,70	928,90
17:30	15,87	238,50	23,30	1,40	7,80	928,70
18:00	7,99	114,80	22,40	3,00	8,30	928,70
18:30	0,58	25,00	21,30	1,80	9,90	928,90
19:00	-0,32	6,00	19,50	2,20	11,60	928,80

19:30	-0,31	0,00	17,60	1,50	14,50	929,00
20:00	-0,31	0,00	16,20	1,90	15,30	929,20

<b>CENTRALE PV LAGHOAT 60Mwc</b>						
22/02/2020						
Time	Puissance	R Globale	Température	vitesse de vent	humidité	Pression atmosphérique
	(MW)	(W/m2)	(°C)	(m/s)	(%)	(hpa)
06:00	-0,32	0,00	4,60	2,10	45,60	934,20
06:30	-0,32	0,00	3,20	2,70	47,80	934,20
07:00	-0,32	0,00	3,30	0,70	48,70	934,70
07:30	-0,13	10,10	4,10	0,70	50,80	935,00
08:00	6,30	68,50	5,70	0,80	47,80	935,50
08:30	15,93	182,40	6,70	0,50	42,00	936,00
09:00	23,82	307,10	10,00	0,80	36,40	936,70
09:30	30,75	435,70	12,20	0,90	29,60	937,00
10:00	36,14	543,60	13,60	1,60	29,20	937,40
10:30	40,16	627,70	16,30	1,10	26,50	937,60
11:00	43,29	705,40	18,10	1,80	25,10	937,90
11:30	45,89	778,30	18,60	1,20	26,70	937,90
12:00	47,97	822,80	18,40	2,00	26,50	937,70
12:30	48,78	849,20	19,50	2,00	23,60	937,60
13:00	48,81	852,30	20,00	0,90	21,60	937,10
13:30	48,16	792,10	21,10	1,50	21,60	936,80
14:00	47,25	768,20	21,20	0,90	20,00	936,70
14:30	44,94	751,20	21,90	2,50	19,30	936,30
15:00	42,33	688,80	22,40	1,60	18,80	936,10
15:30	38,72	622,50	22,50	2,80	18,80	935,80
16:00	34,28	525,70	22,90	2,30	16,60	935,90
16:30	28,89	405,40	22,80	2,30	16,80	935,70
17:00	22,18	319,60	21,40	2,30	17,90	935,70
17:30	14,65	198,00	21,00	3,50	16,80	935,60
18:00	5,59	84,50	20,30	1,40	18,00	935,70
18:30	0,02	18,20	18,90	2,10	19,40	936,00
19:00	-0,32	6,00	17,10	2,00	20,70	936,10
19:30	-0,31	0,00	16,40	2,10	23,50	936,30
20:00	-0,31	0,00	14,70	1,40	25,60	936,50

Tableaux .A3.2. Caractéristiques d'onduleur

Max. DC Voltage	900Vdc
MPP Voltage Range	450~860Vdc
Max. DC Power	550kWp
Max. Input Current	1200A
Recommend PV Array Open Circuit Voltage	700V
<b>AC SIDE DATA</b>	
Rated Output Power	500kW
Rated Grid Voltage	315Vac
Grid Voltage Range	250~362Vac
Rated Grid Frequency	50Hz/60Hz
Grid Frequency Range	47~51.5Hz/57~61.5Hz
Output Current THD	<3% (at nominal power)
DC Current Injection	<0.5% of rated inverter output current
Power Factor	0.9 (lagging) ~0.9 (leading)
<b>SYSTEM</b>	
Max. Efficiency	98.7%
Euro. Efficiency	98.5%
Protection Degree	IP20 (indoor)
Power Consumption at Night	<100W
Operating Temperature	-25~+55°C
Cooling Method	controlled forced-air cooling
Relative Humidity	0~95%, non-condensing
Max. Working Altitude	6000m (operation with derating above 3000m)
<b>DISPLAY AND COMMUNICATIONS</b>	
Display	touch screen LCD
Standard Comm. Interfaces	RS485
Optional Comm. Interfaces	Ethernet/GPRS
<b>MECHANICAL DATA</b>	
Dimensions (WxHxD)	2800x2180x850mm
Net Weigh	2288kg