

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

Université A.MIRA-BEJAIA

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique



## Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Electrotechnique

Option : Réseaux Électriques

**Thème:**

---

Emplacement optimal des générateurs décentralisés  
dans un réseau de distribution

---

**Préparé par :**

Mr. HAMMICHE Boubekour

Mr. BOUNCEUR Anis

**Encadré par :**

Mme. N. AOUZELLAG

Mr. F. OUALI

Année Universitaire : 2020/2021

# Remerciement

Avant tout, nous remercions Dieu le tout puissant qui nous a donné la force et la Patience de faire ce travail.

Nos sincère remerciements pour notre encadreur Mme N. AOUZELLAG, et également, notre co-encadreur Mr. F.Ouali. Pour leur précieux suivi durant toute la période du travail.

Nous remercions également tous les enseignants de département Génie Electrique de l'université de Bejaïa qui ont participé à notre formation pendant tout le cycle universitaire..

A tous les membres du jury pour avoir accepté de juger notre travail.

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Nous exprimons nos profonds remerciements pour nos familles et nos amis.

# SOMMAIRE

<b>Introduction générale .....</b>	<b>1</b>
<b>ChapitreI. Architectures des réseaux de distribution et méthodes de calcul de l'écoulement de puissances.....</b>	<b>3</b>
I.1. Introduction.....	3
I.2. Architectures des réseaux électriques.....	3
I.2.1. Réseau radial .....	3
I.2.2. Réseau bouclé .....	4
I.2.3. Réseau maillé .....	4
I.3. Organisation des réseaux électriques .....	5
I.3.1. Transport.....	5
I.3.2. Répartition .....	6
I.3.3. Distribution .....	6
I.3.3.1 Réseaux ruraux.....	6
I.3.3.2. Réseaux urbains.....	7
I.4. Méthodes de calcul de l'écoulement de puissance dans un réseau radial .....	11
I.4.1 Méthode se basant sur la topologie d'un réseau de distribution .....	11
I.4.1.1. Matrice [BIBC] .....	11
I.4.1.2. Matrice [BCBV].....	13
I.4.1.3. Développement de la méthode .....	14
I.4.1.4. Algorithme de la méthode.....	14
I.4.2. Méthode Progressive- Rétrogressive .....	15
I.4.2.1. Mise en équation pour les réseaux radiaux de distribution .....	15
I.4.3. Méthode se basant sur le théorème Tellegen .....	18
I.4.3.1. Méthodologie du théorème Tellegen .....	18
I.5. CONCLUSION .....	21

<b>ChapitreII. Production décentralisée et optimisation de son emplacement dans le réseau de distribution.....</b>	<b>22</b>
II.1. Introduction .....	22
II.2. Production Décentralisée.....	22
II.2.1. Types de productions décentralisées .....	22
II.2.2. Avantage de la production décentralisée .....	23
II.2.3. Contraintes existantes dans l'allocation de la génération distribuée .....	23
II.3. Intégration de la PD sur le réseau de distribution.....	23
II.3.1. Conditions de raccordement .....	23
II.3.2. Types de raccordement.....	23
II.4. Impacts de la production décentralisée sur le réseau de distribution.....	24
II.4.1. Impact sur les transits des puissances .....	24
II.4.2. Impact sur la tension .....	24
II.4.3. Capacité du réseau et la congestion .....	25
II.4.4. Impact sur le plan de protection.....	25
II.4.5. Impact sur le courant de court-circuit .....	26
II.5. Organisation du réseau de distribution en présence de PD .....	26
II.5.1. Emplacement des PD .....	27
II.5.2. Taille des PD.....	27
II.5.3. Fonction objectif.....	27
II.5.4. Choix de la méthode d'optimisation .....	27
II.5.5. Choix de l'emplacement optimal .....	28
II.6. Conclusion.....	31
<b>ChapitreIII. Simulation et interprétation des résultats .....</b>	<b>32</b>
III.1. Introduction .....	32
III.2. Présentation du réseau étudié .....	32
III.3. Plan de travail.....	36

III.4. Résultats de programmation.....	36
III.4.1. Etat du réseau sans la présence de la PD.....	36
III.4.2. Etat du réseau avec insertion de la PD.....	40
III.4.3. Comparaison de l'état du réseau avant et après l'insertion de la PD.....	45
III.5. Synthèse .....	48
III.6. CONCLUSION .....	49
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>50</b>
<b>Bibliographie .....</b>	<b>Error! Bookmark not defined.</b>

## Nomenclature

Symboles	Définition
PD	Production décentralisée
GED	Générateur d'énergie dispersée
LSF	Facteur de sensibilité aux pertes
Kv	kilo Volt
HTB	Haute Tension
HTA	Moyenne Tension
BTA	Basse Tension
[BIBC]	Bus-injection to branch-current
[BCBV]	Matrix Branch-current to bus-voltage
IB	Courant de branche
$I_{ch}$	Courant de charge
M	Nombre de branche
N	Nombre d'accès
$B_k$	Branche k
Z	Impédance de la ligne
$V_n$	Tension
$\Delta V$	Chutes de tension
P	Puissance active
Q	Puissance réactive
R	Résistance de la ligne
X	Réactance de la ligne

Y	Admittance de la ligne
$\gamma$	Constante de propagation
TT	Théorème de Tellegen
RDN	Réseau de distribution radial
S	Puissance apparente
JB	Jeu de barres
IVM	Méthode de vecteur index
VSI	Indice de sensibilité à la tension
$\Delta \bar{S}_{ij}$	Erreur sur la puissance apparente
$\Delta P_{ij}$	Erreur sur la puissance active
$\Delta Q_{ij}$	Erreur sur la puissance réactive

## Liste des figures

Figure I.1:	Réseau radial	4
Figure I.2:	Réseau bouclé	4
Figure I.3:	Réseau maillé	4
Figure I.4:	Organisation générale du système électrique	5
Figure I.5:	Structure d'un réseau rural	7
Figure I.6:	Topologie du réseau urbain en double dérivation	8
Figure I.7:	Trois variations de la topologie en coupure d'artère (maillé)	9
Figure I.8:	Topologie du réseau maillé (grille)	10
Figure I.9:	Exemple d'un réseau contenant les structures bouclées	11
Figure I.10:	Exemple d'un réseau de distribution radial à 6 nœuds	12
Figure I.11:	Modèle d'une branche en $\pi$	17
Figure I.12:	Circuit équivalent d'un RDN sans branches latérales	18
Figure I.13:	Réseau de distribution radial (RDN) par niveau	19
Figure I.14:	Réseau de distribution illustrant les différentes puissances	20
Figure I.15:	Courant entrant et sortant au nœud-k pour un RDN	21
Figure II.1:	Illustration des configurations de raccordement en départ	24
Figure II.2:	Illustration des configurations de raccordement en départ direct	24
Figure II.3:	Schémas illustratif sur l'impact de production décentralisé sur le plan de tension	25
Figure II.4 :	Courant de court-circuit dans un réseau radial sans PD	26
Figure II.5:	Courant de court-circuit dans un réseau radial avec PD	26
Figure II.6:	Organisation du réseau de distribution en présence des PD	27

Figure II.7:	Tronçon d'une ligne de distribution	28
Figure III.1:	Schéma unifilaire du réseau de distribution étudié	33
Figure III.2:	Amplitude de la tension aux nœuds	36
Figure III.3 :	Chute de tension dans les segments	37
Figure III.4:	Perte de la puissance active dans les segments	37
Figure III.5:	Perte de la puissance réactive dans les segments	38
Figure III.6 :	Sens de transit de puissance (courant) dans le réseau	40
Figure III.7:	Amplitude de la tension aux nœuds après intégration de la PD	41
Figure III.8 :	Chute de tension dans les segments après intégration de la PD	42
Figure III.9 :	Pertes de puissance active dans les segments après intégration de la PD	42
Figure III.10 :	Pertes de puissance réactive dans les segments après intégration de la PD	43
Figure III.11:	Sens du transit de puissance dans le réseau après insertion de la PD	45
Figure III.12:	Amplitude de la tension aux nœuds avant et après intégration de la PD	46
Figure III.13:	Amplitude de la tension aux nœuds avant et après intégration de la PD	46
Figure III.14:	Pertes de puissance active dans les segments avant et après intégration de la PD	47
Figure III.15:	Pertes de puissance réactive dans les segments avant et après intégration de la PD	47

## Liste des tableaux

Tableau III.1 :	Données des lignes	34
Tableau III.2 :	Données des charges	35
Tableau III.3 :	Courants transités dans les segments	39
Tableau III.4 :	Courants transités dans les segments après insertion de la PD	44
Tableau III.5 :	Pertes totales actives et réactives avant et après l'insertion de la PD	48

## Introduction générale

De nos jours, l'énergie électrique est un bien de consommation à part entière devenue indispensable, non seulement pour la vie quotidienne de chacun mais, également, pour l'économie des pays. En effet, les moindres pannes électriques ou la non satisfaction du besoin en puissance ont des conséquences économiques et sociétales considérables. Ainsi, la nécessité d'avoir des réseaux électriques fiables et économiques est un enjeu de plus en plus important [01].

Les réseaux électriques sont traditionnellement exploités d'une manière centralisée et la plus grande partie de la production électrique est centrée autour des centrales à grande capacité de production (hydrauliques, thermiques, nucléaires). Cette production est souvent liée à des emplacements géographiques adéquats (sources d'eau, impératifs techniques, ... etc.). L'énergie est ensuite acheminée vers les grands centres de consommation à travers de lignes aériennes et de câbles, souvent à de grandes distances et à des niveaux de tension plus au moins importants [02].

Le développement de nouvelles sources de production décentralisée « PD », appelée aussi générateur d'énergie dispersée « GED », est désormais une réalité dans plusieurs pays à travers le monde grâce à la déréglementation du marché de l'énergie ainsi qu'aux évolutions technologiques des moyens de production de petite puissance. Cette manière de production d'énergie est destinée à être produite localement, c'est-à-dire, près des lieux de consommation en général, et donc destinée à être transportée sur de courtes ou moyennes distances [03].

Malgré que l'intégration des PD dans les réseaux de distribution présente plusieurs avantages, en revanche, elle présente aussi plusieurs impacts négatifs sur la tension, les transits des puissances et sur la protection du réseau.

La solution à ces problèmes passe par l'intégration optimale des PD dans les réseaux de distribution, donc l'objectif que nous nous sommes fixé est la détermination de l'emplacement optimal des PD par une méthode d'optimisation simple pour réduire au mieux les pertes de puissance, améliorer le profil de la tension, et soulager les lignes de transmission électrique.

Pour cela, on a choisi une méthode d'optimisation se basant sur le facteur de sensibilité aux pertes « LSF » [04][05], pour déterminer l'emplacement optimal de la PD, car cette technique permet de trouver rapidement la solution la plus proche de l'optimum et elle donne la taille optimale et l'emplacement idéal de la PD dans le réseau de distribution, elle permet aussi d'atteindre plusieurs objectifs en même temps.

Le présent mémoire est structuré en trois chapitres. Le premier sera consacré aux généralités sur les différentes architectures des réseaux électriques, ainsi que sur le développement des équations de calcul de l'écoulement de puissance. Une attention particulière sera portée au réseau de distribution.

Le deuxième chapitre aborde en premier lieu quelques notions sur la production de l'énergie décentralisée, ensuite, il traite les problèmes liés à leur insertion dans les réseaux électrique de distribution. Nous nous intéresserons en deuxième lieu aux méthodes d'optimisation pour la détermination optimale de l'emplacement des PD.

Enfin, le troisième chapitre constitue une contribution à l'étude de l'écoulement de puissance par une méthode basée sur la topologie des réseaux de distribution. Dans la suite, nous allons étudier le réseau à son état initial et avec la présence de la PD. Nous terminerons par l'optimisation de son emplacement en appliquant la méthode se basant sur le facteur de sensibilité aux pertes « LSF ».

## **Architectures des réseaux de distribution et méthodes de calcul de l'écoulement de puissances**

### **I.1.Introduction**

A l'origine, le réseau électrique a été construit et dimensionné pour transporter l'énergie électrique produite par les centres de production jusqu'aux centres de consommation les plus éloignés. Ainsi, les transits de puissances circulent de l'amont depuis les productions d'énergie électrique de type grosses centrales thermiques, hydraulique ou nucléaire, vers l'aval représenté par les consommateurs de l'énergie électrique. Le réseau électrique met donc en œuvre des milliers de kilomètres de ligne, des milliers de poste de transformation, ainsi que de nombreux organes de coupure et d'automates de réglage, etc. dimensionnés pour assurer le bon fonctionnement de la fourniture d'énergie électrique [06].

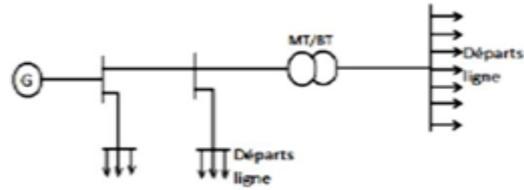
Dans ce présent chapitre, nous allons présenter les différentes architectures des réseaux électriques, une attention particulière sera accordée au réseau de distribution, ainsi qu'aux méthodes les plus appliquées pour le calcul de l'écoulement de puissance dans ce dernier.

### **I.2.Architectures des réseaux électriques**

L'architecture est celle qui apparaît sur une carte sous forme de schéma simplifié (schéma ou une ligne triphasée est représentée par un trait unique). Ils existent plusieurs topologies, dans ce qui suit, sont présentées les plus habituelles :

#### **I.2.1. Réseau radial**

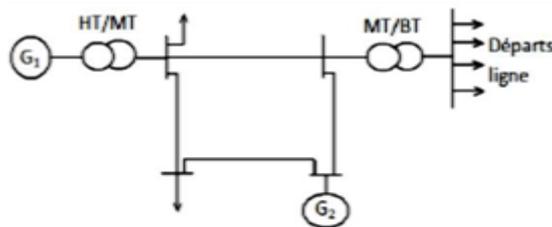
Une topologie radiale et celle dont le schéma unifilaire est dit «arborescent», elle représente la forme de réseau la plus simple (figure I.1). Les lignes se développent en antenne en partant de la station de transformation. Tous les accès ne sont alimentés que par une seule ligne, ainsi, le flux de puissance n'a qu'un trajet possible. La sécurité par contre est rudimentaire, puisque une avarie sur une ligne et l'ouverture du disjoncteur concerné entraîne une interruption de service pour tous les usagers en aval, sans oublier que les consommateurs les plus éloignés de la chaîne de consommation doivent faire face à d'importantes fluctuations de tension [07].



**Fig. I.1: Réseau radial**

## I.2.2. Réseau bouclé

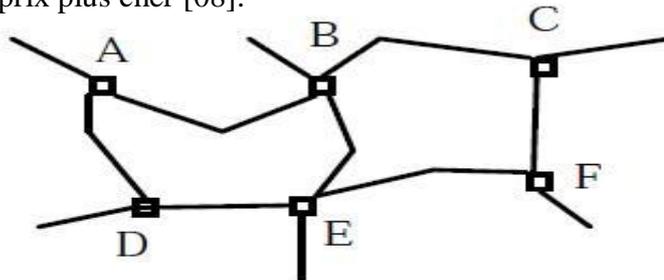
Les réseaux bouclés sont alimentés à la fois par plusieurs sources (figure I.2), les postes sont raccordés en coupure d'artère, cette disposition permet lors d'une coupure, une continuité de service. L'existence de plusieurs sources en parallèle augmente la sécurité d'alimentation en cas d'avarie de l'une d'elles (transformateurs) ou en cas d'avarie sur une boucle [08].



**Fig. I.2 : Réseau bouclé**

## I.2.3. Réseau maillé

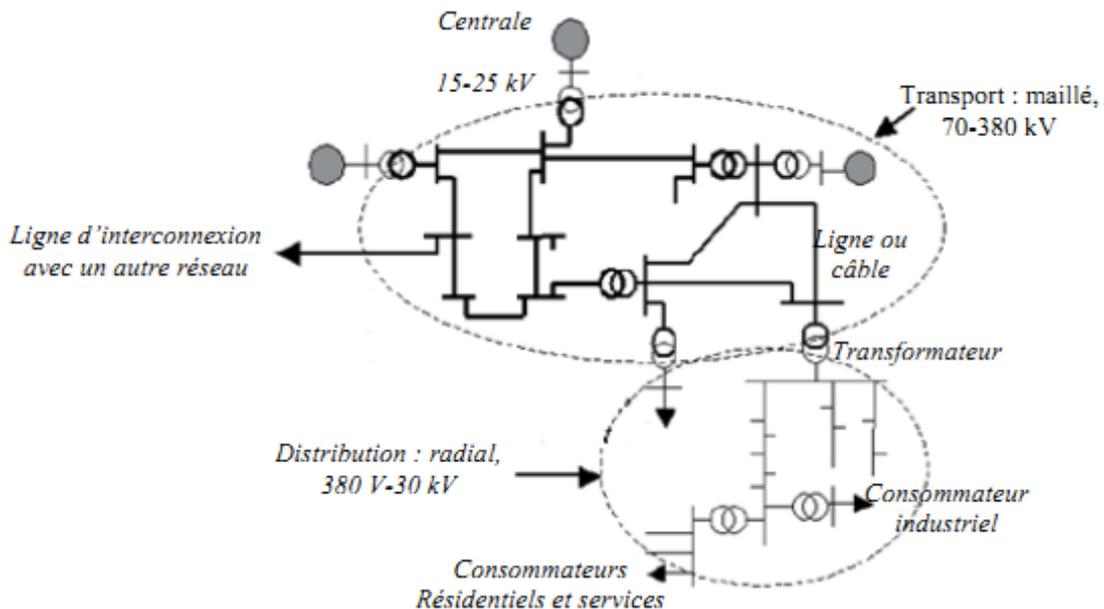
Les réseaux maillés sont des réseaux où toutes les lignes sont bouclées formant ainsi une structure analogue aux mailles d'un filet, de plus, le nombre de sources débitant en parallèle peut atteindre plusieurs dizaines (figure I.3). Cette structure nécessite que tous les tronçons de ligne soient capables de supporter des surcharges permanentes et qu'ils soient munis à leurs deux extrémités d'appareils de coupure les isolants en cas d'avarie. On obtient une meilleure sécurité, mais à un prix plus cher [08].



**Fig. I.3 : Réseau maillé**

## I.3. Organisation des réseaux électriques

Un réseau électrique est un ensemble d'outils destiné à produire, transporter, distribuer (figure I.4) l'énergie électrique et à veiller sur la qualité de cette énergie, notamment la continuité de service et la qualité de la tension [9]. On distingue:



**Fig. I.4 : Organisation générale du système électrique**

### I.3.1. Transport

Ce réseau de transport assure le transport de l'énergie électrique sur de grandes distances. Afin de minimiser, entre autres, les pertes joules sur les lignes, ces réseaux sont à très haute tension (de 400 kV, 225 kV). Du point de vue topographique, pour des raisons de sécurité de fonctionnement, les réseaux de transport sont des réseaux maillés ou interconnectés afin de collecter l'électricité produite par les centrales importantes et de l'acheminer par grand flux vers les zones de consommation, et de permettre une exploitation économique et sûre des moyens de production en assurant une compensation des différents aléas (fonction interconnexion) [10] [11].

## **I.3.2. Répartition**

Le réseau de répartition (63kV, 90kV), celui-ci assure le transport des réserves en électricité composées de l'énergie puisée au réseau de transport et de productions de plus petites échelles vers les zones de consommations et à quelques gros clients industriels directement connectés à celui-ci [12]. Les réseaux de répartition ont fréquemment une structure bouclée et peuvent alors être exploités soit en boucle fermée soit en boucle ouverte. Certaines alimentations se font aussi en antenne ou encore en piquage en prélevant une partie de l'énergie circulant sur une ligne reliant deux postes [13].

## **I.3.3. Distribution**

Les réseaux de distribution assurent la distribution de l'énergie électrique au niveau local. Leur tension est inférieure ou égale à 50 kV (HTB). Ils sont constitués de deux types de réseaux :

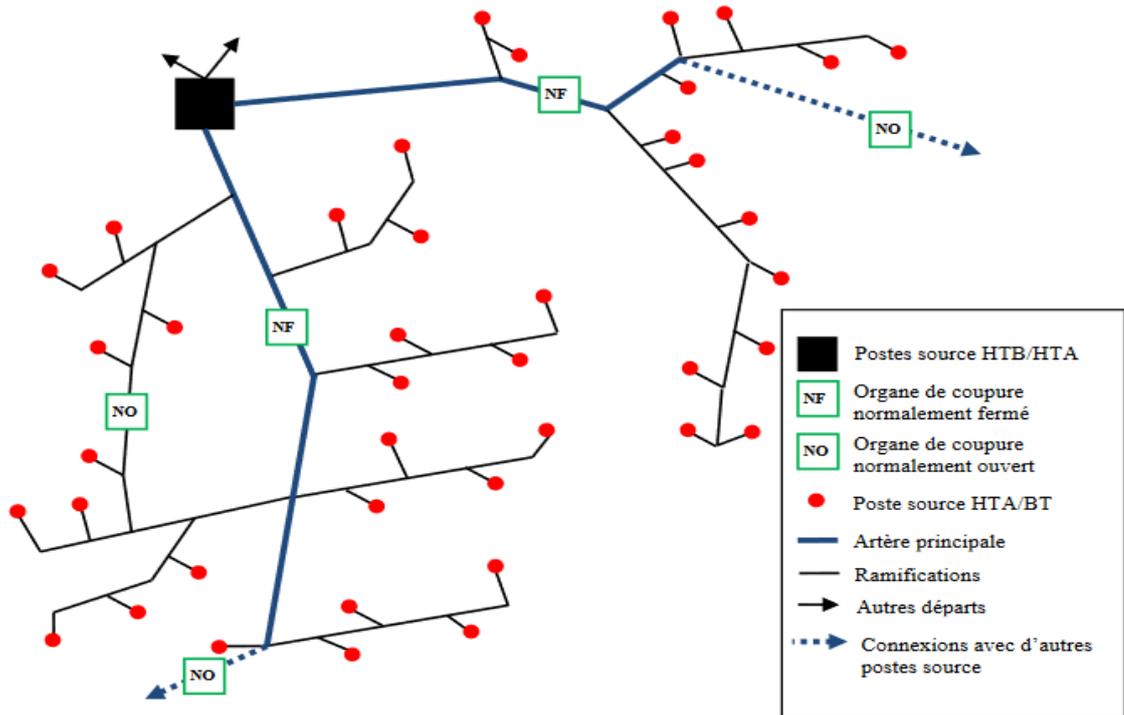
Le réseau moyenne tension (HTA), qui est connecté au réseau de transport ;

Le réseau basse tension (BTA).

Les réseaux de distribution sont dans la très grande majorité des cas exploités de manière radiale. Cette structure permet de facilement assurer la maintenance du réseau, notamment pour la détection et l'élimination rapide des défauts. Des schémas d'exploitation de secours entre postes sources sont prévus et permettent de minimiser le nombre de clients coupés en cas de défaillances [14].

### **I.3.3.1 Réseaux ruraux**

Les réseaux ruraux ont une topologie très faiblement maillée, avec des boucles entre les différents postes source ou les ramifications, mais l'exploitation se réalise via une structure arborescente (figure I.5). Il existe ainsi des organes de manœuvre normalement ouverts, pouvant être manœuvrés pour isoler un défaut éventuel [15].



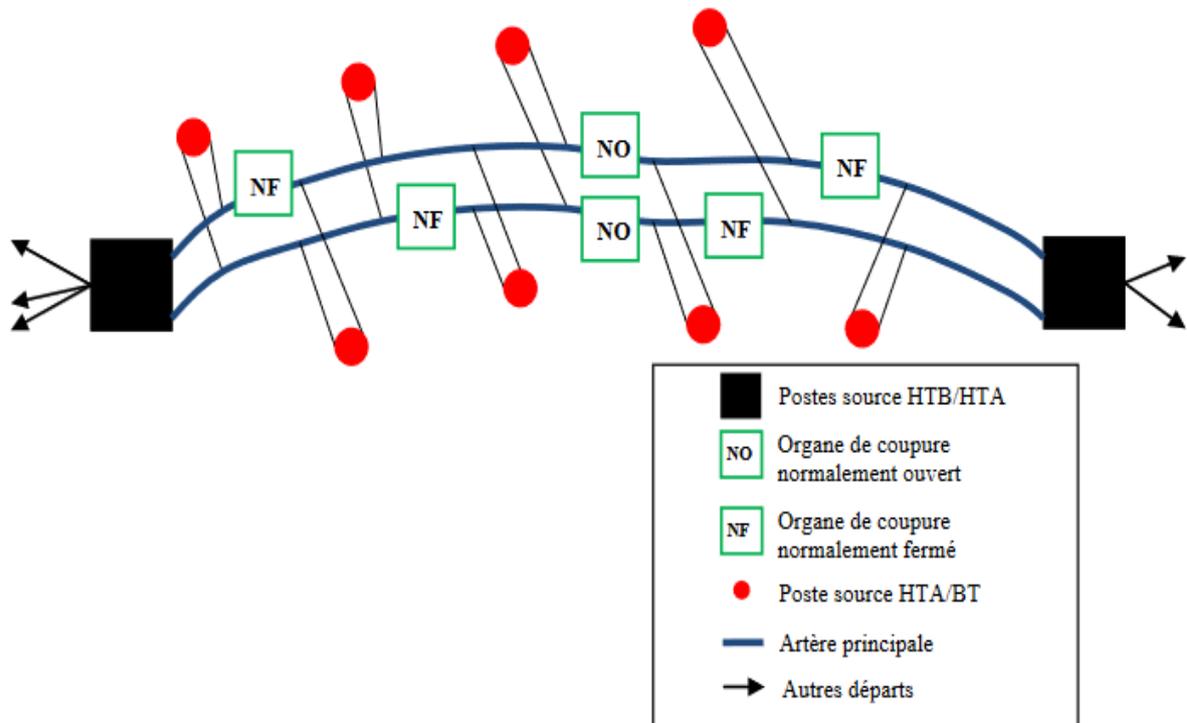
**Fig. I.5 : Structure d'un réseau rural à moyenne tension**

### I.3.3.2. Réseaux urbains

Les réseaux urbains sont caractérisés principalement par une forte densité de charges. Cette caractéristique varie selon les zones, y compris au sein de la même localité. C'est pourquoi ils sont très variés en fonction des besoins des clients, des aspects historiques et des objectifs posés pendant la conception de réseaux. On distingue trois groupes de topologies principales: les réseaux en dérivation multiples, les réseaux en coupure d'artère, les réseaux fortement bouclés [16].

#### *A .Réseaux en dérivation multiples*

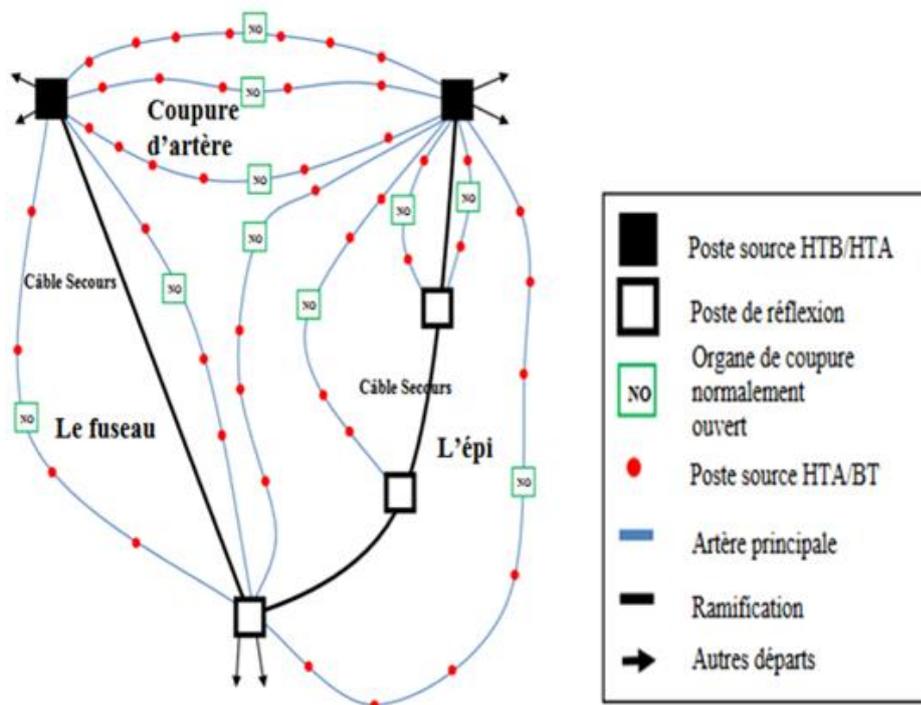
Ce type de réseaux se compose de deux postes source HTB/HTA qui sont connectés par deux (pour la double dérivation), ou plusieurs (dérivations multiples) circuits triphasés placés en parallèle. Les charges (transformateurs HTA/BTA) sont connectées soit à un circuit, soit à un second qui peut être un circuit de secours dédié. L'exploitation du réseau ayant cette structure peut être facilement automatisée. La Figure (I.6) montre un réseau en double dérivation [01].



**Fig. I.6 : Topologie du réseau urbain en double dérivation à moyenne tension**

## ***B. Réseau en coupure d'artère***

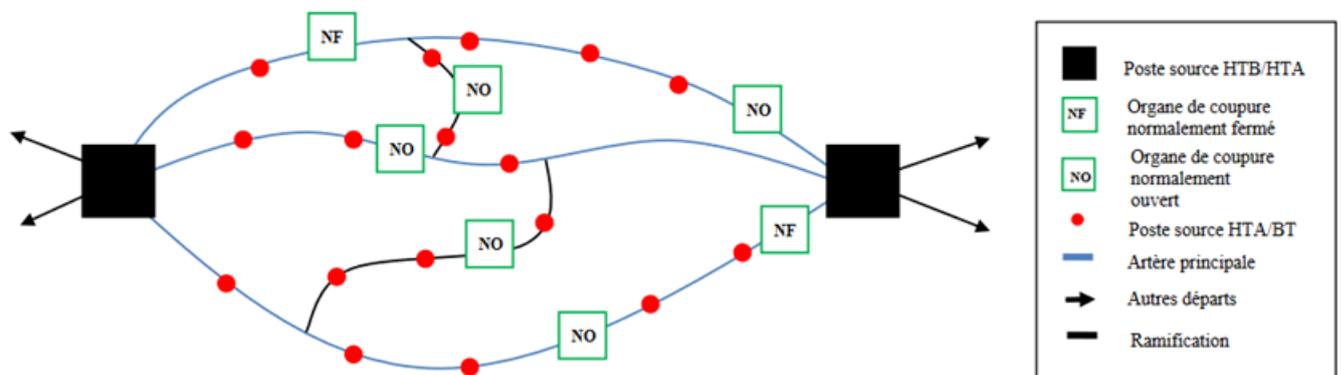
Dans les réseaux de ce type, les postes source HTB/HTA sont raccordés deux à deux par des circuits dit artères. Chaque charge est connectée directement à une artère qui contient un ou plusieurs organes de coupure ayant l'état normalement ouvert ou fermé afin de réaliser l'exploitation dans une structure radiale. Dans certains cas, la connexion entre les postes HTB/HTA peut être renforcée par un câble de secours. Il existe les variantes de la structure en coupure d'artère appelées le fuseau et l'épi. La figure (I.7) présente les trois structures en coupure d'artère.



**Fig. I.7 : Trois variations de la topologie en coupure d'artère (maillé) à moyenne tension**

Dans la structure en fuseau sur la gauche de la figure (I.7) tous les câbles issus d'un même poste convergent vers un même point appelé point de réflexion [17]. Ce point peut être considéré comme un lieu privilégié pour la création, dans le futur, d'un nouveau poste source HTB/HTA. Le point de réflexion peut être aussi connecté par un câble secours. La structure en épi montrée sur la partie droite de la figure (I.7) se caractérise par la présence de plusieurs postes de réflexion connectés successivement par le câble de secours et ensuite par les câbles de travail avec le poste source HTB/HTA. Cette architecture permet de développer le réseau autour d'un même poste de façon plus économique et plus souple que dans le fuseau. De plus elle tient compte de la répartition réelle des charges ce qui minimise, au final, la longueur totale des lignes par rapport à la structure en fuseau [16].

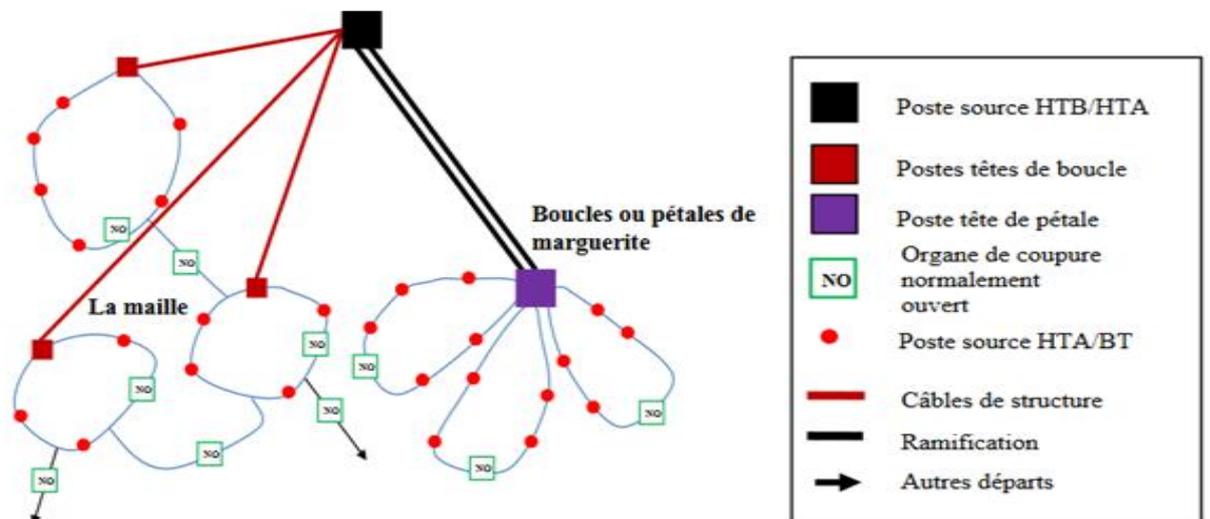
Une variante de l'architecture en coupure d'artères est la structure maillée ou la grille. Elle diffère par la présence d'un grand nombre des boucles formées par des conducteurs reliant les postes source HTB/HTA entre eux, les charges et les connexions intermédiaires. L'exploitation de cette structure se réalise en radial grâce au placement de plusieurs organes de manœuvre normalement ouverts dans le réseau. L'existence de nombreuses connexions entre des lignes dans le réseau apporte une grande sécurité d'alimentation comme montrée sur la figure (I.8) [16].



**Fig. I.8 : Topologie du réseau maillé (grille) à moyenne tension**

### C. Réseaux bouclés

Dans la figure (I.9) deux types d'architecture fortement bouclée sont représentées : la maille et les boucles (ou pétales de marguerite). Dans ces réseaux, chaque ligne qui forme une boucle doit être alimentée à partir d'un même poste source HTB/HTA (ou à partir des postes têtes de boucle). Les postes têtes de pétales sont eux connectés aux sources HTB/HTA par des conducteurs de section importante appelés câbles de structure [16].



**Fig. I.9 : Exemple d'un réseau contenant les structures bouclées à moyenne tension**

## I.4. Méthodes de calcul de l'écoulement de puissance dans un réseau radial

Cette étude est nécessaire pour la planification, l'échange de puissance entre les centres de production et le dispatching économique. Elle est aussi essentielle pour l'évaluation de la stabilité transitoire, stabilité dynamique et l'estimation de l'état du réseau ainsi que la prise de mesure adéquate à d'éventuelle imprévue. La planification d'une future extension pourrait se baser sur l'étude de l'écoulement de puissance dans ce réseau [18].

Dans ce qui suit, trois principales méthodes qui traitent le problème lié au calcul d'écoulement de puissance dans un réseau de distribution radial, seront développées à savoir :

- ❖ Méthode se basant sur la topologie d'un réseau de distribution ;
- ❖ Méthode Progressive - Rétrogressive ;
- ❖ Méthode se basant sur le théorème Tellegen.

### I.4.1 Méthode se basant sur la topologie d'un réseau de distribution

Cette méthode est basée sur la construction de deux matrices, la matrice  $[BIBC]$  qui représente le rapport entre les courants injectés à l'accès charge et les courants des branches et la matrice  $[BCBV]$  qui représente le rapport entre les courants des branches et les tensions d'accès [19].

#### I.4 .1.1. Matrice $[BIBC]$

Soit le réseau de distribution illustrer sur la figure (I.10). Les courants des branches peuvent être obtenus en appliquant les lois de Kirchhoff au réseau de distribution. Les courants des branches peuvent être exprimés en fonction des courants de charges [20].

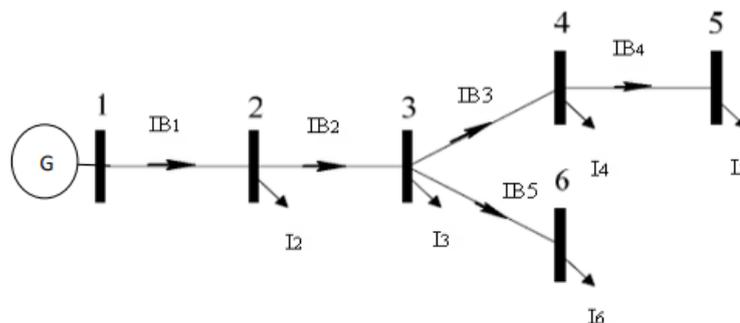


Fig. I.10 : Exemple d'un réseau de distribution radial à 6 nœuds

## Chapitre I

---

$$\begin{cases} IB_1 = I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6 \\ IB_2 = I_3 + I_4 + I_5 + I_6 \\ IB_3 = I_4 + I_5 \\ IB_4 = I_5 \\ IB_5 = I_6 \end{cases} \quad (0.1)$$

Par conséquent, le rapport entre les courants injectés aux accès et les courants de branche peuvent être exprimé comme suit :

$$\begin{bmatrix} IB_1 \\ IB_2 \\ IB_3 \\ IB_4 \\ IB_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} \quad (0.2)$$

L'équation (I.2) peut être réécrite sous la forme générale :

$$[IB] = [BIBC][I_{ch}] \quad (0.3)$$

Où :

$[IB]$ : Vecteur des courants de branches de dimension  $m$  ;

$[I_{ch}]$ : Vecteur des courants de charges (injectés) de dimension  $(n-1)$  ;

$[BIBC]$ : Matrice reliant les courants de branches avec les courants de charges  $(n-1) \times m$ .

$m$  et  $n$  : représentent respectivement le nombre de branches et d'accès.

La matrice  $[BIBC]$  est une matrice triangulaire supérieure, qui contient que des zéro et des (+1) seulement. Elle est calculée comme suit :

**Étape 1a** : Pour un réseau de distribution avec  $(m)$  branches et  $(n)$  accès, la dimension de la matrice  $[BIBC]$  est  $((n-1) \times m)$  ;

**Étape 2a** : Si une ligne ( $B_k$ ) est située entre deux accès  $i$  et  $j$ , copier la colonne  $i$  de la matrice  $[BIBC]$  à la colonne  $j$ , et mettre (+1) en position de la ligne  $k$  dans la colonne  $j$  ;

**Étape 3a** : Un procédé de répétition de l'étape (2a) jusqu'à inclure toutes les branches dans la matrice  $[BIBC]$ .

## I.4.1.2. Matrice [BCBV]

C'est le rapport entre les courants de branches et les tensions d'accès. Par exemple, les tensions du nœud 3 ( $V_3$ ) et du nœud 4 ( $V_4$ ) sont [19]:

$$\begin{cases} V_3 = V_2 - IB_2 Z_{23} \\ V_4 = V_3 - IB_3 Z_{34} \end{cases} \quad (0.4)$$

$Z_{23}$  et  $Z_{34}$  représentent les impédances des tronçons de ligne entre les nœuds (2-3) et (3-4), respectivement.

La tension  $V_4$  peut être écrite sous la forme :

$$V_4 = V_1 - IB_1 Z_{12} - IB_2 Z_{23} - IB_3 Z_{34} \quad (0.5)$$

D'après (I.5), on peut constater que la tension au nœud peut être exprimée en fonction des courants de branche. Les mêmes procédures peuvent être appliquées sur d'autres nœuds, le rapport entre les courants de branches et les tensions d'accès peut être exprimé par :

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_1 \\ V_1 \\ V_1 \\ V_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & Z_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} IB_1 \\ IB_2 \\ IB_3 \\ IB_4 \\ IB_5 \end{bmatrix} \quad (0.6)$$

L'équation (I.6) peut être réécrite sous la forme générale :

$$[\Delta V] = [BCBV][IB] \quad (0.7)$$

Où :

[ $\Delta V$ ]: Vecteur des chutes de tension, de dimension  $(n-1)$ ;

[BCBV]: Matrice qui relie les courants de branches et les chutes de tension  $(n-1) \times m$ .

La matrice [BCBV] prend comme éléments les impédances de branches. Pour construire la matrice [BCBV], on suit la procédure suivante :

**Étape 1b :** Pour un réseau de distribution avec  $(m)$  branches et  $(n)$  nœuds, la dimension de la matrice [BCBV] est  $((n-1) \times m)$  ;

**Étape 2b :** Si une ligne ( $Bk$ ) est située entre deux accès  $i$  et  $j$ , copier la ligne de l'accès  $i$  de la matrice  $[BCBV]$  à la ligne d'accès  $j$ , et mettre l'impédance de ligne ( $Z_{ij}$ ) en position de la ligne  $j$  et de la colonne  $k$  ;

**Étape 3b :** Un procédé de répétition de l'étape (2b) jusqu'à inclure toutes les branches dans la matrice  $[BCBV]$ .

### I.4.1.3. Développement de la méthode

Le développement des matrices  $[BIBC]$  et  $[BCBV]$  est basé sur la structure topologique des réseaux de distribution.

En combinant (I.3) et (I.7), le rapport entre les courants injectés aux accès et les tensions d'accès peuvent être exprimé comme suit :

$$[\Delta V] = [BCBV][BIBC][I] = [DLF][I] \quad (0.8)$$

La solution pour l'écoulement de puissance du réseau de distribution peut alors être obtenue par le processus itératif de (I.9), (I.10) et (I.11):

$$I_i^k = \left( \frac{P_i + jQ_i}{V_i^k} \right)^* \quad (0.9)$$

$$[\Delta V^{k+1}] = [DLF][I^k] \quad (0.10)$$

$$[V^{k+1}] = [V_1] + [\Delta V^{k+1}] \quad (0.11)$$

Le calcul des pertes totales est vérifié par l'équation (I.12).

$$\Delta \bar{S}_{ij} = \Delta P_{ij} + j\Delta Q_{ij} = \bar{V}_i \cdot (\bar{I}_{ij})^* - \bar{V}_j \cdot (\bar{I}_{ij})^* \quad (0.12)$$

### I.4.1.4. Algorithme de la méthode

**Étape 1.** Mettre le compteur d'itération  $k = 0$  ;

**Étape 2.** Appliquer les procédures de 1a à 3a et l'équation (I.3) pour former la matrice  $[BIBC]$ ;

**Étape 3.** Appliquer les procédures de 1b à 3b et l'équation (I.7) pour former la matrice  $[BCBV]$  ;

**Étape 4.** Appliquer l'équation (I.8) pour former la matrice  $[DLF]$  ;

**Étape 5.** Incrémenter le compteur  $k = k + 1$  ;

**Étape 6.** Calculer l'écoulement de puissance en employant les équations (I.9), (I.11) et (I.12).

**Étape 7.** Tester la convergence pour le calcul de  $\max_i (|I_i^{k+1}| - |I_i^k|) > \xi$  (la tolérance), aller à l'étape (6).

### I.4.2. Méthode Progressive- Rétrogressive

Les auteurs dans la référence [21] ont présenté une technique simple et performante pour résoudre le problème d'écoulement de puissance dans le système de distribution radial. Ils ont pris en considération la dépendance de la tension des charges statiques, et la charge capacitive de la ligne. La méthode est basée sur la technique de tension progressive-rétrogressive, pour chaque branche et elle se met à jour via :

Des équations polynômiales de tension ;

Des équations à échelle rétrograde.

L'algorithme proposé a une capacité de convergence robuste en comparaison avec la version améliorée de la méthode classique algorithme progressive-rétrograde.

#### I.4.2.1. Mise en équation pour les réseaux radiaux de distribution

Dans un modèle de charge statique les puissances active et réactive peuvent être exprimées soit sous forme polynomiale ou exponentielle.

Sous forme exponentielle les puissances active et réactive peuvent être modélisées de la sorte :

$$P = P_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{n_p} \quad (0.13)$$

et

$$Q = Q_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{n_q} \quad (0.14)$$

Où :

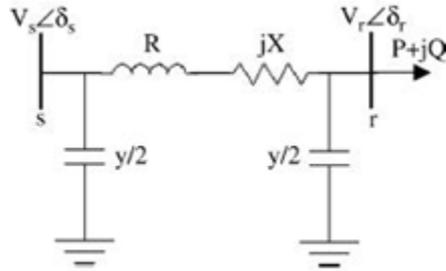
$n_p, n_q$  : représentent l'exposant des charges;

$P_0, Q_0$  : représentent les valeurs des puissances active et réactive nominales des charges;

$V, V_0$  : représentent les tensions aux jeux de barres et la tension nominale de référence, respectivement.

## Chapitre I

Dans les réseaux de distribution qui ont une structure radiale avec plusieurs embranchements et sous-embranchements, la tension de charge d'une branche du réseau, représentée dans la figure (I.11), peut être calculée en utilisant des équations polynomiales qui donnent la relation existante entre la tension à la source et à la réception



**Fig. I.11: Modèle d'une branche en  $\pi$**

Pour le cas illustré dans la figure (I.11), en utilisant l'équation polynomiale, et en supposant que, les puissances active et réactive transmises peuvent être écrites sous la forme suivante :

$$P = \frac{|V_r| |V_s|}{Z} \cos(\theta_Z - \delta_s) - \frac{|A| |V_r|^2}{Z} \cos(\theta_Z - \delta_A) \quad (0.15)$$

et

$$Q = \frac{|V_r| |V_s|}{Z} \sin(\theta_Z - \delta_s) - \frac{|A| |V_r|^2}{Z} \sin(\theta_Z - \delta_A) \quad (0.16)$$

Sachant que  $\gamma = \sqrt{Z \cdot Y}$  est la constante de propagation de l'onde tension avec  $Z$  et  $Y$  représentant respectivement l'impédance et l'admittance de la ligne et  $A$  est un paramètre de la ligne donné par l'expression :  $A = \cosh(\gamma)$ .

Avec :

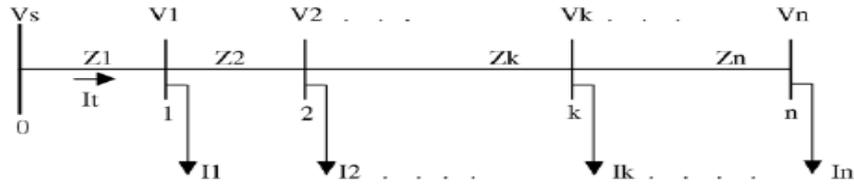
$V_s$ ,  $V_r$  qui représentent respectivement la tension à la source et à l'extrémité de la charge;  
 $\theta_Z$ ,  $\delta_s$ ,  $\delta_A$  représentent, respectivement, l'angle de phase de  $Z$ , de la tension à la source et celle du paramètre de la ligne  $A$ .

Une solution simple qui dépend de l'angle de phase, de la relation qui lie, la tension avec la charge statique et les paramètres de la ligne, est donnée par l'équation (I.17):

$$|A|^2 |Vr|^4 + 2|A|Vr^2 |Z| (p_0 Vr^{np} \cos(\Theta_Z - \delta_A) + Q_0 Vr^{np} \sin(\Theta_Z - \delta_A)) - V_S^2 Vr^2 + (P_0^2 Vr^{2np} + Q_0^2 Vr^{2nq}) |Z|^2 = 0 \quad (0.17)$$

Dans l'algorithme proposé. La valeur de  $V_r$  utilisée par le programme (progressive-rétrograde) représente la solution de l'équation (I.17) dont la partie réelle est positive et maximale.

Le processus de progression de l'algorithme est basé sur cette équation polynômiale pour chaque branche du réseau.



**Fig. I.12 : Circuit équivalent d'un RDN sans branches latérales**

Du schéma illustré sur la figure (I.12), la formule qui nous permet le calcul des tensions aux accès lors du processus rétrogressif, peut être écrite comme suit:

$$V_S = V_n + I_t \sum_{k=1}^n Z_k - \sum_{k=1}^{n-1} I_k \left( \sum_{i=k+1}^n Z_i \right) \quad (0.18)$$

Avec,

$$I_k = \left( \frac{S_k}{V_k} \right)^* \quad (0.19)$$

Où,

$$V_k^{ajuster} = \frac{V_k^{nouveau}}{V_S} \quad (0.20)$$

Et

$$\left| |V_k^{j+1}| - |V_k^j| \right| \leq \varepsilon \quad (0.21)$$

Où:

$V_S$  et  $V_n$  : Tensions de l'extrémité d'émission et de réception, respectivement ;

$Z_k$  et  $Z_i$ : Impédances au  $k^{\text{ième}}$  et le  $i^{\text{ième}}$  nœud du réseau;

$I_k$  : Courant de charge à l'accès  $k$  ;

$I_t$  : Courant totale découlant de l'accès source.

## I.4.3. Méthode se basant sur le théorème Tellegen

L'auteur dans la référence [22] a proposé une méthode qui se base sur le théorème de Tellegen (TT). Un ensemble d'équations itératives d'écoulement de puissance sont développées afin de non seulement calculer la puissance mais aussi le courant d'une manière progressif-rétrogressif.

TT indique que la somme algébrique des puissances complexes à un nœud est nulle, et que son utilisation d'une manière rétrogressif permet de calculer les pertes nodales (puissances, courants...) de l'aval vers l'amont du réseau. Cette méthode compétente est formulée au cours des balayages progressif-rétrogressif, ce qui est utile pour le calcul du courant en aval du réseau. Enfin, lors du balayage progressif on utilise directement les lois de Kirchhoff afin d'obtenir la solution d'écoulement de puissance.

### I.4.3.1. Méthodologie du théorème Tellegen

Un réseau de distribution radiale est illustré dans la figure (I.13), avec  $n$  nœud et  $b$  branches

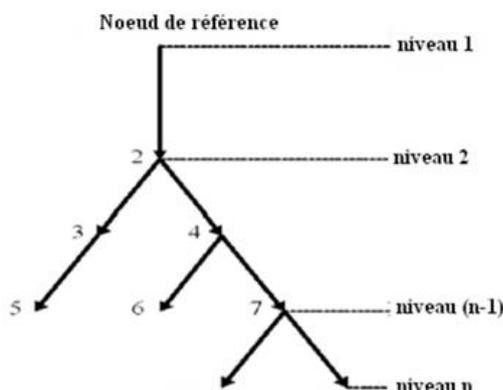


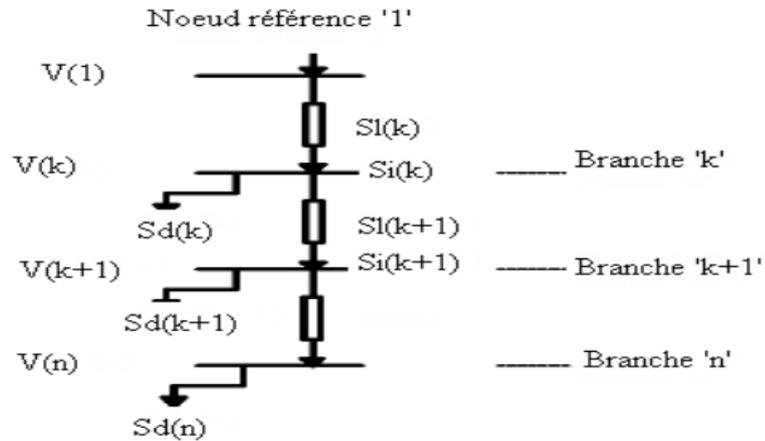
Fig. I.13 : Réseau de distribution radial (RDN) par niveau

**Technique de numérotation des nœuds :** Les nœuds du réseau sont numérotés niveau par niveau, de la partie gauche à la partie droite du RDN jusqu'au niveau terminal du réseau.

**Calcul de la puissance injectée nodale par échelle régressive :** on utilise le théorème de Tellegen durant l'échelle régressive lors du calcul de la puissance injectée du nœud externe au nœud 1. Réseau de distribution illustré sur la figure (I.14) est soit configuré d'une manière intermédiaire ou sous- intermédiaire.

**La puissance injectée au  $n$  I<sup>eme</sup> nœud :** au nœud externe la puissance injectée  $S_i$  est égale à la puissance demandée  $S_d$

$$S_i(n) = S_d(n) \quad (0.22)$$



**Fig.I.14 : Réseau de distribution illustrant les différentes puissances**

Avec :

$S_i(k)$  : Puissance injectée au nœud  $k$  ;

$S_d(k)$  : Puissance demandée au nœud  $k$  ;

$S_l(k)$  : Puissance perdue dans le segment (élément  $k$ ) ;

$V(1)$  : Tension au nœud 1 ;

$V(k)$  : Tension inconnue au nœud  $k$ .

En outre, le calcul de la puissance  $S_i$  est effectuée grâce à un balayage rétrogressif, partant du nœud sous-intermédiaire au nœud intermédiaire jusqu'à ce que le nœud 1 soit atteint.

$$S_i(k) = S_i(k + 1) + S_l(k + 1) + S_d(k) \quad (0.23)$$

Avec,

$$S_l(k + 1) = abs\left(\frac{S_i(k + 1)}{V(k + 1)}\right)^2 Z(k + 1) \quad (0.24)$$

## Chapitre I

---

Dans la figure (I.14), on arrive clairement à apercevoir que la puissance injectée en amont est la somme des puissances délivrées en aval. Alors l'équation (I.23) peut être réduite à deux termes :

$$S_i(k) = \sum_{K=\text{noeuds en aval}}^{n-\text{noeuds en amont}} S_d(k) + \sum_{K=\text{noeuds en aval}+1}^{n-\text{noeuds en amont}} S_i(k) \quad (0.25)$$

On observe que le premier terme de l'équation (I.24), est indépendant de la tension supposée, alors que le deuxième terme dépend du carré de la valeur absolue de la tension supposée.

**Calcul du courant injecté par échelle progressive :** Le courant injecté au nœud en aval est calculé d'une manière progressive, en utilisant à la fois le courant provenant en amont et en aval.

Le courant injecté au k<sup>ème</sup> nœud est :

$$I_i(k) = \left( \frac{S_i(k)}{V(k)} \right)^* \quad (0.26)$$

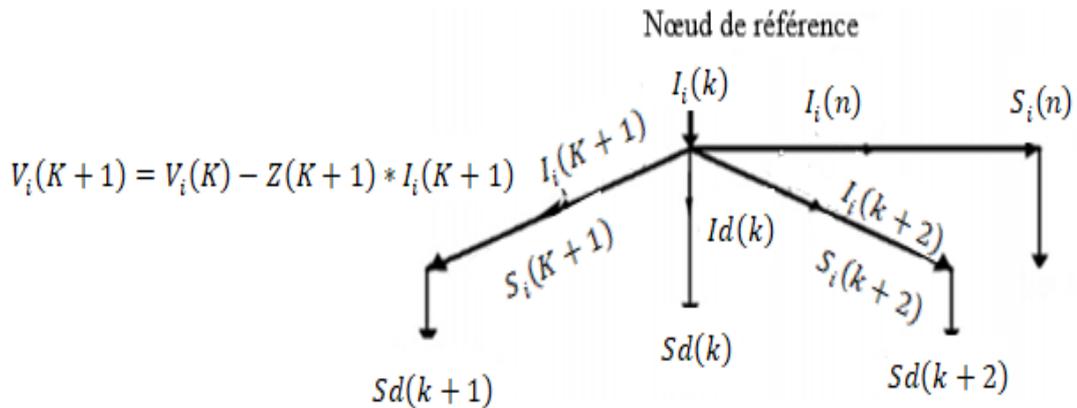
Calcul des éléments-courants

La valeur du courant en aval  $I_i(k + 1)$  est égale à la valeur ascendante récente du courant qui arrive au nœud k moins celle provenant de l'aval du même nœud. Pour un réseau de distribution radial (RDN), l'équation peut être écrite comme suit :

$$I_i^{aval}(k + 1) = I_i^{amont}(k) - \left[ \sum_{k=k+1}^{\text{branches d'issue}} I_i^{aval}(k + 2) - I_d^{amont}(k) \right] \quad (0.27)$$

Le courant injecté  $I_i$  au nœud k illustré sur la figure (I.15) est égal à :

$$I_i(k + 1) = \left[ \frac{S_i(k)}{V(k + 1)} \right]^* - \sum_{k=k+1}^{\text{branches d'issue}} \left[ \frac{S_i(k + 2)}{V(k)} \right]^* - \frac{S_d(k)}{V(k)} \quad (0.28)$$



**Fig. I.15 : Courant entrant et sortant au nœud-k pour un RDN**

En appliquant la loi de Kirchhoff sur le RDN illustré sur la figure (I.15), on arrive à mettre à jour le nœud (k+1) :

$$V_i(k+1) = V_i(k) - Z(k+1) \cdot I_i(k+1) \quad (0.29)$$

Pour l'algorithme de résolution, les équations (I.27), (I.28) et (I.29) seront exécutées en boucle jusqu'à ce que la convergence sera atteinte et l'erreur sur le calcul de la chute de tension au nœud k est calculée de la sorte :

$$\Delta V(k)^{i+1} = V(k)^{i+1} - V(k)^i \quad (0.30)$$

## I.5. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons exposé tout d'abord les architectures des réseaux électriques, ensuite nous avons présenté les différents types de réseaux, à savoir, de transport, de répartition et de distribution en précisant le rôle et les caractéristiques de chacun d'eux. Nous avons aussi défini et développé trois méthodes principales pour le calcul de l'écoulement de puissance dans un réseau de distribution à structure radiale.

# **Production décentralisée et optimisation de son emplacement dans le réseau de distribution**

## **I.6. Introduction**

L'organisation traditionnelle du réseau de distribution est basée sur la direction unique de la puissance transitant de la source vers les charges. Actuellement avec l'augmentation de la charge due au développement économique et industriel, cette ancienne organisation ne satisfait pas complètement le besoin des consommateurs [23]. A cet effet, une nouvelle organisation apparaît basée sur l'intégration de la production décentralisée assurant un transit de puissance bidirectionnel en couvrant une partie de la puissance demandée par la charge [24].

La production décentralisée 'PD' se définit par opposition à la production classique centralisée qui est caractérisée par des unités de grandes puissances raccordées au réseau électrique haute tension. Les réseaux de distribution représentent le maillon du système de puissance où le développement de la PD est le plus attendu [03]. Cependant, l'interconnexion à grande échelle de ces systèmes aux réseaux de distribution pourrait créer de nombreux problèmes techniques tels que la modification du transit de puissance, la variation de la tension, et la perte de la stabilité du réseau [25].

Dans ce chapitre, nous nous intéresserons à l'étude du réseau de distribution en présence des PD et les méthodes d'optimisation de leur emplacement.

## **I.7. Production Décentralisée**

Le terme production décentralisée (PD) désigne l'ensemble des générateurs d'électricité de faible puissance, connectés aux réseaux de distribution. Ce terme est construit par opposition au terme production centralisée désignant les grandes centrales de production connectées au réseau de transport [26].

### **I.7.1. Types de productions décentralisées**

Les formes d'énergie renouvelables à finalité électrique qui sont actuellement les plus exploitées tout en respectant au mieux l'environnement sont l'hydraulique, le solaire photovoltaïque et l'éolien [26].

### **I.7.2. Avantage de la production décentralisée**

Les PD peuvent être installés près des sites de consommation, réduisant ainsi le coût de transport, les pertes en lignes et l'appel de puissance réactive au niveau du poste source. D'autre part, le temps d'installation est plus court que pour la production centralisée et les sites d'installation sont plus faciles à trouver. Enfin, les nouvelles technologies mises en œuvre sont plus propres et l'utilisation des producteurs décentralisés en cogénération améliore nettement le rendement énergétique global de l'installation et donc son attrait économique [27].

### **I.7.3. Contraintes existantes dans l'allocation de la génération distribuée**

Les principales contraintes de raccordement des PD sur le réseau de distribution sont liés aux problèmes de la capacité technique d'accueil d'une part et aux problèmes réglementaires qui obligent le distributeur à accepter le raccordement d'un producteur sur le réseau de distribution d'autre part. En effet, le réseau de distribution n'a pas été conçu, à la base, pour accepter ce type de production. Cette problématique peut remettre largement en cause la façon de planifier et d'exploiter les réseaux de distribution [28].

## **I.8. Intégration de la PD sur le réseau de distribution**

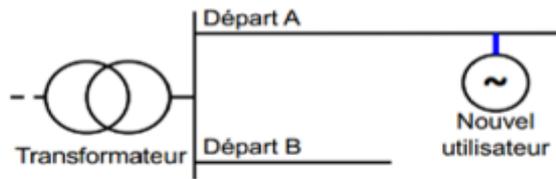
### **I.8.1. Conditions de raccordement**

Le raccordement aux réseaux de distribution HTA d'unités de production décentralisées doit respecter certaines contraintes techniques et impose généralement des aménagements dans le réseau pour assurer un fonctionnement correct de ce dernier. Des précautions sont ainsi à prévoir par des règles de raccordement afin de conserver le bon déroulement du fonctionnement du réseau. Ces règles sont des prescriptions techniques de conception et de fonctionnement : la protection, la puissance d'installation, la perturbation de la fréquence et la tension [29].

### **I.8.2. Types de raccordement**

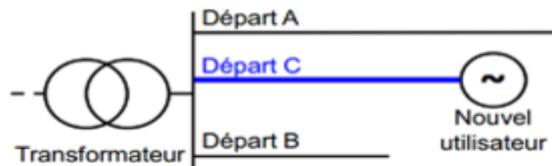
Deux types de configuration de raccordement sont envisagés [29]:

**Raccordement en départ mixte** : le raccordement à un départ existant auquel des consommateurs et éventuellement des producteurs sont déjà raccordés (figure II.1).



**Fig. II.1 : Illustration des configurations de raccordement en départ mixte**

**Raccordement en départ direct :** le raccordement au poste source le plus proche via un départ nouvellement créé pour le nouvel utilisateur (figure II.2).



**Fig. II.2 : Illustration des configurations de raccordement en départ direct**

### I.9. Impacts de la production décentralisée sur le réseau de distribution

L'insertion de la PD au sein du réseau de distribution existant n'est pas sans impact sur l'exploitation et le fonctionnement de ce dernier. Dans les paragraphes suivants, plusieurs de ces impacts vont être présentés.

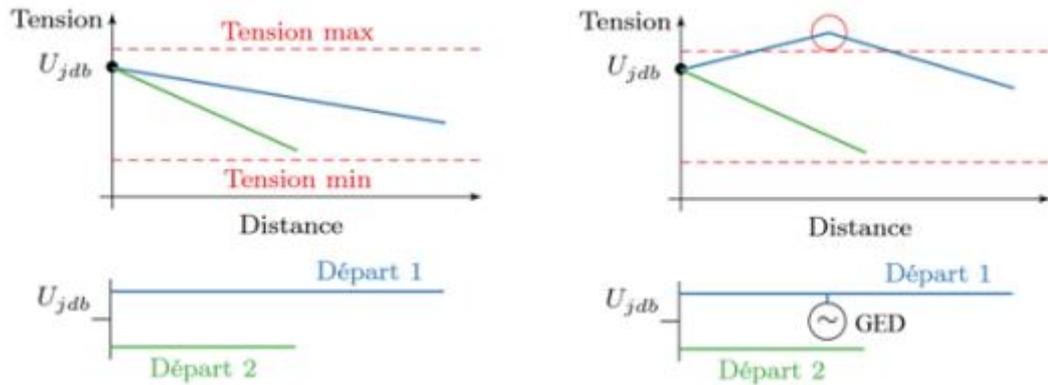
#### I.9.1. Impact sur les transits des puissances

Une forte insertion de la production décentralisée à énergie renouvelable peut faire apparaître une modification du sens des flux de puissance. Possibilité qui n'a pas été prise en compte lors de la conception des réseaux de distribution [30]. Ces derniers ont été conçus pour alimenter des installations de consommation à faible coût et donc avec peu de possibilité de bouclage pour évacuer une puissance éolienne importante dans une zone à faible densité de charges. Typiquement, sur un réseau de distribution radiale, l'énergie circule traditionnellement de l'amont (point de connexion au réseau de transport) vers l'aval (les charges). La connexion d'un groupe de production sur un départ peut inverser le sens du flux de puissance, entraînant par exemple un dysfonctionnement des protections non directionnelles.

#### I.9.2. Impact sur la tension

On sait que dans un réseau de distribution les nœuds proches d'une source ont une tension plus élevée, la tension diminuant au fur et à mesure que l'on s'éloigne. Mais en présence de PD, cette règle sera modifiée, tel qu'au point du raccordement, il y a une

amélioration du plan de tension, comme il est illustré sur la figure (III.3.a) sans la présence de PD et la figure (III.3.b) avec présence de PD [31].



**Fig. II.3: Schémas illustratif sur l'impact de production décentralisée sur le plan de tension**

### I.9.3. Capacité du réseau et la congestion

La disponibilité de la capacité, ou l'absence de congestions de ligne dans la partie du réseau où la PD est insérée, peut jouer un rôle primordial sur l'intégration de celle-ci. Les réseaux de transport ont une structure maillée qui offre plusieurs voies à l'écoulement de puissance, tandis que les réseaux de distribution, de structures radiale ou bouclée, permettent ainsi quelques directions pour le flux d'énergie. Par conséquent, la capacité de transmission de puissance dans la distribution est nettement inférieure que dans le transport. Il est également intéressant de noter qu'une insertion appropriée de la PD à proximité des charges ne conduisent généralement pas à une augmentation des congestions de la distribution, mais peut-être à leur réduction [32].

### I.9.4. Impact sur le plan de protection

Le plan de protection est un système coordonné de protections visant à isoler très rapidement un ouvrage en défaut (ligne, transformateur, jeu de barres, ...etc.) afin de garantir la sécurité des biens et des personnes. Différents types de relais mesurant différentes grandeurs physiques sont utilisés. La modification des courants de court-circuit due à l'insertion de PD peut conduire à une modification du réglage des protections voire même à leur changement. Deux principaux problèmes apparaissent suite à une insertion de PD, le problème d'aveuglement de protections et celui du déclenchement intempestif des protections [33].

### I.9.5. Impact sur le courant de court-circuit

La contribution de la production décentralisée lors d'un défaut peut modifier les niveaux de courant de court-circuit, leurs variations dépendent du nombre d'unité de PD inséré et la puissance délivrée par celles-ci, tel que l'augmentation de ces derniers entraîne une élévation du courant de court-circuit, la figure II.4 montre l'apport de PD . Cette élévation peut alors créer des problèmes pour le fonctionnement des composants de distribution comme les lignes, les disjoncteurs et les interrupteurs, s'ils ont été dimensionnés pour supporter des courants de court-circuit inférieurs. Ces composants, lorsqu'ils transportent des courants de défaut persistant, sont soumis à des contraintes thermiques et mécaniques [33].

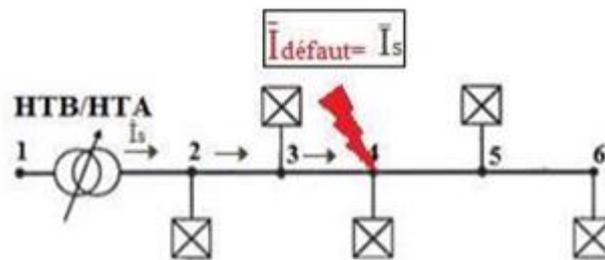


Fig. II.4 : Courant de court-circuit dans un réseau radial sans PD

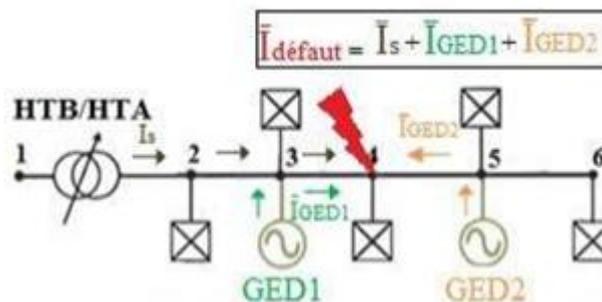
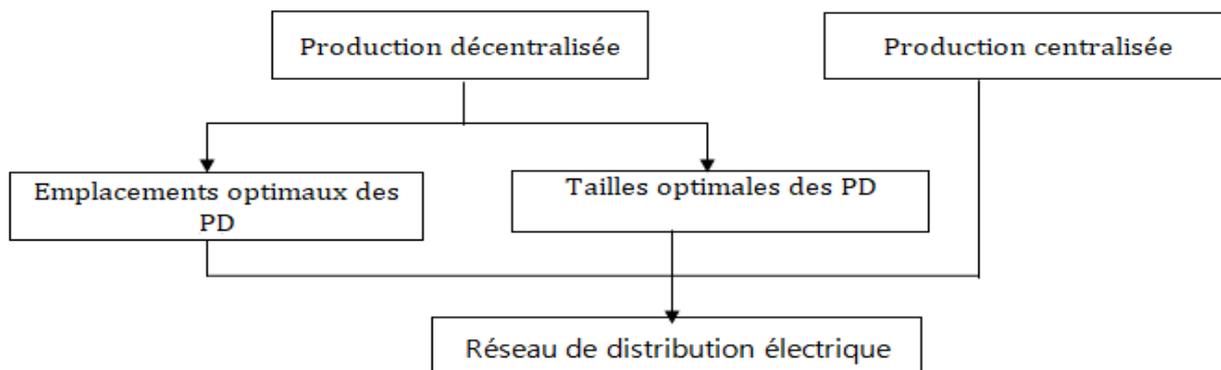


Fig. II.5 : Courant de court-circuit dans un réseau radial avec PD

### I.10. Organisation du réseau de distribution en présence de PD

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



**Fig. II.6 : Organisation du réseau de distribution en présence des PD**

### **I.10.1. Emplacement des PD**

Les PD doivent être installées de façon à réduire le coût de transport, les pertes de puissance en lignes et l'appel de puissance réactive au niveau du poste source. Donc il faut que leur emplacement dans le réseau de distribution soit optimal de telle sorte que les tensions dans tous les jeux de barres soient dans les limites admissibles et les pertes de puissances active et réactive soient minimales [34].

### **I.10.2. Taille des PD**

Afin de ne pas avoir un effet inverse sur le plan de tension et les pertes de puissance, il faut que la puissance délivrée par chaque PD installée soit optimale pour équilibrer entre la puissance demandée et la puissance générée pendant les différentes périodes de charges. Donc le problème consiste à optimiser aussi les tailles des PD installées dans le réseau de distribution.

### **I.10.3. Fonction objectif**

Pour la détermination optimale de l'emplacement et de la taille de la PD installée dans le réseau de distribution, nous avons pris comme fonction objectif la minimisation des pertes totales de puissance active en assurant un bon profil de tension.

### **I.10.4. Choix de la méthode d'optimisation**

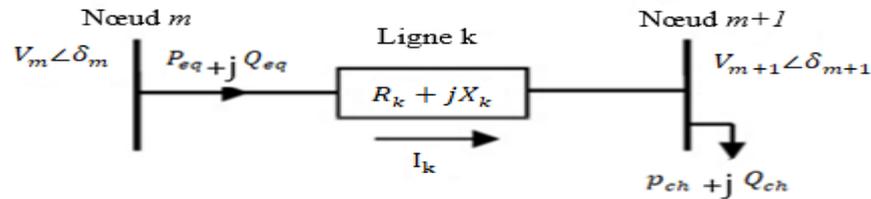
Il existe plusieurs méthodes d'optimisation, à savoir, le facteur de sensibilité aux pertes « LSF » [04][05], la méthode du vecteur index « IVM » [35] et la méthode de stabilité de la

tension « VSI » [36]. Dans le présent travail, la première méthode sera appliquée car elle offre la possibilité d'identifier l'emplacement idéal ainsi que la taille idéale de la PD.

### I.10.5. Choix de l'emplacement optimal

En se basant sur les travaux effectués dans les articles [04] et [05], le facteur de sensibilité aux pertes « LSF » est l'un des facteurs les plus utilisés pour trouver le meilleur emplacement de la PD dans un réseau de distribution donné, car cette méthode réduit l'espace de recherche ce qui permet des calculs plus rapides pour les pertes de puissance active et réactive au niveau de la ligne. Ces pertes sont évaluées en fonction de chaque segment de la ligne.

Considérons le tronçon de ligne montré sur la figure II.7 :



**Fig. II.7 : Tronçon d'une ligne de distribution**

La puissance active  $P_{eq}$  et la puissance réactive  $Q_{eq}$  traversant une branche  $k$  du nœud  $m$  au nœud  $m+1$  peuvent être calculées comme suit :

$$P_{eq} = P_{ch/(m+1)} + P_{perte\ ligne\ k} \quad (0.1)$$

$$Q_{eq} = Q_{ch/(m+1)} + Q_{perte\ ligne\ k} \quad (0.2)$$

Avec :

$P_{ch/(m+1)}$  et  $Q_{ch/(m+1)}$  sont respectivement les charges de puissance active et réactive totales effectives au-delà du nœud  $m+1$ .

$P_{perte\ ligne\ k}$  et  $Q_{perte\ ligne\ k}$  sont respectivement, les pertes de puissances actives et les pertes de puissance réactive à travers la branche  $k$ .

Le courant circulant dans la branche  $k$  du nœud  $m$  au nœud  $m+1$  peut être calculé comme :

$$I_k = \frac{P_{eq} - jQ_{eq}}{V_m \angle \delta_m} \quad (0.3)$$

## Chapitre II

---

Ou bien,

$$I_k = \frac{V_m \angle \delta_m - V_{m+1} \angle \delta_{m+1}}{R_k + jX_k} \quad (0.4)$$

Où :

$V_m$  et  $V_{m+1}$  sont respectivement les amplitudes de tension aux nœuds  $m$  et  $m+1$  ;  
 $\delta_m$  et  $\delta_{m+1}$  sont respectivement les déphasages de tension aux nœuds  $m$  et  $m+1$  ;  
 $R_k$  et  $X_k$  sont respectivement la résistance et la réactance de la branche  $k$ .

D'après (II.3) et (II.4), on trouve que :

$$V_m^2 - V_m \cdot V_{m+1} \angle (\delta_{m+1} - \delta_m) = (P_{eq} - jQ_{eq}) \cdot (R_k + jX_k) \quad (0.5)$$

En égalant les parties réelle et imaginaire des deux côtés de (II.5), on peut obtenir ce qui suit :

$$V_m V_{m+1} \cdot \cos(\delta_{m+1} - \delta_m) = V_m^2 - (P_{eq} R_k + Q_{eq} X_k) \quad (0.6)$$

$$V_m V_{m+1} \cdot \sin(\delta_{m+1} - \delta_m) = Q_{eq} R_k - P_{eq} X_k \quad (0.7)$$

Après élévation au carré et addition de (II.6) et (II.7), on obtient l'expression (II.8) :

$$V_{m+1}^2 = V_m^2 - 2 \cdot (P_{eq} R_k + Q_{eq} X_k) + (R_k^2 + X_k^2) \left( \frac{P_{eq}^2 + Q_{eq}^2}{V_m^2} \right) \quad (0.8)$$

Les pertes de puissances active et réactive de la branche  $k$  peuvent être calculées comme :

$$P_{perte\ ligne\ k} = I_k^2 * R_k \cong \left( \frac{P_{eq}^2 + Q_{eq}^2}{V^2 m + 1} \right) * R_k \quad (0.9)$$

et

$$Q_{perte\ ligne\ k} = I_k^2 * X_k \cong \left( \frac{P_{eq}^2 + Q_{eq}^2}{V^2 m + 1} \right) * X_k \quad (0.10)$$

Maintenant, le facteur de sensibilité aux pertes peut être obtenu comme suit :

$$\frac{\partial P_{perte\ ligne}}{\partial P_{eq}} = \frac{2 * P_{eq} (m + 1) * R_k}{(V^2 (m + 1))} \quad (0.11)$$

## Chapitre II

---

$$\frac{\partial P_{\text{perte ligne}}}{\partial Q_{eq}} = \frac{2 * Q_{eq}(m+1) * R_k}{(V^2(m+1))} \quad (0.12)$$

$$\frac{\partial Q_{\text{perte ligne}}}{\partial Q_{eq}} = \frac{2 * Q_{eq}(m+1) * X_k}{(V^2(m+1))} \quad (0.13)$$

$$\frac{\partial Q_{\text{perte ligne}}}{\partial P_{eq}} = \frac{2 * P_{eq}(m+1) * X_k}{(V^2(m+1))} \quad (0.14)$$

Enfin,

$$P_{lsf} = \frac{2 * P_{eq}(m+1) * R_k}{(V^2(m+1))} + \frac{2 * Q_{eq}(m+1) * R_k}{(V^2(m+1))} \quad (0.15)$$

$$Q_{lsf} = \frac{2 * P_{eq}(m+1) * X_k}{(V^2(m+1))} + \frac{2 * Q_{eq}(m+1) * X_k}{(V^2(m+1))} \quad (0.16)$$

Les facteurs de sensibilité aux pertes de puissances active et réactive ainsi que l'écart de tension par rapport à la limite autorisée sont utilisés pour trouver l'emplacement optimal de la PD. Le nœud ayant la valeur du 'LSF' la plus élevée est le mieux adapté pour un emplacement optimal de la PD.

La fonction objective pour la localisation optimale de la PD est la suivante :

$$\max(F_1) = w_1 \cdot P_{lsf} + w_2 \cdot Q_{lsf} - w_3 \cdot [\sum_{m=1}^{nb} \{(Vm - Vmin)^2 + (Vm - Vmax)^2\}] \quad (II.17)$$

Où,  $w_1$ ,  $w_2$  et  $w_3$  sont des valeurs aléatoires. La valeur de  $Vmin$  est de 0,95 pu et celle de  $Vmax$  de 1,05 pu d'après [04].

Le nœud ayant la valeur maximale de cette fonction objective  $F_1$  sera le nœud optimal pour l'emplacement de la PD.

### **I.11.Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons défini en premier lieu la production décentralisée et les conditions de son raccordement aux réseaux de distribution. Par la suite, nous avons cité les différents impacts de cette PD sur les réseaux de distribution dans le cas où elle serait installée dans un nœud inadéquat. Nous avons exposé trois méthodes d'optimisation de l'emplacement, à savoir, la « IVM » , la « VSI » et enfin la « LSF » qui a été appliquée dans le présent travail.

### Simulation et interprétation des résultats

#### I.12.Introduction

Dans ce chapitre, nous allons effectuer un calcul d'écoulement de puissance d'un réseau de distribution radial test à 33 nœuds avec la méthode BCBV afin d'évaluer les grandeurs : tensions aux nœuds, chutes de tension, pertes de puissance dans les lignes ainsi que le sens du transit de puissance, avant et après l'insertion d'une production décentralisée. La méthode SLF, qui se base sur le facteur de sensibilité aux pertes, est appliquée pour optimiser l'emplacement des PD et sa taille. Les résultats obtenus sont représentés et commentés.

#### I.13.Présentation du réseau étudié

Le réseau étudié dans ce travail est un réseau de distribution IEEE 33 nœuds présenté dans la figure (III.1) [04].

**A-caractéristiques du réseau :** Les caractéristiques du réseau sont données comme suit:

Nombre de nœud : 33;

Nombre de segments : 32;

Nœud de référence : Nœud N°1 ;

Tension de base : 12.66 kV

Puissance de base : 10MVA

**B- Les données du réseau :** Les données du réseau (lignes et charges) sont résumées dans les tableaux (III.1) et (III.2).

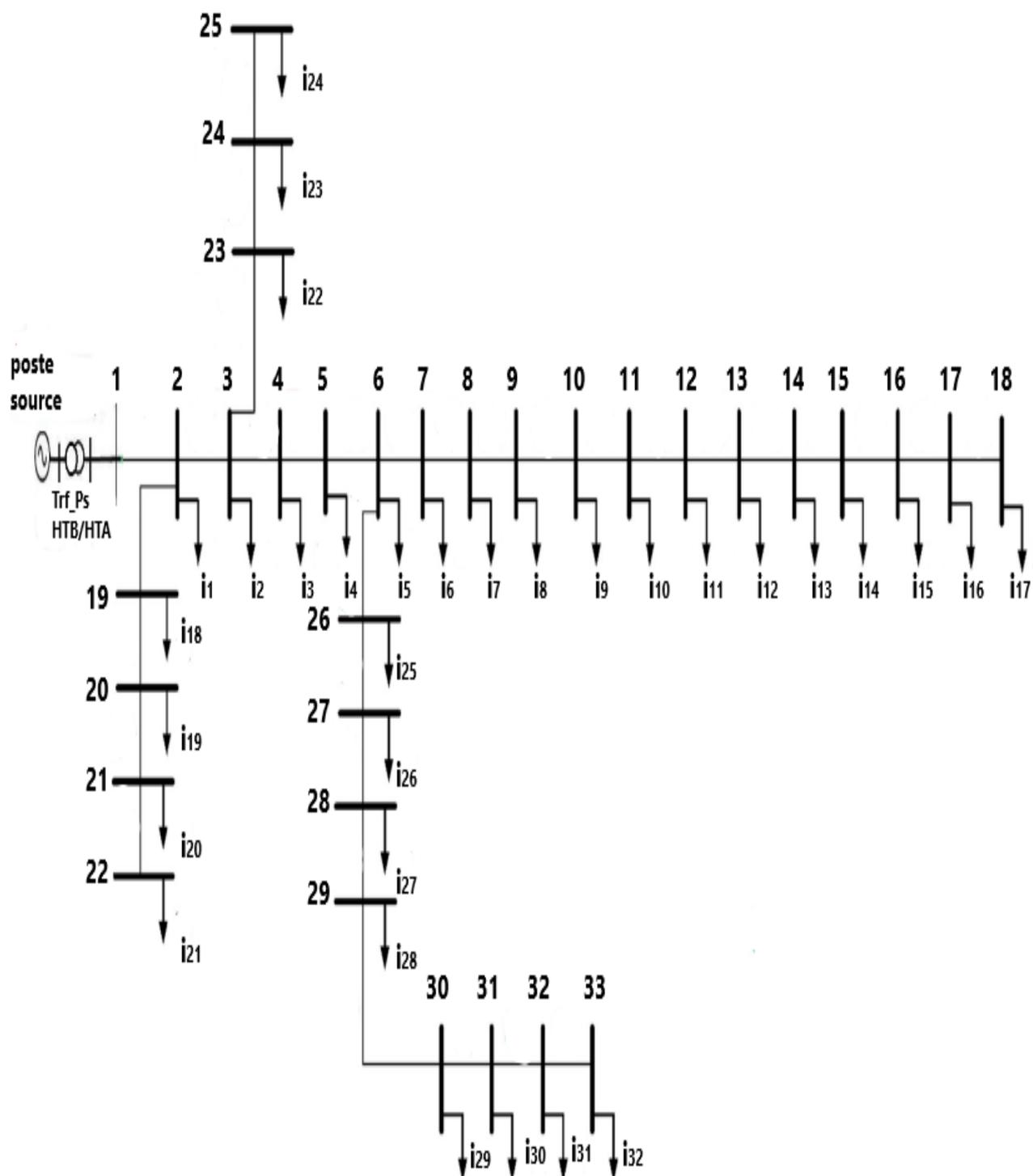


Fig. III.1 : Schéma unifilaire du réseau de distribution étudié

## Chapitre III

**Tab III.1 : Données des lignes**

<b>Branche N°</b>	<b>Nœud de départ</b>	<b>Nœud d'arrivée</b>	<b>Resistance (<math>\Omega</math>)</b>	<b>Réactance (<math>\Omega</math>)</b>
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

## Chapitre III

---

**Tab III.2 : Données des charges**

<b>Nœud d'arrivée N°</b>	<b>Puissances actives (kW)</b>	<b>Puissances réactives (kVAr)</b>
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

### I.14. Plan de travail

Le présent travail a été divisé en trois parties, à savoir :

Étudier l'état du réseau IEEE 33 nœuds (tension aux nœuds, chute de tension et pertes des puissances active et réactive dans les lignes, sens du transit de puissance) ;

Étudier l'état du réseau IEEE 33 nœuds après l'insertion d'une production décentralisée (PD), son influence sur le réseau du point de vue, niveau de tension, pertes de puissance active et réactive dans les lignes ainsi que sur le sens de transit des puissances ;

Effectuer une synthèse sur les résultats obtenus qui consiste en une comparaison de l'état du réseau IEEE 33 JB avant et après l'insertion de la PD.

### I.15. Résultats de programmation

#### I.15.1. Etat du réseau sans la présence de la PD

Un calcul d'écoulement de puissances a été effectué sur le réseau test et les résultats obtenus sont représentés sur les figures de (III.2) à (III.6).

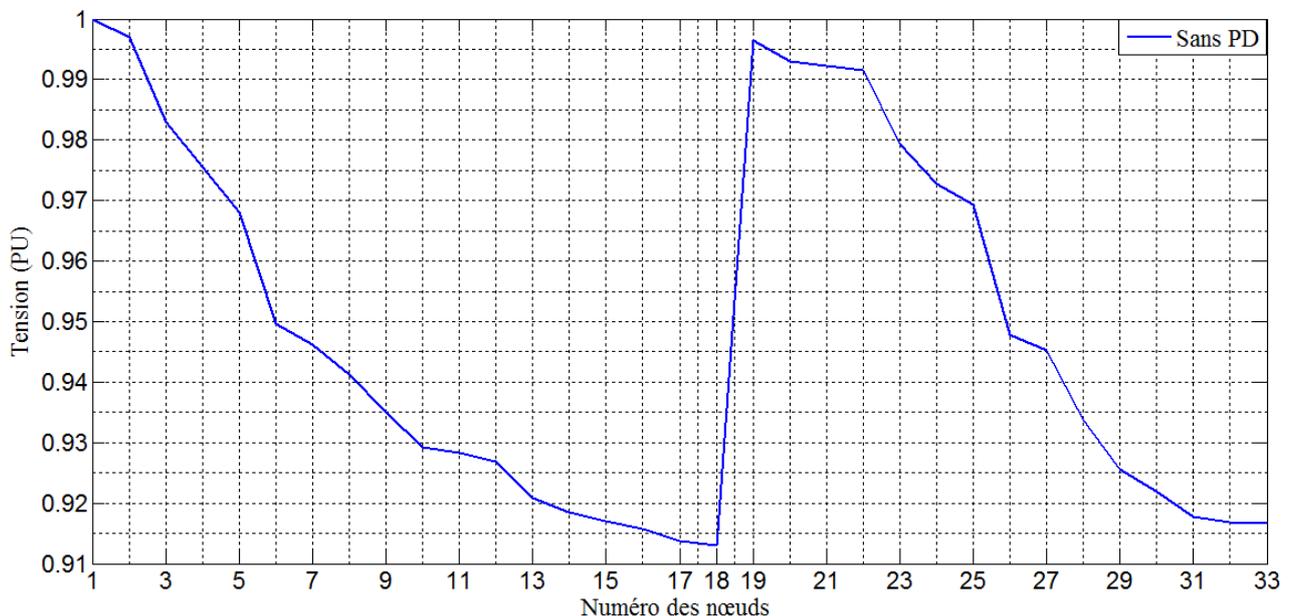
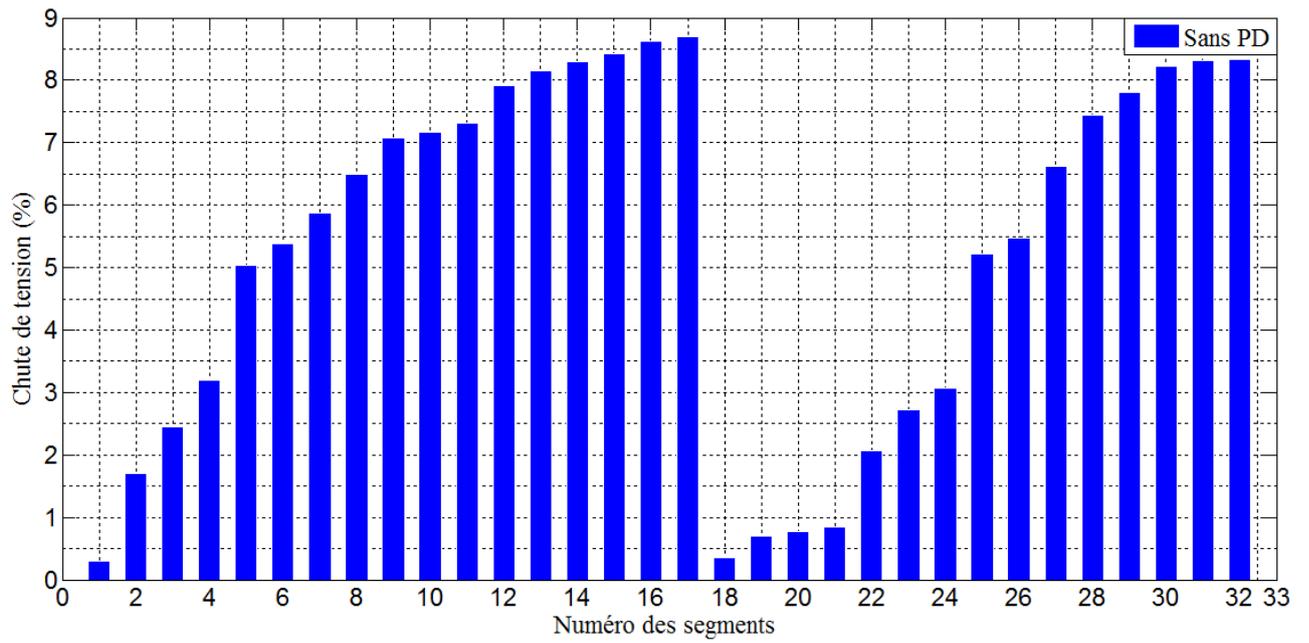
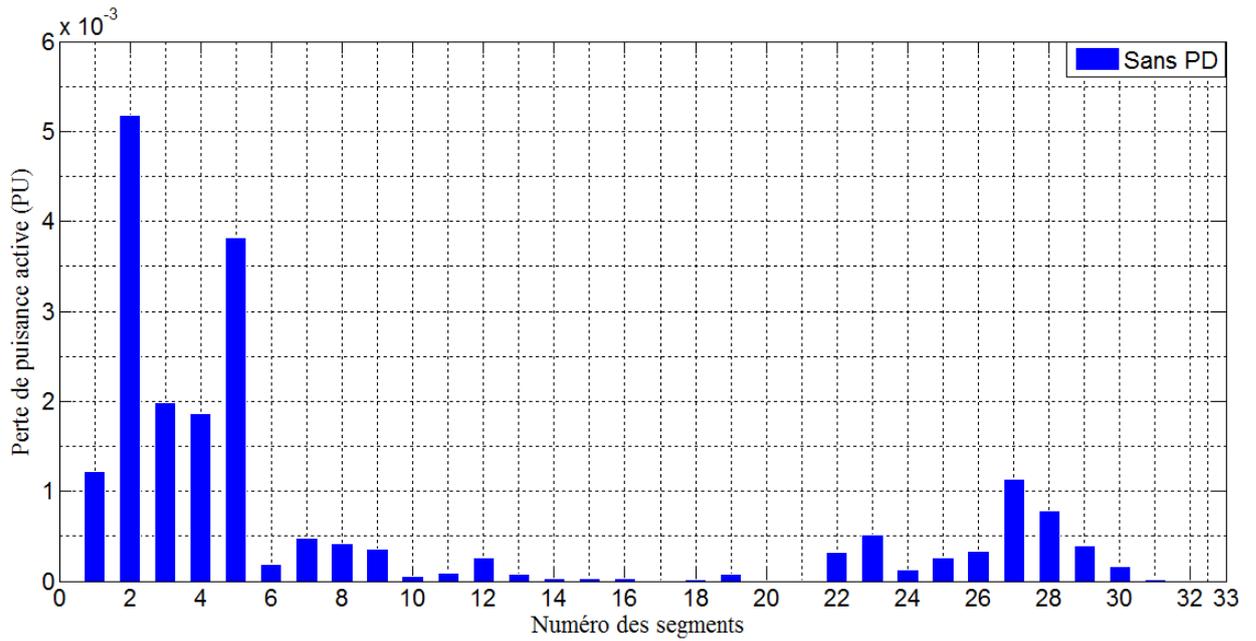


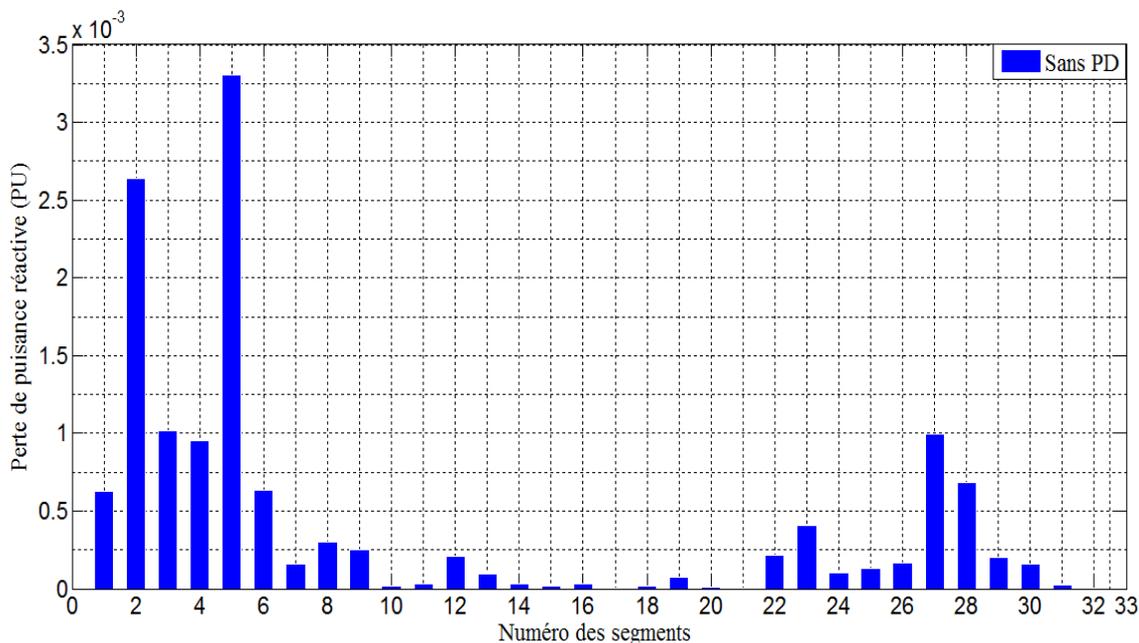
Fig. III.2 : Amplitude de la tension aux nœuds



**Fig.III.3 : Chute de tension dans les segments**



**Fig.III.4: Perte de la puissance active dans les segments**



**Fig.III.5: Pertes de puissance réactive dans les segments**

### Chutes de tension admissible

La limite maximal de la chute de tension pour des installations MT est 8%

### Interprétation des résultats

Les figures (III.2) et (III.3) représentent, respectivement, l'allure de la tension au niveau des différents nœuds du réseau, ainsi que les chutes de tension au niveau des segments. On remarque que la valeur de la tension la plus basse est de 0,9131 pu qui se trouve au niveau du nœud 18, cela est justifié par l'accumulation des chutes de tension dans les segments, tel que la plus grande valeur atteinte a une amplitude de 8,691 % par rapport au nœud de référence.

Les figures (III.4) et (III.5) représentent, respectivement, les allures des pertes de puissances active et réactive dans les segments. Elles montrent que la plus grande perte est enregistrée au niveau du deuxième segment pour les pertes actives avec une valeur de  $5,2 \cdot 10^{-3}$  pu et au niveau du cinquième segment pour les pertes réactives avec une valeur de  $3,3 \cdot 10^{-3}$  pu. Ces résultats sont dus à l'intensité des courants traversant ces segments ainsi qu'aux caractéristiques électriques, résistance et réactance relatives à chaque segment du réseau.

## Chapitre III

**Tab.III. 3 :** Courants transités dans les segments

N° du segment	Nœud de départ	Nœud d'arrivée	Courant transité
1	1	2	0.3918 - j0.2435
2	2	3	0.3455 - j0.2214
3	3	4	0.2407 - j0.1709
4	4	5	0.2284 - j0.1628
5	5	6	0.2221 - j0.1597
6	6	7	0.1155 - j0.0553
7	7	8	0.0943 - j0.0447
8	8	9	0.0731 - j0.0341
9	9	10	0.0667 - j0.0319
10	10	11	0.0602 - j0.0297
11	11	12	0.0554 - j0.0265
12	12	13	0.0489 - j0.0227
13	13	14	0.0424 - j0.0189
14	14	15	0.0294 - j0.0101
15	15	16	0.0229 - j0.0089
16	16	17	0.0164 - j0.0067
17	17	18	0.0098 - j0.0045
18	2	19	0.0362 - j0.0161
19	19	20	0.0272 - j0.0121
20	20	21	0.0181 - j0.0081
21	21	22	0.0091 - j0.0041
22	3	23	0.0957 - j0.0464
23	23	24	0.0865 - j0.0413
24	24	25	0.0433 - j0.0207
25	6	26	0.1004 - j0.1023
26	26	27	0.0940 - j0.0997
27	27	28	0.0877 - j0.0971
28	28	29	0.0812 - j0.0949
29	29	30	0.0682 - j0.0875
30	30	31	0.0460 - j0.0226
31	31	32	0.0296 - j0.0151
32	32	33	0.0066 - j0.0043

## Chapitre III

Le tableau (III.3) représente le sens du transit des courants dans les segments avant l'intégration de la PD au réseau

Compte tenu des résultats obtenus de l'intensité des courants transités à travers les segments et qui sont résumés dans le tableau III.3, on remarque que leur sens de transit est unidirectionnel, c'est-à-dire du poste source vers les charges et c'est évident pour un réseau de distribution de type radial. La figure (III.6) illustre bien, par les flèches, le sens de transit des courants c'est-à-dire des puissances dans le réseau.

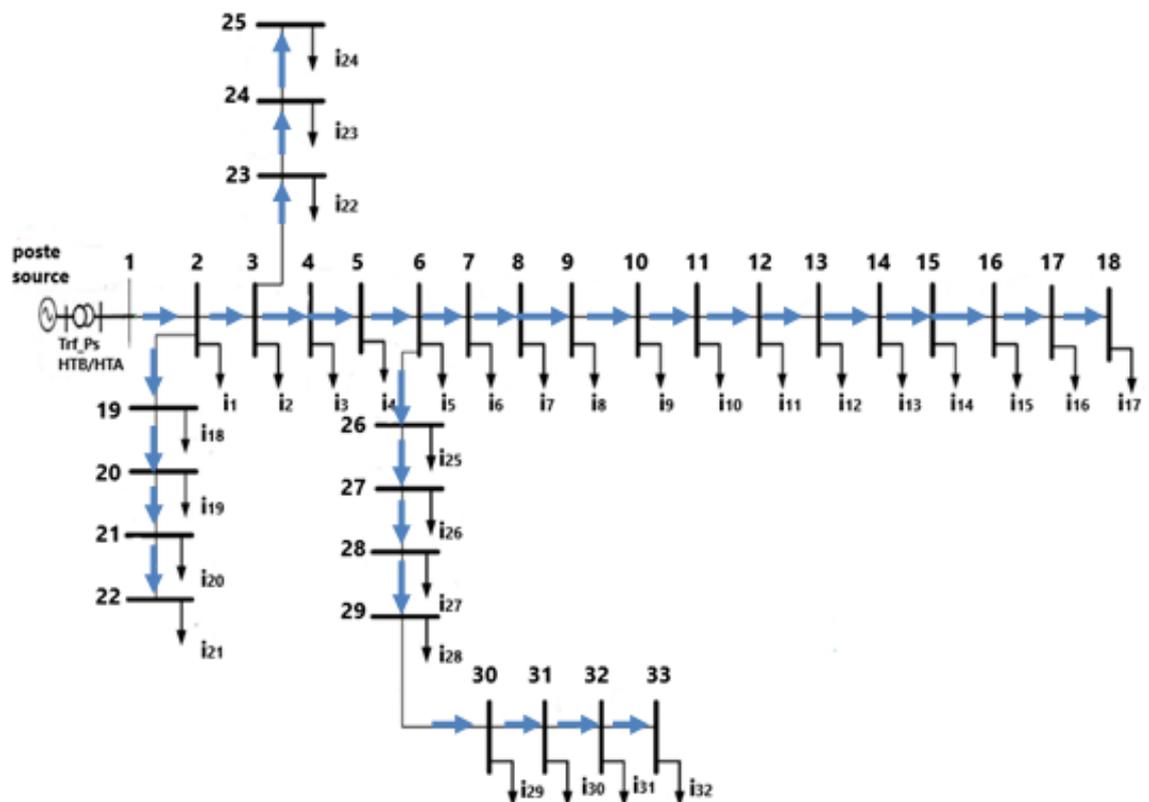


Fig.III.6 : Sens de transit de puissance (courant) dans le réseau

Il est à noter que les pertes totales des puissances active et réactive, avant l'insertion de la PD, sont respectivement  $20.3 * 10^{-3}$ pu et  $13.5 * 10^{-3}$  pu.

### I.15.2. Etat du réseau avec insertion de la PD

Nous avons utilisé la méthode d'optimisation « LSF » pour trouver l'emplacement optimal de la PD, en se basant sur l'expression (II.16), en fixant les valeurs des poids à  $[w_1, w_2, w_3] = [3.8 ; 2.19 ; 0.05]$ , après simulation nous avons trouvé que l'emplacement optimal est

## Chapitre III

au niveau du nœud 6 et la taille optimale est équivalente à une puissance injectée de 0.2235 pu, c'est-à-dire, un taux d'intégration de 60.16% calculé à partir de l'expression (III.1).

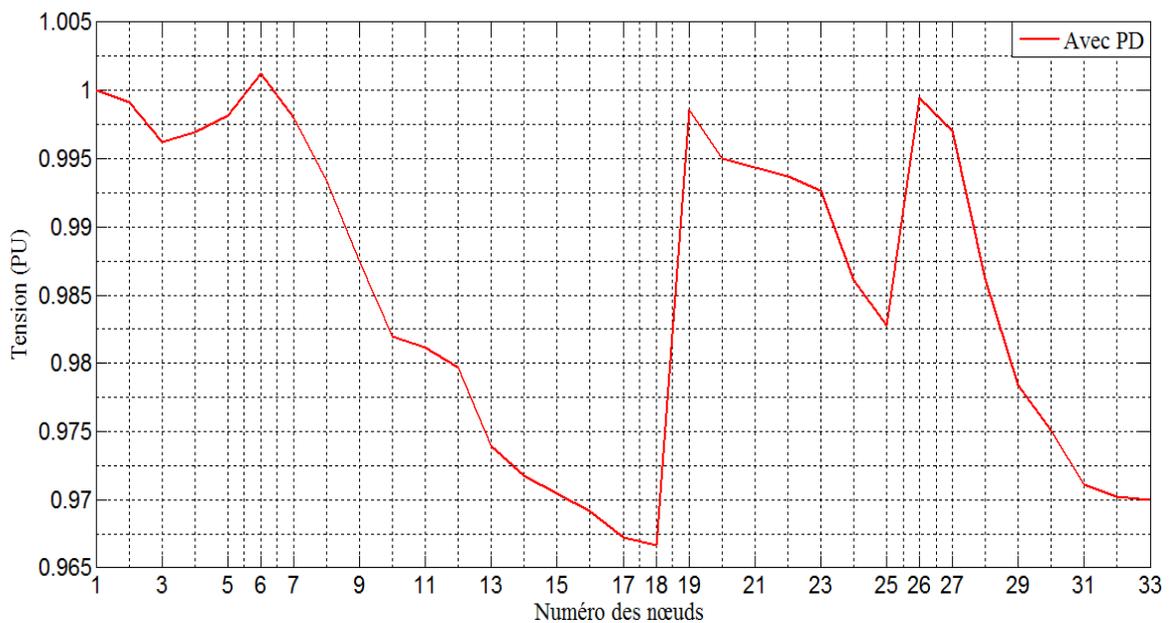
$$Taux \% = \frac{P_{pd}}{P_{ch}} * 100\% \quad (0.1)$$

Où :

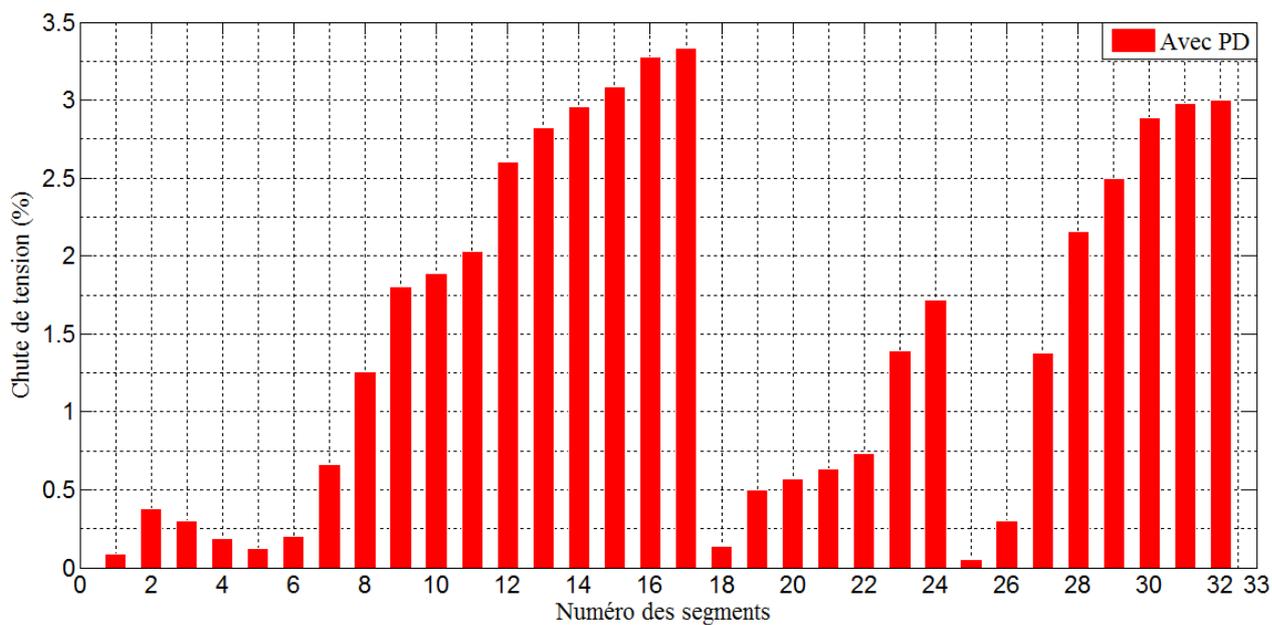
$P_{ch}$  : Puissance totale demandée par les charges ;

$P_{pd}$  : Puissance injectée par la PD.

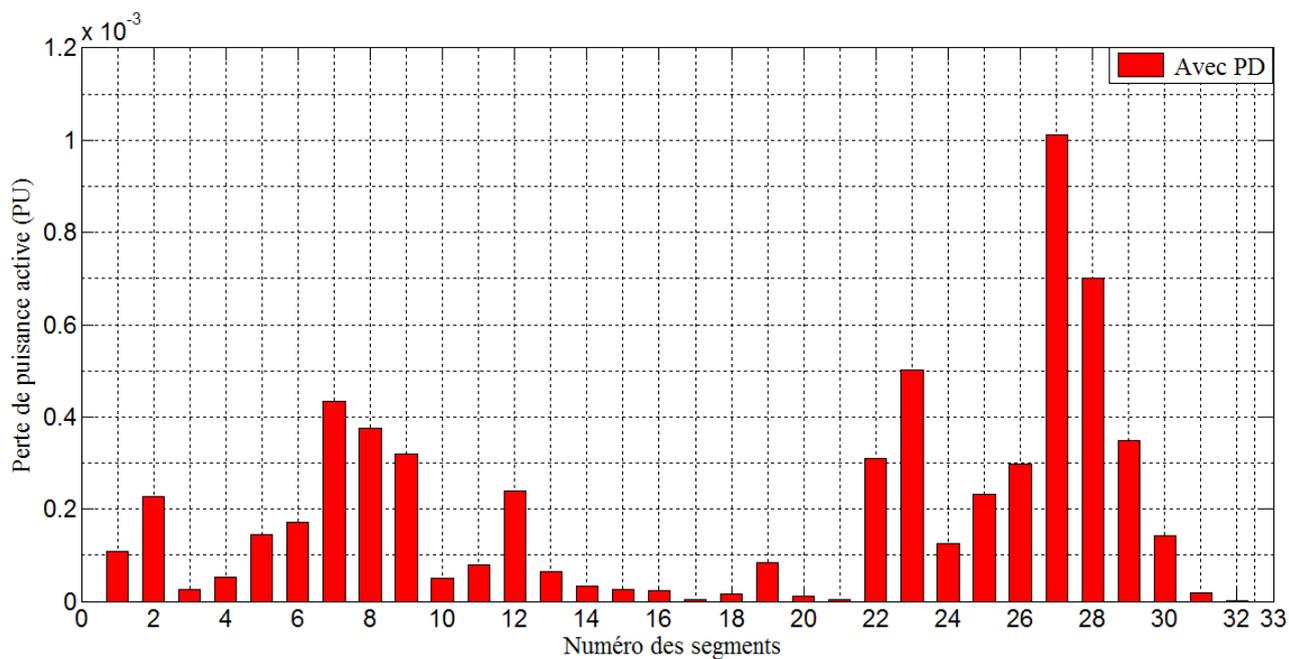
Un calcul d'écoulement de puissance a été effectué et les résultats obtenus sont représentés sur les figures de (III.7) à (III.10).



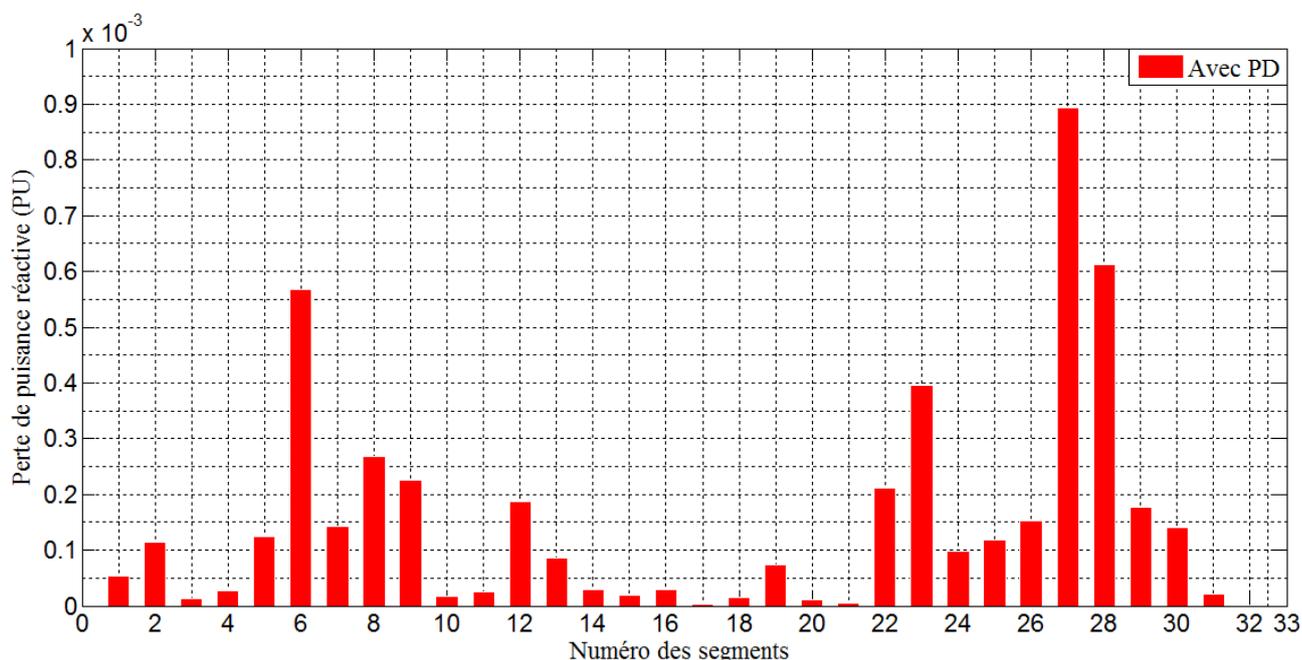
**Fig.III.7 : Amplitude de la tension aux nœuds après intégration de la PD**



**Fig.III.8 : Chute de tension dans les segments après intégration de la PD**



**Fig.III.9 : Pertes de puissance active dans les segments après intégration de la PD**



**Fig.III.10 : Pertes de puissance réactive dans les segments après intégration de la PD**

### Interprétation des résultats

Les figures (III.7) et (III.8) représentent, respectivement, l'allure de la tension au niveau des différents nœuds du réseau, ainsi que les chutes de tension au niveau des segments après l'intégration de la PD au nœud N°6. On remarque que la valeur de la tension la plus basse est de 0,9667 pu qui est enregistrée au niveau du nœud 18, avec une chute de tension maximale par rapport au nœud de référence de 3,3342% pu.

Les figures (III.9) et (III.10) représentent, respectivement, les allures des pertes de puissances active et réactive dans les segments après l'intégration de la PD au nœud N°6. Elles montrent que les plus grandes pertes active et réactive sont simultanément enregistrées au niveau du segment N°27, avec des valeurs de  $10^{-3}$ pu pour les pertes actives et  $0,8299 \cdot 10^{-3}$ pu pour les pertes réactives.

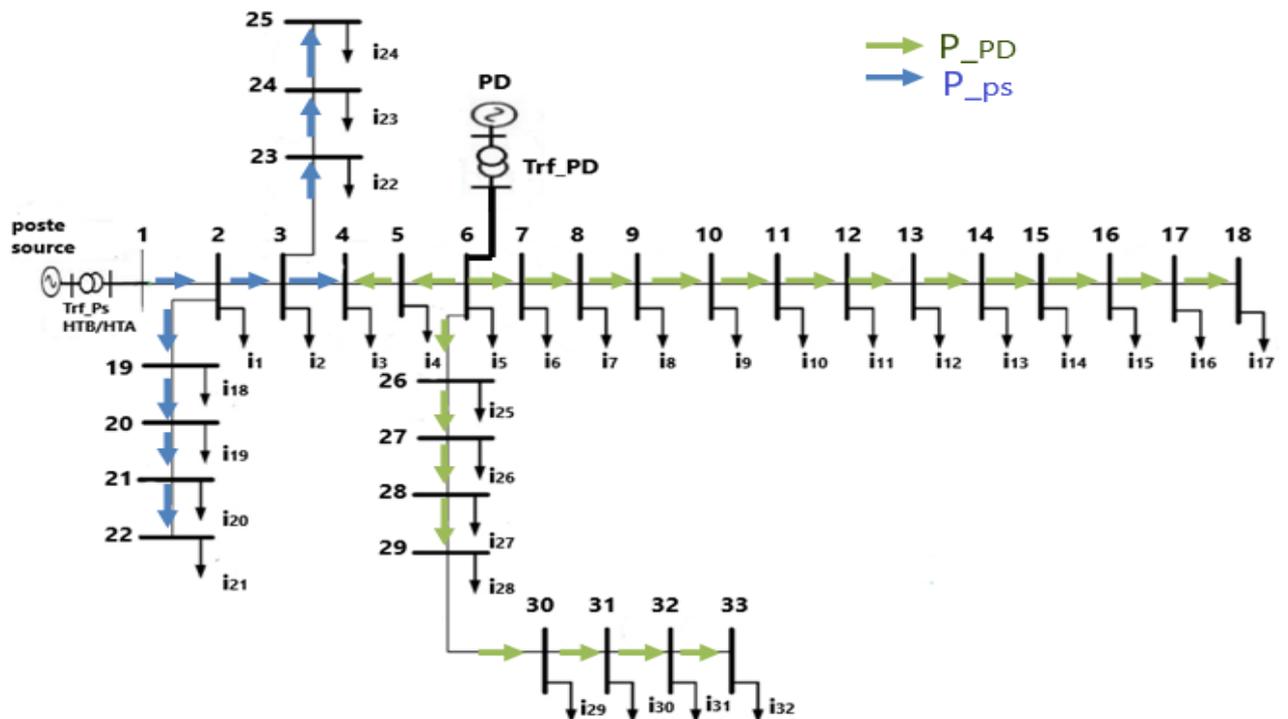
## Chapitre III

**Tab.III. 4 :** Courants transités dans les segments après insertion de la PD

N° du segment	Nœud de départ	Nœud d'arrivée	Courant transité
1	1	2	0.1588 - j0.0994
2	2	3	0.1127 - j0.0772
3	3	4	0.0091 - j0.0273
4	5	4	-0.0030 -j0.0193
5	6	5	-0.0091- j0.0162
6	6	7	0.1104 - j0.0527
7	7	8	0.0902 - j0.0426
8	8	9	0.0699 - j0.0325
9	9	10	0.0637 - j0.0304
10	10	11	0.0576 - j0.0283
11	11	12	0.0529 - j0.0252
12	12	13	0.0468 - j0.0216
13	13	14	0.0406 - j0.0180
14	14	15	0.0281 - j0.0096
15	15	16	0.0219 - j0.0085
16	16	17	0.0156 - j0.0064
17	17	18	0.0094 - j0.0043
18	2	19	0.0362 - j0.0161
19	19	20	0.0271 - j0.0121
20	20	21	0.0181 - j0.0081
21	21	22	0.0091 - j0.0040
22	3	23	0.0945 - j0.0459
23	23	24	0.0855 - j0.0409
24	24	25	0.0428 - j0.0205
25	6	26	0.0959 - j0.0976
26	26	27	0.0898 - j0.0951
27	27	28	0.0838 - j0.0926
28	28	29	0.0776 - j0.0906
29	29	30	0.0652 - j0.0835
30	30	31	0.0439 - j0.0215
31	31	32	0.0282 - j0.0144
32	32	33	0.0063 - j0.0041

## Chapitre III

Le tableau (III.4) représente le sens de transit des courants dans les segments après l'intégration de la PD au réseau.

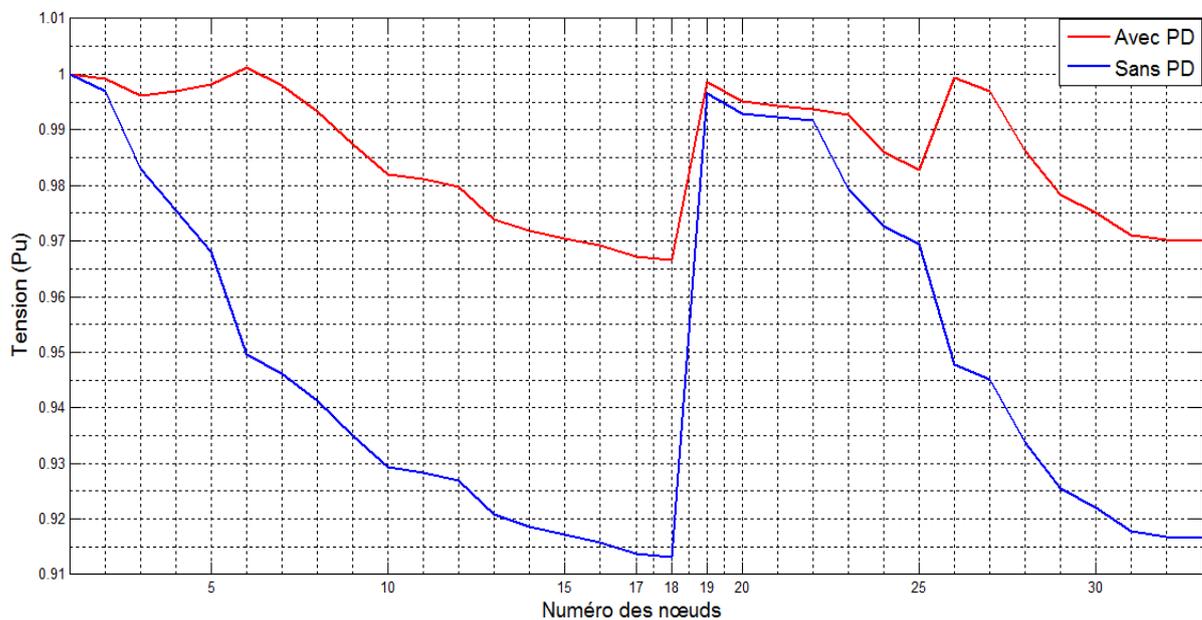


**Fig.III.11 : Sens de transit de puissance dans le réseau après insertion de la PD**

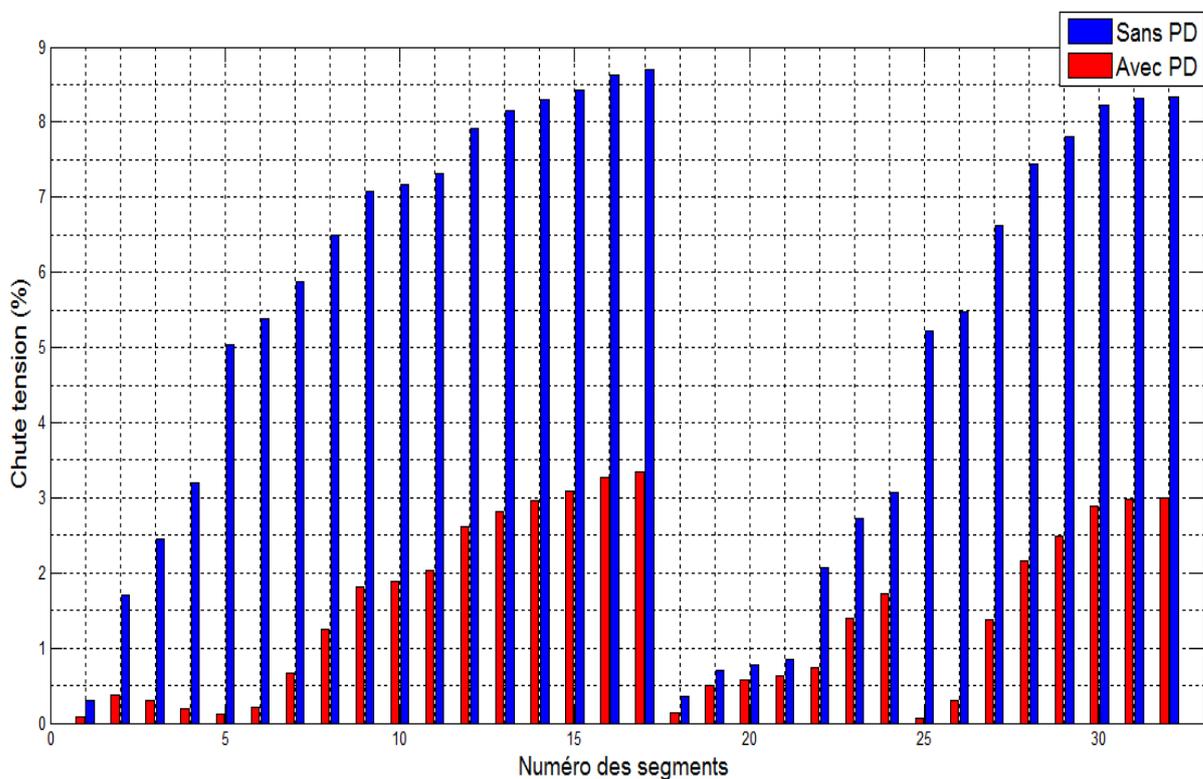
Après l'insertion de la PD au nœud N°6, on remarque bien la contribution de celle-ci dans l'alimentation des charges qui se situent en aval à son emplacement, ainsi que celles qui se trouvent en amont, à savoir, au niveau des nœuds 4 et 5 (flèches vertes). Le sens du courant à travers les segments (4-5) et (5-6) est alors inversé comme il est illustré dans le tableau (III.4) et la figure (III.11). Le poste source est alors soulagé à 60%, qui correspond au taux d'intégration de la PD. Il est à noter que les pertes totales de la puissance active et réactive après l'insertion de la PD sont, respectivement, de  $6,2 \cdot 10^{-3}$  pu et  $4,9 \cdot 10^{-3}$  pu.

### I.15.3. Comparaison de l'état du réseau avant et après l'insertion de la PD

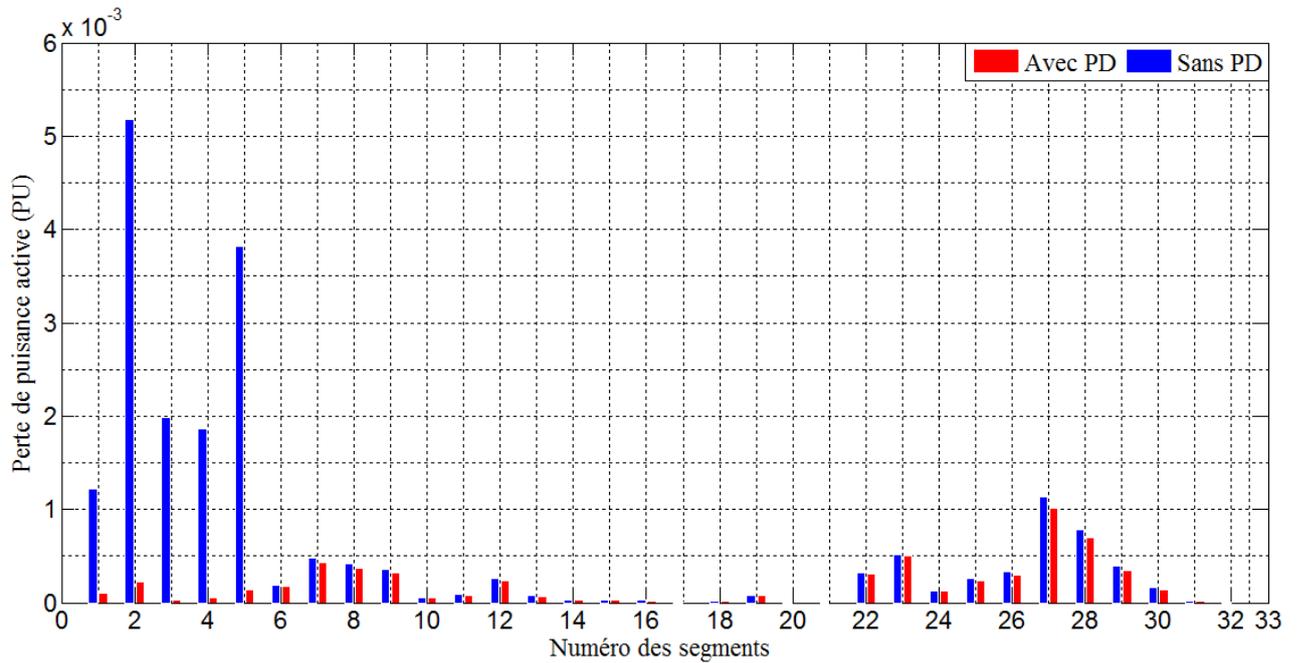
Dans ce qui suit nous allons faire une comparaison entre les résultats obtenus avant et après l'insertion de la PD au nœud optimal N°6, afin d'évaluer l'état du réseau et montrer les améliorations par rapport au niveau de tension et les pertes de puissances.



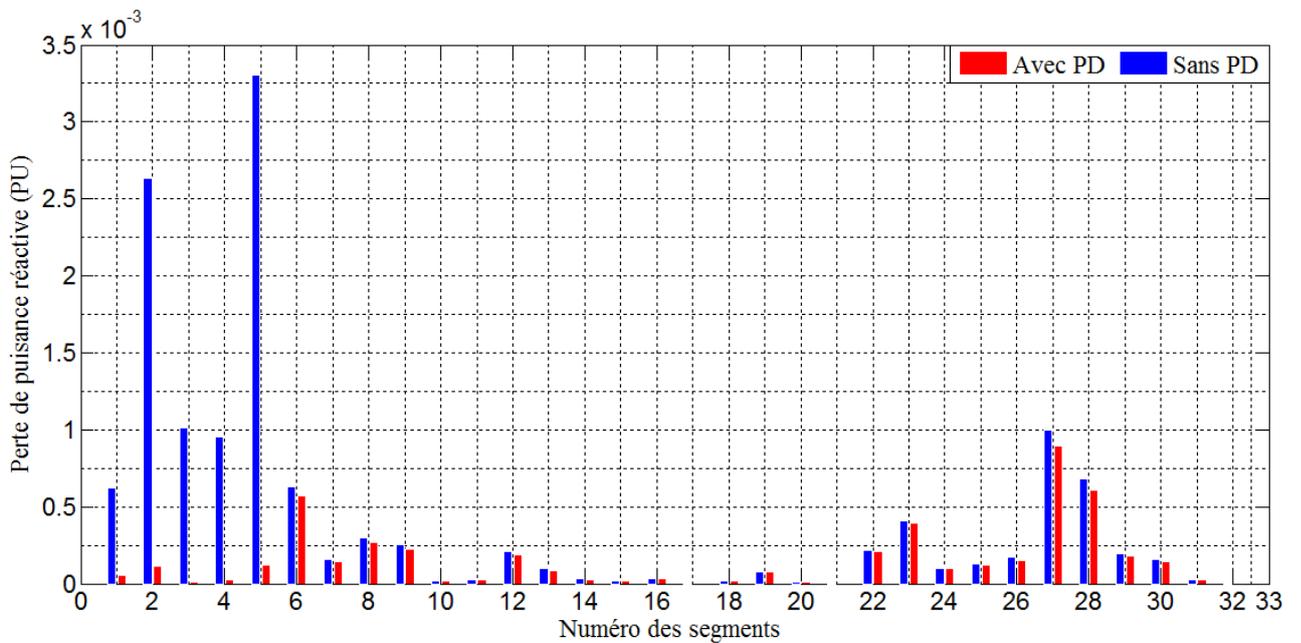
**Fig.III.12 : Amplitude de la tension aux nœuds  
avant et après intégration de la PD**



**Fig.III.13 : Chute de tension dans les segments avant et après l'intégration da la PD**



**Fig.III.14: Pertes de puissance active dans les segments  
avant et après intégration de la PD**



**Fig.III.15 : Pertes de puissance réactive dans les segments**

**avant et après intégration de la PD**

### Interprétation des résultats

La figure (III.12) représente les allures de la tension au niveau des différents nœuds du réseau, avant et après l'intégration de la PD au réseau. On remarque l'amélioration de l'amplitude des tensions au niveau de tous les nœuds, la plus remarquable est au niveau du nœud N°18, elle passe de 0,9131 pu à 0,9667 pu.

La figure (III.13) représente les chutes de tension au niveau des segments avant et après l'intégration de la PD au réseau. On remarque la diminution des chutes de tension au niveau de tous les segments, où la chute de tension la plus importante avant l'intégration de la PD était dans le segment N°17 avec une valeur de 8,691%, mais après l'insertion de la PD elle passe à 3,3342% au même segment.

Les figures (III.14) et (III.15) représentent respectivement les pertes de puissance active et réactive dans les segments avant et après l'insertion de la PD, on remarque une diminution considérable des pertes active et réactive dans tous les segments ;

Le tableau III.6 représente les pertes totales active et réactive avant et après l'insertion de la PD où on note une diminution remarquable.

**Tab.III.5 : Pertes totales actives et réactives avant et après l'insertion de la PD**

	Avant l'insertion de la PD	Après l'insertion de la PD
Pertes de puissances actives totales (pu)	$20,3 \cdot 10^{-3}$	$6,2 \cdot 10^{-3}$
Pertes de puissance réactive totales (pu)	$13,5 \cdot 10^{-3}$	$4,9 \cdot 10^{-3}$

### I.16.Synthèse

L'emplacement optimal au niveau du nœud N°6 ainsi que la taille optimale qui est définie par un taux d'intégration de 60.16% ont permis d'améliorer le fonctionnement global du réseau et cela par :

L'amélioration du profil de la tension ;

La diminution des chutes de tension ;

La diminution des pertes de puissances dans les segments donc des pertes totales;  
Le soulagement du poste source.

### **I.17. CONCLUSION**

Dans ce chapitre, nous avons présenté en premier lieu le réseau de distribution test IEEE 33 nœuds, de structure radiale. Nous avons, par la suite, calculé l'écoulement de puissance avec la méthode BCBV avant et après l'intégration de la PD au réseau où nous avons appliqué la méthode « LSF » afin d'optimiser l'emplacement et la taille de cette dernière. Nous avons comparé les résultats obtenus, afin de monter l'intérêt apporté par l'optimisation de l'emplacement de la PD dans un réseau de distribution sur le fonctionnement global de ce dernier.

## Conclusion générale

L'insertion des productions décentralisées permet aux réseaux de distribution de dépendre moins des réseaux de transport et d'apporter une solution à la problématique d'accroissement de la demande en énergie et servir pour satisfaire aux besoins locaux en charge ou surcharge, de ce fait, réduire les pertes, le coût de transport et de distribution et augmenter la qualité de service. Elle contribue également à l'amélioration du profil de la tension et au soulagement des lignes des réseaux de distribution.

L'insertion de ces nouvelles productions n'est pas sans effets négatifs sur des réseaux auxquels elles sont interconnectées et qui n'ont pas été conçus à cet effet. Elles peuvent cependant poser plusieurs impacts négatifs comme, modifier le sens de transit de puissance, augmenter l'intensité du courant de court-circuit lors d'un défaut, créer les problèmes de déclenchement intempestif et aveuglement des protections et influencer sur le profil de la tension.

La solution de ces problèmes passe par un emplacement optimal des productions décentralisées dans le réseau de distribution, qui était l'objectif du présent travail.

Dans le premier chapitre nous avons cité les différentes architectures des réseaux électriques en général et celle du réseau de distribution en particulier où nous avons exposé trois méthodes de calcul d'écoulement de puissance. La méthode BCBV a été appliquée.

Le deuxième chapitre a été consacré pour définir la production décentralisée et ses conditions d'intégration au réseau de distribution. Nous avons aussi discuté sur les impacts sur ce dernier et exposé trois méthodes d'optimisation. La Méthode (LSF) a été appliquée, car c'est une méthode simple et efficace, elle permet de trouver l'emplacement optimal ainsi que la taille optimale de la PD et sa convergence est rapide.

Dans le troisième chapitre, nous avons d'abord évalué le réseau étudié à son état initial, c'est-à-dire, l'amplitude de la tension aux nœuds, chutes de tension et les pertes de puissances, ainsi que les courants transités à travers les lignes. Nous avons par la suite intégré la PD au réseau au nœud optimal et avec un taux optimal obtenus par les résultats de la simulation de la méthode (LSF). Nous avons réévalué l'état du réseau après l'intégration de la PD et comparé les deux résultats obtenus, avant et après l'insertion de la PD. A travers ce travail, on conclut que l'intégration optimale d'une production décentralisée au réseau de distribution permet d'améliorer le profil de la tension et réduire les chutes de tension ainsi que les pertes de puissance dans les lignes. Le soulagement du poste source a été aussi enregistré.

### Bibliographie

- [1] M.C Alvarez-Hérault, « Architectures des réseaux de distribution du futur en présence de production décentralisée », Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, Décembre 2009 ;
- [2] Dj. Labed, « production décentralisée et couplage au réseau, » Thèse de doctorat, Université Mentouri Constantine, 2008 ;
- [3] V.T Khanh, « Interconnexion des sources d'énergie renouvelable au réseau de distribution électrique, » Thèse de doctorat, Université du Québec à Trois-Rivières, 2009 ;
- [04] F. Iqbal et al., “Optimal placement of DG and DSTATCOM for loss reduction and voltage profile improvement”, Alexandria Eng. J. (2017);
- [05] A.A. Abou El-Ela and al, “Optimal capacitor placement in distribution systems for power loss reduction and voltage profile improvement”, IET Gener. Transm. Distrib, Vol. 10, Iss. 5, pp. 1209–1221, 2016;
- [06] J.F.CANARD, « Impact de la génération d'énergie dispersée dans les réseaux de distribution », Thèse de doctorat de l'INPG, Décembre 2000 ;
- [07] k.Singh, « Fast decoupled power flow for unbalanced radial distribution system », a ward of degree of master of engineering, Thapar University, Patiala, juin 2009;
- [08] I. Noui, « réduction des pertes dans les réseaux électriques par la compensation série TCSC », Mémoire de fin d'études, Université Mohamed Khider Biskra, 2012 ;
- [9] F. HAMOUDI, Cours « Architectures des réseaux électriques, power system design », Master 1 Electrotechnique, université de Béjaïa, 2020-2021 ;
- [10] N. ketfi, « Contribution à la gestion des réseaux de distribution en présence de génération d'énergie dispersée », Thèse de doctorat Université de Batna, 2014 ;
- [11] Yujun HE, « Contribution au réglage de la tension sur un réseau HTA avec producteur. Apport de la flexibilité de la demande », Thèse de doctorat Centrale Supélec, 2015 ;
- [12] Guide Sonelgaz (SPE Amizour), « Régulation fréquence-charge », 2017 ;
- [13] N. Lahaçani Aouzellag, « Contribution à l'Amélioration de la Flexibilité dans les Réseaux Electriques liée à l'Intégration des Générateurs Eoliens », Thèse de doctorat, Université A.MIRA de Bejaïa, 2011 ;
- [14] B. Berseneff « Réglage de la tension dans les réseaux de distribution du futur », Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2010 ;

## Bibliographie

---

- [15] B. Enacheanu, «Outils d'aide à la conduite pour les opérateurs des réseaux de distribution, », Thèse de doctorat, Grenoble, 2007 ;
- [16] Egor Gladkikh. « Optimisation de l'architecture des réseaux de distribution d'énergie électrique », Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes, 2015 ;
- [17] P. Carrive et A. Doulet, «Réseaux de distribution-Structure et planification», Techniques Ingénieur, D4210, Vol.1, 2021 ;
- [18] P.S.R.Murty « power system Analysis. » BS Publication, 2007;
- [19] R. M.Crici , A.P. Feltrin & I. F.Ochoa . « Power flow in four wire distribution networks, general approach », IEEE Transactions on power systems, Vol. 18, No. 3,pp. 1283-1290, November 2003;
- [20] JEN-HAO TENG. « A Direct Approach for Distribution System Load Flow Solutions » IEEE Transactions on power delivery, Vol. 18, No. 3,pp. 882-887, July 2003;
- [21] U. Eminoglu, M. Hakan Hocaoglu, « A new power flow method for radial distribution systems including voltage dependent load models », Electric power systems research, pp.106-114, sciencedirect.com, 2005;
- [22] D. Hemadrassa, «Power Flow Analysis For Radial and Weakly Meshed Electrical Distribution Networks», Thèse de doctorat, Caledonian College of Engineering, Oman, 2010;
- [23] R. Palma-Behnke, J. L. Cerda A., L. S. Vargas, and A. Jofré , « A Distribution Company Energy Acquisition Market Model With Integration of Distributed Generation and Load Curtailment Options, » IEEE Trans. Power Syst., Vol. 20, 2005. pp. 1718-1727;
- [24] A. Keane, and M. O'Malley , « Optimal Allocation of Embedded Generation on Distribution Networks, » IEEE Trans. Power Syst., Vol. 20, 2005, pp. 1640-1646;
- [25] N. Hadjsaid, J.-F. Canard, and F. Dumas , " Dispersed generation impact on distribution networks," *IEEE Computer Applications in Power*, Vol.12 , 1999,pp.22-28;
- [26] N.Aouzellag, Cours « production centralisée et décentralisée », Master 1 Réseaux électriques, université de Béjaia, 2020-2021 ;
- [27] A. Peças Lopes, «Integration of Dispersed Generation on Distribution Networks », IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Vol. 1, pp.323-328, 2000;
- [28] M. Cécile, A. Hérault. « Architectures des réseaux de distribution du futur en présence de production décentralisée », Sciences de l'ingénieur, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2009 ;
- [29] S. Naciri, « Impact de l'intégration des énergies renouvelables au réseau de distribution HTA », Mémoire de fin d'étude, université Sidi Mohamed Ben Abdellah, 2017 ;

## Bibliographie

---

- [30] N. Laverdure, « l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faible ou Insulaires », thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 2005 ;
- [31] T. Pham, « Influences De La Production Décentralisée Sur La Gestion Des Infrastructures Critiques Des Réseaux De Puissance », Thèse de doctorat, INP Grenoble année, 2006 ;
- [32] A. Aissaoui, « Planification des réseaux électriques de distribution pour une présence massive de la génération d'énergie dispersée », Thèse de doctorat, Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbès, 2016 ;
- [33] P. Makanga Koumba, « Étude d'intégration de sources d'énergie renouvelable à un réseau électrique autonome », Mémoire, Université du QUEBEC, Novembre 2013 ;
- [34] C. Djabali « Planification des réseaux de distribution en présence de la production décentralisée », Thèse de doctorat, Université de Sétif 1, 2014 ;
- [35] V. V. S. N. Murthy, A. Kumar, « comparison of optimal DG allocation methods in radial on sensitivity approaches », International journal of Electrical Power & Energy systems ,N°53,pp. 450-467, 2013;
- [36] V. V. S. N. Murthy, A. Kumar, « comparison of optimal DG in radial distribution systems based on new voltage stability index under load growth », International journal of Electrical Power & Energy systems, N°69, pp. 246-256, 2015.