

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 de cycle

En vue de l'obtention du diplôme de  
Master en Electrotechnique  
Option : Réseaux Electriques  
Techniques de Haute Tension

## Thème

---

Développement d'une approche simple pour le calcul de l'écoulement  
de puissance dans un réseau de distribution

---

Réalisée par :

LOUNIS Anis

MADI Ahmed

Encadrés par :

M<sup>me</sup> AOUZELLAG. N

Année Universitaire : 2015 / 2016

# *Remerciement*

*Avant tout, nous remercions Dieu le tout puissant qui nous a donné la force et la*

*Patience de faire ce travail.*

*Nos plus vifs remerciements vont à :*

*Notre promotrice Mme AOUZELLAG.N d'avoir bien voulu diriger ce travail,*

*Pour sa disponibilité, sa franchise, son aspect sérieux dans le travail et son bagage*

*De connaissance qu'elle nous a fait partager.*

*Aux enseignants qui nous ont suivis tout au long de notre cursus 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.*

## *Dédicaces*

*Que ce travail témoigne de mes respects :*

*A mes grands parents :*

*Qui ont tant sacrifié pour nous*

*A mes parents :*

*Grâce à leurs tendres encouragements et leurs grands sacrifices, ils ont pu créer le climat affectueux et propice à la poursuite de mes études. Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma considération et mes profonds sentiments envers eux.*

*Je prie le bon Dieu de les bénir, de veiller sur eux, en espérant qu'ils seront toujours fiers de moi.*

*A mon frère.*

*A la famille LOUNIS.*

*Ils vont trouver ici l'expression de mes sentiments de respect et de reconnaissance pour le soutien qu'ils n'ont cessé de me porter.*

*A tous mes professeurs :*

*Leur générosité et leur soutien m'oblige de leurs témoigner mon profond respect et ma loyale considération.*

*A tous mes amis :*

*Ils vont trouver ici le témoignage d'une fidélité et d'une amitié infinie.*

*LOUNIS Anis*

# *DEDICACES*

***Je dédie ce modeste travail :***

***A toute ma famille***

***A mes parents***

***A ma mère qui m'a beaucoup encouragé.***

***A mes frères et sœurs***

***A mes grands parents.***

***A toute la promo de l'électrotechnique 2015/2016.***

***Et à tous mes amis de près ou de loin.***

***MADI Ahmed***

## Table des matières

<b>Table des matières</b> .....	i
<b>Liste des symboles</b> .....	iii
<b>Liste des abréviations</b> .....	v
<b>Table des figures</b> .....	vi
<b>Table des tableaux</b> .....	viii
<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>Chapitre 1 : généralités sur le réseau électrique</b>	
I.1 Introduction .....	3
I.2 Différentes topologies d'un réseau électrique .....	3
I.2.a Réseau radial .....	4
I.2.b Réseau bouclé .....	5
I.2.c Réseau maillé .....	5
I.3 Réseau de distribution électrique .....	6
I.4 Problèmes de tension liés au réseau de distribution .....	7
I.4.a Les fluctuations de tension .....	7
I.4.b Creux de tension et coupures brèves .....	8
I.4.c Déséquilibre de tension .....	9
I.4.d Les surtensions .....	10
I.4.e Les harmoniques .....	10
I.5 But de l'étude de l'écoulement de puissance .....	11
I.5.1 Formulations des équations de l'écoulement de puissance .....	13
I.6 Conclusion .....	14
<b>Chapitre 2 : Méthodes de calcul de l'écoulement de puissance dans un réseau radial</b>	
II.1 Introduction .....	15
II.2 Méthode se basant sur la topologie d'un réseau de distribution .....	15
II.2.1 construction de la Matrice [BIBC] .....	15
II.2.2 Matrice [BCBV] .....	17
II.2.3 Développement de la méthode .....	19
II.2.4 Algorithme de la méthode .....	19
II.3 Méthode Progressive- Rétrogressive .....	20
II.3.1 Mise en équation pour les réseaux radiaux de distribution .....	21

## Table des matières

II.3.2 L'algorithme de la méthode .....	25
II.4 Méthode se basant sur le théorème Tellegen .....	26
II.4.1 Méthodologie du théorème Tellegen .....	26
II.5 Conclusion .....	31
<b>Chapitre 3 : Intégration de la production décentralisée dans le réseau de distribution : Impacts et remèdes</b>	
III.1 Introduction .....	32
III.2 La production décentralisée .....	32
III.2.1 Les différents types de production décentralisée .....	32
III.3 Impacts de la production décentralisée sur le réseau de distribution .....	33
III.3.1 Effets sur la puissance .....	34
III.3.2 Effets sur la tension .....	34
III.3.3 Effets sur la fréquence du réseau .....	35
III.3.4 Effets sur les puissances de court-circuit .....	36
III.3.5 Effets sur le plan de protection .....	36
III.4 Moyens de réglage de la tension et contrôle de la puissance .....	36
III.3 Classification des dispositifs FACTS .....	36
III.3.1 Dispositifs FACTS parallèles .....	37
III.3.1.a Thyristor Controlled Reactor (TCR) .....	37
III.3.1.b Compensateur statique synchrone STATCOM .....	38
III.3.2 Dispositifs FACTS série .....	38
III.3.3 Dispositifs FACTS hybride série-parallèle .....	40
III.6 Conclusion .....	42
<b>Chapitre 4 : Calcul de l'écoulement de puissance</b>	
IV.1 Introduction .....	43
IV.2 Présentation du réseau étudié .....	43
IV.3 Calcul de l'écoulement de puissance .....	46
IV.3.1 Etat du réseau .....	46
IV.3.2 Etats du réseau avec insertion du générateur éolien .....	49
IV.3.3 Etude de l'état du réseau avec insertion du générateur éolien et compensation .....	53
IV.4 Conclusion .....	56
<b>Conclusion générale et perspective .....</b>	<b>57</b>
<b>Bibliographie .....</b>	<b>59</b>

**Liste des symboles**

$V_i$	Tension au jeu de barres $i$
$\delta_i$	Déphasage de la tension au jeu de barre $i$
$\delta_A$	Angle de phase du paramètre de la ligne A
$P_{Di}$	Puissance active demandée par le nœud $i$
$Q_{Di}$	Puissance réactive demandée par le nœud $i$
$V_S$	Tension de source
$V_r$	Tensions à la réception
$Y$	Admittance total
$G$	Conductance
$P$	Puissances active transportée par la ligne
$Q$	Puissances active transportée par la ligne
$P_{Gm}$	Puissance active générée par le nœud $m$
$Q_{Gm}$	Puissance réactive générée par le nœud $m$
$P_{Dm}$	Puissance active demandée par le nœud $m$
$Q_{Dm}$	Puissance réactive demandée par le nœud $m$
$P_L$	Pertes de puissance active totale
$Q_L$	Pertes de puissance réactive totale
$V_3$ et $V_4$	Tensions des accès 3 et 4
$Z_{ij}$	Impédance de ligne entre les accès $i$ et $j$
$[\Delta V]$	vecteur des chutes de tension
$P_0$	Puissance active nominales des charges
$Q_0$	Puissance réactive nominales des charges
$V_0$	Tension nominale de référence
$\gamma$	Constante de propagation
$A$	Paramètre de la ligne

## Liste des symboles

$Z$	Impédance de la ligne
$I_k$	Représente le courant de charge à l'accès $k$
$I_t$	Courant totale découlant de l'accès source.
$\Delta V$	Chute de tension de la ligne
$R$	Résistance de la ligne
$X$	Réactance de la ligne



**Liste des abréviations**

<b>THT</b>	Très haute tension
<b>HT</b>	Haute tension
<b>MT</b>	Moyenne tension
<b>BT</b>	Basse tension
<b>TT</b>	Théorème Tellegen
<b>BIBC</b>	Bus-injection to branch-current
<b>BCBV</b>	Branch-current to bus-voltage
<b>RDN</b>	Radial distribution network
<b>FACTS</b>	Flexible Alternative Current Transmission Systems
<b>PD</b>	Production décentralisée
<b>TCR</b>	Thyristor controlled reactor
<b>SVC</b>	Static var compensator
<b>STATCOM</b>	Static Compensator
<b>DVR</b>	Dynamic Voltage Restorer
<b>SSSC</b>	Static Synchronous Series Compensator
<b>UPFC</b>	Unified Power Flow Controller
<b><math>P_{\text{éol}}</math></b>	La puissance générée par le générateur éolien

**Table des figures**

Figure I.1 : Réseau radial.....	5
Figure I.2 : Réseau bouclé.....	5
Figure I.3 : Réseau maillé.....	6
Figure I.4 : Exemple de fluctuation de la tension .....	8
Figure I.5 : Creux et coupure de tension.....	9
Figure I.6 : Déséquilibre d’amplitude et de phase .....	9
Figure I.7 : Exemple de surtension .....	10
Figure I.8 : Onde déformée et sa décomposition .....	10
Figure I.9 : Système a deux jeux de barres .....	12
Figure II.1: Exemple d’un réseau de distribution .....	16
Figure II.2: Modèle d’une branche en $\pi$ .....	21
Figure II.3: Circuit équivalent d’un RDN sans branches latérales .....	24
Figure II.4: Réseau de distribution radial (RDN) par niveau .....	26
Figure II.5 : Réseau de distribution illustrant les différentes puissances .....	27
Figure II.6 : Courant entrant et sortant au nœud-k pour un RDN.....	29
Figure II.7 : Les tensions nodales dans un RDN.....	30
Figure III.1 : Schéma de raccordements parallèles.....	37
Figure III.2 : Schéma d’un TCR.....	37
Figure III.3 : Schéma de base du STATCOM .....	38
Figure III.4 : Schéma de raccordement série .....	39
Figure III.5: Schéma de base d’un SSSC .....	40
Figure III.6 :Schéma de raccordement série-shunt.....	41
Figure III.7: Schéma de base d’un UPFC .....	41
Figure IV.1 : Schéma du réseau étudié .....	43
Figure IV.2 : Allure de la tension au niveau des 30 jbs .....	46
Figure IV.3: Tension aux nœuds (4, 17, 20, 22, 24, 25) .....	47
Figure IV.4 : Chutes de tension dans les lignes .....	47
Figure IV.5 : Pertes de puissance active dans les lignes .....	48
Figure IV.6: Pertes de puissance réactive dans les lignes .....	48
Figure IV.7 : Allure de la puissance générée par le générateur éolien .....	49
Figure IV.8 : Tension aux nœuds à 30% d’intégration de la puissance éolienne .....	50
Figure IV.9 : Tension aux nœuds à 50% d’intégration de la puissance éolienne .....	50

## Table des figures

Figure IV.10: Tension aux nœuds (4, 17, 20, 22, 24, 25), après insertion du générateur éolien .....	51
Figure IV.11 : Chutes de tension dans les lignes après insertion du générateur éolien .....	51
Figure IV.12 : Pertes de puissance active dans les lignes après insertion du générateur éolien .....	52
Figure IV.13: Pertes de puissance réactive dans les lignes après insertion du générateur éolien .....	52
Figure IV.14: Tension aux nœuds (4, 17, 20, 22, 24, 25) après compensation .....	54
Figure IV.15 : Chutes de tension dans les branche après compensation .....	54
Figure IV.16 : Pertes de puissance active dans les lignes après compensation .....	55
Figure IV.17: Pertes de puissance réactive dans les lignes après compensation.....	55

**Table des tableaux**

Tableau IV.1 : Données du réseau étudié .....	44
Tableau IV.2 : Données du réseau étudié(les charges) .....	45

### **Introduction générale**

Les réseaux d'énergie, structures vastes et complexes, ont le rôle d'acheminer l'électricité depuis les centres de production jusqu'aux lieux de consommation souvent sur de longues distances. Cependant dans beaucoup de réseaux électriques, la croissance de la demande d'électricité ne s'accompagne pas en parallèle d'une augmentation des capacités de transport et de production. Par exemple, l'extension des réseaux vers les zones rurales ou la construction de nouveaux réseaux aux sites lointains rencontre des contraintes économiques importantes. Pour les réseaux isolés ou en milieu insulaire, il existe souvent un manque d'offre de production. Une alternative consiste à exploiter les énergies renouvelables qui offrent la possibilité de produire de l'électricité proprement et surtout dans une moindre dépendance des ressources, à condition d'accepter leurs fluctuations naturelles et parfois aléatoire.

Le développement de nouvelles sources de production décentralisée (PD) est désormais une réalité dans plusieurs pays à travers le monde. Cette manière de production d'énergie est destinée à être produite localement, généralement insérées au niveau du réseau de distribution. La production décentralisée introduit des changements radicaux sur la distribution de l'énergie électrique et remet en cause la planification, la conception, le fonctionnement et l'exploitation de ces réseaux. En effet, les réseaux de distribution n'ont pas été conçus pour accueillir ce type de production puisque l'insertion de ces sources d'énergie au sein de ces réseaux peut avoir des conséquences importantes sur la gestion et la protection du réseau.

L'objectif de ce mémoire consiste non seulement à étudier l'écoulement de puissance dans un réseau de distribution radial avec une méthode simple à programmer, mais aussi d'étudier l'impact qu'engendre l'intégration des générateurs éolien dans ce type de réseau sur le plan de tension et le flux de puissance et de proposer des solutions pour remédier à ces problèmes. Pour cela notre travail sera donc développé en quatre chapitres comme suit :

Le premier chapitre sera consacré aux généralités sur les différentes structures du réseau électrique, ainsi que sur le développement des équations du calcul de l'écoulement de puissance.

Dans le deuxième chapitre nous allons définir trois différentes méthodes ainsi que leur développement qui traitent le problème lié au calcul d'écoulement de puissance dans un réseau de distribution radial, à savoir :

## Introduction générale

- ✓ méthode se basant sur la topologie d'un réseau de distribution
- ✓ méthode Progressive- Rétrogressive
- ✓ méthode se basant sur le théorème Tellegen

Le troisième chapitre aborde tout d'abord en premier lieu quelques notions sur la production de l'énergie décentralisée, où on a définie la production décentralisée et présenté les différents types de sa production, ainsi que les problèmes liés à leur insertion dans les réseaux électrique de distribution. Et en deuxième lieu, nous avons définie les moyens de réglage de la tension.

Enfin, au quatrième chapitre un calcul d'écoulement de puissance dans un réseau de distribution radial est effectué afin d'évaluer les paramètres tensions et puissances, par la suite, nous allons intégrer un générateur éolien sur le réseau pour voir son influence et proposer des solutions. On terminera ce travail par une conclusion générale et perspective.

## **I.1 Introduction**

Dans un pays, le Transport et la Distribution assurent le transit de l'énergie électrique entre les points de production et les points de consommation. Les points de production sont les centrales qui génèrent l'énergie électrique à partir de différentes énergies primaires (nucléaire, hydraulique, charbon,...), et il est nécessaire de la produire d'une manière efficace et continue, afin de satisfaire et de répondre à la consommation croissante d'électricité des différents points de consommation (postes ou ouvrages et abonnés)

Dans ce chapitre, le réseau de distribution ainsi que les différentes topologies des réseaux électriques seront décrites.

## **I.2 Différentes topologies d'un réseau électrique**

Par topologie d'un réseau électrique il faut comprendre l'ensemble des principes (schéma, protection, mode d'exploitation) utilisés pour véhiculer l'énergie électrique en distribution publique.

Dans la pratique, pour un distributeur, définir une topologie revient à fixer un certain nombre d'éléments physiques en tenant compte de critères liés à des objectifs visés et/ou à des contraintes techniques [01].

Ces éléments étant fortement corrélés entre eux, le choix d'une topologie est toujours le résultat de compromis technico-économiques.

Le choix d'une topologie répond à des objectifs :

- assurer la sécurité des personnes et des biens,
- obtenir un niveau de qualité de service fixé,
- assurer le résultat économique souhaité.

Mais il doit aussi se soumettre à des impératifs

- tenir compte de l'étendue géographique, du relief et des difficultés de construction,
- satisfaire aux contraintes d'environnement, en particulier climatiques (températures minimale et maximale, fréquence des orages, neige, vent, etc.) et respect du milieu.

Les niveaux de tension dans les réseaux électrique sont hiérarchisés. La plupart des pays font appelle à :

- Un réseau de transport (très haute tension) THT 220 ..... 800 kV
- Un réseau de répartition (haute tension) HT 60 ..... 170 kV

## Chapitre 1 : Généralités sur le réseau électrique

- Un réseau de distribution (moyenne tension) MT 5 ..... 36 kV
- Un réseau de livraison de l'abonné (basse tension) BT 400/230 V (selon CEI)

Et selon la nouvelle norme en vigueur en France UTE C18-510 définit les niveaux de tension alternative comme suit :

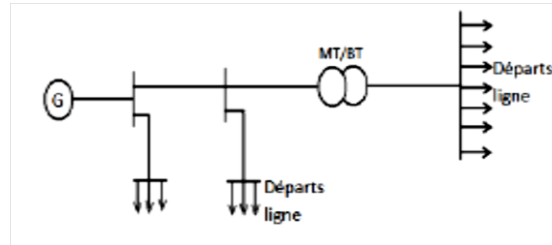
- HTB → pour une tension composée supérieure à 50 kV
- HTA → pour une tension composée comprise entre 1 kV et 50 kV
- BTB → pour une tension composée comprise entre 500 V et 1 kV
- BTA → pour une tension composée comprise entre 50 V et 500 V
- TBT → pour une tension composée inférieure ou égale à 50 V

Cette hiérarchie des niveaux de tensions utilisés varie considérablement d'un pays à l'autre, en fonction des paramètres liés à l'histoire électrotechnique du pays, ses ressources énergétiques, sa surface et finalement, des critères technico-économiques.

### **I.2.a Réseau radial**

Le réseau radial ou antenne est la forme de réseau la plus simple. 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. Grâce à sa structure simple les coûts de réalisation et de protection restent minimes, et il reste largement utilisable dans des zones à faible agglomération. 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 [02]. Un exemple d'un réseau radial est illustré sur la figure (I.1).

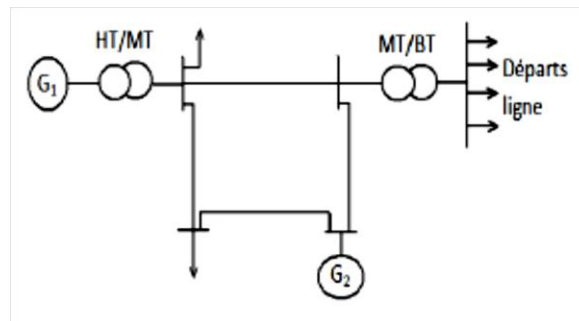




**Fig. I.1** : Réseau radial

### I.2.b Réseau bouclé

Lorsque la densité de charge augmente, on tend, surtout dans les réseaux à moyenne tension mais aussi dans les réseaux à basse tension, vers un maillage partiel par la formation de boucles. Tous les accès de la boucle sont alors alimentés par deux lignes, ce qui augmente fortement la sécurité du service. Un exemple d'un réseau bouclé est illustré sur la figure (I.2).

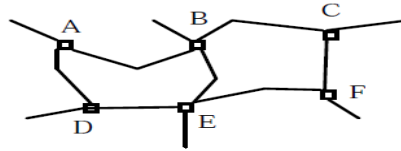


**Fig. I.2** : Réseau bouclé

### I.2.c Réseau maillé

Ce type de réseau est utilisé généralement dans les réseaux de transport, il permet d'assurer la redondance des transits possibles en cas d'incident mais aussi en fonctionnement normal d'assurer dans de bonnes conditions le maintien de la tension lors des fortes variations de la puissance transitée. Et comme il nous assure une fluctuation de tension minimale aux bornes des charges [02].

Le maillage des réseaux MT et à BT est par contre assez rare. Un exemple d'un réseau maillé est illustré sur la figure (I.3).



**Fig. I.3** : Réseau maillé

Dans ce travail, nous allons s'intéresser à l'étude du problème de chutes de tension ainsi que l'évaluation des pertes de puissance dans les lignes du réseau de distribution avec un calcul de l'écoulement de puissance dans un réseau radial.

### **I.3 Réseau de distribution électrique**

Un réseau de distribution électrique est la partie d'un réseau électrique desservant les consommateurs. Il achemine l'énergie électrique d'un réseau de transport ou un réseau de répartition (BT) aux transformateurs aériens desservant les clients [03].

#### ✓ Réseau de distribution MT

La finalité de ce réseau est d'acheminer l'électricité du réseau de répartition aux points de moyenne consommation (généralement supérieure à 250 KVA et inférieure à 10MVA).

Ces points de consommation 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.

#### ✓ Réseau de distribution BT

La finalité de ce réseau est d'acheminer l'électricité du réseau de distribution MT aux points de faible consommation (inférieure à 250 KVA) dans le domaine public avec l'accès aux abonnés BT [04]. 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, de type aérien ou souterrain, est souvent influencée par l'environnement. Les tensions sur ces réseaux sont comprises entre 100 et 440 V.

Les clients peuvent être groupés d'une façon très dense comme dans les villes ou bien séparés les uns des autres par des distances plus ou moins grandes comme dans les campagnes. Ils

sont desservis par un réseau de distribution alimenté par un poste de répartition qui reçoit l'énergie, provenant de centrales éloignées, par l'intermédiaire du réseau de transport. Des lignes de distribution à moyenne tension partent des postes de répartition et alimentent des postes de transformation répartis en différents endroits de la zone à desservir à savoir :

- Les réseaux ruraux généralement de types aériens, arborescents et bouclables,
- Les réseaux urbains essentiellement enterrés et bouclables.

### **I.4 Problèmes de tension liés au réseau de distribution**

Il arrive souvent que les tensions et les courants d'un circuit n'aient pas une forme d'onde sinusoïdale. Ainsi, cette distorsion peut être causée par la saturation du flux dans le noyau d'un transformateur, par la commutation des thyristors dans un système d'entraînement électronique, ou par toute autre charge non linéaire. Les tensions distorsion nées affectent la qualité de la puissance offerte par le fournisseur d'électricité. Elles affectent aussi la performance de plusieurs appareils électroniques.

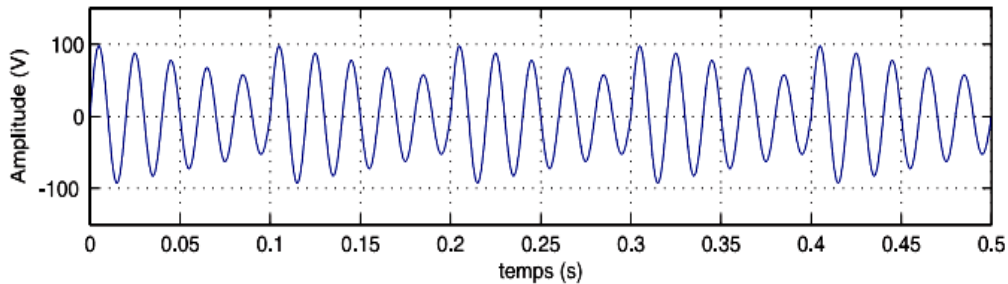
Le gestionnaire de réseau doit maintenir l'amplitude de la tension dans un intervalle de l'ordre de 10% autour de sa valeur nominale. Cependant, même avec une régulation parfaite, plusieurs types de perturbations peuvent dégrader la qualité de la tension :

- Les fluctuations de tension ;
- Creux de tension et coupures brèves ;
- Les surtensions ;
- La présence d'harmonique et d'inter harmonique ;
- Déséquilibre de tension.

#### **I.4.a Les fluctuations de tension**

Les fluctuations de tension peuvent être décrites comme une variation périodique de l'enveloppe de la tension ou comme une suite de variations de tension aléatoires figure(I.4). Sur ces variations, il faut différencier les fluctuations de tension des variations lentes qui sont dues aux variations progressives de la consommation dans les réseaux.

Ces fluctuations de tension peuvent provoquer un papillotement de l'éclairage (flicker), gênant pour la clientèle, même si les variations individuelles ne dépassent pas quelques dixièmes de pour-cent. Les autres applications de l'électricité ne sont normalement pas affectées par ces phénomènes, tant que l'amplitude des variations reste inférieure à quelque 10 %. [05] [06].



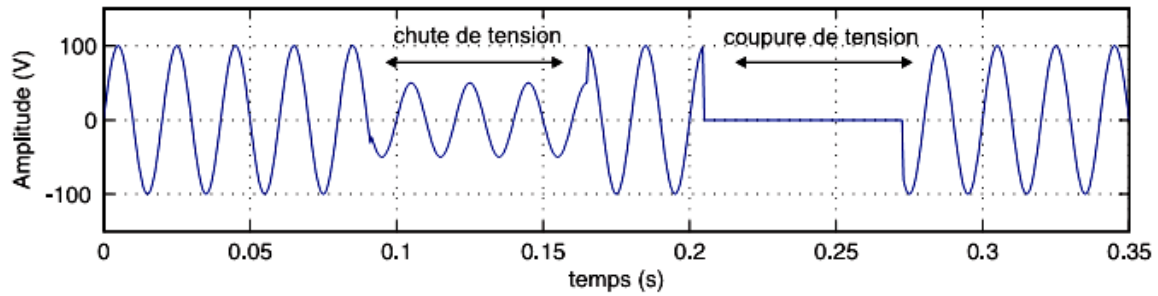
**Fig. I.4** : Exemple de fluctuation de la tension

### **I.4.b Creux de tension et coupures brèves**

Les creux de tension sont produits par des courts-circuits survenant dans le réseau général ou dans les installations de la clientèle figure (I.5). Seules les chutes de tension supérieures à 10 % sont considérées ici (les amplitudes inférieures rentrent dans la catégorie des «fluctuations de tension»). Leur durée peut aller de 10ms à plusieurs secondes, en fonction de la localisation du court-circuit et du fonctionnement des organes de protection (les défauts sont normalement éliminés en 0.1s à 0.2s en HT, 0.2s à quelques secondes en MT[06].

Ils sont caractérisés par leurs amplitude et durée et peuvent être monophasés ou triphasés selon le nombre de phases concerné. Ils peuvent provoquer le déclenchement d'équipements, lorsque leur profondeur et leur durée excèdent certaines limites (dépendant de la sensibilité particulière des charges). Les conséquences peuvent être extrêmement coûteuses (temps de redémarrage se chiffrant en heures, voire en jours ; pertes de données informatiques ; dégâts aux produits, voire aux équipements de production...).

Les coupures brèves de la tension est la perte complète ou la disparition de la tension d'alimentation pendant une période de temps de 1/2 cycle jusqu'à 3s. Elle se produit quand la tension d'alimentation ou le courant de charge diminue à moins de 0.1p.u [07].



**Fig. I.5 :** Creux et coupure de tension

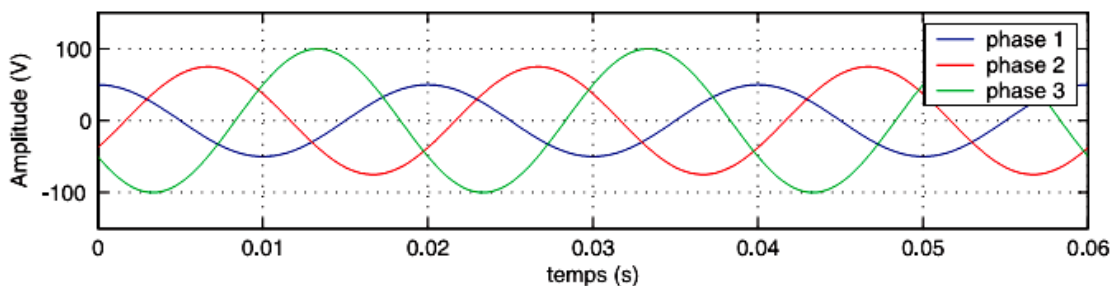
Le dégagement du défaut de tension et les coupures brèves sont principalement produits par les courts-circuits imputables aux incidents naturels du réseau et aux manœuvres d'organes de protection éliminant ces défauts. Ils sont également la conséquence d'appel de puissances importantes lors de la mise en service de certaines charges du réseau.

### I.4.c Déséquilibre de tension

Le phénomène de déséquilibre de tension figure (I.6) est la situation où les trois tensions du système triphasé ne sont pas égales en amplitude et/ou ne sont pas décalées normalement les unes par rapport aux autres de  $120^\circ$ .

Un récepteur électrique triphasé, qui n'est pas équilibré et que l'on alimente par un réseau triphasé équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau. Ceci est fréquent pour les réceptrices monophasées basses tensions. Mais cela peut également être engendré, à des tensions plus élevées, par des machines à souder, des fours à arc ou par la traction ferroviaire [08].

En pratique, un taux de déséquilibre de tension de 1% pendant une longue période et 1.5% de moins de quelque minute est acceptable.



**Fig. I.6 :** Déséquilibre d'amplitude et de phase

### I.4.d Les surtensions

On qualifie de surtension figure (I.7) toute tension appliquée à un équipement dont la valeur de crête sort des limites d'un gabarit défini par une norme ou une spécification [09].

Les surtensions sont de trois natures :

- temporaires (à fréquence industrielle) ;
- de manœuvre ;
- d'origine atmosphérique (foudre).

Et elles peuvent apparaître en mode :

- différentiel (entre conducteurs actifs phase/phase – phase/neutre),
- commun (entre conducteurs actifs et a masse ou la terre).

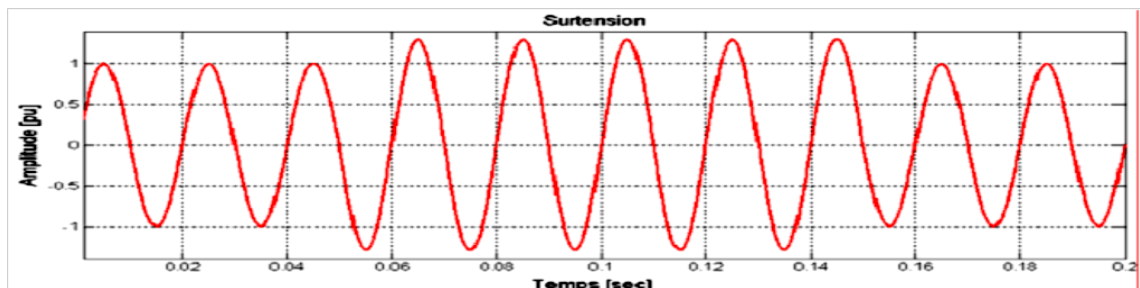


Fig. I.7 : Exemple de surtension

### I.4.e Les harmoniques

On entend par harmonique, toute perturbation non transitoire affectant la forme d'onde de tension du réseau électrique [05]. Les harmoniques sont des composantes dont la fréquence est un multiple de la fréquence fondamentale figure(I.8), qui provoquent une distorsion de l'onde sinusoïdale [10]. Ils sont principalement dus à des installations non linéaires telles que les convertisseurs ou les gradateurs électroniques, les fours à arc, etc.

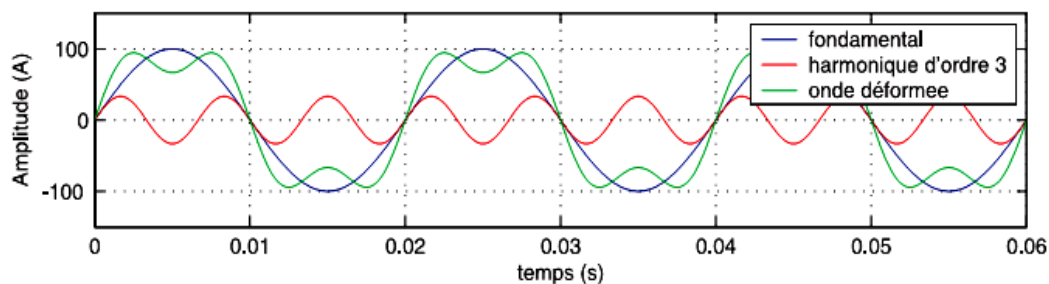


Fig. I.8 : Onde déformée et sa décomposition

## Chapitre 1 : Généralités sur le réseau électrique

Des niveaux élevés d'harmoniques peuvent causer un échauffement excessif de certains équipements, par exemple de condensateurs ou de machines tournantes, et peuvent perturber le fonctionnement de systèmes électroniques [07] [11].

### **I.5 But de l'étude de l'écoulement de puissance**

Le système électro-énergétique donné peut être exploité de la manière suivante :

- ✓ Le réglage du couple d'entraînement de la turbine permet de contrôler la puissance active générée suivant la puissance active demandée et garder donc un équilibre entre ces deux puissances aux pertes de puissance active près. La fréquence 50Hz est le critère utilisé pour satisfaire cette condition d'équilibre. Ceci est lié à la régulation de vitesse ou de fréquence.
- ✓ Le réglage du courant d'excitation de chaque générateur permet de régler la tension aux bornes du générateur et ainsi garder un équilibre entre la puissance réactive générée et celle demandée aux pertes de puissance réactive près. Le critère de tension constante est utilisé pour satisfaire cet équilibre. Il est lié à la régulation de tension.

Chaque réseau électrique consiste principalement en [12] :

- Générateurs d'énergie électrique ;
- Consommateurs d'énergie électrique ;
- Lignes et câbles électriques.

L'étude de l'écoulement de puissance permet d'avoir la solution des grandeurs (tensions, puissances) d'un Réseau électrique en fonctionnement normal équilibré en régime permanent. Un modèle mathématique de ce système doit être déterminé pour pouvoir résoudre le problème de l'écoulement de puissances.

On associe à chaque jeu de barre quatre quantités, dont deux sont connues [13] :

- La puissance active ;
- La puissance réactive;
- Le module de la tension ;
- L'angle de phase.

En particulier, nous pouvons déterminer aussi les puissances à générer par les unités de production si nous connaissons la demande d'énergie par les consommateurs.

Il est nécessaire de choisir un jeu de barre de référence, pour fournir des puissances actives et réactives supplémentaires, pour compenser les pertes dans les lignes de transmission qui restent inconnues jusqu'à l'obtention de la solution finale.

Considérons le schéma représentatif du réseau suivant Figure (I.9)

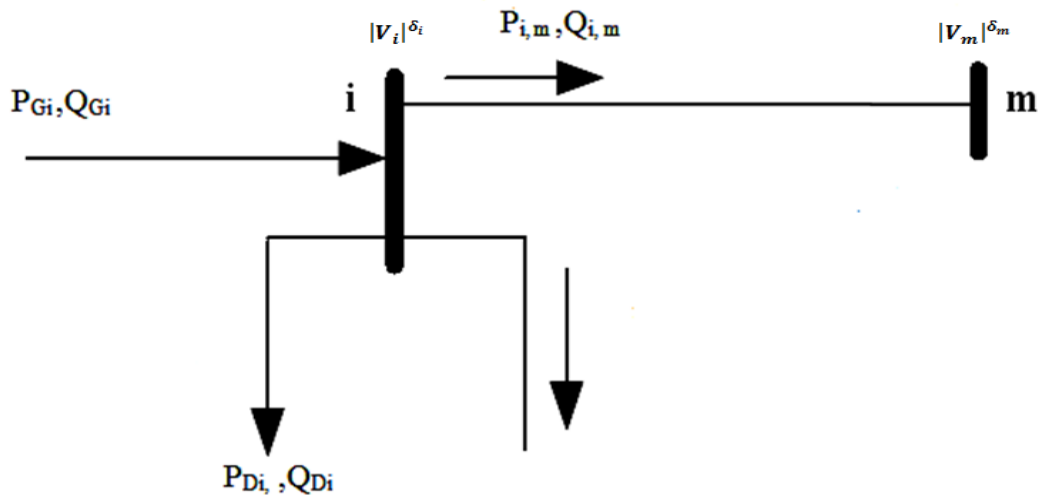


Fig. I.9 : Système a deux jeux de barres

Les jeux de barres sont classés en trois différentes catégories :

- **Jeu de barre de charges (P,Q)**

On connaît les puissances demandées ( $P_{Di}$  et  $Q_{Di}$ ) pour le nœud « i », et les puissances générées ( $P_{Gi}$  et  $Q_{Gi}$ ) afin de spécifier les puissances injectées  $P_i$  et  $Q_i$ .

La solution des équations d'écoulement de puissances sera de déterminer le module de la tension et son déphasage  $|V_i|$  et  $\delta_i$ .

- **Jeu de barre de contrôle de la tension (générateur) (P, |V|)**

On connaît ( $P_{Di}$  et  $Q_{Di}$ ) et on connaît  $|V_i|$  et  $P_{Gi}$ . On spécifie aussi la Puissance  $P_i$ .

La solution des équations d'écoulement de puissances est de déterminer  $\delta_i$  ainsi que  $Q_i$ .



- **Jeu de barre de référence ( $|V|, \delta$ )**

On connaît  $P_{Di}$  et  $Q_{Di}$  et on spécifie  $|V_i|$  et  $\delta_i$  ( $\delta_i$  est toujours égal à zéro).

La solution des équations d'écoulement de puissances sera de trouver  $P_{Gi}$  et  $Q_{Gi}$  ainsi que les puissances injectées  $P_i$  et  $Q_i$ .

### I.5.1 Formulations des équations de l'écoulement de puissance

D'après la figure (I.9) la puissance apparente au nœud « i » est donnée par la relation suivante [14]:

$$S_i = I_i^* * V_i \quad \text{I.1}$$

$$S_i = S_{Gi} - S_{Di} = (P_{Gi} - P_{Di}) + j(Q_{Gi} - Q_{Di}) \quad \text{I.2}$$

L'expression de la tension au nœud « i » et au nœud « m » sous sa forme trigonométrique est:

$$V_i = |V_i| e^{j\delta_i} \quad \text{I.3}$$

$$V_m = |V_m| e^{j\delta_m} \quad \text{I.4}$$

$$V_m^* = |V_m| e^{-j\delta_m} \quad \text{I.5}$$

Le courant au nœud « i » est la somme du produit de ses admittances mutuelles avec les autres nœuds, et la tension en ces nœuds :

$$I_i^* = \sum_{m=1}^n Y_{im}^* V_m^* \quad \text{I.6}$$

L'admittance de la branche i-m est donnée par l'expression :

$$Y_{im} = G_{im} + jB_{im} \quad \text{I.7}$$

$$Y_{im}^* = G_{im} - jB_{im} \quad \text{I.8}$$

En combinant les équations (I.2), (I.3), (I.5) et (I.8) avec (I.6), on aura :

$$S_i = \sum_{m=1}^n |V_i| e^{j\delta_i} (G_{im} - jB_{im}) (|V_m| e^{-j\delta_m}) \quad \text{I.9}$$

$$S_i = |V_i| \sum_{m=1}^n |V_m| [(G_{im} - jB_{im}) (e^{j(\delta_i - \delta_m)})] \quad \text{I.10}$$

$$S_i = |V_i| \sum_{m=1}^n |V_m| [G_{im} [\cos(\delta_i - \delta_m) + j \sin(\delta_i - \delta_m)] - jB_{im} [\cos(\delta_i - \delta_m) + j \sin(\delta_i - \delta_m)]] \quad \text{I.11}$$

En remplaçant  $S_i$  par l'expression (I.2) on aura :

$$\begin{cases} P_{Gi} - P_{Di} = |V_i| \sum_{m=1}^n |V_m| [G_{im} * \cos(\delta_i - \delta_m) + B_{im} \sin(\delta_i - \delta_m)] \\ Q_{Gi} - Q_{Di} = |V_i| \sum_{m=1}^n |V_m| [G_{im} * \sin(\delta_i - \delta_m) - B_{im} \cos(\delta_i - \delta_m)] \end{cases} \quad \text{I.12}$$

Ce système peut s'écrire de la façon :

$$\begin{cases} V_i \sum_{m=1}^n |V_m| [G_{im} * \cos(\delta_i - \delta_m) + B_{im} \sin(\delta_i - \delta_m)] - P_{Gi} + P_{Di} = 0 \\ V_i \sum_{m=1}^n |V_m| [G_{im} * \sin(\delta_i - \delta_m) - B_{im} \cos(\delta_i - \delta_m)] - Q_{Gi} + Q_{Di} = 0 \end{cases} \quad \text{I.13}$$

Ce sont des équations non linéaires qui ne peuvent être résolues par des méthodes analytiques. La solution est obtenue par des méthodes numériques. Les équations de circulation de puissances relient tension et puissance au lieu de tension et courant. Dans les deux équations du système, le déphasage intervient par une différence de phases.

Si  $P_{Gm}$ ,  $Q_{Gm}$ ,  $P_{Dm}$  et  $Q_{Dm}$  désignent respectivement les puissances actives et réactives générées et les puissances actives et réactives demandées par le nœud  $m$ .

Nous définissons les pertes de puissance active totale  $P_L$  et les pertes de puissance réactive totale  $Q_L$ , comme étant :

$$\begin{cases} P_L = \sum_{i \neq m}^n (P_{Gi} + P_{Gm}) - (P_{Di} + P_{Dm}) \\ Q_L = \sum_{i \neq m}^n (Q_{Gi} + Q_{Gm}) - (Q_{Di} + Q_{Dm}) \end{cases} \quad \text{I.14}$$

Si  $P_L = 0$ ,  $Q_L$  est maximal ; on a affaire alors à une ligne d'impédance purement réactive (inductive ou capacitive).

Quand les pertes de puissance réactive  $Q_L$  sont négatives, la ligne fournit de la puissance réactive au réseau.

## I.6 Conclusion

Ce chapitre a fait l'objet, d'une description des topologies du réseau de distribution électrique, et aussi on a présenté le but et le procédé du calcul de l'écoulement de puissance en générale.

## II.1 Introduction

Un réseau à distribution radial, se caractérise par une grande ration de  $R/X$ , ce qui influe d'une manière directe négative sur la convergence d'algorithmes des flux de charge conventionnelle, telle que la méthode de Gauss-Seidel, Newton-Raphson et découplée rapide. Une nouvelle méthode efficace sera proposée pour la solution de l'écoulement de puissance des réseaux de distribution radiaux. Des équations simples seront utilisées pour relier entre la tension de départ, la tension côté réception et les chutes de tension dans chaque branche du système de distribution. L'effet de la capacité de la ligne de charge sera pris en considération incorporée dans la solution de flux de puissance.

Dans ce chapitre nous allons définir trois différentes méthodes ainsi que leur développement qui traitent le problème lié au calcul d'écoulement de puissance dans un réseau de distribution radial, à savoir :

- ✓ méthode se basant sur la topologie d'un réseau de distribution
- ✓ méthode Progressive- Rétrogressive
- ✓ méthode se basant sur le théorème Tellegen

## II.2 Méthode se basant sur la topologie d'un réseau de distribution

Cette méthode est basée sur la construction de deux matrices, la matrice  $[BIBC]$ , (bus-injection to branch-current) représente le rapport entre les courants injectés à l'accès charge et les courants des branches. Et la matrice  $[BCBV]$ , (branch-current to bus-voltage) qui représente le rapport entre les courants des branches et les tensions d'accès [15].

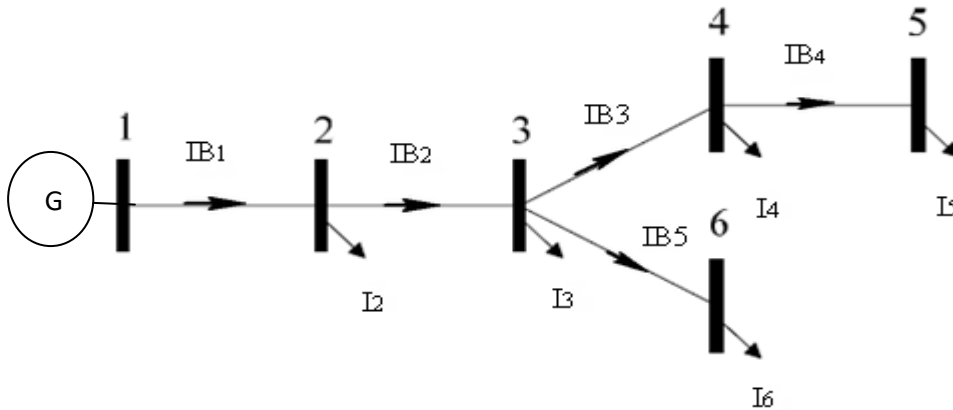
En exploitant la structure arborescente d'un réseau de distribution, il est possible de déterminer directement le sens d'un courant grâce à la configuration radiale. On peut alors construire un algorithme basé sur ce principe.

### II.2.1 construction de la Matrice $[BIBC]$

Soit le réseau de distribution illustrer sur la figure (II.1). Les puissances des charges peuvent être converties aux courants des charges équivalentes injectées par la relation suivante :

$$I_i = \left( \frac{P_i + jQ_i}{V_i} \right)^* \quad \text{II.1}$$

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 [16].



**Fig. II.1:** Exemple d'un réseau de distribution.

Avec

$$IB_1 = I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6$$

$$IB_2 = I_3 + I_4 + I_5 + I_6$$

$$IB_3 = I_4 + I_5 \quad \text{II.2}$$

$$IB_4 = I_5$$

$$IB_5 = I_6$$

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

$$\begin{bmatrix} IB_1 \\ IB_2 \\ IB_3 \\ IB_4 \\ IB_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} \quad \text{II.3}$$

L'équation (II.3) peut être réécrite sous la forme générale :

$$[IB] = [BIBC] [I_{ch}] \quad \text{II.4}$$

Où :

$[IB]$  : est le vecteur des courants de branches de dimension  $m$  ;

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

$[BIBC]$  : est la matrice reliant les courants de branches avec les courants de charges, elle est de dimension  $(n-1)*m$ .

$m$  et  $n$  : représentent respectivement 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  $((n-1)*m)$  ;

**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 (2) jusqu'à inclure toutes les branches dans la matrice  $[BIBC]$ .

### II.2.2 Matrice $[BCBV]$

C'est le rapport entre les courants de branches et les tensions d'accès. Par exemple, les tensions des accès 3 et 4 sont [15]:

$$V_3 = V_2 - IB_2 Z_{23} \quad \text{II.5}$$

$$V_4 = V_3 - IB_3 Z_{34}$$

Avec

## Chapitre 2 : Méthode de calcul de l'écoulement de puissance dans un réseau radial

$V_i$  : La tension de l'accès  $i$  ;

$Z_{ij}$ : L'impédance de ligne entre les accès  $i$  et  $j$ .

$$V_4 = V_1 - IB_1Z_{12} - IB_2Z_{23} - IB_3Z_{34} \quad \text{II.6}$$

D'après (II.6), on peut constater que la tension d'accès peut être exprimée en fonction des courants de branche.

Les mêmes procédures peuvent être appliquées sur d'autres accès, le rapport entre les courants de branches et les tensions d'accès peut être exprimé par :

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_1 \\ V_1 \\ V_1 \\ V_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & Z_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} IB_1 \\ IB_2 \\ IB_3 \\ IB_4 \\ IB_5 \end{bmatrix} \quad \text{II.7}$$

L'équation (II.7) peut être réécrite sous la forme générale :

$$[\Delta V] = [BCBV][IB] \quad \text{II.8}$$

Où :

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

$[BCBV]$  : est la matrice qui relie les courants de branches et les chutes de tension, de

Dimension  $(n-1)*m$ .

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  $((n-1)*m)$  ;

**Étape 2b :** Si une ligne ( $B_k$ ) est située entre deux accès  $i$  et  $j$ , copions 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 (2) jusqu'à inclure toutes les branches dans la matrice  $[BCBV]$ .

### II.2.3 Développement de la méthode

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

En Combinant (II.4) et (II.8), le rapport entre les courants injectés aux accès et les tensions d'accès peuvent être exprimé comme suit :

$$[\Delta V] = [BCBV][BIBC][I] = [DLF][I] \quad \text{II.9}$$

Et la solution pour l'écoulement de puissance de réseau de distribution peut être obtenue par l'équation itérative II.10, II.11 et II.12:

$$I_i^k = \left( \frac{P_i + jQ_i}{V_i^k} \right)^* \quad \text{II.10}$$

$$[\Delta V^{k+1}] = [DLF][I^k] \quad \text{II.11}$$

$$[V^{k+1}] = [V_1] + [\Delta V^{k+1}] \quad \text{II.12}$$

### II.2.4 Algorithme de la méthode

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

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

**Étape 3.** Appliquer les procédures (1b), (2b), (3b) et l'équation (II.8) pour former la matrice  $[BCBV]$  ;

**Étape 4.** Appliquer l'équation (II.9) pour former la matrice  $[DLF]$  ;

**Étape 5.** Itération  $k = k + 1$  ;

**Étape 6.** Calcule de l'écoulement de puissance en employant les équations (II.2) et (II.13), et tensions initiales.

$$\Delta S_{ij} = \Delta P_{ij} + j\Delta Q_{ij} = V_i(I_{ij})^* - V_j(I_{ji})^* \quad \text{II.13}$$

**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).

### II.3 Méthode Progressive- Rétrogressive

Les auteurs dans la référence [17] 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.

### II.3.1 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 :

$$P = P_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{n_p} \quad \text{II.14}$$

$$Q = Q_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{n_q} \quad \text{II.15}$$

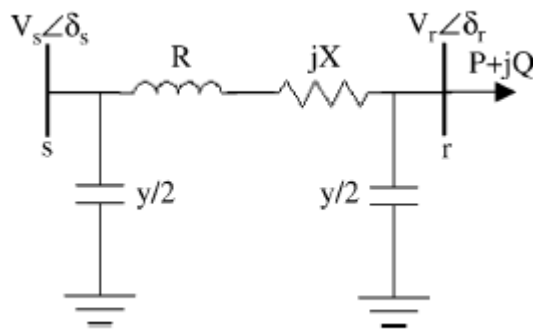
Où

$n_p, n_q$  : 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.

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 (II.2), peut être calculé en utilisant des équations polynomiales qui donnent la relation existante entre la tension à la source et à la réception.



**Fig. II.2:** Modèle d'une branche en  $\pi$

Pour le cas illustré dans la figure (II.2), en utilisant l'équation polynomiale, et en supposant que  $\delta_r = 0$ , les puissances active et réactive transmise peuvent être écrites sous la forme suivante :

$$P = \frac{|V_r| |V_s|}{|z|} \cos(\theta_z - \delta_s) - \frac{|A| |V_r|^2}{|z|} \cos(\theta_z - \delta_A) \quad (\text{II.16})$$

$$Q = \frac{|V_r| |V_s|}{|z|} \sin(\theta_z - \delta_s) - \frac{|A| |V_r|^2}{|z|} \sin(\theta_z - \delta_A) \quad (\text{II.17})$$

$$\gamma = \sqrt{zy} \quad (\text{II.18})$$

$$A = \cosh(\gamma) \quad (\text{II.19})$$

Où

$\gamma$  : constante de propagation de l'onde tension ;

A : paramètre de la ligne ;

z et y : représentent respectivement l'impédance et l'admittance de la ligne ;

$V_s$  et  $V_r$ : représentent respectivement la tension de à 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 source et celle du paramètre de la ligne A.

Les deux équations (II.16) et (II.17) peuvent aussi s'écrire sous la forme suivante :

$$\cos(\theta_z - \delta_s) = \frac{P|z|}{|V_r||V_s|} + \frac{|A||V_r|}{|V_s|} \cos(\theta_z - \delta_A) \quad (\text{II.18})$$

$$\sin(\theta_z - \delta_s) = \frac{Q|z|}{|V_r||V_s|} + \frac{|A||V_r|}{|V_s|} \sin(\theta_z - \delta_A) \quad (\text{II.19})$$

Si on met les équations (II.18) et (II.19) au carré et on les développe, on aura :

$$\cos^2(\theta_z - \delta_s) = \frac{P_0^2 |V|^{2np} |z|^2}{|V_r|^2 |V_s|^2} + \frac{|A|^2 |V_r|^2}{|V_s|^2} \cos^2(\theta_z - \delta_A) + 2 \frac{P_0 |V|^{np} |z| |A|}{|V_s|^2} \cos(\theta_z - \delta_A) \quad (\text{II.20})$$

$$\sin^2(\theta_z - \delta_s) = \frac{Q_0^2 |V|^{2nq} |z|^2}{|V_r|^2 |V_s|^2} + \frac{|A|^2 |V_r|^2}{|V_s|^2} \sin^2(\theta_z - \delta_A) + 2 \frac{Q_0 |V|^{nq} |z| |A|}{|V_s|^2} \sin(\theta_z - \delta_A) \quad (\text{II.21})$$

En utilisant la forme trigonométrique de l'équation (II.22)

$$\cos^2(\theta_Z - \delta_S) + \sin^2(\theta_Z - \delta_S) = 1 \quad (\text{II.22})$$

Et en substituant les équations (II.14), (II.15), (II.20) et (II.21) dans l'équation (II.22), on obtiendra l'équation suivante :

$$\frac{P_0^2 |V|^{2np} |Z|^2}{|V_r|^2 |V_s|^2} + \frac{|A|^2 |V_r|^2}{|V_s|^2} + 2 \frac{P_0 |V|^{np} |Z| |A|}{|V_s|^2} \cos(\theta_Z - \delta_A) + \frac{Q_0^2 |V|^{2nq} |Z|^2}{|V_r|^2 |V_s|^2} + 2 \frac{Q_0 |V|^{nq} |Z| |A|}{|V_s|^2} \sin(\theta_Z - \delta_A) = 1 \quad \text{II.23}$$

En multipliant l'équation (II.23) par  $|V_s|^2 |V_r|^2$ , on aboutit à :

$$P_0^2 |V|^{2np} |Z|^2 + |A|^2 |V_r|^4 + 2P_0 |V|^{np} |Z| |A| |V_r|^2 \cos(\theta_Z - \delta_A) + Q_0^2 |V|^{2nq} |Z|^2 + 2|V_r|^2 Q_0 |V|^{nq} |Z| |A| \sin(\theta_Z - \delta_A) = |V_r|^2 |V_s|^2 \quad \text{II.24}$$

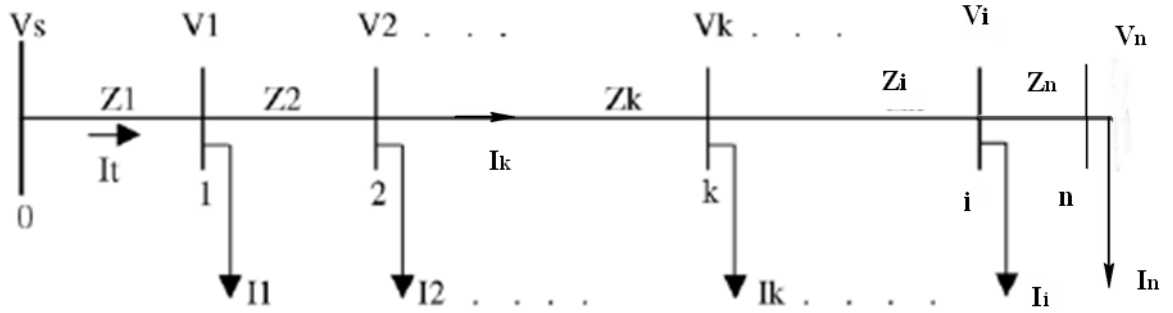
Enfin :

$$|A|^2 V_r^4 + 2|A| V_r^2 |Z| (P_0 V_r^{np} \cos(\theta_Z - \delta_A) + Q_0 V_r^{nq} \sin(\theta_Z - \delta_A)) - V_s^2 V_r^2 + (P_0^2 V_r^{2np} + Q_0^2 V_r^{2nq}) |Z|^2 = 0 \quad \text{II.25}$$

L'équation (II.25) à 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.

Dans l'algorithme proposé, la valeur de  $V_r$  utilisée par le programme (progressive-rétrograde) représente la solution de l'équation (II.25) 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. II.3:** Circuit équivalent d'un RDN sans branches latérales.

Du schéma illustré sur la figure (II.3), la formule qui nous permet le calcul des tensions aux accès lors du processus rétrogressif, peut être écrite comme suit :

$$V_s = V_n + I_t \sum_{k=1}^n Z_k - \sum_{k=1}^{n-1} I_k (\sum_{i=k+1}^n Z_i) \quad \text{II.26}$$

$$I_k = \left( \frac{S_k}{V_k} \right)^* \quad \text{II.27}$$

$$V_{S,r} = \frac{v_s^{\text{nouveau}}}{V_s} \quad \text{II.28}$$

$$V_k^{\text{ajuster}} = \frac{v_k^{\text{nouveau}}}{V_s} \quad \text{II.29}$$

$$\left| |V_k^{j+1}| - |V_k^j| \right| \leq \varepsilon \quad \text{II.30}$$

Où

$Z_k$  et  $Z_i$ : représente l'impédance au  $k^{\text{ième}}$  et le  $i^{\text{ième}}$  nœud du réseau;

$I_k$  : représente le courant de charge à l'accès  $k$ ;

$I_t$  : le courant totale découlant de l'accès source.

### II.3.2 L'algorithme de la méthode

Si on prend le cas illustré sur la figure (II.3), qui est une structure à branches simples et sans branches latérales, alors pour toutes les charges et pour les mêmes exposants ( $n_p, n_q$ ), une méthode simple est proposée comme suit :

- **Étape 1** : initialiser le compteur d'itération ( $i=0$ ) et les tensions de tous les accès, choisies égales à (1pu).
- **Étape 2** : faire le processus de progression en utilisant l'équation (II.25) pour obtenir les tensions  $V_k$  en commençant par l'accès (0). Pour chaque accès charge, utiliser la puissance totale de charge en additionnant toutes les puissances des charges qui passent à travers cet accès et employer les tensions obtenues de cet accès comme tension de départ de la prochaine branche de la branche principale.
- **Étape 3** : calculer les nouvelles puissances active et réactive des charges en utilisant les équations (II.14) et (II.15), ensuite calculer le profil des courants des charges avec l'équation (II.27) .
- **Étape 4** : faire le processus de rétroaction en utilisant l'équation (II.26) pour obtenir les nouvelles tensions des accès ( $V_k^{\text{nouveau}}$ ) et la nouvelle tension de la source ( $V_s^{\text{nouveau}}$ ) en commençant par le  $n^{\text{eme}}$  accès.
- **Étape 5** : calculer le rapport entre la nouvelle tension de la source et l'ancienne et ajuster les tensions  $V_k^{\text{nouveau}}$  à l'aide des équations II.28 et II.29.
- **Étape 6** : revenir à l'étape (2) jusqu'à la convergence, en utilisant l'équation (II.30)
- **Étape 7**: répéter les étapes (3) et (5) pour obtenir les nouveaux déphasages des tensions dans les accès et tous les autres paramètres du réseau.

## II.4 Méthode se basant sur le théorème Tellegen

L'auteur dans la référence [18] 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.

### II.4.1 Méthodologie du théorème Tellegen

Un réseau de distribution radiale est illustré dans la figure (II.4), avec  $n$  nœud et  $b$   $(n-1)$  éléments.

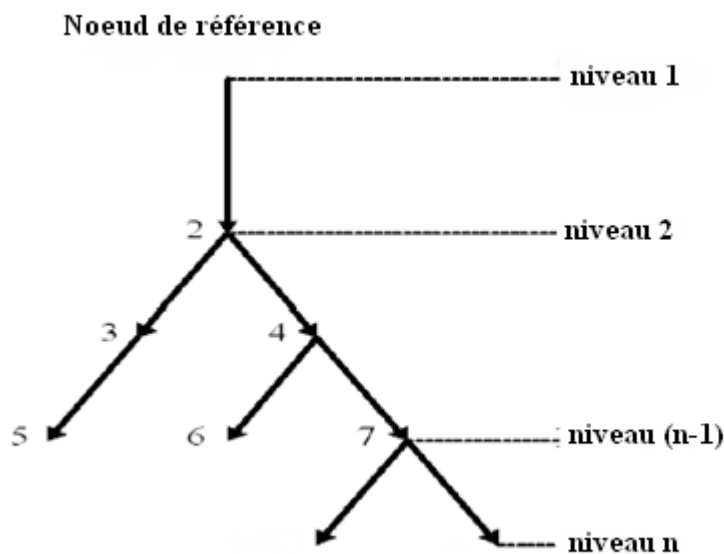


Fig. II.4 : Réseau de distribution radial (RDN) par niveau

- 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.

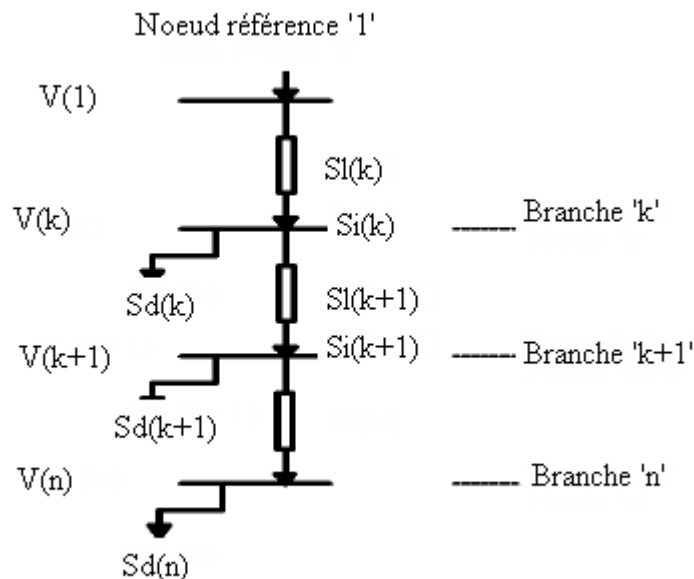
- Calcul de la puissance injectée nodale par échelle régressive :

En utilisant le théorème de Tellegen durant l'échelle régressive lors du calcul de la puissance injectée du nœud externe au nœud-1. Le RDN illustré sur la figure (II.5) est soit configuré d'une manière intermédiaire ou sous- intermédiaire.

- La puissance injectée au n ième nœud : au nœud externe la puissance injectée  $S_i$  est égales à la puissance demandée  $S_d$  ,

$$S_i(n) = S_d(n)$$

II.31



**Fig. II.5 :** Réseau de distribution illustrant les différentes puissances

$S_i(k)$  : puissance injectée au nœud-k

$S_d(k)$  : puissance demandée au nœud-k

$S_l(k)$  : puissance perdue dans l'élément-k

$V(1)$  : tension au nœud-1

$V(k)$  : tension inconnue au nœud-1

## Chapitre 2 : Méthode de calcul de l'écoulement de puissance dans un réseau radial

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.

$$S_i(k) = S_i(k + 1) + S_l(k + 1) + S_d(k) \quad \text{II.32}$$

Où,

$S_i(k)$  : puissance injectée en amont;

$S_i(k + 1)$  : puissance injectée en aval;

$S_l(k + 1)$  : puissance perdue sur le long de la branche;

$S_d(k)$  : puissance demandée en aval.

$$S_l(k + 1) = abs \left( \frac{S_i(k+1)}{V(k+1)} \right)^2 Z(k + 1) \quad \text{II.33}$$

Dans la figure (II.5), on arrive clairement à apercevoir que la puissance injectée en amont est la somme des puissances délivrées en aval. Alors l'équation (II.32) peut être réduite à deux termes :

$$S_i(k) = \sum_{k=\text{nœuds en aval}}^{\text{n- nœuds en amont}} \text{charges} + \sum_{k=\text{nœuds en aval}}^{\text{n- nœuds en amont}} \text{pertes} \quad \text{II.34}$$

$$S_i(k) = \sum_{k=\text{nœuds en aval}}^{\text{n- nœuds en amont}} S_d(k) + \sum_{k=\text{nœuds en aval}+1}^{\text{n- nœuds en amont}} S_l(k) \quad \text{II.35}$$

On observe que le premier terme de l'équation (II.35), 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 ième nœud est

$$I_i(k) = \left( \frac{S_i(k)}{V(k)} \right)^* \quad \text{II.36}$$

- ✓ Calcul des éléments-courants

La valeur de l'élément, courant en aval  $I_i$ , est égale à la valeur ascendante récente du courant qui arrive au nœud-k moins celle provenant de l'aval du même nœud.

$$I_i^p(k+1) = I_i^{p-1}(k) - \left[ \sum_{k=k+1}^{\text{branches d'issue}} \text{courants laterale} + \sum_{k=k+2}^{\text{branches d'issue}} \text{courants noeud} \right] \quad \text{II.37}$$

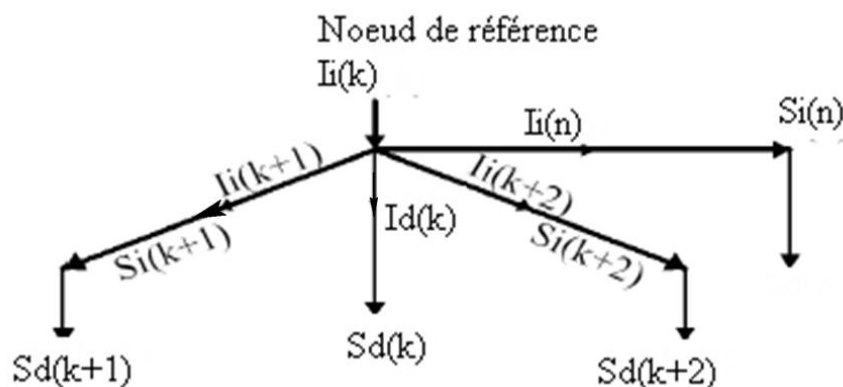
Où p représente le nombre d'itération.

Pour un réseau de distribution radial (RDN), l'équation (II.37) peut être écrite comme suit :

$$I_i^{\text{aval}}(k+1) = I_i^{\text{amont}}(k) - \sum_{k=k+1}^{\text{branches d'issue}} I_i^{\text{aval}}(k+2) - I_d^{\text{amont}}(k) \quad \text{II.38}$$

Le courant injecté  $I_i$  au nœud-k illustré sur la figure (II.7) est égale à:

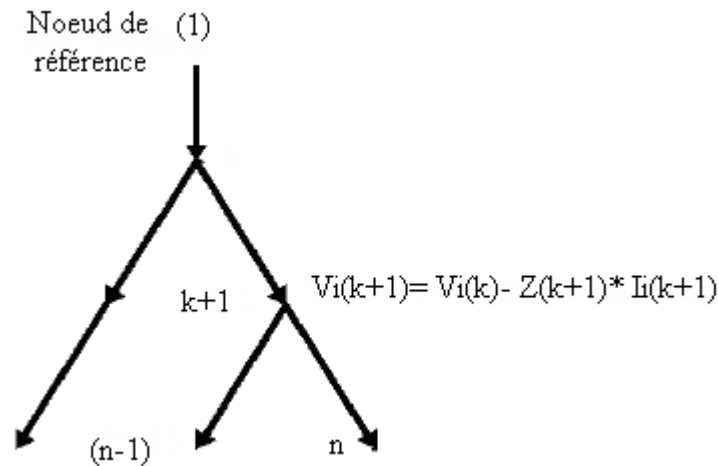
$$I_i(k+1) = \left[ \frac{S_i(k)}{V(k+1)} \right]^* - \sum_{k=k+1}^{\text{branches d'issue}} \left[ \frac{S_i(k+2)}{V(k)} \right]^* - \frac{S_d(k)}{V(k)} \quad \text{II.39}$$



**Fig. II.6 :** Courant entrant et sortant au nœud-k pour un RDN

En appliquant la loi de Kirchhoff sur le RDN illustré sur la figure (II.7), on arrive à mettre à jour le nœud-(k+1) :

$$V_i(k + 1) = V_i(k) - Z(k + 1)I_i(k + 1) \quad \text{II.40}$$



**Fig. II.7 :** Les tensions nodales dans un RDN

Pour l'algorithme de résolution, les équations (II.36), (II.39) et (II.40) seront exécutée 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 :

$$\Delta V(k)^{p+1} = V(k)^{p+1} - V(k)^p \quad \text{II.41}$$

**Étape 1 :** Insertion des données de la ligne et des jeux de barres du réseau. Initialisé le nombre d'itération et définir la convergence.

**Étape 2 :** Balayage rétrogressive : calcul de la puissance injectée en amont à l'aide de l'équation (II.32)

**Étape 3 :** Balayage progressif : les valeurs amont du courant obtenues de l'équation (II.36) sont injectée dans l'équation (II.39) afin d'obtenir les valeurs du courant en aval.

**Étape 4 :** Balayage rétrogressive : application de la loi de Kirchhoff pour le calcul de la tension complexe à partir de l'équation (II.40).

## **II.5 Conclusion**

L'analyse faite au réseau de distribution électrique, via les trois différentes méthodes, nous a permis de dégager un modèle mathématique qui nous permet de traiter le problème lié au calcul de la répartition des puissances. Il s'avère que ces derniers sont très efficaces et elles répondent d'une manière très satisfaisante, lors du traitement de la problématique dans les réseaux de distribution radial et quel que soit le degré de complexité de la structure topologique. Dans notre étude nous avons choisi d'appliquer la méthode Progressive-Régressive en raison de sa précision et sa rapidité de convergence.

### **III.1 Introduction**

Avec l'évolution du temps, les attentes des usagées de l'électricité sont devenues encore plus exigeantes vis-à-vis de la qualité de service, une exigence née des conséquences d'un matériel plus performant utilisé par ces derniers. Et les conséquences d'un service de distribution de qualité médiocre, peut paralyser de nombreux processus industriels ou matériels courants.

Dans ce chapitre, nous allons définir les moyens qui vont nous assurer le réglage de la tension au niveau de la distribution, comme les dispositifs FACTS qui peuvent aider à s'affranchir de ces contraintes.

### **III.2 La production décentralisée**

La production décentralisée est la production d'énergie électrique à l'aide d'installations de petite capacité raccordées au réseau électrique à des niveaux de tension peu élevée basse ou moyenne tension. Ce terme est né par opposition au terme production centralisée désignant les grandes centrales de production connectées au réseau de transport.

#### **III.2.1 Les différents types de production décentralisée**

La production décentralisée PD est fréquemment associée ou parfois confondue avec certains types de production électrique, et il existe plusieurs technologies qui coexistent sur les réseaux de distribution. Une simple classification peut être donnée, en fonction du type de source d'énergie utilisée.

##### **(a) Les énergies renouvelables**

Les sources d'énergie renouvelables sont des sources d'énergies dont le renouvellement naturel est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle du temps humain [19]. Et ses sources d'énergies renouvelables se prêtent bien à la construction de production décentralisée. Mis à part pour les grands barrages et les champs d'éolienne de grande superficie, ces sources sont souvent dispersées géographiquement et ne permettent qu'une faible production d'énergie électrique [20]. Les principales sources sont :

- Energie solaire telle que photovoltaïque et thermique ;
- Energie hydraulique ;
- Géothermie ;
- Biomasse ;
- Énergie éoliennes.

(b) Les énergies non renouvelables

Pour ce qui concerne la production centralisée actuellement, elles arrivent pratiquement à fournir plus de 80 % de l'énergie totale consommée dans le monde [21].

On peut classer les énergies non renouvelables en deux grandes familles distinctes :

Les énergies fossiles (charbon, gaz naturel et pétrole), et l'énergie nucléaire (dont les gisements d'uranium sont limités).

### **III.3 Impacts de la production décentralisée sur le réseau de distribution**

De nombreux travaux ont déjà été réalisés pour caractériser les impacts de la production décentralisée sur le réseau HTA, dans le cas où cette production est connectée sur le même niveau de tension [22], ou au réseau BT [23]. Ce dernier a montré que le critère le plus important était le respect du plan de tension, pour maintenir à terme une capacité d'accueil de la production décentralisée plus importante. A cet effet, il faut souligner que le réseau à même d'accueillir cette production parfois intermittente ou aléatoire est le réseau de distribution. Or, ce dernier n'a pas été conçu à l'origine pour cet usage.

Les réseaux de distribution sont par ailleurs le siège de différents types de défauts caractérisés par leur forme et leur durée (défauts triphasés, biphasés, monophasés). Leurs effets ont des conséquences de plusieurs types : thermiques (échauffement des conducteurs), chutes de tension, instabilité des machines. Lorsque l'on connecte à un poste source une nouvelle production ou que l'on remplace un gros moyen de production par une production plus décentralisée, on modifie la puissance de court-circuit, donc un comportement différent des moyens classiques. Tous ces effets peuvent remettre en cause le plan de protection.

En ce qui concerne la production éolienne, il faut de plus prendre en compte son caractère particulier et les impacts spécifiques qu'elle engendre, comme la gestion de la connexion au réseau ou celui du phénomène de Flicker (fluctuations de puissance conduisant à un effet de scintillation).

Dans le cas des réseaux insulaires, les problèmes cités précédemment sont bien entendu présents voire accentués. Ceci provient de la topologie même du réseau. Ils présentent une puissance de court-circuit ( $P_{cc}$ ) plus faible que celle des réseaux métropolitains et dans le cas de défauts type courts-circuits, les creux de tension seront plus importants et l'ensemble du réseau risque d'être affecté. Enfin, ces réseaux se caractérisent par une faible réserve primaire, et l'introduction de parcs éoliens accentue ce phénomène. Les fluctuations lentes de tension, les creux de tension, les fluctuations de fréquence sont plus importantes dans les réseaux insulaires ainsi que les déséquilibres de tension et le phénomène de Flicker [24].

### III.3.1 Effets sur la puissance

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 [24]. 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.

### III.3.2 Effets sur la tension

La chute de tension dans un conducteur est calculée via la formule suivante [25]:

$$\Delta V = \frac{RP + XQ}{V_r} = V_s - V_r$$

Tel que :

$\Delta V$  : chute de tension de la ligne ;

$R$  et  $X$  : résistance et réactance de la ligne ;

Chapitre 3 : Intégration de la production décentralisée dans le réseau de distribution : Impacts et remèdes

$P$  et  $Q$  : puissances active et réactive transportée par la ligne ;

$V_s$  et  $V_r$  : tensions à la source et à la réception.

De l'expression précédente on peut remarquer qu'une variation lente ou rapide des deux différents types d'énergie aura des répercussions sur la tension du réseau. Comme par exemple :

La modification du plan de tension

La gestion du plan de tension a pour objectif de maîtriser les chutes de tension actives et réactives qui sont croissantes de l'amont vers l'aval tout en assurant le respect des obligations contractuelles ou réglementaires. La présence d'une production décentralisée modifie cette règle.

La puissance active générée par une éolienne par exemple est de nature fluctuante, ce qui tend d'après l'expression précédente à induire des fluctuations de tension dans la zone du réseau proche de point de connexion de ces éoliennes. Dans le réseau de transport de ligne HT et THT, les variations de la tension sont essentiellement induites par les transits de la puissance réactive, contrairement aux réseaux de distribution.

### **III.3.3 Effets sur la fréquence du réseau**

L'effet de la variation de la puissance aérodynamique doit être considéré dans le fonctionnement d'un système de production autonome. Dans le cas de l'utilisation des éoliennes à vitesse fixe, l'oscillation de la vitesse de rotation de la génératrice, provoquée lors d'une brusque diminution ou d'une rafale du vent, induit des variations significatives de la fréquence. Pour les éoliennes à vitesse variable reliées au réseau par des convertisseurs de puissance, ces normes sont facilement respectées par l'existence d'un bus continu intermédiaire [25].

Selon les standards Européens EN 50 160, la fréquence nominale du réseau de distribution est de 50Hz. En outre, en dehors d'un fonctionnement normal, la valeur moyenne de la fréquence du fondamental mesurée sur 10s, doit être d'environ 50Hz  $\pm 1\%$  (donc de 49 Hz à 51 Hz) pour 95% de la semaine ou de 50Hz  $\pm 7.5\%$  (donc de 42.5 Hz à 57.5 Hz) pour 100% de la semaine.

### **III.3.4 Effets sur les puissances de court-circuit**

La puissance de court-circuit au niveau d'un réseau de distribution diminue de l'amont vers l'aval. Avec le raccordement de la production décentralisée sur le réseau cette loi n'est plus valable. Plusieurs cas peuvent alors être énumérés selon l'endroit de court-circuit [25].

### **III.3.5 Effets sur le plan de protection**

Sur le réseau de distribution un dispositif de protection simple et peu onéreux a été mis en place. Ce dispositif fonctionne en prenant en compte que les installations des consommateurs sont passives et non génératrice de production. Dans le cas d'insertion de production décentralisée et d'apparition de défauts, différents dysfonctionnement peuvent apparaître au niveau du plan de protection [25].

### **III.4 Moyens de réglage de la tension et contrôle de la puissance**

Les dispositifs FACTS « Flexible Alternative Current Transmission Systems », sont à base d'électronique de puissance et permettent de contrôler le transit de puissance et d'accroître les capacités de transport des réseaux, ou encore mieux réduire l'instabilité de tension [26].

### **III.3 Classification des dispositifs FACTS**

Depuis les premiers compensateurs, trois familles de dispositifs FACTS ont vu le jour. Elles se distinguent par la technologie des semi-conducteurs et des éléments d'électronique de puissance utilisés, mais aussi par leur mode de connexion.

Suivant ces critères, on peut dénombrer:

- Les dispositifs shunt connectés en parallèle dans les postes du réseau (SVC...);
- Les dispositifs séries insérés en série avec les lignes de transport (TCSC...);
- Les dispositifs hybrides série-parallèle qui recourent simultanément aux deux couplages.



### III.3.1 Dispositifs FACTS parallèles

Le système est à base d'éléments passifs commutés. Il pourra régler la tension au nœud de raccordement en modifiant les échanges de puissances réactives par une injection en parallèle (Figure. III.1) d'une énergie de type inductive ou capacitive. Si le système est basé sur l'onduleur de tension, en plus de la fonctionnalité précédente il peut réaliser du filtrage actif d'harmoniques de courant [27] [28].

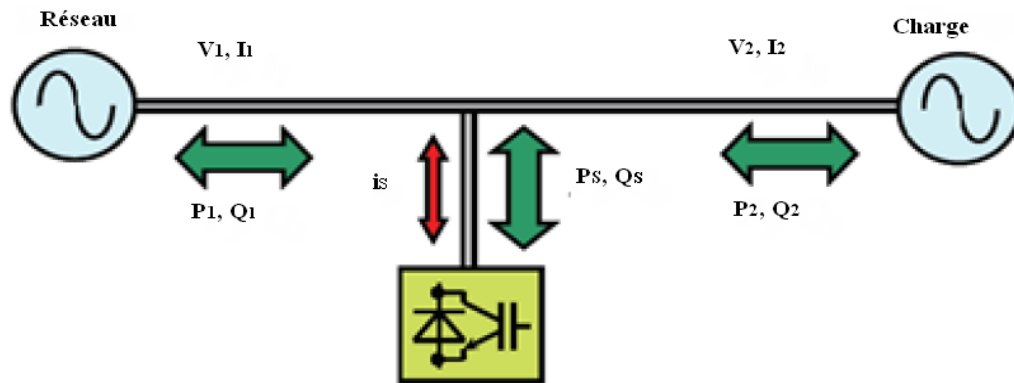


Fig. III.1 : schéma de raccordements parallèles

Parmi les dispositifs shunt on peut citer :

#### III.3.1.a Thyristor Controlled Reactor (TCR)

Le TCR est l'un des constituants important du SVC, il est composé d'une inductance placée en série avec deux thyristors monté en antiparallèle. Le schéma de principe d'un TCR est montré sur la figure (III.2) [29].

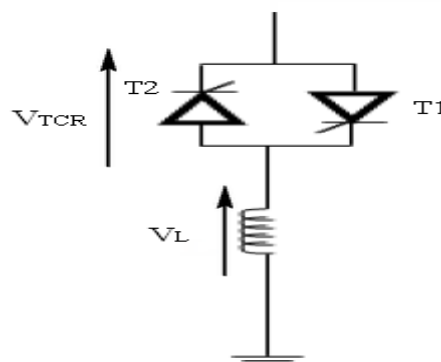


Fig.III.2 Schéma d'un TCR

### III.3.1.b Compensateur statique synchrone STATCOM

Le STATCOM (Static Compensator), est un convertisseur de tension à base de GTO ou de IGBT alimenté par des batteries de condensateur, l'ensemble est connecté parallèlement au réseau à travers un transformateur de couplage. Ce dispositif est l'analogie d'un compensateur synchrone (machine); et comme c'est un dispositif électronique (convertisseur de tension triphasé), il n'a pas d'inertie mécanique, présentant alors de meilleures caractéristiques telle que sa dynamique rapide, son faible coût d'installation et de sa maintenance devant les compensateurs synchrones.

Il est principalement utilisé pour la compensation dynamique des réseaux, afin de faciliter la tenue en tension, d'accroître la stabilité en régime transitoire et d'amortir les oscillations de puissance [27].

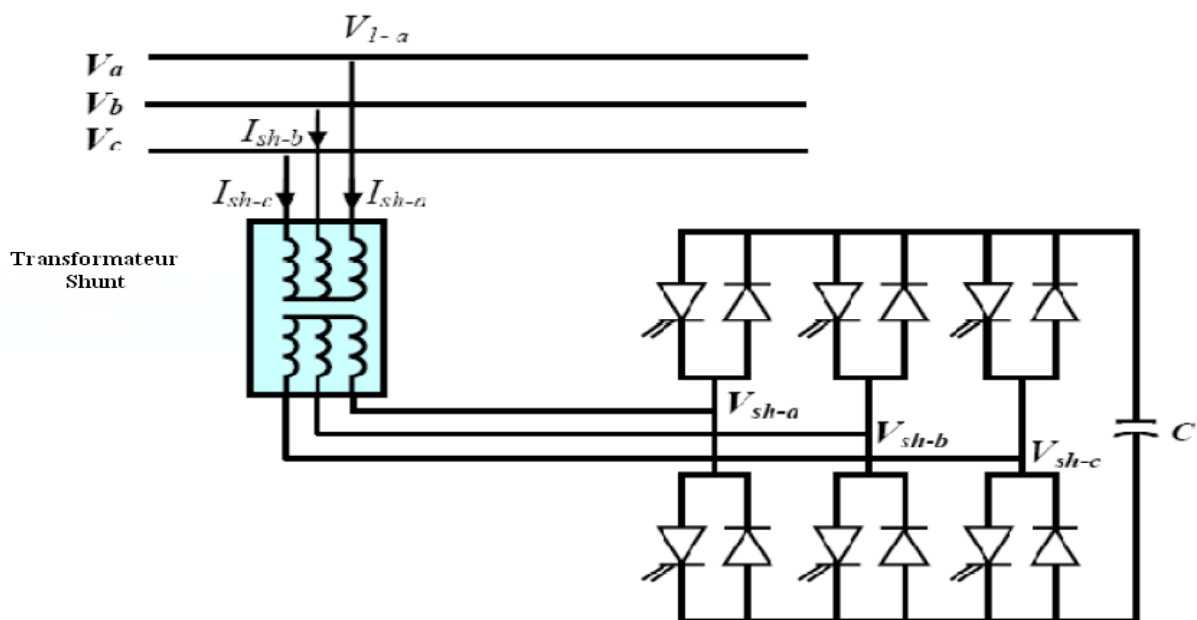


Fig. III.3 : Schéma de base du STATCOM

### III.3.2 Dispositifs FACTS série

Si le système est à base d'éléments passifs commutés, son action principale sera la modification de l'impédance des lignes en l'insérant en série avec la ligne (Fig. III.3). Ainsi sur des lignes fortement inductives, une compensation de la chute de tension peut être réalisée par un fonctionnement capacitif. C'est ce que réalise la compensation série (Series Capacitor System) par l'adjonction en série avec la ligne d'un banc de condensateur d'impédance.

Artificiellement, l'impédance de la ligne est modifiée. Avec un système basé sur un onduleur, en plus de la fonction évoquée précédemment, la tension injectée en série dans la ligne pourra immuniser la charge des perturbations de type harmonique de tension, flicker ou creux de tension.

Ce fonctionnement est alors appelé Dynamic Voltage Restorer (DVR) [30]. Plus la compensation sera importante et plus le stockage de l'énergie dans la partie continue du convertisseur devra être grand. Dans certains cas, si l'on souhaite pouvoir injecter de la puissance active, l'utilisation d'un système d'alimentation auxiliaire au niveau de la tension du bus continu devra être envisagée.

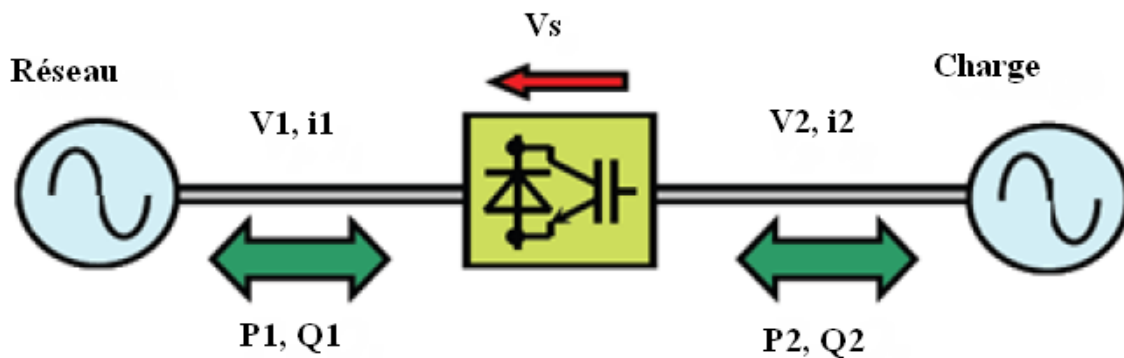
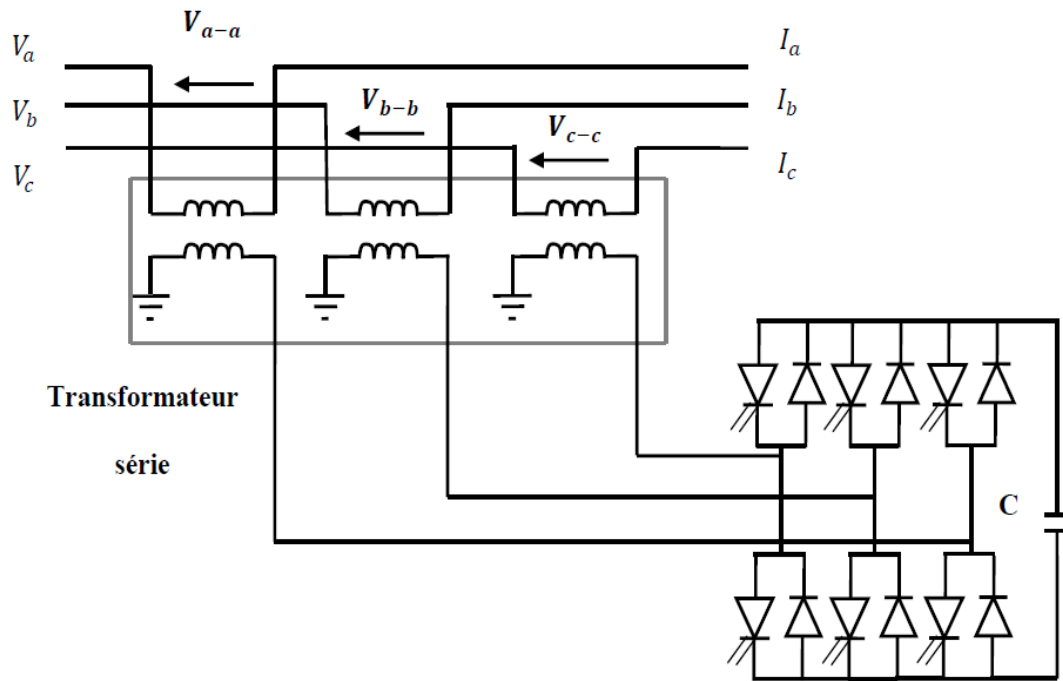


Fig. III.4 : schéma de raccordement série

Parmi les dispositifs série on distingue :

**SSSC (Static Synchronous Series Compensator)** [27]

Ce type de compensateur série (Compensateur Synchrone Statique Série) est le plus important dispositif de cette famille. Il est constitué d'un onduleur triphasé couplé en série avec la ligne électrique à l'aide d'un transformateur (Figure. III.5). Son rôle est d'introduire une tension triphasée, à la fréquence du réseau, en série avec la ligne de transport. Cette tension est en quadrature avec le courant de ligne. Nous pouvons, dans ce cas, régler continuellement la valeur apparente de la capacité ou de l'inductance ainsi introduite dans la ligne.



**Fig. III.5:** Schéma de base d'un SSSC

### III.3.3 Dispositifs FACTS hybride série-parallel

Ce système est une association de deux systèmes généralement de même nature, à base d'éléments passifs commutés ou sur la base de l'onduleur, l'un raccordé en série et l'autre en parallèle (Figure III.6). Les fonctionnalités de ce système sont une combinaison de celle des deux systèmes précédents. Sa conception permet de prélever de la puissance active sur le réseau généralement par la partie shunt et de contrôler les paramètres de sortie à l'aide de la partie série [31].

Les dispositifs FACTS présentés précédemment permettent d'agir uniquement sur un des trois paramètres déterminant la puissance transmise dans une ligne (tension, impédance et déphasage). Par une combinaison des deux types de dispositifs (shunt et série), il est possible d'obtenir des dispositifs hybrides capables de contrôler simultanément les différentes variables précitées.

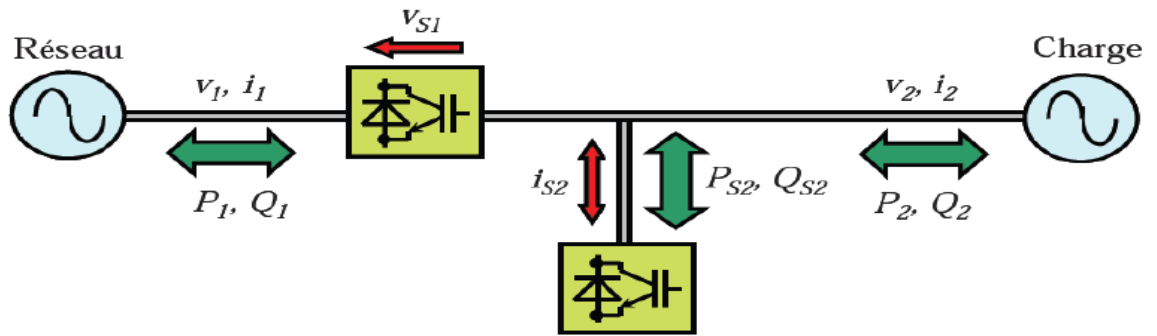


Fig. III.6 : Schéma de raccordement série-shunt

Parmi ces types de compensateurs on peut nommer :

**Contrôleur de transit de puissance unifié UPFC**

Le contrôleur de transit de puissance unifié UPFC (Unified Power Flow Controller) est formé de deux convertisseurs de tension reliés par une liaison à courant continu formée par un condensateur. Il s'agit en fait de la combinaison d'un STATCOM et d'un SSSC (Figure .III.8).

Le principe de l'UPFC consiste à dériver une partie du courant circulant dans la ligne pour le réinjecter avec une phase appropriée. Le convertisseur connecté en parallèle, a pour fonction de prélever la puissance active et de la délivrer au convertisseur série. Ce dernier génère une tension contrôlée en amplitude et en phase, qui est insérée dans la ligne.

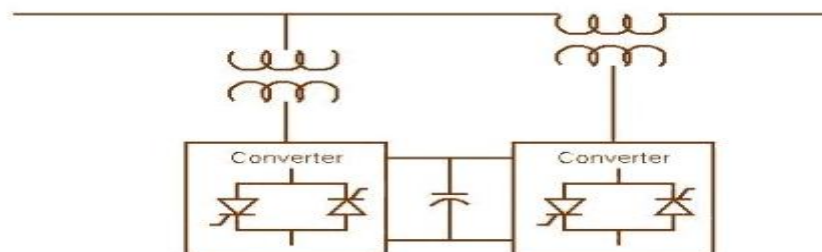


Fig. III.7: Schéma de base d'un UPFC

### **III.6 Conclusion**

Les énergies renouvelables sont devenues un moyen incontournable dans le monde de la production d'électricité, cependant leur intégration dans les réseaux électriques pose de vrais problèmes en termes d'impacts. Il faudra donc, accompagner ces sources d'énergie inépuisable, par des moyens de contrôle telle que les dispositifs FACTS qui se caractérisent par leur flexibilité et leur grande vitesse de réponse.

Nous avons présenté dans ce chapitre, en premier lieu définie la production décentralisée et présenté les différents types de sa production, ainsi que les problèmes liés à leur insertion dans les réseaux électrique de distribution.

En deuxième lieu, nous avons définie les moyens de réglage de la tension au niveau de la distribution, et aussi nous avons donné une définition et une classification des divers types de contrôleur FACTS.

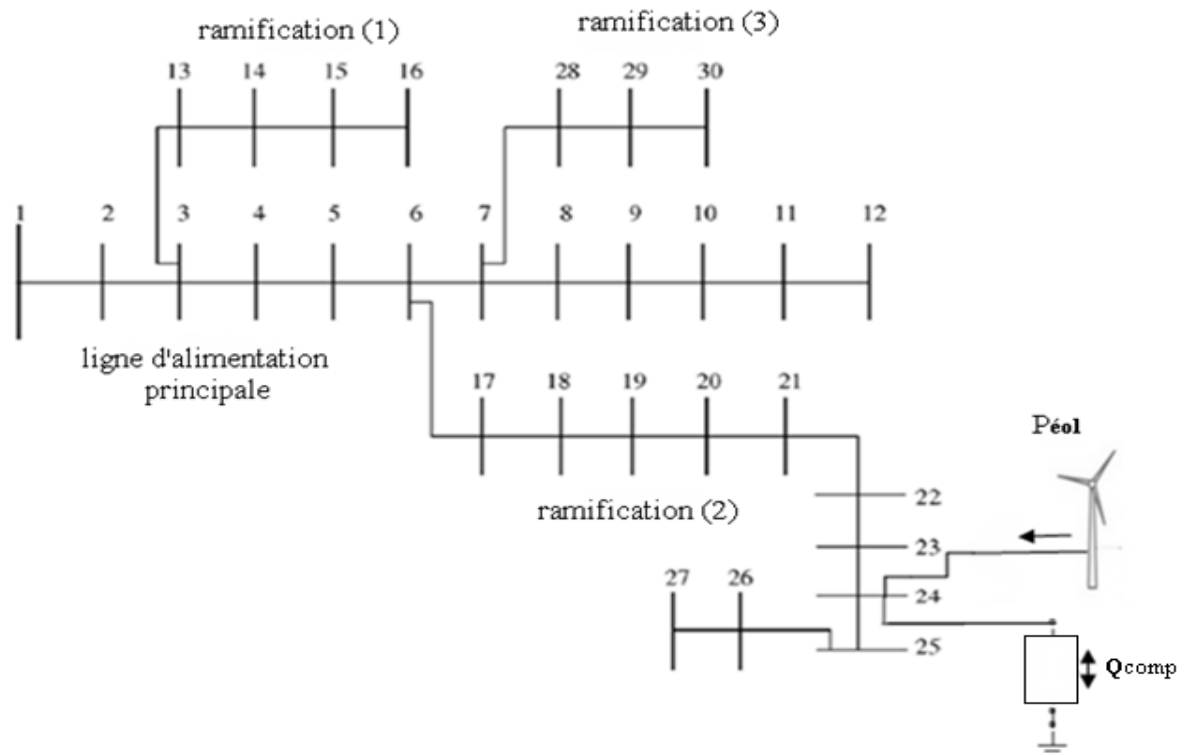
## IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons effectuer un calcul d'écoulement de puissance dans un réseau de distribution radial à 30 jbs avec la méthode progressive-régressive afin d'évaluer les tensions et les puissances.

Par la suite nous allons étudier l'impact de l'intégration d'un générateur éolien au réseau. Comme la puissance générée par l'éolienne est prise de forme fluctuante, nous allons voir son influence sur le comportement du réseau et quelle est la solution adoptée pour améliorer la qualité de cette intégration.

## IV.2 Présentation du réseau étudié

Le réseau étudié dans notre travail est constitué d'une source centralisée de tension nominale de 11 kV. Cette source alimentant une ligne de 30 jeux de barres présentant trois ramifications. Dans ce système, tous les nœuds sont de type consommateur (P, Q), à l'exception du nœud 1 qui est un nœud bilan avec une tension de 1 p.u. Le schéma du réseau est représenté sur la figure IV.1.



**Fig.IV.1** : Schéma du réseau étudié

Les paramètres de la charge et de la ligne sont regroupés dans les tableaux (IV.1).

Tab IV.1 : Données du réseau étudié

Numéro de la branche	Nœuds de départ	Nœuds d'arrivée	R (p.u)	X (p.u)
1	1	2	0.0967	0.0397i
2	2	3	0.0886	0.0364i
3	3	4	0.1359	0.0377i
4	4	5	0.1236	0.0343i
5	5	6	0.1236	0.0343i
6	6	7	0.2598	0.0446i
7	7	8	0.1732	0.0298i
8	8	9	0.2598	0.0446i
9	9	10	0.1732	0.0298i
10	10	11	0.1083	0.0186i
11	11	12	0.0866	0.0149i
12	3	13	0.1299	0.0223i
13	13	14	0.1732	0.0298i
14	14	15	0.0866	0.0149i
15	15	16	0.0433	0.0074i
16	6	17	0.1483	0.0412i
17	17	18	0.1359	0.0377i
18	18	19	0.1718	0.0391i
19	19	20	0.1562	0.0355i
20	20	21	0.1562	0.0355i
21	21	22	0.2165	0.0372i
22	22	23	0.2165	0.0372i
23	23	24	0.2598	0.0446i
24	24	25	0.1732	0.0298i
25	25	26	0.1083	0.0186i
26	26	27	0.0866	0.0149i
27	7	28	0.1299	0.0223i
28	28	29	0.1299	0.0223i
29	29	30	0.1299	0.0223i



Tab IV.2 : Données du réseau étudié (les chages)

Numéro de la branche	P (p.u)	Q (p.u)
1	0	0
2	0.0042	0.0026
3	0	0
4	0.0042	0.0026
5	0.0042	0.0026
6	0	0
7	0	0
8	0.0042	0.0026
9	0.0042	0.0026
10	0.0041	0.0025
11	0.0042	0.0026
12	0.0025	0.0015
13	0.0011	0.0007
14	0.0011	0.0007
15	0.0011	0.0007
16	0.0002	0.0001
17	0.0044	0.0027
18	0.0044	0.0027
19	0.0044	0.0027
20	0.0044	0.0027
21	0.0044	0.0027
22	0.0044	0.0027
23	0.0044	0.0027
24	0.0044	0.0027
25	0.0044	0.0027
26	0.0044	0.0027
27	0.0026	0.0016
28	0.0017	0.0011
29	0.0017	0.0011
30	0.0017	0.0011

### IV.3 Calcul de l'écoulement de puissance

Le présent travail a été divisé en trois parties essentielles définies comme suit :

- Etudier l'état du réseau (tension aux nœuds, chute de tension et pertes de puissances dans les lignes).
- Etudier l'état du réseau avec insertion d'un générateur éolien.
- Etudier l'état du réseau avec insertion d'un générateur éolien, et régulation de la tension

#### IV.3.1 Etat du réseau

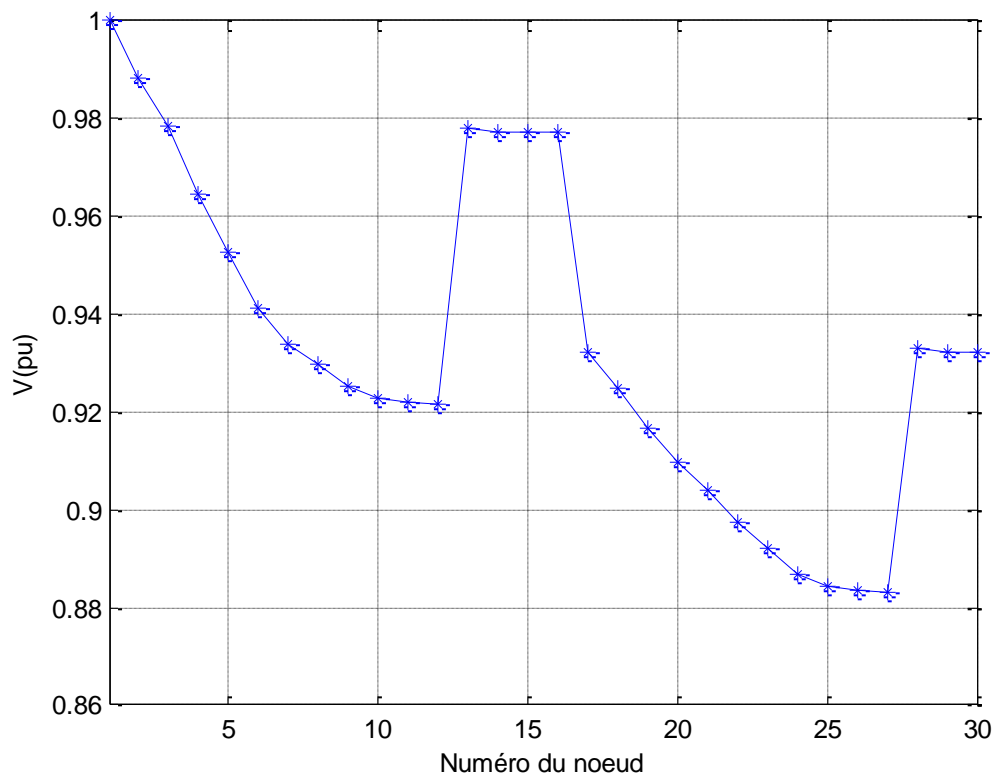


Fig.IV.2 : Allure de la tension au niveau des 30 nœuds

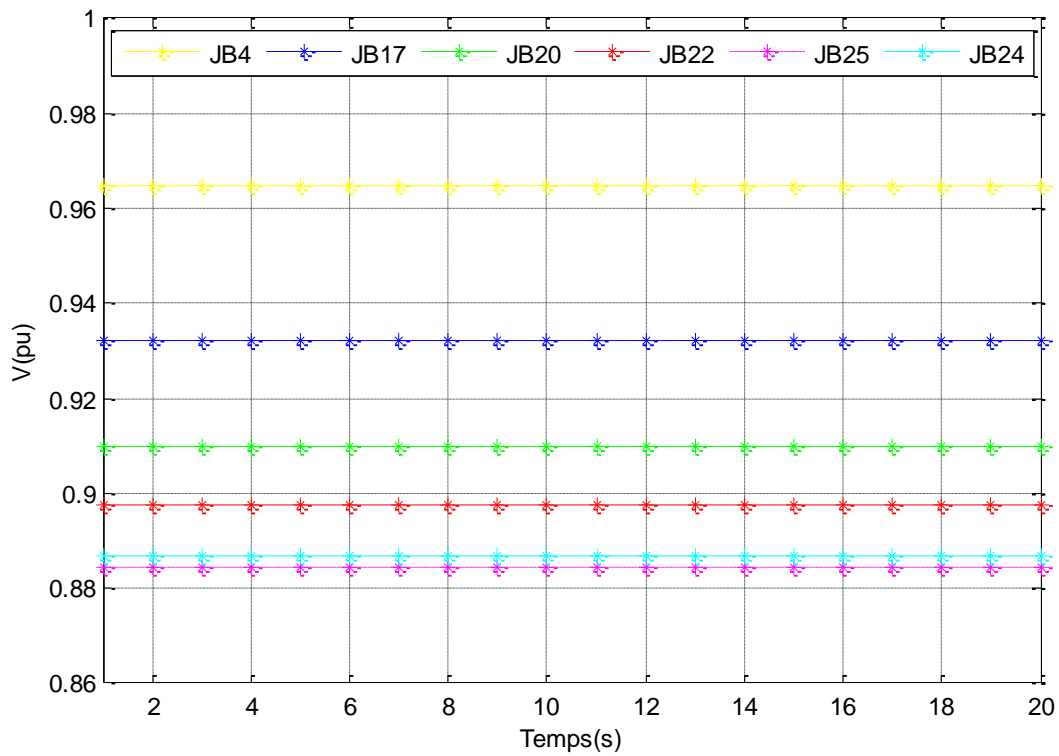


Fig. IV.3: Tension aux nœuds (4, 17, 20, 22, 24, 25)

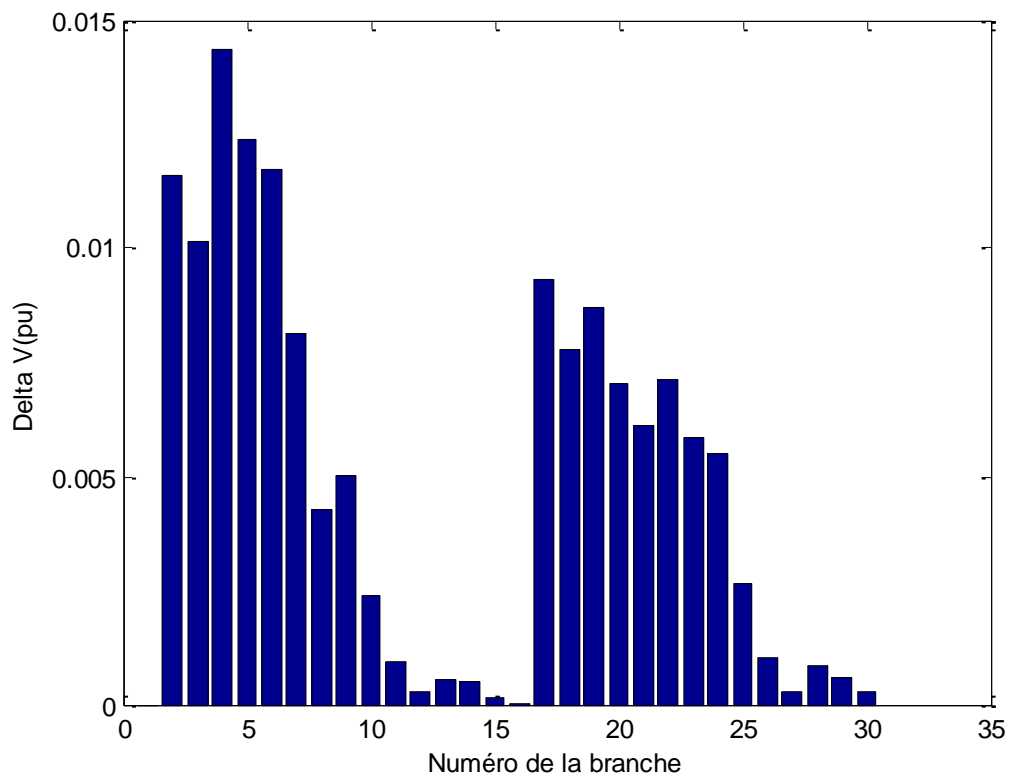


Fig IV.4 : Chutes de tension dans les lignes

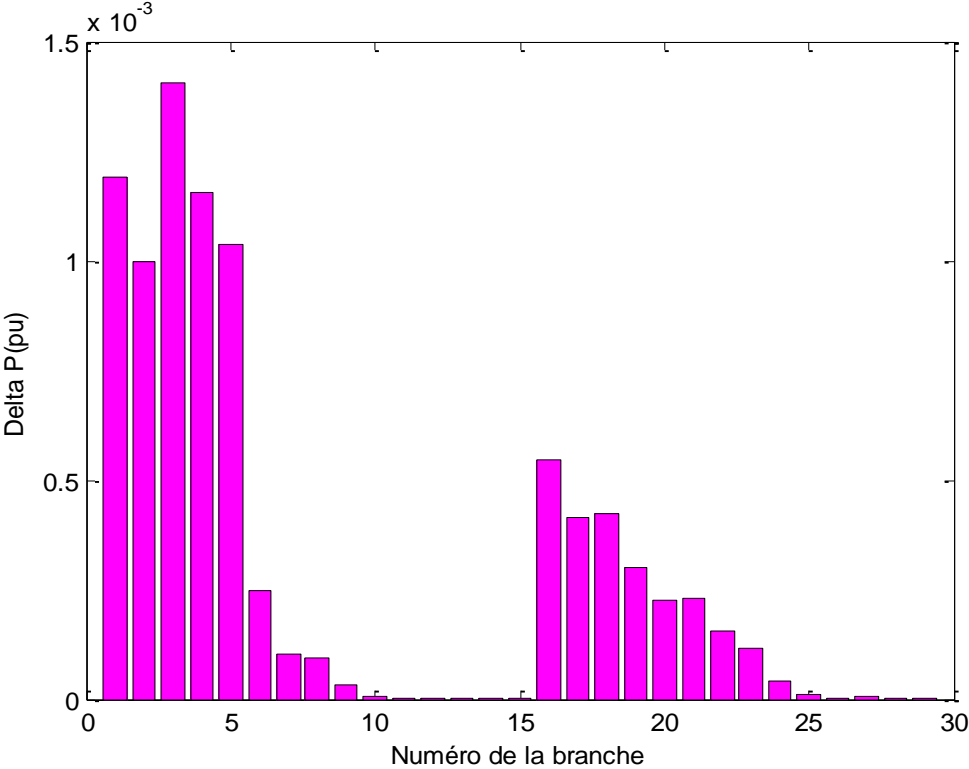


Fig. IV.5 : Pertes de puissance active dans les lignes

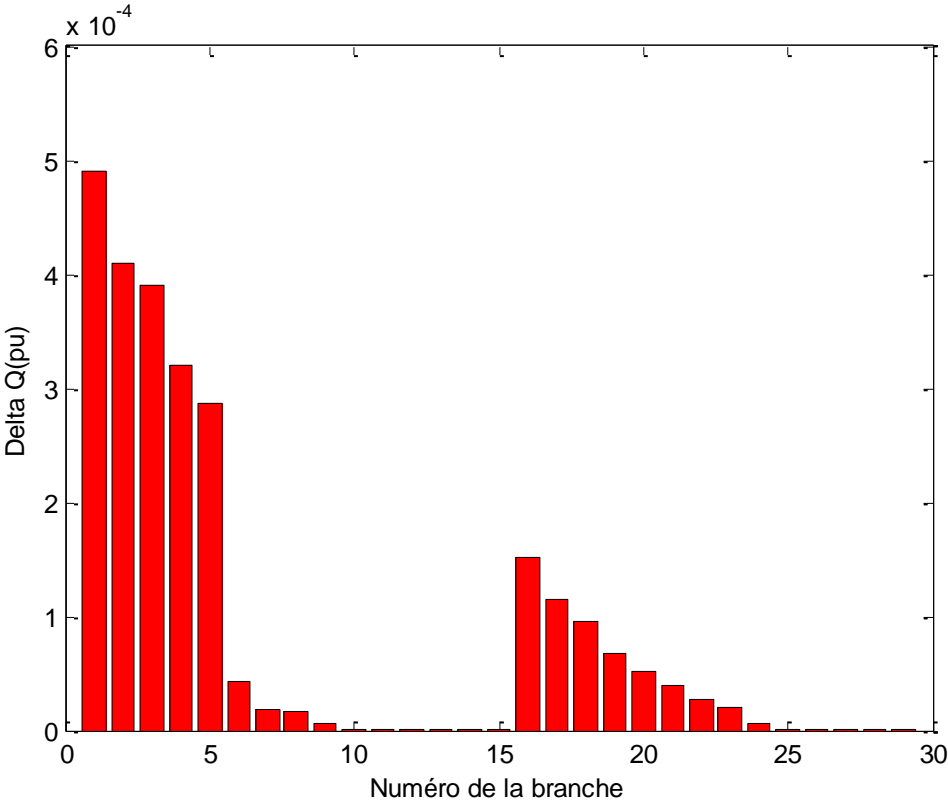


Fig. IV.6: Pertes de puissance réactive dans les lignes

### Interprétation

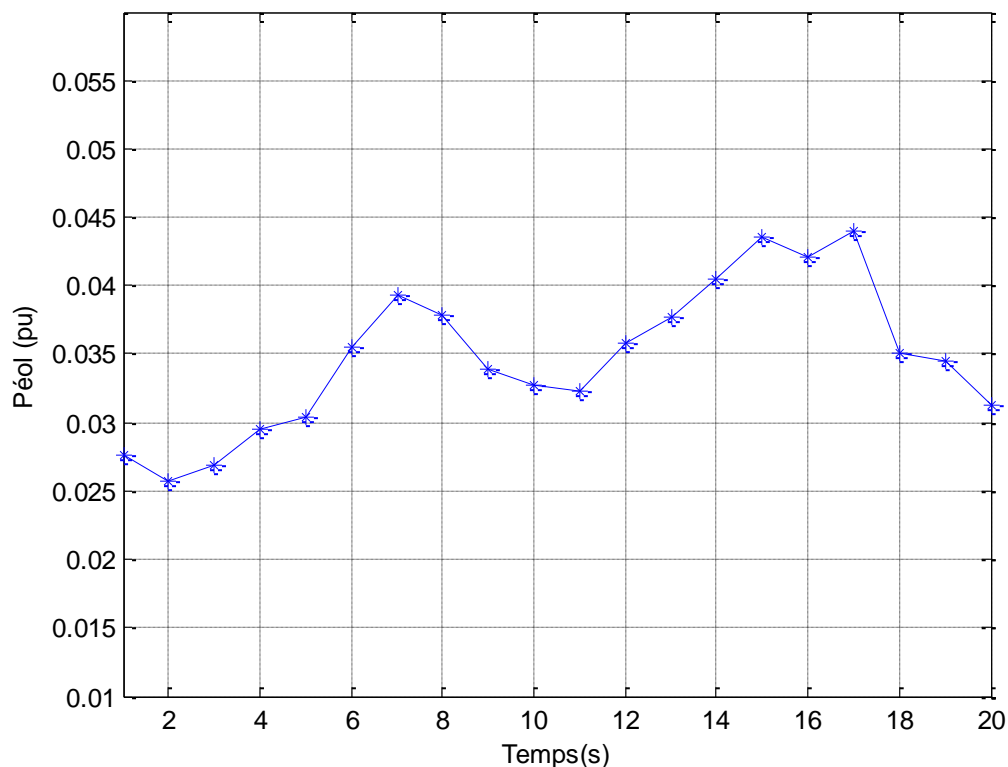
Les figures (IV.2) et (IV.3) représentent l'allure de la tension au niveau des différents jeux de barres du réseau, ainsi qu'aux jeux de barres 4, 17, 20, 22, 24 et 25 choisis dans le but de les comparer avec celles que nous allons trouver lors de l'utilisation de l'éolienne.

Les figures (IV.4), (IV.5) et (IV.6), illustrent à leurs tours respectivement les chutes de tension et les pertes de puissance active et réactive dans les lignes.

#### IV.3.2 Etats du réseau avec insertion du générateur éolien

Vu l'importance de la chute de tension constatée au nœud de charge 24, une ferme éolienne est connectée à ce niveau, cette dernière va générer au réseau une puissance  $P_{éol}$  à un taux d'intégration variant entre 30% et 50% de la puissance totale demandée.

La puissance de la ferme éolienne représentée sur la figure IV.7 est choisie de forme fluctuante afin d'illustrer son influence sur les grandeurs du réseau, (tension et puissance).



**Fig. IV.7 :** Allure de la puissance générée par le générateur éolien

Les résultats obtenus sont représentés sur les figures (IV.8 à IV.13).

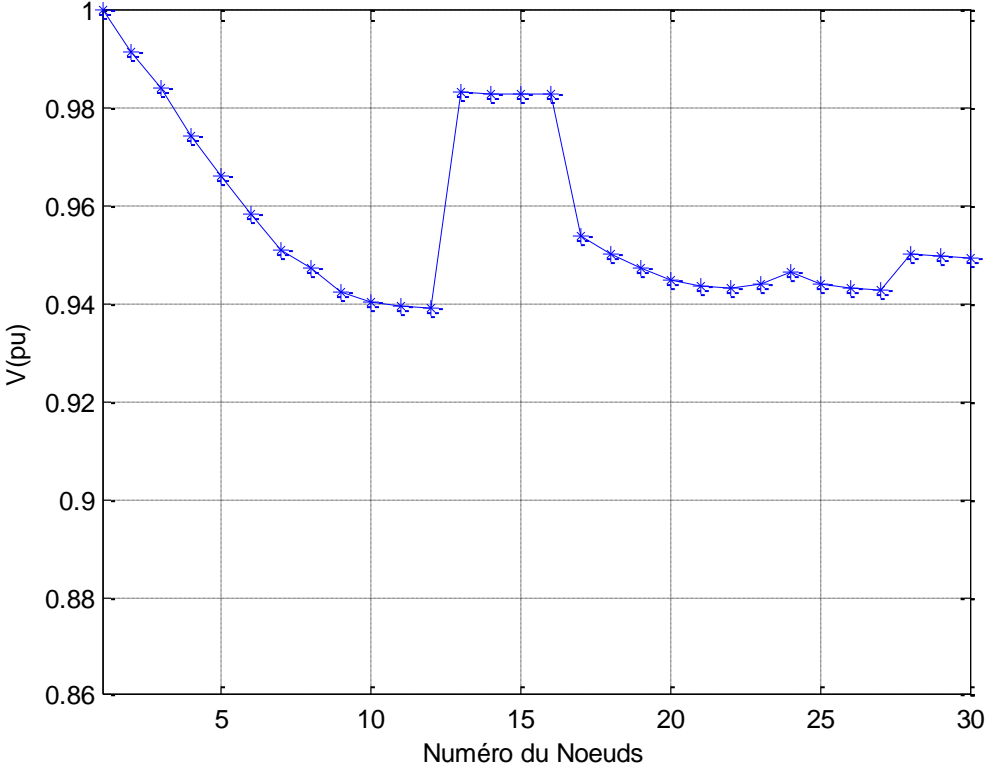


Fig. IV.8 : Tension aux nœuds à 30% d'intégration de la puissance éolienne

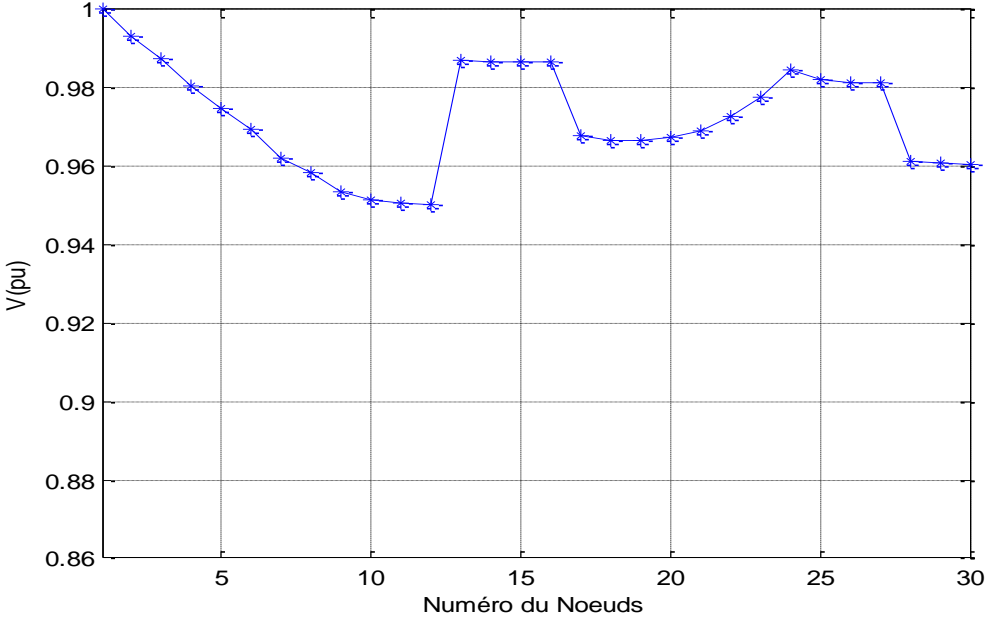


Fig. IV.9 : Tension aux nœuds à 50% d'intégration de la puissance éolienne

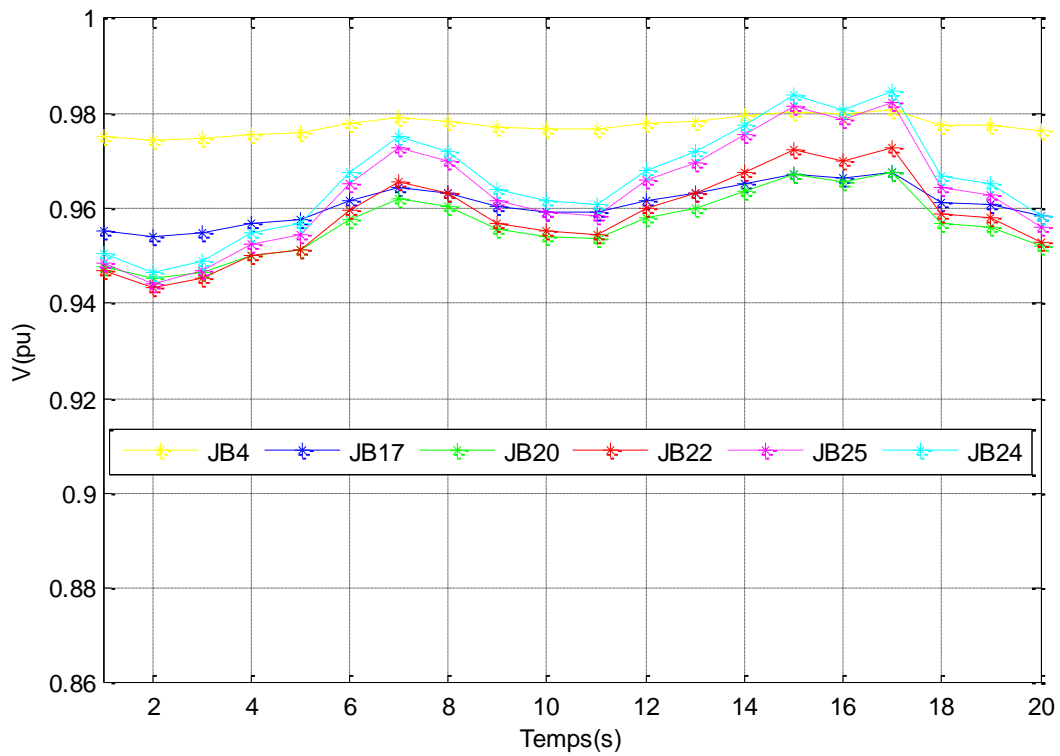


Fig. IV.10: Tension aux nœuds (4, 17, 20, 22, 24, 25), après insertion du générateur éolien

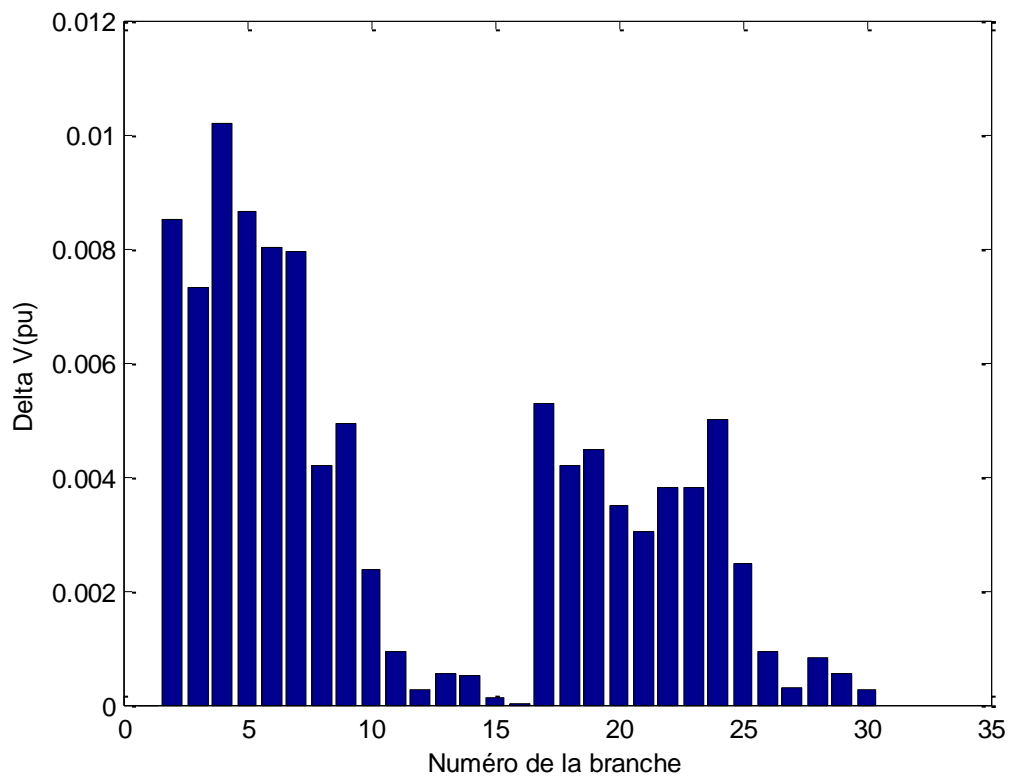


Fig IV.11 : Chutes de tension dans les lignes après insertion du générateur éolien

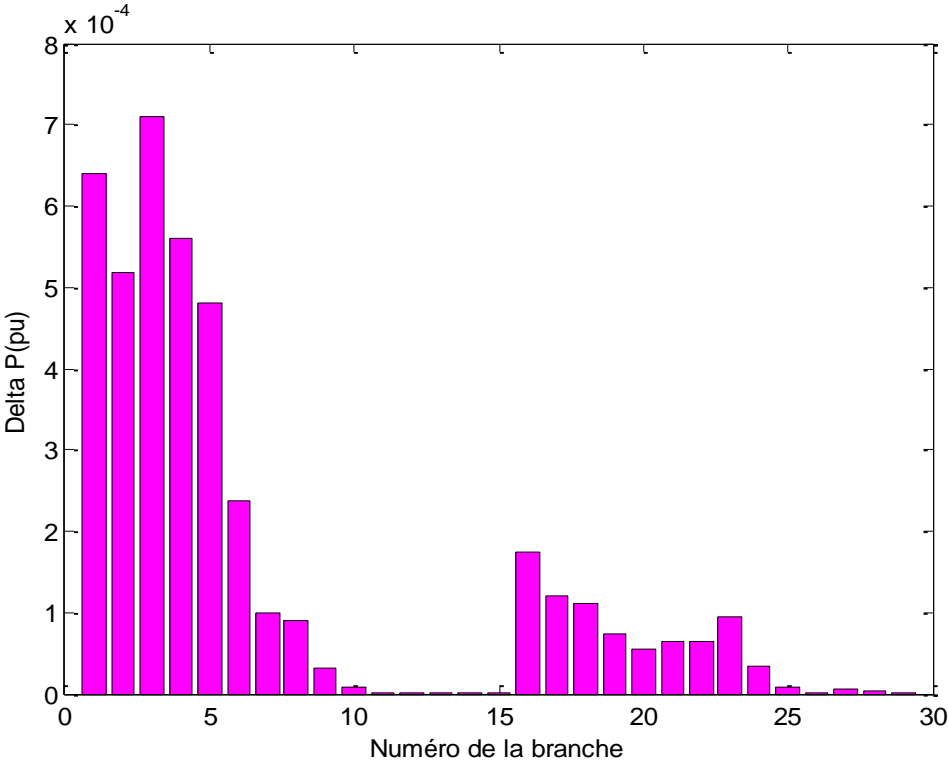


Fig. IV.12 : Pertes de puissance active dans les lignes après insertion du générateur éolien

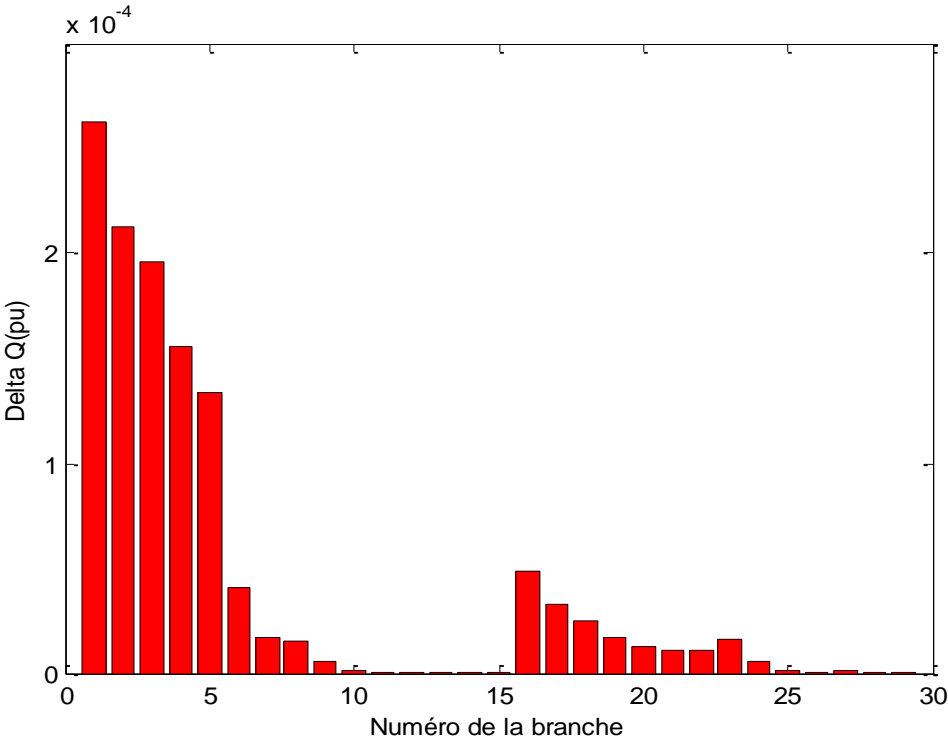


Fig. IV.13: Pertes de puissance réactive dans les lignes après insertion du générateur éolien



### **Interprétation**

Les figures (IV.3 et IV.10), montrent l'évolution des tensions, avant et après insertion du générateur éolien au niveau des jeux de barres (4, 17, 20, 22, 24, 25).

On remarque une importante amélioration du niveau de tension au point de connexion de 0.88 (p.u) à 0.98 (p.u), mais d'une forme fluctuante autour de 0.965 (p.u), qui est du à la variation de la puissance éolienne ' $P_{éol}$ ' injectée. Pour les jeux de barres les plus proches du nœud de connexion, on remarque aussi que leurs tensions est considérablement touchées par cette fluctuation par rapport aux autres, les plus loin.

Les deux figure (IV.4 et IV.11), montrent l'évolution des chutes de tension, avant et après insertion du générateur éolien au jeux de barre 24. On constate une diminution remarquable de la chute de tension au point de connexion, ainsi qu'aux nœuds les plus proches.

En comparant la figure (IV.5) avec (IV.12), et la figure (IV.6) avec (IV.13), on observe clairement une diminution remarquable des pertes de puissances active et réactive avant et après l'insertion du générateur éolien.

En se confiant aux résultats obtenus, où on remarque que les pertes totales de la puissance active passe de 0.0087 (p.u) à 0.0044 (p.u), alors on peut dire qu'avec cette intégration on augmente la puissance transitée vers les consommateurs et par conséquence on réalise un soulagement de la source.

#### **IV.3.3 Etude de l'état du réseau avec insertion du générateur éolien et compensation**

Malgré l'amélioration de l'amplitude des tension aux nœuds de connexion et voisins au nœud 24 mais, elle est de forme fluctuante, sur-ce une compensation est envisagée afin de réguler la tension.

Le but de la compensation dans cette partie est de calculer l'énergie réactive nécessaire pour réguler la tension à une valeur de référence fixée à 0.965 p.u (qui est la valeur autour de laquelle la tension au nœud 24 fluctue).

Les résultats obtenues sont représentés sur les figures (IV.14 à IV.17).

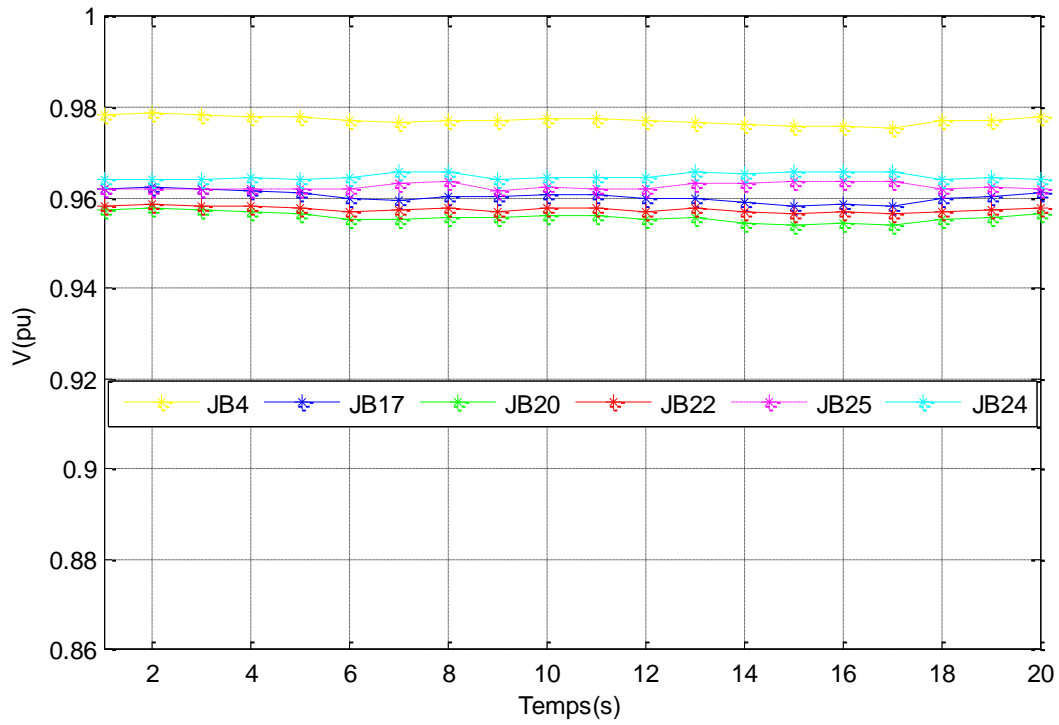


Fig. IV.14: Tension aux nœuds (4, 17, 20, 22, 24, 25) après compensation

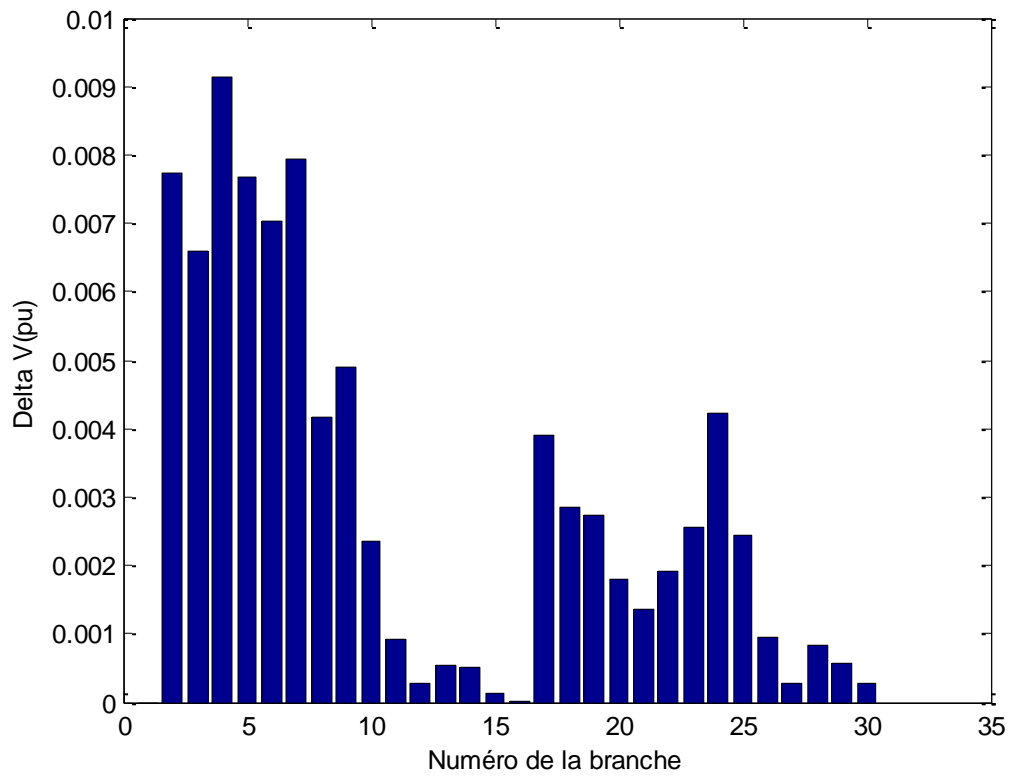


Fig. IV.15 : Chutes de tension dans les branche après compensation

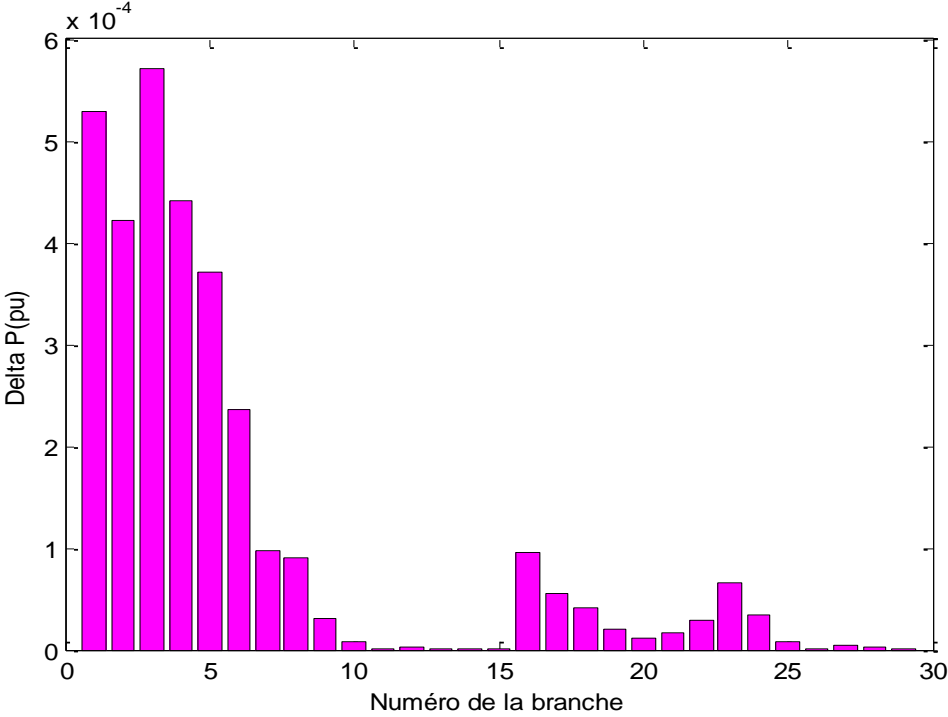


Fig. IV.16 : Pertes de puissance active dans les lignes après compensation

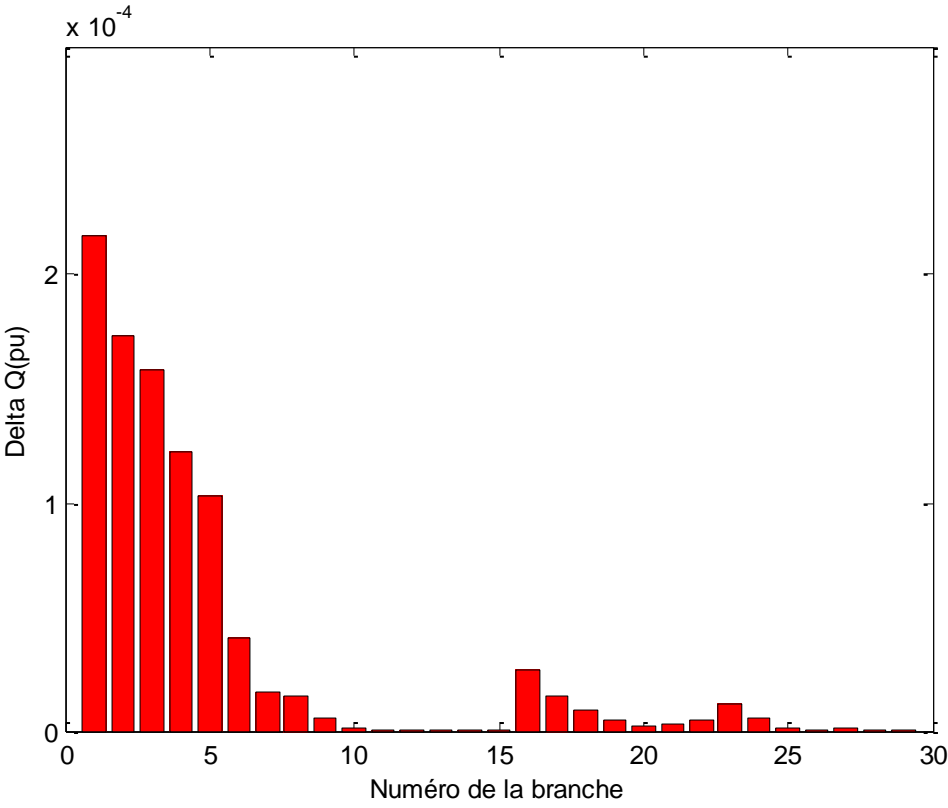


Fig. IV.17: Pertes de puissance réactive dans les lignes après compensation

## **Interprétation**

La figure (IV.14) illustre l'évolution de la tension aux nœuds (4, 17, 20, 22, 24, 25) après compensation, et les figures (IV.15), (IV. 16) et (IV.17) montrent les différentes chutes de tension, pertes de puissances active et réactive sur tout le long du réseau étudié.

Les résultats montrent un profil de tension meilleur au nœud de connexion, ainsi qu'aux nœuds les plus proches, où la tension au JB 24 devient quasiment stable à 0.965 (p.u), avec une erreur statique de l'ordre de 0.1%.

Ce résultat est obtenu grâce à l'action de la compensation qui arrive dans un premier temps à absorber de la puissance réactive aux points où la tension dépasse les 0.965 (p.u), qui est choisie comme tension de référence, comportement inductif, et dans un deuxième temps à fournir de la puissance réactive aux points où la tension n'atteint pas les 0.965 (p.u), comportement capacitif.

## **IV.4 Conclusion**

L'objectif de ce chapitre est de calculer, en premier temps, l'écoulement de puissance dans un réseau de distribution radial à 30 jbs avec la méthode « Progressive- Régressives » afin d'évaluer les paramètres du réseau (tension, puissances), et par la suite étudier son comportement vis-à-vis d'une intégration d'un générateur éolien sur le plan de tension et les puissances transitées.

Nous avons remarqué que cette insertion nuit surtout la tension au nœud de connexion, et afin d'alléger ces nuisances, on a suggéré une compensation afin d'améliorer le profil de la tension.

Les résultats obtenus sont très satisfaisants, ce qui nous laisse à conclure que l'énergie éolienne est une énergie prometteuse, mais au moins il est nécessaire de mieux la contrôler.

## **Conclusion générale et perspectives**

Les réseaux de distribution sont aujourd'hui à l'aube d'une révolution technologique et économique. Ces dernières années, l'arrivée à maturité du système électrique en termes de croissance ainsi que le fort développement des technologies de l'information constituent les deux déclencheurs principaux des changements majeurs survenant dans le système électrique, notamment dans les réseaux de distribution.

Un des aspects de cette révolution est l'arrivée des productions décentralisées dans les réseaux de distribution. Mais en moins une insertion massive de ces énergies à production décentralisées est porteurs de plusieurs impacts néfastes sur la sûreté de fonctionnement et la qualité de l'énergie fournie. Car elle arrive à influencer sur le comportement des systèmes de puissance par interaction avec la production conventionnelle et les charges. L'énergie éolienne injectée au réseau est purement active et ne fournit pas de puissance réactive qui est nécessaire au maintien du profil de tension dans les plages normatives. Ceci mène à penser à des solutions adéquates au problème de réglage de tension. L'étude menée dans notre travail a abouti à la proposition d'une solution au problème de tension sur les réseaux de distribution, lié à l'impact de la connexion des générateurs éoliens.

On a tout d'abord exposé, dans le premier chapitre, les différentes topologies du réseau de distribution électrique, et comme on a présenté le but et le procédé du calcul de l'écoulement de puissance en générale.

La présentation de trois méthodes différentes qui traitent l'écoulement de puissance dans un réseau de distribution radial a fait l'objet du deuxième chapitre, et ça nous a permis de dégager un modèle mathématique qui nous a permis de traiter le problème lié au calcul de la répartition de puissances. Il s'avère que ces derniers sont très efficaces et elles répondent d'une manière très satisfaisante, lors du traitement de la problématique dans les réseaux de distribution radial.

Dans le troisième chapitre, on a abordé les moyens de production d'énergie électrique à base de sources renouvelables. On a pu constater que le réseau de distribution, de par sa structure et les réglages existants, n'est pas dimensionné pour l'accueil de production décentralisée à grande échelle. L'impact de cette production sur le réseau induit des problèmes, non seulement sur le sens de transit de puissance, mais aussi sur la tenue de tension ou des surtensions qui, en fonction des états de charge du réseau, peuvent entraîner un

## Conclusion générale

non respect des valeurs de tensions maximale et minimale admissibles. Dans ce sens on a établi aussi, une brève étude sur les méthodes et moyens de régulation de la tension. On a pu constater que les systèmes d'électronique de puissance sont applicable dans de vaste domaine, vu que ces dispositifs offrent une possibilité de réglage de tension plus flexible.

Enfin, au quatrième chapitre un ensemble de simulations numériques du fonctionnement d'un réseau radial à 30 jbs, sans et avec production décentralisée a été réalisé afin d'évaluer l'impact de l'intégration d'un générateur éolien dans un réseau de distribution sur le profil de la tension et les puissances transportées. Afin d'alléger ces nuisances, on a suggéré d'incorporer une compensation qui a assuré le contrôle de la puissance réactive par son injection ou son absorption et améliorer ainsi le profil de la tension.

Cependant, notre étude reste modeste et d'autres recherches doivent être explorées concernant la problématique étudiée. Il ressort donc de ce travail de nouvelles perspectives. Le modèle du réseau étudié, pourrait être développé comme prendre un nombre important des jeux de barres, et une topologie un peu plus complexe. Étude de l'impact des autres dispositifs de compensation sur les réseaux d'énergie électrique.

## Bibliographie

## Bibliographie

- [01] C. Puret, « Les réseaux de distribution publique MT dans le monde », CT No 155, édition septembre 1991
  
- [02] K. Singh, “FAST DECOUPLED POWER FLOW FOR UNBALANCED RADIAL DISTRIBUTION SYSTEM”, award of degree of master of engineering, Thapar University, Patiala, juin 2009
  
- [3] <https://fr.wikipedia.org>, 2016
  
- [04] N.AOUZELLAG ‘Contribution à l’Amélioration de la Flexibilité dans les Réseaux Electriques liée à l’Intégration des Générateurs Eoliens’, Thèse de doctorat d’état soutenue 2011, Bejaia
  
- [05] M.Crappe, « Commande et régulation des réseaux électriques », Hermès Science, Paris 2003
  
- [06] Jacques .C, Guillaume de Preville, Jean-Louis Sanhet, « Fluctuations de tension et flicker - Évaluation et atténuation (partie I et II) » Techniques de l’ingénieur D 4316, édition 10 févr. 2002.
  
- [07] H. Kouara, « Application d’un filtre actif série au contrôle de la tension d’un réseau basse tension », mémoire de magister, université de Batna 28/02/2006.
  
- [08] H.Akagi, Y.Kanazawa and A.Nabae, “Instantaneous reactive power compensators Comprising switching devices without energy storage components”, IEEE transaction on Industry Application, vol.Ia-20, N°3, May/Jaune 1984.
  
- [09] P.FERRACCI, «La qualité de l’énergie électrique», Cahier technique No 199, édition octobre 2001

## Bibliographie

- [10] P. Sarrand et J.Verseille : « Compensation de l'énergie réactive et tenue de tension dans les réseaux publics », Technique de l'ingénieur, D 4305, édition 10 juin 1986
- [11] L.Benasla, ' Compensation statique : Approche shunt et Approche série', mémoire de Magister, USTO, juillet 1999
- [12] M. Rahli, « Contribution à l'étude de la répartition optimale des puissances dans un réseau d'énergie électrique par la programmation linéaire et non linéaire », Thèse de doctorat d'état soutenue le 07 janvier 1996, USTO-MB, Oran.
- [13] K. CHIKHI, « *Etude des phénomènes transitoires et optimisation dans les réseaux électriques* », Thèse de doctorat d'Etat soutenue le 14 novembre 2007, Université de Batna
- [14] S. ZAHIRA, « optimisation de l'écoulement de puissances dans un système d'énergie électrique par la méthode du point intérieur », mémoire de Magister, 2009
- [15] R. M.CRICI, A. P. FELTRIN & L. F. OCHOA.  
« Power flow in four wire distribution networks, general approach », IEEE Transaction on power systems, Vol. 18, No. 4, pp. 1283-1290, November 2003.
- [16] 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.
- [17] Ulas 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.
- [18] DHARMA SA,  
«Power Flow Analysis For Radial and Weakly Meshed Electrical Distribution Networks», Research and development cell jawaharlal nehru technological university hyd. kukatpally, hyderabad – 500 085 (ap) india, July, 2010.
- [19] [https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie\\_renouvelable](https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_renouvelable) le 18/06 /2016
- [20] Boris Berseneff, réglage de la tension dans les réseaux de distribution du futur, institut polytechnique de Grenoble, dec 2010



## Bibliographie

- [21] [https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie\\_non\\_renouvelable](https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_non_renouvelable) le 18/06/06
- [22] JF.Canard, «Impact de la génération d'énergie dispersée dans les réseaux de distribution », thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 2000
- [23] R.Caire, « Gestion de la production décentralisée dans les réseaux de distribution », thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 2004
- [24] N. Laverdure, « l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faible ou insulaires », thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 2005
- [25] Arnaud DAVIGNY, «Participation aux services système de fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie », thèse de doctorat de l'Université des Sciences et Technologie de lille, Décembre 2007.
- [26] **O. AREZKI, A. AHMANE**, « Analyse de la stabilité de la tension en présence des compensateurs FACTS », Mémoire de fin d'étude Ingénieur d'état, Université A.MIRA de Bejaïa, Juin 2007.
- [27] **E. LE PELLETER**, « Outil d'électronique de puissance pour le maillage /bouclage des réseaux de distribution : Application au contrôle des flux de puissance et la limitation des courants de court-circuit », Thèse de doctorat de l'INPG, 26 octobre 2007.
- [28] **H. Rachida**, « Contrôle des Puissances Réactives et des Tensions par les Dispositifs FACTS dans un Réseau Electrique », Mémoire de Magister, Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technologique d'Oran, 2008-2009.
- [29] R.Mohan MATHUR, Ontario power generation, Toronto, ON, Canada, RAJIV K. VARMA, Indian Institute of technology Kanpur, India, Thyristor-based Facts controllers for electrical transmission systems, IEEE press series on power engineering, Wiley-Interscience, 2002

## **Bibliographie**

- [30] **A. ALIBI**, « Contrôle des Réseaux Electriques par les Systèmes FACTS: (Flexible AC Transmission Systems) », Mémoire de Magister, Université Hadj lakhder de Batna, 2009.
- [31] **F. KOUADRA**, « Etude des variations rapides de tension pour le raccordement d'une production décentralisée dans un réseau MT », Mémoire de Magister, Université MENTOURI de Constantine.