

Université A.MIRA de Bejaia



Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

Mémoire

En vue d'obtention du diplôme Master

En Electrotechnique

Option : Réseaux Electriques

**CALCUL DE L'ECOULEMENT DE PUISSANCE DANS UN RESEAU DE
DISTRIBUTION RADIAL AVEC INSERTION
D'UN GENERATEUR EOLIEN**

Réalisé par :

- Mr SAADI Ferhat
- Mr TENBOUKTI Hanafi

Encadré par :

- M^{me} AOUZELLAG Narimen
- M^{me} CHEKKAL Samira

Remerciements

En premier lieu, nous remercions Dieu qui nous a procuré
de la patience et du courage afin d'achever
ce travail et d'atteindre cette réussite.

Nous remercions Madame AOUZELLAG, notre promotrice
et Madame CHEKKAL, notre co-promotrice ,
de nous avoir proposé ce sujet et d'avoir dirigé ce travail
et pour leurs remarques constructives.

Nous exprimons notre gratitude aux membres de jury
d'avoir consacré une partie de leur temps
pour juger ce modeste travail.

Nos remerciements les plus vifs vont tout
particulièrement à nos parents
ainsi qu'à tous ceux et celles qui ont participé de près et de
loin à la réalisation de ce travail.

.

Dédicace

Je tiens à dédier ce modeste travail à :

Ma très chère mère et mon cher père Ali, qui
n'ont pas cessé de m'encourager, de me soutenir
dans les moments difficiles et qui ont su m'entourer
de toute leur affection et leur amour pour que je
puisse réussir. Que Dieu les protège.

A mes chers grands parents

A mes chères sœurs

A mes chers frères Mourad, Riad et Hamza

Au petit Nabyle.

A mon binôme Hanafi ainsi qu'à tous ses proches

A tous mes amis et ceux qui' m'ont soutenu durant

Mon cursus universitaire.

A tous mes proches et les élèves de ma promotion.

Ferhat SAADI

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail à mes défunttes mère et sœur, Houria et Nedjima, à qui je souhaite une place au paradis, mon père auquel je souhaite une longue vie. A Mes frères : Djilali, Bermtan, abed Elghani, Teyeb, Ahmed, Walid. Et à mes chères sœurs et leurs maris : Rebiha, Dalila, Ouahiba, Amel et ma petite sœur Nadira.

Je le dédie à ma chère Faiza, ainsi qu'à mon meilleur amie et ma sœur Lisa et tous mes amis : Abdou, Nabil, Khaled, Ferhat, Bachir, Kamal.

Je tiens à remercier particulièrement les membres de la famille ZEROUROU, pour leur hospitalité et leur gentillesse.

Je tiens à remercier aussi mon binôme SAADI Ferhat pour sa patience ainsi que toute sa famille..

TENBOUKTI Hanafi

Chapitre I : Généralités sur les réseaux électriques

Introduction	2
I .1. Structure des réseaux électriques	2
I.1 Réseau de transport THT ($U > 220$ kV, $S > 300$ MVA).....	3
I.2 Réseau de répartition HT et THT (60/220 kV)	4
I.3 Réseau de distribution MT (30kV)	4
I.4 Réseau de livraison BT (400V).....	4
I.2 Architecture des réseaux électriques.....	5
I.2.1 Réseau maillé/bouclé	5
I.2.1.1 Avantages.....	5
I.2.1.2 Inconvénients	5
I.2.2 Réseau Radial/arborescent	6
I.2.2.1 Avantages.....	6
I.2.2.2 Inconvénients	6
I.3 Calcul de l'écoulement de puissance dans un réseau électrique	7
I.3.1 Le but de l'écoulement de puissance	7
I.3.2 Classification des jeux de barres	7
I.3.3 Equations d'écoulement de puissance.....	9
I.3.3.1 Formation de la matrice admittance.....	9
I.3.3.2 Formulation des équations de tension.....	10
I.3.3.3 Formulation des équations d'écoulement de puissance	11
I.3.3.4 Formulation de l'équation des pertes en puissance active	12
I.3.3.5 Formulation de l'équation des pertes en puissance réactive	12
I.4 La production décentralisée	13
I.4.1 Impact de l'intégration de la PD dans le réseau de distribution.....	13
I.4.1.1 Effet due au changement du sens de transit de puissances	14
I.4.1.2 Plans de protections	14
I.4.1.3 Compatibilité avec le réseau	14
I.4.1.4 Qualité de la tension.....	14
I.4.1.5 Problèmes de gestion et de prévision.....	14
I.4.2 Contraintes mécaniques	14
I.4.3 Contraintes électriques.....	14
I.4.4 Solutions proposées pour améliorer la qualité de l'énergie extraite de la PD	15
I.4.4.1 Les systèmes FACTS les plus utilisés	15

SOMMAIRE

I.4.4.2 Les Filtres.....	16
I.4.4.3 La régulation floue	16
Conclusion.....	18
Chapitre II: Méthodes simples pour le calcul de l'écoulement de puissance dans un réseau de distribution radial	
Introduction	20
II.1 Méthode simple pour le calcul de l'écoulement de puissances avec des charges variables	20
II.1.1 Approche Mathématique	20
II.1.2 Algorithme de Résolution.....	24
II.2 Méthode simple et directe pour les calculs dans les réseaux de distribution ...	25
II.2.1 Développement mathématique	25
II.2-1.1 Cas générale	25
II.2.1.2 Cas de liaisons sous-terraines	27
II.2.1.3. présence de condensateurs ou de bobines.....	28
II.2.1.4. cas de neud generateur (Ou neoud PV)	28
II.2.2 Algorithme de résolution	29
II.3 Méthode matricielle pour la résolution des équations d'écoulement de puissance en réseau radial	29
II.3.1 Détermination de la valeur du courant dans chaque branche	30
II.3.2 Détermination l'amplitude de la tension ainsi que son déphasage à chaque neud	32
II.3.3 Algorithme de la méthode	34
II.4 Calcul de l'écoulement de puissance dans un réseau de distribution radiale en utilisant une structure linéaire de données	35
II.4.1 Approche mathématique	35
II.4.2 Algorithme de résolution	37
Conclusion.....	38

SOMMAIRE

Chapitre III: Calcul de l'écoulement de puissance : Résultats et Discussions

Introduction :	39
III.1. Etat initial du réseau	40
III.1.1 Discussion des résultats.....	41
III.2 Etat du réseau avec insertion d'un générateur éolien	42
III.2.1 Discussion des résultats.....	44
III.3 Régulation de la tension	45
III.3.1 Discussion des résultats.....	49
III.4.1 Discussion des résultats.....	52
Conclusion.....	53

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 Propriétés des Nœuds.....	08
Tableau III.1 Solution de l'écoulement de puissance.....	40
Tableau III.2 Somme des pertes actives et réactives dans les trois cas.....	48
Tableau III.3 Chute de tension avant et après compensation	48

Liste des Figures

Chapitre I

Fig.I.1 Structure générale d'un réseau électrique	03
Fig.I.2 les différentes structures des réseaux électriques.....	06
Fig.I.3 Réseau électrique avec trois nœuds.....	08
Fig.I.4 Exemple d'un réseau bouclé.....	09
Fig.I.5 : Schéma général d'un contrôleur flou.....	18

Chapitre II

Fig. II.1 exemple d'une branche en Π	21
Fig. II.2 Exemple d'une branche.....	25
Fig II.3 exemple d'une branche sous-terrain en Π	27
Fig. II.3 réseau radial.....	30
Fig. II.4 Exemple d'une branche en réseau radial.....	35

Chapitre III

Fig.III.1 Réseau de distribution radial à 10 jeux de barres.....	39
Fig.III.2 Tensions initiales dans le réseau.....	40
Fig.III.3 Les pertes de puissance active et réactive sans éolienne.....	41
Fig.III.4 Chutes de tension dans les branches.....	41
Fig.III.5 Courbe des puissances actives injectées par l'éolienne.....	42
Fig.III.6 Tensions initiales aux jdb 10,8 5 et 2 avant insertion du générateur éolien....	43
Fig.III.7 Tensions aux jdb 10,8 5 et 2 après insertion de l'éolienne.....	43
Fig.III.8 Pertes de puissance active et réactive après insertion de l'éolienne.....	43

Liste des Figures

Fig.III.9	Chutes de tension après insertion de l'éolienne.....	44
Fig.III.10	Courants actifs et réactif avant et après insertion de l'éolienne.....	45
Fig.III.11	Schéma du réseau avec éolienne et compensateur.....	46
Fig.III.12	Tensions avec compensation aux jdb 10, 8, 5 et 2.....	46
Fig.III.13	Pertes de puissance active et réactive après compensation.....	47
Fig.III.14	Chutes de tension après compensation.....	47
Fig.III.15	Courbe de la puissance réactive fournie/consommée par le compensateur...	48
Fig. III.16	Schéma global du réseau étudié.....	50
Fig. III.17	Tension initiale au jdb 10.....	51
Fig.III.18	Tension au jdb 10 avec éolienne.....	51
Fig.III.19	Tension avec compensation au jdb 10.....	51
Fig.III.20	Puissance réactives échangée avec le réseau.....	52

Liste des Figures

Liste des Indices

P_g	Puissances active générée.
Q_g	Puissance réactive générée.
P_c	Puissance active des charges.
Q_c	Puissance réactive des charges.
P_p	Perte de puissance active dans les lignes.
Q_p	Pertes de puissance réactive dans les lignes.
I_{bus}	Vecteur des courants injectés.
V_{bus}	Vecteur des tensions.
Y_{bus}	Matrice admittance
$P_{loss\ ik}$	Pertes de puissance active dans la branche ik.
$Q_{loss\ ik}$	Pertes de puissance réactive dans la branche ik
P	Puissance active transportée par la ligne.
Q	Puissance réactive transportée par la ligne.
V_s	Tension à la source.
V_r	Tension à la charge.
δ_s	Déphasage de la tension V_s .
δ_r	Déphasage de la tension V_r .
R	Résistance de la ligne.
X	Inductance de la ligne.
Y	Admittance de la ligne.
Z	Impédance de la ligne.
θ_z	Déphasage de la ligne.
δ_A	Déphasage du paramètre A de la ligne.
np	Paramètre variable suivant le type de charges.
nq	Paramètre variable suivant le type de charges.
P_0	Puissance active nominale de la charge.
Q_0	Puissance réactive nominale de la charge.
V_0	Tension nominale des charges.
S_k	Puissance apparente au nœud k.

Liste des Indices

V_k	Tension au nœud K.
e_i	Partie réelle de la tension V_i .
f_i	Partie imaginaire de la tension V_i .
$I_{L(K)}$	Courant de charge au nœud K.
$P_{L(K)}$	Puissance active de la charge au nœud K.
$Q_{L(K)}$	Puissance réactive de la charge au nœud K.
$V_{(K)}$	Tension au nœud K.
I_{jj}	Courant dans la branche jj.
I_{LK}	Courant dans la charge connectée au nœud K.
nb_{jj}	Nombre de nœuds qui se situent après la branche.
N_i	Numéro du nœud.
j	Numéro de branche.
$V_{(i)}$	Tension au nœud i .
θ_{vi}	Déphasage de la Tension au nœud i.
$I_{br(j)}$	Courant dans la branche j.
S_i	La puissance apparente de la charge i.
P_i	Puissance active de la charge i.
Q_i	Puissance réactive de la charge i.
$(LI)_i^*$	Le conjugué du courant de la charge i.
θ_i	Le déphasage du courant de la charge i.
LP_j	Pertes active dans la branche j.
LQ_j	Pertes réactive dans la branche j.
R_{brj}	Résistance de la branche j.
X_{brj}	Inductance de la branche j.

Liste des Indices

Introduction générale

Le problème majeur des gestionnaires des réseaux est de proposer une meilleure planification en vue d'une meilleure gestion du transit de puissance. Depuis les centres de production jusqu'au consommateur, les lignes de transport infligent de grandes pertes en énergie que ça soit active où réactive, beaucoup plus dans les réseaux de distribution où environs 14% de la puissance transitant par ces lignes est perdue.

L'ensemble de ces pertes influe sur la qualité de la tension délivrée aux clients. Pour cela plusieurs techniques correctives sont misent en service afin de contourner ce problème. Parmi ces solutions, on cite les productions décentralisées qui sont de plus en plus présentes sur le marché. Les techniques conventionnelles utilisées dans la production décentralisée offrent au réseau une meilleure qualité d'énergie, d'une autre part leur besoin en matière première ainsi que leur impacts sur l'environnement font d'elles des moyens de production indésirables, en plus de ça leur temps et coût de réalisation sont excessifs.

Pour cela la production décentralisée à base d'énergie renouvelable constitue une alternative prometteuse, son coût de réalisation et de maintenance est beaucoup moins élevés que celles citées auparavant, leur temps de réalisation est de loin plus court. En plus de ça, les énergies renouvelables sont non polluantes. Cependant, ce ne sont pas des solutions magiques, car leurs impacts sur le réseau et sur la qualité d'énergie imposent l'insertion de moyens de filtrage, de régulation et de compensation.

L'objet de notre mémoire est d'étudier le comportement d'un réseau de distribution radial, vis-à-vis d'une insertion d'une production décentralisée de type éolienne, ainsi que l'influence de cette dernière sur la qualité d'énergie. Notre travail est divisé en trois chapitres.

Le premier présente des généralités sur les réseaux électriques, ainsi que le développement mathématiques des équations de l'écoulement de puissance, et aussi les moyens principaux utilisés pour améliorer la qualité de l'énergie électrique.

Dans Le second chapitre, nous allons proposer quelques méthodes simples et directes sur le calcul de l'écoulement de puissance dans les réseaux de distribution radiaux.

Finalement, et comme troisième chapitre nous allons présenter et comparer les résultats de la méthode utilisée avec programmation et les résultats du Simulink sous MATLAB.

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LES RESEAUX
ELECTRIQUES

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons aborder quelques notions sur le réseau électrique, notamment les différentes architectures existantes pour le transport et la distribution. Par la suite, nous allons introduire la notion de l'écoulement de puissance ainsi que les solutions qui permettent de résoudre ces problèmes. Nous allons aussi parler de la production décentralisée, et de ses impacts sur le réseau de distribution, ainsi que les solutions qui l'accompagnent pour améliorer la qualité de l'énergie.

Parmi ces solutions, nous citerons brièvement les dispositifs FACTS et nous donnerons un aperçu sur le régulateur flou.

I.1. Structure des réseaux électriques

Un système électrique est un ensemble constitué d'unités de production, unités de consommation, de réseaux électriques et de centre de contrôle. Son exploitation est assurée par un Gestionnaire de réseau de transport 'GRT'. [1]

L'architecture d'un réseau électrique est plus ou moins complexe suivant le niveau de tension, la puissance demandée et la sûreté d'alimentation requise. Brièvement, le réseau électrique est subdivisé en deux catégories principales: les réseaux de transport/Répartition et les réseaux de Distribution/Livraison. [2]

Pour les niveaux de tension, il existe plusieurs classifications provenant des différentes organisations d'Electrotechnique qui s'occupe de maitre en œuvre les normes et les lois qui régissent le domaine du Génie électrique.

Les réseaux électriques sont hiérarchisés. La plupart des pays mettent en œuvre (selon CEI) : [3]

- | | | |
|--------------------------------------|-----|-----------------|
| ✓ Un réseau de transport | THT | 220.... 800 kV |
| ✓ Un réseau de répartition | HT | 60 170 kV |
| ✓ Un réseau de distribution | MT | 5 36 kV |
| ✓ Un réseau de livraison de l'abonné | BT | 400/230 V |

La nouvelle norme en vigueur en France UTE C18-510 définit les niveaux de tension alternative comme suit : [3]

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 500V et 1 kV

BTA → pour une tension composée comprise entre 50V et 500 V

TBT → pour une tension composée inférieure ou égale à 50V

Cette hiérarchie du réseau est montrée dans le schéma de la figure 1.

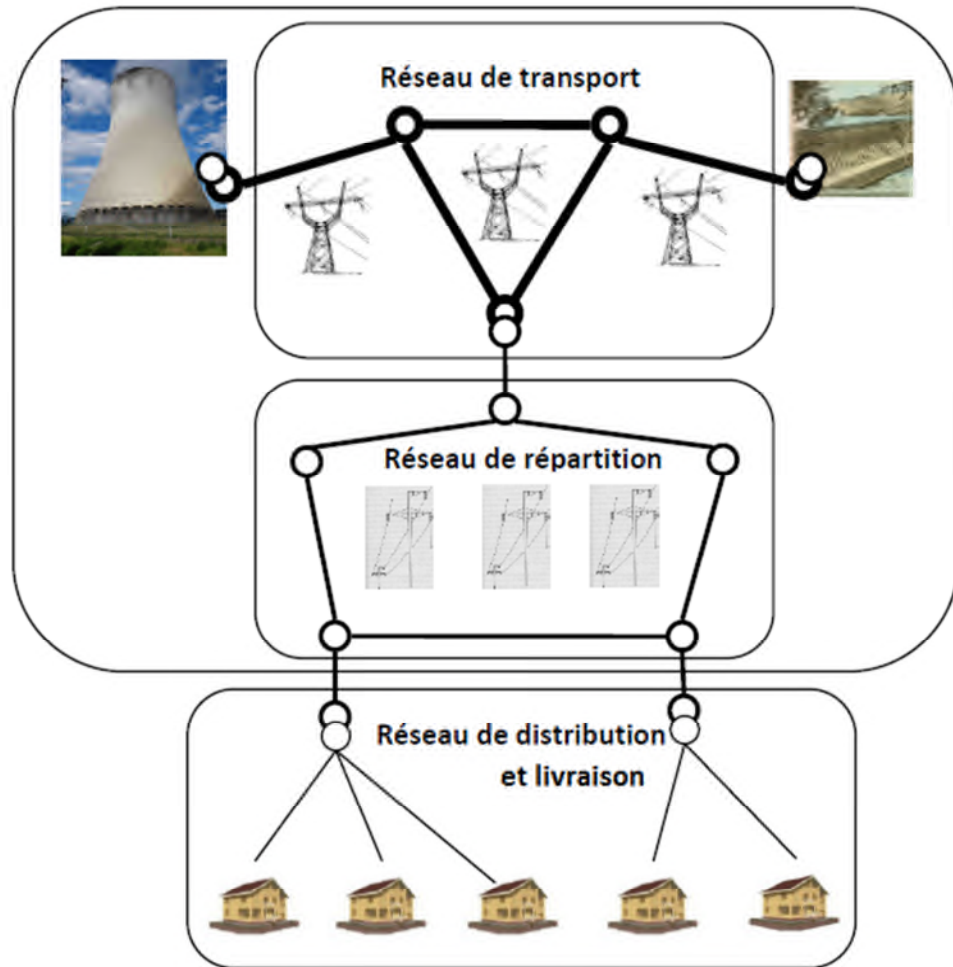


Fig.I.1 : Structure générale d'un réseau électrique

I.1 Réseau de transport THT ($U > 220$ kV, $S > 300$ MVA)

Le réseau de transport et d'interconnexion achemine en très haute tension de grandes quantités d'énergie ($S > 300$ MVA) sur de longues distances depuis des centrales de production vers le réseau de répartition. [3]

Les réseaux de transport constituent une vaste grille couvrant le territoire. Ces réseaux sont, pour la plupart, aériens. Ils sont étudiés pour un transit donné correspondant à la limite thermique de la ligne. [3]

Les protections de ces réseaux doivent être très performantes. Quant à leur exploitation, elle est assurée au niveau national par un centre de conduite ou de dispatching à partir duquel l'énergie électrique est surveillée et gérée en permanence. [1]

I.2 Réseau de répartition HT et THT (60/220 kV)

Les réseaux régionaux de répartition répartissent l'énergie au niveau des régions et alimentent les réseaux de distribution ainsi que les clients industriels importants ($S > 10\text{MVA}$) livrés directement en HT ou en THT, Il s'agit essentiellement d'industriels tels la sidérurgie, la cimenterie, la chimie, le transport ferroviaire...etc. [2]

Leur structure peut être soit aérienne ou souterraine à proximité des zones urbaines. Les protections sont de même nature que celles utilisées sur les réseaux de transport, sa gestion est prise en charge par les centres de conduite régionaux. [1]

I.3 Réseau de distribution MT (30kV)

La finalité du réseau de répartition s'achève avec un réseau de distribution en moyenne tension qui desservant le consommateur dans le domaine public et les petites et moyennes entreprises. [4]

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. Son exploitation est assurée par un centre de conduite local. [1]

I.4 Réseau de livraison BT (400V)

C'est le réseau qui nous est familier puisqu'il s'agit de la tension 400V/230V. La finalité de ce réseau est d'acheminer l'électricité du réseau de distribution MT aux points de faible consommation dans le domaine public avec l'accès aux abonnés BT. Il représente le dernier niveau dans une structure électrique. [2]

La puissance à ce niveau est acheminée avec deux topologies suivant la localisation des charges :

- Les réseaux urbains : la puissance transite par voie souterraine, ce type de réseau est caractérisé par une forte densité de charge, la topologie de ces réseaux sont réparties en trois groupes : les réseaux en dérivation multiples, les réseaux en coupure d'artère et les réseaux fortement bouclés. [2]

- Les réseaux ruraux : la puissance est acheminée par voie aérienne, ils sont caractérisés par une faible densité de charge et un faible maillage avec des boucles entre les postes sources. [2]

I.2 Architecture des réseaux électriques

Pour effectuer le transit des puissances depuis les centres de production vers les consommateurs de divers niveaux de tensions, on utilise différentes architectures et topologies des réseaux qui assurent ces tâches, ces architectures dépendent de plusieurs critères :

- Le niveau de fiabilité recherché.
- La flexibilité et la maintenance.
- Le coût d'investissement et d'exploitation.

Ces topologies sont classées comme suit :

I.2.1 Réseau maillé/bouclé

Il est souvent utilisé dans l'interconnexions des réseaux au niveau du transport et de la répartition, la topologie maillée consiste à créer plusieurs boucles ou liaisons entre les différents postes d'interconnexions à l'aide de lignes THT ce qui forme un maillage.

Les réseaux bouclés sont par contre utilisés pour des niveaux de tension moins élevés, HT ou MT. On les trouve dans les réseaux de répartition et de distribution.

Il faut noter que les réseaux MT ne sont pas forcément bouclés.

I.2.1.1 Avantages

Cette structure, grâce à ses multiples dérivations garantie une grande fiabilité, et une continuité de service. En cas de défaut sur l'une des lignes, ce genre de structure offre une grande sécurité d'alimentation.

Pour le réglage de fréquence et de tension, l'interconnexion offre une meilleure souplesse et minimise l'impact des surcharges sur une source donnée.

I.2.1.2 Inconvénients

Cette structure nécessite une protection très complexe et avancée ce qui rend le coût de réalisation très élevé. La complexité et l'étendue de sa structure la rend difficile à gérer et à assurer sa maintenance.

I.2.2 Réseau Radial/arborescent

Ce genre de topologie est principalement utilisé dans les réseaux MT et BT. Pour le radial, ça consiste à connecter deux postes sources MT ainsi, le flux de puissance n'a qu'un seul trajet possible à suivre.

Pour l'arborescent, il est constitué d'un poste de répartition qui alimente plusieurs postes de distribution BT grâce à des dérivations faites à différents niveaux des lignes alimentant les postes MT/BT.

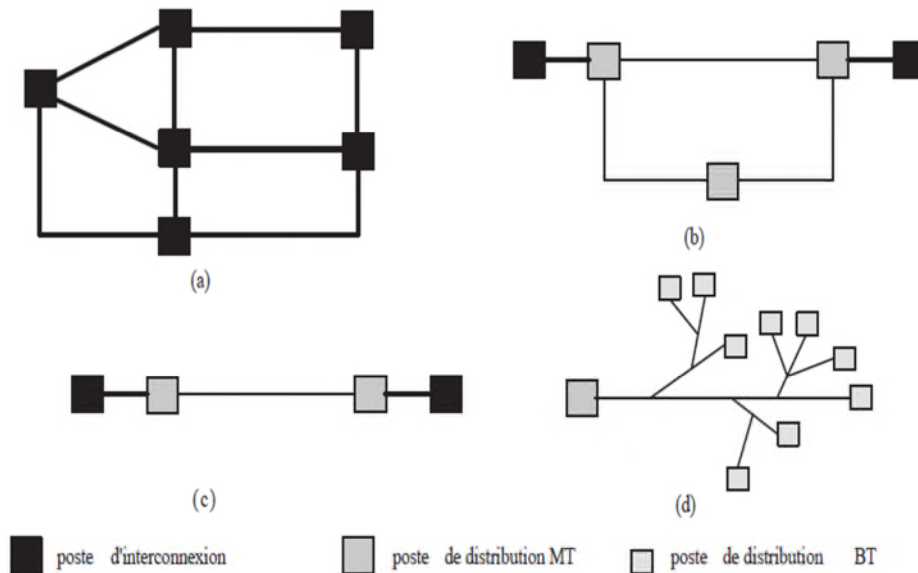
I.2.2.1 Avantages

Les dispositifs de protection dans ce type de topologie sont moins complexes que ceux utilisés dans le réseau maillé, ce qui rend sa maintenabilité plus facile et moins coûteuse. L'extension se fait facilement, il suffit d'un piquage sur la ligne principale.

D'un point de vue économique, le coût de sa réalisation est faible comparé à celui d'une structure maillée.

I.2.2.2 Inconvénients

L'inconvénient de cette réalisation est que lors d'un défaut, tout ce qui se trouve en aval du défaut serait isolé, donc il n'assure pas de continuité de service dans ce cas.



(a) Réseau maillé. (b) réseau bouclé. (c) réseau radial. (d) réseau arborescent

Fig.I.2 : les différentes structures du réseau électrique.

I.3 Calcul de l'écoulement de puissance dans un réseau électrique

I.3.1 Le but de l'écoulement de puissance

L'étude de l'écoulement de puissance ou de flux de puissance est une étape essentielle pour l'étude et la conception des réseaux électriques. Cette étude est nécessaire pour la planification, l'échange de puissance entre les centres de production et le dispatching économique. Elle est aussi essentielle pour l'évaluation de la stabilité transitoire, stabilité dynamique et l'estimation de l'état du réseau ainsi que la prise de mesure adéquate à d'éventuelle imprévue.

La planification d'une future extension pourrait se baser sur l'étude de l'écoulement de puissance dans ce réseau. [5]

I.3.2 Classification des jeux de barres

Dans le réseau électrique, les jeux de barres sont caractérisés par un ensemble de quatre variables; les puissances active et réactive P et Q , la tension V et son angle de phase δ , généralement, deux sont connues et les deux autres sont à déterminer.

Nous avons généralement à faire à trois types de nœuds : [5]

- **Nœud de charge**

C'est un jeu de barres où uniquement une ou plusieurs charges sont connectées. Dans ce jeu de barres les puissances active et réactive sont les deux variables connues, les deux autres sont à déterminer. [5]

- **Nœud Générateur**

Dans ces jeux de barres, les variables connues sont la puissance active et l'amplitude de la tension $|V|$, les deux autres sont aussi à déterminer. Dans ce nœud les limites de la puissance réactive sont spécifiées. [5]

- **Nœud Bilan**

Dans le réseau, l'écoulement de puissance nous impose des pertes dans les lignes, le bilan des puissances nous donne : [5]

$$\begin{cases} P_g - P_c - P_p = 0 \\ Q_g - Q_c - Q_p = 0 \end{cases} \quad (I.1)$$

P_g, Q_g : Puissances active et réactive générées.

P_c, Q_c : Puissances active et réactive des charges.

P_p, Q_p : Pertes de puissances active et réactive dans les lignes.

Ce nœud est aussi appelé nœud de référence, l'amplitude de la tension ainsi que son angle de phase sont imposées, ce dernier est choisi généralement égal à zéro. Tous les autres nœuds sont comparés à celui-ci pour déterminer leur angle de phase. En plus des puissances exigées par les charges il fournit une puissance qui sera perdue dans les lignes.

Nœud	Variables spécifiés	Variables à calculer
Nœud de charge	P et Q	Module de V et δ
Nœud générateur (Nœud à tension contrôlée)	Module de V et P	δ et Q
Nœud Bilan	Module de V et δ	P et Q

Tableau I.1 Propriétés des Nœuds

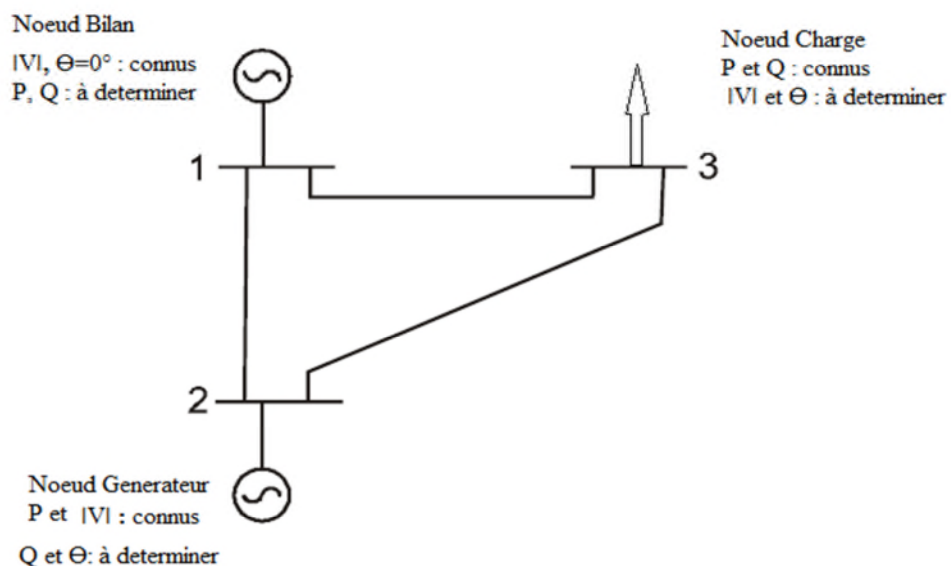


Fig.I.3 : Réseau électrique avec trois nœuds.

I.3.3 Equations d'écoulement de puissance

Les équations du réseau électrique peuvent être exprimées par plusieurs formes, néanmoins, la méthode des tensions nodales est la plus utilisée. Les équations des courants à chaque nœud nous donnent la matrice admittance, cette dernière est ensuite utilisée pour déterminer les tensions à différents jeux de barres sous forme d'équations non linéaires qui sont résolues avec plusieurs méthodes.

Les puissances active et réactive sont déduites depuis les résultats de tension obtenus.
[6]

I.3.3.1 Formation de la matrice admittance

Cette matrice est obtenue en utilisant les équations de courant obtenues dans les nœuds constituant le circuit du réseau comme suit : [6]

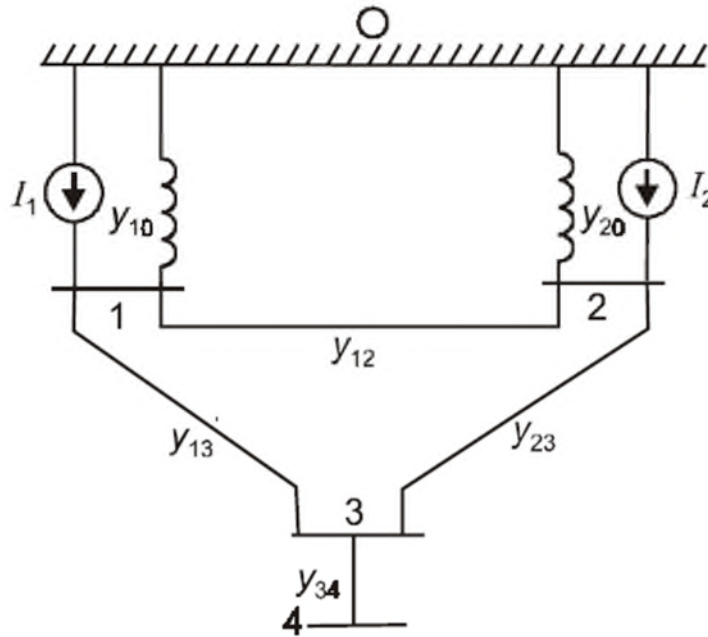


Fig.I.4 : Exemple d'un réseau bouclé.

- En appliquant le théorème de Kirchhoff dans les quatre jeux de barre, on obtient les équations suivantes :

$$\begin{cases} I_1 = Y_{10}V_1 + Y_{12}(V_1 - V_2) + Y_{13}(V_1 - V_3) \\ I_2 = Y_{20}V_2 + Y_{12}(V_2 - V_1) + Y_{23}(V_2 - V_3) \\ 0 = Y_{23}(V_3 - V_2) + Y_{12}(V_3 - V_1) + Y_{34}(V_3 - V_4) \\ 0 = Y_{34}(V_4 - V_3) \end{cases} \quad (I.2)$$

- En réarrangeant les équations précédentes, on obtient :

$$\begin{cases} I_1 = (Y_{10} + Y_{12} + Y_{13})V_1 + Y_{12}V_2 - Y_{13}V_3 \\ I_2 = -Y_{12}V_1 + (Y_{20} + Y_{12} + Y_{23})V_2 - Y_{23}V_3 \\ 0 = -Y_{13}V_3 - Y_{23}V_2 + (Y_{13} + Y_{23} + Y_{34})V_3 - Y_{34}V_4 \\ 0 = -Y_{34}V_3 + Y_{34}V_4 \end{cases} \quad (I.3)$$

Ainsi on obtient les éléments de la matrice admittance

$$Y_{11} = (y_{10} + y_{12} + y_{13})$$

$$Y_{22} = (y_{20} + y_{12} + y_{23})$$

$$Y_{33} = (y_{13} + y_{23} + y_{34})$$

$$Y_{44} = y_{34}$$

$$Y_{12} = Y_{21} = -y_{12}$$

$$Y_{13} = Y_{31} = -y_{13}$$

$$Y_{23} = Y_{32} = -y_{23}$$

$$Y_{34} = Y_{43} = -y_{34}$$

Les équations finales sont :

$$\begin{cases} I_1 = Y_{11}V_1 + Y_{12}V_2 + Y_{13}V_3 + Y_{14}V_4 \\ I_2 = Y_{21}V_1 + Y_{22}V_2 + Y_{23}V_3 + Y_{24}V_4 \\ I_3 = Y_{31}V_1 + Y_{32}V_2 + Y_{33}V_3 + Y_{34}V_4 \\ I_4 = Y_{41}V_1 + Y_{42}V_2 + Y_{43}V_3 + Y_{44}V_4 \end{cases} \quad (I.4)$$

Sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} \quad (I.5)$$

En général, on peut écrire :

$$I_{bus} = Y_{bus}V_{bus} \quad (I.6)$$

I_{bus} : Vecteur des courants injectés

V_{bus} : Vecteur des tensions

Y_{bus} : Matrice admittance

I.3.3.2 Formulation des équations de tension

D'après l'équation (I.6) :

$$I_i = Y_{ii} V_i + \sum_{k \neq i}^n Y_{ik} V_k \quad (I.7)$$

Et nous avons aussi :

$$P_i - jQ_i = V_i^* I_i \quad (I.8)$$

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad (I.9)$$

En remplaçant l'équation(I.7) dans (I.9) on obtient :

$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = Y_{ii} V_i + \sum_{k \neq i}^n Y_{ik} V_k \quad (I.10)$$

Alors :

$$Y_{ii} V_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} - \sum_{k \neq i}^n Y_{ik} V_k \quad (I.11)$$

Et finalement l'équation (I.11) s'écrira :

$$V_i = \frac{1}{Y_{ii}} \left[\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} - \sum_{k \neq i}^n Y_{ik} V_k \right] \quad (I.12)$$

I.3.3.3 Formulation des équations d'écoulement de puissance

Avec les mêmes étapes qu'avec les équations de tensions, on parvient aux équations des puissances actives et réactives comme suit : [6]

$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = Y_{ii} V_i + \sum_{k \neq i}^n Y_{ik} V_k \quad (I.13)$$

$$P_i - jQ_i = V_i^* \left[Y_{ii} V_i + \sum_{k \neq i}^n Y_{ik} V_k \right] \quad (I.14)$$

Où :

$$Y_{ii} = |Y_{ii}| e^{j\theta_{ii}}, \quad Y_{ik} = |Y_{ik}| e^{j\theta_{ik}}$$

$$V_i^* = |V_i| e^{-j\delta_i}, \quad V_k = |V_k| e^{j\delta_k}$$

$$V_i = |V_i| e^{j\delta_i}$$

Et donc nous aurons :

$$P_i - jQ_i = |V_i|^2 |Y_{ii}| \angle^{\theta_{ii}} + \sum_{k \neq i}^n |Y_{ik}| |V_i| |V_k| \angle^{\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i} \quad (I.15)$$

Et finalement :

$$P_i = \sum_{k=1}^n |V_i| |V_k| |Y_{ik}| \cos(\theta_{ik} - \delta_i + \delta_k) \quad (I.16)$$

$$Q_i = - \sum_{k=1}^n |V_i| |V_k| |Y_{ik}| \sin(\theta_{ik} - \delta_i + \delta_k) \quad (I.17)$$

I.3.3.4 Formulation de l'équation des pertes en puissance active

On a :

$$P_{Loss_{ik}} = P_{ik} + P_{ki} \quad (I.18)$$

Où :

$$P_{ki} = -|V_k|^2 |Y_{ik}| \cos \theta_{ik} + |V_i| |V_k| |Y_{ik}| \cos(\theta_{ik} - \delta_k + \delta_i) \quad (I.19)$$

$$P_{ik} = -|V_i|^2 |Y_{ik}| \cos \theta_{ik} + |V_i| |V_k| |Y_{ik}| \cos(\theta_{ik} - \delta_i + \delta_k) \quad (I.20)$$

Donc on aura

$$P_{Loss_{ik}} = [2|V_i| |V_k| \cos(\delta_i - \delta_k) - |V_i|^2 - |V_k|^2] |Y_{ik}| \cos \theta_{ik} \quad (I.21)$$

On a aussi

$$Y_{ik} = G_{ik} + jB_{ik}$$

$$G_{ik} = |Y_{ik}| \cos \theta_{ik}$$

$$B_{ik} = |Y_{ik}| \sin \theta_{ik}$$

D'où :

$$P_{Loss_{ik}} = G_{ik} [2|V_i| |V_k| \cos(\delta_i - \delta_k) - |V_i|^2 - |V_k|^2] \quad (I.22)$$

I.3.3.5 Formulation de l'équation des pertes en puissance réactive

On a l'équation (I.23)

$$Q_{Loss_{ik}} = Q_{ik} + Q_{ki} \quad (I.23)$$

Où :

$$Q_{ki} = |V_k|^2 |Y_{ik}| \sin \theta_{ik} - |V_i| |V_k| |Y_{ik}| \sin(\theta_{ik} - \delta_k + \delta_i) - |V_k|^2 |Y_{ki}^0| \quad (I.24)$$

$$Q_{ik} = |V_i|^2 |Y_{ik}| \sin \theta_{ik} - |V_i| |V_k| |Y_{ik}| \sin(\theta_{ik} - \delta_i + \delta_k) - |V_i|^2 |y_{ik}^0| \quad (I.25)$$

Finalement on obtient :

$$Q_{Loss_{ik}} = (|V_i|^2 + |V|^2) B_{ik} - (|V_i|^2 |Y_{ik}^0| + |V_k|^2 |y_{ki}^0|) - |V_i| |V_k| |Y_{ik}| [\sin(\theta_{ik} - \delta_i + \delta_k) + \sin(\theta_{ik} - \delta_k + \delta_i)] \quad (I.26)$$

Il existe plusieurs méthodes pour résoudre les équations d'écoulement de puissance, on cite principalement la méthode de Gauss-Seidel, la méthode de Newton-Raphson et la méthode de N-R découplée et découplée rapide. [6]

I.4 La production décentralisée

La libéralisation du marché de l'électricité a encouragé les particuliers à s'engager dans la production de l'énergie électrique. Les réseaux électriques étant en expansion continue, la demande à l'énergie augmente systématiquement. Pour faire face à cette demande croissante, les opérateurs système font appel à ces particuliers qui produisent localement leur énergie. Et contenue de la puissance et des tensions de ces PD, leur intégration ne peut être faite que sur les réseaux de distribution.

La production décentralisée est répartie en deux types de sources d'énergie : les sources renouvelables et les sources conventionnelles.

Le coût de réalisation de ce type de production est compétitif, et le temps court de leur mise en service présente une meilleure alternative pour subvenir aux besoins immédiats en énergie. Mais à cause des effets négatifs du deuxième type déjà cité sur l'environnement, les producteurs se tournent plus vers les énergies renouvelables. Malgré son modeste coût et son respect de l'environnement, ce type de production peut avoir des répercussions négatives sur le réseau auquel il est intégré.

I.4.1 Impact de l'intégration de la PD dans le réseau de distribution

L'insertion de la PD a des effets négatifs qui provoquent des anomalies sur le réseau qui sont présentés par suite :

I.4.1.1 Effet due au changement du sens de transit de puissances

Dans les réseaux de distribution, les équipements de protection sont généralement prévus pour une puissance unidirectionnelle, cependant, avec l'insertion d'une PD, ces équipements ne sont plus compatibles et ne répondent pas à un transit de puissance bidirectionnel.

I.4.1.2 Plans de protections

L'ajout d'un nouveau générateur au réseau change les prévisions pour les courants de court-circuit et donc le réglage des seuils de protection, cela peut conduire à un mauvais choix sur les équipements de sécurité et par conséquent avoir des déclenchements ou coupures intempestifs.

I.4.1.3 Compatibilité avec le réseau

Les lignes à la fin d'un réseau radial sont dimensionnées pour véhiculer uniquement la puissance exigée par la dernière charge, intégrer une éolienne au dernier nœud peut imposer à cette ligne de véhiculer des puissances supérieures à ses capacités.

I.4.1.4 Qualité de la tension

La puissance délivrée par la PD est fluctuante, cela se répercute sur l'allure des tensions dans les nœuds voisins, certaines charges ne peuvent pas supporter ce genre de variations. L'utilisation des équipements de l'électronique de puissance dans la commande et le contrôle des moteurs utilisés dans l'éolienne génèrent des harmoniques qui nuisent sur la qualité de la tension délivrée aux clients.

I.4.1.5 Problèmes de gestion et de prévision

Sur le plan de gestion des réseaux de distribution, l'opérateur système ne devrait pas inclure dans ces prévisions l'apport de l'énergie éolienne car cette dernière est peu fiable et dépend de paramètres incontrôlables.

Deux types de contraintes principales sont la cause des fluctuations qu'on constate sur l'allure de la puissance délivrée, les contraintes mécaniques et les contraintes électriques si nous prenons par exemple le cas d'une éolienne.

I.4.2 Contraintes mécaniques

Plusieurs paramètres entrent en jeu quand on parle des perturbations de cette origine, mais la cause principale reste le vecteur vitesse du vent, ces variations aléatoires couramment

appelées phénomène de cisaillement se transmettent sur l'arbre de la turbine et se manifestent sous forme de couple mécanique variable. Un autre phénomène appelé effet de tour se passe lors du passage d'une des pales constituant l'éolienne devant la tour ou le support de cette dernière.

I.4.3 Contraintes électriques

Une seule contrainte est la cause de ce type de problèmes, les harmoniques. Ce sont généralement le résultat de l'utilisation d'interface d'électronique de puissance, que ça soit lors du démarrage des moteurs ou lors de la commande où on doit réguler la vitesse ou le couple suivant le mode utilisé (charge partielle, pleine charge). Ces deux modes de fonctionnement ont pour objectif d'améliorer le rendement de l'éolienne.

I.4.4 Solutions proposées pour améliorer la qualité de l'énergie extraite de la PD

L'amélioration des signaux (tension et puissance) peut être faite par plusieurs moyens qui se basent principalement sur la compensation de l'énergie réactive en l'absorbant ou en l'injectant dans le réseau suivant le besoin, pour cela des systèmes dit FACTS sont utilisés. Ils sont composés principalement par des bobines et des condensateurs installés en parallèle. Ces deux derniers éléments peuvent être raccordés séparément au réseau.

Des compensateurs synchrones sont aussi utilisés dans ce même but. Ça consiste à utiliser des générateurs synchrones qui sont soit sous alimentés pour absorber de l'énergie réactive, ou suralimentés pour en produire en fonction du but désiré.

Des filtres actifs et/ou passifs sont aussi utilisés pour éliminer les courants harmoniques causés par les équipements de l'électronique de puissance.

I.4.4.1 Les systèmes FACTS les plus utilisés

- SATCOM, SVC : ce sont des éléments qu'on insert en parallèle avec le réseau, ils sont principalement constitués d'un condensateur en parallèle avec une bobine qui est mise en série avec deux thyristors montés en tête de biche afin de pouvoir assurer une variation homogène de la réactance capacitive. Son rôle est de générer ou absorber de l'énergie réactive, dont le but est de maintenir le niveau de tension à une valeur consigne. En effet, la chute de tension dans une ligne peut être réduite en jouant sur la valeur de l'énergie réactive. [3]

- TCSC : ce genre d'équipement est installé en série avec la ligne, et peuvent être utilisés comme une impédance variable afin d'influer sur l'admittance de la ligne, donc sur son impédance. Ce changement influe directement sur la puissance transmise dans cette ligne. Il est constitué des mêmes équipements que ceux du SVC. [3]
- UPFC : cela est une combinaison entre la compensation série et la compensation parallèle, donc au lieu de contrôler uniquement un paramètre, ce dispositif nous permet de commander des trois. [3]

I.4.4.2 Les Filtres

Dans le but d'éliminer les courants harmoniques, causés par l'utilisation de composants d'électronique de puissance, on introduit dans le réseau des composants connectés en série ou en parallèle. Ces composants appelés filtres se divisent en deux principales catégories : les filtres actifs et les filtres passifs.

Les filtres actifs

Comme son nom l'indique, ce filtre est composé d'éléments actifs, son principe est simple, il s'agit d'injecter dans le réseau des courants où des tensions harmoniques égales en amplitudes et opposés en argument avec l'harmonique qu'on veut éliminer. Ce dispositif peut être connecté en série, en parallèle, association des deux ou associé avec des filtres passifs en fonction des grandeurs à compenser. [11] [12]

Les filtres passifs

Composée d'éléments passifs tels que les résistances, Inductances et capacités, connectés en série ou en parallèle et qui forment une impédance d'une certaine fréquence dont le but est de présenter un chemin de faible impédance pour une catégorie d'harmonique. Parmi ces filtres, on distingue les filtres passifs résonants et les filtres passifs amortis. [13]

I.4.4.3 La régulation floue

La régulation floue est devenue de nos jours une technique très utilisée, spécialement dans le domaine industriel et la commande des systèmes, elle ne remplace pas la logique classique, elle est généralement complémentaire de cette dernière en fonction des applications, elle est particulièrement utilisée quand on ne possède pas de modèle mathématique précis du système à commander.

Elle permet de traiter les variables incertaines qui sont différentes du 0 et 1 qu'on connaît du booléen, des variables pouvant prendre des valeurs comprises entre celles du binaire.

Le principe est simple, il faut transformer des valeurs mesurées en termes linguistiques flous appelées variable linguistique. Des règles établies auparavant permettent de prendre des décisions en fonction de ses entrées.

Le choix de ces règles afin de résoudre le problème, nécessite la présence de certaines conditions :

- Connaissance préalable du système à contrôler, c.-à-d. avoir du savoir-faire.
- Possibilité d'agir sur ce système manuellement.
- Possibilité de mesure et d'observation des différents paramètres du système.

Trois notions fondamentales sont à connaître pour modéliser un régulateur flou :

L'ensemble flou : il est caractérisé par sa fonction d'appartenance qui attribue à chaque variable un degré d'appartenance pouvant varier entre 0 et 1. [13]

Les variables linguistiques : c'est l'attribution à des variables numériques des termes linguistiques afin de les caractériser. [13]

Les fonctions d'appartenance : fait correspondre à chaque valeur 'x', son degré d'appartenance à un ensemble A. [13]

Le traitement flou passe par trois étapes principales :

La fuzzification : c'est l'étape qui permet le passage de valeurs numériques mesurées ou observées en variables flous, cela en lui attribuant un degré d'appartenance par son évaluation avec une fonction d'appartenance. [13]

L'inférence : dans cette étape, les ensembles flous sont comparés avec les règles déjà établies et la sortie est elle aussi une variable linguistique. [13]

La défuzzification : c'est l'étape qui vient après l'inférence, elle transforme l'ensemble flou de la valeur linguistique en valeur numérique. [13]

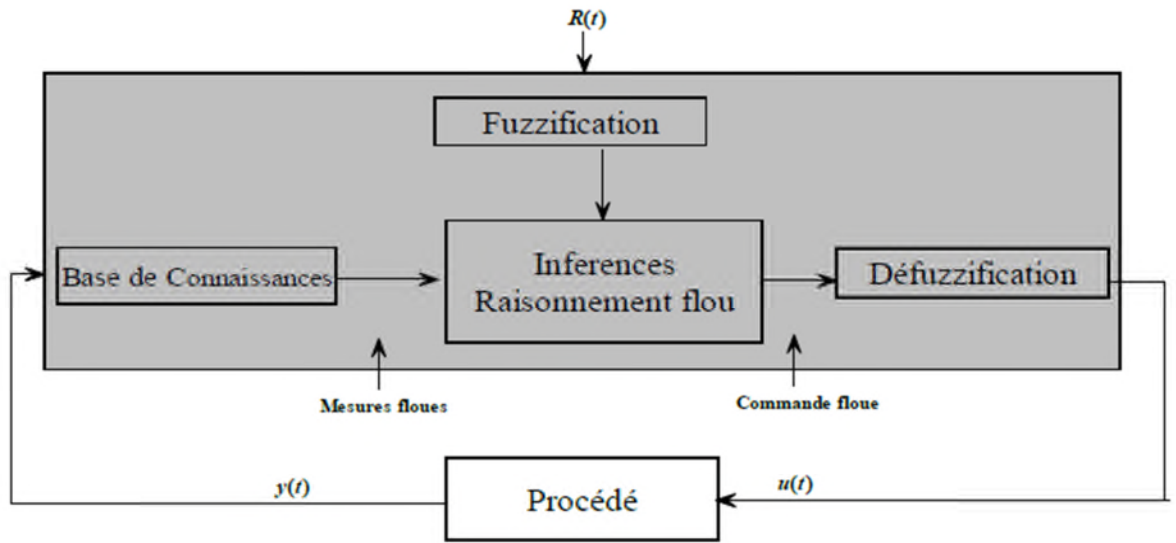


Fig.I.5 : Schéma général d'un contrôleur flou [14]

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différentes structures du réseau électrique, ainsi que les architectures de chaque structure (maillé ou radiale). Puis nous avons mis en évidence les avantages et inconvénients de ces deux architectures. Par la suite nous avons défini l'intérêt du calcul de l'écoulement de puissance et sa contribution dans la planification.

Par la suite, nous avons présenté l'impact de l'intégration de la production centralisée dans le réseau de distribution radial, ainsi que les quelques dispositifs de régulation nécessaires pour remédier à ces perturbations causées par cette intégration, à savoir les dispositifs FACTS, dispositif synchrone, Filtres, régulateur flou.

CHAPITRE II

METHODES SIMPLES POUR LE CALCUL DE
L'ECOULEMENT DE PUISSANCE DANS UN RESEAU
RADIAL

Introduction

Généralement, dans la résolution de l'écoulement de puissance dans un réseau électrique, les chercheurs ont toujours opté pour les méthodes classiques telles que la méthode de Gauss-Seidel, la méthode de Newton- Raphson et Newton- Raphson découplée rapide... Mais ces méthodes se sont avérées être inefficace dans le cas d'un réseau radial. Leur divergence est souvent expliquer par le quotient très élevé de R/X .

Dans ce présent chapitre nous allons essayer de présenter puis de procéder au développement mathématique d'un ensemble de quatre méthodes traitant du problème de l'écoulement de puissance dans les réseaux de distribution. Ce sont des méthodes simples, directes et faciles à programmer. Elles sont toutes itératives et se basent sur le principe du balayage en amont et en aval pour le calcul de la tension

II.1 Méthode simple pour le calcul de l'écoulement de puissances avec des charges variables

Cette méthode est proposée par Ulas Eminoglu, M. Hakan Hocaoglu [15]. Elle a pour objectif la résolution du problème de l'écoulement de puissance dans un réseau de distribution radial. Elle est simple, efficace et elle a comme avantages des caractéristiques de convergence améliorées.

Cette approche prend en considération l'influence du type de charges sur la tension en utilisant un facteur de correction, ainsi que l'effet capacitif des lignes. Elle se base sur la résolution de l'équation polynomiale de tension obtenue à partir de l'équation de l'écoulement de puissance entre deux jeux de barre. La tension dans chaque jeu de barre s'obtient en utilisant la tension calculée dans le jeu de barre précédant. Les valeurs des tensions sont corrigées en prenant en considération les chutes de tension causées par l'impédance des lignes.

Cette méthode présente une meilleure convergence quel que soit le type de charges utilisées.

II.1.1 Approche Mathématique

Le schéma suivant montre un simple réseau à deux jeux de barre : [15]

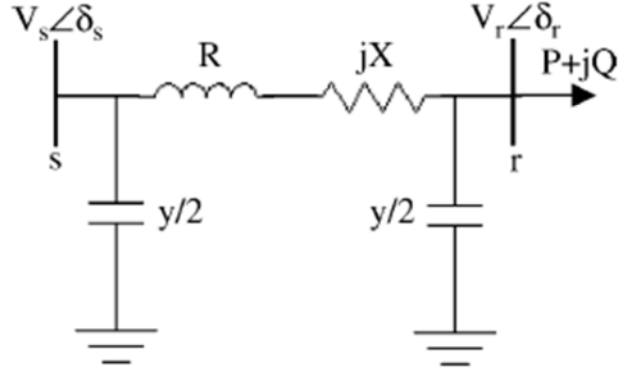


Fig. II.1 : exemple d'une branche en Π

Avec :

P : Puissance active transportée par la ligne.

Q : Puissance réactive transportée par la ligne.

V_s : Tension à la source.

V_r : Tension à la charge.

δ_s : Déphasage de la tension V_s .

δ_r : Déphasage de la tension V_r .

R, X : Résistance et inductance de la ligne.

Y : Admittance de la ligne.

Dans cette méthode on fait appel aux équations de l'écoulement de puissances qui sont les suivantes :

$$P = \frac{|V_r||V_s|}{|Z|} \cos(\theta_z - \delta_s) - \frac{|A||V_r|^2}{|Z|} \cos(\theta_z - \delta_A) \quad (\text{II.1})$$

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

Où : $A = \cosh(\gamma)$ et : $\gamma = \sqrt{zy}$

Z : Impédance de la ligne.

θ_Z : Déphasage de la ligne.

δ_A : Déphasage du paramètre A de la ligne

A partir des équations (II.1) et (II.2) en fait extraire les équations (II.3) et (II.4) :

$$\cos(\theta_Z - \delta_s) = \frac{P|Z|}{|V_r||V_s|} + \frac{|A||V_r|}{|V_s|} \cos(\theta_Z - \delta_A) \quad (\text{II.3})$$

$$\sin(\theta_Z - \delta_s) = \frac{Q|Z|}{|V_r||V_s|} + \frac{|A||V_r|}{|V_s|} \sin(\theta_Z - \delta_A) \quad (\text{II.4})$$

On peut aussi exprimer les expressions de puissances active et réactive par les expressions (II.5) et (II.6) :

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{np} \quad (\text{II.5})$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{nq} \quad (\text{II.6})$$

Où np et nq : paramètres variables suivant le type de charges.

P_0 et Q_0 : puissances active et réactive nominales des charges.

Dans cette méthode les valeurs de V_0 sont fixées à 1pu donc les équations (II.5) et (II.6) deviennent plus simple à exprimer tel que :

$$P = P_0 V^{np} \quad (\text{II.7})$$

$$Q = Q_0 V^{nq} \quad (\text{II.8})$$

L'étape qui suit se fait en remplaçant les expressions (II.7) et (II.8) dans (II.3) et (II.4) :

$$\cos(\theta_Z - \delta_s) = \frac{P_0|V|^{np}|Z|}{|V_r||V_s|} + \frac{|A||V_r|}{|V_s|} \cos(\theta_Z - \delta_A) \quad (\text{II.9})$$

$$\sin(\theta_Z - \delta_S) = \frac{Q_0 |V|^{np} |Z|}{|V_r| |V_s|} + \frac{|A| |V_r|}{|V_s|} \sin(\theta_Z - \delta_A) \quad (\text{II.10})$$

Maintenant, on va développer les expressions de $\cos^2(\theta_Z - \delta_S)$ et de $\sin^2(\theta_Z - \delta_S)$

Telle que:

$$\begin{aligned} \cos^2(\theta_Z - \delta_S) &= \frac{P_0^2 |V|^{2np} |Z|^2}{|V_r|^2 |V_s|^2} + \frac{|A|^2 |V_r|^2}{|V_s|^2} \cos^2(\theta_Z - \delta_A) + \\ &2 \frac{P_0 |V|^{np} |Z| |A|}{|V_s|^2} \cos(\theta_Z - \delta_A) \end{aligned} \quad (\text{II.11})$$

$$\begin{aligned} \sin^2(\theta_Z - \delta_S) &= \frac{Q_0^2 |V|^{2np} |Z|^2}{|V_r|^2 |V_s|^2} + \frac{|A|^2 |V_r|^2}{|V_s|^2} \sin^2(\theta_Z - \delta_A) + \\ &2 \frac{Q_0 |V|^{np} |Z| |A|}{|V_s|^2} \sin(\theta_Z - \delta_A) \end{aligned} \quad (\text{II.12})$$

On a aussi l'équation trigonométrique suivante :

$$\cos^2(\theta_Z - \delta_S) + \sin^2(\theta_Z - \delta_S) = 1 \quad (\text{II.13})$$

On remplace les équations (II.11) et (II.12) dans l'équation (II.13) puis on simplifie l'équation finale et on obtient la relation (II.14) :

$$\begin{aligned} &\frac{P_0^2 |V|^{2np} |Z|^2}{|V_r|^2 |V_s|^2} + \frac{|A|^2 |V_r|^2}{|V_s|^2} + 2 \frac{P_0 |V|^{np} |Z| |A|}{|V_s|^2} \cos(\theta_Z - \delta_A) + \frac{Q_0^2 |V|^{2np} |Z|^2}{|V_r|^2 |V_s|^2} \\ &+ 2 \frac{Q_0 |V|^{np} |Z| |A|}{|V_s|^2} \sin(\theta_Z - \delta_A) = 1 \end{aligned} \quad (\text{II.14})$$

Dans l'étape suivante on va multiplier l'équation (II.14) par $|V_s|^2 |V_r|^2$ et on aura :

$$P_0^2 |V|^{2np} |Z|^2 + |A|^2 |V_r|^4 + 2P_0 |V|^{np} |Z| |A| |V_r|^2 \cos(\theta_Z - \delta_A) + Q_0^2 |V|^{2np} |Z|^2 + 2Q_0 |V|^{np} |Z| |A| \sin(\theta_Z - \delta_A) = |V_r|^2 |V_s|^2 \quad (\text{II.15})$$

D'où :

$$|A|^2 |V_r|^4 + 2|V_r|^2 |Z| |A| (P_0 |V_r|^{np} \cos(\theta_Z - \delta_A) + Q_0 |V_r|^{np} \sin(\theta_Z - \delta_A)) + |Z|^2 (P_0^2 |V_r|^{2np} + Q_0^2 |V_r|^{2np}) = 0 \quad (\text{II.16})$$

$$V_s = V_n + I_t \sum_{k=1}^n Z_k - \sum_{k=1}^{n-1} I_k (\sum_{i=k+1}^n Z_i) \quad (\text{II.17})$$

Avec :

$$I_k = \left(\frac{S_k}{V_k} \right)^* \quad (\text{II.18})$$

S_k : Puissance apparente au nœud k.

V_k : Tension au nœud K.

$$V_{S_r} = \frac{V_s^{\text{new}}}{V_s} \quad (\text{II.19})$$

$$V_k^{\text{Adjust}} = \frac{V_k^{\text{new}}}{V_{S_r}} \quad (\text{II.20})$$

L'équation (II.19) représente le rapport entre la tension après correction des puissances et celle d'avant.

L'équation (II.20) représente la correction effectuée sur la tension V_k .

II.1.2 Algorithme de Résolution

Etape 1 : initialiser toutes les valeurs de tensions de telle manière à avoir toutes les tensions aux nœuds égales à 1pu.

Etape 2 : Utiliser un balayage en aval pour le calcul des tensions à l'aide de l'équation (II.10), en démarrant du premier nœud, et ce en calculant toutes les puissances qui sortent du jeu

de barre en question. La méthode se basant sur un principe itératif, la tension trouvée à chaque niveau doit être utilisée pour le calcul de la tension suivante.

Dans le cas d'une ramification, il faut préciser le nœud duquel cette dernière est issue.

Etape 3 : corriger les valeurs des puissances P et Q en utilisant les nouvelles tensions à l'aide des équations (II.5 et II.6). Ensuite recalculer les nouveaux courants des charges.

Etape 4 : commencer un balayage en amont pour calculer les nouvelles tensions en utilisant l'équation (II.17) partant du $n^{\text{ème}}$ nœud jusqu'à la source. [15]

II.2 Méthode simple et directe pour les calculs dans les réseaux de distribution

La méthode suivante a été proposée par Manuel A. Matos [16], elle ne diffère pas énormément des autres méthodes, elle se base sur un calcul itératif appliqué à une équation obtenue à partir de l'équation de puissance transitant entre deux jeux de barres successifs. Les valeurs des tensions, impédances et puissances dans les équations sont écrites sous forme rectangulaire, ce qui va nous permettre par la suite de calculer au même temps que le module de la tension, son angle de phase.

Dans un premier temps l'effet capacitif n'est pas pris en considération, il s'agit des lignes aériennes, il sera introduit uniquement pour les lignes sous terraines où cet effet ne peut être négligé.

II.2.1 Développement mathématique

II.2-1.1 Cas générale

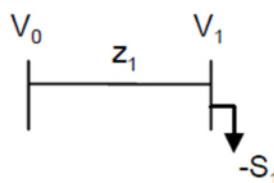


Fig. II.2 Exemple d'une branche.

Premièrement, à partir de la (Fig. II.2) on peut écrire l'équation (II.21)

$$V_0 - V_1 = Z_1 * \left(-\frac{S_1}{V_1}\right)^* \quad (\text{II.21})$$

On multiplie l'équation (II.21) par V_1 et on calcule son conjuguée, on obtient l'équation (II.22) :

$$V_0^* \cdot V_1 - |V_1|^2 + z_1^* \cdot S_1 = 0 \quad (\text{II.22})$$

Maintenant, et pour faciliter les calculs, on remplace les éléments de l'équation (II.22) par leurs formes triangulaires respectives comme suit :

- On suppose que l'angle $V_0^* = e_0$ et que $\theta_0 = 0$
- $V_1 = e_1 + jf_1$; $z_i = r_i + jX_i$ et $S_i = P_i + jQ_i$

On obtient l'équation (II.23):

$$e_0(e_1 + jf_1) - (e_1^2 + f_1^2) + (r_1 - jX_1)(P_1 + jQ_1) = 0 \quad (\text{II.23})$$

et après développement et séparation de l'équation (II.23) en parties réelle et imaginaire, on obtient les équations (II.24) et (II.25) :

$$e_0 e_1 - (e_1^2 + f_1^2) + (r_1 \cdot P_1 + X_1 \cdot Q_1) = 0 \quad (\text{II.24})$$

$$e_0 f_1 + (r_1 \cdot Q_1 - X_1 \cdot P_1) = 0 \quad (\text{II.25})$$

Nous avons un système d'équations à deux inconnues à résoudre (II.24) et (II.25), il suffit de tirer f_1 de la l'équation (II.25) et de le remplacer dans l'équation (II.24) pour trouver e_1 .

cela ne peut s'appliquer qu'à un système à deux jeux de barres, ce qui n'est pas d'une grande utilité dans le domaine pratique. [16]

Pour un système à « n » jeux de barres, on se base sur le même principe et l'équation (II.21) devient :

$$V_0 - V_1 = z_1 \cdot \left(-\sum_{k=1}^n \frac{S_k}{V_k}\right)^* \quad (\text{II.26})$$

on multiplie l'équation (II.26) par V_1 et on calcule son conjuguée :

$$e_0 \cdot V_1 - |V_1|^2 + z_1^* \cdot \sum_{k=1}^n S_k \cdot \left(\frac{V_1}{V_k} \right) = 0 \quad (\text{II.27})$$

On utilise cette même équation pour calculer les tensions au niveau des différents accès en utilisant à chaque fois la tension trouvée à l'accès précédent. L'expression générale est donnée par :

$$V_{prec(i)}^* \cdot V_i - |V_i|^2 + z_i^* \cdot \left(S_i + \sum_{k \in succ(i)} S_k \cdot \left(\frac{V_i}{V_k} \right) \right) = 0 \quad (\text{II.28})$$

Pour atteindre une certaine précision ε , il faut dérouler l'équation (II.28) en utilisant plusieurs itérations, l'écriture correcte dans ce cas est donnée par l'équation (II.29) :

$$V_{prec(i)}^{*(p)} \cdot V_i - |V_i|^2 + z_i^* \cdot \left(S_i + \sum_{k \in succ(i)} S_k \cdot \left(\frac{V_i^{(p-1)}}{V_k^{(p-1)}} \right) \right) = 0 \quad (\text{II.29})$$

Où $succ(i)$: est la succession des jeux de barres.

Où (P) est l'itération à laquelle on est arrivé, et P-1 sera l'itération précédente, et

$$\varepsilon = \left| V_i^{(P)} - V_i^{P-1} \right|$$

L'équation (II.29) peut être écrite d'une manière simplifiée tel que :

$$V_{prec(i)}^* \cdot V_i - |V_i|^2 + z_i^* \cdot S_i' = 0 \quad (\text{II.30})$$

L'utilisation de l'équation (II.30) ne nécessite pas de valeurs initiales pour V_i , il faut juste considérer que :

$$V_k^{(0)} = V_i^{(0)} \quad \text{avec } k \in succ(i)$$

On peut alors écrire pour la première itération :

$$V_{prec(i)}^* \cdot V_o - |V_i|^2 + z_i^* \cdot (S_i + \sum_{k \in succ(i)} S_k) = 0 \quad (\text{II.31})$$

II.2.1.2 Cas de liaisons sous-terraines



Fig II.3 : exemple d'une branche sous-terrainne en Π

La figure (II.3) représente le mode en Π d'une ligne entre deux jeux de barres, elle n'a de plus que la (Fig.II.2), les semi-admittance y_{si} .

Parce qu'un nœud peut être en liaison avec plusieurs autres nœuds, on peut définir pour chaque nœud i , une admittance totale telle que :

$$Y_{si} = y_{si} + \sum_{k \in \text{scon}(i)} y_{sk} \quad (\text{II.32})$$

Où $\text{scon}(i)$ sont les nœuds connectés au nœud (i) . (Avec k différent de i)

Dans ce cas, la somme des courants passant à travers le jeu de barre (i) va changer, et donc l'équation (II.21) va s'écrire :

$$V_{\text{pred}(i)} - V_i = z_i \cdot \left(\left(-\frac{S'_i}{V_i} \right)^* + Y_{si} \cdot V_i + \sum_{k \in \text{succ}(i)} Y_{sk} \cdot V_k \right) \quad (\text{II.33})$$

Et après calcul du conjugué et multiplication par V_i , l'équation (II.30) va maintenant s'écrire :

$$(V_{\text{pred}(i)}^* - z_i^* \cdot \sum_{k \in \text{succ}(i)} Y_{sk}^* \cdot V_k^*) \cdot V_i - (1 + z_i^* \cdot Y_{si}^*) \cdot |V_i|^2 + z_i^* \cdot S'_i = 0 \quad (\text{II.34})$$

Pour avoir l'équation (II.34) sous forme quadratique avec un coefficient de 1 Pour $|V_i|^2$ on l'a divisé par son coefficient actuel et on obtient :

$$\frac{V_{\text{pred}(i)}^* - z_i^* \cdot \sum_{k \in \text{succ}(i)} Y_{sk}^* \cdot V_k^*}{1 + z_i^* \cdot Y_{si}^*} \cdot V_i - |V_i|^2 + \frac{z_i^*}{1 + z_i^* \cdot Y_{si}^*} \cdot S'_i = 0 \quad (\text{II.35})$$

II.2.1.3. présence de condensateurs ou de bobines

Il est facile d'introduire une charge inductive ou capacitive aux calculs, il suffit de modifier l'équation (II.32) en ajoutant un paramètre Y_i correspondant à cette charge tel que : [16]

$$Y_{si} = y_{si} + \sum_{k \in \text{con}(i)} y_{sk} + Y_i \quad (\text{II.36})$$

Dans ce cas l'équation (II.32) sera remplacée par l'équation (II.36)

II.2.1.4. cas de neud generateur (Ou neoud PV)

$$V_{prec(i)}^* \cdot V_i + z_i^* \cdot S_i \cdot |V_i|^2 + z_i^* \cdot \sum_{k \in \text{succ}(i)} S_k \cdot \left(\frac{V_i}{V_k} \right) = 0 \quad (\text{II.37})$$

$$V_{prec(i)}^* \cdot V_i + z_i^* \cdot jQ_i + z_i^* \cdot P_i - |V_i|^2 + z_i^* \cdot \sum_{k \in \text{succ}(i)} S_k \cdot \left(\frac{V_i}{V_k} \right) = 0 \quad (\text{II.38})$$

$$V_{prec(i)}^* \cdot V_i + z_i^* \cdot jQ_i + C = 0 \quad (\text{II.40})$$

II.2.2 Algorithme de résolution

Etape 1 : initialiser toutes les valeurs de tension de telle manière à avoir toutes les tensions égales à 1pu.

Etape 2 : Utiliser un balayage en aval pour le calcul des tensions à l'aide de l'équation (II.29), en démarrant du jeu de barre 1, et ce en calculant toutes les puissances qui sortent du jeu de barre en question. La méthode se basant sur un principe itératif, la tension trouvée à chaque niveau doit être utilisée pour le calcul de la tension suivante.

Dans le cas d'une ramification, il faut préciser le nœud duquel cette dernière est issue.

Etape 3 : dans le cas de nœuds PV, on utilise l'équation (II.37) et on garde la valeur de Q pour les nœuds suivants.

Etape 4 : une fois arriver au dernier nœud, on refait toutes les itérations avec les nouvelles tensions obtenues jusqu'à atteindre la précision désirée. [16]

II.3 Méthode matricielle pour la résolution des équations d'écoulement de puissance en réseau radial

Comme déjà cité auparavant, il y a plusieurs méthodes qui s'intéressent au calcul de l'écoulement de puissance dans le réseau radial. La méthode présentée dans ce qui suit s'appuie

sur l'analyse matricielle des équations de puissance et tension dans le but de déterminer les valeurs des grandeurs suivantes : Tension, Courant, Pertes en puissances active et réactive. Cette méthode est proposée par Smarajit Ghosh, Karma Sonam Sherpa .[17]

Le réseau radial n'est pas complètement arborescent car, dans certains cas, on le trouve bouclé pour diverses raisons, ce qui complique la tâche de résolution des équations de l'écoulement de puissance et pour y remédier, on utilise l'analyse matricielle qui nous garantit une résolution facile et plus rapide.

L'application de cette méthode passe par deux étapes essentielles qui sont :

- Déterminer la valeur du courant dans chaque branche.
- Déterminer l'amplitude de la tension ainsi que son déphasage à chaque nœud.

II.3.1 Détermination de la valeur du courant dans chaque branche

Pour déterminer la valeur du courant dans chaque branche du réseau, on doit procéder comme suit :

La figure suivante représente un réseau de neuf jeux de barres et huit avec une ramification au niveau du 3^{ème} nœud incluant les nœuds 6, 7, 8 et 9. [17]

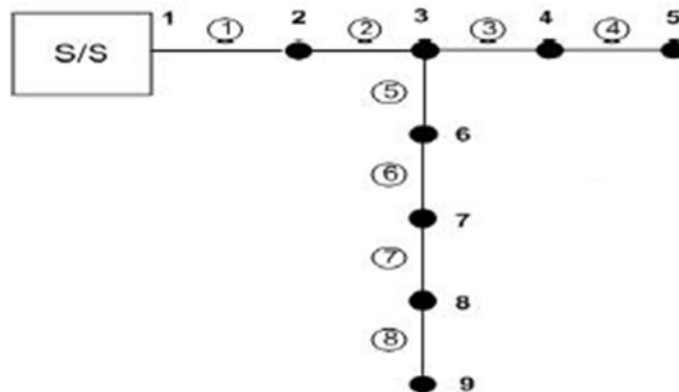


Fig. II.4 réseau radial

1. Créer la matrice suivante qui représente l'ensemble des nœuds qui se situe après chaque branche

$$A = \begin{pmatrix} 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ 0 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ 0 & 0 & 4 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 7 & 8 & 9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 & 9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 9 \end{pmatrix} \quad (\text{II.41})$$

Dans cette matrice les lignes représentent les numéros de branche, et les éléments des colonnes représentent les numéros des nœuds qui se situent après la branche.

2. Connecter les charges aux nœuds qui lui correspondent dans la matrice précédente. Par exemple le premier élément de la matrice correspond à 2, on place la charge qui est connectée au nœud 2 à cette position, procéder de la même manière pour le reste des charges.

La nouvelle matrice obtenue $S(K1)$; (Matrice des puissances apparentes) est la matrice de base qui est utilisée pour le calcul des courants de branche. [17]

$$S(k1) = \begin{pmatrix} s2 & s3 & s4 & s5 & s6 & s7 & s8 & s9 \\ 0 & s3 & s4 & s5 & s6 & s7 & s8 & s9 \\ 0 & 0 & s4 & s5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s6 & s7 & s8 & s9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s8 & s9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s8 & s9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s9 \end{pmatrix} \quad (\text{II.42})$$

3. Créer la matrice $S(K2)$ qui représente la matrice conjuguée des puissances apparentes

$$S_{(K2)} = \text{conj}(S_{(K1)}) \quad (\text{II.43})$$

4. Calculer les courants de charges avec l'équation (2.44) :

$$I_{L(K)} = \frac{(P_{L(K)} - jQ_{L(K)})}{\text{conj}(V_{(K)})} \quad (\text{II.44})$$

Où :

$I_{L(K)}$: Courant de charge au nœud K.

$P_{L(K)}$ et $Q_{L(K)}$: Puissances active et réactive de la charge au nœud K.

$V_{(K)}$: Tension au nœud K.

Pour effectuer le calcul des courants de charges, on doit d'abord fixer la tension dans chaque nœud à $V_{(K)} = 1 \text{ p.u.}$

5. Les courants dans les branches sont calculés en additionnant les courants de charges de tous les nœuds suivants.

$$I_{jj} = \sum_{nb_{jj}} I_{LK} \quad (\text{II.45})$$

Où :

I_{jj} : Courant dans la branche.

I_{LK} : Courant dans la charge connectée au nœud K.

nb_{jj} : Nombre de nœud qui se situent après la branche.

Les courants de branche sont résumés dans le vecteur suivant :

$$I_J = \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \\ I_7 \\ I_8 \end{pmatrix} \quad (\text{II.46})$$

II.3.2 Détermination l'amplitude de la tension ainsi que son déphasage à chaque nœud

Pour déterminer l'amplitude de la tension ainsi que son déphasage on va en premier lieu créer la matrice diagonale des impédances de branches, elle est du même ordre que la matrice des nœuds créée auparavant. Les éléments de la diagonale représentent les impédances dans chaque branche : [17]

$$Z(J) = \begin{pmatrix} Z(1) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Z(2) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z(3) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Z(4) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Z(5) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z(6) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z(7) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z(8) \end{pmatrix} \quad (\text{II.47})$$

Le produit de cette matrice avec le vecteur des courants des branches nous donne les valeurs des chutes de tensions dans les lignes, elles sont illustrées dans l'équation (II.48)

$$\Delta U = Z(J) * I(J) \quad (\text{II.48})$$

Donc :

$$\Delta U = \begin{pmatrix} Z(1) * I(1) \\ Z(2) * I(2) \\ Z(3) * I(3) \\ Z(4) * I(4) \\ Z(5) * I(5) \\ Z(6) * I(6) \\ Z(7) * I(7) \\ Z(8) * I(8) \end{pmatrix}$$

Pour finaliser le calcul des tensions, on va procéder comme suit :

1. On prend la matrice des chutes de tensions et on la partage en deux matrices D1 et D2.

$$D1 = \begin{pmatrix} Z(1) * I(1) \\ Z(2) * I(2) \\ Z(3) * I(3) \\ Z(4) * I(4) \end{pmatrix}$$

$$D2 = \begin{pmatrix} Z(1) * I(1) \\ Z(2) * I(2) \\ Z(5) * I(5) \\ Z(6) * I(6) \\ Z(7) * I(7) \\ Z(8) * I(8) \end{pmatrix}$$

Les éléments de ces deux matrices sont les chutes de tensions dans les branches qui se suivent sur le même sentier, par exemple dans notre réseau on a deux chemins différents, le premier relie les branches (1, 2, 3, 4) et le deuxième les branches (1, 2, 5, 6, 7, 8).

2. On calcule les tensions dans tous les nœuds avec les deux équations (II.49) et (II.50) :
Sachant que la tension au premier nœud est fixée à 1 p.u. le vecteur de tension initial est donné comme suite :

$$V_0 = \begin{pmatrix} V(2) \\ V(3) \\ V(4) \\ V(5) \\ V(6) \\ V(7) \\ V(8) \\ V(9) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$V_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} Z(1) * I(1) \\ Z(1) * I(1) - Z(2) * I(2) \\ Z(1) * I(1) - Z(2) * I(2) - Z(3) * I(3) \\ Z(1) * I(1) - Z(2) * I(2) - Z(3) * I(3) - Z(4) * I(4) \end{pmatrix} \quad (II.49)$$

Et :

$$V_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} Z(1) * I(1) \\ Z(1) * I(1) - Z(2) * I(2) \\ Z(1) * I(1) - Z(2) * I(2) - Z(5) * I(5) \\ Z(1) * I(1) - Z(2) * I(2) - Z(5) * I(5) - Z(6) * I(6) \\ Z(1) * I(1) - Z(2) * I(2) - Z(5) * I(5) - Z(6) * I(6) - Z(7) * I(7) \\ Z(1) * I(1) - Z(2) * I(2) - Z(5) * I(5) - Z(6) * I(6) - Z(7) * I(7) - Z(8) * I(8) \end{pmatrix} \quad (II.50)$$

L'ensemble des résultats de ces deux équations nous donne les valeurs de toutes les tensions dans le réseau. Les valeurs sont résumées dans le vecteur tension suivant :

$$V_1 = \begin{pmatrix} V(2) \\ V(3) \\ V(4) \\ V(5) \\ V(6) \\ V(7) \\ V(8) \\ V(9) \end{pmatrix}$$

II.3.3 Algorithme de la méthode

Etape 1 : Introduire le nombre de branches et nœuds ainsi que les données du réseau.

Etape 2 : Créer la matrice 'A'.

Etape 3 : Calculer les courants de charges puis les courants dans les branches avec les équations (II.45) et (II.46).

Etape 4 : Créer la matrice impédance du réseau.

Etape 5 : Calculer les chutes de tensions dans chaque branche.

Etape 6 : Calculer les tensions dans les différents nœuds.

Etape 7 : Vérifier la convergence à partir l'équation [17]

$$abs(V1 - V0) > \varepsilon$$

II.4 Calcul de l'écoulement de puissance dans un réseau de distribution radiale en utilisant une structure linéaire de données

L'article présenté par Ritu Parasher [18], présente une méthode rapide et efficace pour le calcul de l'écoulement de puissance dans un réseau de distribution radial. Elle est basée sur une structure de donnée linéaire, c'est-à-dire que les données sont introduites en forme de vecteurs ainsi que les résultats obtenus.

Cette méthode requière très peu d'itérations pour converger vers un bon résultat.

II.4.1 Approche mathématique

Les équations développées dans la suite de ce titre se basent sur le schéma de la figure

II.4

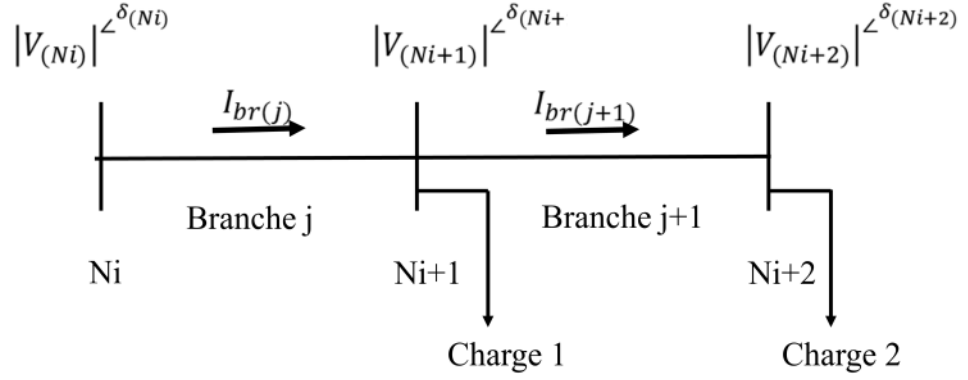


Fig. II.5 : Exemple d'une branche en réseau radial

Tel que :

N_i : Numéro du nœud.

j : Numéro de branche

$V_{(i)}$: Tension au nœud i .

θ_{vi} : Déphasage de la Tension au nœud i .

$I_{br(j)}$: Courant dans la branche j .

Nous avons l'équation de la puissance apparente au niveau d'une charge :

$$S_i = V_i(LI)_i^* = P_i + jQ_i \quad (\text{II.51})$$

S_i étant la puissance apparente de la charge i .

P_i et Q_i sont respectivement la puissance active et réactive de la charge i .

$(LI)_i^*$: Le conjugué du courant de la charge i .

Cela nous donne l'équation (II.52) :

$$(LI)_i = \left(\frac{S_i}{V_i} \right)^* = \frac{P_i + jQ_i}{V_i^*} \quad (\text{II.52})$$

On séparant le module de l'argument nous auront :

$$(LI)_i = \frac{\sqrt{P_i^2 + Q_i^2}}{|V_i|} \frac{\angle \tan^{-1}\left(\frac{Q_i}{P_i}\right)}{\angle -\theta_{vi}} \quad (\text{II.53})$$

On peut simplifier l'équation (II.53)

$$(LI)_i = |LI_i| \angle \theta_i$$

θ_i : est le déphasage du courant de la charge i .

Qui peut être aussi écrite :

$$(LI)_i = |LI_i| \cos \theta_i + j |LI_i| \sin \theta_i \quad (\text{II.54})$$

Les équations du module du courant de charge et de son argument sont données par (II.55) et (II.56) :

$$|LI_i| = \frac{[P_i^2 + Q_i^2]^{1/2}}{|V_i|} \quad (\text{II.55})$$

$$\theta_i = \theta_{vi} - \tan^{-1} \left(\frac{Q_i}{P_i} \right) \quad (\text{II.56})$$

Pour les courants de branche on additionne les courants des charges se trouvant en aval de la branche où on se trouve :

$$I_{br_j} = \sum_{i=1}^n |LI_i| \cos \theta_i + j \sum_{i=1}^n |LI_i| \sin \theta_i \quad (\text{II.57})$$

n est le nombre de nœuds du réseau.

Pour « s » et « r » deux nœuds successifs, la tension dans « r » est obtenue par l'équation (II.58) :

$$V_r = V_s - I_{br} \cdot Z_{br} \quad (\text{II.58})$$

Z_{br} : est l'impédance de la ligne entre « s » et « r » et $\theta_{Z_{br}}$ son argument.

Une forme plus contractée de l'équation (II.58) nous donne :

$$|V_r| \angle \theta_{V_r} = |V_s| \angle \theta_{V_s} - |I_{br}| \angle \theta_{I_{br}} \cdot |Z_{br}| \angle \theta_{Z_{br}} \quad (\text{II.59})$$

En développant l'équation précédente on arrive à (II.60)

$$\begin{aligned} |V_r| \angle \theta_{V_r} &= |V_s| \angle \theta_{V_s} - |I_{br}| |Z_{br}| \angle (\theta_{I_{br}} + \theta_{Z_{br}}) \\ &= V_s \angle \theta_{V_s} - |I_{br}| \cdot |Z_{br}| \angle \emptyset \end{aligned} \quad (\text{II.60})$$

A partir des courants des branches calculés dans l'équation (II.57), on déduit les équations des pertes actives et réactive en fonction de l'impédance de la ligne :

$$LP_j = |I_{brj}|^2 \cdot R_{brj} \quad (\text{II.61})$$

$$LQ_j = |I_{brj}|^2 \cdot X_{brj} \quad (\text{II.62})$$

LP_j et LQ_j : sont les pertes active et réactive dans la branche j .

R_{brj} et X_{brj} : résistance et inductance de la branche j .

II.4.2 Algorithme de résolution

Etape 01 : lire les données du réseau (Puissances, Impédances des lignes, tension nominale...) et initialiser toutes les tensions dans les nœuds à 1 p.u et les courants de branche à 0 p.u.

Etape 2 : calculer tous les courants des charges et ensuite déduire les courants des branches.

Etape 3 : corriger les valeurs des nouvelles tensions en utilisant les courants des lignes.

Etape 4 : calculer l'erreur absolue entre deux valeurs de tension dans un même jeu de barre et dans deux itérations successives à une valeur d'Epsilon proche à (0.0001).

Si l'erreur est supérieure, retour à l'étape 2 pour calculer les nouvelles valeurs des courants.

Etape 5: une fois le critère de convergence est vérifié on procède au calcul des pertes de puissances active et réactive, ainsi que les chutes de tensions dans les lignes.

Conclusion

Nous avons dans ce chapitre, traité quatre méthodes dans le cadre de la résolution du problème de l'écoulement de puissance dans un réseau radial. L'ensemble de ces méthodes présentent une approche simple pour calculer les tensions au niveau des nœuds d'un réseau en calculant les courants dans les charges, puis dans les branches. Ces tensions sont corrigées à chaque itération jusqu'à atteindre la précision désirée. Nous avons à la fin de chaque méthode, donné un algorithme qui résume les différentes étapes pour la résolution des équations données auparavant.

Dans ce chapitre, nous avons appliqué la méthode citée dans le paragraphe (II.4), nous avons développé un programme sous MATLAB afin d'effectuer les calculs, et de tester la

fiabilité de la méthode en comparant les résultats obtenus avec ceux d'autres méthodes déjà approuvées. Le choix de cette méthode s'est fait parce que les paramètres du réseau sont insérés directement en forme de vecteur, aucune modification n'est nécessaire.

CHAPITRE III

CALCUL DE L'ÉCOULEMENT DE PUISSANCE :

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons effectuer le calcul de l'écoulement de puissance à partir de la méthode présentée dans (II.4). En premier lieu nous allons présenter un réseau de distribution radial à 10 jeux de barres dans son état initial. Les différentes grandeurs obtenues du développement et de l'implantation sous MATLAB de cette méthode, seront par la suite présentées et discutées.

Nous allons intégrer par la suite à ce même réseau un générateur éolien dont le but est de voir le comportement du réseau vis-à-vis de l'intégration d'une source éolienne de puissance fluctuante, et d'évaluer par la suite les paramètres du réseau. Et finalement nous allons intégrer un dispositif de compensation et voir son apport aux paramètres du réseau.

La dernière partie consiste à effectuer une simulation sous MATLAB des mêmes étapes que celles réalisées avec le programme, et ce avec le même réseau de la figure (III.1), seulement dans cette partie nous avons utilisé un régulateur floue pour le calcul des puissances réactives échangés avec le réseau. En fin nous allons faire une comparaison entre ces deux résultats.

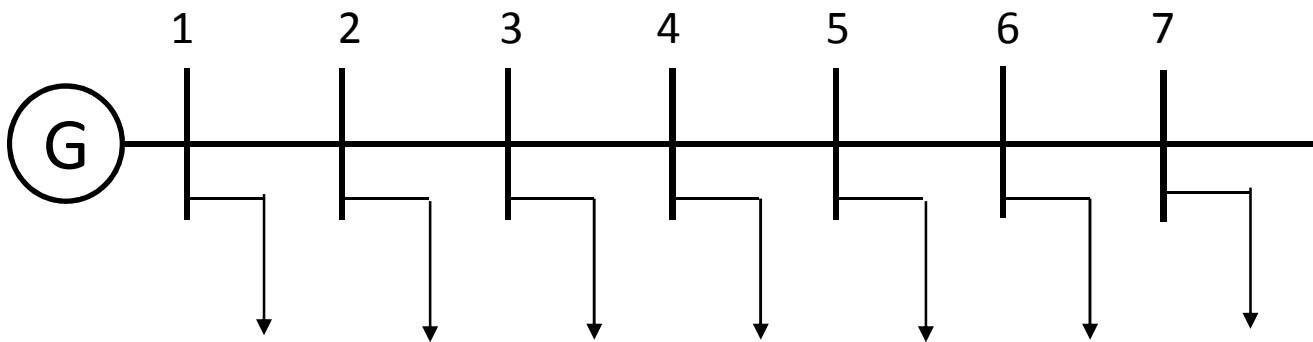


Fig. III.1 : Réseau de distribution radial à 10 jeux de barres

Les calculs sont effectués en unités relatives, les valeurs initiales des tensions égales à 1 p.u pour les modules et 0 radian pour l'argument. La puissance et tension nominales de base sont respectivement 4186 kVA et 23kV et les données du réseau sont représentées en Annexe.

Le calcul de l'écoulement de puissance est effectué en trois états du réseau :

III.1. Etat initial du réseau

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau (III.1) et figures (III.2), (III.3) et (III.4) :

Tab.III.1 : Solution de l'écoulement de puissance

N° de Nœud	$V_{\text{nœud}}$ (pu)	Résultats de [19]	Les pertes totales
1	1.0000	1.0000	Puissance active : 860.0972 kW
2	0.9929	0.9929	
3	0.9823	0.9823	
4	0.9581	0.9581	
5	0.9427	0.9427	
6	0.9116	0.9116	Puissance réactive : 1048.6 kVAr
7	0.9015	0.9015	
8	0.8832	0.8832	
9	0.8527	0.8527	
10	0.8314	0.8314	

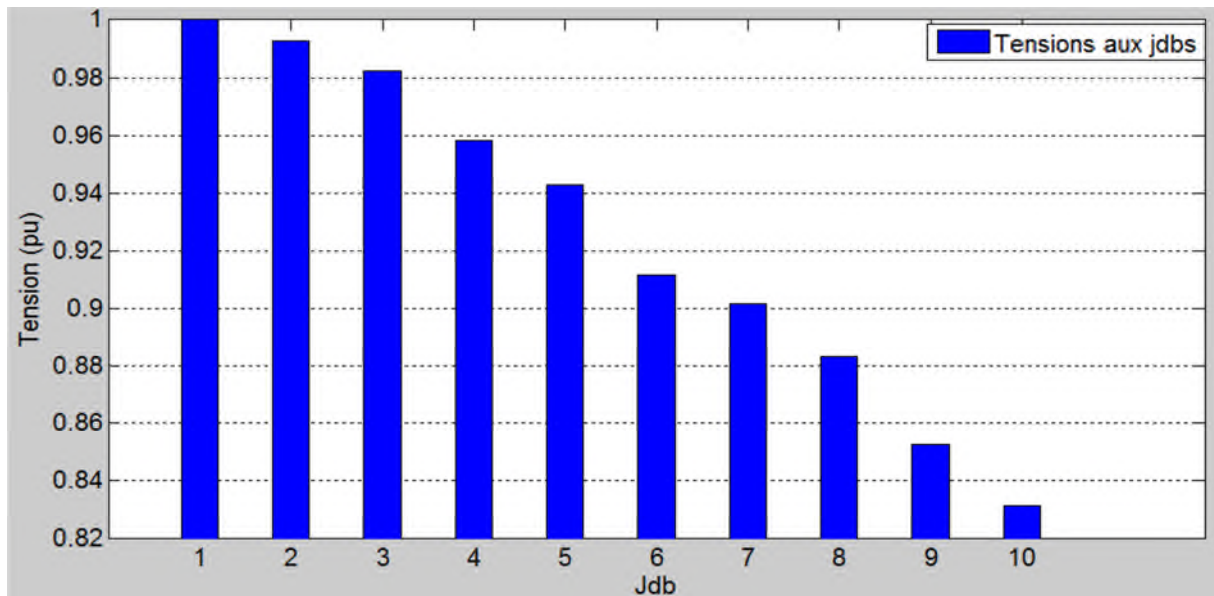


Fig. III.2 : Tensions aux nœuds du réseau.

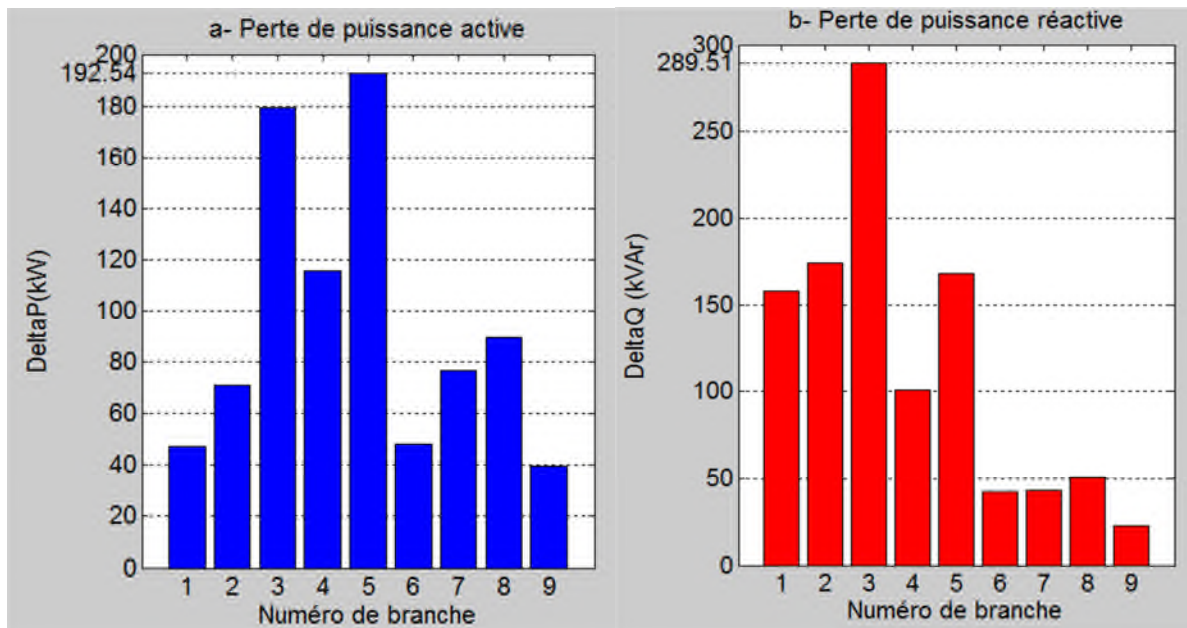


Fig.III.3 : Les pertes de puissance active et réactive dans les branches.

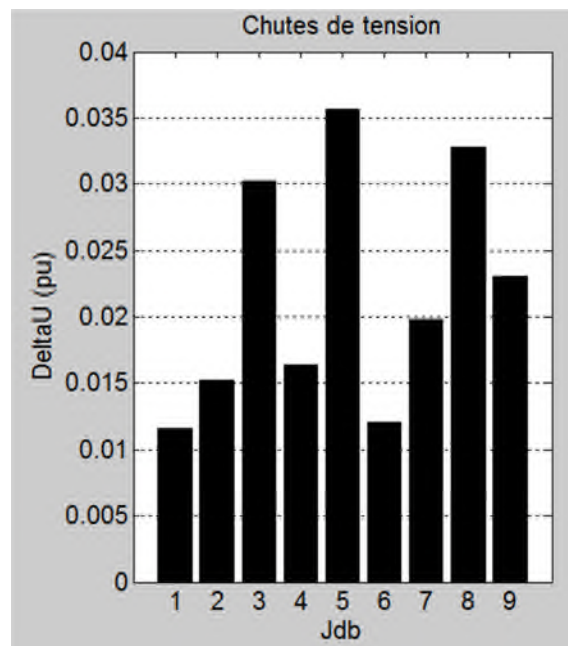


Fig. III.4 : Chutes de tension dans les branches

III.1.1 Discussion des résultats

Les résultats de l'écoulement de puissance sont résumés dans le tableau (III.1). On remarque que la plus grande tension atteint une amplitude de 0.9929 pu au deuxième jeu de barre, le premier étant celui du générateur dont la tension est imposée et fixée. La plus faible tension est observée au niveau du dernier jeu de barre, cela est justifié par l'accumulation des chutes de tension dans les branches. Pour les pertes de puissance, nous notons qu'elles sont

respectivement 860.0972 kW et 1048.6 kVAr. La figure (III.3) montre que les plus grandes pertes de puissances active et réactive sont enregistrées respectivement au niveau de la 5^{ème} et la 3^{ème} branche avec des valeurs de 192.54 kW et 289.51 kVAr, cela est justifié par les valeurs des impédances de ces lignes.

Dans la figure (III.4), on note que la chute de tension la plus importante est située au niveau de la 5^{ème} branche avec une valeur de 0.0356 p.u suivie de la 8^{ème} branche avec une chute de tension égale à 0.0328 p.u, ces valeurs ne peuvent être justifiées qu'avec les valeurs des impédances relativement élevées dans ces branches, le courant étant la somme de ceux demandés par les charges en aval.

III.2 Etat du réseau avec insertion d'un générateur éolien

Dans le but de voir le comportement du réseau de distribution vis-à-vis d'une intégration éolienne, nous avons inséré un générateur de puissance fluctuante comme le montre la figure (III.5) au nœud qui présente une chute de tension importante.

Le taux d'intégration a été choisi entre 20% et 30% de la puissance totale appelée par les charges (III.5), c.à.d. entre 0.886 p.u et 0.5909 p.u, ce qui équivaut à 3710.4 kW et 2473.6 kW respectivement. Dans ce qui suit, nous allons présenter les résultats des tensions dans les nœuds 10, 8, 5 et 2 avant et après insertion de l'éolienne (Fig.III.6), (Fig.III.7).

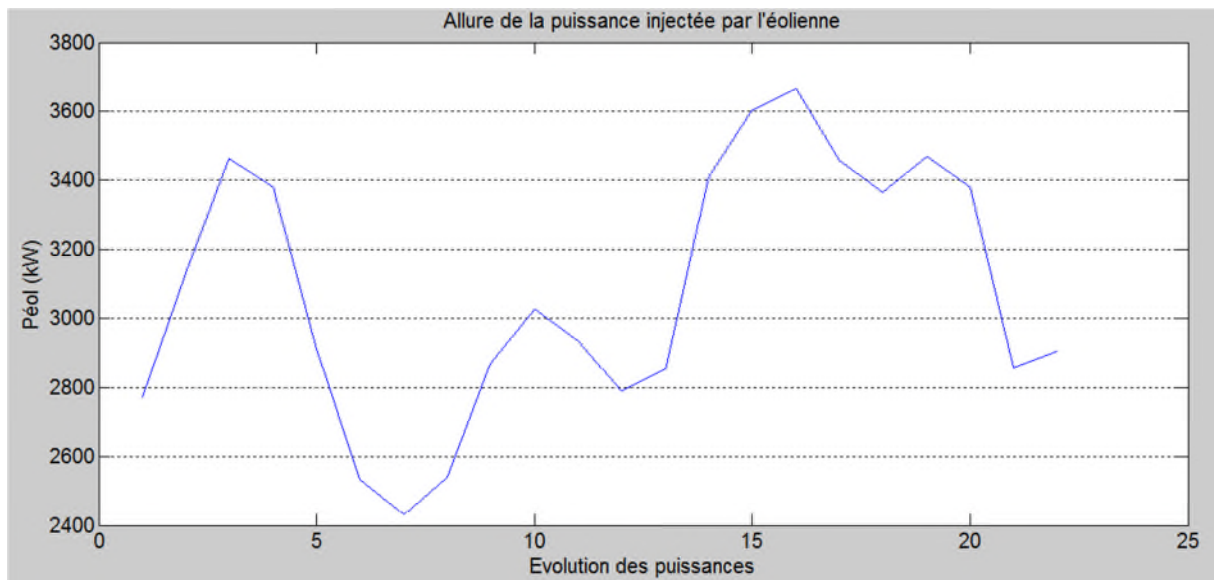


Fig.III.5 : Courbe de la puissance active injectée par l'éolienne

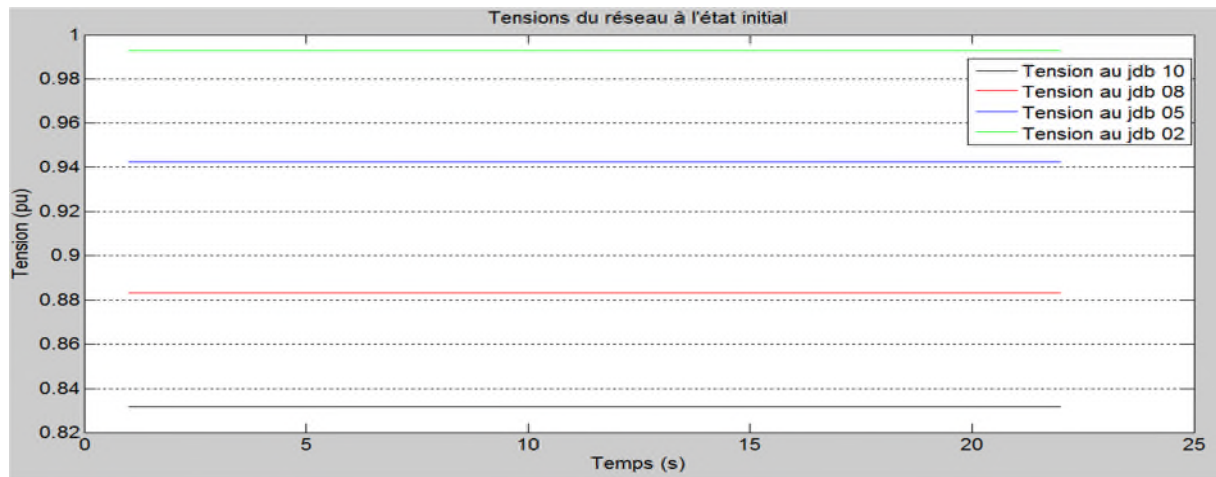


Fig. III.6 : Tensions aux jdb 10,8 5 et 2 avant insertion du générateur éolien.

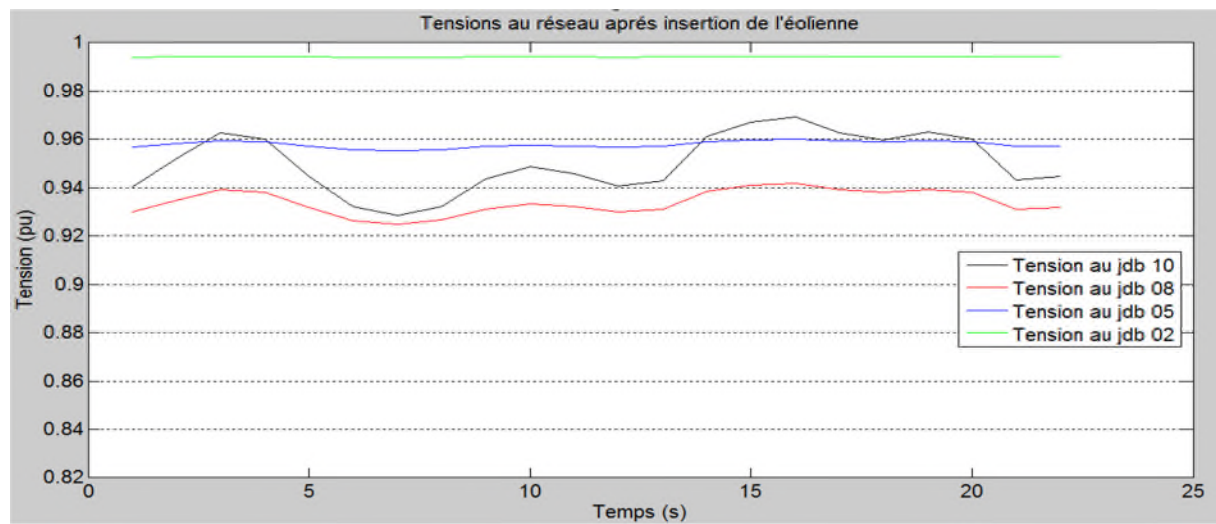


Fig. III.7 : Tensions aux jdb 10,8 5 et 2 après insertion de l'éolienne.

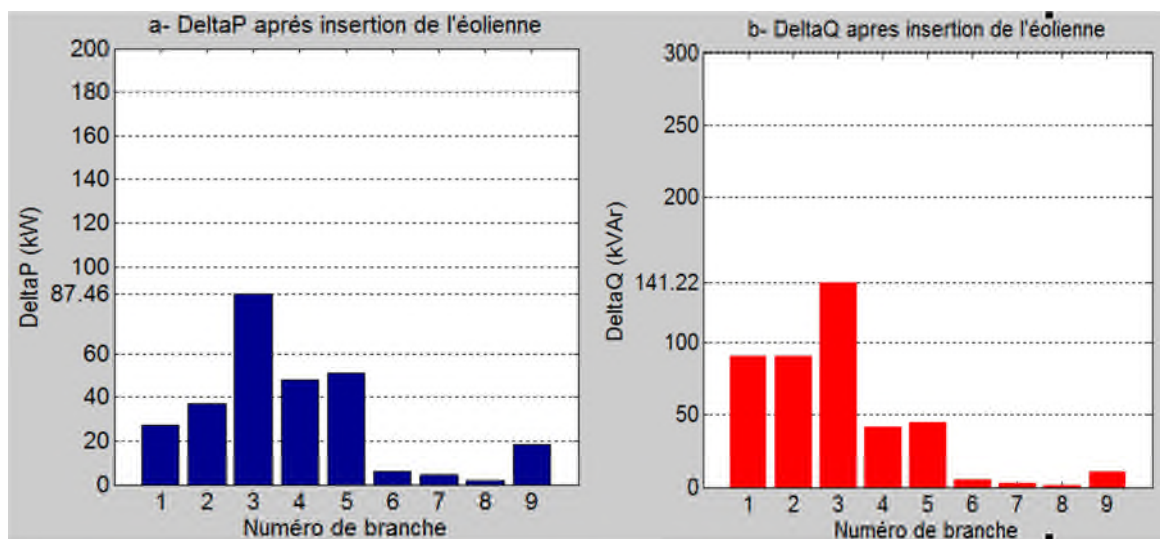


Fig. III.8 : Pertes de puissances active et réactive après insertion de l'éolienne

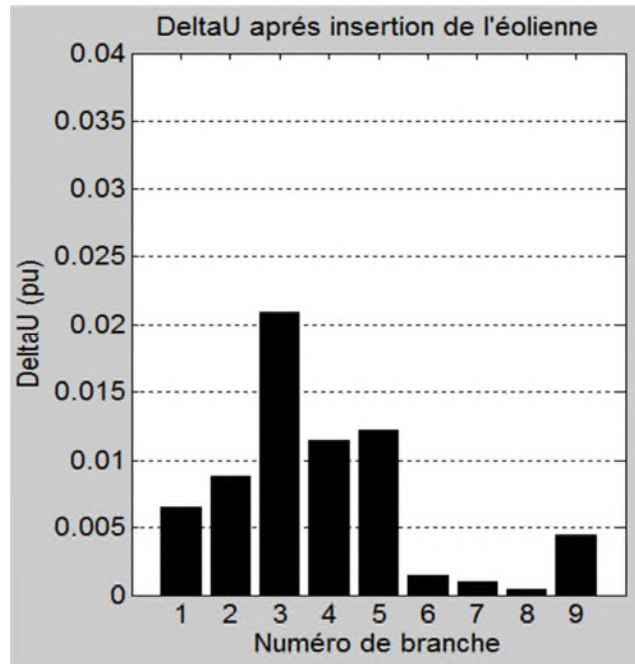


Fig. III.9 : Chutes de tension après insertion de l'éolienne

III.2.1 Discussion des résultats

La première chose à remarquer dans les figures (III.6) et (III.7) est l'amélioration de l'amplitude des tensions, spécialement le nœud où le générateur éolien a été installé (de 0.8314 p.u à 0.9447 p.u). Une autre chose à mentionner est la forme de l'onde de tension qui n'est plus constante mais de forme fluctuante car elle suit le profil de la puissance de l'éolienne injectée. Cette perturbation se propage sur les nœuds voisins mais n'atteint pas le 2^{ème} jeu de barre. L'augmentation des tensions aux jeux de barres au-delà du 8^{ème} est dus au fait que le courant de ligne a diminué, ce qui a pour effet de réduire les chutes de tensions (Figure.III.9).

Nous observons aussi la diminution remarquable des pertes de puissances active et réactive dans les branches. Avant l'intégration de l'éolienne, la somme des pertes actives était de 860.0972kW, mais après, elle a diminué jusqu'à atteindre 281.4707 kW, c.à.d. une baisse de deux tiers. Quand à la puissance réactive qui était à 1048.6 kVAr, elle a baissé jusqu'à 428.4 kVAr. Le maximum des pertes actives est enregistré au niveau de la 3^{ème} branche avec 87.46 kW, le maximum des pertes réactives à son tour se trouve au niveau de la 3^{ème} branche avec une puissance de 141.22 kVAr.

Les pertes dans les branches situées à proximité du dernier nœud sont presque nulles, cela est due au fait de l'existence d'un courant venant dans le sens inverse du courant délivré par la

source comme on le constate dans la figure (III.10). Ce qui justifie aussi le fait que le maximum des pertes s'est déplacé de la 5^{ème} branche vers la 3^{ème}.

Les chutes de tension, par conséquent, ont diminué dans toutes les branches et spécialement dans la huitième où est situé le nœud d'équivalence alimenté par les deux générateurs.

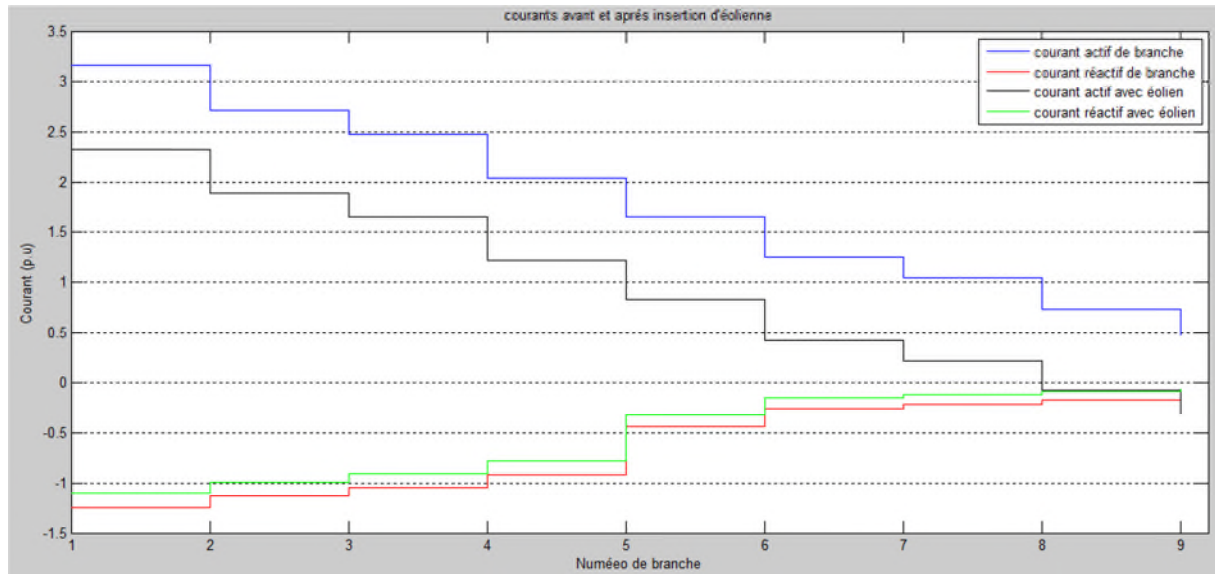


Fig. III.10 : Courants actifs et réactif avant et après insertion de l'éolienne.

III.3 Régulation de la tension

Nous avons vu dans la figure (III.7) que l'allure des tensions est de forme fluctuante, car elle suit celle de la puissance éolienne injectée. Pour cela, une compensation est nécessaire afin de réguler ces tensions. La compensation s'est portée sur le dernier nœud où la perturbation est plus importante (Figure.III.7). Le but de cette partie du travail est de calculer la puissance réactive nécessaire pour réguler ses tensions. Les valeurs de la tension au nœud 10 obtenues dans la partie précédente sont fluctuantes autour d'une valeur de 0.95 p.u, cette valeur est prise comme tension de référence pour la régulation.

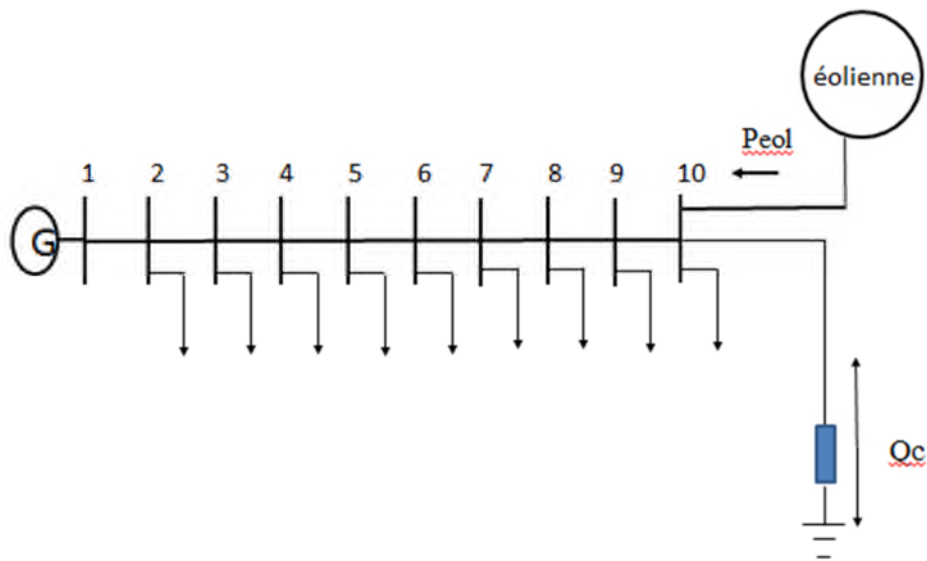


Fig.III.11 Schéma du réseau avec éolienne et compensateur

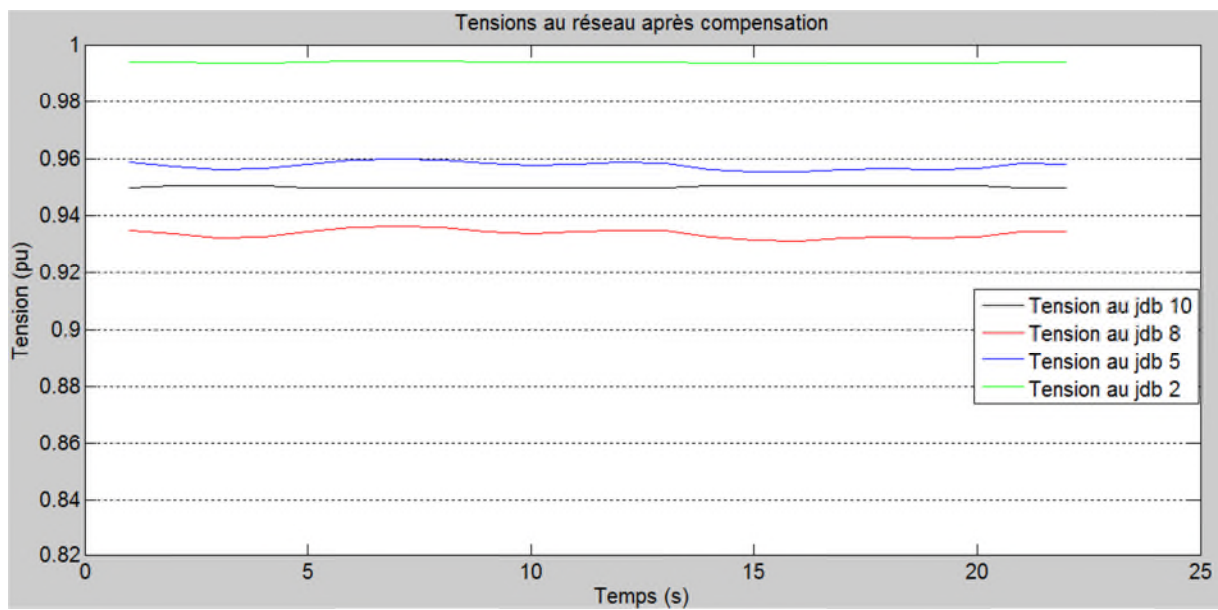


Fig. III.12 : Tensions avec compensation aux jdbs 10, 8, 5 et 2.

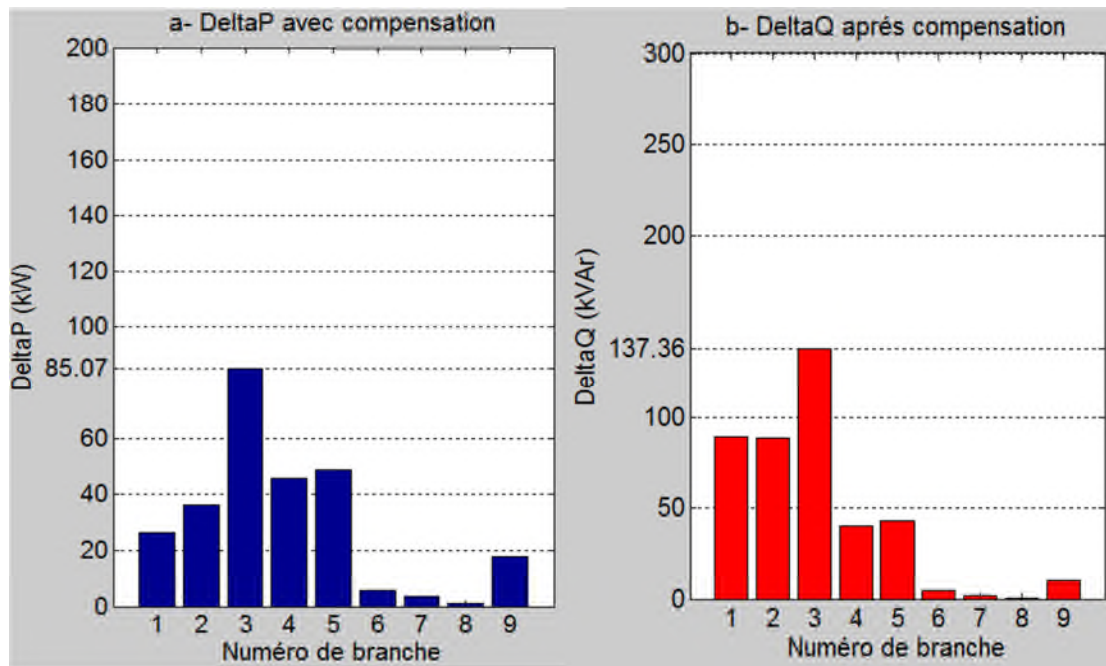


Fig. III.13 : Pertes de puissance active et réactive après compensation.

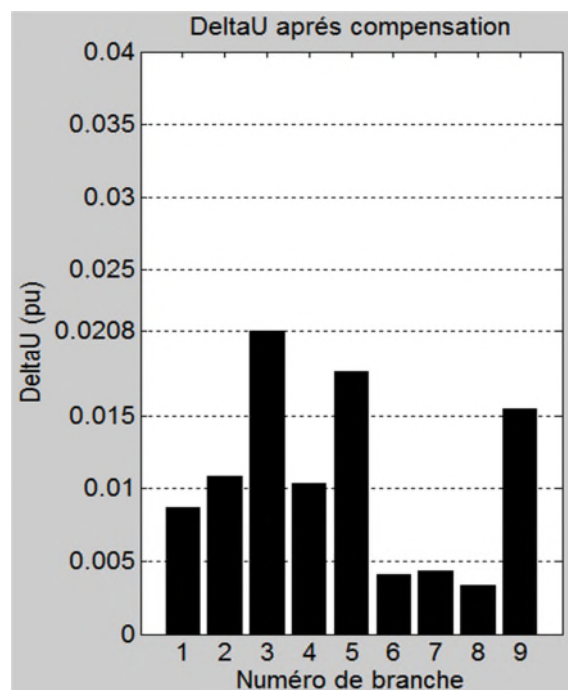


Fig. III.14 : Chutes de tension après compensation.

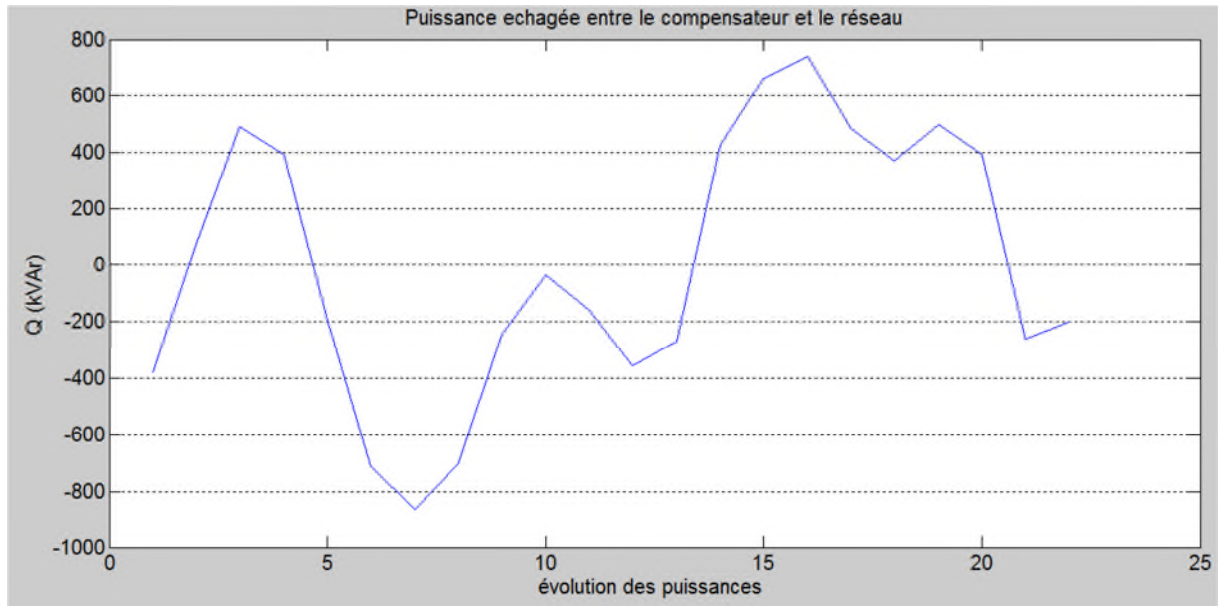


Fig.III.15 Courbe de la puissance réactive fournie/consommée par le compensateur.

Tab.III.2 : Somme des pertes actives et réactives dans les trois cas

Pertes	état initial	Réseau avec générateur éolien	Réseau avec générateur éolien et compensation
Pertes actives (kW)	860.0972	281.4707	271.2271
Pertes réactives (kVAr)	1048.6	428.3993	415.7770

Tab.III.3 : Chutes de tension avant et après compensation

Numéro de branche	Avant Compensation (Volt)	Après compensation (Volt)
1-2	201.8994	200.0526
2-3	253.2780	250.2784
3-4	485.2314	478.5611
4-5	243.0123	238.2121
5-6	422.0650	413.6574
6-7	97.3547	94.3120
7-8	107.0921	99.5209
8-9	111.2317	77.3661
9-10	362.1849	355.8561

III.3.1 Discussion des résultats

La figure (III.12) présente les tensions après la compensation insérée au nœud 10. On remarque que les tensions sont moins fluctuantes qu'avant l'insertion du compensateur.

On observe aussi comme le montre la figure (III.13) et le tableau (III.2) une petite diminution des pertes en puissances active et réactive. Les pertes active et réactive totales sont respectivement 271.23 kW et 415.77 kVAr, on remarque une légère diminution dans ces dernières due à la diminution de la puissance réactive transportée dans les lignes, par conséquent, les chutes de tension ont aussi légèrement diminué comme le montre le tableau (III.3).

Les valeurs des puissances réactives injectées que nous avons trouvées suivent le comportement de la puissance de l'éolienne.

Lorsque la tension au nœud 10 est supérieure à la tension de référence, chose qui est causée par une forte puissance éolienne injectée, le compensateur consomme de l'énergie réactive (fonctionnement inductif) afin de baisser la tension. Dans le cas contraire, nous avons un effet capacitif, c.à.d. que le compensateur fournit de l'énergie au réseau afin d'augmenter la tension. La figure (III.15) résume les échanges de puissance réactive effectués entre le réseau et le compensateur.

Les résultats obtenus par la programmation ont été comparés et validés par rapport à ceux effectués par simulation avec l'application d'un régulateur flou [14] pour contrôler la tension au nœud de connexion. Le schéma bloc est représenté sur la figure (III.16)

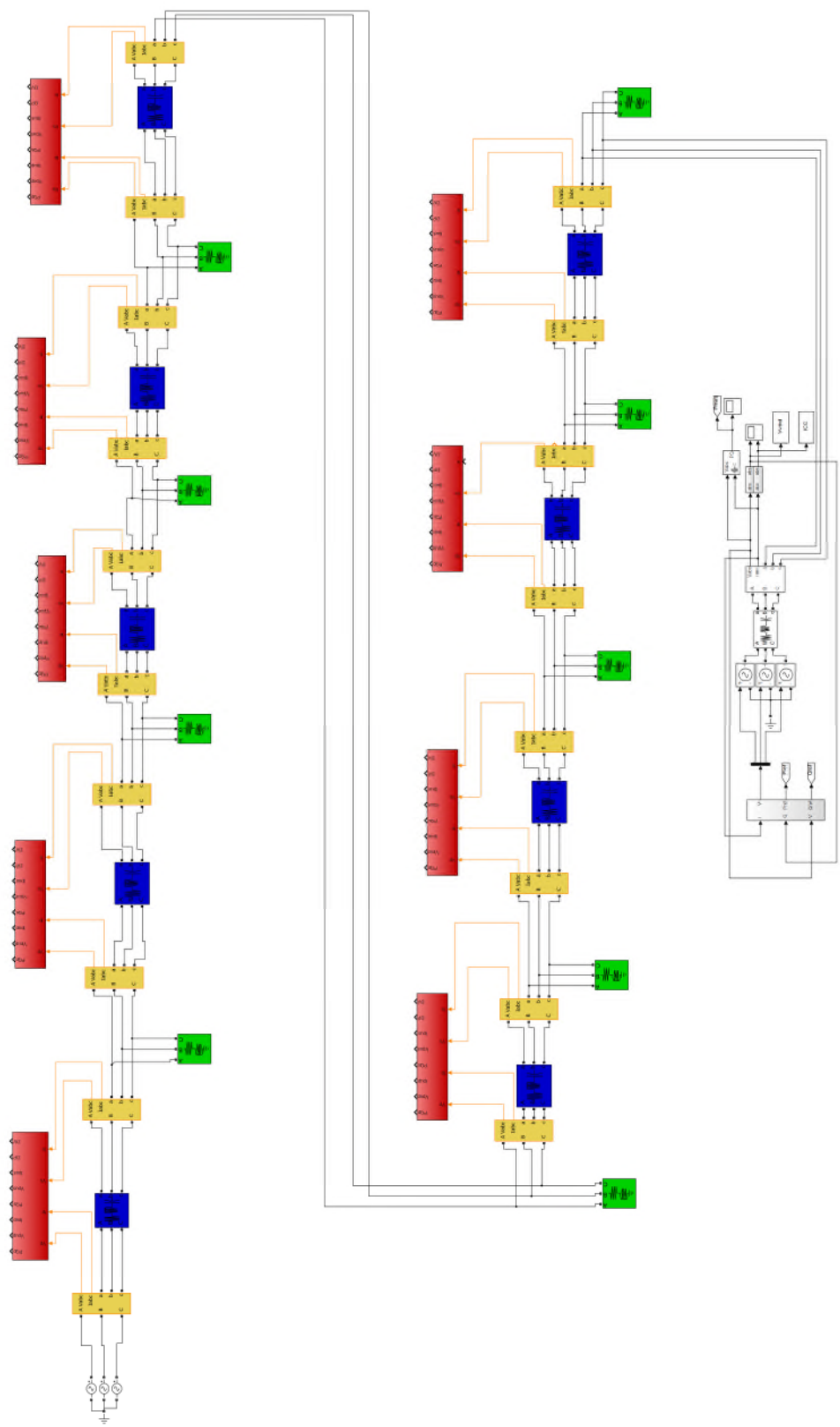


Fig. III.16 : Schéma globale du système étudié

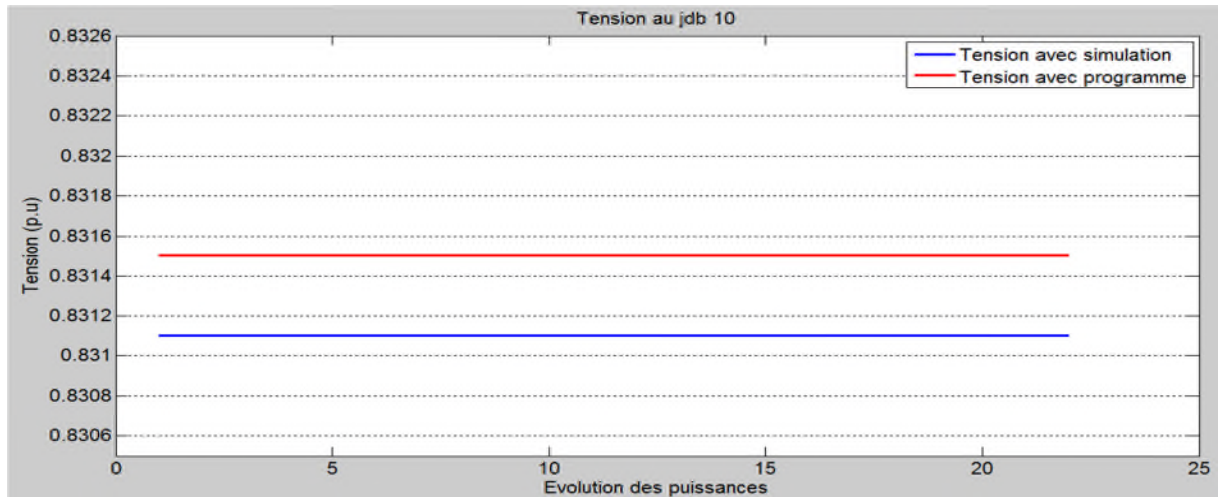


Fig. III.17 : Tension initiale au jdb 10.

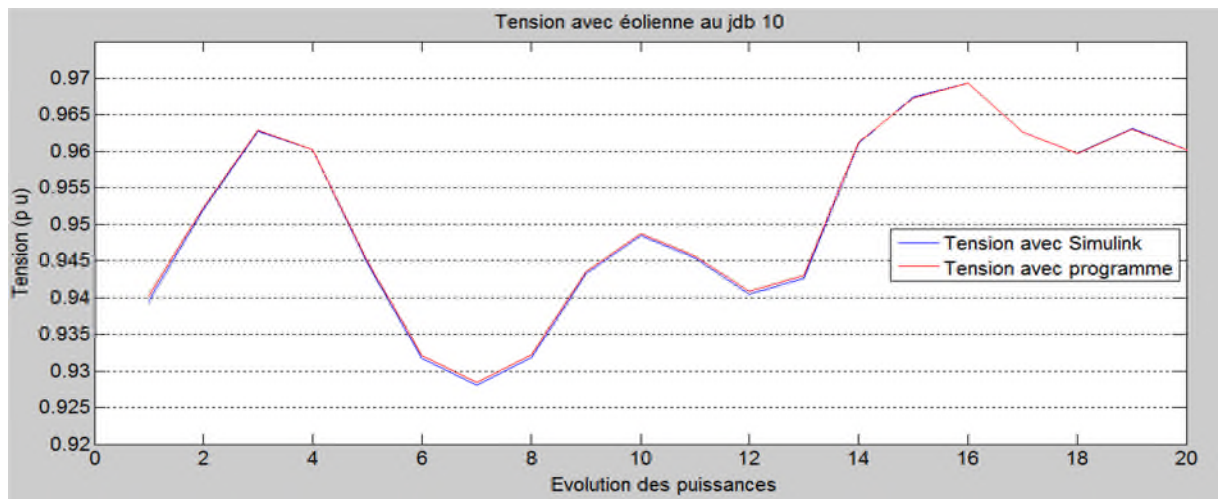


Fig. III.18 : Tension au jdb 10 avec éolienne.

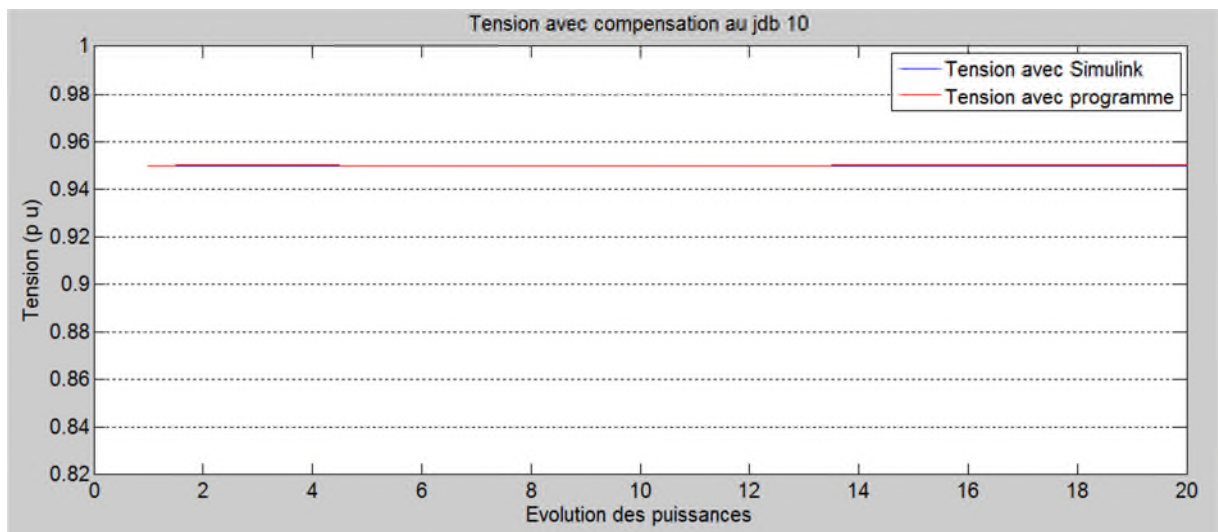


Fig. III.19 : Tension avec compensation au jdb 10.

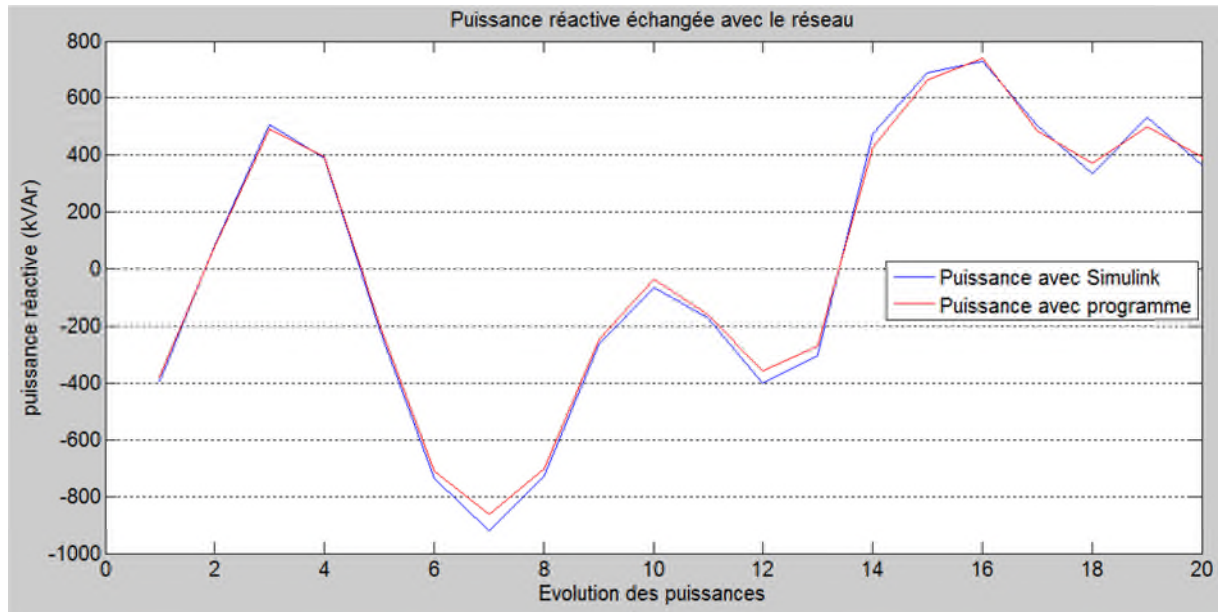


Fig.III.20 : Puissance réactive de compensation échangée avec le réseau.

III.4.1 Discussion des résultats

La figure (III.17) illustre les tensions obtenues dans le programme ainsi que celle donnée par la simulation, on remarque que les deux sont quasiment égales, avec une erreur relative de 0.04%.

La courbe dans la figure (III.18), montre la forme de la tension après l'insertion de l'éolienne dans les deux cas, les courbes sont superposées et les valeurs obtenues dans le programme confirment celles données par la simulation.

Pour la figure (III.19), on remarque la superposition des deux courbes de tension obtenues par le cas statique et dynamique.

La figure (III.20) représente les puissances réactives échangées entre le réseau et le compensateur, on remarque une légère différence due à la précision utilisée dans le programme et le pas avec lequel la puissance réactive est ajoutée.

Conclusion

Ce chapitre est divisé en quatre parties essentielles. La première consiste à évaluer les différentes grandeurs caractérisant le réseau de distribution radial à 10 jdb (Tensions, puissances et pertes) dans son état initial.

En deuxième partie, nous avons inséré un générateur éolien avec une puissance fluctuante au nœud qui représente la tension la plus faible, et étudier l'intégration éolienne sur le plan de tension, nous avons remarqué que ces dernières suivent exactement l'allure des puissances éoliennes, spécialement le nœud où elle est insérée. Nous avons remarqué aussi la baisse des pertes en puissances active et réactive ainsi que les chutes de tension dans les branches. En revanche, cette insertion a conduit à un soulagement de la source principale et ça se confirme par la valeur de puissance apparente totale fournie au réseau qui est passée de 14222 kVA à 10781 kVA après son insertion, c.-à-d. une baisse de 25%.

Ce résultat a été confirmé dans les deux cas d'étude (statique et dynamique)

A cause des perturbations sur les allures des tensions, la régulation a été effectuée, en calculant la puissance réactive nécessaire à fournir ou à consommer pour améliorer le profil de la tension.

Les résultats ont été comparés et validés pour les deux cas d'étude.

Conclusion générale

La demande de l'électricité est en constante croissance, pour satisfaire cette demande, plusieurs techniques ont été mis au point, la première solution est de réaliser un réseau de transport qui va relier l'ensemble des centrales de production afin de répartir la charge demandée. Cela n'a pas suffi à cause de l'apparition de nouvelles extensions et l'augmentation exponentielle de la consommation de l'énergie électrique. Pour compenser ce manque, on a introduit dans le réseau de nouvelles sources d'énergie moins puissantes que les premières, appelées sources de production décentralisée. On y trouve des sources d'énergies renouvelables, ainsi que des génératrices à faible puissance. Cependant, et malgré leur apport positif en puissance, quelques unes de ces énergies renouvelables ont une influence négative sur les paramètres du réseau électrique, notamment la tension.

Le travail s'est porté sur l'influence de l'insertion d'une production éolienne sur le réseau électrique, ainsi que la solution adoptée afin d'améliorer la qualité de cette insertion. Afin d'arriver à cet objectif, nous avons partagé notre mémoire en trois chapitres.

Dans le premier chapitre, nous avons mis en évidence un ensemble de généralités sur les réseaux électriques, nous avons développé les équations de l'écoulement de puissance régissant sur un réseau maillé, ainsi que les méthodes généralement utilisées afin de résoudre ce système d'équations, par la suite, nous avons abordé le problème de l'impact des productions décentralisées sur le réseau de distribution radial. Par la suite, nous avons proposé quelques moyens de compensation dans le but d'améliorer la qualité d'énergie. Finalement, nous avons introduit le concept de la logique floue et son utilisation dans les régulateurs.

Dans le second chapitre, nous avons proposé quelques méthodes simples et rapides de résolution du problème de l'écoulement de puissance dans le réseau de distribution radial. Pour la suite du travail, nous avons opté pour la méthode (II.4) proposée dans ce chapitre.

Nous avons consacré le dernier chapitre de ce mémoire à la présentation des résultats obtenus par la programmation sous MATLAB du calcul de l'écoulement de puissance dans un réseau de distribution à 10 JDBs sans et avec insertion d'un générateur éolien afin d'évaluer l'impact de cette dernière sur le plan de tension et finalement une compensation au niveau du nœud de connexion du générateur a été indispensable afin de réguler la tension.

Les résultats obtenus par la programmation ont été comparé avec ceux obtenus en utilisant la simulation sous MATLAB du même réseau, avec un régulateur flou pour améliorer le profil de la tension, les résultats ont été très satisfaisants.

Bibliographie

- [1]:Arnaud VERGNOL. « Intégration dans le réseau électrique et le marché de l'électricité de production décentralisée d'origine renouvelable (Gestion de congestion°)» Thèse Doctorat. 2010
- [2]:Egor GLADKIKH. « Optimisation de l'architecture des réseaux de distribution de l'énergie électrique » Thèse Doctorat. 2006
- [3] Narimen AOUZELLAG. « Contribution à l'Amélioration de la Flexibilité dans les Réseaux Electriques liée à l'Intégration des Générateurs Eoliens » Thèse Doctorat. 2011
- [4]:Sellé TOURÉT. « Optimisation des réseaux « réseau actif et flexible » Thèse Doctorat.2014
- [5]: P.S.R.Murty. "Power System Analysis", BS Publications 2007
- [6]: DEBAPRIYA.DAS. "Electric Power System". New Age International (P) Ltd. 2006
- [7] Nicolas LAVERDURE. « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires »Thèse Doctorat.2005
- [8] Arnaud DAVIGNY, « Participation aux services système de fermes d'éoliennes à vitesse variable intègrent du stockage inertiel d'énergie» Thèse Doctorat.2007
- [9] Thu Hà PHAM, « Influence de la production décentralisée sur la gestion des infrastructures critiques des réseaux de puissance». Thèse Doctorat 2006
- [10] Sahli Abdeslem : « Filtrage actif et contrôle de puissances : Application aux systèmes Photovoltaïques interconnecté au réseau » ; mémoire Magister ; université de Sétif ; 2012
- [11] Abdelmadjid Chaoui. « Filtrage actif triphasé pour charge non linéaire »Thèse doctorat ; Sétif 2010
- [12] Mohamed Magraoui. « Validation de techniques de commande d'un filtre parallèle » Thèse Doctorat. Québec 2007.
- [13] François CHEVRIE, François GUELY, Cahier technique Schneider n° 191, Mars 1998
- [14] Samira CHEKKAL, « Intégration des Génératrices Asynchrones à Double étoiles dans un Système Eolien ». Thèse Doctorat. 2015
- [15] Ulas Eminoglu, M. Hakan Hocaoglu. « A new power flow method for radial distribution systems including voltage dependent load models ».Electric Power Systems Research 76 106–114. 2005
- [16] Manuel A. Matos. «A new power flow method for radial networks »

- [17] Smarajit Ghosh, Karma Sonam Sherpa. « An Efficient Method for Load Flow Solution of Radial Distribution Networks »2008. International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering Vol: 2, No:9
- [18] Ritu Parasher. «Load flow analysis of radial distribution network using linear data structure » Department of Computer Science & Engineering, Yagyavalkya Institute of Technology, Jaipur Rajasthan Technical University, Kota.October, 2013
- [19] Wissal TEBANI, «Compensation optimale de l'énergie réactive dans les réseaux de distribution » Thèse magister,2012.

ANNEXE

Annexes 1 :

Les données du réseau radial avec une seule branche à 10 jeux de barres sont consignées dans le tableau.1. La tension de base est égale à 23 kV, la puissance de base est égale 4186 kVA.

Tableau. A.1 : Données de la ligne de 10 jeux de barres

Numéro de branche	Départ de nœud	Nœud d'arrivé	R(ohm)	X(ohm)	P (kW)	Q(KVA)
1	1	2	0.1233	0.4127	1840	460
2	2	3	0.2466	0.6051	980	340
3	3	4	0.7463	1.2050	1790	446
4	4	5	0.6984	0.6084	1598	1840
5	5	6	1.9831	1.7276	1610	600
6	6	7	0.9053	0.7886	780	110
7	7	8	2.0552	1.1640	1150	60
8	8	9	4.7953	2.7160	980	130
9	9	10	5.3434	3.0264	1640	200

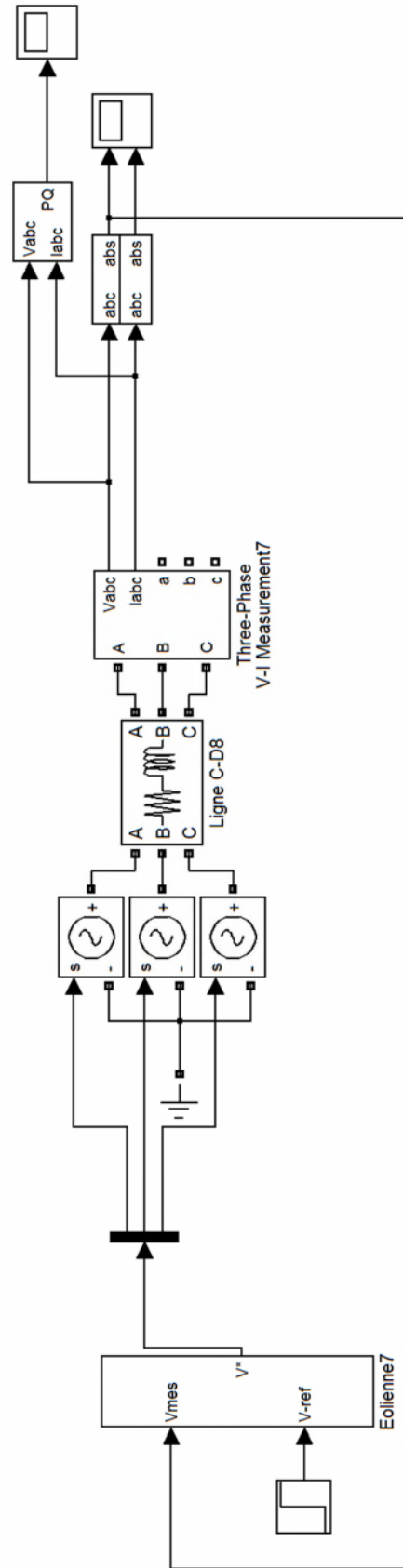


Schéma bloc éolienne