

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8 Mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique

Réf:...../2019



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER Académique**

Domaine: Sciences et Technologie

Filière: Electrotechnique

Spécialité: Réseaux électriques

Par: NAWA Hacenna

Thème

Intégration des énergies éoliennes dans le réseau électrique

Soutenu publiquement, le 02 / 07 / 2019, devant le jury composé de:

M. BOULOUEH Messaoud	Professeur	Univ. Guelma	Président
M. LADJIMI Abdelaziz	MCA	Univ. Guelma	Encadrant
M. FERAGA Chams-Eddine	MCA	Univ. Guelma	Examineur

Année Universitaire: 2018/2019

Résumé :

Ce travail porte l'étude de l'effet d'intégration des générateurs éoliens sur l'exploitation du réseau de distribution.

Le 1^{er} chapitre traite les caractéristiques des réseaux de distribution électriques avec une petite généralité sur les réseaux électriques, le réseau algérien et le contrôle de tension par la présence d'une production décentralisée.

Le deuxième chapitre expose l'aspect des énergies éoliennes ; principe de conversion pour la production électrique, ses différents types, leur rendement par la limite de Betz, ainsi sa modélisation mathématique et les principales techniques des aérogénérateurs.

Le troisième chapitre s'intéresse sur les techniques de raccordement des énergies renouvelables en particulier l'énergie éolienne et ces différents types, ensuite les impacts d'intégration dans le réseau de distribution électrique.

Dans le dernier chapitre nous présentons un calcul d'écoulement de puissance dans un réseau de distribution radial sans et avec générateur éolien sous environnement MATLAB.

Mots clés : Réseau de distribution, Energie éolienne, Ferme éolienne, Production décentralisée, Ecoulement de puissance.

Abstract:

This work examines the integration effect of wind generators on the operation of the distribution network.

The first chapter treats the characteristics of the electrical distribution networks with a small generality on the electrical networks, the Algerian network and the voltage control by the presence of a decentralized production.

The second chapter describes the aspect of wind energy; conversion principle for electrical generation, its different types, their yield by the Betz limit, as well as its mathematical modeling and the main techniques of wind turbines. The third chapter focuses on the techniques of connecting renewable energies, in particular the wind energy and these types, then the integration impacts in the electricity distribution network.

In the last chapter, we present a calculation of power flow in a radial distribution network with and without wind generator in MATLAB environment.

Key words: Distribution network, Wind energy, Wind farm, Decentralized generation, Power flow.

الملخص

يقدم هذا العمل تأثير دمج مولدات الرياح على تشغيل شبكة التوزيع.

يتناول الفصل الأول خصائص شبكات التوزيع الكهربائية ذات العمومية الصغيرة على الشبكات الكهربائية والشبكة الجزائية والتحكم في الجهد من خلال إنتاج لامركزي.

يصف الفصل الثاني جانب طاقة الرياح. مبدأ التحويل لتوليد الكهرباء ، أنواع توربينات الرياح ، عائدها من حد Betz ، وكذلك نمذجة الرياضي وتقنياتها الرئيسية.

يركز الفصل الثالث على تقنيات ربط الطاقات المتجددة ، وخاصة طاقة الرياح وأنواعها ، ثم تأثيرات الاندماج في شبكة توزيع الكهرباء.

في الفصل الأخير ، نقدم حساباً لتدفق الطاقة في شبكة توزيع نصف قطرية مع وبدون مولد الرياح باستخدام MATLAB.

الكلمات المفتاحية: شبكة التوزيع ، طاقة الرياح ، مزرعة الرياح ، التوليد اللامركزي ، تدفق الطاقة.

Remerciements

Tout d'abord, je remercie dieu à tout puissant de m'avoir donné le courage et la force.

Egalement, j'exprime mes plus profonds remerciements à :

- *Mes parents pour leur soutien moral et matériel,*
- *Mon encadrant, Mr. Ladjimi Abdelaziz pour ces aides et conseils durant la préparation de ce mémoire,*
- *L'ensemble des membres du jury de m'avoir fait l'honneur de juger ce travail,*
- *toute l'équipe pédagogique du département de génie électrotechnique et automatique et en particulier les responsables de la formation réseaux électriques et tous les étudiants de ma promotion.*

Je remercie également toutes personnes qui m'a apporté de l'aide, soit par leurs connaissances dans des domaines spécifiques, soit sous forme de conseils.

Sommaire

Introduction générale	01
Chapitre I Les réseaux de distribution électriques	
I.1. Introduction	02
I.2. Généralités sur le réseau électrique	02
I.2.1. Rappel sur la production de l'énergie électrique	02
I.2.2. Système de transformation	03
I.2.3. Description des réseaux électrique	03
I.2.4. Le réseau de transport	03
I.2.5. Le réseau de distribution	04
I.2.6. Structures topologiques des réseaux	04
I.2.6.1. Réseau radial	04
I.2.6.2. Réseau bouclé	04
I.2.6.3. Réseau maillé	04
I.3. Caractéristiques des réseaux de distribution	04
I.3.1. Caractéristiques générales	04
I.3.2. Le réseau électrique algérien	05
I.3.3. Les niveaux de tension	05
I.3.4. Les postes sources HTB/HTA	06
I.4. Réglage de tension dans les réseaux de distribution	06
I.4.1. Qualité de service	06
I.4.2. Le réglage de tension pour la sécurité des réseaux	07
I.4.3. Le réglage de tension pour l'exploitation normale des réseaux	07
I.5. Réglage de la tension dans les réseaux de distribution actuels	09
I.5.1. Compensation de puissance réactive au poste source	09
I.5.2. Les régulateurs en charge	09
I.5.3. Le réglage par la production décentralisée (PD)	09
I.6. Tenu de fréquence	11
I.7. Conclusion	11
Chapitre II L'énergie éolienne	
Aspect et modélisation	
II.1. Introduction	13
II.2. Définition de l'énergie éolienne	13
II.3. Principe du vent	13
II.4. Principe de conversion	14
II.5. Les différents types des turbines éoliennes	14
II.5.1. Eolienne à axe verticale	14
II.5.1.1. Les différents types d'éolienne à axe vertical	14
II.5.1.1.1. Les éoliennes verticales Darrieus	15
II.5.1.1.2. Les éoliennes verticales Savonius	15
II.5.2. Eolienne à axe horizontale	16
II.5.3. Composantes d'une éolienne à axe verticale	17
II.5.4. L'énergie éolienne en Algérie	18
II.6. Modélisation de la turbine éolienne	18
II.6.1. L'énergie récupérable par une turbine et limite de Betz	18
II.6.2. Limite de Betz	19
II.6.3. Modèle du multiplicateur	20
II.6.4. Equation dynamique de l'arbre	20

II.7. Les générateurs éoliens	21
II.7.1. Eolienne à vitesse fixe	21
II.7.2. Eolienne à vitesse variable	22
II.7.2.1 Eolienne à base de machine asynchrone à double alimentation (MADA)	22
II.7.2.2. Eolienne à base de machine synchrone à aimants permanents (MS)	23
II.8. Conclusion	24

Chapitre III Raccordement d'énergie renouvelable dans le réseau de distribution et leurs impacts

III.1. Introduction	26
III.2. Technique de raccordement	26
III.2.1. Connexion au réseau	26
III.2.2. Tension de raccordement	26
III.2.3. La capacité d'accueil des réseaux	27
III.2.4. Types de raccordement	28
III.3. Les impacts de l'intégration d'un système éolien dans le réseau	29
III.3.1. Impacts Locaux	29
III.3.1.1. Plan de tension	29
III.3.1.2. Court-Circuit	30
III.3.1.3. Plan de protection	30
III.3.2. Impact globaux	31
III.3.2.1. Impact sur le fonctionnement des systèmes	31
III.3.2.2. Capacité de transport	31
III.3.2.3. Impacts sur le sens de transit de puissance	32
III.3.2.4. Dispatching	32
III.4. Conclusion	32

Chapitre IV Etude de l'écoulement de puissance avec et sans intégration d'un générateur éolien

IV.1. Introduction	33
IV.2. Généralités sur la répartition de puissance	33
IV.2.1. Le but de l'écoulement de puissance	33
IV.2.2. Classification des jeux de barres	33
IV.3. Méthode de calculs d'écoulement des puissances	34
IV.3.1. Méthode matricielle pour la résolution des équations d'écoulement de puissance en réseau radial	34
IV.3.1.1. Détermination de la valeur du courant dans chaque branche	34
IV.3.1.2. Détermination l'amplitude de la tension ainsi que son déphasage à chaque nœud	36
IV.3.2. Méthode se basant sur la topologie d'un réseau de distribution	38
IV.3.2.1. Construction de la Matrice [BIBC]	38
IV.3.2.2. Construction de la Matrice [BCBV]	40
IV.3.2.3. Développement de la méthode	41
IV.3.2.4. Algorithme de la méthode	42
IV.4. Simulation et interprétation des résultats	42
IV.4.1. Topologie du réseau étudié	43
IV.4.2. Résultats de simulation	43
IV.5. Interprétation des résultats	48
IV.6. Conclusion	48
Conclusion générale	50

Liste des figures

Figure I.1 : Schémas d'un réseau électrique	03
Figure I.2 : Appellations normalisées des différents niveaux de tension	06
Figure I.3 : Schéma de principe d'un poste source HTB/HTA	05
Figure I.4 : Modèle de ligne en π	08
Figure I.5 : Diagramme de Fresnel de la ligne en π	08
Figure I.6 : Détermination de la chute de tension sur une ligne	10
Figure II.1 : Schéma d'une turbine éolienne	13
Figure II.2 : Schéma de différents types d'éoliennes Darrieus	15
Figure II.3 : Schéma d'une éoliennes Savonius	15
Figure II.4 : Schéma d'une éolienne à axe verticale	16
Figure II.5 : Schéma des différentes composantes d'une éolienne à axe horizontale	17
Figure II.6 : Colonne d'air	18
Figure II.7 : Schéma du courant d'air traversant une turbine	19
Figure II.8 : Structure d'une éolienne à vitesse fixe	22
Figure II.9 : Structure d'une éolienne à base MADA	23
Figure II.10 : Structure d'une éolienne à base de MS à aimants permanents	23
Figure III.1 : Modèle d'un départ HTA « à grandeurs uniformément réparties »	28
Figure III.2 : Illustration des configurations de raccordement (a) en départ mixte (b) en départ direct	29
Figure IV.1 : Réseau radial	34
Figure IV.2 : Exemple d'un réseau de distribution	39
Figure IV.3 : Algorithme de calcul de l'écoulement de puissances	42
Figure IV.4 : Schéma du réseau étudié	43
Figure IV.5 : Allure de tension au niveau des 6 jeux de barres sans générateur éolien	44
Figure IV.6 : Transit de puissance dans le réseau test sans générateur éolien	44
Figure IV.7 : Schéma du réseau étudié avec insertion du générateur éolien au nœud	44
Figure IV.8 : Allure de la tension au niveau des 6 jeux de barres avec insertion de l'éolienne	45
Figure IV.9 : Transit de puissance dans le réseau test avec insertion de l'éolienne au nœud 6	45
Figure IV.10 : Schéma du réseau étudié avec insertion du générateur éolien au nœud 5	45

Figure IV.11 : Allure de la tension au niveau des 6 jeux de barres avec insertion de l'éolienne	46
Figure IV.12 : Transit de puissance dans le réseau test avec insertion de l'éolienne au nœud 5	46
Figure IV.13 : Schéma du réseau étudié avec insertion du générateur éolien aux nœuds 3 et 5	46
Figure IV.14 : Allure de la tension au niveau des 6 jeux de barres avec insertion de l'éolienne aux nœuds 3 et 5	47
Figure IV.15 : Transit de puissance dans le réseau avec insertion de l'éolienne aux nœuds 3	47
Figure IV.16 : Les pertes des puissances dans les lignes	47

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Caractéristique de tension en BT et HTA	07
Tableau III.1 : Niveaux de tension aux points de raccordement en fonction de la puissance installée	27

Introduction générale

Les sources renouvelables comme l'éolienne et l'énergie solaire peuvent constituer d'un complément aux groupes électrogènes, pour la génération de l'électricité dans les zones isolées, ou les intégrées dans le réseau électrique lorsqu'il y a une demande d'énergie importante ou de diminuer ; d'une part les dépenses économiques des énergies primaires, et d'autre part la participation des émissions de gaz à effet de serre pour un développement durable.

L'intégration des sources renouvelables dans les réseaux électriques présente des intérêts importants (augmentation de la capacité de puissance, investissement moins chères...), implique un respect de certaines contraintes techniques pour une assurance fiable, continue et de qualité pour la population et les industries, malgré que les réseaux électriques n'aient pas été conçus pour cette intégration.

Nous citons dans ce mémoire la problématique de l'intégration des sources renouvelables (éolienne en particulier), les techniques de raccordement, ainsi leurs impacts sur le réseau, par la subdivision de quatre chapitres :

Le 1^{er} chapitre traite les caractéristiques des réseaux de distribution électriques avec une petite généralité sur les réseaux (production, transport...), le réseau algérien et les niveaux des tensions et ces normes appliquées en Algérie, et le contrôle de tension par la présence d'une production décentralisée .

Le deuxième chapitre traite l'aspect des énergies éoliennes ; principe de conversion pour la production électrique, ces différents types, leur rendement par la limite de betz, ainsi sa modélisation mathématique, et en fin les principales technologies des aérogénérateurs.

Le troisième chapitre s'intéressera aux techniques de raccordement des énergies renouvelables en particulier l'énergie éolienne et ces différents types, ensuite les impacts d'intégration dans le réseau électrique

En fin le chapitre quatre présente le calcul des répartitions des puissances et certaines méthodes matricielles pour le calcul, et une application sur MATLAB d'un réseau radial de 10 MW et une insertion d'une ferme éolienne de capacité différente dans plusieurs nœuds et d'avoir le comportement du réseau avant et après l'insertion.

Chapitre I

Les réseaux de distribution électriques

I.1. Introduction

Les réseaux électriques ont été construits et dimensionnés pour transporter l'énergie électrique produite par les centres de production (type conventionnel ou renouvelable) jusqu'aux consommateurs, et les réseaux électriques de distribution acheminent l'alimentation aux consommateurs depuis la transmission ou la sous-transmission, ils se distinguent des réseaux de transport par leur niveau de tension et leur topologie.

Dans ce chapitre on traite la structure du système électrique et en particulier la partie distributive du réseau électrique et ces caractéristiques, le contrôle de tension et son réglage pour le bon fonctionnement.

I.2. Généralités sur le réseau électrique

Le réseau électrique est un ensemble des infrastructures énergétiques conçu pour fournir de l'électricité depuis la production vers les consommateurs. Ce réseau composé de trois parties principales: production, transport et distribution.

I.2.1. Rappel sur la production de l'énergie électrique

La centrale de production est la composante principale du système électrique. Une centrale peut regrouper sur un même site plusieurs groupes de production. Elle est destinée à produire de l'électricité par l'intermédiaire des alternateurs. la moyenne tension de production est élevée à une valeur entre 63 et 400 kV à l'aides des transformateurs situés dans un poste de départ placé au voisinage immédiat de l'usine pour un transport économique de l'énergie.

Pour répondre à la consommation croissante d'électricité, il a fallu inventer et construire des centrales capables de produire de l'électricité en grande quantité. Les trois principaux modes de production sont les centrales nucléaires, les centrales à combustibles fossiles (fioul, gaz...etc.) et les centrales hydroélectriques. Les centres de production sont répartis presque uniformément dans l'ensemble du réseau interconnecté, d'autres modes de production existent tels que l'éolien, solaire, géothermale,...etc.

La turbine et l'alternateur sont les deux pièces principales de ces générateurs d'électricité. Dans le cas des usines thermiques, la turbine est entraînée par la vapeur produite dans les chaudières où l'on brûle les combustibles. Alors que dans le cas des usines hydroélectriques, la turbine est animée par la force de l'eau. La turbine est couplée à un alternateur.

I.2.2. Système de transformation

Pour transporter une énergie électrique à grande distance, il est essentiel, sur le plan économique, de minimiser l'énergie gaspillée par effet Joule le long de la ligne de transport, la solution la plus rentable consiste à élever le niveau de tension au départ pour le ramener à une tension plus basse, éventuellement la tension de départ, au point d'utilisation. Les deux opérations de changement de tension sont effectuées par des transformateurs.

I.2.3. Description des réseaux électriques

Comme l'électricité ne se stocke pas en grande quantité, la production doit s'adapter sans cesse à la consommation. C'est pourquoi l'énergie produite doit être acheminée en temps réel jusqu'aux consommateurs. On appelle réseau électrique l'ensemble des infrastructures permettant d'acheminer l'énergie électrique des centrales électriques, vers les consommateurs d'électricité.

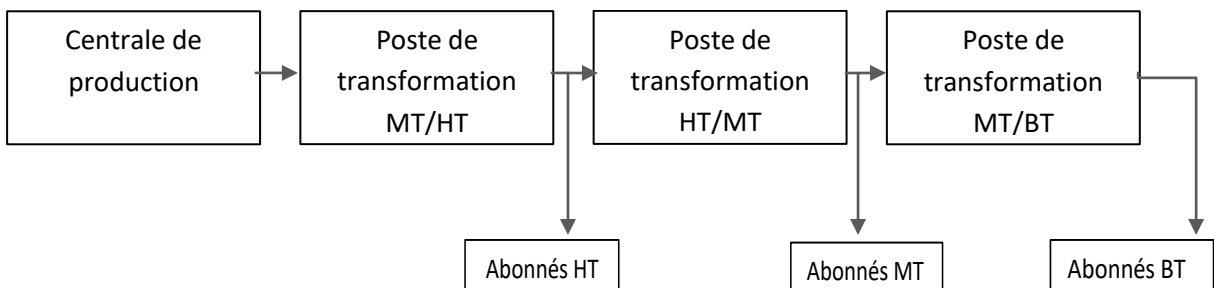


Figure I.1 : Schémas d'un réseau électrique

I.2.4. Le réseau de transport

Situé en amont des réseaux de distribution, il se compose de deux sous-ensembles:

- Le réseau de grand transport et d'interconnexion : Il est destiné à transporter des quantités importantes d'énergies de longues distances. Il constitue la structure principale pour l'interconnexion des grands centres de production.
- Les réseaux de répartition régionale ou locale : Ils sont destinés à répartir l'énergie en quantités moindre sur des distances plus courtes. Le transport est assuré en Haute-Tension (HT) et en Moyenne-Tension (MT).

L'énergie électrique est exportée à travers des lignes électrique ou lignes de transmission, d'un lieu à un autre. Il existe 2 types principaux de ligne :

- **Les lignes aériennes** : assurent la majeure partie du transport longue distances.

- **Les lignes souterraines** : souvent utilisés pour le transport de l'électricité à travers des zones peuplées.

I.2.5. Le réseau de distribution

Ce réseau a pour fonction d'alimenter l'ensemble de la clientèle principalement connectée à ce réseau. Les réseaux de distribution ont principalement une structure radiale. A la différence d'une structure maillée, une structure radiale est une structure arborescente, ainsi, le flux de puissance n'a qu'un trajet possible pour transiter du poste de transformation HT/MT ou MT/BT vers le point de consommation considérée.

I.2.6. Structures topologiques des réseaux

- Les réseaux radiaux
- Les réseaux bouclés
- Les réseaux maillés

I.2.6.1. Réseau radial

Si l'énergie transportée par un réseau vers un client y parvient par un seul parcours, on parle de distribution radiale. (Généralement utilisé pour le réseau rural).

I.2.6.2. Réseau bouclé

Si l'énergie transportée par un réseau vers un client y parvient par plusieurs parcours, on parle de distribution bouclée. (Généralement utilisé pour les réseaux de répartition)

I.2.6.3. Réseau maillé

Les réseaux maillés sont des réseaux où toutes les lignes sont bouclées formant ainsi une structure analogue au maillage d'un filet. Ils sont utilisés pour les réseaux de distribution à basse tension et pour les réseaux de transport.

I.3. Caractéristiques des réseaux de distribution

I.3.1 Caractéristiques générales

Les réseaux de distribution sont exploités dans des gammes de tensions inférieures à 50 Kv, soit le domaine de la HTA et de la BT. La tension nominale des réseaux de distribution HTA est de 20kV. Ce niveau de tension permet un bon compromis pour limiter les chutes de tension, minimiser le nombre de postes source (poste de connexion HTB/HTA) et réduire les contraintes inhérentes aux hautes tensions (coûts des investissements, protection des biens et des personnes).

Les réseaux de distribution sont, dans la très grande majorité des cas, exploités de manière radiale. Cette structure permet d'assurer facilement la maintenance du réseau,

Chapitre I Les réseaux de distribution électrique

notamment pour la détection et l'élimination rapide des défauts. Des schémas d'exploitation de secours entre postes sources sont bien entendu prévus et permettent de minimiser le nombre de clients coupés en cas de défaillances.

I.3.2. Le réseau électrique algérien

Dans nos jours il n'y a pas des normes internationales pour la réalisation et les modes de connexions des clients pour le réseau de distribution [1]. En effet chaque distributeur a sa propre manière de faire ainsi son expérience au fil de l'exploitation de son réseau. Cependant et malgré les différences ; l'Algérie a presque la même norme de structure électrique avec la France.

L'Algérie est électrifiée à 99% dont la capacité est de 20 994 MW, répartie sur 34 441 km de ligne de transport, 131 557 Km de lignes de distribution et de 47 189 postes [2].

I.3.3. Les niveaux de tension

Le choix des niveaux de la tension et de la fréquence est souvent basé aux critères technico-économiques. Ainsi chaque pays possède des niveaux tensions différents et utilise une fréquence qui lui est propre.

Anciennement, on pouvait trouver la nomenclature suivante pour les différents niveaux de tension :

- THT, pour des tensions composées de plus de 100 kV ;
- HT, pour des tensions composées comprises entre 50 kV et 100 kV ;
- MT, pour des tensions composées comprises entre 1 kV et 50kV ;
- BT, pour les niveaux de tension inférieure à 1 kV.

Dorénavant en Algérie, on trouve une nouvelle nomenclature comme celle de la France [1].

- HTB, pour des tensions composées de plus de 50 kV ;
- HTA, pour des tensions composées comprises entre 1 kV et 50 kV ;
- BTB, pour des tensions composées comprises entre 500 V et 1 kV ;
- BTA, pour des tensions composées comprises entre 50 V et 500 V ;
- TBT, pour les niveaux de tension inférieure à 50 V.

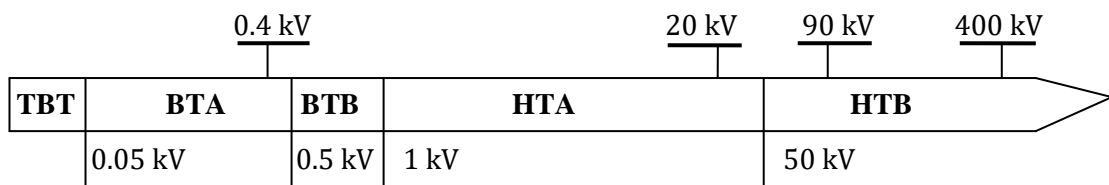


Figure I.2 : Appellations normalisées des différents niveaux de tension

I.3.4. Les postes sources HTB/HTA

Les réseaux de distribution sont alimentés par un poste source HTB/HTA. Ces postes permettent de relier le réseau de transport au réseau de distribution d'électricité. Il sert à :

- transformer une très haute tension en haute tension,
- diriger l'énergie électrique vers plusieurs canalisations haute tension, appelées « départs »

La tension de l'électricité apportée par le réseau est modifiée par un ou plusieurs transformateurs qui sont abrités dans un poste de transformation. La tension à la sortie de la source de production est de 400 KV, puis elle est successivement abaissée d'un niveau de tension à un autre, jusqu'à la tension d'utilisation.

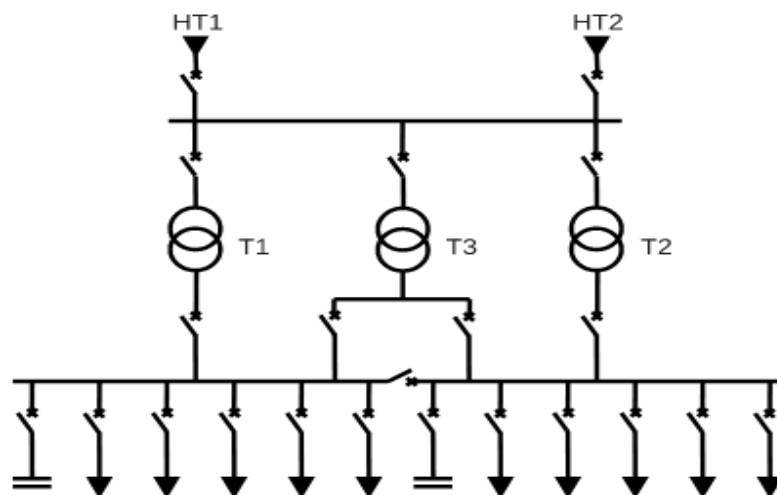


Figure I.3 : Schéma de principe d'un poste source HTB/HTA. [3]

I.4. Réglage de tension dans les réseaux de distribution

I.4.1. Qualité de service

L'objectif des réseaux de distribution est de fournir de l'énergie électrique aux clients en HTA ou en BT en assurant la continuité de service et la qualité de l'onde électrique, dans les meilleures conditions. La qualité de l'énergie délivrée doit être conforme à des caractéristiques définies par des normes. Ces normes sont données par le gestionnaire de l'électricité du pays, l'Algérie applique les normes françaises :

Chapitre I Les réseaux de distribution électrique

Tableau I.2 : Caractéristique de tension en BT et HTA [1]

Caractéristiques	Valeurs admises
Fréquence	BT: 50 Hz \pm 1% pendant 99,5% du temps sur une année
	HTA: 50 Hz \pm 4 % /-6 % pendant 100 % du temps sur une année
Tension	BT: 230 V \pm 10 % pendant 95 % du temps sur une semaine
	HTA: 20 kV \pm 10 % pendant 95 % du temps sur une semaine
Harmonique	Taux global de distorsion harmonique \leq 8 % U_n
Déséquilibre de la tension	$U_{inverse} \leq 2$ % de U_{direct} pendant 95 % du temps sur une semaine

I.4.2. Le réglage de tension pour la sécurité des réseaux [1]

Pour garantir la stabilité du réseau et la sécurité des matériels, la tension doit être maintenue dans des limites fixées par les règles d'exploitation des réseaux électrique. La tenue de tension de la tension est donc un des aspects fondamentaux de l'exploitation des réseaux de transport et de distribution. En effet les limites de tensions sont définies dans chaque pays selon le type de réseau en fonction de son niveau de tension.

I.4.3. Le réglage de tension pour l'exploitation normale des réseaux

Pour étudier les conséquences de la tenue de la tension sur la bonne exploitation des réseaux, nous prenons la figure I.4 un modèle équivalent monophasé en π d'une ligne triphasé couramment utilisé dans l'étude des réseaux. Ce modèle est valable pour des lignes courtes ou moyennes, P et Q désignent dans ce paragraphe les puissances active et réactive transitées par phase.

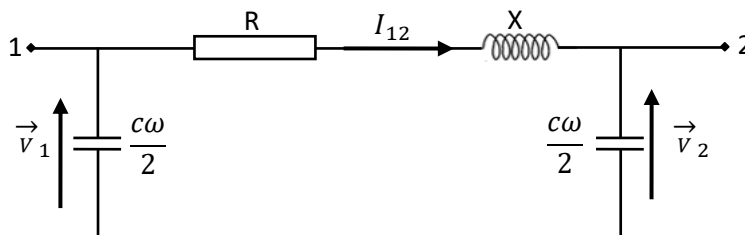


Figure I.4 : Modèle de ligne en π

Chapitre I Les réseaux de distribution électrique

A ce modèle de ligne en π , on peut associer un diagramme de Fresnel reliant les tension aux éléments de ce modèle (figure I.5).

Si l'on connaît V_2 ainsi que les puissances active et réactive transitées dans la ligne, on peut alors calculer la chute de tension :

$$\Delta \bar{V} = \bar{V}_1 - \bar{V}_2 = \frac{RP+XQ}{\bar{V}_2} + j \frac{XP-RQ}{\bar{V}_2} \quad (\text{I. 1})$$

De manière générale, on peut considérer que si le déphasage δ entre les tensions d'entrée et de sortie de la ligne est suffisamment petit (hypothèse d'un réseau peu chargé, connue sous le nom d'hypothèse de Kapp), alors la chute de tension est égale à sa projection ΔV :

$$|\Delta \bar{V}| \approx \Delta V = \frac{RP+XQ}{\bar{V}_2} \quad (\text{I. 2})$$

La chute de tension sur une ligne est donc liée à la fois à la puissance transmise et à la tension d'exploitation. Un plan de tension élevé permettra donc de réduire les chutes de tension sur le réseau.

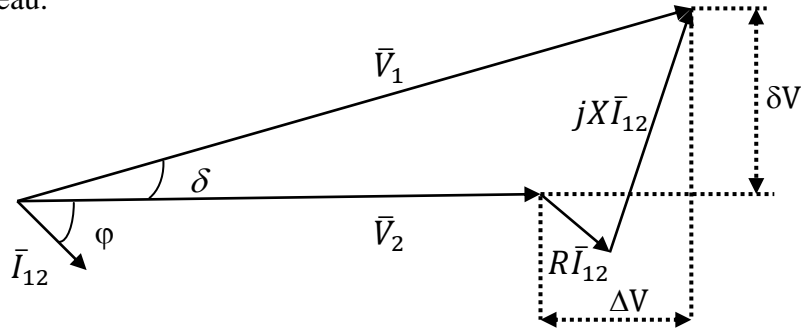


Figure I.5 : Diagramme de Fresnel de la ligne en π

Les pertes en ligne par effet joule sont également déterminées par la puissance transmise et la tension d'exploitation. Les pertes joules par phase s'expriment sous la forme :

$$P_J = R \frac{P^2 + Q^2}{V_2^2} \quad (\text{I. 3})$$

Les pertes joules triphasés s'expriment donc sous la forme suivante :

$$P_{JT} = 3P_J = \frac{R P_T^2 + Q_T^2}{3 V_2^2} \quad (\text{I. 4})$$

En notant que P_T et Q_T les puissances active et réactive triphasées.

L'équation (I.4) montre qu'un plan de tension élevé permet également de minimiser les pertes Joules.

I.5. Réglage de la tension dans les réseaux de distribution actuels

Le réglage de la tension dans le réseau de distribution n'est pas basé sur des règles, il dépend de structure du réseau et son gestionnaire, néanmoins il existe plusieurs techniques pour le réglage de la tension:

I.5.1. Compensation de puissance réactive au poste source

Les réseaux disposent de divers moyens de compensation d'énergie réactive localisée aux postes sources. Ils permettent de limiter le transit de puissance réactive sur les transformateurs et ainsi d'éviter une trop forte dégradation du plan de tension.

I.5.2. Les régleurs en charge

Le réglage de charge est équipé par la modification du rapport de transformation par pas de 1% au niveau des transformateurs des postes source. Cela permet d'ajuster la tension des jeux de barres HTA en fonction de l'évolution des charges et des fluctuations de la tension en amont [4].

Le réglage de la tension HTA peut se faire avec ou sans compoudage. Le compoundage est une technique qui prend en compte, par mesure du courant dans le transformateur (et donc de l'état de charge moyen du réseau), les chutes de tension dans le réseau aval. Cela permet de tenir la tension en un point du réseau différent du poste source [4].

I.5.3. Le réglage par la production décentralisée (PD)

Le travail de ce thème est l'une des techniques qui sont désormais d'une part pour le contrôle de tension et d'autre part l'augmentation de capacité de puissance.

La production décentralisée (PD) est la production d'énergie électrique à l'aide d'installations de petite capacité raccordées aux réseaux électriques à des niveaux de tension peu élevée, elle peut-être conventionnelle (Les turbines à combustion, Les micro-turbines à combustion, Les moteurs diesel, La cogénération...) ou renouvelable (Hydraulique, solaire photovoltaïque, éolienne...).

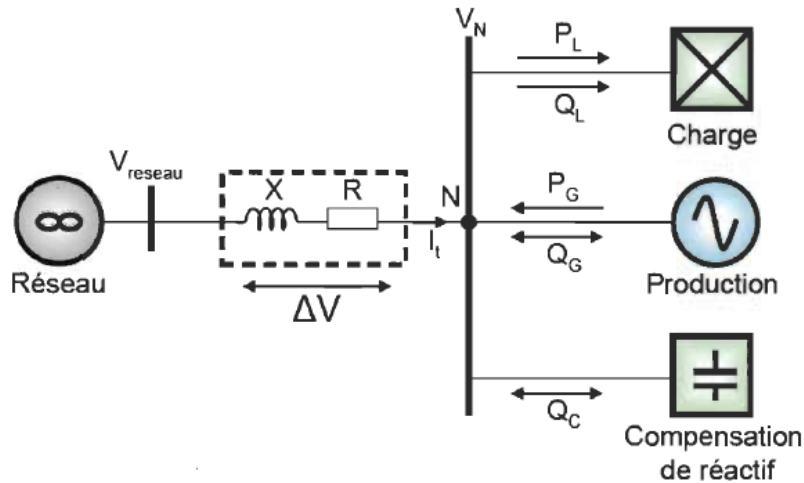


Figure I.6 : Détermination de la chute de tension sur une ligne [5]

Dans le réseau de distribution classique de structure radiale, la tension est, en règle générale, plus élevée au poste source et diminue vers l'extrémité du départ. La puissance circule dans un seul sens à partir du poste source vers les consommations. Mais avec la présence PD sur le réseau, ce dernier devient actif et les transits de puissance sont modifiés [4]. La chute de tension ΔV entre le poste source et le point de raccordement d'une PD via une ligne est déterminée comme suit:

$$\Delta V = RI_T \cos\varphi + L\omega I_T \sin\varphi \quad (I.5)$$

Où :

- R, L sont la résistance et l'inductance totale de ligne.
- V_N la tension au nœud N et I_T le courant transit dans la ligne.
- P_N, Q_N les puissances active et réactive au nœud N.

$$\Delta V = R \frac{P_N}{V_N} + L\omega \frac{Q_N}{V_N} = \frac{R(P_G - P_L) + L\omega(\pm Q_G - Q_L \pm Q_C)}{V_N} \quad (I.6)$$

$$\Delta V = R \frac{P_N}{V_N} + L\omega \frac{Q_N}{V_N} \quad (I.7)$$

P_G, Q_G sont les puissances active et réactive fournies par la PD.

P_L, Q_L sont les puissances active et réactive de consommation.

Q_C est la puissance réactive du dispositif de compensation.

L'équation (I.6) illustre un des principaux problèmes liés à la connexion de PD sur un réseau. En effet, l'injection de puissance, active ou réactive, va induire une élévation de la

tension au nœud de connexion. Les impacts sur la tension de telles productions vont être différents selon le type de réseaux auxquels elles sont connectées. Selon la nature du réseau, les caractéristiques du poste source, le point de raccordement et la puissance injectée par la PD, la tension peut être élevée au point de raccordement, pouvant même dépasser la limite admissible.

I.6. Tenu de fréquence

De même que pour la tension, la fréquence doit impérativement être maintenue dans les limites contractuelles. Les principaux problèmes apparaissant en cas d'excursion non maîtrisée de la fréquence sont les suivants:

- rupture de synchronisme des alternateurs pouvant entraîner la perte de groupes en cascade;
- limite de fonctionnement des auxiliaires de centrales;
- en cas de baisse de fréquence: saturation des circuits magnétiques de transformateurs ou compensateurs bobinés d'énergie réactive entraînant un fonctionnement dégradé et des pertes fer [4].

I.7. Conclusion

L'objectif, de ce chapitre est de donner une vision globale des concepts classiques, des réseaux électriques, qui restent toujours d'actualité comme les cheminements de l'énergie électrique, la classification des tensions et les schémas d'exploitation des différents types de réseau.

Les niveaux de tensions et leurs réglages de telles sortes soient dans les niveaux admissibles selon les normes reconnus par l'Algérie et la France ont été traité de manière abrégée dans ce chapitre.

Chapitre II

L'énergie éolienne

Aspect et modélisation

II.1. Introduction

L'énergie éolienne est l'une des sources renouvelable tirée directement du vent à travers un dispositif appelé éolienne. La production d'électricité par les éoliennes a adopté un développement significatif dans le monde, l'aspect technologique de la turbine éolienne et sa modélisation. Ainsi, les différents types des aérogénérateurs seront détaillés dans ce chapitre.

II.2. Définition de l'énergie éolienne

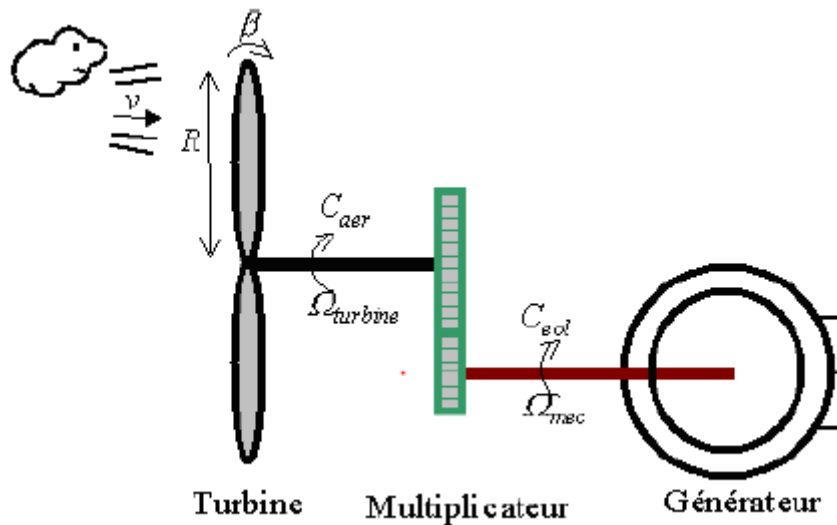


Figure II.1 : Schéma d'une turbine éolienne [5]

L'éolienne ou l'aérogénérateur est un dispositif qui permet de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'un générateur.

II.3. Principe du vent

Le vent, c'est de l'air qui se déplace à cause des différences de température et de pression dans l'atmosphère. En effet, l'air chaud est plus léger que l'air froid. C'est pourquoi, quand le Soleil chauffe la mer ou le sol, l'air qui se trouve juste au-dessus se réchauffe, s'allège, et monte, en poussant l'air froid qui est plus haut. L'air froid, plus lourd, descend et vient remplacer l'air chaud, puis il se réchauffe à son tour, et ainsi de suite.

En plus, comme la Terre est ronde, le Soleil ne distribue pas la chaleur partout de façon égale, et celle-ci n'est pas absorbée de la même manière par la mer ou par le sol. Toutes ces différences font que les masses d'air se déplacent verticalement et horizontalement.

Il existe des sites plus ou moins venteux, selon leur emplacement et leur dégagement, mais aussi selon leur incidence sur la pression de l'air. Par exemple, les crêtes de montagne et le bord de mer connaissent des vents plutôt violents : dans ces endroits, il y a en effet peu d'obstacles naturels ou de bâtiments pour retenir le vent [6].

II.4. Principe de conversion

L'éolienne permet de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, cette conversion se fait en deux étapes:

- La conversion d'une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique ; cette conversion se fait au niveau de l'éolienne.
- La conversion de cette énergie mécanique en énergie électrique. Selon la technologie de l'éolienne utilisée, la transmission de l'énergie électrique au réseau soit directement, soit par l'intermédiaire total ou partiel d'une interface de l'électronique de puissance.

II.5. Les différents types des turbines éoliennes

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : les éoliennes à axe vertical qui tendent à disparaître, les éoliennes lentes à axe horizontal utilisées surtout pour le pompage et les éoliennes rapides à axe horizontal plus particulièrement utilisées dans la production d'énergie électrique.

II.5.1. Eolienne à axe verticale

Les pales de l'éolienne verticale, également nommée VAWT (Vertical Axis Wind Turbine), tournent autour d'une tige positionnée verticalement, comme son nom l'indique. Cette solution est moins répandue que l'éolienne horizontale mais tend progressivement à la remplacer [7].

Son principal atout est sa capacité à capter des vents faibles:

- L'éolienne verticale n'a donc pas besoin de rafales ou de vents puissants, voire violents, pour fonctionner, car elle n'a pas besoin de s'orienter par rapport au vent.

- De plus, elle demande moins d'espace qu'une éolienne horizontale et peut fonctionner quel que soit le sens du vent. [8].

II.5.1.1. Les différents types d'éolienne à axe vertical

On distingue dans cette étude deux catégories d'éoliennes à axe verticale:

II.5.1.1.1. Les éoliennes verticales Darrieus

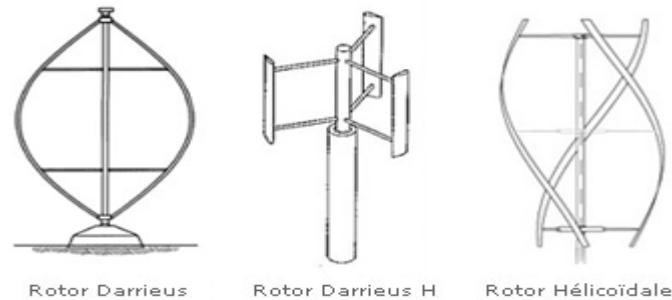


Figure II.2 : Schéma de différents types d'éoliennes Darrieus [9]

L'éolienne verticale de type Darrieus produit de l'électricité grâce à un rotor, qui peut être lui aussi de différent type (hélicoïdale, H, cylindrique), qui tourne autour d'une tige fixe, appelée stator à ailettes.

Les avantages de l'éolienne verticale type Darrieus sont nombreux :

- Elle peut être installée dans des zones très venteuses, puisqu'elle peut subir des vents dépassant les 220 km/h.
- Elle émet moins de bruit qu'une éolienne horizontale et occupe moins de place. De plus, vous pouvez l'installer directement sur le toit.
- Autre aspect pratique, son générateur est installé en bas de celle-ci. il peut être vérifié et entretenu plus facilement.

II.5.1.1.2. Les éoliennes verticales Savonius

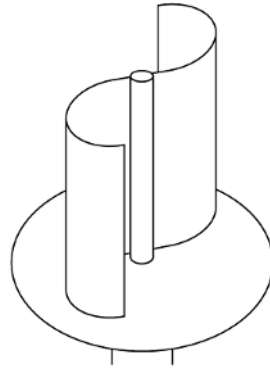


Figure II.3 : Schéma d'une éolienne Savonius [9]

L'éolienne verticale Savonius consiste en au moins deux demi-cylindres installés de manière légèrement désaxée l'un par rapport à l'autre.

Le vent s'engouffre dans l'un des demi-cylindres et le pousse. Les demi-cylindres n'étant pas rattachés en un même point, mais légèrement désaxés, le vent continue sa course dans l'autre demi-cylindre, qu'il pousse à son tour.

Les avantages de cette éolienne verticale sont :

- d'une part, son esthétisme et la possibilité de l'installer sur une toiture,
- d'autre part, le fait qu'elle fonctionne même avec un vent faible (contrairement au système Darrieus), quelle que soit sa direction. [8]

II.5.2. Éolienne à axe horizontale

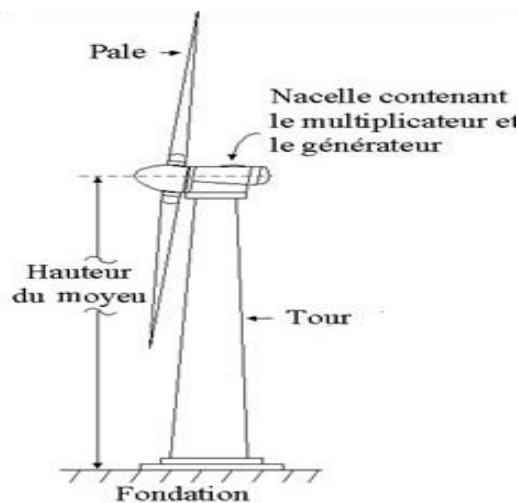


Figure II.4 : Schéma d'une éolienne à axe horizontale [9]

L'éolienne horizontale, également appelée HAWT (Horizontal Axis Wind Turbine) est le modèle le plus répandu. Elle capte le vent (de face ou de dos selon le modèle) grâce à des pales assemblées en hélice. Celles-ci tournent autour d'un mât placé horizontalement par rapport au sol. Le générateur, actionné par la rotation de l'hélice, est situé en haut de l'éolienne. C'est la plus utilisée par les particuliers car son rendement est plus important [8].

II.5.3. Composantes d'une éolienne à axe horizontale

Les composantes les plus souvent utilisés pour décrire une éolienne retient principalement quatre sous-ensembles [10] :

- **le rotor**, partie rotative de l'éolienne placée en hauteur afin de capter des vents forts et réguliers. Il est composé de pales (en général 3) en matériau composite qui sont mises en mouvement par l'énergie cinétique du vent. Reliées par un moyeu, ces dernières peuvent en moyenne mesurer chacune 25 à 60 m de long et tourner à une vitesse de 5 à 25 tours par minute;
- **la nacelle**, structure soutenue par le mât abritant les différents éléments mécaniques. On distingue les éoliennes à entraînement direct de celles équipées de train d'engrenages (multiplicateur/réducteur) selon le type d'alternateur utilisé. Les alternateurs classiques requièrent une adaptation de la vitesse de rotation par rapport au mouvement initial du rotor.
- **la tour**, composée du mât, du système de commande électrique et du transformateur. le mât supporte la nacelle. Il mesure entre 50 et 130 m de haut et a un diamètre à son pied compris entre 4 et 7 m. Une ouverture en bas du mât permet d'accéder aux différents équipements de l'éolienne parmi lesquels le transformateur qui permet d'augmenter la tension de l'électricité produite afin de l'injecter sur le réseau ;
- **la base**, souvent circulaire et en béton armé dans le cas des éoliennes terrestres, qui permet de maintenir la structure globale [10].

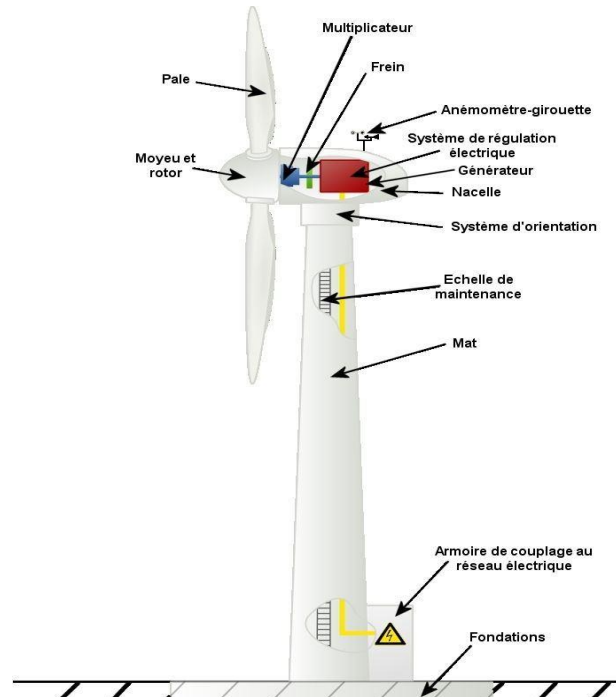


Figure II.5 : Schéma des différentes composantes d'une éolienne à axe horizontal [10]

II.5.4. L'énergie éolienne en Algérie

L'Algérie, accuse un retard important dans la course aux énergies renouvelables, malgré la décision gouvernementale qu'un programme ait été élaboré dans le plan d'action '2011-2030', dans l'objectif d'installation d'une puissance de 5.1 GW de source éolienne. A ce jour, une première et 'unique' ferme éolienne de 10MW a été installée dans la région de Kaberten dans la wilaya d'Adrar [11].

II.6. Modélisation de la turbine éolienne

II.6.1. L'énergie récupérable par une turbine et limite de Betz

Pour beaucoup plus comprendre de la part convertie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, On considère une colonne d'air de longueur dl , de section S , de masse volumique ρ animée d'une vitesse V conformément à la figure suivante :

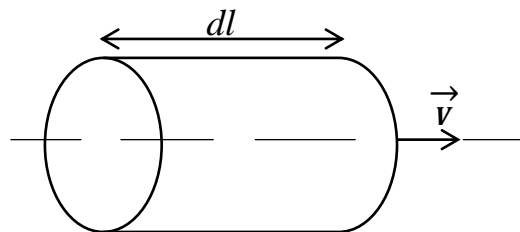


Figure II.9 : Colonne d'air

L'énergie cinétique de cette colonne d'air est donc :

$$dE_c = \frac{1}{2} dm v^2 \quad (\text{II. 1})$$

Avec $dm = \rho S dl$

Or nous savons que : $dl = v dt$ Car $v = \frac{dl}{dt}$

D'où :

$$dE_c = \frac{1}{2} \rho S v^3 dt \quad (\text{II. 2})$$

On en déduit alors l'expression de la puissance disponible :

$$P = \frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} \rho S v^3 \quad (\text{II. 3})$$

Donc la puissance du vent ou de puissance éolienne est définie de la manière suivante:

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S v^3 \quad (\text{II. 4})$$

Où :

ρ est la densité de l'air (Approximativement 1.22 kg/m^3 à la pression atmosphérique à 15°C),

S est la surface balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale ($S \text{ (m}^2\text{)}$).

II.6.2. Limite de Betz

Considérons la figure ci-dessous : soit S la surface de la turbine éolienne, V_1 la vitesse d'entrée et V_2 la vitesse sortie de l'éolienne.

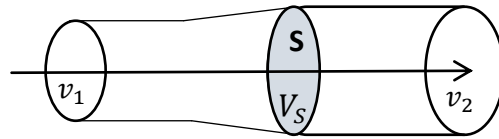


Figure II.7 : Schéma du courant d'air traversant une turbine

Soit v_s la vitesse moyenne de l'air traversant S :

$$v_s = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (\text{II. 5})$$

Soit $\rho S v_s$, la masse d'air traversant S par unité de temps.

La variation d'énergie par unité de temps, donc la puissance, transmise au rotor de l'éolienne vaut :

$$P = \frac{1}{2} \rho S v_s (v_1^2 - v_2^2) = \frac{1}{4} \rho S (v_1 + v_2)(v_1^2 - v_2^2) \quad (\text{II. 6})$$

Le maximum de l'équation (II.6) $P (V_2)$ s'obtient lorsque :

$$\frac{d}{dv_2} \left\{ \frac{1}{4} \rho S (v_1 + v_2)(v_1^2 - v_2^2) \right\} = 0 \quad (\text{II. 7})$$

En développant, on obtient :

$$\frac{1}{4} \rho S (-3v_2^2 - 2v_1v_2 + v_1^2) = 0 \quad (\text{II. 8})$$

Cette expression s'annule pour : $v_2 = \frac{v_1}{3}$

D'où la puissance maximale est :

$$P_{max} = \frac{8}{27} \rho S v_1^3 \quad (\text{II. 9})$$

La fraction maximale de la puissance totale qu'il est possible de convertir en énergie mécanique et qui détermine la limite de Betz est donc donnée par :

$$C_p = \frac{P_{max}}{P_v} = \frac{16}{27} \approx 0.593$$

Cette fraction est définie par le coefficient de puissance C_p qui propre à chaque turbine et qui dépend à la fois de position angulaire de l'axe de la pale, caractérisée par son angle de calage β et du rapport de la vitesse spécifique λ donnée par conventionnel :

$$\lambda = \frac{R_{Turbine} \Omega_{Turbine}}{v} \quad (\text{II. 10})$$

Où :

λ est la vitesse spécifique (sans unité),

R_T est le rayon de la turbine (longueur de la pale (m)),

Ω_T est la vitesse angulaire de la turbine (rad/s).

Donc la puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor s'écrit :

$$P_{aer} = C_p P_v = \frac{1}{2} \rho C_p (\lambda, \beta) S v^3 \quad (II. 11)$$

Connaissons la vitesse de turbine, le couple aérodynamique est donc directement déterminé par :

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{Turbine}} = \frac{1}{2\Omega_{Turbine}} C_p \rho S v^3 \quad (II. 12)$$

II.6.3. Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur de vitesse, qui est disposé entre la turbine éolienne et la génératrice, Il sert a adapté la vitesse plus lente de la turbine $\Omega_{Turbine}$ à celle la plus rapide de génératrice Ω_{mec} , il est souvent modélisé par les deux équations suivantes:

$$C_{gén} = \frac{C_{aer}}{G} \quad (II. 13)$$

$$\Omega_{Turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (II. 14)$$

Où :

- $C_{gén}$, C_{aer} sont les couple de génératrice et l'aérogénérateur (N.m),
- Ω_{mec} , $\Omega_{Turbine}$ sont les vitesses angulaire de génératrice et l'aérogénérateur (rad/s),
- G est le gain du multiplicateur.

II.6.4. Equation dynamique de l'arbre

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie $J_{Turbine}$ et comprend masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale J constitué de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie.

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_{gén} \quad (II. 15)$$

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total C_{mec} appliqué au rotor :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{Tot} - C_{vis} \quad (II. 16)$$

Où C_{vis} est le couple résistant dû aux frottements est modélisé par un coefficient de frottement visqueux f :

$$C_{vis} = f \Omega_{mec}$$

- C_{Tot} c'est le couple total qui égale à la superposition des couples de la génératrice $C_{gén}$ et électromagnétique $C_{ém}$.

$$C_{Tot} = C_{gén} - C_{ém} \quad (II.17)$$

L'équation de l'arbre mécanique devient alors :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + f\Omega_{mec} = C_{gén} - C_{ém} \quad (II.18)$$

II.7. Les générateurs éoliens

Le générateur éoliens reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique. Il existe plusieurs types de technologies qui peuvent jouer le rôle de génératrice dans un système aérodynamique qui demande des caractéristiques très spécifique [5].

On décrit dans cette étude les principaux types de système éoliens:

II.7.1. Eolienne à vitesse fixe

Ces systèmes éoliens (figure) sont constitués d'une turbine éventuellement équipée de contrôle de l'angle de calage des pales β , d'un multiplicateur de vitesse et d'un générateur. Ce générateur est principalement une machine asynchrone directement couplée au réseau et en tournant en hyper synchronisme à la vitesse $\Omega_s (1-g)$ où g est le glissement de la machine ($g < 0$ dans ce cas) étant couplée directement au réseau, la vitesse est imposé par ce dernier et par conséquence quasiment constante. La puissance convertie par la machine est donnée au rendement près par l'expression suivante :

$$P_{éle} \cong \frac{1}{1-g} P_{mec} \quad (II.19)$$

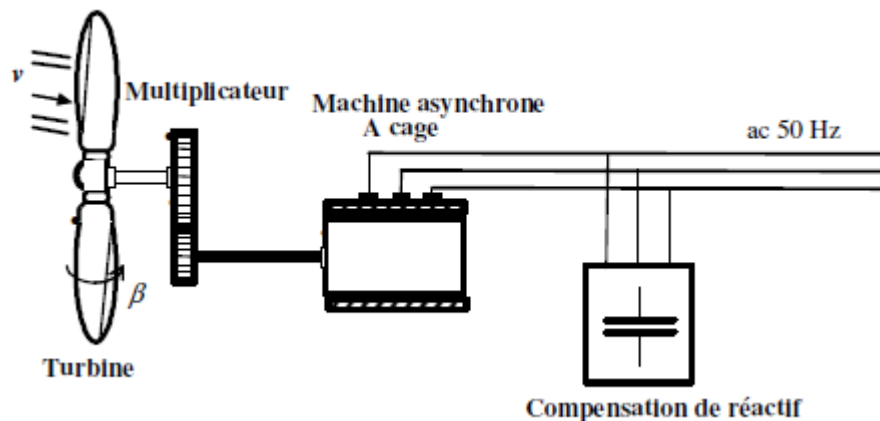


Figure II.8 : Structure d'une éolienne à vitesse fixe [5]

On note également la présence de batterie de compensation pour compenser la puissance réactive consommée par le maintien de la magnétisation de la machine.

Les principaux avantages de cette technologie sont sa robustesse et son faible coût, notamment dû à l'utilisation de machines standards. En revanche la puissance captée n'est pas optimisée, le coût de maintenance essentiellement imputé au multiplicateur est élevé et on ne peut pas contrôler l'énergie réactive. Par ailleurs la connexion directe de l'enroulement statorique de la génératrice au réseau entraîne une très forte sensibilité aux creux de tension.

II.7.2. Eolienne à vitesse variable

Cette technologie est basée sur une interface d'électronique entre le réseau et le rotor pour réguler la tension, et assure l'échange de puissance réactive entre le rotor et le réseau [1].

On distingue dans cette étude deux types d'éoliennes:

II.7.2.1 Eolienne à base de machine asynchrone à double alimentation (MADA)

La machine asynchrone à double alimentation est une machine asynchrone dont le rotor bobiné est raccordé au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance. Cette interface adapte l'amplitude et la fréquence des courants rotoriques en contrôlant la tension aux bornes du rotor en fonction du point de fonctionnement de la machine.

Le stator est connecté directement au réseau et fonctionne dans les conditions normales, sous des amplitudes de tension constante et à fréquence constante (généralement 50 Hz).

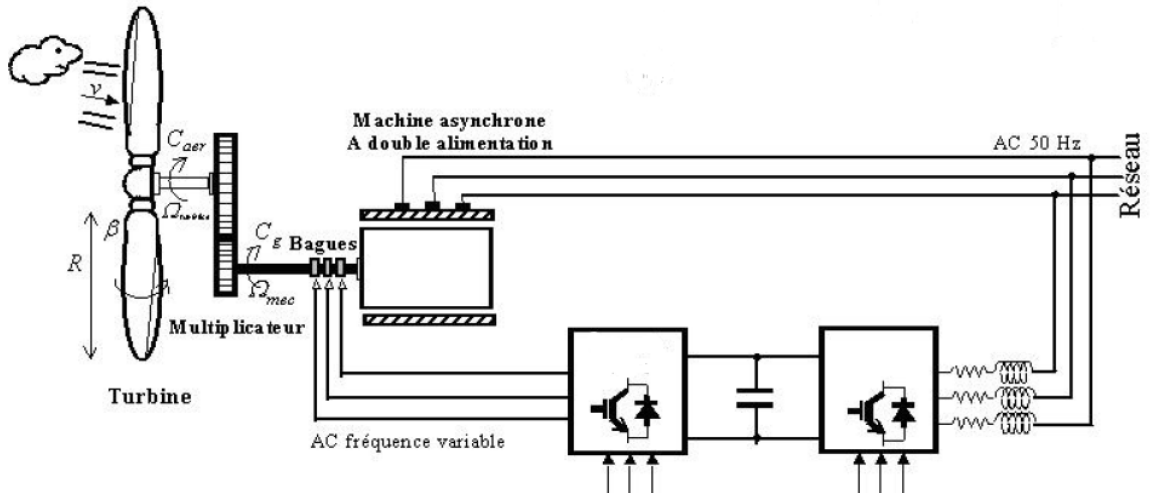


Figure II.9 : Structure d'une éolienne à base MADA [5]

II.7.2.2. Eolienne à base de machine synchrone à aimants permanents (MS)

Cette structure est basée sur une machine synchrone à aimants permanents interfacée par un dispositif d'électronique de puissance constitué d'un redresseur connecté au stator et un onduleur connecté au réseau. Cette structure permet de varier la vitesse de 0% à 100% de la vitesse nominale de rotation de la machine.

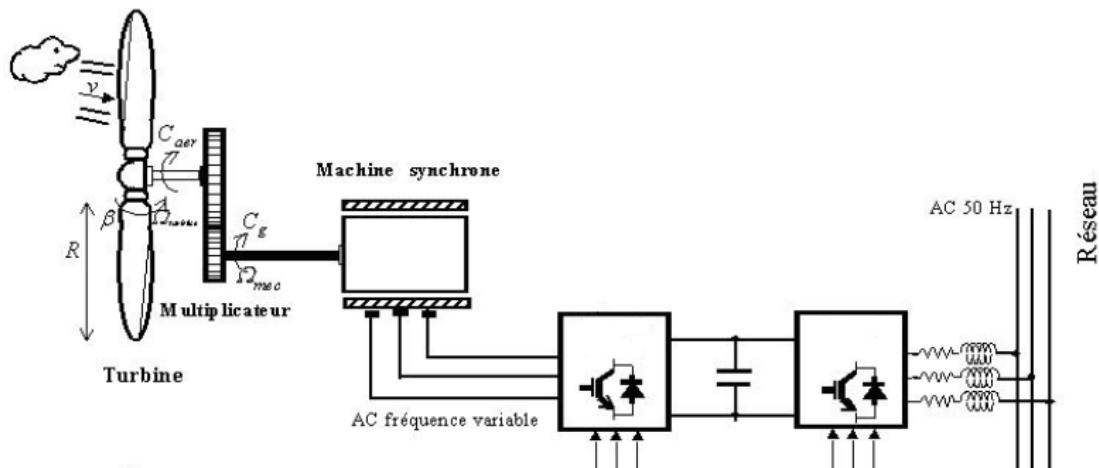


Figure II.10 : Structure d'une éolienne à base de MS à aimant permanents [5]

Le convertisseur connecté au stator de la machine contrôle le couple de la machine et celui connecté au réseau assure le transfert de puissance entre la génératrice et le réseau

ainsi que l'échange de puissance réactive avec ce dernier. Comme pour l'interface de la MADA.

Cette technologie offre de nombreux avantages : souplesse de contrôle, découpage entre le réseau et génératrice, optimisation de la production grâce à une grande plage de vitesse.

II.8. Conclusion

Nous avons traité dans ce chapitre l'aspect de la turbine éolienne, ces différents types, et le principe de conversion de l'énergie cinétique jusqu'à la production électrique. Ainsi, la structure de l'éolienne à axe horizontale et sa modélisation.

En fin nous avons cité les différents types technologies d'aérogénérateurs et la spécification de chacune, et les avantages de l'une par rapport aux autres.

Chapitre III

Raccordement d'énergie renouvelable dans le réseau de distribution et leurs impacts

Chapitre III Raccordement d'énergie renouvelable dans le réseau de distribution et leurs impacts

III.1. Introduction

L'énergie éolienne est l'une des productions décentralisées dont le pouvoir de l'intégrer dans le réseau électrique. Cette intégration doit respecter certaines contraintes techniques et impose généralement des aménagements dans le réseau pour assurer un fonctionnement correct.

Les techniques de raccordement imposé, le choix de niveau de tension d'intégration dans les réseaux électriques et ses impacts seront traités dans ce chapitre.

III.2. Technique de raccordement

En fonction des pays, compte tenu des impacts que peuvent avoir les moyens de production sur les réseaux, des conditions techniques spécifiques de raccordement sont reconnus par grid code ou codes de distribution.

III.2.1. Connexion au réseau [12]

L'éolienne connectée, de même que tous les périphériques connectés au réseau, a un impact plus ou moins important sur la qualité de l'énergie. De plus, les parcs éoliens sont situés dans un territoire où les vents sont favorables et où le réseau est peu développé. Néanmoins, les parcs éoliens doivent être connectés de plusieurs façons, par exemple. Néanmoins, les parcs éoliens doivent être connectés de plusieurs façons, par exemple:

- Parc éolien connecté à la ligne moyenne tension (HTA) existante qui répond aux demandes environnantes (puissance transmissible - de 2 à 5 MW).
- Si la ligne HTA est trop faible pour le parc éolien, elle peut être connectée au jeu de barres HTA de la sous-station HTB / HTA la plus proche par sa propre ligne (puissance transmissible de 10 à 40 MW).
- Parc éolien connecté au jeu de barres HTB dans la sous-station HTB / HTA la plus proche par une ligne propre avec son propre transformateur HTB / HTA (puissance transmissible - jusqu'à 100 MW).

Quelle que soit la méthode de connexion, l'éolienne introduit dans le réseau plus ou moins de variations de puissance. Généralement la solution la plus courante est la connexion en moyenne tension (HTA), qui génère la plupart des interférences.

Chapitre III Raccordement d'énergie renouvelable dans le réseau de distribution et leurs impacts

III.2.2. Tension de raccordement

La tension au point de raccordement détermine la puissance maximale de l'insertion de production décentralisée. Le tableau III.1 donne les niveaux de tension au point de raccordement en fonction de la puissance de l'installation appliqués en France [1]

Tableau III.1 : Niveaux de tension aux points de raccordement en fonction de la puissance installée
[1]

Réseau	Limite de tension	Niveaux réels	Limite de puissance
BT	$U \leq 1 \text{ KV}$ (raccordement monophasé)	230 KV	$P \leq 18 \text{ KVA}$
	$U \leq 1 \text{ KV}$ (raccordement triphasé)	400 KV	$P \leq 250 \text{ KVA}$
HTA	$1 \text{ KV} < U \leq 50 \text{ KV}$	15 KV, 20KV, 33KV	$P \leq 17 \text{ MW}$
HTB	$50 \text{ kV} < U \leq 130 \text{ kV}$	63 kV, 90 kV	$P \leq 50 \text{ MW}$
	$130 \text{ kV} < U \leq 350 \text{ kV}$	150 KV, 225KV	$P \leq 250 \text{ MW}$
	$350 \text{ kV} < U \leq 500 \text{ kV}$	400 KV	$P > 250 \text{ MW}$

III.2.3. La capacité d'accueil des réseaux

La capacité d'accueil en un nœud donné d'un réseau est la puissance de raccordement maximale qui respecte à tout moment les contraintes de tension et de courant sur l'ensemble du réseau considéré. Cette capacité est très souvent limitée par les contraintes de tension haute, notamment dans les zones rurales et semi-urbaines où des producteurs de puissance élevée ($> 1 \text{ MW}$) demandent à être raccordés à l'espace disponible permettant d'y développer de tels projets.

La capacité d'accueil P_{raccmax} d'un départ de type rural ou semi-urbain, à la distance l du poste électrique, peut donc être estimée à partir d'un modèle analytique du plan de tension d'un départ à grandeurs supposées uniformément réparties : haute, notamment dans les zones rurales et semi-urbaines où des producteurs de puissance élevée ($> 1 \text{ MW}$) demandent à être raccordés à l'espace disponible permettant d'y développer de tels projets.

La capacité d'accueil P_{raccmax} d'un départ de type rural ou semi-urbain, à la distance l du poste électrique, peut donc être estimée à partir d'un modèle analytique du plan de tension d'un départ à grandeurs supposées uniformément réparties :

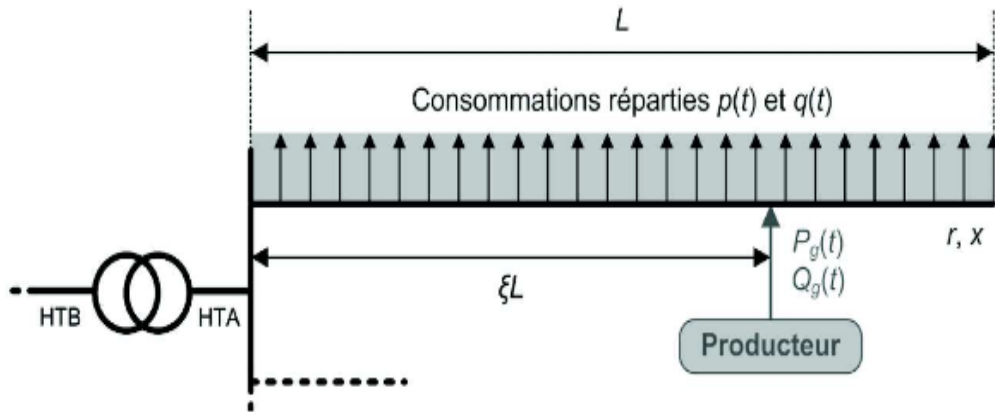


Figure III.1 : Modèle d'un départ HTA « à grandeurs uniformément réparties » [13]

$$P_{raccmax} = \frac{U_{max}^2 - U_0^2 + (2\varepsilon - \varepsilon^2)(RP_{cmin} + XQ_{cmin})}{2\varepsilon(R + X \tan \varphi)} \quad (III. 1)$$

Avec $\varepsilon = l/L$

Où:

- L, R et X : la longueur, la résistance et la réactance totales du départ ;
- P_{cmin} et Q_{cmin} : les puissances active et réactive minimales consommées sur le départ ;
- $\tan(\varphi)$: de la production associée à $P_{raccmax}$ à la distance l ;
- U_0 : la tension au secondaire du transformateur amont ;
- U_{max} : la tension maximale admissible à la distance l du poste électrique.

Si $L=0$, l'équation de la puissance de raccordement devienne :

$$S_{raccmax} = S_{source} + S_{cmin} \quad (III. 2)$$

III.2.4. Types de raccordement

L'énergie éolienne est comme toute production décentralisée a deux types de raccordement dans le réseau électrique:

- **Raccordement en départ mixte** : le raccordement à un départ existant auquel des consommateurs et éventuellement des producteurs sont déjà raccordés (Figure III.2.a).

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

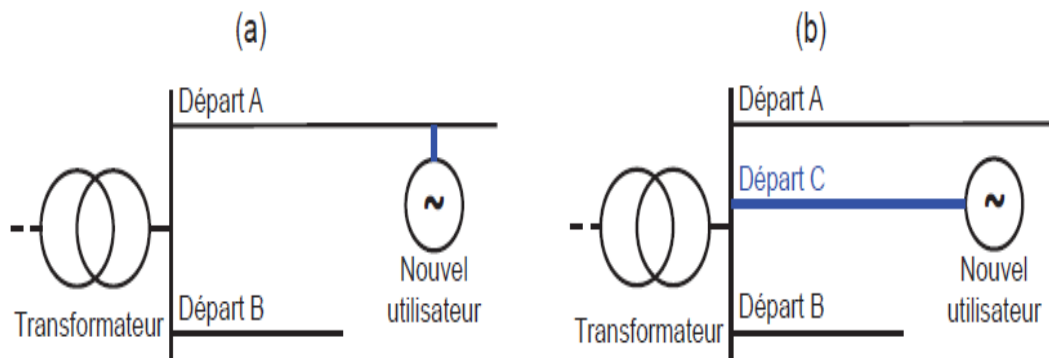


Figure III.2 : Illustration des configurations de raccordement (a) en départ mixte (b) en départ direct [13]

III.3. Les impacts de l'intégration d'un système éolien dans le réseau

Le raccordement un système électrique quelconque a un impact non négligeable qui dépend de la technologie utilisée, et aussi du type de réseau. En général on peut dire que plus le taux de pénétration est important plus l'impact de l'intégration des énergies renouvelable dans les réseaux est significatif. On peut distinguer des impacts locaux qui concernent tous les types de réseaux et les impacts globaux qui concernent en particulier les réseaux de transports interconnectés et les réseaux insulaires [14].

III.3.1. Impacts Locaux

Ce sont les impacts qui se produisent dans le point de raccordement de l'unité et. Les impacts locaux sont en général indépendants du taux de pénétration global des unités de production des énergies dans le système. Ils concernent deux principaux aspects : la capacité d'accueil du réseau et la qualité de tension :

III.3.1.1. Plan de tension

Les impacts sur la tension de telles productions vont être différents selon le type de réseaux auxquels elles sont connectées. Selon la nature du réseau, les caractéristiques du poste source, le point de raccordement et la puissance injectée par l'éolienne, la tension peut être élevée au point de raccordement, pouvant même dépasser la limite admissible. La gestion du plan de tension a pour objet 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. L'intégration de l'énergie éolienne provoque les fluctuations suivantes :

Chapitre III Raccordement d'énergie renouvelable dans le réseau de distribution et leurs impacts

- **Creux de tension**
- **Flicker**
- **Harmonique**

III.3.1.2. Court-Circuit

L'impact sur le courant de court-circuit dû aux éoliennes qui suivant la technologie peuvent, en cas de défaut sur le réseau, alimenter et donc accroître le courant de court-circuit circulant dans le réseau. La contrainte ici est de ne dépasser ni les valeurs maximales admissibles pour les différents appareillages de réseaux et les conducteurs, ni le pouvoir de coupure des organes de protection. Chaque appareil de coupure possède un pouvoir de fermeture et un pouvoir de coupure sur défaut ; un dépassement des valeurs de dimensionnement de l'appareil de coupure a pour conséquence un risque de non coupure de l'arc ou de non fermeture du courant de défaut avec un fort risque de destruction de l'appareillage.

Les éoliennes à vitesse fixe, étant équipées de machines asynchrones classiques directement couplées au réseau, contribuent de façon significative aux courants de court-circuit.

Les éoliennes à vitesse variable équipées de machines asynchrones à double alimentation contribuent aussi aux courants de court-circuit. Cependant cette contribution diminue rapidement du fait de l'action des équipements d'électronique de puissance qui détectent et mesurent les défauts rapidement.

La contribution des éoliennes à vitesse variable équipées de machines synchrones est négligeable car la machine est entièrement découplée du réseau par l'interface à électronique de puissance.

III.3.1.3. Plan de protection

Le plan de protection est un système coordonné de protections visant à isoler très rapidement un ouvrage en défaut (ligne, transformateur, jeu de barres, etc.) afin de garantir la sécurité des biens et des personnes. Différents types de relais mesurant différentes grandeurs physiques sont utilisés.

Le raccordement de la production d'énergie renouvelable peut entraîner des variations du sens (réseau de production) ou de l'amplitude des courants en régime permanent, des variations des courants de court-circuit, des modifications de la tension, des variations des impédances mesurées, etc. Ces variations peuvent avoir une influence sur le bon fonctionnement du plan

Chapitre III Raccordement d'énergie renouvelable dans le réseau de distribution et leurs impacts

de protection avec notamment des aveuglements de protection ou des déclenchements intempestifs...

III.3.2. Impact globaux

A part les impacts locaux qui ont des effets dans le voisinage du point de raccordement, les unités de production des énergies renouvelables peuvent avoir des impacts plus globaux à l'échelle d'une région surtout si elles sont raccordées au réseau de transport ou dans les réseaux insulaires.

III.3.2.1. Impact sur le fonctionnement des systèmes

La problématique majeure liée à l'intégration des énergies renouvelables dans les réseaux est de deux ordres :

- La variabilité de la production d'énergie renouvelable du fait des variations de l'énergie primaire qui de plus est non contrôlable (fatale). Les gestionnaires de réseau doivent donc faire face à une production fatale variable. Des capacités de production de réserve contrôlables sont alors nécessaires pour pallier à ces variations, en particulier pour satisfaire la demande en période de pointe,
- L'incertitude sur les prévisions météorologiques induisant une incertitude sur la production. Cette problématique est plus marquée pour la production éolienne car les prévisions de vitesse de vent sont moins fiables que celles de l'ensoleillement.

Les deux aspects cités plus haut ont trait à des impacts liés surtout à la réalisation de l'équilibre production-consommation à divers horizons temporels. Outre ces préoccupations, restent celles liées à la sécurité du réseau du point de vue global.

III.3.2.2. Capacité de transport

L'impact de l'intégration des Energies renouvelables sur les capacités de transport dépend de la situation géographique de la production renouvelable par rapport à la demande, de la corrélation entre cette production et la demande et de la puissance du réseau initial. La production d'énergie renouvelable affecte le transit de puissance dans le réseau : elle peut changer le sens des flux, augmenter ou réduire les pertes. L'analyse des capacités de transport nécessite à la fois des études statiques (calcul de la répartition des flux de puissance) et dynamiques (analyse de stabilité).

III.3.2.3. Impacts sur le sens de transit de puissance

Chapitre III Raccordement d'énergie renouvelable dans le réseau de distribution et leurs impacts

Les réseaux sont dimensionnés pour recevoir les flux d'énergie du réseau de transport vers la distribution. L'insertion d'une production décentralisée (l'énergie éolienne...) dans les niveaux de tension autres que le réseau de transport peut créer une injection de puissance dans le sens contraire, c'est-à-dire de la distribution vers le transport. Les équipements, notamment les protections doivent alors être bidirectionnelles. Ainsi, sachant que les réseaux au niveau de tension inférieure sont normalement surdimensionnés afin de faire face à l'accroissement de consommation, lorsque le taux de pénétration de PD augmentera, la modification du sens de transit de puissance pourra éventuellement provoquer des congestions locales.

III.3.2.4. Dispatching

Cet impact est dû à la variabilité et aux erreurs de prédiction de la production renouvelable. Les deux principaux aspects influences sont : le dispatching, et l'exploitation (durée, charge partielle, arrêts/démarrages) du parc de production. Il est donc important de développer des méthodes pour analyser et intégrer l'impact des énergies renouvelables sur la gestion prévisionnelle du parc de production.

III.4. Conclusion

A la fin de ce chapitre on prend de point de vue général les contraintes imposées pour un bon fonctionnement du système électrique au cours de l'intégration d'une production décentralisée surtout l'énergie éolienne et ses impacts sur le réseau électrique.

Chapitre IV

Etude de l'écoulement de puissance avec et sans intégration d'un générateur éolien

IV.1.Introduction

Dans ce chapitre on s'intéressera en premier temps à une généralité sur l'étude de répartition de puissance et certaines méthodes de calculs, Ainsi l'application de notre travail qui consiste à l'étude du comportement d'un réseau radial avec et sans intégration d'un ferme éolien.

IV.2. Généralités sur la répartition de puissance

IV.2.1. Le but de l'écoulement de puissance

L'étude de l'écoulement de puissance ou le 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.

IV.2.2. Classification des jeux de barres

Les jeux de barres sont classés en trois différentes catégories :

➤ **Jeu de barre de charges (P, Q)**

Nous avons 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 δ_i [15].

➤ **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 δ_i ainsi que Q_i [15].

➤ **Jeu de barre de référence (|V|, δ)**

On connaît P_{Di} et Q_{Di} et on spécifie $|V_i|$ et δ_i (δ_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 [15].

On associe à chaque jeu de barre quatre quantités, dont deux sont connues [16]:

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

IV.3. Méthode de calculs d'écoulement des puissances

Il existe plusieurs méthodes qui traitent le problème lié au calcul d'écoulement de puissance dans un réseau de distribution radial. On choisit parmi ces méthodes deux méthodes matricielle l'une était proposée par **Smarajit Ghosh, Karma Sonam Sherpa** [15] et l'autre méthode qui se basant sur la topologie d'un réseau de distribution radial.

IV.3.1 Méthode matricielle pour la résolution des équations d'écoulement de puissance en réseau radial [16]

C'est la méthode matricielle qu'elle était proposée par **Smarajit Ghosh, Karma Sonam Sherpa**. L'application de cette méthode passe par deux étapes essentielles qui sont :

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

IV.3.1.1. 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. [2].

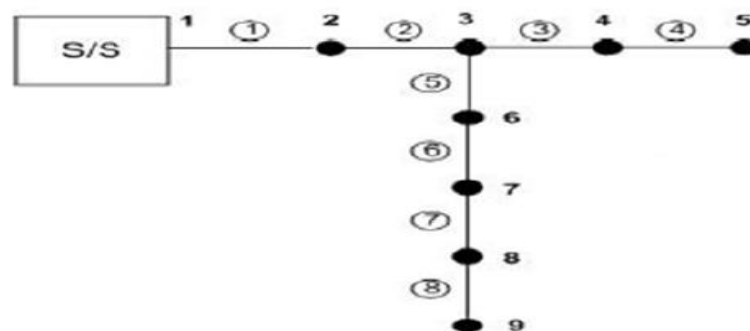


Figure IV.1 : Réseau radial [16]

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

Chapitre IV Etude de l'écoulement de puissance avec et sans intégration d'un générateur éolien

$$A = \begin{bmatrix} 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ 0 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ 0 & 0 & 4 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 6 & 7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 7 & 8 & 9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 & 9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 9 \end{bmatrix} \quad (\text{IV. 1})$$

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.

b. 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.

$$A = \begin{bmatrix} s2 & s3 & s4 & s5 & s6 & s7 & s8 & s9 \\ 0 & s3 & s4 & s5 & s6 & s7 & s8 & s9 \\ 0 & 0 & s4 & s5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s6 & s7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s7 & s8 & s9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s8 & s9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s9 \end{bmatrix} \quad (\text{IV. 2})$$

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

$$S_{(k2)} = \text{Conj}(S_{(k2)}) \quad (\text{IV. 3})$$

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

$$I_{L(k)} = \frac{(P_{L(k)} - jQ_{L(k)})}{\text{Conj}(V_{(k)})} \quad (\text{IV. 4})$$

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.

Chapitre IV Etude de l'écoulement de puissance avec et sans intégration d'un générateur éolien

$V(k)$: Tension au nœud K.

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

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

$$I_{jj} = \sum nb_{jj} I_{LK} \quad (\text{IV.5})$$

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 :

$$I_j = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \\ I_7 \\ I_8 \end{bmatrix} \quad (\text{IV.6})$$

IV.3.1.2. Détermination l'amplitude de la tension ainsi que son déphasage à chaque nœud [15]

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 :

Chapitre IV Etude de l'écoulement de puissance avec et sans intégration d'un générateur éolien

$$Z(j) = \begin{bmatrix} Z(1) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Z(2) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z(3) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Z(4) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Z(5) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z(6) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z(7) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z(8) \end{bmatrix} \quad (\text{IV.7})$$

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 (IV.8)

$$\Delta U = Z(j) * I(j) \quad (\text{IV.8})$$

Donc :

$$\Delta U = \begin{bmatrix} Z(1) * I_1 \\ Z(2) * I_2 \\ Z(3) * I_3 \\ Z(4) * I_4 \\ Z(5) * I_5 \\ Z(6) * I_6 \\ Z(7) * I_7 \\ Z(8) * I_8 \end{bmatrix} \quad (\text{IV.9})$$

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

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

$$D1 = \begin{bmatrix} Z(1) * I_1 \\ Z(2) * I_2 \\ Z(3) * I_3 \\ Z(4) * I_4 \end{bmatrix}$$

$$D2 = \begin{bmatrix} Z(1) * I_1 \\ Z(2) * I_2 \\ Z(5) * I_5 \\ Z(6) * I_6 \\ Z(7) * I_7 \\ Z(8) * I_8 \end{bmatrix}$$

Chapitre IV Etude de l'écoulement de puissance avec et sans intégration d'un générateur éolien

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).

b. On calcule les tensions dans tous les nœuds avec les deux équations (IV.10) et (IV.11) :

Sachant que la tension au premier nœud est fixée à 1 p.u. le vecteur de tension initial est donné comme suite :

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

$$V_1 = \begin{bmatrix} Z(1) * I_1 \\ Z(1) * I_1 - Z(2) * I_2 \\ Z(1) * I_1 - Z(2) * I_2 - Z(3) * I_3 \\ Z(1) * I_1 - Z(2) * I_2 - Z(3) * I_3 - Z(4) * I_4 \end{bmatrix} \quad (IV.10)$$

Et

$$V_2 = \begin{bmatrix} Z(1) * I_1 \\ Z(1) * I_1 - Z(2) * I_2 \\ Z(1) * I_1 - Z(2) * I_2 - Z(5) * I_5 \\ Z(1) * I_1 - Z(2) * I_2 - Z(5) * I_5 \\ Z(1) * I_1 - Z(2) * I_2 - Z(5) * I_5 - Z(6) * I_6 \\ Z(1) * I_1 - Z(2) * I_2 - Z(5) * I_5 - Z(6) * I_6 - Z(7) * I_7 \\ Z(1) * I_1 - Z(2) * I_2 - Z(5) * I_5 - Z(6) * I_6 - Z(7) * I_7 - Z(8) * I_8 \end{bmatrix} \quad (IV.11)$$

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 :

$$V1 = \begin{bmatrix} V(2) \\ V(3) \\ V(4) \\ V(5) \\ V(6) \\ V(7) \\ V(8) \\ V(9) \end{bmatrix}$$

IV.3.2. 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.

IV.3.2.1. Construction de la Matrice [BIBC]

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

$$I_i = \left(\frac{P_i + jQ_i}{V_i} \right)^* \tag{IV.12}$$

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 charge

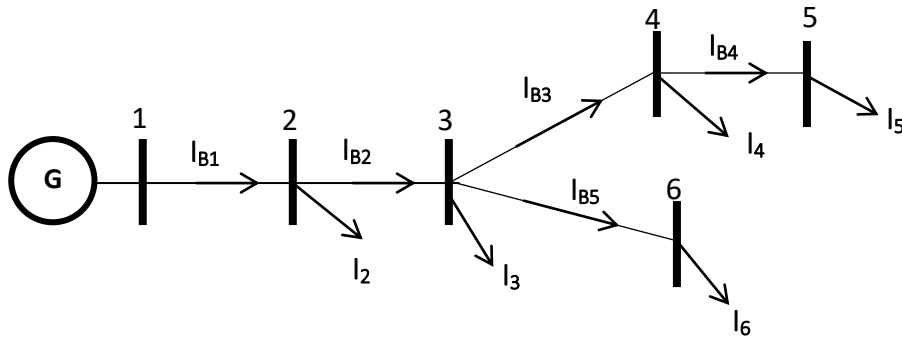


Figure IV.2 : Exemple d'un réseau de distribution

$$\begin{cases} I_{B1} = I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6 \\ I_{B2} = I_3 + I_4 + I_5 + I_6 \\ I_{B3} = I_4 + I_5 \\ I_{B4} = I_5 \\ I_{B5} = I_6 \end{cases} \tag{IV.13}$$

Chapitre IV Etude de l'écoulement de puissance avec et sans intégration d'un générateur éolien

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

$$\begin{bmatrix} I_{B1} \\ I_{B2} \\ I_{B3} \\ I_{B4} \\ I_{B5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} \quad (\text{IV. 14})$$

Cette équation peut s'écrire sous la forme :

$$[IB] = [BIBC][I_{ch}] \quad (\text{IV. 15})$$

Où :

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

[BIBC] : est le vecteur des courants de charges (injectés) de dimension (n - 1) ;

[I_{ch}] : 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].

IV.3.2.2. Construction de la 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:

$$\begin{cases} V_3 = V_2 - I_{B2}Z_{23} \\ V_4 = V_3 - I_{B3}Z_{34} \end{cases} \quad (\text{IV. 16})$$

Chapitre IV Etude de l'écoulement de puissance avec et sans intégration d'un générateur éolien

V_i : La tension de l'accès i ;

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

$$V_4 = V_1 - I_{B1}Z_{12} - I_{B2}Z_{23} - I_{B3}Z_{34} \quad (\text{IV.17})$$

D'après (IV.30), 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 :

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_1 \\ V_1 \\ V_1 \\ V_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & Z_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{B1} \\ I_{B2} \\ I_{B3} \\ I_{B4} \\ I_{B5} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.18})$$

L'équation (IV.32) peut être réécrite sous la forme générale :

$$[\Delta V] = [BCBV][IB] \quad (\text{IV.19})$$

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 [15] :

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 $[BCBV]$.

IV.3.2.3. Développement de la méthode

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

En Combinant (IV.15) et (IV.19), le rapport entre les courants injectés aux accès et les tensions d'accès peuvent être exprimé comme suit :

$$[\Delta V] = [BCBV][BIBC][I] = [DLF][I] \quad (IV.20)$$

Et la solution pour l'écoulement de puissance de réseau de distribution peut être obtenue par les équations itérative IV.21, IV.22, et IV.23 :

$$I_i^k = \left(\frac{P_i + jQ_i}{V_i^k} \right)^* \quad (IV.21)$$

$$[\Delta V^{k+1}] = [DLF][I^k] \quad (IV.22)$$

$$[V^{k+1}] = [V_1] + [\Delta V^{k+1}] \quad (IV.23)$$

IV.3.2.4. Algorithme de la méthode

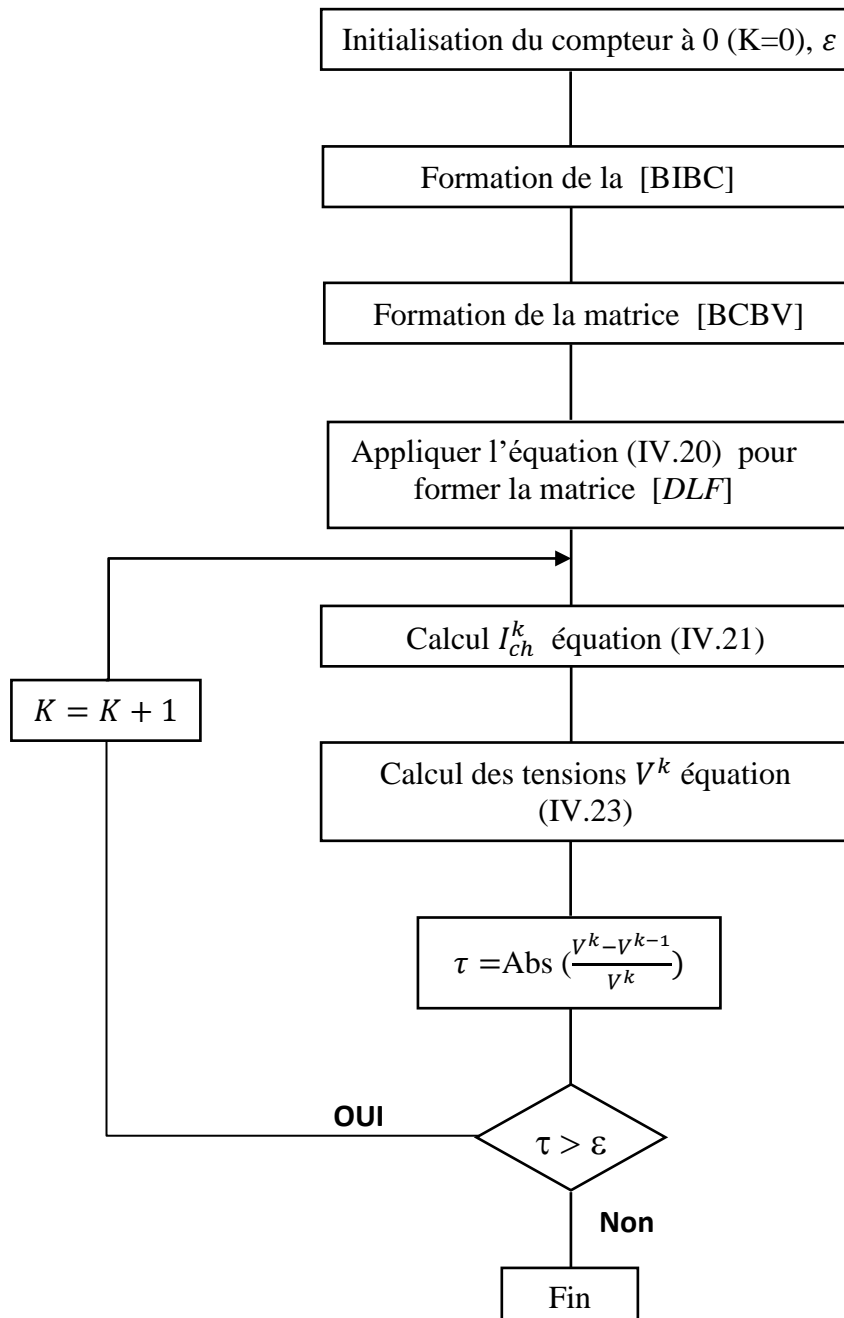


Figure IV.3 : Algorithme de calcul de l'écoulement de puissances

IV.4. Simulation et interprétation des résultats

Afin d'analyser l'influence de l'intégration d'une production éolienne au réseau de distribution, nous allons effectuer un calcul d'écoulement de puissance dans un réseau radial à six jeux de barres afin d'évaluer les tensions et les puissances. Puis nous allons étudier l'impact de l'intégration d'une production éolienne au réseau.

Chapitre IV Etude de l'écoulement de puissance avec et sans intégration d'un générateur éolien

La modélisation mathématique des systèmes non linéaires à résoudre pour l'étude de la répartition de puissance, consiste à faire appel aux outils mathématiques de calcul de l'écoulement de puissance à savoir la méthode se basant sur la topologie d'un réseau de distribution qui sera implantée dans l'environnement MATLAB.

IV.4.1. Topologie du réseau étudié

Le réseau étudié dans notre travail (figure IV.4) est constitué de 6 jeux de barres espacées de 5 km consommant au total 10 MW. Les paramètres des conducteurs sont donc : $r=0.206\Omega/\text{km}$ et $x=0.1\Omega/\text{km}$. Le nœud 1 représente le jeu de barre de référence [4].

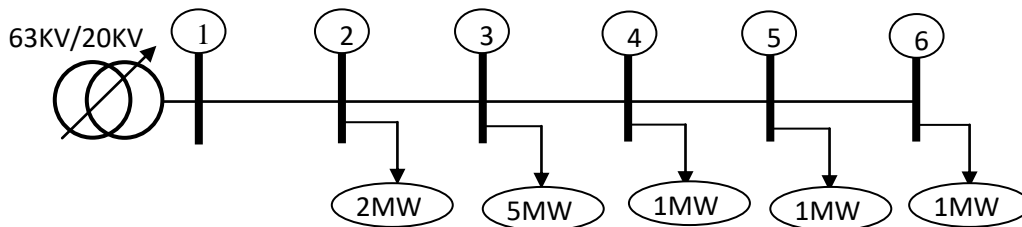


Figure IV.4: Schéma du réseau étudié

IV.4.2. Résultats de simulation

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

- Réseau sans générateur éolien
- Intégration du générateur éolien

a- Réseau sans éolienne

Le calcul de l'écoulement de puissance du réseau test avant l'insertion d'une source éolienne a donné les résultats représentés dans les figures (IV.5) et (IV.6).

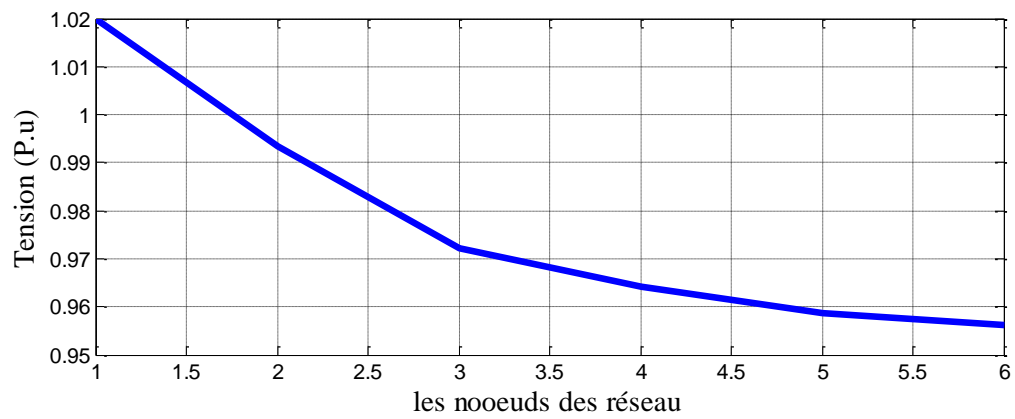


Figure IV.5 : Allure de tension au niveau des 6 jeux de barres sans générateur éolien

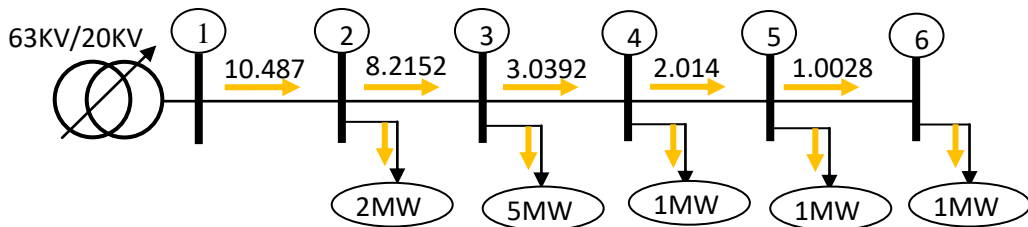


Figure IV.6: Transit de puissance dans le réseau test sans générateur éolien

b- Intégration du générateur éolien

Cas 1 : le générateur éolien est connecté au nœud 6 (P éolien=2MW) (figure IV.7)

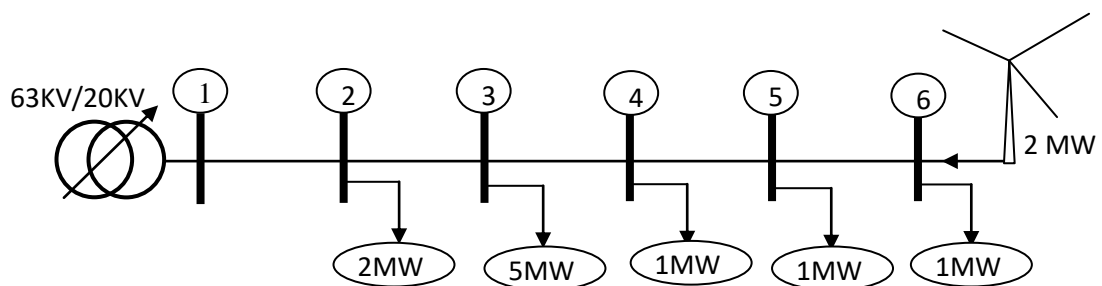


Figure IV.7 : Schéma du réseau étudié avec insertion du générateur éolien au nœud 6

Chapitre IV Etude de l'écoulement de puissance avec et sans intégration d'un générateur éolien

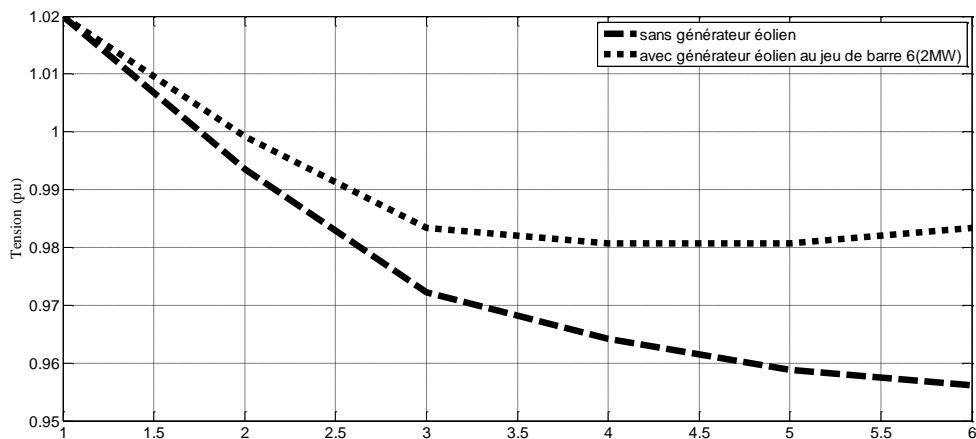


Figure IV.8 : Allure de la tension au niveau des 6 jeux de barres avec insertion de l'éolienne

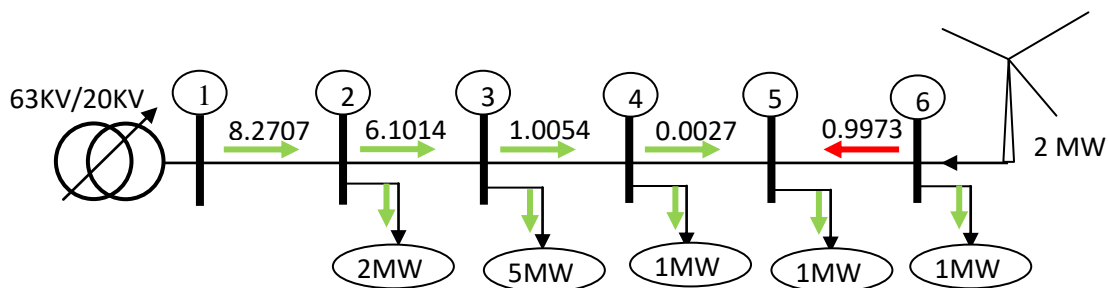


Figure IV.9 : Transit de puissance dans le réseau test avec insertion de l'éolienne au nœud

Cas 2 : le générateur éolien est connecté au nœud 5 ($P_{\text{éolien}}=5\text{MW}$) (figure IV.10)

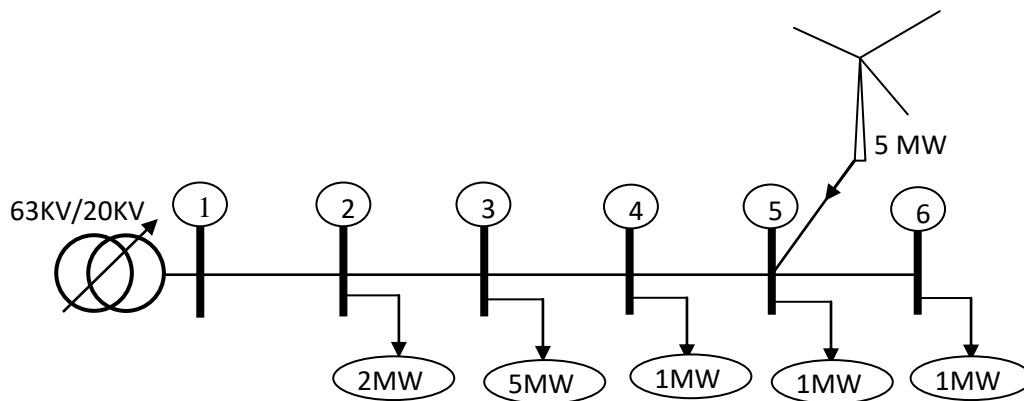


Figure IV.10 : Schéma du réseau étudié avec insertion du générateur éolien au nœud 5

Chapitre IV Etude de l'écoulement de puissance avec et sans intégration d'un générateur éolien

Le calcul de l'écoulement de puissance du réseau test après l'intégration d'une source éolienne a donné les résultats représentés dans les figures (IV.11) et (IV.12).

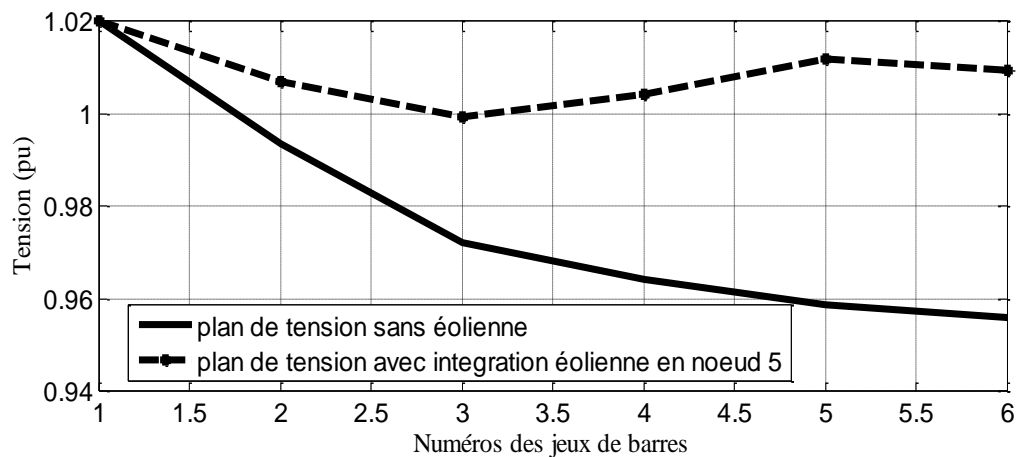


Figure IV.11 : Allure de la tension au niveau des 6 jeux de barres avec insertion de l'éolienne au nœud 5

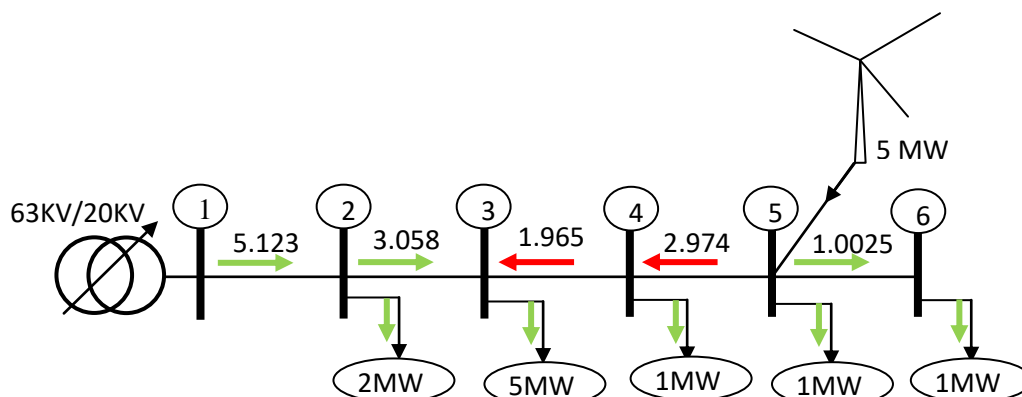


Figure IV.12 : Transit de puissance dans le réseau test avec insertion de l'éolienne au nœud 5

Cas 3 : Connexion d'éolien aux nœuds 3 (5 MW) et 5 (6 MW)

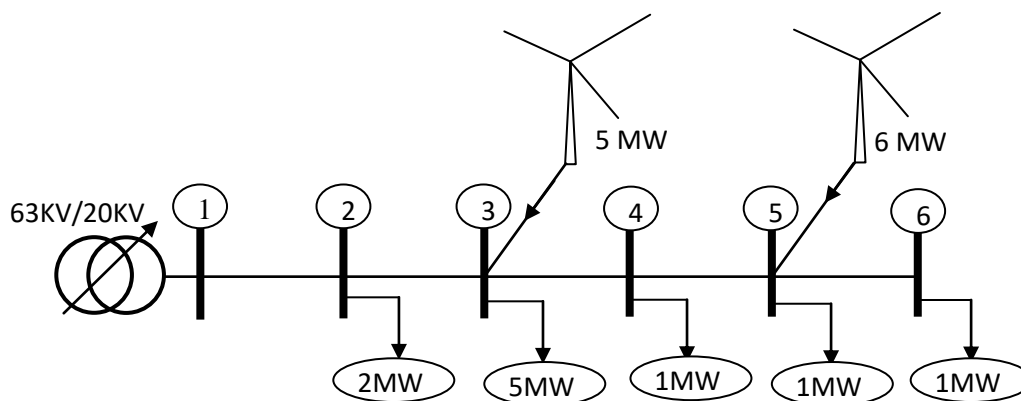


Figure IV.13 : Schéma du réseau étudié avec insertion du générateur éolien aux nœuds 3 et 5

Chapitre IV Etude de l'écoulement de puissance avec et sans intégration d'un générateur éolien

Le calcul de l'écoulement de puissance du réseau au cours de l'intégration d'une source éolienne dans les nœuds 3 et 5 a donné les résultats représentés dans les figures (IV.14), (IV.15) et (IV.16).

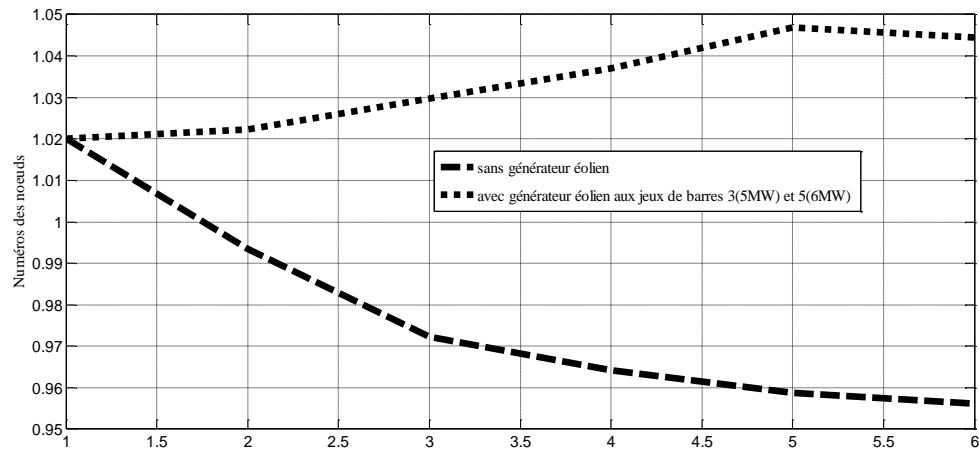


Figure IV.14 : Allure de la tension au niveau des 6 jeux de barres avec insertion de l'éolienne aux nœuds 3 et 5

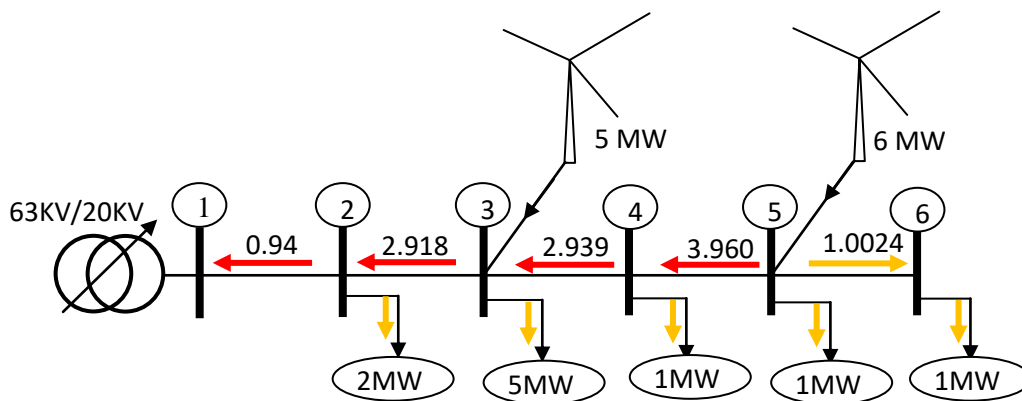


Figure IV.15 : Transit de puissance dans le réseau avec insertion de l'éolienne aux nœuds 3 et 5

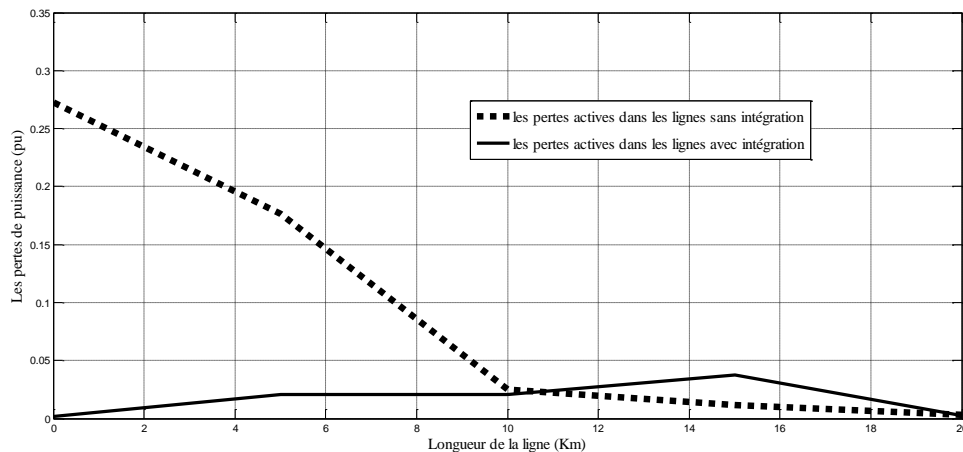


Figure IV.16 : les pertes des puissances dans les lignes

IV.5. Interprétation des résultats

Les figures IV.5 et IV.6 illustrent le plan de tension avec une chute de tension inadmissible en aval de notre réseau et des transits des puissances normaux (de l'amont vers l'aval) sans intégration de la ferme éolienne. On peut remarquer qu'au nœud 1 la tension est maintenue à 1.02 dans tous les cas (avec et sans intégration) de notre réseau, c'était grâce à la consigne du transformateur régleur en charge.

Nous avons intégrés en premier temps une ferme éolienne de 2 MW au nœud 6, l'énergie est consommée plus localement que le cas sans intégration. Le plan de tension avec une ferme éolienne connectée permet dans ce cas d'augmenter la tension tout en restant dans les limites admissibles, ceci est bien pour le réseau, car cela permet de réduire les pertes.

La Figure IV.6 montre les transits de puissance obtenus dans ce réseau test sans intégration d'un générateur éolien. Les flux de puissance sont unidirectionnels et proviennent du réseau de transport. La figure IV.9 qui illustre les transits et la répartition des puissances au cours de l'intégration, les flux des puissances ont devenues bidirectionnelles.

Notre deuxième cas d'intégration c'est d'une ferme éolienne de 5 MW au nœud 5 et nous avons sortis avec la Figure IV.11 qui illustre le plan de tension avec une diminution des chutes des tensions important c.-à-d la tension a remonté et restera admissibles. et la Figure IV.12 qui prouve l'impact de transit bidirectionnelle des puissances à chaque insertion.

Chapitre IV Etude de l'écoulement de puissance avec et sans intégration d'un générateur éolien

En fin on a connecté le réseau avec une ferme éolienne de 11 MW répartie au nœud 3 de 5 MW et au nœud 5 de 6 MW et nous avons obtenu la Figure IV.14 qui montre une surtension au jeu de barre 5, et la figure IV.15 illustre un cas d'exportation de puissance vers le réseau de transport.

La Figure IV.16 illustre les pertes des puissances dans les lignes avec et sans intégration et montre la participation de l'éolienne pour les limites des chutes de tension.

IV.6. Conclusion

Selon le traitement de ce chapitre on peut comprendre de point de vue générale la répartition des puissances avec et sans intégration des énergies renouvelables dans le réseau électrique, le comportement de tension et des puissances et la participation aux diminutions des chutes des tensions sans oublié les impacts lors de l'intégration.

Conclusion générale

Il était prévu de travailler sur le logiciel de simulation des réseaux électriques EMTP, pour intégrer la ferme éolienne dans le réseau de distribution de la wilaya d'Adrar-Algérie, malheureusement le logiciel a cessé de fonctionner, malgré nos efforts. Cela nous exige de changer un petit peu le plan de travail par une simulation d'un réseau radial sans et avec une insertion d'une ferme éolienne de différentes valeurs à l'aide du logiciel MATLAB.

Selon la simulation réalisée d'insertion d'une ferme éolienne dans un réseau électrique radial de 10 MW répartie à 6 jeux de barres, on peut dire que :

- L'intégration d'éolienne augmente la capacité de puissance,
- L'impact de la ferme éolienne sur le flux des puissances,
- La diminution des pertes des puissances dans les lignes,
- La diminution des chutes des tensions dans les lignes,
- Une modification importante et admissible sur le profil de tension.

A la fin de ce mémoire on a prouvé par notre étude que le réseau électrique exige à la source décentralisée le respect de certains paramètres tel que la tension, fréquence et la symétrie des lignes pour l'intégrer. Par conséquent les impacts resteront significatifs et il faut les considérer, pour un bon fonctionnement du réseau électrique.

Bibliographie

- [1] NOUREDINE Hadjsaïd, “Les réseaux électriques de distribution de la production dé centralisée aux Smart Grids”, Edition: Lavoisier, 2010.
- [2] “Réseaux de Distribution de l'électricité et du gaz”,
<http://www.sonelgaz.dz/?page=article&id=17>
- [3] BORIS Berseneff, “Réglage de tension dans les réseaux de distribution du futur”,
Thèse doctorat, Institut national polytechnique Grenoble, 2010.
- [4] PAUL Makanga Koumba, “Etude d'intégration de sources renouvelable à un réseau électrique autonome”, Mémoire de maîtrise, Université du Québec à trois rivières 2013.
- [5] EL AIMANI Salma, “Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension”, Thèse doctorat, école centrale de Lille 2014.
- [6] “les exploiters de L'énergie, l'énergie éolienne”,
<http://www.explorateurs-energie.com/index.php/les-energies/eolienne>
- [7] “Installation d'éolienne”,
<https://www.quelleenergie.fr/questions/difference-eolienne-verticale-horizontale>
- [8] “Les différents types d'éoliennes”, <https://eolienne.ooreka.fr/comprendre/>
- [9] ZERARI Naziha, “ Modélisation et optimisation multi objectifs d'une éolienne à axe horizontal d'un système de production éolien isolé de petite taille”, Thèse doctorat, Université Badji mokhtar-annaba, 2015.
- [10] “Composantes d'une éolienne”,
<https://www.connaissancedesenergies.org/quels-sont-les-constituants-d-une-eolienne-130125>
- [11] “Centre de développement des énergies renouvelables, L'énergie éolienne”
<https://www.cder.dz/>
- [12] “Grid connexion”,
http://www.i15.p.lodz.pl/stromy/EIC/res/Grid_connection_wind_power.html
- [13] HELOÏSE Dutrieux, “Méthodes pour la planification pluriannuelle des réseaux de distribution. Application à l'analyse technico-économique des solutions d'intégration des énergies renouvelables intermittentes”, Thèse de doctorat, école centrale de Lille, 2015.

- [14] Herman Bayem, “Apport des méthodes probabilistes aux études d’intégration des énergies renouvelables aux systèmes électriques”, Thèse de doctorat, Ecole Doctorale des Sciences et Technologies de l’Information, des Télécommunications et des systèmes d’Orsay ,2009.
- [15] LOUNIS Anis, MADI Ahmed “ Développement d’une approche simple pour le calcul de l’écoulement de puissance dans un réseau de distribution”, Mémoire master, Université A. MIRA-Bejaia, 2016.
- [16] SAADI Ferhat, TENBOUKTI Hanafi “Calcul de l’écoulement de puissance dans un réseau de distribution radial avec insertion d’un générateur éolien”, Mémoire master, Université A. MIRA-Bejaia, 2016.