



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة الجيلاي بونعاما خميس مليانة

Djilali BOUNAAMA Université - Khemis Miliana

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم الهندسة الكهربائية

Département de Génie Electrique

Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du Master

En Science et Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Impact de l'intégration des éoliennes sur le régleur en charge (Cas d'un réseau MT)

Présenté par

BATACHE Abd El Kader

BEN ZEKRI Abdelhamid

Encadré par

Dr. Youcef BOT

L'année Scolaire

2019 / 2020

Remerciements

Avant tout, nous remercions le bon dieu tout puissant qui nous donne de la foi, du courage et de patience afin d'accomplir ce modeste travail.

Nous tenons à remercier notre promoteur Mr. Y.BOT d'avoir accepté de nous encadrer et pour Les efforts qu'il est déployé, pour nous aider, conseiller. encourager et corriger avec une grande gentillesse durant toute cette période.

Nous remercions tous les membres du jury qui Ont accepté de juger notre travail et pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce dernier.

Nous remercions tous les enseignants qui ont Contribué à notre formation sans exception.

Sohayb. Hamid

Résumer

Résumer

Ce travail traite de l'impact des éoliennes sur le réseau électrique, et en particulier de leur profil de tension après l'installation des éoliennes dans le réseau. Cela se fait en examinant le test du réseau de distribution moyenne tension. Le premier chapitre traite de la dimension éolienne, du principe de conversion pour produire de l'électricité, des types d'éoliennes, de leur retour à partir de la limite de Betz, ainsi que de leur modélisation mathématique et de leurs technologies. Le deuxième chapitre contient les caractéristiques des réseaux de distribution électrique et le contrôle de la tension par une production décentralisée. Dans le dernier chapitre, nous nous concentrons sur les technologies de connexion des énergies renouvelables, en particulier l'énergie éolienne, et l'impact de leur intégration dans le réseau de distribution d'électricité.

Les mots clé: Eoliennes, Conversion, Réseaux de distribution, énergies renouvelables

Abstract

This work deals with the impact of wind turbines on the power grid, and in particular their voltage profile after installing wind turbines in the grid. This is done by examining the medium voltage distribution network test. The first chapter deals with the wind energy aspect, the conversion principle to generate electricity, the types of wind turbines, their return from the Betz limit, as well as their mathematical modeling and technologies. The second chapter contains the characteristics of electrical distribution networks, and the control of voltage through decentralized production. In the last chapter, we focus on the techniques of connecting renewable energies, especially wind energy, and the impact of their integration into the electricity distribution network.

Key words: Wind turbines, Conversion, Distribution networks, renewable energies

الملخص:

يتناول هذا العمل تأثير توربينات الرياح على شبكة الكهرباء، ولا سيما ملف الجهد الخاص بها بعد تركيب توربينات الرياح في الشبكة. يتم ذلك عن طريق فحص اختبار شبكة توزيع الجهد المتوسط. يتناول الفصل الأول جانب طاقة الرياح، مبدأ التحويل لتوليد الكهرباء، أنواع توربينات الرياح، عاندها من حد Betz، وكذلك نمذجتها الرياضية وتقنياتها ويحتوي الفصل الثاني خصائص شبكات التوزيع الكهربائية، والتحكم في الجهد من خلال إنتاج لا مركزي. في الفصل الأخير نركز على تقنيات ربط الطاقات المتجددة خاصة طاقة الرياح وتأثير اندماجها في شبكة توزيع الكهرباء.

الكلمات المفتاحية: توربينات الرياح - شبكات التحويل والتوزيع - الطاقات المتجددة

Table des Matières

Introduction et contexte

I. Introduction.....	1
Chapitre I	L'énergie éolienne - Aspect et modélisation
I.1. Introduction.....	3
I.2. Définition de l'énergie éolienne.....	3
I.3. Les différents types des turbines éoliennes	3
I.3.1. Eolienne à axe verticale.....	3
I.3.2. Eolienne à axe horizontale.....	5
I.3.2.1. Composantes d'une éolienne à axe horizontale.....	7
I.4. Les générateurs éoliens.....	8
I.4.1. Eolienne à vitesse fixe.....	8
I.4.2. Eolienne à vitesse variable.....	9
I.4.2.1. Eolienne à base de machine asynchrone à double alimentation (MADA)	9
I.4.2.2. Eolienne à base de machine synchrone à aimants permanents (MS).....	10
I.5. Modélisation de la turbine éolienne.....	11
I.5.1. L'énergie récupérable par une turbine.....	11
I.5.2. Limite de Betz.....	12
I.5.3. Modèle du multiplicateur.....	13
I.5.4. Equation dynamique de l'arbre.....	14
I.6. Simulation d'un exemple d'une éolienne avec le vent.....	14
I.7. Les résultats de simulation.....	17
I.8. Conclusion.....	18
Chapitre II	Les réseaux électriques de distribution
II.1. Introduction.....	19
II.2. Généralités sur le réseau électrique.....	19
II.2.1. Rappel sur la production de l'énergie électrique.....	19
II.2.2. Système de transformation.....	20
II.2.3. Description des réseaux électriques.....	20
II.2.4. Le réseau de transport.....	20
II.2.5. Le réseau de distribution.....	21
II.2.6. Structures topologiques des réseaux.....	21
II.2.6.1. Réseau radial.....	21
II.2.6.2. Réseau bouclé.....	21

Table des Matières

II.2.6.3. Réseau maillé.....	21
II.3. Caractéristiques des réseaux de distribution.....	21
II.3.1. Caractéristiques générales.....	21
II.3.2. Le réseau électrique algérien.....	22
II.3.3. Les niveaux de tension.....	22
II.3.4. Les postes sources HTB/HTA.....	23
II.4. Réglage de tension dans les réseaux de distribution.....	24
II.4.1. Qualité de service.....	24
II.4.2. Le réglage de tension pour la sécurité des réseaux.....	24
II.4.3. Le réglage de tension pour l'exploitation normale des réseaux.....	24
II.5. Réglage de la tension dans les réseaux de distribution actuels.....	26
II.5.1. Compensation de puissance réactive au poste source.....	26
II.5.2. Les régulateurs en charge.....	26
II.5.3. Le réglage par la production décentralisée (PD).....	26
II.6. Simulation sur un réseau MT de test.....	28
II.6.1. Les Résultats de simulation.....	30
II.7. Conclusion.....	31
Chapitre III Raccordement d'énergie renouvelable dans le réseau de distribution et leurs impacts sur le régulateur en charge.	
III.1. Introduction.....	32
III.2. Technique de raccordement.....	32
III.2.1. Connexion au réseau.....	32
III.2.2. Tension de raccordement.....	33
III.2.3. La capacité d'accueil des réseaux.....	33
III.2.4. Types de raccordement.....	34
III.3. Les impacts de l'intégration d'un système éolien dans le réseau.....	35
III.3.1. Impacts Locaux.....	35
II.3.1.1. Plan de tension.....	35
II.3.1.2. Court-Circuit.....	36
II.3.1.3. Plan de protection.....	36
III.3.2. Impacts globaux.....	37
III.3.2.1. Impact sur le fonctionnement des systèmes.....	37
III.3.2.2. Capacité de transport.....	37

Table des Matières

III.3.2.3. Impacts sur le sens de transit de puissance.....	37
III.3.2.4. Dispatching.....	38
III.3.3. Test et simulation sur le réseau MT.....	38
III.3.4. Discussion et interprétation des résultats.....	40
III.4. Conclusion.....	41
Conclusion Générale.....	42
Référence Bibliographique.....	
Annexes.....	

List des Figures

Chapitre I

Figure I.1 : Schéma d'une turbine éolienne.....	3
Figure I.2 : Schéma de différents types d'éoliennes Darrieus.....	4
Figure I.3 : Schéma d'une éoliennes Savonius.....	4
Figure I.4 : Schéma d'une éolienne à axe verticale.....	5
Figure I.5 : Schéma des différentes composantes d'une éolienne à axe horizontale.....	8
Figure I.6 : Structure d'une éolienne à vitesse fixe.....	9
Figure I.7 : Structure d'une éolienne à base MADA.....	10
Figure I.8 : Structure d'une éolienne à base de MS à aimant permanents.....	10
Figure I.9 : Colonne d'air.....	11
Figure I.10 : Schéma du courant d'air traversant une turbine.....	12
Figure I.11 : Architecture de l'installation.....	15
Figure I.12 : Données techniques et économiques de l'éolienne.....	15
Figure I.13 : Courbe de puissance relative à l'éolienne (Enercon E-48 [800kW]).....	16
Figure I.14 : Architecture du système.....	16
Figure I.15 : Profil de vitesse du vent utilisé pour la simulation du système en 29-30 Aout.....	17
Figure I.16 : Profil de vitesse du vent utilisé pour la simulation du système en 22-23 Décembre.....	17

Chapitre II

Figure II.1 : Schémas d'un réseau électrique.....	20
Figure II.2 : Réseau HTA radial en simple antenne.....	21
Figure II.3 : réseau HTA en boucle ouverte.....	21
Figure II.4 : Appellations normalisées des différents niveaux de tension.....	22
Figure II.5 : Schéma de principe d'un poste source HTB/HTA.....	24
Figure II.6 : Modèle de ligne en π	24
Figure II.7 : Diagramme de Fresnel de la ligne en π	26
Figure II.8 : Détermination de la chute de tension sur une ligne.....	26
Figure II.9 : Diagramme linéaire.....	28
	29

Chapitre III

Figure III.1 : Modèle d'un départ HTA « à grandeurs uniformément réparties ».....	34
Figure III.2 : Illustration des configurations de raccordement (a) en départ mixte (b) en départ direct.....	35
Figure III.3 : Diagramme linéaire.....	38

Liste des Tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 : Classification des turbines éoliennes.....	6
--	---

Chapitre II

Tableau II.1 : Caractéristique de tension en BT et HTA.....	24
Tableau II.2 : Tensions ligne-ligne par bus et nœud sans régulateur en charge.....	29
Tableau II.3 : Tensions ligne-ligne par bus et nœud avec régulateur en charge.....	30

Chapitre III

Tableau III.1 : Niveaux de tension aux points de raccordement en fonction de la puissance installée.....	33
Tableau III.2 : Tensions ligne-ligne par bus et nœud (éolienne sans régulateur en charge).....	39
Tableau III.3 : Tensions ligne-ligne par bus et nœud (éolienne avec régulateur en charge).....	40

Introduction Générale

La capacité éolienne installée mondiale a connu une croissance significative, passant de seulement 24 GW en 2001 à 283 GW en 2012 [1]. Cette croissance devrait se poursuivre pendant quelques années [2]. La croissance est principalement attribuée aux politiques gouvernementales visant à augmenter la part de la consommation d'énergie provenant de ressources renouvelables. Ce faisant, les gouvernements tentent de réduire les émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère et la dépendance à l'égard de l'utilisation du charbon et du pétrole importé.

Cette quantité substantielle d'énergie éolienne doit être connectée au système électrique pour fournir son électricité aux consommateurs potentiels. Mais les éoliennes présentent diverses caractéristiques qui rendent leur intégration différente des centrales électriques conventionnelles. D'une part, contrairement aux centrales électriques conventionnelles, la taille des centrales éoliennes varie de l'éolienne unique de la gamme kW à des centaines de MW de parcs éoliens. Par conséquent, les centrales éoliennes sont connectées au réseau à différents niveaux de tension. D'autre part, pendant le fonctionnement normal des centrales électriques conventionnelles, la puissance requise peut être générée à tout moment, étant donné que la demande de puissance est dans les contraintes techniques de la centrale. Par conséquent, la puissance de sortie est contrôlable et prévisible. Cependant, la production d'énergie des centrales éoliennes dépend de l'état du vent de la région et, en outre, elle fluctue. De plus, les sources conventionnelles utilisent principalement des générateurs synchrones pour produire de l'énergie électrique. Cependant, les centrales éoliennes utilisent différents types de systèmes de générateurs tels que les générateurs à induction, des générateurs à induction à double alimentation ou synchrones avec des convertisseurs pleine puissance. Chacun de ces systèmes générateurs présente des opportunités et des défis différents pour le réseau.

Alors que la plupart des grands parcs éoliens sont connectés à des systèmes de transport à haute tension, les parcs de taille moyenne sont de préférence connectés à des systèmes de distribution à basse tension. Cette préférence découle des coûts de connexion comparativement inférieurs associés à l'installation de parcs éoliens / turbines dans des systèmes à basse tension [3]. Ainsi, il est nécessaire d'exploiter efficacement la capacité d'hébergement d'énergie éolienne des systèmes de distribution. Cependant, les systèmes de distribution moyenne tension ont une résistance du réseau plus faible que leurs contreparties haute tension. Par conséquent, ils sont plus vulnérables aux problèmes de qualité et de fiabilité de l'énergie introduits par l'énergie éolienne. En fonction de la technologie des éoliennes, ces problèmes liés à l'énergie éolienne comprennent le scintillement de la tension, les harmoniques, les surtensions, les surcharges, l'augmentation du niveau de puissance de court-circuit et les dysfonctionnements

Introduction Générale

de la protection. Certains gestionnaires de réseau de distribution (GRD) s'inquiètent également de l'effet de l'énergie éolienne sur l'augmentation de la fréquence des changements de prises (FTC) d'un transformateur de sous-station.

Par conséquent, dans cette mémoire, ces différentes problématiques d'intégration de l'énergie éolienne sont étudiées. Une attention particulière est accordée à l'effet de l'énergie éolienne sur les surtensions, les surcharges et l'augmentation du FTC des transformateurs de sous-station. Le rôle des stratégies de gestion active (SGA) dans l'atténuation de ces effets de l'énergie éolienne a été étudié et démontré à l'aide d'études de cas.

Chapitre I

L'énergie éolienne - Aspect et modélisation



I.1. Introduction

L'énergie éolienne est l'une des sources renouvelables 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. Dans ce chapitre nous traitons de manière détaillée les différents types des aérogénérateurs.

I.2. Définition de l'énergie éolienne

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.

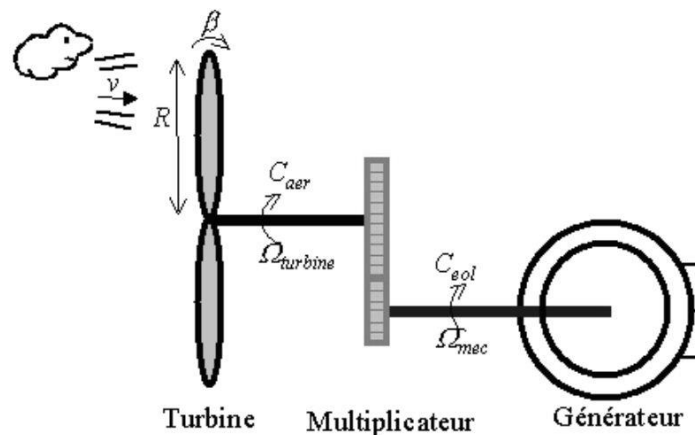


Figure I.1: Schéma d'une turbine éolienne [5].

I.3. Les différents types des turbines éoliennes

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles :

A axe vertical qui tendent à disparaître.

A axe horizontal (subdivisée en deux) :

- Lentes: utilisées surtout pour le pompage
- Rapides: plus particulièrement utilisées dans la production d'énergie électrique.

I.3.1. Eolienne à axe verticale

Paradoxalement, contrairement à l'éolienne traditionnelle à axe horizontal, les éoliennes à axe vertical ont été les premières machines conçues pour produire de l'électricité. Ils ont l'avantage de rendre les organes de commande et le générateur facilement accessibles au niveau du sol. Depuis les années 1920, plusieurs variantes ont été essayées, dont beaucoup n'ont pas abouti, mais deux systèmes sont entrés dans le processus d'industrialisation:

- **Les éoliennes verticales Darrieus**

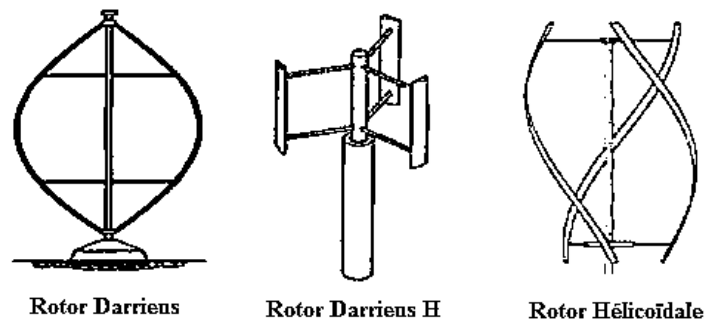


Figure I.2: Schéma de différents types d'éoliennes Darrieus [9].

L'électricité est produite par l'éolienne verticale de style Darrieus grâce à un rotor, peut-être de différents types (hélicoïdal, 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.

- **Les éoliennes verticales Savonius**

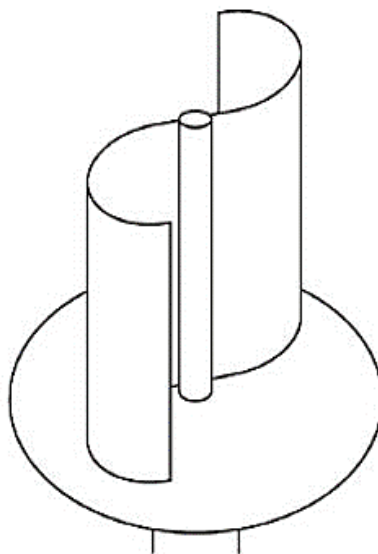


Figure I.3: Schéma d'une éolienne Savonius [9].

Au moins deux demi-cylindres dans un ajustement légèrement désaxés les uns par rapport aux autres sont montés sur l'éolienne verticale Savonius.

Le vent souffle à travers l'un des demi-cylindres et le pousse vers l'avant.

Demi-cylindre non attaché en un point, mais quelque peu désaxé, 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].

I.3.2. Eolienne à axe horizontale

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. A la manière des ailes d'avion, elles sont composées de pales profilées aérodynamiquement. La portance n'est pas utilisée dans ce cas pour maintenir un avion en vol, mais pour produire un couple moteur qui induit une rotation.

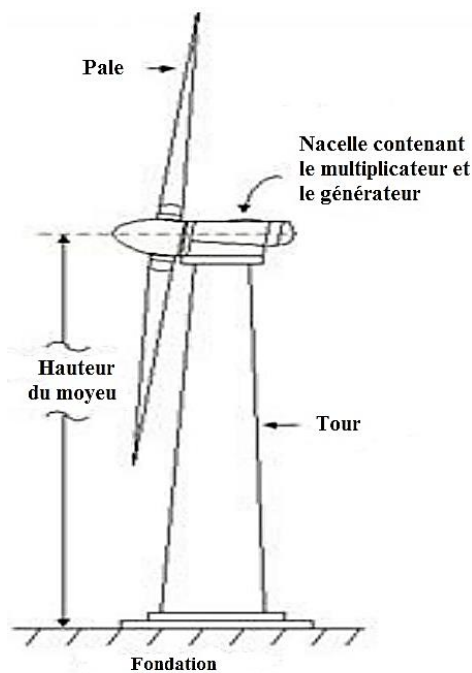


Figure I.4: Schéma d'une éolienne à axe verticale [9].

- **Eoliennes lentes** : Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Ces éoliennes multi pales sont surtout adaptées aux vents de faible vitesse. Elles démarrent à vide pour des vents de l'ordre de 2 à 3 m/s et leurs couples de démarrage sont relativement forts. Cependant elles sont moins efficaces que les éoliennes rapides et sont surtout utilisées pour le pompage d'eau. La puissance maximale susceptible d'être obtenue par ce type de machine peut se calculer en fonction du diamètre par l'expression suivante [3]:

$$P = 0.15 * D^2 * V^3 \quad \text{(I.1)}$$

La puissance étant exprimée en Watts, le diamètre (D) en mètre et la vitesse (V) du vent en m/s.

- **Eoliennes rapides** : Les éoliennes rapides ont un nombre de pales assez réduit, qui varie en général entre 2 et 4 pales. Elles sont les plus utilisées dans la production d'électricité en raison de leur efficacité, de leur poids (moins lourdes comparées à une éolienne lente de même puissance) et de leur rendement élevé. Elles présentent, par contre, l'inconvénient de démarrer difficilement. Leurs vitesses de rotation sont beaucoup plus élevées que pour les machines précédentes et sont d'autant plus grandes que le nombre de pales est faible. Le tableau 2 propose une classification de ces turbines selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leur hélice.

Le **Tableau I.1** propose une classification de ces turbines selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leur hélice [14] [10].

Echelle	Diamètre de l'hélice	Puissance délivrée
Petite	Moins de 12 m	Moins de 40 kW
Moyenne	12 à 45 m	40 kW à 1 MW
Grande	46 m et plus	1MW

Tableau I.1: Classification des turbines éoliennes.

En effet, les éoliennes ont des dimensions différentes, et comme l'air est une ressource diffuse, les appareils de plus en plus gros sont préférés par la tendance générale. Les progrès de la science des matériaux ont permis de créer des pales plus légères et plus solides ainsi que de meilleures conceptions de tours et de fondations, permettant la construction d'avions de plus en

plus gros. Les éoliennes de 500 kW étaient la dernière invention en 1995. Chaque système de 4,5 MW (4 500 kW) est actuellement en production commerciale [6].

Dans ce qui suit, on se base spécialement sur les éoliennes rapides dont nous donnerons une description globale du modèle. Une formule fonctionnelle pour les éoliennes rapides à axe horizontal, tenant compte d'un rendement moyen.

$$P = 0.2 * D^2 V^3 \quad (I.2)$$

I.3.2.1. Composantes d'une éolienne à axe horizontale

Les éléments d'éoliennes utilisés le plus fréquemment retiennent quatre sous-ensembles [10]:

- **Le Rotor**, La partie rotative de l'éolienne était bien placée pour capter des vents puissants et fréquents. Il se compose de pales (généralement 3) en matériau composite qui sont mises en mouvement par l'énergie cinétique du vent. Ces derniers, reliés par un moyeu, peuvent mesurer chacun une longueur moyenne de 25 à 60 m et tourner à des vitesses de 5 à 25 tours par minute;
- **La Nacelle**, structure soutenue par le mât abritant les différents éléments

Mécaniques. Selon le type d'alternateur utilisé, une distinction est faite entre les éoliennes à entraînement direct et celles équipées d'un train d'engrenages (multiplicateur / réducteur)..

- Les alternateurs classiques nécessitent 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].

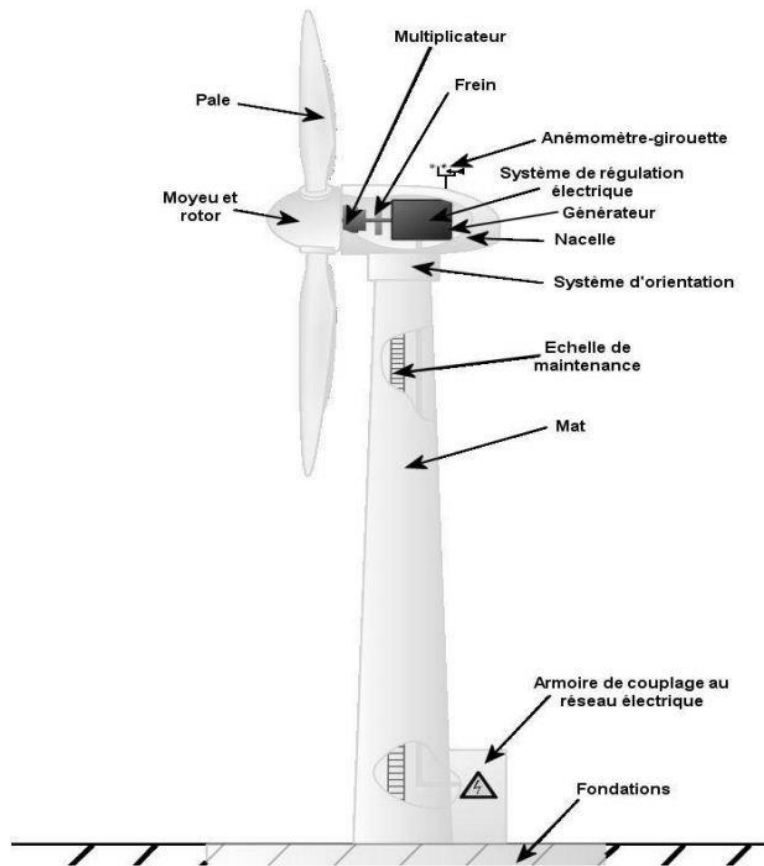


Figure I.5 : Schéma des différentes composantes d'une éolienne à axe horizontale [10].

I.4. Les générateurs éoliens

Le générateur éolien 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 spécifiques [5]. On décrit dans cette étude les principaux types de système éoliens.

I.4.1. Eolienne à vitesse fixe

Ces systèmes éoliens sont composés d'une turbine, probablement équipée d'une puissance d'angle de pas des pales β , d'un multiplicateur de vitesse et d'un générateur. Ce générateur est avant tout une machine asynchrone directement connectée au réseau et tournant à la vitesse $-s$ ($1-g$) en hyper synchronisme où g est le glissement de la machine (dans ce cas $g < 0$) directement connectée au réseau, la vitesse est imposée par ce dernier et donc quasi constante. La puissance convertie par la machine est donnée par l'expression suivante à la sortie la plus proche:

$$P_{\text{éle}} = \frac{1}{1-g} P_{\text{mec}} \quad (\text{I.3})$$

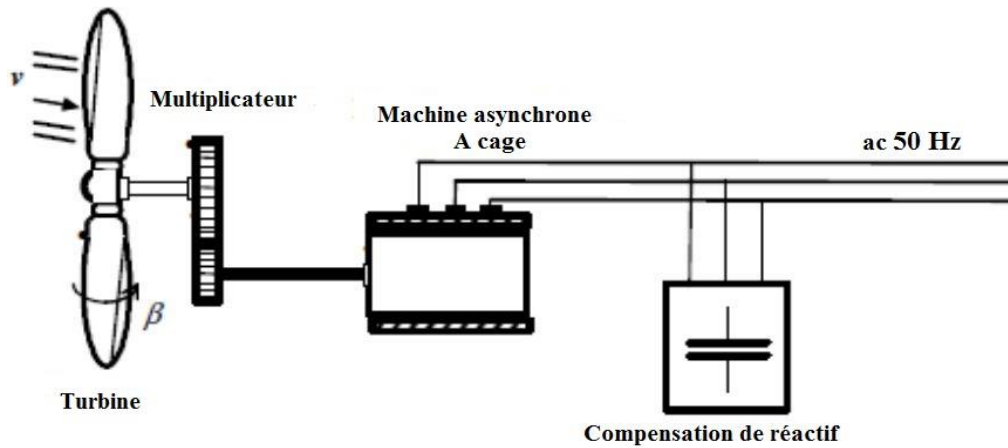


Figure I.6: Structure d'une éolienne à vitesse fixe [5].

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.

I.4.2. 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:

I.4.2.1. Eolienne à base de machine asynchrone à double alimentation (MADA)

La machine asynchrone à double alimentation est une machine asynchrone dont le rotor bobiné, via une interface d'électronique de puissance, est relié au réseau. Cette interface adapte l'amplitude et la fréquence des courants du rotor en régulant la tension aux bornes du rotor en fonction du point de fonctionnement du système. Le stator est directement connecté au réseau et fonctionne avec une tension et une fréquence constante dans des conditions normales (généralement 50 Hz).

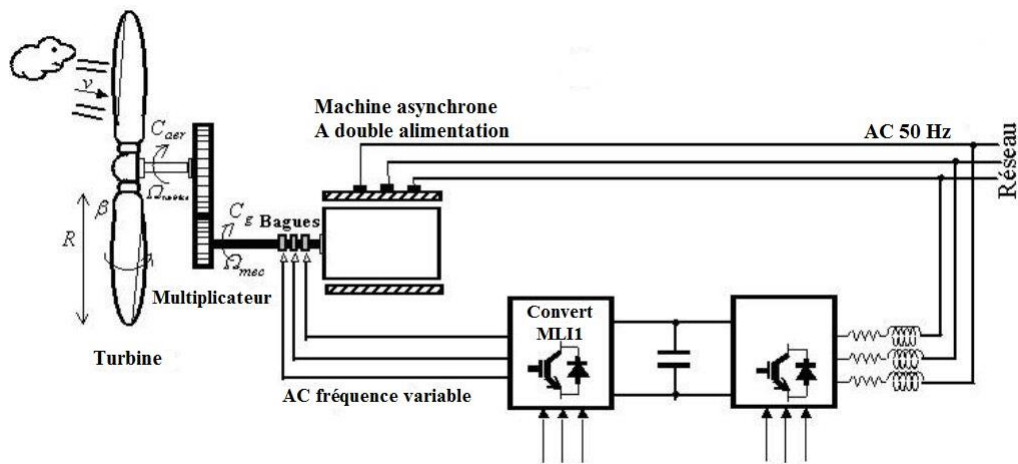


Figure I.7: Structure d'une éolienne à base MADA [5].

I.4.2.2. Eolienne à base de machine synchrone à aimants permanents (MS)

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

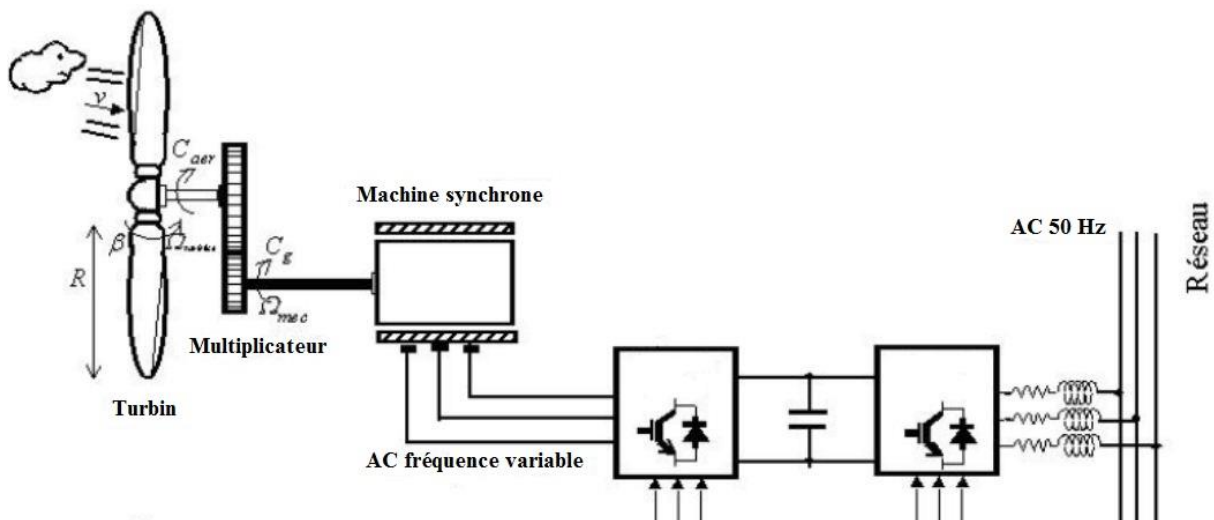


Figure I.8: Structure d'une éolienne à base de MS à aimants permanents [5].

Le couple de la machine est régulé par le convertisseur connecté au stator de la machine et la machine connectée au réseau assure le transfert de puissance entre le générateur et le réseau ainsi que l'échange de puissance réactive avec ce dernier comme l'interface MADA.

Les avantages de cette technologie sont multiples: stabilité du contrôle, répartition entre le réseau et le générateur, optimisation du rendement grâce à une large plage de vitesse.

I.5. Modélisation de la turbine éolienne

I.5.1. L'énergie récupérable par une turbine

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 \mathbf{V} conformément à la figure suivante :

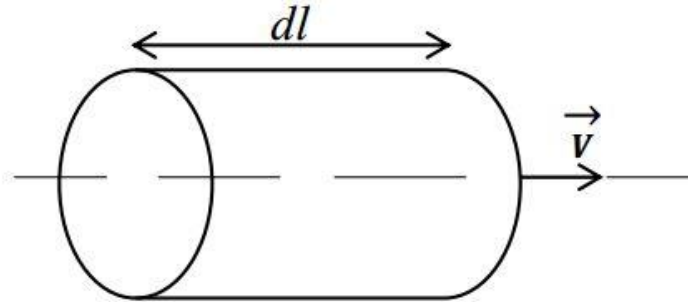


Figure I.9: Colonne d'air.

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

$$dE_c = \frac{1}{2} dm v^2 \quad (\text{I.4})$$

Avec $dm = \rho S dl$

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

D'où :

$$dE_c = \frac{1}{2} \rho S v^3 dt \quad (\text{I.5})$$

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

$$P = \frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} \rho S v^3 \quad (\text{I.6})$$

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

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S v^3 \quad (\text{I.7})$$

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 ($S \text{ (m}^2\text{)}$).

I.5.2. 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.

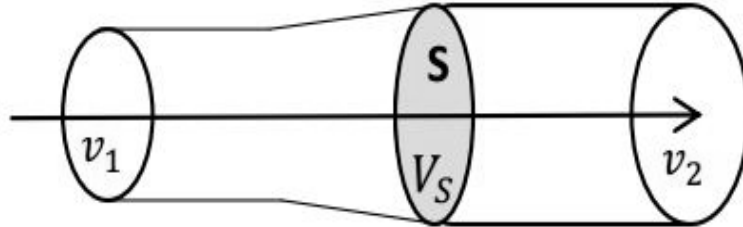


Figure I.10 : Schéma du courant d'air traversant une turbine.

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

$$v_s = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (\text{I.8})$$

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 :

$$P = \frac{1}{2} \rho S v_s (v_1^2 - v_2^2) = \frac{1}{4} \rho S (v_1 + v_2) (v_1^2 - v_2^2) \quad (\text{I.9})$$

Le maximum de l'équation [I.9] $P(v_1)$ s'obtient lorsque :

$$\frac{d}{dv_2} \left\{ \frac{1}{4} \rho S (v_1 + v_2) (v_1^2 - v_2^2) \right\} = 0 \quad (\text{I.10})$$

En développant, on obtient :

$$\frac{1}{4} \rho S (-3v_2^2 - 2v_1 v_2 + v_1^2) = 0 \quad (\text{I.11})$$

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

D'où la puissance maximale est :

$$P_{max} = \frac{8}{27} \rho S v_1^3 \quad (\text{I.12})$$

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 :

$$C_p = \frac{P_{max}}{P_v} = \frac{16}{27} \approx 0.593 \quad (\text{I.13})$$

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:

$$\lambda = \frac{R_{Turbine} \Omega_{Turbine}}{v} \quad (\text{I.14})$$

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:

$$P_{aer} = C_p P_v = \frac{1}{2} \rho C_p (\lambda, \beta) S v^3 \quad (\text{I.15})$$

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

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{Turbine}} = \frac{1}{2\Omega_{Turbine}} C_p \rho S v^3 \quad (\text{I.16})$$

I.5.3. Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur de vitesse, qui est disposé entre la turbine éolienne et la génératrice, Il sert à adapter 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:

$$C_{gén} = \frac{C_{aer}}{G} \quad (\text{I.17})$$

$$\Omega_{Turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (\text{I.18})$$

Où :

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

I.5.4. 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.

$$J = \frac{J_{\text{Turbine}}}{G^2} + J_{\text{gén}} \quad (\text{I.19})$$

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 :

$$J \frac{d\Omega_{\text{mec}}}{dt} = C_{\text{Tot}} - C_{\text{vis}} \quad (\text{I.20})$$

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

$$C_{\text{vis}} = f \Omega_{\text{mec}} \quad (\text{I.21})$$

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

$$C_{\text{Tot}} = C_{\text{gén}} - C_{\text{cem}} \quad (\text{I.22})$$

L'équation de l'arbre mécanique devient alors :

$$J \frac{d\Omega_{\text{mec}}}{dt} = f \Omega_{\text{mec}} = C_{\text{gén}} - C_{\text{cem}} \quad (\text{I.23})$$

I.6. Simulation d'un exemple d'une éolienne avec le vent

Pour faire une simulation d'un exemple d'une éolienne avec le vent, nous avons utilisé logiciel HOMER (Hybrid Optimisation Model for Electric Renewable) est un logiciel de modélisation énergétique. C'est un outil puissant pour analyser et concevoir les systèmes électriques hybrides, Ces systèmes sont un ensemble de générateurs fonctionnant aux énergies conventionnelles, d'aérogénérateurs, de panneaux photovoltaïques, de batteries, de piles à combustibles, d'hydroélectricité, de biomasse et d'autres intrants [17].

Après avoir établi un état de l'art sur les éoliennes et modélisé les deux parties essentielles du système de conversion de l'énergie éolienne que sont la turbine et le générateur, nous pouvons maintenant simuler une éolienne avec le vent.

Dans ce programme, nous avons déterminé les coordonnées de l'emplacement géographique lieu de travail sur « **Khemis Miliana** » Ainsi que la durée de vie des composants, leurs coûts et la durée de vie du projet, et voici l'interface du programme sur la **Figure [I.11]**.

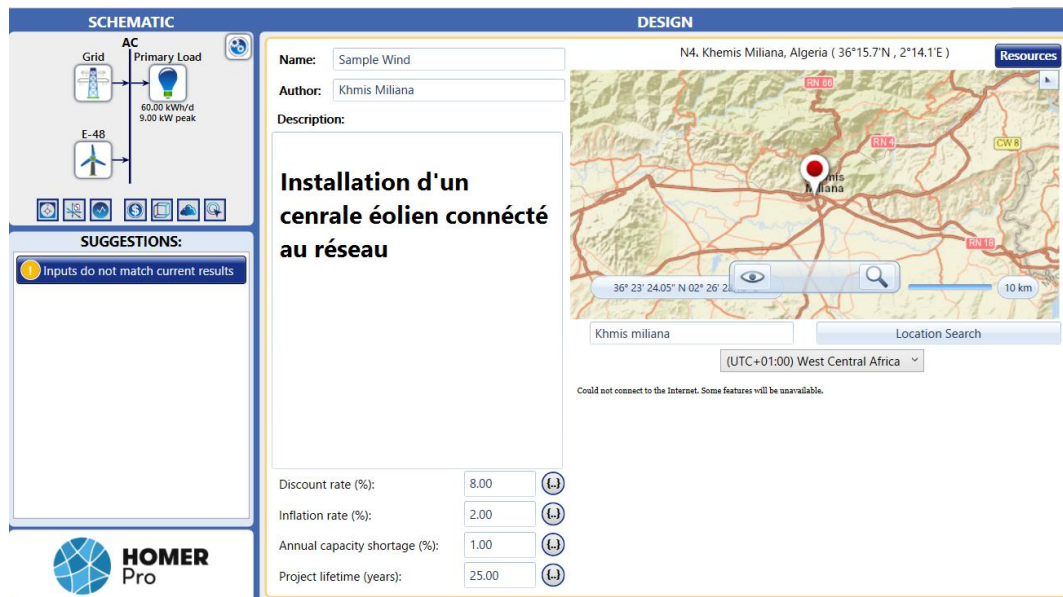


Figure I.11 : Architecture de l'installation.

A. Choix d'éolienne

Pour l'éolienne nous avons choisi le type Enercon E-48 [800kW] (voir annexe A.1), a coût d'achat 29000,00 \$ et de remplacement 25000,00 \$ est le coût de fonctionnement et de maintenance correspond à 400 \$ de l'investissement par année.

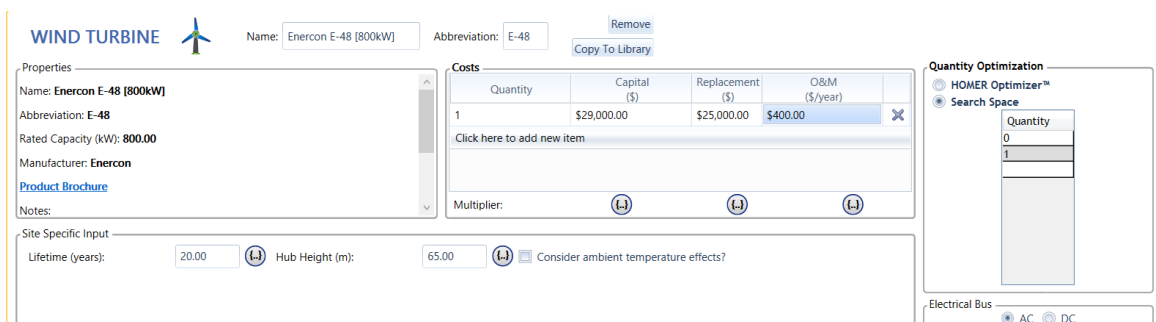


Figure I.12: Données techniques et économiques de l'éolienne.

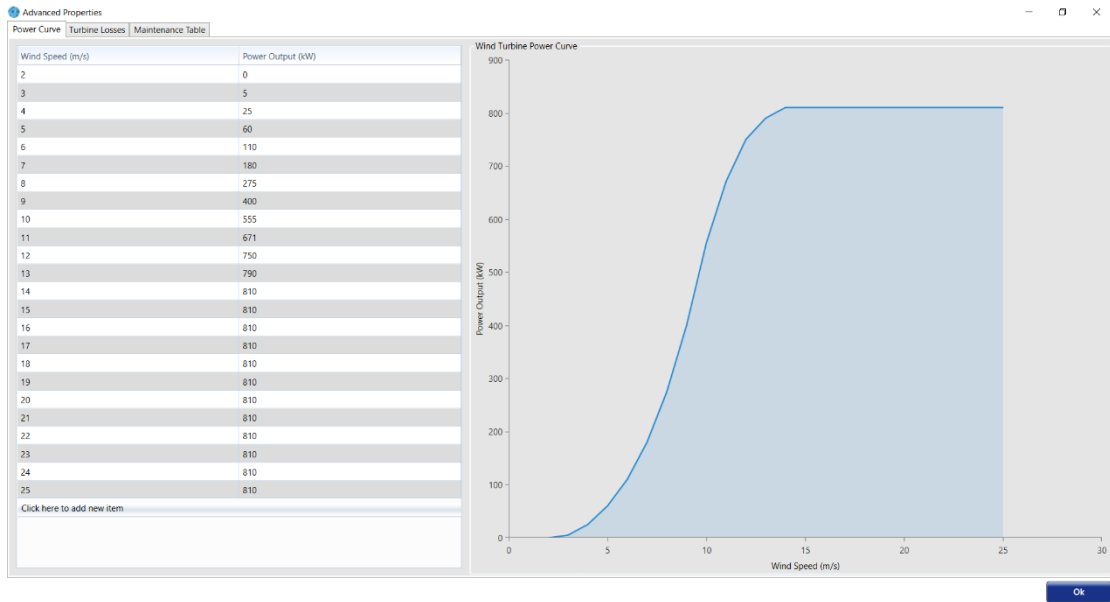


Figure I.13 : Courbe de puissance relative à l'éolienne (Enercon E-48 [800kW]).

B. Architectures du system

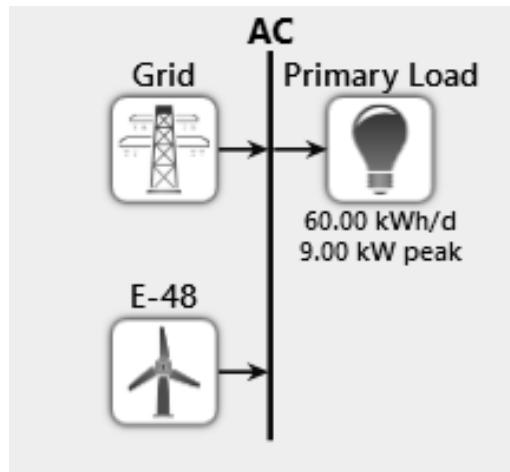


Figure I.14 : Architecture du système.

I.7. Les résultats de simulation

D'après la simulation du système a étudié, qui est montré sur **Figure [I.14]** les **Figures [I.15]** et **Figure [I.16]** montre les résultats qui présentent de puissance de vent en fonction de jour.

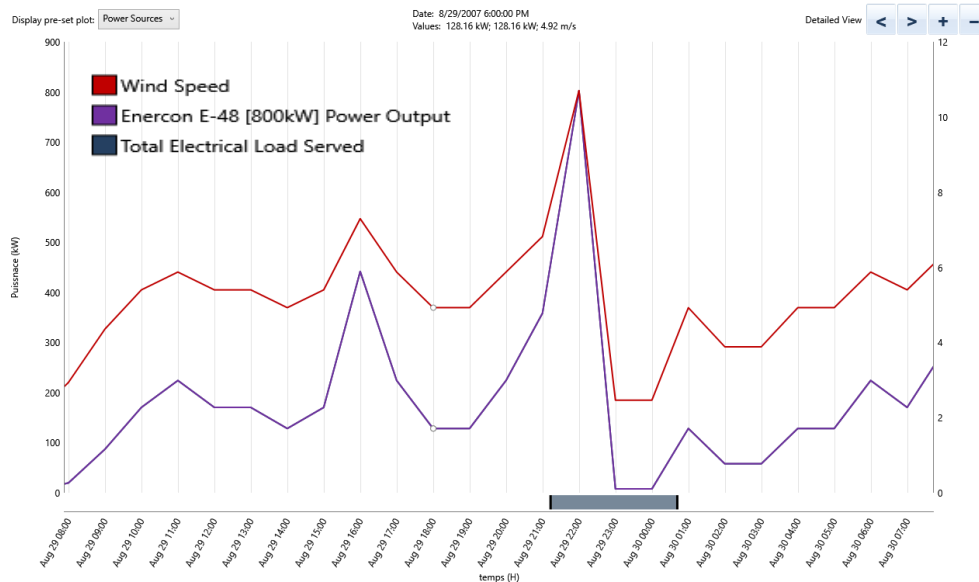


Figure I.15 : Profil de vitesse du vent utilisé pour la simulation du système en 29-30 Aout.

Figure [I.15] montre que la production par l'éolienne et dépend de la variation de la vitesse de vent pendant les mois de l'année, car elle est proportionnelle à la vitesse du vent. Dans e mois d'aout la production avoir sa valeur maximale entre 22 :00 h environ pour la journée du 29 Aout est 802.05 kW avec vitesse de vent de 10.70 m/s et lorsque la vitesse du vent déminue a 2.46 m/s, la puissance décroissant progressivement par le régulateur pitch contrôle pendant 22:00 h et 23:00 h à cause des caractéristiques du turbine qui nous avent choisir (Enercon E 48).



Figure I.16 : Profil de vitesse du vent utilisé pour la simulation du système en 22-23 Décembre.

La montre **Figure [I.16]** que la production par l'éolienne et dépend de la variation de la vitesse de vent pendant les mois de l'année, car elle est proportionnelle à la vitesse du vent. Cette production est maximale entre 11 :00 h et 14 :00 h environ pour la journée du 22 janvier est 534.96 kW avec vitesse de vent 7.77 m/s et lorsque la vitesse du vent dépasse 6.53 m/s, la puissance décroissant progressivement par le régulateur pitch contrôle pendant 14 :00 h et 17 :00 h à cause des caractéristiques du turbine qui nous avons choisie (Enercon E-48).

I.8. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons abordé les différents types de la turbine éolienne et sa nature et le principe de transformation de l'Énergie cinétique jusqu'à la production électrique. De plus la structure de l'éolienne à axe horizontale. À la fin de l'exposition nous avons montré les différentes technologies d'aérogénérateurs- et la spécialité de chacune. Ainsi les avantages d'une par rapport aux autres

Chapitre II

Les réseaux électriques de distribution



II.1. Introduction

Les réseaux électriques ont été développés et configurés pour acheminer vers les clients l'énergie électrique générée par les centres de fabrication (type conventionnel ou renouvelable), et les réseaux de distribution relaient l'électricité aux consommateurs depuis le transport ou le sous-transport,

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.

II.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. (Réseau électrique).

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

Le centre de fabrication de l'énergie électrique est la composante fondamentale du système électrique. Une centrale peut combiner sur un même site plusieurs groupes de production. Ce sous-système est réservé à produire de l'électricité par l'intermédiaire des alternateurs à une tension comprise entre 5000 et 24 000 V: Pour assurer un transport économique, cette tension insuffisante est élevée jusqu'au 63 et 400 Kv dans des transformateurs situés dans un poste de départ placé au voisinage immédiat de l'usine. Pour couvrir la consommation croissante d'électricité, il était nécessaire de trouver une solution à ce problème de construction de centrales électriques à capacité de production énorme. Il existe trois principaux modes de production, sont les centrales hydroélectriques centrales nucléaires, les centrales à combustibles fossiles (fioul, gaz, etc).

Les centres de production sont répartis presque uniformément sur tout le réseau interconnecté, et d'autres méthodes de production existent comme l'éolien, le solaire, la géothermie, etc.

la turbine et l'alternateur sont les deux parties principales de ces générateurs. Dans le cas des installations thermiques, la turbine est entraînée par la vapeur produite dans les chaudières où le combustible est brûlé. Alors que dans le cas des centrales hydroélectriques, la turbine est animée par la force de l'eau. La turbine est couplée à un alternateur.

II.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 [3].

II.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 [1].

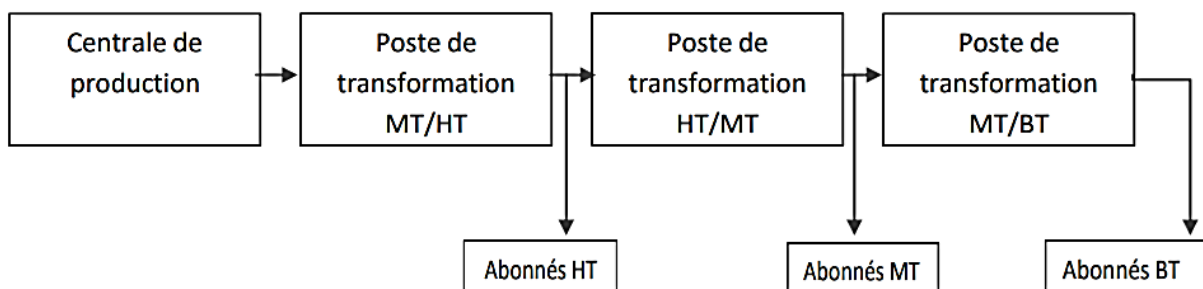


Figure II.1 : Schémas d'un réseau électrique.

II.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 moindres 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 électriques 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.

II.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 [2].

II.2.6. Structures topologiques des réseaux

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

II.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).

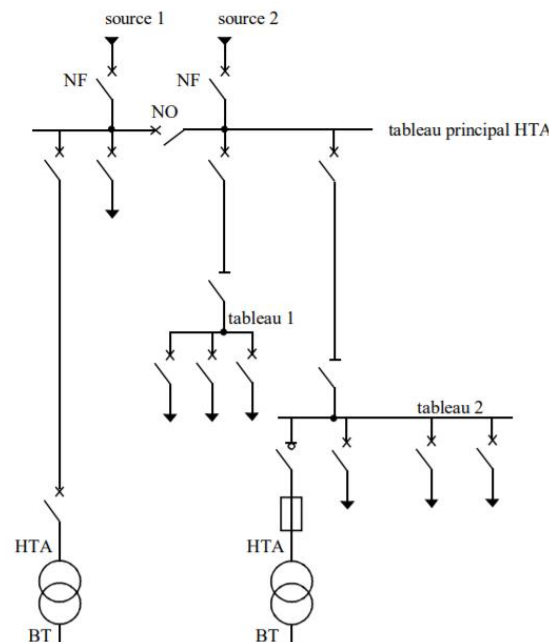


Figure. II.2: Réseau HTA radial en simple antenne.

II.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).

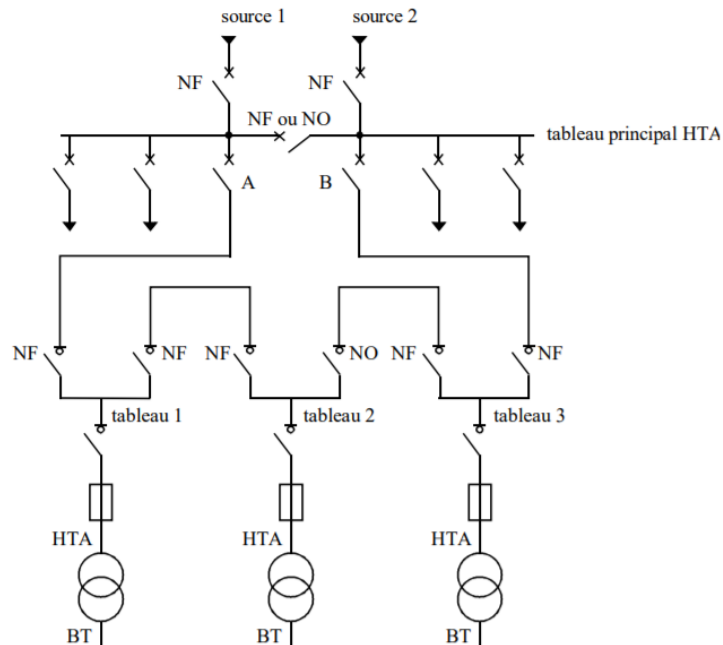


Figure II.3: réseau HTA en boucle ouverte.

II.2.6.3. Réseau maillé

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

II.3. Caractéristiques des réseaux de distribution

II.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, 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 [2].

II.3.2. Le réseau électrique algérien

À l'heure actuelle, il n'existe pas de normes internationales pour réaliser des modèles de communication des clients pour un réseau de distribution [1].

En réalité, chaque distributeur a sa propre façon de les expérimenter lors de la gestion de son réseau. Néanmoins, compte tenu des trous. L'Algérie a à peu près le même standard de châssis électrique que la France. Avec une puissance de 20994 MW répartis sur 34 441 km de lignes de transport, 131557 km de lignes de distribution et 47 189 sous-stations, l'Algérie est électrifiée à 99% [2].

II.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 [5]:

- **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.

Maintenant 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.

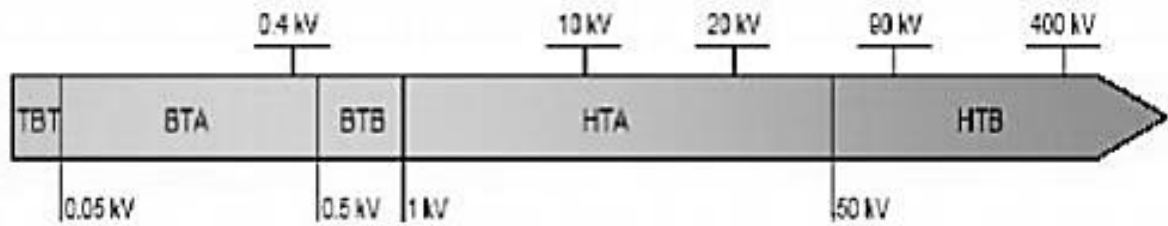


Figure II.4: Appellations normalisées des différents niveaux de tension.

II.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 [3].

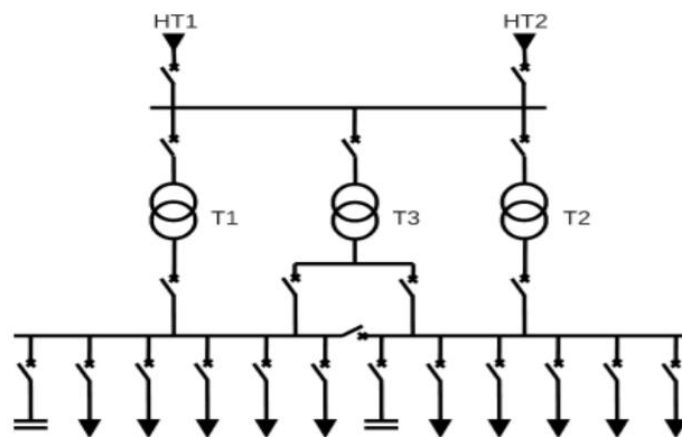


Figure II.5: Schéma de principe d'un poste source HTB/HTA [3].

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

II.4.1. Qualité de service

Les réseaux de distribution visent à fournir de l'énergie électrique aux clients MT ou BT, tout en conservant la plus grande fiabilité de service ainsi que l'efficacité de l'onde électrique. L'énergie fournie doit être de qualité conforme aux caractéristiques standard. Le directeur de l'électricité du pays fixe ces normes, tandis que l'Algérie répond aux normes françaises [7]:

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

Tableau II.1 : Caractéristique de tension en BT et HTA [7].

II.4.2. Le réglage de tension pour la sécurité des réseaux

La tension doit être maintenue dans les limites fixées par les règles d'exploitation des réseaux électriques afin de garantir la fiabilité du réseau et la protection des équipements. Par conséquent, la tension de résistance à la tension est l'un des principaux aspects du service de transport et du fonctionnement du réseau de distribution. En fait, dans chaque région, les limites de tension sont déterminées par le type de réseau en fonction de la tension [9].

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

Nous prenons **Figure [II.4]** pour rechercher les effets de la tolérance de tension sur le bon fonctionnement des réseaux. un modèle équivalent à un étage, largement utilisé dans l'analyse de réseau, pour une ligne à trois étages. Dans ce segment, la puissance active et réactive transmise au cours du processus est désignée par P et Q pour les lignes courtes et moyennes.

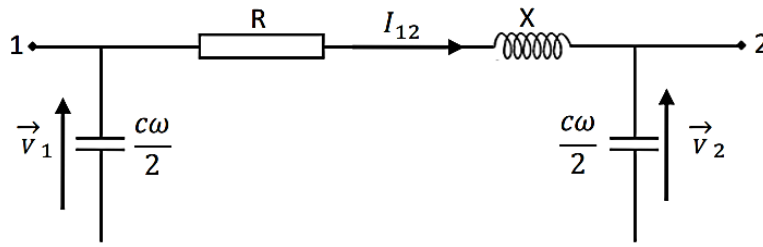


Figure II.6: Modèle de ligne en π .

A ce modèle de ligne en π , on peut associer un diagramme de Fresnel reliant les tensions 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:

$$\Delta \bar{v} = \bar{v}_1 - \bar{v}_2 = RP + XQV_2 + j \frac{RP - XQ}{\bar{v}_2} \quad (\text{II.1})$$

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 :

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

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.

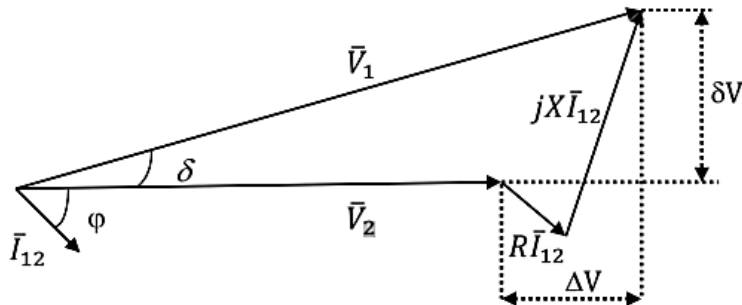


Figure II.7: Diagramme de Fresnel de la ligne en π .

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 :

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

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

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

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

L'équation [II.4] montre qu'un plan de tension élevé permet également de minimiser les pertes Joules.

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

Le réglage de la tension du réseau de distribution n'est pas réglementaire, il dépend de la structure du réseau et de sa gestion ; cependant, il existe de nombreuses techniques d'ajustement de tension [12].

II.5.1. Compensation de puissance réactive au poste source

Les réseaux ont différentes manières de compenser l'énergie réactive dans les stations sources. Il permet de réduire la puissance de transit réactive sur les transformateurs et empêche ainsi le plan de tension de se dégrader inutilement.

II.5.2. Les régleurs en charge

Le réglage de la charge est équipé en modifiant le taux de transformation par pas de 1% au niveau des transformateurs de la sous-station source. Cela permet d'ajuster la tension des jeux de barres MT en fonction de l'évolution des charges et des fluctuations de tension en amont [4].

Le réglage de la tension MT peut être effectué avec ou sans composition. Le compoundage est une technique qui prend en compte, en mesurant le courant dans le transformateur (et donc l'état de charge moyen du réseau), la tension chute dans le réseau aval. Ceci permet de maintenir la tension en un point du réseau différent de la station source [4].

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

L'une des techniques actuellement utilisées pour le contrôle de tension d'une part et pour augmenter la capacité de puissance d'autre part est le travail de ce thème. La fabrication décentralisée d'électricité (PD) peut être soit conventionnelle (turbines à combustion, micro turbines à combustion, moteurs diesel, cogénération, etc.) soit renouvelable par installation à petite échelle liée à des systèmes électriques à basse tension (hydraulique, solaire photovoltaïque, éoliennes, etc) [8].

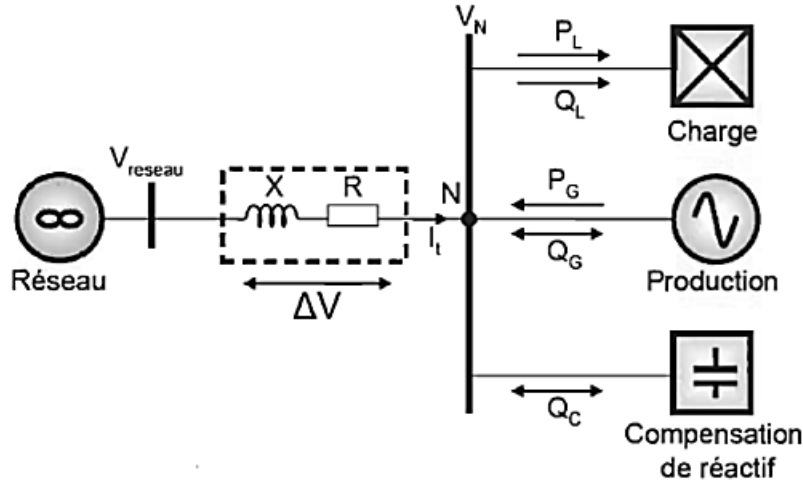


Figure II.8: Détermination de la chute de tension sur une ligne [5].

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:

$$\Delta V = R I_T \cos \varphi + l \omega I_T \sin \varphi \quad (\text{II.5})$$

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.

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

$$\Delta V = R \frac{P_N}{V_N} + l \omega \frac{Q_N}{V_N} \quad (\text{II.7})$$

- 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 [II.6] montre l'un des problèmes clés associés à la connexion PD à un réseau. En effet l'injection de puissance, active ou réactive, peut provoquer une élévation de tension au nœud de liaison. Les impacts sur le stress de ces productions peuvent varier en fonction du type de réseaux auxquels elles sont liées. Selon la conception du réseau, les caractéristiques de la station source, le point de connexion et la puissance injectée par le PD, la tension peut être élevée au point de connexion, dépassant même le maximum autorisé [6].

II.6 Simulation sur un réseau MT de test

Dans cette partie, nous avons simulé un réseau de 13 nœuds connecté à un régleur en charge, et pour cela nous avons utilisé le programme OPENDSS.

OPENDSS

OpenDSS est un simulateur de système de distribution d'énergie électrique (DSS) conçu pour prendre en charge l'intégration et la modernisation du réseau d'une ressource énergétique distribuée (DER). Il permet aux ingénieurs d'effectuer des analyses complexes à l'aide d'une plate-forme flexible, personnalisable et facile à utiliser conçue spécifiquement pour répondre aux défis actuels et futurs du système de distribution et fournit une base pour comprendre et intégrer les nouvelles technologies et ressources...[5].

Réseau de 13 nœuds

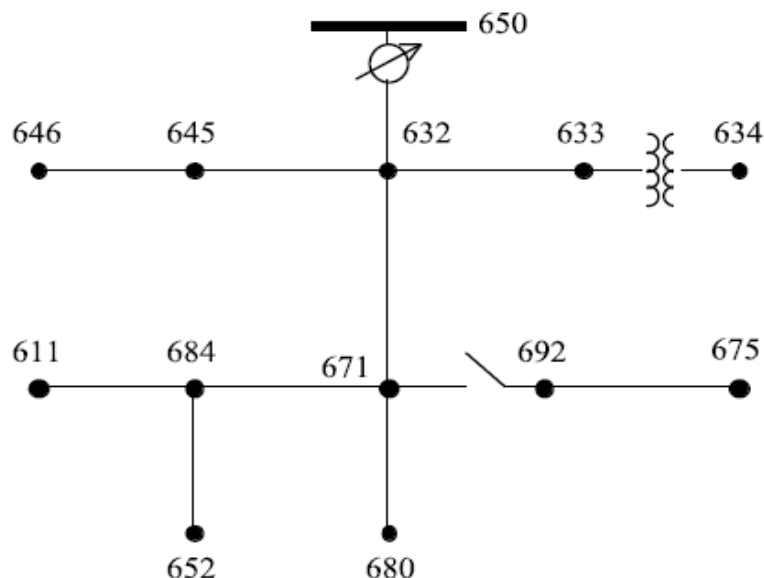


Figure II.9: Diagramme linéaire.

On retrouve les paramètres de ce réseau en **annexe B**, Pour montrer les effets du régleur en charge sur le réseau. En à ajouter un régleur en charge dans le réseau.

II.6.1. Les Résultats de simulation

Les résultats de simulation dans ce tableau

Sans régleur en charge

Bus	VLN (kV)	VLN (kV)	VLN (kV)	VLN (kV)
Pourcentage	100%	75%	50%	25%
SOURCEBUS	114.99	115	115	115.01
650	4.1596	4.1598	4.1601	4.1603
RG60	4.159	4.1593	4.1598	4.1602
633	4.0036	4.0258	4.0891	4.1401
634	0.45218	0.45711	0.46678	0.47514
645	4.001	4.0226	4.0876	4.1393
646	3.9997	4.0214	4.0868	4.1389
652	3.8965	3.9396	4.0461	4.1335
671	3.9071	3.9483	4.0517	4.1363
675	3.9033	3.9474	4.0534	4.1408
692	3.9071	3.9483	4.0517	4.1363
611	3.9002	3.9418	4.048	4.1345
632	4.008	4.0296	4.0916	4.1413
684	3.9025	3.9442	4.0492	4.1351
680	3.9071	3.9483	4.0517	4.1363
670	3.974	4.002	4.0781	4.1396

Tableau II.2 Tensions ligne-ligne par bus et nœud sans régleur en charge.

Avec régulateur en charge

Bus	VLN (kV)	VLN (kV)	VLN (kV)	VLN (kV)
Pourcentage	100%	75%	50%	25%
SOURCEBUS	114.99	115	115	115.01
650	4.1595	4.1597	4.1601	4.1603
RG60	4.4318	4.3802	4.2898	4.2382
633	4.271	4.2451	4.2191	4.2183
634	0.48237	0.482	0.48162	4.2175
645	4.2682	4.2418	4.2176	4.2172
646	4.2668	4.2407	4.2169	4.2172
652	4.1614	4.1585	4.1767	4.2121
671	4.1727	4.1677	4.1824	4.215
675	4.1686	4.1668	4.1842	4.2196
692	4.1727	4.1677	4.1824	4.215
611	4.1654	4.1609	4.1787	4.2131
632	4.2757	4.249	4.2217	4.2196
684	4.1678	4.1634	4.1799	4.2137
680	4.1727	4.1677	4.1824	4.215
670	4.2409	4.2214	4.2085	4.218

Tableau II.3 Tensions ligne-ligne par bus et nœud avec régulateur en charge.

- **Interprétation des résultats**

Le Tableau II.2 montre les tensions au niveau de chaque nœud en fonction de la rétention de la charge (100%,75%,50% et 25%), on remarque qu'il y'a une diminution de la tension dans certains nœuds, mais au nœud 652 on remarque que la tension a 100% de charge atteint 3,89 kV, et par contre, a la diminution de la charge à 25%, on remarque l'augmentation de la tension a 4,1335 KV.

Le Tableau II.3 dans ce cas on a ajouté le régleur en charge dans notre réseau. On remarque que la tension augmente à chaque nœud. Par exemple le nœud RG60 augmenter a 4.4318 KV a 100% de charge, par contre il été à 4.159 kV sans régleur en charge.

La chute de tension augmente lorsque la charge augmente, il dépasse les limites dans certaines valeurs de charge.

II.7. Conclusion

L'objectif de ce chapitre est d'offrir une vision globale des concepts classiques, les réseaux électriques, qui sont toujours importants, tels que les chemins d'énergie électrique, la classification des tensions et les schémas de fonctionnement des différents types de réseaux. (Des ajustements d'effort de tension et leur modifications, similaires aux normes reconnues en Algérie et en France et ont été traités et contrôlés de manière abrégée dans ce chapitre.

Chapitre III

Raccordement d'énergie renouvelable dans le réseau de distribution et leurs impacts sur le régulateur en charge.



III.1. Introduction

L'énergie éolienne fait partie des productions autonomes dont la capacité à l'intégrer au réseau électrique. Cette intégration doit respecter certaines restrictions technologiques et nécessite généralement des dispositions de mise en réseau pour assurer un bon fonctionnement. Les techniques de raccordement nécessaires, le choix du niveau de tension d'intégration dans les réseaux électriques et ses impacts seront abordés dans ce chapitre.

III.2. Technique de raccordement

Selon les pays, sous réserve des impacts que les moyens de traitement peuvent avoir sur les réseaux, des exigences technologiques particulières de communication sont connues par le grid code ou les codes de livraison.

III.2.1. Connexion au réseau

L'éolienne connectée, ainsi que tous les équipements connectés au réseau, ont un effet plus ou moins significatif sur la qualité de l'électricité. En comparaison, les éoliennes sont situées dans une région où les vents sont favorables et le réseau n'est pas bien implanté. Néanmoins, les éoliennes devraient être liées de plusieurs manières, par exemple. [12]:

- 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 à 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**).

Quel que soit le processus de liaison, l'éolienne est intégrée au réseau avec plus ou moins de différences de puissance. Habituellement, la solution la plus répandue est la relation moyenne tension (**HTA**), qui produit la plupart des interférences.

III.2.2. Tension de raccordement

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	$P \leq 50 \text{ MW}$
	$130 \text{ kV} < U \leq 350 \text{ kV}$		$P \leq 250 \text{ MW}$
	$350 \text{ kV} < U \leq 500 \text{ kV}$	150 KV, 225KV 400 KV	$P > 250 \text{ MW}$

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

Le point de tension de liaison définit la puissance optimale de l'insertion de sortie décentralisée. Les niveaux de tension au point de liaison sont indiqués dans le **Tableau [III.1]** en fonction de la puissance de l'installation en France [1].

III.2.3. La capacité d'accueil des réseaux

A un nœud donné d'un réseau, la capacité de réception est la puissance maximale de connexion qui respecte à tout instant les contraintes de tension et de courant sur l'ensemble du réseau considéré.

Les contraintes de haute tension très souvent limitent cette capacité, en particulier dans les zones rurales ou semi-urbaines où les producteurs de grande puissance ($> 1 \text{ MW}$) doivent être liés à l'espace disponible pour la construction de tels projets.

La capacité de réception P_{raccmax} d'un départ rural ou semi-urbain à partir de la plateforme de puissance l-distance, peut donc être calculé à partir d'un modèle analytique du plan de tension d'un départ avec des quantités supposées uniformément réparties: élevée, notamment en milieu rural et les zones semi-urbaines où les producteurs de grande puissance ($> 1 \text{ MW}$) demandent à être connectés à l'espace disponible .

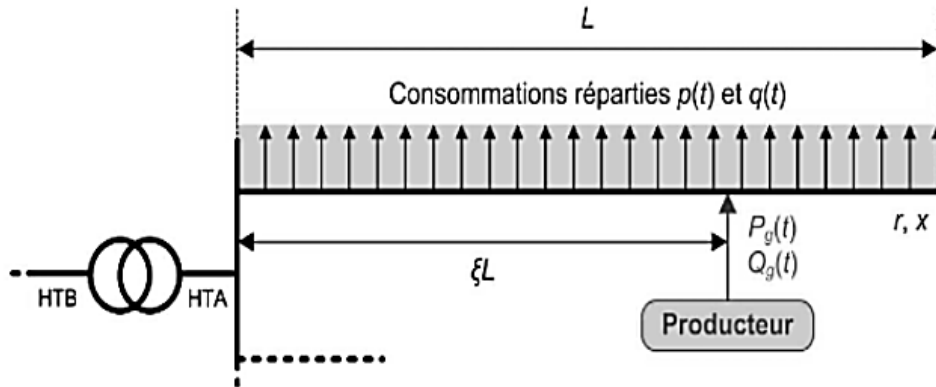


Figure III.1 : Modèle d'un départ HTA « à grandeurs uniformément réparties » [13].

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

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:

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

III.2.4. Types de raccordement

L'énergie éolienne a deux formes de lien dans le réseau électrique, comme toute production décentralisée:

- Raccordement en départ mixte : le raccordement à un départ existant qui relie déjà les clients et peut-être les producteurs **Figure [III.2.a]**.
- Raccordement en départ direct : connexion à la station source la plus proche via une prise nouvellement créée pour le nouvel utilisateur **Figure [III.2.b]**.

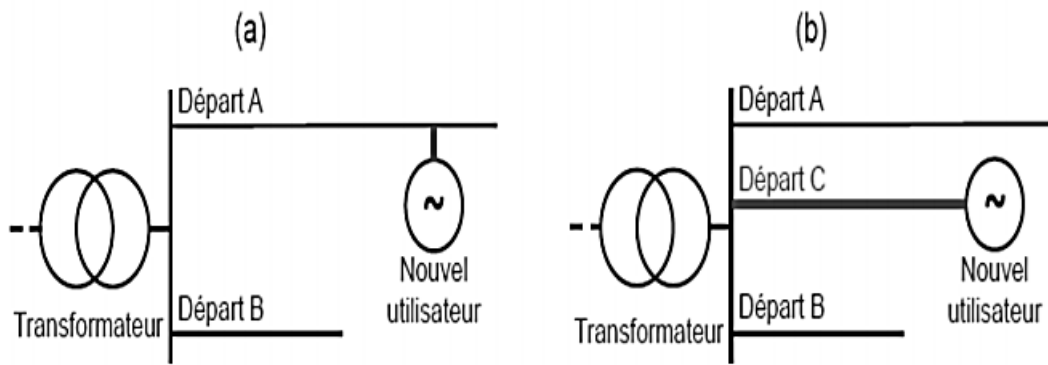


Figure III.2 : Illustration des configurations de raccordement (a) en départ mixte (b) en départ direct [13].

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. Les impacts locaux peuvent être différenciés entre toutes les formes de réseaux et les impacts nationaux qui affectent les réseaux de transport intégrés et les réseaux insulaires en particulier [14].

III.3.1. Impacts Locaux

Ce sont les impacts qui ont lieu au point d'interaction de l'appareil et. En général, les effets locaux sont indépendants des niveaux de pénétration totaux des unités de traitement d'énergie du système. Deux facteurs clés sont concernés: la capacité de réception du réseau et le rendement de la tension.

III.3.1.1. Plan de tension

Selon la forme des réseaux auxquels ils sont liés, les résultats de tension d'une telle sortie seront différents. La tension peut être élevée au point de connexion, en fonction de la configuration du réseau, des caractéristiques de la sous-station source, du point de connexion et de la puissance injectée par l'éolienne, et peut même atteindre le plafond admissible. Les chutes de tension actives et réactives qui augmentent d'amont en aval tout en maintenant le respect des exigences contractuelles ou réglementaires est le but de la gestion du programme de tension. L'intégration de l'énergie éolienne induit les variations suivantes:

- Creux de tension.
- Flicker.
- Harmonique.

III.3.1.2. Court-Circuit

L'effet des éoliennes sur le courant de court-circuit qui, selon la technologie, fournira de l'énergie en cas de panne du réseau et augmentera ainsi le courant de court-circuit circulant dans le réseau.

La limitation est qu'il n'y a pas de valeurs maximales admissibles ou de potentiel de rupture des systèmes de protection pour les différents équipements et conducteurs du réseau. Chaque système d'interruption a la capacité de fermer et d'interrompre une panne; Le dépassement des valeurs de taille du dispositif de coupure entraîne le risque de ne pas rompre l'arc ou de fermer le défaut présent, et un risque élevé de destruction de l'appareil. 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 avec des machines asynchrones à double puissance entraînent également des courants de court-circuit. L'effet des équipements électroniques de puissance, qui identifie et calcule facilement les pannes, diminue cependant rapidement cette contribution.

Différentes éoliennes équipées de machines synchrones rendent leur contribution négligeable, le système étant entièrement déconnecté du réseau via l'interface de l'électronique de puissance.

III.3.1.3. Plan de protection

Ce Plan de Sécurité est un dispositif défensif structuré permettant d'isoler très rapidement une structure défectueuse afin d'assurer la sécurité des biens et des personnes (ligne, transformateurs, jeu de barres, etc.). Il existe différents types de relais qui pèsent différents nombres de grandeurs physiques à mesurés.

La relation entre la production d'énergie renouvelable peut entraîner des changements de direction (réseau de production) ou d'amplitude des courants stationnaires, des changements de courants de court-circuit, des changements de tension, des variations d'impédances mesurées, etc. En particulier avec aveugle protection ou déclenchement inutile, ces variations peuvent affecter le bon fonctionnement du plan de protection.

III.3.2. Impacts globaux

En plus des impacts locaux affectant le voisinage du point de jonction, les unités de production d'énergie renouvelable peuvent avoir des impacts plus globaux à l'échelle de la région, surtout si elles sont reliées au réseau de transport ou au réseau insulaire.

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'effet sur la capacité de transport de l'intégration des énergies renouvelables dépend de la position géographique de la production d'énergies renouvelables par rapport à la demande, du lien entre cette production et la demande et de la capacité initiale du réseau. La production d'énergie renouvelable a un effet sur le transfert de puissance vers le réseau: elle peut modifier le sens du flux, augmenter ou diminuer les pertes.

L'analyse de la capacité de transport implique à la fois des études statiques (calcul de la distribution du flux d'énergie) et des études dynamiques (analyse de stabilité).

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

Les réseaux sont dimensionnés de telle sorte que des flux d'énergie du réseau de transport vers la distribution puissent être obtenus. L'introduction dans des niveaux de tension autres que le réseau de transport de production décentralisée (énergie éolienne, etc. produira une injection de puissance dans le sens inverse, c'est-à-dire de la distribution au transport. Les

machines, et les protections en particulier, doivent alors être bidirectionnelles. Par conséquent, sachant que les réseaux au niveau de tension le plus bas sont généralement surdimensionnés pour faire face à l'augmentation de l'utilisation, le changement de direction du flux d'énergie pourrait probablement entraîner une congestion locale à mesure que le taux de pénétration de la DP augmente.

III.3.2.4. Dispatching

Cet effet est dû à l'incertitude de la production renouvelable et aux erreurs de prévision. Les deux principaux facteurs d'influence sont la répartition et l'exploitation du parc de production (durée, charge partielle, arrêts / démarrages). Par conséquent, il est important d'établir des méthodes pour évaluer et intégrer l'effet des énergies renouvelables sur la gestion prévisionnelle du parc de production. Les sauvegardes, et en particulier les machines, doivent alors être bidirectionnelles.

III.3.3. Test et simulation sur le réseau MT

Dans cette partie, nous avons ajouté une éolienne au nœuds 675 comme le montre **Figure [II.6]**; et pour cela nous avons utilisé toujours le programme OPENDSS.

Réseau de 13 nœuds avec éolienne

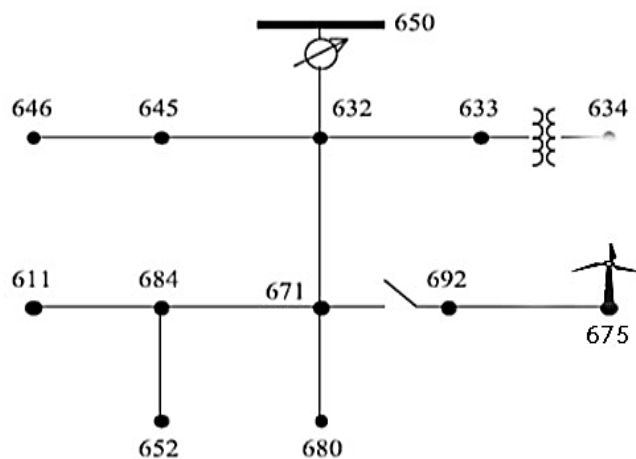


Figure III.3: Diagramme linéaire.

Pour voir l'effet d'une éolien sur le réseau avec un régleur de charge et sans régleur de charge on a simulé les deux cas sur logiciel OPENDSS. Les **Tableau [III.2]** et **Tableau [III.3]** Montre les résultats obtenus pour un test de réseau sans et avec un régleur de charge:

Eolienne Sans régleur en charge

Bus	VLN (kV)	VLN (kV)	VLN (kV)	VLN (kV)
	100%	75%	50%	25%
SOURCEBUS	114.99	115	115	115.01
650	4.1596	4.1598	4.1601	4.1603
RG60	4.159	4.1593	4.1598	4.1602
633	3.987	4.0258	4.0891	4.1401
634	0.4503	0.45711	0.46678	0.47514
645	3.9841	4.0226	4.0876	4.1393
646	3.9827	4.0214	4.0868	4.1389
652	3.8707	3.9396	4.0461	4.1335
671	3.8824	3.9483	4.0517	4.1363
675	3.879	3.9474	4.0534	4.1408
692	3.8824	3.9483	4.0517	4.1363
611	3.8749	3.9418	4.048	4.1345
632	3.9919	4.0296	4.0916	4.1413
684	3.8774	3.9442	4.0492	4.1351
680	3.8824	3.9483	4.0517	4.1363
670	3.9548	4.002	4.0781	4.1396

Tableau III.2 Tensions ligne-ligne par bus et nœud (éolienne sans régleur en charge).

Eolienne Avec régleur en charge

Bus	VLN (kV)	VLN (kV)	VLN (kV)	VLN (kV)
	100%	75%	50%	25%
SOURCEBUS	114.99	115	115	115.01
650	4.1595	4.1597	4.1601	4.1603
RG60	4.5227	4.4971	4.3418	4.2382
633	4.3608	4.3616	4.2711	4.2183
634	0.49252	0.49523	0.48756	0.48411
645	4.358	4.3584	4.2696	4.2175
646	4.3566	4.3573	4.2689	4.2172
652	4.2511	4.2754	4.2289	4.2122
671	4.2626	4.2849	4.2347	4.2151
675	4.2585	4.2839	4.2365	4.2197
692	4.2626	4.2849	4.2347	4.2151
611	4.2551	4.2779	4.2309	4.2132
632	4.3656	4.3656	4.2738	4.2197
684	4.2576	4.2804	4.2322	4.2138
680	4.2626	4.2849	4.2347	4.2151
670	4.3309	4.3383	4.2606	4.2181

Tableau III.3 Tensions ligne-ligne par bus et nœud (éolienne avec régleur en charge).

III.3.4. Discussion et interprétation des résultats

Le **Tableau III.2** représente les plans de tension le long du réseau à différentes charges si le régleur en charge est désactivé et avec l'injection d'une source éolienne au nœud 675. La tension de sortie issue du secondaire est réglée à la valeur nominale de réseau. La chute de tension le long du réseau augmente quand l'appel de charge augmente, elle dépasse les limites pour certaines valeurs des charges.

D'après le **Tableau III.2**, l'ajout d'une éolienne sur le réseau sans régleur en charge, n'a aucune influence importante sur la tension des nœuds.

Le régleur en charge contrôle le nœud 675 et estime donc une chute de tension dans le réseau plus importante. Par conséquent, il varie rapidement la prise ce qui a pour effet de faire varier rapidement la tension pour l'ensemble des nœuds du réseau. Cette variation de la tension est avec conséquence à l'amélioration de la qualité de la tension au nœud RG60, ou il y a un

dépassement dans la valeur autorisée ($> +5\%$) quand l'appel de charge augmente (Voir **Tableau III.3**).

III.4. Conclusion

En guise de conclusion de ce chapitre on constate d'une manière générale les différents obstacles qui peuvent être à la barre pour un fonctionnement électrique au cours l'intégration d'une production décentralisée, ces contraintes ne se limite pas seulement ici mais aussi pour l'énergie éolienne et ses impacts sur un réseau sans et avec régleur de charge.

Conclusion Générale

Les plus grands parcs éoliens sont connectés aux systèmes de transport tandis que les plus petits parcs éoliens sont de préférence connectés aux systèmes de distribution. Cette préférence découle des coûts de connexion comparativement inférieurs associés à l'installation de l'énergie éolienne dans les réseaux à basse tension. Mais l'introduction de l'énergie éolienne dans un système de distribution pose un certain nombre de problèmes de qualité et de fiabilité de l'énergie tels que le scintillement et les harmoniques de tension, les surtensions et les surcharges thermiques et l'augmentation du niveau de défaut. dans notre mémoire, nous avons travaillé sur le logiciel de simulation de réseau électrique EMTP pour intégrer le parc éolien dans le réseau de distribution de Khemis Miliana, dans la simulation que nous avons faite précédemment nous pouvons conclure que l'intégration d'éoliennes augmente la capacité de puissance, que le réseau électrique oblige la source décentralisée à respecter certains paramètres tels que la tension, la fréquence et la symétrie de ligne pour l'intégration. Par conséquent, les impacts resteront importants et doivent être pris en compte pour le bon fonctionnement du réseau électrique.

Les Références Bibliographiques

- [1] J. L. Sawin, E. Martinot, and Others, “Renewables 2013 global status report,” tech. rep., REN21, Paris, France, June 2012.
- [2] S. Krohn, P.-E. Morthorst, and S. Awerbuch, “The economics of wind energy,” tech. rep., European Wind Energy Association (EWEA), Brussels, Mar. 2009.
- [3] S. Liew and G. Strbac, “Maximising penetration of wind generation in existing distribution networks,” *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-*, vol. 149, pp. 256–262, May 2002.
- [1] NOUREDINE Hadjsaïd, “Les réseaux électriques de distribution de la production décentralisée 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 maitrise, 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/strony/EIC/res/Grid_connection_wind_power.html

Les Références Bibliographiques

- [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, 2015.52
- [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.
- [17] Phonétique théorique de la langue française. Fedorov V.A. - 12 p. <https://bit.ly/3IVfq7>.

Annexes



Annexe A

Spécifications de l'éolienne Enercon E48 800 kW

Turbine	
Configuration	Trois lames, axe horizontal, au vent
Puissance nominale	800kW at 12m/s
Vitesse du rotor	16 to 32 rpm
IEC 61400-1 Turbine Classe	IIA
Vitesse moyenne du vent sur le site	8.5 m/s
Vitesse du vent de survie	59.5 m/s
Rotor	
Diamètre du rotor	48 m
Zone balayée	1,810 m ²
Matériau de la lame	GRP (Epoxy)

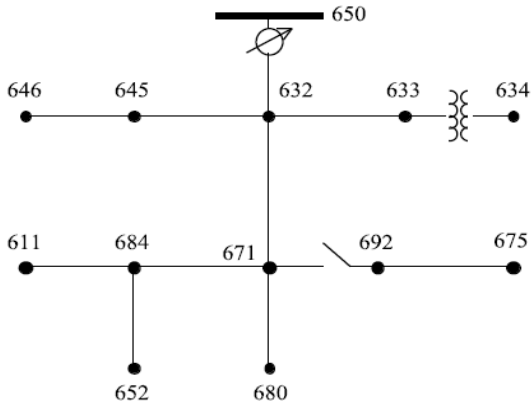
Régulation de puissance	Vitesse variable contrôlée par pas
Générateur	
Type de générateur	Générateur d'anneau synchrone à entraînement direct ENERCON
Configuration	3-Phase, 400V, 50Hz – 60Hz
Système de freinage et de sécurité	
Système de freinage principal	3 systèmes de contrôle de pas indépendants avec alimentation de secours
Système secondaire	Frein de rotor et blocage de rotor (à des fins de maintenance)
Arrêt automatique déclenché par	Vitesse du vent élevée, défaillance du réseau, vitesse excessive, toutes les autres conditions de défaut
Les contrôles	
Interface utilisateur des systèmes de contrôle	ENERCON SCADA
Tours	
Hauteurs de moyeu disponibles	50 m, 60 m, 75 m

Type de tour	Tour en acier tubulaire
garantie	
Période et type	Forfait de service standard jusqu'à 15 ans

Annex B

Paramètres de réseau IEEE 13 noeuds

Un diagramme linéaire



Paramètre de configuration de la ligne

Confi g	Phasing	Cable	Neutral	Space ID
606	A B C N	250,000 AA, CN	None	515
607	A N	1/0 AA, TS	1/0 Cu	520

Paramètre de ligne haute tension

Config	Phasing	Phase	Neutral	Spacing
		ACSR	ACSR	ID
601	B A C N	556, 500 26/7	4/0 6/1	500
602	C A B N	4/0 6/1	4/0 6/1	500
603	C B N	1/0	1/0	505
604	A C N	1/0	1/0	505
605	C N	1/0	1/0	510

Paramètre de segment de ligne

Node A	Node B	Length (ft.)	Config
632	645	500	603
632	633	500	602
633	634	0	XFM-1
645	646	300	603
650	632	2000	601
684	652	800	607

Paramètre du condensateur

Node	Ph-A	Ph-B	Ph-C
	kVar	kVar	kVar
675	200	200	200
611			100
Total	200	200	300

632	671	2000	601
671	684	300	604
671	680	1000	601
671	692	0	Switch
684	611	300	605
692	675	500	606

Paramètre de régulateur

Régulateur ID :	1		
Line Segment :	650-632		
Location :	650		
phases :	A-B-C		
Connection :	3-Ph, LG		
Monitoring Phase :	A-B-C		
Bandwidth :	2.0volts		
PT Ratio :	20		
Primary CT Rating:	700		
compensator Settings :	Ph-A	Ph-B	Ph-C
R-Setting:	3	3	3
X-Setting:	9	9	9
Voltage Level:	122	122	122

Paramètre du transformateur

	kVA	kV-high	kV-low	R - %	X - %
Substation	5,000	115 - D	4,16 Gr. Y	1	8
XFM - 1	500	4,16 - Gr.W	0,48 - Gr.W	1.1	2

Paramètre des charges

Node	Load	Ph-1	Ph-1	Ph-2	Ph-2	Ph-3	Ph-3
	Model	kW	kVar	kW	kVar	kW	kVar
634	Y-PQ	160	110	160	110	160	110
645	Y-PQ	170	125	170	125	170	125
646	Y-PQ	230	132	230	132	230	132

652	Y-PQ	128	86	128	86	128	86
671	Y-PQ	1155	660	1155	660	1155	660
675	Y-PQ	485	190	485	190	485	190
692	Y-PQ	170	151	170	151	170	151
611	Y-PQ	170	80	170	80	170	80
	Total	2668	1534	2668	1534	2668	1534

Distribution des charges

Node A	Node B	Load Model	Ph- 1 kW	Ph-1 kVar	Ph- 2 kW	Ph-2 kVar	Ph- 3 kW	Ph-3 kVar
632	671	Y-PQ	17	10	66	38	117	68