



LICENCE SCIENCES ET TECHNIQUES
Génie Electrique

RAPPORT DE FIN D'ETUDES

Intitulé :

**Impact de l'intégration du parc éolien de
Taza sur le réseau: Qualité de l'énergie.**

Réalisé Par :
BOUJENANE SAMIRA

Encadré par :

Pr EL MARKHI HASSANE (FST FES)

M.EL MAKRINI ABOUBAKR (ONEE FES)

Soutenu le 16 Juin 2015 devant le jury

Pr EL MARKHI HASSANE (FST FES)

Pr ERRAHIMI FATIMA (FST FES)

Pr GHENNIQUI HICHAM (FST FES)

Dédicace

Aucun travail n'est possible dans l'isolement. Les rencontres, les conseils et les encouragements constituent des aides précieuses souvent décisives. C'est pourquoi je tiens à dédier mon stage à tous ceux qui ont contribué à ce travail parfois sans le savoir ou du moins sans la portée de leur influence.

Je dédie ce travail à:

Mes parents

Pour les sacrifices déployés à mon égard ; pour leur patience

Leur amour et leur confiance en moi

Ils ont tout fait pour mon bonheur et ma réussite.

Nulle dédicace ne puisse exprimer ce que je leur dois

Que dieu leur réserve la bonne santé et une longue vie.

Mes chers amis

Pour leurs présences et leurs aides et encouragements.

Et enfin à tous les enseignants et les étudiants de la filière génie électrique.

J'espère que ce rapport donnera une satisfaction à toutes ces personnes et à tous ceux qui auront l'occasion de le lire.

Remerciements

Le projet de fin d'étude auquel j'ai été initié a été une expérience intellectuellement utile et humainement motivant. Rien de cela n'aurait été possible sans ceux qui ont partagé avec moi leur savoir, leur efforts et qui m'ont permis d'éviter les difficultés par leurs bons conseils.

Tout d'abord, je voudrais remercier Monsieur ABOUBAKR EL MAKRINI, Chef de la Division exploitation transport de l'Office National d'Electricité pour bien voulu m'accueillir comme stagiaire dans sa division et s'est montré très disponible pour répondre à mes questions le long de mon stage, je lui exprime toute ma gratitude pour son expérience, sa compétence multidisciplinaire, son soutien inconditionnel et ses qualités humaines.

J'adresse mes vifs remerciements à M. EL MARKHI HASSANE Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de Fès, pour son encadrement, ses clairs conseils, j'ai beaucoup appris en travaillant avec lui, sa disponibilité aussi pour la confiance et la compréhension qu'il m'a manifestée, je le remercie également de m'avoir supporté pendant la durée du stage.

Je tiens à remercier également les membres du jury pour le temps qu'ils ont consacré à l'évaluation de mon projet, Monsieur GHENNIoui Hicham et Madame ERRAHIMI Fatima.

Mes vifs remerciements à tous les enseignants qui ont contribué à ma formation du primaire à l'université, à ceux qui ont marqué ma formation électrique.

Je suis également profondément à tous les gens de la division de transport de l'ONEE que j'ai eu l'opportunité d'embêter, en particulier Monsieur EL MAJDoub YOUSSEF pour sa rigueur scientifique et les conseils judicieux qu'il m'a prodigués pour l'élaboration de ce travail, je lui remercie également pour sa disponibilité et sa gentillesse toute la durée de mon stage.

Merci également à tous les collègues avec lesquelles j'ai effectué mon stage (Zakaria, SILVER et OMAIMA) et tous mes collègues du la filière génie électrique de leurs encouragements et les bons moments qu'on a passés ensemble, une chance énorme de vous avoir connu à vous tous.

Je ne peux pas finir mes remerciements sans rendre un grand hommage à Mr BOUKHRIS YOUNESS, pour l'environnement de sérieux et de détente mêlés qui règnent pour apporter une richesse incomparable à mon sujet de fin d'étude.

Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la concrétisation de ce travail.

Boujenane Samira

Résumé

Selon la ligne directrice spécifiée dans la commission électrotechnique internationale IEC 61400-21, les éoliennes peuvent provoquer des impacts significatifs sur la qualité de puissance du réseau auquel sont connectées. Les mesures de la qualité de puissance se déterminent par les paramètres suivants : la puissance active, la puissance réactive, la variation de tension, le Flicker et les harmoniques. Ce rapport de fin d'étude présente l'étude des différents paramètres qui affectent la qualité d'énergie et les solutions proposées pour les atténuer ainsi que la simulation de ces solutions pour un modèle du parc éolien de TAZA en utilisant l'outil Matlab/Simulink.

Sommaire:

<i>Remerciements</i>	2
<i>Résumé</i>	3
<i>Introduction générale</i>	8
<i>chapitre 1 : APERÇU SUR L'ONEE ET LE PARC ÉOLIEN DE TAZA</i>	9
1. Introduction	9
2. Aperçu général sur l'ONEE	9
1.1. Historique	9
1.2. Missions de l'ONEE	9
1.3. Fiche signalétique	10
1.4. Stratégie	10
1.5. Activité	10
1.6. L'organigramme de l'ONE	12
3. Aperçu général sur le parc du TAZA	13
3.1. Programme intégré de l'énergie éolienne :	13
3.2. Première Phase du Programme Eolien Intégré de 1000 MW : " PROJET DE PARC EOLIEN DE TAZA (150 MW) "	13
3.3. Raccordement électrique :	13
4. Conclusion	14
<i>chapitre 2 : SYSTÈMES ÉOLIENS À BASE DE LA MADA</i>	15
1. Introduction	15
2. Généralités sur les éoliennes	15
2.1. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	15
2.2. La puissance éolienne dans le monde	16
2.3. Constitution d'une éolienne	16
3. Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA)	18
3.1. Les constitutions du MADA	19
3.2. Principe de fonctionnement	19
3.3. Régimes de fonctionnement	20
3.4. Les avantages du MADA	21
3.5. Les inconvénients du MADA	21
4. Conclusion	21
<i>chapitre 3 : CODE GRID</i>	22
1. Introduction	22
2. Les exigences techniques du code GRID	22
2.1. La tension et la fréquence	22
2.2. La puissance active	25
2.3. La puissance réactive	25
2.4. Qualité de l'énergie électrique	25
3. Creux de Tension et coupures brèves	26
3.1. Mesure du creux de tension	26
3.2. Les Causes	26
3.3. Les Conséquences :	27



3.4. Les Solutions	27
4. Déséquilibre de tension	28
4.1. La mesure de déséquilibre	28
4.2. Les Causes	29
4.3. Les conséquences	29
4.4. Les solutions	29
5. Flicker (papillotement)	29
5.1. Classification de Flicker	30
5.2. Mesure de Flicker	30
5.3. Les Causes	31
5.4. Conséquences	31
5.5. Les solutions	31
6. Les harmoniques	32
6.1. Les caractéristiques d'un signal déformé	32
6.2. Les causes des harmoniques	35
6.3. Conséquences	35
6.4. Les solutions	35
7. Comparaison entre différents Code GRID	36
7.1. Contrôle de la fréquence :	36
7.2. Contrôle de la tension :	38
7.3. Baisse de tension en cas de défaut :	38
8. Conclusion	39
<i>chapitre 4 : ANALYSE DE LA QUALITÉ D'ÉNERGIE</i>	<i>40</i>
1. Introduction	40
2. Description du modèle du parc éolien	40
2.1. Modélisation du parc éolien de TAZA	40
3. Mesure de qualité d'énergie	41
3.1. Creux de tension	41
3.2. Flicker	41
4. Simulation du système éolien sous Matlab/Simulink	42
4.1. Simulation de la variation de la vitesse du vent	42
4.2. Le modèle du système simulé	42
4.3. Différents scénarios d'amélioration de la qualité d'énergie	47
5. Conclusion	53
Conclusion générale	54

Liste des figures :

Figure 1 : Schéma unifilaire de raccordement du parc éolien de TAZA	14
Figure 2 : Capacité éolienne installée dans le monde [2].	16
Figure 3 : Conversion de l'énergie cinétique du vent [3].....	17
Figure 4: Constitution d'une centrale éolienne [1]	17
Figure 5: Puissance totale générée mesurée en fonction de la vitesse du vent [3].....	18
Figure 6 : Constitutions du MADA [4].	19
Figure 7 : Le statisme [4].	23
Figure 8: La régulation de fréquence [11].	24
Figure 9: Les limites de la plage de puissance réactive [9].	25
Figure 10 : Creux et coupure de tension [13].....	26
Figure 11 : Amplitude d'un creux de tension provoqué par a) un court-circuit b) le démarrage d'un moteur de forte puissance [16]	27
Figure 12: Déséquilibre du système triphasé de tension [13]	28
Figure 13 : Fluctuations de tension [13]	30
Figure 14 : Courbe limite de gêne du Flicker (selon la norme CEI 868).....	30
Figure 15 : Représentation de l'effet d'harmonique [13].	32
Figure 16 : Spectre harmonique d'un signal [18].	33
Figure 17 : La variation de F_p en fonction de $THDi$ pour deux valeurs de $THDv$ [18].	35
Figure 18: Contrôle de la puissance active/fréquence [4]	37
Figure 19: Les durées et les niveaux de tension associés aux aérogénérateurs suite aux défauts [19].	39
Figure 20 : Schéma de raccordement du parc éolien de Taza.....	40
Figure 21 : La vitesse du vent aléatoire	42
Figure 22: Le modèle du système simulé.....	43
Figure 23: L'aérogénérateur de type MADA.....	43
Figure 24: Les tensions visualisées aux réseaux de TAZA et El Ouali	44
Figure 25 : La tension et le courant du parc en fonctionnement nominal.....	44
Figure 26 : Zoom sur la courbe de tension en fonctionnement nominal.....	45
Figure 27: Allure de spectre harmonique du tension du parc au PCC en fonctionnement nominale.	45
Figure 28: La tension et le courant au point PCC	46
Figure 29: Allure de spectre harmonique du tension du parc au PCC.	47
Figure 30 : Parc avec une capacité série	48
Figure 31 : La tension au PCC du parc avec capacité série	48
Figure 32: Allure de spectre harmonique du tension du parc au PCC avec capacité série	49

Figure 33 : Parc avec filtre passif.....	49
Figure 34: Allure de spectre harmonique du tension du parc au PCC avec un filtre passif.	50
Figure 35: La structure du filtre actif parallèle	51
Figure 36: Parc éolien avec filtre actif.	52
Figure 37 : La tension au PCC du parc avec filtre actif.....	52
Figure 38: Allure de spectre harmonique du tension du parc au PCC avec un filtre actif.....	53

Les acronymes:

ASI	: Alimentation Sans Interruption
CEI	: Commission Electrotechnique Internationale
CRS	: Convertisseur côté réseau
CRT	: Convertisseur côté rotor
E.ON Netz	: German transmission system Operator
EWEA	: European Wind Energy Association
FACT	: Flexible AC Transmission System
FAP	: Filtre Actif Parallèle
FFT	: Fast Fourier Transform
GTO	: Gate Turn-Off Thyristor
IGBT	: transistors à jonction et à effet de champ (Insulated Gate Bipolar Transistor)
LVRT	: Low Voltage Ride Through
MADA	: Machine asynchrone double alimentation
MLI	: Modulation de Largeur d'Impulsion
ONEE	: Office National de l'Electricité et de l'Eau Potable
PCC	: Point Commun de Raccordement
PI	: Proportionnel-Intégral
PLL	: Boucle à verrouillage de phase
STATCOM	: Static Compensator
SVC	: Static Voltage Compensator
THD	: Total Harmonic Distorsion

Introduction générale

L'énergie électrique est un facteur essentiel pour le développement et l'évolution des sociétés humaines soit sur le plan de l'amélioration des conditions de vie, ou sur le développement des activités industrielles. Elle est devenue une forme d'énergie essentielle par sa souplesse d'utilisation et par la multiplicité des domaines d'activité où elle est appelée à jouer un rôle plus important. Les modes et les moyens de production associés sont amenés à subir de graves changements au cours des prochaines décennies. En effet, les modes de production reposant sur la transformation des énergies renouvelables (éolien, solaire ...), sont appelés à être de plus en plus utilisés dans le cadre du développement durable.

Parmi ces sources d'énergies renouvelables, l'énergie éolienne est celle qui a le potentiel énergétique le plus important. La puissance des éoliennes installées dans le monde augmentant de plus en plus tous les ans, actuellement, le système éolien à vitesse variable basé sur la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) est le plus utilisé dans les fermes éoliennes terrestres. Son principal avantage est d'avoir des convertisseurs d'électronique puissance triphasés dimensionnés pour une partie de la puissance nominale de la MADA, ce qui est en fait un bénéfice économique important par rapport à d'autres solutions possibles de conversion électromécanique (machine synchrone à aimants permanents par exemple).

Aujourd'hui du fait de l'importance en termes de puissance installée des parcs éoliens, chaque pays a asservi à des nouvelles exigences techniques, ces exigences concernent la fréquence, la tension, la puissance active produit, la puissance réactive absorbée et la qualité d'énergie. Le domaine de la qualité de l'énergie électrique se caractérise par deux grands axes :

- La surveillance (monitoring): Comprendre l'origine des perturbations afin d'évaluer leur impact sur les équipements et donc de trouver et de choisir la solution la plus appropriée économiquement et techniquement.
- Les solutions préventives et curatives.

Ce rapport de projet de fin d'étude est organisé de la manière suivante : Le premier chapitre et un chapitre introductif qui donne une présentation générale du lieu du stage et un aperçu sur le parc éolien de TAZA. Le deuxième chapitre est consacré aux notions générales sur l'énergie éolienne. Les technologies d'éoliennes ainsi que les différents composants constituant l'aérogénérateur seront brièvement présentés. Ensuite, les différentes machines électriques utilisées pour la conversion éolienne seront étudiées afin de montrer les avantages de la MADA. Dans le troisième chapitre, nous abordons d'abord la notion de « Code GRID » et présenter les différents exigences de raccordement tel que la fréquence, la tension, la puissance active et réactive ensuite la qualité d'énergie qui définit les principaux types de perturbations ainsi que leurs origines, causes, conséquences et traits caractéristiques et puis dans une deuxième partie on a choisi cinq pays(Danemark ,allemand , Ireland ,Tunisie et la Maroc) pour faire la comparaison entre eux sur ce que concerne le code GRID. Le quatrième chapitre sera consacré à l'analyse des perturbations de tension sous l'environnement Matlab/Simulink du modèle du parc éolien de TAZA, Puis nous présenterons et nous interpréterons les résultats que nous avons obtenus.

Chapitre 1

APERÇU SUR L'ONEE ET LE PARC ÉOLIEN DE TAZA

1. Introduction

Dans ce premier chapitre nous allons donner une présentation du lieu de stage et du parc éolien de TAZA.

2. Aperçu général sur l'ONEE

1.1. Historique

Crée par Dahir en août 1963 l'Office National de l'Electricité et de l'Eau Potable a été substitué à la Société Electrique du Maroc pour prendre en main le secteur électrique : production, transport et distribution. C'est un établissement public ayant un caractère industriel et commercial et possédant une autonomie financière.

Les droits et obligations de l'ONEE sont définis dans un cahier de charges approuvé par décret en 1974, qui indique les conditions techniques, administratives et financières relatives à l'exploitation des ouvrages de production, de transport et de distribution de l'électricité.

Les ouvrages de production dont dispose l'ONEE, sont constitués de 24 usines hydroélectriques totalisant une puissance installée de 1 283.8MW, de 5 centrales thermiques vapeurs totalisant 2 385MW, de 7 centrales à turbines à gaz et plusieurs centrales Diesel totalisant 1093.7MW et un parc éolien de 250.4MW.

Le réseau de transport, reliant les moyens de production aux centres de consommation, qui couvre une très grande partie de territoire national, est constitué de lignes 400KV, 225KV, 150KV et 60KV d'une longueur totale de l'ordre 17107 KM environ. Il est par ailleurs interconnecté avec le réseau algérien au moyen de deux lignes 225KV et une ligne de 400KV et avec le réseau espagnol au moyen de trois lignes de 400kv sous-marins.

La coordination de gestion de l'ensemble du réseau de l'ONEE est assurée à partir des :

- ❖ Réseaux de distribution de l'ONEE sont constitués de près de 36955 KM en moyenne tension et de 92 130 KM en basse tension. L'énergie électrique est distribuée par l'ONEE en zone rurale et dans plusieurs centres urbains.
- ❖ Régimes municipaux ou intercommunaux, placées sous la tutelle du Ministère de l'intérieur pour les grands centres urbains.

Le Dispatching national, implanté à Casablanca est doté de moyens modernes permettant une surveillance permanente et une exploitation optimale.

1.2. Missions de l'ONEE

L'ONEE a pour principales missions de :

- Satisfaire la demande en électricité du pays en énergie électrique dans les meilleures conditions de coût et de qualité de service ;

- Gérer et développer le réseau de transport ;
- Planifier, identifier et généraliser l'extension de l'électrification rurale ;
- Œuvrer pour la promotion et le développement des énergies renouvelables ;
- Répondre aux besoins du pays en énergie électrique ;
- Sa politique ambitieuse de développement économique et du progrès social de notre pays.

1.3. Fiche signalétique

- ❖ **Raison social** : office national d'électricité ;
- ❖ **Statut juridique** : établissement public à caractère industriel et commercial de droit marocain daté de la personnalité moral et de l'autonomie financière instituée par le dahir 63-226 du 14 RABIAI ;
- ❖ **Siège social** : 65 rus Otman ben Affan 2000 Casablanca-Maroc ;
- ❖ **Date de création** : 1963 ;
- ❖ **Activité** : production, transport, et distribution d'énergie électrique au Maroc ;

1.4. Stratégie

Pour satisfaire la demande d'énergie électrique au moindre cout et avec une meilleure qualité de service, l'ONEE a mis en œuvre une stratégie visant à renforcer son rôle de vecteur important de développement :

- La recherche du kWh le moins cher ;
- La diversification des sources d'approvisionnement ;
- La mise en valeur des ressources nationales ;
- L'intégration régionale.

1.5. Activité

1.5.1. Production

Face à un environnement énergétique mondial difficile, les principaux défis de l'ONEE sont :

- ✓ Assurer l'indépendance électrique de son pays ;
- ✓ Réduire le poids des importations d'énergies primaires sur la balance commerciale ;
- ✓ Favoriser l'implication du secteur privé dans l'investissement pour l'électricité ;
- ✓ Mobiliser les énergies renouvelables en tant qu'énergies nationales.

En tant que producteur national, l'ONEE a la responsabilité de fournir sur tout le territoire marocain et à tout instant une énergie de qualité.

Cette fourniture est assurée par des moyens de production exploités directement par l'ONE ou par des ouvrages confiés à des producteurs concessionnels.

Au-delà de la gestion technique et de l'amélioration des ouvrages de son parc de production, l'ONEE développe de nouveaux moyens de production et de nouvelles technologies en conciliant performance économique, expertise technique, modélisation des ressources énergétiques nationales notamment les énergies renouvelables et préservation de l'environnement.



Potentiel d'énergies renouvelables:

- ⚡ Solaire : Un rayonnement moyen de 5 kWh/m²/j.
- ⚡ Éolien : Un potentiel éolien de plus de 6000 MW
- ⚡ Petite Hydraulique : Un potentiel significatif pour les microcentrales hydrauliques : plus de 200 sites exploitables.
- ⚡ Biomasse : 9 millions d'hectares de forêts.

1.5.2. Transport

Ayant pour mission d'assurer le transport de l'énergie électrique et la sécurité d'alimentation du pays, l'ONEE développe et renforce son réseau de transport qui couvre la quasi-totalité du territoire national. D'une longueur totale de 20 350 km en 2009, le réseau de transport national est interconnecté aux réseaux électriques espagnol et algérien, dans l'objectif de :

- *Renforcer la fiabilité et la sécurité d'alimentation.*
- *Bénéficier de l'économie potentielle sur le prix de revient du kWh.*
- *Intégrer le marché électrique national dans un vaste marché euromaghrébin.*

Avec le renforcement des interconnexions, le Maroc est devenu un carrefour énergétique entre les deux rives de la Méditerranée et offre l'infrastructure de base à l'émergence d'un véritable marché de l'électricité. Pour répondre aux besoins du pays en énergie électrique, l'ONEE a lancé un vaste programme de développement du réseau national de transport et de mise en place de véritables " autoroutes de l'électricité " vers les pays voisins.

Ce programme comprend :

- *L'extension et le renforcement des lignes 400 kV, 225 kV et 60 kV.*
- *Un nouveau dispatching national, (DOS), pour assurer une meilleure gestion technico-économique des moyens de production et de transport.*
- *La mise en place de la télégestion des centrales.*

1.5.3. Distribution

La satisfaction de la clientèle et le service public constituent deux axes prioritaires de l'ONE qui œuvre sans cesse pour l'amélioration de la qualité de service tant au niveau Technique que commercial

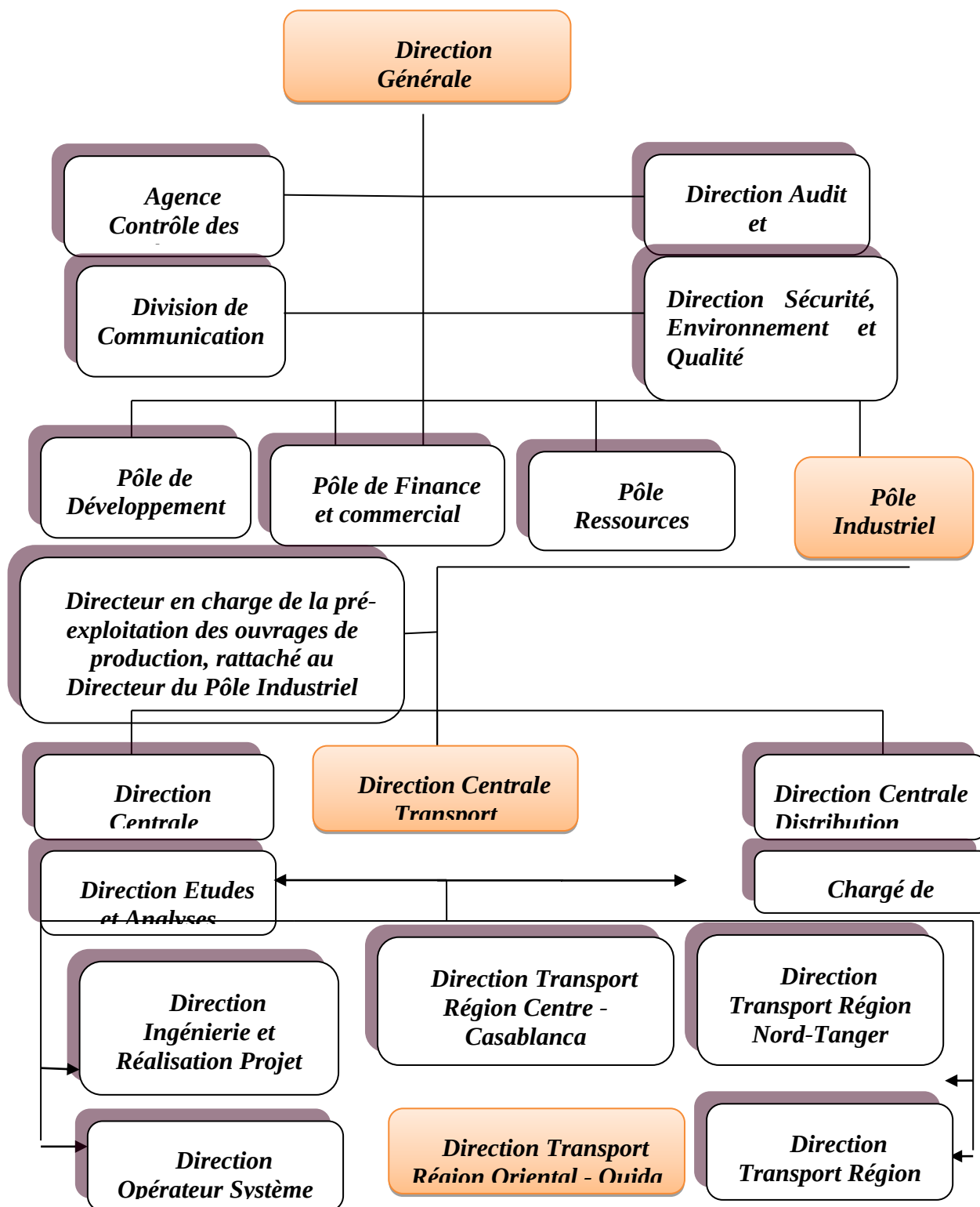
C'est ainsi que l'ONEE s'efforce de relever constamment les performances du service pour répondre au mieux aux attentes de ses 4 millions de clients sur tout le territoire national à l'exception de quelques agglomérations urbaines gérées par des régies de distribution publiques ou des distributeurs privés.

1.5.4. Eclairage publique

L'ONE poursuit sa politique visant l'encouragement des Communes à opter pour la gestion déléguée du service d'éclairage public en confiant ce service à l'ONEE ou à des opérateurs spécialisés. Les objectifs étant d'encourager l'utilisation d'équipements moins énergétivores pour l'éclairage public, la rationalisation de la consommation d'énergie électrique dédiée à cette utilisation et à la systématisation de l'entretien des installations.

A ce jour, l'ONEE assure la gestion de l'éclairage public dans les villes d'Al Hoceima, Béni Mellal, BENSLIMANE, BOUARFA, CHEFCHOUANE, Essaouira, IMZOUREN, KHEMISSET, KHROUBIGA, NADOR, TANGER, TAZA et quelques quartiers du Grand Casablanca.

1.6. L'organigramme de l'ONE



3. Aperçu général sur le parc du TAZA

3.1. Programme intégré de l'énergie éolienne :

Le programme intégré de l'Energie Eolienne 1000 MW est composé de six parcs éoliens, répartis dans les régions sud et nord du Royaume qui disposent d'un potentiel éolien important : Taza (150MW), Tanger II (100MW), Boujdour (100MW), Tiskrad (300MW), Midelt (150MW) et Jbel Lahdid (200MW).

Ce programme entre dans le cadre de la stratégie énergétique visant, notamment, à atteindre une part de 42% des énergies renouvelables dans le bouquet électrique à l'horizon 2020, avec une composante éolienne de 2000 MW.

Outre la production d'une électricité verte, ce Programme vise, dans un cadre de partenariat public-privé, la promotion d'une industrie éolienne nationale.

Pour la réalisation du Programme, l'ONEE, le Fonds Hassan II pour le Développement Economique et Social et la Société d'Investissements Energétiques (SIE) s'associeront à un ou plusieurs partenaires stratégiques de référence dans les domaines de la production d'électricité et de l'industrie éolienne, qui seront retenus à l'issue des appels d'offres associés au Programme.

La totalité du programme sera opérationnelle en 2020.

Ce Programme est réparti en deux phases :

- ⊗ **1ère Phase** : Projet du Parc Eolien de Taza (150 MW), dont la mise en service est prévue début 2016 ;
- ⊗ **2ème Phase** : Projet Eolien Intégré 850 MW, composé de cinq parcs éoliens, répartis entre les régions sud et nord du Royaume qui disposent d'un potentiel éolien important : Tanger II (100MW), Boujdour (100MW), Tiskrad (300MW), Midelt (150MW), et Jbel Lahdid (200MW).

Les mises en service de ces parcs éoliens seront opérées entre 2016 et 2020.

3.2. Première Phase du Programme Eolien Intégré de 1000 MW : " PROJET DE PARC EOLIEN DE TAZA (150 MW) "

Le parc du parc éolien de Taza est situé à environ 12km de la ville de Taza.

Le projet comprend le développement, le financement, la conception, l'ingénierie, la fourniture, la construction, la mise en service et l'exploitation d'un parc éolien d'une puissance totale de 150 MW.

Constituant la première phase du Programme Eolien Intégré de 1000 MW, ce projet éolien contribuera, en sus de la satisfaction de la demande croissante d'électricité au Maroc, à la constitution d'une expertise de haut niveau dans le domaine éolien et la promotion d'une industrie éolienne, à travers une compensation industrielle relative à la réalisation du Projet.

Le Projet comprend 50 éoliennes répartie entre deux types : ECO 110 et ECO 100 série 2 d'Alstom avec des hauteurs de mat de 75 m. Ces éoliennes sont des nouvelles générations d'éoliennes de grandes puissances et spécialement conçues pour les parcs sur terre. Au total, 40 éoliennes seront de type ECO 110 et 10 de type ECO 100 Le tableau (Annexe A) présente les caractéristiques des deux types d'éoliennes.

3.3. Raccordement électrique :

Raccordement interne :

Les éoliennes produisent du courant à une tension d'environ 690 V. Le courant passe ensuite par un transformateur situé à l'intérieur de la base de l'éolienne, et ressort à une tension nominale de 20 kV.

Les machines seront regroupées en grappes de 4 à 6 éoliennes reliées entre elles par un réseau 20 KV sous terrain. Les transformateurs 690 V/20 KV seront installés au niveau des nacelles, les cellules de protection et les transformateurs auxiliaires aux pieds des mats. Les grappes seront reliées au poste d'évacuation 20/225 KV par des liaisons sous terraines suivant les différents chemins d'accès.

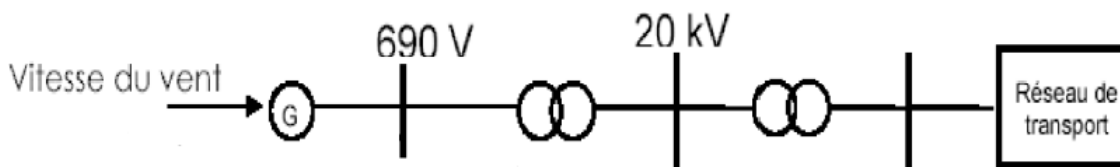


Figure 1 : Schéma unifilaire de raccordement du parc éolien de TAZA

Pour les paramètres équivalents de l'impédance sous transitoire et les paramètres de transformateur, nous avons retenu une valeur typique $Z_{source} = 0.00779 + j0.19199$ en ce qui concerne le transformateur qui prend en compte aussi le réseau BT / MT à l'intérieur du parc, les paramètres ont été choisis de la façon suivante : $X_{tran} = \frac{15}{\text{Puissance nominale du parc}}$ et $R_{tran} = 3\% X_{tran}$.

Poste d'évacuation 20/225 kV :

Un poste d'évacuation 20/225 kV sera installé au centre du parc (dans la vallée). Il collectera l'électricité produite par les éoliennes, transportée par le réseau de câblage inter-éoliennes, et la transmettra au réseau électrique national. Le poste d'évacuation sera lié au réseau ONEE en coupure d'accès sur la ligne 225 KV en conducteur ACR SR 288 mm².

Raccordement au réseau électrique :

D'après l'étude de raccordement qui a été effectuée, le raccordement du parc éolien au réseau national se fera par le rabattement de la ligne 225 kV El Ouali - Taza n°25.114 (située au Sud du parc) sur le nouveau poste 225 KV du parc. Cela implique la réalisation d'une ligne 225 kV à double terre, d'une longueur d'environ 5 km.

4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit brièvement le lieu du stage et nous avons donné un aperçu général sur l'ONEE et sur le parc éolien de TAZA, Dans ce qui va suivre nous allons donner une vision sur les énergies éoliennes et le principe de la conversion de l'énergie cinétique en énergie électrique et qui est transmise au réseau de distribution à travers une structure d'électronique de puissance (ex : MADA), puis nous allons traiter les exigences de raccordement relative au réseau de transport et nous concluons par des simulations sous MATLAB/ Simulink pour vérifier la qualité d'énergie dans le parc éolien de TAZA .

Chapitre 2:

SYSTÈMES ÉOLIENS À BASE DE LA MADA

1. Introduction

Un aérogénérateur (couramment appelé éolienne) est une machine qui utilise l'énergie éolienne (l'énergie cinétique du vent) pour produire de l'énergie électrique. Le vent est une ressource propre et inépuisable qui peut produire d'électricité pratiquement sans l'émission des gaz polluants. Dans le domaine de production de l'énergie électrique à vitesse variable, on préfère plutôt utiliser des machines asynchrones à double alimentation qui offrent d'excellentes performances.

Dans ce chapitre nous allons donner un survol sur les systèmes de conversion éoliens de manière générale puis des statistiques montrant l'évolution de la production et la consommation de l'énergie éolienne dans le monde ensuite une description des différentes structures des systèmes éoliens et dans une deuxième partie nous allons présenter la machine asynchrone à double alimentation MADA .

2. Généralité sur les éoliennes

2.1. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie. Cette source d'énergie a également des inconvénients qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne perturbent pas le développement d'éolienne.

2.1.1. Les Avantages

L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement [1] :

- ✦ L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est-à-dire que contrairement à l'énergie fossile, les générations futures pourront toujours en bénéficier ;
- ✦ L'énergie éolienne évite déjà aujourd'hui l'émission de 6.3 millions de tonnes de CO₂ et 21 millions de tonnes de SO₂ et 17,5 mille tonnes de NO₂, qui sont les principaux responsables des pluies acides ;
- ✦ L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie de risque comme l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs ;
- ✦ C'est l'énergie la moins chère des énergies renouvelables ;

2.1.2. Inconvénients

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolienne a quelques désavantages[1]:

- ✦ L'impact visuel, ça reste néanmoins un thème subjectif ;

- ✦ Le bruit : il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur, le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée.
- ✦ La qualité de la puissance électrique : la source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs notamment dans les régions à fort potentiel de vent est augmentée.

2.2. La puissance éolienne dans le monde

L'énergie éolienne est la source d'énergie qui croît le plus vite dans le monde. Cette progression est énorme par rapport à d'autres types d'énergie plus, telle que l'énergie nucléaire avec une croissance de 1% ou le charbon qui n'a pas du tout augmenté depuis les années 90, comme en témoigne le graphe de la Figure 2[1].

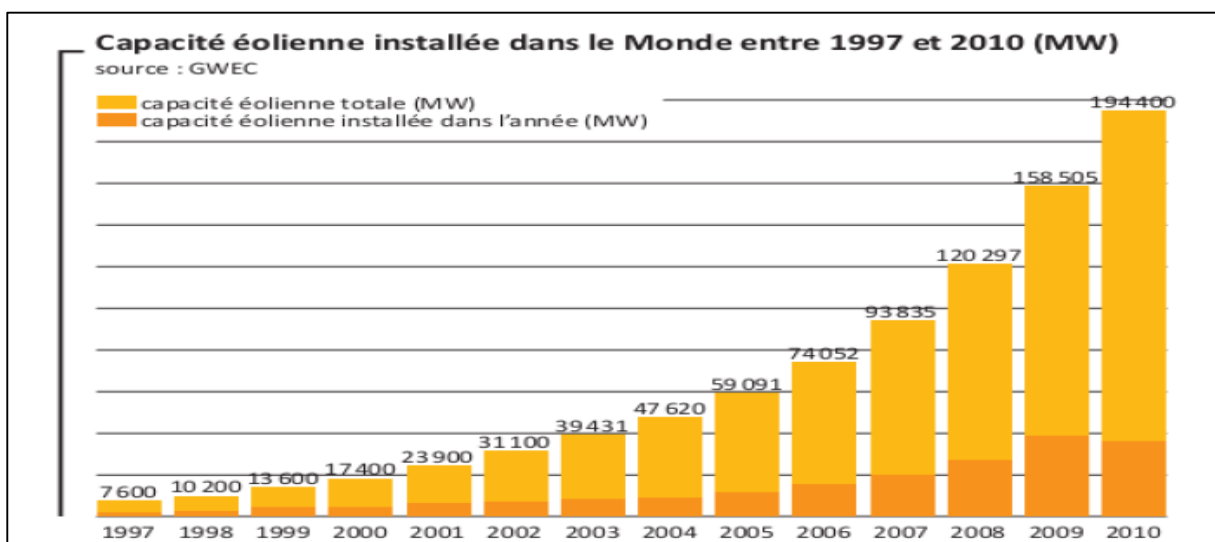


Figure 2 : Capacité éolienne installée dans le monde[2].

Les perspectives sont toutes favorables, L'EWEA (European Wind Energy Association) l'association européenne pour l'énergie du vent estime que **12 %** de l'électricité mondiale en **2020** sera d'origine éolienne et plus de **20 %** pour **2040**[1].

2.3. Constitution d'une éolienne

2.3.1 Principe

Un système éolien a pour rôle d'extraire une partie de l'énergie cinétique du vent et la convertir en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice [3].

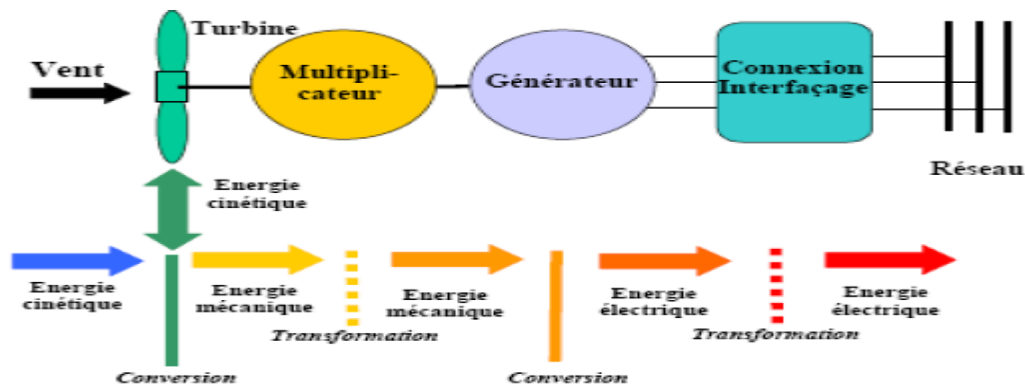


Figure 3 : Conversion de l'énergie cinétique du vent[3]

Cette conversion se fait en deux étapes[3] :

- ✓ Au niveau de la turbine, qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent pour la convertir en énergie mécanique. Cette dernière est transmise à la génératrice au moyen d'un arbre de transmission et un éventuel réducteur de vitesse.
- ✓ Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique.

2.3.2 Les constitutions d'une centrale éolienne

Une centrale éolienne classique est composée essentiellement des parties suivantes :

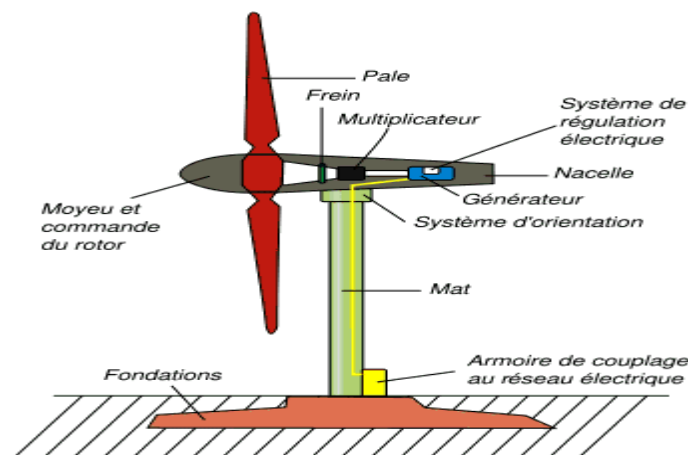


Figure 4: Constitution d'une centrale éolienne[1]

Le mat : qui supporte la nacelle et le rotor de la turbine, il est important que le mat soit haut du fait de l'augmentation de la vitesse du vent en hauteur.

Les pales : qui permettent de capter la puissance du vent et la transférer au rotor, le nombre de pales peut varier suivant les éoliennes, actuellement, le système tripale est la plus utilisé car il permet de limiter les vibrations, le bruit et la fatigue du rotor par rapport à un système bipale ou monopale.

La fondation : une fondation solide assurant la résistance de l'ensemble par grands vent et dans des conditions de givrage.

La nacelle : qui comporte tous les éléments mécaniques remettent de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres, multiplicateur, roulement, le frein à disque qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge.

2.3.3 Différents Types d'éolienne

Il existe deux grandes familles d'éoliennes :

- ✦ à axe vertical
- ✦ à axe horizontal.

Actuellement, les éoliennes à axe horizontal sont largement plus utilisées que les éoliennes à axe vertical pour des raisons économiques liées à leur fabrication et à leur installation. Parmi les éoliennes à axe horizontal, on distingue celles à vitesse fixe et celles à vitesse variable. Ces dernières sont les plus couramment utilisées pour la production d'énergie électrique sur le réseau électrique[2]. En effet, les éoliennes à vitesse variable, contrairement aux éoliennes à vitesse fixe, fonctionnent sur une large plage de vitesses permettant ainsi une maximisation des puissances extraites pour de faibles vitesses du vent et le maintien d'une puissance constante pour des vitesses de vent élevées.

Dans le cadre du parc de TAZA, les éolienne utilisées sont à vitesse variable avec des génératrices électriques de type machine asynchrone à rotor bobiné, plus Habituellement appelé Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA).

3. Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA)

La MADA est une machine triphasée à courant alternatif avec deux enroulements triphasés accessibles dans lesquels la puissance peut être fournie ou extraite de la machine à travers ces enroulements. Ce type de machine nécessite une seule source d'alimentation alternative qui peut alimenter les deux côtés de la machine et ceci constitue un avantage principal surtout dans les domaines d'entraînement et de génération à vitesse variable[3].

Nous présentons sur la figure 5 la caractéristique de la puissance mesurée en fonction de la vitesse du vent d'une éolienne réelle de 1.5 MW basée sur une machine asynchrone à double alimentation à rotor bobiné, on constate à partir de cette figure que la puissance est limitée à sa valeur nominale pour une vitesse du vent de 12.5 m/s l'orientation des pales et parfaitement réalisées dans ce cas.

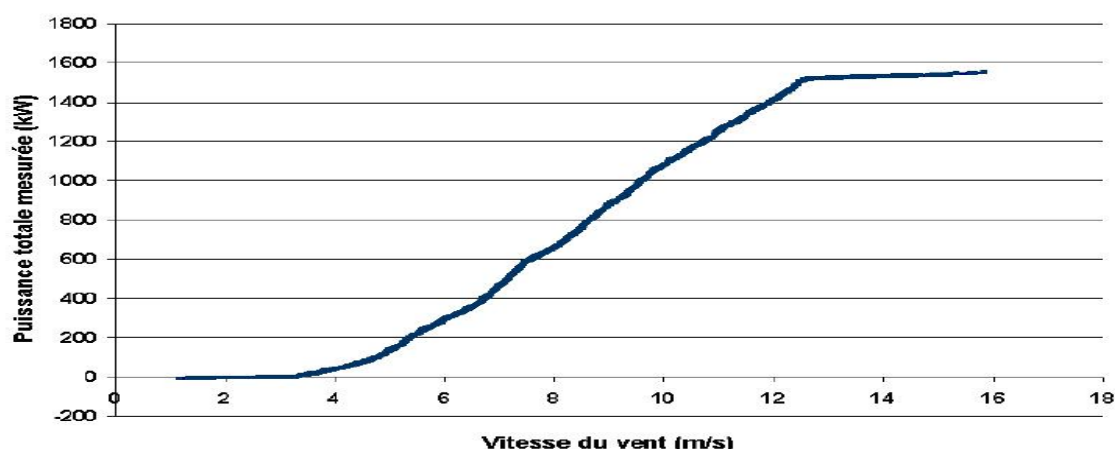


Figure 5: Puissance totale générée mesurée en fonction de la vitesse du vent[3]

3.1. Les constitutions du MADA

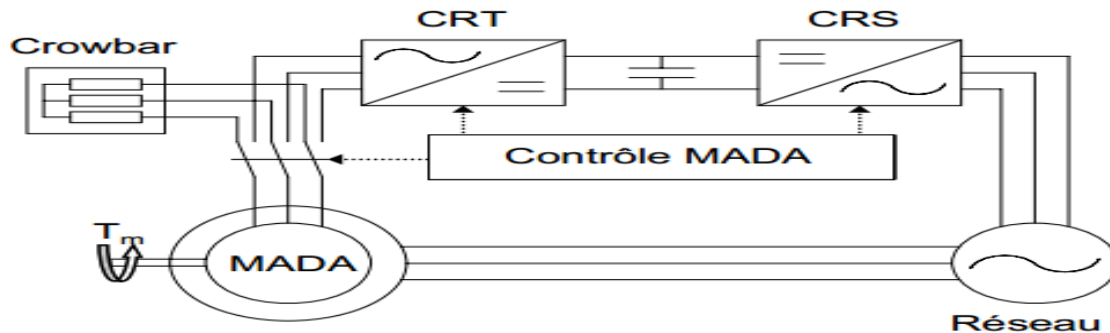


Figure 6 : Constitutions du MADA[4].

3.1.1. Les convertisseurs

Le convertisseur côté rotor (CRT) : est commandé de façon à faire varier l'angle du champ du rotor par rapport à celui du stator selon les besoins de réactif de la MADA [5].

Le convertisseur côté réseau (CRS) : est commandé de façon à fonctionner comme un STATCOM permettant d'injecter dans le réseau un courant AC contrôlé en phase et en amplitude, et ainsi régler la tension en régimes dynamique et permanent. En effet la puissance des convertisseurs est de seulement 30% de la puissance de la machine, les convertisseurs sont très sensibles au courant et peuvent être explosés pendant la durée du défaut à des courants élevés [5]. Aujourd'hui le problème est résolu grâce à l'incorporation d'éléments de protection, appelés Crowbars, limitant le courant au rotor de la MADA.

3.1.2. Les crowbars

Le circuit crowbar est contrôlé de façon à s'activer uniquement pendant la durée du défaut et ainsi à éviter la circulation de courants importants à travers les convertisseurs. Quand le crowbar est déclenché, le convertisseur côté rotor (CRT) est désactivé et les puissances active et réactive de la machine ne peuvent plus être contrôlées. La magnétisation du générateur dans ce cas est réalisée par le stator, au lieu de l'être par le rotor. Du fait que le convertisseur côté réseau (CRS) ne soit pas directement relié aux enroulements du générateur où des courants transitoires élevés se produisent, ce convertisseur n'est pas bloqué par la protection, permettant ainsi un fonctionnement comme compensateur statique synchrone (STATCOM), avec une production limitée de puissance réactive. Le crowbar peut être déconnecté après un temps prédéfini ou selon d'autres critères tels que le niveau de tension du réseau. Quand le crowbar est déconnecté, le CRT est reconnecté et la commande de la puissance active et réactive est à nouveau réalisable.

3.2. Principe de fonctionnement

La MADA est une machine asynchrone à rotor bobiné avec l'enroulement du stator connecté directement au réseau, le rotor occupé par des enroulements triphasés reliés à un convertisseur de puissance bidirectionnel par un système ballast-bague [6]. Dans le cas où les nombres de pôles du stator et du rotor sont identiques, la vitesse angulaire de rotation du rotor est définie par :

$$\omega_m = \omega_s \pm \omega_r$$

$$\omega_m = p \cdot \Omega_m$$

Avec :

Ω_m : est la vitesse mécanique du rotor ;

ω_m : La vitesse mécanique angulaire ;

ω_s et ω_r : La vitesse angulaire du stator et du rotor ;

p : Le nombre de paires de pôles.

D'autre part la relation qui relie la fréquence du stator et celle de rotor est donnée par [6]:

$$f_s = f_r + n_p f_m$$

Avec :

f_m : La fréquence de rotation du rotor

Dans ce cas le glissement g est défini par [6]:

$$g = \frac{f_r}{f_s} = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} = \begin{cases} > 0 \text{ régime hypo - synchrone} \\ < 0 \text{ régime hyper - synchrone} \end{cases}$$

Transfert de puissance :

En négligeant les pertes dans les circuits du stator et du rotor, les relations entre les puissances ci-dessus sont:

$$\begin{aligned} P_m &= P_{\text{réseau}} \\ P_{\text{réseau}} &= P_s - P_r \\ P_r &= g P_s \\ P_s &= P_{\text{réseau}} / (1 - g) \\ \omega_T &= |g| \cdot f \end{aligned}$$

Avec :

P_m : Puissance mécanique ($P_m < 0$ si la machine est entraînée)

P_s : Puissance active absorbée par le stator ($P_s < 0$ si la MADA est génératrice)

P_r : Puissance active débitée par le rotor (son sens dépend du signe du glissement)

$P_{\text{réseau}}$: Puissance active fournie par le réseau à la machine ($P_{\text{réseau}} < 0$ si la MADA est génératrice)

ω_T : pulsation de la tension rotorique

f : fréquence du réseau

g : Glissement

3.3. Régimes de fonctionnement

On peut distinguer quatre régimes de fonctionnement du MADA [6] :

- ✦ Stationnaire ($g=1$) ;
- ✦ Hypo-synchrone ($0 < g < 1$) ;
- ✦ Synchrone ($g=0$);
- ✦ Hyper Synchrone ($g < 0$).

3.3.1. Stationnaire ($g=1$)

Le stator est alimenté directement par le réseau avec une fréquence f_s par conséquent le rotor est le siège d'une F.é.m. induite avec une fréquence f_r identique à $f_s \Rightarrow$ le MADA se comporte comme un transformateur.

3.3.2. Hypo-synchrone $0 < g < 1$

la puissance est fournie par le réseau au stator en tournant le rotor dans la direction de flux du stator, la fréquence f_r du rotor commence à décroître, plus la vitesse du rotor s'approche de celle du synchronisme, de même la tension induite dans le rotor décroît linéairement et prend une valeur très faible pour une vitesse de synchronisme, Si la vitesse de rotation est inférieure au synchronisme $\omega_m < \omega_s$, la puissance P_r « Puissance de glissement » est renvoyée sur le réseau[6].

3.3.3. Synchrone ($g=0$)

Lorsque la vitesse mécanique du rotor atteint la vitesse de synchronisme la fréquence f_r du rotor s'annule, dans ce cas, le rotor tourne avec la même vitesse que celle du flux statorique, donc le rotor ne voit aucun mouvement relatif par rapport au stator.

3.3.4. Hyper -synchrone ($g < 0$)

La phase du rotor s'inverse, l'augmentation de la vitesse relative du rotor par rapport à celle du flux statorique mène à une augmentation de la tension induit du rotor[6].

3.4. Les avantages du MADA

- Les convertisseurs statiques utilisés nécessitent un système de refroidissement moins lourd. Ils génèrent moins de perturbations comparativement aux convertisseurs utilisés pour les éoliennes à base de machine asynchrone à cage ou à aimant permanent[8] ;
- Le convertisseur lié au rotor est dimensionné au tiers de la puissance nominale de la machine pour une vitesse de fonctionnement autour de celle de synchronisme, dans ce cas les pertes dans les interrupteurs à semi -conducteur sont faibles, et par conséquent un rendement élevé du système de conversion [8] ;
- Les pertes liées aux convertisseurs statiques sont diminuées et le rendement du système de génération est amélioré ;
- Le facteur de puissance peut être réglé car la génératrice peut être contrôlée pour fonctionner de façon similaire à un alternateur synchrone, En effet, les puissances active et réactive peuvent être contrôlées de façon indépendante grâce au convertisseur connecté au rotor de la MADA [8].

3.5. Les inconvénients du MADA

- Machine plus volumineuse ;
- La présence du système engendre des effets indésirables sur la machine comme les frottements ;
- Elle est moins fiable ;
- Nécessite une maintenance périodique, ce qui va augmenter le coût d'exploitation.

4. Conclusion

Les éoliennes à vitesse variable sont capables de participer au réglage de la tension et de la fréquence grâce à la présence des convertisseurs électroniques de puissance. Ceci offre ainsi à ce type d'éoliennes une plus grande souplesse d'adaptation aux conditions techniques de raccordement qui tendent actuellement à se rapprocher des conditions actuelles des groupes conventionnels. Dans le chapitre suivant nous allons expliquer ces techniques de raccordement puis les exigences nécessaires (code GRID).

Chapitre 3

CODE GRID

1. Introduction

L'intégration à grande échelle des parcs éoliens pose aux réseaux d'énergie électrique de nouvelles contraintes par rapport aux sources d'énergies conventionnelles dont le comportement est bien maîtrisé, afin de relever le défi de coordination d'une production d'électricité basée sur l'exploitation de l'énergie éolienne avec le reste du système électrique, de nombreux pays ont imposée dans leur code réseau des nouvelles exigences relatives au raccordement et au fonctionnement des aérogénérateurs et parcs éoliens.

Ces exigences visent essentiellement le fonctionnement efficient du système électrique national et reposent sur les cinq principes suivants :

- ⊙ *La fiabilité du réseau électrique national ;*
- ⊙ *La stabilité du réseau ;*
- ⊙ *Le maintien de la qualité du service pour les clients raccordés au réseau ;*
- ⊙ *La protection des équipements du réseau ;*
- ⊙ *La sécurité de l'équipement.*

2. Les exigences techniques du code GRID

2.1. La tension et la fréquence

2.1.1. La plage de fonctionnement en fréquence

Pour la fréquence d'exploitation normale et au même titre que les centrales conventionnelles, les installations de production (parc de TAZA) raccordées au réseau de haute tension doivent rester connectées au réseau sans interruption en tout point de fonctionnements. Cependant, des variations de fréquence plus importantes peuvent survenir à la suite des perturbations sur le réseau de transport.

Pour la plage de La fréquence en régime permanent du réseau de transport peut varier de $\pm 1\% f_n$ (fréquence nominale) [9], tel que pour $f_n = 50$ Hz, la plage de fréquence normale soit entre 49.5 Hz et 50.5 Hz.

2.1.2. La plage de fonctionnement en tension

La centrale électrique du parc éolien doit être capable de fonctionner dans la plage de fonctionnement normale, La tension en régime permanent du réseau de transport peut varier de $\pm 10\% U_n$ (tension nominale) tel que $U_n = 90$ kV et plus (150kV, 225 kV et 400 kV) [9].

2.1.3. La régulation de fréquence

Il est nécessaire de disposer d'un régulateur de fréquence pour :

- ☞ Éviter l'effondrement du réseau lors d'une forte variation de la charge;
- ☞ Gérer les échanges entre les réseaux voisins;
- ☞ Faire une répartition économique de la production.

a) Les niveaux de réglage de fréquence

Les niveaux de réglage découlent des besoins du réglage de la fréquence, c'est ainsi qu'on peut distinguer 3 niveaux de réglage :

- ①-Le réglage primaire (*inertial control ou droop control*) ;
- ②-Le réglage secondaire (*Load Frequency Control*) ;
- ③-Le réglage tertiaire (*Optimal Power Flow*).

①-Le réglage primaire

Il utilise la réserve d'énergie cinétique des machines pour régler la fréquence. Il est fait par une action proportionnelle et très rapide (en quelques secondes) et a pour rôle essentiel d'empêcher l'effondrement du réseau [10]. La régulation automatique ainsi réalisée est définie par son statisme qui exprime l'excursion totale de fréquence en fonction de la puissance. Si on désigne par ΔP la puissance injectée ou retirée du réseau par l'aérogénérateur, k est l'énergie réglant (en MW/Hz) et R est appelé statisme du groupe (droop), on a :

$$\Delta P = -K(f - f_{nominal}) \quad \text{avec} \quad k = \frac{1}{R}$$

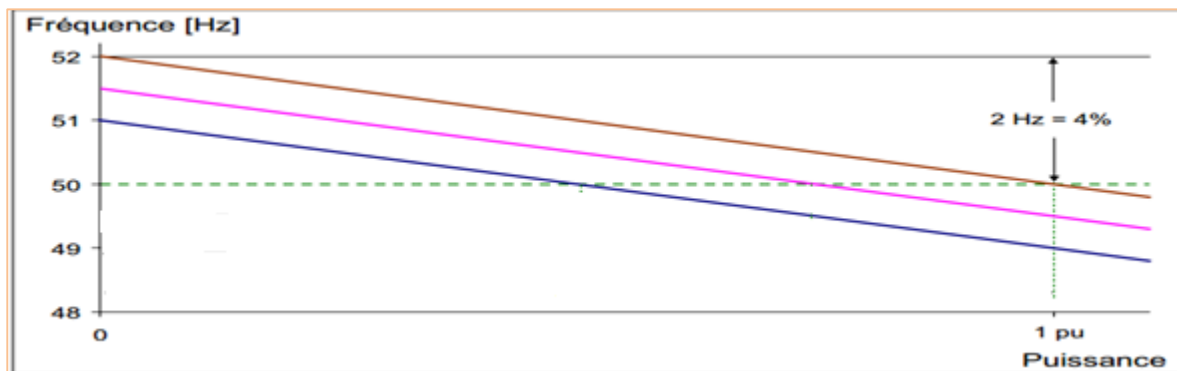


Figure 7 : Le statisme[4].

Lorsqu'on s'éloigne du point de fonctionnement (P_n, f_n) toute augmentation de la puissance active fournie provoque une baisse de fréquence et inversement, ainsi par exemple, un statisme de 4 % garantit une fréquence 49 à 51 Hz ($50 \text{ Hz} \times 4\% = 2 \text{ Hz}$)

Remarque :

Pour un meilleur réglage, R doit être compris entre 4 % et 5%.

Dans le cas où il ya plusieurs générateurs réglant connectés sur le réseau, la formule suivante permet de déterminer l'erreur de fréquence $\Delta f(n)$ générateur :

$$\Delta f = - \frac{\Delta P}{\sum_{i=1}^n K_i + D}$$

Le coefficient d'amortissement de la charge pour des oscillations faibles de la fréquence est D qui est généralement compris entre 0.01 pu à 0.02 pu. Ces grandeurs sont valables uniquement en pu, avec :

$$\Delta P = D \Delta f$$

②-Le réglage secondaire :

Si le réglage primaire sert à éviter l'écroulement du réseau, le secondaire, généralement du type proportionnel intégral (PI) sert plutôt à réduire l'erreur de fréquence à des valeurs faibles. C'est le réglage secondaire qui gère la puissance de transit entre les zones de charge. Cette opération est faite grâce à la modification de la puissance de référence des groupes connectés sur le réseau et peut aller sur plusieurs minutes (environ 50 à 200s pour les réseaux européens)[11].

③-Le réglage tertiaire :

Le réglage tertiaire est un réglage manuel avec lequel le dispatching peut mobiliser à la hausse ou à la baisse des volumes de puissance disponibles, son action s'étend sur plusieurs dizaines de minutes. L'injection dans le réseau de cette puissance permet de compenser les déséquilibres profonds et durables entre production et consommation et de ramener la fréquence à la valeur nominale, de reconstituer les réserves primaire et secondaire, de maintenir les marges d'exploitation à des niveaux suffisants et de reconnecter les charges délestées, permettant ainsi de se prémunir de tout nouvel aléa[10].

Régulation de primaire et secondaire

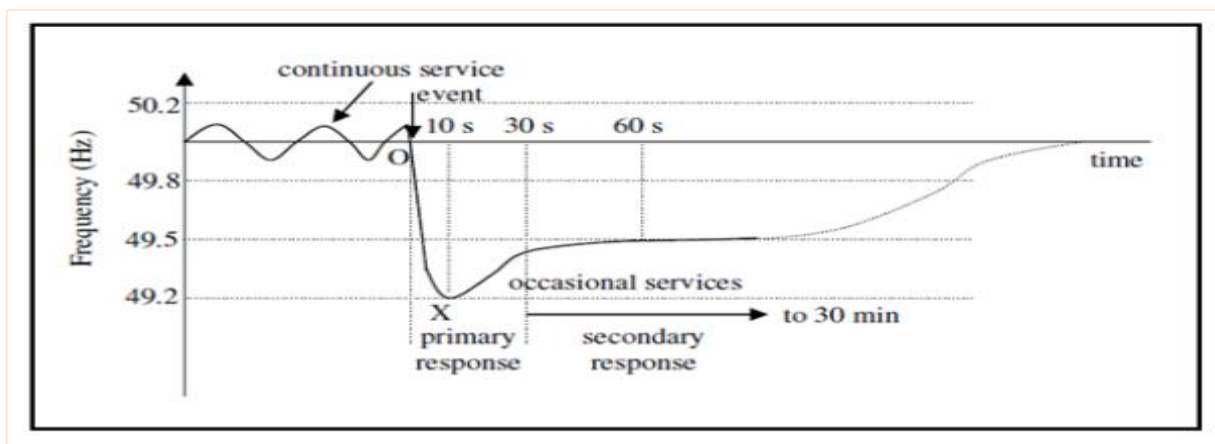


Figure 8: La régulation de fréquence[11].

2.1.4. La régulation de la tension

Les centrales éoliennes doivent participer au contrôle de la tension du réseau de transport, elles doivent être munies d'un système automatique de régulation de la tension et être en mesure de fournir ou d'absorber, en régime permanent, la puissance réactive nécessaire au maintien de la tension dans les limites admissibles de fonctionnement du réseau de transport[9]. La régulation de la tension dans un parc éolien peut être réalisée par l'éolienne elle-même (les aérogénérateurs ex : MADA...) ou au moyen d'autre équipements ajoutés à la centrale par le producteur (compensateur synchrone, STATCOM, etc....).

2.2. La puissance active

Les unités de production utilisant des sources d'énergie renouvelables doivent être contrôlables en termes de puissance active, afin de lutter contre un risque sur le réseau ou une perturbation de l'équilibre du système. La valeur de la vitesse de variation de la puissance doit pouvoir être réglée dans un intervalle compris entre 10% de la puissance installée par minute et la vitesse maximale admise indiquée par le fabricant[9]. Si une centrale éolienne déclenche en raison du dépassement de la vitesse limite du vent pour laquelle elle a été conçue, elle doit pouvoir se reconnecter automatiquement quand cette vitesse revient à des valeurs normales de fonctionnement.

2.3. La puissance réactive

Toute installation de production éolienne raccordée au réseau de transport doit être en mesure, dans toute la plage de tension admissible en régime permanent, de fournir et d'absorber la puissance réactive correspondant à un facteur de puissance surexcité et sous-excité égal ou inférieur à 0,95 au point de raccordement de parc éolien.

Les limites de la plage de puissance réactive pour le parc éolien sont illustrées par la figure suivante (figure 11).

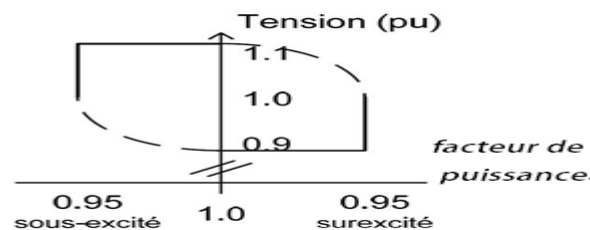


Figure 9: Les limites de la plage de puissance réactive[9].

2.4. Qualité de l'énergie électrique

La qualité de l'énergie électrique est un terme très répandu dans le domaine scientifique et industriel, ce concept détermine les paramètres qui définissent les propriétés du produit électricité en conditions normales. La qualité de l'énergie électrique (power quality) est considérée comme une combinaison de la qualité de la tension et du courant qui est fourni à l'utilisateur, si ce dernier n'utilise pas de charge perturbatrice, le courant sera peut-être déformé, mais uniquement d'une manière qui résulte des caractéristique de la tension fournie, c'est pourquoi on dit parfois que la qualité de l'énergie réduit à la qualité de la tension (power quality = voltage quality)[12].

Toutefois, les problèmes les plus souvent rencontrés sont :

- ✚ Creux de tension et coupures brèves ;
- ✚ Déséquilibre de tension ;
- ✚ Flicker (papillotement);
- ✚ Harmonique.

N'importe quelle perturbation affecte un ou plusieurs paramètres suivants du système:

- * Amplitude de tension ou de courant.
- * Fréquence.
- * Contenu spectral

Deux facteurs ont une influence directe sur l'effet de la perturbation:

- * Durée de la perturbation.
- * Impédance de la source.

3. Creux de Tension et coupures brèves

- ✓ un creux de tension est une brusque chute de tension en un point du réseau électrique, suivie de son rétablissement après une courte durée allant d'une demi-période à quelques secondes
- ✓ Une coupure brève peut être considérée comme un creux de tension d'amplitude 100%.

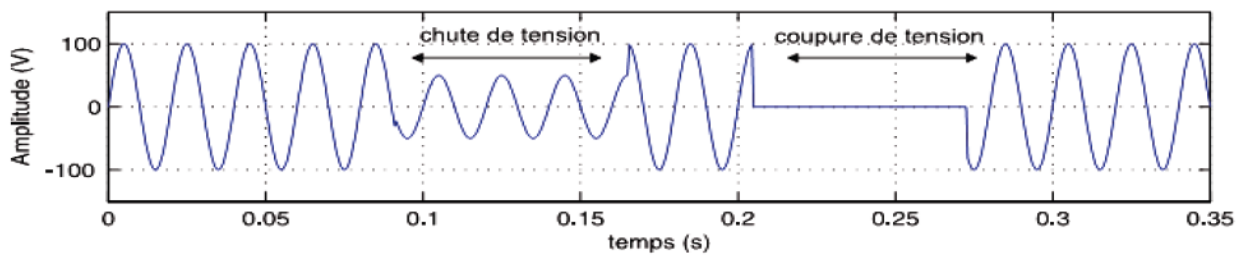


Figure 10 : Creux et coupure de tension[13].

3.1. Mesure du creux de tension

- ✎ On peut calculer la profondeur du creux de tension acceptable par la formule suivante[7]:

$$d = 100 k_u(\psi_k) * \frac{S_n}{S_k}$$

$k_u(\psi_k)$: Le facteur de changement de tension ;

ψ_k : L'angle d'impédance de réseau ψ_k au point commun de raccordement PCC ;

S_n : La puissance apparente de la turbine éolienne ;

S_k : La puissance apparente de court-circuit au point commun de raccordement PCC.

- ✎ Et Le facteur de changement de tension est calculé selon la formule suivante [12] :

$$k_u(\psi_k) = \sqrt{3} \frac{U_{max} - U_{min}}{U_n} \frac{S_{cc}}{S_n}$$

U_{max} et U_{min} : La tension minimal et maximal lors de la variation de tension ;

U_n : La tension nominale entre phase ;

S_{cc} : La puissance de court-circuit ;

S_n : La puissance nominale.

3.2. Les Causes

Les creux de tension et les coupures de tension ont pour principale origine :

- Le court-circuit affectant le réseau électrique ou les installations raccordées ;
- Le démarrage des moteurs de forte puissance.

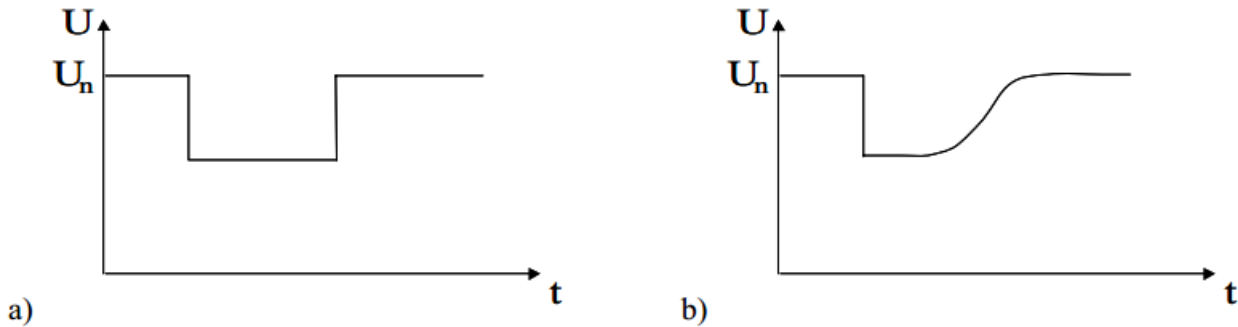


Figure 11 : Amplitude d'un creux de tension provoqué par a) un court-circuit b) le démarrage d'un moteur de forte puissance[16]

Toutefois, les courts-circuits restent la principale cause de creux de tension et de coupures brèves, ils engendrent des variations brusques de l'amplitude de la tension et pour cette raison, les creux de tension correspondants se caractérisent par une forme rectangulaire en fonction de temps (figure 16 a), les court-circuit peuvent affecter une, deux ou trois des phases et peuvent engendrer des déphasages supplémentaires entre elles [15].

En général, le courant des moteurs atteint au moment de leur démarrage 5 à 6 fois le courant nominal et diminue progressivement lorsque la machine se rapproche de sa vitesse nominale.

3.3. Les Conséquences :

Les creux de tension et les coupures brèves sont susceptibles de perturber le fonctionnement de l'installation éolienne Principalement au niveau des moteurs. En effet la remontée de tension, constituant l'ultime séquence de tout creux de tension, peut provoquer une surintensité dans les machines tournantes; ceci donne lieu à des sur-échauffements et des efforts aérodynamiques de brèves durées, susceptibles d'engendrer une fatigue du matériel préjudiciable à terme.

Les effets cités précédemment se manifestent de façon appréciable à partir d'un certain niveau de profondeur du creux de tension et dans les pires des cas on a déconnection de l'éolienne. Enfin, les conséquences des creux de tension et des coupures brèves sont parfois aussi économiques. Ces perturbations peuvent engendrer: une perte ou une altération de la production, une détérioration de l'outil de production, une perte de temps pour la remise en état et la remise en route de l'outil de production[15].

3.4. Les Solutions

Les chutes de tension provoquées par les équipements d'un client sont réduites en augmentant le niveau de puissance de court-circuit disponible à leur point de raccordement.

$$\frac{\Delta U}{U} \approx \frac{X Q}{U^2} = \frac{Q}{S_{cc}}$$

Il suffit alors de prévoir une alimentation des charges du client, qui sont à l'origine de la chute de tension, le plus en amont possible sur le réseau (parc éoliennes).

Quelques actions ponctuelles peuvent également être mises en œuvre, en particulier pour se prémunir contre des chutes de tension provoquées par des démarrages de moteurs:

- installer un système de démarrage afin de limiter l'appel de courant.
- installer un compensateur statique d'énergie réactive qui compense l'appel de puissance réactive au moment du démarrage. Cette solution est cependant à court terme coûteuse[15].

Améliorer l'immunité de l'installation par l'utilisation de :

- Moteur à vitesse variable (MADA...)
- dispositifs de compensation à réserve d'énergie les ASI (alimentation sans interruption), ces dispositifs sont intercalés en série entre le réseau polluant et l'installation à désensibiliser pour assurer une fourniture de l'énergie électrique même pendant les creux de tension ou les coupures brèves[16].

4. Déséquilibre de tension

Trois grandeurs de même nature et de même pulsation forment un système triphasé équilibré lorsqu'elles ont la même amplitude et lorsqu'elles sont déphasées de $\pm 120^\circ$. Lorsque les grandeurs ne vérifient pas ces conditions de phase et d'amplitude, on parle d'un système triphasé déséquilibré.

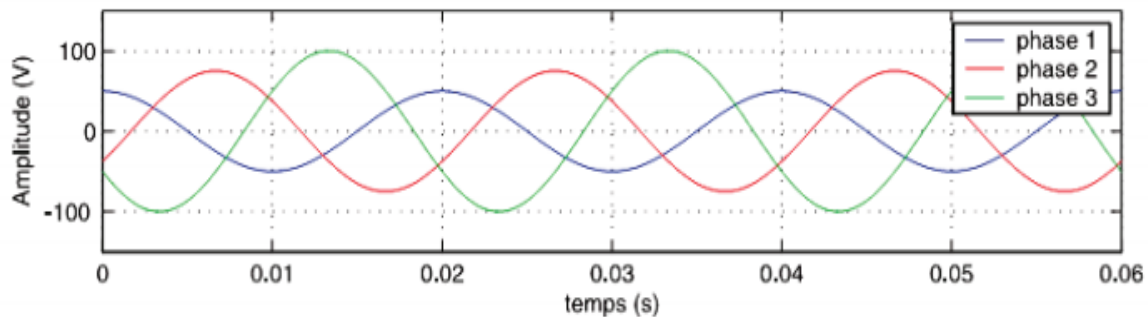


Figure 12: Déséquilibre du système triphasé de tension[13]

4.1. La mesure de déséquilibre

Le déséquilibre d'un système triphasé est quantifié par le facteur de déséquilibre, dont la définition dépend du type de mesures.

- ✎ Pour des mesures entre phase et neutre ou phase et terre, le facteur de déséquilibre est défini par [12]:

$$f_d = \left| \frac{V_a + a^2 V_b + a V_c}{V_a + a V_b + a^2 V_c} \right| * 100 \%$$

Avec :

V_a, V_b et V_c : les tensions fondamentale de chaque phase ;

$a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$: Le coefficient de normalisation est choisi de manière à conserver les amplitudes entre les systèmes triphasés.

- ✎ En cas de mesures entre phases, le facteur de déséquilibre prend alors la forme[12]:

$$f_d = \left| \frac{U_{ab} - a U_{bc}}{U_{ab} - a^2 U_{bc}} \right| * 100 \%$$

U_{ab} et U_{bc} : Sont les tensions fondamentales entre phase.

4.2. Les Causes

Les déséquilibres des tensions sont généralement dus à :

- *Des charges monophasées car dans les cas les courants absorbés sur les trois phases sont d'amplitude et / ou de phase différente.*
- *Des impédances des lignes du réseau et des charge triphasé, lorsque celle-ci ne sont pas symétriques*

⚡ **Le niveau de déséquilibre est lié à la fois à la puissance et la localisation des charges perturbatrices, et à la puissance de court-circuit du réseau amont.**

4.3. Les conséquences

Les déséquilibres de tension engendrent des composantes inverses de courant, qui provoquent des couples de freinage parasites et des échauffements dans les moteurs à courant alternatif. Ils peuvent également perturber le fonctionnement des dispositifs à thyristors à commande de phase[16].

4.4. Les solutions

- ✓ **L**e bouclage des réseaux, favorable à l'obtention d'une puissance de court-circuit élevée, permet de diminuer le degré de déséquilibre : $\frac{\Delta U}{U} \approx \frac{X Q}{U^2} = \frac{Q}{S_{cc}}$
- ✓ Régulateur électronique dynamique de tension ;
- ✓ Compensateur électronique shunt,
- ✓ Compensation de la puissance réactive : La compensation d'énergie réactive est assurée par un des éléments de FACT; il s'agit d' une structure d'électronique de puissance ou tout autre système statique qui fournit des degrés de contrôle sur un ou plusieurs paramètres du réseau alternatif pour augmenter la contrôlabilité et améliorer la capacité de transfert de puissance, parmi ces éléments on trouve STATCOM , SVC , FAP
- ✓ Diminuer l'impédance du réseau en amont des générateurs de déséquilibre en augmentant les puissances des transformateurs et la section des câbles,

5. **Flicker (papillotement)**

Le Flicker ou papillotement de lumière (de l'anglais : to Flicker = scintiller = papilloter) est définie comme impression subjective de fluctuation de la luminance, c'est un phénomène de gêne physiologique visuelle ressenti par les utilisateurs de lampes alimentées par une source commune à l'éclairage et à une charge perturbatrice.

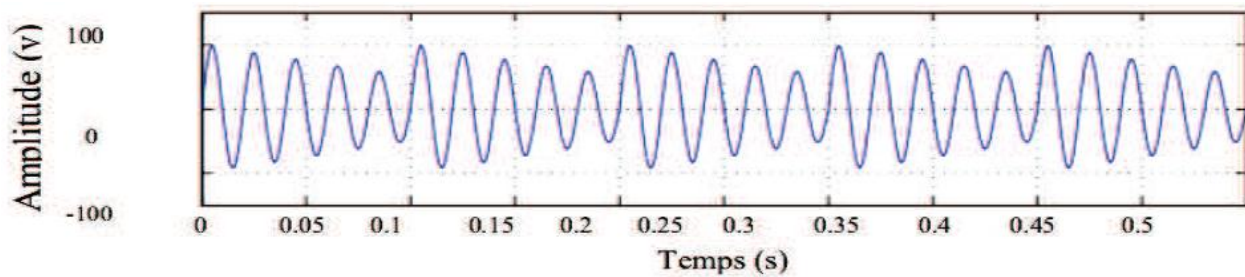


Figure 13 : Fluctuations de tension[13]

Selon la norme CEI 868, afin de définir si la tension est correcte ou non pour une sévérité de Flicker $P_{st} = 1$, les paramètres à vérifier sont: La variation de la tension et Le taux de répétition (figure 16).

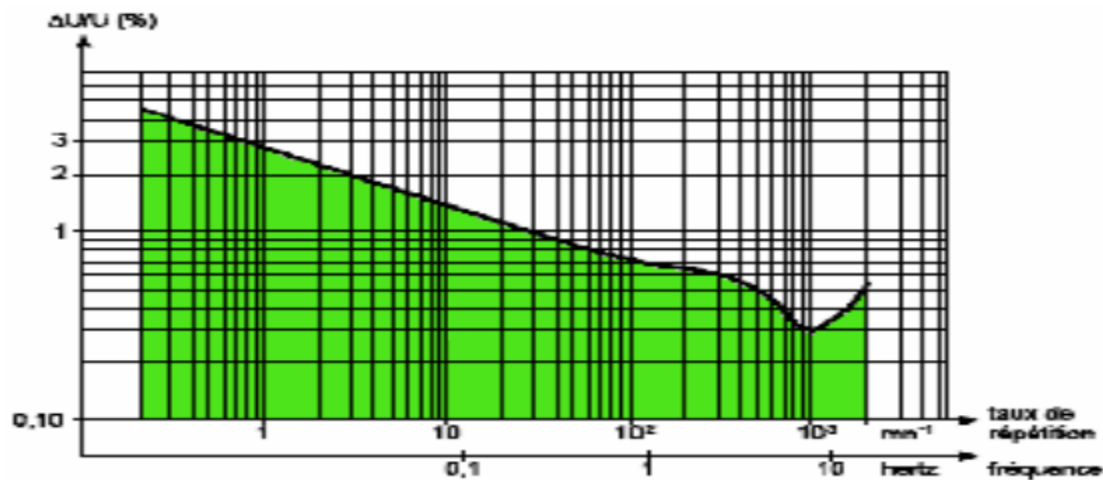


Figure 14 : Courbe limite de gêne du Flicker (selon la norme CEI 868)

✓ Pour que l'effet de Flicker soit acceptable le point de mesure doit se situer dans la zone colorée.

5.1. Classification de Flicker

Le Flicker engendrés par les fermes éoliennes ont des origines différentes et sont classées en deux catégories :

- ❖ Le papillotement en fonctionnement établi « continuous opération » : ce sont les variations rapides de tension engendrées en fonctionnement établi, elles sont dues aux variations de la puissance produite par les aérogénérateurs en raison des fluctuations du vent, du gradient de vent et de leur aérodynamisme ;
- ❖ Le papillotement lors des opérations de couplage « switching opérations » ce sont les variations de tension engendrée lors des opérations de couplage / découplage, elles sont consécutives aux variations de vent.

5.2. Mesure de Flicker

• L'évaluation de la sévérité du Flicker s'exprime par deux paramètres :

⌚ Le P_{st} 'short time' Flicker à court terme quantifié sur 10 min ;

⌚ Le Plt 'long time' Flicker à long terme quantifié sur 120 min.

⇒ P_{st} et Plt sont les unités de mesure du Flicker ; grandeur sans dimension physique.

✍ Flicker en fonctionnement établi :

Le Flicker en fonctionnement établi émis de l'ensemble des turbines éoliennes connectées au point commun de raccordement calculable par l'équation suivante selon la norme IEC 61400-21[17] :

$$P_{lt\Sigma} = P_{st\Sigma} = \frac{1}{S_k} * \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{wt}} (C(\psi_k, V_a) * S_n)^2}$$

$C(\psi_k, V_a)$: Le coefficient de Flicker dépend de l'angle d'impédance de réseau ψ_k au point commun de raccordement et la vitesse du vent V_a est donnée selon la norme IEC 61400-21 ;

S_k : La puissance de court-circuit au point de raccordement ;

S_n : La puissance apparente de turbine éolienne ;

N_{wt} : Le nombre des turbines éoliennes connectées au point de raccordement.

✍ Flicker lors des opérations de couplage :

Le Flicker lors des opérations de couplage émis de l'ensemble des turbines éoliennes connectées au point commun de raccordement peut le calculer d'après les formules suivantes selon la norme IEC 61400-21[17] :

$$P_{lt\Sigma} = \frac{8}{S_k} * \left(\sum_{i=1}^{N_{wt}} N_{10m,i} * (k_{f,i}(\psi_k) * S_{n,i})^{3.2} \right)^{0.31}$$

$$P_{st\Sigma} = \frac{18}{S_k} * \left(\sum_{i=1}^{N_{wt}} N_{120m,i} * (k_{f,i}(\psi_k) * S_{n,i})^{3.2} \right)^{0.31}$$

Avec :

$N_{10m,i}$ et $N_{120m,i}$: le nombre de fluctuation de chaque turbine éolienne dans une période de 10 min et 120 min ;

$k_{f,i}(\psi_k)$: Flicker step factor pour chaque turbine éolienne proposée par le fabricant de turbine ;

$S_{n,i}$: La puissance nominale pour chaque éolienne.

5.3. Les Causes

Variations répétitives de tension causées par certaines charges industrielles : les machines à souder, les laminoirs, les gros moteurs à charge variable, les fours à arc, les éoliennes

5.4. Conséquences

Comme les fluctuations ont une amplitude qui n'excède pas $\pm 10\%$, la plupart des appareils ne sont pas perturbés, le principal effet des fluctuations de tension est la fluctuation de la luminosité des lampes, la gêne physiologique (fatigue visuelle et nerveuse) dépend de l'amplitude des fluctuations, de la cadence de répétition des variations, de la durée de la perturbation[16].

5.5. Les solutions

✓ Augmenter la puissance de court-circuit (S_{cc}) :

$$\frac{\Delta U}{U} \approx \frac{X Q}{U^2} = \frac{Q}{S_{cc}}$$

- ✓ Compensateur automatique en temps réel,
- ✓ Compensateur électronique série,
- ✓ Utiliser un compensateur automatique: Cet équipement réalise une compensation en temps réel phase par phase de la puissance réactive. Le Flicker peut être réduit de 25 % à 50 %;
- ✓ Placer une réactance série : En réduisant le courant appelé, une réactance en aval du point de raccordement du parc éolien peut réduire de 30 % le taux de Flicker.

6. Les harmoniques

Les signaux (tension et courant) relevés sur le réseau sont des signaux déformés et loin d'être des sinusoïdes parfaites. Un signal déformé est la superposition d'un signal fondamental (50 Hz) est des signaux harmoniques de fréquences qui sont des multiples entiers de la fréquence du fondamental (100, 150, 200, 250 ... etc.).

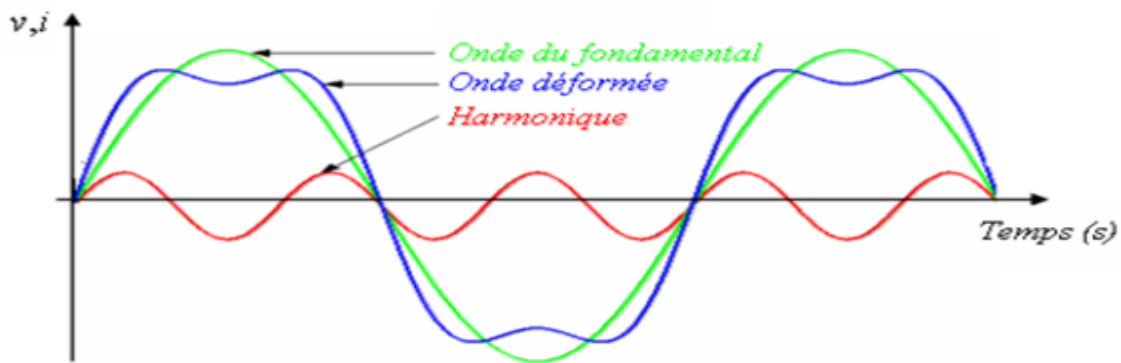


Figure 15 : Représentation de l'effet d'harmonique [13].

6.1. Les caractéristiques d'un signal déformé

✎ Rang d'harmonique :

Le rang harmonique est le rapport de la fréquence d'harmonique f_h à celle fondamentale, par principe le fondamental f_1 a le rang 1.

$$h = \frac{f_h}{f_1}$$

✎ Représentation spectrale :

C'est un histogramme donnant l'amplitude de chaque harmonique en fonction du rang. L'amplitude est donnée en valeur relative par rapport au fondamentale en un point spécifié, la figure ci-dessous montre un exemple de spectre[18].

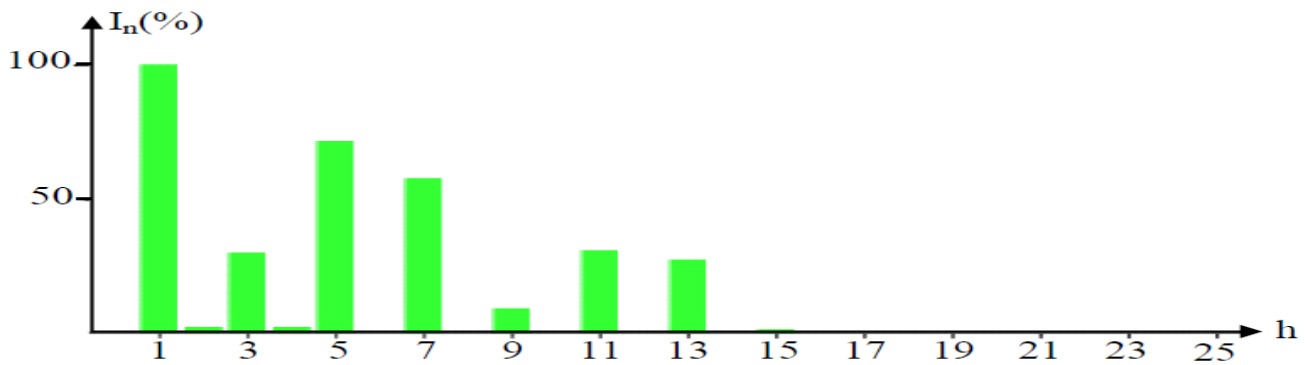


Figure 16 : Spectre harmonique d'un signal[18].

✎ Analyse de Fourier :

Sur le plan mathématique on peut décomposer tout signal périodique en une série de sinusoïde dont la fréquence est un multiple de la fréquence fondamentale du signal, cette série nommée série de Fourier.

Le courant absorbé par la charge non linéaire a pour expression :

$$i(t) = \sum_{h=1}^N I_h \sin(\omega_h t + \varphi_h) \quad (a)$$

L'équation (a) peut être sous la forme suivante :

$$i(t) = \sqrt{2}I_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + \sum_{h=2}^N \sqrt{2}I_h \sin(\omega_h t + \varphi_h)$$

Avec :

I_1 : Valeur efficace du courant du courant fondamental ;

I_h : Valeur efficace du courant du courant harmonique de rang h ;

φ_1 : Déphasage du courant fondamental ;

φ_h : Déphasage de l'harmonique de rang h .

✎ L'amplitude des harmoniques des tensions décroît avec la fréquence, selon les normes on prend en considération les harmoniques jusqu'au rang $N=40$ [18].

✎ valeur caractérisant un signal déformé :

⚡ Valeur efficace d'une grandeur déformée :

Lorsque le développement en série de Fourier d'une fonction périodique est continu, on peut déterminer sa valeur efficace comme suit [18]:

$$G_{eff} = \sqrt{\sum_{h=1}^N (G_h)^2}$$

Avec :

h : Rang harmonique de rang h ;

Remarque : Lorsqu'un signal comporte des composantes harmoniques, sa valeur est différente de la valeur efficace du signal fondamental, il est donc possible d'évaluer grossièrement la déformation du signal en comparant la valeur efficace de la composante fondamentale et la valeur efficace.

⚡ **Taux individuel :**

Il donne une mesure de l'importance de chaque harmonique par rapport au fondamentale ou c'est le rapport de la valeur efficace de l'amplitude de l'harmonique du rang h à celle du fondamental

$$T(\%) = 100 * \left(\frac{G_h}{G_1} \right)$$

⚡ **Taux de Distorsion Harmonique global (THD) :**

Il donne une mesure de l'influence thermique de l'ensemble des harmoniques ; c'est le rapport de la valeur efficace des harmoniques à celle du fondamental et qui est le plus couramment utilisé[11].

$$THD = \frac{I_h}{I_1}$$

✎ Taux de distorsion harmonique en courant THD_i :

$$THD_i(\%) = 100 * \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N (I_h)^2}}{I_1}$$

I_h : Courant harmonique de rang h ;

I_1 : Fondamental de courant.

✎ Taux de distorsion harmonique en tension THD_v :

$$THD_v(\%) = 100 * \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N (V_h)^2}}{V_1}$$

V_h : Tension harmonique de rang h ;

V_1 : Fondamental de tension.

Remarque :

Le THD_i ne dépend que des valeurs efficaces du courant de charge, en revanche, le THD_v est fonction des courants harmoniques, caractérisant la charge, et de l'impédance de court-circuit imposé par le réseau Z_{cc} [18].

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N (V_h)^2}}{V_1} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N (Z_{cc} \cdot I_h)^2}}{V_1}$$

⚡ **Le facteur de puissance :**

Le facteur de puissance est défini, dans le cas général, comme étant le rapport de la puissance active sur la puissance apparente

$$F_p = \frac{P}{S} \quad (b)$$

En présence d'harmonique, $S^2 \neq P^2 + Q^2$ on introduit la notion de puissance déformante D telle que

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2$$

Les expressions des puissances :

- Puissance active : $P = V I_1 \cos \varphi_1$
- Puissance réactive : $Q = V I_1 \sin \varphi_1$

- Puissance déformante : $D = V I_h = V I_1 * THD_i$
- Puissance apparente : $S = V I = V I_1 \sqrt{1 + THD_i^2}$

On remplace ces expressions des puissances dans la relation (b) nous donne la relation entre le facteur de puissance et le taux de distorsion harmonique :

$$F_p = \frac{\cos \varphi_1}{\sqrt{1 + THD_i^2}}$$

Le figure suivante montre la variation de F_p en fonction de THD_i pour deux valeurs de THD_v

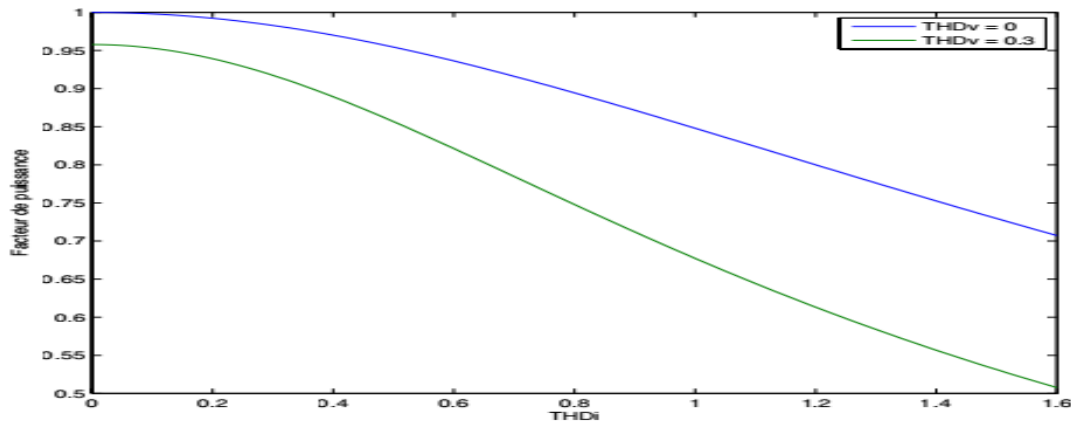


Figure 17 : La variation de F_p en fonction de THD_i pour deux valeurs de THD_v [18].

- ❖ Quand le taux de distorsion harmonique du courant (THD_i) augmente, le facteur de puissance diminue.

6.2. Les causes des harmoniques

La principale gêne d'harmonique ce sont Les appareils dont la caractéristique tension/courant n'est pas linéaire, ex: les convertisseurs électroniques de puissance des entraînements de moteurs, les redresseurs utilisés pour l'électrolyse, les fours à arc, etc.[16]

Ils émettent des courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers ou non entiers de la fréquence fondamentale.

6.3. Conséquences

- Surcharges (du conducteur de neutre, des sources...);
- Déclenchements intempestifs ;
- Vieillessement accéléré ;
- Dégradation du rendement énergétique ;
- Perte de productivité.

6.4. Les solutions

Trois orientations sont possibles pour les supprimer, ou au moins réduire leur influence[18]:

✂ Réduction des courants harmoniques générés:

- Inductance de ligne;
- Utilisation de redresseurs dodécaphasés;
- Appareils à prélèvement sinusoïdal.

Cette méthode consiste à utiliser des convertisseurs statiques dont l'étage redresseur exploite la technique de commutation MLI qui permet d'absorber un courant sinusoïdal.

✎ Modification de l'installation:

- Immuniser les charges sensibles à l'aide de filtres;
- Augmenter la puissance de court-circuit de l'installation;
- Déclasser des équipements;
- Confiner les charges polluantes.

En premier, il faut raccorder les équipements sensibles aussi près que possible de leur source d'alimentation. Ensuite, il faut identifier puis séparer les charges polluantes des charges sensibles, par exemple en les alimentant par des sources séparées ou par des transformateurs dédiés. Tout cela en sachant que les solutions qui consistent à agir sur la structure de l'installation sont, en général, lourdes et coûteuses.

- Protections et surdimensionnement des condensateurs.

✎ Filtrage:

- Le filtrage passif;
- Le filtrage actif;
- Le filtrage hybride.

7. Comparaison entre différents Code GRID

Cinq codes de réseaux sont sélectionnés pour la comparaison :

- 🌐 Le code de réseau d'E.ON Netz (German transmission system Operator), un des deux opérateurs d'électricité Allemand ;
- 🌐 Le code de réseau Danois, caractérisé par une forte pénétration de l'énergie éolienne ;
- 🌐 Le code de réseau Irlandais, un réseau isolé ;
- 🌐 Le code de réseau Tunisie similaire au cas marocain ;
- 🌐 Le code de réseau marocain.

Les principales exigences dans un code de réseau sont liées aux contrôles :

- ✓ La fréquence ;
- ✓ La tension ;
- ✓ La baisse de la tension en cas de défaut.

7.1. Contrôle de la fréquence :

Dans un système électrique, il est important de maintenir la fréquence autour de sa valeur nominale (50 Hz). Le respect strict de cette valeur est non seulement nécessaire au bon fonctionnement des charges, mais également reste un indicateur d'équilibre entre les puissances actives produites et celles consommées. En effet, la fréquence diminue si la consommation est supérieure à la production. Inversement, la fréquence augmente lorsque la consommation est inférieure à la production.

Dans les premières installations des parcs éoliens, lors de la baisse de fréquence, les éoliennes étaient déconnectées du réseau, ce qui rendait difficile le rétablissement du système. Dans les récents codes de réseaux, les éoliennes restent connectées au système et peuvent fonctionner dans une gamme de fréquence proche de la valeur nominale pendant une certaine période qui varie avec la déviation [19]. Les exigences pour la fréquence changent selon le pays, Le tableau 1 montre que les limites les plus extrêmes sont fixées par le code de réseau allemand [20].

Pays	Limite de fréquence	Durée maximale
Danemark	$48.5 < f < 51$ $f < 48$ ou $f > 51$ $f < 47.5$ ou $f > 52$ $f < 47$ ou $f > 53$	Continu 25 min 5 min 10 secondes
Allemagne	$49 < f < 50.5$ $f < 48.5$ ou $f > 51.5$ $f < 47.5$ ou $f > 51.5$ $f < 46.5$ ou $f > 53.5$	Continu 30 min 10 min 10 secondes
Ireland	$49.5 < f < 50.5$ $f < 47.5$ ou $f > 52$ $f < 47$ ou $f > 53$	Continu 60 min 10 secondes
Tunisie	$47.5 < f < 48.5$ $48.5 < f < 49.5$ $49.5 < f < 50.5$ $50.5 < f < 51$ $51 < f < 52$	5 min 5 heures Continu 1 heures 15 min
Maroc	$49.9 < f < 50.1$ $47.5 < f < 52$	

Tableau 1: Les exigences sur les limites de la fréquence [20][9]

La Figure20 illustre les limites de contrôle de la puissance active en fonction de la fréquence, données dans le code de réseau Irlandais.

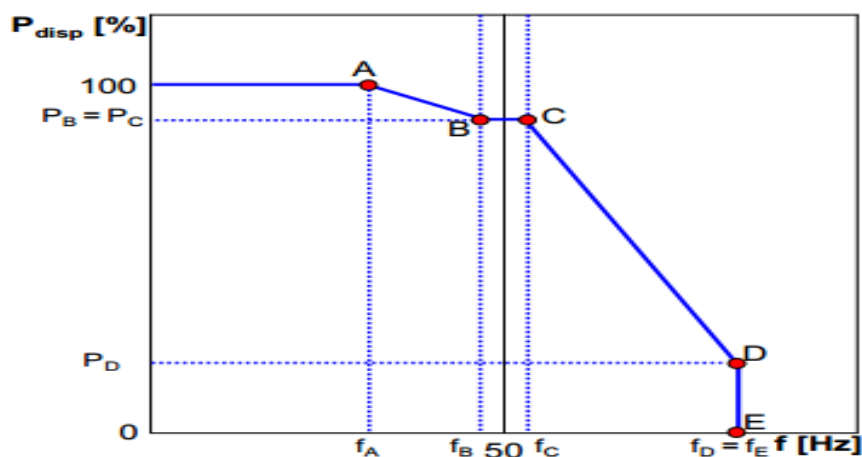


Figure 18: Contrôle de la puissance active/fréquence [4]

- ⚡ **P**roduire un pourcentage de la puissance disponible lorsque la fréquence du réseau est dans un domaine normal autour de la fréquence nominale, délimité par les points B et C ;
- ⚡ **R**éduire la production en fonction de la variation de fréquence lorsque la fréquence augmente et dépasse la limite normale de fréquence C ;
- ⚡ **A**ugmenter la production en fonction de la variation de fréquence lorsque la fréquence diminue et dépasse la limite normale de fréquence B.

7.2. Contrôle de la tension :

Afin d'assurer un comportement correct des équipements électriques et respecter les engagements contractuels vis-à-vis des clients, la tension en tout point du réseau doit être maintenue dans une plage autorisée. Les codes de réseaux exigent que la tension à la sortie des éoliennes soit maintenue à une valeur constante au moyen d'un régulateur de tension. Ce régulateur protège l'éolienne contre toute absorption ou production excessive de l'énergie réactive. Les exigences sur les limites de la tension varient selon le code réseau de chaque pays (tableau 2).

	Danemark		Allemagne		Ireland		Tunisie		Maroc	
							Un	kV		
Fonctionnement en continue	-10% 5 %	400 kV	-13% 5 %	400 kV	-13% 5 %	400 kV	0.80- 0.85	400 kV	±10%	60kV
							0.85-0.95	225 kV		
	-3% 13%	150kV	-13% 12%	220kV	-9% 12 %	220 kV	0.95-1.05	150kV	+8.7% -10%	225kV
							1.05-1.1	100kV		
	-5% 10%	132kV	-13% 12 %	110 kV	-10% 12 %	110 kV	1.1-1.2	60 kV	±5 %	400kV
Temps limité	-20% 10%	400 kV					0.80-0.85	30 min		
							0.85-0.95	3 heures		
	-10% 20%	150kV					0.95-1.05	Continu		
							1.05-1.1	1 heure		
	-10% 18%	132kV					1.1-1.2	15 min		

Tableau 2: Les exigences sur les limites de la tension [20][9].

7.3. Baisse de tension en cas de défaut :

Afin de garder les éoliennes connectées au réseau pendant et après l'élimination d'un défaut, de nouvelles exigences de fonctionnement ont été élaborées. Ces dernières permettent aux éoliennes de continuer à produire de la puissance malgré un défaut et permettent aussi la restauration rapide de puissance active et réactive aux valeurs pré-défaut. Dans le tableau 3 sont données les baisses de tension admises en cas de défaut (low voltage ride-through LVRT).

Le parc éolien est déconnecté temporairement du système si la tension au point de connexion, pendant ou après une perturbation, est en dessous des niveaux fixés.

Pays	Pendant le défaut		Après l'élimination de défaut	
	Vmin (%)	Tmax(pu)	Vmin (%)	Tmax(pu)
Danemark	20 %	0.500	90 %	1.500
Allemagne	0 %	0.150	90 %	1.500
Ireland	15 %	0.625	90 %	3.000
Tunisie	10 %	0.600		
Maroc				

Tableau 3: Les baisses de la tension admissibles en cas de défaut [20].

Sur la Figure 21, sont représentés les durées et les niveaux de tension associés aux aérogénérateurs tels qu'ils sont imposés par le code de réseau irlandais

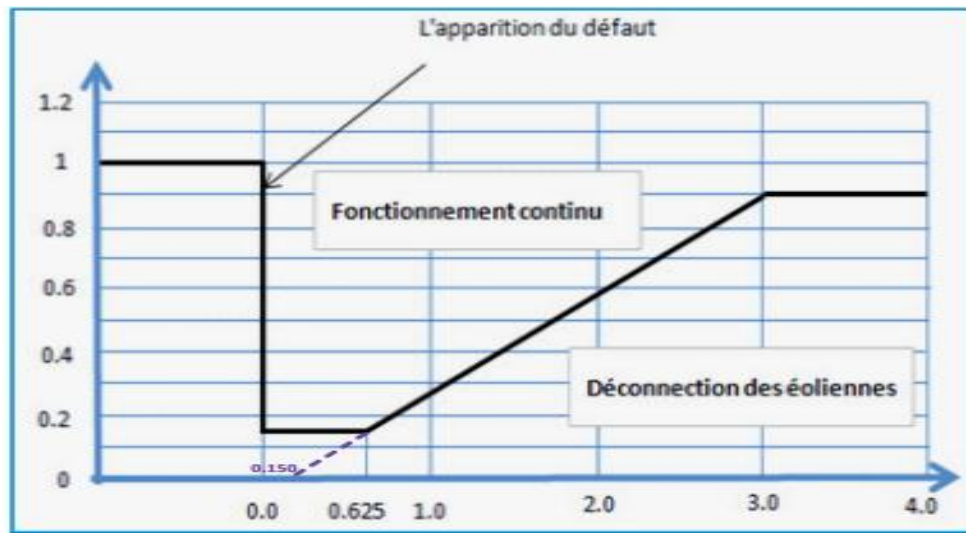


Figure 19: Les durées et les niveaux de tension associés aux aérogénérateurs suite aux défauts[19].

Selon le code de réseau d'Irlande, le système de contrôle de la ferme éolienne doit être en mesure d'assurer le contrôle du fonctionnement du système dans les situations suivantes [19] :

- ✓ Pendant la chute de tension, le système de contrôle doit fournir une puissance active proportionnelle à la tension de référence et maximiser le courant réactif transmis au réseau de transport sans dépasser les limites techniques caractérisant l'aérogénérateur.
- ✓ La maximisation du courant réactif doit se poursuivre pendant au moins 0.6 sec ou dès que la tension du réseau de transport reprend rapidement sa plage de fonctionnement normal.
- ✓ Le système de contrôle des fermes éoliennes contrôlables doit fournir au moins 90% de leurs puissance active maximale disponible aussi rapidement que la technologie le permet.

8. Conclusion

Les principales contraintes liées au raccordement des éoliennes au réseau de transport et leurs caractéristiques ont été présentées dans ce chapitre, dans le suivant nous allons analyser les résultats de simulation en illustrant l'impact des éoliennes sur le réseau électrique et certaines possibilités de réglage qui permettraient d'améliorer leur intégration dans le réseau.

Chapitre 4

ANALYSE DE LA QUALITÉ D'ÉNERGIE

1. Introduction

Dans ce chapitre nous analysons les perturbations de tension sous l'environnement Matlab/Simulink du modèle du parc éolien de TAZA en présentant ce dernier et ses paramètres, puis nous présentons et interprétons les résultats que nous avons obtenus.

2. Description du modèle du parc éolien

Cette partie décrit le modèle des principaux éléments qui interviennent dans le comportement dynamique du parc de TAZA

2.1. Modélisation du parc éolien de TAZA

2.1.1. Raccordement électrique

Le schéma de raccordement est le suivant :

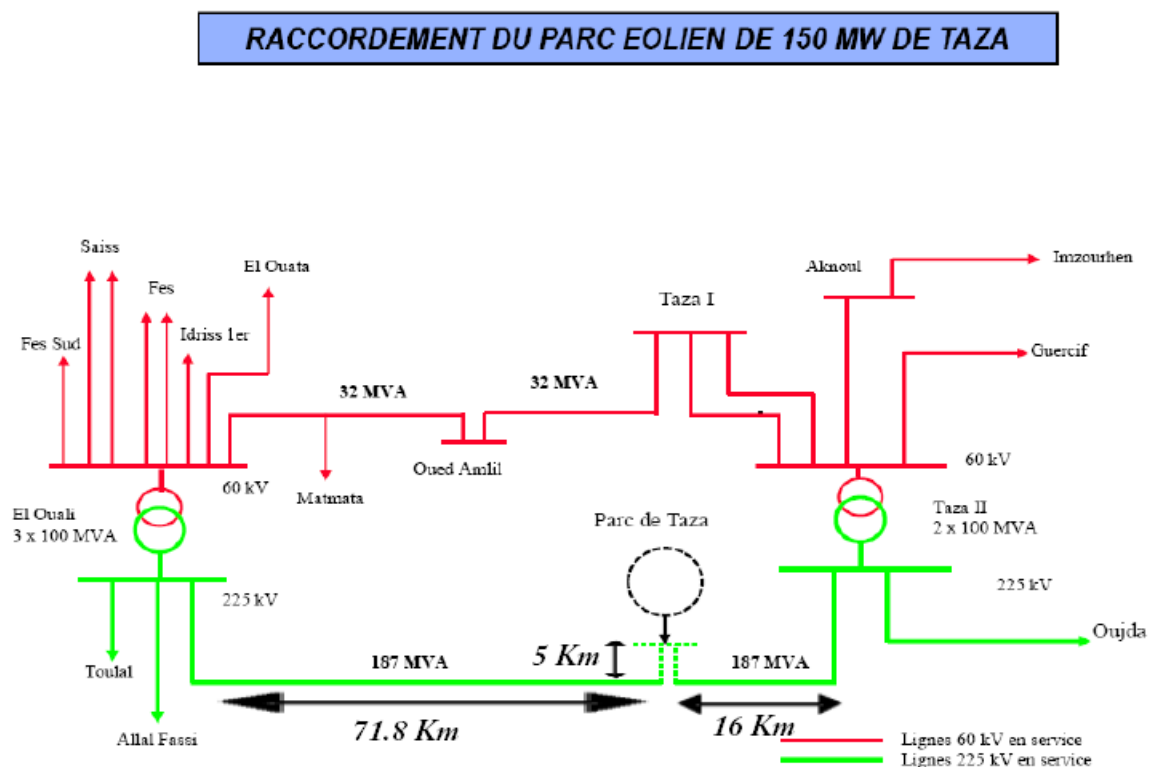


Figure 20 : Schéma de raccordement du parc éolien de Taza.

Les puissances de court-circuit :

Les valeurs des puissances de court-circuit triphasées en MVA déterminées pour le stade 2014 :

- ✎ El Ouali : 3000 MVA au niveau de jeu de barres 225 KV du poste 225 / 69 kV ;
- ✎ parc : 1800 MVA au niveau de jeu de barre 225 kV ;
- ✎ TAZA : 1000 MVA. au niveau du jeu de barre 225KV.

3. Mesure de qualité d'énergie

3.1. Creux de tension

$$d = 100 k_u(\psi_k) * \frac{S_n}{S_k}$$

$$S_k = 1800 \text{ MVA}$$

$$S_n = 150 \text{ MVA}$$

$$\text{On } Z_{\text{source}} = 0.00779 + j 0.19199$$

$$\text{donc } \psi_k = \tan^{-1}\left(\frac{X}{R}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{0.19199}{0.00779}\right) = 87.67^\circ$$

$$\text{Et d'après l'Annexe B on trouve que } k_u(\psi_k) = 0.19$$

$$d = 1.58 \%$$

Le creux de tension dans ce cas ne dépasse la limite acceptable < 3%.

3.2. Flicker

✎ Flicker en fonctionnement établi :

$$P_{lt} = P_{st} = C(\psi_k, V_a) * \frac{S_n}{S_k}$$

$$\text{D'après l'Annexe B on trouve que : } C(\psi_k, V_a) = 1.4$$

$$S_n = 187 \text{ MVA}$$

$$S_k = 3000 \text{ MVA}$$

⇒

$$P_{lt} = P_{st} = 0.116$$

La limite acceptable de Flicker est 0.25 (Annexe C)

✎ Flicker lors des opérations de couplage :

Pour chaque éolienne on a :

$$P_{lt} = \frac{8}{S_k} * N_{10m}^{0.31} k_f(\psi_k) * S_n$$

$$P_{st} = \frac{18}{S_k} * N_{120m}^{0.31} * k_f(\psi_k) * S_n$$

$$k_f(\psi_k) = 0.03$$

$$N_{10m} = 10$$

$$N_{120m} = 120$$



$$P_{Jt} = 0.024 < 0.25$$

$$P_{st} = 0.11 < 0.35$$

4. Simulation du système éolien sous Matlab/Simulink

Matlab/Simulink offre trois méthodes de simulation (continue, discrète, phasor). Dans notre étude nous avons utilisé une simulation discrète.

4.1. Simulation de la variation de la vitesse du vent

Pour le modèle étudié nous avons appliqué un vent variable aléatoirement à l'entrée du parc éolien de la forme suivante:

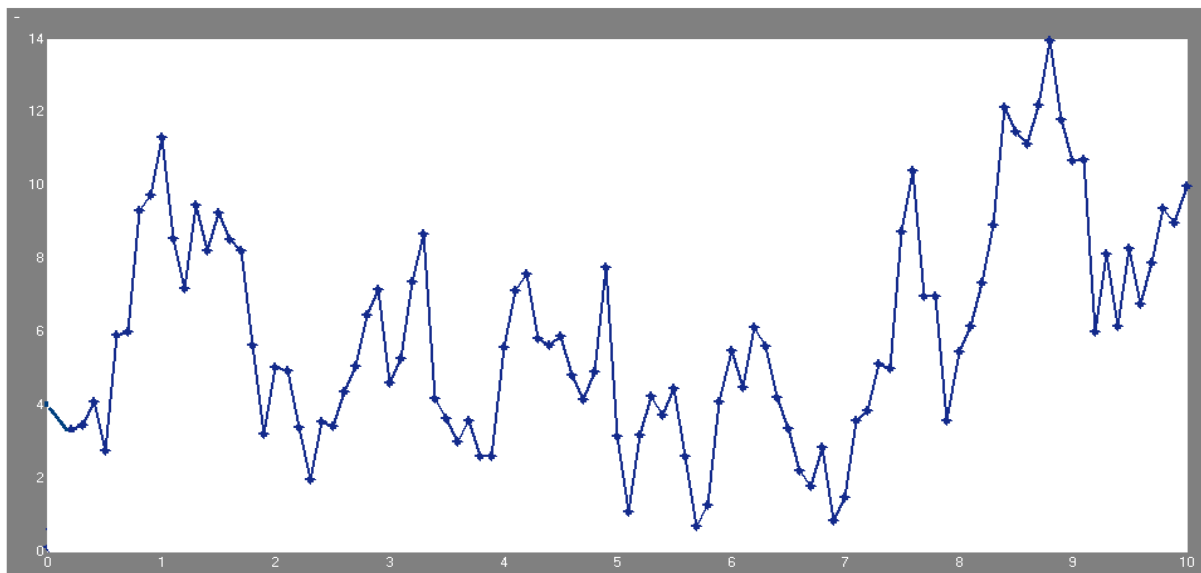


Figure 21: La vitesse du vent aléatoire

Nous voyons sur la courbe que la vitesse varie entre 0.75 et 14 m/s, cette variation de la vitesse permet de changer la puissance convertie par la turbine.

4.2. Le modèle du système simulé

Le modèle de simulation est représenté par le schéma suivant :

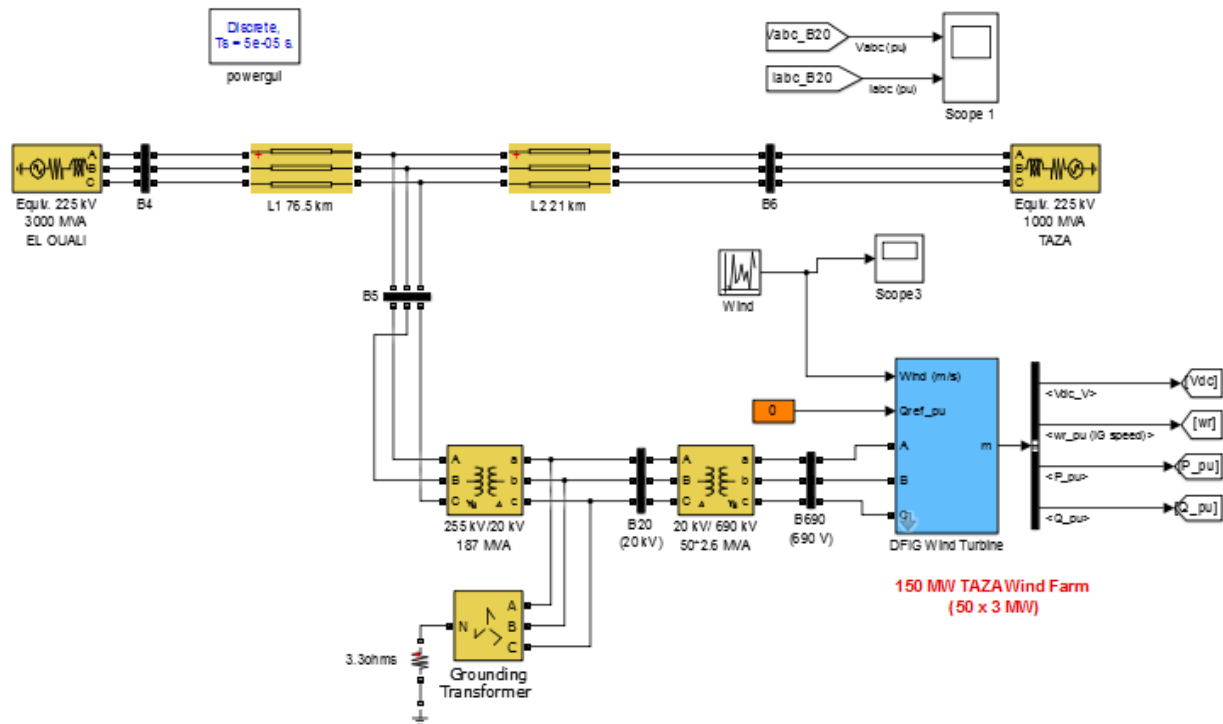


Figure 22: Le modèle du système simulé

Comme il est déjà indiqué le modèle de l'aérogénérateur utilisé pour le parc éolien de TAZA est de type MADA dans le sous bloc de la firme éolienne est représenté comme suit :

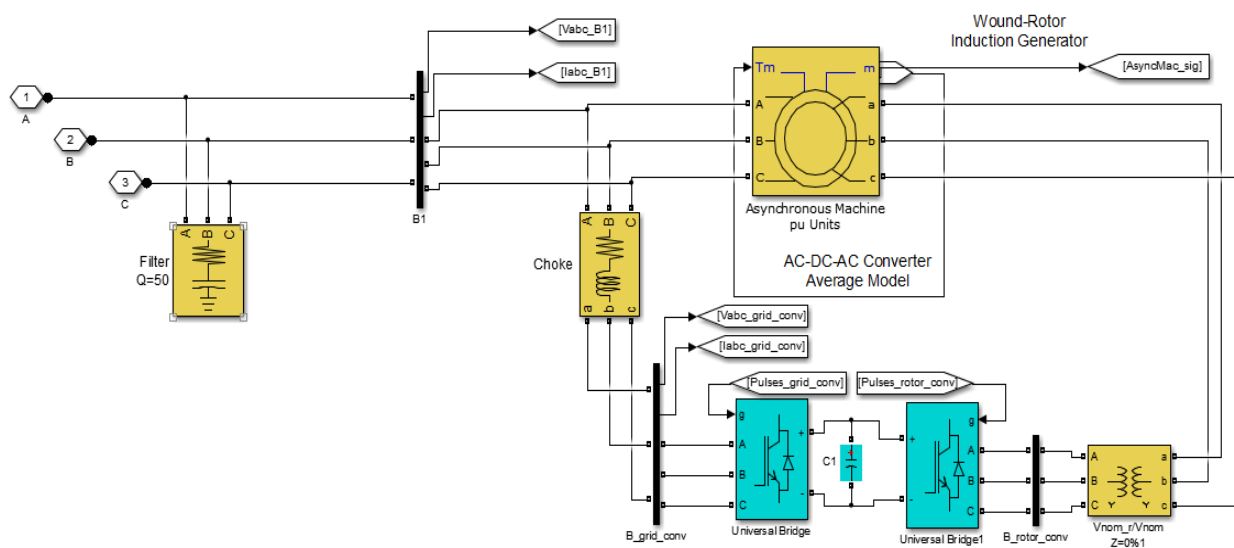


Figure 23: L'aérogénérateur de type MADA

Tous les paramètres de ce modèle est représenté également en pu (per unit : est une unité sans dimension c'est la grandeur physique divisé par sa valeur nominale)

La simulation du la tension à TAZA et El Ouali : Nous visualisons les tensions aux jeux de barre B6 (TAZA) et B4 (El Ouali) comme suit :

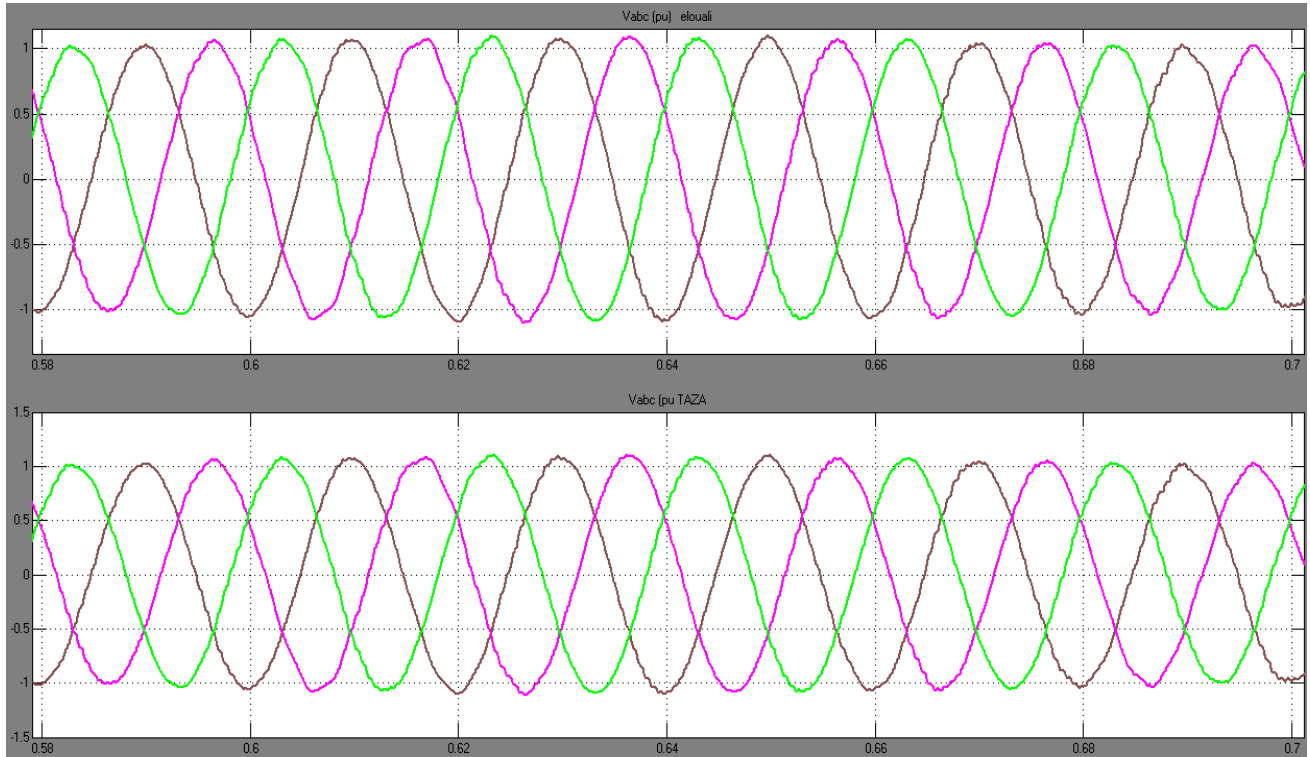


Figure 24: Les tensions visualisées aux réseaux de TAZA et El Ouali

Nous avons étudié plusieurs scénarios de simulation selon le type de solution appliquée. Premièrement, le système éolien est à son point de fonctionnement nominal. La tension et le courant au point PCC ont la forme suivante:

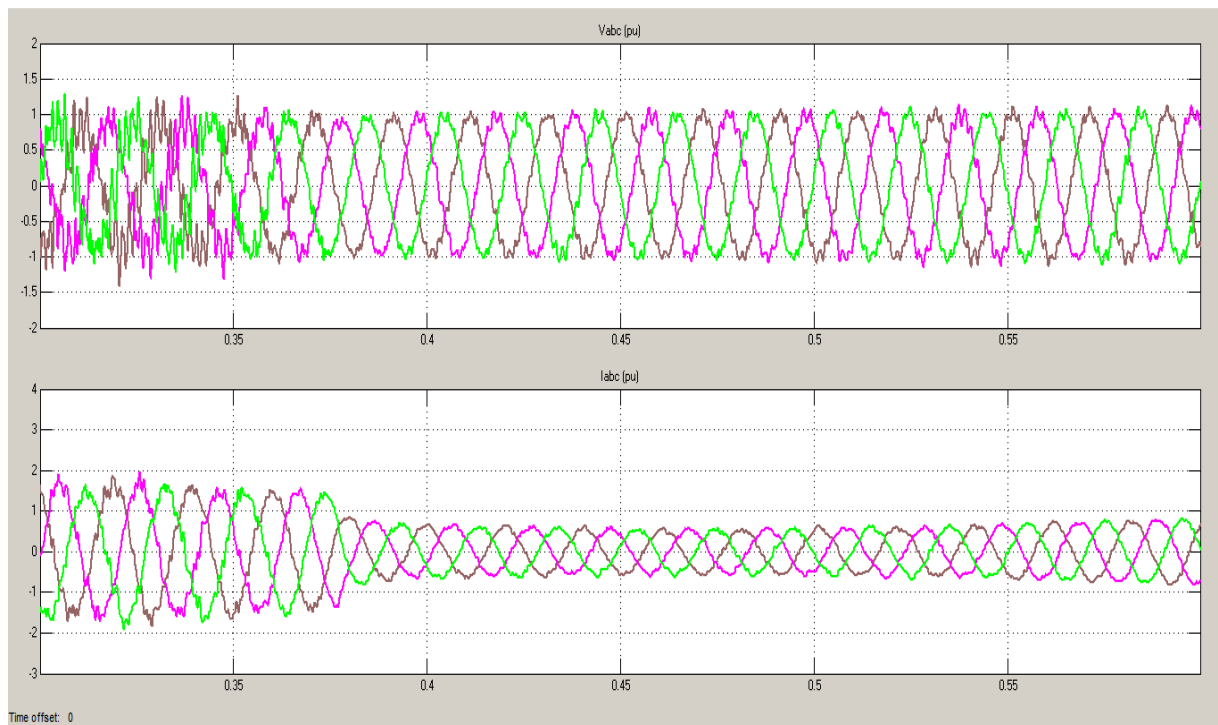


Figure 25 :La tension et le courant du parc au point PCC en fonctionnement nominal.

Cette courbe montre le fort courant au démarrage, des valeurs atteignent 2pu et on observe aussi des petites fluctuations de tension dû au Flicker et des perturbations harmoniques qui sont bien montrées sur le zoom de la figure suivante:

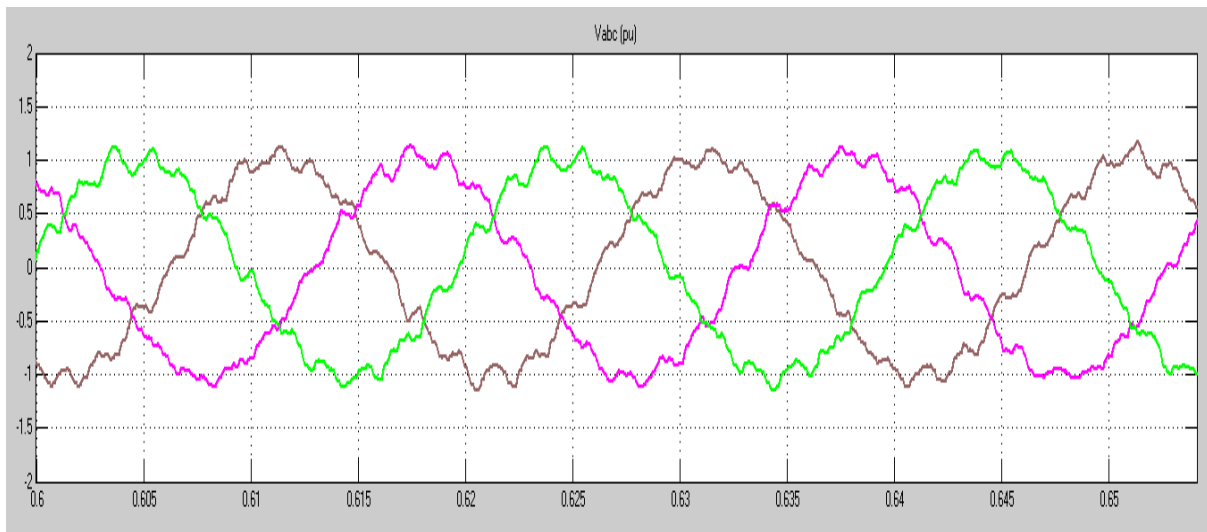


Figure 26 : Zoom sur la courbe de tension en fonctionnement nominal.

L'outil « Powergui FFT Analysis Tool » de Matlab est utilisé pour évaluer les niveaux d'harmoniques d'un signal et le pourcentage de THD. Le spectre harmonique de la tension du parc au PCC en fonctionnement nominale est donné sur la figure suivante :

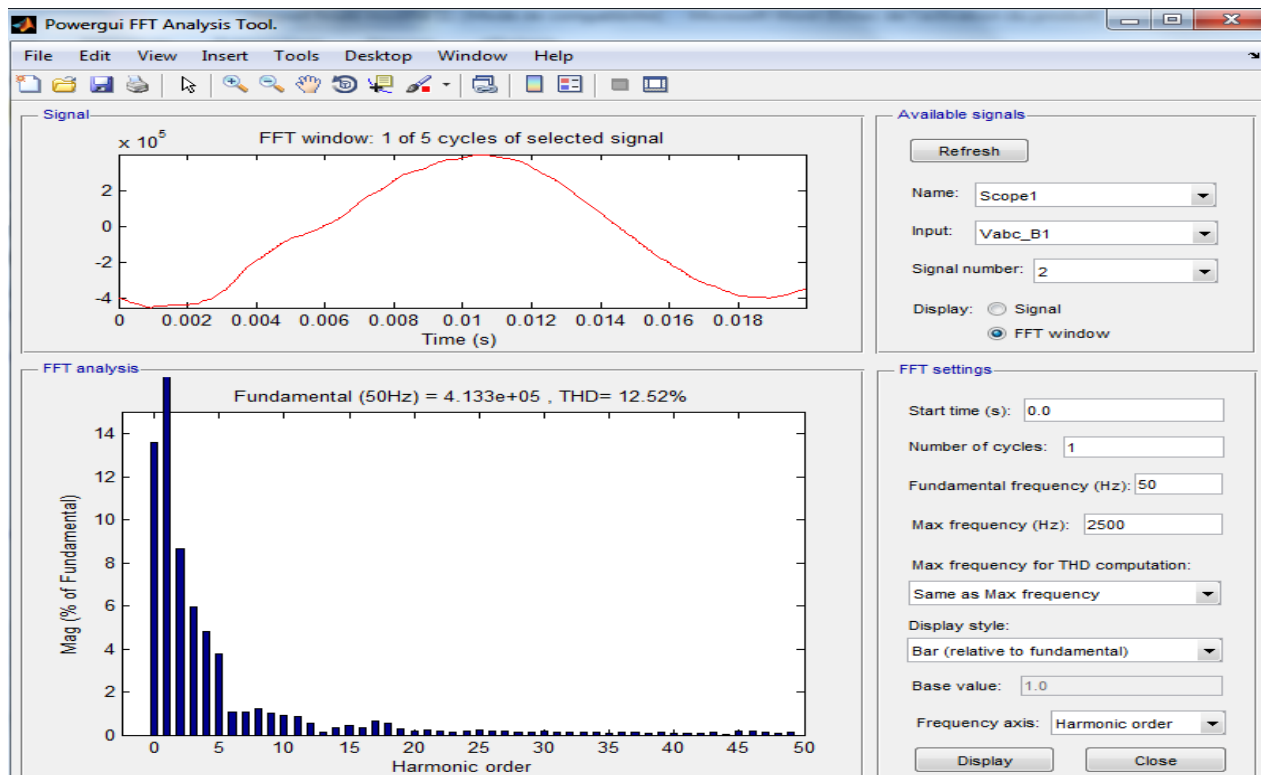


Figure 27: Allure de spectre harmonique de la tension du parc au PCC en fonctionnement nominale.

D'après le spectre la valeur de THD = 12.52 % cette valeur dépasse les limites acceptable de la norme C.E.I.61400.

Action sur la puissance de court-circuit :

En ce qui concerne la puissance de court-circuit dans le parc éolien de TAZA qui est un réseau fort on a une puissance de court-circuit élevée si on baisse la puissance de court-circuit :

EL Ouali 3000 MVA → 30000 KVA

Parc de TAZA 1000 MVA → 10000 KVA

La figures suivantes représentent respectivement la tension et le courant au point de raccordement (jeu de barre B20) :

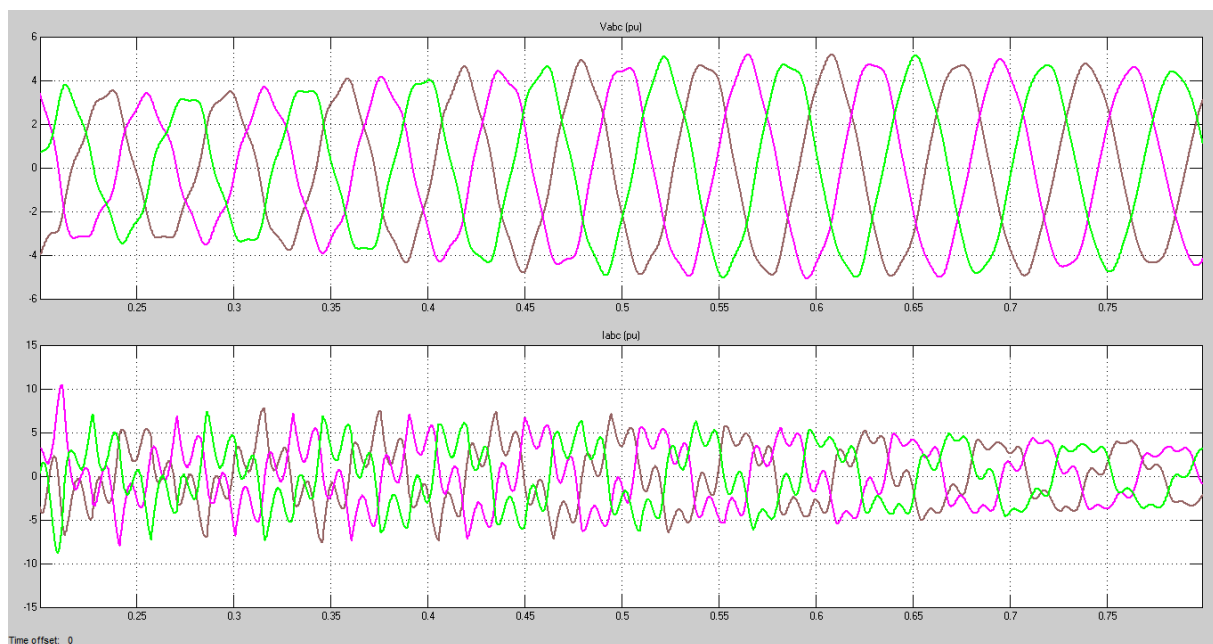


Figure 28: La tension et le courant au point PCC

Par la comparaison des figures 25 et 28 la tension et le courant sont déformés ce qui affirme la relation précitée $\frac{\Delta U}{U} \approx \frac{Q}{S_{cc}}$, lorsque la puissance de court-circuit diminue la chute de tension augmente ce qui rend l'allure de tension perturbée.

Dans ce cas l'analyseur de FFT donne le résultat suivant :

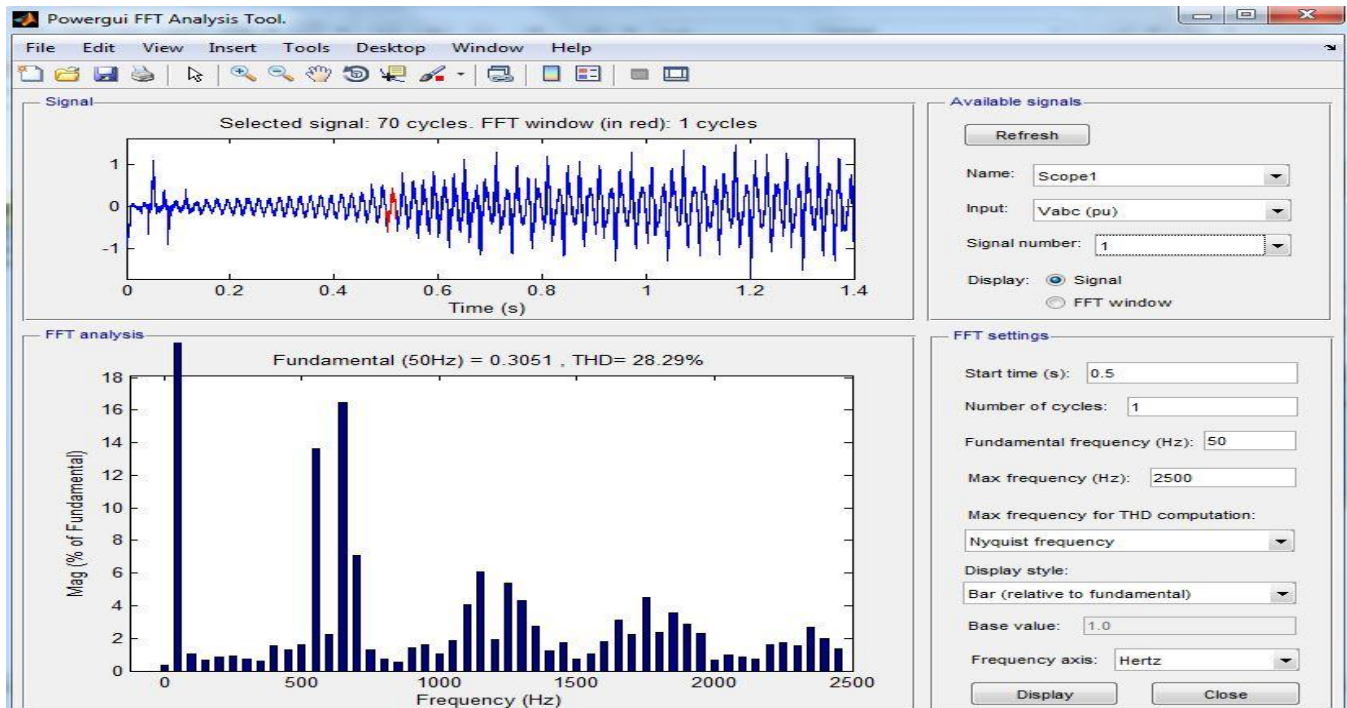


Figure 29: Allure de spectre harmonique du tension du parc au PCC.

Le THD devient égal à 28.29 %, ce qui montre que la diminution de la puissance de court-circuit influence sur la distorsion d'harmonique du parc éolien comme spécifier auparavant.

4.3. Différents scénarios d'amélioration de la qualité d'énergie

L'objectif ici est de comparer plusieurs stratégies de régulation de la production éolienne afin de ramener le THD à une valeur inférieure à 5 %, comme l'impose la norme C.E.I.61400 [14]:

3.1.1. La capacité série :

On introduit une capacité série $C = 50 \text{ mF}$ dans chaque ligne de transport des deux réseaux El Ouali et TAZA comme le montre la figure suivante :

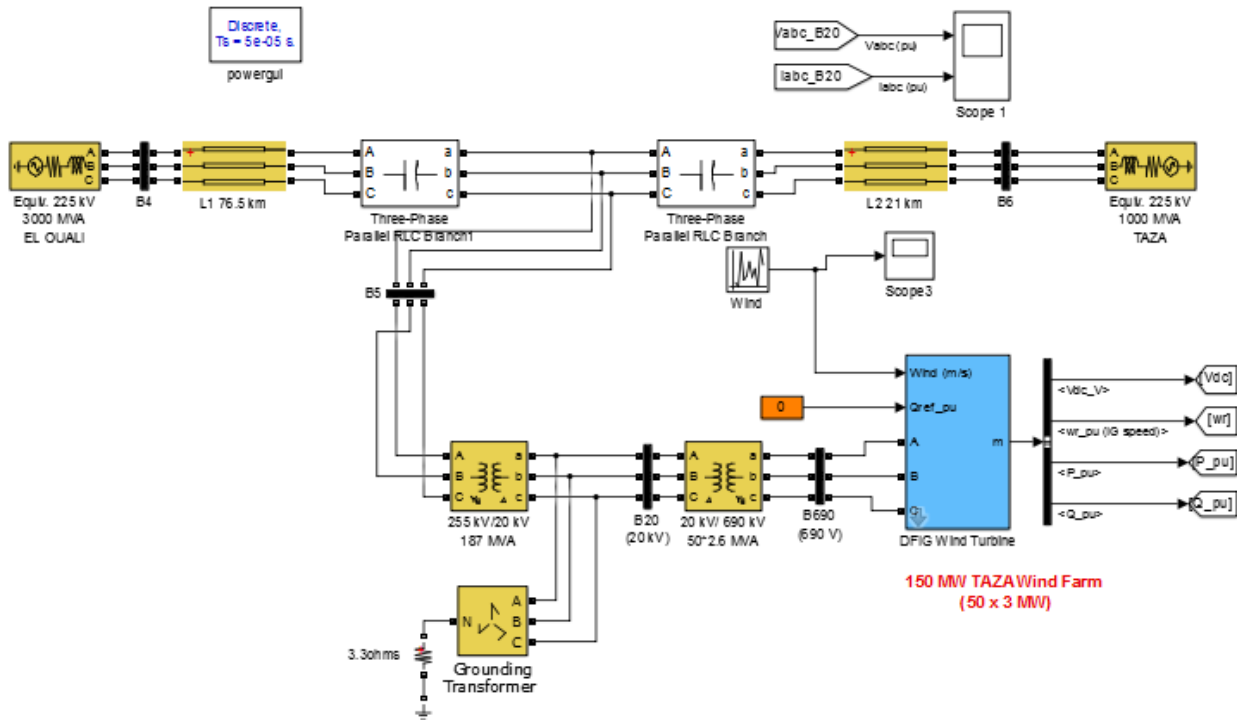


Figure 30 : Parc avec une capacité série.

La courbe de simulation de la tension obtenue est la suivante:

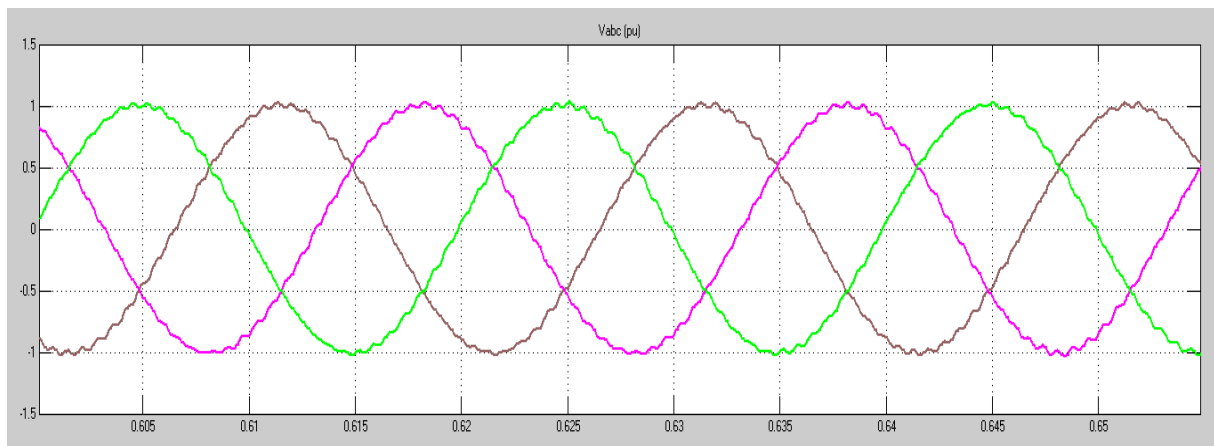


Figure 31 : La tension au PCC du parc avec capacité série

Comme il se voit on a une diminution des fluctuations de tension par rapport à la figure 26 et cette diminution s'exprime par la relation mathématique suivante : $\Delta V = \frac{RP+Q(X-X_c)}{V^2}$ lorsque la valeur de X_c augmente le coefficient $X - X_c$ baisse ce qui implique que la chute de tension diminue.

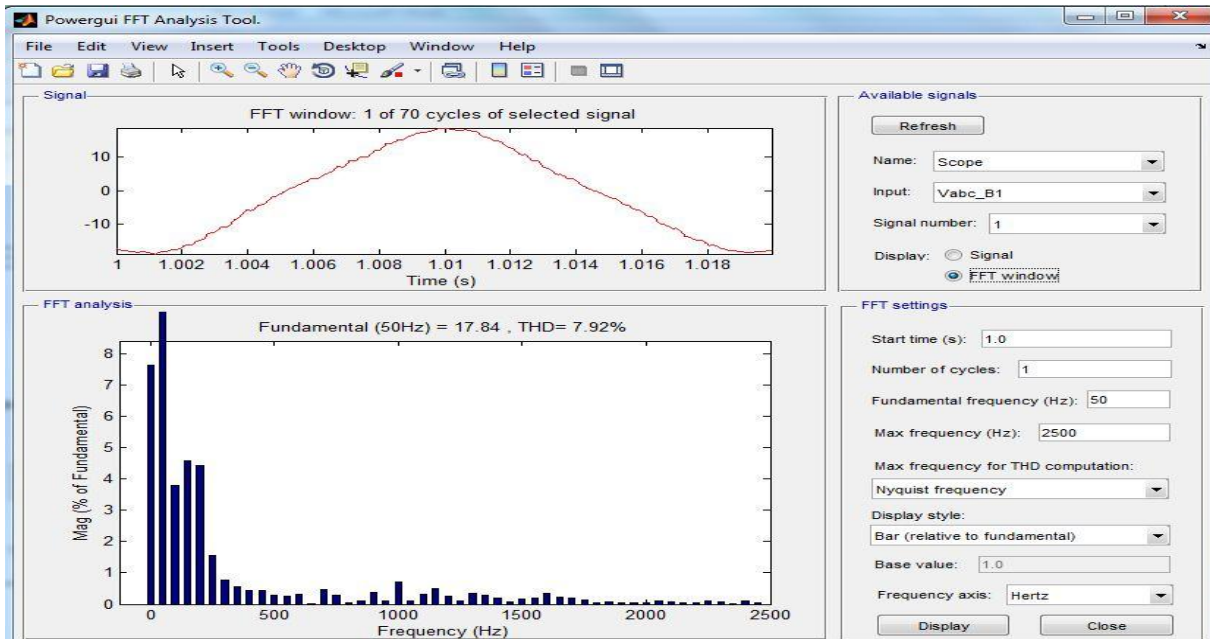


Figure 32: Allure de spectre harmonique de la tension du parc au PCC avec capacité série.

D'après les résultats obtenus la valeur de THD est de 7.92 % qui est aussi supérieure à la valeur acceptable de 5 %. Donc on peut conclure que la capacité série réduit les perturbations du réseau.

3.1.2. Les filtres passifs

On connecte un filtre passif au point de raccordement selon la figure suivante :

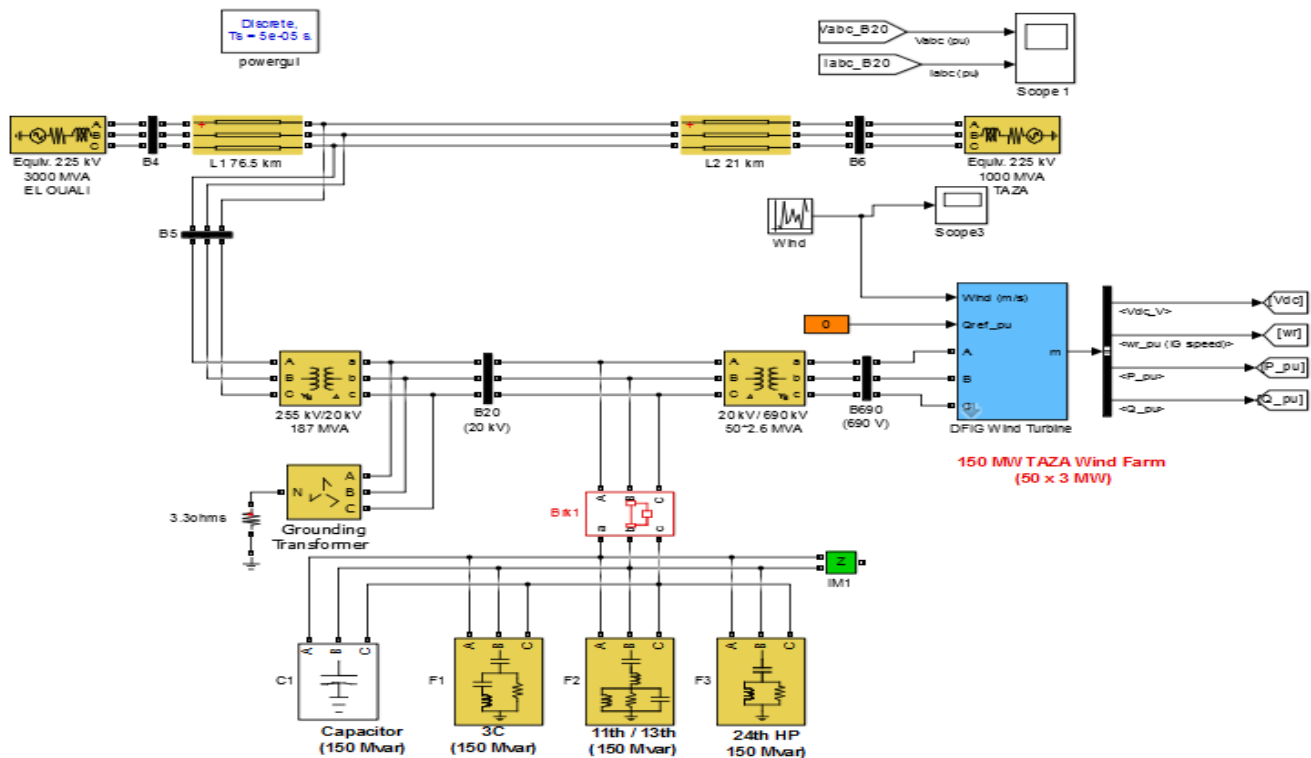


Figure 33 : Parc avec filtre passif.

D'après la simulation de cette solution on a obtenu les résultats suivants :

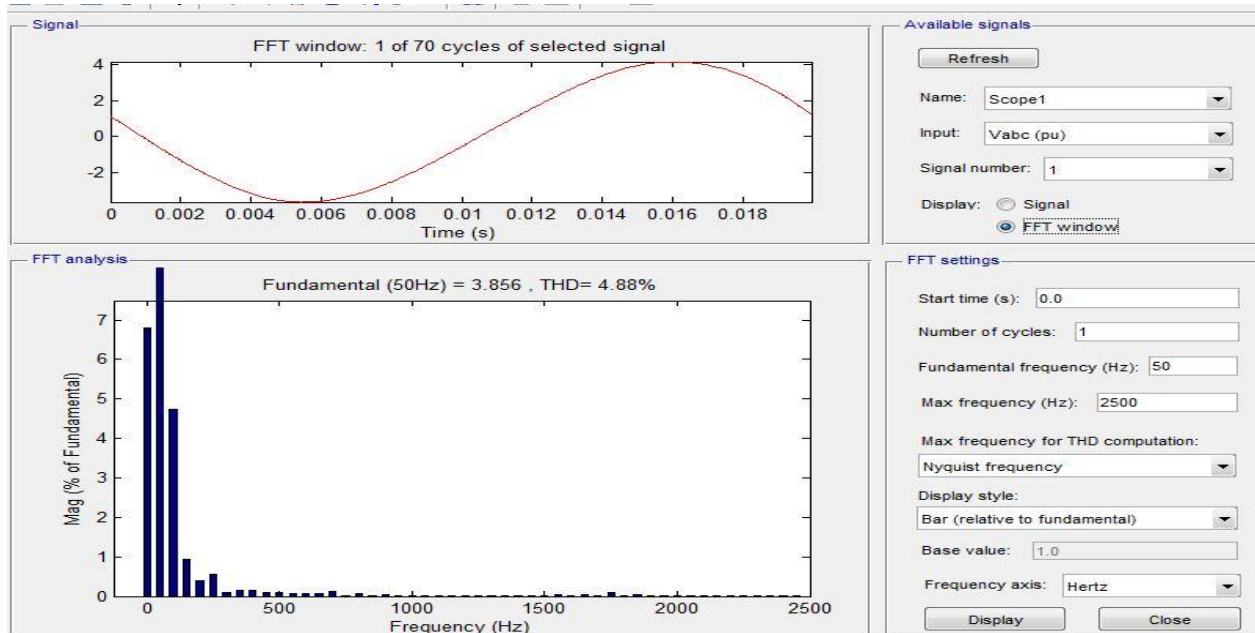


Figure 34: Allure de spectre harmonique du tension du parc au PCC avec un filtre passif.

On voit une diminution de THD à une valeur de 4.88 % qui est selon la norme C.E.I.61400 une valeur acceptable.

Donc on peut conclure qu'un filtre passif donne de bon résultat par rapport à la capacité série.

Toutefois, les filtres passifs présentent les inconvénients suivants :

- ✓ Non adaptabilité aux variations de la charge et du réseau,
- ✓ Phénomène de résonance,
- ✓ Lorsqu'il y a plusieurs rangs harmoniques à filtrer, il est nécessaire de mettre autant de filtres accordés sur les rangs correspondants.

Ces inconvénients ont conduit à la conception d'une nouvelle structure de filtres appelée filtres actifs.

3.1.3. Compensation de la puissance réactive

Comme il est déjà indiqué on a différents éléments de compensation parmi eux nous avons choisi FAP (filtre actif parallèle) cette structure apporte des degrés de contrôle au réseau par les fonctions suivantes :

- ✓ Filtrage d'harmoniques,
- ✓ Amélioration du facteur de puissance (Power Factor) sur le réseau comme indiqué auparavant.

Les filtres actifs sont des convertisseurs de puissance, agissant comme source de courants ou de tensions harmoniques, qui injectent en parallèle sur les réseaux des courants ou des tensions harmoniques en opposition par rapport aux perturbations existantes. Le filtre actif offre de nombreux avantages:

- Il s'adapte automatiquement à l'évolution des charges et du réseau;
- Il peut compenser plusieurs rangs harmoniques (dans la limite de sa bande passante);

La Figure suivante donne la structure générale du filtre actif parallèle, laquelle se présente sous la forme de deux blocs :

- La partie puissance ;
- La partie contrôle-commande.

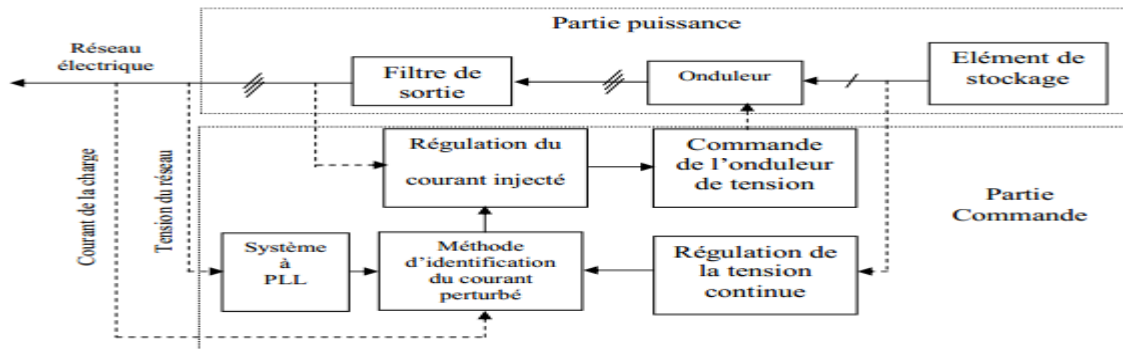


Figure 35: La structure du filtre actif parallèle

La partie puissance est constituée :

- D'un onduleur à base d'interrupteurs de puissance, commandables à l'amorçage et au blocage (GTO, IGBT, ...etc.) avec des diodes en antiparallèle,
- D'un circuit de stockage d'énergie, souvent capacitif,
- d'un filtre de sortie.

La partie contrôle-commande quant à elle est constituée :

- De la méthode d'identification des courants perturbés,
- Du système à base de PLL qui sera intégré dans la méthode d'identification des courants,
- De la régulation de la tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie,
- De la régulation du courant injecté sur le réseau à partir de l'onduleur de tension,
- De la commande de l'onduleur de tension.

Principe de fonctionnement d'un FAP :

Pour la structure onduleur, la source de tension continue est l'élément de stockage souvent capacitif, la tension aux bornes de capacité doit être maintenue constante afin d'éviter tout risque de détérioration des interrupteurs de puissance. Une valeur trop en dessous de la tension de référence causerait également un préjudice quant aux performances du filtre actif. L'implantation d'une régulation est donc nécessaire pour éliminer les fluctuations de tension au borne de capacité de stockage. Les interrupteurs de l'onduleur sont réversibles en courant. Ils sont formés à partir de composants semi-conducteurs commandés à la fermeture et à l'ouverture (transistors bipolaires, IGBT, GTO), en anti-parallèle avec une diode. Le filtre de sortie sert à limiter les variations des courants harmoniques dues aux commutations des bras. La variation des courants générés est contrôlée directement par les tensions commutées de l'onduleur. La correction des erreurs se fait de façon très rapide.

Le coût des filtres :

D'après des études financière on a trouvé que le prix du filtre actif est assez élevé par rapport au filtre passif. Pour le filtre actif de type Bluewave est de 30 000 DH, le filtre passif NF-HPHF est de 20 000 DH.

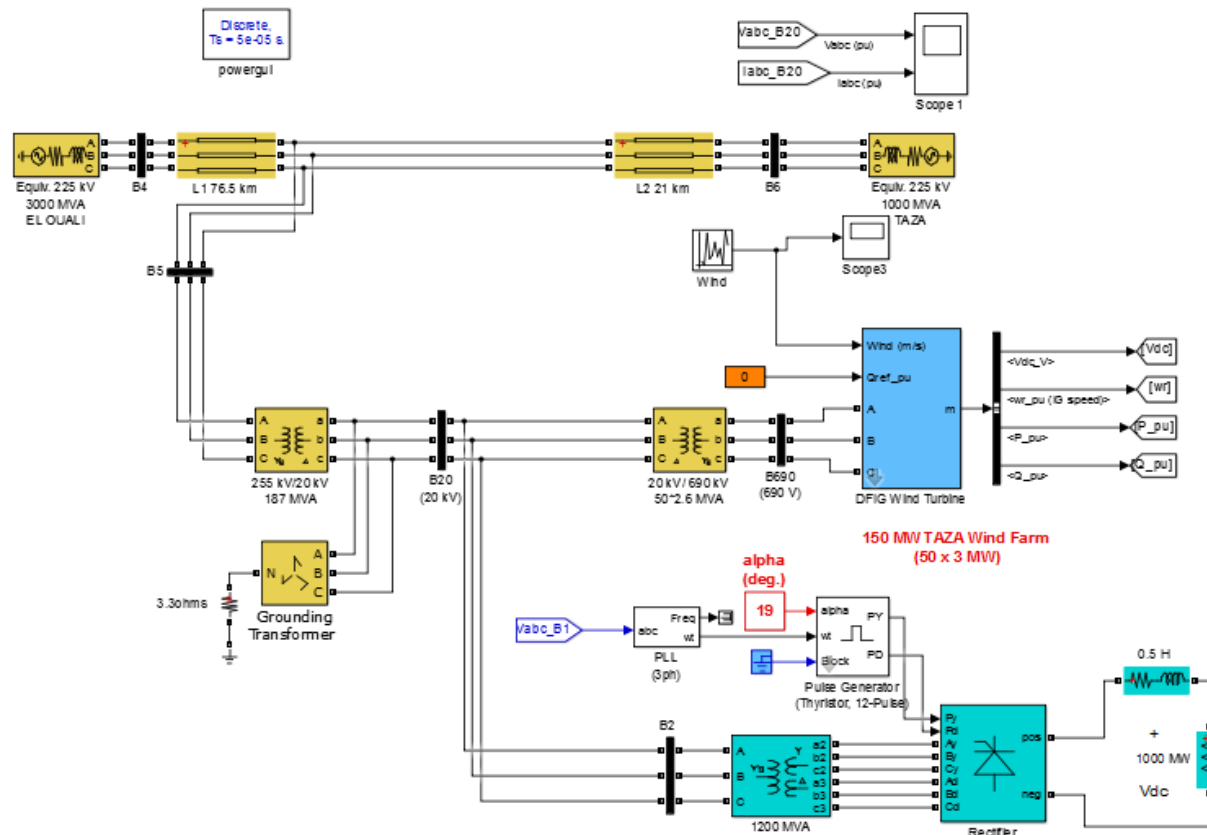


Figure 36: Parc éolien avec filtre actif.

L'observation de la tension nous donne la courbe ci-dessous :

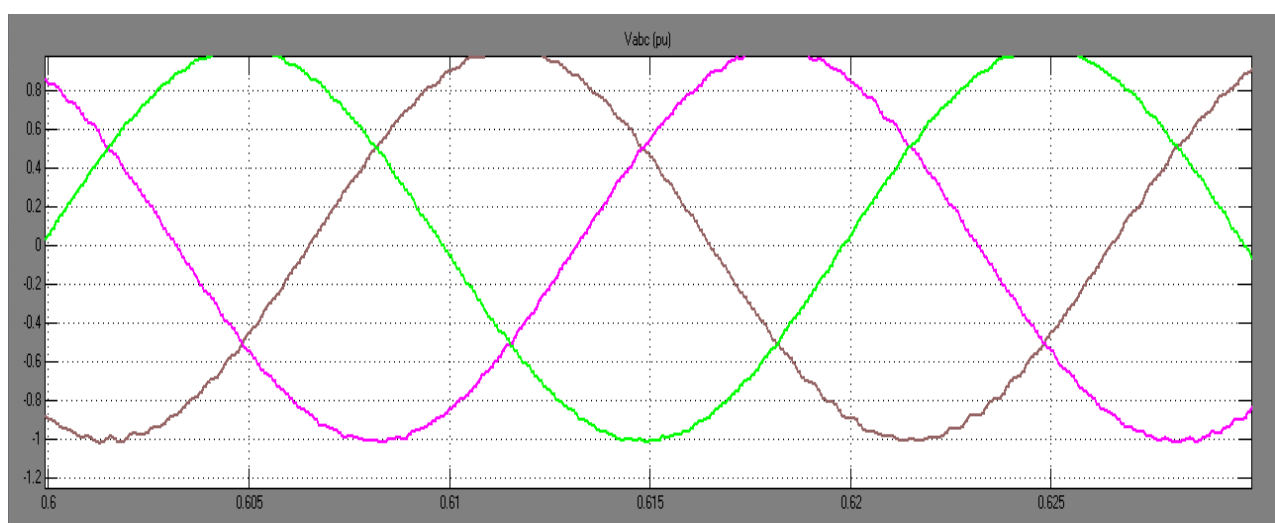


Figure 37 : La tension au **PCC** du parc avec filtre actif.

On observe que la tension dans ce cas est moins perturbée par rapport aux autres cas. Les résultats de l'analyse de la FFT sont donnés sur la figure suivante :

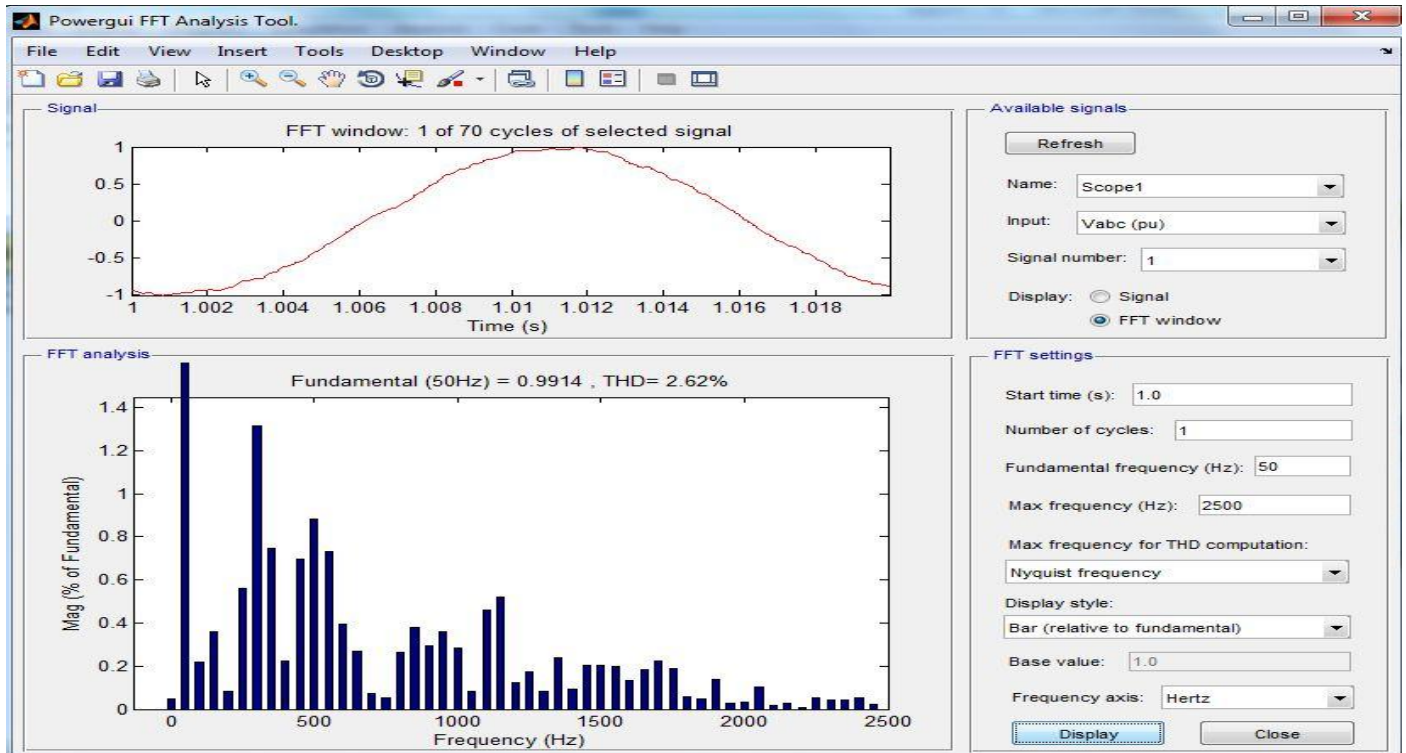


Figure 38: Allure de spectre harmonique de la tension du parc au PCC avec un filtre actif.

On observe bien que la valeur de THD est de 2.62%. C'est la petite valeur obtenue par rapport aux différentes solutions proposées. On voit également une amélioration nette des formes d'ondes de la tension. Ce qui explique l'efficacité des filtres actifs.

5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons analysé le comportement du réseau de TAZA en présence d'une forte production éolienne et les différents scénarios d'amélioration de la qualité d'énergie dans le but d'injecter une énergie propre non polluante au réseau électrique. La modélisation du système (réseau +solution) a été faite et l'analyse des résultats de simulation qui ont été présentés nous a permis de confirmer et de valider la technique d'amélioration de la qualité d'énergie la plus efficace c'est d'utiliser la compensation de l'énergie réactive par un filtre actif parallèle.

Conclusion générale

Le travail effectué dans ce projet de fin d'étude avait comme objectifs d'analyser l'impact d'intégration des éoliennes dans les réseaux et de proposer des solutions permettant l'amélioration de ce moyen de production, dans notre cas le parc éolien de TAZA.

Afin d'atteindre nos objectifs principaux, ce rapport a permis de mettre en évidence les principales caractéristiques des réseaux ainsi que des conditions techniques de raccordement des groupes de production éoliens aux réseaux. Nous avons décrit également les principales problématiques de cette intégration.

Des simulations du modèle du parc éolien de TAZA que nous avons effectué sous l'outil Matlab/Simulink, nous ont permis d'étudier les stratégies de résolution de l'impact défavorable de l'éolienne sur le comportement dynamique du réseau. Les résultats obtenus montrent les performances et l'efficacité du filtre actif parallèle sur la qualité d'énergie.

Le présent travail nous a permis d'approfondir nos connaissances et de mesurer combien la problématique des éoliennes est riche en interrogations et en perspectives, qui feront l'objet de futures projets de fin d'études. Pour que l'étude soit complète, nous proposons les idées suivantes:

- ✦ Etude de la qualité d'énergie en cas d'augmentation de la puissance installé au parc de TAZA ;
- ✦ Dimensionnement des capacités série et filtres actif et passive ;
- ✦ Etude technico-économique de solutions proposées.

Annexes

Annexe A: Fiche technique des éoliennes installées au parc de TAZA

Caractéristiques	ECO 100 série 2	ECO 110 série 2
Adaptée pour des vitesses moyennes annuelles de vent	10 m/s	8,5 m/s
Vitesse minimum pour la production d'électricité	3 m/s	
Adaptée pour des rafales de vent avec un retour d'occurrence aux 50 ans	70m/s	59,5 m/s
Hauteur du mat	75 m	
Diamètre des pales	100,8 m	109,8 m
Hauteur totale (mat plus pales)	125 m	130 m
Inclinaison verticale	8°	
Surface balayée par les pales	7980 m ²	9469 m ²
Game de vitesse du rotor	8 à 14,2 tours par minute	7,7 à 13,6 tours par minute
Type de fondation requise	Fondation en béton de forme octogonale avec un piédestal octogonal	
Poids d'une pale	10 tonnes	12 tonnes
Poids total de l'éolienne	150 tonnes	155 tonnes
Température d'exploitation	-10 à +40°C	
Puissance du générateur	3 MW	
Durée de vie	20 ans	
Diamètre de la base du mat	4,26 m	
Diamètre de la tour du mat	2,85 m	
Taille de la nacelle	4,7 (hauteur) x 14,6 (long.) x 7,1 (largeur) m	
Matériaux pour le mat	Acier	
Surface d'une pale	119 m ²	129 m ²
Protection contre les éclairs	Niveau 1	

Annexe B : La norme IEC 61400

WINDTEST

Kaiser-Wilhelm-Koog GmbH

Laboratory accredited by DAP Deutsches Akkreditierungssystem
Prüfwesen according to DIN EN ISO/IEC 17025. This
accreditation is valid for the test and measurement procedures
given in the certificate.



Excerpt of the test report

"Measurement of the electrical characteristics acc. to IEC61400-21
with regard to utility interconnection of the E-82"

Report No.:

WT5707/07

Page 1 of 2

Type:	E-82	Manufacturers specification:	
Manufacturer:	Enercon GmbH Dreikamp 5 D – 26605 Aurich	Kind of installation:	Pitch, variable speed
Report:	WT 5706/07	Rated power P_{rn} :	2000 kW
Period of measurement:	2007-03-20 to 2007-04-04	Rated wind speed v_{rn} :	12 m/s
Order no (WT) :	4250 05 03075 64	Rated apparent power S_{rn} :	2002 kVA
		Rated reactive Power Q_{rn} :	100 kvar
		Rated current I_{rn} :	2890 A
		Rated voltage U_{rn} :	400 V

Performance:¹⁾

P_{rn} [kW]	2000.0	P_{99} [kW]	2022.9	$P_{9.9}$ [kW]	2065.1
$p_{rn} = P_{rn} / P_n$	1.00	$p_{99} = P_{99} / P_n$	1.01	$p_{9.9} = P_{9.9} / P_n$	1.05
Output power [% of P_n]		Output power [kW]		Reactive Power [kvar]	
0..10		82.8		74.4	
10..20		302.1		73.3	
20..30		505.5		86.0	
30..40		688.9		91.1	
40..50		905.1		95.3	
50..60		1119.3		98.5	
60..70		1299.9		98.3	
70..80		1489.4		97.8	
80..90		1710.4		98.4	
90..100		1918.5		97.1	
100..110		---		---	
Reactive Power at p_{rn} [kvar]			100.0		
Reactive Power at p_{99} [kvar]			112.0		
Reactive Power at $p_{9.9}$ [kvar]			105.6		

Flicker:

Network impedance phase angle, φ_s	30°	50°	70°	85°
Annual average wind speed, v_s (m/s)	Flicker coefficient, $c(\varphi_s, v_s)$			
$v_s = 6.0$ m/s	2.6	2.1	1.5	1.1
$v_s = 7.5$ m/s	2.9	2.4	1.7	1.2
$v_s = 8.5$ m/s	3.0	2.5	1.7	1.3
$v_s = 10.0$ m/s	3.2	2.6	1.7	1.4

WINDTEST Kaiser-Wilhelm-Koog GmbH

Laboratory accredited by DAP Deutsches Akkreditierungssystem
Prüfwesen according to DIN EN ISO/IEC 17025. The
accreditation is valid for the test and measurement procedures
given in the certificate.



Excerpt of the test report
"Measurement of the electrical characteristics acc. to IEC61400-21
with regard to utility interconnection of the E-82"

Report No.:
WT5707/07
Page 2 of 2

Switching operations:

Case of switching operation	Start-up at cut-in wind speed			
Max. number of switching operations, N_{10}	3			
Max. number of switching operations, N_{120}	35			
Grid impedance angle	30°	50°	70°	85°
Flicker step factor, $k_f(\psi_k)$	0.04	0.03	0.02	0.02
Voltage step factor, $k_u(\psi_k)$	0.06	0.06	0.06	0.05

Case of switching operation	Start-up at rated wind speed			
Max. number of switching operations, N_{10}	3			
Max. number of switching operations, N_{120}	35			
Grid impedance angle	30°	50°	70°	85°
Flicker step factor, $k_f(\psi_k)$	0.07	0.06	0.04	0.03
Voltage step factor, $k_u(\psi_k)$	0.01	0.70	0.41	0.19

Harmonics:²⁾

Order	Output power [kW]	Harmonic current [% from I_n]	Order	Output power [kW]	Harmonic current [% from I_n]
2	1978.7	0.2	3	1993.3	0.1
10	1986.8	0.1	5	1981.5	0.7
14	20.7	0.1	7	1991.5	0.4
16	21.4	0.1	11	181.6	0.7
			13	21.4	0.6
			15	20.7	0.2
			17	99.5	0.4
			19	1950.7	0.1
			23	1978.7	0.1

Maximum total harmonic current distortion [% from rated]	0.95
Power at maximum total harmonic current distortion [kW]	1993.3

Exceptional details:

1. The measurement was carried out only to 14.5 m/s.
2. Values <0.1% of I_n weren't indicated.

This report is only valid in conjunction with the report WT 5706/07.

WINDTEST Kaiser-Wilhelm-Koog GmbH
Sommerdeich 14b
25709 Kaiser-Wilhelm-Koog

Date: 2007-04-27
Operative: Dipl.-Ing. A. Müller
Tel./ Fax.: +49 4856 901-36 / - 49



Annexe C : Les limites de Flicker selon publication de l'UIE:

Flicker	Niveaux de compatibilité pour planification		Limites acceptables de Flicker
	MV	HV	MV & HV
p_{st}	0.9	0.8	0.35
p_{lt}	0.7	0.6	0.25

Les références :

- [1]. MOKRANE SMAILI « Modélisation et commande d'un aérogénérateur à Machine asynchrone à double alimentation en vue De simulation des problèmes de cogénération », thèse de doctorat Août 2013
- [2]. Ye Wang « Evaluation de la Performance des Réglages de Fréquence des Eoliennes à l'Echelle du Système Electrique : Application à un Cas Insulaire », thèse de doctorat Ecole Centrale de Lille, 2012. French.
- [3]. MELLOUL Ahmed « thème Simulation et diagnostic d'une machine asynchrone à double alimentation d'une éolienne ».thèse de doctorat MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE UNIVERSITE FERHAT ABBAS — SETIF UFAS (ALGERIE) 2011.
- [4]. David Marín « Intégration des éoliennes dans les réseaux électriques insulaires » DOCTORAT DELIVRE PAR L'ECOLE CENTRALE DE LILLE 2009
- [5]. Bruno FRANCOIS « La génératrice asynchrone à double alimentation (Modélisation et commande) » Master (Recherche) Sciences et Technologies.
- [6]. www.em.ucv.ro
- [7]. DEDOUGA ABDELHAKIM « contrôle des puissances active et réactive de la machine à double alimentation (DFIM) » thèse de doctorat 2010.
- [8]. Thierno Lamarana SOW « COMMANDE NON LINÉAIRE DE L'ÉOLIENNE À MADA POUR UNE PARTICIPATION AU RÉGLAGE DE LA FRÉQUENCE DU RÉSEAU » thèse de doctorat.
- [9]. « Exigence de raccordement et d'exploitation des installations de production d'électricité à partir des énergies renouvelables sur le réseau haute et moyenne tension », ' projet 2013 ' Société Tunisienne de l'Electricité du Gaz.
- [10]. YE WANG « Evaluation de la performance des réglages de fréquence des éoliennes à l'échelle du système électrique : application à un cas insulaire », Thèse de doctorat 2002.
- [11]. THIEMO LAMARANA SOW /Mémoire : commande non linéaire de l'éolienne à MADA pour une participation au réglage de la fréquence du réseau, Montréal LE 04 JANVIER 2012.
- [12]. Mr. HADDAD SALIM « gestion de la qualité d'énergie électrique dans un réseau de transmission année 2010 », Thèse de doctorat.
- [13]. John Wiley & son Germany/ Wind power in power system 2005/ book.
- [14]. Mr. Vanya Ignatova « Méthode d'analyse de la qualité de l'énergie électrique, application aux creux de tension et à la pollution harmonique, electric power », Thèse de doctorat université Joseph-Fourier – Grenoble I, 2006, French < tel 00170713 >.
- [15]. GATTAL BOULAARES « méthodes d'analyse des perturbations électriques dans la qualité de l'énergie électrique en utilisant des nouvelles techniques pour l'application aux creux de tension » Thèse de doctorat 2012.
- [16]. Renewable and sustainable energy reviews: power- quality issues and the need for reactive –power compensation in the grid integration of wind power / journal ELSEVIER 2015.
- [17]. CHALAH Samira « analyse Stochastique de la Résultante De l'Injection De Courants Harmoniques Dans Un Réseau Electrique » Mémoire de magister 2012.
- [18]. MAKHLOUFI Saida « Les codes de réseau de raccordement des parcs éoliens au réseau électrique » recherche et développement 2012 / Division Energie Eolienne – CDER.
- [19]. Willi Christiansen & David T. Johnsen "Analysis of requirements in selected Grid Code" 2006.
- [20]. Bruno FRANCOIS « La génératrice asynchrone à double alimentation (Modélisation et commande) » thèse de doctorat.
- [21]. Mohamad AlaaEddinAlali « Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension », thèse de doctorat 2002.