



LICENCE SCIENCES ET TECHNIQUES
Génie Electrique

RAPPORT DE FIN D'ETUDES

Intitulé :

**Impact de l'intégration du parc éolien de
Taza sur le réseau: Flicker**

Réalisé Par :

OMAIMA EL ALANI

Encadré par :

Pr EL MARKHI HASSANE

(FST FES)

M. EL MAKRINI ABOUBAKR

(ONEE FES)

Soutenu le 16 Juin 2015 devant le jury

Pr HASSANE EL MARKHI

(FST FES)

Pr FARID ABDI

(FST FES)

Pr HICHAM GHENNIQUI

(FST FES)

Dédicace

Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots qu'il faut. Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour et le respect que je vous dois... Aussi, je dédie ce projet de fin d'études ...



A mes Chers parents,

Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma considération, ma gratitude, mon dévouement et mon profond respect envers vous.

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

A mon frère, ma sœur

Je vous remercie de tout mon cœur, sans vous je n'aurais pas réussi à avancer.

A toute ma famille

Merci d'être à mes côtés, votre soutien et vos encouragements ont été sources inépuisables et force qui m'a permis d'aller de l'avant.

A tous mes professeurs

Leur générosité et leur soutien m'obligent de leur témoigner mon profond respect et ma loyale considération

A tous mes amis

Je vous remercie pour tous les moments inoubliables que nous avons passés ensemble.

A tous mes amis de licence Génie Électrique

A tous ceux qui m'aiment

Je dédie ce travail...

OMAIMA EL ALANI

Remerciements

Avant de commencer la présentation de ce travail, Il m'est particulièrement agréable d'exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à tous ceux qui, par leurs enseignements et leurs conseils, m'ont aidé pour la réalisation de ce projet de fin d'études. Puissent ces lignes être l'expression de notre profonde reconnaissance.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur ABOUBAKR EL MAKRINI, Ingénieur d'Etat et Chef de la Division de transport à l'Office National d'Electricité, pour avoir accepté ma demande de stage, pour sa disponibilité, pour la confiance qu'il a su m'accorder et les conseils précieux qu'il m'a prodigués tout au long de la réalisation de ce projet, je le remercie aussi pour son accueil chaleureux et sa gentillesse.

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à mon encadrant universitaire Monsieur HASSANE EL MARKHI, Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de Fès, pour son encadrement exemplaire ainsi que pour son soutien, sa collaboration, ses remarques pertinentes et directives, sa disponibilité, sa rigueur scientifique, son soutien sans faille et son expérience qui m'ont permis d'évoluer dans mon sujet et pour l'intérêt qu'il a porté à mon travail.

Je présente aussi mes remerciements les plus chaleureux à Monsieur HICHAM GHENIOUI et Monsieur FARID ABDI professeurs à la faculté des sciences et techniques de Fès de m'avoir honoré en acceptant de juger notre modeste travail. Veuillez trouver ici le témoignage de notre respect le plus profond

Mes remerciements vont aussi à tous mes professeurs, enseignants et à tous les membres du corps professoral de Licence Génie Electrique de la Faculté des Sciences et Techniques de Fès.

Je tiens également à remercier l'ensemble du personnel de la Division du transport de l'ONEE, et spécialement Monsieur YOUSSEF EL MAJDOUB pour leur précieuse aide ainsi que leur sympathie qui a favorisé notre intégration à l'équipe.

Je ne peux pas clore mes remerciements sans rendre un grand hommage à Monsieur YOUNESS BOUKHRIS de sa disponibilité pour répondre à mes questions et à mes attentes et pour l'attention qu'il a bien voulu apporter à ce rapport à divers stades de son élaboration.

SOMMAIRE :

<i>Dédicace</i>	<u>1</u>
<i>Remerciements</i>	<u>2</u>
<i>Introduction générale</i>	<u>8</u>
<i>Chapitre I : Contexte générale du projet</i>	<u>10</u>
1. Aperçu général sur l'ONEE	<u>10</u>
1.1. Présentation de L'ONEE	<u>10</u>
1.2. Mission de L'ONEE	<u>10</u>
1.3. Objectifs de L'ONEE	<u>11</u>
1.4. Activités de L'ONEE	<u>11</u>
1.5. Organigramme de L'ONEE	<u>12</u>
2. Problématique et objectifs de l'étude	<u>14</u>
<i>Chapitre II : Généralités, principes, modélisation de l'éolienne et présentation du Parc Eolien de Taza.</i>	<u>15</u>
<i>Introduction</i>	<u>15</u>
1. Situation énergétique Marocaine	<u>15</u>
1.1. Projets et objectifs du programme éolien	<u>15</u>
1.2. Le gisement éolien au Maroc	<u>16</u>
2. L'énergie éolienne	<u>17</u>
2.1. Définition	<u>17</u>
2.2. Description d'une éolienne	<u>17</u>
3. Contrôle de la puissance fournie par une éolienne	<u>18</u>
3.1. Fonctionnement à vitesse fixe	<u>18</u>
3.2. Fonctionnement à vitesse variable	<u>18</u>
4. Fonctionnement et production d'électricité	<u>19</u>
4.1. Système utilisant la génératrice asynchrone à double alimentation	<u>19</u>
4.2. La puissance extraite du vent	<u>19</u>
4.3. Types de fonctionnement de la MADA	<u>20</u>
5. Parc Eolien de Taza	<u>20</u>
5.1. Caractéristiques du parc	<u>20</u>
5.1.1. Description géographique du projet	<u>20</u>
5.1.2. Fiche technique du Parc	<u>21</u>
5.1.3. Raccordement du parc	<u>21</u>
<i>Conclusion</i>	<u>21</u>
<i>Chapitre III : Impact de l'intégration des éoliennes dans le réseau électrique</i>	<u>22</u>
<i>Introduction</i>	<u>22</u>
1. Qualité de Production	<u>22</u>
1.1. Classification de différents phénomènes de qualité de Production	<u>23</u>
1.1.1. Creux de tension	<u>23</u>
1.1.2. Les variations Lentes de Tension	<u>23</u>
1.1.3. Les variations rapides de tension ou Flicker	<u>24</u>
1.1.4. Les Harmoniques	<u>24</u>
1.1.5. Le Déséquilibre	<u>24</u>
1.1.6. Variation de Fréquence	<u>24</u>
2. Papillotement (Flicker)	<u>24</u>
2.1. Définition	<u>25</u>
2.1.1. Flicker en fonctionnement continue	<u>25</u>
2.1.2. Flicker lors des opérations de couplage	<u>25</u>

2.2.	Les origines de flicker	25
2.2.1.	chute de tension	25
2.2.2.	Chute de tension pour un réseau HT	27
3.	Caractérisation et normalisation de l'effet des charges fluctuantes	27
3.1.	Conséquences de Flicker	27
3.2.	Valeurs indicatives du Flicker	28
4.	Évaluation et méthodologie de mesure de Flicker	28
4.1.	Limite de Flicker	28
4.2.	Méthode de calcul analytique	29
4.2.1.	Plt/Pst en fonctionnement établi	29
4.2.2.	Le Plt/Pst lors des opérations de couplage :	30
4.3.	Calcul d'émission de Flicker pour le parc éolien de Taza	31
4.4.	Méthode statistique :	31
4.4.1.	Description du Flickermètre	31
4.4.2.	Traitement statistique	32
4.4.3.	Sommation et Propagation des fluctuations de tension	34
5.	Atténuation des fluctuations de tension	34
5.1.	Augmentation de la puissance de court-circuit	35
5.2.	Moyens classiques de compensation réactive et de réglage de tension	35
5.2.1.	Condensateurs parallèles	36
5.2.2.	compensateurs synchrones	36
5.3.	Moyens modernes	36
5.3.1.	Les compensateurs shunts	36
5.3.2.	Le SVC (Static Var Compensator)	36
5.3.3.	Le Compensateur synchrone statique(STATCOM)	37
5.3.4.	Comparaison entre SVC et STATCOM	39
Conclusion		39
Chapitre IV : Simulation du parc éolien de Taza		40
Introduction		40
1.	Description du système étudié	40
2.	Simulation du système éolien	40
1.1.	Simulation du vent	40
1.2.	Modèle de simulation du système étudié	41
1.3.	Simulation du parc avec une puissance du parc plus élevée	43
3.	Solutions pour l'atténuation des fluctuations de tension	45
3.1.	Augmentation de la puissance de court-circuit	45
3.2.	La capacité série	47
3.3.	Amélioration avec le SVC	48
3.4.	Amélioration avec le STATCOM	51
CONCLUSION GENERALE		54
Références:		55
Annexes :		56

LISTE DE FIGURES :

Figure 1: Capacité éolienne installée en MW dans le monde entre 2000 et 2013. [1]	15
Figure 2: Programme d'énergie éolienne au Maroc (2015-1019). [2].....	16
Figure 3: Carte de la vitesse moyenne du vent (m/s). [3].....	16
Figure 4: Conversion de l'énergie cinétique du vent	17
Figure 5: Eolien à axe horizontal. [5].....	18
Figure 6: Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique. [5].....	18
Figure 7: Schéma fonctionnel de la MADA. [5]	19
Figure 8 : Schéma de raccordement Du parc au réseau [8].....	21
Figure 9 : Qualité d'énergie.....	23
Figure 10: Creux de Tension. [7].....	23
Figure 11: Creux de tension a) provoquées par un court-circuit b) provoquées par un démarrage brusque d'un moteur. [10]	23
Figure 12: Fluctuations de Tension. [7].....	24
Figure 13: Harmonique. [7].....	24
Figure 14: Caractéristique puissance vitesse mesurée pour une éolienne de 1.5 MW [5]	25
Figure 15 : Schéma d'une éolienne connectée au réseau [14] [5].....	26
Figure 16: Schéma équivalent du parc connecté au réseau. [14].....	26
Figure 17 : Variation de l'intensité lumineuse due à une fluctuation de tension [12].....	27
Figure 18 : Caractéristique de perception de Flicker [15].....	28
Figure 19 : Schéma de principe du flickermètre international [d'après UIE et CEI 61000-4-15].....	32
Figure 20: Enveloppe des fluctuations : Calcul du temps de cumulation.....	32
Figure 21: Enveloppe pondérée des fluctuations: densité de probabilité cumulée.	33
Figure 22 : Circuit équivalent après l'insertion de capacité	35
Figure 23 : Structure d'un SVC, schéma équivalent [18]	37
Figure 24 : Schéma du STATCOM [18]	38
Figure 25 : Caractéristique tension courant a. STATCOM ; b.SVC.....	39
Figure 26: Schéma de raccordement du Parc de Taza au réseau.....	40
Figure 27: Vent simulé pendant 10s	41
Figure 28 : Parc éolien connecté au réseau.....	41
Figure 29 : Génératrice Asynchrone Double Alimentation.....	42
Figure 30: Tensions au niveau d'El Ouali, Taza et au Pcc. Pn=150MW	42
Figure 31: Tensions au niveau d'El Ouali, Taza et au Pcc. Pour Pn=700MW	43
Figure 32 : Variations des puissances actives et réactives de l'éolienne	43
Figure 33: Tensions de El Ouali, Taza et au PCC.....	44
Figure 34 : Zoom des tensions de El Ouali, Taza et au Pcc.	45
Figure 35 : Tensions de El Ouali, Taza et au PCC.....	46
Figure 36 : Tensions d'El Ouali, Taza.....	46

Figure 37 : Schéma du parc avec l'insertion des capacités série	47
Figure 38 : Tensions de El Ouali, Taza et au PCC pour $c=0,01F$	48
Figure 39 : Parc éolien avec un SVC	49
Figure 40 : Tensions d'el Ouali, Taza avec le SVC.....	49
Figure 41: Zoom sur les tensions d'el Ouali et Taza avec le SVC	50
Figure 42 : Tensions d'El Ouali Taza pour un SVC connecté à un jeu de barre de faible tension.....	50
Figure 43 : Parc éolien avec STATCOM.....	51
Figure 44 : Tensions d'El Ouali et de Taza avec STATCOM.....	51
Figure 45 : Zoom des tensions d'El Ouali et Taza pour le STATCOM.....	52
Figure 46 : Tensions d'El Ouali et Taza pour le STATCOM connecté à un jeu de barre de faible tension	52

Liste des tableaux

Tableau 1 : Puissance de court-circuit du Parc	21
Tableau 2 : Limites de Flicker pour MTA et MTB.....	29
Tableau 3: Valeurs de coefficient de flicker selon la norme CEI 61 400-21. (Annexe 3).....	30
Tableau 4 : Valeurs de nombres de séquences.....	31
Tableau 5 : Les résultats de calculs de flicker	31
Tableau 6 : Prix approximatif des différents FACTS	54

Listes des Acronymes

BT	Base Tension
CEI	Commission Electrotechnique Internationale
EDF	Électricité De France
FACTS	Flexible AC Transmission Systems
MADA	Machine Asynchrone Double Alimentation
MTA	Moyenne Tension
MTB	Haute Tension
ONEE:	Office Nationale d'Electricité et d'Eau Potable
PCC	Point Commun de Couplage
P_{lt}	Coefficient de sévérité de Flicker long time
P_{st}	Coefficient de sévérité de Flicker short time
SIE	Société d'Investissements Energétiques
STATCOM	Static Synchronous Compensator
SVC	Stat Var Compensator
TSC	Thyristor Swithed Capacitor
TCR	Thyristor Controlled Reactor
UIE	Union Internationale d'Electrothermie

Résumé :

La problématique de la connexion des éoliennes au réseau électrique se pose du fait de la difficulté à prévoir la production, du risque de déconnexions intempestives des fermes éoliennes et d'une dégradation de la qualité de l'électricité. L'objectif fondamental des réseaux électriques est de fournir aux clients de l'énergie électrique avec une parfaite continuité, sous forme de tensions parfaitement sinusoïdales, avec des valeurs d'amplitude et de fréquence préétablies (en fonction du point de raccordement).

Dans le cadre de ce projet, nous sommes particulièrement intéressés à l'analyse des fluctuations de tension. Nous avons défini d'une façon plus précise cette perturbation ainsi que les méthodes de mesure et d'atténuation de ces fluctuations à l'aide de différentes techniques et plus précisément les techniques modernes à base des dispositifs FACTS dont le fonctionnement se base sur la compensation de l'énergie réactive.

La technique utilisée dans ce projet pour l'atténuation de Flicker dans le but d'amélioration des performances de la qualité d'énergie est simulée sous l'environnement Matlab /Simulink, elle a montré une bonne efficacité, un bon fonctionnement et elle a donné de bons résultats pour l'atténuation des fluctuations de tension générés par les aérogénérateurs.

Introduction générale

L'électricité est devenue de plus en plus primordiale pour l'humanité. En effet, l'accès à l'électricité est la garantie de meilleures conditions de vie (hygiène, santé, éducation) est un facteur essentiel pour un développement économique.

L'industrialisation très forte des dernières décennies et la prolifération des appareils domestiques électriques (chauffage, climatisation, lavage, médicale, informatique... etc.) ont mené à des besoins planétaires immenses en énergie électrique. Aujourd'hui, plus de 2 milliards d'êtres humains n'ont pas l'accès à l'électricité pour cause d'économie fragile, d'infrastructures lourdes et coûteuses, de zones difficiles d'accès et d'habitat dispersé. Le problème dans le monde entier est de répondre à la demande énergétique qui augmente sans cesse. Face à la demande en électricité, toujours croissante et loin de l'utilisation des énergies fossiles polluantes (pétrole et gaz), plusieurs pays se sont tournés vers les énergies renouvelables.

Dans ce contexte, les nouvelles énergies vertes dite « renouvelables » sont réapparues et prennent peu à peu une place indéniable dans le marché d'électricité. En particulier, parmi toutes les ressources renouvelables possibles (biomasse, soleil, vent, houle, etc.), l'éolien apparaît actuellement en bonne place comme énergie d'appoint complémentaire à l'énergie fossile et nucléaire puisque le vent est une source d'énergie libre, propre et inépuisable.

L'énergie éolienne devient de plus en plus une source significative d'énergie, elle est aujourd'hui l'énergie la plus accessible en termes de technologie et de coût et elle est appelée à prendre une place très importante parmi toutes les énergies exploitables par l'homme. Sa matière première (le vent) est gratuite. Cependant, sa connexion au réseau électrique est un peu plus compliquée parce qu'elle ne participe pas d'une part au réglage de la tension et de la fréquence et d'autre part son énergie est

fluctuante. Ceci peut être considéré comme une perturbation de la puissance injectée dans le réseau et peut mettre en danger sa stabilité.

Le but de ce travail est l'étude des perturbations et plus précisément le Flicker causé par la connexion d'un parc éolien au réseau électrique et comment atténuer cette perturbation à l'aide des FACTS. Pour ce faire et afin de remédier aux problèmes précités, nous avons adopté le plan qui s'articule comme suit :

- ☞ Le premier chapitre présente l'office national d'électricité et d'Eau Potable ONEE lieu de notre Projet Fin d' Etudes.
- ☞ Le deuxième chapitre est consacré à une vision générale sur l'énergie éolienne, description des éoliennes, leurs caractéristiques et leurs systèmes de fonctionnement utilisés pour avoir un meilleur rendement, et enfin une description du parc éolien de TAZA.
- ☞ Le troisième chapitre porte sur l'impact de l'énergie éolienne sur le réseau électrique et puis l'amélioration de la stabilité de ce réseau électrique auquel est connectée la ferme éolienne.

Nous clôturerons enfin ce rapport du projet de fin d'études par une simulation afin de visualiser les résultats obtenus, justifiant les techniques utilisées pour l'atténuation des fluctuations de tension afin d'améliorer la stabilité du réseau électrique auquel est connecté le parc éolien.

NB : D'un point de vue électrotechnique, l'éolienne sera considérée comme une charge passive qui injecte une puissance dans le réseau électrique.

CHAPITRE I

Chapitre I : Contexte générale du projet



1. Aperçu général sur l'ONEE

1.1. Présentation de L'ONEE

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. Mission de L'ONEE

- **Les principales missions de l'ONEE consistent à :**
 - ❖ Gérer et développer le réseau du transport.
 - ❖ Répondre aux besoins du pays en énergie électrique.
 - ❖ Planifier, intensifier et généraliser l'extension et l'électrification rurale.
 - ❖ Œuvrer pour la promotion et le développement des énergies renouvelables.

1.3. Objectifs de L'ONEE

- **Les principaux objectifs de l'ONEE consistent à :**

- ❖ Couvrir dans les meilleures conditions techniques et économiques la progression de la demande d'énergie. Réduire les tarifs moyens et hautes tensions pour atteindre des prix concurrentiels au Maroc.
- ❖ Assurer directement ou indirectement la couverture financière de programmes d'investissements de plus en plus lourds et indispensables au développement de l'économie de pays.

Devant la volonté de désengagement de l'état d'autre part, l'ONEE s'oriente vers l'approche qui consiste à avoir recours aux producteurs concessionnaires privés, à la coopération par les interconnexions des réseaux avec des puissances garanties

1.4. Activités de L'ONEE

L'ONEE opère dans les trois métiers-clés du secteur de l'électricité : la **production**, le **transport** et la **distribution**.

- ❖ ***Production d'énergie***

En tant que producteur, l'ONEE a la responsabilité de fournir sur tout territoire national et à tout instant une énergie de qualité dans les meilleures conditions économiques. Il assure cette fourniture par les moyens de production qu'il exploite directement ainsi que par les ouvrages qu'il a confiés à des opérateurs privés dans le cadre de contrats de production concessionnaire.

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 de l'environnement.

- **Potentiel d'énergies renouvelables:**

Solaire : Un rayonnement moyen de 5 kWh/m²/ j.

Eolien : 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.

- ❖ ***Transport d'énergie***

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.

❖ *Distribution d'énergie*

La satisfaction de la clientèle et le service public constituent deux axes prioritaires de l'ONEE qui œuvre en permanence pour l'amélioration de la qualité de service sur le plan technique et commercial.

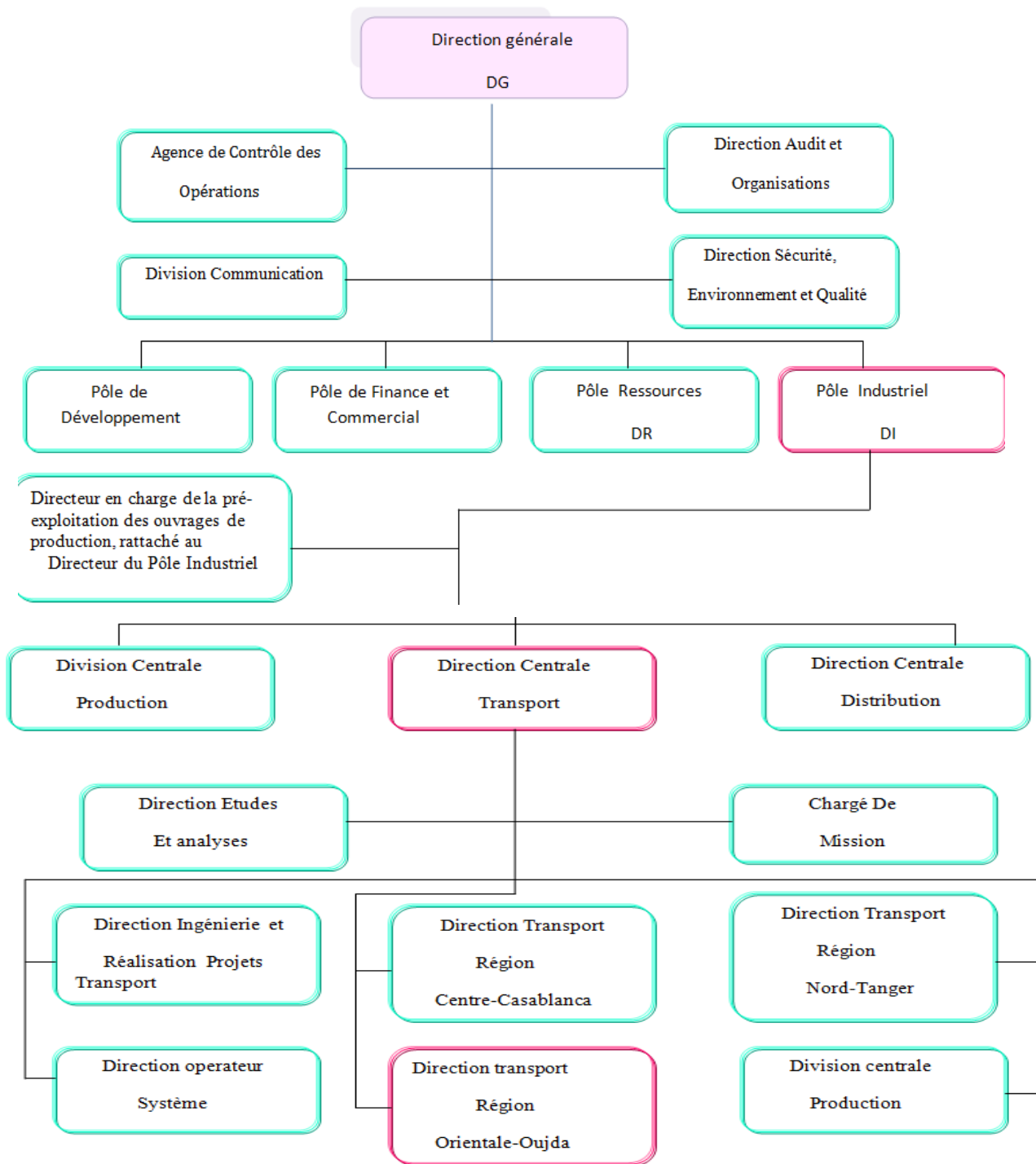
❖ *Eclairage public*

L'ONEE 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,

BENI MELLAL, BENSLIMANE, BOUARFA, CHEFCHOUANE, ESSAOUIRA, IMZOUREN, KHEMISSET, KHROUBIGA, NADOR, TANGER, TAZA et quelques quartiers du Grand CASABLANCA.

1.5. Organigramme de L'ONEE



❖ *Division Exploitation Transport FES « XF »*

La Division Exploitation Transport FES(XF) a pour missions principales :

- ❖ Assurer l'identification, l'inscription budgétaire et le suivi et la réception de l'ensemble de matériel nécessaire à la maintenance.
- ❖ Assurer l'exploitation, la maintenance corrective et préventive, la conduite des ouvrages, HTB (THT/HT) (Lignes HTB (THT/HT), postes HTB (THT/HT), partie HT dans les postes HT/MT, Comptage des clients grand compte,) sur le territoire couvert par les services Exploitations maintenance et conduite du Transport ERRACHIDIA et Fès avec la meilleure qualité de service et au moindre coût en veillant sur la sécurité des personnes et des ouvrages.

- ❖ Assurer des prestations techniques et les demandes de prestations de maintenance pour le compte des clients grand compte ONCF et Régies (RADEM, RADEEF, HOLCIM, LAFARGE, ...)
- ❖ Superviser et coordonner l'exploitation, la maintenance et la conduite des ouvrages Transport
- ❖ Elaborer et assurer le suivi de la mise en œuvre des programmes de maintenance mensuelle, annuelle et triennal dans le respect de la politique de maintenance des ouvrages Transport
- ❖ Analyser les incidents enregistrés sur le réseau entretenu par La Division Exploitation Transport de Fès; proposer des mesures d'amélioration ; élaborer le rapport d'incident préliminaire et faire dégager les actions correctives a engagé.
- ❖ Réceptionner et mettre en service les nouveaux ouvrages lignes et postes Transport.

2. Problématique et objectifs de l'étude

L'énergie éolienne apparait clairement en bonne place, car elle offre une énergie fiable, rentable, non polluante et d'une matière première gratuite. Cependant, sa connexion au réseau électrique est un peu plus compliquée à cause de son énergie fluctuante qui peut être considérée comme une perturbation affectant la puissance injectée dans le réseau et peut mettre en danger sa stabilité et même modifier sa structure.

La connexion des éoliennes au réseau électrique pose un problème de stabilité du réseau électrique. Parmi les perturbations résultantes de la connexion de ces éoliennes les fluctuations de tension. De ce fait, ce projet a pour objectif, la définition de ce phénomène puis l'élaboration des techniques d'atténuation de ces fluctuations afin d'améliorer la qualité d'énergie. Après une étude théorique sur les fluctuations de tension nous présenterons également les différentes méthodes d'amélioration modernes et traditionnelles de la qualité d'énergie. Avant de visualiser les résultats obtenus, nous avons modélisé et simulé le parc éolien de Taza connecté au réseau électrique en question en utilisant l'outil MATLAB/Simulink.

Chapitre II:

Chapitre II : Généralités, principes, modélisation de l'éolienne et présentation du Parc Eolien de Taza.

Dans ce chapitre, on décrit le système éolien. On montre ses éléments et son principe de fonctionnement, on présente les principaux types du système ainsi une description du parc éolien de Taza.

Introduction

La consommation énergétique ne peut que croître, pour deux raisons : l'une est l'accroissement accéléré de la population qui pourrait atteindre huit milliards d'individus en 2050, l'autre réside dans le fait que les pays en développement ne peuvent élever leur niveau de vie qu'en augmentant notablement leur consommation énergétique.

Malgré la crise financière de ces dernières années et ses conséquences, le marché mondial de l'éolien a pu résister, la filière éolienne représente le créneau à plus forte croissance dans la production d'électricité et maintenant utilisée comme source d'énergie dans plus de 50 pays du monde (figure 1).

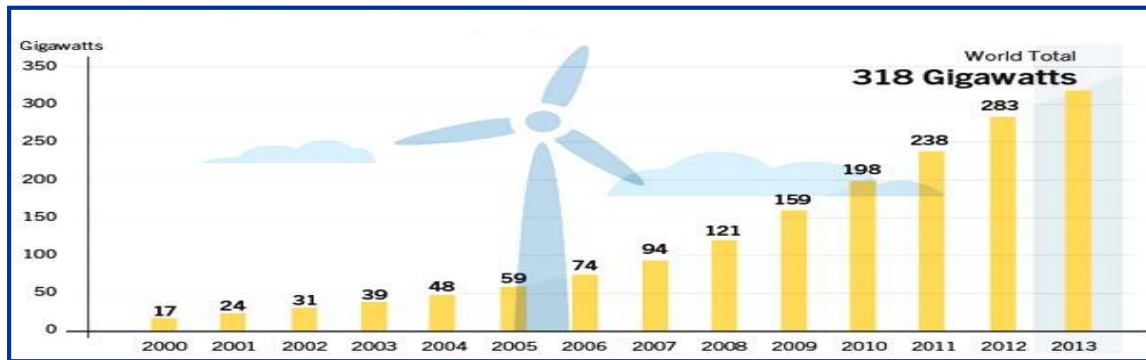


Figure 1: Capacité éolienne installée en MW dans le monde entre 2000 et 2013. [1]

1. Situation énergétique Marocaine

Dans le cadre de sa stratégie énergétique, le Maroc s'engage dans un vaste programme éolien, pour accompagner le développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique dans le pays. De ce fait, un programme très ambitieux de développement de ces énergies renouvelable a été adopté récemment par le gouvernement, le Projet Marocain Intégré de l'Energie Eolienne, s'étalant sur une période de 10 ans pour un investissement total estimé à 31,5 milliards de dirhams, permettra au pays de porter la puissance électrique installée d'origine éolienne de 280 MW en 2010 à 2000MW à l'horizon 2020.

1.1. Projets et objectifs du programme éolien

Le développement de 1720 MW de nouveaux parcs éoliens à l'horizon 2020 est prévu dans le cadre du projet éolien :

- ✦ 720 MW en cours de développement à **Tarfaya** (300 MW), **Akhfenir** (200 MW), **Bab El Oued** (50 MW), **Haouma** (50 MW) et **Jbel Khalladi** (120 MW)
- ✦ 1 000 MW prévus sur 5 nouveaux sites choisis pour leur grand potentiel: **Tanger 2** (150 MW), **Koudia El Baida** à Tétouan (300 MW), **Taza** (150 MW), **Tiskrad** à Laayoune (300 MW) et **Boujdour** (100 MW).

Objectifs :

- ✦ Augmenter la part de l'énergie éolienne dans la capacité électrique totale à 14% à l'horizon 2020.
- ✦ Atteindre une capacité de production à partir de l'énergie éolienne de 2 GW et une capacité de production annuelle de 6600 GWh, correspondant à 26% de la production électrique actuelle.
- ✦ Economiser en combustibles 1,5 million de tonnes équivalent pétrole annuellement, soit 750 millions de dollars US, et éviter l'émission de 5,6 millions de tonnes de CO₂ par an.

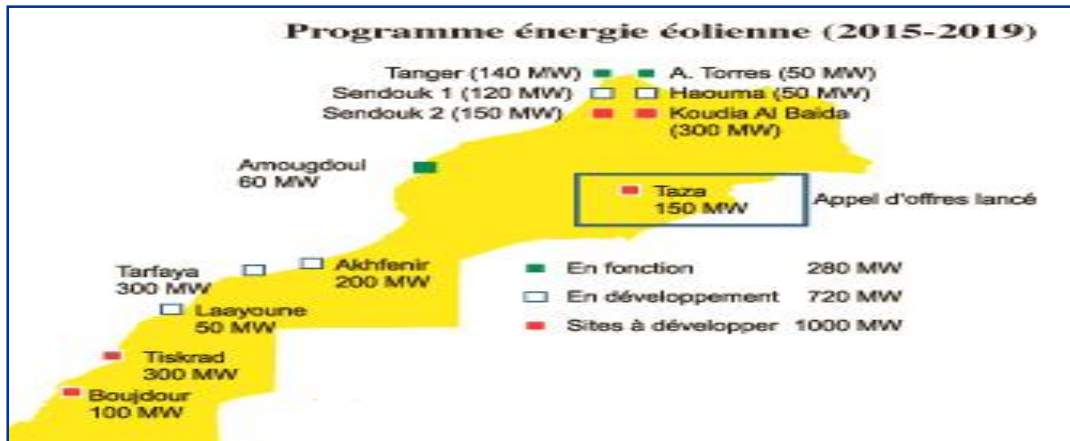


Figure 2: Programme d'énergie éolienne au Maroc (2015-2019). [2]

1.2. Le gisement éolien au Maroc

Le Maroc bénéficie d'un gisement éolien important avec des régions dépassant 10 mètres par seconde (**10 m/s**) de vitesse annuelle moyenne du vent, en particulier :

Au Nord, au Nord-Est et au Sud :

- ✦ **Essaouira, Tanger et Tétouan** avec des vitesses moyennes annuelles entre **9,5 m/s à 11 m/s** à
- ✦ **Tarfaya, Taza et Dakhla** avec des vitesses moyennes annuelles entre **7,5 m/s à 9,5 m/s** à Une première carte éolienne du pays a montré que la zone **Nord (Tanger à Tétouan)** et la bande côtière allant de **Tarfaya** jusqu'à **Lagouira** présentent des sites exceptionnels avec des vents réguliers et des vitesses moyennes suffisantes pour développer des projets rentables :

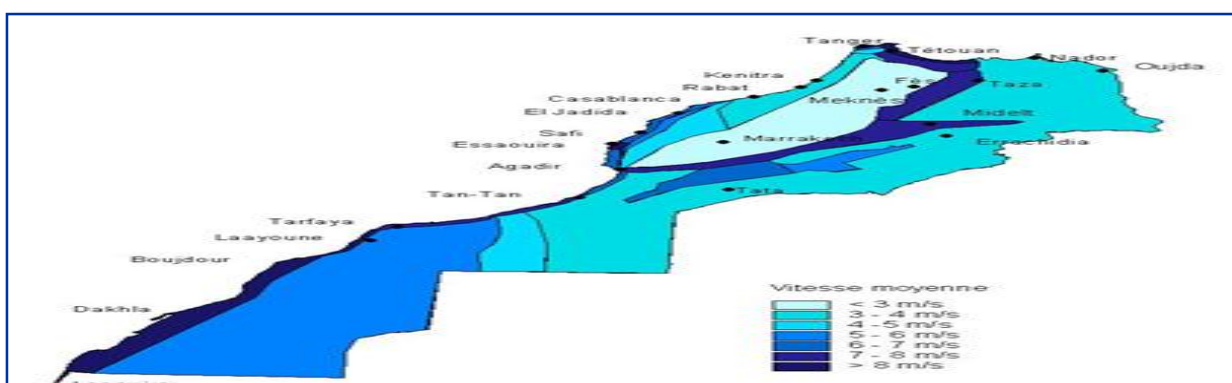


Figure 3: Carte de la vitesse moyenne du vent (m/s). [3]

2. L'énergie éolienne

2.1. Définition

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui utilise la force motrice du vent, qui est une source d'énergie propre, renouvelable quasi instantanément et quasi infinie à l'échelle humaine et terrestre cette force peut être utilisée pour produire de l'énergie mécanique (système de pompage par exemple) ou pour produire de l'électricité (dans le cas d'un aérogénérateur). Mais les éoliennes sont-elles véritablement intéressantes par rapport aux énergies actuelles et leur principe de fonctionnement leur permet d'être compétitives?

Pour répondre à cette problématique posée, nous allons donc voir tout d'abord quel est leur fonctionnement, comment tirer un maximum de l'énergie éolienne et quelles peuvent être les différentes applications de cette énergie

👉 Comment ça marche ?

Pour produire de l'énergie électrique, l'éolienne est reliée au réseau électrique par l'intermédiaire d'un générateur électrique pour produire du courant continu ou alternatif (Figure 4).

Pour convertir l'énergie du vent en énergie électrique. [4]

- ✈ La turbine extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique, la vitesse de rotation de l'éolienne est adaptée à celle de la génératrice par un multiplicateur de vitesse.
- ✈ La génératrice convertit l'énergie mécanique en énergie électrique, transmise ensuite directement ou indirectement au réseau électrique.

Le contrôle de la puissance fournie peut se faire soit au niveau de la turbine soit au niveau de la génératrice.

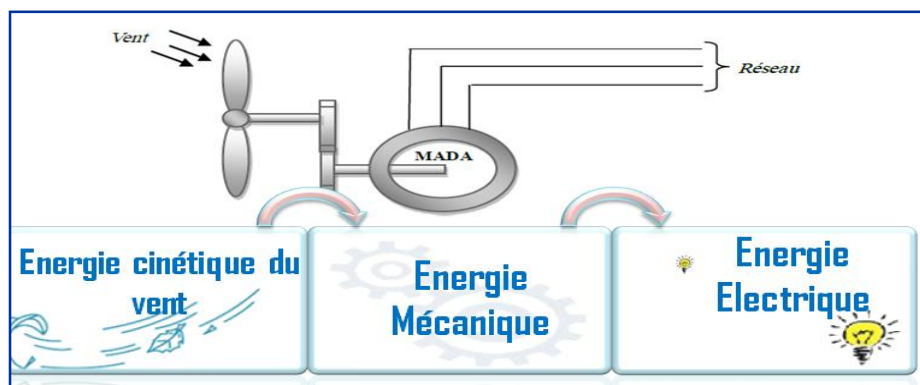


Figure 4: Conversion de l'énergie cinétique du vent

2.2. Description d'une éolienne

Il existe deux grandes familles d'éoliennes : celle à **axe vertical** et celle à **axe horizontal** (figure5). 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. Une éolienne comporte les éléments suivants:

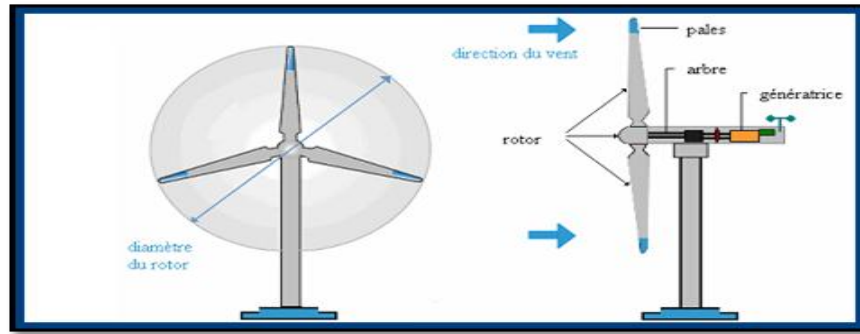


Figure 5: Eolien à axe horizontal. [5]

- ✈ Un mat : Représentant un support permettant d'installer les pales auxquelles le vent peut les tourner à une vitesse dominante.
- ✈ Trois pales: Permettant d'accueillir le vent pour le transformer en énergie via le système de conversion.
- ✈ Une génératrice électrique : Permettant de produire de l'énergie électrique.
- ✈ Une interface, génératrice-réseau électrique, qui diffère selon les modèles permettant d'interconnecter l'éolienne au réseau électrique

3. Contrôle de la puissance fournie par une éolienne

Le contrôle de la puissance au niveau permet d'optimiser l'extraction de l'énergie pour les vents faibles et moyens. [6]

3.1. Fonctionnement à vitesse fixe

Pour les éoliennes à vitesse fixe, la génératrice asynchrone est directement couplée au réseau, sa vitesse Ω est alors imposée par la fréquence du réseau et par son nombre de paires de pôles. Le couple mécanique entraînant tend à accélérer la vitesse de la génératrice. Cette dernière fonctionne alors en hyper synchrone et génère de la puissance électrique.

3.2. Fonctionnement à vitesse variable

Les éoliennes à vitesse variable sont les plus utilisées pour la production d'énergie électrique. En effet, ces dernières contrairement aux éoliennes à vitesse fixe, fonctionnent sur une large plage de vitesses permettant ainsi une maximisation des puissances extraites pour des faibles vitesses du vent et le maintien d'une puissance constante pour des vitesses de vent élevées.

✋ Pourquoi les éoliennes à vitesse variable ?

La caractéristique générale de la puissance convertie par une turbine éolienne en fonction de sa vitesse est représentée sur la Figure 6:

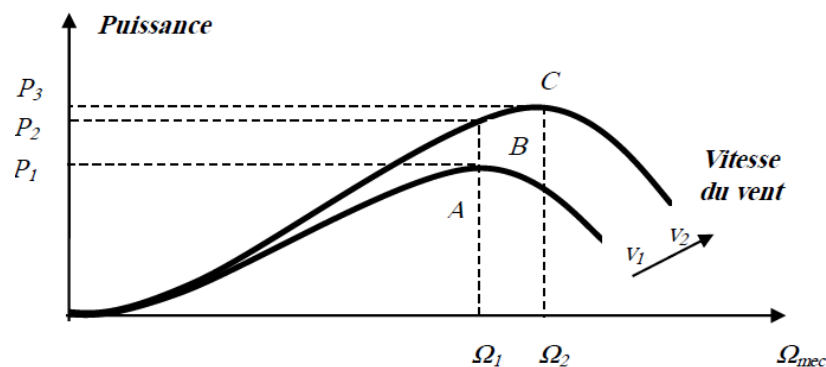


Figure 6: Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique. [5]

Pour une vitesse du vent $V1$ et une vitesse mécanique de la génératrice $\Omega1$, on obtient une puissance nominale $P1$ (point A). Si la vitesse du vent passe de $V1$ à $V2$ et que la vitesse de la génératrice reste inchangée (cas d'une éolienne à vitesse fixe), la puissance $P2$ se trouve sur la 2^{ème} caractéristique (point B). La puissance maximale se trouve ailleurs sur cette caractéristique (point C). Si on désire extraire la puissance maximale, il est nécessaire de fixer la vitesse de la génératrice à une vitesse supérieure à $\Omega2$. Il faut donc rendre la vitesse mécanique variable en fonction de la vitesse du vent pour extraire le maximum de la puissance générée. En conséquence et afin de maximiser la puissance convertie, la vitesse de la turbine doit être adaptée par rapport à la vitesse du vent [5].

4. Fonctionnement et production d'électricité

4.1. Système utilisant la génératrice asynchrone à double alimentation

Dans cette configuration le stator de la machine asynchrone est connecté directement au réseau et le convertisseur de puissance se trouve sur le circuit rotorique (Figure7).

- **Convertisseur coté rotor:** permet de contrôler la puissance active et réactive d'une façon indépendante.
- **Convertisseur coté réseau:** permet de contrôler le coefficient de puissance pour opérer à $\cos(\varphi)=1$ et de régler la tension du circuit DC.

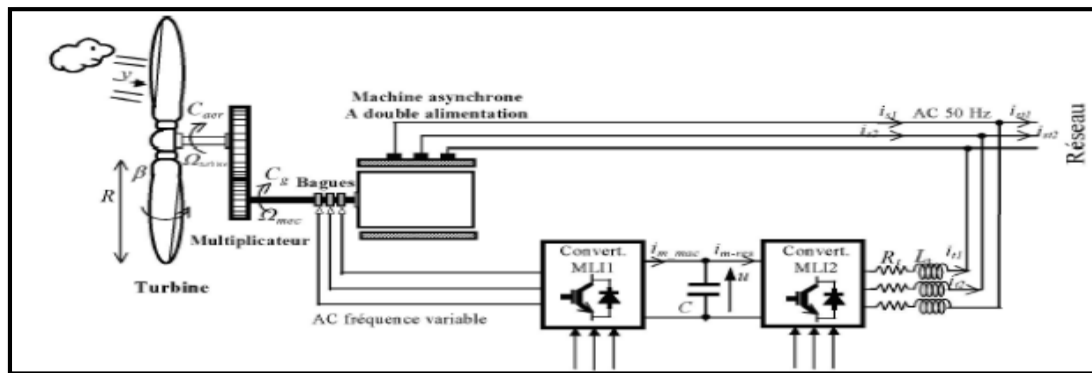


Figure 7: Schéma fonctionnel de la MADA. [5]

Aujourd'hui les générateurs utilisent souvent la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) comme génératrice car cette dernière permet un fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable ce qui donne la possibilité de produire le maximum de puissance possible sur une large plage de variation de la vitesse du vent. Plus que ça elle a la possibilité de régler la tension au point de connexion où elle est injectée, Chère par rapport à la machine asynchrone, mais elle est moins par rapport à la machine synchrone

4.2. La puissance extraite du vent

La puissance mécanique P_{mt} extraite du vent peut être déterminée au moyen de l'expression suivante: [4][5]

$$P_{mt} = \frac{\rho S V^3}{2}$$

Avec: ρ : masse volumique ; V : vitesse du vent en m/s

Puissance récupérable: La puissance du vent contenue dans un cylindre de section S [6]:

Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent. [6]

La puissance récupérable par une éolienne est donc :

$$P_m = C_p \cdot P_{mt} = \frac{\rho S V^3 C_p(\lambda, \beta)}{2}$$

Avec

C_p : Coefficient de puissance ; λ vitesse relative : $\lambda = \frac{R\Omega}{V}$

Ω : vitesse mécanique de la turbine (rad/s) ; R : rayon de la turbine (m)

Le coefficient C_p correspondant au rendement aérodynamique de la turbine.

4.3. Types de fonctionnement de la MADA

Pour les générateurs à base des machines asynchrones, le glissement est défini comme la différence entre la vitesse mécanique Ω , et la vitesse dite synchrone Ω_s [7].

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s}$$

Pour les machines à rotor bobiné, la variation de la vitesse mécanique consiste à varier le glissement en changeant la valeur de la résistance du circuit rotorique. Au lieu de dissiper cette puissance, il est important de la renvoyer vers le réseau via deux convertisseurs d'électronique de puissance reliés par un bus continu. En conséquence, la puissance transitant à travers le circuit rotorique est rendue variable et deux fonctionnements peuvent être distingués :

- ❖ **Hyper-synchrone** : Si $g < 0$, la puissance extraite du circuit rotorique est envoyée au réseau à travers les convertisseurs de puissance → **Le rotor fourni de la puissance au réseau électrique**
- ❖ **Hypo-synchrone** : Si $g > 0$, la puissance circule alors du réseau vers le circuit rotorique → **Le rotor absorbe la puissance**

La bidirectionnalité des convertisseurs autorise le fonctionnement hyper- et hypo- synchrone. Ils sont dimensionnés pour transiter la puissance rotorique qui représente environ 30% de la puissance nominale. C'est le principal intérêt de cette technologie.

5. Parc Eolien de Taza

Introduction

L'ONEE a donc lancé un vaste projet faisant appel à l'énergie éolienne et au solaire, le but étant d'augmenter la production d'électricité pour le Maroc, mais aussi de vendre à l'Europe cette électricité verte. Ce projet renforcera la sécurité d'alimentation de la clientèle et permettra au Maroc de s'ouvrir à la concurrence du marché **Euro-maghrébin** de l'électricité et contribuera, à la satisfaction de la demande croissante d'électricité, à la constitution d'une expertise de haut niveau dans le domaine éolien et la promotion d'une industrie éolienne C'est dans ce contexte que le Projet éolien de Taza - Touahar s'inscrit.

Le Projet éolien de Taza -Touahar sera réalisé dans le cadre d'un partenariat public-privé où l'ONEE, la Société des Investissements Energétiques (SIE) et le Fonds Hassan II pour le Développement Economique et Social s'associeront au Consortium EDF EN Mitsui formant une Société de Projet. Cette société de droit marocain, sera chargée du développement, de la conception, du financement, de la construction, de l'exploitation et de la maintenance du Projet. [8]

5.1. Caractéristiques du parc

5.1.1. Description géographique du projet.

Le Parc éolien se trouve dans l'Est du Maroc, dans la zone de **Touahar**, au niveau de 2 collines à environ 16 km de la ville de Taza. La zone du Projet se situe entre les chaînes montagneuses de l'Atlas (Boutonnière de Tazekka) et la chaîne Préarifaine. [8]

5.1.2. Fiche technique du Parc

❖ **Site Touahar, situé à 15 km de la ville de Taza.**

- **Nombre d'éoliennes : 50**
 - 10 éoliennes : ECO 100.
 - 40 éoliennes : ECO 110
- **Vitesse moyenne annuelle du vent:**
 - ECO 100: **10 m/s**
 - ECO 110: **8,5 m/s**
- **Vitesse min pour la production d'électricité : 3 m/s**
- **Puissance totale projetée du parc : 150 MW**



5.1.3. Raccordement du parc

D'après l'étude qui a été effectuée le raccordement du parc au réseau national se fera par le rabattement de la ligne 225kV El Ouali -Taza n°25.114 sur le nouveau parc de 225KV

✈ Le schéma de raccordement est le suivant (voir annexe 1)

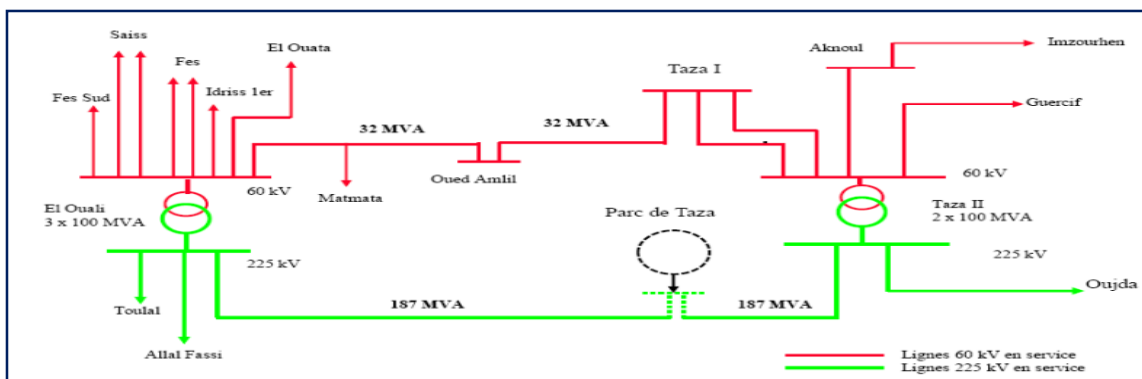


Figure 8 : Schéma de raccordement Du parc au réseau [8]

	Puissance de court-circuit
Parc	1800 MVA
Jeu de barre d'el Ouali	3000MVA
Jeu de barre de Taza	1000MVA

Tableau 1 : Puissance de court-circuit du Parc [9]

Conclusion

Une brève description du gisement éolien ainsi en particulier le parc éolien de TAZA, a été présenté dans ce chapitre. Quelques notions principales sur les différents types d'éoliennes aussi leurs principes de fonctionnement. Mais l'intégration de ces aérogénérateurs dans le réseau cause des perturbations qui ont un impact sur la stabilité du réseau électrique, le chapitre qui suit définit ces perturbations et les solutions les plus adéquates pour les atténuer.

Chapitre III:

Chapitre III : Impact de l'intégration des éoliennes dans le réseau électrique

Introduction

L'énergie électrique est généralement distribuée sous la forme de trois tensions constituant un système sinusoïdal triphasé. Habituellement, les systèmes électriques génèrent, transportent et distribuent la puissance à une fréquence fixe telle que 50 ou 60 hertz tout en maintenant une tension raisonnable et constante. L'objectif désiré étant un courant alternatif avec une forme sinusoïdale la plus idéale possible. Les parcs éoliens n'avaient qu'une seule contrainte : produire quand il était possible de produire. De plus, le plan de protection était fait de telle sorte qu'en cas de défaut, le parc se déconnecte du réseau puis s'arrête [5], qui avait comme conséquence la destruction de la qualité de l'énergie ainsi que la totalité des équipements électriques exigent une énergie électrique de bonne qualité.

1. Qualité de Production

Le terme de « **Qualité De Production** » se réfère à la stabilité de tension, à la stabilité de la fréquence et au contenu harmonique des grandeurs générées. Si l'éolienne est raccordée à un réseau électrique faible (c'est-à-dire reliée au réseau électrique principal, au moyen d'une ligne ayant une faible capacité de transport d'énergie), il peut y avoir des problèmes de chute de tension et d'excursion de puissance. Les mesures de puissance et de la qualité du réseau électrique prennent beaucoup d'importance. Parallèlement, il existe un besoin croissant pour une meilleure qualité et une plus grande fiabilité du réseau électrique.

Les critères de qualité de l'électricité sont directement issus de l'observation des perturbations électromagnétiques des réseaux électriques. Les facteurs qui sont susceptibles d'affecter la qualité de l'énergie sont :

- ✦ La variation de fréquence
 - ✦ Les fluctuations de tension
 - ✦ Les creux de tension
 - ✦ Les courants ou tensions harmoniques
 - ✦ Le déséquilibre
- ☞ Le schéma suivant montre une classification des différents phénomènes de qualité de puissance, apparaissant dans le fonctionnement des éoliennes :

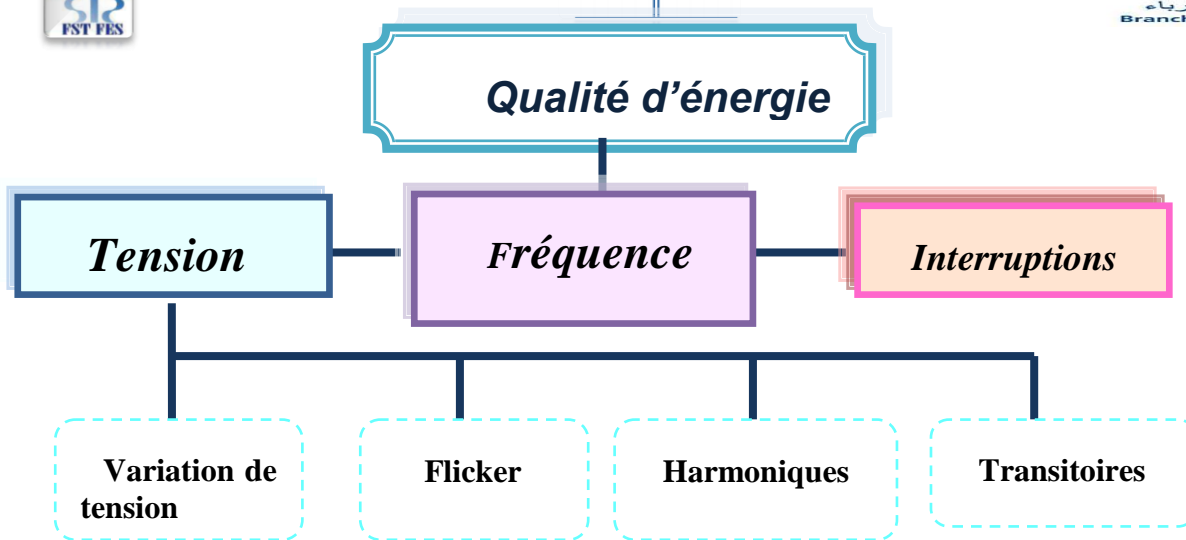


Figure 9 : Qualité d'énergie.

1.1. Classification de différents phénomènes de qualité de Production

1.1.1. Creux de tension

Un creux de tension est une chute brutale de l'amplitude de la tension :

Sa profondeur (ΔU) : Située entre 90% et 10% de la tension nominale U_n [7].

Sa durée (Δt) : Peut durer de 10 ms à 3 min [7].

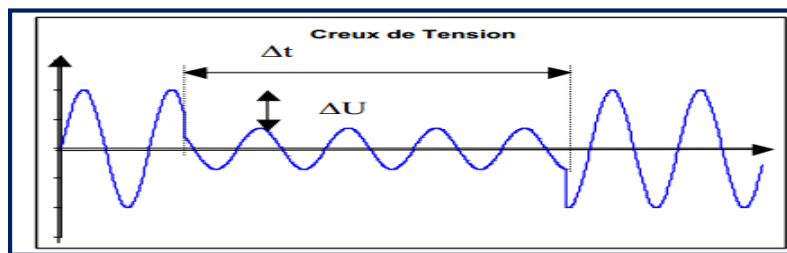


Figure 10: Creux de Tension. [7]

Origines :

- ✓ Les courts-circuit affectant le réseau électrique ou les installations raccordées
- ✓ Démarrage des moteurs de forte puissance

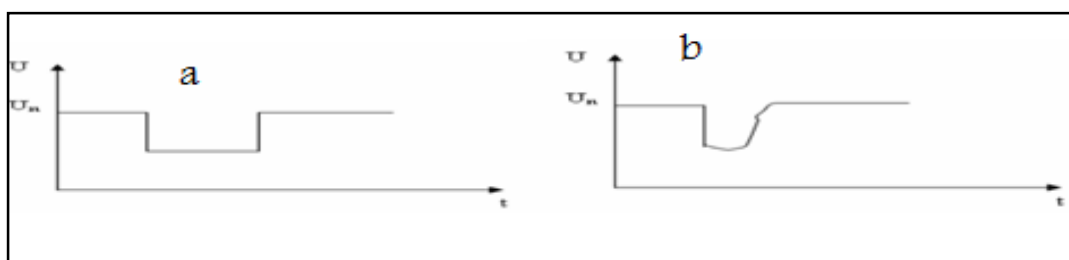


Figure 11: Creux de tension a) provoquées par un court-circuit b) provoquées par un démarrage brusque d'un moteur. [10]

1.1.2. Les variations Lentes de Tension

La valeur efficace de la tension varie continuellement en raison de modifications des charges alimentées par le réseau. Les appareils usuels peuvent supporter sans inconvénients des variations lentes de tension dans une plage d'au moins $\pm 10\%$ de la tension nominale.

1.1.3. Les variations rapides de tension ou Flicker

Des fluctuations de tension, répétitives ou aléatoires est une diminution de la valeur efficace de la tension de moins de 10 % sont provoquées par des variations rapides de puissance produite par les éoliennes.

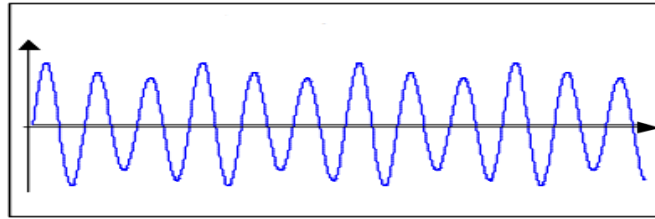


Figure 12: Fluctuations de Tension. [7]

Origines :

- ✓ Connexion/déconnexion des éoliennes
- ✓ Variations rapides de puissance produite par les éoliennes

1.1.4. Les Harmoniques

Dans de nombreux cas le courant consommé par la charge n'a plus une forme sinusoïdale pure. Les éoliennes interfacées au réseau via des convertisseurs électroniques de puissance, génèrent malheureusement des harmoniques. Ces convertisseurs équipés en grande majorité des transistors IGBT, génèrent des harmoniques hautes fréquences, le passage de ces courants harmoniques dans les impédances du réseau électrique peut entraîner des tensions harmoniques au point de raccordement et alors polluer les consommateurs alimentés par le même réseau électrique.

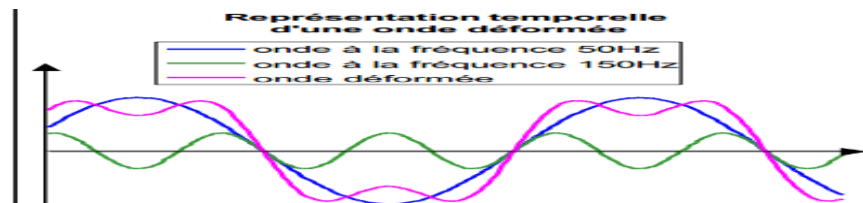


Figure 13: Harmonique. [7]

1.1.5. Le Déséquilibre

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.

1.1.6. Variation de Fréquence

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

Afin de bien connaître les pollutions des réseaux électriques, par conséquent, trouver les meilleures méthodes de dépollution, je vais prendre comme perturbation les variations rapides de tension ou Flicker. Les origines, les effets, les mesures et solutions de cette perturbation seront analysés en détails dans ce qui suit.

2. Papillotement (Flicker)

Dans tous les pays industriels les distributeurs d'énergie; comme les exploitants d'installation électrique doivent respecter des tolérances de variations d'amplitude et de fréquence sur leurs réseaux, sinon le bon fonctionnement des équipements n'est plus garanti. À cet effet, depuis 50 ans le Flicker ou papillotement [11] a fait l'objet de nombreuses publications. C'est un phénomène maintenant bien défini, analysé et mesurable, pour lequel il existe des éléments de prévision et des remèdes.

2.1. Définition

Le Flicker de lumière [11] ou papillotement est défini comme impression subjective de fluctuation de la luminance. C'est un phénomène de gêne physiologique visuel qui provoque une fatigue physique et psychique pour les usagers et les utilisateurs de lampes alimentées par une source commune à l'éclairage et raccordée à proximité de la charge perturbatrice. Les applications de l'électricité ne sont normalement pas affectées par ces phénomènes tant que la variation d'amplitude reste inférieure à 10%. [12]

Dans le cas des éoliennes, ces variations sont dues aux fluctuations de la vitesse du vent, aux limites mécaniques de l'éolienne (par exemple du pitch control) et à l'effet d'ombre causé par le passage des pales devant le mât.

2.1.1. Flicker en fonctionnement continu

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 leur aérodynamisme [13].

2.1.2. Flicker lors des opérations de couplage.

Ces variations sont dues aux brusques variations de puissance active et réactive qui apparaissent lors de la magnétisation des machines, le basculement d'une zone de fonctionnement à un autre produit également du Flicker. Les commutations typiques sont la mise on/hors service des éoliennes [13].

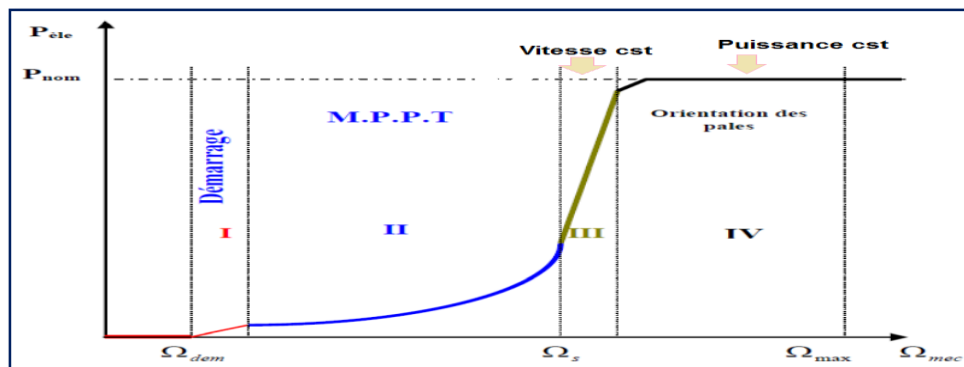


Figure 14: Caractéristique puissance vitesse mesurée pour une éolienne de 1.5 MW [5]

2.2. Les origines de flicker

Comme les éoliennes ont une influence sur le réseau électrique ses générateurs sont aussi très sensibles aux perturbations du réseau et ont tendance à se déconnecter rapidement; par exemple lors d'un creux de tension (dès que la valeur de la tension est inférieure à 80% de la tension nominale) ou lors d'une variation de la fréquence l'enclenchement des générateurs peut provoquer des variations rapides de tension dues à des variations rapides de puissance absorbée ou produite par des installations éoliennes.

2.2.1. chute de tension

Le système étudié est un réseau radial avec une ligne de transmission via une source de tension de 225 kV auquel est connectée une ferme éolienne de 150 MW, comme le montre la figure 15. [14]

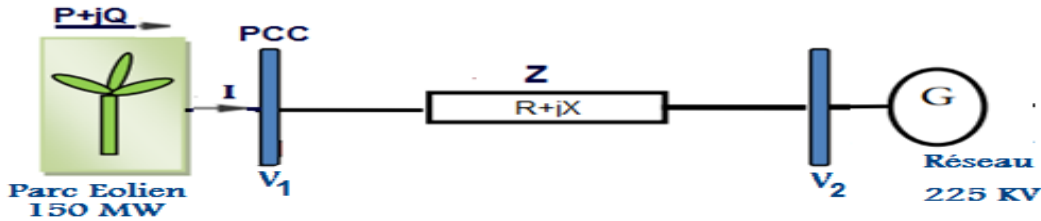
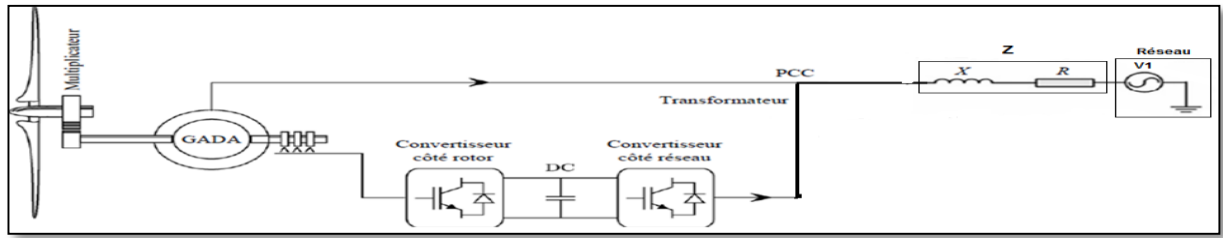


Figure 15 : Schéma d'une éolienne connectée au réseau [14] [5]

X:	réactance de la ligne	R:	résistance de la ligne
V₁	tension nominale du réseau	V₂	Tension au PCC
P:	puissance active du parc	Q:	puissance réactive du parc
Z:	L'impédance de ligne	I:	courant de la ligne
S_{cc}:	puissance de court-circuit (au PCC)	S:	puissance apparente de la charge

✓ Schéma équivalent :

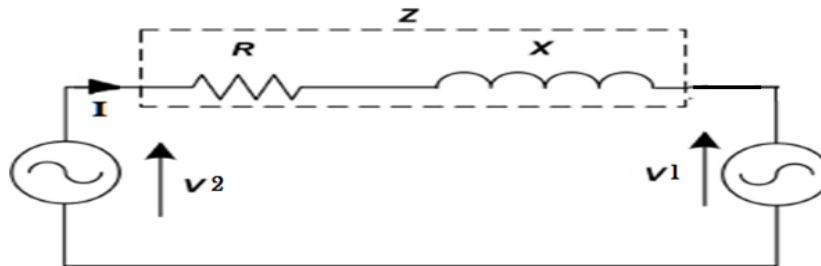


Figure 16: Schéma équivalent du parc connecté au réseau. [14]

Considérons le Schéma équivalent ci-dessous. La chute de tension est due au courant I dans l'impédance.

V2 étant pris comme référence

$$\Delta V = ZI = V_1 - V_2$$

La puissance apparente :

$$S = V_2^* I = P + jQ$$

$$I = (P - jQ) / V_2$$

$$\Delta V = \frac{(R + jX)(P - jQ)}{V_2}$$

$$\Delta V = \frac{(RP + XQ)}{V_2} + j \frac{(XP - RQ)}{V_2}$$

$$\Delta V = \Delta V_{Re} + j \Delta V_{Im}$$

- La chute de tension dépend de la puissance active et réactive de la charge.

$$\Delta V = V_1 - V_2 \rightarrow V_1 = V_2 + \Delta V$$

Le module de V_1 :

$$|V_1|^2 = \left(V_2 + \frac{RP+XQ}{V_2}\right)^2 + \left(\frac{XP-RQ}{V_2}\right)^2$$

Et comme :

$$\frac{XP-RQ}{V_2} < V_2 + \frac{RP+XQ}{V_2}$$

On fait l'approximation

$$|V_1|^2 = \left(V_2 + \frac{RP+XQ}{V_2}\right)^2$$

D'où

$$\Delta V = V_1 - V_2 = \frac{(RP+XQ)}{V_2}$$

La chute de tension aux bornes de la ligne de connexion d'une éolienne au réseau peut être approximée par la relation suivante :

$$\frac{\Delta V}{V_2} = \frac{(PR+QX)}{V_2^2}$$

2.2.2. Chute de tension pour un réseau HT

La réactance X est le paramètre prédominant dans l'impédance du réseau HT c'est-à-dire $R \ll X$, on peut écrire que :

$$\frac{\Delta V}{V_2} = \frac{Q \cdot X}{V_2^2} = \frac{Q}{S_{cc}}$$

- ❖ La puissance générée par les éoliennes est d'origine fluctuante, ce qui entraîne d'après l'expression précédente des fluctuations de tension dans la zone du réseau proche du point de connexion de ces éoliennes. Dans le réseau de transport constitué de ligne HT et THT, les variations de tension sont essentiellement induites par les transits de **puissance réactive**.
- ❖ Les éoliennes actuellement connectées au réseau de transport doivent donc participer au réglage de la tension via un réglage de la puissance réactive

3. Caractérisation et normalisation de l'effet des charges fluctuantes

3.1. Conséquences de Flicker

La plupart des appareils ne sont toutefois pas perturbés par les fluctuations de tension lorsque la variation étant inférieure aux limites contractuelles. Par contre, ces fluctuations peuvent, pour différents types d'éclairage, provoquer un papillotement du flux lumineux. Cette gêne visuelle est perceptible pour une variation de 1% de la tension, telle qu'une petite variation de la tension d'alimentation peut avoir un impact fort sur l'intensité lumineuse d'une lampe [11][15]. (Figure17)

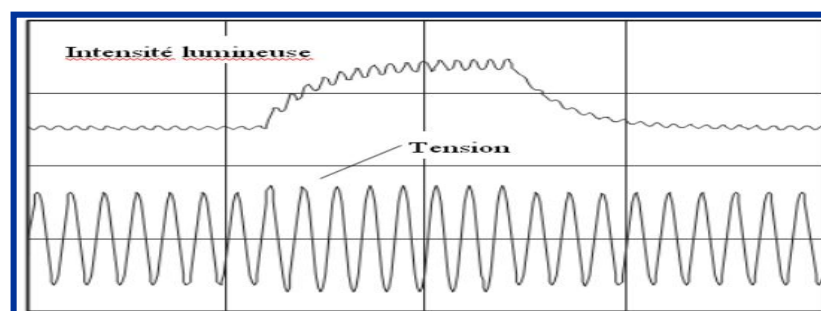


Figure 17 : Variation de l'intensité lumineuse due à une fluctuation de tension [12]

3.2. Valeurs indicatives du Flicker

Le papillotement, ou Flicker, est un paramètre important de mesure de la qualité de l'énergie électrique. Dans la définition du Flicker faite auparavant on admet que les fluctuations d'amplitude inférieure à 10%, et de période inférieure à une heure peuvent être considérées comme étant Flicker ou papillotement [11][15], En revanche, les indices utilisés pour évaluer le papillotement de longue et courte durée sont respectivement l'indices de sévérité le P_{st} et le P_{st}

3.2.1. Définition des coefficients de sévérité P_{st} et P_{lt}

Les indicateurs de la sévérité du flicker sont :

- ❖ P_{st} : Flicker à court terme quantifié sur 10 min
- ❖ P_{lt} : Flicker à long terme quantifié sur 120 min

NB : En fonctionnement établi : $P_{st} = P_{lt}$

Lors des opérations de couplage : $P_{st} \neq P_{st}$

La perception du papillotement des lampes d'éclairage ou perception du Flicker dépend de la fréquence et de l'amplitude des fluctuations. Une caractéristique de perception de Flicker est définie par la CEI. (Figure 18)

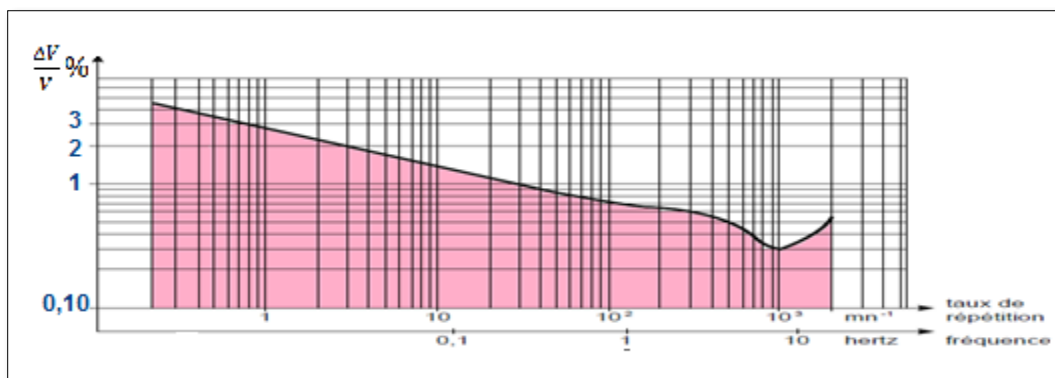


Figure 18 : Caractéristique de perception de Flicker [15]

Avec :
$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{XQ}{V^2} = \frac{Q}{Scc}$$

Cette caractéristique permet d'évaluer si la valeur du Flicker est acceptable :

- ❖ Pour que l'effet de flicker soit acceptable le point de mesure doit se situer dans la zone colorée.

4. Évaluation et méthodologie de mesure de Flicker

4.1. Limite de Flicker

Le calcul du coefficient de flicker a pour rôle de vérifier que le raccordement du parc éolien n'entraîne pas un niveau inacceptable de fluctuations de tension au point de connexion commun.

Pour établir cette vérification on définit :

a. Niveaux de compatibilité

Les niveaux de compatibilité constituent les limites d'émission telles que la sommation des effets individuels conduise à des niveaux perturbateurs restant inférieurs aux niveaux de compatibilité.

b. Niveaux de planification

Le niveau de planification est sous la responsabilité de l'opérateur de réseau, les niveaux de planification qui fournissent une marge par rapport aux niveaux de compatibilité.

Chaque site perturbateur peut bénéficier des niveaux d'émission/planification pour le P_{lt} et pour le P_{st} , le Flicker est acceptable puisqu'il ne dépasse pas les valeurs limites donnée par la norme CEI 61 400-21. (Tableau 2)

Facteur de Flicker	Niveau de planification		Niveau d'émission
	MTA	MTB	MTA & MTB
P_{st}	0,9 à 0,8	0,8	0,35
P_{lt}	0,6 à 0,7	0,6	0,25

Tableau 2 : Limites de Flicker pour MTA et MTB

4.2. Méthode de calcul analytique

A chaque fois, trois calculs de flicker sont réalisés:

- ✓ P_{lt} en fonctionnement établi (en fonctionnement établi, $P_{lt} = P_{st}$).
- ✓ P_{st} lors des opérations de couplage.
- ✓ P_{lt} lors des opérations de couplage.

4.2.1. P_{lt}/P_{st} en fonctionnement établi

La valeur du P_{st} dépend généralement d'un coefficient de flicker « c » et de la puissance apparente de court-circuit au PCC:

$$P_{st\Sigma} = P_{lt\Sigma} = \frac{1}{S_k} \times \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{wt}} (c_i(\Psi_k, v_a) \times S_{n,i})^2}$$

- Avec:
- $C(\Psi_k, v_a)$: Coefficient de flicker
 - S_n Puissance apparente nominale
 - S_n Puissance apparente du court-circuit
 - Ψ_k Angle de l'impédance = $\arctg(X/R)$
 - N_{wt} Nombre de turbines

a. Détermination du coefficient de Flicker $C(\Psi_k, v_a)$:

- ❖ Si le producteur n'a pas fourni de fiche de test selon la norme CEI le P_{st} en fonctionnement établi est calculé selon la norme CEI 61400-21 avec des valeurs types de coefficients « c » données pour les familles 2 à 6. (Voir annexe 2).
- ❖ Si le test des aérogénérateurs a été réalisé et le rapport écrit selon la norme CEI 61 400-21, le coefficient de flicker en régime permanent « $c(\Psi_k, v_a)$ » est connu pour 4 angles d'impédance Ψ_k ($30^\circ, 50^\circ, 70^\circ, 85^\circ$) et pour 4 vitesses moyennes annuelles de vent ($6\text{m/s}, 7,5\text{m/s}, 8,5\text{m/s}, 10\text{m/s}$). (Tableau 3)

Ψ_k	30°	50°	70°	85°
	[25 ; 40]] 40 ; 60]] 60; 77]] 77; 90]
$C(\Psi_k, v_a): V_a=6 \text{ m/s}$	2,6	2,1	1,5	1,1
$C(\Psi_k, v_a): V_a=7,5 \text{ m/s}$	2,9	2,4	1,7	1,2
$C(\Psi_k, v_a): V_a=8,5 \text{ m/s}$	3,0	2,5	1,7	1,3
$C(\Psi_k, v_a): V_a=10 \text{ m/s}$	3,2	2,6	1,7	1,4

Tableau 3: Valeurs de coefficient de flicker selon la norme CEI 61 400-21. (Annexe 3)

4.2.2. Le P_{lt}/P_{st} lors des opérations de couplage :

On évalue alors le P_{lt} et le P_{st} selon la norme CEI 61 400-21 :

$$P_{st\Sigma} = \frac{18}{S_K} \times \left(\sum_{i=1}^{N_{wt}} N_{10m,i} \times (k_{f,i}(\Psi_k) \times S_{n,i})^{3,2} \right)^{0,31}$$

$$P_{lt\Sigma} = \frac{8}{S_K} \times \left(\sum_{i=1}^{N_{wt}} N_{120m,i} \times (k_{f,i}(\Psi_k) \times S_{n,i})^{3,2} \right)^{0,31}$$

Avec :

N_{10} : Nombre de séquences sur 10 min $k_f(\Psi_k)$: Coefficient de Flicker
 N_{120} : Nombre de séquences sur 120 min N_{wt} : Nombre de turbine au PCC

a. Détermination du coefficient de Flicker $k_f(\Psi_k)$:

- ❖ Si le producteur n'a pas fourni de fiche de test selon la norme CEI, le P_{lt}/P_{st} lors des opérations de couplage est calculé selon la norme CEI 61400-21 avec des valeurs typiques des coefficients « $k_f(\Psi_k)$ » données pour les familles 3 et 4 des éoliennes et à partir des données constructives et de la description du fonctionnement des aérogénérateurs (appels de puissance active et réactive lors du déroulement des séquences et nombre de séquences sur 10 min et sur 120 min) pour les autres familles. (Voir annexe 2)
- ❖ Si le test des aérogénérateurs a été réalisé et le rapport écrit selon la norme CEI 61400-21, le Coefficient de flicker lors des opérations de couplage « $k_f(\Psi_k)$ » pour 4 angles d'impédance (30, 50, 70, 85).

Le P_{st} et le P_{lt} sont évalués à partir de la description des événements des séquences :

- ✓ Couplage à vent minimal
- ✓ Couplage et montée en charge à vent nominal
- ✓ Basculement d'une machine sur l'autre ou changement de couplage (si le cas se présente).

☞ **Remarque** : En absence de valeurs pour N_{10} et N_{120} , on prendra :(Tableau 4)

	N_{10}	N_{120}
Couplage à vent minimal	10	120
Couplage à vent nominal	1	12
Basculement	10	120

Tableau 4 : Valeurs de nombres de séquences

4.3. Calcul d'émission de Flicker pour le parc éolien de Taza

Puissance Nominale du Parc(MW)	Puissance apparente nominale(MVA)	Nombre de turbines	Point de Mesure	S_{cc} (MVA)	Emission de Flicker		
	$\cos(\varphi)=0,89$				continu	Lors d'opérations de couplage	
	$\Psi_k=87^\circ$					P_{st}	P_{lt}
					$P_{st} = P_{lt}$	P_{st}	P_{lt}
150	150,01	50	<i>PCC</i>	1800	0,014	0,023	0,018
			<i>Taza</i>	1000	0,026	0,042	0,03
			<i>El Ouali</i>	3000	$8,7 \cdot 10^{-3}$	0,015	0,01

Tableau 5 : Les résultats de calculs de flicker

D'après les calculs $P_{st} < 0,35$ et $P_{lt} < 0,25$

On a obtenu des facteurs de flicker inférieur aux limites, ce qui respecte la norme.

☞ Le problème de Flicker n'est pas posé pour le Parc éolien de Taza

Les valeurs de Flicker obtenues montrent aussi que plus la puissance de court-circuit augmente plus une diminution de Flicker est remarquable.

4.4. Méthode statistique :

Généralement, le phénomène de fluctuation de tension se caractérise par l'amplitude des variations de la tension et le taux de répétition. La norme CEI 61000-4-15 définit la méthode de mesure et les performances des appareils destinés au mesurage des fluctuations de tension susceptibles de créer un scintillement des dispositifs d'éclairage, ces appareils qui mesurent le flicker s'appellent « **Flickermètre** ». L'évaluation finale de la sévérité du flicker selon la norme CEI60 868 s'exprime par les deux paramètres : le P_{st} et le P_{st} .

4.4.1. Description du Flickermètre

Les fluctuations de tension sont analysables avec le flickermètre de l'UIE (Union Internationale d'Électrotechnique).

Le schéma de principe de cet appareil (figure 1 de la norme) est reproduit sur la figure suivante:

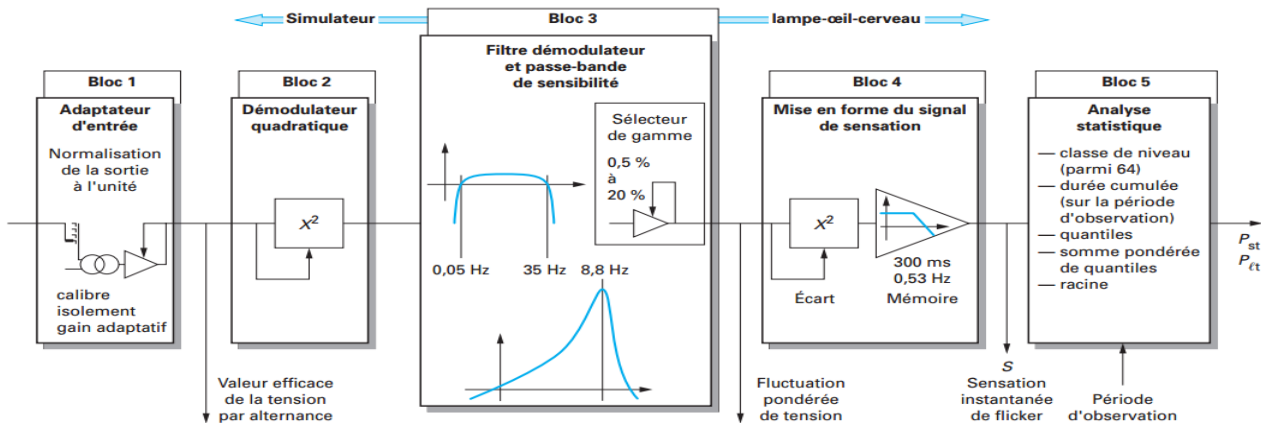


Figure 19 : Schéma de principe du flickermètre international [d'après UIE et CEI 61000-4-15]

- ✓ **Bloc 1:** La mesure de tension est mise à l'échelle au moyen d'un gain ajustable de façon à améliorer la sensibilité de la mesure la grandeur mesurée est ainsi normée à l'unité par ce bloc ;
- ✓ **Bloc 2:** Après cette adaptation d'entrée, la tension est élevée au carré ; il s'agit de la fonction dite démodulateur quadratique. Cette étape correspond au phénomène physique qui crée le flicker ;
- ✓ **Bloc3 :** La tension est filtrée pour éliminer la composante continue, la tension filtrée est alors pondérée en fonction de la fréquence pour approcher la réponse physiologique. La pondération est assurée par un filtre passe-bande particulier centré sur 8,8 Hz ; La fonction obtenue est représentative des écarts de la tension du réseau d'alimentation, la mise en mémoire est simulée par un filtre passe-bas du premier ordre et de constante de temps 300 ms (coupure à 0,53 Hz).
- ✓ **Bloc 4:** En sortie de ce bloc, une grandeur **S** nommée **sensation instantanée du flicker** est exprimée en unités de perception (udp) ;
- ✓ **Bloc 5:** Caractérise la sensation instantanée du flicker en fonction de la gêne. Il s'agit d'une analyse statistique des fluctuations.

4.4.2. Traitement statistique

L'amplitude de **S** est définie par des classes de niveaux, 64 au moins selon la norme. Dans la procédure statistique proposé par UIE et adopté par IEC pour l'évaluation de la sévérité des fluctuations de la tension, l'amplitude de la sensation du Flicker est subdivisée en un nombre adéquat de classes. Au cours de la période d'observation, on cumule le temps t_n pendant lequel l'amplitude de **S** dépasse les limites. La figure 20 montre la méthode de calcul pour $n=x$:

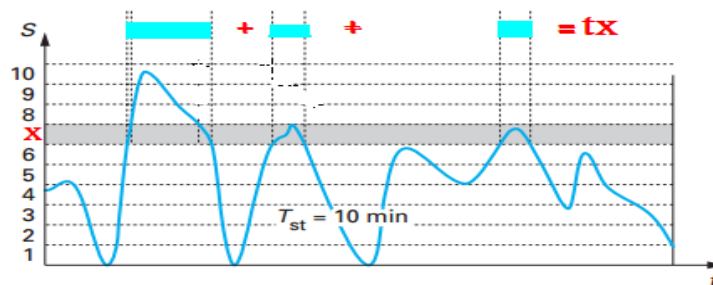


Figure 20: Enveloppe des fluctuations : Calcul du temps de cumulation

On définit p_n , la fonction de probabilité cumulée c'est-à-dire la probabilité que S soit supérieure ou égale à un niveau donné :

$$p_n = \frac{\sum_{j=n}^{j=\max} t_j}{T_{st}}$$

Avec T_{st} : période d'observation

La figure 21 illustre la densité de probabilité cumulée p_n en fonction des niveaux de S.

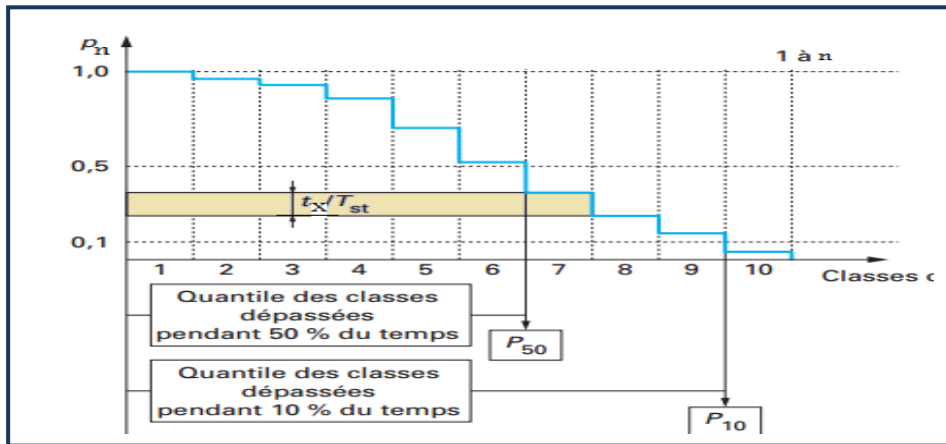


Figure 21: Enveloppe pondérée des fluctuations: densité de probabilité cumulée.

Soit P_x le grandeur tel que le niveau de S dépassé pendant x % du temps:

$$P_x = n$$

Exemple: ($P_{50} = n_6$ et $P_{10} = n_9$.)

➤ L'indice de perceptibilité P_{st} est la racine carrée de la somme pondérée de cinq quantiles.

Les quantiles 1 à 50 % sont de préférence lissés. Le symbole des quantiles lissés est affecté de l'indice s.

Le lissage d'un quantile est obtenu par la moyenne arithmétique avec les quantiles voisins. Cette loi admise par la communauté internationale, à la suite des travaux de l'UIE, est décrite par l'équation: (cf. 4.10.1 de la CEI 61000-4-15)

$$P_{st} = \sqrt{0,03140P_{0,1} + 0,0525P_{1s} + 0,0657P_{3s} + 0,28P_{10s} + 0,08P_{50s}}$$

Avec :

$$P_{1s} = \frac{P_{0,7} + P_1 + P_{1,5}}{3}$$

$$P_{3s} = \frac{P_{2,2} + P_1 + P_{1,5}}{3}$$

$$P_{10s} = \frac{P_6 + P_8 + P_{10} + P_{13} + P_{17}}{5}$$

$$P_{50s} = \frac{P_{30} + P_{50} + P_{80}}{5}$$

P_x : Grandeur dépassée pendant x% du temps

Pour l'évaluation du flicker à long terme, on utilise les valeurs du P_{1t} obtenue sur une période N donnée. Le calcul se fait avec la formule suivante :

$$P_{It} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^N P_{st}}{N}}$$

4.4.3. Sommation et Propagation des fluctuations de tension

a. Sommation des effets des fluctuations de tension

Le raccordement de plusieurs générateurs de flicker cumulent leurs effets ; la loi communément admise est une somme pseudo-cubique d'exposant m (m valant 3 en moyenne) [81]

$$P_{It} = \sqrt[m]{\sum_i P_{st,i}}$$

L'exposant m dépend essentiellement du degré des changements de tension que provoquent les sources principales de fluctuations

b. Propagation des fluctuations de tension

Les fluctuations de tension produites sur un réseau à moyenne tension ou sur un réseau à haute tension peuvent s'ajouter aussi bien qu'affecter les réseaux voisins parmi lesquels certains peuvent être à basse tension.[15]

On définit :

- T_{FHM} : Coefficient de transfert de flicker entre un réseau à haute tension (MTB) et un réseau à moyenne tension (MTA) qui lui est associé. en moyenne, sa valeur est voisine de 0,8.
- T_{FML} : Coefficient de transfert de flicker entre un réseau à moyenne tension (MTA) et un réseau à basse tension (BT) qui lui est associé, sa valeur est voisine de 0,95.

NB : la valeur de coefficient de transfert dépend des caractéristiques du réseau et la charge, elle est donnée par la norme

☞ Remarque :

En d'autres termes, des fluctuations de tension sur un réseau BT n'affectent par le réseau MT dont il est issu, et des fluctuations de la tension sur un réseau MT n'affectent pas le ou les réseaux HT dont il est issu. Alors :

$$T_{FMH} = 0 \quad \text{et} \quad T_{FLM} = 0$$

Le Flicker généré par une charge fluctuante se propage à travers tout le réseau électrique. La propagation du Flicker est considérée comme linéaire et proportionnelle au ratio des puissances de court-circuit entre deux points :

$$P_{stMTB} = P_{stMTA} \times \frac{S_{ccMTA}}{S_{ccMTB}}$$

Maintenant le flicker est un phénomène bien défini, analysé, mesurable, ...etc., pour lequel il existe des éléments de prévision et des remèdes.

5. Atténuation des fluctuations de tension

Les effets des fluctuations de tension sont principalement liés aux variations d'amplitude de la tension. Un système est dit bien conçu quand il peut délivrer une énergie

d'alimentation fiable avec un niveau de tension dans des limites acceptables. Chaque fois que le niveau de tension en un point du système est soumis à des variations cela est dû à un déséquilibre entre la puissance fournie et consommée. La variation de tension peut être expliquée par un déséquilibre entre la puissance réactive délivrée et celle consommée.

D'après la relation de la chute de tension : $\frac{V}{V_2} = \frac{Q \cdot X}{V_2^2} = \frac{Q}{S_{cc}}$ les amplitudes des fluctuations de tension peuvent être limitées de deux façons :

5.1. Augmentation de la puissance de court-circuit

❖ La capacité série

D'après la relation : $S_{cc} = \frac{V_2^2}{Z}$ l'augmentation de la puissance de court-circuit au Pcc consiste à diminuer l'impédance de la ligne.

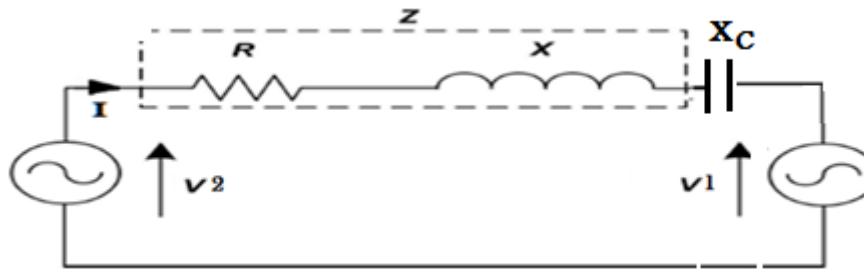


Figure 22 : Circuit équivalent après l'insertion de capacité

L'expression de la chute de tension devient :

$$\Delta V = \frac{RP + Q(X - X_c)}{V_2}$$

☞ En haute tension la technique consiste à diminuer la réactance de la ligne :

$$\Delta V = \frac{Q(X - X_c)}{V_2}$$

Une réduction importante de variation de tension est produite lorsqu'il s'ajoute à la réactance inductive de la ligne, la valeur de la réactance du condensateur série.

- L'ajout des générateurs au PCC peut aussi augmenter la puissance de court-circuit, mais cette méthode reste moins optimale du côté producteur.
- ❖ En basse tension une solution se présente dans le raccordement des circuits d'éclairage loin de la charge perturbatrice

5.2. Moyens classiques de compensation réactive et de réglage de tension

❖ Contrôle de la tension à travers le contrôle de la puissance réactive

Les fluctuations de tension du réseau sont étroitement liées aux fluctuations de la puissance réactive dans le système de production et de transport ces transits se résultent du déséquilibre entre la puissance réactive produite et consommée dans l'ensemble du système électrique

En général, les moyens de compensation et de réglage à mettre en œuvre doivent faire face aux fluctuations périodiques liées à l'évolution journalière des transits de puissance réactive. Cette catégorie comprend les batteries de condensateurs et les inductances installées sur les réseaux :

5.2.1. Condensateurs parallèles

Les batteries des condensateurs installées en dérivation peuvent améliorer le facteur de puissance au niveau des charges inductives alors compenser la puissance réactive.

La puissance réactive de l'installation devient :

$$Q_{Totale} = Q_{initiale} + Q_c$$

$$Q_c = -C\omega V^2$$

La compensation de puissance réactive consiste à assurer : $Q_{Totale} = 0$

C.-à-d. : $\cos(\varphi)=1$

5.2.2. compensateurs synchrones

☞ Dans les systèmes énergétiques, les générateurs synchrones sont les principaux producteurs de puissances actives et réactives. Pour la puissance active ils sont l'unique source, par contre pour la puissance réactive la quantité produite n'est pas constante. Une machine synchrone surexcitée fournit de l'énergie réactive comme un condensateur. En sous-excitation, elle absorbe du réactif comme une inductance. Il peut faire face aux besoins en réactif du réseau.

5.3. Moyens modernes

La nouvelle technologie défie les contraintes de compensation de l'énergie perdue à cause de plusieurs paramètres. Notamment, les systèmes FACTS (Flexible AC Transmission Systems) est l'abréviation définie comme suit: « 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 » [17]

5.3.1. Les compensateurs shunts

Ils consistent une impédance variable, source variable ou une combinaison des deux. Ils injectent un courant dans le réseau à travers le point de connexion. Ils sont principalement utilisés pour la compensation de la puissance réactive et par conséquent le contrôle de la tension [18]. Leur principe est basé sur une impédance variable connectée en parallèle avec un réseau, qui consomme (ou injecte) un courant variable, cette injection de courant modifie les puissances actives et réactives qui transitent dans la ligne. Les compensateurs shunts les plus utilisés sont les SVC et les STATCOM. [18]

5.3.2. Le SVC (Static Var Compensator)

Compensateur Statique de Puissance Réactive (Stat Var Compensator) SVC est un équipement de compensation parallèle à base d'électronique de puissance (Thyristor) capable de réagir en quelques cycles aux modifications du réseau. Il permet la diminution des effets des défauts ou des fluctuations de tension.

a. Principe de fonctionnement d'un SVC :

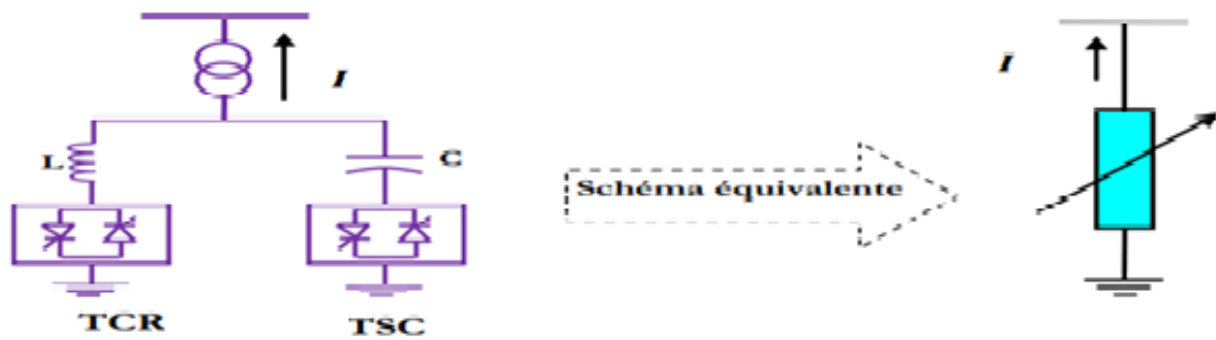


Figure 23 : Structure d'un SVC, schéma équivalent [18]

- **TCR (thyristor controlled reactor):** Un circuit TCR est composé d'une impédance placée en série avec deux thyristors montés en antiparallèle, la valeur de l'impédance est continuellement changée par l'amorçage des thyristors.
- **TSC (thyristor swithed capacitor):** des capacités commandées par thyristors fonctionnant en pleine onde les thyristors varie de façon continue le courant dans des inductances.

Le TCR ne peut absorbée que de l'énergie réactive, puisque il est constitué d'élément inductif. C'est pour cela qu'on associe ce dispositif avec des bancs de condensateur commandé par thyristor (TSC) qui fournit de l'énergie réactive au réseau.

b. Réduction de Flicker avec un SVC :

L'installation d'un compensateur statique de puissance réactive en un point spécifique du réseau peut atténuer les oscillations de puissance réactive permet une réduction du Flicker de 25% à 50%.

☞ Le coefficient de réduction du Flicker réalisé avec un SVC:

$$R_{\text{svc}} = 1 + 0,75 \frac{S_{\text{svc}}}{S_{\text{éol}}}$$

Avec R_{svc} : Coefficient de réduction de flicker

S_{svc} : Puissance nominale du SVC

$S_{\text{éol}}$: Puissance nominale du parc éolien

☞ Remarque :

Le SVC permet une amélioration de la stabilité statique et dynamique du réseau électrique car sa régulation de tension est contrôlée selon la puissance réactive échangée avec le réseau. Par conséquence, il permet une atténuation considérable du phénomène de Flicker. Cependant son utilisation en basse tension est limitée.

5.3.3. Le Compensateur synchrone statique(STATCOM)

STATCOM est un dispositif constitué d'un ensemble d'onduleurs à base d'IGBT connectés en parallèle avec une source de tension continue. Un onduleur est capable de générer et de consommer à part égale de la puissance réactive de telle manière à remplir les mêmes fonctions que le SVC mais avec beaucoup plus de souplesse. [18]

a. Principe de fonctionnement:

Le STATCOM est constitué d'un transformateur de couplage, un convertisseur de tension, et une source de stockage pour le coté DC. Comme montre la figure (24)

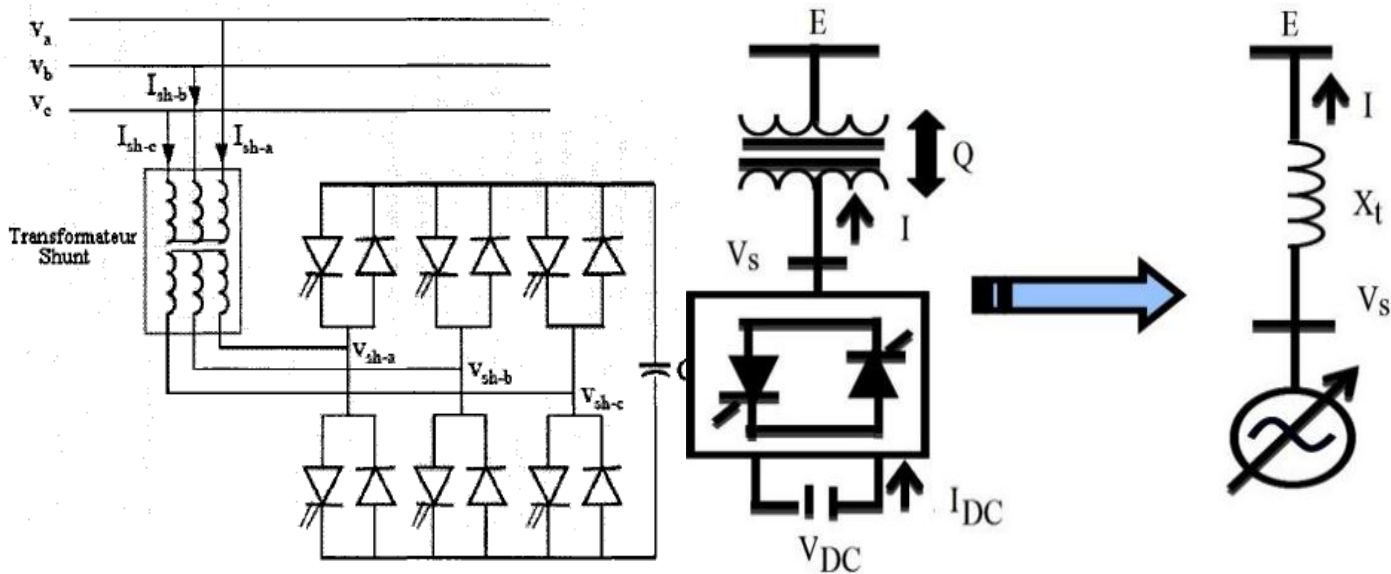


Figure 24 : Schéma du STATCOM [18]

Le rôle de STATCOM est d'échanger d'énergie réactive avec le réseau. Pour ce faire, l'onduleur est couplé au réseau par l'intermédiaire d'une inductance triphasée, celui-ci est en général l'inductance de fuite du transformateur de couplage.

L'échange d'énergie réactive se fait par le control de la tension de sortie de l'onduleur V_s laquelle est en phase avec la tension du réseau E

- ❖ Si $V_s < E$: le courant circulant dans l'inductance est déphasé de $(-\frac{\pi}{2})$ par rapport à la tension E ce qui donne un courant inductif
 - ✓ Le STATCOM absorbe de la puissance réactive
- ❖ Si $V_s > E$: Le courant circulant dans l'inductance est déphasé de $(+\frac{\pi}{2})$ par rapport à la tension E ce qui donne un courant capacitif.
 - ✓ Le STATCOM fournie de la puissance réactive
- ❖ Si $V_s = E$: le courant circulant dans l'inductance est nul
 - ✓ Pas d'échange d'énergie.

Le STATCOM présente plusieurs avantages :

- ✓ Bonne réponse à faible tension : le STATCOM est capable de fournir son courant nominal, même lorsque la tension est presque nulle.
- ✓ Bonne réponse dynamique : Le système répond instantanément
- ✓ Le Pouvoir d'échanger de l'énergie de nature inductive ou capacitive uniquement a l'aide d'une seule inductance.
- ✓ Le pouvoir de fournir un courant constant important même lorsque la tension E diminue

5.3.4. Comparaison entre SVC et STATCOM

Le SVC et le STATCOM sont très proches dans leur pouvoir de compensation, mais très différents dans le principe de fonctionnement. Le STATCOM est une source de tension synchronisée en shunt avec le réseau tandis que le SVC est une admittance (inductive ou capacitive) shunt contrôlée. [18]

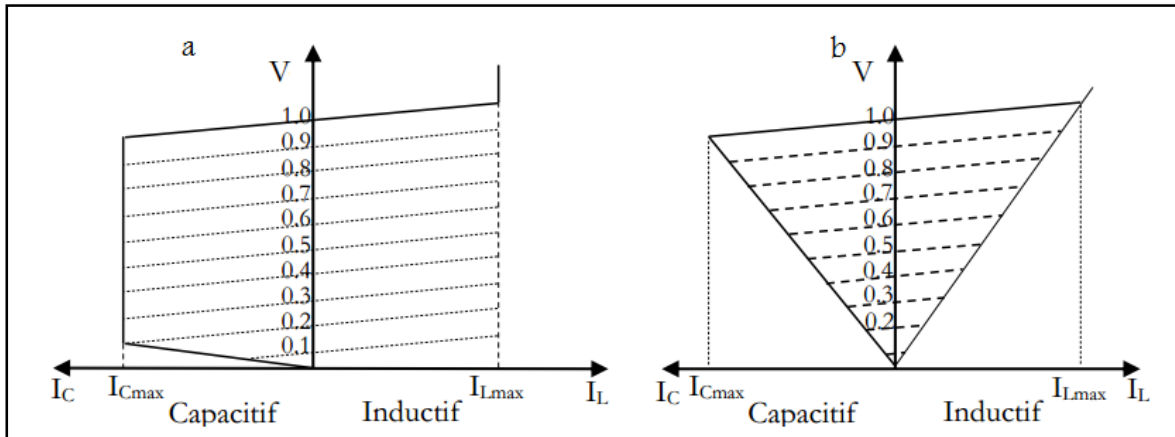


Figure 25 : Caractéristique tension courant a. STATCOM ; b.SVC

- ❖ Le STATCOM peut fournir un courant capacitif ou inductif indépendant de la tension du réseau. Il peut donc fournir le courant capacitif maximal même pour de faibles valeurs de tensions. Sa capacité à soutenir la tension du réseau est donc meilleure que celle du SVC. De plus, le STATCOM peut augmenter temporairement les valeurs nominales du courant (inductif ou capacitif).
- ❖ L'avantage de ce dispositif est le pouvoir d'échanger de l'énergie de nature inductive ou capacitive uniquement à l'aide d'une inductance, il n'y a pas d'élément capacitif qui puisse provoquer des résonances avec des éléments inductifs du réseau Contrairement au SVC. [18]

Conclusion

Ce chapitre a fait l'objet d'une étude des différentes perturbations de tension, et d'une manière plus précise les fluctuations de tension résultant de la variation de la puissance réactive absorbé par les aérogénérateurs. La mesure de ces fluctuations peut se faire d'une manière analytique comme il peut se calculer directement par le Flickermètre. Après le calcul de ces fluctuations vient le rôle de plusieurs dispositifs permettant l'atténuation du Flicker et qui ont comme principe le contrôle de la tension à partir de la compensation de la puissance réactive.

Chapitre IV

Chapitre IV : Simulation du parc éolien de Taza

Introduction

Dans ce chapitre, on s'intéresse à la simulation du parc éolien de Taza connecté au réseau électrique comme le montre la figure 26. Ce parc éolien utilise comme génératrice la MADA. Des simulations ont été faites avec et sans insertion des dispositifs d'atténuation des fluctuations de tension, afin de montrer leurs importances dans l'amélioration de la stabilité de l'énergie électrique durant le régime perturbé. Cette simulation a été effectuée sous l'environnement MATLAB/Simulink.

1. Description du système étudié

Le système étudié est le Parc éolien Taza, dont le schéma de raccordement est le suivant (figure 26) :

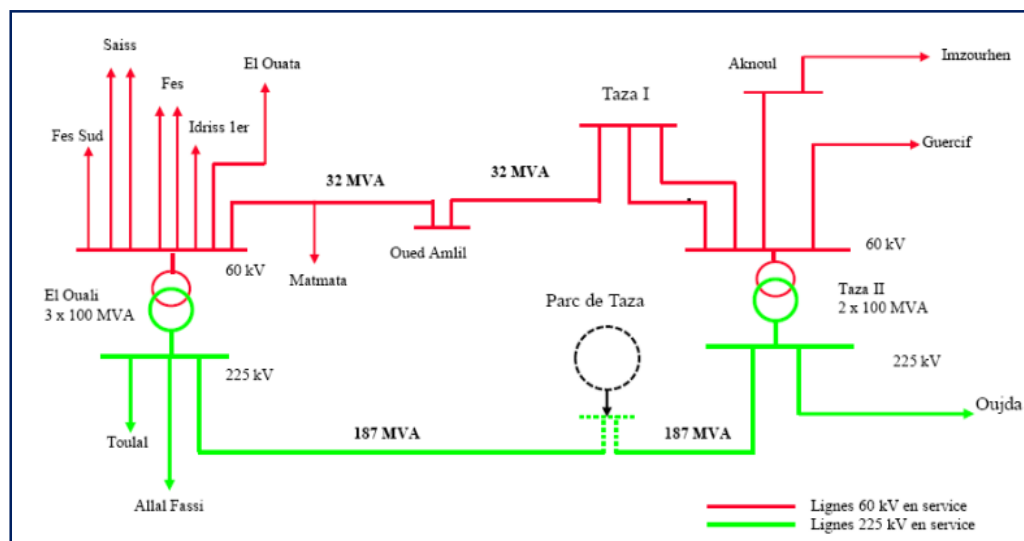


Figure 26: Schéma de raccordement du Parc de Taza au réseau

Caractéristiques du système :

- ❖ Un parc éolien de 50 éoliennes de 3 MW chacune, génératrice : MADA
- ❖ 2 lignes : Une de 21 km (Taza) et l'autre 76,8 km (El Ouali)

Les puissances de court-circuit sont indiquées dans le tableau 1 et la fiche technique du parc précitée.

2. Simulation du système éolien

1.1. Simulation du vent

Le vent est la raison d'être des aérogénérateurs. Son énergie cinétique constitue la source primaire d'énergie. Le vent est en fait un champ de déplacement de masses d'air caractérisé par sa vitesse et sa direction. La variation de la vitesse du vent est la raison derrière la variation des puissances produites ou consommées par l'éolienne. Ci-dessous la figure qui montre la vitesse du vent appliquée au parc éolien pendant 10s entre deux valeurs, ($V_{max}=14m/s$) comme valeur maximale et ($V_{min}=0,75m/s$) comme valeur minimale d'une façon aléatoire ce qui reflète un vent réel.

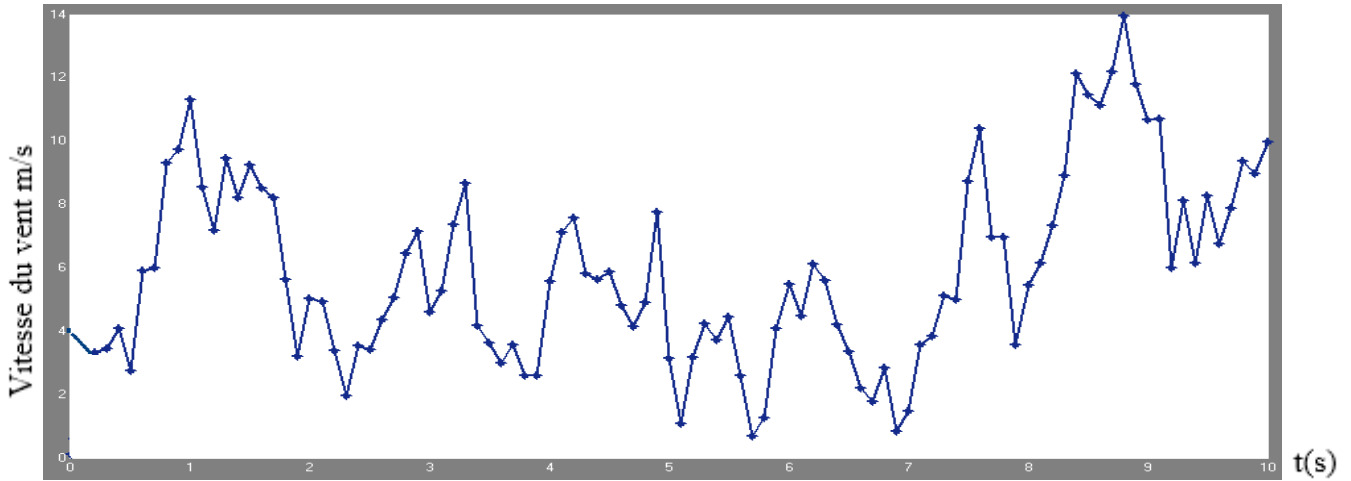


Figure 27: Vent simulé pendant 10s

1.2. Modèle de simulation du système étudié

Dans un premier temps, nous allons présenter une simulation de parc éolien en fonctionnement normal. La figure 28 montre le schéma de simulation du parc éolien de Taza établi sous l'environnement Matlab/Simulink/SimPowerSystem. Le parc est connecté au réseau électrique de Taza 225 kV à travers une ligne de distribution de 21 km de long, et au réseau d'El Ouali à travers une ligne de longueur 76,8km

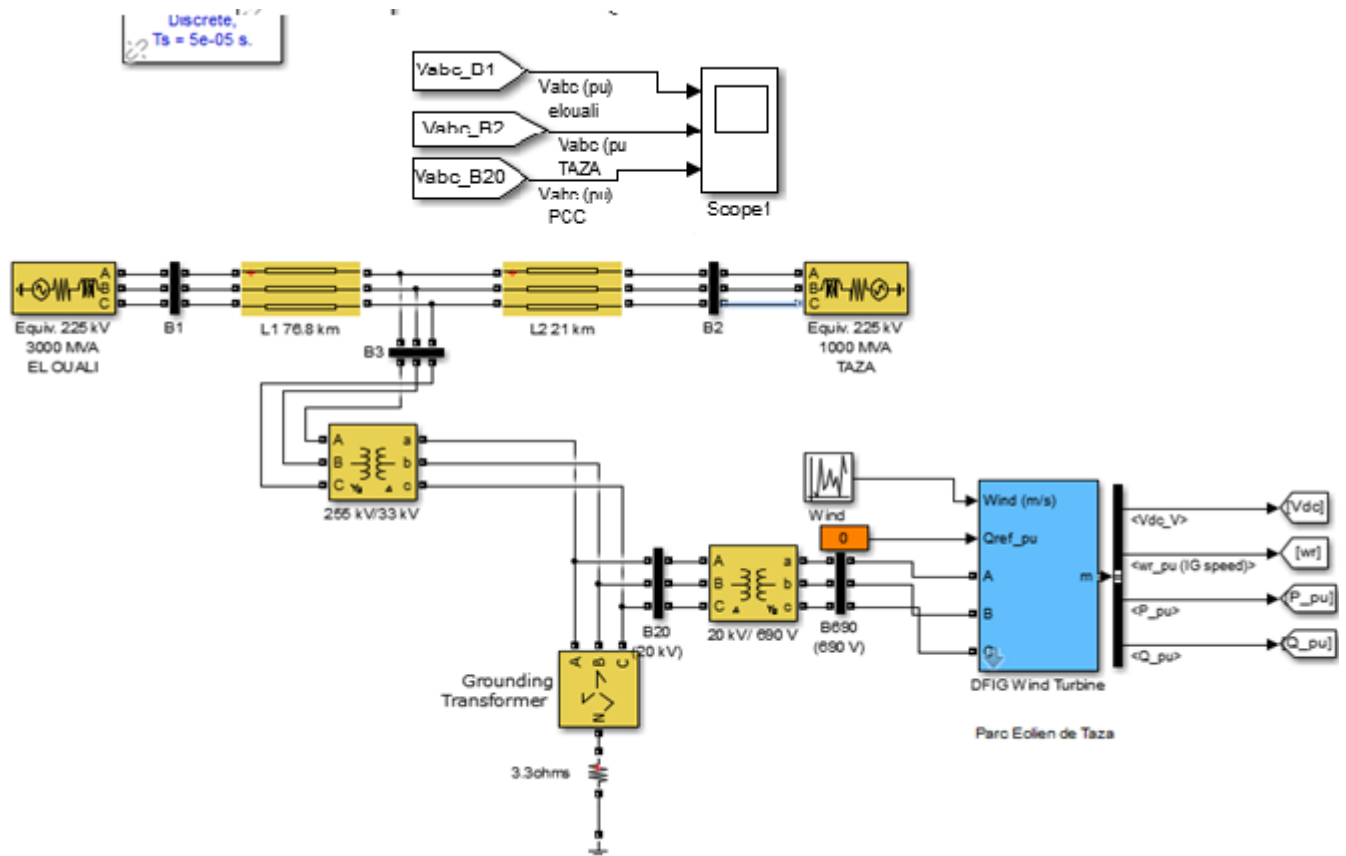


Figure 28 : Parc éolien connecté au réseau

La génératrice du parc est basée sur une machine asynchrone double alimentation, son schéma sous Matlab/Simulink/SimPowerSystem est le suivant :

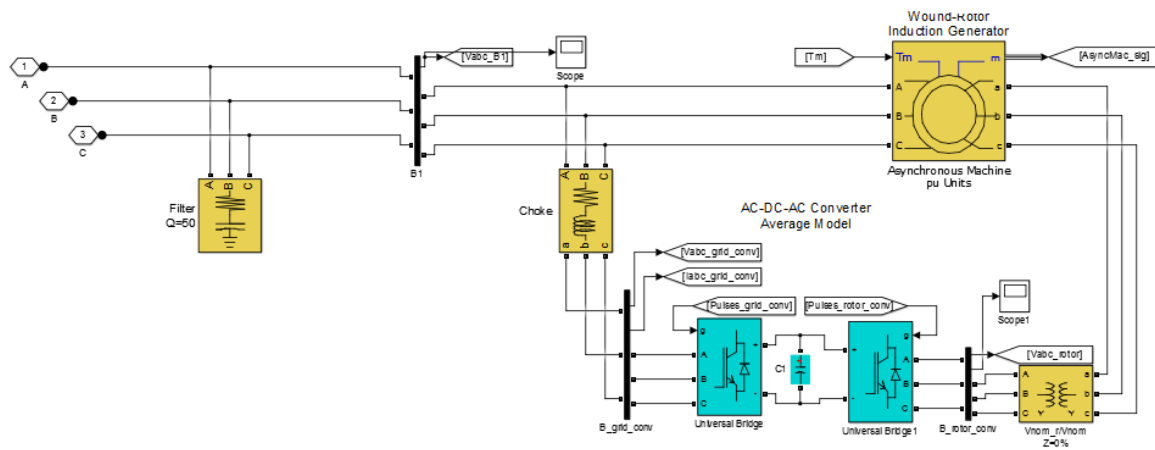


Figure 29 : Génératrice Asynchrone Double Alimentation

Le régime transitoire s'étale jusqu'à $t=0,4s$:

- V_{abc} el Ouali : La tension au niveau du jeu de barre B1 (225 KV)
- V_{abc} Taza : La tension au niveau du jeu de barre B2 (225 KV)
- V_{abc} Pcc : La tension au niveau du jeu de barre B20 (20 KV)

La simulation de ce Parc a donnée comme résultat :

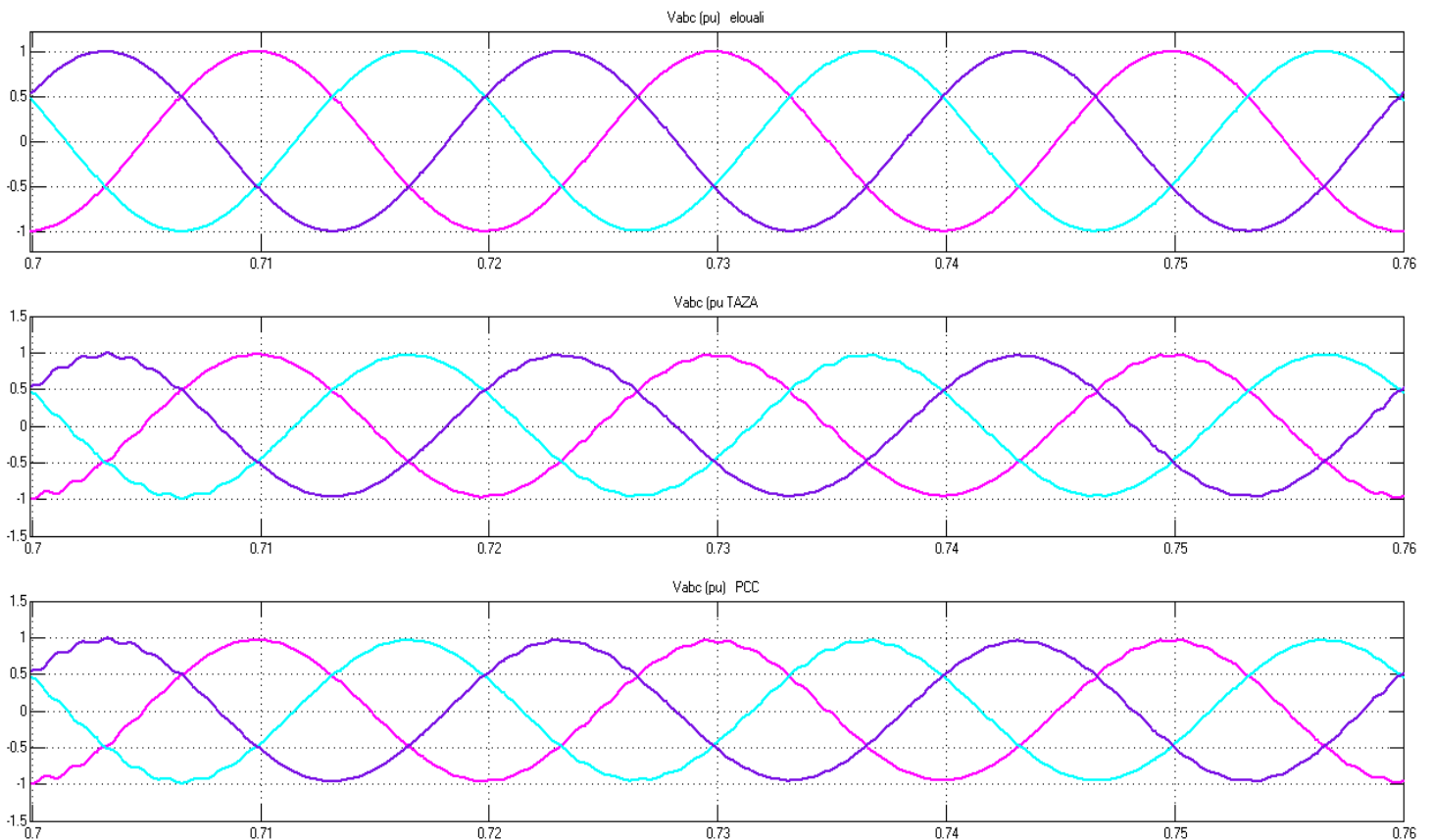


Figure 30: Tensions au niveau d'El Ouali, Taza et au Pcc. $P_n=150MW$

Les résultats théoriques sont en conformité avec celle de la simulation, nous pouvons conclure que l'intégration du parc éolien de Taza ne pose pas le problème de Flicker.

1.3. Simulation du parc avec une puissance du parc plus élevée

Afin de bien exploiter la production du parc, certaines mesures doivent être prises en compte. En effet, un mauvais choix de certains paramètres pourra impacter l'installation éolienne, une étude du parc doit être faite afin d'assurer un meilleur rendement (exemple cas de renforcement du parc éolien)

◆ Pour $P_n=700\text{MW}$ on obtient :

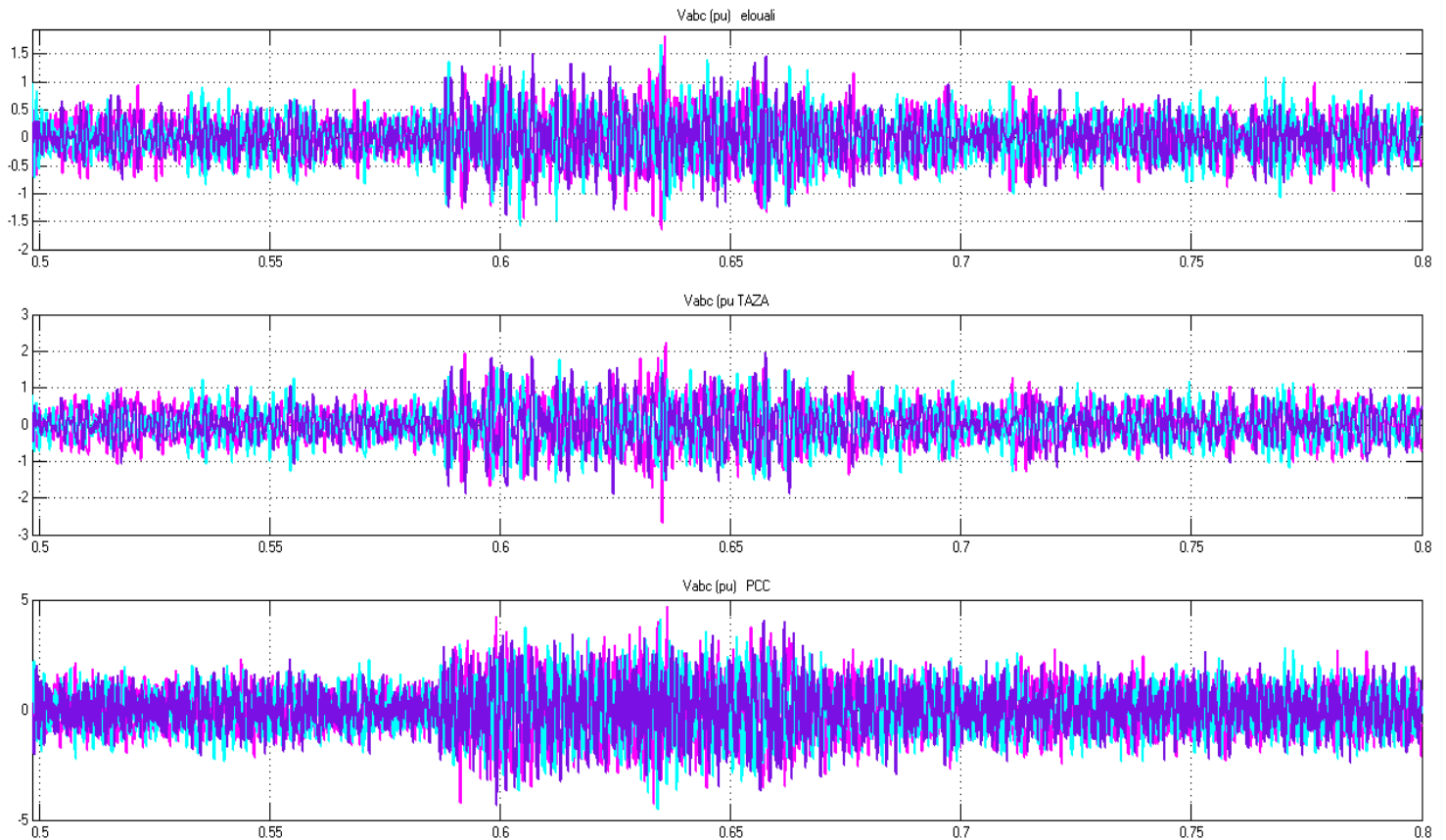


Figure 31: Tensions au niveau d'El Ouali, Taza et au Pcc. Pour $P_n=700\text{MW}$

Ces fluctuations sont dues généralement aux variations des puissances. (Figure 32)

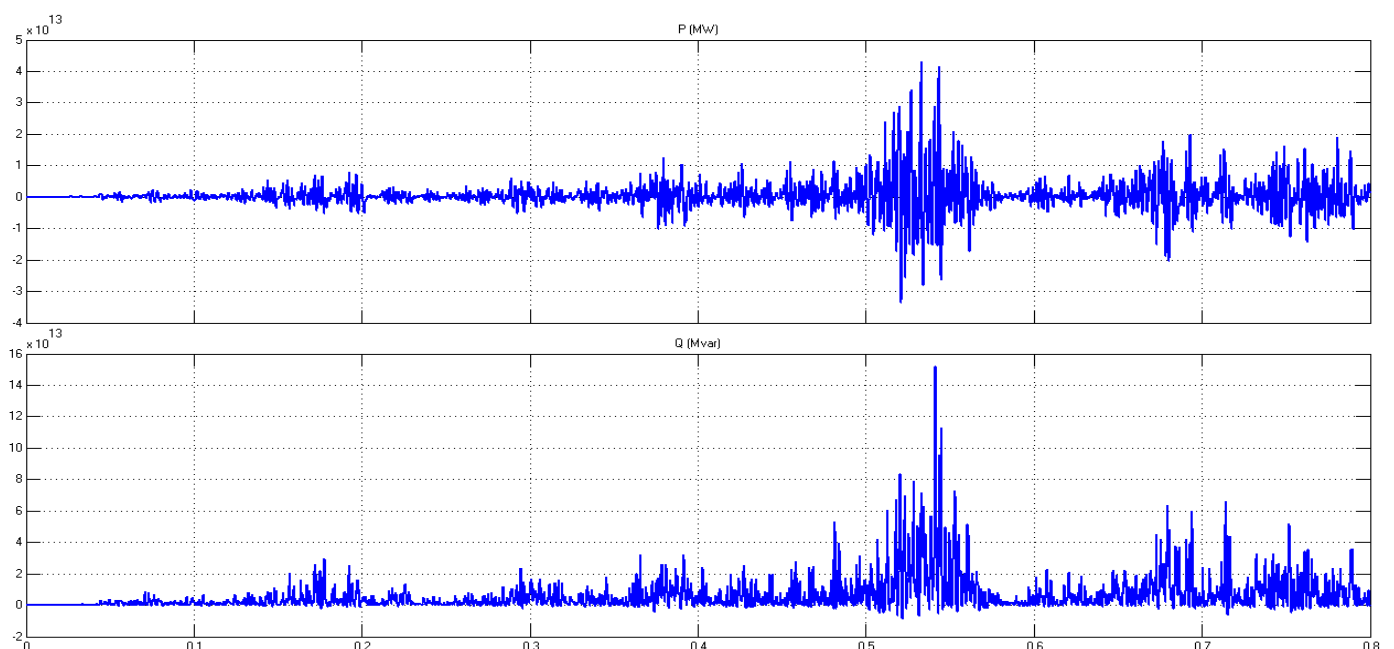


Figure 32 : Variations des puissances actives et réactives de l'éolienne

Calcul théorique du niveau de Flicker :

	$P_{It} = P_{st}$
TAZA	5,1
EL OUALI	2,03
PCC	3,3

Les valeurs obtenues sont très supérieures aux limites acceptables présentées dans le Tableau2.

L'augmentation de la puissance nominale du parc jusqu'à 700MW a montré des fluctuations énormes de la tension.

Dans ce qui suit et afin d'évaluer les fluctuations de tension la puissance nominale du Parc sera prise égale à 300MW: $\blacklozenge P_n=300MW$

Calcul théorique :

	$P_{It} = P_{st}$
TAZA	3
EL OUALI	1,02
PCC	1,66

Les valeurs obtenues dépassent les limites d'émissions de Flicker.

La simulation a donnée :

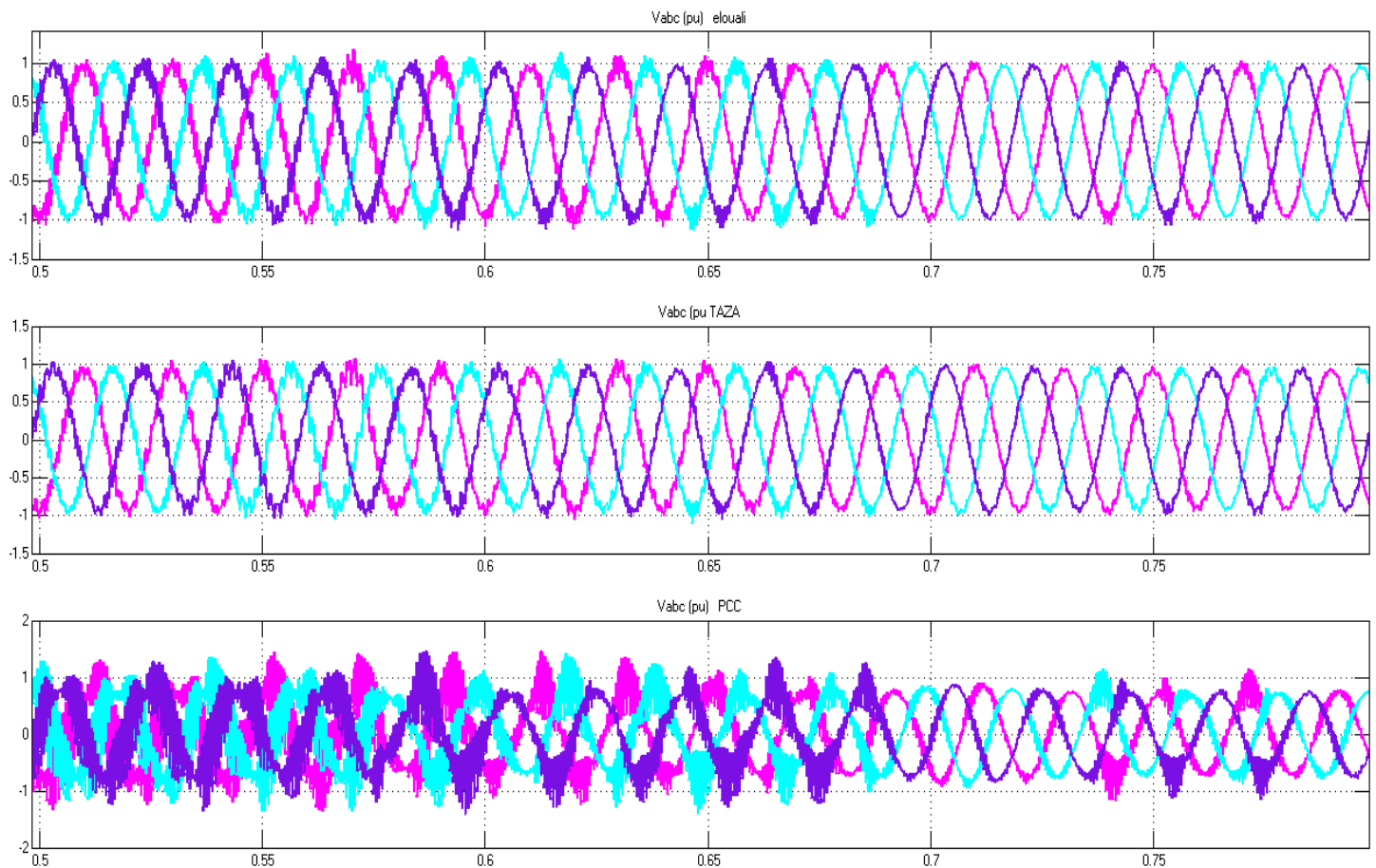


Figure 33: Tensions de El Ouali, Taza et au PCC

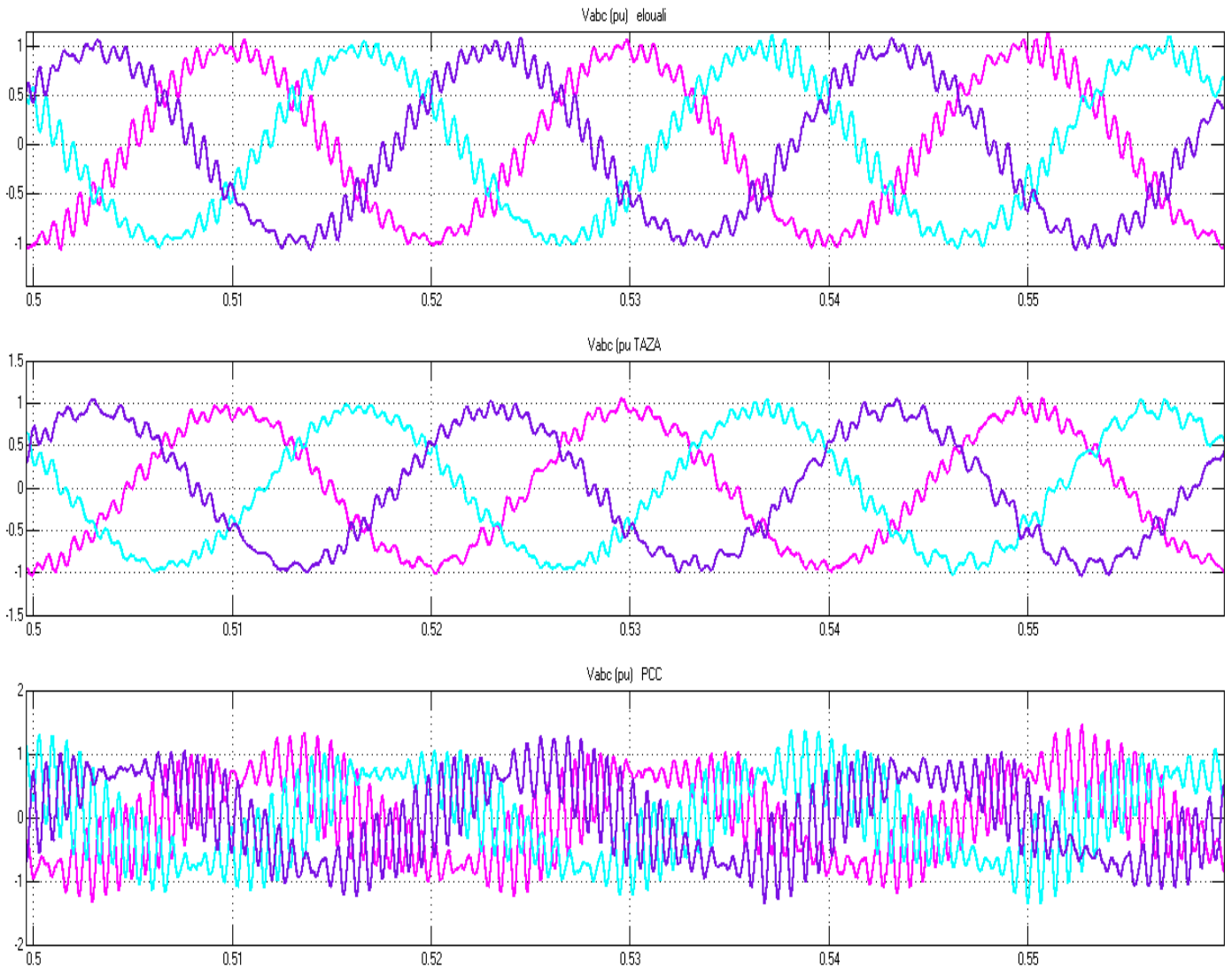


Figure 34 : Zoom des tensions de El Ouali, Taza et au Pcc.

On peut augmenter la puissance nominale du parc en ajoutant plus de turbines.

La comparaison entre les tensions en fonctionnement normale du parc éolien figure 30 et les tensions obtenues dans le cas de renforcement du réseau électrique figure 34 montre que l'augmentation de la puissance nominale du parc a un impact sur le réseau électrique car les tensions sont devenues plus fluctuantes.

Ces variations de tension peuvent comme montré dans la figure 17 influencer sur l'intensité lumineuse et provoquer une gêne visuelle et même conduire à la déconnexion du parc. Alors une atténuation de ces fluctuations est nécessaire, dans ce qui suit des différents scénarios des techniques d'atténuation de Flicker seront proposées.

3. Solutions pour l'atténuation des fluctuations de tension

3.1. Augmentation de la puissance de court-circuit

La relation $\frac{\Delta V}{V} = \frac{Q}{S_{cc}}$ démontré auparavant montre que plus la puissance de court-circuit augmente plus la variation de tension diminue, en partant de cette relation la simulation est faite pour des différentes valeurs de puissances de court-circuit :

Afin de voir l'influence de la puissance de court-circuit sur la réduction de Flicker deux cas ont été simulé: $S_{cc}(Taza) : 1800MVA$; $S_{cc}(el Ouali) : 5000MVAR$; $S_{cc}(parc)=2000MVA$.

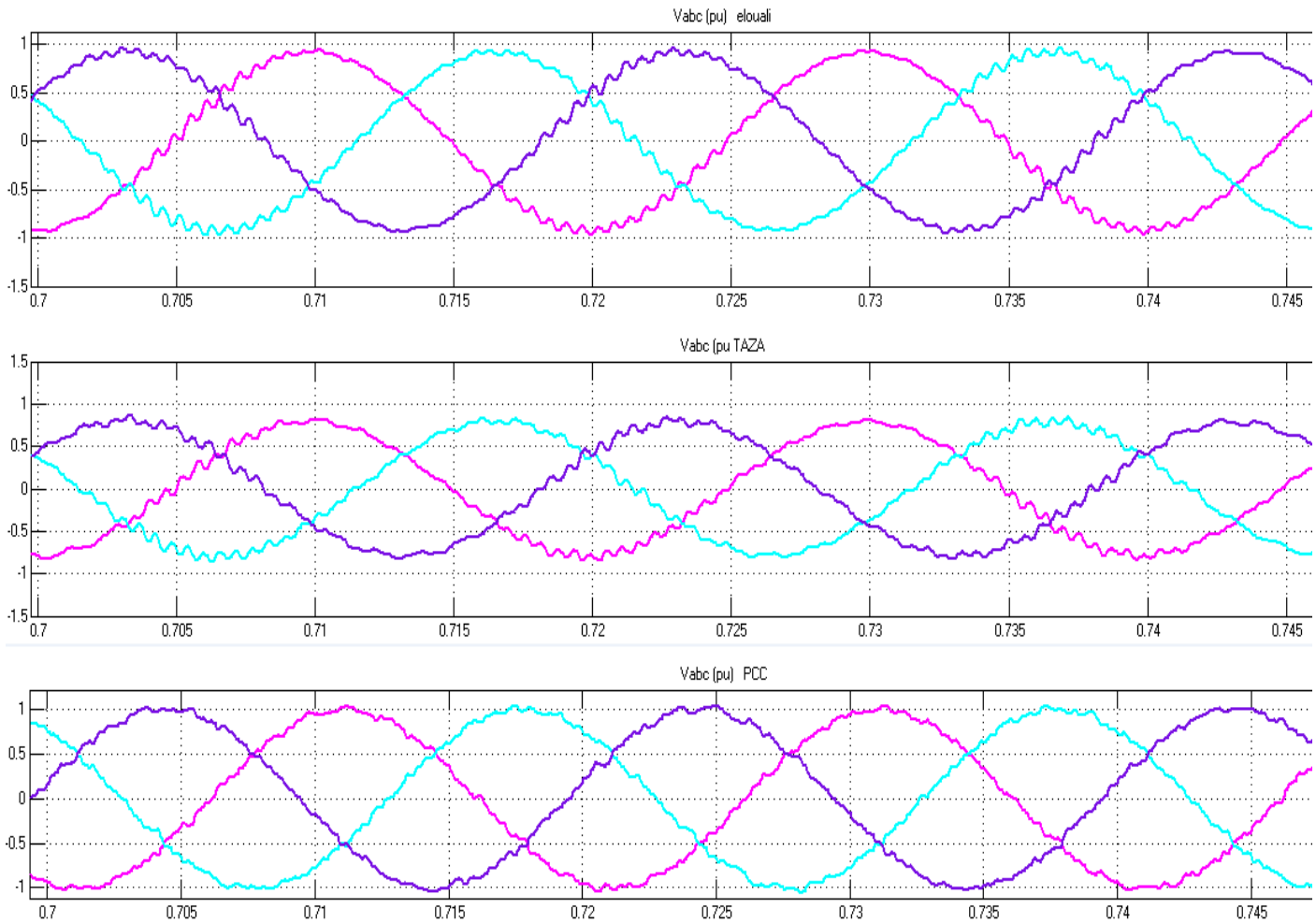


Figure 35 : Tensions de El Ouali, Taza et au PCC.

On comparant la figure 35 avec la figure 34 on remarque bien que les tensions sont devenues moins fluctuantes.

❖ $S_{cc}(Taza) : 1800MVA$; $S_{cc}(el Ouali) : 3400MVAR$; $S_{cc}(parc)=1900MVA$.

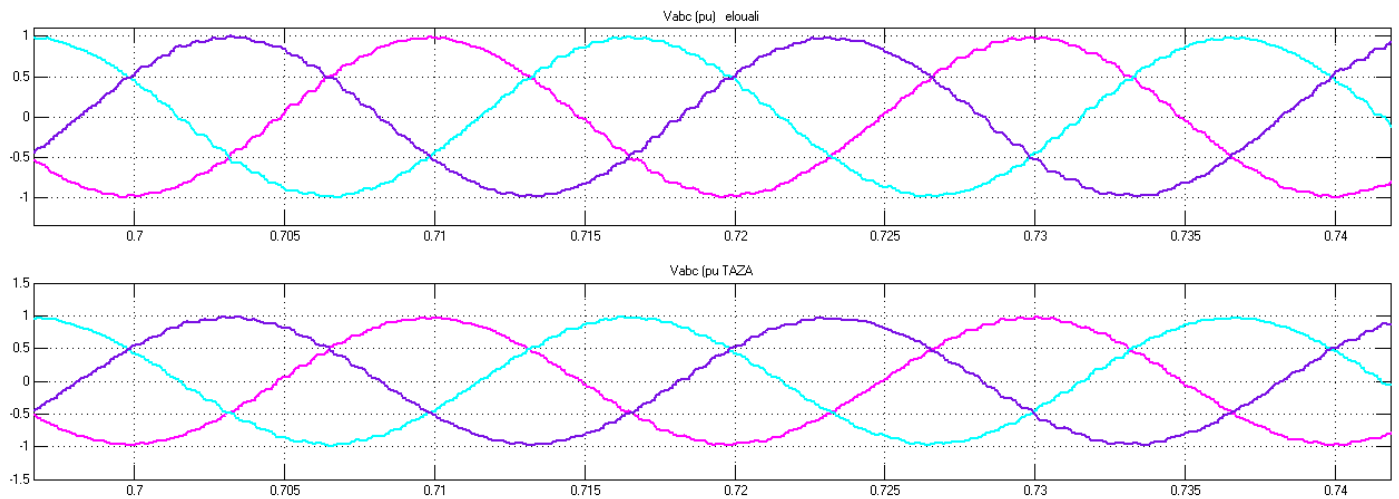


Figure 36 : Tensions d'El Ouali, Taza.

On remarque d'après la figure 36 que la tension est devenue moins fluctuante par rapport à celle de la figure 34. Alors la relation $\frac{\Delta V}{V} = \frac{Q}{S_{CC}}$ démontré auparavant est bien vérifié et l'augmentation de la puissance de court-circuit permet une réduction des fluctuations de tension.

3.2. La capacité série

L'insertion de la capacité série dans la ligne peut réduire la variation de tension comme le montre la relation suivante: $\Delta V = \frac{RP+Q(X-X_c)}{V_2}$

Pour cette simulation la capacité $C=0.01$ F (Figure 37)

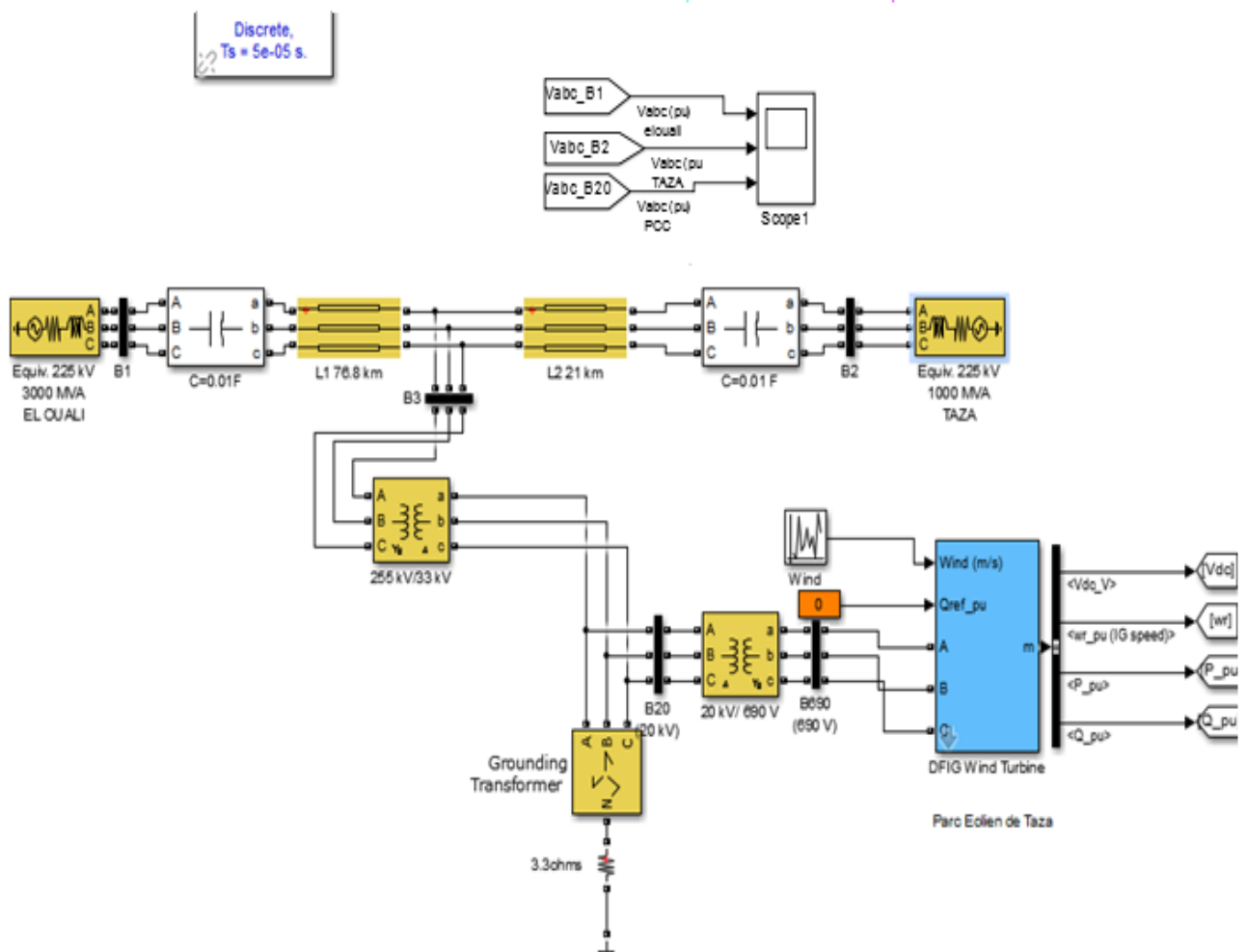


Figure 37 : Schéma du parc avec l'insertion des capacités série

Dans le but de voir l'impact d'intégration d'une capacité série dans la ligne sur la stabilité de tension une capacité de 0,01 F est utilisé pour cette simulation :

Les résultats de la simulation sont illustrés sur la figure suivante :

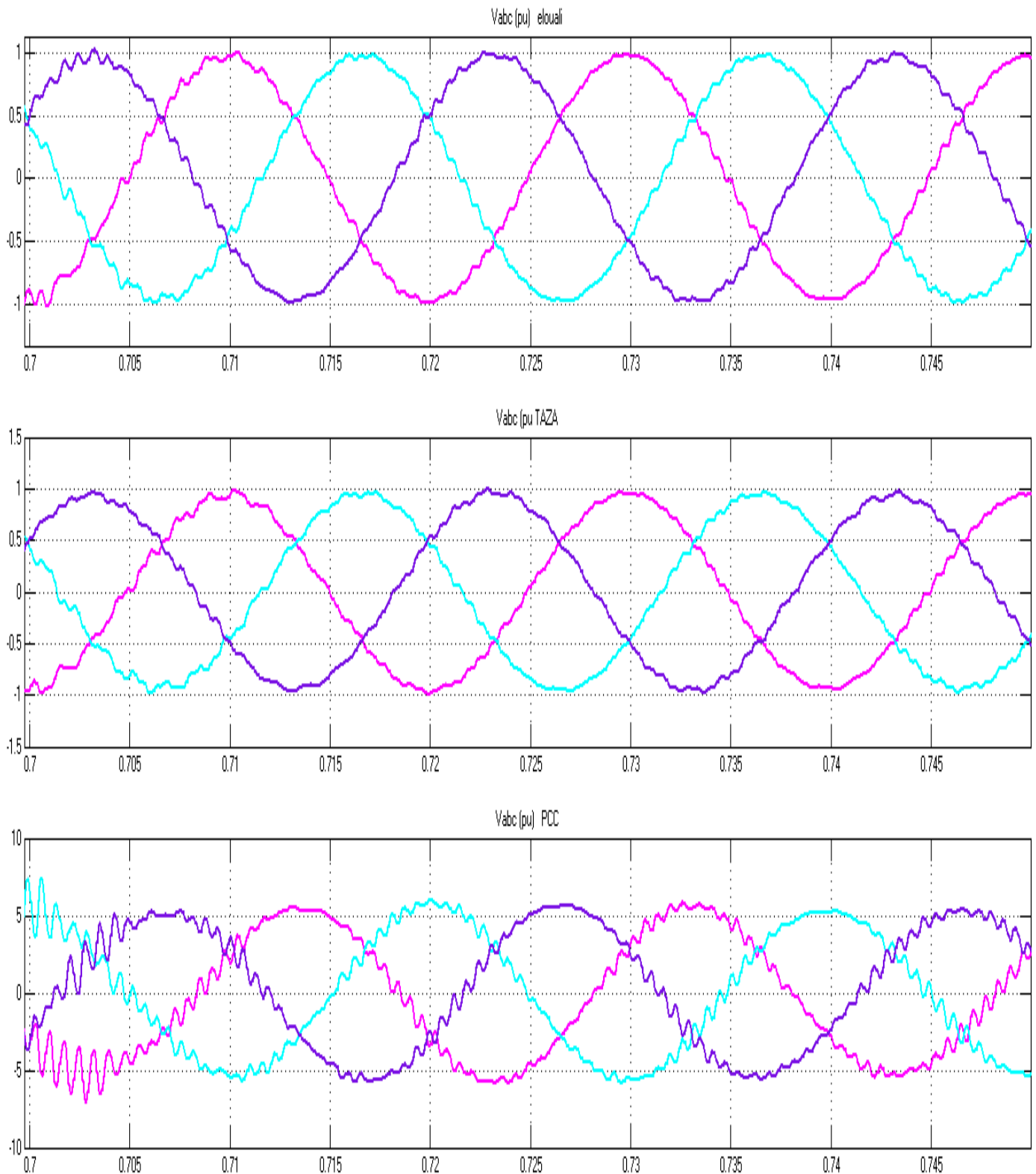


Figure 38 : Tensions de El Ouali, Taza et au PCC pour $c=0,01F$

Une comparaison entre les figures 38 et 34 montre que l'insertion de la capacité série permet de diminuer l'impédance de la ligne afin d'augmenter la puissance de court cette technique permet de compenser les réseaux en puissance réactive et de maintenir la tension dans les limites.

3.3. Amélioration avec le SVC

Le rôle des dispositifs FACTS comme le SVC et le STATCOM dans l'amélioration de la performance du système est bien spécifié, ces dispositifs sont plus performant pour

l'amélioration de la stabilité de tension, les simulations suivantes sont basées sur le SVC (Figure 39) et le STATCOM (Figure 43)

SVC : Le SVC utilisé possède une puissance de court-circuit : $S_{SVC} = 50$ MVA

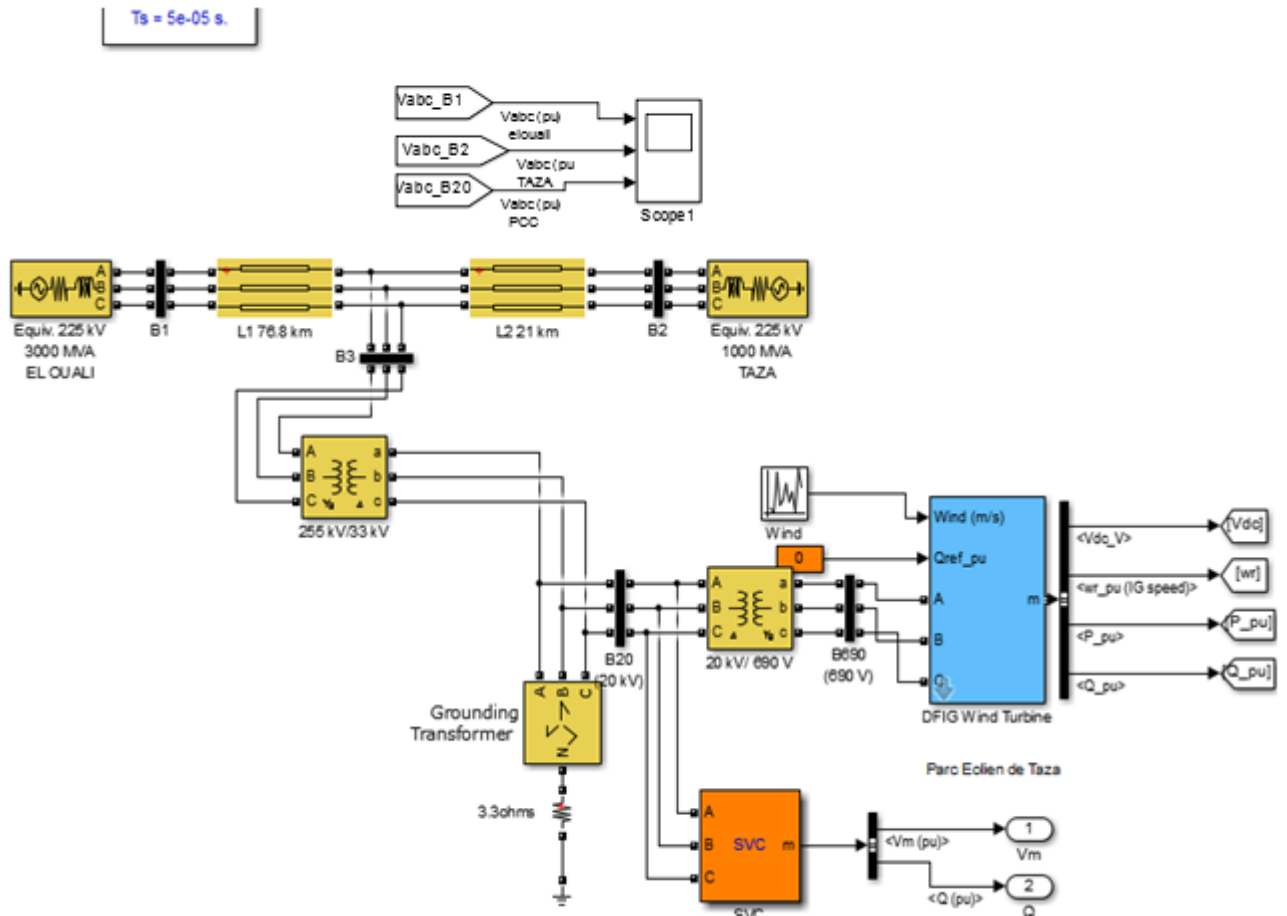


Figure 39 : Parc éolien avec un SVC

Pour cette simulation juste les tensions des réseaux Taza et el Ouali sont illustrés car se sont les réseaux affectés par la perturbation :

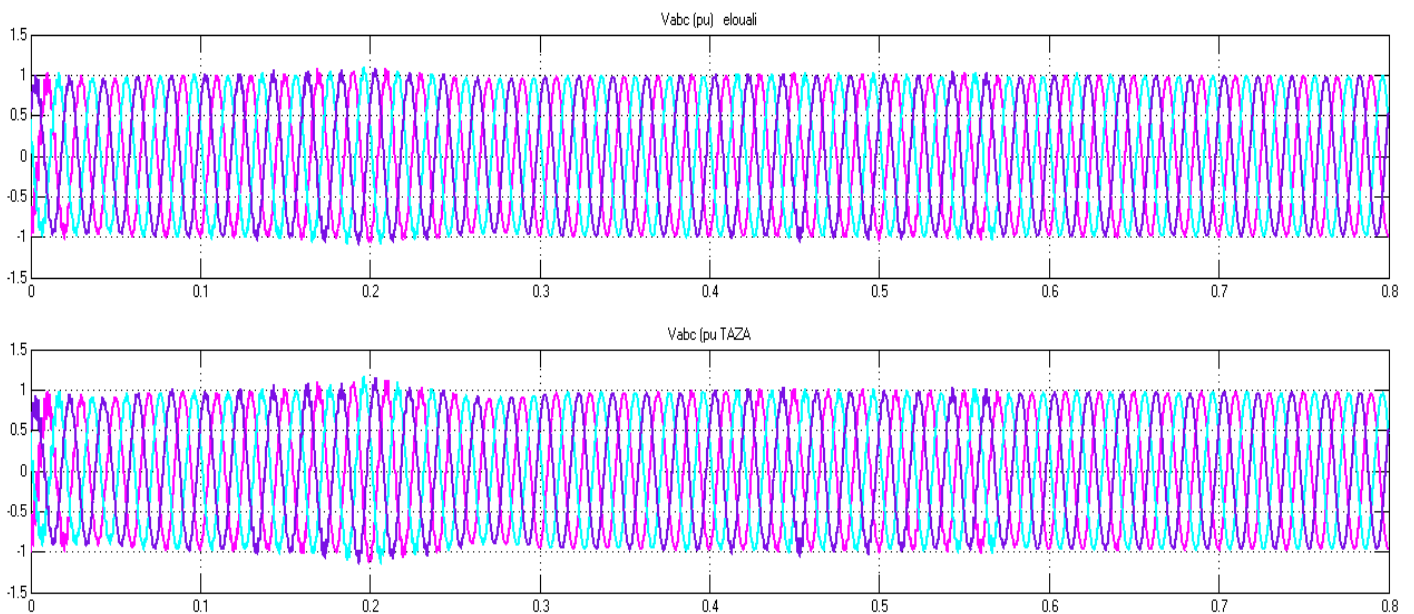


Figure 40 : Tensions d'el Ouali, Taza avec le SVC

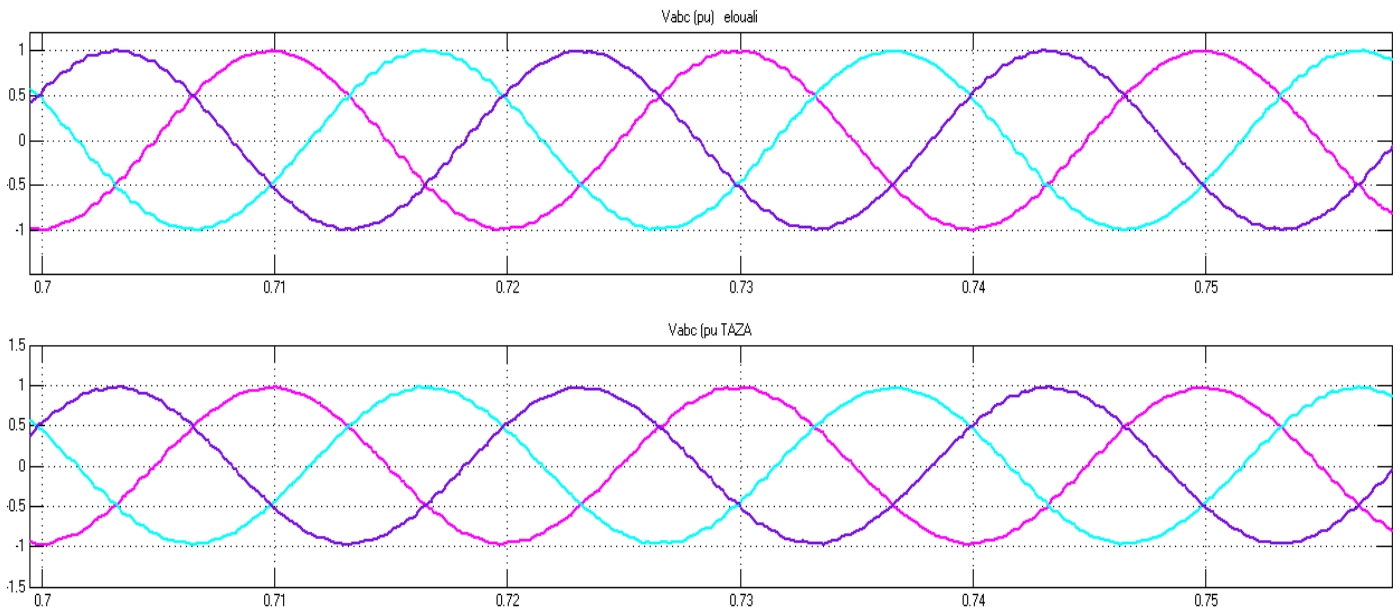


Figure 41: Zoom sur les tensions d'el Ouali et Taza avec le SVC

Suivant la relation $R_{svc} = 1 + 0,75 \frac{S_{svc}}{S_{sol}}$ le SVC permet une réduction de Flicker de 1,23%

✦ *SVC connecté à un jeu de barre de faible tension :*

Dans le cas où le SVC est connecté à un réseau jeu de barre faible (5kV) les fluctuations apparaissent encore une fois comme le montre la figure suivante :

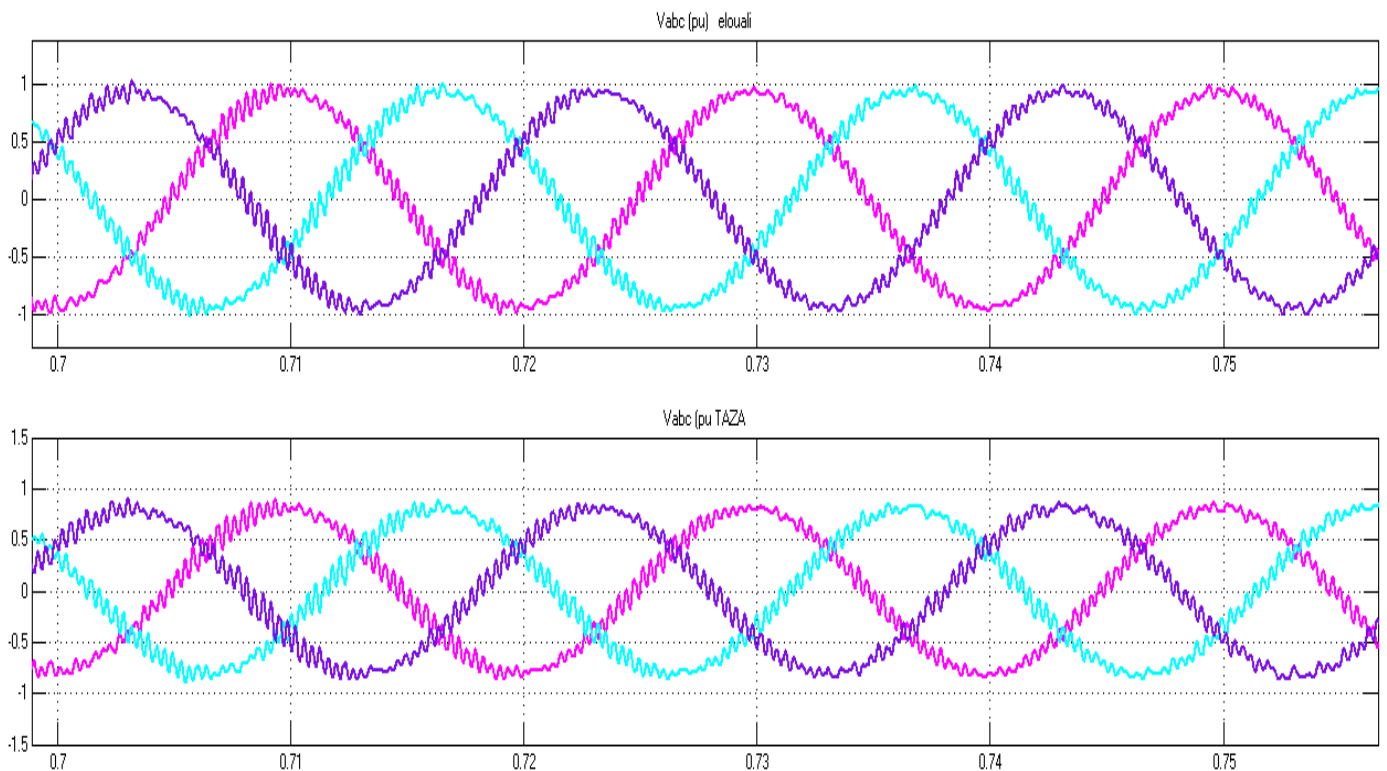


Figure 42 : Tensions d'El Ouali Taza pour un SVC connecté à un jeu de barre de faible tension

L'inconvénient du SVC se situe dans le fait que ce dernier ne peut pas compenser de la puissance réactive lorsqu'il est connecté à un faible réseau.

3.4. Amélioration avec le STATCOM

Afin de faire une comparaison entre le STATCOM et le SVC on considère le schéma de la figure suivante :

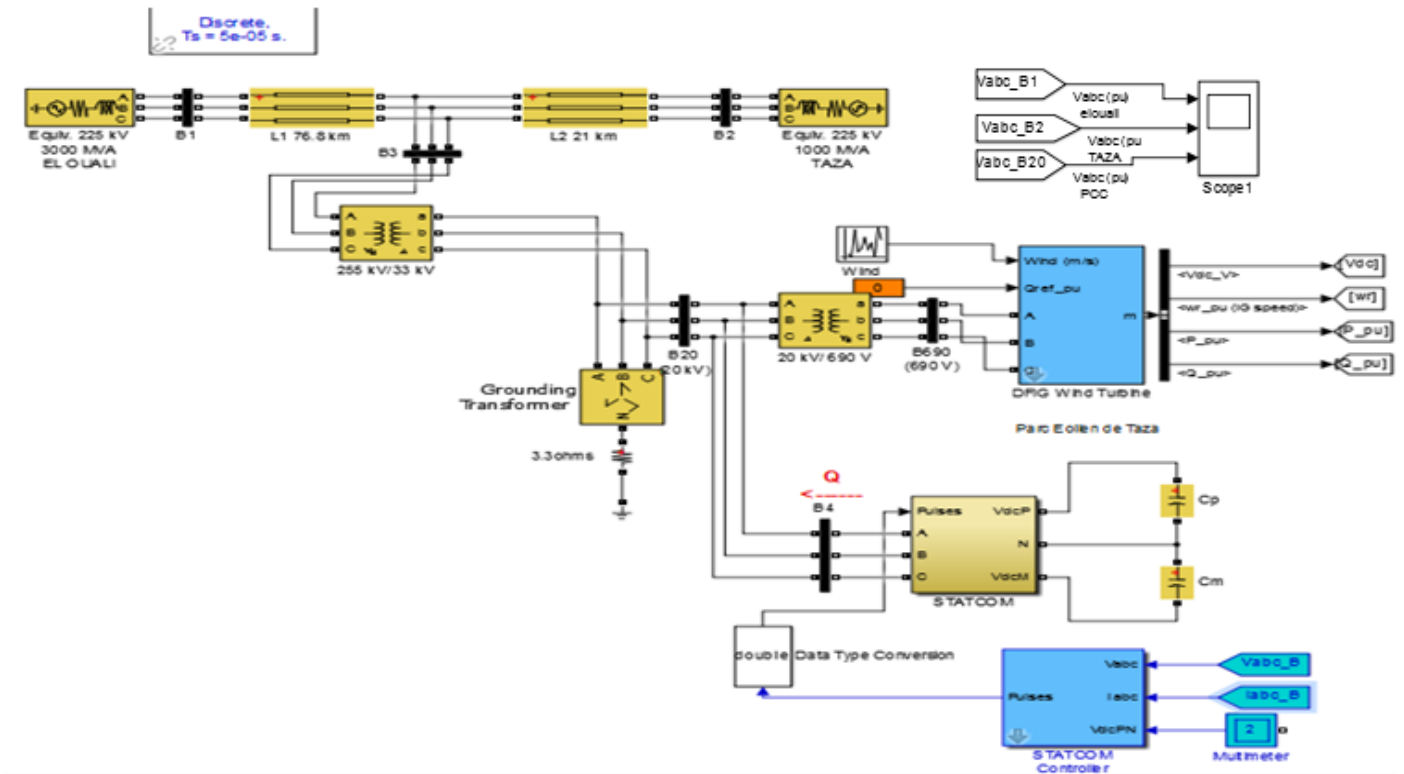


Figure 43 : Parc éolien avec STATCOM

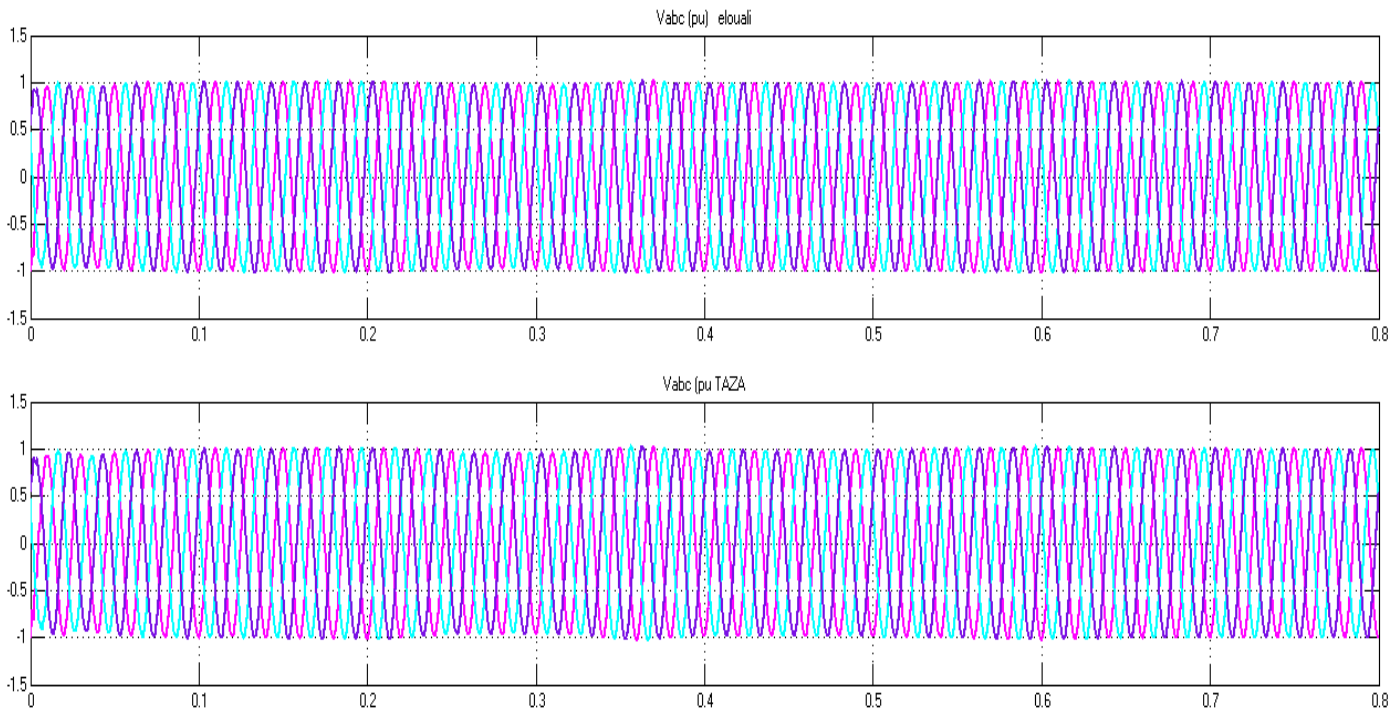


Figure 44 : Tensions d'El Ouali et de Taza avec STATCOM

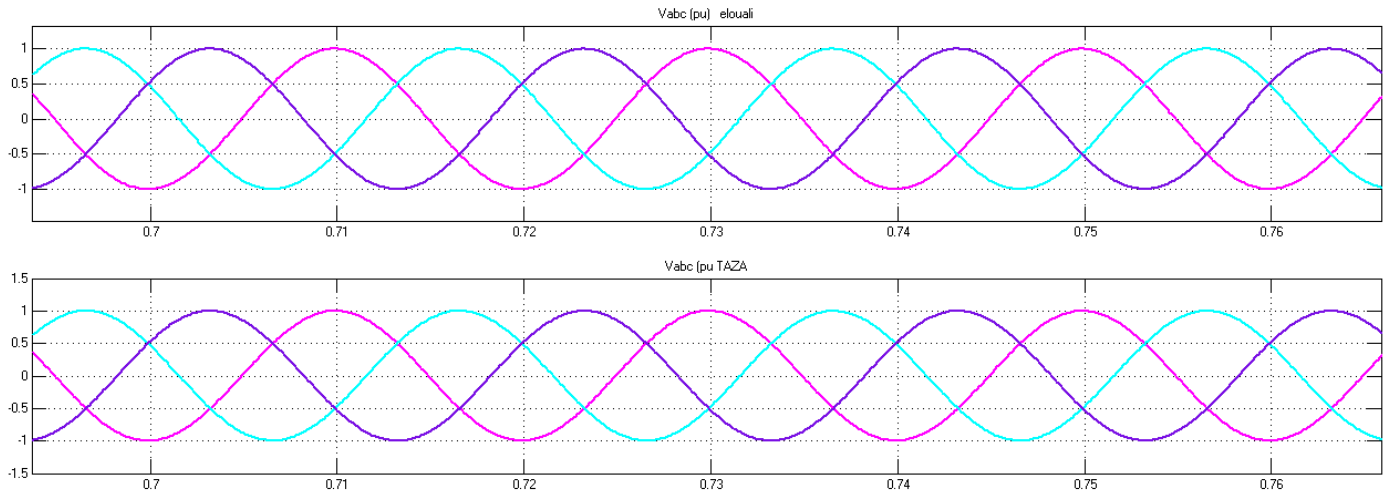


Figure 45 : Zoom des tensions d'El Ouali et Taza pour le STATCOM

Les performances obtenues sont très satisfaisantes du point d'atténuation des fluctuations de tension. La tension obtenue ne subit aucune distorsion car la STATCOM avec son pouvoir de compensation élevé peut atténuer des perturbations autres que le Flicker comme par exemple les harmoniques

STATCOM connecté à un réseau faible :

Pour un STATCOM connecté à un jeu de barre de faible tension (5kv) la simulation a donnée :

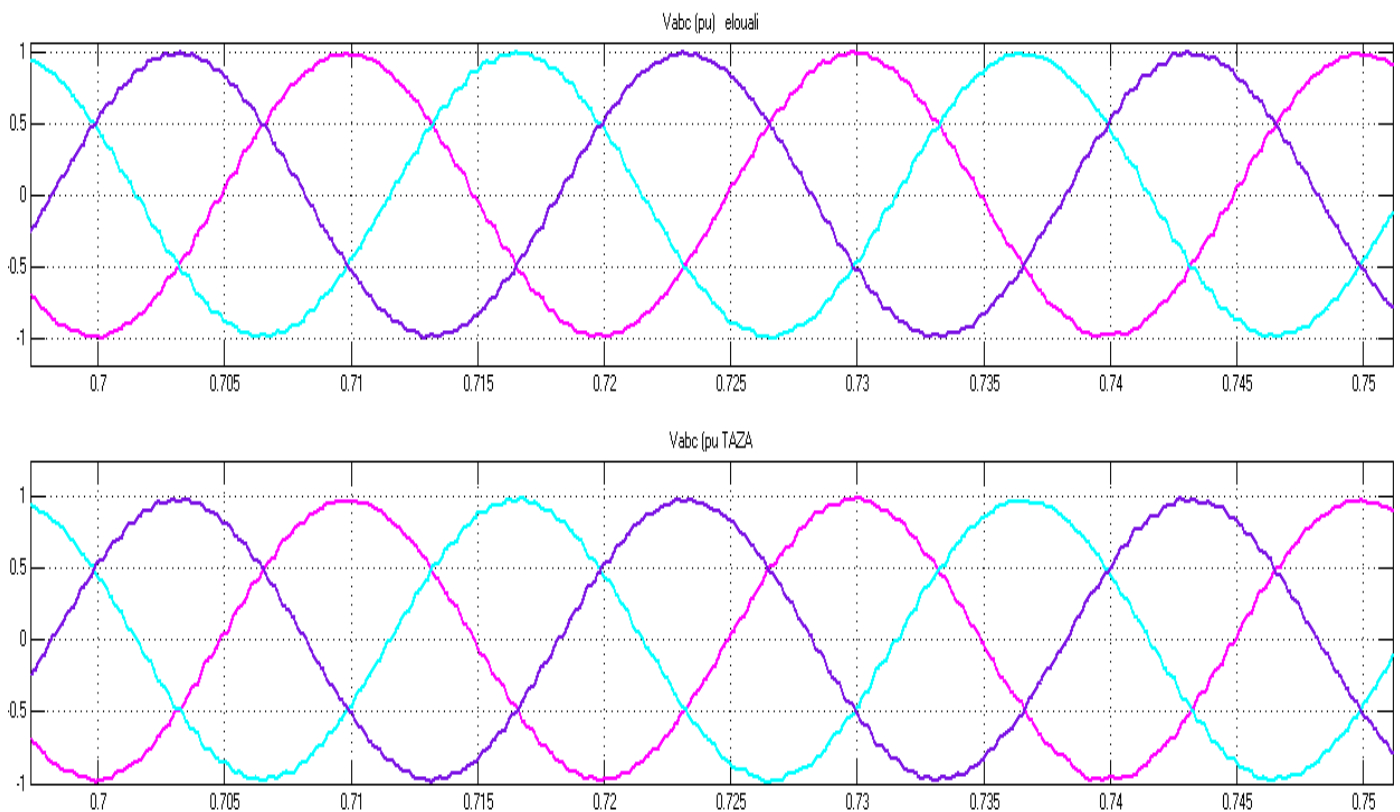


Figure 46 : Tensions d'El Ouali et Taza pour le STATCOM connecté à un jeu de barre de faible tension

Le STATCOM permet le même contrôle qu'un SVC mais avec plus de robustesse. D'après la figure 46 ce dispositif est capable de fournir son courant nominal, même si la tension au niveau des jeux de barres est très faible alors le courant du STATCOM est indépendant de la tension du nœud

Le résultat obtenu montre que le STATCOM est plus performant que le SVC

Conclusion

Ce chapitre a fait l'objet de l'étude du parc éolien de Taza, dont le fonctionnement est basé sur la machine asynchrone à double alimentation fonctionnant à vitesse variable. Après l'intégration de ce système dans le réseau électrique, les résultats de simulations montrent le rôle des dispositifs FACTS comme le SVC et le STATCOM dans l'amélioration de la qualité de tension il paraît clairement que le parc éolien est beaucoup plus performant en qualité de stabilité de tension, lorsqu'il est muni d'un STATCOM même avec des faibles tensions.

D'après les calculs et les simulations, nous pouvons confirmer que l'intégration du parc éolien de Taza n'a pas d'impact sur le réseau électrique, en revanche dans le cas de renforcement du réseau il faut prévoir les précautions nécessaires afin d'éviter le problème d'émission de Flicker. Ce problème est posé dans le cas du parc éolien de Tarfaya où la puissance nominale est de 300 MW mais la production est limitée à 140 MW à cause des fluctuations de tension. Du point de vue économique, l'étude préalable de la qualité d'énergie des futurs parcs éoliens est nécessaire afin d'éviter tout surinvestissement.

CONCLUSION GENERALE

L'éolienne constitue un moyen écologique de production d'énergie. Il existe de nombreux types d'éolienne. Dans le réseau électrique d'un pays, des éoliennes de grande taille dites ferme (ou parcs) éoliennes formant une centrale d'aérogénérateurs sont utilisées. L'intégration de ces éoliennes posent des problèmes majeurs dans la stabilité et l'écoulement de puissances dans un réseau électrique. En effet, sa puissance est sensible à la variation rapide du vent qui présente une production aléatoire et difficilement prévisible.

Nous avons établi, dans le cadre de ce travail, dans un premier temps une vue générale sur les puissances énergétiques éoliennes au niveau mondial et marocain. Puis les concepts fondamentaux de la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique. Au regard de ce chapitre, il est apparu que les éoliennes se divisent en deux grandes catégories, celles fonctionnant à vitesse fixe et celles à vitesse variable. Dans un troisième chapitre nous avons rappelé les différents problèmes de la stabilité des réseaux électriques due à l'intégration des parcs éoliens dans un réseau électrique, parmi ces perturbations on a défini le problème des fluctuations de tension. La partie simulation de ce projet est consacrée à l'étude des fluctuations de tension résultantes de la connexion du parc éolien Taza au réseau électrique ainsi les différentes techniques d'atténuation. Cette simulation a montré que les dispositifs FACTS sont les plus performants pour l'amélioration de la stabilité de tension.

La construction d'un FACTS permettant d'améliorer le transfert de puissance et améliorer la qualité de l'énergie. En perspective, il faut prévoir une étude technico-économique des dispositifs FACTS, pour arriver au choix pertinent de l'équipement correspondant. Globalement le coût des FACTS dépend de leurs puissances. (Tableau 6)

	SVC	STATCOM
Prix selon le CIGRÉ(\$/kVA ou \$/kVAr)	35-80	48-80
Prix selon Siemens(\$/kVA ou \$/kVAr)	60-100	60-130

Tableau 6 : Prix approximatif des différents FACTS

Références:

- [1] Wikipedia avantages et inconvénients de l'énergie éolienne en 2015 les-énergies-renouvelables
- [2] Equiterre /Documents/Le choix de l'énergie éolienne _ equiterre.org - Pour des choix écologiques, équitables et solidaires
- [3] ADEME : Agence de l'environnement et de maîtrise de l'énergie :pour l'énergie édition Novembre 2012
- [4] A. Mekkaoui Etude comparative des performances d'un Statcom et d'un SVC sur la stabilité d'un parc éolien connecté au réseau électrique Revue des Energies Renouvelables Vol. 17 N°1 (2014) 149 – 157
- [5] A. BOUHADOUZA « Amélioration de la Stabilité Transitoire des Fermes Eoliennes » Thèse de doctorat 2013.
- [6] Melle. MOKHNACHE, « Etude de la stabilité d'une ferme éolienne » Thèse de doctorat 2013
- [7] 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. fiche techniques présenté par l'one
- [8] fiche techniques présenté par l'one : projet éolien Taza
- [9] Wind farm modelling for power quality IECON'01: The 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society
- [10] HAKIM SAKKOU conception d'un compensateur actif multifonctions Corrigeant toutes les perturbations en tension générées par les charges non linéaires et les fours à arc
- [11] Perturbation en tension - Section 5.1.4 Zbigniew Hanzelka & Andrzej Bien AGH Université de Sciences et Technologies Octobre 2008
- [12] 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
- [13] HAL Contribution à la Commande Robuste des Eoliennes à base de Génératrice Asynchrones Double Alimentation Du Mode Glissant Classique au Mode Glissant d'Ordre Supérieur, thèse de doctorat 2009
- [14] JACQUES COURAULT Fluctuations de tension et flicker Évaluation et atténuation, thèse de doctorat 2011
- [15] René Wierda flicker ou scintillement des sources lumineuses
- [16] Oussama MAMMERI « différentes méthodes de calcul de la puissance réactive dans un nœud a charge non linéaire en présence d'un système de compensation de l'énergie » thèse doctorat 2007
- [17] Tarak GHENAM Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, thèse de doctorat

Annexes :

Annexe1 : Fiche du parc éolien 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	

Annexe2 : Coefficients de Flicker

*Valeurs types des coefficients « c » :

On donne les valeurs de coefficients types pour les familles 2 à 6 et 4 angles Ψ_k d'impédance du réseau (30,50, 70, 85).

Pour la famille 2, les valeurs sont différentes suivant le type de régulation des pales:

-pitch : Pales variables,

-stall : Régulation naturelle par la forme des pales.

Famille 2

Régulation	$\Psi_k = 30^\circ$ [25 ; 40]	$\Psi_k = 50^\circ$ [40 ; 60]	$\Psi_k = 70^\circ$ [60 ; 77]	$\Psi_k = 85^\circ$ [77 ; 90]
Pitch	48	36	18	30
Stall	32	24	12	20

Famille 3

	$\Psi_k = 30^\circ$ [25 ; 40]	$\Psi_k = 50^\circ$ [40 ; 60]	$\Psi_k = 70^\circ$ [60 ; 77]	$\Psi_k = 85^\circ$ [77 ; 90]
C	21	14	10	12

Famille 4

	$\Psi_k = 30^\circ$ [25 ; 40]	$\Psi_k = 50^\circ$ [40 ; 60]	$\Psi_k = 70^\circ$ [60 ; 77]	$\Psi_k = 85^\circ$ [77 ; 90]
C	12	14	17	18

Famille 5

	$\Psi_k = 30^\circ$ [25 ; 40]	$\Psi_k = 50^\circ$ [40 ; 60]	$\Psi_k = 70^\circ$ [60 ; 77]	$\Psi_k = 85^\circ$ [77 ; 90]
C	20	20	20	20

Famille 6

	$\Psi_k = 30^\circ$ [25 ; 40]	$\Psi_k = 50^\circ$ [40 ; 60]	$\Psi_k = 70^\circ$ [60 ; 77]	$\Psi_k = 85^\circ$ [77 ; 90]
C	12	12	12	12

Valeurs types des coefficients « kf »: On donne les valeurs de coefficients types pour les familles 3 et 4 et 4 angles Ψ_k d'impédance du réseau (30, 50, 70, 85).

Familles 3

	$\Psi_k = 30^\circ$	$\Psi_k = 50^\circ$	$\Psi_k = 70^\circ$	$\Psi_k = 85^\circ$
couplage à vent minimal	0,75	1,5	1,5	2,7
couplage à vent nominal	1,95	2,25	2,4	2,4
transition entre machines	1,95	2,4	2,85	2,85

Familles 4

	$\Psi_k = 30^\circ$	$\Psi_k = 50^\circ$	$\Psi_k = 70^\circ$	$\Psi_k = 85^\circ$
couplage à vent minimal	0,23	0,23	0,21	0,18
couplage à vent nominal	0,27	0,35	0,42	0,44
transition entre machines	0,26	0,21	0,17	0,17

Annexe 3 : La norme CEI 61 400-21

WINDTEST
Kaiser-Wilhelm-Koog GmbH

Laboratory accredited by DAP Deutsches Akkreditierungssystem
Professoren 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 Dreerkamp 5 D - 26805 Aurich	Kind of installation:	Pitch, variable speed
Report:	WT 5706/07	Rated power P_{rated} :	2000 kW
Period of measurement:	2007-03-20 to 2007-04-04	Rated wind speed v_{rated} :	12 m/s
Order no (WT) :	4250 05 03075 64	Rated apparent power S_{rated} :	2002 kVA
		Rated reactive Power Q_{rated} :	100 kvar
		Rated current I_{rated} :	2890 A
		Rated voltage U_{rated} :	400 V

Performance:¹⁾

P_{max} [kW]	2000.0	P_{95} [kW]	2022.9	P_{99} [kW]	2095.1
$P_{max} = P_{95} / P_n$	1.00	$P_{90} = P_{90} / P_n$	1.01	$P_{99} = P_{99} / P_n$	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_{max} [kvar]		100.0			
Reactive Power at p_{90} [kvar]		112.0			
Reactive Power at p_{99} [kvar]		105.6			

Flicker:

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