



LICENCE SCIENCES ET TECHNIQUES
Génie Electrique

RAPPORT DE FIN D'ETUDES

Intitulé :

**Etude d'impact de l'intégration du parc
éolien de Midelt sur le réseau HTB:
Flicker & harmonique**

Réalisé Par :

ELMEHTOUCHI HAMZA
ELKROUK FATH ALLAH

Encadré par :

Pr EL MARKHI HASSANE (FST FES)
M. EL MAKRINI ABOUBAKR (ONEE FES)

Soutenu le 09 Juin 2017 devant le jury

Pr EL MARKHI HASSANE (FST FES)
Pr MECHAQRANE ABDELLAH (FST FES)
Pr EL AMRANI EL IDRISSEI NAJIBA (FST FES)

بسم الله الرحمن الرحيم

Dédicace

Nous dédions ce travail,

Comme preuve de respect, de gratitude, et de reconnaissance :

A Nos très chers parents,

Pour leur patience, leur amour, leur soutien et leurs encouragements qu'ils nous ont apportés au cours de ce projet. Ils ont tout fait pour notre bonheur et notre réussite.

A Nos frères et sœurs,

Pour votre soutien et encouragements.

A Nos chers ami(e)s,

Pour les moments que nous avons passé ensemble veuillez trouver ici l'expression de notre gratitude.

A tous Nos professeurs,

Pour votre soutien et vos conseils,

Une spéciale dédicace aux membres de club espoir, veuillez trouver ici notre sincères gratitudes et reconnaissances.

A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail

Merci infiniment

Remerciements

Nous tenons d'abord à exprimer nos vifs remerciements et notre profonde gratitude à tous les professeurs du département Génie Electrique, spécialement aux membres de jurys qui ont accepté de juger ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à notre encadrant universitaire Monsieur **HASSANE EL MARKHI**, Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de Fès, pour son encadrement et son soutien, il a toujours montré l'écoute et la disponibilité tout au long de la réalisation de ce travail, ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'il a bien voulu nous consacrer pour assurer la réussite de cette étude.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et nos chaleureux remerciements à monsieur **ABOUBAKR EL MAKRINI**, Ingénieur d' État et Chef de la Division de transport à l'Office National d' Électricité, pour avoir accepté notre demande de stage, pour sa disponibilité, pour ses conseils précieux qu'il nous a prodigués tout au long de la réalisation de ce projet.

Nous tenons aussi à remercier Monsieur **HASSAN EL MOUSSAOUI**, Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de Fès, pour son soutien, sa collaboration, ses remarques pertinentes et directives, et sa disponibilité.

Nous sommes également profondément reconnaissants à tous les doctorants de département de génie électrique, en particulier Monsieur **EL KARKARI YASSIR**, pour sa rigueur scientifique et les conseils judicieux qu'il nous a prodigués pour l'élaboration de ce travail, nous lui remercions également pour sa disponibilité et sa gentillesse.

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.

Nos remerciements s'adressent également à tout le corps professoral du département Génie Electrique, pour la qualité de son enseignement ainsi que sa disponibilité tout au long de ces trois années de formation.

Enfin, que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail trouvent ici l'expression de notre reconnaissance et de nos remerciements.

Résumé

L'électricité est devenue de plus en plus primordiale pour l'humanité. Face à la demande en électricité, toujours croissante de nos jours, et loin de l'utilisation des énergies fossiles polluantes (pétrole et gaz), plusieurs pays se sont tournés vers les énergies renouvelables.

Les nouvelles énergies vertes dites "renouvelables" sont réapparues et prennent peu à peu une place indéniable dans le marché d'électricité. Parmi celles-ci, 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.

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

Sommaire

Dédicace	1
Remerciements	2
Résumé.....	3
Introduction générale.....	8
Chapitre I : Aperçu sur l'ONEE et Le parc éolien de Midelt	10
I.1 Présentation de l'ONEE :.....	11
I.2 Fiche technique :	11
I.3 Missions :	11
I.4 Activités :	11
I.5 Situation énergétique marocaine	12
I.5.1 Contexte générale :	12
I.5.3 Le gisement éolien au Maroc :	13
I.6 Parc Eolien de Midelt	14
I.6.1 Description de parc	14
I.6.2 Caractéristique des éoliennes utilisées :	14
I.6.3 Raccordement au réseau national	15
Chapitre II : Etude des conditions de raccordement de parc éolien au réseau national	16
II.1 L'énergie éolienne	17
II.1.1 Définition.....	17
II.1.2 Constitution d'une éolienne :.....	18
II.1.3 Classification d'éoliennes :	18
II.2 Eoliennes a vitesse fixe et variable :.....	19
II.2.1 Eoliennes à vitesse fixe :.....	19
II.2.2 Les éoliennes à vitesse variable :	20
II.3 Les perturbations générées par les parcs éoliens sur le réseau de transport.....	22
II.3.1 Les creux de tension :	23
II.3.2 Le Déséquilibre	24
II.3.3 Les harmoniques :	24
II.3.4 Flicker (papillotement) :	27
Chapitre III : Les solutions proposées pour l'atténuation des harmoniques et le Flicker.....	34
III.1 Atténuation des fluctuations de tension :	35

III.1 .1 Augmentation de la puissance de court-circuit :	35
III.1 .2 La Compensation de la puissance réactive :	36
III .2 Atténuation des harmoniques :	39
III .2 .1 Filtre passif :	39
III .2 .2 Filtre actif (ou compensateur actif) :	39
III .2 .3 Filtre hybride :	40
III .2.4 Critères de choix :	40
Chapitre IV : Simulation du parc éolien de Midelt	41
IV .1 Description du système étudié :	42
IV .2 Simulation du système éolien :	42
IV .2.1 Simulation du vent :	42
IV .2.2 Simulation de parc éolien en fonctionnement normal :	43
IV .3 La simulation des fluctuations de Tension « «FLICKER » :	44
IV .3 .1Calcul théorique du niveau d'émission de Flicker :	44
IV.3.2 La simulation du parc éolien dans le cas de renforcement : L'effet de l'augmentation de la puissance nominale de parc :	45
IV .3 .3 Techniques d'atténuation de Flicker :	46
IV .4 La simulation des fluctuations des harmoniques :	48
IV .4 .1 Technique d'Atténuations des harmoniques :	50
Les références :	55

Liste des figures

Figure 1 : Le projet marocain intégré de l'énergie [2].....	12
Figure 2: Stratégie énergétique marocaine [2].....	13
Figure 3 : Caractéristique du programme éolien intègre [2].....	13
Figure 4 : Carte du gisement éolien du Maroc (vitesse moyenne annuelle) [1].....	14
Figure 5 : Raccordement de parc éolien au réseau national.....	15
Figure 6 : Conversion de l'énergie cinétique du vent [3].....	17
Figure 7: Composition d'une éolienne [4].....	18
Figure 8 : Eolienne à couplage direct et à vitesse fixe [5].	19
Figure 9 : Puissance en fonction de la vitesse de rotation des pales d'éolienne [7].....	20
Figure 10 : Aérogénérateur à machine synchrone [5].....	21
Figure 11 : Système éolien à vitesse variable basé sur une MADA [5].	22
Figure 12 : Creux de Tension [8].....	23
Figure 13 : Creux de tension acceptable par la norme CEI 1000-2- 2.[9].....	23
Figure 14: Creux de tension a) provoquées par un court-circuit b) provoquées par un démarrage brusque d'un moteur [8].	23
Figure 15 : Déséquilibre du système triphasé de tension [10].....	24
Figure 16 : Courbe de courant/tension en sinusoïde parfaite. [11].....	25
Figure 17 : L'addition des harmoniques au signal fondamental déforme la sinusoïde de base. [11]	25
Figure 18 : Spectre harmonique d'un signal [11].....	26
Figure 19 : Fluctuations de tension [12].....	28
Figure 20 : Schéma d'un parc éolien connecté au réseau.	29
Figure 21 : Schéma équivalent du parc connecté au réseau [13].	29
Figure 22 : Variation de l'intensité lumineuse due à une fluctuation de tension [14].....	31
Figure 23 : Circuit équivalent après l'insertion de la capacité [15].....	35
Figure 24 : la structure du SVC [17].....	37
Figure 25 : Schéma du STATCOM [17].....	38
Figure 26 : Principe d'utilisation d'un filtre passif [18].	39
Figure 27 : Principe d'utilisation d'un filtre actif [18].....	40
Figure 28 : Principe d'utilisation d'un filtre hybride [18].	40
Figure 29 : Schéma de raccordement du Parc de Midelt.	42
Figure 30: La vitesse du vent aléatoire (m/s).	42
Figure 31: le modèle du parc éolien en fonctionnement normal.	43
Figure 32 : la génératrice du parc éolien.....	43
Figure 33 : la simulation du parc éolien en fonctionnement normal.	44
Figure 34 : Tensions de Mibladen, Errachidia et au PCC.	45
Figure 35 : Tensions de Mibladen, Errachidia et au PCC.	46
Figure 36 : Tensions de Mibladen, Errachidia et au PCC pour C=0,01F.....	46
Figure 37 : Le parc éolien raccordé au réseau avec un STATCOM	47
Figure 38 : Tensions de Mibladen et d'Errachidia avec STATCOM.....	48
Figure 39 : le modèle du système simulé.....	48
Figure 40 : Vabc et labs au point PCC.....	49
Figure 41 : Le spectre harmonique de la tension du parc au PCC en fonctionnement nominal.....	49
Figure 42 : Parc éolien avec filtre actif.	50
Figure 43 : La tension au PCC du parc avec filtre actif.....	50
Figure 44: Allure de spectre harmonique de la tension du parc au PCC avec un filtre actif.	51

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques générales d'aérogénérateurs de 3 MW [1]	14
Tableau 2 : les valeurs limitent des niveaux des tensions [9].	27
Tableau 3: Limites de Flicker pour HTA et HTB [9].	32
Tableau 4 : l'émission du flicker en fonctionnement normal	44
Tableau 5 : l'émission du flicker dans le cas de renforcement	45

Liste des Acronymes

ONEE	: Office National de l'Electricité et de l'Eau Potable.
CDER	: Le Centre de Développement des Énergies Renouvelables.
CEI	: Commission Electrotechnique Internationale.
FACTS	: Flexible Alternative Currents Transmission Systems.
FAP	: filtre actif parallèle.
GTO	: Gate Turn-Off Thyristor (Thyristors Commandés à l'Ouverture).
IGBT	: Insulated Gate Bipolar Transistor (Transistor Bipolaire à Grille Isolée).
MADA	: Machine Asynchrone A Double Alimentation.
PCC	: Point Commun de Raccordement.
Pst	: Flicker à Court Terme (short time).
Plt	: Flicker à Long Terme (long time).
SVC	: Static VAR Compensator.
STATCOM	: Static Synchronous Compensator.
TSC	: Thyristor Switched Capacitors.
TCR	: Thyristor Controlled Reactors.
TEP	: tonnes équivalent-pétrole.

Introduction générale

L'accélération du développement économique et social du Maroc a engendré une progression significative de la demande en énergie.

Pour répondre à ses besoins énergétiques croissants, le Maroc a défini une nouvelle stratégie énergétique visant à sécuriser l'approvisionnement en énergie et à en optimiser l'accès, tout en rationalisant la consommation et en protégeant l'environnement.

Dans ce contexte, les énergies renouvelables sont alors une composante majeure de la nouvelle stratégie énergétique du royaume. En effet, le Maroc dispose d'un potentiel important en énergies renouvelables dont l'exploitation permettra de couvrir une part substantielle de ses besoins croissants et de contribuer à la protection de l'environnement en se substituant aux énergies fossiles. 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.

La connexion des éoliennes au réseau électrique pose un problème de stabilité du réseau électrique et la qualité de la puissance produite. Parmi les perturbations résultantes de la connexion de ces éoliennes, on trouve les harmoniques et les fluctuations de tension « FLICKER ».

Pour réduire ces perturbations et ainsi améliorer la qualité de l'énergie distribuée, nous utilisons :

- un compensateur statique STATCOM qui injecte ou absorbe de l'énergie réactive dans le réseau selon le besoin, afin de garder la valeur de tension à sa valeur nominale, pour améliorer la stabilité des réseaux électriques.
- Utilisation d'un filtre actif de puissance qu'est un convertisseur continu-alternatif (onduleur) qui injecte en parallèle sur les réseaux des courants ou des tensions harmoniques identiques à celles qu'on souhaite éliminer, mais en opposition de phase.

Ce rapport de projet de fin d'études est organisé de la manière suivante :

- Le premier chapitre contiendra un aperçu général sur l'office national d'électricité (ONEE) lieu de notre stage, situation énergétique marocaine, et une vue générale sur le parc éolien de Midelt .

- Le deuxième chapitre comportera trois parties : la première partie sera consacrée aux notions générales sur les éoliennes ainsi que les différents composants constituant l'aérogénérateur seront brièvement présentés. La seconde exposera les différentes machines électriques utilisées pour la conversion éolienne seront étudiées afin de montrer les avantages de la MADA. Tandis que la troisième partie montrera les perturbations générées par les parcs éoliens sur le réseau de transport et nous focalisons le point sur celui des harmoniques, et le flicker.
- Le troisième chapitre présentera les solutions traditionnelles et modernes de dépollution harmonique aussi que pour les fluctuations de flicker.
- Dans le quatrième chapitre, sera consacré à la simulation (Matlab/Simulink) du parc éolien de Midelt avec l'intégration du STATCOM pour but d'éliminer les fluctuations rapides de tension 'le flicker'. Ensuite, nous abordons la simulation du parc éolien avec l'intégration du filtre actif, pour but d'améliorer le contenu total d'harmonique (THD).

Chapitre I :

Aperçu sur l'ONEE et Le parc éolien de Midelt

I.1 Présentation de l'ONEE :

Crée par Dahir en août 1963 l'Office National de l'Electricité et de l'Eau potable était substituée à la Société Electric 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.

I.2 Fiche technique :

Raison social : Office national d'électricité.

Statut juridique : Etablissement public à caractère industriel et commercial.

Directeur General : Ali FASSI FIHRI.

Siège social : 65 rue Otman ben Affan 2000 Casablanca-Maroc.

Activité : Production, transport, et distribution d'énergie électrique au Maroc.

Date de création : 1963.

I.3 Missions :

Les missions de l'ONEE résident essentiellement en :

- La garantie d'un service public de la production et du transport de l'énergie électrique, ainsi que celui de sa distribution dans les zones où l'Office intervient.
- La garantie de la demande en électricité du pays en énergie électrique dans les meilleures conditions de coût et de qualité de service.
- La gestion et le développement du réseau de transport.
- La planification et la généralisation de l'électrification rurale.
- Le développement des énergies renouvelables.

I.4 Activités :

L'ONEE assure la production, le transport et la distribution de l'électricité, à travers tout le territoire marocain.

- **Production :**

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

- **Transport :**

Ayant pour mission d'assurer le transport de l'énergie électrique et la sécurité d'alimentation du pays, l'ONEE développe et renforce son réseau de transport, qui couvre aujourd'hui presque la quasi-totalité du territoire national, et est constitué de lignes de 400 kV, 225 kV, 150 kV et 60kV.

- **Distribution :**

Étant le premier distributeur d'électricité au Maroc, l'ONEE met tout en œuvre afin que la clientèle soit satisfaite, ainsi l'ONEE ne cesse d'améliorer la qualité de service : externalisation des points d'encaissement, promotion du prépaiement, mise en place de "SIRIUS", progiciel intégré de gestion commerciale, télé conduite régionale.

I.5 Situation énergétique marocaine

I.5.1 Contexte générale :

Le Royaume du Maroc souhaite révolutionner la production d'énergie pour diminuer sa dépendance aux importations de combustibles utilisés pour la production d'électricité et ainsi diminuer sa dépendance aux produits pétroliers. La dépendance énergétique aux combustibles fossiles expose le Royaume à la volatilité et à la tendance à la hausse des prix, ainsi qu'aux risques liés à la sécurité d'approvisionnement à moyen et long terme. La dépendance du Maroc au pétrole s'explique par les faibles ressources énergétiques fossiles et minières du pays [1].

D'autre part, le Maroc connaît une forte croissance économique et sociale. L'industrialisation, l'urbanisation et les politiques de développement rurales qui ont permis d'arriver à un taux d'électrification rurale de 96,8% en 2010 se traduisent par une demande accrue des besoins en énergie électrique, de l'ordre de 8 % annuel sur ces dix dernières années [1].

I.5.2 Le projet marocain intégré de l'énergie :

À l'horizon 2020, les centrales fonctionnant avec des énergies renouvelables représenteront 42% de la capacité électrique totale, le solaire, l'éolien et l'hydraulique occupant chacun 14% (figure 1).

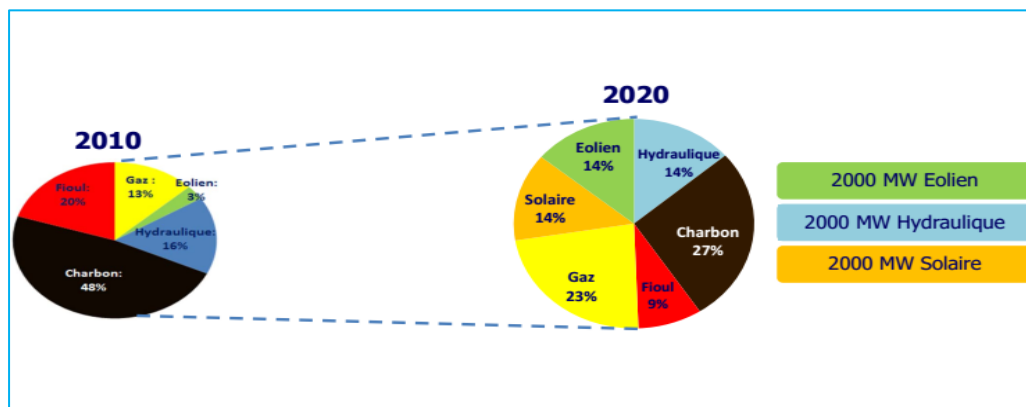


Figure 1 : Le projet marocain intégré de l'énergie [2].

Le Projet marocain de l'énergie éolienne a également pour objectif une puissance totale de 2 000 MW pour 2020 (ONEE). Il est estimé qu'en réalisant ce programme d'équipement, le pays réduira ses importations de combustibles, permettant ainsi l'économie de 1,5 millions de tep en combustibles fossiles (figure 2).

Puissance totale	2000 MW
Production annuelle	6600 GWh
Investissement	3,5 Milliards US\$
Economie ann. de combustible	1,5 million TEP
Emissions de CO₂ ann. évitées	5,6 millions T
Achèvement du programme	2020

Figure 2: Stratégie énergétique marocaine [2]

Le projet Marocain de l'Énergie Éolienne (figure 3), qui contribue à la mise en valeur du potentiel considérable du Maroc en énergie éolienne, comprend les installations électriques éoliennes suivantes :

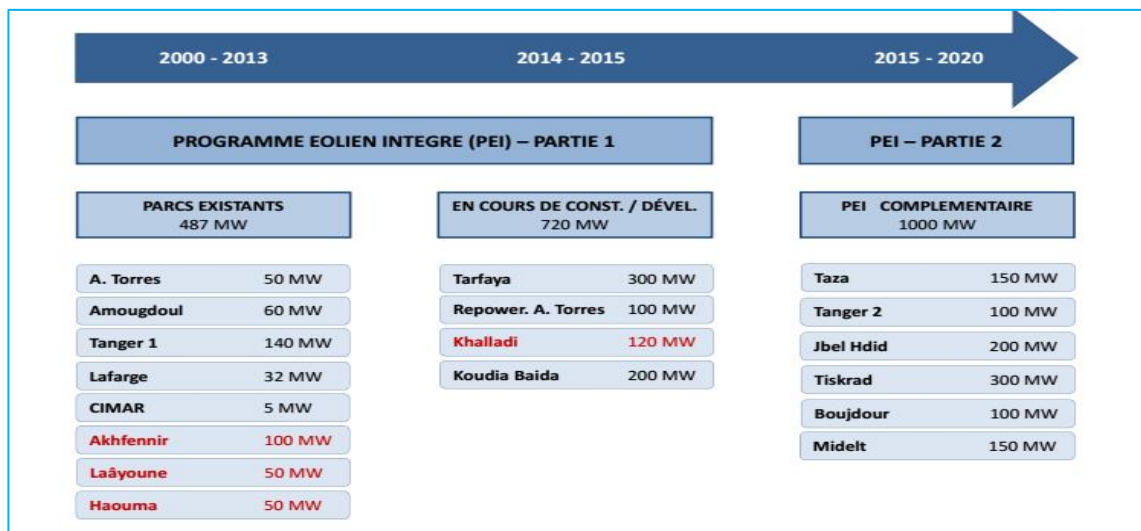


Figure 3 : Caractéristique du programme éolien intègre [2]

I.5.3 Le gisement éolien au Maroc :

Le Maroc bénéficie d'un gisement éolien important avec des régions dans lesquelles le vent dépasse les 8 m/s de vitesse moyenne annuelle. La mise en évidence de ce gisement a été réalisée par le Centre de Développement des Énergies renouvelables (CDER), qui, par l'installation de plusieurs mâts de mesure, a permis d'établir une carte du gisement éolien du pays (figure 4). Le potentiel marocain de production d'énergie électrique éolienne a été estimé à 25 000 MW. [1]

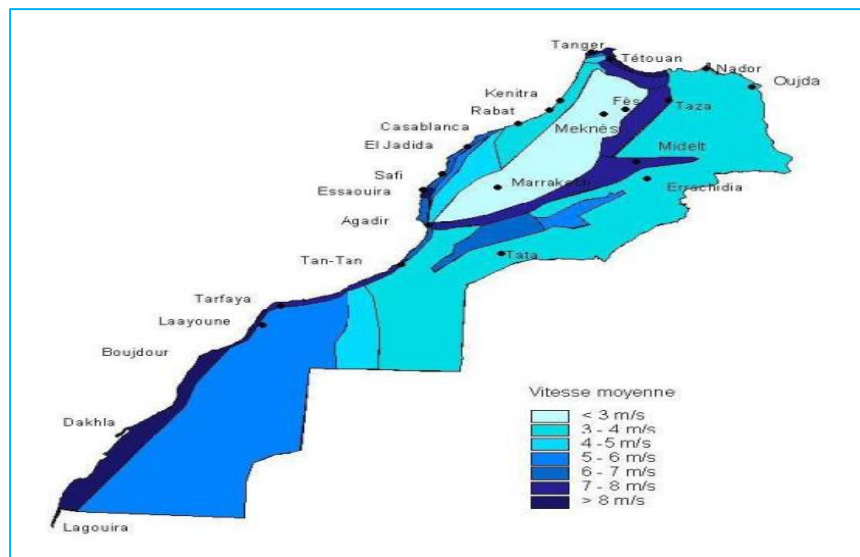


Figure 4 : Carte du gisement éolien du Maroc (vitesse moyenne annuelle) [1].

I.6 Parc Eolien de Midelt

I.6.1 Description de parc

Le site retenu pour l'implantation d'un parc éolien dans la zone de Midelt est situé à environ 14 Km au nord-est de la ville de Midelt. Il est prévu qu'environ 60 éoliennes soient installées sur les massifs de Jbel Amrhourzif, Chebket el Rhechioua, Bou Tmirine, Jbel Ajobab, Ajellab, et Irht Ourhenbou. Des hauteurs jouissant d'une vitesse de vent considérable.

I.6.2 Caractéristique des éoliennes utilisées :

Les aérogénérateurs qui seront installés auront une puissance nominale de 3MW. Les caractéristiques des aérogénérateurs de cette puissance sont détaillées dans le tableau suivant, et peuvent varier selon les fabricants (tableau 1).

Tableau 1 : Caractéristiques générales d'aérogénérateurs de 3 MW [1]

Caractéristiques générales de l'aérogénérateur	
Puissance nominale	3.0 MW
Hauteur maximale	140-150 m
Concept d'installation	Tripale à axe horizontal, avec multiplicateur, vitesse de rotation variable, ajustage individuel des pales
Tour	
Hauteur	90 à 100 m
Couleur	Gris clair RAL 7035
Rotor	
Diamètre	100 m – 110 m
Surface balayée	8 000 m ² – 9469 m ²
Vitesse de rotation	7,8 à 13,7 tr/min
Vitesse de démarrage	3 m/s (11 km/h)

I.6.3 Raccordement au réseau national

Les éventuelles possibilités de raccordement du futur parc au réseau national sont les suivantes :

- Raccordement direct au futur poste 225/60 kV de Mibladene .
- Rabattement sur la ligne 225 kV existante Khénifra-Errachidia

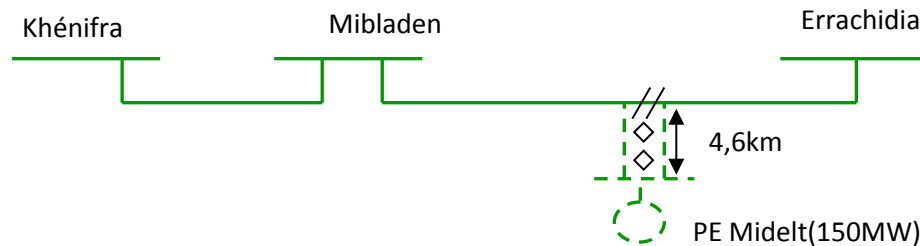


Figure 5 : Raccordement de parc éolien au réseau national

D'après l'étude de raccordement qui a été effectuée, le raccordement du parc éolien au réseau national se fera par le rabattement de la ligne 225kV Errachidia-Mibladen sur le nouveau poste 225kV du parc éolien Midelt moyennant la réalisation de deux lignes 225kV simple terne en câble Almélec acier 612mm² d'une longueur d'environ 4,6km chacune (figure 5).

Conclusion

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. Le projet de parc éolien de Midelt s'insère dans le Projet Marocain de l'Énergie Éolienne.

Chapitre II :

Etude des conditions de raccordement de parc éolien au réseau national

Introduction

La contrainte essentielle de l'intégration des parcs éoliens dans les systèmes électriques est liée au caractère de variabilité (intermittent, aléatoire et imprévisible) du vent. La puissance électrique produite par les éoliennes est fluctuante. Elle varie avec la variation de la vitesse du vent. Ceci peut être considéré comme une perturbation de puissance injectée dans le système électrique et peut mettre en danger la stabilité du système. D'où l'intérêt d'élaborer de nouvelles exigences de raccordement et de fonctionnement des parcs éoliens afin de garder au maximum les éoliennes connectées au réseau. Le système électrique doit résister aux différentes perturbations et avoir la capacité de contribuer à la stabilité et à la sécurité du réseau.

II.1 L'énergie éolienne

II.1.1 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'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 les contraintes liées à leur raccordement au réseau de transport.

Pour convertir l'énergie du vent en énergie électrique (voir figure 6). [3]

- 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.

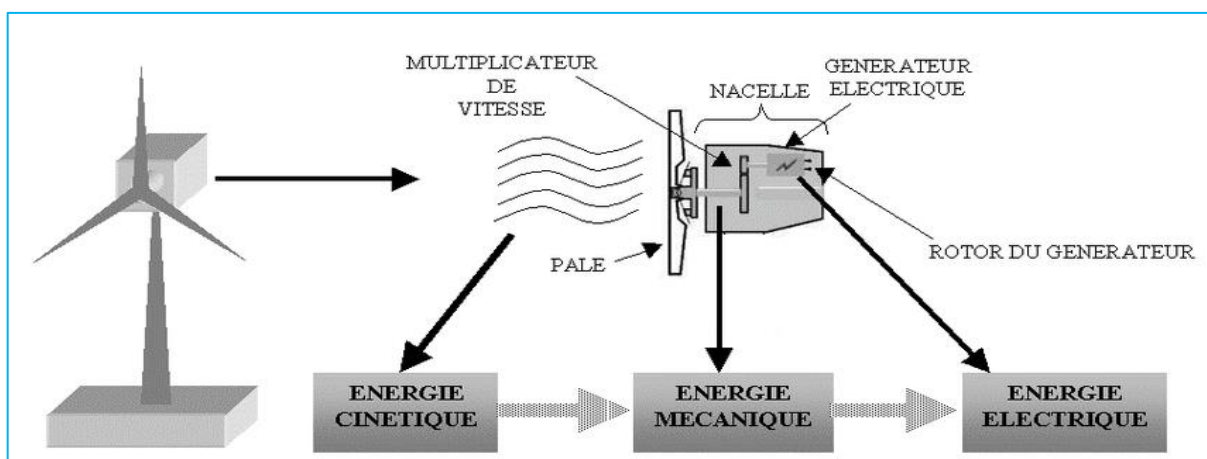


Figure 6 : Conversion de l'énergie cinétique du vent [3].

II.1.2 Constitution d'une éolienne :

Une éolienne classique est généralement constituée de trois éléments principaux (figure 7) :

- **Le mat** : Généralement un tube d'acier, qui supporte la nacelle et le rotor de la turbine. Il doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations et les obstacles près du sol et aussi du fait de l'augmentation de la vitesse du vent en hauteur.
- **Les pales** : Qui permettent de capter la puissance du vent et la transférer au rotor. Le nombre de pales varie de 1 à 3.
- **La nacelle** : Qui regroupe tous les éléments mécaniques essentiels : arbres, multiplicateur, le frein à disque qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge, le générateur, les appareils de mesure, une girouette qui indiquera la direction du vent, l'anémomètre qui indiquera la vitesse du vent, etc.

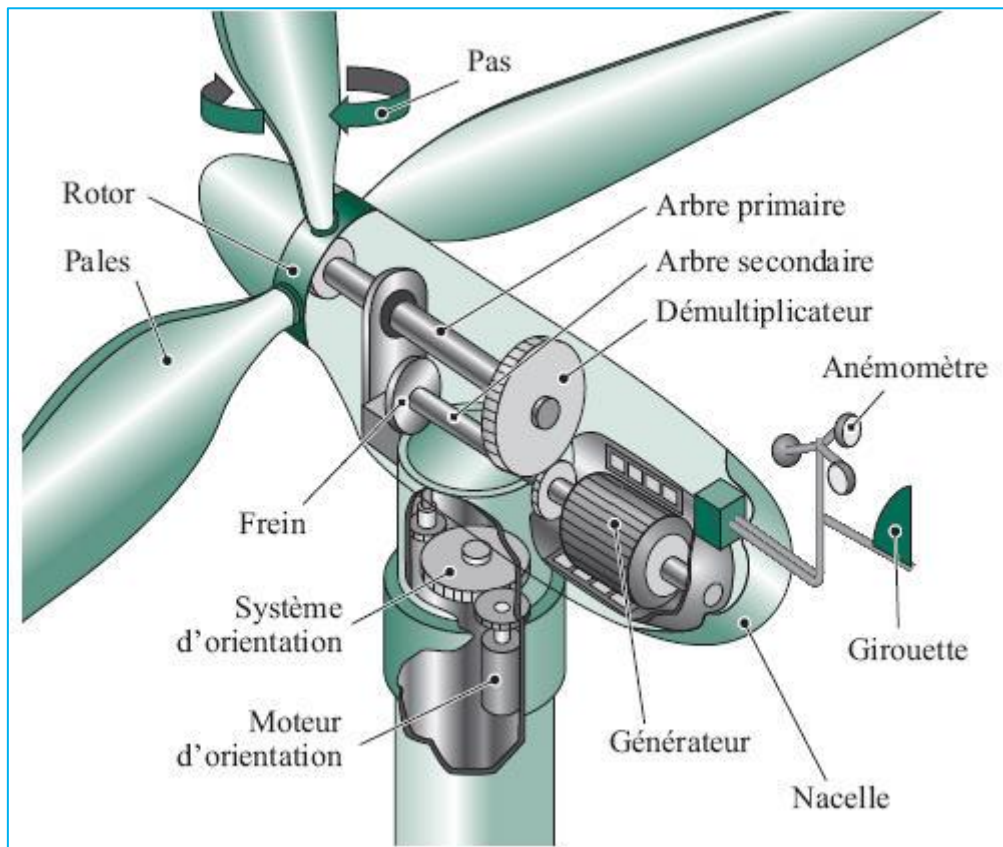


Figure 7: Composition d'une éolienne [4]

II.1.3 Classification d'éoliennes :

Il existe deux grandes familles d'éoliennes :

- les turbines éoliennes à axe horizontal.
- Les turbines éoliennes à axe vertical.

Actuellement, les éoliennes à axe horizontal sont largement plus utilisées que les éoliennes à axe vertical pour des raisons économiques liées à leur fabrication et à leur installation. Parmi les éoliennes à axe horizontal, on distingue celles à vitesse fixe et celles à vitesse variable.

II.2 Eoliennes a vitesse fixe et variable :

II.2.1 Eoliennes à vitesse fixe :

Les premières éoliennes commercialisées reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage directement couplée sur le réseau électrique (figure 8). Un multiplicateur de vitesse entraîne cette machine à une vitesse qui est maintenue approximativement constante grâce à un système mécanique d'orientation des pales. Une batterie de condensateurs est souvent associée pour compenser la puissance réactive nécessaire à la magnétisation de la machine asynchrone à cage [5].

La conception des turbines éoliennes à vitesse fixe est fortement liée aux caractéristiques aérodynamiques et mécaniques. Le temps de réponse de certaines de ces parties se situe dans la gamme de la dizaine de millisecondes. En conséquence, en cas de rafales de vent, on peut observer une variation rapide et importante de la puissance électrique générée.

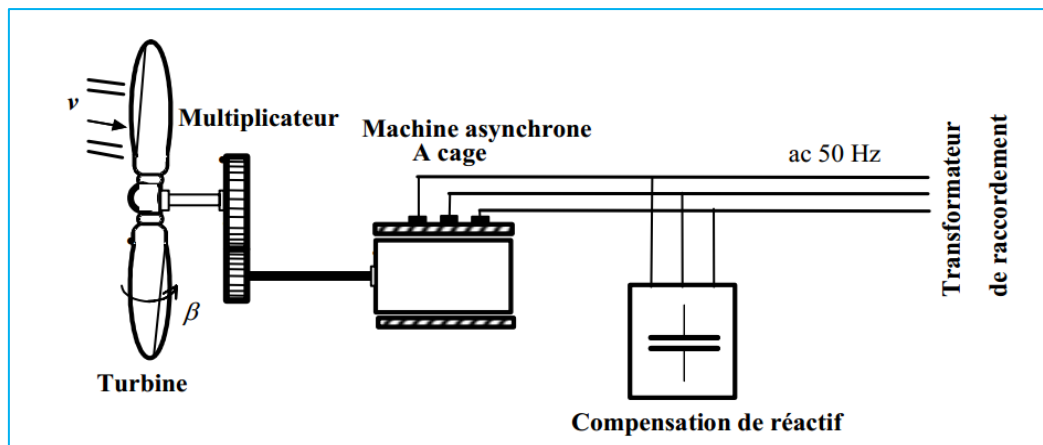


Figure 8 : Eolienne à couplage direct et à vitesse fixe [5].

- **Avantages :**

Il s'agit en particulier :

- Système simple.
- Moins chères et moins exigeantes en termes d'entretien.
- Pas de convertisseurs statiques.

- ✚ **Inconvénients :**

Parmi lesquels on trouve :

- La présence du multiplicateur, introduit des coûts supplémentaires de maintenance, en particulier pour les projets offshore.

- Variations fréquentes du couple mécanique à cause du mouvement des pales pour garder une vitesse constante, ce qui entraîne des variations rapides du courant dans le réseau.
- Il est bruyant à cause du système d'orientation des pales.
- Puissance non optimisée pour des vitesses de vents élevées.

II.2.2 Les éoliennes à vitesse variable :

Vu les problèmes causés par un fonctionnement à vitesse fixe (Systèmes d'orientation, maintenance périodique, rendement médiocre,...), une autre technologie est utilisée, pour contrôler la puissance injectée sur le réseau électrique en fonction de la vitesse du vent appliquée sur les pales de l'éolienne. Cette optimisation de la production peut s'effectuer par l'introduction et la commande des convertisseurs statiques de puissance, le générateur à vitesse variable permet de fonctionner pour une large gamme de vents donc de récupérer un maximum de puissance.

En vitesse variable, on règle le système de façon à ce que pour chaque vitesse de vent, l'éolienne fonctionne à puissance maximale (figure 9). C'est ce qu'on appelle le Maximum Power Point Tracking. La puissance maximale P est atteinte pour une vitesse de rotation de la turbine Ω , donnée par la caractéristique de l'éolienne $P(\Omega)$ est représentée sur la figure suivante :

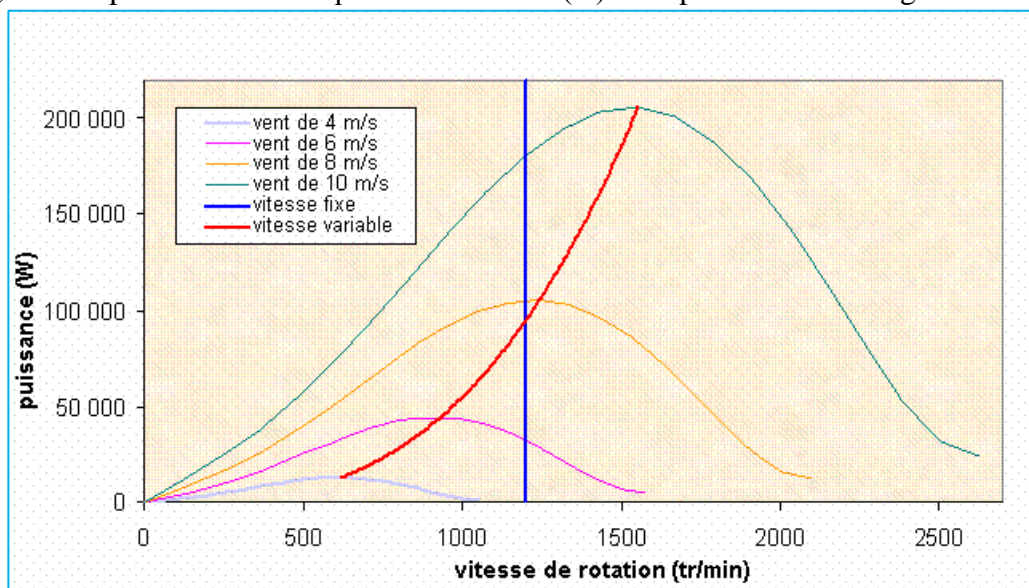


Figure 9 : Puissance en fonction de la vitesse de rotation des pales d'éolienne [7].

- **Eoliennes à vitesse variable équipées de génératrices synchrones, pilotées par le stator :**

Le fonctionnement à vitesse variable de ces éoliennes est devenu possible grâce au développement des convertisseurs statiques et de leurs dispositifs de commande. En effet, deux convertisseurs statiques interfacés par un bus continu sont utilisés. La connexion de ces convertisseurs est réalisée au moyen de trois inductances de lissage permettant de réduire significativement les harmoniques de courant (figure 10) [5].

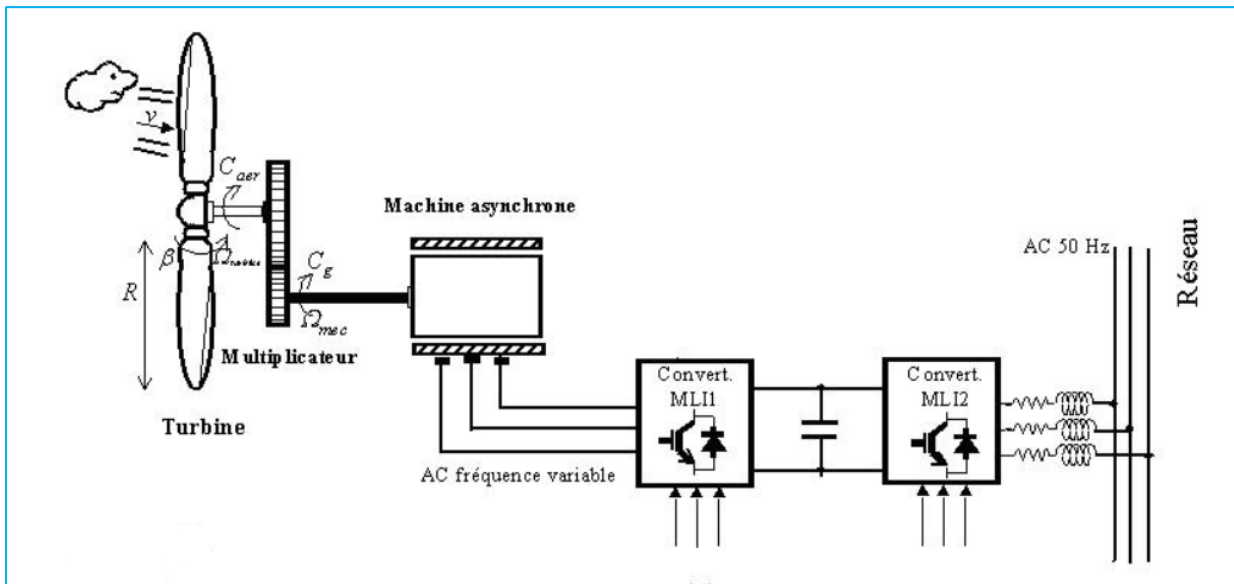


Figure 10 : Aérogénérateur à machine synchrone [5].

Le premier convertisseur assure le contrôle de la puissance générée en agissant sur la vitesse du générateur. Ceci permet de limiter le système d'orientation des pales à une fonction de sécurité par grand vent [5]. Le second permet avec une commande adéquate de délivrer des courants de fréquence fixe correspondant à celle du réseau, avec la possibilité de régler le facteur de puissance (puissance réactive). La puissance nominale de la machine détermine alors la puissance maximale que peut fournir l'éolienne. Cette technologie d'éoliennes présente aussi certains inconvénients au niveau :

- ✚ du dimensionnement des convertisseurs utilisés (effectué pour transiter la totalité de la puissance échangée entre la machine et le réseau).
- ✚ du dimensionnement des filtres (réalisé pour transiter la puissance totale),
- ✚ de l'augmentation des pertes des convertisseurs de puissance avec l'augmentation de la puissance des éoliennes.

- **Eolienne à vitesse variable basée sur une génératrice asynchrone à double alimentation commandée par le rotor :**

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) est une génératrice asynchrone à rotor bobiné. Le stator de la machine est directement connecté au réseau qui va imposer sa tension et sa pulsation ω_s . Le rotor est bobiné avec des enroulements accessibles raccordés à deux convertisseurs IGBT permettant de faire transiter la puissance de façon bidirectionnelle entre le rotor et le réseau (figure 11). Donc il est possible de faire varier la pulsation rotorique ω_r et autoriser le fonctionnement de la machine dans une grande plage de vitesse autour du synchronisme.

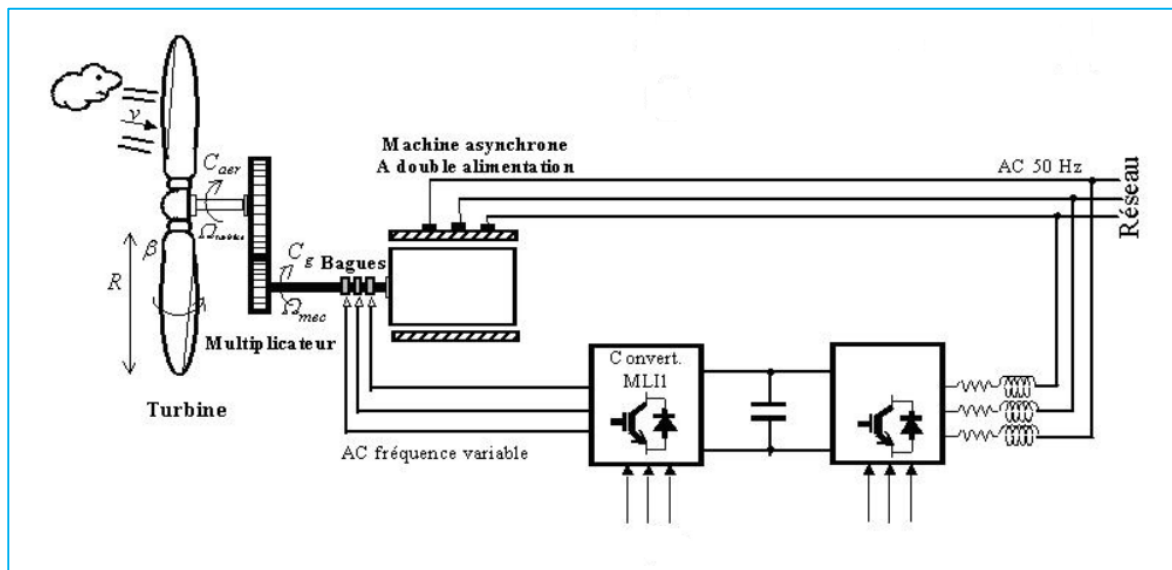


Figure 11 : Système éolien à vitesse variable basé sur une MADA [5].

La majeure partie de la puissance électrique est diffusée dans le réseau par le biais du stator. Une faible partie (environ 30% de la puissance nominale) de la puissance électrique est diffusée dans le réseau par le biais du rotor. La puissance active passant par les convertisseurs de puissance est donc faible, et on peut donc utiliser des convertisseurs de puissance ayant un faible coût [6].

Ce type d'éoliennes nécessite un système d'orientation des pales simplifié. En effet, la possibilité de contrôler la vitesse du générateur via le couple électromagnétique permet de réduire le rôle du système d'orientation des pales, qui interviendra essentiellement pour limiter la vitesse de la turbine et la puissance générée en présence de vitesses de vent élevées.

La structure utilisant la machine asynchrone à double alimentation présente le meilleur avantage en termes de production de puissance élevée, en fonctionnement à vitesse variable, tout en réduisant le dimensionnement des convertisseurs de puissance [6].

II.3 Les perturbations générées par les parcs éoliens sur le réseau de transport.

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 :

- ✚ Déséquilibre de tension.
- Harmonique.
- Creux de tension.
- Flicker (papillotement).

II.3.1 Les creux de tension :

Un creux de tension est une chute brutale de l'amplitude de la tension (figure 12)

Sa profondeur (ΔU) : Située entre 90% et 10% de la tension nominale U_n [8].

Sa durée (Δt) : Peut durer de 10 ms à 3 min [8].

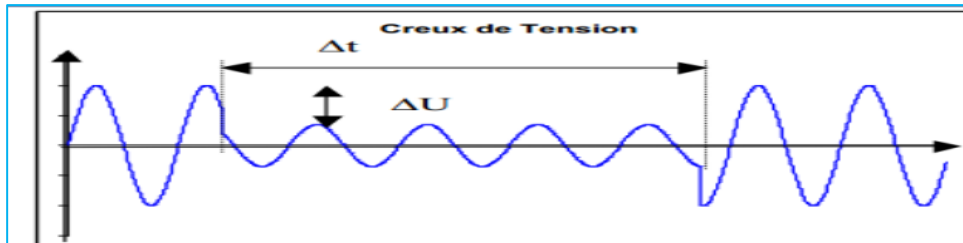


Figure 12 : Creux de Tension [8].

- **Le parc doit tenir pour des creux de tension allant jusqu'à 80% U_n pendant 600ms, en se basant sur la norme CEI 1000-2- 2 (figure 13) [9].**



Figure 13 : Creux de tension acceptable par la norme CEI 1000-2- 2.[9]

- **Les causes :**

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

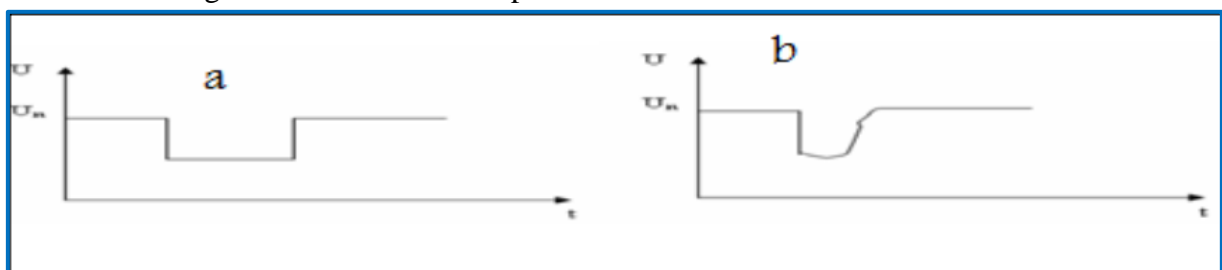


Figure 14: Creux de tension a) provoquées par un court-circuit b) provoquées par un démarrage brusque d'un moteur [8].

- **les conséquences :**

Les creux de tension sont susceptibles de perturber le fonctionnement de l'installation éolienne, principalement au niveau des moteurs. En effet la remontée de tension, constituant l'ultime séquence de tout creux de tension, peut provoquer une surintensité dans les machines tournantes ; ceci donne lieu à des sur-échauffements et des efforts aérodynamiques de brèves durées, susceptibles d'engendrer une fatigue du matériel préjudiciable à terme [10].

II.3.2 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 (figure 15).

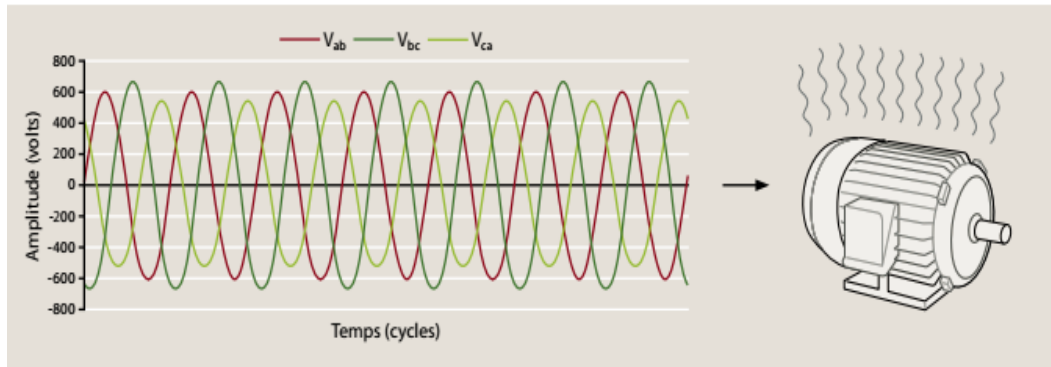


Figure 15 : Déséquilibre du système triphasé de tension [10].

- **La valeur limite de déséquilibre en THT est de 1% en se basant sur la norme CEI 1000-2-2 [9].**

- **Les causes de déséquilibre :**

Les déséquilibres des tensions sont généralement dus à :

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

- **Les conséquences de déséquilibre :**

Les déséquilibres de tension engendrent des composantes inverses de courant, qui provoquent des couples de freinage parasites et des échauffements dans les moteurs à courant alternatif et, par conséquent, la dégradation de l'isolation électrique et la réduction de la durée de vie.

II.3.3 Les harmoniques :

L'électricité fournie par le réseau électrique est de type alternatif (voir figure 16). Cela signifie que la tension et le courant suivent la forme d'une sinusoïde de fréquence fixée (50 Hz au Maroc, 60 Hz aux USA). En connectant certains appareils électroniques au réseau, ceux-ci peuvent provoquer des modifications de la forme de la courbe tension/courant dans le temps. Les différentes par rapport à la sinusoïde parfaite sont appelées harmoniques.

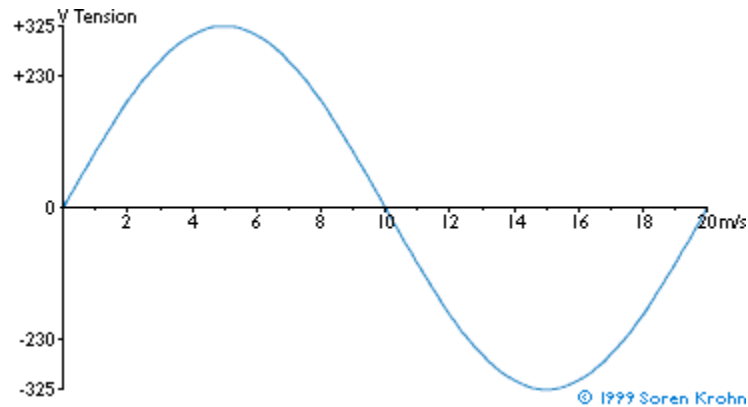


Figure 16 : Courbe de courant/tension en sinusoïde parfaite. [11]

Une harmonique est donc un composant intégral multiple de la fréquence fondamentale d'une onde. Une onde de 50 Hz pourra donc avoir des harmoniques de 150 Hz (harmonique de rang 3), 250 Hz (harmonique de rang 5) (figure 17).

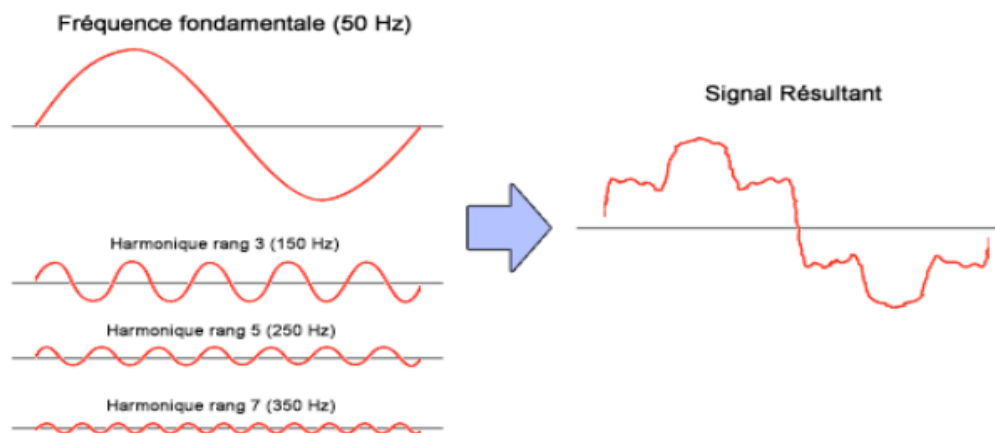


Figure 17 : L'addition des harmoniques au signal fondamental déforme la sinusoïde de base. [11]

• Les causes des harmoniques

La principale gênante d'harmonique ce sont les appareils dont la caractéristique tension/courant n'est pas linéaire, ex : les convertisseurs électroniques de puissance des entraînements de moteurs, les redresseurs utilisés pour l'électrolyse, les fours à arc, etc. [11] Ils émettent des courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers ou non entiers de la fréquence fondamentale.

• Conséquences

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

- **Rang de l'harmonique :**

C'est le rapport de la fréquence d'harmonique f_n à celle du fondamental (généralement 50 ou 60 Hz) :

$$n = \frac{f_n}{f_1}$$

Par principe, le fondamental f_1 a le rang 1.

- **Spectre :**

C'est un histogramme donnant l'amplitude de chaque harmonique en fonction du rang (Figure18).

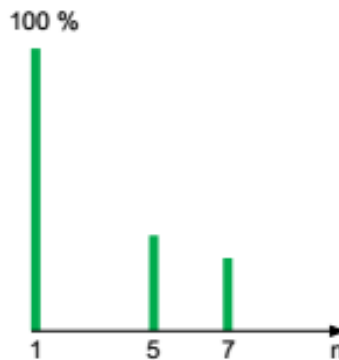


Figure 18 : Spectre harmonique d'un signal [11].

- **Décomposition en séries de Fourier :**

Un signal périodique de fréquence f peut s'écrire sous la forme suivante :

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

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

I_1 : Valeur efficace du courant fondamental ;

I_h : Valeur efficace du courant harmonique de rang h ;

φ_1 : Déphasage du courant fondamental ;

φ_h : Déphasage de l'harmonique de rang h

- **Taux individuel et taux de distorsion :**

Les taux individuels et la distorsion en tension sont significatifs de la pollution d'un réseau.

➤ **Taux individuel :**

Il donne une mesure de l'importance de chaque harmonique par rapport au fondamental. Le taux individuel est le rapport de la valeur efficace de l'amplitude de l'harmonique de rang h à celle du fondamental.

$$T(\%) = 100 \times \frac{G_h}{G_1}$$

➤ **Taux global de distorsion :**

Il donne une mesure de l'influence thermique de l'ensemble des harmoniques ; c'est le rapport de la valeur efficace des harmoniques à celle de la valeur efficace.

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

• **Limites normalisées :**

Le tableau ci-dessous donne les valeurs limites des niveaux des tensions harmoniques (en pour-cent de la tension nominale) en HT et THT conformément à la norme CEI 61000-3-6[9] :

Tableau 2 : les valeurs limitent des niveaux des tensions [9].

Rangs impairs non multiples de 3		Rangs impairs multiples de 3		Rangs pairs	
Rang h	Tension Harmonique (%)	Rang h	Tension Harmonique (%)	Rang h	Tension Harmonique(%)
5	2	3	2	2	1.5
7	2	9	1	4	1
11	1.5	15	0.3	6	0.5
13	1.5	21	0.2	8	0.4
17	1	>21	0.2	10	0.4
19	1			12	0.2
23	0.7			>12	0.2
25	0.7				
>25	0.2+ 0.5x25/h				

Taux de distorsion harmonique total (THD) : 3% en HT-THT

II.3.4 Flicker (papillotement) :

• **Définition :**

Les fluctuations de tension sont des variations périodiques ou erratiques de l'enveloppe de la tension. Ce sont des variations brutales de l'amplitude de la tension situées dans une bande de 10 % et se produisent sur un intervalle de temps de quelques centièmes de secondes (voir figure 19) [12].

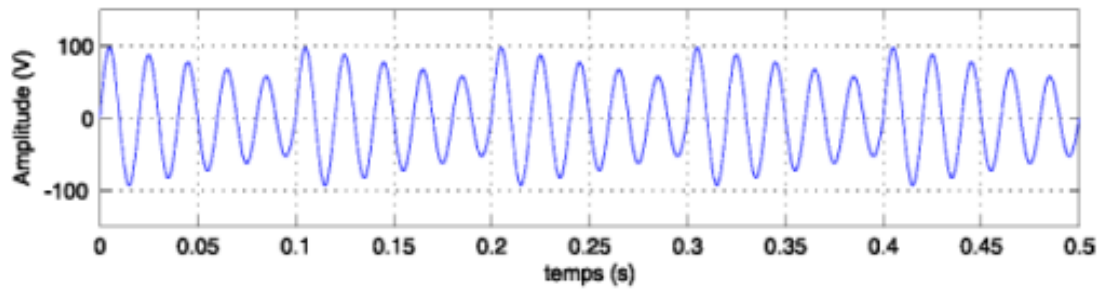


Figure 19 : Fluctuations de tension [12].

- **Classification de Flicker :**

Le Flicker engendré par les fermes éoliennes a des origines différentes et sont classées en deux catégories[12] :

- ✓ **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.

- ✓ **Flicker lors des opérations de couplage :**

Les opérations de commutation produisent également du flicker. Des opérations de commutation typiques sont la connexion et déconnexion du réseau, des aérogénérateurs. Des démarrages, arrêts ou commutations entre générateurs entraînent des variations de la puissance produite, celles-ci provoquant des variations de tension dans le Point de Connexion Commun et donc l'émission de flicker .

- **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 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. [13].

- ✓ **La 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 20.

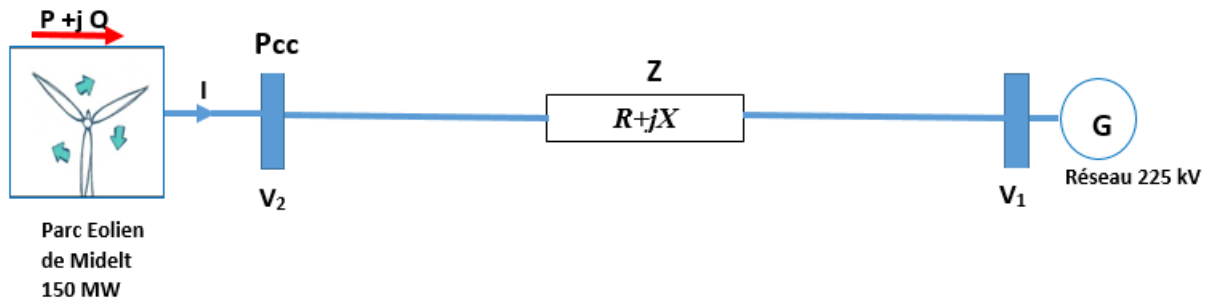


Figure 20 : Schéma d'un parc éolien connecté au réseau.

Avec :

V_1 : tension nominale du réseau.

P : puissance active du parc.

V_2 : Tension au PCC .

Q : puissance réactive du parc.

X : Réactance de la ligne.

S : puissance apparente de la charge.

R : Résistance de la ligne.

S_{cc} : puissance de court-circuit (au PCC).

Z : L'impédance de ligne.

I : courant de la ligne.

➤ Schéma équivalent :

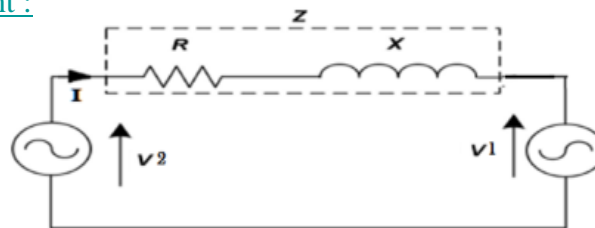


Figure 21 : Schéma équivalent du parc connecté au réseau [13].

Considérons le Schéma équivalent (voir figure 21). La chute de tension est due au courant I dans l'impédance.

V_2 étant pris comme référence

$$\Delta V = Z \times I = V_1 - V_2$$

La puissance apparente :

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

Alors :

$$I = \frac{P - jQ}{V_2}$$

Donc :

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

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

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

⇒ **La chute de tension dépend de la puissance active et réactive de la charge**

On a: $\Delta V = V_1 - V_2 \quad \Rightarrow \quad V_1 = \Delta V + V_2$

Le module de la tension V1 est : $|V_1|^2 = \left(V_2 + \frac{RP+XQ}{V_2} \right)^2 + \left(\frac{XP-RQ}{V_2} \right)^2$

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 :

$$\frac{\Delta V}{V_2} = \frac{RP + XQ}{V_2^2}$$

- **La chute de tension pour les réseaux haut tension HT :**

Dans les réseaux HT, la réactance X est le paramètre prédominant dans l'impédance c'est-à-dire $R \ll X$,

Alors, on peut écrire :

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

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 la 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.

- **Caractérisation et normalisation de l'effet des charges fluctuantes**

- **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 [14] (Figure22).

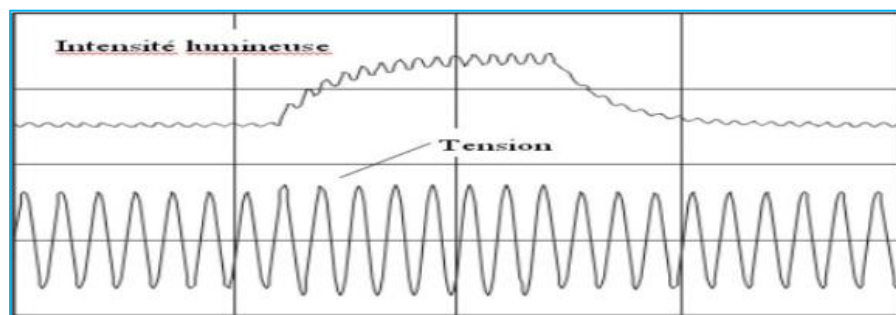


Figure 22 : Variation de l'intensité lumineuse due à une fluctuation de tension [14].

- **Valeurs indicatives du Flicker**

Le papillotement « Flicker » est un paramètre important de mesure de la qualité de l'énergie électrique. Les indices utilisés pour évaluer le papillotement de longue et courte durée sont respectivement l'**indice de sévérité le P_{lt} et le P_{st}** .

- ✓ **Les indicateurs de la sévérité du flicker :**

Les indicateurs de la sévérité du sont :

- Le **P_{st} (small time)** correspond à ce que l'on appelle le *flicker* de courte durée. La sévérité de l'effet est observée sur un intervalle de 10 minutes.
- Le **P_{lt} (long time)** correspond au *flicker* de longue durée et prend en compte les appareils à cycle long ou variable. Le temps de référence est alors de 2 heures.

NB :

- Le fonctionnement établi : $P_{st} = P_{lt}$
- Le fonctionnement lors de couplage : $P_{st} \neq P_{lt}$

- ✓ **Les limites 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.

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 Plt et le Pst. Les valeurs limites pour le flicker en conformité avec le rapport technique CEI 61400-21 sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 3: Limites de Flicker pour HTA et HTB [9].

Facteur de Flicker	Niveau de planification		Niveau d'émission
	HTA	HTB	HTA & HTB
Pst	0,9 à 0,8	0,8	0,35
Plt	0,6 à 0,7	0,6	0,25

✓ Méthode de calcul analytique :

A chaque fois, trois calculs de flicker sont réalisés : [15]

- **Plt/Pst en fonctionnement établi :**

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

$$Pst = Plt = \frac{1}{S_k} \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{wt}} (C(\Psi_k, V_a) * S_n)^2}$$

$C(\Psi_k, V_a)$: Le coefficient de Flicker. (Voir annexe A)

S_k : La puissance de court-circuit ou point de raccordement.

S_n : La puissance apparente de turbine éolienne.

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

- **Le Plt/Pst lors des opérations de couplage :**

$$Plt = \frac{8}{S_k} \left(\sum_{i=1}^{N_{wt}} N_{10m,i} * (K_{f,i}(\psi_k) * S_{n,i})^{3,2} \right)^{0,31}$$

$$Pst = \frac{18}{S_k} \left(\sum_{i=1}^{N_{wt}} N_{120m,i} * (K_{f,i}(\psi_k) * S_{n,i})^{3,2} \right)^{0,31}$$

Avec :

$N_{10m,i}$ Et $N_{120m,i}$: le nombre de fluctuation de chaque turbine dans une période de 10 min et 120 min. (Voir l'annexe A).

$K_{f,i}(\psi_k)$: *Flicker step factor* pour chaque turbine éolienne proposée par le fabricant de turbine. (Voir l'annexe A).

Conclusion

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

Chapitre III :

Les solutions proposées pour l'atténuation des harmoniques et le Flicker

III.1 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 en HT qu'on a trouvée précédemment :

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

Les amplitudes des fluctuations de tension peuvent être limitées en deux façons : Soit par l'augmentation de la Scc ou par la Compensation de la puissance réactive.

III.1 .1 Augmentation de la puissance de court-circuit :

- La capacité série :

On considère la relation suivante :

$$S_{cc} = \frac{V_2^2}{Z}$$

D'après cette relation, l'augmentation de la puissance de court-circuit qui consiste à diminuer l'impédance de la ligne.

L'expression de la chute de tension devient :

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

Alors une réduction importante de variation de tension est produite lorsqu'on ajoute un condensateur série à la ligne (figure 23). [15]

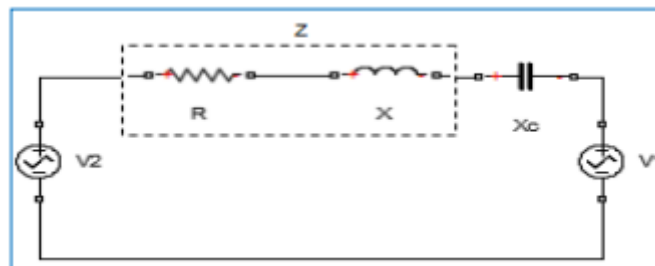


Figure 23 : Circuit équivalent après l'insertion de la capacité [15].

III.1.2 La Compensation 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 :

- **Condensateurs parallèles :**

Les condensateurs parallèles permettent le contrôle de la tension en un point du réseau grâce à l'injection de puissance réactive grâce à l'amélioration du facteur de puissance.

La puissance réactive de l'installation devient :

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

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

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

C.-à-d. : $\cos(\varphi) = 1$.

- **Moyens modernes : les systèmes FACTS :**

Le concept FACTS « **F**lexible **A**lternative **T**ransmission **S**ystems » est un terme générique qui caractérise l'ensemble des équipements mettant en jeu de l'électronique de puissance (diodes, thyristors, GTO, IGBT.....). Ces équipements permettent d'améliorer l'exploitation du réseau électrique c'est-à-dire les différents paramètres du réseau électrique tension, impédance, la phase du réseau etc.

La technologie de ces systèmes (interrupteur statique) leur assure une vitesse supérieure à celle des systèmes électromécaniques classiques. De plus, ils peuvent contrôler le transit de puissance dans les réseaux et augmenter la capacité efficace de transport tout en maintenant, voire en améliorant la stabilité des réseaux électriques. [16]

Les compensateurs parallèles (**shunt**) sont très utilisés pour le contrôle de tension lorsque la variation de la charge est lente. De plus le compensateur shunt placé au point milieu de la ligne de transmission donne des solutions aux problèmes de la stabilité. Les compensateurs shunts les plus connus sont : **SVC** et **STATCOM**.

✓ SVC :

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 (figure 24). Il permet la diminution des effets des défauts ou des fluctuations de tension [16].

Fonctionnement du SVC :

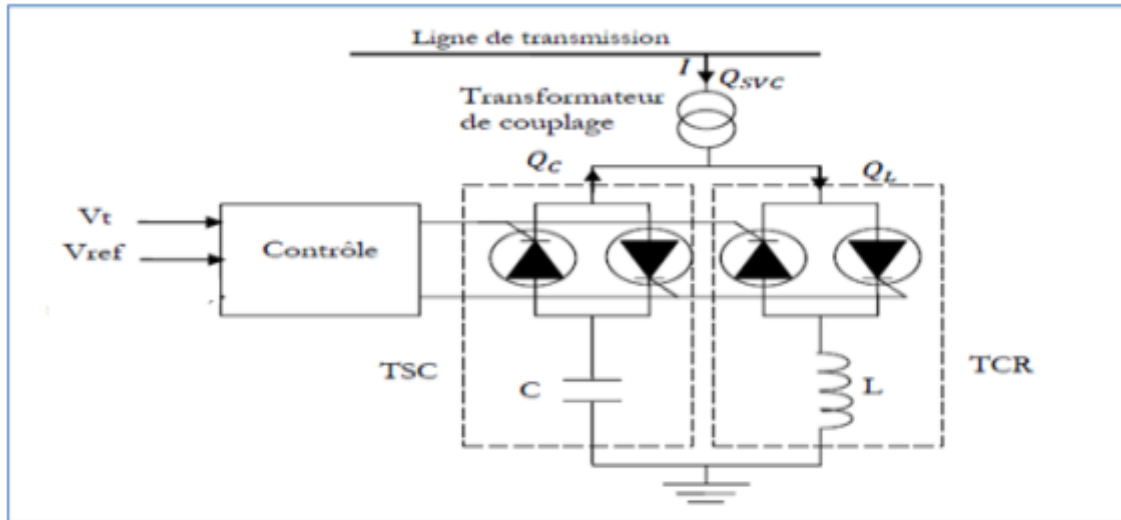


Figure 24 : la structure du SVC [17].

○ Réactance commandée par thyristors (TCR) :

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.

○ Condensateur commuté par thyristors (TSC) :

Le condensateur commuté par thyristors TSC (*Thyristor-Switched Capacitor*) est composé d'un condensateur fixe « C » branché en série avec une valve à thyristors bidirectionnelle.

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

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:

$$R_{SVC} = 1 + 0.75 \frac{S_{SVC}}{S_{\acute{e}ol}}$$

Avec R_{SVC} : Coefficient de réduction de flicker.

S_{SVC} : Puissance nominale du SVC.

$S_{\acute{e}ol}$: Puissance nominale du parc éolien.

✓ STATCOM :

Le STATCOM (Statice Compensateur) appelé aussi en anglais Advanced Statice Var Générateur ASVG, représente la deuxième génération de FACTS. Le STATCOM est un nouveau compensateur de puissance réactive qui surmonte les limitations techniques et le coût élevé du SVC. [16]

Ce compensateur constitué d'un ensemble d'onduleurs à base d'IGBT connectés en parallèle avec une source de tension continue (figure 25). Un onduleur est capable de générer et de consommer à part égale de la puissance réactive.

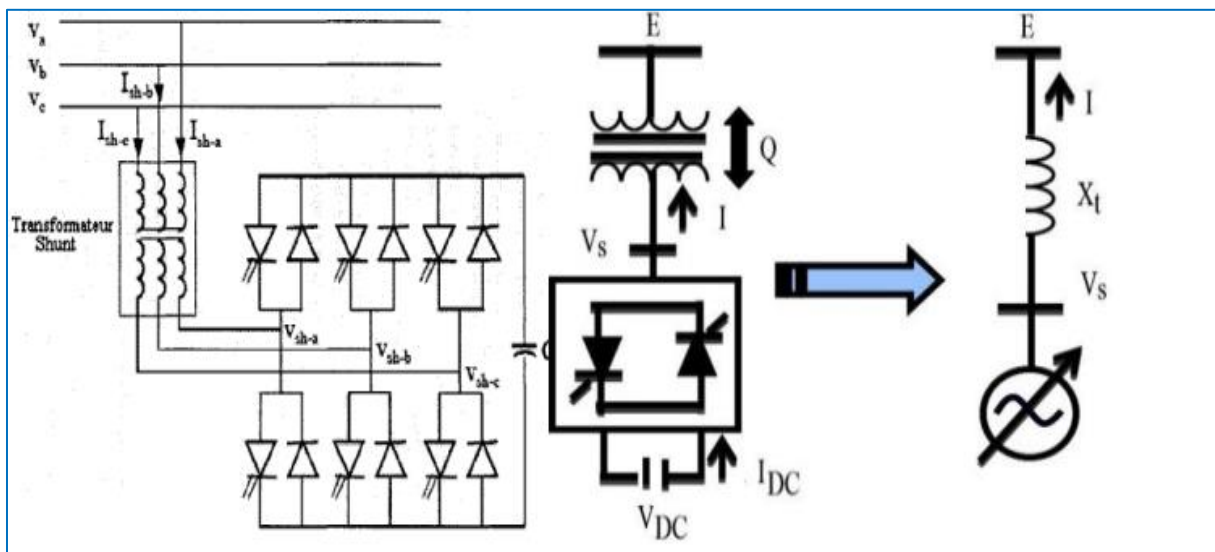


Figure 25 : Schéma du STATCOM [17].

Fonctionnement du STATCOM :

L'échange de puissance réactive avec le réseau se fait en faisant varier l'amplitude des tensions de sortie de l'onduleur V_s laquelle est en phase avec la tension du réseau E . Selon l'amplitude de ces tensions, les trois régimes de fonctionnement suivants sont possibles pour le STATCOM :

- ✓ Si $V_s < E$: le courant circule du réseau vers le convertisseur ; le STATCOM consomme de la puissance réactive et alors (**un comportement inductif**).
- ✓ Si $V_s > E$: le courant circule du convertisseur vers le réseau ; le STATCOM produit alors de la puissance réactive (**comportement capacitif**).
- ✓ Si $V_s = E$: aucun courant ne circule entre le réseau et le convertisseur (**aucun échange d'énergie réactive**).

L'avantage de ce dispositif est de pouvoir échanger de l'énergie de nature inductive ou capacitive uniquement à l'aide d'une inductance, Contrairement au SVC.

III .2 Atténuation des harmoniques :

Il y a plusieurs méthodes pour limiter les effets harmoniques, parmi ces méthodes il y a le filtrage. Différents types de filtres ont été développés, on peut distinguer trois types de filtres [18] :

III .2 .1 Filtre passif :

Principe de fonctionnement :

Un circuit LC accordé sur chaque fréquence d'harmonique à filtrer est placé en parallèle sur le générateur d'harmoniques (voir Fig.26). Ce circuit de dérivation absorbe les harmoniques et évite que ceux-ci ne circulent dans l'alimentation. En général, le filtre passif est accordé sur un rang d'harmonique proche de l'harmonique à éliminer. Plusieurs branches de filtres en parallèle peuvent être utilisées lorsque l'on souhaite une réduction forte du taux de distorsion sur plusieurs rangs.

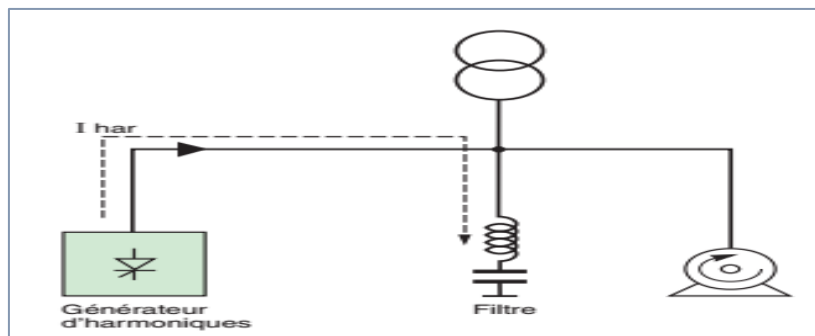


Figure 26 : Principe d'utilisation d'un filtre passif [18].

III .2 .2 Filtre actif (ou compensateur actif) :

Principe de fonctionnement :

Les filtres actifs sont des convertisseurs de puissance, agissant comme source de courants ou de tensions harmoniques, qui injectent en série ou en parallèle dans les réseaux des courants ou des tensions harmoniques en opposition par rapport aux perturbations existantes. La Figure 27 donne un exemple de filtre actif parallèle compensant le courant harmonique

$$(I_{har} = -I_{act}).$$

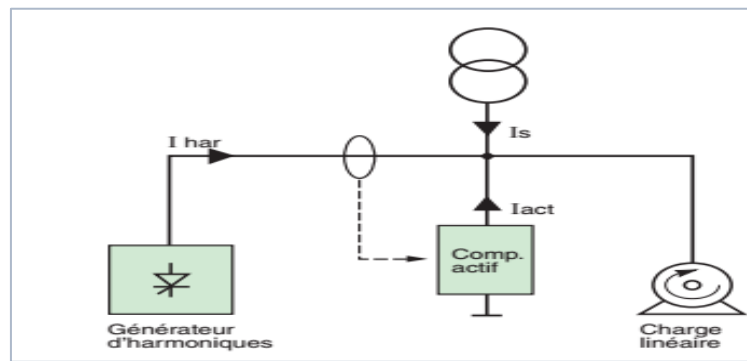


Figure 27 : Principe d'utilisation d'un filtre actif [18].

III .2 .3 Filtre hybride :

Principe de fonctionnement :

Les deux types de dispositifs précédents peuvent être associés au sein d'un même équipement et constituer un filtre hybride (voir Fig. 28). Cette nouvelle solution de filtrage permet de cumuler les avantages des solutions existantes et de couvrir un large domaine de puissance et de performances.

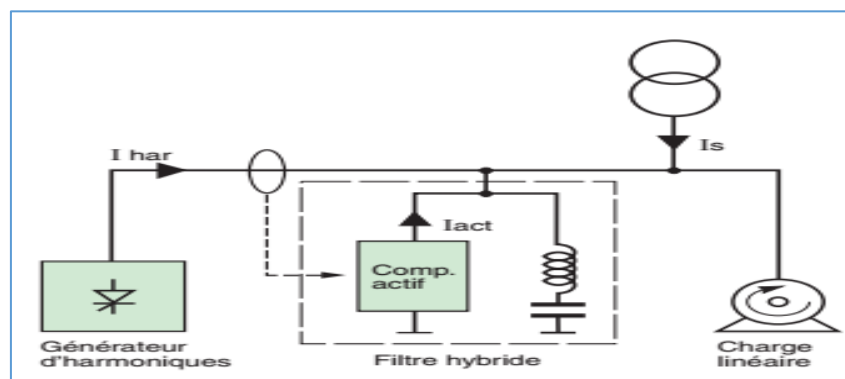


Figure 28 : Principe d'utilisation d'un filtre hybride [18].

III .2.4 Critères de choix :

- Le filtre passif permet à la fois :
 - la compensation d'énergie réactive.
 - Une grande capacité de filtrage en courant.
- Le filtre actif permet le filtrage des harmoniques sur une large bande de fréquence. Il s'adapte à n'importe quelle charge.
- Le filtre hybride réunit l'ensemble des performances des filtres passifs et actifs.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les solutions traditionnelles et modernes de dépollution harmonique aussi que pour les fluctuations de flicker. Dans le suivant nous allons analyser les résultats de simulation en illustrant l'impact des éoliennes sur le réseau électrique et certaines possibilités de réglage qui permettraient d'améliorer leur intégration dans le réseau.

Chapitre IV : Simulation du parc éolien de Midelt

IV.1 Description du système étudié :

le système étudié est le Parc éolien Midelt , dont le schéma de raccordement est le suivant :

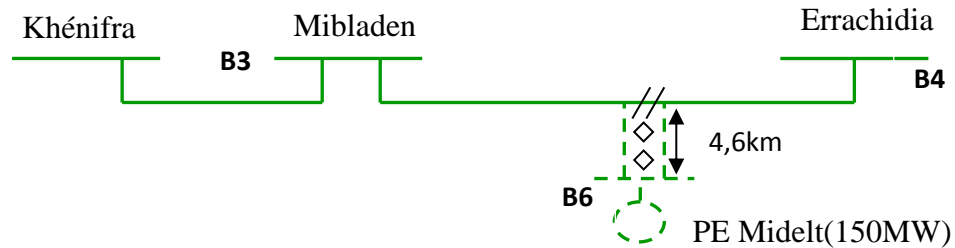


Figure 29 : Schéma de raccordement du Parc de Midelt.

Caractéristiques du système :

- ❖ Un parc éolien de 50 éoliennes de 3 MW chacune, génératrice : MADA
- ❖ 2 lignes : Une de 51.6 km (Mibladen) et l'autre 51.6 km (Errachidia)

Les puissances de court-circuit :

Les valeurs des puissances de court-circuit triphasées en MVA :

Mibladen : 2916 MVA au niveau de jeu de barre B3 (225 KV).

Errachidia : 1222 MVA au niveau du jeu de barre B4 (225KV).

PCC : 1800 MVA au niveau du jeu de barre B6 (20KV).

IV.2 Simulation du système éolien :

IV.2.1 Simulation du vent :

Nous avons appliqué un vent variable aléatoirement à l'entrée du parc éolien de la forme suivante (Figure 30) :

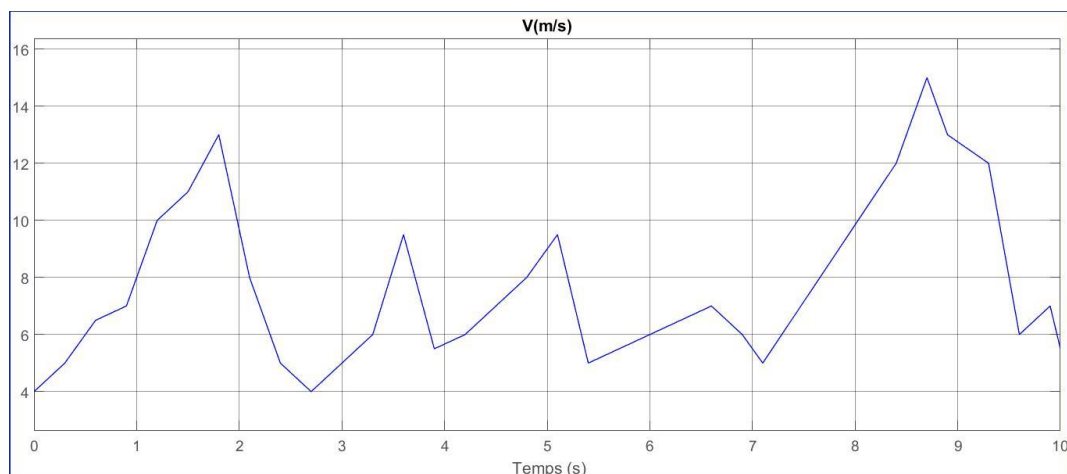


Figure 30: La vitesse du vent aléatoire (m/s).

Nous voyons sur la courbe (figure 30) que la vitesse varie entre 4 et 15 m/s avec la valeur moyenne est : 10m/s, cette variation de la vitesse permet de changer la puissance convertie par la turbine.

IV .2.2 Simulation de parc éolien en fonctionnement normal :

Dans un premier temps, nous allons présenter une simulation de parc éolien en fonctionnement normal. La figure 32 montre le schéma de simulation du parc éolien de Midelt établi sous l'environnement Matlab/Simulink/SimPowerSystem. Le parc est connecté au réseau électrique de Mibladen 225 KV à travers une ligne de distribution de 51.6 Km et au réseau d'Errachidia à travers une ligne de longueur 51.6 Km.

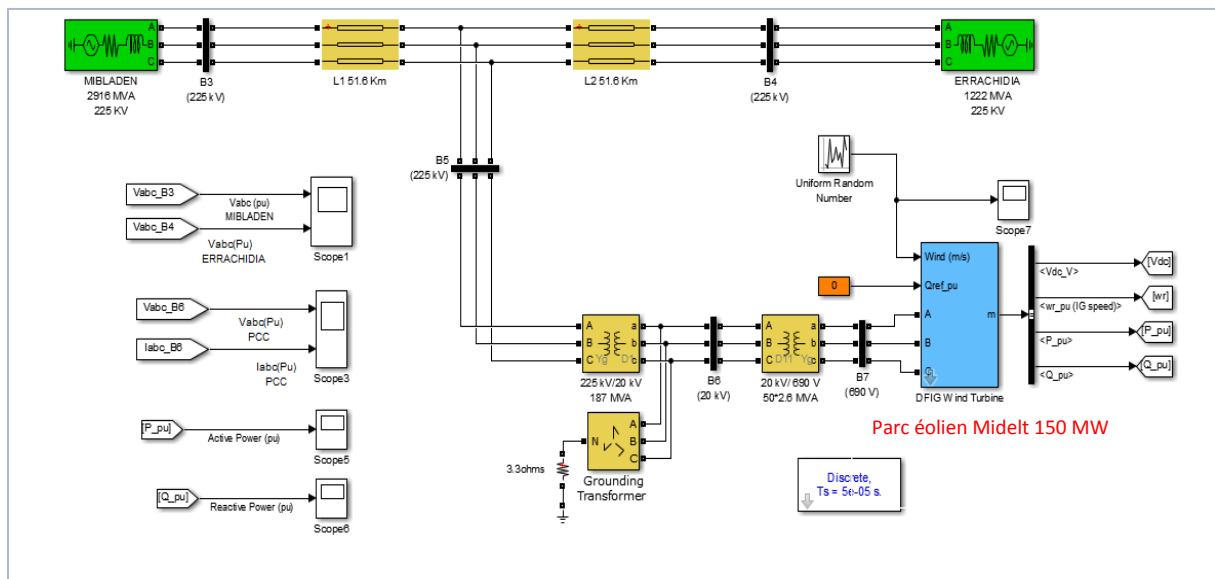


Figure 31: le modèle du parc éolien en fonctionnement normal.

Comme nous avons dit précédent, la génératrice du parc est basée sur une machine asynchrone double alimentation, son schéma sous Matlab/Simulink/SimPowerSystem est le suivant :

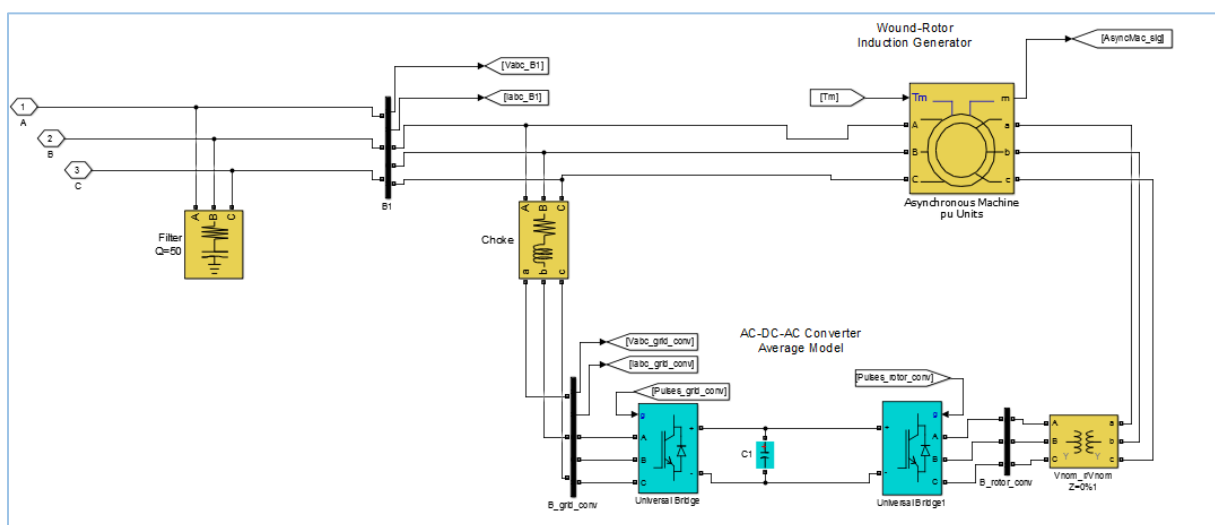


Figure 32 : la génératrice du parc éolien

Tous les paramètres de ce modèle sont représentés également en pu (par unit : est une unité sans dimension c'est la grandeur physique divisée par sa valeur nominale).

Nous visualisons les tensions aux jeux de barre **B3 (MIBLADEN)**, **B4(ERRACHIDIA)** et **B6(PCC)** comme suit :

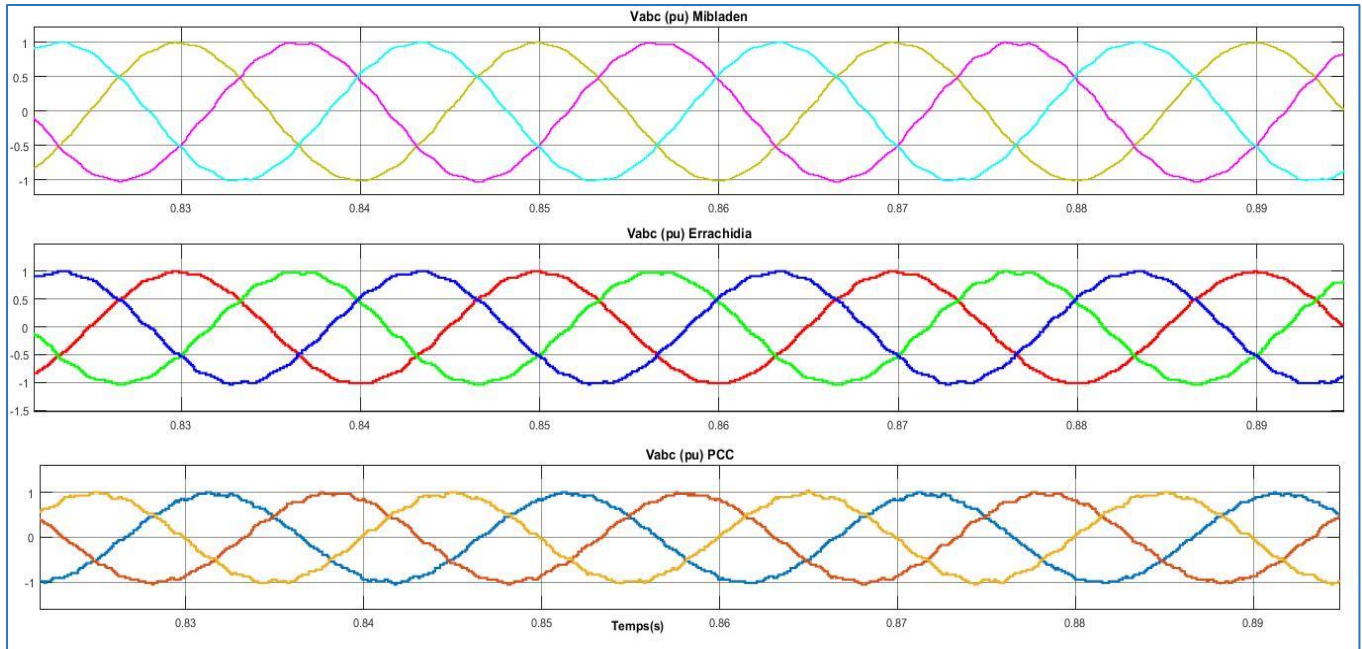


Figure 33 : la simulation du parc éolien en fonctionnement normal.

IV.3 La simulation des fluctuations de Tension « FLICKER » :

IV.3.1 Calcul théorique du niveau d'émission de Flicker :

L'émission de Flicker pour chaque point de mesure est présentée par le tableau suivant :

Tableau 4 : l'émission du flicker en fonctionnement normal

	Mibladen(Pcc=2916MVA)	Errachidia(Pcc=1222MVA)	PCC(Pcc=1800MVA)
$P_{st} = P_{lt}$	0.06	0.21	0.13

- Les facteurs de flicker obtenus sont inférieurs aux limites (<0.35), ce qui respecte bien la norme CEI61 400-21.

Alors, les résultats théoriques sont en conformité avec la simulation de modèle du parc éolien en fonctionnement normal (figure 33), d'où l'intégration du parc éolien de Midelt ne pose pas le problème de Flicker.

IV.3.2 La simulation du parc éolien dans le cas de renforcement : L'effet de l'augmentation de la puissance nominale de parc :

Pour la puissance nominale du parc éolien : $P_n = 300 \text{ MW}$.

Alors l'émission de Flicker pour chaque point de mesure devient :

Tableau 5 : l'émission du flicker dans le cas de renforcement

	Mibladen(Pcc=2916MVA)	Errachidia(Pcc=1222MVA)	PCC(Pcc=1800MVA)
$P_{st} = P_{lt}$	1.01	2.11	1.6

- Les valeurs obtenues sont supérieures aux limites acceptables (>0.35) de la norme CEI61 400-21.

Remarque : on peut augmenter la puissance nominale du parc en ajoutant plus de turbines. Dans ce qui suit, la valeur de la puissance nominale de notre Parc éolien sera prise égale à 300 MW (le phénomène du FLICKER).

Les résultats de simulation sont :

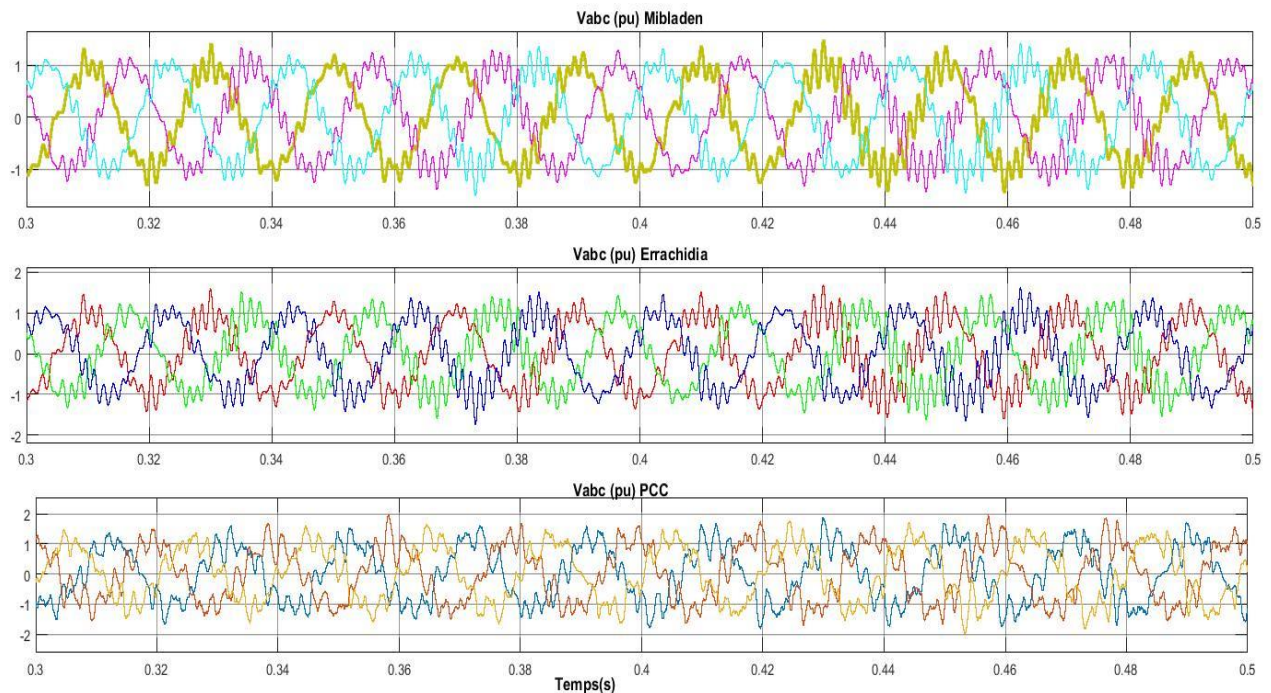


Figure 34 : Tensions de Mibladen, Errachidia et au PCC.

Interprétations :

La comparaison entre les tensions en fonctionnement normal du parc éolien (figure 33) 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 dont les tensions sont devenues plus fluctuantes.

➔ Pour atténuer ces fluctuations de Tension, on a proposé différents techniques d'atténuation de Flicker .

IV.3.3 Techniques d'atténuation de Flicker :

- La capacité série :

Afin de voir l'effet d'insertion d'une capacité série dans la ligne sur les fluctuations de tension, nous utilisons une capacité de 0.01F pour cette simulation :

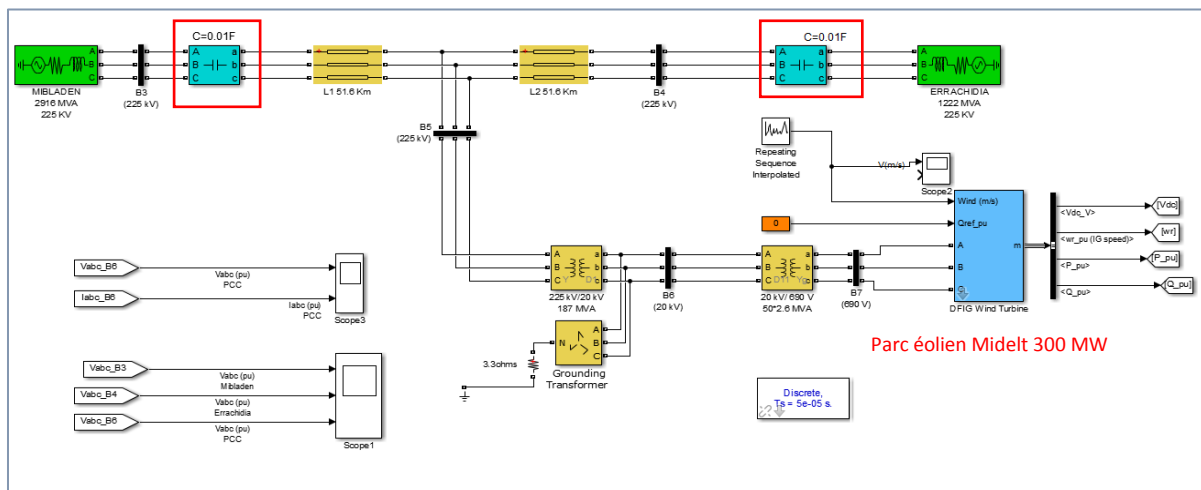


Figure 35 : Tensions de Mibladen, Errachidia et au PCC.

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

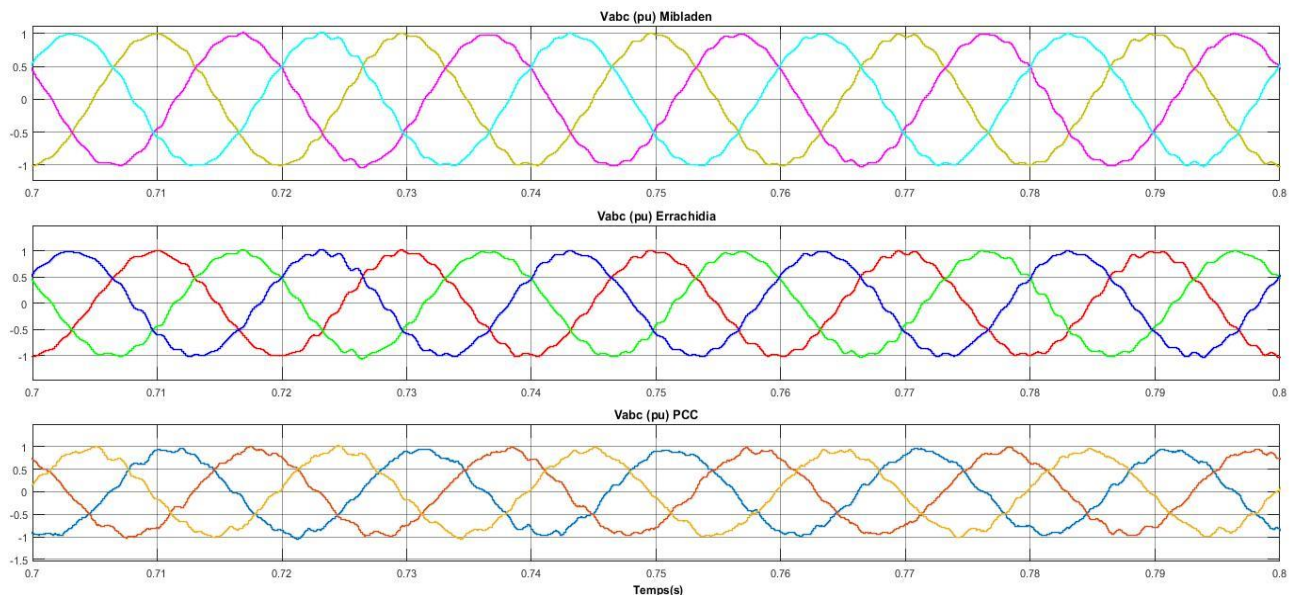


Figure 36 : Tensions de Mibladen, Errachidia et au PCC pour C=0,01F.

Interprétations :

Une comparaison entre les figures 34 et 36 montre que l'insertion de la capacité série permet de diminuer l'impédance de la ligne suivant la relation : $\Delta V = \frac{RP+Q(X-X_C)}{V^2}$ afin d'augmenter la puissance de court-circuit, et suivant 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.

- Amélioration avec le STATCOM

L'amélioration de la stabilité de tension basée sur le STATCOM qui injecte ou absorbe de l'énergie réactive selon le besoin, afin de garder la valeur de tension à sa valeur nominale. La figure suivante illustre le montage de base :

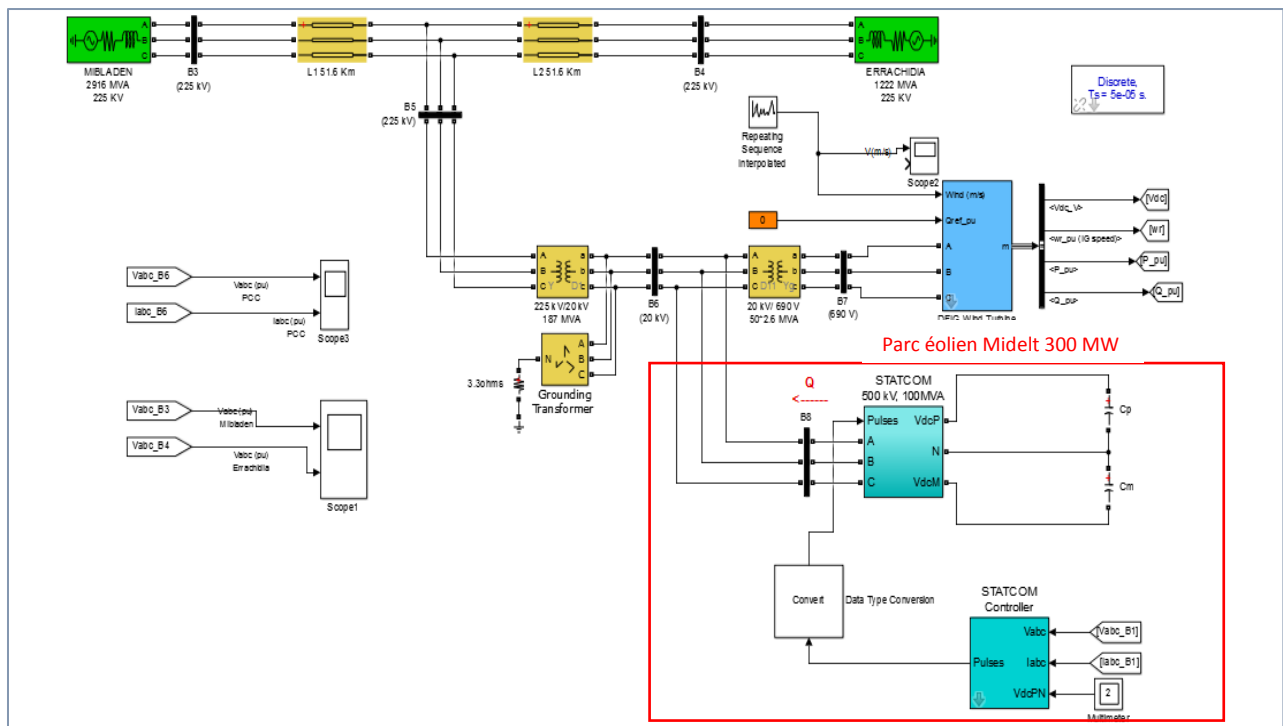


Figure 37 : Le parc éolien raccordé au réseau avec un STATCOM

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

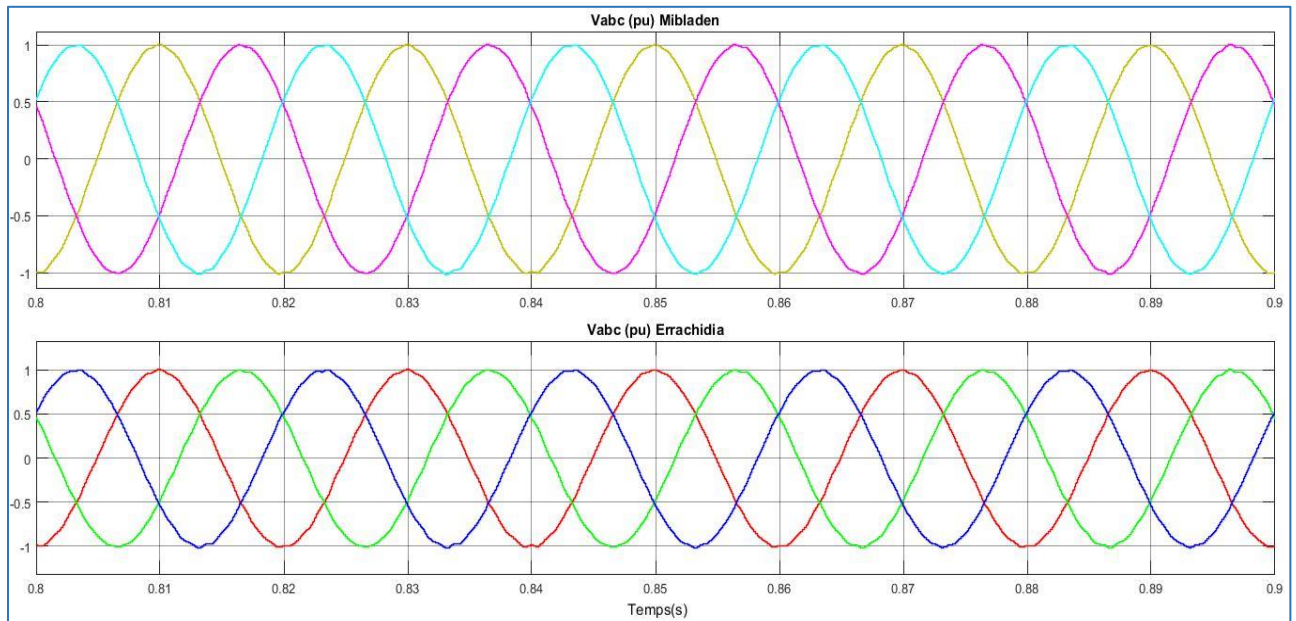


Figure 38 : Tensions de Mibladen et d'Errachidia avec STATCOM.

Interprétations :

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 de 'Flicker'.

IV.4 La simulation des fluctuations des harmoniques :

Le modèle de simulation en fonctionnement normal est représenté par le schéma suivant :

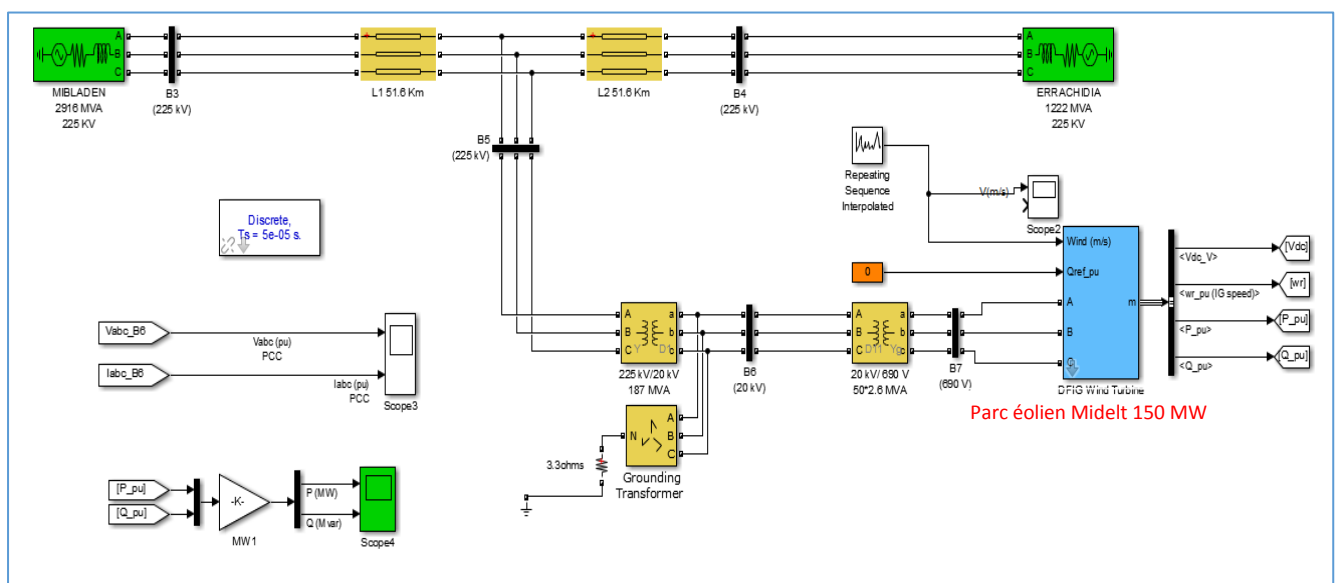


Figure 39 : le modèle du système simulé.

La tension et le courant au point PCC ont la forme suivante :

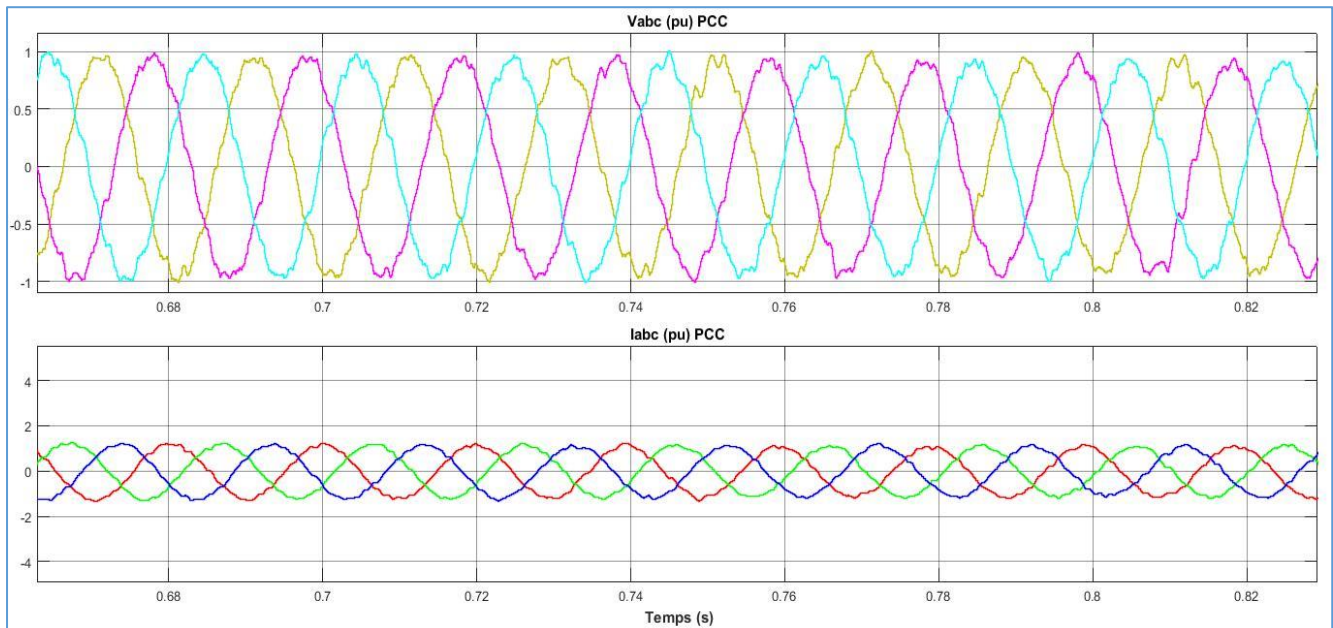


Figure 40 : Vabc et Iabc au point PCC.

L'outil « Powergui FFT Analysis Tool » de Matlab est utilisé pour évaluer les niveaux d'harmoniques d'un signal et le pourcentage de la THD.

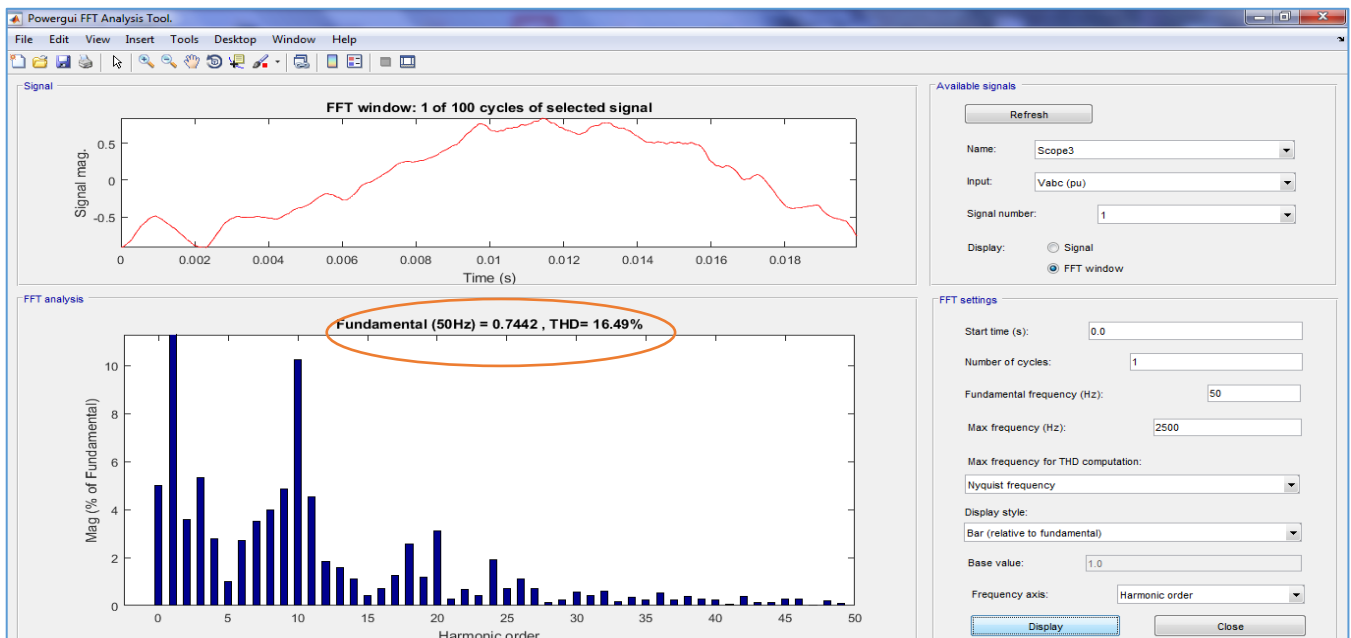


Figure 41 : Le spectre harmonique de la tension du parc au PCC en fonctionnement nominal.

Interprétations :

➤ Le taux de distorsion harmonique de tension est : **THD=16.49%**
On remarque qu'il est supérieur à 3%, il dépasse la limite acceptable qui est imposée par les conditions de raccordements et la norme C.E.I.61400.

➤ D'où la nécessité d'avoir une solution convenable afin d'éliminer ces harmoniques, et avoir une valeur THD acceptable pour la tension au point PCC.

IV .4.1 Technique d'Atténuations des harmoniques :

• 4.1.2. filtre actif parallèle :

Comme il est déjà indiqué on a différents éléments de compensation parmi eux nous avons choisi filtre actif parallèle (figure 42) cette structure apportent des degrés de contrôle au réseau par les fonctions suivantes :

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

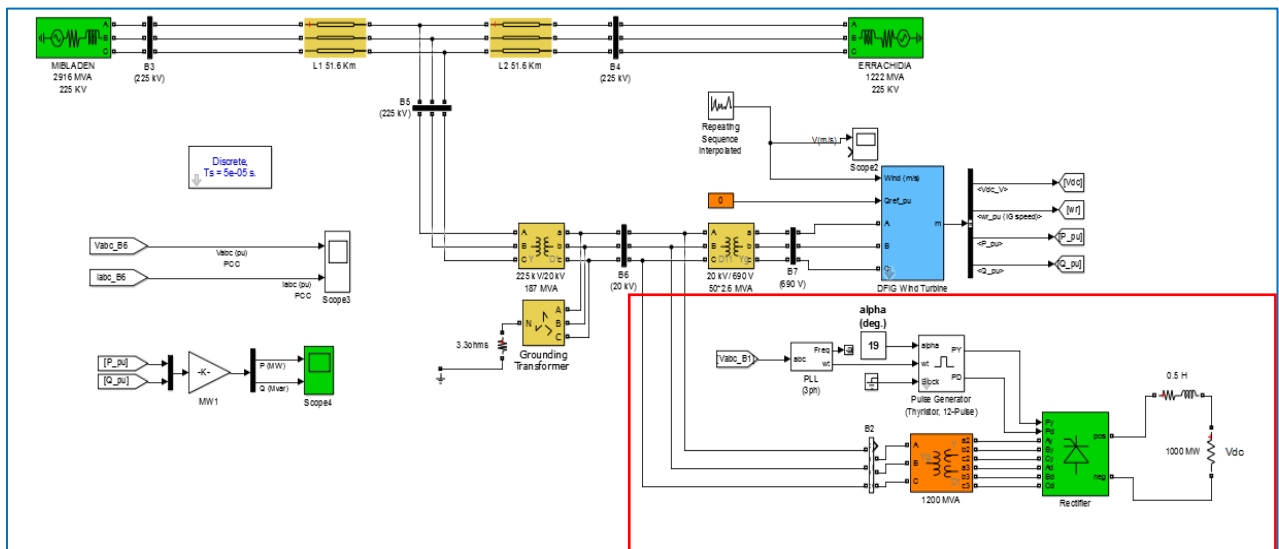


Figure 42 : Parc éolien avec filtre actif.

Les résultats obtenus au point PCC (point de raccordement commun) sont les suivants :

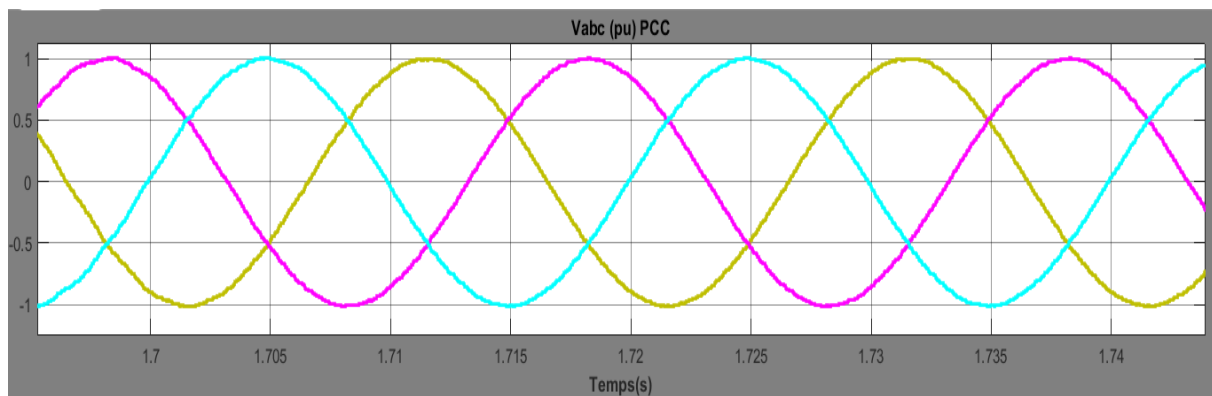


Figure 43 : La tension au PCC du parc avec filtre actif.

Le spectre harmonique de la tension du (parc+FAP) au PCC :

Les résultats de l'analyse de la FFT sont donnés sur la figure suivante :

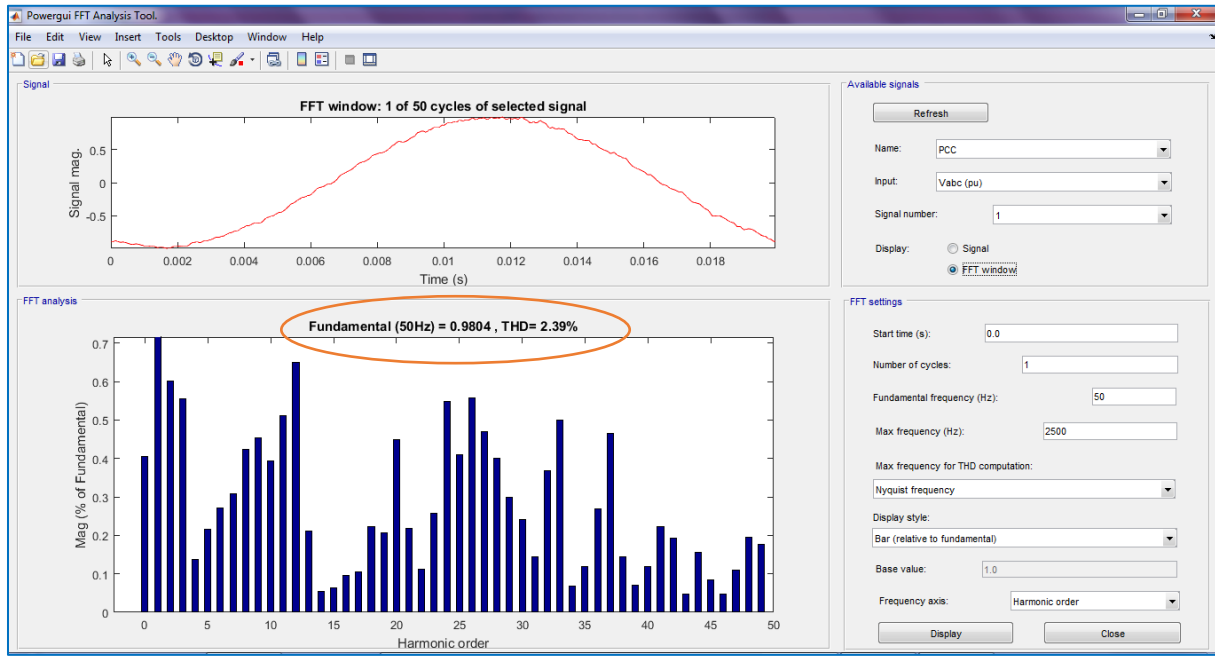


Figure 44: Allure de spectre harmonique de la tension du parc au PCC avec un filtre actif.

Interprétations :

On constat d'après la figure 44 que : Le taux de distorsion harmonique en tension est : **THD=2.39%**.

On confirme que après le filtrage, le FAP a pu avoir les performances suffisantes afin d'éliminer les harmoniques, et d'avoir une valeur acceptable pour la THD concernant la tension ce qui respecte bien la norme C.E.I.61400.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons analysé le comportement du réseau de Midelt en présence d'une forte production éolienne et les différents scénarios d'amélioration de la qualité d'énergie dans le but d'injecter une énergie propre non polluante au réseau électrique. D'après les calculs et les simulations, nous pouvons confirmer que l'intégration du parc éolien de Midelt dans le fonctionnement normal (150 MW) pose le problème des harmoniques dans le réseau donc, il faut d'insérer un filtre actif parallèle pour l'atténuation de cette problématique, après l'extension de parc éolien (300MW) le réseau sera plus fluctuant, la technique d'amélioration de la qualité d'énergie la plus efficace dans ce cas c'est d'utiliser la compensation de l'énergie réactive par STATCOM.

CONCLUSION GENERALE

L'étude de la stabilité des réseaux électrique constitue un sujet important pour la l'exploitation des réseaux électrique.

Ce rapport avait pour objectif d'étudier l'impact d'intégration des éoliennes dans les réseaux électrique, plus précisément les perturbations harmoniques et les fluctuations rapides de tension 'le flicker'.

Afin d'éliminer les harmoniques, une des solutions les plus efficaces pour les corriger est l'utilisation des filtres actifs parallèles ayant pour but de dépolluer le réseau et de compenser l'énergie réactive, et pour les fluctuations de tension « flicker » nous sommes attachés à montrer l'intérêt que peut susciter un système flexible de transport à courant alternatif (FACTS) tels qu'un STATCOM, et l'impact positif qu'il peut avoir sur la stabilité d'un réseau électrique perturbé.

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

Le présent travail nous a permis d'approfondir nos connaissances et de mesurer combien la problématique des éoliennes est riche.

Annexe A : La norme IEC 61400

WINDTEST
Kaiser-Wilhelm-Koog GmbH

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



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

Report No.:
WT5707/07
Page 1 of 2

Type:	E-82	Manufacturers specification:	
Manufacturer:	Enercon GmbH Dreekamp 5 D – 26605 Aurich	Kind of installation:	Pitch, variable speed
Report:	WT 5706/07	Rated power P_{r0} :	2000 kW
Period of measurement:	2007-03-20 to 2007-04-04	Rated wind speed v_{r0} :	12 m/s
Order no (WT) :	4250 05 03075 64	Rated apparent power S_{r0} :	2002 kVA
		Rated reactive Power Q_{r0} :	100 kvar
		Rated current I_{r0} :	2890 A
		Rated voltage U_{r0} :	400 V

Performance:¹⁾

P_{inc} [kW]	2000.0	P_{50} [kW]	2022.9	$P_{0.2}$ [kW]	2035.1
$P_{inc} = P_{inc} / P_n$	1.00	$P_{50} = P_{50} / P_n$	1.01	$P_{0.2} = P_{0.2} / P_n$	1.05
Output power [% of P_r]		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		96.4	
90..100		1918.5		97.1	
100..110		---		---	
Reactive Power at p_{inc} [kvar]			100.0		
Reactive Power at p_{50} [kvar]			112.0		
Reactive Power at $p_{0.2}$ [kvar]			105.6		

Flicker:

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

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

Report No.:
WT5707/07
Page 2 of 2

Switching operations:

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

Case of switching operation	Start-up at rated wind speed			
Max. number of switching operations, N_{10}	3			
Max. number of switching operations, N_{120}	35			
Grid impedance angle	30°	50°	70°	85°
Flicker step factor, $k_f(\psi_n)$	0.07	0.06	0.04	0.03
Voltage step factor, $k_U(\psi_n)$	0.91	0.70	0.41	0.19

Harmonics:²⁾

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

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

Exceptional details:

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

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

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

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



Les références :

- [1] Etude d'impact environnemental et social parc éolien Midelt province de Midelt rapport n° 5793.13 P SEPTEMBRE 2013.
- [2] Presentation_ONEE: LA MARCHE DE L'ENERGIE ELECTRIQUE AU MAROC 2013-06-25
- [3] site : http://www.robot24.fr/comprendre_le_fonctionnement_de_lolienne
- [4] .ADEME (Agence de l'environnement et de maîtrise de l'énergie) : Énergie éolienne.
- [5] Mr. Samir BELLARBI « Estimation technico-économique de la production d'électricité par voie éolienne, intégrée aux réseaux interconnectés de transport électrique » thèse de doctorat.
- [6] JEL KARKARI YASSIR & LEMHADRI RAJAE « Impact des défauts réseaux transport sur les parcs éoliens- Cas parc éolien de TAZA », Faculté des Sciences et Techniques Fès, 2016.
- [7] Site : <http://Sitesfinal.uclouvain.be/elec/FR/realisations/EnergiesRenouvelables/FiliereEolienne/Generalites/DifferentesTechnologies/DifferentesTechnologiesEolien2.htm>
- [8]. GATTAL BOULAARES « méthodes d'analyse des perturbations électriques dans la qualité de l'énergie électrique en utilisant des nouvelles techniques pour l'application aux creux de tension » Magister en Electrotechnique.
- [9] Conditions de raccordement des éoliennes et parcs solaires a base de pv au réseau national de transport « ONEE ».
- [10] Les éoliennes et la qualité de puissance, Danish Wind Industry Association .
- [11] .Principes de Compensation des harmoniques, cours électronique de puissance avancée (année 2008).
- [12] KOUADRA FOUED, « Etude des variations rapides de tension pour le raccordement d'une production décentralisée dans un réseau MT » Mémoire De Magister à l'Université Mentouri De Constantine, Faculté des Sciences de l'Ingénieur.
- [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].René Wierda flicker ou scintillement des sources lumineuses.
- [15] .OMAIMA EL ALANI, « Impact de l'intégration du parc éolien de Taza sur le réseau : Flicker », Faculté des Sciences et Techniques Fès, 2015.
- [16]. M. HAMADOU Zakaria, « Optimisation des paramètres d'un FACTS shunt pour l'amélioration de la stabilité transitoire d'un système électrique », Mémoire de Magistère à l'Université De Setif, Faculté de Technologie, le 20 Juin 2012.
- [17]. ABDELAALI ALIBI, « Contrôle des Réseaux Electriques par les Systèmes FACTS: (Flexible AC Transmission System) », à l'université de Batna, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, le 13 /06/2009.
- [18]. 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.