الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

Département du Génie Électrique et de l'Informatique



Projet de Fin d'Etudes

Présenté pour l'obtention du Diplôme
De Master en électrotechnique

Spécialité : Réseaux Electriques

Thème

Modélisation d'un câble sous-marin reliant une éolienne a un réseau électrique en présence

D'harmonique

Proposé et dirigé par :

Mr. A.GACEMI

Préparé et présenté par :

Mm.ABD SSELAM FATIHA

Mm. MAGRI ACHOUAK

REMERCIMENT

Nous remercions Dieu, le tout puissant, pour nous avoir donné, le courage, la patience, la volonté et la force nécessaires, pour affronter toutes les difficultés et les obstacles, qui se sont hissés au travers de notre chemin, durant toutes nos années d'études.

Nous exprimons nos remerciements à notre promoteur Mr A.GACEMI, qui a accepté de nous encadrer et qui nous a guidés pendant l'élaboration de ce mémoire, pour sa disponibilité et ses conseils précieux.

Nous adressons nos sincères salutations et nos vifs remerciements à tous ceux qui nous encouragés et donnés les mains d'aides, de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail afin que notre travail soit présentable.

Nos vifs remerciements vont à Monsieur le Président de jury, pour l'honneur qu'il nous fait et aux membres du jury pour avoir accepté de corriger et d'évaluer ce travail.

Enfin nous exprimons notre reconnaissance à tous les Enseignants du département Informatique et Génie Electrique qui nous ont guides pendant notre cursus Universitaire.



Dédicace



Pour l'amour qui ne finit jamais et grand cœur à l'infini, ce qui m'a submergé tout l'amour et de la tendresse Voici ma mère bien-aimée

Pour moi de la liaison et soulevez la couronne de ma tête ça piquait jamais venin et goûté à l'amertume de la vie

Pour égards, à ceux qui ont persévéré gratuitement jour et nuit et de la grêle à toi mon éducation mon beau-père

A mon futur mari HAMZA

Pour mon père ,

Pour tous mes frères et sœurs et frère salim EL Hadj

Djahida Naima et Khairuddin et Ayoub

Pour touts mes amies (Assma Hanane Imane Siham Zahra Karima Nabila Lila Nadia Kawthar Djamila)

A mon binome Achouak

Pour tous mes professeurs de la phase primaire de la phase universi



FATIHA



Dédicace

Avec toute sincérité et modestie, je dédie ce travail à :

Ma source de tendresse qui donne à ma vie

Le gout et le sens mes chers parents.

À toute la famille MAGRI

Et mon mari et sa famille,

À Mes amies :

Fatiha qui m'a aidé à terminer ce travail,

Et toutes mes amies de 2ème années master.



ACHOUAK

NOMENCLATURE

ΔV : La chute de tension (V) ;

P_n : Puissance nominale (W) ;

V_n : vitesse nominale (m/s) ;

V_d : La vitesse de démarrage (m/s);

V_{max} : La vitesse maximale (m/s);

P : la puissance active (W) ;

Q : puissance réactive (VA) ;

R : résistance (Ω);

X : réactance (Ω);

P_{stock} : la puissance qui correspond au stockage pendant un jour (W) ;

L_1 : inductance équivalente du transformateur (F) ;

R_1 : résistance équivalente du transformateur ;

R_2 : la partie résistive du câble (Ω);

L_2 : la partie inductive du câble

C : la partie capacitive du câble (F) ;

L_3 et R_3 : correspondant aux Lsc et R_{SC} (l'impédance de court-circuit) (H),(Ω);

μ : perméabilité magnétique absolue du conducteur ;

μ_0 : constante magnétique ou la perméabilité de l'espace libre ;

μ_r : perméabilité magnétique relative ;

l : la longueur du câble (m) ;

D : diamètre du conducteur (m) ;

ρ_c : résistivité ;

V_d : La vitesse de démarrage (m/s);

V_{max} : La vitesse maximale du vent (m/s) ;

k_n : Coefficients de limitation ;

ω : pulsation du courant ($2\pi f$) ;

A : La section pour ce diamètre mm^2 ;

I(t): Le courant absorbe par la charge non linéaire (A);

A_c : La section efficace du conducteur ($1200mm^2$) ;

σ = Coefficient de fuites1 – M2/LsLr ;

ε : Coefficient d'amortissement

ACRONYMES ET ABREVIATIONS

NJD : nombre total de jours déficitaires ;

NJT : nombre total de jours de fonctionnement ;

IGBT : Insulated Gate Bipolar Transistor ;

HT : réseau de houât tension ;

MT: réseau moyen tension ;

BT : réseau petite tension ;

EP : Électronique de puissance ;

UPQC : Unifie Power Qualité Conditionner ;

MADA : Machine Asynchrone a Double Alimentation ;

GADA : Génératrice Asynchrone à Double Alimentation ;

MAS : Machine asynchrone ;

MS : Machine Synchrone ;

RNA : réseau neurone artificiel ;

AC : câbles sous-marins ;

FFT : Fast Fourier Transform ;

IGBT : Insulated Gate Bipolar Transistor ;

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1. Limitations des rangs harmoniques des courants générés …….. (14)

Tableau I.1. Principales charges polluantes ……...…… (19)

Tableau III.1. Niveaux de tension de raccordement en fonction de leur puissance... (39)

Tableau III.2. Besoins en capacité de stockage ……...…….. (46)

Tableau IV.1 : Paramètres du câble calculés par PSCAD en fonction des dimensions et des caractéristiques…… (57)

Tableau IV.2 : Caractéristiques du réseau principal……...…….…. (59)

Tableau IV.3 : Caractéristiques du transformateur……..... (59)

Tableau IV.4 : Comparaison des résultats pour les 3 méthodes……..…… (68)

Tableau IV.5 : caractéristique Câble …….……..... (69)

Tableau IV.6 : Paramètres du système complet……...…. (69)

LISTE DES FIGURES.

Figure I.1.Répartition des sources primaires d'énergie dans le monde……. (4)

Figure I.2.Eléments constitutifs d'une éolienne……. (4)

Figure I.3. Turbine éolienne en amont et en aval……..... (6)

Figure I.4. Turbine à axe vertical……..... (6)

Figure I.5. Puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent……..… (7)

Figure I.6. Eolienne à vitesse fixe…….…... (8)

Figure I.7. Eolienne à vitesse variable…….…..…… (10)

Figure. I.8. Classification des différents phénomènes de qualité de production.... (11)

Figure .I.9. Caractéristique puissance vitesse mesurée d'une éolienne de 1.5MW... (12)
Figure .II.1. Représentation de l'effet d'un harmonique…….. (18)
Figure II.2. Alimentation d'une charge non linéaire ……..…. (21)
Figure II.3.(a) Filtre passif résonant(b) Filtre passif amorti……..... (26)
Figure II.4. Schéma de principe du filtrage actif parallèle ……..... (27)
Figure II
.5. Schéma de principe du filtrage actif série……..……... (28)
FigureII.6. Filtre active série et filtre passif parallèle ……..……... (28)
Figure II.7. Filtre actif série connecte en série avec un filtre passif parallèle..……... (29)
Figure II.8. Filtre actif parallèle avec filtre passif parallèle……. (29)
FigureII.9. Combinaison parallèle-série des filtres actifs……..... (30)
Figure III.1:Qualité d'énergie……..…..…….…… (33)
Figure III.2:Creux de Tension ……..…….. (33)
Figure III.3:Creux de tension…….……. (34)
Figure III.4:Fluctuations de Tension……..……34)
Figure III.5:Harmonique…….…..… (35)
Figure. III.6: Schéma d'une éolienne connectée au réseau…….…. (42)
Figure. III.7: Insertion d'un système de stockage dans une éolienne……..…. (44)
Figure. III.8: Eolienne équipée d'un crowbar actif…….…. (49)
Figure. III.9: Tensions côté réseau……... (49)
Figure IV.1 : Représentation générique d'un câble électrique ……... (53)
Figure IV.2 : Représentation d'une section différentielle du câble et ses paramètres RGLC dépendant de la fréquence …….. (54)
Figure IV.3 : Classification des différents modèles de câbles……..... (54)
Figure IV.4. : Synoptique de simulation du système de transmission: le transform élévateur de tension, les câbles sous-marins et le réseau de distribution ..……. (57)
Figure IV.5: Tension polluée appliquée à l'entrée du système …….…….. …. (59)
Figure IV.6 : Trains harmoniques de la tension appliquée au système transmission…….…….. (59)
Figure. IV.7: Réponse fréquentielle du système de transmission . FFT du courant au PCC: en détail au voisinage de la résonance principale à f=400Hz (60) …….. (60)
Figure IV.8 :Réponse fréquentielle du système de transmission avec variation l'inductance de fuite du transformateur : 3%(gris), 6% (bleu), 9% (r et 12% (vert)……..(61)

Figure IV.9 : Réponse fréquentielle du système de transmission avec une inductance de fuite de 3% du transformateur élévateur …… (62)
Figure IV.10 : Réponse fréquentielle du système de transmission avec variation de la longue du câble à partir de: 20 km (gris), 50 km (bleu), 80 km (vert) et 110 km (rouge) …….....(63)
Figure IV.11 : Réponse fréquentielle du système de transmission avec variation l'impédance de court-circuit de: 2% (gris), 5% (bleu), 8% (vert) et 11% (rouge)... (63)
Figure IV.12 : Représentation d'une seule phase du système de transmission (Câble sou marin modélisé par un circuit en configuration Γ) ……..…(65)
Figure IV.13 : Réponse fréquentielle du système de transmission (Câble sous marin modél par une cellule en Γ) ……..(66)
Figure IV.14 : Représentation du module la tension du câble (distribué et cellules en cascad …….....(66)
Figure IV.15: Représentation d'une seule phase du système de transmission (Câble sou marin modélisé par 4-cellules en cascade en Γ)……..……...(67)
Figure IV.16 : Représentation fréquentielle du système de transmission avec le câble modél par 4-cellules en cascade …….....(67)
FigueIV.17. Généralités lay-out de la ferme éolienne Offshore considéré…....(69)
Figure IV.18 : Schéma équivalent du champ éolien ……..…….....…(69)
Figue. IV.19 : Circuit équivalent du système de transmission…….....(71)
Figue. IV.20. La réponse fréquentielle de Circuit équivalent du système de transmission ……...…(71)

Figue. IV.21 : Circuit équivalent du système de transmission avec compensati statique…….……..……...(71)
Figue. IV.22. La réponse fréquentielle de Circuit équivalent du système de transmission avec compensation statique …….……...(72)
Figue. IV.23 : Circuit équivalent du système de transmission avec deux éoliennes équivalen …….....(73)
Figue. IV.24. La réponse fréquentielle de Circuit équivalent du système de transmission av deux éoliennes équivalentes …….. (74)
Figure. IV.25.Circuit équivalent du système de transmission avec un Filtre passive(76)
Figure. IV.26. LA Réponse fréquentielle Circuit équivalent du système de transmissi avec un filtre passive …….……... (76)

TABLEAU DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE...…...……..……...……..(1)
Chapitre I. généralités sur systèmes éoliens..…….....(1)
I.1: Introduction……..…….…….....(1)
I.2: Notions théoriques sur l'énergie éolienne ……..…….……(1)
I.3. Différentes parties d'un aérogénérateur…….……(2)

I.4. Différents types d'éoliennes ……...……...(4)
I.4.1. Eoliennes à axe horizontal…….(4)
I.4.2. Eolienne à axe vertical……...(5)
I.5. Zones de fonctionnement de l'éolienne……...……..(6)
I.6. Production optimale de l'énergie……(7)
I.6.1. Fonctionnement à vitesse fixe……...……(7)
I.6.1.1. Eolienne à décrochage aérodynamique……..……(7)
I.6.1.2. Eoliennes à pales orientables……..……(8)
I.6.2. Fonctionnement à vitesse variable……..……..(8)
I.6.3. Qualité de production ……..…(9)
I.6.3.1. Généralités……....(9)
I.6.3.2. Tension……...…...…….....(10)
I.6.3.3 Fréquence……...……...(12)
I.6.3.4. Ilotage…….……..(12)
I.6.3.5. Harmoniques…….....(13)
I.7. Conclusion……..……..…(14)

Chapitre II La pollution harmonique dons le réseau électrique ……...…...….(15)
II.1. Introduction ……..……..(15)
II.2. Définition des harmoniques……..……...(15)
II.3. Les principaux responsables de la pollution……..…….....(16)
II.4. Interprétation des harmoniques……..……..…...(16)
II.5. Sources des harmoniques et leurs effets……..……...….(18)
II.5.1. Sources des harmoniques……....…..(18)
II.5.1.1. Type d'harmonique……..…..(19)
II.5.1.2. Types de charges non-linéaires……..……(20)
II.5.2. Effets des harmoniques…….....(22)
II.6. Solutions pour la dépollution harmonique……..(24)
II.6.1. Filtrage passif…….....(24)
II.6.2. Filtrage actif……..…..(25)
II.6.2.1. Filtres actif parallèle(FAP)…….....(26)
II.6.2.2. Filtre actif série(FAS)……...……(26)
II.6.2.3. Filtrage à structure hybride……...……(27)
II.6.2.4. Filtre universel…….....(28)

II.7. Avantage du traitement des Harmoniques……...(29)
II.8. Conclusion……...…(29)
Chapitre III ……...…..(31)
Impact de l'intégration des éoliennes dans le réseau électrique ……....(31)
III.1. Introduction …….....(31)
III.2. Qualité de Production ……...…….(31)
III.3.2 .1. Classification de différents phénomènes de qualité de Production ……..(32)
III.2.1.1. Creux de tension …….…….(32)
III.2.1.2. Les variations Lentes de Tension ……..(33)
III.2.1.3. Les variations rapides de tension ou Flicker ……..……...(33)
III.2.1.4. Les Harmoniques ……..…….....(34)
III.2.1.5. Le Déséquilibre ……..(34)
III.2.1.6. Variation de Fréquence ……..(35)
III.3. Principaux problèmes rencontrés ……..…(35)
III.3.1. Capacités d'accueil ……(35)
III.3.2. Qualité de tension ……...(35)
III.3.3. Interférence avec le plan de protection du réseau ……..(36)
III.3.4. Comportement dynamique et stabilité ……...(36)
III.3.5. Services système ……....(36)
III.4. Problématique de la connexion au réseau …….....(36)
III.4.1. Description des contraintes de raccordement ……....(37)
III.4.1.1 Réglage de la tension ……...(37)
III.4.1.2 Réglage de la Fréquence ……..(38)
III.4.2 Description des problèmes induits par l'intégration d'éoliennes dans un réseau électrique……(39)
III.4.2.1 Production aléatoire et très peu prévisible ……(39)
III.4.2.2 Capacité d'accueil ……..(39)
III.4.3 Description des facteurs affectant la qualité énergétique ……...(40)
III.4.3.1 Fluctuation de tension ……....(40)
III.4.3.2. Harmoniques et inter-harmoniques…….……...(42)
III.5. Architectures pour améliorer la qualité de L'énergie ……..….(42)
III.5.1. Le stockage et les fluctuations de production ……....(42)
III.5.1.1. Description des différents types de stockage ……....(42)
III.5.1.2. Le stockage inertiel (court terme) ……(43)

III.5.1.3 Modélisation des unités de stockage long terme ……(44)
III.5.2 Filtrage limitant les harmoniques ……(45)
III.5.2.1 Problématique des harmoniques ……(45)
III.3.5.2.2 Méthodes de compensation des harmoniques ……..……..(46)
III.5.3 Creux de tension ……(46)
III.5.3.1 Reprise au vol ……...(46)
III.5.3.2 Solutions possibles …….....(47)
III.5.3.3 Défauts asymétriques de la tension du réseau …….....(48)
III.6. Conclusion …….....(49)
CHAPITRE IV……....(51)
Modélisation d'un câble reliant une éolienne a un réseau électrique …….....(51)
IV.1. Introduction ……..……(50)
IV.2. Généralité sur les câbles sous- marine ……..……..…….....(50)
IV.2.1. Caractérisation du câble sous-marin …….....(50)
IV.2.1.1. Conducteurs …….....(50)
IV.2.2.2. Isolation ……...(50)
IV.2.2.3. Ecran ……(50)
IV.2.2.4. Armature ou gaine ……...(50)
IV.2.3. Modélisation du câble sous-marin ……..……...(54)
IV.2.3.1. Modèle dépendant de la fréquence (modèle idempotent) ……..(54)
IV.2.3.2. Adaptation des paramètres du câble sous PSCAD ……..(54)
IV.2.3.2.1. Conducteur ……(54)
IV.2.3.2.2. Bouclier ……(55)
IV.2.3.2.3. Isolation ……...(55)
IV.2.4. Réponse fréquentielle du système de transmission : simulation par PSCAD ….....(56)
IV.2.4.1. Effet des différents composants du système sur la réponse fréquentielle ……..(59)
IV.2.5. Réponse fréquentielle du système de transmission simplifié ……..(63)
IV.2.6. Modélisation du système de transmission ……..…..(64)
IV.2.6.1. Câble sous marin modélisé par un seul circuit en gamma ……(64)
IV.2.6.2. Réponse fréquentielle d'une seule phase du système ……..(64)
IV.2.6.3. Détermination du modèle en nombre de cellules du câble sous marin ….(65)
IV.2.7. Câble sous marin modélisé par une cascade de cellules ……...(66)
IV.2.7.1. Réponse fréquentielle du système ……(66)
IV.2.7.2. Comparaison et validation des résultats de la simulation ……(67)

IV.3. Application sur un cas réel ……(67)
IV.3.1 Réponse fréquentielle du système réel ……(68)
IV.3.2. L'effet de la Compensation de la puissance réactive sur la réponse …….....(71)
IV.3.3. Validation du système avec plusieurs Turbines …….(72)
IV.3.4. Filtrage et conception du Filtre Passive …….(73)
IV.3.5. Réponse fréquentielle du système avec intégration du filtre active ……..(74)
IV.3. Conclusion ……(76)
CONCLUSION GENERALE

ملخص :

أدى الاستخدام المتزايد للأجهزة الالكترونية في أنظمة الطاقة للمشاكل المتزايدة كالتشوه التوافقي أو تعطل شبكات الكهربائية , ينتج هذا التشوه من وجود الحمولة الغير خطية والمرتبطة بالشبكة حيث تستهلك تيارات غير جيبية.

في هذا العمل سلطنا الضوء على دراسة المرشح الكهربائي النشيط لمحاربة ظاهرة التلوث التوافقي وإصلاح الشبكات الكهربائية باستعمال برنامج orcadوهو أكثر دقة في تحديد وإزالة هذه التوافقيات باستخدام تقنياته الحديثة.

كلمات مفتاحية : الرياح , التوافقيات , المرشح الكهربائي (التصفية) ,نوعية الطاقة الكهربائية.

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 de la pollution Harmonique. Nous avons modélisée et simulée sous le logiciel cadence, Orcad d'une façon plus précise cette perturbation ainsi l'identification et l'élimination de ces Harmoniques à l'aide de différentes techniques et plus précisément les techniques modernes basé sur le filtrage.
Les mots clés : les éolienne, harmonique, qualité de l'énergie électrique, filtres.

Abstract

The problem of connecting wind turbines to the grid arises because of the difficulty in forecasting production, the risk of disconnections wind farms and deterioration in the quality of electricity. The fundamental purpose of grids is to provide customers of electrical energy with a perfect continuity in the form of perfectly sinusoidal voltages, with preset amplitude and frequency values (depending on the connection point).

As part of this project, we are particularly interested in the analysis of harmonic pollution. We modeled and simulated in software cadence, Orcad a more precise this disturbance and the

identification and removal of these harmonics using different techniques and specifically modern techniques based filtering.

Key words: the wind, harmonic fields connected to networks, filter.

INTRODUCTION GÉNERALE

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 la pollution harmonique causé par la connexion d’un parc éolien au réseau électrique et comment atténuer cette perturbation à l’aide des filtres. Pour ce faire et afin de remédier aux problèmes précités, nous avons adopté le plan qui s’articule comme suit :

- Le premier chapitre présente une vision générale sur l’énergie éolienne, description des éoliennes, leurs caractéristiques et leurs systèmes de fonctionnement

- Le deuxième chapitre est consacré à des généralités sur les harmoniques et la compréhension de l’origine des perturbations, l’évaluation de leur impact sur les équipements, et au choix de la solution la plus appropriée.

- 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 projet de fin d'études par une modélisation et simulation d'un application d'un cas réel d'un câble sous marin reliant un réseau électrique à une éolienne, généralement source d'harmonique afin de visualiser les résultats obtenus, justifiant les techniques utilisées pour l'atténuation des harmoniques afin d'améliorer la qualité de l'énergie électrique du réseau électrique auquel est connecté le parc éolien.

CHAPTER I

GENERALITES SUR SYSTEMES EOLIENS

I.1 : Introduction

Ces dernières années, l'intérêt d'utilisation d'énergies renouvelables ne cesse d'augmenter, car l'être humain est de plus en plus concerne par les problèmes environnementaux. Parmi ces énergies, on trouve l'énergie éolienne. Cette dernière sert à transformer l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. La encore, de nombreux

dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones ou asynchrones ***[1]***. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse de vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes.

Dans ce chapitre, on présente des notions théoriques sur l'énergie éolienne, des différents types d'aérogénérateurs (verticaux, horizontaux, a vitesse fixe et vitesse variable), puis on passe a la description des génératrices synchrones, asynchrones a cage et asynchrone a bagues doublement alimentées avec ses différentes configurations d'alimentation, et on donne les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne.

I.2 : Notions théoriques sur l'énergie éolienne

Aujourd'hui, plus de 85% de l'énergie produite est obtenue a partir des matières fossiles comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou de l'énergie nucléaire. La figure 1.1 montre la répartition en termes d'énergie primaire dans le monde pour toutes les ressources actuelles. Les formes de production d'énergie non renouvelables engendrent une forte pollution environnementale par rejet des gaz à effet de serre qui provoque un changement climatique irréversible ou dans le cas du nucléaire une pollution par radiations de longue durée qui pose le problème, aujourd'hui non résolu, du stockage des déchets radioactifs ***[2]***.

Dans le courant de $21^{éme}$ siècle, le paysage énergétique va radicalement changer car plusieurs ressources fossiles risquent de disparaitre. De nouvelles ressources associées à des technologies performantes et fiables sont indispensables pour tenter de maintenir le niveau de la production énergétique mondiale.

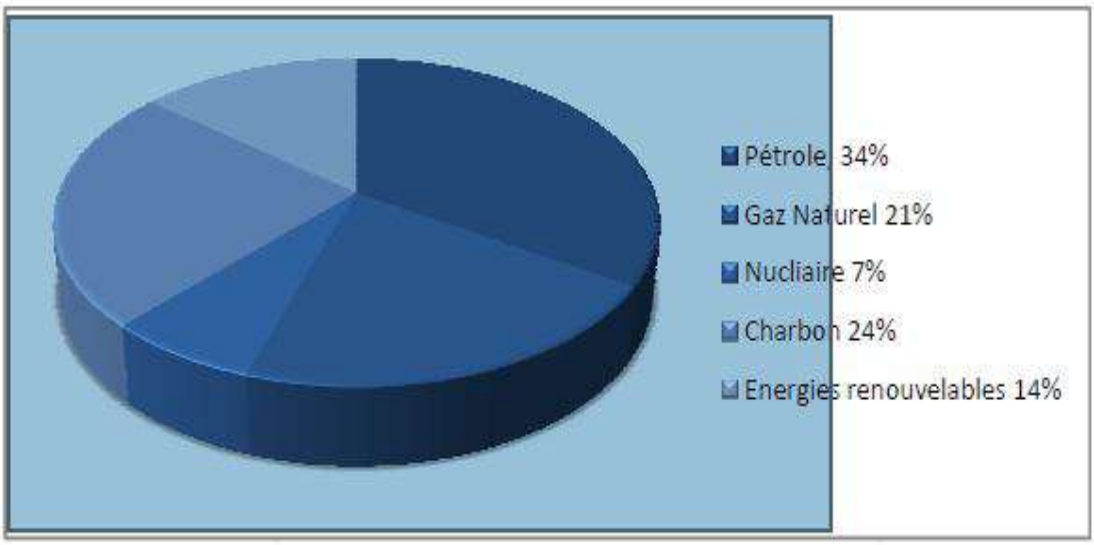


Figure I .1. *Répartition des sources primaires d'énergie dans le monde*

Il existe plusieurs ressources d'énergies renouvelables : l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne, l'énergie solaire, la géothermie et la biomasse. Ces ressources et propres ***[2]***.

I.3. Différentes parties d'un aérogénérateur

Une éolienne est composée de plusieurs éléments présents sur la figure I.2

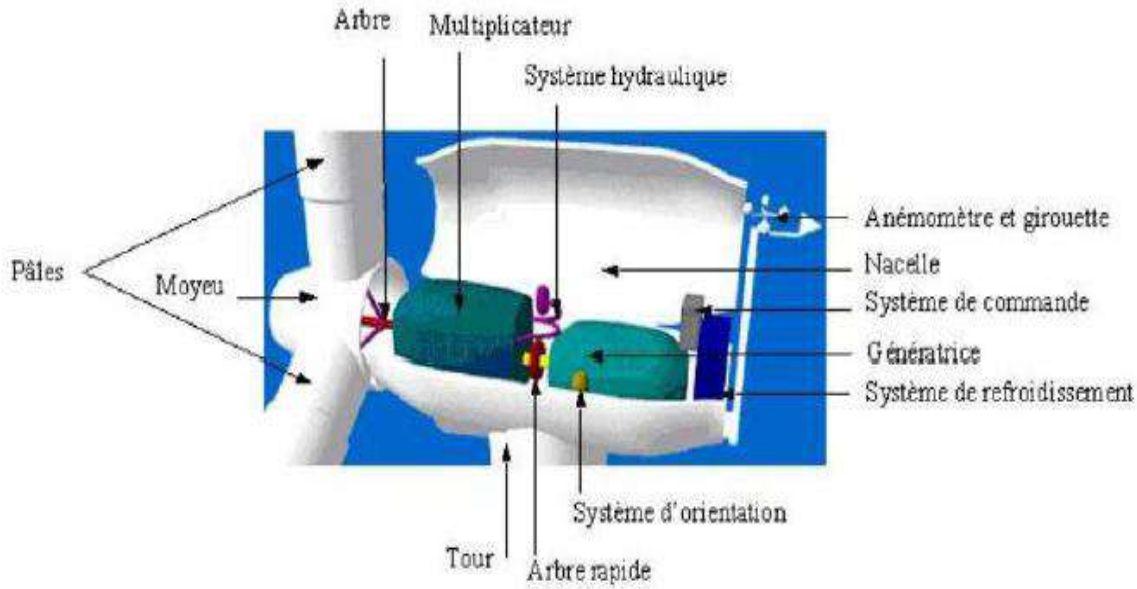


Figure I.2. *Eléments constitutifs d'une éolienne*

Un mat, ou tour, supporte la nacelle et la turbine. Il est important qu'il soit haut du fait de l'augmentation de la vitesse du vent avec la hauteur et aussi du diamètre des pales. La nacelle

avec une armature métallique accueille la gênera vitesse et différents équipements électroniques de contrôle qui permettent de commander les différents mécanismes d'orientation ainsi que le fonctionnement global de l'éolienne.

Le multiplicateur de vitesse comporte un arbre lent supportant un arbre rapide et la turbine. Cette dernière possède trois pales qui permettent de capter l'énergie du vent et de la transférer à l'arbre lent. Un système électromécanique permet généralement d'orienter les pales et de réguler la vitesse de rotation de la turbine. Les pales fournissent également un frein aérodynamique par ≪mise en drapeau ≫ ou seulement par rotation de leurs extrémités. Un anémomètre et une girouette, situes sur le toit de la nacelle, fournissent les données nécessaires au système de contrôle pour orienter l'éolienne et la déclencher ou l'arrêter selon la vitesse du vent ***[3].***

I.4. Différents types d'éoliennes

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice:

I.4.1. Eoliennes à axe horizontal

Ce sont les éoliennes les plus utilisées et sont dotées d'un système de commande ou la conception oriente le rotor face au vent. Une turbine à axe horizontal demeure face au vent, comme les hélices des avions et des moulins a vent. Elle est fixée au sommet d'une tour, ce qui lui permet de capter une quantité plus importante d'énergie éolienne. Les éoliennes à axe horizontal sont les plus employées car leur rendement aérodynamique est supérieur à celui des éoliennes à axe vertical. Elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et ont un cout moins important.

Selon son nombre de pales, une éolienne à axe horizontal est dite monopole, bipale, tripale ou multiple. Le plus souvent le rotor de ces éoliennes est tripale, car trois pales constituent un bon compromis entre le coefficient de puissance, le cout et la vitesse de rotation du capteur éolien ainsi que l'aspect esthétique par rapport aux autres types. Suivant leur orientation en fonction du vent, les éoliennes a axe horizontal sont dites en ≪ amont ≫ (upwind) ou en ≪aval ≫ (downwind),

La figure I.3 montre ces deux types, celle en amont est largement prédominante ***[4].***

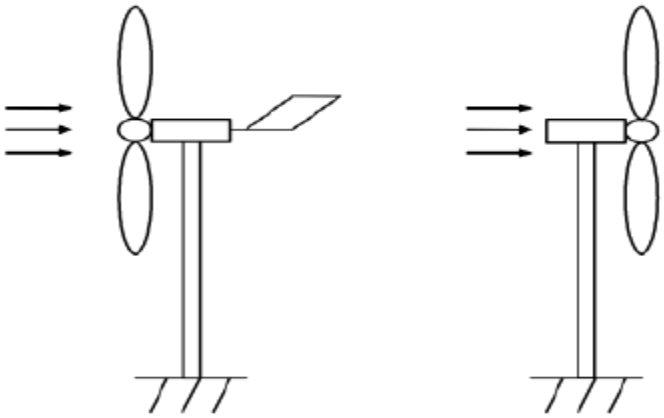


Figure I -3.*Turbine éolienne en amont et en aval.*

I.4.2. Eolienne à axe vertical

Elles sont les moins utilisées, a cause de leur manque de performances par rapport a la précédente. L'axe de rotation de ce type est vertical par rapport au sol et perpendiculaire a la direction du vent. Ce type de turbine peut recevoir le vent de n'importe quelle direction, ce qui rend inutile tout dispositif d'orientation. Le générateur est disposé au niveau du sol, ce qui est plus simple et donc économique. La maintenance du système est également simplifiée dans la mesure où elle se fait au sol. Ces turbines ne disposent pas de commande d'angle de pale comme la précédente. La figure I.4 montre trois conceptions d'une éolienne à axe vertical. Le faible rendement aérodynamique et la quantité du vent réduite qu'elles reçoivent au niveau du sol constituent les principaux handicaps de ce type face a l'autre type ***[4, 2].***

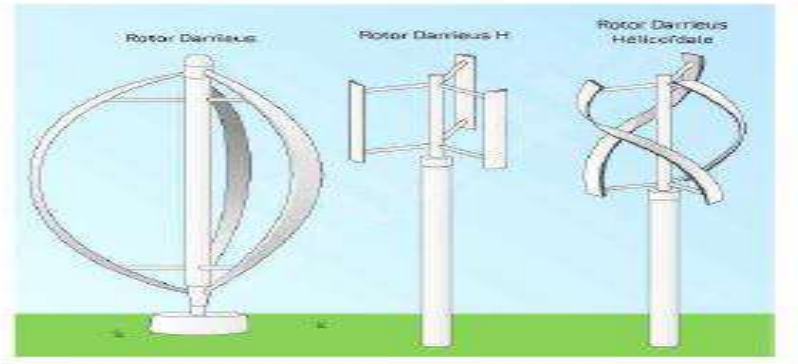


Figure I -4.*Turbine à axe vertical*

I.5. Zones de fonctionnement de l'éolienne

Les objectifs de la régulation sont d'assurer la sécurité de l'éolienne par vents forts et de limiter la Puissance. Donc, il existe pour la puissance éolienne nominale P_n une vitesse du vent

nominale pour laquelle l'aérogénérateur est bien dimensionne. Lorsque la vitesse du vent est supérieure a V_n, la turbine éolienne doit modifier ses paramètres afin d'éviter toute destruction mécanique, de sorte que sa vitesse de rotation reste pratiquement constante. A cote de la vitesse nominale V_n, on spécifie aussi :

_ La vitesse de démarrage, V_d a partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie ;

_ La vitesse maximale du vent, V_{max}, pour laquelle la turbine ne convertit plus l'énergie éolienne, Pour des raisons de sureté de fonctionnement.

Les vitesses V_{nd}, V et V_{max} définissent quatre zones sur le diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent (Figure I.5) :

_ La zone I, ou P =0, la vitesse du vent est trop faible, la turbine peut tourner mais l'énergie a Capter est trop faible ;

_ La zone II, le maximum de puissance est capte dans cette zone pour chaque vitesse de vent;

_ La zone III, ou la vitesse de rotation est maintenue constante et ou la puissance P fournie reste égale a P_n ;

_ La zone IV, la vitesse du vent devient trop forte, la turbine est arrêtée et la puissance extraite est nulle ***[5, 6].***

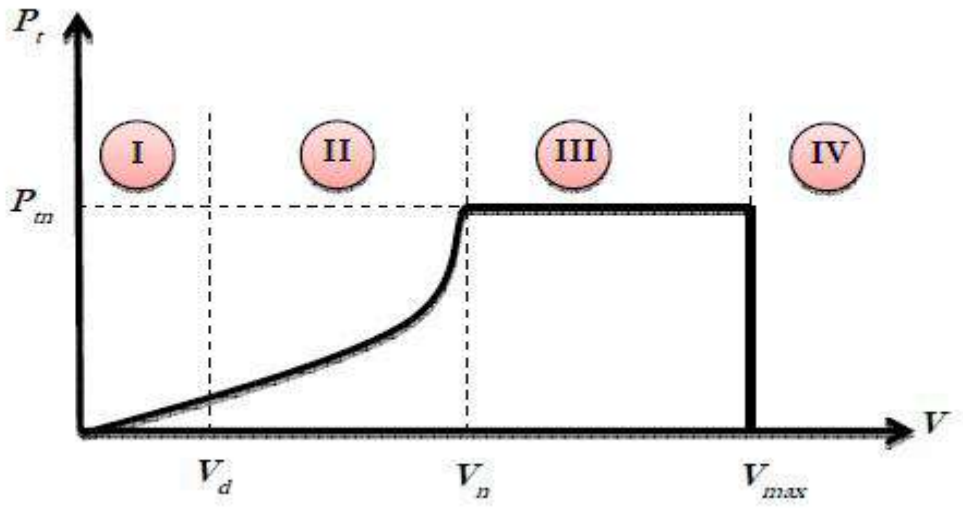


Figure I .5.*Puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent*

I.6. Production optimale de l'énergie

On peut classer les éoliennes en deux catégories suivant le mode de fonctionnement : des éoliens fonctionnements a vitesse fixe et celles fonctionnement a vitesse variable.

I.6.1. Fonctionnement à vitesse fixe

Les éoliennes à vitesse fixe sont les premières qui ont été développées. Dans cette technologie, la génératrice asynchrone est directement couplée au réseau, donc sa vitesse est imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de pairs de pôles de la génératrice utilisée (Figure I.6) ***[7].***

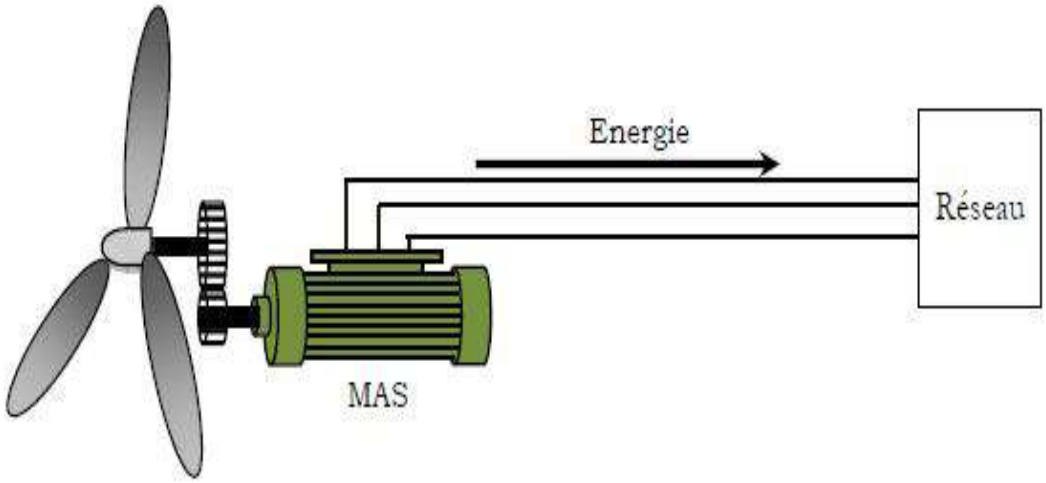


Figure* I .*6.*Eolienne à vitesse fixe***

Le couple mécanique entrainant (produit par la turbine) tend à accélérer la vitesse de la génératrice. Cette dernière fonctionne alors en hypersynchrone et fournit la puissance électrique au réseau. On peut distinguer deux technologies d'éoliennes à vitesse fixe : Les éoliennes à décrochage aérodynamique et les éoliennes à pales orientables ***[8].***

I.6.1.1. Eolienne à décrochage aérodynamique

C'est un régulateur par décrochage aérodynamique ; autrement dit, le comportement géométrique des pales peut évoluer selon le rapport entre les deux vitesses du vent et de la turbine, ce qui permet le décrochage à partir d'une certaine vitesse du vent. Ce décrochage dépend notamment de l'angle de calage des pales qui peuvent être fabriquées avec un pas variable suivant la position le long de la pale et possèdent aussi un mécanisme de freinage en bout. Cette technique du "Stall Control" a aussi quelques avantages ***[5]*** :

_ Pas de système de contrôle d'angle de calage ;
_ Construction plus simple et moins couteuse du rotor ;
_ Maintenance plus aisée et fiabilité meilleure.

Pour les machines de fortes puissances, on trouve également le système "Stall actif". Le décrochage aérodynamique est alors obtenu progressivement grâce à un dispositif permettant un débattement des pales contre le vent. L'orientation des pales étant très réduite, le dispositif mécanique est technologiquement plus simple et moins couteux que le système a orientation des pales qui est maintenant présente ***[9].***

I.6.1.2. Eoliennes à pales orientables

C'est un contrôle par variation de l'angle de calage des pales (pas des pales) autour de leur axe longitudinal en fonction de la vitesse du vent et de la puissance active à extraire. L'utilisation d'un système d'orientation des pales permet, par une modification aérodynamique, de maintenir constante la puissance de la machine en fonction de la vitesse du vent. Le fonctionnement à vitesse fixe possède les caractéristiques suivantes :

Système électrique plus simple ;

_ Plus grande fiabilité ;

_ Peu de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne ;

_ Pas besoin de système électronique de commande ;

_ Moins cher ***[5 ,9].***

I.6.2. Fonctionnement à vitesse variable

Pour garantir un captage maximal de l'énergie incidente et d'améliorer le rendement et la qualité de la conversion de l'énergie, il faut ajuster en permanence la vitesse de l'éolienne a la vitesse du vent. L'optimisation de la puissance dans la charge ou le réseau récepteur peut s'effectuer par des Commandes sur la turbine, sur la partie électrotechnique (générateur électrique lui-même et/ou paramètres de commande du convertisseur d'électronique de puissance) (Figure I.7).

Le fonctionnement à vitesse variable demande la définition d'une stratégie de commande globale de la turbine. Il faut donc indiquer les variations de la vitesse de rotation, couple ou puissance souhaitées en fonction des variations de la vitesse du vent ***[7].***

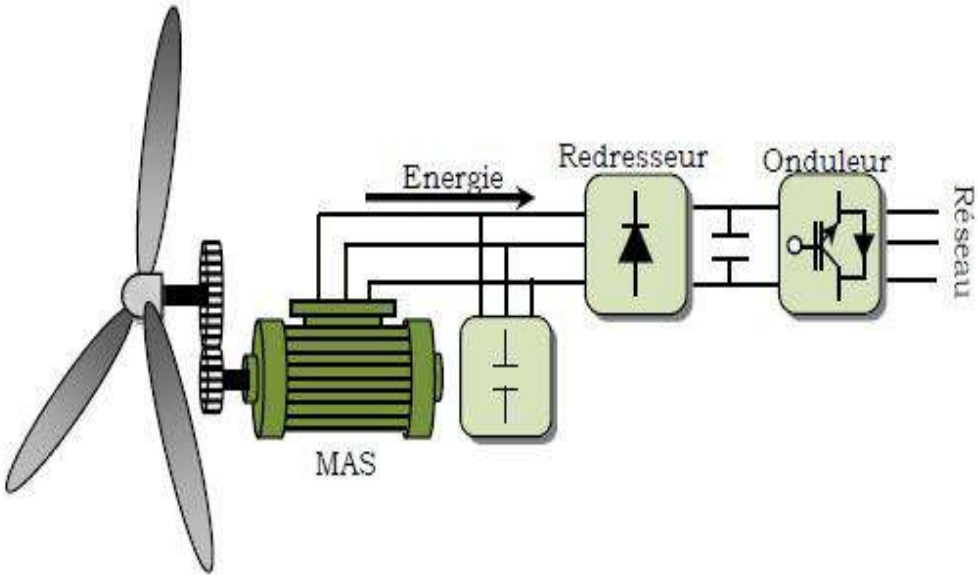


Figure 1-7. *Eolienne à vitesse variable*

Le fonctionnement a vitesse variable est caractérise par :

_ Augmentation du rendement énergétique ;

_ Réduction des oscillations du couple dans le train de puissance ;

_ Réduction des efforts subis par le train de puissance ;

_ Génération d'une puissance d'une meilleure qualité ***[5].***

1.6.3. Qualité de production

1.6.3.1. Généralités.

Le terme ''qualité de production '' se réfère à la stabilité de la tension, à la stabilité de la fréquence et au contenu harmonique des grandeurs générées. Si une éolienne est raccordée à un réseau électrique faible (c'est-à-dire relié au réseau électrique principal, au moyen d'une ligne ayant une faible capacité de transport de l'énergie), il peut y avoir des problèmes de chute de tension et d'excursions de puissance.

Il peut alors s'avérer nécessaire de renforcer le réseau.

Les aspects de qualité de production les plus rencontrés sont :

_ Les creux de tentions

_ La variation de fréquence

_ Les interruptions de fonctionnement

La figure 1.8, montre une classification des différents phénomènes de qualité de puissance, apparaissant dans le fonctionnement des éoliennes ***[10].*** Dans ce qui suit, on va décrire ces différents aspects, sauf les interruptions de fonctionnement qui ne seront pas pris en compte dans l'étude.

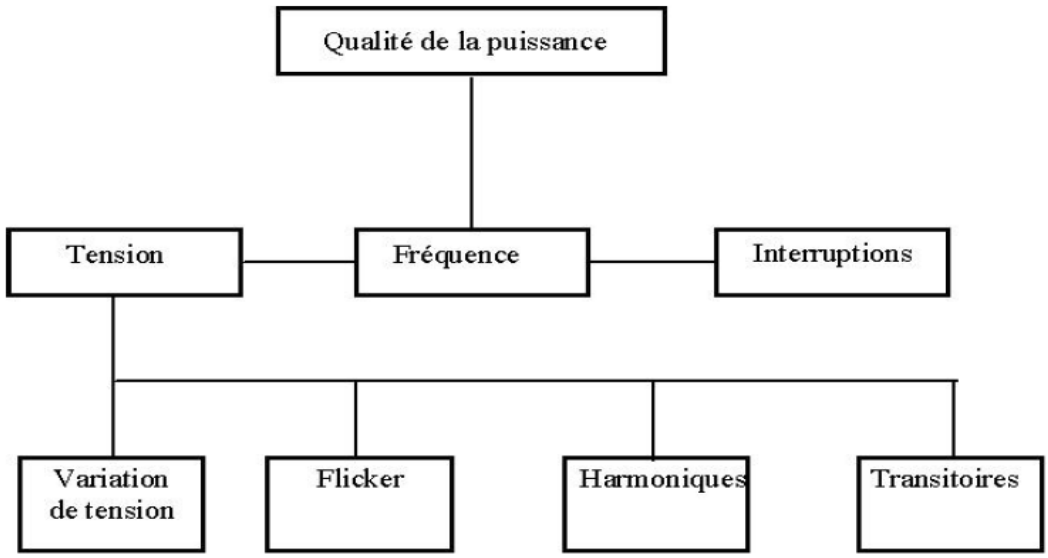


Figure. I.8. *Classification des différents phénomènes de qualité de production*

1.6.3.2. Tension

A – Variations de tension

Elles sont définies par un changement de la valeur efficace de la tension sur une durée de quelques minutes ou plus. Les standards internationaux imposent que cette variation ne doit pas dépasser ± 5% de la tension nominale dans un réseau ***HTA [11].***

Différentes méthodes de calculs permettent de détecter la variation. Le flicker désigne les variations de tension de courte durée apparaissant dans le réseau électrique. Deux causes de flicker sont identifiées.

B – Flicker en fonctionnement continu

Le flicker produit lors d'un fonctionnement continu est causé par les fluctuations de puissance. Ces dernières émanent essentiellement des variations de la vitesse du vent, de l'effet d'ombre de la tour et également des erreurs d'orientation des pales. Afin de déterminer le flicker produit durant un fonctionnement continu, des mesures sont effectuées et comparées avec la tension de référence pour quantifier le taux de flicker en tension.

C – Flicker lors d'un basculement d'une zone de fonctionnement à une autre

Le basculement d'une zone de fonctionnement à un autre produit également du flicker. Les commutations typiques sont la mise en/hors service de l'éolienne. Ces opérations provoquent des changements dans la puissance produite ou lors de changement d'algorithmes de commande (figure *I*.9).

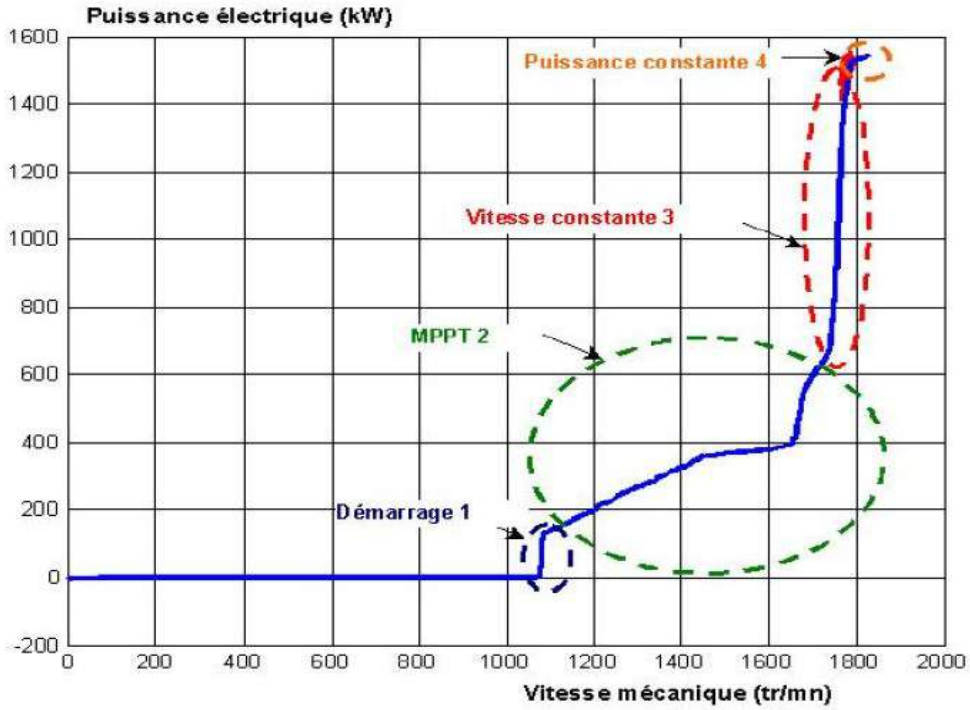


Figure. I.9. *Caractéristique puissance vitesse mesurée d'une éolienne de 1.5MW*

Remarque : La procédure de démarrage des éoliennes n'est pas identique d'une technologie d'éolienne à l'autre : les éoliennes à vitesse variable et à orientation des pales ont un démarrage moins brutal que les éoliennes à vitesse fixe.

Généralement, lors de la mise en service d'une éolienne basée sur une génératrice asynchrone, la puissance réactive, nécessaire à la magnétisation de la génératrice consommée provoque une chute de tension au point de connexion. Cette dernière est rétablie parla connexion d'un banc de condensateurs.

I.6.3.3 Fréquence

L'effet de la variation de la puissance aérodynamique doit être considéré dans le fonctionnement d'un système de production autonome ***[10].*** Dans le cas de l'utilisation

d'éoliennes 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 les éoliennes à vitesse variable reliées au réseau par des convertisseurs de puissance, ces normes sont facilement respectées par l'existence d'un bus continu intermédiaire.

Selon les standards Européens en 50 160, la fréquence nominale du réseau de distribution est de 50Hz. En outre, en dehors d'un fonctionnement normal, la valeur moyenne de la fréquence du fondamental mesurée sur 10s, doit être d'environ 50Hz± 2% (donc de 49Hz à 51Hz) pour 95% de la semaine ou de 50Hz ±15%(donc de 42.5 Hz à 57.5Hz) pour 100% de la semaine.

I.6.3.4. Ilotage

L'ilotage désigne la situation qui peut arriver si une section du réseau électrique est déconnectée du réseau électrique principal suite à une activation accidentelle ou intentionnelle d'un sectionneur de ligne (par exemple en cas de courts-circuits ou de coups de foudre). Si les éoliennes continuent à produite de l'électricité, la transmettant à la partie isolée du réseau, il est très probable que les deux réseaux séparés ne soient plus en phase après un bref laps de temps. Le rétablissement de la connexion au réseau peut donc causer d'énormes courants électriques tans dans le réseau que dans la génératrice. De même, on assistera probablement aussi à un effort important sur la transmission mécanique (l'arbre, le multiplicateur et le rotor de l'éolienne), les effets seront semblables à ceux d'une connexion brutale de la génératrice au réseau électrique.

Le système contrôle-commande doit donc surveiller sans cesse la tension et la fréquence du courant alternatif transmis au réseau.

I.6.3.5. Harmoniques

Les harmoniques de tension et de courant sont toujours présents dans un réseau de distribution. Ils sont essentiellement provoqués par la présence de charges non-linéaires et se convertisseurs de puissance. Ces harmoniques provoquent une surchauffe de l'équipement, un fonctionnement défectueux du système de protection, et des interférences dans les circuits de communication. C'est pourquoi des standards concernant les taux maxima d'harmoniques de rang pair et impair ***[12].***

On distingue aussi les harmoniques et les inter-harmoniques. Les harmoniques sont des composantes de fréquences souvent constituées de multiples de la fréquence de base (fréquence

du réseau). Les inter-harmoniques sont des composantes situées entre les harmoniques de composantes situées entre les harmoniques et la fréquence de base.

Le Tableau *I*.1. Résume les limitations des rangs harmoniques de courants en présence de convertisseurs pour les installations de plus de 100kVA (Coefficients de limitation k_n) ***[13]*** :

Tableau. I.1. Limitations des rangs harmoniques des courants générés

Rangs impairs	k_n (%)	Rangs pairs	k_n
3	4	2	2
5et7	5	4	1
9	2	>4	0.5
11et13	3		
>13	2		

I.7. Conclusion

Dans ce chapitre, on a présent un rappel de notions nécessaires a la compréhension du système de conversion de l'énergie éolienne, différents types d'éoliennes et leurs modes de fonctionnement ont été décrits. Apres ce rappel des notions élémentaires, on est passe à la présentation des différentes configurations électriques qui sont utilisées dans les éoliennes.

En revanche, l'utilisation de ce type d'énergie présente des problèmes par rapport à la qualité de l'énergie produite, ces impactes sont résumés en deuxième partie de ce chapitre.

CHAPTER II

LA POLLUTION HARMONIQUE DONS LE RÉSEAU ÉLECTRIQUE

II.1. Introduction

La pollution des réseaux électriques par les courants harmoniques est une conséquence inévitable de la prolifération depuis quelques années des charges non linéaires engendrant des courants harmoniques et des distorsions dans les différents réseaux électriques.

L'énergie électrique, principalement produite et distribuée sous forme de tensions triphasées sinusoïdales, permet de fournir la puissance électrique nécessaire aux différentes charges sur le réseau électrique. Les paramètres caractéristiques de ce réseau sont la fréquence, l'amplitude, la symétrie du système triphasé et la forme d'onde de la tension. Cette dernière doit être sinusoïdale. Cependant, lorsque la forme d'onde de la tension n'est plus sinusoïdale, on rencontre des perturbations qui peuvent affecter le bon fonctionnement de nombreux équipements et de charges raccordés sur le réseau électrique.

Depuis quelques années, avec l'évolution technologique des composants d'électronique de puissance, les distributeurs d'énergie rencontrent plusieurs problèmes lies a l'accroissement du nombre de convertisseurs statiques raccordes aux réseaux de distribution d'énergie. En effet, ces convertisseurs sont des sources polluantes qui absorbent des courants non sinusoïdaux et consomment pour la plupart de la puissance réactive. Ces courants harmoniques circulant a travers les impédances du réseau peuvent, lorsqu'ils sont importants en amplitude, créer des tensions harmoniques et ainsi perturber le fonctionnement des autres équipements branches au point commun de raccordement. Ce chapitre est entame par des notions générales des harmoniques.

II.2. Définition des harmoniques

Dans le système de puissance ***[12],*** la définition d'un harmonique peut être énoncée comme suit : une composante sinusoïdale périodique ayant une fréquence multiple entier de la fréquence du fondamental. Ainsi, pour un système, la fréquence fondamentale est de f_0 et la fréquence de $h^{éme}$ harmonique est de hf_0. Les harmoniques sont souvent utilisées pour définir la distorsion du signal sinusoïdal associe avec le courant ou la tension de différentes amplitudes et de fréquences ce qui se traduit par une dégradation du facteur de puissance ***[13, 14, 15]***.

II.3. Les principaux responsables de la pollution

- La présence des charges électriques non linéaires chez les consommateurs génèrent les courants harmoniques dans leur réseau public et dans leurs réseaux internes entrainant une pollution électrique ayant des effets néfastes sur la qualité de puissance fournie.

- Le responsable de la pollution harmonique n'étant pas les centrales électriques, ni le réseau national de distribution électrique.
- Les consommateurs sont les principaux responsables de cette pollution dans le réseau de distribution de l'électricité qui subit les effets générés par les charges polluantes.

II.4. Interprétation des harmoniques

Le concept d'harmonique est introduit au début du 19éme siècle par JOSEPH FOURIER qui démontra que tout signal périodique non sinusoïdal peut être représente par une somme ou série de sinusoïdes de fréquences discrètes (multiples) ***[15]***.

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty}(a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)) \quad \text{(II.1)}$$

On note que la composante $\frac{a_0}{2}$ de la série de FOURIER est la composante continue.

a_0, a_n, b_n : Sont définis comme suit :

$$a_0 = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} f(\omega t) d(\omega t) \quad \text{(II.2)}$$

$$a_n = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} f(\omega t) \cos(n\omega t)\ d(\omega t) \quad \text{(II.3)}$$

$$b_n = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} f(\omega t) \sin(n\omega t)\ d(\omega t) \quad \text{(II.4)}$$

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

$$I(t) = \sum_{h=1}^{\infty} Ih \sin(\omega ht + \varphi h) \quad \text{(II.5)}$$

La première composante de rang 1 $(h=1)$ est appelée : composante fondamentale. Pour les systèmes raccordes a un réseau électrique stabilise, la fréquence de la composante fondamentale est considérée comme étant fixe ($50Hz$ en Europe, $60Hz$aux Etats Unis). Le reste des composantes de la série de FOURIER sont appelées : harmoniques de rang *h*, ou *h* désigne le numéro de la composante (le rang 2 correspond au deuxième terme de la série de Fourier qui aura une fréquence double du fondamental).
La figure 2.1 donne l'allure d'un courant contenant un harmonique de rang 3, c'est à dire un courant qui contient une composante de rang 3 élevée en amplitude. Dans les réseaux électriques triphasés, les principales composantes harmoniques sont de rangs 5, 7,11.

Dans le cadre de la décomposition en série de Fourier d'un signal périodique, un courant électrique est composé en un signal sinusoïdal à la fréquence du réseau et la somme (en général infinie) de signaux sinusoïdaux, de fréquence 2, 3, 4, 5, n fois la fréquence du réseau.

n est le rang de la composante harmonique

•Rang 3: courant supplémentaire de 150 Hz (**3**x50 Hz)

•Rang 5: courant supplémentaire de 250 Hz (**5**x50 Hz)

•Rang 7: courant supplémentaire de 350 Hz (**7**x50 Hz)

•Rang 11: courant supplémentaire de 550 Hz (**11**x50 Hz), etc.……

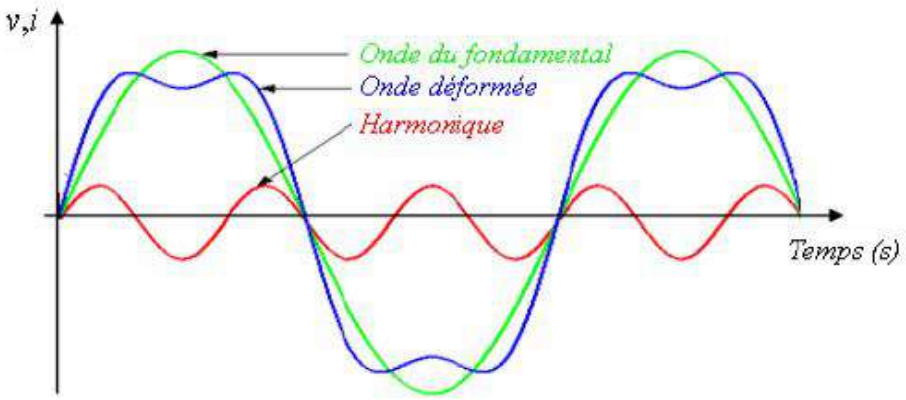


Figure II -1. *Représentation de l'effet d'un harmonique.*

II.5. Sources des harmoniques et leurs effets

II.5.1. Sources des harmoniques

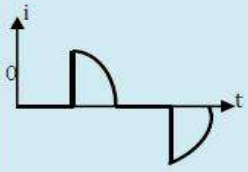
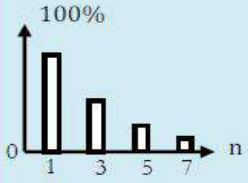
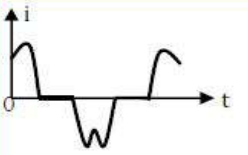
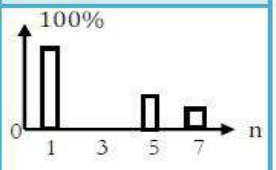
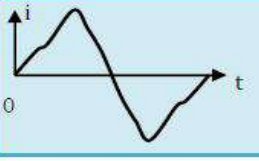
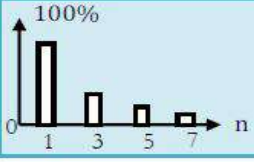
Les principales sources à l' origine des harmoniques sont les appareils d'éclairage fluorescent, les appareillages informatiques, les appareils domestiques (téléviseurs, appareils électroménagers en grand nombre), les arcs électriques et tous les convertisseurs statiques raccordés aux réseaux tels que les redresseurs et les onduleurs. Tous ces systèmes contribuent a la pollution harmonique du réseau auquel ils sont connectes. En effet, ces systèmes absorbent des courants non sinusoïdaux, même s'ils sont alimentes par une tension sinusoïdale. Ces équipements électriques sont considères comme des charges non linéaires émettant des courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers ou non entiers de la fréquence fondamentale.

On représente quelques principales charges non linéaires situées dans les réseaux électriques; Comme par exemple:

- Gradateur monophasé
- Redresseur triphasé a thyristor
- Moteur asynchrone ***[16]***.

Le tableau II.1 montre l'exemple des charges non linéaires citées ci-dessus:

Tableau II.1. Principales charges polluantes ***[13]***

Type de charge	Appareils concernés	Courant absorbé	Spectre harmonique correspondant
Gradateur monophasé (commandé par angle de phase)	Régulation de puissance de fours à résistance Modulation de puissance des lampes halogènes		
Redresseur triphasé à thyristor	Variateurs de vitesse des moteurs à courant continu et des moteurs synchrones		
Moteur asynchrone	Machines à outils Appareils électroménagers		

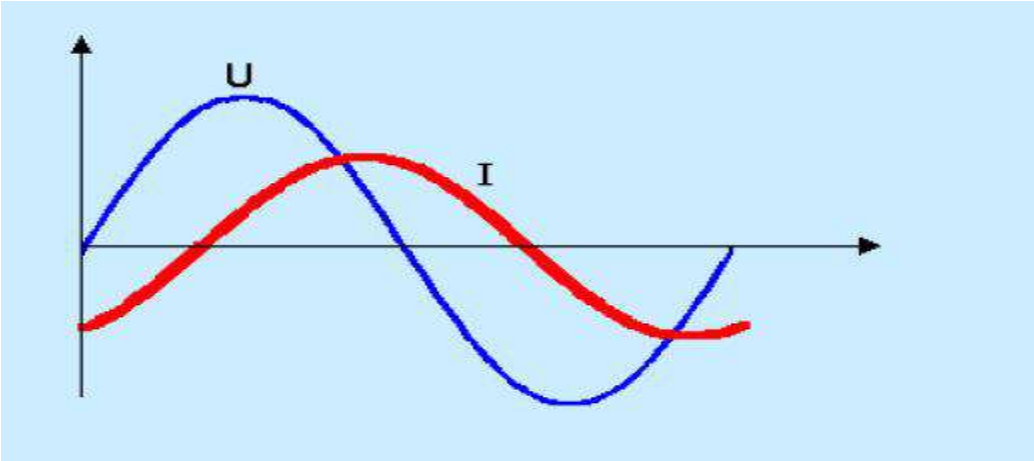
II.5.1.1. Type d'harmonique

- **LES CHARGES LINEAIRES**

  Une charge est dite "**linéaire**" si le courant qu'elle absorbe est sinusoïdal lorsqu'elle est alimentée par une tension sinusoïdale.

  Ce type de récepteur ne génère pas d'harmonique.

  Exemple par les charges linéaire. ***[21]***

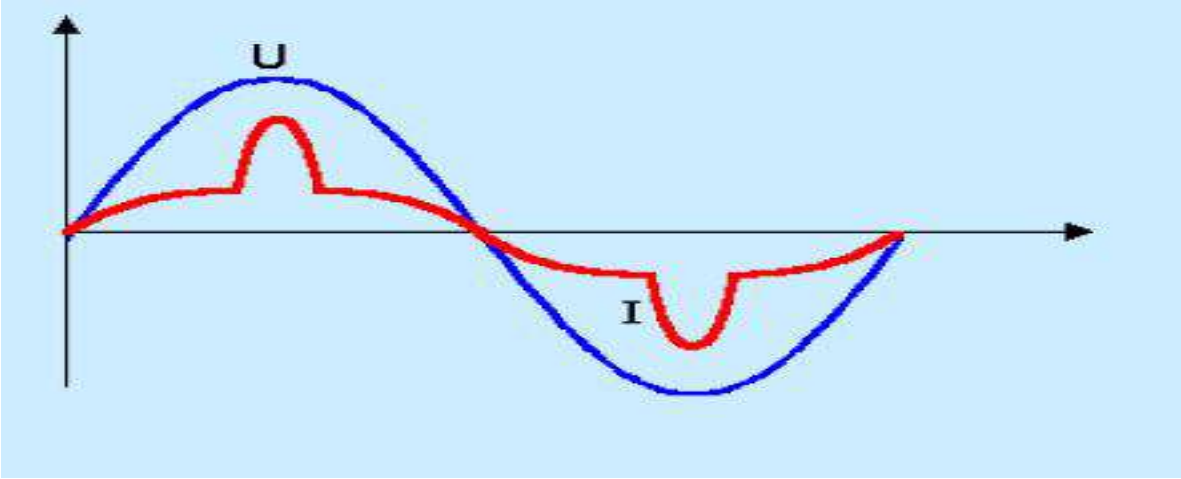


- ***charges non-linéaires***

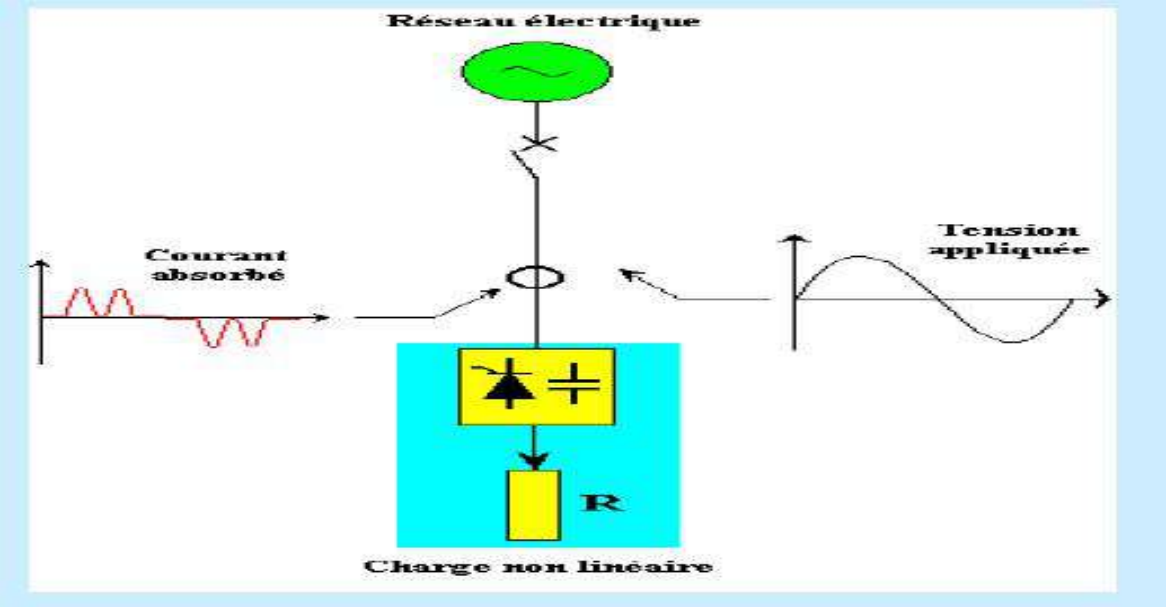
Une charge est dite "**non linéaire**" si le courant absorbé n'est pas sinusoïdal lorsqu'elle est alimentée par une tension sinusoïdale. Ce type de récepteur est générateur des courants harmoniques. Les charges non linéaires déforment les signaux électriques du courant et de la tension.

Exemple par les charges non linéaires ***[21]***

a)



b)



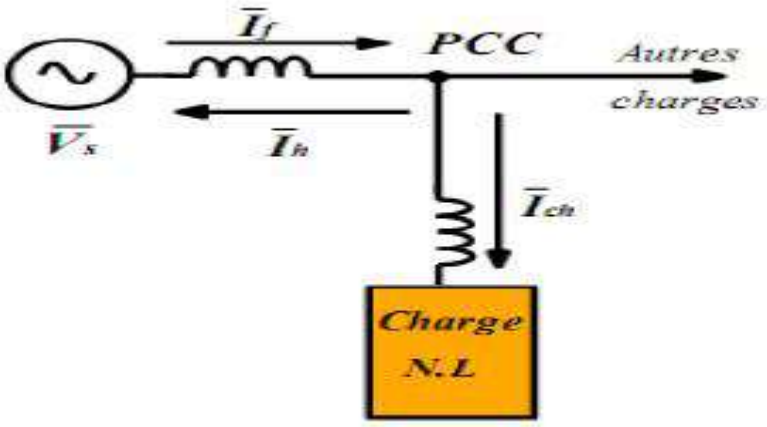


Figure II.2. *Alimentation d'une charge non linéaire.*

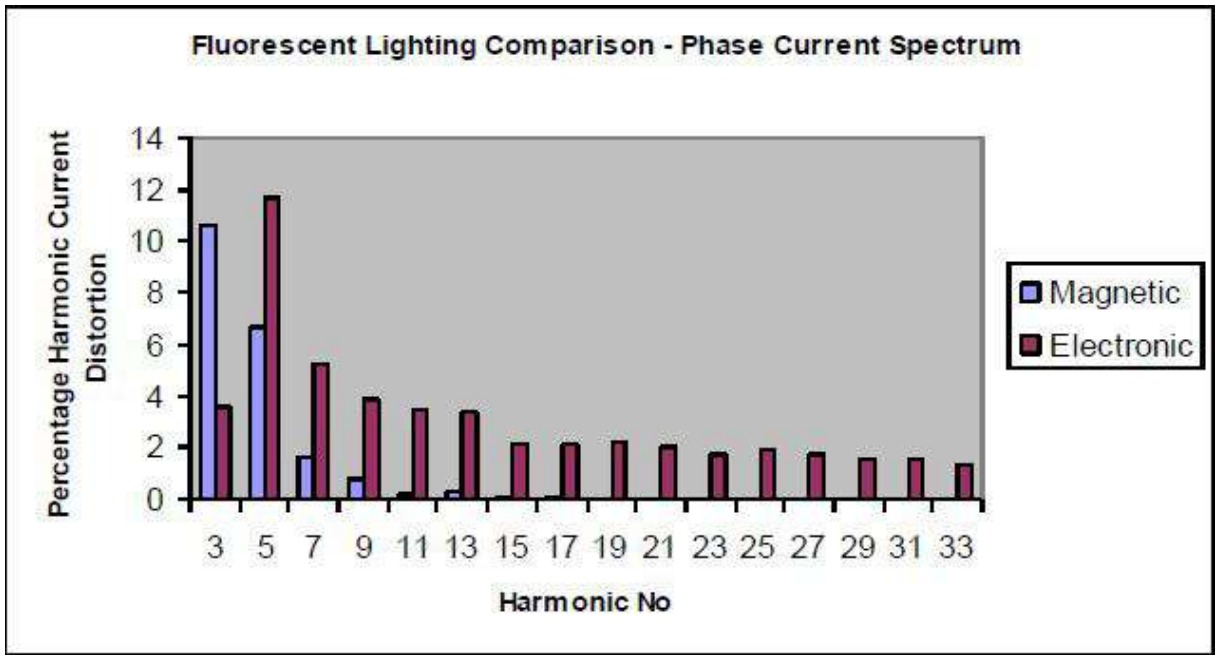
II.5.1.2. Types de charges non-linéaires

A. <u>Le premier groupe (Charges monophasées) comprend:</u>

- Lampe basse consommation dite à économie d'énergie.
- Tubes fluorescent
- Lampes à décharge gazeuse à basse et haute pression.
- Ballasts électroniques pour éclairage.
- Equipements médicaux
- Téléviseurs
- Ordinateurs

- Imprimantes et photocopieurs
- Onduleurs

Exemple de charge non linéaire monophasée -Eclairage Fluorescent Comparaison des courants harmoniques générés entre les Ballasrs magnétiques et électroniques ***[21]***



B).<u>Le deuxième groupe (Charges triphasées) comprend:</u>

- Variateurs de vitesse pour moteurs

- Redresseur (convertisseur alternatif –continu)

- Hacheur (Convertisseur continu -continu est un dispositif de l'électronique de puissance)

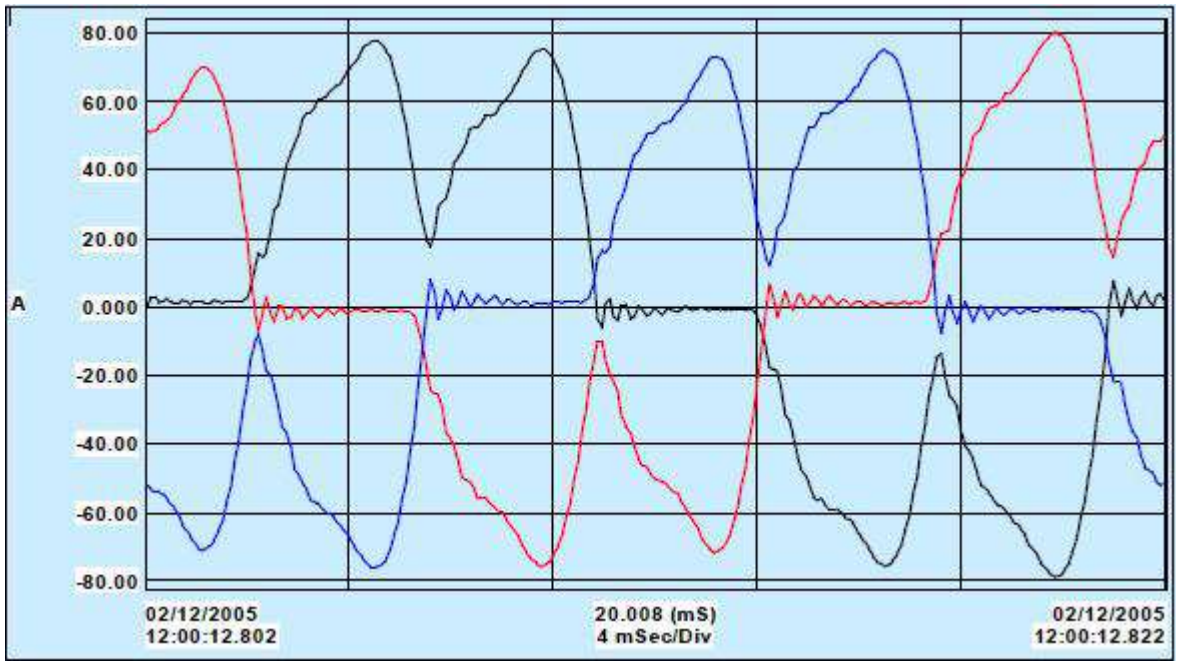
- Soudeuse

- Four à arc utilisé dans la métallurgie

- Chargeurs de batteries

- PLC, UPS

Exemple de charge non linéaire triphasée (AC VFD) Forme d'onde déformée du courant.***[21]***



II.5.2. Effets des harmoniques

De nombreux effets des harmoniques sur les installations et les équipements électriques peuvent être cités tels que les déformations des formes d'ondes entrainant des dysfonctionnements, l'augmentation des valeurs crêtes créant des claquages diélectriques ou des valeurs efficaces induisant des échauffements. Les effets de ces perturbations peuvent se classer en deux types ***[20]*** :

❖ *les effets instantanés ou à court terme :*

- dysfonctionnements des dispositifs de commande ou de régulation (détection du passage par zéro, …),
- pertes de précision dans les appareils de mesure (compteur d'énergie, instrumentation,…),
- vibrations dans les moteurs électriques alternatifs à cause des couples mécaniques pulsatoires dus aux champs tournants harmoniques,
- vibrations, bruits acoustiques dans les transformateurs ou les inductances dus aux efforts électrodynamiques proportionnels aux courants harmoniques

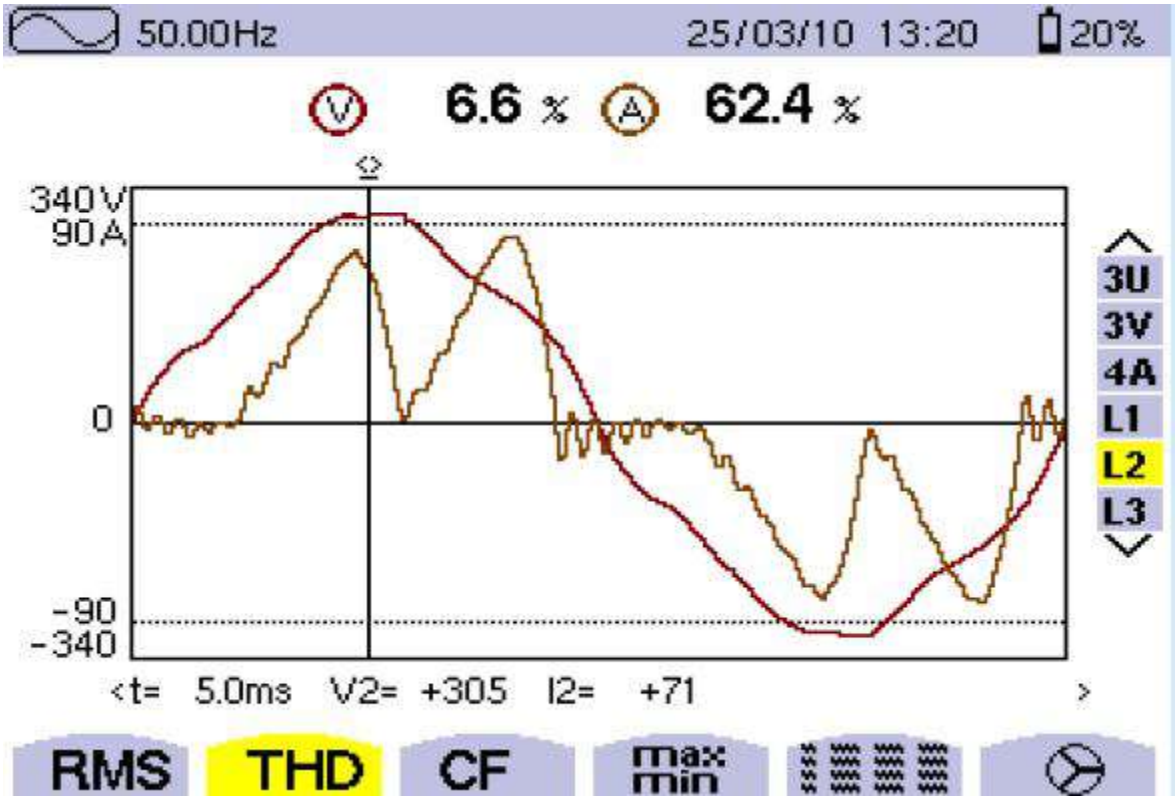
- Interférences avec les systèmes de télécommande à distance utilisés par les distributeurs d'énergie,

❖ *les effets à long terme :*

- vieillissement prématuré des moteurs électriques alternatifs du fait des pertes
- cuivre et fer supplémentaires, dû à la différence importante de la vitesse entre
- les champs tournants inducteurs harmoniques et le rotor,
- échauffements et pertes joules supplémentaires des câbles et des équipe- ment
- entrainant des déclassements du matériel avec des surdimensionnements,
- surchauffe du neutre. En effet dans un système triphasé équilibré, les tensions
- sont déphasées de 120° si bien que lorsque les charges sont égales, le courant
- résultant dans le neutre est nul. Toutefois, si les courants de phases
- s'annulent, ce n'est pas le cas des courants harmoniques. Ces courants qui sont des multiples impairs de la fréquence du courant de phase s'ajoutent dans le conducteur neutre. Ainsi le courant résultant dans le neutre représente l'addition des courants harmoniques de rang trois et multiple de trois,
- échauffements supplémentaires des condensateurs par conduction et par hystérésis dans le diélectrique qui peuvent conduire au claquage,
- risque d'excitation de résonance : Les fréquences de résonance des circuits formés par les inductances du transformateur et les câbles sont normalement élevées. Ce n'est pas le cas lorsque des batteries de condensateurs sont raccordées au réseau pour relever le facteur de puissance. Les fréquences de résonance peuvent devenir assez faibles et coïncider avec celles des harmoniques engendrés par les convertisseurs statiques. Dans ce cas, il y aura des phénomènes d'amplification d'harmoniques ***[17]*** qui peuvent entrainer des destructions.

Exemple : Forme d'ondes de la tension et du courant: Effet des harmoniques

THDV: 6,6% & THDI: 62,4% ***[21]***



2.6. Solutions pour la dépollution harmonique

Pour faire face aux problèmes de la pollution harmonique, plusieurs solutions ont été proposées et développées. Elles sont scindées principalement en deux grandes classes :

II.6.1. Filtrage passif

Le filtrage passif consiste à placer en parallèle sur le réseau une impédance de valeur très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante a la fréquence fondamentale du réseau. Parmi les dispositifs de filtrage les plus répandus, on distingue le filtre passif résonnant (figure II.3.b) et le filtre passif amorti ou passe-haut (figure II.3.a). Le filtre résonant est un filtre très sélectif. Il peut se connecter en parallèle avec d'autres filtres résonnants. Le filtre passe-haut compense les harmoniques supérieurs ou égaux à sa fréquence propre. Il peut se connecter en parallèle avec d'autres filtres résonnants.



Figure 2-3. *(a) Filtre passif résonant(b) Filtre passif amorti*

Ces dispositifs électriques sont utilises pour empêcher les courants harmoniques de se propager dans les réseaux électriques. Ils peuvent aussi être utilises pour compenser la puissance réactive.

Malgré leur large utilisation dans l'industrie, ces dispositifs peuvent présenter beaucoup d'inconvénients :

_ Manque de souplesse à s'adapter aux variations du réseau de la charge ;

_ Equipements volumineux ;

_ Problèmes de résonance avec l'impédance du réseau.

II.6.2. Filtrage actif

Les filtres actifs sont des convertisseurs d'électronique de puissance (onduleur) associes a un dispositif de contrôle adapte. Ils sont assimilables a des sources de courant ou de tension qui éliminent directement les perturbations harmoniques en injectant sur le réseau des courants ou des tensions en oppositions par rapport aux perturbations existantes ***[18].***

II.6.2.1. Filtres actif parallèle(FAP)

Le filtre actif connecte en parallèle sur le réseau, comme le montre la figure (II.4), est le plus souvent commande comme un générateur de courant. Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux a ceux absorbes par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci. Le courant cote réseau est alors sinusoïdal. Ainsi l'objectif du filtre actif parallèle (FAP) consiste à empêcher les courants perturbateurs, produits par des charges polluantes, de

circuler a travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif ***[19].***

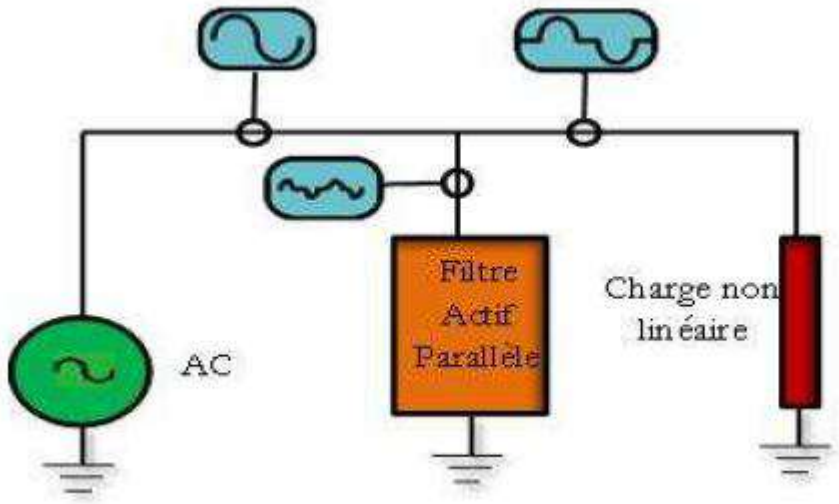


Figure 2-4. *Schéma de principe du filtrage actif parallèle*

II.6.2.2. Filtre actif série(FAS)

Le filtre actif série se comporte dans ce cas, comme le montre la figure 2.5, comme une source de tension qui s'oppose aux tensions perturbatrices venant de la source et également a celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs a travers l'impédance du réseau. Ainsi la tension aux bornes de la charge à protéger est purement sinusoïdale ***[19].***

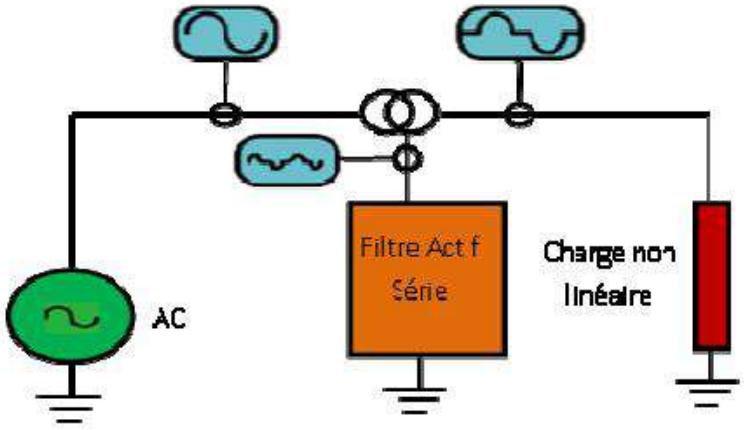


Figure II.5. *Schéma de principe du filtrage actif série*

II.6.2.3. Filtrage à structure hybride

Le filtre hybride est l'association de filtre(s) passif(s pour éliminer les harmoniques de rang d'harmonique. On distingue alors plusieurs types d'association de filtres actifs et passifs, les plus étudiées étant :

_ Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles

_ Le filtre actif série connecte en série avec des filtres passifs parallèles

_ Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle

Les figures 2.6 à 2.8 montrent la configuration de chaque un de ces types.

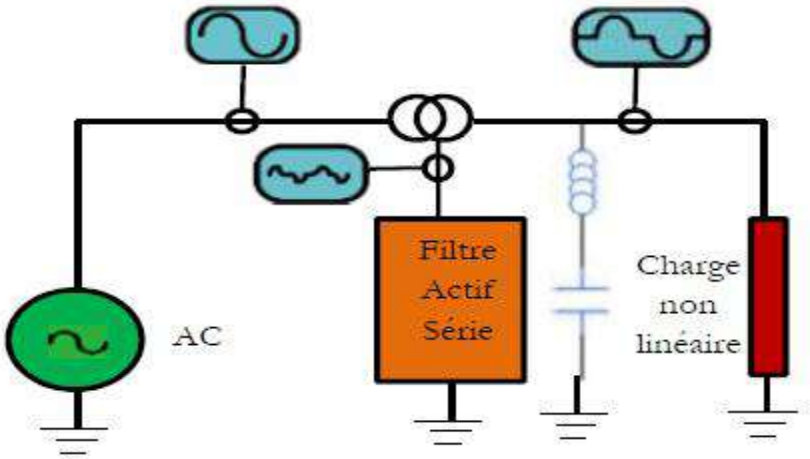


Figure. II.6. *Filtre active série et filtre passif parallèle.*

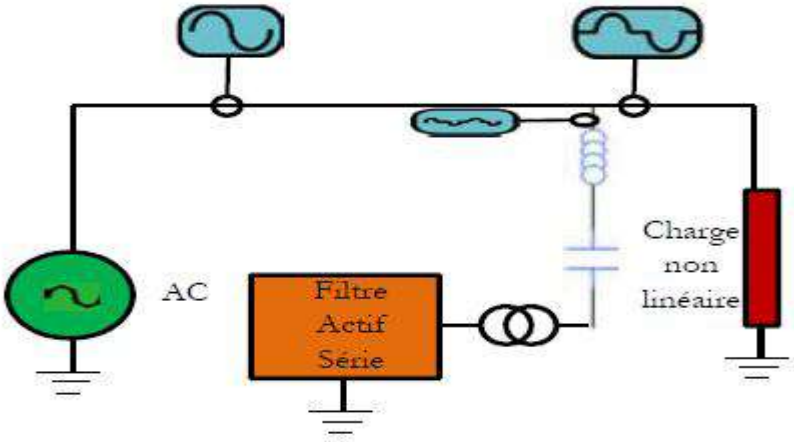


Figure II.7.*Filtre actif série connecte en série avec un filtre passif parallèle*

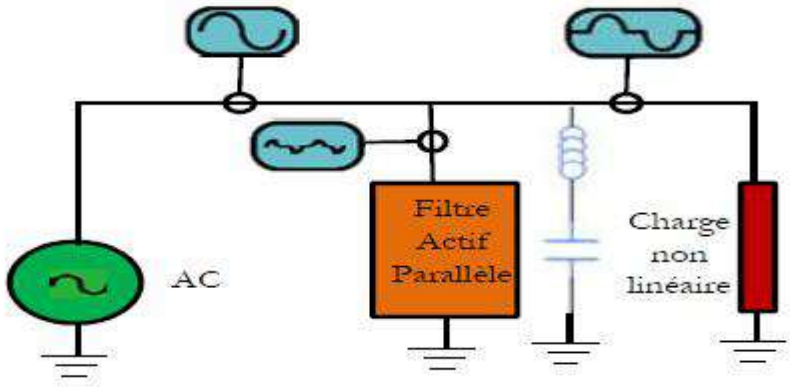


Figure II-8.*Filtre actif parallèle avec filtre passif parallèle*

II.6.2.4. Filtre universel

La combinaison parallèle-série des filtres actifs, aussi appelée, en anglais, Unifie Power Qualité Conditionner (UPQC), résulte de l'association des deux filtres actifs parallèle et série profitant des avantages des deux. L'UPQC assure la forme d'onde sinusoïdale pour le courant et de même pour la tension ***[16].***

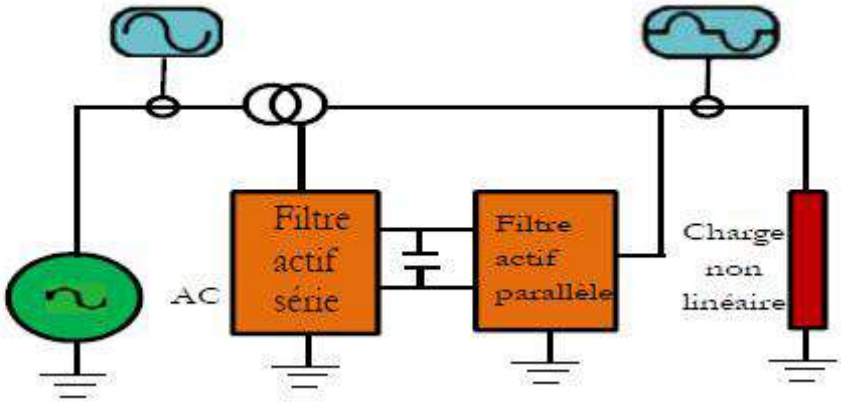


Figure II.9.*Combinaison parallèle-série des filtres actifs*

II.7. Avantage du traitement des Harmoniques

- Pour les Installations Existantes:

_ Le traitement des harmoniques au niveau des installations comportant un système de cogénération permet de libérer au niveau des transfos une puissance apparente (Capacité supplémentaire en KVA) pouvant aller à plusieurs MW que l'industriel pourra vendre à la STEG ou réduire la consommation de gaz naturel correspondante à la réduction des KVA, réalisant ainsi d'importantes économies d'énergie.

- Pour les Nouvelles Installations:

_ Le traitement des harmoniques permet également de réduire le dimensionnement des systèmes de cogénération et par conséquent, réduire le coût de l'investissement.

II.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons illustré, en premier lieu, le phénomène des harmoniques, leurs caractéristiques, leurs sources et leurs conséquences. Par conséquent, un domaine de recherche très intéressant pour les scientifiques afin d'élaborer des solutions de compensation pour cette pollution harmonique. Plusieurs solutions traditionnelles et modernes de dépollution ont été présentées. Nous avons montré que la solution classique à base de filtres passifs est souvent pénalisante en termes d'encombrements et de résonance. En revanche, la solution des filtres actifs parallèles et séries avec leurs combinaisons se présente comme la meilleure jusqu'à ce jour pour tous types de perturbations susceptibles d'apparaître dans le réseau électrique.
Ainsi, le choix de la topologie du filtre actif parallèle se présente comme la solution la plus standard pour le filtrage des courants harmoniques.

CHAPTER III

IMPACT DE L'INTÉGRATION DES ÉOLIENNES DANS LE RÉSEAU ÉLECTRIQUE

III.1. Introduction

Le développement de la production décentralisée sur les réseaux électriques a entraîné de nouveaux problèmes et contraintes, qui ont conduit à l'évolution de la réglementation sur les conditions techniques de raccordement ***[22]***. Parmi les types de productions décentralisées, l'éolien génère des problèmes spécifiques liés à son caractère aléatoire et à ses particularités technologiques. Les règles de raccordement évoluent donc en conséquence et deviennent de plus en plus sévères pour l'éolien, à cause de la part croissante qu'il occupe dans la puissance installée. C'est pourquoi apparaît un besoin de plus en plus pressant de solutions pour faciliter son intégration dans les réseaux.

Cette partie présente une brève description des principaux problèmes et contraintes rencontrés sur les réseaux liés à l'intégration de l'éolien, qu'ils lui soient spécifiques ou non ***[23]***, puis décrit les différentes solutions avec quelques exemples d'applications.

III.2. 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

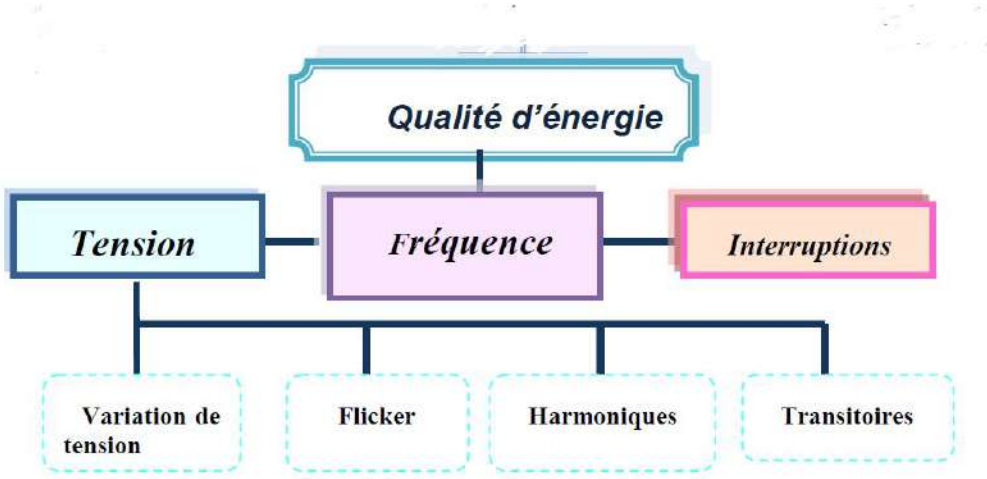


Figure III.1. *Qualité d'énergie.*

III.2 .1. Classification de différents phénomènes de qualité de Production

III.2.1.1. 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 Un ***[24]***.

Sa durée (Δt) : Peut durer de 10 ms à 3 min ***[24]***.

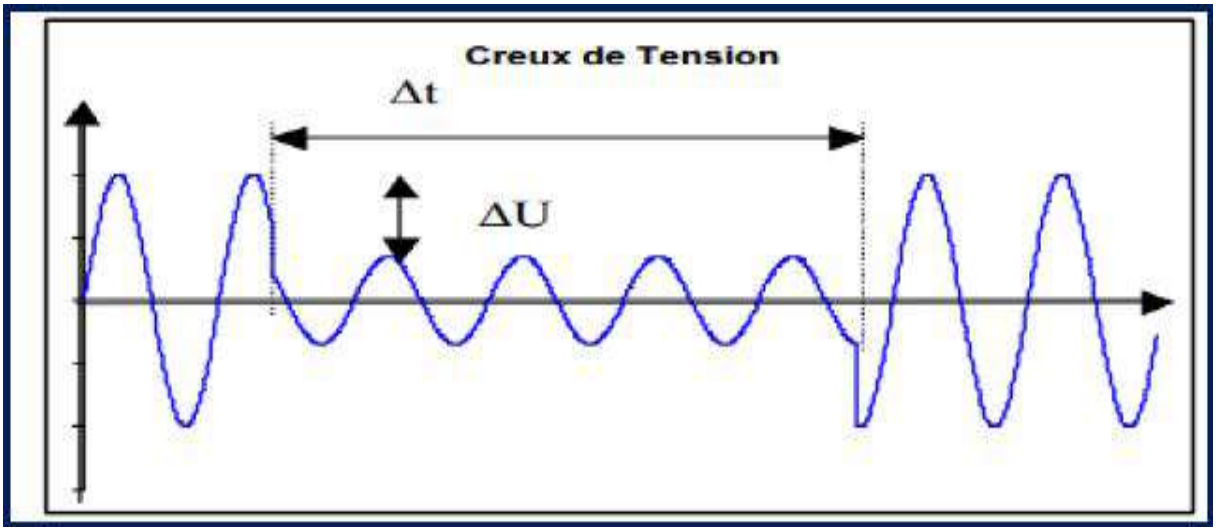


Figure III.2: *Creux de Tension.* ***[24]***

Origines :

□□Les courts-circuit affectant le réseau électrique ou les installations raccordées

□□Démarrage des moteurs de forte puissance

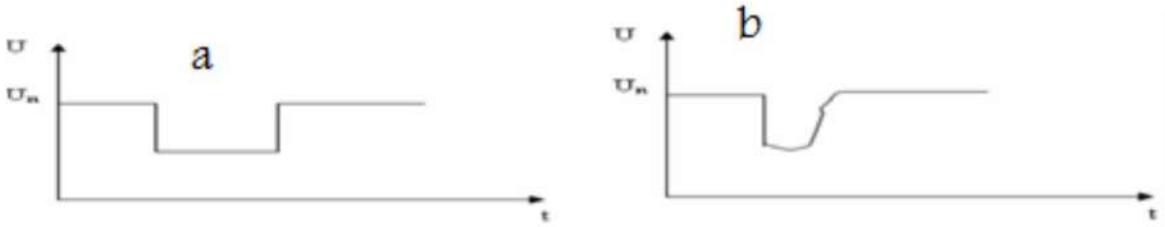


Figure III.3.*Creux de tension **[25]***

a) provoquées par un court-circuit b) provoquées par un démarrage brusque d'un moteur.

III.2.1.2. 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 ±10% de la tension nominale.

III.2.1.3. 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.

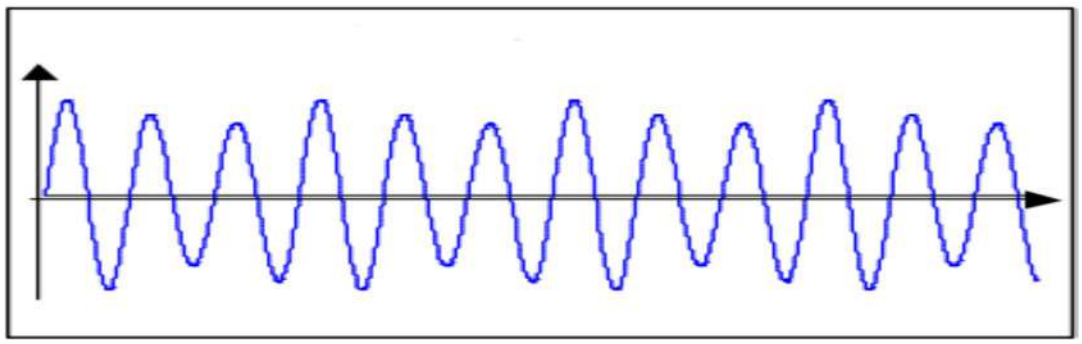


Figure III.4: *Fluctuations de Tension. **[24]***

Origines :

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

III.2.1.4. 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.

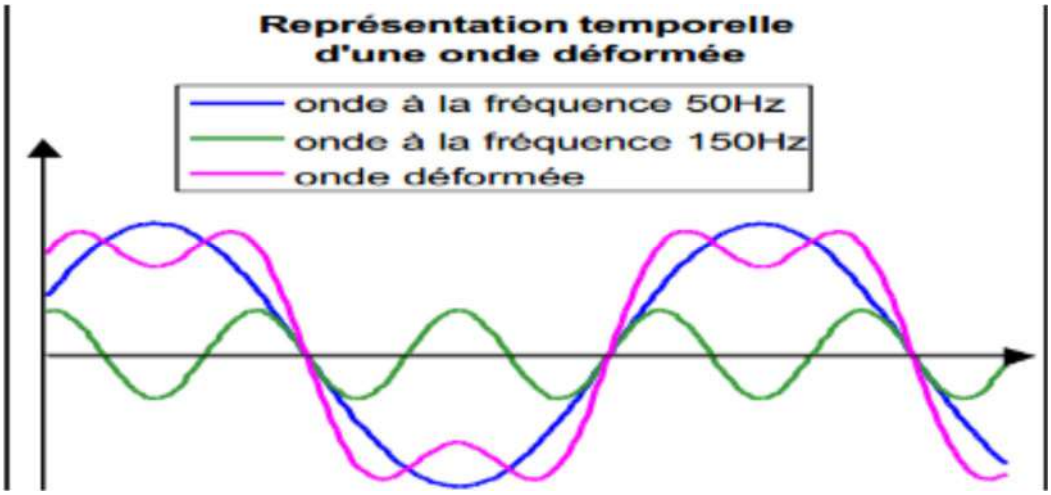


Figure III.5 : *Harmonique.* ***[24]***

III.2.1.5. 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 ±120°. Lorsque les grandeurs ne vérifient pas ces conditions de phase et d'amplitude, on parle d'un système triphasé déséquilibré.

III.2.1.6. 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.

III.3. Principaux problèmes rencontrés

III.3.1. Capacités d'accueil

- Risque de dépassement des courants maximaux admissibles et tenue thermique des ouvrages en régime permanent sur les réseaux de distribution ou de transport (congestions),
- Risque de dépassement des puissances et courants de courts-circuits maximaux admissibles et tenue en court-circuit des ouvrages de réseaux et des installations des clients,
- Non-respect des plages de tension admissibles : modification du profil de tension consécutive au raccordement, celui-ci devant demeurer en tout point dans les limites contractuelles.

III.3.2. Qualité de tension

- Fluctuations et à-coups de tension : variations « lentes » lors des fluctuations de puissance, et rapides lors des connexions ou des déconnexions Fluctuations et à-coups de tension : variations « lentes » lors des fluctuations de puissance, et rapides lors des connexions ou des déconnexions
- Flicker (papillotement) notamment dû aux fluctuations de la vitesse du vent et au passage des pales devant le mât de l'éolienne.
- Pollution harmonique qui peut être générée par l'électronique de puissance (EP).

- Perturbation des signaux de commande « TCFM » transmis sur le réseau (heures creuses, heures pleines...).

III.3.3. Interférence avec le plan de protection du réseau

- Risque de perturbation du fonctionnement des protections, par exemple au niveau de la sélectivité et de la sensibilité du plan de protection.

III.3.4. Comportement dynamique et stabilité

Les installations éoliennes ne doivent pas perturber le comportement dynamique du réseau. Notamment les fermes doivent pouvoir supporter les défauts de réseau, et en particulier rester connectées lors de creux de tension spécifiés ***[22]***. En effet un défaut sur réseau de transport pourrait s'étendre géographiquement, affecter plusieurs fermes, et créer une vague de déconnexions nuisible au bon fonctionnement du réseau.

III.3.5. Services système

- nécessité d'un contrôle de la tension et d'une compensation du réactif, pour un plan de tension optimal permettant les échanges de puissance avec une sûreté de fonctionnement accrue (stabilité statique et dynamique) et le respect des tensions contractuelles sur le réseau. Les fermes éoliennes doivent participer à ce service système.
- Contrôle de la fréquence : pour l'éolien, l'absence de participation au réglage de la fréquence et la variabilité de la source d'énergie accroissent la sollicitation des autres groupes connectés pour le réglage de la fréquence et le maintien de la sûreté du réseau, et conduisent à des difficultés de définition du programme de fonctionnement.

III.4. Problématique de la connexion au réseau

L'impact de l'éolien sur le réseau de transport est à considérer à grand échelle : exemple le réseau européenne. En effet, la concentration d'énergie éolienne dans le nord de l'Allemagne produit déjà d'importants flux discontinus de puissance sur les réseaux de transport d'Europe Centrale. Dans le futur, le réseau de transport risque de ne pas être épargné par ce phénomène.

III.4.1. Description des contraintes de raccordement

Les prescriptions techniques relatives au raccordement au réseau de transport d'une installation de production d'énergie électrique sont précisées et la législation et stricte en ce

qui concerne les contraintes de raccordement de manière générale et l'arrêté les précise en fonction du type d'installation. Sans prétendre être exhaustifs, nous allons évoquer quelques unes de ces contraintes.

III.4.1.1 Réglage de la tension

Les installations de production relèvent :

– du réseau public de transport si la puissance installée est supérieure à 12 MW ; le raccordement s'effectue alors à un niveau de tension supérieur ou égal à 63 kV (domaine de la HTB) ;

– du réseau public de distribution si la puissance installée est inférieure ou égale à 12 MW ; le raccordement s'effectue alors à un niveau de tension inférieur ou égal à 20 kV (Domaine de la HTA et de la BT).

Les contraintes techniques dépendent principalement de la puissance à raccorder, elle définit le type de réseau. Le Tableau III.1 donne les niveaux de tension de raccordement des installations en fonction de leur puissance.

Les unités de production doivent assurer un contrôle de la tension et/ou de la puissance réactive au point de livraison soit par un réglage primaire soit par un réglage secondaire : *Le* réglage primaire, qui mobilise la réserve réactive des groupes les plus proches de la perturbation, sous l'action de leur régulateur primaire de tension agissant sur l'excitatrice des groupes à partir des variations de tension observées au stator, de façon à maintenir cette tension égale à la valeur de consigne affichée. Le réglage secondaire de tension, qui mobilise les réserves réactives de l'ensemble des groupes et des condensateurs par zones électriquement homogènes du point de vue du comportement en tension.

Plus la puissance produite est importante, plus les contraintes de réglage sont importantes. Les installations raccordées aux réseaux HTB2 et HTB3 doivent pouvoir participer au réglage secondaire de la tension de leur zone, si le gestionnaire du réseau le demande.

III.4.1.2 Réglage de la Fréquence

A la différence de la tension, qui est un paramètre local (la tension est différente en tout point du réseau, elle dépend du courant qui circule dans les lignes au voisinage du point considéré), la fréquence est homogène dans tout le réseau électrique dès lors que la production et la consommation sont en équilibre.

Tableau III.1. Niveaux de tension de raccordement en fonction de leur puissance ***[26]***.

Type de réseau	*Plage de tension*	*Niveaux de tension*	*Puissance*
BT	BT monophasé	230 V	P < 18 Kva
BT	BT triphasé	400 V	P < 250 Kva
MT (HTA)	1 kV < U < 50 Kv	15 kV, 20 kV	P <12MW
HT (HTB1)	50 kV < U < 130 kV	63 kV, 90 kV	P < 50MW
HT (HTB2)	130 kV < U < 350 kV	150 kV, 225 kV	P < 250MW
HT (HTB3)	350 kV < U < 500 kV	400 kV	P > 250MW

La participation au réglage de la fréquence n'est pas exigée pour les fermes éoliennes. Il est néanmoins intéressant de noter les contraintes imposées aux autres installations :

– Les installations d'une puissance supérieure ou égale à 40 MW doivent participer au réglage primaire de fréquence ;

– Les installations d'une puissance supérieure ou égale à 120 MW doivent participer au réglage secondaire de fréquence.

Le fait de ne pas participer au réglage de fréquence limitera à terme le taux de pénétration de l'éolien. En cas de forte pénétration de l'éolien, les exigences en terme de participation au réglage de fréquence de l'éolien évolueront. Le problème étant évidemment l'existence d'une réserve primaire associé à l'éolien. Actuellement, il est déjà demandé aux éoliennes de réduire leur génération lorsque la production est supérieure à la consommation, donc lorsque la fréquence est supérieure à 50 Hz.

III.4.2 Description des problèmes induits par l'intégration d'éoliennes dans un réseau électrique.

Les problèmes induits par l'intégration d'éoliennes dans le réseau électrique sont principalement causés par :

– leur production aléatoire qui et difficilement prévisible ;

– la capacité d'accueil ;

– les déconnexions intempestives.

III.4.2.1 Production aléatoire et très peu prévisible

Le problème majeur de l'éolien est l'incertitude sur les prévisions de la vitesse du vent sur les sites éoliens induisant une incertitude sur la production des éoliennes. Les erreurs de prévisions sont en négatif (sous-production) ou en positif (surproduction) avec des changements de signe rapides en cours de journée. La prévision est satisfaisante en ce qui concerne l'amplitude mais le moment où ce niveau de production est atteint, n'est pas précis.

L'expérience allemande montre que des prévisions à 72 h sont utopiques, et que l'erreur moyenne sur des prévisions à 24 h représente 10% de la capacité installée et peut atteindre parfois 50% ***[27]***.

La multiplicité des installations éoliennes sur un vaste territoire est néanmoins favorable à une corrélation entre la consommation et la production éolienne comme le montre des études sur le foisonnement éolien. Le foisonnement éolien est le phénomène statistique qui fait que, par la multiplication spatiale des installations éoliennes sur un territoire donné, la valeur minimale de la puissance injectée par l'ensemble est supérieure à la somme des puissances minimales de chacune d'entre-elles. Ainsi, la multiplication d'éoliennes (soumises à des vitesses de vent différentes) conduit globalement à un lissage de la puissance.

III.4.2.2 Capacité d'accueil

- Risque de dépassement des courants maximaux admissibles et tenue thermique des ouvrages en régime permanent sur les réseaux de distribution ou de transport (congestions),
- Risque de dépassement des puissances et courants de courts-circuits maximaux admissibles et tenue en court-circuit des ouvrages de réseaux et des installations des clients,
- Non-respect des plages de tension admissibles : modification du profil de tension consécutive au raccordement, celui-ci devant demeurer en tout point dans les limites contractuelles.

III.4.3 Description des facteurs affectant la qualité énergétique

Le terme qualité de puissance fait référence à la stabilité de la tension ainsi qu'à la stabilité de la fréquence du réseau. L'objectif désiré étant un courant alternatif avec une forme sinusoïdale la plus idéale possible.

III.4.3.1 Fluctuation de tension

Le problème principal est le creux de tension dont l'origine est liée aux courts-circuits qui peuvent être provoqués par l'enclenchement de gros moteurs, d'appels de charges importantes, etc. Dans une moindre mesure, il y a des variations rapides de tension, provoquées par des variations rapides de puissance absorbées ou produites par des installations telles que les éoliennes. Ces fluctuations peuvent provoquer un papillotement de l'éclairage gênant désigné par le terme flicker (ou papillotement). Les autres applications de l'électricité ne sont, normalement, pas affectées par ces phénomènes tant que la variation d'amplitude reste inférieure à 10%.

La chute de tension aux bornes de la ligne de connexion d'une éolienne au réseau peut être approximée par la relation suivante (Fig. III.3) ***[28]*** :

$$\nabla V = RP + XQ/V_{th} \quad \text{(III.1)}$$

Où P et Q sont les puissances actives et réactives transitant par la ligne de résistance R et de réactance X.

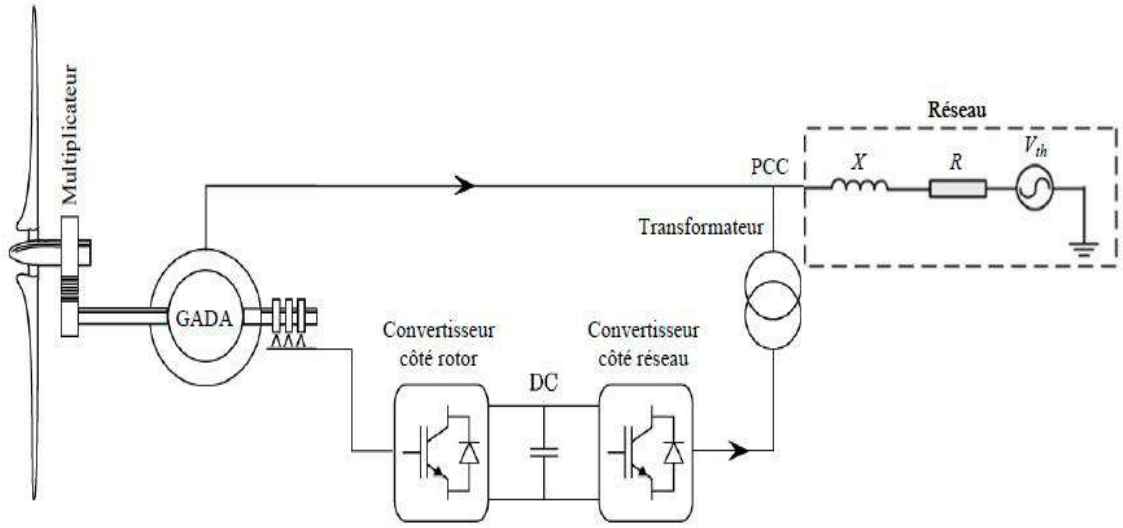


Fig. III.6. *Schéma d'une éolienne connectée au réseau.*

Dans le cas des lignes THT, $X > 10R$, (26) peut se réduire à :

$$\Delta V = XQ/V_{th} \quad \text{(III.2)}$$

En effet, la nuit, en régime de faible consommation, les lignes électriques très peu chargées génèrent énormément de réactif que les groupes de production se doivent d'*absorber*. Mais de

manière générale, le facteur de puissance EDF autrement valant 0.93, on aura $Q = 0.4P$. De plus, pour les lignes à haute tension, les valeurs des résistances linéiques sont comprises entre 0.012 Ω/km (800 kV) à 0.031 Ω/km (362 kV). Les inductances vont de 1 à 2 mH/km pour les lignes aériennes, soit des réactances comprises entre 0.3 et 0.7 Ω/km, donc nettement supérieures aux résistances linéiques. L'hypothèse est donc réaliste en négligeant les effets capacitifs en sous-charge.

La puissance active générée par les éoliennes étant fluctuante, elle induit donc des fluctuations de la tension dans la zone du réseau proche du point de connexion de ces éoliennes. Dans le réseau de transport, les transits de puissance réactive provoquent des variations de tension. Les éoliennes actuellement connectées au réseau de transport doivent donc participer au réglage de la tension via un réglage de la puissance réactive ***[26]***.

III.4.3.2. Harmoniques et inter-harmoniques

Les éoliennes, interfacées au réseau via des convertisseurs électroniques de puissance, génèrent malheureusement des harmoniques. Les convertisseurs équipés en grande majorité de transistors IGBT, génèrent des harmoniques hautes fréquences (plusieurs kHz) mais, ces harmoniques peuvent être assez aisément limités contrairement aux convertisseurs équipés de thyristors générant des harmoniques de basse fréquence et nécessitant des filtres conséquents pour les éliminer.

III.5. Architectures pour améliorer la qualité de L'énergie

III.5.1. Le stockage et les fluctuations de production

Au vu des éléments présentés dans le paragraphe précédent, il est important que les centrales électriques puissent réguler leur production. Dans le cas des éoliennes nous pouvons réduire facilement la puissance captée du vent en utilisant la commande de la génératrice (en régulant la puissance avec la commande du), en orientant les pales ou en utilisant d'autres méthodes qui seront vues dans.

Cependant, produire à un instant donné plus d'énergie que l'énergie captable du vent à cet instant est impossible si ce n'est en utilisant l'inertie mais, son action est très limité. L'utilisation d'un système de stockage améliorerait de manière significative les capacités d'intégrations des éoliennes dans le réseau. Un système permettant d'emmagasiner une grande

quantité d'énergie tout en ayant une dynamique de réponse rapide qui permettrait de lisser toutes les variations instantanées de puissance et ainsi d'améliorer la qualité de l'énergie produite par les éoliennes.

Ce paragraphe va donc brièvement lister les différents procédés de stockage pour l'éolien et les conversions qu'ils effectuent ***[29]***.

III.5.1.1. Description des différents types de stockage

Les moyens de stockage court terme, possédant un temps de réponse court, sont :

– Les supercondensateurs fonctionnant à partir d'un bus de tension continue avec un hacheur et une connexion au réseau par le biais d'un redresseur/onduleur ***[30]***.

– Les batteries alimentées à partir d'un bus de tension continue avec un hacheur et une connexion au réseau à l'aide d'un redresseur/onduleur.

– De l'air comprimé fonctionnant avec une machine à courant continu pilotée par un hacheur alimenté par un bus de tension continue et une connexion au réseau à l'aide d'un redresseur/onduleur.

– Les piles à combustible avec redresseur/onduleur pour la connexion au réseau et fonctionnement à l'aide un hacheur.

Nous voyons que tous ces dispositifs peuvent être assez facilement connectés aux éoliennes au niveau du bus continu comme le montre la Fig. III.8.

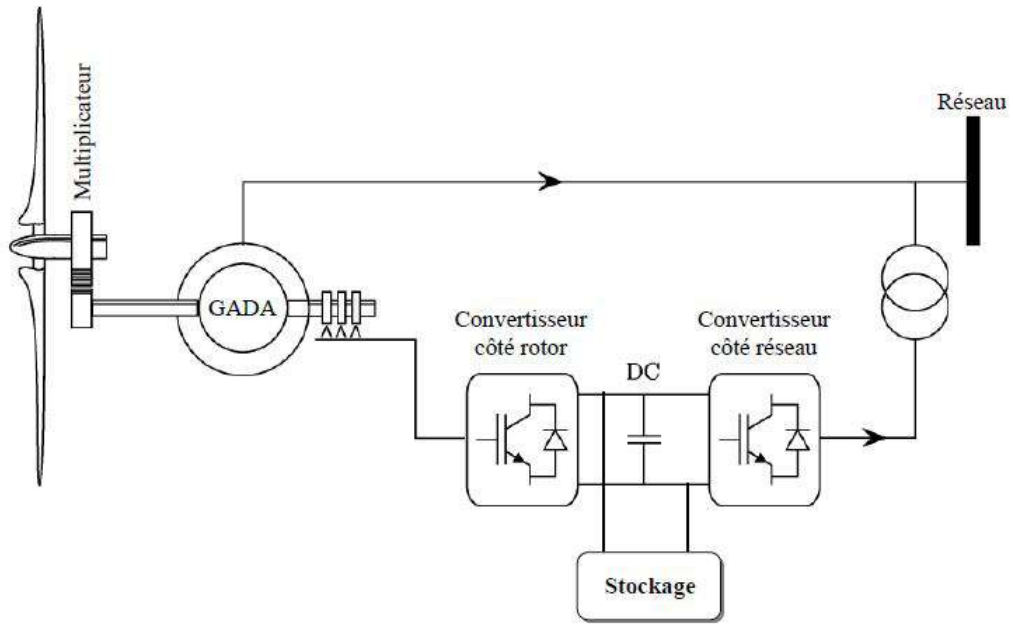


Fig. III.7. *Insertion d'un système de stockage dans une éolienne.*

III.5.1.2. Le stockage inertiel (court terme)

Le phénomène de flicker limite le taux de pénétration de l'énergie éolienne dans les réseaux de distribution. L'utilisation d'un système du stockage inertiel permet d'atténuer ce phénomène en stockant de l'énergie lorsque la vitesse du vent augmente et en la restituant au réseau lors d'une diminution de la vitesse du vent. Le système de stockage inertiel est souvent présenté comme une solution car sa constante de temps est faible et qu'il a un meilleur rendement pour les sollicitations rapides. Les rendements de ces systèmes peuvent atteindre 92%.

III.5.1.3 Modélisation des unités de stockage long terme

Ces sources possèdent trois paramètres importants pour leur exploitation : la valeur de l'énergie et de la puissance qu'elles sont capables de fournir ou emmagasiner ainsi que leur temps de réponse ***[29]***. On modélise ainsi ces dispositifs comme des sources de tension Continue contrôlées en puissance avec des limites sur l'énergie stockée.

Pour la gestion de l'énergie, on fixe un seuil minimal pour ne pas endommager les éléments propre à l'unité de stockage (en particulier pour les batteries) et un seuil maximal Correspondant à la taille de l'unité.

La puissance à stocker est la différence entre la puissance extraite du vent et la puissance fournie au réseau.

$$P_{stock} = P_{ext} - P_{réseau} \quad \text{(III.3)}$$

Il est utile que le stockage soit capable de fournir la puissance au réseau lorsque le vent est nul. Pour fournir une puissance de 750 kW au réseau, on pourrait choisir une génératrice de 1.5 MW car il faut prévoir 750 kW pour recharger le stockage.

Il faut maintenant déterminer la capacité énergétique de l'unité de stockage. Celle-ci peut être définie comme suit ***[29]*** :

$$Capacité = \omega_{stock\text{-}max} _ \omega_{stock\text{-}max} \quad (III.4)$$

Où:

$$\omega_{Stock} = \int p_{stock}\, dt \text{ avec } p_{stock} = p_{ext} - 750 \quad (III.5)$$

Et P_{stock} est la puissance qui correspond au stockage pendant un jour.

Bien qu'elle soit intéressante, cette méthode de dimensionnement ne semble pas tout à fait exacte à cause des fluctuations importantes d'un jour sur l'autre. L'élaboration de la capacité de stockage sur un an serait bien évidement plus intéressante. Pour ce faire, on aurait intérêt à définir le coefficient d'autonomie *R* du système calculé à partir du rapport du nombre total de jours déficitaires (*NJD*) au nombre total de jours de fonctionnement (*NJT*) ***[31]***.

$$R = 1 - \frac{NJD}{NJT} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (3.6)$$

Considérons qu'une journée est déficitaire si à un instant donné nous n'avons pas réussi à fournir les 750 kW demandés. En se basant sur le Tableau III.2 (obtenu grâce à ***[27]***) sur une période d'un an et pour *NJT* = 365 jours, et en choisissant une capacité de stockage de 3 MWh ; il est bien évident que l'on ne pourra pas assurer une production constante pendant les 80 jours en déficit et pendant les 4 jours où la capacité de stockage n'est pas adaptée.

En comparant le coût du stockage aux bénéfices que cela va engendrer, on aboutit à la principale conclusion que les éléments de stockage à long terme (les batteries entre autres) ne permettront jamais à une éolienne de devenir une unité de production électrique à la demande. Leur utilisation permettrait de lisser la production mais le stockage ne sera probablement pas rentable **[30]**.

Tableau III.2. Besoins en capacité de stockage.

Nombre de Jours	Besoin en Capacité de Stockage
80	Production inférieure en moyenne à 750 kWh
130	750 kWh
75	1.5 MWh
60	2 MWh
10	2.5 MWh
6	3 MWH
4	4 MWh

III.5.2 Filtrage limitant les harmoniques

III.5.2.1 Problématique des harmoniques

Les équipements électriques affectés par les harmoniques peuvent être classés en deux principales catégories :

– Les équipements sensibles aux harmoniques : entraînant des échauffements supplémentaires et nécessitant un surdimensionnement ;

– Les appareils se synchronisant avec le réseau ou utilisant la tension réseau comme référence. En effet, les courants harmoniques génèrent des chutes de tension dans les conducteurs.

Au vu des ces informations, la nécessité de limiter la propagation des courants harmoniques est évidente.

III.5.2.2 Méthodes de compensation des harmoniques

Il existe 4 solutions pour diminuer la pollution harmonique présente sur le réseau.

– Il a été démontré que la perturbation harmonique globale croit lorsque la puissance du court-circuit diminue. La solution serait donc de réduire l'impédance du court-circuit, ce qui n'est pas toujours envisageable pour des raisons de coût.

– La modification du convertisseur polluant en changeant sa structure ou du moins sa commande.

– L'utilisation de filtres passifs de type LC connecté en parallèle avec la charge empêche la propagation des harmoniques. Cependant, malgré sa simplicité et son faible coût, ils essentiellement des caractéristiques du réseau. Cette technique nécessite de connaître le rang de chaque harmonique et demande de réaliser un filtre pour chaque harmonique que l'on veut diminuer. En fait, ces filtres ne sont pas adaptatifs et sont peu efficaces quand les harmoniques sont variables. Sans oublier, que ces filtres connaissent des problèmes de vieillissement qui entraînent un décalage de la fréquence réduisant leur efficacité.

_ La dernière solution consiste à mettre en œuvre un filtrage actif. Ces filtres s'adaptent en permanence aux courants harmoniques présents sur le réseau et permettent une compensation de tous les harmoniques. Ces filtres actifs se déclinent en différentes structures. Il existe une grande variété de commandes selon les courants (filtre parallèle) ou les tensions (filtre série) que l'on veut corriger.

III.5.3 Creux de tension

III.5.3.1 Reprise au vol

Le terme reprise au vol (ou fault ride through en anglais) désigne le fait de pouvoir recommencer à produire, tout de suite après le défaut, à condition que certaines grandeurs électriques ou mécaniques soient contrôlées de manière fine pendant le défaut.

Si la reprise au vol n'est pas assurée, une procédure d'arrêt d'urgence doit être enclenchée, puis une procédure de démarrage et enfin une procédure de couplage au réseau, ce qui occasionne une interruption de plusieurs minutes. C'est contraignant pour l'opérateur de réseau qui doit gérer un défaut sur le réseau mais aussi une interruption de production de puissance d'origine éolienne. C'est aussi gênant pour le producteur qui doit arrêter puis remettre en marche son éolienne (fatigue mécanique des composants). Il faut enfin signaler que la reprise au vol permettrait aux générateurs éoliens de participer au courant de court-circuit.

III.5.3.2 Solutions possibles

La possibilité de reprise au vol exige de pouvoir gérer l'excès de puissance pendant le défaut. Trois types d'action peuvent être proposés pour y parvenir : limiter la puissance entrante, stocker l'excédent de puissance ou dissiper cet excédent de puissance.

A). Limiter la puissance

Modifier l'angle de calage permet de freiner la turbine et limiter ainsi son accélération. Dans pratiquement toutes les structures, il y a cette possibilité de réduire la puissance captée par la turbine par une action rapide sur l'angle de calage des pales.

B).Stocker l'excédent de puissance entrante

Le stockage inertiel est effectué naturellement par l'accélération de la turbine lors de l'apparition du défaut. Nous avons vu précédemment que, au niveau du bus continu, nous pouvions insérer un moyen de stockage.

C).Dissiper l'excédent de puissance entrante

Cette stratégie consiste à rajouter au niveau du bus continu une résistance de dissipation pilotée par un interrupteur commandable. Cette résistance correctement dimensionnée peut

aussi servir de résistance de freinage en fonctionnement normal lors de l'arrêt de l'éolienne. Il s'agit du *freinage rhéostatique*, également utilisé dans la traction électrique.

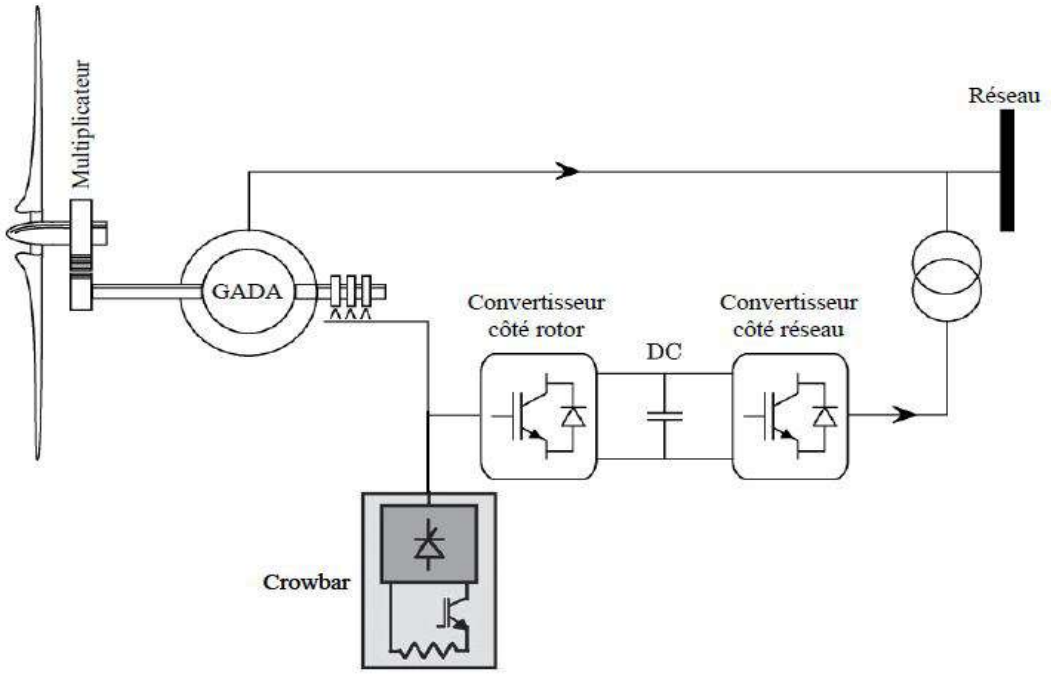


Fig. 3.8. *Eolienne équipée d'un crowbar actif.*

III.5.3.3 Défauts asymétriques de la tension du réseau

Durant les petits défauts, l'objectif reste le maintient des performances optimales de L'éolienne (bonne poursuite de la consigne de couple et donc meilleures performances énergétiques). Il s'agit maintenant d'évaluer le degré de tolérance de la commande proposée durant des défauts asymétriques de la tension du réseau.

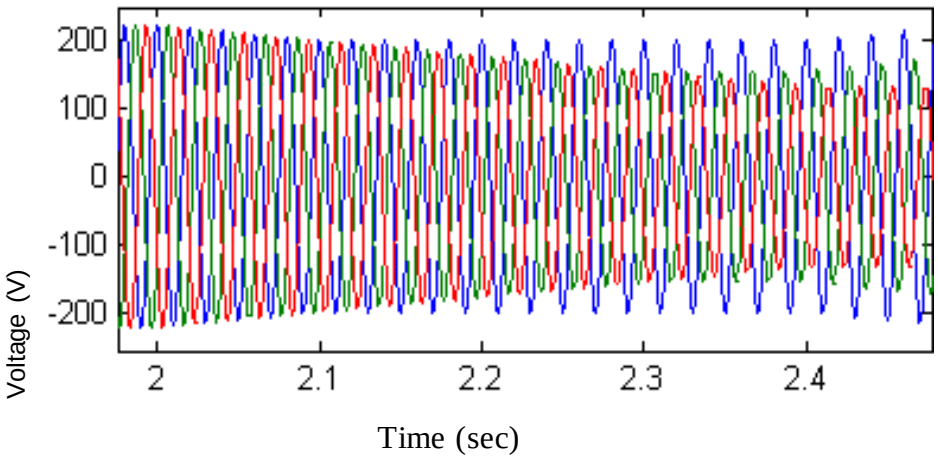


Fig.III.9. *Tensions côté réseau.*

III.6. Conclusion

Nous avons présenté les problèmes liées à la connexion des éoliennes au réseau ensuite la description des contraintes de raccordement suivi par différentes solutions techniques pour résoudre les problèmes principaux concernant l'intégration.

Ces techniques sont basées sur :

- L'accroissement et une meilleure utilisation des capacités constructives des éoliennes (à travers l'amélioration des performances des différentes technologies de génératrices) ainsi que de leurs systèmes de couplage au réseau ;
- La coordination des fermes éoliennes et de leur environnement réseau (effacement, coordination avec d'autres moyens de production ou avec des charges contrôlables);
- Des systèmes de compensation du réactif et de contrôle de la tension ;
- Des solutions pour accroître la capacité des éoliennes à tenir les creux de tension et éviter leur déconnexion,
- des systèmes de stockage d'énergie ;
- une limitation du courant de court-circuit.

A cause des enjeux commerciaux importants (liés aux mécanismes de promotion de l'éolien), les solutions pour une meilleure intégration des éoliennes dans les réseaux évoluent très rapidement. Elles impliquent des aspects hautement confidentiels par suite de la compétition intense que se livrent les constructeurs d'éoliennes et les manufacturiers d'équipements électrotechniques.

CHAPTER IV

MODELISATION D'UN CABLE RELIANT UNE EOLIENNE A UN RESEAU ELECTRIQUE

IV.1. Introduction :

Une approche est utilisée pour la modélisation du câble, afin de prédire le nombre convenable de cellules aux fréquences harmoniques et inter- harmoniques tout en assurant fidélité et bonne précision.

L'avantage est qu'on s'appuie sur les seules données caractéristiques de la ligne. Cette approche est basée sur la technique des réseaux neuronaux artificiels RNA qui trouve ses origines dans certaines propriétés des neurones biologiques **[31].**

La première partie de ce chapitre est consacrée à la présentation des câbles et des lignes de transports d'énergie électrique ainsi que les différents modèles utilisés dans la simulation.
Une application sur un câble sous marin reliant un réseau électrique à une éolienne généralement source d'harmoniques suivi par la modélisation du câble aux fréquences harmoniques.

En deuxième partie, une analyse fréquentielle détaillée d'un parc éolien offshore raccordé au réseau électrique par un câble sous-marin AC. Il est bien connu que, en raison du caractère capacitif des câbles sous-marins AC, il est très fréquent de rencontrer des problèmes de résonance.

Dans cette optique, l'ensemble du système est analysé dans le domaine fréquentielle, décrivant comment les facteurs tels que les paramètres du câble, et la compensation réactive statique, etc. ... affectent l'amplitude et l'emplacement des résonances du système. Après cela, une solution est proposée pour atténuer les effets négatifs de ces résonances, basée sur le filtrage.

IV.2. Généralité sur les câbles sous- marine

L'objectif de cette étude est d'estimer la fréquence de résonance principale d'une manière simple et précise, alternativement à la méthode décrite dans la première partie de cette application. Ainsi, cette application nous permet de valider notre étude ayant pour but de prédire, à des fréquences d'intérêts, le modèle exact du câble défini par le nombre de cellules en cascade et leurs paramètres **[32]**. Cette tâche permet de représenter la première fréquence de résonance du système de transmission, qui est la principale caractéristique de cette réponse.

L'interaction entre les installations composant les fermes éoliennes offshores et le réseau électrique peuvent provoquer des amplifications harmoniques.

Cet aspect n'est pas négligeable, car en tant que résultat de cette amplification, le niveau des harmoniques dans le point de couplage commun du parc éolien peut être inacceptable vis-à-avis des exigences normalisées relatives aux réseaux électriques.

IV.2.1. Caractérisation du câble sous-marin

La fonction du câble sous-marin et de transporter de l'énergie électrique en toute sécurité du parc éolien au réseau électrique. Afin d'assurer convenablement cette fonction, le câble est constitué de conducteurs, d'une isolation, d'un écran et d'une armature ou gaine, (voir figure IV.1).

IV.2.1.1. Conducteurs

Le conducteur est l'élément principal du câble qui transporte le courant électrique. Le câble électrique peut être réalisé par un seul conducteur (câble monophasé), trois conducteurs (câbles triphasés), ou quatre, etc…

IV.2.2.2. Isolation

Couche de matériau diélectrique, sont rôle est d'assurer l'isolation entre les conducteurs des différentes phases ou entre phases et terre.

IV.2.2.3. Ecran

Revêtement métallique, qui couvre toute la longueur du câble. Il est utilisé pour confiner le champ électrique à l'intérieur du câble.

IV.2.2.4. Armature ou gaine

Couche de matériau lourd utilisé pour protéger les composants du câble de l'environnement extérieur.

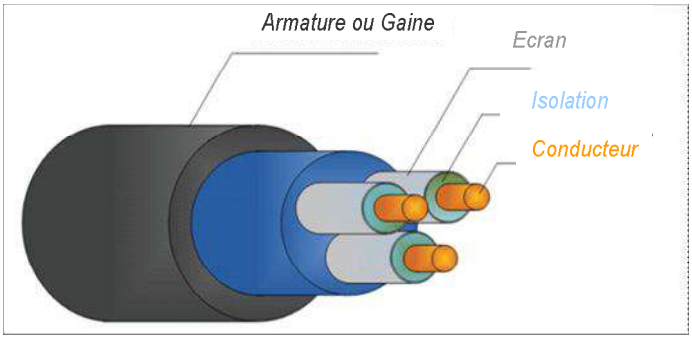


Figure IV.1 : *Représentation générique d'un câble électrique*

Le comportement du câble de transport d'énergie électrique peut être représenté par plusieurs phénomènes électromagnétiques.

De nombreux auteurs **[33]** ont convenu que le câble sous- marin peut être représenté électriquement par une section différentielle de la longueur avec un circuit à paramètres *RLCG* distribués.

Dans les circuits *DC*, la densité de courant est similaire dans toute la section du conducteur, mais en circuits *AC*, la densité du courant est supérieure près de la surface extérieure du conducteur. Cet effet est connu sous le nom de l'effet de peau. En raison de ce phénomène, la résistance *AC* du conducteur est supérieure à la résistance *DC*. Près du centre du conducteur il ya plus de lignes de force magnétique que près de la périphérie. Cela entraîne une augmentation de l'inductance vers le centre et le courant tend à migrer vers la surface extérieure. En bref, l'effet de peau provoque une variation des paramètres du câble, en raison de la distribution non- uniforme du courant à travers la section transversale du câble.

Cette variation est fonction de la fréquence, par conséquent les paramètres *RGLC* dépendent également de cette fréquence. Si cet effet est pris en compte, la représentation électrique du câble pour chaque section différentielle de la longueur est illustrée par la figure IV.2.

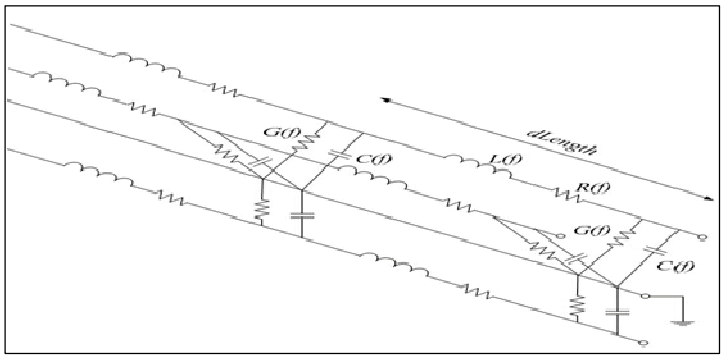


Figure IV.2 : *Représentation d'une section différentielle du câble et ses paramètres RGLC dépendant de la fréquence.*

IV.2.3. Modélisation du câble sous-marin

En se basant sur la représentation électrique des câbles et selon les exigences du modèle de câble, il est possible d'effectuer des simplifications afin de maintenir la précision du modèle et de réduire sa complexité. Ainsi, il existe plusieurs démarches pour la modélisation d'un câble. Ces modèles peuvent être classés comme suit **[34]** :

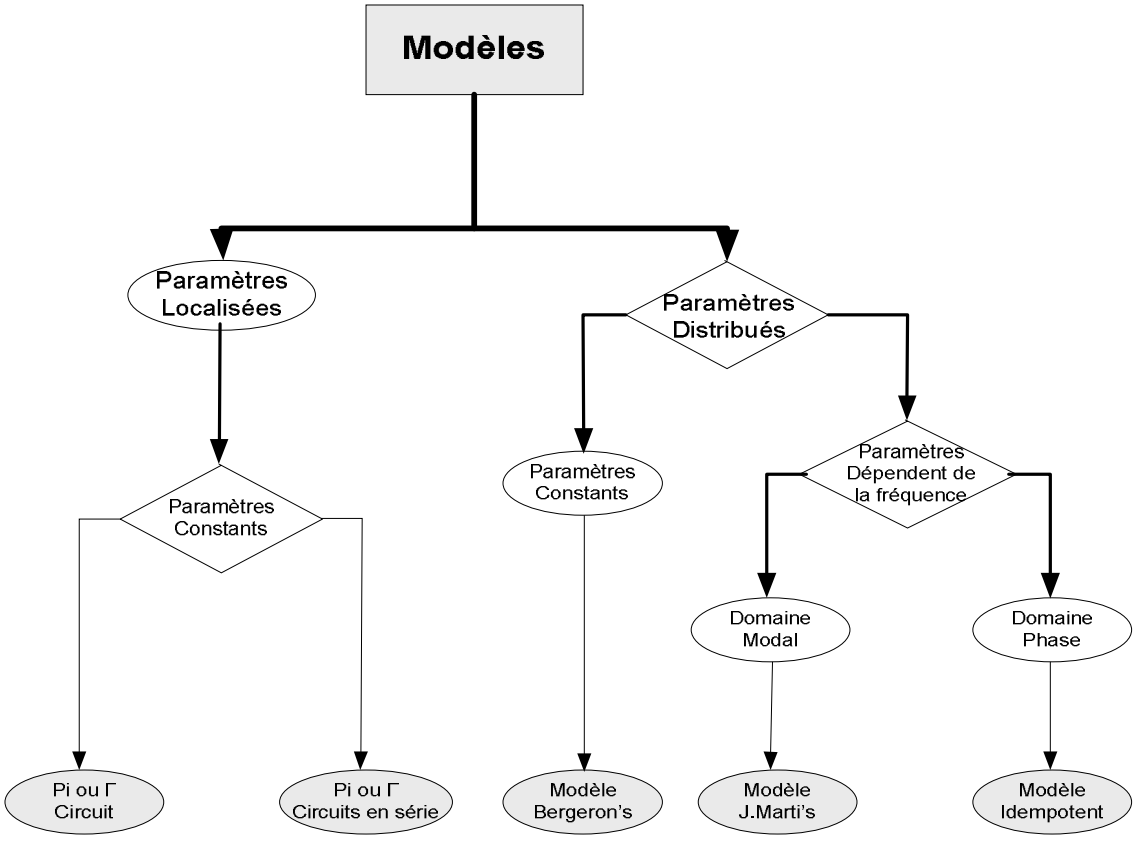


Figure IV.3 : *Classification des différents modèles de câbles.*

IV.2.3.1. Modèle dépendant de la fréquence (modèle idempotent)

Le modèle choisi dans ce cas pour effectuer l'analyse de la réponse fréquentielle de l'offshore du parc éolien, est le modèle de la ligne avec dépendance des paramètres de la fréquence sous PSCAD. Le choix de ce modèle, le plus complexe mais assez précis, est motivé par le fait qu'il doit représenter le câble dans une large gamme de fréquences.

IV.2.3.2. Adaptation des paramètres du câble sous PSCAD

A partir des caractéristiques physiques d'un câble spécifique, PSCAD calcule les impédances équivalentes (paramètres RLGC)

IV.2.3.2.1. Conducteur

Pour un conducteur de diamètre de 43.5mm et une section efficace de 1200mm^2. Si le conducteur est considéré comme un noyau plein, homogène et circulaire (cas du modèle sous PSCAD), la section pour ce diamètre (équation (IV.1) n'est pas la même.

$$\boldsymbol{A = \pi . r^2 = \pi . (21,75)^2 = 1486,17\ mm^2} \quad \textit{(IV.1)}$$

Par conséquent, pour corriger l'écart entre A (calculée) et A(PSCAD), il est nécessaire de revoir la résistivité du conducteur ρ. À cette fin, la première étape est de calculer (équations ((IV.2) et (IV.3)) la vraie valeur de la résistivité du conducteur (données du fabricant).

$$\boldsymbol{R_{DC} = \frac{\rho_c . l}{A_C} = 0.0151\ \Omega/km} \quad \textit{(IV.2)}$$

$$\boldsymbol{\rho_C = \frac{R_{DC} . A_C}{l} = 1.812 . 10^{-8} \Omega} \quad \textit{(IV.3)}$$

Où:

$\boldsymbol{\rho_c}$: la résistivité, l : la longueur du câble et A_c : la section efficace du conducteur (1200mm^2)

En deuxième étape, afin de maintenir la même résistance absolue du conducteur, [89], cette résistivité est modifiée (équation (IV.4)) à partir du rayon du conducteur (donné par le fabricant) et en fonction de la section efficace et la section transversale réelle.

$$\rho_c' = \rho_c \frac{\pi.r^2}{A_c} = 2.24412.10^{-8}\Omega$$

…….. (IV.4)

Pour vérifier cette estimation, la résistance absolue du conducteur à 50 Hz est calculée à partir de l'équation (IV.5). Cette équation permet de réaliser pratiquement les mêmes résultats en comparaison avec les caractéristiques du fabricant.

$$R_{a.c}(50) = \frac{\rho_c}{\delta_{50}}.\frac{l}{\pi(D-\delta_{50})} = 0,0204\ \Omega/km$$

…… (IV.5)

$$\delta_{50} = \sqrt{\frac{2.\rho_c}{\omega.\mu}} = 0,010662mm$$

……. (IV.6)

l : la longueur du câble ; *D* : diamètre du conducteur ; ρ_c : résistivité, ω : pulsation du courant (2πf) ; μ : perméabilité magnétique absolue du conducteur (μ_r .μ_0); μ_0 : constante magnétique ou la perméabilité de l'espace libre ($4\pi \times 10^{-7}$. N/A_2) et μ_r : perméabilité magnétique relative.

IV.2.3.2.2. Bouclier

Afin de maintenir le bouclier à une section de 30mm^2 et à la même capacité, les paramètres du bouclier qui doivent être modifiés sont le diamètre de l'isolant et sa perméabilité relative. En supposant que le diamètre extérieur de la couche du bouclier du conducteur est de 88.5mm, il est possible d'obtenir le diamètre intérieur à partir des équations ((IV.7)) et ((IV.8)).

$$A_s = R_s^2 - r_s^2$$

…….. *(IV.7)*

$$30mm^2 = (44,25)^2 - r_s^2$$

$$r_s = \sqrt{(44,25)^2 - 30} = 43,9\ mm$$

…… (IV.8)

IV.2.3.2.3. Isolation

Pour corriger la zone de l'écran, le rayon de l'isolation est modifié. En conséquence, la valeur de la composante capacitive utilisant le rayon calculé dans l'équation ((IV.8)) est légèrement

différente en comparaison avec la caractéristique fournie par les constructeurs. Par conséquent, pour représenter correctement le câble sous-marin, le constant diélectrique est corrigé par PSCAD. L'écart et la capacité corrigée sont donnés par les équations ((IV.9)) et ((IV.10)).

$$\varepsilon_r = 0,233.17,97.\ln\left(\frac{43,9}{21,75}\right) = 2,94 \quad \text{..... (IV.9)}$$

$$C = \frac{\varepsilon_r}{17,97.\ln\left(\frac{b}{a}\right)} = \frac{2,94}{17,97.\ln\left(\frac{43,9}{21,75}\right)} = 0,233\ \mu F/km$$

..... (IV.10)

Les résultats obtenus (Tableau IV.2), permettent de constater que les paramètres électriques calculés par PSCAD sont sensiblement similaires aux paramètres donnés par le fabricant.

Tableau IV.1 : Paramètres du câble calculés par PSCAD en fonction des dimensions et des caractéristiques.

Paramètre électrique (50Hz) Capacité C	Résistivité R	Inductance L
0.233µF/km	0,0311 Ω / km	0.334mH/km
* Résistivité du conducteur sans prendre en compte le bouclier : 0.0190 Ohm/km		

IV.2.4. Réponse fréquentielle du système: simulation par PSCAD

Le système de transmission est la partie de l'éolien offshore qui rend possible la transmission de l'énergie du point collecteur (offshore) au point de couplage commun (on shore). En d'autres termes, on a transfert d'énergie de la ferme éolienne au réseau principal.

Le système de transmission est constitué par le transformateur élévateur de tension, le câble sous-marin, les éléments réactifs de compensation de puissance (si nécessaire), et les dispositifs pour intégrer l'énergie dans le réseau principal.

La connaissance de la réponse fréquentielle du système de transmission et de l'influence de chaque composant sur cette réponse en fréquence peut aider à éviter les résonances indésirables et les harmoniques. Dans ce but, la mise en forme du système de transmission (transformateur, câble et réseau) est représentée sur la figure IV.4. Pour améliorer la transmission il existe

d’autres éléments accessoires pour effectuer le transport d'énergie sans les dispositifs de soutien.

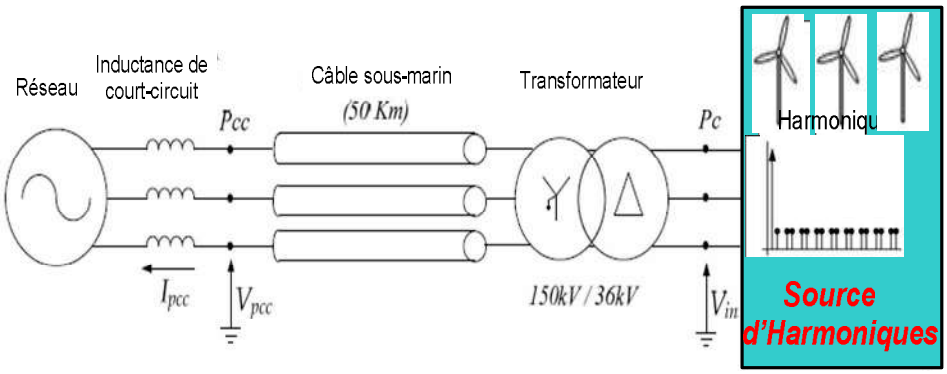


Figure IV.4. *Synoptique de simulation du système de transmission:*

Pour calculer l'impédance du système de transmission en fonction de la fréquence, une source de tension harmonique est utilisée. Le train harmonique de tension d'entrée (V_{in}), est constitué par des composantes sinusoïdales dans la gamme de fréquences: 50-5000Hz.

L’amplitude de ces tensions harmoniques est de 10% de la fréquence fondamentale (50Hz-150kV). A partir de 50 Hz, le train des harmoniques de tension a des composantes séparées l'une de l’autre de 10Hz, comme illustré par la Fig .IV.4. Ces harmoniques à l’entrée du système peuvent représenter d'une manière simplifiée l'effet des harmoniques générées par les éoliennes dans le cas pratique.

En mesurent le courant à la PCC (I_{pcc}) et en effectuant la FFT (Fast Fourier Transform) du signal, il est possible d'obtenir l'impédance du système de transmission pour chacune des fréquences excitatrices, c'est à dire qu'il est possible d'obtenir l'évolution de l'impédance en fonction de la fréquence.

Pour simuler de manière simple le système illustré par la figure IV.5, on utilise la source de tension définie plus haut et l'impédance de court-circuit dont les caractéristiques sont données dans le Tableau IV.3. Le transformateur utilisé est en montage (Δ-gY), ses caractéristiques sont indiquées dans le tableau IV.4. Enfin, les caractéristiques du modèle du câble sont déjà décrites dans le Tableau IV.3.

La réponse en fréquence du système de transmission décrit est illustrée par la Figure IV.5.

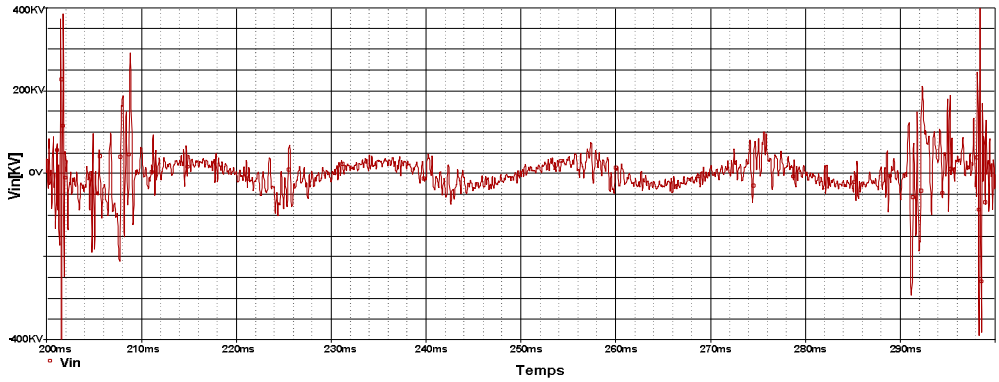


Figure IV.5.*Tension polluée appliquée à l'entrée du système.*

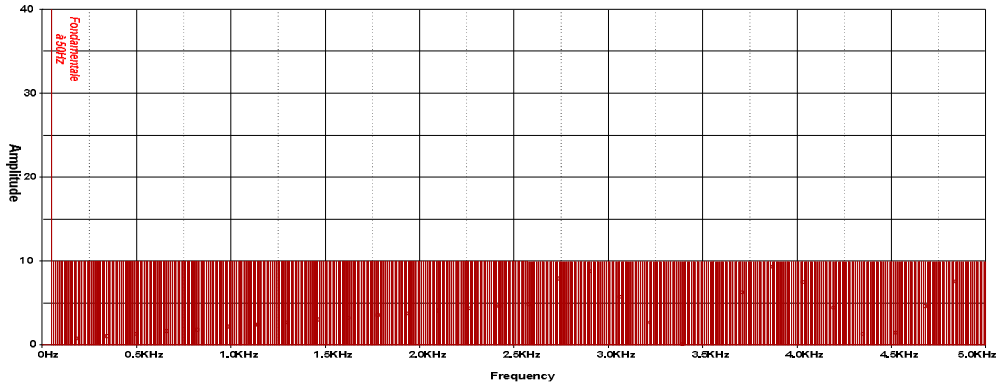


Figure IV.6 : *Trains harmoniques de la tension appliquée au système de transmission.*

Tableau IV.2 : Caractéristiques du réseau principal.

Paramètre	**Valeur**
Puissance nominale (Pn)	150 MW
Tension nominale (Vn)	150kV
Inductance de court-circuit	5%

Tableau IV.3 : Caractéristiques du transformateur.

Paramètre	**Valeur**
Puissance nominale	150MVA
Tension primaire	33Kv
Tension secondaire	150Kv
Connexion	Δ-GY
Résistance de fuite du transformateur	1%
Inductance de fuite du transformateur	6%
Pas de pertes de charge	1,78%

La Figure .IV.7. Permet d'observer que tous les multiples des harmoniques d'ordre 3 produits par les éoliennes, ne peuvent pas atteindre le PCC. Car, entre ces points, est placé un transformateur (Δ-GY) qui est connu par son rôle de filtrage des harmonique d'ordre 3. Le système de transmission est composé de plusieurs composants inductifs, comme le transformateur ou l'impédance de court-circuit du réseau principale. Cette impédance inductive provoque une atténuation significative en hautes fréquences, comme on peut le voir dans la Fig .IV.7. Ainsi, les tensions harmoniques en haute fréquence n'affectent pas le courant du PCC (en fait les harmoniques supérieurs à 700Hz n'affectent pas le courant, du PCC).

Toutefois, l'interaction de la composante inductive du système de transmission avec la composante capacitive du câble sous-marin provoque une résonance à 400Hz, susceptible de créer des problèmes.

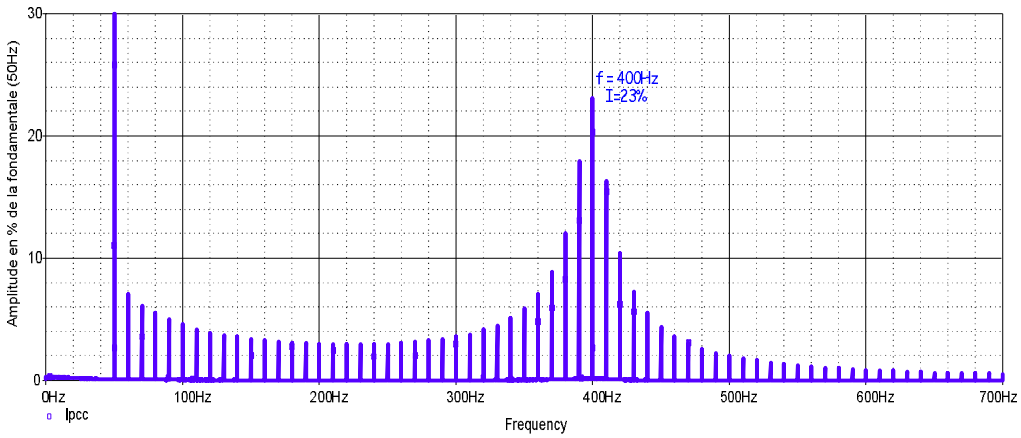


Figure .IV.7 : *Réponse fréquentielle du système de transmission. FFT du courant au PCC: en détail au voisinage de la résonance principale à f=400Hz.*

IV.2.4.1. Effet des différents composants du système sur la réponse fréquentielle

On analyse chacun des éléments du système de transmission affectant la réponse fréquentielle dans le but d'éviter les résonances indésirables et optimiser la conception du système de transmission.

L'étude de la réponse fréquentielle du système de transmission est basée sur la variation des impédances des trois composants principaux:

- L'impédance de fuite du transformateur ;
- L'impédance du câble sous-marin (variation de la longueur du câble) ;

- L'impédance de court-circuit du réseau principal.

Dans un premier cas, l'évaluation de l'influence du transformateur (structure Figure IV.7), pour trois cas, est obtenue par simulation de la réponse fréquentielle du système de transmission en appliquant le train harmonique (fig .IV.8). L'évolution de la réponse fréquentielle pour une inductance de fuite du transformateur variant de 3% à12% est illustrée sur la figure IV.8.

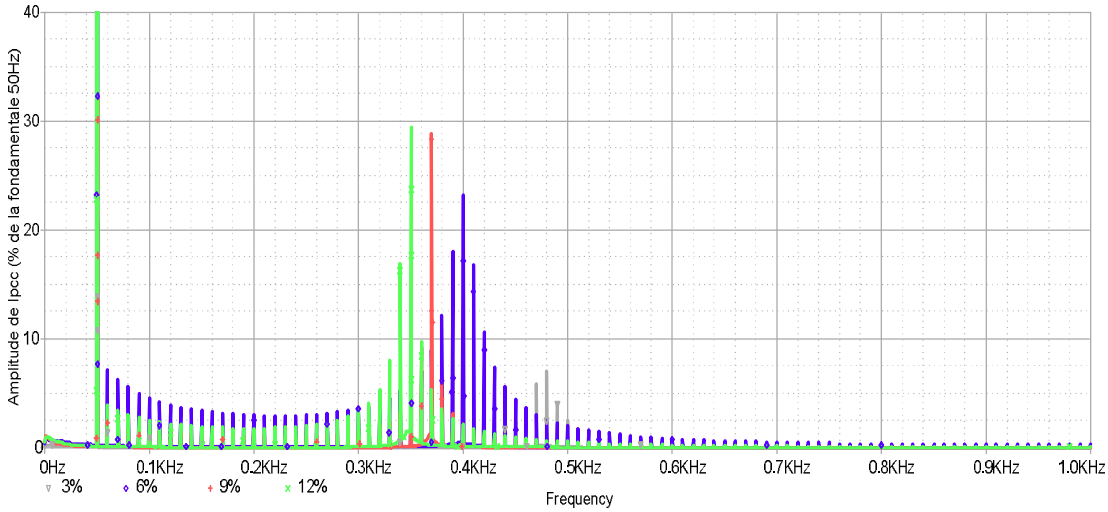


Figure IV.8 : *Réponse fréquentielle du système de transmission avec variation de l'inductance de fuite du transformateur : 3%(gris), 6% (bleu), 9% (rouge) et 12% (vert)*

On constate que pour une augmentation de l'inductance de fuite du transformateur élévateur de la tension, la fréquence de résonance diminue (de 450Hz à 350Hz). Pour le cas particulier où l'inductance de fuite est de 3%, il est important de voir comment le raccordement du transformateur ne laisse pas traverser les harmoniques proches de la résonance au PCC, fig. 4.9. La résonance est toujours présente à (450Hz).

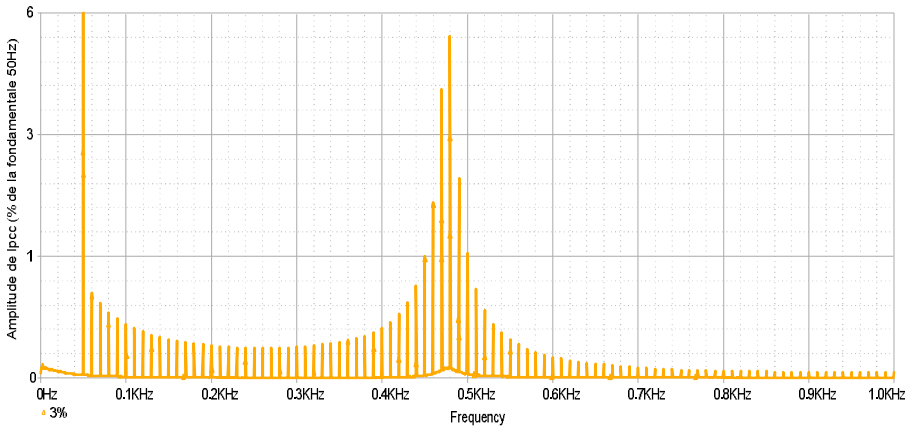


Figure IV.9 : *Réponse fréquentielle du système de transmission avec une inductance de fuite de 3% du transformateur élévateur.*

Le train d'harmoniques utilisées a des composantes dans la gamme de 50-5000Hz, mais pas en permanence dans toute cette gamme, la source harmonique génère des tensions harmoniques dans les intervalles de 10 Hz. Ainsi, en utilisant cette technique il est possible de déterminer la résonance avec une précision de 10 Hz, c'est à dire le système à une précision de 10 Hz. A la fréquence de résonance, l'amplitude de la résonance varie très rapidement et étroitement de quelques Hz.

En conséquence, si la résonance harmonique correspond à la fréquence de résonance exacte, l'amplitude mesurée dans la simulation sera plus grande que dans les cas où les harmoniques du train sont proches de la fréquence exacte de la résonance. Ainsi, cette analyse permet de mesurer avec précision la fréquence de la résonance, mais pas l'amplitude qui est une valeur approchée.

Dans ce cas on analyse l'influence de la longueur du câble avec une variation de l'ordre de 20 km à 110 km. La réponse fréquentielle du système de transmission considérée avec cette variation est illustrée par la Figure IV.10.

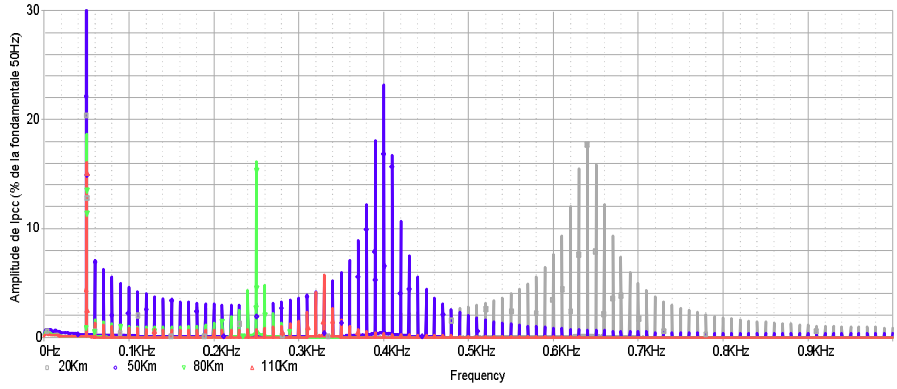


Figure IV.10. *Réponse fréquentielle du système de transmission avec variation de la longueur du câble à partir de: 20 km (gris), 50 km (bleu), 80 km (vert) et 110 km (rouge).*

La fréquence de résonance diminue avec l'augmentation de la longueur du câble sous-marin. Il est clair que la résonance du système de transmission diminue avec le câble à 80 km, parce que dans ce cas également tous les multiples des harmoniques d'ordre 3 ne peuvent pas transiter par le transformateur.

Dans le troisième cas, la variation de l'impédance de court-circuit est considérée. Cette variation est de 2% à 11%, les résultats de simulation sont illustrés par la Fig. IV.11.

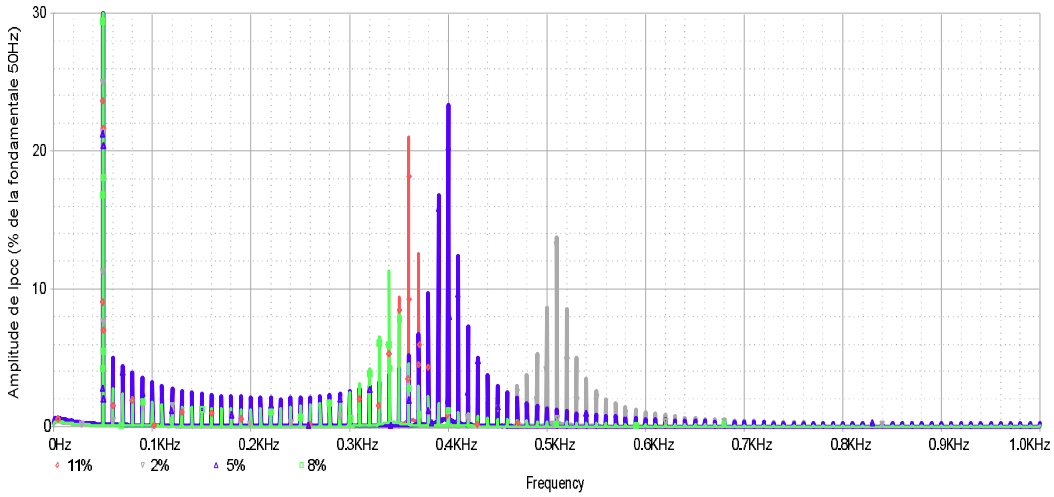


Figure IV.11 : *Réponse fréquentielle du système de transmission avec variation de l'impédance de court-circuit de: 2% (gris), 5% (bleu), 8% (vert) et 11% (rouge).*

Dans ce dernier cas, comme dans les deux cas précédents, l'augmentation de l'impédance de court-circuit engendre une diminution de la fréquence de résonance. Dans les cas analysés, la plus grande variation se situe entre 640Hz et 250Hz, elle est causée par la variation de la longueur du câble de 20 km à 110 km. Cependant, dans la plupart des cas, la résonance se situe entre 450Hz et 250Hz ce qui est en concordance avec les résultats de **[35]** mettant en évidence que les systèmes de transmission AC avec un transformateur de la sous-station offshore, présentent conjointement le risque d'amplifier les harmoniques dans les basses fréquences (essentiellement les harmoniques d'ordre 3, 5 et 7).

IV.2.5. Réponse fréquentielle du système de transmission simplifié

L'objectif de cette application est d'estimer la fréquence de résonance principale d'une manière simple et précise, alternativement à la méthode décrite précédemment.
Cette application nous permet de valider notre étude ayant pour but de prédire, à des fréquences d'intérêt, le modèle exact du câble défini par le nombre de cellules en cascade et leurs paramètres, afin de représenter la première fréquence de résonance du système de transmission, qui est la principale caractéristique de la réponse fréquentielle.

Cette fréquence de résonance peut produire un risque potentiel d'amplification des harmoniques, présenté par une méthode simple par **[35]**. Cette approximation ne tient compte que de la composante capacitive du câble, en négligeant les composantes résistives et inductives. De cette façon, il est possible de simplifier le système de transmission entier par un circuit RLC. Ensuite, la fréquence de résonance de ce circuit *RLC* simplifiée sert à approcher la résonance du système de transmission.
Cette fréquence de résonance donnée par la méthode simplifiée (circuit équivalent *RLC*) est estimée par l'équation suivante (IV.11).

$$f_{Résonance} = \frac{1}{2.\pi.\sqrt{(L_{Transformateur}+L_{Cable}).C_{Cable}}}$$

……..…… ***(IV.11)***

Afin d'améliorer l'estimation de la fréquence de résonance (obtenue par la méthode simplifiée) nous avons utilisé une deuxième méthode reposant sur la modélisation du système de transmission complet (fig. IV.11.) par un circuit électrique. L'estimation de la fréquence de résonance est ainsi obtenue en utilisant, pour la simulation, le logiciel Cadence Pspice**.**

Ce circuit prend en compte toutes les composantes du système : le transformateur, le câble sous marin et l'impédance de court-circuit du réseau principal. Par comparaison, l'avantage de cette opération est l'obtention de résultats plus précis que ceux obtenus par **[36],** Enfin, pour valider les résultats obtenus par cette méthode, plus précise, une comparaison est faite avec les résultats du système complet simulés par PSCAD.

IV.2.6. Modélisation du système de transmission

IV.2.6.1. Câble sous marin modélisé par un seul circuit en gamma

Dans un premier temps, afin d'expliquer et valider notre approche de modélisation présentée au **[31].** Le câble sous marin est représenté à l'aide du modèle à paramètres localisés (Une Cellule en gamma). Le transformateur élévateur est considéré comme une inductance équivalente et le réseau principal comme une source de tension idéale avec une impédance de court-circuit. La représentation d'une seule phase du système de transmission par un circuit est illustrée par la figure IV.12.

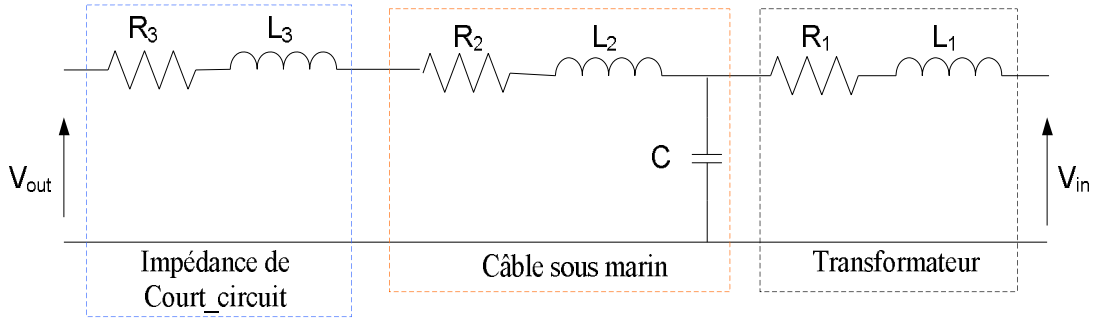


Figure IV.12 : *Représentation d'une seule phase du système de transmission (Câble sous-marin modélisé par un circuit en configuration Γ).*

L_1 : inductance équivalente du transformateur ; R_1 : résistance équivalente du transformateur R_2 : la partie résistive du câble, L_2 : la partie inductive du câble ; C : la partie capacitive du câble et L_3 et R_3 : correspondant aux Lsc et R_{SC} (l'impédance de court-circuit).

IV.2.6.2. Réponse fréquentielle d'une seule phase du système

La réponse fréquentielle du système de transmission avec le câble sous-marin régi par le modèle à paramètres localisés (1-cellule en Γ), le transformateur élévateur de tension et l'impédance du réseau principal sont simulés par le logiciel Cadence Pspice avec leurs paramètres puisés dans les tableaux IV.1, IV.2 et IV.3. Cette réponse est illustrée par la figure IV.13.

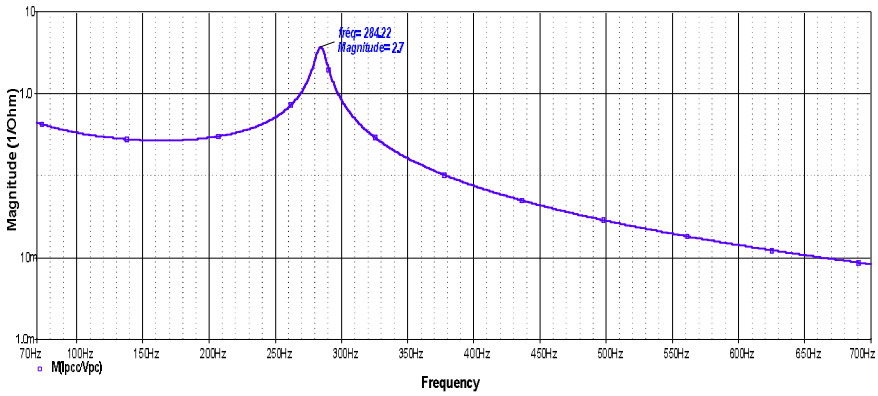


Figure IV.13.*Réponse fréquentielle du système de transmission (Câble sous marin modélisé par une cellule en Γ)*

Comme montré à la figure IV.13 et présenté au chapitre précédent, le modèle à paramètres localisés classique (une seule cellule) n'est pas en mesure de représenter le câble à une fréquence de résonnance à 400 Hz. Cette résonnance est provoquée par l'interaction de la composante inductive du système de transmission et la composante capacitive du câble sous-marin susceptible de produire des harmoniques. L'approche de modélisation proposée au travail présenté par **[37]**, nous permet d'obtenir le nombre exact de cellules pour modéliser le câble à cette fréquence.

IV.2.6.3. Détermination du modèle en nombre de cellules du câble

En suivant les étapes de l'approche de modélisation déjà présentée pour la détermination du modèle du câble sous marin, on détermine le nombre de cellules en cascade avec une précision prédéfinie à des fréquences d'intérêt. Les résultats de simulation (figure IV.14) nous a permis de choisir le modèle adéquat.

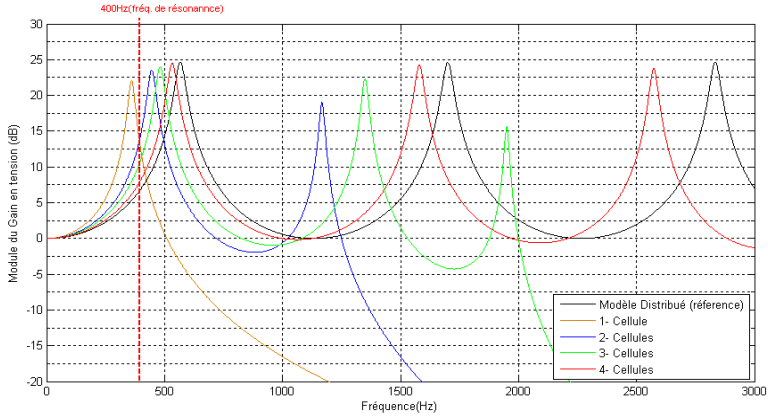


Figure IV.14. Représentation du module la tension du câble (Distribué et cellules en cascade)

Ce choix est basé sur les étapes décrites dans **[31].** Le modèle de cellules en cascade adéquat pour représenter le câble sous marin convenablement à des fréquences d'intérêt après compromis entre la précision et le nombre de cellules. A une précision de ΔV_{seuil} = 1dB, modèle correspondant est à 4 cellules en cascade pour représenter le câble sous marin à une fréquence de 400Hz.

IV.2.7. Câble sous marin modélisé par une cascade de cellules

IV.2.7.1. Réponse fréquentielle du système

La réponse fréquentielle du système de transmission avec le câble sous-marin régi par le modèle à 4 cellules en cascade en Γ, le transformateur élévateur de tension et l'impédance du réseau principal (figure IV.15) sont simulés par le logiciel Cadence Pspice avec leurs paramètres puisés dans les Tableaux IV.1, IV.2 et IV.3. Cette réponse est illustrée par la figure IV.15.

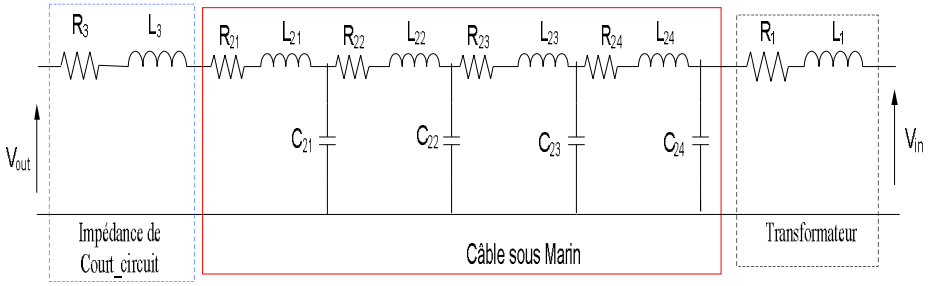


Figure IV.15. *Représentation d'une seule phase du système de transmission. (Câble sous-marin modélisé par 4-cellules en cascade en Γ).*

Le modèle de câble sous-marin avec quatre cellules en cascade a rendu possible la représentation du système dans la gamme de fréquence d'intérêt, c'est à dire suffisamment et correctement jusqu'à la résonance **[37].**

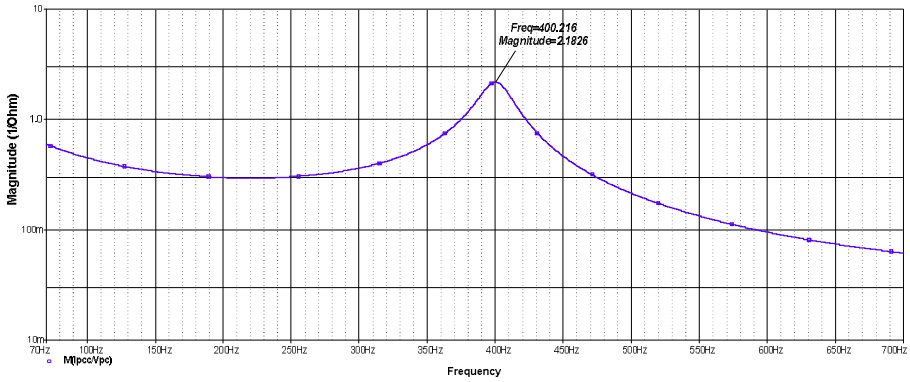


Figure IV.16. *Représentation fréquentielle du système de transmission avec le câble modélisé par 4-cellules en cascade*

La figure IV.16 montre que la première résonance du système est située à 400.215Hz, sensiblement égale à celle estimé par simulation (400 Hz) du système de transmission sous PSCAD. On rappelle que l'amplitude de la résonance, comme dans les cas précédents, est également une approximation.

IV.2.7.2. Comparaison et validation des résultats de la simulation

La validation de ces résultats de modélisation est fondée sur l'estimation de la première résonance. A cette fin, le tableau IV.5 ci-dessous permet de faire la comparaison entre le modèle référence simulé par le logiciel PSCAD et les résultats obtenus par simulation et ceux donnés par **[38].** Ce tableau met en évidence les fréquences de résonance obtenues par chaque méthode et pour différentes longueurs du câble (20 ; 50 ; 80 et 110 km).

***Tableau IV.4* :** Comparaison des résultats pour les 3 méthodes

Longueur du Câble(km)	**Simulation par PSCAD (f_R en Hz)**	**Cellules en cascade (f_R en Hz)**	**RLC simplifié (f_R en Hz)**
20	640	640.6	522
50	400	400.215	318
80	310	310.41	256.67
110	255	255.7	211.8

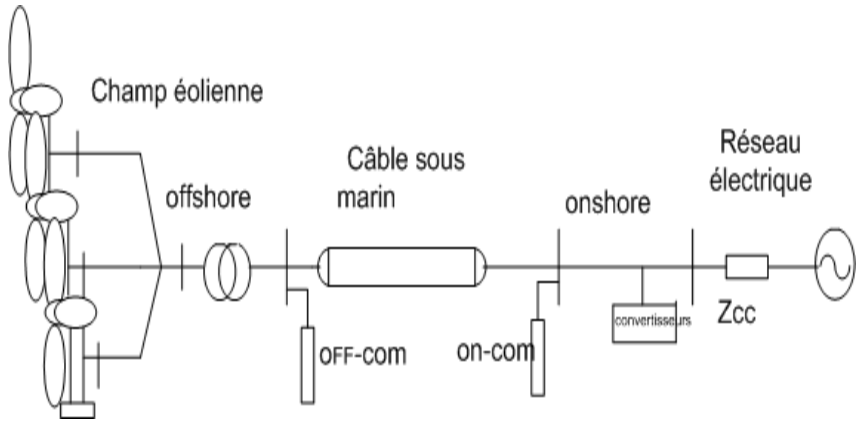
La comparaison fait ressortir que le modèle de cellules en cascade est une bonne représentation pour l'estimation de la fréquence de résonance, même en faisant varier la longueur du câble.

Par contre la méthode simplifiée RLC ne fournit que des résultats très approximatifs de la fréquence de résonance. Toutefois, cette méthode pourrait être utile pour approximer de manière très simplifiée la première valeur de la fréquence de résonance.

IV.3. Application sur un cas réel

Une application sur un cas réel d'un câble sous marin reliant une éolienne au réseau électrique, généralement source d'harmoniques, est l'objet de cette partie de ce chapitre.

Le système électrique général du parc éolien offshore, représenté par la figure.IV.17, consistent à: l'éolien, station offshore (Transformateur élévateur), le câble sous-marin, l'interface entre le parc éolien et le point de couplage commun (station) et du réseau.



Figue IV.17. *Système électrique général du parc éolien offshore considéré.*

4.3.1 Réponse fréquentielle du système réel

Le parc éolien est de puissance nominale de 150 MVA, composé de convertisseur est des éoliennes. Pour plus de simplicité, toutes les éoliennes du parc, sont modélisées par une seule machine équivalente, comme illustré sur la Fig. IV.18.

Par conséquent, le système de transmission est modélisé par un seul équivalent Machine-convertisseur-filtre de puissance nominal de 150 MVA.

Le réseau inter-turbine est généralement de moyenne tension, dans ce cas et de 33kV. A la sous-station en mer, la tension est élevée à 150kV, puis transférée au réseau. Le système de transmission se compose de trois câbles sous-marins et en vue d'améliorer

l'efficacité de transmission, un compensateur capacitif de puissance réactive et des filtres passifs peuvent être nécessaires**. [40]**

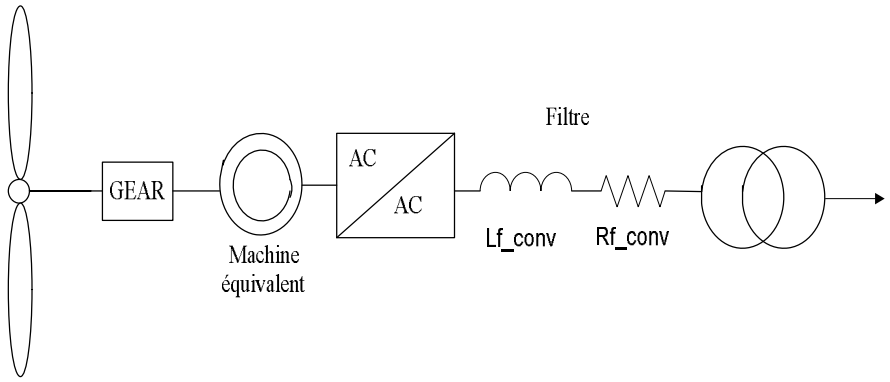


Figure IV.18. *Schéma équivalent du champ éolien*

Les paramètres et les composants principaux du système. Le câble sous-marin est de 50 km de long, avec les caractéristiques sont indiquées dans le Tableau IV.6.

***TABLEAU* IV.5.** Caractéristiques du Câble **[39]**

	Vn(KV)	In(A)	R (Ω/Km)	L (mH /Km)	C(μF/km)
Câble	87/150	1088	0.0151	0.352	0.233

Du côté réseau est installé un filtre convertisseur représenté par une inductance. Ce filtre est aussi grand, suffisant pour être en mesure de filtrer le signal du système de transmission à la puissance nominale. Enfin, le transformateur élévateur est simplifié par une inductance.

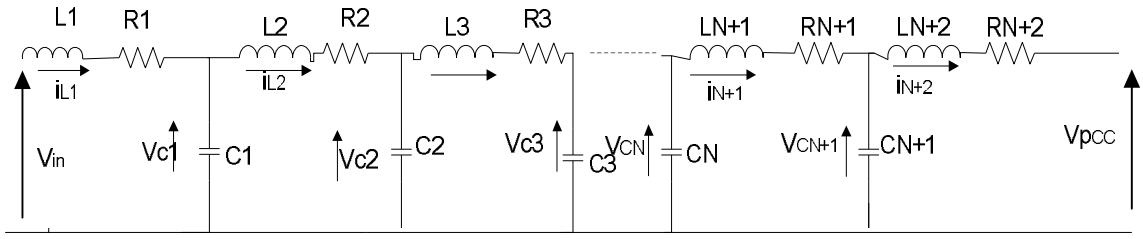
TABLEAU IV.6 : Paramètres du système complet

paramètres	***Valeur***
L_{cc}	17.2mh
R_{cc}	0.18ohm

C_{cable}	11.65μF
R_{cable}	0.755ohm
L_{cable}	17.65Mh
L_{comp}	1.74H
L_f	0.5835H
C_f	1.929 μF
R_f	50ohm
L_{tra}	17.16Mh
R_{tra}	0.8ohm
Lf_{conv}	212.6 mH
Rf_{conv}	0.141ohm

a = transformer relation

Le circuit équivalent du système de transmission de base, avec N "pi" circuits pour le modèle du câble sous-marin est représenté sur la Figue IV.20



Figue. IV.19 *Circuit équivalent du système de transmission.*

Où,

L_1 et R_1 représente l'impédance du transformateur et le filtre convertisseurs,

L_2 à $L_{N+1} = L_{câble} / N$, R_2 à $R_{N+1} = R_{cable} / N$, C_1 et $C_{N+1} = C_{câble} / 2N$, C_2 à C_N

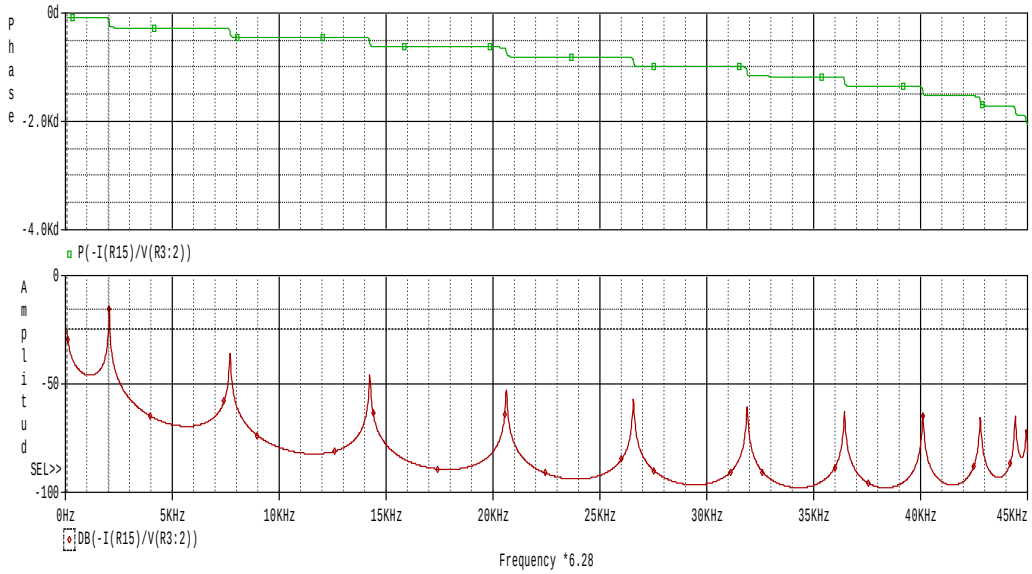
$C_{câble} / N$ et L_{N+2} avec R_{N+2} représente l'impédance de courte circuit (réseau).

Les étapes à suivre pour obtenir la réponse fréquentielle du circuit équivalent sont les suivantes :

1- Détermination du nombre N de cellules pour modéliser le câble en fonction de la plage de la fréquence désiré.

2- Simulation dans le domaine fréquentielle du système complet en utilisant le logiciel Orcad - Pspice

Enfin, la réponse en fréquence du circuit équivalent avec la modélisation du câble par dix (10) cellules pi en cascade, le rapport entre la tension et le courant du convertisseur i_{PCC} / v_{in} est représentée par la Fig.IV.20 Dans cette réponse fréquentielle, on observe des pics de résonance égale en nombre de cellules en «pi» utilisées pour le modèle du câble.

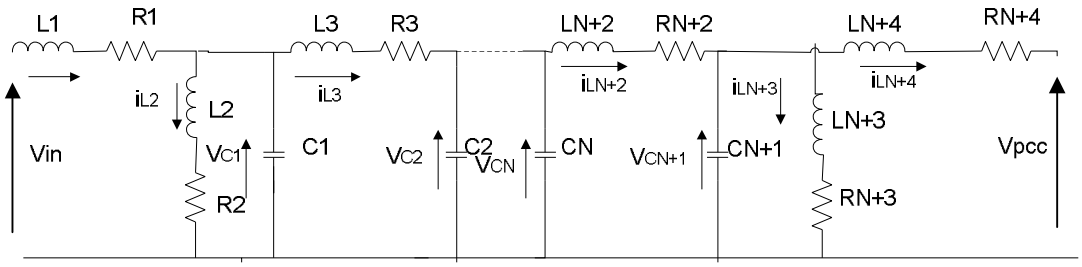


Figue. IV.20. *La réponse fréquentielle de Circuit équivalent du système de transmission.*

IV.3.2. L'effet de la Compensation de la puissance réactive sur la réponse

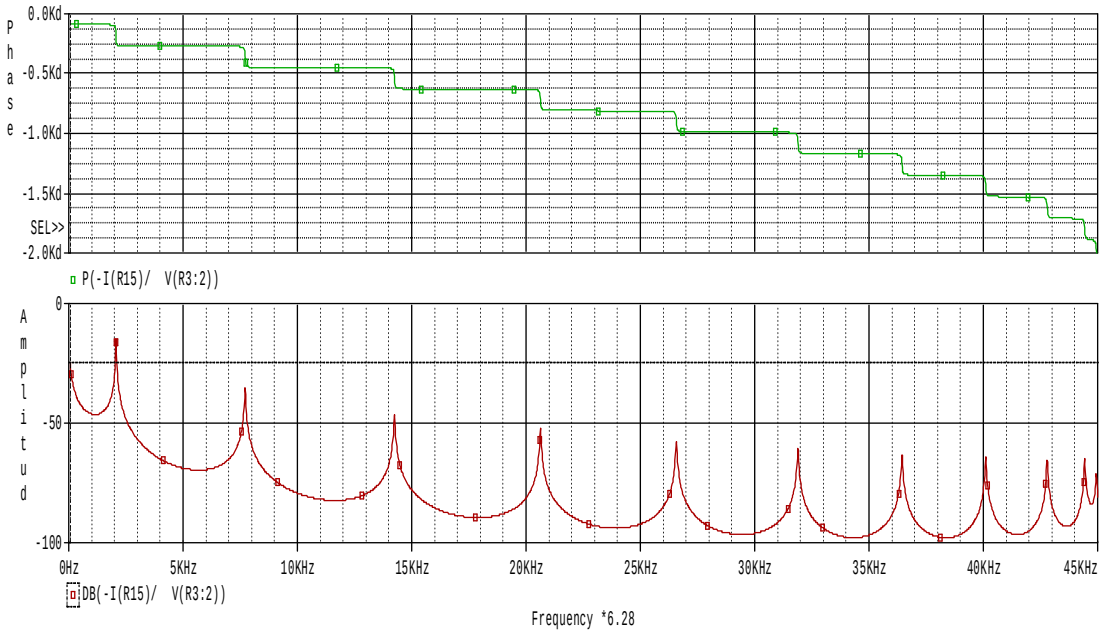
Les câbles sous-marins présentent une capacité shunt élevée donc cet effet entraîne une charge capacitive et décharger le courant dans le câble et ce courant génère une puissance réactive. Le courant nominal du câble est thermiquement limité et comme leur capacité en shunt augmente avec la longueur du câble, et le courant de charge augmente aussi.

Pour utiliser le câble sous-marin sans limité la longueur et de réduire les pertes de conduction, la solution idéale est une compensation de la puissance réactive le long de la longueur du câble. Donc la meilleure solution est de compenser la puissance réactive aux deux extrémités **[38].** L'analyse du système de transmission avec cette compensation est représentée par la Fig. IV.21 où L2 et LN + 3 (L_{comp}) sont donné par le Tableau .IV.8.



Figue IV.21.*Circuit équivalent du système de transmission avec compensation statique.*

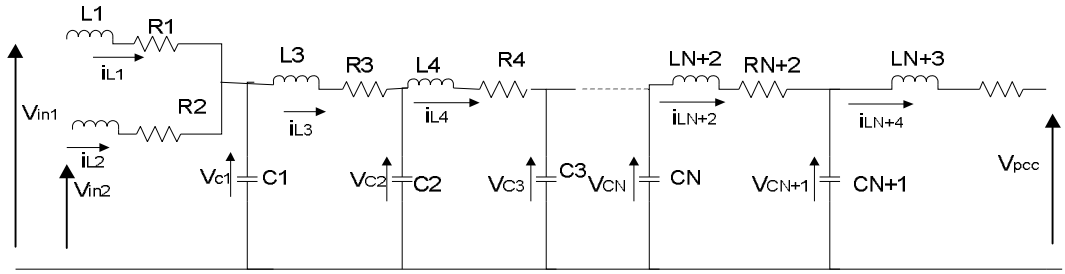
Le circuit est le même sauf qu'en ajoute deux autres variables, L_2 et L_{N+3} représentant le compensateur statique, avec La réponse en fréquence du système est représentée sur la Fig. IV.22 C'est une réponse en fréquence très similaire en comparaison avec le système de transmission de base. La principale différence apparaît dans les basses fréquences.



Figue IV.22. *La réponse fréquentielle de Circuit équivalent du système de transmission avec compensation statique.*

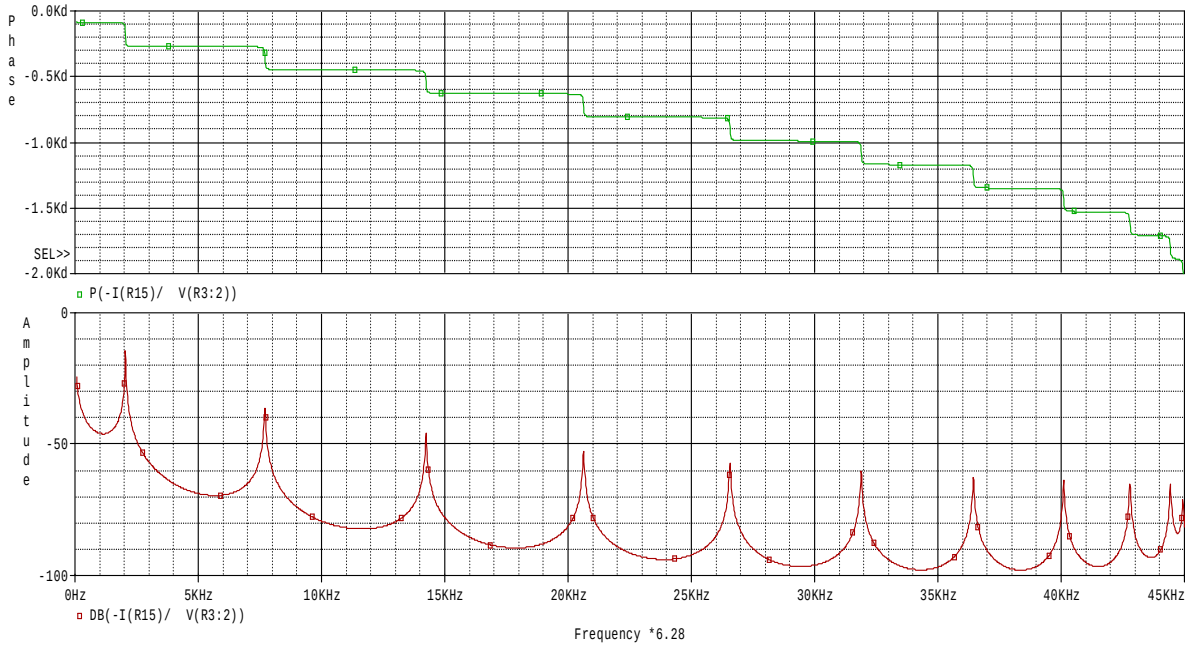
IV.3.3. Validation du système avec plusieurs Turbines

Comme mentionné précédemment, le parc éolien est modélisé avec sa représentation équivalente d'une seule machine, donc, dans cette section, cette simplification est analysée. Cela est dû au fait que le parc éolien est composé de multiples convertisseurs de puissance. Donc, dans cette section le parc éolien est modélisé par deux turbines équivalents et convertisseur**. [41]** Le circuit équivalent du système est représenté sur la Fig IV.23



Figue. IV.23.*Circuit équivalent du système de transmission avec deux éoliennes équivalentes.*

Figue. IV.24 montre les mêmes fréquences de résonance que le système de transmission de la Fig. IV.20. Mais pour le cas considéré, à savoir le cas de deux entrées la réponse de fréquence globale est découpé en deux schémas de réponse en fréquence égale. Par conséquent, en appliquant le principe de superposition, il est possible d'atteindre la même réponse en fréquence.



Figue. IV.24. La réponse fréquentielle de *Circuit équivalent du système de transmission avec deux éoliennes équivalentes.*

IV.3.4. Filtrage et conception du Filtre Passive

Le filtrage consiste à placer en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance de valeur très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau **[42].** Un filtre passif est constitué d'éléments passifs tels que des inductances, des condensateurs et des résistances, qui forment une impédance dont la valeur varie en fonction de la fréquence. On connecte alors le filtre passif en parallèle avec le réseau de manière à absorber un harmonique de courant donné.

Si on veut par exemple éliminer le courant harmonique de rang 5, on dimensionne alors les éléments passifs de manière à ce que l'impédance équivalente du filtre soit la plus petite possible à la fréquence 5× fondamental , le courant circulera alors dans l'impédance la plus faible.

La fréquence de résonance. Ainsi, la résonance de l'impédance du filtre est calculé par:

$$Z = R_f + j\,(X_{Lf} + X_{Cf}) \quad \text{(IV.12)}$$

$$\omega . L_f - \left(\frac{1}{\omega . C_f}\right) \quad \text{(IV.13)}$$

Dans les équations (IV.12) et (IV.13), il existe deux variables indépendantes L et C, de sorte qu'il existe de multiples combinaisons pour obtenir une fréquence de résonance déterminée.

Par conséquent, pour concevoir des filtres passifs ces facteurs sont également pris en compte: puissance harmonique et le facteur de qualité.

Dans cette fréquence de résonance, la partie imaginaire de l'impédance disparaît. Donc, la puissance harmonique dans cette fréquence du filtre est calculée par les équations:

$$P_{harmonic} = R_f . I^2 \quad \text{(IV.14)}$$

$$P_{harmonic} = R_f . V^2 / R_f = V^2 / R_f \rightarrow R_f = V^2 / P_{harmonic} \quad \text{(IV.15)}$$

D'autre part, le facteur de qualité (Q) du filtre est déterminé par l'équation:

$$Q = f0 / \Delta f = \frac{1}{R_f} . \sqrt{\frac{L_f}{C_f}} \quad \text{(IV.16)}$$

Où:

f_0: est la fréquence de résonance et Δf la largeur de la bande.

Q : est définie comme étant une relation entre la tension au borne de l'inductance (ou condensateur) et la résistance.

Ainsi, la résistance du filtre détermine la puissance du filtre, le facteur de qualité et la largeur de la bande.

IV.3.5. Réponse fréquentielle du système avec intégration du filtre active

Après calcul des paramètres du filtre passif, le système équivalent avec intégration du filtre et illustré par la figure ci- dessous

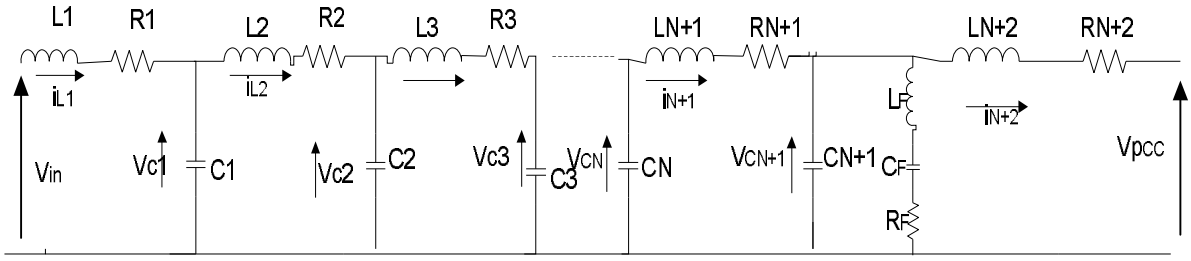


Figure. IV.25.*Circuit équivalent du système de transmission avec un filtre passive*

La première résonance du système de transmission a un grand potentiel d'amplification des harmoniques. Cette fréquence de résonance est principalement en fonction des caractéristiques et la longueur du câble sous-marin.

D'autres facteurs comme compensation réactive statique, l'impédance du court circuit ou d'impédance du transformateur n'affectent pas de manière significative le réseau.

Les filtres passifs peuvent atténuer les harmoniques et modifier la réponse en fréquence du système de transmission comme le montre la réponse fig. IV.26.

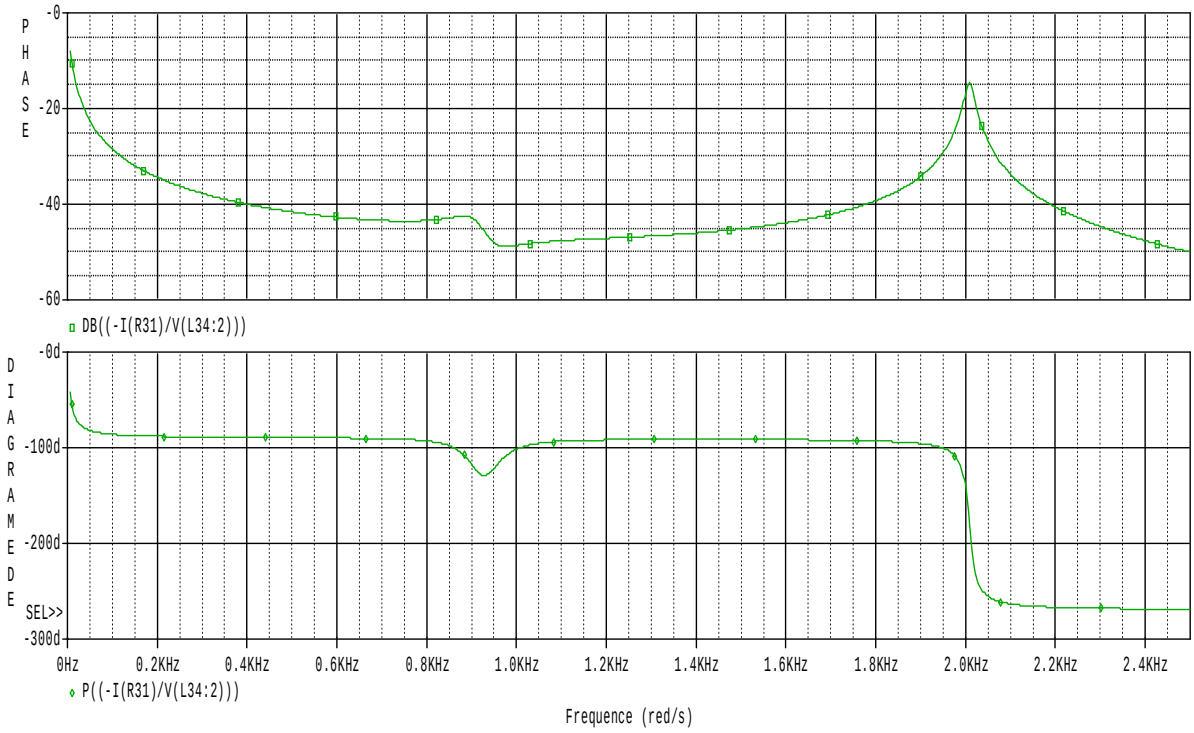


Figure. IV.26. *LA Réponse fréquentielle Circuit équivalent du système de transmission avec un filtre passive*

Enfin, la réponse en fréquence du circuit équivalent avec intégration du filtre (rapport entre la tension et le courant du convertisseur i_{PCC} / v_{in}) est représentée par la Fig. IV.21 Dans cette réponse fréquentielle, on observe que la première résonance est atténue par le filtre passif.

De toute évidence, ces résultats doivent être validés avec des résultats expérimentaux.

IV.4. Conclusion

Une méthode de prédiction par réseaux de neurones du modèle de cellules en cascade à de fréquences d'intérêt a été utilisée.

L'approche de modélisation proposée automatisée par RNA a été appliquée à un système comprenant une éolienne, reliée par câble au réseau électrique. L'étude du câble en présence de la propagation des harmoniques générées par l'éolienne a abouti à une solution convenable lors de la conception du tel système électrique comparativement aux travaux récents. L'avantage réside dans l'accès simple, rapide et relativement exact à l'estimation de la première fréquence de résonance considérée comme principale grandeur de validation.

CONCLUSION GÉNERALE

CONCLUSION GENERALE

L'éolienne constitue un moyen écologique de production d'énergie. Il existe de nombreux types d'éolienne. Dans les réseaux électrique dans le monde, des éoliennes de grande taille dites firme (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. Puis les concepts fondamentaux de la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique. Au regard de ce chapitre, il est apparu que différents problèmes de la stabilité des réseaux électriques due à l'intégration des parcs étoliens dans un réseau électrique, parmi ces perturbations on a défini le problème de la pollution harmonique. La partie simulation de ce projet est consacrée à la modélisation des câble basée sur le modèle de cellules en cascade, nous avons procédé à l'identification du modèle le mieux représentatif de la ligne en tenant compte des fréquences non fondamentales (harmoniques et interharmoniques), du nombre adéquat de cellules à des fréquences d'intérêt en fonction de la longueur de la ligne et du seuil de précision.

La modélisation a été appliquée à un système réel comprenant une éolienne, reliée par câble au réseau électrique. L'étude du câble en présence de la propagation des harmoniques générées par l'éolienne a abouti à une solution convenable lors de la conception d'un tel système électrique par comparaison aux travaux récents.
La simulation a montré que l'opération de filtrage et indispensable pour l'amélioration de la qualité de l'énergie dans ce cas. Néanmoins l'intégration d'un filtre passif dans le système à beaucoup améliorer la réponse fréquentielle du système.

Référence bibliographiques :

[1] B. Bouaziz, F. Bacha, M. Gasmi ; ‘ Modeling and control of a variable speed Wind energy conversion system based on an induction machine’. Proc. International Renewable Energy Congress (IREC), Sousse, Tunisia, 2010.

[2] A. MIRECKI, "Etude comparative de chaine de conversion d’énergie dédiées à une éolienne de petite puissance". Thèse de doctorat, 2005, Institut national polytechnique de Toulouse, France.

[3] M. Benamsili, M. Taouriri, "Filtrage actif par l’éolienne". Projet de fin d’études, 2009, Ecole nationale supérieure polytechnique, Algérie.

[4] M. Lopez, "Contribution à l’optimisation d’un système de conversion éolien pour une unité de production isolée". Thèse de doctorat, Université Paris Sud-11, France.

[5] B. Toual, "Modélisation et commande floue optimisée d’une génératrice à double alimentation, application à un système éolien à vitesse variable". Mémoire de magister, 2009, Université de Batna, Algérie.

[6] N. Boudrahem, "Etude et commande d’une éolienne à vitesse variable". Mémoire de magister, 2007, Université de Bejaia, Algérie.

[7] O. Bouhali, "Contribution des convertisseurs multiniveaux au raccordement de la production d’origine éolienne sur un réseau électrique". Thèse de doctorat, 2007, Ecole nationale polytechnique, Lille, France.

[8] B. Hamane, "Contrôle robuste d’aérogénérateur". Mémoire de magister, 2012, Université d’Oran, Algérie.

[9] S. El.Aimani, " Modélisation de différentes technologie d’éoliennes intégrées dans un réseau de moyen tension". Thèse de doctorat, université de Lille, France ; 2004.

[10] A. Larson, ’’ The power quality of Wind Turbines’’, Thesis for the dégrée of doctor of philosophy, Göteborg, Sweden 2000.

[11] Arrêté du 4 juillet 2003 relatif aux prescriptions.

[12] M. M. Abdusalam, "Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales". Thèse de doctorat, 2008, Université Henri Poincaré, Nancy France.

[13] T. Ghennam, "Etude et réalisation d’un compensateur actif de puissance commandé par DSP". Mémoire de magister, 2003, Ecole Militaire Polytechnique d’Alger, Algérie.

[14] J. Arrilaga, N. R. Watson, "Power system harmonics", 2éme édition, John Wiley & Sons, 2003.
[15] Luc Lasne, J.C. Gianduzzo, "Electrotechnique : Rappels fondamentaux puissances électriques, Systèmes triphasés, Circuit magnétique, Transformateurs, Harmoniques, Régimes transitoires, Réseaux électriques". 2007, Université de Bordeaux.
[16] M. Ferhat, "Commande en temps réel d'un filtre actif de puissance". Mémoire de magister, 2012, Université de Sétif, Algérie.
[17] C. Dewez, "Modélisation d'un filtre actif parallèle triphasé pour la dépollution harmonique et synthèse d'une commande basée sur le rejet de perturbations ", Thèse de doctorat, LAII-ESIP, Université de Poitiers, France, December 2007.
[18] CEI, 61000.1.1: Electromagnetic compability (EMC), Part 1: General, section 1: application and interprétation of fondamental définitions and terms, 2001.
[19] M. A. E. Alali, "Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension". Thèse de doctorat, 2002, Université Louis Pasteur, Strasbourg I, France.
[20] A. Chaoui, " Filtrage actif triphasé pour charges non linéaires", Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas – Sétif, Décembre 2010.
[21] 001- GTZ-Présentation-harmoniques-CASA
[22] J. MATEVOSYAN, T. ACKERMANN, S. BOLIK and L. SODER, "Comparison of International Regulations for Connection of Wind Turbines to the Network ", Proceedings of NVVPC'04, Gbteborg, Sweden, March 1-4, 2004.
[23] H. BELHOMME, C. NASLIN, G. BESLIN, N. ALBRIEUX, " Wtnd farms and networks - Main technical issues, Proceedings of International Conference on Power Generation and Sustainable Development ", Liège, Belgium, 8-9 October 2001.
[24] 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.
[25] 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.
[26] B. Robyns et al., "Impact de l'éolien sur le réseau de transport et la qualité de l'énergie," J3eA , vol.5, Hors Série 2006.

[27] Décret du 27 juin 2003 : Prescriptions techniques générales de conception et de fonctionnement auxquelles doivent satisfaire les installations en vue de leur

raccordement au réseau public de transport de l'électricité, Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie.
[28] S.M. Muyeen et al. "A variable speed wind turbine control strategy to meet wind farm grid code requirements," IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 25, n°1, pp. 331-340, February 2010.
[29] A. Boyette, Contrôle–commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne, Thèse de Doctorat, Université de Nancy I, 2006.
[30] S. Lemofouet et al. "A hybrid energy storage system based on compressed air and supercapacitors with maximum efficiency point tracking (MEPT)," IEEE Trans. Industrial Electronics, vol. 53, n°4, pp. 1105-1115, June 2006.
[31] W.D. Kellogg et al. "Generation unit sizing and cost analysis for stand-alone wind, photovoltaic, and hybrid wind/PV systems," IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 13, n°1, March 1998.
[31] A.Gacemi, M.Boudour**,** "Modeling of Submarine Cable Connected for Offshore Wind Farms for Harmonic Analyses Using Artificial Neural", 4th International Conference on a. Electrical Engineering, L.S.E.I, U.S.T.H.B, (accepted), May 08-10, 2012.
[32] Jiang, Y.L., "Mathematical modelling on RLCG transmission lines", Nonlinear Analysis Modeling and Control, Xi'an Jiantong University, Vol. 10(2), pp.137-149, China, 2005.
[33] Castellanos, F., Marti, J.R. & Marcano, F., "Phase-domain multiphase transmission line models", Int. Jour. of Electrical Power & Energy Systems, Elsevier Science Ltd. vol. 19(4), pp.241-248, 1997
[34] Gustavsen, B., Irwin, G., Mangelrod, R., Brandt, D. & Kent, K. "Transmission line models for the simulation of interaction phenomena between parallel AC and DC overhead lines", IPST 99 Proceedings', pp.61-67, 1999.
[35] Kocewiak, L.H., Bak, C.L. & Hjerrild, J. "Harmonic aspects of offshore wind farms", Proceedings of the Danish PhD Seminar on Detailed Modelling and Validation of Electrical Componentes and Systems, Aalborg, 2010.
[36] Nian, L., "Transients in the collector Grid of a novel Wind Farm topology", Msc Thesis KTH Stockholm, 2009.

[37]A.Gacemi, M.Boudour," power transmission line modeling using artificial neural networks in presence of non fundamental frequencies",Journal of electrical engineering(JEE): volume11/2011 edition: 2.

[38] M. Zubiaga, G. Abad, J.A. Barrena, A. carcar, S. Aurtenetxea "Evaluation and selection of AC transmission lay outs for large offshore wind farms," EPE 2009. Accepted.

[39] W.Breuer, N.Christl, "Grid Access Solutions Interconnecting LargeBulk Power On- / Offshore Wind Park Installations to the Power Grid", GWREF 2006.

[40] J.T.G. Pierik, J. Morren, E.J. Wiggelinkhuizen, S.W.H. de Haan, T.G. van Engelen, J. Bozelie, "Electrical and Control Aspects of Offshore Wind Farms II: Dinamic Models of Wind Farms," Delft University of Technology.

[41] Liangzhong Yao, "Experience on Technical Solutions for Grid Integration of Offshore Windfarms," DTI Conference Centre, London 2007.

[42] M. Ferhat, "Commande en temps réel d'un filtre actif de puissance". Mémoire de magister, 2012,
Université de Sétif, Algérie.