

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Electrique



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Réseaux électriques

Présenté par :

SAKER samah

GUENDOZ mouna

Thème:

**Rayonnement électromagnétique autour
d'une éolien suit à impact direct d'un coup
de foudre sur son système de protection**

M^r DJAAFOUR Ahmed

MAA

Président

UKM Ouargla

M^r ROUIBAH Taher

MCA

Encadreur/rapporteur

UKM Ouargla

M^r BENBOUZA Naima

MAA

Examineur

UKM Ouargla

Année universitaire 2020/2021

REMERCIEMENTS

Grâce à Dieu ce mémoire à été réalisé, Dieu merci pour le courage et la volonté sans les quelles mon travail n'aurait jamais pu voir la lumière de ce jour.

J'adresse ma profonde reconnaissance a *Mr Rouibah Tahar* Maître de Conférences à *l'Université de Kasdi Merbah*, pour son aide et son soutien, en vue de concrétiser ce travail

Je tiens également à remercier toute l'équipe pédagogique de *l'Université Kasdi Merbah*.

Je tiens également à remercier tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin dans la réalisation de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail spécialement à mon père et à ma mer, qui
Repose en paix près de dieu tout puissant.

Mon petit

Frère: taki eddine et tous mes sœur ahlam et imane,

Mes tentes et oncles

A tout ma famille

A mes amis:

Mouna,amina,amani,ikram,sabah,ilham,ayoub,tarek A

tous mes amis

samah

Dédicace

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail
À ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais à leur
exprimer mon amour sincère.

A l'homme, mon précieux offre du dieu, qui doit ma vie, ma réussite et tout mon
respect : mon cher père Ali

A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non Ames
exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureuse: mon
adorable mère Fatima

A mes chères sœurs pour leurs encouragements permanents, et leur soutien
moral,

A mes chers frères, Que Dieu les protège et leurs offre la chance et le bonheur.

A mes grands-mères, mes oncles et mes tantes. Que Dieu leur donne une longue
et joyeuse vie.

A tous les cousins, et les amis que j'ai connu jusqu'à maintenant.

Sans oublier mon binôme samah pour son soutien moral, sa patience et sa
compréhension tout au long de cette mémoire

Sommaire

Sommaire

Sommaire

| | |
|--|----|
| Introduction générale | 01 |
| Chapitre 1 : Protection et technique d'analyse des défauts dans les réseaux électriques | |
| I. Introduction | 03 |
| II. Les turbines éoliennes | 03 |
| II.1 Définition de l'énergie éolienne..... | 03 |
| II.2 Fonctionnement d'un système éolien | 03 |
| II.3 Descriptions des installations | 04 |
| II.4 composants d'une éolienne | 05 |
| II.4.1. La nacelle | 05 |
| II.4.2. Le mat..... | 06 |
| II.4.3. Le rotor | 07 |
| II.4.4. Système auxiliaire de mise à la terre..... | 07 |
| II.4.5. Câblage électrique | 08 |
| III. Le phénomène de foudre | 08 |
| III.1 Défauts d'origines atmosphériques | 08 |
| III.2 Formation de la foudre | 08 |
| III.3 La classification des coups de foudre..... | 09 |
| III.4 Les effets de la foudre sur le réseau éolien..... | 09 |
| III.5 Classification des dommages causés par la foudre aux pales d'éoliennes..... | 10 |
| III.6 Une éolienne endommagée par la foudre..... | 11 |
| III.7 La menace de la foudre sur les turbines éoliennes..... | 11 |
| IV. Protection contre la foudre | 12 |
| IV.1 Point d'impact | 12 |
| IV.2 Modèle électro géométrique | 13 |
| IV.3 Zone de protection..... | 14 |
| IV.4 Protection d'une éolienne contre la foudre | 14 |
| V. Système de mise à la terre | 15 |
| V.1 Définition..... | 15 |

Sommaire

| | | |
|--|----|------------|
| V.2 Rôle des systèmes de mise à la terre | 16 | |
| V.3 Configuration des systèmes de mises à la terre des éoliennes | 17 | VI. |
| Conclusion | 18 | |

Chapitre 2 : Comportement fréquentiel d'un système de mise a la terre d'une éolienne

| | | |
|--|----|--|
| I. Introduction | 19 | |
| II. Présentation du méthodologie | 19 | |
| III. Théorie des antennes | 19 | |
| III.1 hypothèses | 20 | |
| III.2 Homogénéité des sols | 21 | |
| III.3 caractéristiques électrique des sols..... | 21 | |
| IV. Approximation des files mince | 21 | |
| IV.1 principe général du modèle | 22 | |
| IV.2 Expression du champ électrique..... | 22 | |
| IV.3Modélisation d'un système de mise à la terre par théorie des antennes..... | 25 | |
| IV.4 Expression rigoureuse pour un conducteur entré dans un sol homogène | 26 | |
| IV.5 Résolution de l'équation intégrale par la méthode des moments..... | 27 | |
| IV.6 Approximation du courant dans la pris de terre..... | 28 | |
| V. Modélisation d'une éolienne muni d'un système de protection | 30 | |
| V.1 Calcul de la répartition des courants transitoire dans l'éolienne..... | 31 | |
| V.2 Formalisme des dipôles Hertiens | 31 | |
| V.3 Champs électromagnétiques rayonnés par un dipôle..... | 32 | |
| VI. Conclusion | 33 | |

Chapiter 3: Applications et résultats

| | | |
|---|----|--|
| I. Introduction | 34 | |
| II. L'outil de modélisation | 34 | |
| II.1 Le logiciel NEC 4..... | 34 | |
| II.2 Les composants de NEC..... | 35 | |
| III. Modélisation de la source (courant de loudre) | 35 | |
| IV. Application | 36 | |
| IV.1 Système de mise à la terre des éoliennes..... | 36 | |

Sommaire

| | |
|--|------------|
| IV.2 Calcul des courants dans une éolienne muni de sa mis à la terre..... | 37 |
| IV.3 Discussions..... | 39 |
| V. Champ électromagnétique rayonné par une turbine éolienne | ... |
| V.1 Distribution spatial du champ électromagnétique..... | 40 |
| V.1.1 Champ électrique..... | 42 |
| V. 2 Champ électrique le long d'un profil de l'interface..... | 44 |
| V.2.1 Champ électrique..... | 44 |
| V. 2.2 Champ magnétique..... | 46 |
| VI Conclusion..... | 47 |

Références bibliographiques Annexe

Annexe

Liste de figures et tableaux

Liste de figures et tableaux

Liste de figures et tableaux

Chapitre 1 : Protection et technique d'analyse des défauts dans les réseaux électriques

| | | |
|------------|--|----|
| Fig. I.1 | Conversion de l'énergie cinétique du vent | 4 |
| Fig. I. 2 | Nacelle avec deux anémomètres | 5 |
| Fig. I. 3 | la formation de foudre..... | 9 |
| Fig. I. 4 | Classification des coups de foudre..... | 10 |
| Fig. I. 5 | défaut dans les pales; b) buron out de la pale et fusion de fil; 10 c)Effondrement et destruction de la pale. | |
| Fig. I.6 | vaporisation du récepteur; b) brûlure de surface; c) Ponctions d'obus; d) et 11 e) récepteur et surface..... | |
| Fig. I.7 | Turbines éoliennes exposés aux coups de foudre..... | 11 |
| Fig. I.8 | Modèle physique d'un impact d'une foudre sur une turbine éolienne..... | 12 |
| Fig. I.9 | Point d'impact sur une structure au..... | 13 |
| Fig. I.10 | Point d'impact sur une turbine éolienne..... | 13 |
| Fig. I.11 | Identification de la zone de protection par la méthode des sphères d'une éolienne. | 14 |
| Fig. I.12 | Système de protection d'une éolienne contre la foudre..... | 15 |
| Fig. I. 13 | Structure des pales d'un système de protection contre la foudre..... | 15 |
| Fig. I.14 | Réseau éolien et mise à la terre de pylônes et d'un poste..... | 16 |
| Fig.I. 15 | mises à la terre | 17 |
| Fig. I.16 | modèle de mise à la terre d'éolienne..... | 18 |

Chapiter 2: Comportement fréquentiel d'un système de mise a la terre d'une éolienne

| | | |
|-----------|---|----|
| Fig. II.1 | Conducteur filaire..... | 23 |
| Fig. II.2 | représente une Illustration de la situation physique du problème..... | 25 |
| Fig. II.3 | Système de coordonnées..... | 26 |
| Fig. II.4 | Segmentation du système de mise à la terre..... | 28 |

Liste de figures et tableaux

| | | |
|------------|---|----|
| Fig. II.5 | Illustration de la situation physique..... | 30 |
| Fig. II.6 | Structure segmentée en dipôles..... | 31 |
| Fig. II. 7 | Source dans le l'air et point d'observation dans l'air..... | 32 |

Chapiter 3: Applications et résultats

| | | |
|---------------|--|----|
| Figure III.1 | Modèle de turbine éolienne étudiée dans ces applications..... | 37 |
| Figure III.2 | Une turbine éolienne munie d'une grille de mise à la terre..... | 38 |
| Figure III.3 | Variation du courant en différentes pointes de la turbine et de sa prise de terre..... | 39 |
| Figure III.4 | Configuration pour différentes grille de mise à la terre | 40 |
| Figure III.5 | Variation spatial de la composante E_x du champ électrique configuration 1..... | 40 |
| Figure III.6 | Variation spatial de la composante E_y du champ électrique configuration 1..... | 42 |
| Figure III.7 | Variation spatial du champ électrique E_t configuration 1..... | 42 |
| Figure III.8 | Variation spatial de la composante E_x du champ électrique configuration 2..... | 43 |
| Figure III.9 | Variation spatial de la composante E_y du champ électrique configuration 2..... | 43 |
| Figure III.10 | Variation spatial du champ électrique E_t configuration 2..... | 43 |
| Figure III.11 | Variation temporelle de la composante E_x du champ électrique configuration 1..... | 44 |
| Figure III.12 | Variation temporelle de la composante E_y du champ électrique configuration 1..... | 44 |
| Figure III.13 | Variation temporelle de la composante E_t du champ électrique configuration1 | 44 |

Liste de figures et tableaux

| | |
|---|----|
| Figure III.14 Variation temporelle de la composante E_x du champ électrique | |
| 45 | |
| configuration 2..... | |
| Figure III.15 Variation temporelle de la composante E_y du champ électrique | |
| 45 | |
| configuration 2..... | |
| Figure III.16 Variation temporelle du champ électrique E_t configuration 2..... | 45 |
| Figure III.17 Variation temporelle de la composante H_z du champ magnétique | 46 |
| configuration 1..... | |
| Figure III.18 Variation temporelle du champ magnétique H_t configuration 1..... | 46 |
| Figure III.19 Variation temporelle de la composante H_z du champ magnétique | 47 |
| configuration 2..... | |

Les tableaux

| | |
|---|--|
| Tab III.1 Paramètres des fonctions de l'Heidler correspondant au premier coup et arcs 36 en subséquent, d'après les données expérimentales par Berger | |
| Tab. III.2 Données du fichier d'entrée du code NEC 4 pour une éolienne munie d'une 38 grille de mise à la terre. | |
| Tab. III.3 Données du fichier d'entrée du code NEC 4 pour une éolienne munie d'une 41 grille de mise à la terre. | |

Liste de figures et tableaux

Listes des Acronymes et Symboles

Listes des Acronymes et Symboles

Listes des Acronymes et Symboles

| | |
|----------|--|
| NEC | Le code numérique électromagnétique. |
| CEM | La compatibilité électromagnétique. |
| FEM | La méthode des éléments finis. |
| TLM | Matrices des Lignes de Transmission. |
| FDTD | La méthode des Différences finies dans le domaine fréquentiel. |
| MOM | La méthode des moments. |
| FFT | La transformée de Fourier. |
| IFFT | La transformée de Fourier inverse. |
| EFIE | L'équation intégrale en champ électrique. |
| MFIE | L'équation intégrale en champ magnétique. |
| GW | Configuration des électrodes |
| GN | Paramètres du sol |
| FR | Fréquence |
| EX | Structure d'excitation |
| XQ | La commande d'exécution |
| En | La commande de fin d'exécution |
| G | La fonction de Green. |
| S | Point source. |
| P | Point d'observation. J La densité de courant |
| J | La densité de courant dans la matière |
| μ | Perméabilité magnétique et ϵ permittivité électrique. |
| L | Opérateur linéaire intégral-différentiel. |
| α | Coefficients constants |
| n | Fonction d'excitation connue (source). |
| g | Fonction de Green pour un espace infini. |
| g_1 | Fonction de réponse (inconnue). |
| f | Série des fonctions de base. |
| f_n | Distribution de Dirac. |
| δ | Volume contenant toutes les sources. |
| v | La position d'un point sur l'axe du segment. |

Listes des Acronymes et Symboles

| | |
|--------------------------------|---|
| r | La position d'un point sur la surface "S" du segment. |
| r' | Le vecteur unitaire le long de l'axe du segment m (tangent au segment). |
| τ_1 | La constante de temps de front et la constante de décroissance |
| τ_2 | La constante de temps de front et la constante de décroissance ω |
| Pulsation à la fréquence f_1 | |
| γ^1 | Permittivité complexe équivalente du milieu. ϵ_1 |
| Courant longitudinal. | |

Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale

Ces dernières années, les énergies renouvelables jouent un rôle important dans notre société. Les éoliennes deviennent une ressource d'énergies renouvelables d'une importance dans la production d'énergie électrique. Leur utilisation augmente considérablement dans production d'énergie électrique et il augmentera encore avec les nouvelles règles limitant les émissions de CO₂ par rapport à sources d'énergie conventionnelles.

L'énergie éolienne a été exploitée comme source d'électricité dans le monde entier depuis des décennies. Malgré sa longue durée l'histoire dans d'autres parties du monde, l'utilisation de l'énergie éolienne est relativement nouvelle à l'Algérie [1].

Donc la forte demande d'énergies renouvelables a augmenté le nombre et la taille des éoliennes. Pour ça but, les fabricants se sont récemment tournés vers plus turbines complexes pour capter la puissance sur une large plage des vitesses du vent et pour augmenter la puissance des turbines [1-6].

Les éoliennes sont souvent placées en haute altitude afin d'augmenter leur production d'énergie, ainsi, leur système de protection centre la foudre doit être entièrement intégré dans les différentes parties de la structure pour s'assurer que toutes les pièces susceptibles d'être des points d'attache de foudre. Ce courant de foudre doit être conduit en toute sécurité depuis la pièce jointe vers le sol sans dommages ou perturbations inacceptables aux équipements de l'éolienne. Par conséquent, il est nécessaire d'identifier les courants de foudre dans les structures de l'éolienne comme source principale d'interférence en ce qui concerne la compatibilité électromagnétique (CEM).

La connaissance exacte des champs électromagnétiques de l'écoulement de courant de foudre pour spécifier l'influence du champ à l'intérieur ou à l'extérieur du hub sur le personnel et les équipement de l'éolienne (générateur, système de contrôle, système mécanique, etc ...) qui permettra d'identifier les zones les plus exposées a fin de minimiser les dommages matériels à un niveau tolérable dans l'installation des éoliennes. Il est intéressant de savoir qu'il existe plusieurs méthodes numériques pour analyser l'impact électromagnétique d'un coup de foudre sur une éolienne.

Ainsi que les études de compatibilité électromagnétique nécessitent souvent la prise en compte l'écoulement des courants transitoires vers le sol à travers des prises de terre. Si en basse fréquence une prise de terre se comporte comme une simple résistance, par contre en

Introduction générale

haute fréquence, au moment d'un choc de foudre son comportement devient plus complexe en faisant intervenir des composantes inductives et capacitives.

Dans ce travail de mémoire de master, notre intérêt est porté sur l'analyse du comportement transitoire d'une turbine éolienne suite à un impact direct d'un coup de foudre sur son système de protection. Lorsqu'une onde de foudre tombe directement sur une pale au la nacelle de la turbine, des courants de fortes amplitudes circulent dans la partie électrique des pales puis dans la tour ensuite se dissiperait dans le sol à travers une prise de terre. Pour présenter notre travail, nous proposons trois chapitres. Des généralités sur les systèmes éoliens sont présentées dans le premier chapitre. Le second chapitre comporte la modélisation des éoliennes en régime transitoire. Dans ce chapitre nous présentons quelques détails de la théorie des antennes, après un rappel théorique sur l'équation générale intégrale en champ électrique, nous indiquons comment il est possible de l'adapter aux structures filiformes et comment on aboutit à un système d'équations linéaires en utilisant la méthode des moments et en termine.

Dans le troisième chapitre nous proposons quelques résultats pour des applications que nous réalisons par utilisation du logiciel NEC 4 élaboré à partir de la théorie des antennes pour identifier le champ électromagnétique autour de la turbine.

Chapitre I

Protection et technique d'analyse des défauts dans les réseaux électriques

I. Introduction

L'énergie éolienne est une source d'énergie propre, durable comparée à celle due aux combustibles fossiles utilisée par l'homme depuis très longtemps déjà. Pour cela, la plupart des pays du monde ont pensés d'augmenter le taux énergétique via les sources renouvelables, notamment, l'Europe (l'Allemagne, Danemark, ...), l'Amérique (USA, Canada, ...).

Ce chapitre commence par décrire les composants de base d'une éolienne. Un bref rappel des origines et des conséquences du phénomène de foudre qui est responsable de plus de la moitié des perturbations qui affectent le réseau électrique où nous nous intéressons au cas d'un impact direct d'une décharge orageuse sur une turbine éolienne.

Nous terminons ce chapitre par, une introduction aux systèmes de protection des éoliennes contre l'impact direct de l'onde de foudre. Une discussion sur la configuration des systèmes de mise à la terre des éoliennes est également donnée. **II. Les turbines éoliennes**

II.1 Définition de l'énergie éolienne

Le principe de production de l'énergie éolienne est assez simple. L'énergie cinétique générée par la force du vent est transmise à une turbine (aérogénérateur) ; cette force fait tourner les pales d'un rotor ; L'énergie mécanique produite est ainsi transformée en énergie électrique. L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffusée, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver etc'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). Les matériaux nécessaires à la fabrication des différents éléments (nacelle, mât, pales et multiplicateur notamment) doivent être technologiquement avancés. L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable aux autres énergies sans pour autant prétendre les remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite étant largement plus faible). Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer (fermes éoliennes Offshore) où la présence du vent est plus régulière [1].

On peut classer ces éoliennes selon leur puissance nominale :

- Éoliennes de petite puissance : inférieure à 40 kW.
- Éoliennes de moyenne puissance : de 40 à quelques centaines de kW.
- Éoliennes de forte puissance : supérieure à 1 MW

II.2 Fonctionnement d'un système éolien

Un aérogénérateur a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, ce système est connu sous l'appellation anglaise Wind Energy Conversion Systems (WECS), (Figure I.1). Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique ; d'une manière générale, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est indispensable. Pour parvenir à cet objectif, idéalement. Une éolienne doit comporter :

- Un système qui permet un contrôle mécanique (orientation des pales de l'éolienne, orientation de la nacelle).
- Un système capable de la contrôler électriquement (Machine électrique associée à l'électronique de commande) [1].

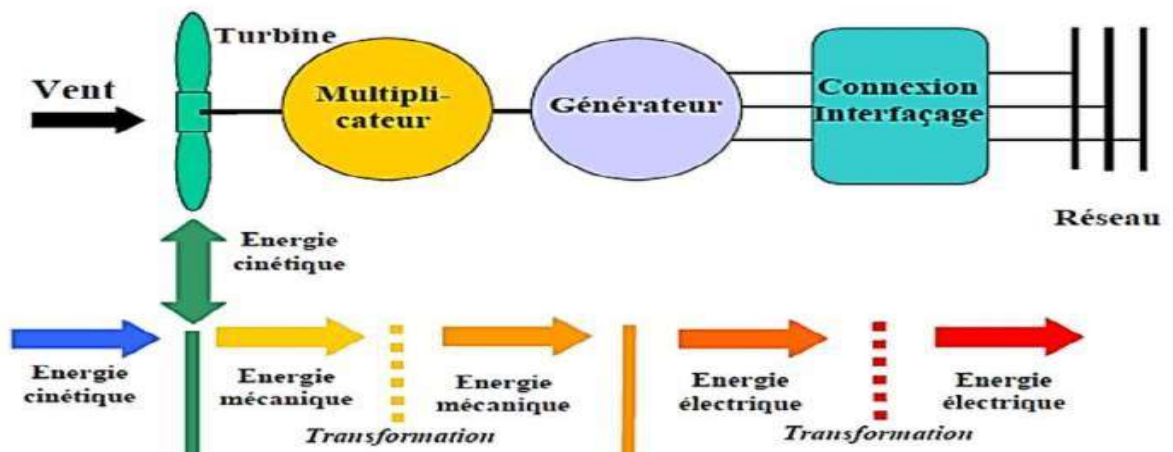


Fig. I.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent.

II.3 Descriptions des installations des éoliennes

On distingue deux types d'installations sur le site [2]:

- Les infrastructures de fonctionnement des éoliennes :
 - Les VRD dont les chemins d'accès et aires de grutage utilisées pour la maintenance.
 - Le raccordement électrique entre les éoliennes ainsi qu'au réseau électrique est réalisé en réseau enterré et emprunte majoritairement les accotements des voies d'accès existantes.
 - Le poste de livraison et les batteries : Ils sont localisés sur la zone technique entre E4 et E5 □ Les éoliennes.

Toutes les éoliennes qui composent le parc sont de même type, de hauteur égale (130 m en bout de pales) et de matériau et couleur sobres (RAL7035 - gris clair).

L'éolienne VESTAS V100 est une éolienne d'une puissance nominale de 2000 kW. La puissance disponible du parc éolien de Grand Rivière est par conséquent de 14 MW. L'éolienne VESTAS V100 est essentiellement composée des éléments suivants

- Une nacelle est en fibre de verre, équipée de 2 capteurs de vent et de balisages
- Un rotor de 100 m de diamètre. Il est composé de trois pales, un moyeu, de trois raccords rotatifs et de trois entraînements pour le calage des pales.
- Un mât en acier d'une hauteur de 80 m, équipée à son sommet d'une nacelle qui s'oriente en permanence en direction du vent. L'échelle et le cordage de sécurité, les plates-formes de repos et de travail, l'armoire électrique, le transformateur, se trouvent à l'intérieur du mât.

L'orientation de l'éolienne est adaptée automatiquement à la direction du vent par le système de commande. Le rotor est contre le vent.

II.4 Composants d'une éolienne

On peut classer une éolienne en plusieurs éléments principaux [2].

II.4.1. La nacelle :

Une vue d'ensemble de la nacelle est présentée sur la figure suivante.



Fig. I.2 Nacelle avec deux anémomètres.

La nacelle abrite plusieurs éléments fonctionnels :

- Le générateur transforme l'énergie de rotation du rotor en énergie électrique ;
- Le multiplicateur (certaines technologies n'en utilisent pas) ;
- le système de freinage mécanique ;
- Le système d'orientation de la nacelle qui place le rotor face au vent pour une production optimale d'énergie ;
- Les outils de mesure du vent (anémomètre, girouette) ;
- Le balisage diurne et nocturne nécessaire à la sécurité aéronautique.

L'énergie produite est soit stockée dans des batteries au moyen des convertisseurs, soit transmise au réseau extérieur via le poste de livraison intégrant 2 transformateurs [2].

a. La couronne d'orientation

La direction du vent est mesurée de manière continue à hauteur de moyeu par deux appareils indépendants. Tous les anémomètres sont chauffés. A partir des vitesses de vent d'environ 10km/h (3m/s) mesurées par les anémomètres, les pales se mettent en mouvement. Si la direction du vent relevée diffère du positionnement de la nacelle d'une valeur supérieure à la valeur limite, la nacelle est réorientée via plusieurs entraînements constitués d'un moteur électrique, d'un engrenage à plusieurs niveaux et de pignons d'entraînement. Les freins d'orientation sont activés

b. La génératrice

La transformation de l'énergie éolienne en énergie électrique s'effectue grâce à une génératrice asynchrone triphasée à rotor bobiné de 2000 kW à 50Hz, avec une tension de 480 à 690 V. La tension est ensuite élevée jusqu'à 20 000 V par deux transformateurs au niveau du poste de livraison pour être ensuite injectée dans le réseau électrique public. Elle est maintenue à une température de fonctionnement optimale grâce au circuit de refroidissement.

c. Les freins

Lorsque la mesure de vent, indiquée par l'anémomètre, atteint des vitesses de plus de 70 km/h (19m/s), l'éolienne cesse de fonctionner pour des raisons de sécurité. Deux systèmes de freinage permettront d'assurer la sécurité de l'éolienne, dont un est au niveau de la nacelle : il s'agit d'un frein mécanique sur l'arbre de transmission à l'intérieur de la nacelle. Ce frein soutient le frein aérodynamique (2ème frein : les pales prennent une orientation parallèle au vent) dès que la vitesse de rotation définie est dépassée et ralentit le rotor jusqu'à l'arrêt. La puissance de freinage est régulée par divers programmes en fonction du déclencheur du freinage. Les programmes de freinage préviennent les pics de charge. Une fois l'éolienne arrêtée, le rotor peut être bloqué ou tourner au ralenti.

II.4.2. Le mat

Le mât est un mât tubulaire cylindrique en acier. L'échelle d'ascension avec son système de protection antichute et les plateformes de repos et de travail à l'intérieur du mât permettent un accès à la nacelle à l'abri de la météo.

a. Fondation

La construction des fondations dépend de la nature du sol du site d'implantation prévu. Pour l'ancrage du mât, une cage d'ancrage est bétonnée dans les fondations. Le mât et la cage d'ancrage sont vissés ensemble.

b. Le transformateur électrique

Aucun transformateur n'est présent dans les éoliennes. Les transformateurs sont situés au niveau du poste de livraison qui en comporte 2 de 2500kVa et d'un régulateur de puissance. Ils permettent d'élever la tension électrique et d'adapter les caractéristiques du courant à l'interface entre le réseau privé et le réseau public.

c. L'armoire électrique

Les composants électroniques les plus importants sont situés dans l'armoire électrique dans le pied du mât. L'armoire électrique contient, séparément, le convertisseur de fréquence, l'ordinateur de gestion d'exploitation, l'écran de contrôle d'ordinateur, l'interrupteur principal, les fusibles ainsi que des connexions pour la communication et les câbles de puissance.

Ils sont équipés d'organes de coupures et de protection adéquats et correctement dimensionnés.

Tout fonctionnement anormal des composants électriques est suivi d'une coupure de la transmission électrique et à la transmission d'un signal d'alerte vers l'exploitant qui prend alors les mesures appropriées. **II.4.3. Le rotor**

Le rotor permet de convertir l'énergie cinétique du vent en mouvement de rotation de l'éolienne.

Il est composé de trois pales, d'un moyeu de rotor, de roulements et d'entraînements pour l'orientation des pales. **a. Le moyeu**

Le moyeu du rotor est une construction en fonte modulaire et rigide. Le roulement d'orientation de pale et la pale sont montés dessus. **b. Les pales**

La longueur totale d'une pale est de 50 mètres. Elle est constituée de deux moitiés collées ensemble. Le matériau du noyau de cette construction à plusieurs couches est en balsa et mousse de PET. Les porteurs longitudinaux, qui se composent de plastique renforcé à la fibre de carbone, renforcent la structure de la pale. Chaque pale est pourvue d'une pointe en aluminium qui dévie le courant de foudre par un grillage de cuivre vers le moyeu du rotor.

II.4.4. Système auxiliaire de mise à la terre

Ces éoliennes respectent la norme EN 62 305 – 3 (Décembre 2006) et sont mises à la terre. En effet, le système de mise à la terre (notamment dans le cas où les éoliennes sont frappées par la foudre) permet d'évacuer l'intégralité du courant de foudre. Le système de protection foudre de l'éolienne également dimensionné pour prévenir toute dégradation des pales de l'éolienne conformément à la norme IEC 61400-24, qui peut être une conséquence indirecte de la foudre.

Le système de protection foudre LPS (Lightning Protection System) est composé de récepteurs foudre, dont le courant est dévié vers la terre entourant la base de l'éolienne.

II.4.5. Câblage électrique

Le câblage électrique des éoliennes comprend deux parties distinctes :

- Le câblage inter-éolien,
- Le câblage de raccordement du parc éolien au poste source le plus proche

La jonction entre les deux parties se fait au niveau du poste de livraison du parc éolien.

L'ensemble est réalisé en lignes de 20 000 Volts enterrées à une profondeur située entre 0,8 et 1 m. Pour chaque câble, des gaines blindées seront utilisées pour assurer la protection et réduire le niveau de rayonnement électromagnétique [2].

III. Le phénomène de foudre

III.1 Défauts d'origines atmosphériques

Les différents composants des réseaux sont conçus, construits et entretenus de façon à réaliser le meilleur compromis entre coût et risque de défaillance. Ce risque n'est donc pas nul et des incidents ou défauts viennent perturber le fonctionnement des installations. Certaines régions, montagneuses par exemple, sont beaucoup plus exposées que d'autres à la foudre ; selon les niveaux de tension, celle-ci est responsable de 60 à plus de 80% des défauts.

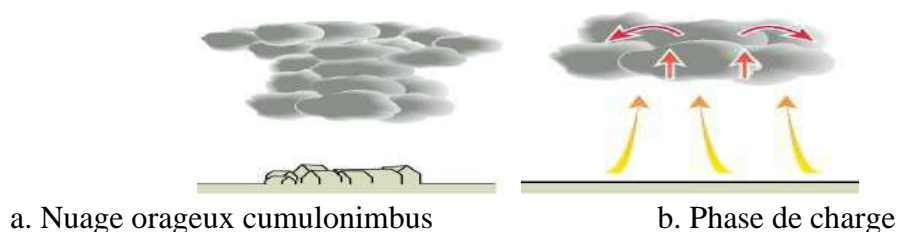
L'interaction de la foudre avec les structures de grandes hauteurs, comme des tours de télécommunication, les pylônes, et les turbines éoliennes, a récemment attiré une attention considérable les ingénieurs chargés de la protection du réseau électrique contre la foudre.

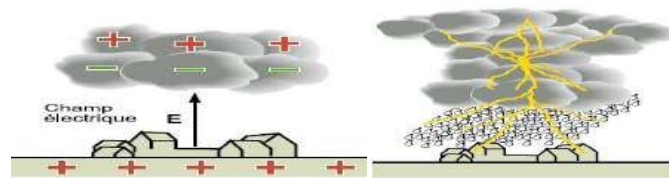
III.2 Formation de la foudre

Le phénomène atmosphérique de la foudre est dû à la décharge subite de l'énergie électrique accumulée à l'intérieur des nuages orageux.

En cas d'orage, le nuage se charge très rapidement d'électricité. Il se comporte alors comme un condensateur géant avec le sol. Lorsque l'énergie emmagasinée devient suffisante, les premiers éclairs apparaissent à l'intérieur du nuage (phase de développement).

Dans la demi-heure suivante, les éclairs se forment entre le nuage et le sol. Ce sont les coups de foudre. Ils s'accompagnent de pluies (phase de maturité) et de coups de tonnerre (dû à la brutale dilatation de l'air surchauffé par l'arc électrique). Progressivement, l'activité du nuage diminue tandis que le foudroiement s'intensifie au sol. Il s'accompagne de fortes précipitations, de grêle et de rafales de vent violentes (phase d'effondrement)[3].





c. Phase de développement.

d. Phase de maturité et d'effondrement.

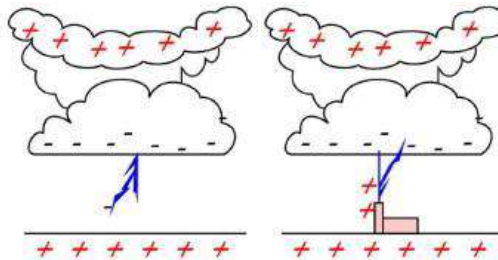
Fig. I.3 Formation de la foudre.

III.3 La classification des coups de foudre

Dans un schéma classique, une décharge nuage-sol est toujours précédée d'une première décharge peu lumineuse, appelée traceur, qui progresse à travers l'air neutre avec une faible vitesse.

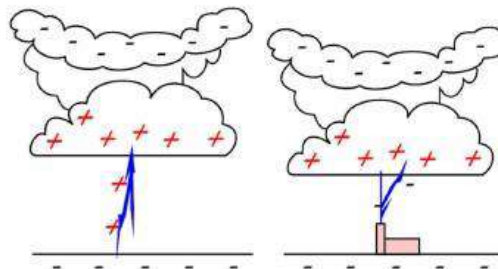
On distingue les décharges de foudre nuage-sol (Figure. I.4) par :

- La direction ascendante ou descendante du traceur,
- Le signe des charges portées à l'extrémité du traceur.



a. Traceur négatif descendant

b. Traceur positif ascendant issu d'une structure élevée.



c. Traceur positif descendant

d. Traceur négatif ascendant issu d'une Structure élevée.

Fig. I.4 Classification des coups de foudre.

Les décharges électriques déclenchées par traceurs ascendants sont relativement rares et apparaissent aux sommets des montagnes ou au niveau de structures élevées. Les coups de foudre descendants positifs représentent environ 8% de l'ensemble des décharges nuage-sol. Dans les régions tempérées, 90% des coups de foudre sont de types négatifs descendants [4].

III.4 Les effets de la foudre sur le réseau éolien

La foudre peut affecter les réseaux d'énergie éolienne par divers mécanismes d'agression :

- L'impact direct sur les conducteurs filaires : la décharge atteint directement les conducteurs de la ligne ; le courant de foudre se répartit dans la ligne et circule dans les deux sens. Il se crée alors des surtensions électriques fonction du courant de foudre ;
- L'impact direct sur les pylônes : lorsque la foudre frappe directement un pylône de réseau éolien, le courant de foudre s'écoule à la terre. Le pylône subit alors une élévation de potentiel qui est fonction de l'impédance de mise à la terre du pylône.
- Le rayonnement électromagnétique de la foudre génère un champ électromagnétique transitoire qui induit des surtensions sur les lignes de transmission aériennes proches. Du fait de la forte radiation électromagnétique générée, le courant des arcs en retour est considéré comme la source principale des surtensions induites. Ces surtensions occasionnent des dysfonctionnements et peuvent endommager dans certains cas, les circuits électroniques, les calculateurs et automates[5].

III.5 Classification des dommages causés par la foudre aux pales d'éoliennes

Le groupe *CIGRE C4.409* a proposé une classification des endommagements d'impact d'une onde de foudre sur les pales d'une éolienne en fonction de leur gravité figure I.5.



Fig. I.5 a) défaut dans les pales ; b) buron out de la pale et fusion de fil ; c) Effondrement et destruction de la pale.

Les dommages sont classés comme catastrophiques, graves, normaux et mineurs. Les dommages catastrophiques sont ceux qui nécessitent un arrêt immédiat de la turbine. Certains de ces dommages sont la rupture et l'effondrement de la lame (figures I.5a et 5c), épaulement et fusion du conducteur de descente (figure I.5b), etc.

Les dommages graves nécessitent une réparation immédiate. Ces dommages comprennent la fissuration de la surface (figure I.6a), la déchirure (figure I.6b) et la perte du récepteur (figure I.6c) [6].

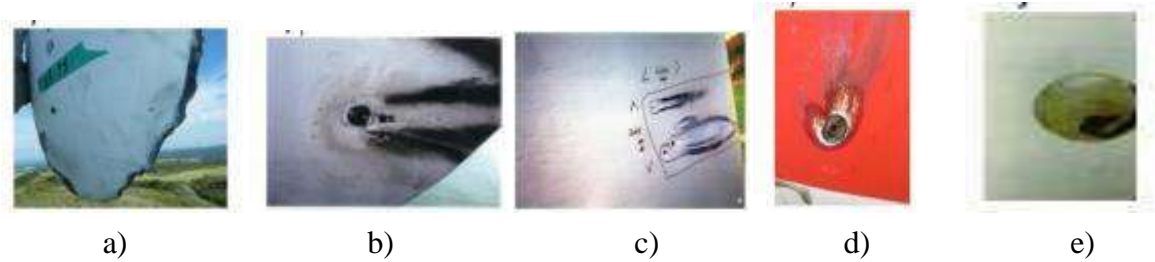


Fig. I.6. a), vaporisation du récepteur ; b) brûlure de surface ; c) Ponctions d'obus ; d) et e) récepteur et surface.

Les dommages qui n'impliquent pas de réparation immédiate sont regroupés comme mineurs. Certains de ces dommages sont la vaporisation du récepteur (Figure 6a), brûlure de surface (Figure 6b), crevaisons (Figure 6c), érosion (Figure 6d et e) et autres dommages mineurs [6].

III.6 Une éolienne endommagée par la foudre

La foudre est imprévisible et les systèmes de protection ne permettent pas toujours d'éviter les effets de la foudre sur les éoliennes. L'impact de la foudre peut être d'une intensité telle que l'air humide présent dans la pale se dilate brusquement sous l'effet de la chaleur de la foudre, provoquant l'éclatement localisé de la pale. Il faut alors arrêter et réparer l'éolienne afin d'empêcher la propagation de la foudre, qui risquerait d'entraîner des dégâts plus importants [7].



Fig. I.7 Turbines éoliennes exposés aux coups de foudre [7].

Lorsque la foudre frappe les pales d'une éolienne, elle endommage la pointe avec un effet de course et une élévation rapide de la température. Le courant de foudre tente d'atteindre le sol de la manière la plus rapide possible et endommage le boîtier et l'équipement à l'intérieur de la nacelle tels que le rotor, la boîte de vitesses et le générateur.

III.7 La menace de la foudre sur les turbines éoliennes

L'élévation des éoliennes atteint jusqu'à 200 mètres avec des tours de 40 à 140 mètres et de 20 à 60 mètres de longueurs de pale. Les turbines sont généralement placées comme les structures les plus hauts autours pour éviter tout obstacle et avoir la plus grande efficacité possible. Les pales sont en matériau composite en fibre de verre, mais elles sont sujettes à l'éclairage en raison des câbles conducteurs à l'intérieur. De plus, la tour est en matériau conducteur et c'est également un autre point attractant pour les foudres.

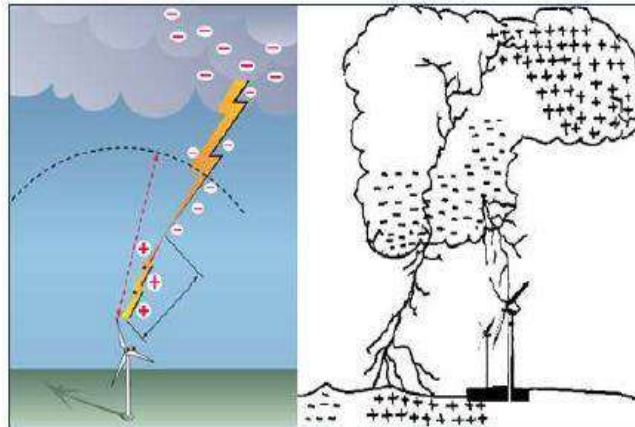


Fig. I.8 Modèle physique d'un impact d'une foudre sur une turbine éolienne.

La foudre frappe principalement les éoliennes à la pointe des pales. Les pales ont conducteurs en cuivre à l'intérieur et des parafoudres circulaires sur la surface pour la protection contre la foudre. Le but de cette combinaison est d'attirer l'éclairage des parafoudres et de transférer le courant au conducteur et enfin au système de mise à la terre [7].

Cependant, la tempête d'éclair provient principalement de fortes pluies et cela rend la surface de pale et la partie intérieure humides et suffisamment conductrices pour que le courant de l'éclair continue comme un chemin vers le sol. Comme toute autre source de haute tension, la foudre préfère suivre de grandes surfaces et, par conséquent, le courant de foudre coule sur la surface au lieu du conducteur de cuivre à l'intérieur de la pale. **IV. Protection contre la foudre**

IV.1 Point d'impact

Au moment du saut final, l'impact serait le point à la terre où l'intensité du champ électrique est la plus élevée. Sur un sol plan, ce sont les points culminants (tours, roches, arbres, etc.) qui facilitent le développement d'une telle décharge atmosphérique. La figure I.9 schématise les étapes intervenant dans le coup de foudre au sol.

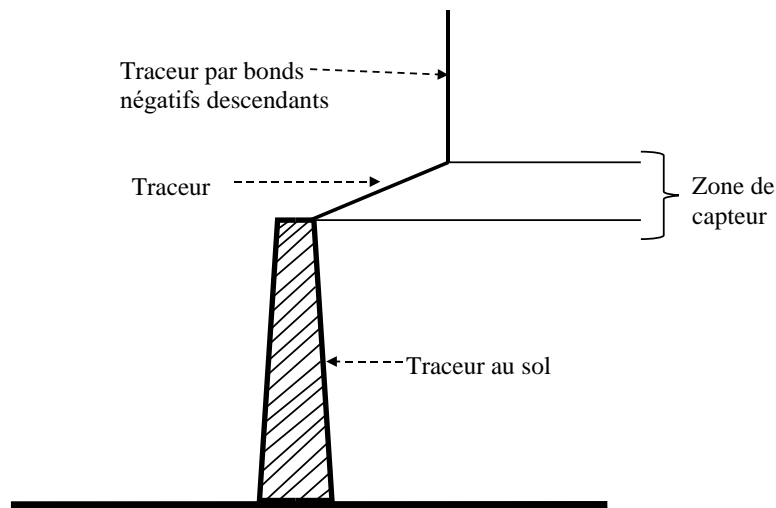


Fig. I.9 Point d'impact sur une structure au sol.

IV.2 Modèle électro géométrique:

Afin de prédire les points d'impact de la foudre et de dimensionner ainsi des dispositifs susceptibles de la capter et d'éviter qu'elle ne frappe directement ce l'on souhaite protéger des impacts directs, des modèles électro géométriques ont été développés.

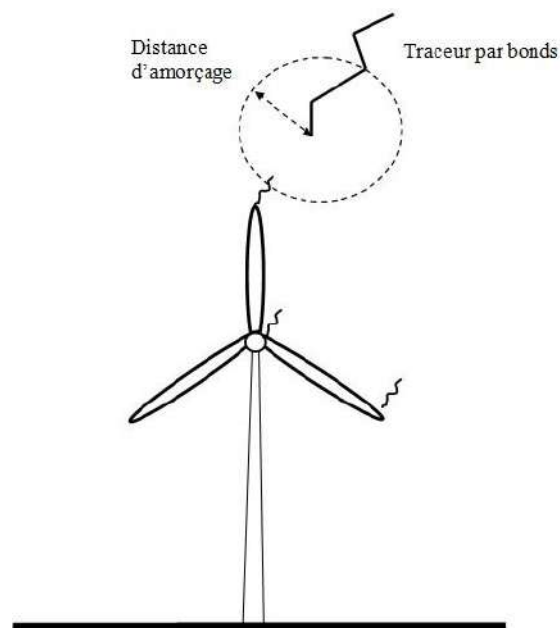


Fig. I.10 Point d'impact sur une turbine éolienne.

Des mesures expérimentales et des enregistrements vidéo de coups de foudre tombant sur différents objets, ont permis de définir une distance d'amorçage (d), la distance entre l'extrémité du traceur par bonds descendant et un objet au sol pour laquelle une décharge ascendante peut se développer à partir de cet objet. Cette distance d appelée distance d'amorçage est donnée, dans le cas l'objet au sol est une turbine éolienne, par l'expression suivante : $D=10 \cdot I^{0.65}$ Où : I est la valeur crête du courant de foudre, exprimé en kA.

IV.3 Zone de protection

Pour mettre en relief la notation de la zone de protection ou capture, une méthode graphique simple, appelée méthode de la sphère fictive a été mise au point. Son principe consiste à considérer la sphère de rayon « d » (Distance d'amorçage) et qui a pour centre la tête du traceur par bonds. La sphère se met en mouvement dans toutes les directions, sans jamais perdre le contact avec le sol, soit avec un objet proéminent. La zone de protection est déterminée par la surface non touchée par le contour de la sphère fictive [8].

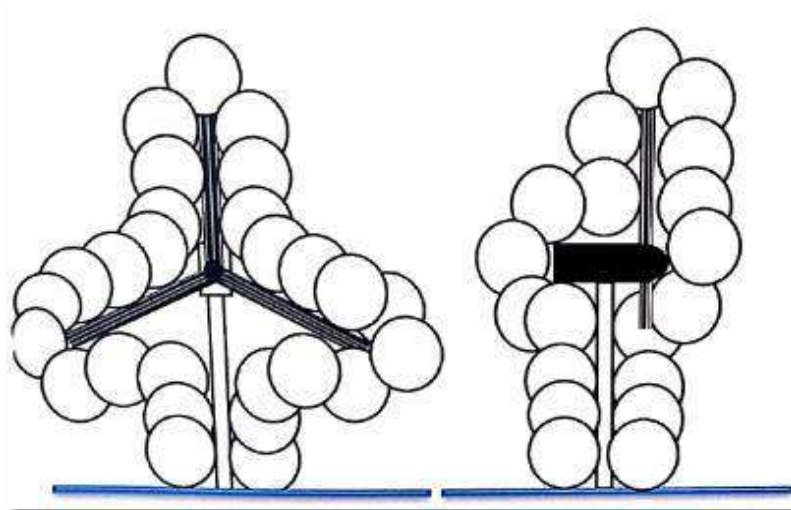


Fig. I.11 Identification de la zone de protection par la méthode des sphères d'une éolienne.

IV.4 Protection d'une éolienne contre la foudre

La protection de l'éolienne contre la foudre et les surtensions revêt une importance particulière où celles-ci, raison de leur complexité, de leur hauteur et de la position risquent d'être frappées par la foudre. Il existe des moyens de protéger les éoliennes contre la foudre. Les appareils modernes sont ainsi équipés de paratonnerres fixés à l'extrémité de chaque pale et reliés à la terre par un câble en cuivre placé à l'intérieur de la pale. Ce système protège efficacement les éoliennes, qui subissent chaque année de nombreux impacts de foudre.

Les parafoudres sous forme de disques métalliques circulaires sont placés sur les deux côtés de la surface de pale. Ces parafoudres sont connectés les uns aux autres par des conducteurs de foudre à l'intérieur de la lame qui sont collés ensemble à des conducteurs descendants à l'intérieur de la tour et enfin au système de mise à la terre en bas figure I.12.

Donc, une éolienne comportant à l'extrémité de ses pales un système de protection contre la foudre. La surface de la pale comporte au moins un récepteur de foudre métallique, à l'extrémité distal de la pointe de la pale. La pale comporte une enveloppe configurée en partie par un stratifié renforcé de fibres.

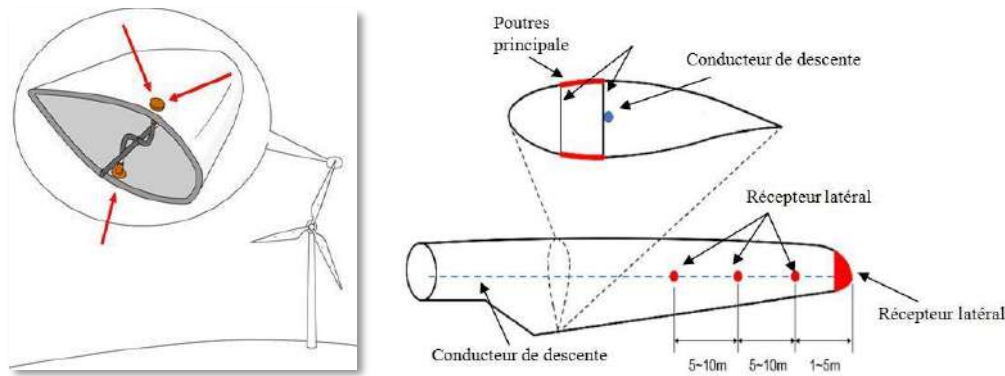


Fig. I.12 Système de protection d'une éolienne contre la foudre.

Donc, une éolienne comportant à l'extrémité de ses pales un système de protection contre la foudre. La surface de la pale comporte au moins un récepteur de foudre métallique, à l'extrémité distal de la pointe de la pale. La pale comporte une enveloppe configurée en partie par un stratifié renforcé de fibres.

La pale comporte un élément électro-conducteur descendant sous forme de treillis métallique. L'élément électro-conducteur descendant ne s'étend que sur une certaine distance à partir de l'extrémité distale de la pointe de la pale, cette distance étant supérieure à une distance entre la position du récepteur de foudre et l'extrémité distale de la pointe de la pale, ce qui permet de garantir que la foudre tombe plutôt sur le récepteur que sur l'élément électro-conducteur descendant[8].

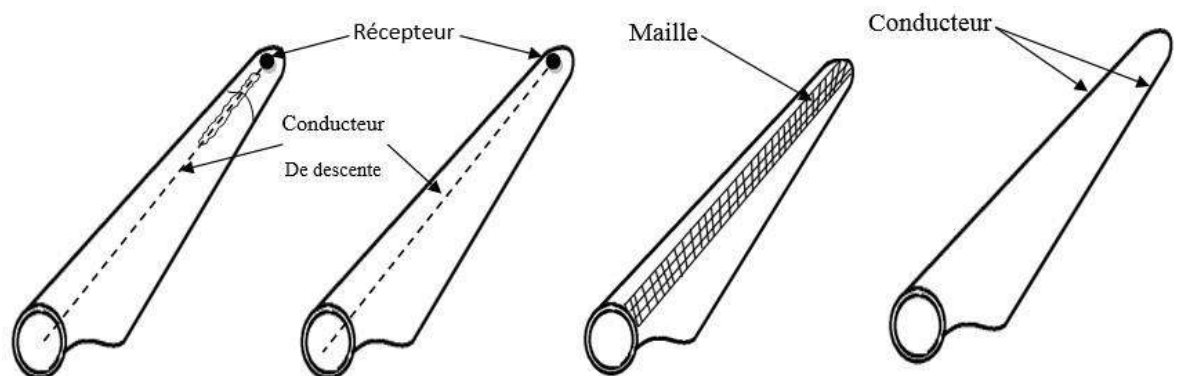


Fig. I.13 Structure des pales d'un système de protection contre la foudre.

V. Système de mise à la terre

V.1 Définition

La protection par les systèmes de mise à la terre des installations éoliennes contre la foudre et les surtensions revêt une importance particulière dans la mesure où celles-ci, en raison de leur complexité, de leur hauteur et de leur position exposée, risquent d'être frappées par la foudre.

Nous présentons ici ce que nous entendons désigner par l'expression, système de mise à la terre.

Les configurations classiques de systèmes de mise à la terre équipant les réseaux éoliens, qui seront considérées tout au long de ce mémoire, seront décrits.

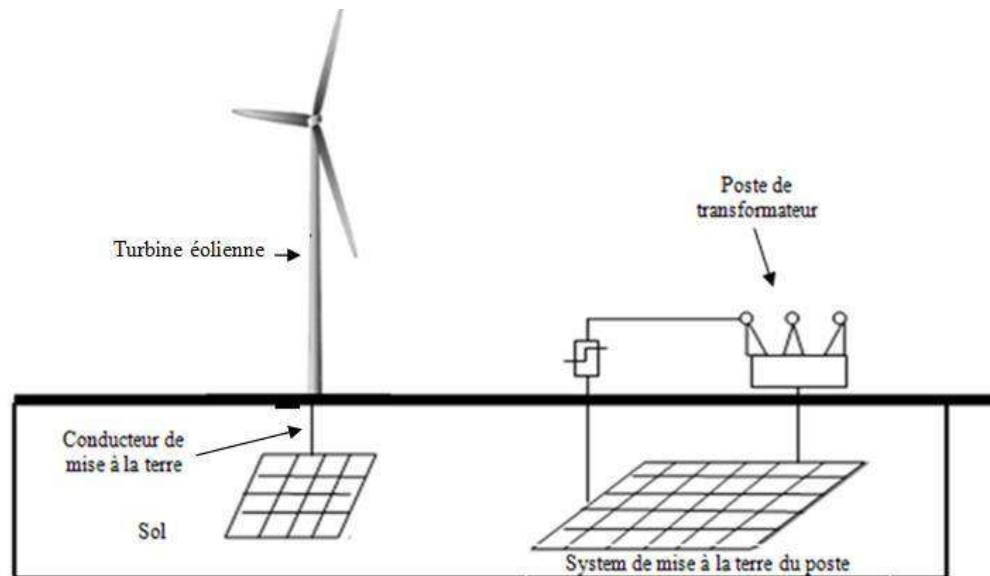


Fig. I.14 Réseautage de terre d'un pylône et d'un poste.

V.2 Rôle des systèmes de mise à la terre

Les documents [1] définissent le rôle et les objectifs des systèmes de mise à la terre. D'une manière générale, il s'agit de relier les masses à la terre par l'intermédiaire d'un ou plusieurs conducteurs afin de permettre aux courants permanents et aux courants de défaut de s'y écouler.

Une bonne mise à la terre doit assurer :

- La sécurité des personnes à proximité des installations électriques éoliennes, notamment dans les zones fréquentées ;
- La protection des équipements (qualité de service) ou des installations de tiers, reliés, ou à proximité ;

Le courant à écouler dans le sol peut être de différente nature :

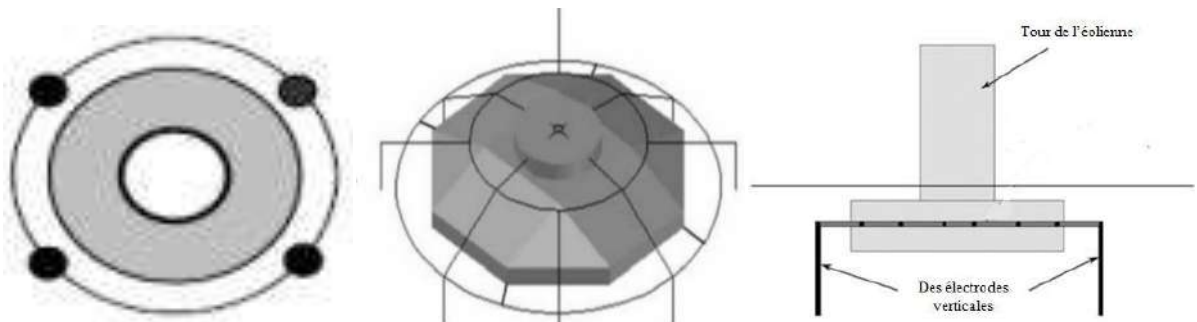
- Un courant à fréquence industrielle (par exemple à la suite d'un court-circuit phase - terre) ;
- Un courant harmonique ;
- Un courant transitoire d'origines diverses (foudre, manœuvre, etc....)

Un système de mise à la terre : peut être composé d'un ou plusieurs sous-systèmes qui ne sont pas nécessairement connectés directement, mais qui sont mutuellement influencés, par couplage électromagnétique. On représente ainsi en la figure I.14, le cas d'un réseau éolien. On admet que les pylônes et les postes sont suffisamment éloignés pour que l'on puisse considérer séparément

leur mise à la terre. Chaque système de mise à la terre est relié en un ou plusieurs points de connexion au réseau électrique[5].

V.3 Configuration des systèmes de mises à la terre des éoliennes

La configuration d'un système de mise à la terre dépend de la nature de la structure connectée, de l'environnement, et des performances recherchées. Nous nous intéresserons ici aux prises de terre des pylônes d'énergie éolienne et des postes de transformation qui composent le réseau. Le système de mise à la terre d'une éolienne unique est normalement réalisé en plaçant une électrode annulaire autour de la fondation et en liant à la tour à travers la structure de la fondation. Conformément aux normes correspondantes le diamètre minimal des électrodes de terre incorporées dans le béton est de dizaines de millimètres (acier rond plein). Des tiges verticales ou des électrodes en bande sont souvent utilisées avec l'électrode en anneau pour obtenir la valeur de résistance 10Ω pour un système de mise à la terre individuel d'un turbin.



Vue de dessus

Fig. I.15 mise à la terre.

L'interconnexion des systèmes de mise à la terre est souvent réalisée entre des éoliennes en reliant les systèmes entre eux. Une telle interconnexion forme un système d'électrodes de terre étendu occupant une grande surface et fournit une impédance beaucoup plus faible. Différents chercheurs ont étudié les systèmes de mise à la terre d'éoliennes, y compris l'électrode étendue interconnectée dans des conditions de fréquence d'alimentation et de transitoire. La référence a effectué des mesures sur site de la résistivité du sol et du système d'électrodes de terre prolongées d'un parc éolien en utilisant la méthode de la pente. Les valeurs mesurées de résistance à la terre étaient supérieures aux valeurs calculées obtenues à l'aide d'un circuit équivalent à paramètre locatif. Cette différence a été attribuée au remblayage des tranchées non compactées. Il a également été signalé que les conditions de résistivité du sol variaient considérablement d'un site à l'autre. Voici en quelques sortes les différents systèmes de mise à la terre des éoliens [5].

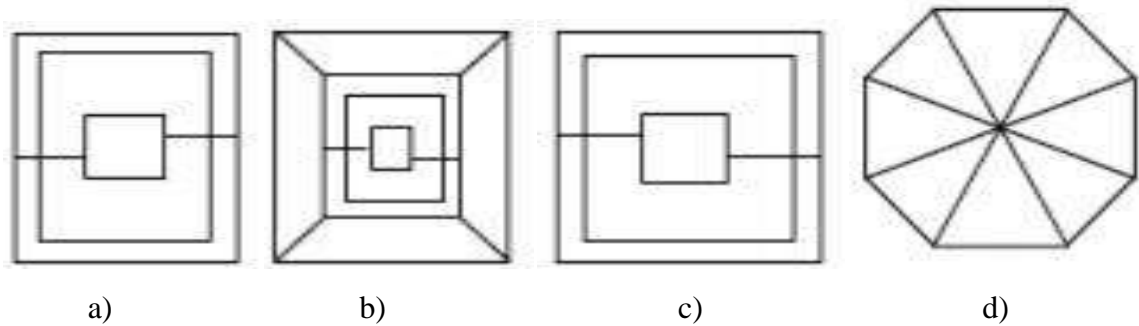


Fig. I.16 modèle de mise à la terre d'éolienne.

VI. Conclusion

En conclusion, ce chapitre présente les éléments de base d'une éolienne qui nous permettent de positionner le problème de notre travail.

Notre travail est consacré à quantifier le rayonnement électromagnétique de l'impact direct d'une onde de foudre sur une turbine éolienne muni de sa prise de terre, ce qui nous a permis de donner une présentation des turbines éoliennes, et sur son système de protection contre la foudre.

Afin de traiter ce problème par modélisation, dans le prochain chapitre nous exposons l'approche que nous avons utilisée dans notre travail.

Chapitre II
Comportement
fréquentiel d'un système
de mise a la terre d'une
éolienne

I. Introduction

Dans ce chapitre, après une brève présentation de l'état de l'art des principales méthodes numériques utilisées en électromagnétique ; nous exposons la méthode théorie des antennes que nous avons retenus pour réaliser notre travail de modélisation. Ce formalisme fréquentiel permet de modéliser une structure filaire située dans des milieux de propriétés physiques quelconques (air, sol et diélectriques) excitée par une excitation quelconque (générateur de courant, générateur de tension et onde électromagnétique). Cette approche est basée sur la résolution d'une équation intégrale par une technique numérique connue sous l'appellation de la méthode des moments.

Pour expliciter notre démarche, nous présentons le formalisme des dipôles et le concept de l'effet du sol ainsi que le calcul des courants transitoires.

II. Présentation et méthodologie

Notre objectif ici se résume à la nécessité de développer un modèle représentant le comportement des systèmes de mise à la terre des éoliens pour les études de transitoire de foudre dans le domaine fréquentiel. Parmi les différents types de modèles de systèmes de mise à la terre, nous avons choisi de nous appuyer, pour notre travail, sur le modèle électromagnétique présenté par la référence [4]. Cette approche se plaçant dans le domaine fréquentiel, nous allons donc l'exploiter afin de construire une représentation du système de mise à la terre qui englobe les transitoires de foudre. Nous utiliserons pour cela une matrice impédance pour le calcul du champ et du potentiel en un point du sol.

Nous proposons ici de représenter dans le domaine fréquentiel un système de mise à la terre possédant plusieurs points de connexion avec le réseau éolien par une matrice impédance.

III. Théorie des antennes

La méthode des équations intégrales, connue aussi sous l'appellation de théorie des antennes, est basée sur la résolution des équations de Maxwell, dans le domaine temporel ou fréquentiel, sous forme intégrale, dont l'inconnue est la densité de courant et échantillonnée par des éléments finis de frontières. C'est une formulation surfacique. Il s'agit de déterminer les champs à partir des charges et des courants. Dans la formulation intégrale, le champ électrique produit par les courants de surface est remplacé par son expression en termes de fonctions de Green, celles-ci n'étant autre que les solutions de la densité de courant. Cette méthode consiste à déterminer les distributions de courant induit à la surface d'une structure illuminée par une source connue, en mettant sous la forme d'une équation intégrale, la relation entre les courants induits, la fonction

de Green et la source. Elle implique donc de connaître les sources de champ pour déterminer les distributions de courants à la surface de l'objet.

Une procédure numérique, basée généralement sur la méthode des moments (MoM), doit ensuite être appliquée pour déterminer la solution des équations intégrales. Une des caractéristiques principales de cette méthode est de réduire d'un degré, la dimension spatiale d'un problème. L'étude d'une structure volumique se résout par une approche surfacique ce qui rend cette méthode particulièrement bien adaptée aux domaines finis en milieu infini.

Déterminer le champ électromagnétique rayonné par un objet dans un certain volume de calcul revient à échantillonner la surface de cet objet et à déterminer les courants circulant sur cette surface, ce qui permet ensuite de trouver le champ électromagnétique rayonné par la structure dans tout l'espace [9]. Une formulation portant non plus sur les surfaces mais sur les interfaces de la structure peut être établie : c'est la méthode des éléments de frontière.

Par rapport aux méthodes volumiques, ce type de formulation ne rencontre pas de problème de troncature du domaine, ni de conditions aux limites d'espace ouvert. Ces méthodes sont donc mieux adaptées aux problèmes de propagation en milieu infini. Cependant, elles nécessitent un traitement de résolution plus lourd que les méthodes volumiques, car elles génèrent des systèmes d'équations linéaires complexes et pleins, à l'inverse des méthodes volumiques dont les systèmes sont relativement creux. En théorie des antennes, trois types d'équations intégrales sont proposées dans la littérature:

- l'équation intégrale en champ électrique EFIE (Electric Field Integral Equation);
- l'équation intégrale en champ magnétique MFIE (Magnetic Field Integral Equation);
- l'équation intégrale mixte EFIE-MFIE.

Cette dernière (EFIE) est bien adaptée pour les structures dites à fils minces de petit volume, tandis que le MFIE, qui échoue pour le cas de fil mince, est plus attrayante pour les structures volumineuses ayant de grandes surfaces lisses. L'EFIE peut également être utilisée pour modéliser des surfaces et elle est utilisée pour représenter des surfaces de grilles métalliques avec un succès raisonnable. Pour une structure composée de fils minces et de surfaces, EFIE et MFIE sont couplés pour donner l'équation hybride EFIE -MFIE[9].

III.1 hypothèses

Plusieurs hypothèses fondamentales sont à la base du modèle électromagnétique que nous étudions :

- Le sol homogène ;
- Les différents milieux ainsi que les conducteurs présentent des caractéristiques électriques linéaires isotropes et invariantes avec la fréquence ;

- La prise de terre doit pouvoir être considérées comme un ensemble de cylindres droits d'orientation diverses et connectés entre eux ou non. Adams précise que ensemble, que nous nommerons dans la suite 'segments' doivent respecter la condition d'application de l'approximation des fils minces, c'est-à-dire que leur longueur doit être grande devant la longueur d'onde

III.2 Homogénéité des sols

Nous avons vu aux littératures que les sols sont loin d'être homogènes, et que même s'ils les sont la présence des fondations modifie localement les propriétés électriques du milieu dans lequel se trouvent les prises de terre, certains modèles électromagnétiques permettent de ramener un sol réel à un sol équivalent à deux couches.

On se contente de considérer un sol homogène. Nous jugeons que cela n'est pas trop dommageable pour nos études en remarquant:

- ✓ qu'il est en pratique souvent difficile de déterminer les propriétés électriques et la géométrie de chaque constituant du sol ;
- ✓ que l'on puisse considérer que le béton des fondations a les mêmes propriétés électriques que le sol.

Nous avons vu, en chapitre 2, que c'est un compromis conservateur, au vu de la nature hygroscopique du béton. Cette hypothèse nous limitera tout de même aux cas qui ne sont pas trop éloignés d'un sol homogène[4].

III.3 Caractéristiques électriques du sol constantes

On admet que les caractéristiques électriques du sol (permittivité ϵ , perméabilité μ et résistivité ρ) sont constantes et indépendantes de la fréquence et de l'amplitude des courants électriques mis en jeu. Le modèle électromagnétique évolue en fréquentiel et est, par conséquent, mal adapté à la prise en compte des phénomènes non linéaires. Aucune solution n'a été proposée pour tenir compte des phénomènes d'ionisation. Ce défaut ne nuit pas trop aux performances du modèle électromagnétique si on considère que:

- ✓ il y a ionisation à partir d'un champ électrique seuil (de l'ordre de 1000 kV/m) qui est rarement atteint;
- ✓ l'ionisation a souvent une influence positive sur le comportement de la prise de terre (baisse locale de la résistivité du sol, si on exclut la probabilité d'une vitrification) et la négliger est donc une hypothèse conservatrice dans la majorité des cas[4].

IV. Approximation des files minces

L'approximation des files minces consiste à modéliser un conducteur filaire par un fil sur son axe parcouru par un courant équivalent, afin de s'affranchir de l'intégration sur le périmètre du conducteur lors des calculs de champs. Cette approximation est basée sur les deux hypothèses suivantes.

- ✓ on considère que le courant dans le conducteur est axial. Ceci est vrai si le rayon du segment est petit devant la longueur d'onde. Le vecteur densité de courant est parallèle à l'axe ;
- ✓ on suppose que la vectrice densité de courant \vec{J} est constante sur une section transversale du conducteur.

On peut alors réduire la géométrie de la structure à un fil sur son axe, parcouru par un courant équivalent.

Ces hypothèses sont valides uniquement si le diamètre du fil est petit devant le chemin parcouru par l'onde électromagnétique durant le temps de montée du champ incident, ce que a traduit par l'inégalité suivante: $(c \cdot \tau_m / a) \geq 3$ avec τ_m le temps de montée de l'onde incidente, c la vitesse de la lumière et a le rayon du fil. Dans le cas d'un fil dans le vide proche du sol, la référence discute de l'erreur due à l'approximation des fils minces.

On peut raisonnablement considérer que les configurations de mise à la terre présentées au chapitre 3 peuvent être décomposées en éléments filaires soumis à l'approximation des fils minces.

IV.1 Principe général du modèle

S'inspirant des travaux effectués en théorie des antennes, propose en 1990, le modèle électromagnétique des systèmes de mise à la terre que nous utiliserons. Ils assimilent les prises de terre à des antennes enterrées et ils emploient la méthode des moments pour résoudre les équations de Maxwell. Les spécialistes des antennes s'intéressent en effet, depuis longtemps, au comportement électromagnétique d'une structure filaire située proche du sol. Une approche classique consiste à :

- ✓ exprimer le champ électrique en surface du conducteur en fonction du courant longitudinal qui y circule (expression du champ électrique dans le vide en présence d'un sol parfaitement conducteur) ;
- ✓ résoudre l'équation intégrale obtenue grâce à la méthode des moments, proposée en 1968 par [4], pour déterminer la distribution du courant sur le conducteur d'antenne, le potentiel et le champ électromagnétique en tout point du milieu (diagramme de rayonnement de l'antenne).

IV.2. Expression du champ électrique

Nous considérons un système de mise à la terre composé d'un fil mince de forme quelconque, illuminé par un champ électromagnétique incident $(\vec{E}^{\rightarrow i}, \vec{H}^{\rightarrow i})$. La figure II.1 présente le repère de coordonnées choisi.

Nous admettrons que le courant dans le conducteur est axial, donc porté par le vecteur \vec{s}^f (approximation des fils minces). Nous chercherons à obtenir une relation entre le champ électrique appliqué en surface du conducteurs $\vec{E}^{\rightarrow i}$ et le courant longitudinal $I_{IS}^{\rightarrow f}$. Nous étudierons successivement, du plus simple au plus compliqué, les cas suivants :

- ✓ le conducteur filaire est un conducteur parfait (conductivité infinie) et il est plongé dans l'espace libre ;
- ✓ le conducteur filaire n'est pas parfait et il est plongé dans l'espace libre;
- ✓ le conducteur n'est pas parfait et il est enterré dans un sol homogène [4].

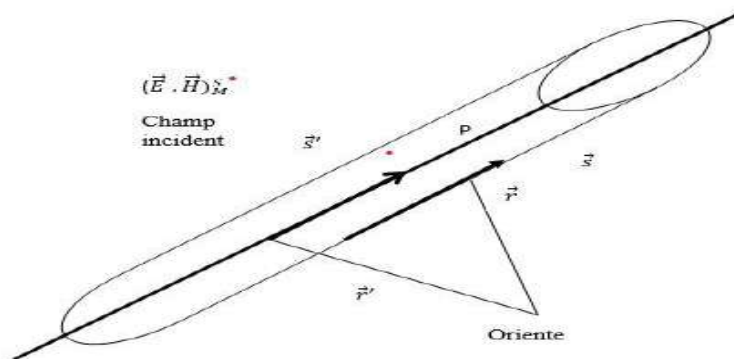


Figure II.1 Conducteur filaire.

Nous notons la spécification suivant :

M : Point situé dans l'espace ;

P : Point situé sur la surface du conducteur ;

S : Vecteur unité tangent à la surface du segment ;

S' : Vecteur unité le long de l'axe du conducteur ;

r' : Position d'un point sur l'axe du conducteur ; r

: Position d'un point en surface du conducteur ;

Soit une onde électromagnétique incidente $(\vec{E}^i(t), \vec{H}^i(t))$ illuminant ce conducteur cette onde va induire dans celui-ci un courant, qui lui-même

est à l'origine d'un champ électromagnétique diffracté $((\vec{E}^d(t), \vec{H}^d(t)))$. le champ électromagnétique total en un point M peut alors être présenté comme la somme du champ incident et du champ diffracté

$$\vec{E}_M(t) = \vec{E}_M^d(t) + \vec{E}_M^i(t) \quad (\text{II.1})$$

avec t le temps. En admettant que les propriétés électriques du milieu sont linéaires, on peut raisonner dans le domaine fréquentiel.

$$\vec{E}_M(t) = \vec{E}_M^d(f) + \vec{E}_M^i(f) \quad (\text{II.2})$$

avec f la fréquence de l'onde électromagnétique, qui ne sera plus écrite dans la suite pour alléger les notations.

Le champ électrique diffracté par le fil parcouru par le courant $I_l(r')$ et de charge surfacique $\sigma_l(r')$ en

point M, \vec{E}_M^d peut être écrit en fonction du potentiel électrique scalaire φ_M et du vecteur magnétique \vec{A}_M créé par la circulation du courant $I_l(r')$.

$$\vec{E}_M^d = -\overrightarrow{\text{grad}}(\varphi_M) = -j\omega\vec{A}_M \quad (\text{II.3})$$

avec $\omega = 2\pi f$

On aura en particulier si le point se situe sur la surface du fil (point P, repéré dans le plan par le vecteur r.

$$\vec{E}_M^d \vec{s} = -(\overrightarrow{\text{grad}}(\varphi(r)) + j\omega\vec{A}(r)) \quad (\text{II.4})$$

Le potentiel vecteur $\vec{A}(r)$ et le potentiel scalaire φ_M sont développés sous la forme de potentiels retardés. Par intégration sur la longueur totale, on a :

$$\vec{A}(r) = \frac{\mu_1}{4\pi} \int I_l(r') \vec{s}' \cdot g_1(r, r') dr' \quad (\text{II.5})$$

$$\varphi(r) = \frac{\mu_1}{4\pi\epsilon_1} \int I_l(r') \vec{s}' \cdot g_1(r, r') dr' \quad (\text{II.6})$$

L'intégrale est prise sur la longueur totale du conducteur L_{TOT} (Longueur totale) et $g_1(r, r')$ est la fonction de Green pour un milieu homogène :

$$g_1(r, r') = \frac{1}{|r - r'|} \exp(-\gamma_1 |r - r'|) \quad (\text{II.7})$$

$\gamma_1^2 = -\omega^2 \mu_1 \epsilon_1$ avec σ_1 , μ_1 respectivement la conductivité (S/m), la perméabilité (H/m), et permittivité (F/m) du milieu.

$\epsilon_1 = \epsilon_1 + \frac{\sigma_1}{j\omega}$ est la permittivité complexe du milieu.

Les conditions aux limites imposent les relations suivantes pour le point P situé à la surface du conducteur parfait :

$$\vec{s} \cdot \vec{E}_p = 0 \quad (\text{II.8})$$

$$\vec{s} \cdot \vec{H}_p = \vec{0} \quad (\text{II.9})$$

En reportant dans (II.3)

$$\vec{s} \cdot \vec{E}_p = \vec{s} \cdot (\vec{E}_p^i + \vec{E}_p^d) \quad (\text{II.10})$$

$$\vec{s} \cdot \vec{E}_p^i = -\vec{s} \cdot \vec{E}_p^d \quad (\text{II.11})$$

Ces relations nous permettent de relier le champ appliqué au champ diffracté. On adonc l'ensemble des équations :

$$\vec{s} \cdot \vec{E}_p^i = -\vec{s} \cdot \vec{E}_p^d = -\left(-\overrightarrow{\text{grad}}\varphi(r) - j\omega\vec{A}(r)\right) \cdot \vec{s} \quad (\text{II.12})$$

$$\vec{A}(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_1} \int I_l(r') \vec{s}' \cdot g_1(r, r') dr' \quad (\text{II.13})$$

$$\varphi(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_1} \int \sigma_l(r') \vec{s}' \cdot g_1(r, r') dr' \quad (\text{II.14})$$

On peut, de plus, développer à partir des équations de continuité :

$$\sigma_l(r) = -\frac{1}{j\omega} \frac{\partial}{\partial r} \times (\vec{s}' I_l(r)) \quad (\text{II.15})$$

L'expression du champ électrique diffracté devient alors sur la longueur totale :

$$\vec{s} \cdot \vec{E}_p^i = \frac{j\omega\mu_1}{4 \times \pi} \int I_l(r') \vec{s}' \cdot g_1(r, r') dr' + \frac{1}{4\pi\epsilon_1} \cdot \overrightarrow{\text{grad}} \int \sigma_l(r') \vec{s}' \cdot g_1(r, r') dr' \quad (\text{II.16})$$

L'équation (II.16) est une équation intégrale du courant et est nommée 'Équation de Pocklington'.

En posant ∇ l'opérateur dérivé spatiale, elle est souvent écrite dans la littérature.

$$\vec{s} \cdot \vec{E}_p^i = -\frac{1}{4\pi j\omega\epsilon_1} \left[(\nabla\nabla - \gamma_1^2) \left(\int I_l(r') \vec{s}' g_1(r, r') dr' \right) \right] \quad (\text{II.17})$$

Dans cette expression du champ électrique à la surface du conducteur, le premier terme est dû à la distribution de charges et le second au courant longitudinal :

Cela montre que peut également être formulée :

$$\vec{s} \cdot \vec{E}_p^i = -\frac{j\omega\mu_1}{4 \times \pi} \int I_l(r') \vec{s}' G_1(r, r') dr' \quad (\text{II.18})$$

où $G_1(r, r')$ est la fonction dyadique de Green pour un milieu homogène et s'exprime:

$$G_1(r, r') dr' = \left[\frac{1}{\gamma_1^2} (\vec{s}' \cdot \nabla) \cdot (\vec{s}' \cdot \nabla) \right] g_1(r, r') \quad (\text{II.19})$$

IV.3 Modélisation d'un système de mise à la terre par la théorie des antennes

Dans le but d'analyser le comportement transitoire d'un réseau de mise à la terre L. Grcev propose une approche basée sur la théorie des antennes dans le cas des fils minces. Bien que le formalisme.

Grcev [10] soit plus général du point de vue mathématique, car il permet de tenir compte de l'interaction entre deux antennes filiformes, son fondement est inspiré de l'équation générale de Pocklington (II.16).

Pour cette étude, L. Grech propose d'utiliser des transformations temps-fréquence et inversement. La

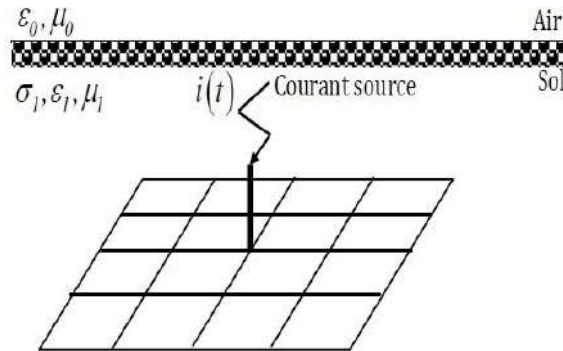


Fig.II.2 représente une Illustration de la situation physique du problème.

Si $i(t)$ représente le courant injecté en un point de l'électrode enterrée, sa réponse observée $X(t)$ est calculé suivant la formule (II.20).

$$X(t) = F^{-1}(W(j\omega) \cdot F[i(t)]) \quad (\text{II.20})$$

où : F et F^{-1} sont respectivement la transformée de Fourier direct et inverse et $(j\omega)$ est une fonction de transfert.

IV.4 Expression rigoureuse pour un conducteur enterré dans un sol homogène

De nombreuses études théoriques traitent des phénomènes de propagation des ondes électromagnétiques dans le sol. On citera en particulier les travaux de Sunde, qui a proposé, en 1968, un ouvrage de référence sur le sujet ,ainsi que ceux plus récents de Dawalibi [11].

Le cas d'un conducteur situé dans un sol homogène est différent car il faut prendre en compte l'interface 'sol/air' dans le développement de l'équation intégrale du courant.

Afin de tenir compte de l'effet d'interface sur le rayonnement d'une antenne (verticale ou horizontale) situé au-dessus ou en-dessous de l'interface de séparation sol-air, plusieurs études sont proposées dans la littérature, En toute rigueur, il est montré que l'effet de l'interface se traduit par l'apparition dans l'expression du noyau de la fonction Dyadique de Green, en plus du terme de Green source, d'un terme de Green image et d'un autre terme de Sommerfeld.

Dans l'équation (II.21), la fonction Dyadique de Green est remplacée par l'expression générale G définie comme suit :

$$G(r, r') = G_1(r, r') + G_i(r, r') + G_s(r, r') \quad (\text{II.21}) \quad G_1(r, r') \text{ et } G_i(r, r') :$$

Correspondent respectivement à la source et son image par rapport à l'interface d'un plan parfaitement conducteur.

$G_s(r, r')$: est le terme de correction exprimée en termes d'intégrales de Sommerfeld due à l'effet de la conductivité finie du sol, ce qui était nécessaire pour la solution complète du champ électrique.

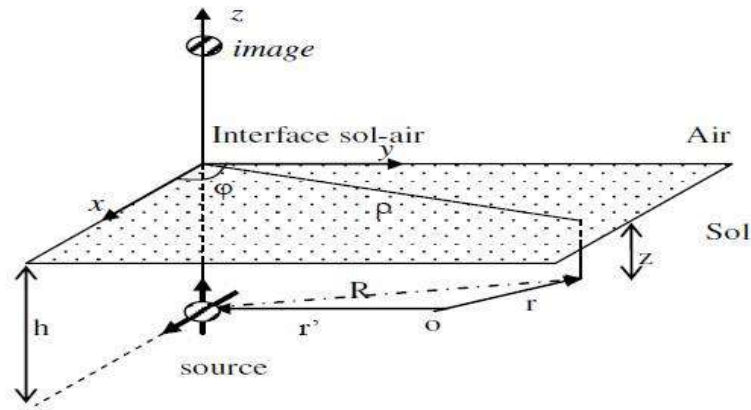


Figure II.3 Système de coordonnées.

Dans son travail L. Grcev, s'intéresse uniquement à l'augmentation du potentiel de la terre, dans ce cas lorsque la source et le point d'observation sont dans le sol, pour un dipôle d'orientation arbitraire s'exprime comme suit [11].

$$G_s(r, r') = \vec{t} \cdot ((\vec{u}_x \cdot \vec{t}') (R_\rho^h \vec{u}_p + R_\phi^h \vec{u}_\phi + R_z^h \vec{u}_z) + (\vec{u}_z \cdot \vec{t}') (R_\rho^v \vec{u}_p + R_z^v \vec{u}_z)) \quad (\text{II.22})$$

$$R_\rho^v = C_1 \partial^2 \frac{(K_{0v11}^2)}{\partial Z \partial \rho} \quad (\text{II.23})$$

$$R_z^v = C_1 \left[\frac{\partial^2}{\partial Z^2} + K_1^2 \right] K_0^2 V_{11} \quad (\text{II.24})$$

$$R_\rho^h = C_1 \cdot \cos(\varphi) \left[\frac{\partial^2}{\partial \rho^2} K_1^2 V_{11} + K_1^2 U_{11} \right] \quad (\text{II.25}) \quad R_\phi^h = -C_1(\varphi) \left[\frac{\partial^2}{\rho \partial \rho} K_1^2 V_{11} + K_1^2 U_{11} \right] \quad (\text{II.26})$$

$$R_z^h = -C_1(\varphi) \left[\frac{\partial^2}{\partial z \partial \rho} K_1^2 V_{11} \right] \quad (\text{II.27})$$

$$U_{11} = 2 \int_0^\infty \frac{e^{-\gamma_1(h-z)}}{\gamma_1 - \gamma_0} J_0(\lambda \rho) \lambda d\lambda \quad (\text{II.28})$$

$$V_{11} = 2 \int_0^\infty \frac{e^{-\gamma_1(h-z)}}{K_1^2 \gamma_0 - K_0^2 \gamma_1} J_0(\lambda \rho) \lambda d\lambda \quad (\text{II.29})$$

avec :

$$\gamma_1 = \sqrt{\lambda^2 - K_1^2} ; \gamma_2 = \sqrt{\lambda^2 - K_2^2} \text{ et } C_1 = \frac{1}{K_1^2}$$

Les constants de propagation intrinsèques de deux milieux: sol et air sont:

$$K_1^2 = \omega^2 \mu \varepsilon_1 \left(\varepsilon_1 - \frac{J\sigma_1}{\omega \varepsilon_0} \right) : \text{Coefficient de propagation dans le sol ;}$$

$$K_2^2 = \omega^2 \mu_0 \varepsilon_0 \left(\varepsilon_2 - \frac{J\sigma_2}{\omega \varepsilon_0} \right) : \text{Coefficient de propagation dans l'air.}$$

U_{11} et V_{11} sont les intégrales de Sommerfeld [12].

IV.5 Résolution de l'équation intégrale par la méthode des Moments

Les équations intégrales, ne présentent pas des solutions analytiques. Des méthodes matricielles plus connues sous le nom de « méthode des moments » sont utilisées. L'intégration de l'équation en champ électrique est réalisée par la méthode projective de Galerkin, et nécessite l'introduction de fonctions poids. Généralement pour simplifier cette intégration la méthode dite point-matching est utilisée (les fonctions poids sont des impulsions de Dirac) [13].

La première étape dans ce concept consiste à calculer la répartition des courants après la construction d'un système matriciel à partir de l'équation intégrale en champ électrique.

IV.6 Approximation du courant dans la prise de terre

L'expression du champ électrique dans le sol en fonction du courant dans le système de mise à la terre (II.18) est mise sous la forme:

$$\vec{E}^i . t' = L (I_l . \vec{t}') \quad (\text{II.30})$$

L : est l'opérateur linéaire intégral-différentiel : $L = -z_s - \frac{j\omega\mu_1}{4\pi} \int_{LT} G_n(r, r') dr'$;

I_l : est le courant longitudinal ;

$\vec{E}^i . t' . r$: est l'excitation connue.

On applique l'opérateur linéaire intégral-différentiel sur le courant longitudinal, on obtient :

$$L(I_l) = -z_s . I_l(r') - \frac{j\omega\mu}{4\pi} \int_{LT} I_l(t) G_n(r, r') dr ; \quad (\text{II.31})$$

L'équation intégral-différentielle ainsi présentée est résolue par la méthode des moments. Pour cet objectif, on segmente tout d'abord le système de mise à la terre en N s éléments filaires comme le présente la Figure (II.4).

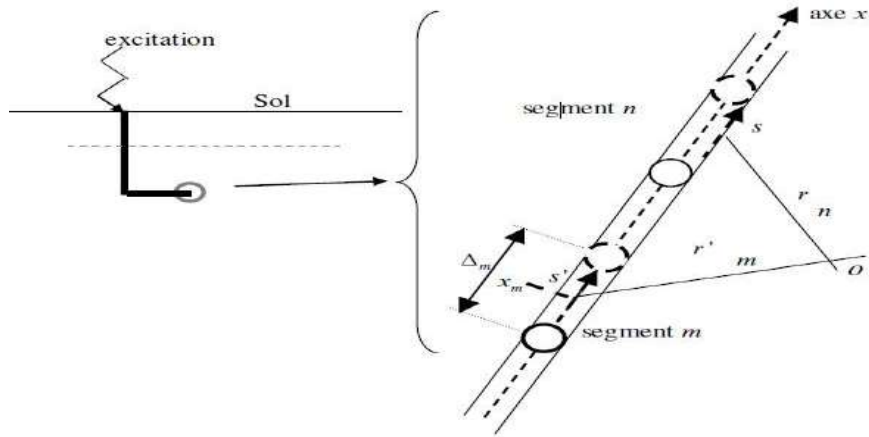


Figure II.4 Segmentation du système de mise à la terre.

L. Greva [14] considère pour chaque segment n , une « tension généralisée » V_n , définie comme le produit du champ $E^i(r_n)$ par sa longueur Δ_n :

$$v_n = -\nabla_n \cdot \vec{t} \cdot \vec{E}^i(r_n) \tag{II.32}$$

La tension généralisée prise le long du segment n est égale à la somme des contributions de chaque courant dans chaque segment n .

$$v_n = \sum_1^{N_s} Z_{nm} \times I_m \tag{II.33}$$

$$= -\nabla_n \vec{E}^i \cdot \nabla_n (-z_s \cdot I_l(r') + \vec{E}^s \cdot \vec{t}) = \nabla_n (-z_s \cdot I_l(r') + \frac{j\omega\mu_1}{4\pi} \int_{LT} I_l(r') G_n(r, r') dr') v_n \tag{II.34}$$

En approximant la distribution du courant le long des conducteurs de terre par :

$$I_l \approx \sum_{i=1}^{N_s} I_n \times F_n \tag{II.35} \quad F_n = \begin{cases} 1 & \text{sur le segment } n \left(x_n - \frac{\Delta_n}{2} \leq X \leq x_n + \frac{\Delta_n}{2} \right) \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \tag{II.36}$$

Pour laquelle des fonctions de base F_n de type « portes » sont choisies:

Aussi, pour la méthode des moments, les fonctions-test de type 'Dirac', définies le long du conducteur sont adoptées :

$$\delta(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x = x_m \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \tag{II.37}$$

Le système d'équation (II.39) peut alors se mettre sous la forme matricielle suivante :

$$[v_m] = [Z_{nm}] \cdot [I_m] \tag{II.38}$$

Cette équation peut encore s'écrire comme suit :

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1N} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{M1} & Z_{M2} & \dots & Z_{MN} \end{bmatrix} [I_1 \ I_2 \ \dots \ I_N] = [E_1 \cdot \Delta \ E_2 \cdot \Delta \ \dots \ E_N \cdot \Delta] = [V_1 \ V_2 \ \dots \ V_N] \tag{II.39}$$

où:

$[v_m]$: le vecteur tension généralisée qui représente la tension entre les deux extrémités du segment de longueur Δ centré en X_m ;

$[I_m]$: le vecteur courant généralisé de terme général inconnue I_m ; [

Z_{nm}] : la matrice des impédances généralisées.

Les termes Z_{nm} définissent les interactions électromagnétiques entre chaque segment. Ils ne dépendent que de la géométrie de la structure, des propriétés du milieu, et de la fréquence de l'excitation [10].

En développant l'expression de l'opérateur "L" nous aurons :

$$Z_{nm} = -\Delta_n L(F_n(r_m)) - \Delta_n \times \left(-F_n(r') \cdot z_s \frac{j\omega\mu_1}{4\pi} \int_l F_n(r') G_n(r, r') dr' \right) \quad (\text{II.40})$$

A partir de la définition des fonctions de base F_n , on trouve alors l'expression des impédances généralisées:

$$Z_{nm} = \begin{cases} \Delta_n \times \frac{j\omega\mu_1}{4\pi} \int_l G_n(r, r') dr' & n \neq m \\ -\Delta_n \times z_s + \frac{j\omega\mu_1}{4\pi} \int_l G_n(r_m, r'_n) dr' & n = m \end{cases} \quad (\text{II.41})$$

Dans le cas où l'excitation est un générateur de courant, en fixant $I_1 = I_s$ le courant source, nous obtenons le système à N_s équations et $N_s - 1$ inconnues (de 2 à N_s) suivant.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & Z_{21} & Z_{22} & \dots & 0 & Z_{2N_s} & \vdots & \vdots & Z_{N_s1} & Z_{N_s2} & \dots & Z_{N_sN_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 & I_2 & \vdots & I_{N_s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_s & 0 & \vdots & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.42})$$

Une fois les impédances Z_s et Z_{nm} déterminées relation (II.40) et (II.41), la distribution du courant est calculée simplement en résolvant le système matriciel (II.42).

V. Modélisation d'une éolienne muni d'un système de protection

Dans le but d'analyser le comportement transitoire des systèmes de protection des éoliennes contre la foudre par la théorie des antennes, nous inspirons des travaux réalisés par L.Grcev [10] et F.Dawalibi consacrés à la modélisation d'un réseau de mise à la terre lors d'un impact d'un coup de foudre. Ces auteurs assimilent les prises de terre à des antennes enterrées et ils emploient la méthode des moments pour résoudre une équation intégrale-différentielle.

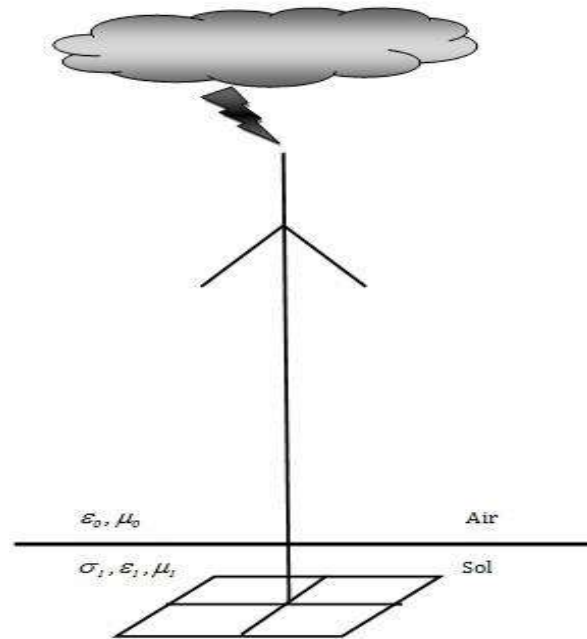


Figure II.5 Illustration de la situation physique.

Ces travaux sont réalisés dont les hypothèses suivantes sont retenues :

- ✓ Le sol et l'air sont homogènes, linéaires et isotropes ;
- ✓ Les conducteurs sont sujets à l'approximation des fils minces ; ✓ Le courant injecté est supposé fourni par un générateur idéal.

Dans notre travail, le dispositif étudié est constitué de deux types de conducteurs : conducteurs aériens (constituant la tour et les pales de la turbine) et conducteurs souterrains (constituants la prise de terre).

Nous entendons par la modélisation électromagnétique en régime transitoire d'une éolienne, la qualification par calcul du champ électromagnétique émis par la structure lorsque celui est traversé par un courant transitoire.

V.1 Calcul de la répartition des courants transitoire dans l'éolienne

Dans le but de calcul de la répartition des courants transitoire dans le poste arien par la théorie des antennes, nous inspirons des travaux réalisés par L. Grcev et F. Dawalibi [11]. Ces auteurs assimilent les prises de terre à des antennes enterrées et ils emploient la méthode des moments pour résoudre une équation intégral-différentielle. Ces travaux sont réalisés dont les hypothèses suivantes sont retenues :

- ✓ Le sol et l'air sont homogènes, linéaires et isotropes ;
- ✓ Les conducteurs sont sujets à l'approximation des fils minces ; ✓ Le courant injecté est supposé fourni par un générateur idéal.

Dans notre travail, le dispositif étudié est constitué des conducteurs aériens (vertical et horizontal).

V.2 Formalisme des dipôles Hertiens

La méthode des dipôles consiste en une subdivision du support « structure filaire » en éléments appelés dipôles Figure II.6, dont la taille est choisie de façon à masquer la propagation. Le champ en tout point du milieu est obtenu par superposition des contributions de l'ensemble des dipôles.

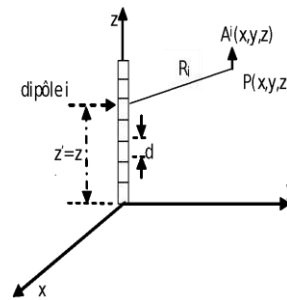


Fig. II.6 Structure segmentée en dipôles La

taille des dipôles dl doit satisfaire aux deux conditions suivantes :

$$dl \leq \frac{\lambda}{20} \quad (\text{II.43})$$

λ : étant la plus petite longueur d'onde significative.

Cette condition permet de masquer la propagation le long du dipôle, c'est à dire l'amplitude et la phase du courant le long du dipôle, sont toutes les deux indépendantes de z .

$$dl \leq \frac{R}{10} \quad (\text{II.44})$$

Cette condition permet de prendre en compte les petites variations de courant d'un point très proche de la structure filaire.

R : étant la distance entre le dipôle considéré et le point d'observation.

V.3 Champs électromagnétiques rayonnés par un dipôle

Le calcul du champ électromagnétique émis par un dipôle situé au voisinage du sol, disposé horizontalement ou verticalement par rapport à l'interface sol-air, a fait l'objet de nombreuses publications. La complexité de ce problème tient à la difficulté de prendre en compte l'effet du sol de façon exacte. Dans le cas de la présence d'une interface sol-air plane, la prise en compte de l'hétérogénéité est réalisé en introduisant généralement un terme dit image ainsi qu'un terme de correction. Pour chacun des éléments de courant il est nécessaire de résoudre des intégrales introduites par Sommerfeld [15].

La solution exacte pour le champ électromagnétique d'une source située près d'une interface a été publiée pour la première fois par A. Sommerfeld . Aussi, l'ensemble des expressions du champ électromagnétique pour un point d'observation proche du sol ont été développées par Banos [16] en coordonnées cylindriques (ρ, φ, z) .

V.4 Formulation des champs électromagnétiques rayonnés par un dipôle

Les expressions des champs électromagnétiques rayonnés par une source élémentaire.

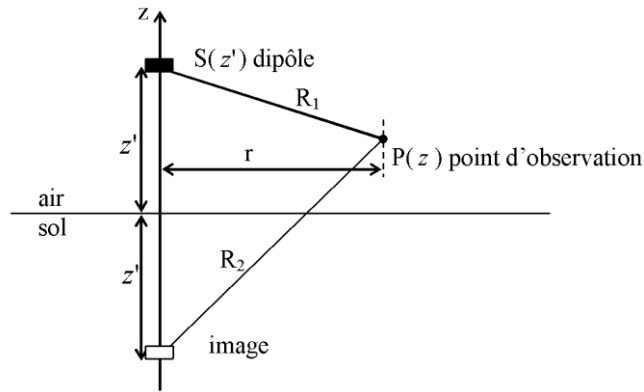


Figure II.7 Source dans le l'air et point d'observation dans l'air.

$$E_{\rho} = \frac{-jP_z \omega \mu_0}{4\pi k_2^2} \cos\varphi \left\{ \frac{\partial^2}{\partial \rho^2} (G_{22} - G_{21} + k_2^2 V_{22}) + k_1^2 (G_{22} - G_{21} + U_{22}) \right\} \quad (\text{II.45})$$

$$E_{\varphi} = \frac{-jP_z \omega \mu_0}{4\pi k_2^2} \sin\varphi \left\{ \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} (G_{22} - G_{21} + k_1^2 V_{22}) + k_1^2 (G_{22} - G_{21} + U_{21}) \right\} \quad (\text{II.46})$$

$$E_z = \frac{-jP_z \omega \mu_0}{4\pi k_2^2} \cos\varphi \left\{ \frac{\partial^2}{\partial z \partial \rho} (G_{22} - G_{21} + k_1^2 V_{22}) \right\} \quad (\text{II.47})$$

$$H_{\rho} = \frac{jP_z}{4\pi k_1^2} \cos\varphi \left\{ (1 + n^2) \frac{\partial V_1}{\rho \partial \rho} + k_1^2 U_{11} + k_1^2 (G_{11} - G_{12}) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial G_{12}}{\partial \rho} \right\} \quad (\text{II.48})$$

$$H_{\theta} = \frac{P_z}{4\pi k_1^2} \cos\varphi \frac{\partial}{\partial z} \left\{ (1 + n^2) \frac{\partial V_{11}}{\partial \rho^2} + k_1^2 U_{11} - \frac{\partial^2}{\partial r^2} (G_{12}) + k_1^2 (G_{11} - G_{12}) \right\} \quad (\text{II.49})$$

$$H_z = -\frac{jP_z}{4\pi} \sin\varphi \frac{\partial}{\partial r} \{ +k_1^2 (G_{11} - G_{12} + U_{11}) \} \quad (\text{II.50})$$

où V_{12} et U_{12} sont les intégrales de Sommerfeld :

$$V_{11} = 2 \int_0^{\infty} \frac{e^{\gamma_1(z+z')}}{k_1^2 \gamma_2 + k_2^2 \gamma_1} J_0(\lambda \rho) \lambda d\lambda \quad (\text{II.51})$$

$$U_{11} = 2 \int_0^{\infty} \frac{e^{\gamma_1(z+z')}}{\gamma_1 + \gamma_2} J_0(\lambda \rho) \lambda d\lambda \quad (\text{II.52})$$

Les intégrales de Sommerfeld traduisent l'effet de la conductivité finie de l'interface, elles dépendent de deux paramètres géométriques :

- ✓ La distance horizontale r , mesurée parallèlement à l'interface, entre la source et le point d'observation ;
- ✓ La distance verticale $z + z'$ entre le point d'observation et l'image de la source.

Elles dépendent en outre de la fréquence par l'intermédiaire des nombres d'ondes k_1 et k_2 .

$$\text{avec : } G_{11} = \frac{e^{-jk_1 R_1}}{R_1} \text{ et } R_1 = [\rho^2 + (z - z')^2]^{\frac{1}{2}}, G_{12} = \frac{e^{-jk_1 R_1}}{R_1} \text{ et } R_1 = [\rho^2 + (z - z')^2]^{\frac{1}{2}},$$

$$\gamma_1 = (\lambda^2 - k_1^2)^{\frac{1}{2}} \text{ et } \gamma_2 = (\lambda^2 - k_2^2)^{\frac{1}{2}}$$

VI. Conclusion

D'un point de vue théorique, la mise à la terre est considérée comme un problème de diffraction électromagnétique. L'équation intégrale du champ électrique, établie dans le domaine fréquentiel, va être résolue numériquement par la méthode des moments.

La théorie des antennes constitue le formalisme le plus rigoureux. Ce formalisme consiste à la résolution d'une équation intégrale-différentielle dans le domaine fréquentiel par la méthode des moments.

La modélisation par la méthode des moments, bien que très attrayante car elle nécessite uniquement la discrétisation linéaire de la structure métallique, conduit à un système matriciel plein et impose la nécessité du calcul des intégrales de Sommerfeld sur l'ensemble des segments (après discrétisation). Ces contraintes sont l'inconvénient de cette méthode

Chapitre III

Applications et résultats

I. Introduction

Dans ce dernier chapitre, nous proposons quelque application qui consistent à calculer les champs électromagnétique au tour d'une éolienne munie de sa mise à la terre suit à une injection d'un courant de foudre

Pour réaliser ces applications, nous utilisons le logiciel NE4 [17] (Numerical électromagnétique code) ; ce logiciel nous permet une simulation en fréquentiel, nous transformons les résultats ainsi obtenus en temporel par la transformée de Fourier inverse (IFFT). Cette étape constitue généralement une source d'erreurs qui parfois peut être importante si des précautions particulières ne sont pas prises (discrétisation spatio-temporelle, la fréquence maximale, ...).

II. L'outil de modélisation

Comme nous l'avons déjà signalé dans le deuxième chapitre, dans le monde, il existe trois grandes familles des méthodes numériques permettant de modéliser les problèmes de l'électromagnétisme méthode des moments (MOM), méthode aux différences finies (FDID, TLM), et méthode des éléments finis (FEM). Chacune de ces méthodes présentent des facilités et des difficultés voir des impossibilités pour traiter les problèmes rencontrés dans la modélisation d'antennes. Dans notre travail nous avons opté pour l'utilisation de la méthode des moments pour résoudre une équation intégrons-différentielle obtenue après quelques manipulations mathématiques sur les équations de Maxwell. Notons que nous avons utilisé le logiciel NEC-4 [17].

II.1 Le logiciel NEC 4

NEC-4 [17] (Numerical Electromagnetic code), est un code développé sous sa première version NEC1, pour le traitement du rayonnement et du couplage électromagnétique. Sa première version, limitée pour cause de l'insuffisance des calculateurs de l'époque (début des années 80), a évolué par la suite progressivement pour aboutir à celle actuellement commercialisée sous l'appellation NEC 4. Cette version permet une modélisation dans les milieux continus tout en tenant compte très particulièrement des interfaces air-sol ainsi que de la conductivité finie de ce dernier (sol). Son fondement théorique est celui des antennes qui consiste à résoudre, par la méthode numérique dite des moments, dans les milieux continus une équation intégrale en champ électrique (EFIE), déduite à partir des équations de Maxwell, ou en champ magnétique (MFIE).

La simulation numérique utilisant le code NEC-4 est réalisable uniquement en fréquentielle. L'analyse en régime temporel exige l'utilisation du passage temps-fréquence et inversement. Cette étape constitue généralement une source d'erreurs qui parfois peut être importante si des précautions particulières ne sont pas prises (discrétisation spatio-temporelle, la fréquence maximale, ...). Enfin, notons que le

logiciel NEC-4 permet uniquement d'accéder à la répartition des courants ainsi qu'au champ électrique et magnétique.

II.2 Les composants de NEC

Logiciel NEC 4 utilise trois composants

- la géométrie de l'électrode grâce à laquelle on va définir les conducteurs qui compose l'antenne. Cette description s'ait en donnant les coordonnées cartésiennes des extrémités d'électrode (selon les axes x, y. z)
- L'environnement de l'électrode; c'est-à-dire: comment elle est alimentée c'est-a-dire ou se trouve le générateur (la source) ; La fréquence sur la qu'elle va être utilisées les caractéristiques du sol.
- Les données pour le calcul : il faudra aussi quel type de résultats (calcul des courants, le champ électrique ou le champ magnétique) on sou

III. Modélisation de la source (courant de foudre)

Afin de pouvoir étudier le comportement transitoire d'une éolienne muni de sa systèmes de mise à la terre parcouru par une décharge orageuse et sa dissipation à travers un réseau de terre, il est important de connaître en premier lieu les caractéristiques du courant de foudre, ainsi que sa vitesse de propagation le long de l'arc en retour.

Les formes analytiques du courant de foudre, généralement rencontrées au sein de la littérature [18-19], se composent de sommes de fonctions exponentielles. Ce type de fonction présente l'intérêt d'avoir une transformée de Fourier pouvant être calculée de manière analytique, ce qui facilite l'analyse dans le domaine fréquentiel. Deux expressions analytiques sont le plus souvent utilisées pour représenter le courant à la base du canal.

En premier, la fonction bi-exponentielle [18 - 19], ou I_0 représente la valeur crête du courant, α est l'inverse du temps de descente et β est l'inverse du temps de montée. Cette fonction est la plus utilisée dans la littérature.

$$I(0, t) = I_0(\exp(-\alpha \cdot t) - \exp(-\beta \cdot t)) \quad (\text{III.1})$$

Puis, plus récemment F. Heidler [103] a proposé une nouvelle expression:

$$i(0, t) = \frac{I_0}{\eta} \frac{(t/\tau_1)^n}{1 + (t/\tau_1)^n} \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \quad (\text{III.2})$$

où:

$$\eta = \exp\left(-\left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right)^n \cdot \sqrt{n \frac{\tau_2}{\tau_1}}\right); \text{ Facteur de correction d'amplitude ;}$$

I_0 : L'amplitude du courant à la base du canal;

τ_1 et τ_2 : La constante de temps de front et la constante de décroissance respectivement;
 n : Un exposant ayant des valeurs comprises entre 2 à 10.

Une autre expression généralement utilisée pour décrire la forme d'onde à la base du canal proposée par Heidler [20] dans le cas d'arcs subséquents est la somme de deux fonctions d'Heidler :

$$I(0, t) = \frac{I_{01}}{\eta_2} \frac{(t/\tau_{11})^{n_1}}{1 + (t/\tau_{11})^{n_1}} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{12}}\right) + \frac{I_{02}}{\eta_2} \frac{(t/\tau_{21})^{n_2}}{1 + (t/\tau_{21})^{n_2}} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{22}}\right) \quad (\text{III.3})$$

Tab III.1 Paramètres des fonctions de l'Heidler correspondant au premier coup et arcs en subséquent, d'après les données expérimentales par Berger et al [34].

| | $I_{01}(kA)$ | $\tau_{11}(\mu s)$ | $\tau_{21}(\mu s)$ | n_1 | $I_{01}(kA)$ | $\tau_{12}(\mu s)$ | $\tau_{22}(\mu s)$ | n_1 |
|----------------|--------------|--------------------|--------------------|-------|--------------|--------------------|--------------------|-------|
| Premier coup | 28 | 1.8 | 95 | 2 | - | - | - | - |
| Arc subséquent | 10.7 | 0.25 | 2.5 | 2 | 6.5 | 2 | 230 | 2 |

La fonction Heidler a été préférée à la fonction bi-exponentielle couramment utilisé, car il présente:

- ✓ Une dérivée nulle pour $t=0$, ce correspond aux observations expérimentales.
- ✓ Un réglage précis et facile de l'amplitude du courant, la dérivée maximale du courant de foudre et la charge électrique transférée près indépendamment en faisant varier I_0 , τ_1 et τ_2 .

IV. Application

Dans nos applications, nous considérons deux applications la première est consacré seulement à une turbine éolienne muni d'une mise a la terre, à topologie simple (grille de mise a la terre) puis à topologie complexe (grille de mise a la terre et piquet vertical), entrée dans un sol suppose linéaire, homogène, isotrope et conducteur de caractéristiques électriques constants.

IV.1 Système de mise à la terre des éoliennes

Le modèle utilisé dans ces applications est une turbine éolienne de 2 MW [8], constituée d'une tour de 67.5 m de hauteur et de trois pales de 40m de longueur déphasées l'une par rapport à l'autre de 120°. Les récepteurs d'un diamètre de 10 mm et sont reliés à un conducteur à l'intérieur de la pale. Le diamètre du conducteur de descente est réglé à 10mm. Le conducteur de descente et les récepteurs sont en cuivre (figure III.1)

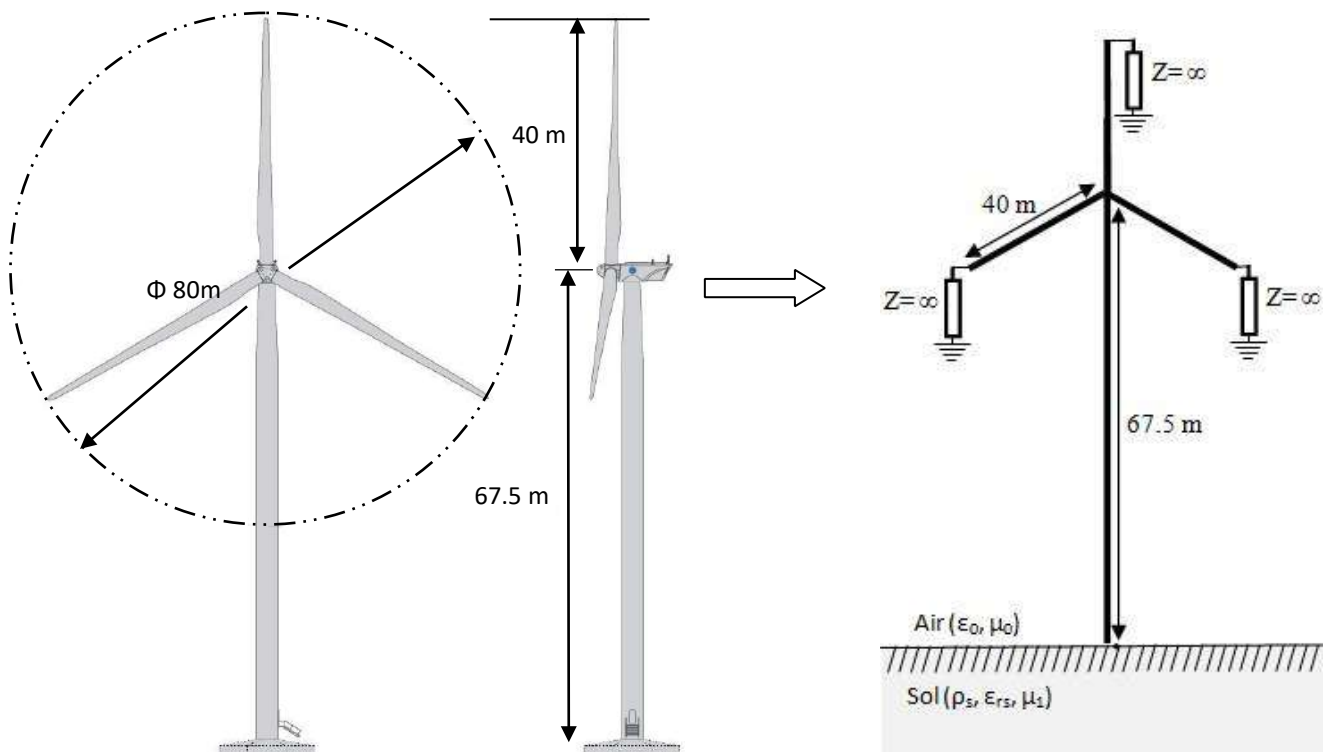


Figure III.1 Modèle de turbine éolienne étudiée dans ces applications [8].

Les extrémités libres des pales de la turbine sont remplacées par des impédances résistives ayant des valeurs allant jusqu'à quelques mégas Ohms. Pour notre application, chaque pale est terminée par une résistance de $R = 10^8 \Omega$ où le courant ne tient pas le chemin du vide.

Dans les applications présentés ci-dessous, Le générateur de courant, type onde de foudre, est représenté mathématiquement par la fonction bi-exponentielle défini par la relation suivante :

Dans les exemples traités dans cette partie d'application, le courant de foudre injecté est représenté mathématiquement par la formule de Heidler défini par la relation suivante :

$$i(t) = \frac{I_{max}}{\eta} \frac{(t/\tau_1)^n}{1 + (t/\tau_1)^n} e^{-t/\tau_2} \quad (III.4)$$

où I_{max} est la valeur de crête de courant, η est le facteur de correction, n est une constante. τ_1 et τ_2 sont les constantes de temps de front et constante de décroissance respectivement.

Les données numériques sont adoptées :

$$I_{max} = 10.7 \text{ kA}; \eta = 0.97; n = 10; \tau_1 = 0.8 \mu\text{s}; \tau_2 = 19 \mu\text{s}.$$

IV.2 Calcul des courants dans une éolienne muni de sa mise à la terre

Considérons une éolienne munie d'une prise de terre à topologie complexes (grille de mise à la terre) de dimension de $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ formée de plusieurs conducteurs de rayon de $a = 0.01 \text{ m}$ enterrés dans un sol supposé linéaire homogène et isotrope, de résistivité $\rho = 300 \Omega.m$, et de permittivité relative $\epsilon_r = 4$ comme le montre la figure III.2.

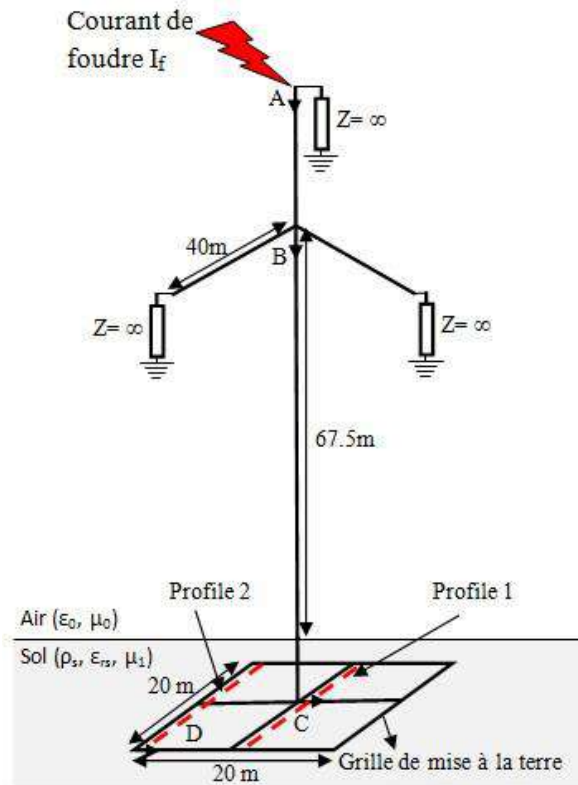


Figure III.2 Une turbine éolienne munie d’une grille de mise à la terre.

Le tableau III.7 regroupe l’ensemble des données pour un fichier d’entrée du code NEC 4.

Tab. III.2 Données du fichier d’entrée du code NEC 4 pour une éolienne munie d’une grille de mise à la terre.

| | | | | | | | | | |
|-------|-----|-------|-------|------|-------|-------|------|-----|--|
| CE | | | | | | | | | |
| GW 1 | 21 | -10.0 | -10.0 | -0.8 | -10.0 | .0 | -0.8 | .01 | |
| GW 2 | 21 | -10.0 | .0 | -0.8 | -10.0 | 10.0 | -0.8 | .01 | |
| GW 3 | 21 | .0 | -10.0 | -0.8 | .0 | .0 | -0.8 | .01 | |
| GW 4 | 21 | .0 | .0 | -0.8 | .0 | 10.0 | -0.8 | .01 | |
| GW 5 | 21 | 10.0 | -10.0 | -0.8 | 10.0 | .0 | -0.8 | .01 | |
| GW 6 | 21 | 10.0 | .0 | -0.8 | 10.0 | 10.0 | -0.8 | .01 | |
| GW 7 | 21 | -10.0 | -10.0 | -0.8 | .0 | -10.0 | -0.8 | .01 | |
| GW 8 | 21 | .0 | -10.0 | -0.8 | 10.0 | -10.0 | -0.8 | .01 | |
| GW 9 | 21 | -10.0 | .0 | -0.8 | .0 | .0 | -0.8 | .01 | |
| GW 10 | 21 | .0 | .0 | -0.8 | 10.0 | .0 | -0.8 | .01 | |
| GW 11 | 21 | -10.0 | 10.0 | -0.8 | .0 | 10.0 | -0.8 | .01 | |
| GW 12 | 21 | .0 | 10.0 | -0.8 | 10.0 | 10.0 | -0.8 | .01 | |
| GW 13 | 4 | .0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | -0.8 | .01 | |
| GW 14 | 210 | .0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 67.5 | .01 | |

| | | | | | | | | | |
|-------|----|------|-----|-----|--------|-------|--------|-------|------------|
| GW | 15 | 160 | .0 | 0.0 | 67.5 | 0.0 | 34.64 | 47.5 | .01 |
| GW | 16 | 160 | .0 | 0.0 | 67.5 | 0.0 | -34.64 | 47.5 | .01 |
| GW | 17 | 160 | .0 | 0.0 | 67.5 | 0.0 | 0.0 | 107.5 | .01 |
| GE -1 | | | | | | | | | |
| GN | 2 | 0 | 0 | 0 | 0.4e+1 | 1e-3 | | | |
| FR | 0 | 1024 | 0 | 0 | 0.007 | 0.007 | | | |
| LD | 0 | 15 | 160 | 160 | 1e+8 | 0. | 0. | | |
| LD | 0 | 16 | 160 | 160 | 1e+8 | 0. | 0. | | |
| LD | 0 | 17 | 160 | 160 | 1e+8 | 0. | 0. | | |
| EX | 4 | 1 | 10 | 0 | 0 | 0 | 107.50 | 90. | 0. 0.25 xQ |
| EN | | | | | | | | | |

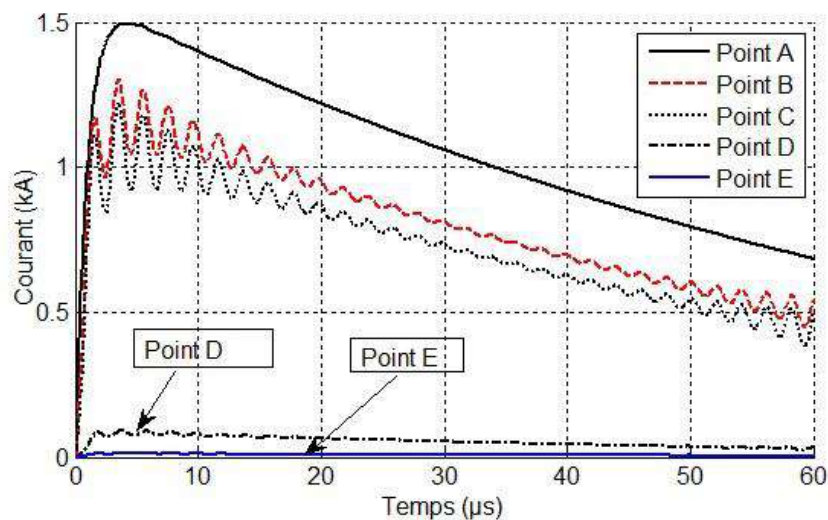


Figure III.3 Variation du courant en différentes pointes de la turbine et de sa prise de terre.

IV.3 Discussions

Nous remarquons que la variation du courant le long de la grille de mise à la terre de la turbine éolienne, met en bien en évidence le rôle de cette dernière (la grille) qui doit favoriser un épanouissement rapide de décharge de courant de foudre dans le sol.

Comme nous l'avons déjà signalé dans le chapitre 1, classiquement, pour l'ingénieur électricien, le rôle d'une prise de terre est l'écoulement rapide des courants de défauts (ce qui implique une faible impédance de la prise) dans le sol. Le courant de défaut se dissipera plus rapidement lorsque l'impédance de la prise de terre est plus faible. Notons qu'à la fin du régime transitoire l'impédance de la grille tend vers sa résistance.

V. Champ électromagnétique rayonné par une turbine éolienne

Comme nous l'avons déjà signalé dans le premier chapitre, les éoliennes sont généralement terminées par des prises de terre à topologie complexes (grille de mise à la terre), d'une grande taille de $20\text{m} \times 20\text{m}$, enterrés dans un sol supposé linéaire homogène et isotrope, de résistivité $\rho = 300\Omega.m$, et de permittivité relative $\epsilon_r = 4$. Pour cela, nous proposons dans cette application deux configurations des prises de terre des éoliennes.

a. la première configuration une éolienne munie d'une grille de mise à la terre formée de plusieurs conducteurs enfouie horizontalement à une profondeur $h = 0.6\text{m}$ de rayon $a = 0.01\text{m}$. Comme le montre la figure III.4.a.

b. la deuxième configuration une éolienne munie d'une grille de mise à la terre formée de plusieurs conducteurs enfouie horizontalement à une profondeur $h = 0.6\text{m}$ et des conducteur vertical de rayon de $a = 0.01\text{m}$ et de longueur $l = 20\text{m}$. Comme le montre la Fig.III.4.

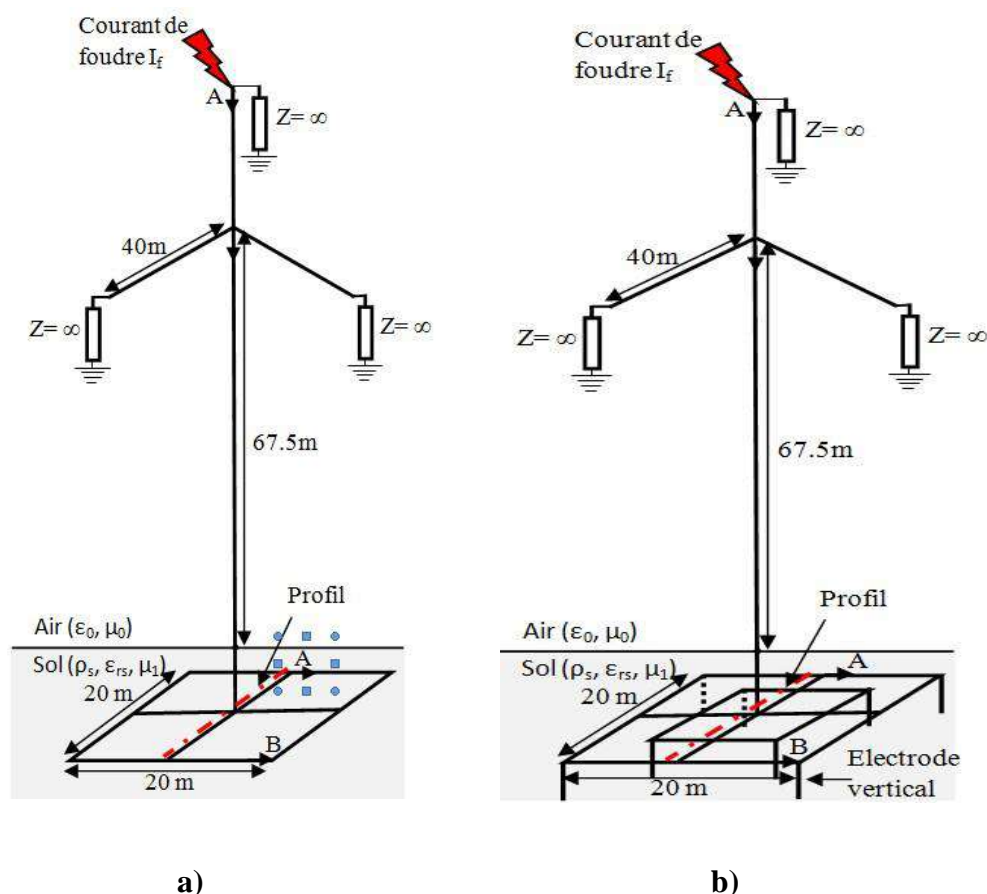


Figure III.4 Configuration pour différentes grille de mise à la terre.

V.1 Distribution spatial du champ électromagnétique

Le tableau III.3 regroupe l'ensemble des données pour un fichier d'entrée du code NEC 4.

Tab. III.3 Données du fichier d'entrée du code NEC 4 pour une éolienne munie d'une grille de mise à la terre.

| | | | | | | | | | |
|-------|----|------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|------------|
| CE | | | | | | | | | |
| GW | 1 | 21 | -10.0 | -10.0 | -0.8 | -10.0 | .0 | -0.8 | .01 |
| GW | 2 | 21 | -10.0 | .0 | -0.8 | -10.0 | 10.0 | -0.8 | .01 |
| GW | 3 | 21 | .0 | -10.0 | -0.8 | .0 | .0 | -0.8 | .01 |
| GW | 4 | 21 | .0 | .0 | -0.8 | .0 | 10.0 | -0.8 | .01 |
| GW | 5 | 21 | 10.0 | -10.0 | -0.8 | 10.0 | .0 | -0.8 | .01 |
| GW | 6 | 21 | 10.0 | .0 | -0.8 | 10.0 | 10.0 | -0.8 | .01 |
| GW | 7 | 21 | -10.0 | -10.0 | -0.8 | .0 | -10.0 | -0.8 | .01 |
| GW | 8 | 21 | .0 | -10.0 | -0.8 | 10.0 | -10.0 | -0.8 | .01 |
| GW | 9 | 21 | -10.0 | .0 | -0.8 | .0 | .0 | -0.8 | .01 |
| GW | 10 | 21 | .0 | .0 | -0.8 | 10.0 | .0 | -0.8 | .01 |
| GW | 11 | 21 | -10.0 | 10.0 | -0.8 | .0 | 10.0 | -0.8 | .01 |
| GW | 12 | 21 | .0 | 10.0 | -0.8 | 10.0 | 10.0 | -0.8 | .01 |
| GW | 13 | 4 | .0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | -0.8 | .01 |
| GW | 14 | 210 | .0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 67.5 | .01 |
| GW | 15 | 160 | .0 | 0.0 | 67.5 | 0.0 | 34.64 | 47.5 | .01 |
| GW | 16 | 160 | .0 | 0.0 | 67.5 | 0.0 | -34.64 | 47.5 | .01 |
| GW | 17 | 160 | .0 | 0.0 | 67.5 | 0.0 | 0.0 | 107.5 | .01 |
| GE -1 | | | | | | | | | |
| GN | 2 | 0 | 0 | 0 | 0.4e+1 | 1e-3 | | | |
| FR | 0 | 1024 | 0 | 0 | 0.007 | 0.007 | | | |
| LD | 0 | 15 | 160 | 160 | 1e+8 | 0. | 0. | | |
| LD | 0 | 16 | 160 | 160 | 1e+8 | 0. | 0. | | |
| LD | 0 | 17 | 160 | 160 | 1e+8 | 0. | 0. | | |
| EX | 4 | 1 | 10 | 0 | 0 | 0 | 107.50 | 90. | 0. 0.25 xQ |
| EN | | | | | | | | | |

V.1.1 Champ électrique

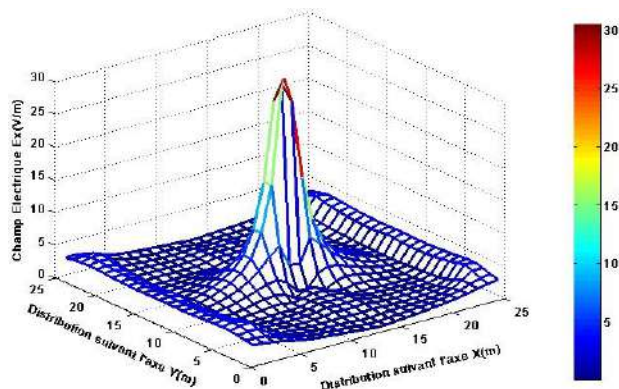


Figure III.5 Variation spatial de la composante E_x du champ électrique configuration 1.

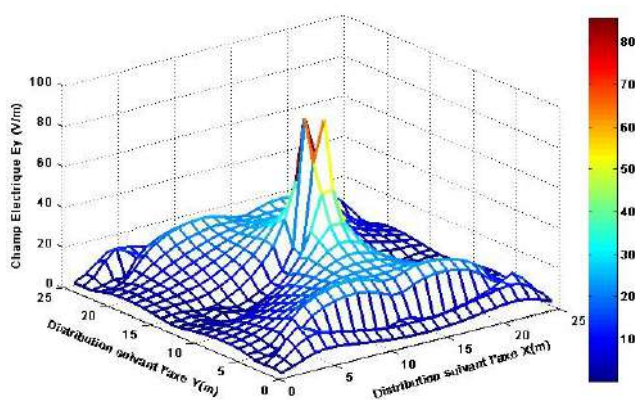


Figure III.6 Variation spatial de la composante E_y du champ électrique configuration 1.

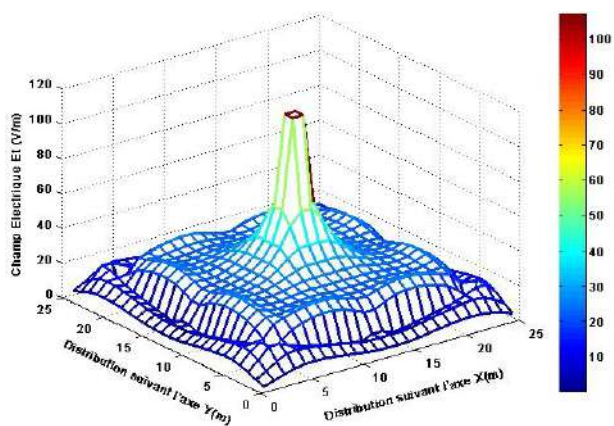


Figure III.7 Variation spatial du champ électrique E_t configuration 1.

Les figure III.5, III.6 et III.7 illustres la variation du champ électrique total E_t et la composante E_x et E_y rayonnée le long du profil pour un impact d'une onde de foudre sur l'un des pales de la turbine éolienne pour la configuration 1 du grille de mise à la terre.

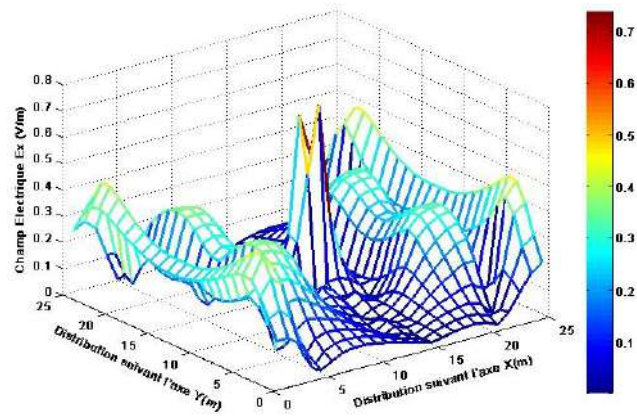


Figure III.8 Variation spatiale de la composante E_x du champ électrique configuration 2.

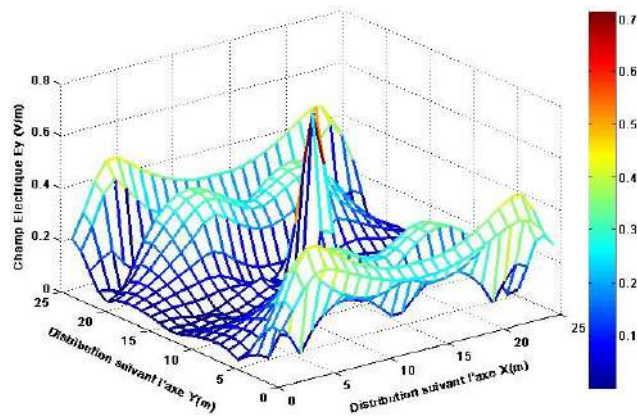


Figure III.9 Variation spatiale de la composante E_y du champ électrique configuration 2.

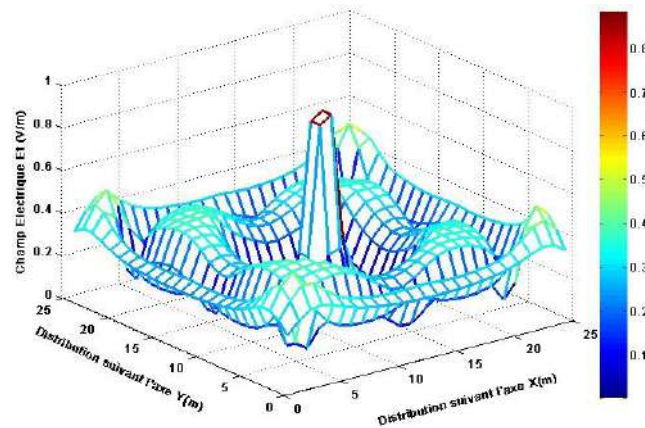


Figure III.10 Variation spatiale du champ électrique E_t configuration 2.

Les figures III.8, III.9 et III.10 illustrent la variation du champ électrique total E_t et la composante

E_x et E_y rayonnée le long du profil pour un impact d'une onde de foudre sur l'un des pales de la turbine éolienne pour la configuration 2 du grille de mise à la terre. Ces résultats montrent l'influence de la configuration des prise de terre de l'éolienne sur le champ électrique rayonné au

tour d'éolienne. On constate qu'une configuration plus complexe avec des électrodes vertical entraîne un champ rayonné moins important, ceci met en évidence une diminution des boucles de rayonnement.

V. 2 Champ électrique le long d'un profil de l'interface

V.2.1 Champ électrique

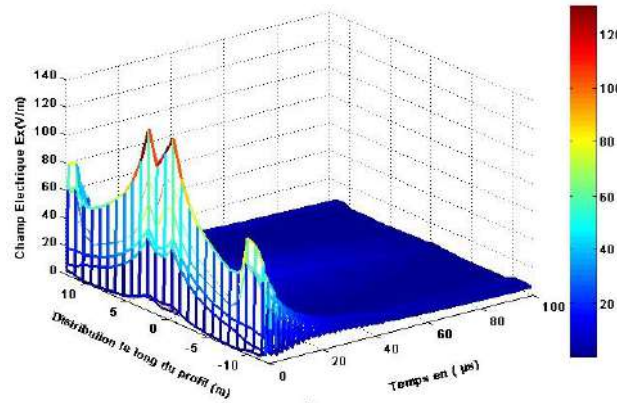


Figure III.11 Variation temporelle de la composante E_x du champ électrique configuration 1.

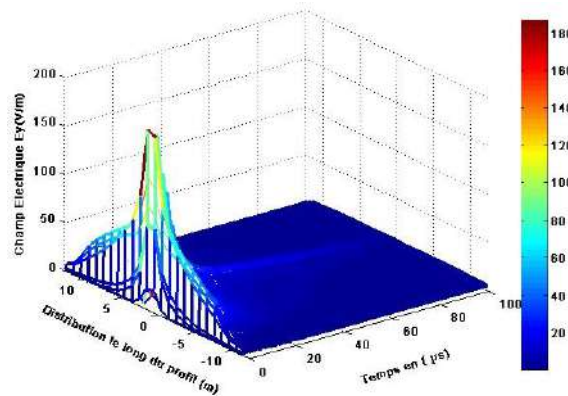


Figure III.12 Variation temporelle de la composante E_y du champ électrique configuration 1.

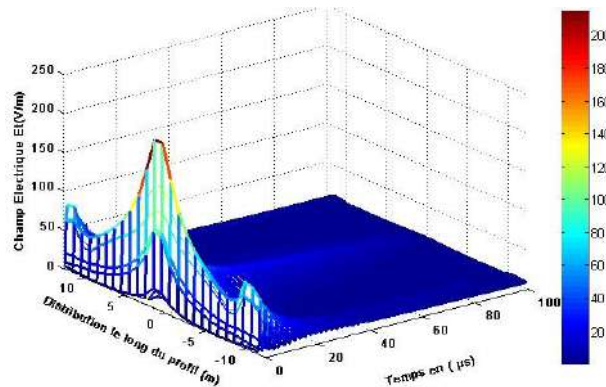


Figure III.13 Variation temporelle de la composante E_z du champ électrique configuration 1.

Les figure III.11, III.12 et III.13 illustres la variation du champ électrique total E_t et la composante E_x et E_y rayonnée le long du profil pour un impact d'une onde de foudre sur l'un des pales de la turbine éolienne pour la configuration 1 du grille de mise à la terre.

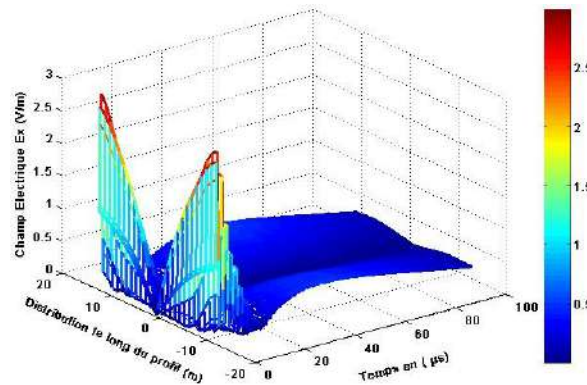


Figure III.14 Variation temporelle de la composante E_x du champ électrique configuration 2.

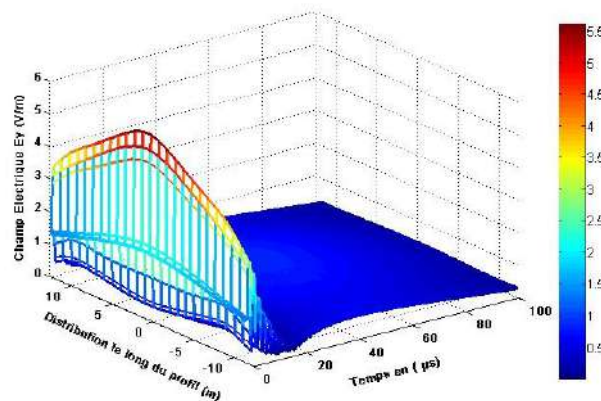


Figure III.15 Variation temporelle de la composante E_y du champ électrique configuration 2.

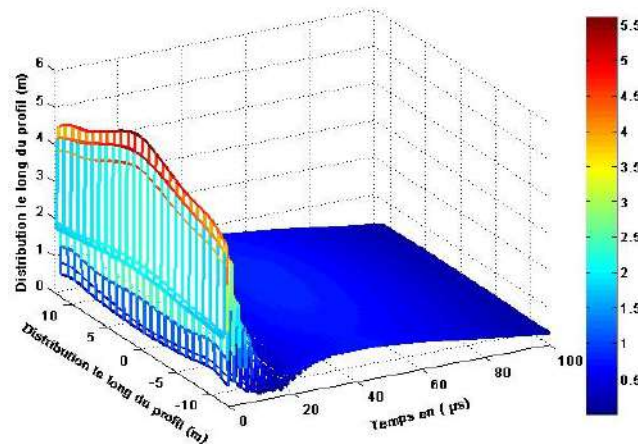


Figure III.16 Variation temporelle du champ électrique Et configuration 2.

Les figure III.14, III.15 et III.16 illustres la variation du champ électrique total E_t et la composante E_x et E_y rayonnée le long du profil pour un impact d'une onde de foudre sur l'un des pales de la turbine éolienne pour la configuration 1 du grille de mise à la terre. V. 2.2 Champ magnétique

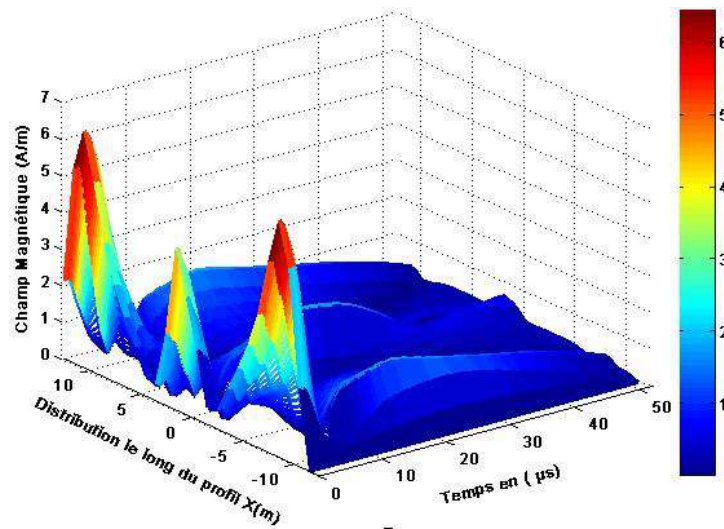


Figure III.17 Variation temporelle de la composante Hz du champ magnétique configuration 1.

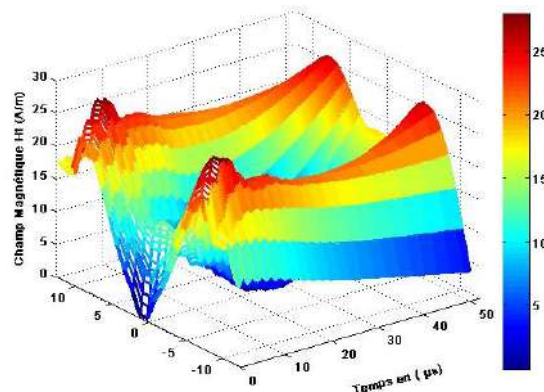


Figure III.18 Variation temporelle du champ magnétique Ht configuration 1. Les figure III.17, III.18 illustres la variation du champ magnétique total H_t et la composante H_z rayonnée le long du profil pour un impact d'une onde de foudre sur l'un des pales de la turbine éolienne pour la configuration 1 du grille de mise à la terre.

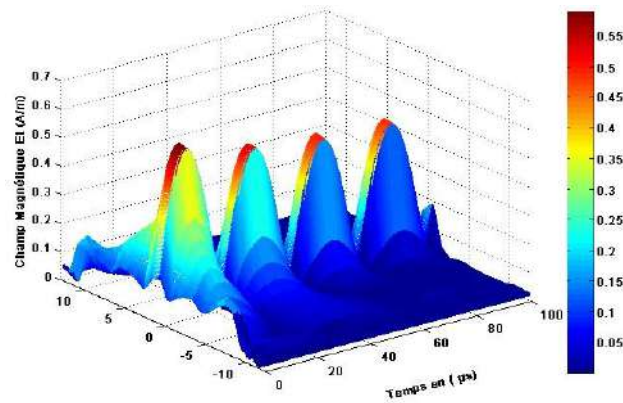


Figure III.19 Variation temporelle de la composante Hz du champ magnétique configuration 2.

Les figures III.5, III.6 et III.7 illustrent la variation de la composante du champ magnétique H_z rayonnée le long du profil pour un impact d'une onde de foudre sur un des pales de la turbine éolienne pour la configuration 1 du grille de mise à la terre.

Ces résultats montrent l'influence de la configuration des prises de terre de l'éolienne sur le champ magnétique rayonné au tour de l'éolienne. On constate qu'une configuration plus complexe avec des électrodes verticales entraîne un champ rayonné moins important, ceci met en évidence une diminution des boucles de rayonnement. **VI Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons évalué le rayonnement électromagnétique générés par les coups de foudre à l'éolienne en présence d'une grille de mise à la terre utilisant la méthode des dipôles Hertiens. Ensuite, l'effet des configurations des prises de terre des éoliennes sur le rayonnement électromagnétique d'impact d'une onde de foudre est discuté en comparant ces résultats de calculs. Il est à noter que les conclusions de ce travail changeront si le point d'observation est placé à un autre endroit, et a constaté que l'effet de la longueur du point d'observation sur les champs devient faible avec l'augmentation de la longueur du point d'observation.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les travaux de recherche présentés dans ce projet de master contribuent à l'analyse Pour la réponse électromagnétique transitoire des systèmes de mise à la terre en Perturbé, fonctionnement particulièrement à la suite d'une décharge de foudre sur les installations Éoliennes.

Nous avons tout d'abord identifié et caractérisé les différents paramètres qm influencent le comportement des systèmes de mise à la terre, en particulier lorsqu'ils diffusent un courant de foudre. La résistivité est l'élément le plus important dans la conception des systèmes de mise à la terre. Lorsque sa valeur est très élevée, le potentiel engendré par une décharge atmosphérique devient important.

Une synthèse des méthodes disponibles pour l'analyse du comportement transitoire des systèmes de mise à la terre a été aussi décrite.

Ensuite un modèle a été décrit pour représenter le comportement transitoire des systèmes de mise à la terre dans le domaine fréquentiel. Pour ce faire, nous nous sommes appuyés sur le modèle électromagnétique. Ce modèle basé sur la théorie des antennes, utilise la méthode numérique dite des moments. Le formalisme des antennes qui conduit vers la résolution d'un système matriciel en fréquentiel est le plus rigoureux mais de mise en œuvre délicate et nécessite des moyens numériques importants Cette modélisation fréquentielle nous a finalement permis d'établir diverses règles d'ingénierie permettant d'optimiser la structure des systèmes de mise à la terre des installations éoliennes.

Enfin, notre modèle nous a permis également d'estimer les réponses temporelles de l'onde électromagnétique créée par le système de mise à la terre sur son environnement matériel et proposer des solutions d'optimisations au sol plus résistif.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Belkacem Belkacem «contribution à l'amélioration de la qualité d'énergie d'une source de production décentralisée» thèse en vue de l'obtention du Diplôme de doctorat en sciences, université Mohamed Boubiaf (orane),2019 .
- [2] M.-J. DDAE_GRESS_Volume_0_Lettre_autorisation_Avril_2015_cle77fdf1.pdf,"
- [3] these_wind_turbine/Peesapati%20,%20Cotton-SupergenNanjing2009_2.pdf
- [4] Kevnin Aporte A.Tete«Réponse transitoire des coups foudre sur les installations éoliennes»,université du Québec en Abitibi témixamingue école de génie ,juin 2019 [5] J .Montanya«lightning intteraction and damages to wind turbines»,university of catalonia,Bercelona Tech(spain).2011,PDF
- [6] H.G. Arantzamendi «étude de structures d'intégration des système de génération décentralisée: application aux micro- réseaux» Thèse de doctorat INPG ,2006
- [7] D. Dib, A.Guebla, H.labar; «study of the lightning impact of the wind-turbine» ;Energy research journal, university of annaba and Tebessa ; laboratory of electrical engerineering LABGET ;12\08\2014
- [8] P. Vadaydhar; «lighting protection of wind turbines» ;degree of doctor ; university of Manchester,2010 .
- [9] T .Rouibah ; «contribution à la modélisation et à la simulation des prises de terre desinstallation électrique» ; thèse ; université Ferhat abbes-setif ;électrotechnique ; 11\11\2015 .
- [10] L. Grcev and F. Dawalibi, «An Electromagnetic Model for Transients in Grounding Systems», IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, N°. 4, pp. 1773-1781, 1990 . [11] L. Grcev and F. Dawalibi, «An Electromagnetic Model for Transients in Grounding Systems», IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, N°. 4, pp. 1773-1781, 1990 . [12] O. Biro, K. Preis, On the use of the magnetic vector potential in the finite element analysis of threedimensional eddy currents, IEEE Trans, On power delivery, vol.25, N°4, July 1989.
- [13] Liew A. C. and Darveniza M, Dynamic model of impulse characteristics of concentrated earths, Proc IEE, Vol. 121, N°. 2, pp. 123-135, 1974.
- [14] B. Rascalou, «Approche théorique de la mise à la terre : de l'étude de régime continu à l'analyse électromagnétique»; Thèse de doctorat en électromagnétisme. L'université Blaise Pascal, 02 octobr1987 .

- [15] Sommerfeld, rayonnement EM d'un dipôle en présence d'un demi-mi A. Sommerfeld, Über die Ausbreitung des wellen in der drahtlosen Telegraphie. Annal Physics Vol. 28. 1909.
- [16] Baños, A., Dipole Radiation in the Presence of a Conducting Half-Space, Oxford, 1966.
- [17] NEC, Numérical Electromagnetique code, janvie, 1992.
- [18] C.A. Nucci, cigré 33.01:lightning-induced voltage on voltage on overhead power lines, part I : Return-stroke current models with specified channel –base current for the evaluation of the return-stroke Electromagnetic fields Electra, N°.161, pp.74-102, Aug 1995.
- [19] Zeddani, A., and P. Degauque, current and voltage induced on a telecommunication cable by a lightning ,strook ,field by H.P.Corp., pp.377-400.1990.
- [20] F. Heidler, Analytic lightning current function for LEMP calculation, conference proceeding, ICLP4'85:18th I international Conference on Lightning Protection, VDE verlage, berlin, Germany, 453, 1985.

Annex

Annex

| GW | La géométrie | | | | | | | | |
|------|--|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| GW | ITG | NS | XW1 | YW1 | ZW1 | XW2 | YW2 | ZW2 | RAD |
| | I1 | I2 | F1 | F2 | F3 | F4 | F5 | F6 | F7 |
| (I1) | Sortie du texte au document | | | | | | | | |
| (I1) | Nombre de segments dans lesquels le fil sera divisé. | | | | | | | | |
| (F1) | Coordonnée x de la première extrémité du fil. | | | | | | | | |
| (F2) | Coordonnée y de la première extrémité du fil. | | | | | | | | |
| (F3) | Coordonnée z de la première extrémité du fil. | | | | | | | | |
| (F4) | Coordonnée x de la première extrémité du fil. | | | | | | | | |
| (F5) | Coordonnée y de la première extrémité du fil. | | | | | | | | |
| (F6) | Coordonnée z de la première extrémité du fil. | | | | | | | | |
| (F7) | Rayon de fil .ou pour l'option de segment conique. | | | | | | | | |

| EX | Excitation | | | | | | | | | |
|----|--|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| EX | I1 | I2 | I3 | I4 | F1 | F2 | F3 | F4 | F5 | F6 |
| I1 | Le type d'excitation utilisée. | | | | | | | | | |
| I2 | Nom utilisé. | | | | | | | | | |
| I3 | Nom utilisé. | | | | | | | | | |
| I4 | Nom utilisé. | | | | | | | | | |
| F1 | X position de l'élément courant en mètres. | | | | | | | | | |
| F2 | y position de l'élément courant en mètres. | | | | | | | | | |
| F3 | z position de l'élément courant en mètres. | | | | | | | | | |
| F4 | L'angle α (degrés) entre le plan x-y et le courant élément. | | | | | | | | | |
| F5 | L'angle β (degrés) entre le l'axe des x et la projection de l'élément courant sur le plan x-y. | | | | | | | | | |
| F6 | Moment actuel de la source Il. | | | | | | | | | |

Remarque : les paramètres entiers I3et I4 ne sont pas utilisés. Les zéros devraient être entrés dans ces positions.

Annex

| GN | Paramètres de sol | | | | | | | | | |
|-----------|--|-------|----|----|------|-----|----|----|----|----|
| | IPERF | NRADL | 0 | 0 | EPSR | SIG | F3 | F4 | F5 | F7 |
| GN | I1 | I2 | I3 | I4 | F1 | F2 | F3 | F4 | F5 | F7 |
| I1 | Type de sol. | | | | | | | | | |
| I2 | Nombre de fils radiaux dans l'approximation de l'écran de bas. | | | | | | | | | |
| I3 | 0 | | | | | | | | | |
| I4 | 0 | | | | | | | | | |
| F1 | Constante diélectrique relative pour la masse au voisinage de l'antenne. | | | | | | | | | |
| F2 | Conductivité en S/m du sol. | | | | | | | | | |
| F3 | Le rayon de l'écran. | | | | | | | | | |
| F4 | Le rayon des fils de l'écran. | | | | | | | | | |
| F5 | L'angle β (degrés) entre le l'axe des x et la projection de l'élément courant sur le plan x-y. | | | | | | | | | |
| F6 | Moment actuel de la source Il. | | | | | | | | | |

| LD | Chargement d'impédance | | | | | | |
|-----------|---|-------|--------|--------|-----|-----|-----|
| LD | LDTYP | LDTAG | LDTAGF | LDTAGT | ZIR | ZLI | ZLC |
| | I1 | I2 | I3 | I4 | F1 | F2 | F3 |
| I1 | Détermine le type de chargement utile. | | | | | | |
| I2 | Numéro d'étiquette ; identifie les sections de fils à charger par leurs numéros d'étiquettes. | | | | | | |
| I3 | Dernier segment. | | | | | | |
| I4 | Dernier segment. | | | | | | |
| F1 | Résistance en ohms. | | | | | | |
| F2 | Inductance en hernies. | | | | | | |
| F3 | Capacité dans les farads. | | | | | | |

XQ : Exécuter pour calculer les courants seulement.

EN : Fin du fichier d'entrée.

GE : Entrée de géométrie de fin.

CE : Sorti du texte au document

ملخص

لدراسة تأثير البرق على تربيينات الرياح لتوليد الطاقة الكهربائية تكون أدوات المحاكاة أكثر تطورا وأكثر دقة. الهدف من هذا العمل هو دراسة أنظمة التأريض تربيينات الرياح المعرضة للبرق نحدد المعلومات المختلفة التي تؤثر على سلوك أنظمة التأريض في مجال التردد, كما تم أخذ نموذج كهرومغناطيسي من نظرية الهوائيات لتمثيل سلوك هذه الأنظمة في مجال التردد. كما يمكن محاكاة كل الظواهر المغناطيسية التي تم إجراؤها, كذلك يتطلب تنفيذ كتابة معادلة تكاملية للمجال الكهربائي (EFIE) يكون حلها بصيغة مبسطة باستخدام طريقة اللحظات.

كما يتم استخدام النماذج التي تم تطويرها في هذا المشروع لدراسة الظواهر العابرة لشبكة التأريض لتربيينات الرياح على ترددات عالية و المشاكل التي تخلفها الصدمة الكهربائية على محطات طاقة الرياح نقوم بتقديم حلول لتقليل من أضرار الصواعق.

الكلمات المفتاحية: تربيينات الرياح, شبكة التأريض, طريقة اللحظات.

Résumé

Pour étudier l'effet de la foudre sur les éoliennes pour la production d'électricité, les outils de simulation sont plus sophistiqués. L'objectif de ce domaine est de modéliser un modèle électromagnétique à partir de la théorie des des antennes pour représenter le comportement dans le domaine fréquentiel. fait, signal, signal, opportunité, en bon état, bon état, bon état, bon état, bon état, bon état, bon état Les applications qui ont été développées dans le projet pour étudier les phénomènes transitoires du réseau de terre des éoliennes à hautes fréquences et les problèmes laissés par les chocs électriques sur les éoliennes sont également utilisés.

Mots clés : éoliennes, réseau de mise à la terre, méthode des moments.

abstract

To study the effect of lightning on wind turbines for the production of electricity, the tools of the simulations are more remarkable. The objective of this field is to model an electromagnetic model from antenna theory to represent behavior in the frequency domain. fact, signal, signal, opportunity, in good condition, good condition, good condition, good condition, good condition, good condition, good condition, good condition, good condition high frequencies and problems left by electric shocks on wind turbines are also used.

Keywords: wind turbines, earthing network, method of moments.