



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES

DÉPARTEMENT DE GENIE ÉLECTRIQUE



THÈSE

Présentée par :

Mr. YOUNES Abdelbari

En vue de l'obtention du diplôme de :

DOCTORAT (L.M.D)

Spécialité : Réseaux Électriques

THÈME

Protection des éoliennes modernes contre la foudre

Devant le Jury :

SEBAA Morsli	Professeur	Université de Tiaret	Président
MIMOUNI ABDENBI	Professeur	Université de Tiaret	Rapporteur
ALLAOUI Tayeb	Professeur	Université de Tiaret	Examineur
BENDAOUOUD Abdelber	Professeur	Université de Sidi Bel Abbes	Examineur
BRAHAMI Mustapha	Professeur	Université de Sidi Bel Abbes	Examineur
ARZAG Kaddour	Professeur	Université de Saida	Examineur

Tiaret -2023-2024

- ملخص:

يتناول هذا العمل حماية توربينات الرياح الحديثة من البرق. يقدم الجزء الأول من العمل لمحة عامة عن طاقة الرياح وتطورها العالمي وإمكاناتها في الجزائر. أما الجزء الثاني فقد تناول ظاهرة البرق وتأثيراتها على توربينات الرياح ووسائل الحماية المتوفرة. ويركز الجزء الثالث على نمذجة المجال الكهرومغناطيسي الناتج عن سقوط البرق على توربينات الرياح، بينما يحلّل الجزء الرابع أداء أنظمة الحماية. باستخدام نموذج رقمي تم تطويره باستخدام برنامج COMSOL Multiphysics، بعد التحقق من صحته، تمكنا من التنبؤ بكثافة المجال الكهربائي على أسطح الشفرة، الناتج عن ضربة البرق. كشفت نتائجنا عن الأهمية الحاسمة لأجهزة الاستقبال المثبتة على شفرات توربينات الرياح في تقليل مخاطر الأضرار الناجمة عن الصواعق. من خلال تقييم المجال الكهربائي في محيط أجهزة الاستقبال مختلفة، تمكنا من تحديد العوامل الرئيسية التي تؤثر على فعالية الاعتراض وتقديم توصيات لتحسين أنظمة الحماية من الصواعق.

الكلمات المفتاحية: توربينات الرياح، الشفرات، أجهزة الاستقبال، الصاعقة، أنظمة الحماية من ضربات الصواعق.

-Abstract:

This work examines the protection of modern wind turbines against lightning. The first part of this work provides an overview of wind energy, its global evolution, and its potential in Algeria. The second explores the phenomenon of lightning, its effects on wind turbines, and the available protection methods. The third part focuses on modeling the electromagnetic field radiated by the interaction lightning-wind turbine, while the fourth part analyzes the performance of lightning protection systems. Using a numerical model developed with COMSOL Multiphysics software, once validated, we were able to predict the intensity of the electric field on the blade surfaces, resulting from a lightning strike. Our results revealed the critical importance of receivers installed on wind turbine blades in reducing the risk of lightning damage. By evaluating the electric field in the vicinity of receivers for different configurations, we were able to identify key factors that influence interception effectiveness and provide recommendations for improving lightning protection systems.

Key words: Wind turbine, blades, receivers, lightning, LPS.

- Résumé :

Ce travail examine la protection des éoliennes modernes contre la foudre. La première partie du travail offre un aperçu de l'énergie éolienne, son évolution mondiale et son potentiel en Algérie. La deuxième partie explore le phénomène de la foudre, ses effets sur les éoliennes et les moyens de protection disponibles. La troisième partie se penche sur la modélisation du champ électromagnétique rayonné par l'interaction foudre-éolienne, tandis que la quatrième partie analyse les performances des systèmes de protection. En utilisant un modèle numérique développé avec le logiciel COMSOL Multiphysics, une fois validé, nous avons pu prédire l'intensité du champ électrique sur les surfaces des pales, résultant d'un impact de foudre. Nos résultats ont révélé l'importance critique des récepteurs installés sur les pales d'éoliennes dans la réduction des risques de dommages causés par la foudre. En évaluant le champ électrique au voisinage des récepteurs pour différentes configurations, nous avons pu identifier les facteurs clés qui influent sur l'efficacité de l'interception et fournir des recommandations pour l'amélioration des systèmes de protection contre la foudre.

-Mots clés : Éolienne, pales, récepteurs, foudre, LPS.

Remerciement

Je remercie tout d'abord Allah de m'avoir prêté santé et volonté pour mener à terme cette thèse.

Je tiens à remercier mon directeur de thèse, le Professeur Abdenbi Mimouni, qui m'a guidé dans mon travail et conseillé tout au long de ces années de recherche. Sa présence et ses observations judicieuses ont été d'une aide précieuse pour la réalisation de ce travail. Son expérience et ses connaissances pour le domaine ont largement participé à la bonne réussite de ma thèse.

Je tiens à remercier énormément Mr Omar Mohamed, enseignant à l'université Ibn Khaldoun de Tiaret et membre de notre laboratoire de recherche (LGEP) qui m'a aidé avec ces conseils.

Un remerciement voué au Professeur Driss NEHARI de l'université de Ain Temouchent de m'avoir donné l'accès au logiciel comsol.

J'adresse mes sincères remerciements au Pr. SEBAA Morsli de l'université Ibn Khaldoun de Tiaret, pour avoir accepté de présider le jury de ma soutenance. Mes remerciements vont également au Pr ALLAOUI Tayeb l'université Ibn Khaldoun de Tiaret, Pr BENDAOUD Abdelber de l'université Djilali Liabès de Sidi-bel-abbès, Pr BRAHAMI Mustapha de l'université Djilali Liabès de Sidi-bel-abbès et Pr ARZAG Kaddour de l'université Saida pour avoir accepté de faire partie du jury et d'examiner ce travail.

Je tiens à remercier sincèrement tous les professeurs et intervenants qui, par leurs mots, leurs textes et leurs conseils ont guidé ma réflexion au cours de mes travaux de recherche.

Dédicace

À mes chers parents et frères, qui m'ont inspiré et m'ont poussé à atteindre la position que j'occupe aujourd'hui. Ils m'offrent toujours leur soutien moral, émotionnel et financier.

Table des matières

Table des matières	I
Liste des Figures	V
Liste des tableaux.....	IX
Acronymes :	X
Introduction Générale	1
Chapitre I : Etat de l'art sur les énergies éoliennes	4
I.1- Introduction	5
I.2- Energie éolienne en chiffres :	5
I.2.1- Situation actuelle de l'énergie éolienne dans le monde :.....	5
I.2.2- L'énergie éolienne en Algérie :	6
I.3- Types d'éoliens selon l'orientation de leurs axes :	7
I.3.1- Éoliennes à axe vertical :	7
I.3.2- Éoliennes à axe horizontal :	8
I.4- Classement des éoliennes selon leur vitesse de rotation :	9
I.4.1- Vitesse Fixe :	9
I.4.2- Vitesse Variable :	10
I.5- AEROGENERATEUR :	10
I.5.1- Principe de fonctionnement :	10
I.5.2- Constitution d'un aérogénérateur :	11
I.6- CRITERES DE CONCEPTION D'EOLIENNE A AXE HORIZONTAL :	12
I.6.1- Critères de taille :	12
I.6.2- Critères de site d'installation :	14
I.6.3- Critères d'aérodynamique des pales :	15
I.7- MODES D'OPERATION D'UNE EOLIENNE.....	19
I.7.1- Éolienne raccordée au réseau	19
I.7.2- Eolienne alimentant une charge isolée	19
I.8- Conclusion.....	19
Chapitre II : Phénomène de foudre, effets et moyens de protection	21
II.1- Introduction :	22
II.2- La foudre à travers l'histoire :	22
II.3- Physique du Phénomène Orageux :	23
II.3.1- Nuages Orageux :	23

II.3.2- Electrification du Nuage Orageux :	24
II.4- PHENOMENE DE Foudre :	25
II.4.1- Foudre, Eclair et Tonnerre :	25
II.4.2- Les différents types de décharges de foudre :	25
II.4.3- Classification des décharges nuage-sol :	26
II.5- Observations expérimentales des courants de foudre et des champs électromagnétiques associés :	29
II.5.1- Courant de l'arc en retour :	29
II.6- Caractérisation des champs électromagnétiques de l'arc en retour en fonction de la distance	30
II.7- Caractéristiques de l'occurrence de la foudre / systèmes de localisation de la foudre :	31
II.8- EFFETS DE LA Foudre :	31
II.8.1- Effets électriques :	32
II.8.2- Effets thermiques :	32
II.8.3- Effets électrodynamiques :	33
II.8.4- Effets électrochimiques :	33
II.8.5- Effets liés aux champs électromagnétiques :	33
II.8.6- Effet de la foudre sur les éoliennes :	34
II.9- PROTECTION CONTRE LA Foudre :	36
II.9.1- Moyens de protection contre les effets de la foudre :	36
II.9.2- Protection des lignes de distribution contre la foudre :	38
II.9.3- Protection des éoliennes contre la foudre :	38
II.9.4- Mise à la terre :	42
II.10- Conclusion	43
Chapitre III : Modélisation et simulation du champ électromagnétique rayonné par l'interaction foudre-éolienne	44
III.1- Introduction :	45
III.2- Classification des modèles du courant de l'arc en retour :	46
III.3- Distribution du courant de foudre dans les modèles d'ingénieur	47
III.3.1- Géométrie du problème	47
III.3.2- Représentation générale des modèles d'ingénieur	48
III.4- Courant de l'arc en retour à la base du canal de foudre :	49
III.4.1- Le modèle bi-exponentiel :	49
III.4.2- Fonction d'Heidler :	50
III.5- Extension des modèles d'ingénieur pour prendre en compte les objets élevés (cas des tours)	54

III.5.1- Extension des modèles d'ingénieur basés sur la représentation de sources distribuées (modèle de Rachidi).....	54
III.5.2- Extension des modèles d'ingénieur basés sur la représentation de source de tension localisée (modèle de Baba et Rakov).....	56
III.5.3- Allure des courants au sommet et à base des tours élevées.....	56
III.6- Champ électromagnétique généré par l'interaction d'un coup de foudre avec une tour :.....	58
III.7- La méthode des Différences Finies dans le Domaine Temporel (FDTD)	59
III.7.1- L'origine de la FDTD.....	59
III.7.2- L'algorithme de Yee.....	60
III.8- Principe de la méthode FDTD	61
III.9- Conditions aux limites absorbantes (ABC).....	64
III.10- Les considérations requises pour la stabilité d'algorithme FDTD	66
III.11- Application de la méthode FDTD pour le calcul du champ électromagnétique de la foudre .66	
III.11.1- Coup de foudre tombant sur une éolienne avec un sol homogène.....	66
III.11.2- Champ électromagnétique en dessous du sol.....	69
III.11.3- Champ électromagnétique au-dessus du sol.....	71
III.12- Conclusion.....	72
Chapitre IV : Etude des performances des systèmes de protection des éoliennes contre la foudre	73
IV.1- Introduction :	74
IV.2- Corrélation entre la foudre et le champ électrique.....	74
IV.3- Distance entre le leader de la foudre et l'éolienne :	75
IV.4- Conception d'un modèle d'une éolienne à l'aide de COMSOL Multiphysics.....	76
IV.4.1- Représentation des surfaces des turbines et l'air environnant	76
IV.4.2- Modèles numériques pour le canal de foudre	76
IV.4.3- Équations gouvernantes.....	78
IV.5- Création du modèle 3D des turbines	78
IV.6- Analyse par éléments finis FEM du logiciel Comsol Multiphysics.....	80
IV.7- Validation du modèle	81
IV.7.1- Récepteur rond de 0,3 m de rayon :.....	82
IV.7.2- Récepteur rond de 0,2 m de rayon :.....	82
IV.7.3- Conducteur en forme de pointe :	83
IV.7.4- Deux récepteurs ronds de 0,2 m de rayon :	83
IV.8- Etude des performances des systèmes de protection des éoliennes contre la foudre :	84
IV.8.1- Effet de la taille et de la forme des récepteurs sur les performances des LPS :	84
IV.8.2- Impact du changement de la position du canal de foudre sur les performances des systèmes de protection « LPS » :	90

Table des matières

IV.8.3- Effet de l'angle de rotation des pales d'éoliennes sur les performances des systèmes de protection contre la foudre :	96
IV.9- Conclusion.....	102
Conclusion générale	104
Bibliographie	106

Liste des Figures

FIGURE I-1 VITESSE MOYENNE DU VENT EN (M/S) A 10 M AU-DESSUS DU SOL EN ALGERIE.	6
FIGURE I-2 FERME EOLIENNE DE KABERTENE A ADRAR	7
FIGURE I-3 STRUCTURE DE SAVONIUS	8
FIGURE I-4 AEROGENERATEUR A AXE HORIZONTAL	8
FIGURE I-5 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE EOLIENNE.	11
FIGURE I-6 ÉOLIENNE DE GRANDE PUISSANCE	11
FIGURE I-7 DISTRIBUTION DE WEIBULL	14
FIGURE I-8 LES PROFILS DE SERIE RISØ-A	17
FIGURE I-9 LES PROFILS DE SERIE RISØ-P	17
FIGURE I-10 LES PROFILS DE SERIE RISØ-B	17
FIGURE II-1 SEPARATION DES CHARGES DANS UN NUAGE ORAGEUX	25
FIGURE II-2 DIFFERENTS TYPES DE DECHARGES DE Foudre	26
FIGURE II-3 LES 4 TYPES DE DEVELOPPEMENT DES DECHARGES DE Foudre SOL-NUAGE	27
FIGURE II-4 ILLUSTRATION DES DIFFERENTES PHASES D'UNE DECHARGE NEGATIVE NUAGE-SOL	28
FIGURE II-5 UNE PHOTO DU SITE D'EXPERIMENTATION DE LA Foudre DECLENCHEE ARTIFICIELLEMENT DANS LE SHANDONG EN 2005.	29
FIGURE II-6 TOUR DE 540 M DE HAUTEUR A MOSCOU	29
FIGURE II-7 CHAMP ELECTRIQUE VERTICAL (COLONNE GAUCHE) ET CHAMP MAGNETIQUE AZIMUTAL (COLONNE DROITE) POUR LE PREMIER ARC EN RETOUR (LIGNE CONTINUE) ET L'ARC EN RETOUR SUBSEQUENT (LIGNE POINTILLEE) A DES DISTANCES DE 1 A 200 KM	30
FIGURE II-8 TENSION DE PAS	32
FIGURE II-9 PALES D'EOLIENNES DETRUITE PAR LA Foudre.....	35
FIGURE II-10 DELAMINATION ET RUPTURE DU LAMINE CAUSEES PAR UN RECHAUFFEMENT RAPIDE PAR EFFET JOULE DU A UN IMPACT DE Foudre	35
FIGURE II-11 ECLATEUR A CORNES AVEC TIGE ANTI-OISEAU	36
FIGURE II-12 PARATONNERRE A DISPOSITIF D'AMORÇAGE	37
FIGURE II-13 PROTECTION D'UN BATIMENT PAR UN PARATONNERRE A CAGE MAILLEE	37
FIGURE II-14 APPLICATION DE LA METHODE DE LA SPHERE ROULANTE A L'ASSEMBLAGE DES TURBINES	39
FIGURE II-15 DIVISION DE L'EOLIENNE EN DIVERSES ZONES DE PROTECTION CONTRE LA Foudre	40
FIGURE II-16 MAILLE DE PETITE DIMENSION POUR NACELLE	41
FIGURE II-17 SYSTEMES DE PROTECTION DES EOLIENNES CONTRE LA Foudre	42
FIGURE III-1 GEOMETRIE DU PROBLEME.	47
FIGURE III-2 COURANT A LA BASE DU CANAL D'UN ARC SUBSEQUENT TYPIQUE CORRESPONDANT AUX DEUX MODELES (MODELE D'HEIDLER ET MODELE BI-EXPONENTIEL).....	51
FIGURE III-3 DERIVEE DE L'APPROXIMATION ANALYTIQUE DU COURANT POUR LES DEUX MODELES	51
FIGURE III-4 ALLURE DU COURANT A LA BASE DU CANAL OBTENUE GRACE AU MODELE HYBRIDE.	52
FIGURE III-5 PREMIER ARC ET L'ARC EN RETOUR SUBSEQUENT A LA BASE DU CANAL.	53
FIGURE III-6 PROPAGATION DES IMPULSIONS DE COURANT LE LONG DU CANAL ET LE LONG DE LA TOUR.	54
FIGURE III-7 COURANT A LA BASE DE LA TOUR PEISSENBERG (168-M).	57
FIGURE III-8 COURANT AU SOMMET DE LA TOUR PEISSENBERG (168-M).	57
FIGURE III-9 COURANT A LA BASE DE LA TOUR CN (553-M).	57
FIGURE III-10 COURANT AU SOMMET DE LA TOUR CN (553-M).....	58

FIGURE III-11 GEOMETRIE DU PROBLEME POUR LE CALCUL DU CHAMP ELECTROMAGNETIQUE RAYONNE PAR LA Foudre EN PRESENCE D'UNE TOUR (CAS D'UN SOL PARFAIT)	58
FIGURE III-12 LA CELLULE DE YEE EN 3D ET EN COORDONNEES CARTESIENNES	61
FIGURE III-13 PRINCIPE DE LA DISCRETISATION TEMPORELLE	61
FIGURE III-14 MAILLAGE SPATIAL EN COORDONNEES CYLINDRIQUES	62
FIGURE III-15 DOMAINE DE CALCUL EN (2D) AVEC UN SYSTEME A COORDONNEES CYLINDRIQUES	63
FIGURE III-16 MAILLAGE FDTD-2D COORDONNEES CYLINDRIQUE.	64
FIGURE III-17 REPRESENTATION DE L'EOLIENNE COMME UNE TOUR	67
FIGURE III-18 GEOMETRIE DU PROBLEME.	67
FIGURE III-19 COURANT A LA BASE DU CANAL DE Foudre	68
FIGURE III-20 CHAMP ELECTRIQUE HORIZONTAL A R = 50M, D1 =5M.	69
FIGURE III-21 CHAMP ELECTRIQUE VERTICAL A R = 50M, D1 = 5M.	69
FIGURE III-22 CHAMP MAGNETIQUE AZIMUTAL A R = 50M, D1 = 5M.	70
FIGURE III-23 CHAMP ELECTRIQUE HORIZONTAL A R = 50M, H = 10M.....	71
FIGURE III-24 CHAMP ELECTRIQUE VERTICAL A R = 50M, H = 10M.	71
FIGURE III-25 CHAMP MAGNETIQUE AZIMUTAL A R = 50M, H = 10M.	71
FIGURE IV-1 TRACE DE CONTOUR DU CHAMP ELECTRIQUE AUTOUR DU RECEPTEUR SUR L'EOLIENNE	75
FIGURE IV-2 MODELE COMSOL 4X4X4 KM AVEC L'EOLIENNE ET LE CANAL DE Foudre	76
FIGURE IV-3 MODELE DE REFERENCE D'UNE EOLIENNE NREL DE 5 MW	78
FIGURE IV-4 PALE D'EOLIENNE	79
FIGURE IV-5 A GAUCHE : MODELE DE LA TOUR DE LA TURBINE. A DROITE : ACHEVEMENT DE L'ASSEMBLAGE DE LA TURBINE DE 5 MW DU NREL	79
FIGURE IV-6 QUATRE TYPES DE RECEPTEURS INSTALLES SUR LA TURBINE 5MW DU NREL	80
FIGURE IV-7 MODELE COMSOL POUR L'ANALYSE FEM DU CHAMP ELECTRIQUE.....	80
FIGURE IV-8 MAILLAGE FIN SUR LA SURFACE DE DECOUPE DE LA TURBINE POUR UNE GRANDE PRECISION	81
FIGURE IV-9 CHAMP ELECTRIQUE AUTOUR D'UN RECEPTEUR ROND DE DIAMETRE 0.3M A GAUCHE – MODELE DE LA REFERENCE; A DROITE – NOTRE MODELE	82
FIGURE IV-10 CHAMP ELECTRIQUE AUTOUR D'UN RECEPTEUR ROND DE DIAMETRE 0.2M : A GAUCHE – MODELE DE LA REFERENCE ; A DROITE – NOTRE MODELE	83
FIGURE IV-11 CHAMP ELECTRIQUE POUR UN RECEPTEUR EN FORME DE POINTE : A GAUCHE - MODELE DE REFERENCE ; A DROITE – NOTRE MODELE	83
FIGURE IV-12 CHAMP ELECTRIQUE POUR DEUX RECEPTEURS RONDS DE 0.2 M DE DIAMETRE : A GAUCHE – MODELE DE LA REFERENCE ; A DROITE – NOTRE MODELE	84
FIGURE IV-13 LES DIFFERENTES FORMES ET TAILLES DES RECEPTEURS UTILISEES DANS LA SIMULATION NUMERIQUE.....	85
FIGURE IV-14 CONFIGURATION DU PROBLEME DANS COMSOL MULTIPHYSICS.....	86
FIGURE IV-15 IMPACT DES DIMENSIONS MAXIMALES DES MAILLES SUR LES DISTRIBUTIONS ATTENDUES DE L'INTENSITE DU CHAMP ELECTRIQUE DANS LES REGIONS DE LA POINTE	86
FIGURE IV-16 DISTRIBUTION DE L'INTENSITE DU CHAMP ELECTRIQUE SUR LA PALE POUR DIFFERENTES FORMES ET TAILLES DES RECEPTEURS.....	87
FIGURE IV-17 LIGNES DU CHAMP ELECTRIQUE	89
FIGURE IV-18 LIGNES DU CHAMP ELECTRIQUE SUR LA PALE DE L'EOLIENNE POUR DIVERSES CONFIGURATIONS DU RECEPTEUR : (A) RECEPTEUR EN FORME DE PETIT DISQUE ; (B) RECEPTEUR EN FORME DE GRAND DISQUE; (C) RECEPTEUR DOUBLE EN FORME DE PETIT DISQUE; (D) 5 RECEPTEURS EN FORME DE PETITS DISQUES ; (E) NEUF RECEPTEURS EN FORME DE PETITS DISQUES ; (F) RECEPTEUR EN FORME DE POINTE (G) RECEPTEURS EN FORME DE PLAQUES ; (H) RECEPTEUR EN FORME DE DEUX LIGNES	89

FIGURE IV-19 TROIS TYPES DE RECEPTEURS UTILISES DANS L'ETUDE.....	91
FIGURE IV-20 GEOMETRIE DU PROBLEME	91
FIGURE IV-21 DISTRIBUTIONS DE L'INTENSITE DU CHAMP ELECTRIQUE DANS LA REGION DE LA POINTE (CONFIGURATION 1) POUR DIFFERENTES POSITIONS DU CANAL DE Foudre : (A) POSITION A ; (B) POSITION B, (C) POSITION C, (D) POSITION D	92
FIGURE IV-22 DISTRIBUTIONS DE L'INTENSITE DU CHAMP ELECTRIQUE SUR LA LAME AVEC DEUX RECEPTEURS SOUS FORME DE PETITS DISQUES (CONFIGURATION 2) POUR DIFFERENTES POSITIONS DU CANAL DE Foudre: (A) POSITION A ; (B) POSITION B, (C) POSITION C, (D) POSITION D	93
FIGURE IV-23 DISTRIBUTIONS DE L'INTENSITE DU CHAMP ELECTRIQUE SUR LA LAME AVEC UN RECEPTEUR SOUS FORME DE PETIT DISQUE (CONFIGURATION 3) POUR DIFFERENTES POSITIONS DU CANAL DE Foudre : (A) POSITION A ; (B) POSITION B, (C) POSITION C, (D) POSITION D.....	93
FIGURE IV-24 COMPARAISON DU CHAMP ELECTRIQUE ATTENDU LE LONG DU BORD DE FUITE POUR DIFFERENTES POSITIONS DU CANAL DE Foudre. (AVEC CONFIGURATION 1)	94
FIGURE IV-25 COMPARAISON DE L'INTENSITE DU CHAMP ELECTRIQUE LE LONG DU BORD DE FUITE POUR DIFFERENTES POSITIONS DU CANAL DE Foudre. (AVEC CONFIGURATION 2)	94
FIGURE IV-26 COMPARAISON DU CHAMP ELECTRIQUE ATTENDU LE LONG DU BORD DE FUITE POUR DIFFERENTES POSITIONS DU CANAL DE Foudre. (AVEC CONFIGURATION 3)	95
FIGURE IV-27 COMPARAISON DU CHAMP ELECTRIQUE LE LONG DU BORD D'ATTAQUE POUR DIFFERENTES POSITIONS DU CANAL DE Foudre. (AVEC CONFIGURATION 1).....	95
FIGURE IV-28 COMPARAISON DU CHAMP ELECTRIQUE ATTENDU LE LONG DU BORD D'ATTAQUE POUR DIFFERENTES POSITIONS DU CANAL DE Foudre. (AVEC CONFIGURATION 2)	96
FIGURE IV-29 COMPARAISON DU CHAMP ELECTRIQUE ATTENDU LE LONG DU BORD D'ATTAQUE POUR DIFFERENTES POSITIONS DU CANAL DE Foudre. (AVEC CONFIGURATION 3)	96
FIGURE IV-30 LES TROIS DIFFERENTS RECEPTEURS UTILISES DANS L'ETUDE : (1) RECEPTEUR SOUS FORME DE POINTE, (2) RECEPTEUR SOUS FORME DE PETIT DISQUE DE RAYON 0.2M, (3) RECEPTEUR FORME DE DEUX DISQUES DE RAYON 0.2 M CHACUN	97
FIGURE IV-31 TROIS ANGLES DE ROTATION DES PALES D'EOLIENNES UTILISES (A) PALE A 0°, (B) A 25° ET (C) A 50°.....	97
FIGURE IV-32 DISTRIBUTIONS DE L'INTENSITE DU CHAMP ELECTRIQUE DANS LA REGION DE LA POINTE (CONFIGURATION 1) POUR DIFFERENTS ANGLES DE ROTATION DE LA PALE : (A) 0°, (B) 25°, (C) 50°.....	98
FIGURE IV-33 DISTRIBUTIONS DE L'INTENSITE DU CHAMP ELECTRIQUE SUR LA LAME AVEC UN RECEPTEUR SOUS FORME DE PETIT DISQUE (CONFIGURATION 2) POUR DIFFERENTS ANGLES DE ROTATION DE LA PALE : (A) 0°, (B) 25°, (C) 50°	98
FIGURE IV-34 DISTRIBUTIONS DE L'INTENSITE DU CHAMP ELECTRIQUE SUR LA LAME AVEC DES RECEPTEUR DOUBLE DISQUES (CONFIGURATION 3) POUR DIFFERENTS ANGLES DE ROTATION DE LA PALE : (A) 0°, (B) 25°, (C) 50°	98
FIGURE IV-35 COMPARAISON DU CHAMP ELECTRIQUE ATTENDU LE LONG DU BORD DE FUITE DANS LA PLAGES DE 55 A 61,5 M POUR DIFFERENTS ANGLES DE ROTATION DE LA PALE AVEC RECEPTEUR DA CONFIGURATION 1	99
FIGURE IV-36 COMPARAISON DU CHAMP ELECTRIQUE ATTENDU LE LONG DU BORD D'ATTAQUE DANS LA PLAGES DE 55 A 61,5 M POUR DIFFERENTS ANGLES DE ROTATION DE LA PALE AVEC RECEPTEUR LA CONFIGURATION 1	99
FIGURE IV-37 COMPARAISON DU CHAMP ELECTRIQUE ATTENDU LE LONG DU BORD DE FUITE DANS LA PLAGES DE 55 A 61,5 M POUR DIFFERENTS ANGLES DE ROTATION DE LA PALE AVEC RECEPTEUR LA CONFIGURATION 2	100
FIGURE IV-38 COMPARAISON DU CHAMP ELECTRIQUE ATTENDU LE LONG DU BORD D'ATTAQUE DANS LA PLAGES DE 55 A 61,5 M POUR DIFFERENTS ANGLES DE ROTATION DE LA PALE AVEC RECEPTEUR LA CONFIGURATION 2	100

Liste des Figures

FIGURE IV-39 COMPARAISON DU CHAMP ELECTRIQUE ATTENDU LE LONG DU BORD DE FUITE DANS LA PLAGES DE 55 A 61,5 M POUR DIFFERENTS ANGLES DE ROTATION DE LA PALE AVEC RECEPTEUR LA CONFIGURATION 3	101
FIGURE IV-40 COMPARAISON DU CHAMP ELECTRIQUE ATTENDU LE LONG DU BORD D'ATTAQUE DANS LA PLAGES DE 55 A 61,5 M POUR DIFFERENTS ANGLES DE ROTATION DE LA PALE AVEC RECEPTEUR LA CONFIGURATION 3	101

Liste des tableaux

TABLEAU I-1 CLASSEMENT BRITANNIQUE (ITDG-UK).....	13
TABLEAU I-2 CLASSEMENT AMERICAIN (NREL-USA)	13
TABLEAU I-3 CLASSEMENT EUROPEEN (EWEA-EUROPE).....	13
TABLEAU I-4 CLASSEMENT DU VENT (IEC)	15
TABLEAU I-5 TYPES DES PROFILS NREL	16
TABLEAU I-6 TYPES DES PROFILS DELFT	18
TABLEAU III-1 PARAMETRES P (Z ') ET V* POUR CINQ MODELES D'INGENIEUR	49
TABLEAU III-2 PARAMETRES DES FONCTIONS EXPONENTIELLES	50
TABLEAU III-3 PARAMETRES DES DEUX FONCTIONS D'HEIDLER	51
TABLEAU III-4 PARAMETRES ADOPTES POUR D'EXPRESSION (III.5).....	52
TABLEAU III-5 PARAMETRES DES DEUX FONCTIONS D'HEIDLER	53
TABLEAU III-6 PARAMETRES DU COURANT DE L'ARC EN RETOUR SUBSEQUENT.	67
TABLEAU IV-1 LES PARAMETRES LIES A L'EQUATION DE COORAY.....	77
TABLEAU IV-2 PARAMETRES DE MAILLAGE UTILISES DANS LES DOMAINES DU MODELE COMSOL ACTUEL.	81
TABLEAU IV-3 HUIT CONFIGURATIONS DE RÉCEPTEURS.....	85
TABLEAU IV-4 INTENSITÉ MAXIMALE PREDITE DU CHAMP ÉLECTRIQUE.....	88
TABLEAU IV-5 NOMBRE DE LIGNES INTERCEPTÉES PAR LES RECEPTEURS.....	90
TABLEAU IV-6 TROIS CONFIGURATIONS DIFFÉRENTES DE RÉCEPTEURS.....	91
TABLEAU IV-7 INTENSITÉ MAXIMALE DU CHAMP ÉLECTRIQUE.....	93
TABLEAU IV-8 INTENSITE MAXIMALE DU CHAMP ELECTRIQUE POUR LES 3 ANGLES DE ROTATION.	97

Acronymes :

CEM :	Compatibilité électromagnétique.
FDTD :	Méthode des différences finies dans le domaine temporel.
FDFD :	Méthode des différences finies dans le domaine fréquentiel.
FEM :	Méthode des éléments finis.
MOM :	Méthode des moments.
ABC :	Absorbing Boundary Conditions (conditions aux limites absorbantes).
MTLE :	Modèle de ligne de transmission modifiée avec une décroissance exponentielle.
E_r :	Champ électrique horizontal.
E_z :	Champ électrique vertical.
H_ϕ :	Champ magnétique azimutal.
c :	Vitesse de la lumière dans le vide exprimé en mètres par seconde.
v :	Vitesse de l'arc en retour de la foudre en mètre par seconde.
ϵ_0 :	Permittivité diélectrique du vide.
ϵ_r :	Permittivité relative du milieu.
μ_0 :	Perméabilité magnétique du vide.
μ_r :	Perméabilité relative du milieu.
σ :	Conductivité électrique.
\vec{r} :	Vecteur position selon l'axe horizontal (x).
\vec{z} :	Vecteur position selon l'axe vertical (Z).
H :	Hauteur du canal de la foudre.
h :	Hauteur de la tour.
Z' :	Indique la position d'un point le long du canal de la foudre ($0 \leq h \leq H$).
λ :	Constante de décroissance du courant
u :	Fonction d'heaviside.
$P(z')$:	Facteur d'atténuation du courant dépendant de la hauteur.
I_0 :	Amplitude du courant à la base du canal.
τ_1 :	Temps de montée de l'impulsion du courant.

Acronymes

τ_2 :	Durée de l'impulsion du courant.
η :	Facteur de correction d'amplitude du courant.
n :	Nombre de réflexions aux deux extrémités de la tour.
Z_t :	Impédance caractéristique de la tour.
Z_{ch} :	Impédance caractéristique du canal de la foudre.
Z_g :	Impédance du sol.
ρ_t :	Coefficient de réflexion au sommet de la tour.
ρ_g :	Coefficient de réflexion à la base de la tour.
δ :	Epaisseur de peau.
Δr :	Pas spatiale selon l'axe (x).
Δz :	Pas spatiale selon l'axe (z).
Δt :	Pas temporel.
i :	Incrément dans l'espace selon l'axe (x).
j :	Incrément dans l'espace selon l'axe (Z).
E :	Champ électrique [v/m]
F :	Variable dans l'expression de la densité de charge
FE:	Élément fini
FEA:	Analyse par éléments finis
G :	Variable dans l'expression de la densité de charge
H1 :	Hauteur des nuages du ciel [m]
I_{peak} :	Pic du courant [kA]
L :	Longueur du leader [m]
LPS :	Systèmes de protection contre la foudre
NREL :	Laboratoire national des énergies renouvelables
R :	Distance entre la foudre et l'éolienne [m]
r :	Rayon des cylindres de foudre [m]
RAM:	Mémoire vive
$V1$:	Tension appliquée [v]
WT :	Éolienne
$z0$:	Distance du sol au sommet de l'éolienne [m]
$z1$:	Distance du sol au point de référence [m]

Acronymes

α :	Constante dans l'expression de la densité de charge
a_0 :	Constante dans l'expression de la densité de charge
a_1 :	Constante dans l'expression de la densité de charge
b :	Constante dans l'expression de la densité de charge
C :	Constante dans l'expression de la densité de charge
d :	Constante dans l'expression de la densité de charge
β :	Constante dans l'expression de la densité de charge
λ_1 :	Densité de charge [C/m].
ρ_v :	Densité volumique de charge électrique [C/m ³]
η_1 :	Distance entre le leader et la pointe supérieure [m]
φ :	Potentiel électrique [v]
v^* :	Vitesse de propagation du front de l'arc en retour.
n_3 :	Indice dont les chiffres sont inclus dans la fourchette entre 2 et 10

Introduction Générale

Au cours des dix dernières années, la production mondiale d'énergie renouvelable a connu une hausse substantielle, stimulée par l'ouverture des marchés de l'électricité. Cette évolution a créé un besoin de nouveaux producteurs rentables et une plus grande reconnaissance de l'impact des émissions de gaz à effet de serre sur le changement climatique.

L'énergie éolienne est exploitée depuis de nombreuses années pour la production d'électricité dans le monde. Bien que l'énergie éolienne ait une longue histoire dans plusieurs parties du monde, son utilisation est relativement nouvelle en Algérie.

Le nombre et la taille des éoliennes sont en augmentation, et nombre d'entre elles sont désormais placées stratégiquement à des altitudes élevées pour maximiser la production d'électricité.

L'énergie éolienne, en tant que source d'énergie propre et renouvelable, est devenue un pilier essentiel de la transition vers un avenir énergétique plus durable. Cependant, malgré ses nombreux avantages, les parcs éoliens sont confrontés à des défis importants, notamment celui de la protection contre la foudre, un phénomène naturel imprévisible et dévastateur.

Les systèmes de protection contre la foudre doivent donc être entièrement intégrés dans les diverses parties de la structure pour garantir que toutes les parties disposent des points d'attache potentiels pour les coups de foudre.

La foudre, qui a fait l'objet de nombreuses recherches pour sa force redoutable et ses images saisissantes, génère des trajectoires ionisées fugaces qui peuvent s'étendre sur des vastes distances. La différence de potentiel entre les nuages d'orage et la terre peut atteindre des centaines de millions de volts, et les courants de foudre varient de plusieurs milliers à plusieurs centaines de milliers d'ampères. Compte tenu de ces caractéristiques extrêmes, il est impératif de mettre en œuvre des stratégies de protection appropriées.

Les champs électromagnétiques produits par la foudre restent un facteur critique de la compatibilité électromagnétique, car ils risquent de perturber ou d'endommager divers systèmes électriques et électroniques. Il est essentiel de comprendre comment les effets électromagnétiques de la foudre interagissent avec les systèmes électriques afin de concevoir des moyens de protection appropriés. L'obtention d'une protection correcte et efficace contre la

foudre nécessite des études théoriques approfondies sur le canal de la foudre et son environnement électromagnétique.

Cette étude vise à améliorer les performances des systèmes de protection des éoliennes contre la foudre « LPS », en se concentrant plus particulièrement sur la protection des pales contre les dommages causés par la foudre. Les effets directs de la foudre sur les composites à matériau polymère se traduisent souvent par des pics de température rapides, entraînant la fusion ou la combustion au bon endroit frappé par la foudre. La question des dommages cumulés causés par la foudre présente un défi multiphysique complexe, où les réactions électrothermiques et mécaniques dans les structures composites peuvent entraîner la détérioration et la décomposition de la matrice.

Dans ce travail intitulé "Protection des éoliennes modernes contre la foudre", nous abordons cette problématique à travers une analyse détaillée en quatre chapitres,

Le premier chapitre, intitulé "État de l'art sur les énergies éoliennes", offre un aperçu global de l'énergie éolienne, de son évolution mondiale et de son potentiel en Algérie. Nous présentons également les différents types d'éoliennes, en mettant particulièrement l'accent sur les éoliennes à axe horizontal, qui sont les plus couramment utilisées dans les parcs éoliens modernes.

Dans le deuxième chapitre, "Phénomène de foudre, effets et moyens de protection", nous examinons en détail la nature de la foudre, ses effets néfastes sur les éoliennes et les différentes technologies de protection disponibles. Nous soulignons l'importance cruciale de comprendre ce phénomène et de mettre en place des mesures efficaces pour minimiser les risques associés.

Le troisième chapitre, "Modélisation et simulation du champ électromagnétique rayonné par la foudre", se concentre sur l'interaction entre la foudre et les éoliennes du point de vue du champ électromagnétique rayonné. Nous explorons les modèles du courant de l'arc en retour et les méthodes de calcul du champ électromagnétique résultant de cette interaction.

Enfin, dans le quatrième chapitre, "Étude des performances des systèmes de protection des éoliennes contre la foudre", nous analysons en détail les performances des systèmes de protection contre la foudre installée sur les pales d'éoliennes. Nous évaluons l'efficacité de ces systèmes en prédisant l'intensité du champ électrique statique sur les surfaces des pales et en identifiant les facteurs clés qui influent sur leur performance.

En résumé, ce travail offre une analyse approfondie de la protection des éoliennes modernes contre la foudre, en abordant les aspects théoriques et pratiques de cette problématique cruciale dans le contexte de la sécurité et de la fiabilité des parcs éoliens.

Chapitre I : Etat de l'art sur les énergies éoliennes

I.1- Introduction

L'énergie éolienne, parmi les sources renouvelables, offre une flexibilité et une diversité essentielles pour répondre aux besoins variés des consommateurs tout en contribuant à réduire la dépendance envers les réseaux électriques centralisés [1]. Cette ressource repose sur la couche de surface de l'atmosphère « couche inférieure de l'atmosphère », où le vent, soumis aux forces de frottement et aux obstacles terrestres, génère des turbulences affectant son amplitude et sa fréquence [2]. Pour exploiter cette énergie en électricité utilisable, les éoliennes jouent un rôle crucial. Ces dispositifs convertissent l'énergie cinétique du vent en une forme exploitable. Ainsi, ce chapitre offre un aperçu de l'état de l'art des systèmes d'exploitation de l'énergie éolienne. Dans ce contexte, nous débiterons par une brève rétrospective de l'évolution mondiale de l'énergie éolienne, avant de nous pencher sur la situation spécifique en Algérie, y compris son potentiel éolien actuel et les initiatives de développement dans ce domaine. Par la suite, une présentation des types d'éoliennes selon l'orientation de leurs axes et leur classification selon leur vitesse de rotation sera donnée, une attention particulière sera réservée aux éoliennes à axes horizontal.

I.2- Energie éolienne en chiffres :

I.2.1- Situation actuelle de l'énergie éolienne dans le monde :

Le recours à l'énergie éolienne a enregistré un véritable engouement au cours des 30 dernières années, principalement à la suite des premiers chocs pétroliers. Selon certaines sources expertes et spécialisées dans le secteur de l'énergie éolienne tel que GWEC « Global Wind Energy Council », le parc mondial en 2021 de l'industrie éolienne a réalisé sa deuxième meilleure année, avec presque 94 GW de capacité ajoutée au niveau mondial, ce qui représente un écart de seulement 1,8 % par rapport à la croissance record de 2020. Actuellement, la capacité globale de production d'énergie éolienne atteint 837 GW [3].

Alors que l'Europe, l'Amérique latine ainsi que l'Afrique et le Moyen-Orient ont enregistré des années record en termes de nouvelles centrales terrestres, le nombre global d'installations éoliennes sur terre en 2021 reste inférieur de 18 % à celui de l'année précédente. Cette diminution s'explique surtout par le freinage de la progression de l'énergie éolienne terrestre dans les deux plus importants marchés mondiaux de l'énergie éolienne, la Chine et les États-Unis. Par ailleurs, la Chine a représenté 80 % de la puissance éolienne offshore

additionnelles dans le monde en 2021, ce qui porte à 27,7 GW la capacité cumulée des installations éoliennes offshore. Il s'agit d'un niveau de croissance exceptionnelle, car il a été nécessaire à l'Europe de mettre trois décennies pour atteindre un niveau similaire de capacité éolienne offshore totale [3], [4], [5].

I.2.2- L'énergie éolienne en Algérie :

L'Algérie dispose d'importantes ressources éoliennes sur la figure I.1, avec un régime de vent modéré entre 2 et 6 m/s conformément à la carte des vents dressée par le Centre de Développement Des Energies Renouvelables, CDER. En raison de la vaste zone géographique de l'Algérie, le potentiel éolien diffère en fonction des régions. Au nord du pays, le potentiel éolien est caractérisé par un vent modéré avec une vitesse de vent plutôt modeste (1 à 4 m/s) et comprend des microclimats aux alentours d'Annaba, d'Oran, des hauts plateaux. Ce potentiel énergétique convient bien au pompage de l'eau [6].

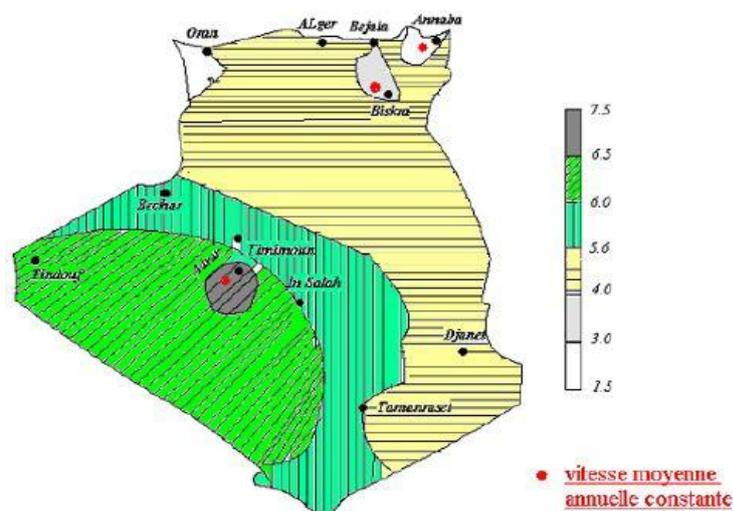


Figure I-1 Vitesse moyenne du vent en (m/s) à 10 m au-dessus du sol en Algérie[6].

L'énergie éolienne représente un second axe de développement des énergies renouvelables en Algérie derrière l'énergie solaire, en particulier dans la zone du sud-ouest saharien. La wilaya d'Adrar a bénéficié, à travers un partenariat algéro-français, d'un projet de parc de 12 éoliennes de 850 kW chacune, situé dans la région de Kabertene (80 km au nord d'Adrar) (sur la figure I.2). Le parc éolien, fourni par la société espagnole Gamesa, produit une puissance de 10 MW à une vitesse de vent de 8 m/s. Ces éoliennes sont raccordées au réseau de transport [7]. Concernant le plan d'étude, le Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) est responsable de repérer les sites susceptibles d'accueillir des parcs éoliens dans le sud de l'Algérie, en particulier dans des régions telles que Touggourt, Hassi Messaoud et Ghardaïa.



Figure I-2 Ferme éolienne de Kabertene à Adrar [7]

I.3- Types d'éoliens selon l'orientation de leurs axes :

On distingue deux différents types de systèmes éoliens en fonction de l'orientation de leurs axes de rotation vis-à-vis de la trajectoire du vent [8].

I.3.1- Éoliennes à axe vertical :

Elles constituaient les premières constructions élaborées dans le but de générer de l'électricité, comme le rotor de Savonius et le rotor de Darrieux [8]. Ces éoliennes sont plutôt marginales et leur usage est nettement moins répandu. Elles ont des avantages et des inconvénients que nous allons mentionner comme suit [9]. (La figure I.3)

I.3.1.1- Avantages :

- Comme l'axe de l'éolienne est vertical, symétrique en rotation, il fonctionne peu importe la direction du vent sans devoir faire tourner le rotor.
- Le modèle est robuste, simple et exige peu de maintenance.
- Cette conception verticale a pour avantage de placer les appareils de commande et la boîte de vitesses sur le terrain.

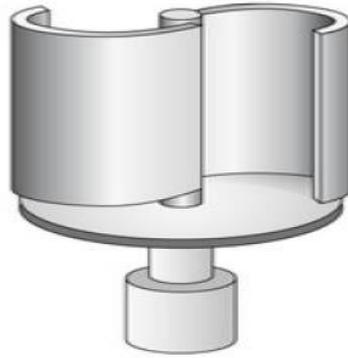


Figure I-3 Structure de Savonius [10]

I.3.1.2- Inconvénients :

- La conception verticale de cette catégorie d'éolienne implique qu'elle opère avec un vent proche du sol. Ce vent qui est ralenti par le terrain est généralement faible.
- Elle prend plus de surface que les éoliennes à tour.
- Elle est moins performante que celles dont l'axe est horizontal.

I.3.2- Éoliennes à axe horizontal :

Ce sont à présent les éoliennes les plus courantes, probablement en raison de leurs avantages appréciables, elles comportent en principe des hélices à deux ou trois pales orientées vers le vent ou sous le vent [11]. (La figure I.4)



Eolienne face au vent (amont)

Eolienne sous le vent (aval)

Figure I-4 Aérogénérateur à axe horizontal [12]

I.3.2.1- Avantages :

- Ce type de structure capte le vent en altitude ou le vent est fort.
- Une surface occupée très réduite comparée aux éoliennes à axe vertical.

- Les équipements de contrôle et le générateur se trouvent dans la nacelle en haut de la tour. Ainsi, plus besoin de locaux pour l'appareillage.

I.3.2.2- Inconvénients :

- Coût très élevé de construction.
- Elles ont un très bas rendement et sont prévues pour un usage permanent. [8].
- Systèmes d'orientation requis.

I.4- Classement des éoliennes selon leur vitesse de rotation :

Il est également envisageable de classer les éoliennes selon leur vitesse de rotation. Celle-ci peut être fixe ou variable. Les premières éoliennes installées sont de type à vitesse fixe. Cette technologie est plus économique et fait appel à un système électrique tout simple qui ne requiert pas un système de contrôle électronique. Cette vitesse fixe est déterminée par le rapport du réducteur de vitesse, le nombre de pôles dans la génératrice et la fréquence du réseau. Elle génère une puissance électrique très fluctuante par rapport aux autres sources d'énergie qui offrent une énergie constante. Contrairement, les éoliennes à vitesse variable emploient des convertisseurs de puissance statiques pour optimiser la puissance délivrée au réseau [9]. Les éoliennes à vitesse variable permettent d'obtenir un rendement de conversion énergétique sur un vaste choix de vitesses de vent. La turbine modifie constamment sa vitesse en fonction de la vitesse du vent afin de maximiser la puissance. Elles ont des avantages et des inconvénients que nous allons mentionner comme suit :

I.4.1- Vitesse Fixe :

→ Avantages : [13]

- Coûts de construction réduits
- Simple, robuste, fiable

→ Inconvénients : [13]

- Fluctuation significative de la puissance.
- Rendement de conversion d'énergie faible.

I.4.2- Vitesse Variable :

→ Avantages : [13]

- Puissance électrique de qualité supérieure.
- Fort rendement de conversion d'énergie.

→ Inconvénients : [13]

- Le contrôle des systèmes devient de plus en plus complexe.
- L'utilisation de convertisseurs peut entraîner des coûts et des pertes supplémentaires.

I.5- AEROGENERATEUR :

I.5.1- Principe de fonctionnement :

Un aérogénérateur ou éolienne est tout simplement un outil de collecte et de transformation de l'énergie, elle permet de transformer une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique présente sur un arbre de transmission puis en énergie électrique via un générateur [2].

La transformation de l'énergie éolienne se déroule en deux phases :

Au sein de la turbine (rotor), qui absorbe une fraction de l'énergie cinétique du vent disponible pour la transformer en énergie mécanique.

Au niveau du générateur, qui réceptionne l'énergie mécanique et la transforme en énergie électrique, qui est ensuite transmise au réseau électrique. Le déroulement général est représenté sur la figure I.5. Toute cette chaîne de conversion implique des domaines très différents et pose des problèmes électriques et mécaniques.

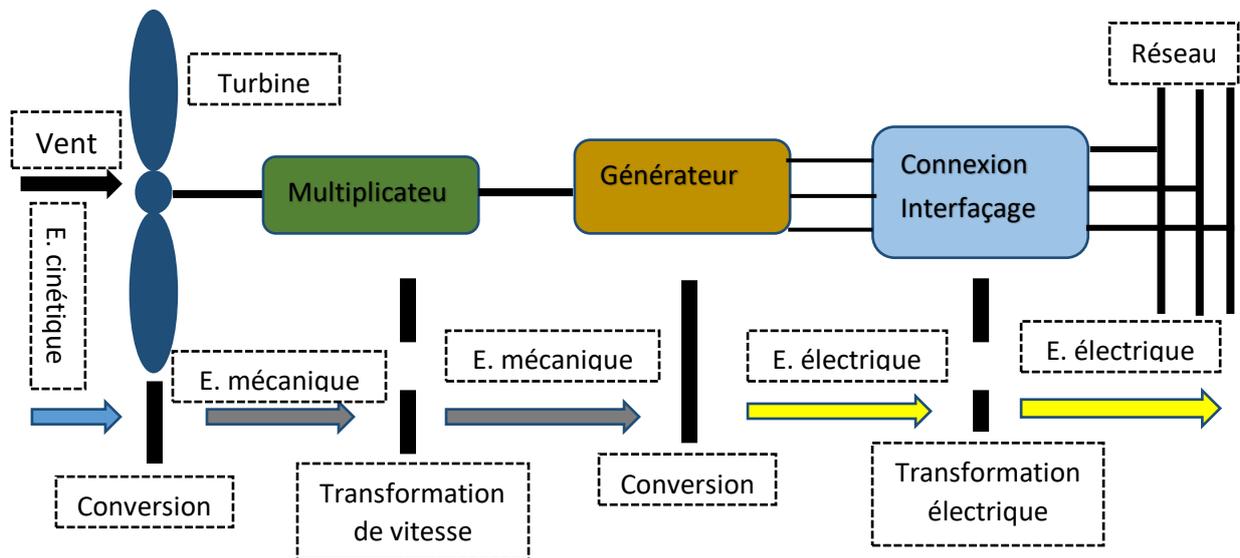


Figure I-5 Principe de fonctionnement d'une éolienne.

I.5.2- Constitution d'un aérogénérateur :

Dans le secteur industriel éolien, le modèle d'éolienne à axe horizontal reste le plus répandu. La figure I.6 montre un schéma caractéristique de la structure interne d'une éolienne avec ses principaux composants [14].

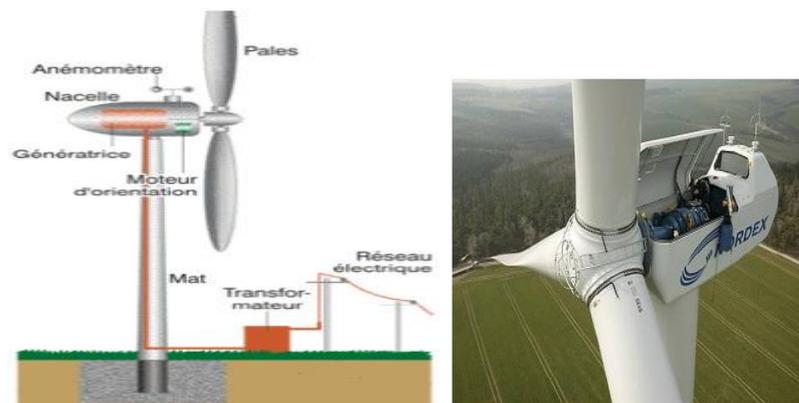


Figure I-6 Éolienne de grande puissance [2]

Cependant, une éolienne "classique" est généralement composée de trois composants majeurs :

- Le mât : un tube de métal ou éventuellement un treillis métallique, il doit être aussi élevé que possible afin de limiter les perturbations à proximité du sol. Cependant, la quantité de matériau utilisée est assez coûteuse et le poids doit aussi rester limité. Il existe un compromis qui consiste à employer un mât un peu plus grand que le diamètre du rotor de

l'éolienne (exemple : éolienne NORDEX N90 2,3 MW: diamètre de 90m, mât de 100 ou 120 m (moyeu) de hauteur [15].)

- La nacelle : Elle comprend tous les composants mécaniques qui relient le rotor éolien à la génératrice électrique : roulements, arbres lent et rapide, le frein à disque, boîte de vitesses. La génératrice, qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques permettant l'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (indispensable pour garder la surface balayée). En outre, il y a le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne.
- Le rotor : constitué par des pales montées sur le moyeu. Pour les éoliennes conçues pour la production d'électricité, le plus souvent, le nombre de pales varie de 1 à 3, le rotor tripale (concept danois) étant de loin le plus fréquents puisqu'il offre un meilleur compromis au niveau du coût, du comportement vibratoire et de la pollution visuelle et le bruit.

Les rotors à vitesse fixe sont généralement équipés d'un système d'orientation des pales qui autorise le générateur (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) à opérer à la même vitesse que le rotor.

Les rotors à vitesse variable sont généralement moins chers car le mode d'orientation des pales est plus simple. Des pales sont simplifiées. Cependant, une interface d'électronique de puissance est nécessaire entre le générateur et le réseau ou la charge. Les pales sont essentiellement caractérisées par leur géométrie dont les performances aérodynamiques.

I.6- CRITERES DE CONCEPTION D'EOLIENNE A AXE HORIZONTAL :

I.6.1- Critères de taille :

Les éoliennes orientées horizontalement varient en taille, les petites turbines fournissent le plus souvent moins de 100 kilowatts de puissance et se trouvent le plus fréquemment dans les maisons. Elles sont accompagnées de simples générateurs diesel pour pompage d'eau. Il y a également des éoliennes de moyenne envergure, leur puissance débute de 100 kilowatts et peut atteindre quelques mégawatts. Il y a également les très grandes éoliennes que l'on trouve dans

les parcs éoliens. Ces éoliennes représentent la plus grande partie de la source d'électricité dans le réseau électrique (Tableau I. 1, 2 et 3). Elles sont classées selon les normes internationales comme indiqué dans les tableaux ci-dessous [16]:

Tableau I-1 Classement Britannique (ITDG-UK)[16]

Échelle	Puissance nominale	Diamètre
Micro	Inferieur de 2 KW	Inferieur de 3m
Petite	2KW à 40 KW	3m à 12m
Moyenne	40KW à 999 KW	12m à 45m
Grande	Plus de 1MW	46m ou plus

Tableau I-2 Classement Américain (NREL-USA)[16]

Échelle	Puissance nominale	Application
Petite	Inferieur de 10 KW	Maisons, fermes.
Intermédiaire	10 KW à 250 KW	Alimentation des villages, système hybride ou distribution
Grande	250 KW à 2 MW	Centrale ou station, fermes éoliennes ou distribution.

Tableau I-3 Classement européen (EWEA-Europe)[16]

Échelle	Puissance nominale	Propriétés
Micro	Inferieure de 3 KW	Générateurs d'aimants permanents à entraînement direct pour le chargement de la batterie
Petite	3 KW à 30 KW	Faible entretien et haute fiabilité, générateurs à aimants permanents appliqués
Moyenne	30 KW à 200 KW	Générateurs à aimants permanents et à induction sont des choix courants. Les modèles à aimants permanents visent à optimiser le couple et l'efficacité.
Grande	200 KW à 1.5 MW	Génératrices à aimants permanents et modèles à rotor enroulé appliqués : <ul style="list-style-type: none"> • Systèmes d'entraînement direct. • Fonctionnement à vitesse variable
Mégawatt	Plus de 1.5 MW	Rotor multi système

I.6.2- Critères de site d'installation :

I.6.2.1- La disponibilité du vent :

L'efficacité d'une éolienne dépend, entre autres, de son emplacement. La puissance fournie augmente avec la vitesse du vent, c'est pourquoi les sites sont d'abord sélectionnés en fonction de la vitesse et de la fréquence du vent. Une éolienne fonctionne mieux lorsque les vents sont réguliers et fréquents [17]. De nombreuses méthodes et un ensemble d'algorithmes ont été créés pour donner une approche de la fréquence des vitesses de vent sur le site, comme la distribution de Weibull [6]. (La figure I.7).

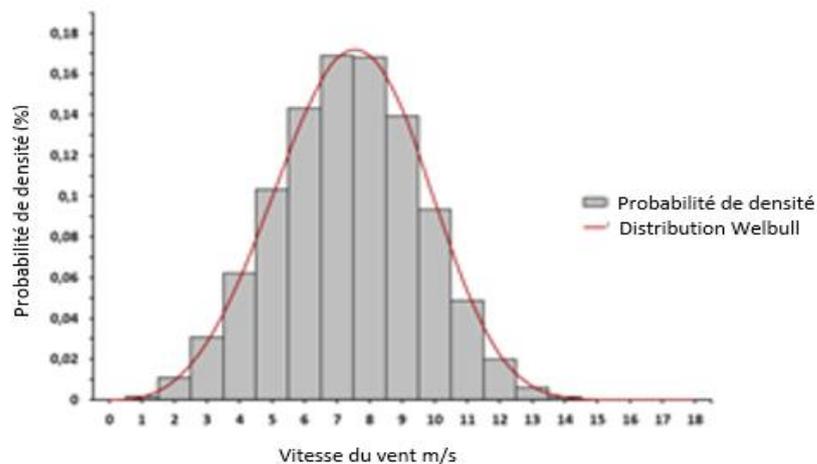


Figure I-7 Distribution de Weibull [6]

I.6.2.2- Classes du vent :

La classe de vent est l'un des critères à prendre en considération dans le dispositif de planification et d'installation d'une centrale éolienne. Les classes de vent servent à déterminer si l'éolienne est adaptée aux caractéristiques normales du vent sur un site donné. Il s'agit principalement de définir par la vitesse annuelle moyenne du vent (mesurée à la hauteur du moyeu de l'éolienne), la vitesse des rafales extrêmes qui peuvent se produire sur une période de 50 ans.

Les 3 catégories de vent pour les éoliennes sont déterminées par une norme de la Commission électrotechnique internationale [16]. (Tableau I.4).

Tableau I-4 Classement du vent (IEC)[18]

Classe d'éolienne	IEC I vent fort	IEC II Vent moyen	IEC III vent faible
Vitesse du vent moyen annuel	10 m/s	8.5 m/s	7.5 m/s
Extrême vitesse mesurée du vent aux 50 ans	70 m/s	59.5 m/s	52.5 m/s
Intensité de turbulence	18%	18%	18%

I.6.2.3- La nature du sol :

Le sol du site doit être solide et capable de supporter les fondations de l'éolienne. Ce critère a une plus grande influence sur le coût d'installation surtout dans le cas d'un terrain meuble nécessitant un renforcement des pieux [19].

I.6.2.4- La position de site :

La distance entre le site d'installation et le réseau électrique ou le site de stockage est d'une grande importance pour faciliter le raccordement. Le coût de l'installation dépend fortement de cette dernière.

I.6.3- Critères d'aérodynamique des pales :

I.6.3.1- Portraits des sections des pales :

Au début, la désignation des éoliennes correspondait à la conception aéronautique. La section des profils a été développée par le Comité consultatif national pour l'aéronautique NACA [20]. Le plus souvent, on trouve trois types, à quatre chiffres, cinq chiffres et six chiffres. L'évaluation expérimentale des caractéristiques de ces trois types confirme que les profils de type NACA à six chiffres sont plus efficaces et conviennent à la conception des pales d'éoliennes. Par ailleurs, d'autres modèles de profils sont en train d'être élaborés, tels que :

I.6.3.1.1 Portraits NREL :

Ces portraits sont élaborés aux Etats Unis, au sein du laboratoire national des énergies renouvelables (NREL). Ils sont spécialement conçus pour la réalisation de pales d'éoliennes à axe horizontal (figure I.4) et sont désignées par la lettre "S" [21], [22]. Le tableau suivant montre les types des profils NREL selon Tony et al. [21]. (Tableau I.5).

Tableau I-5 Types des profils NREL [21]

Diamètre	Type de contrôle	Épaisseur de Profil	Cops de pale	Bout de pale	Pied de pale
3-10 m	Vitesse variable Calage variable	Épais	-	S822	S823
10-20 m	Vitesse variable Calage variable	Mince	S802	S802/S803	S804
10-20 m	Décrochage Contrôlé	Mince	S805/S805A	S806/S806A	S807/S808
10- 20 m	Décrochage Contrôlé	Épais	S819	S820	S821
20-30 m	Décrochage Contrôlé	Épais	S809	S810	S811
20-30 m	Décrochage Contrôlé	Épais	S812	S813	S814
20-40 m	Vitesse variable Calage variable	-	S825	S826	S814/S815
30-50 m	Décrochage Contrôlé	Épais	S816	S817	S818
40-50 m	Décrochage Contrôlé	Épais	S827	S828	S818
40-50 m	Vitesse variable Calage variable	Épais	S830	S831/S832	S818

I.6.3.1.2 Portraits Risø :

Ces modèles sont en cours de développement au laboratoire national Risø, au Danemark. Ce projet est fondé sur le code de programme X-FOIL développé par Derla, et le code CFD Ellipsys-2D développé par Sorensen. Les profils Risø sont répartis en trois types, Risø- A, Risø-P et Risø-B.

Les modèles Risø-A sont conçus pour la conception de pales d'éoliennes à décrochage contrôlé (Figure I.8). Les modèles Risø-P sont une version améliorée des modèles Risø-A pour les éoliennes à vitesse variable (Figure I.9). La famille de profils Risø-B présente un coefficient de portance (Figure I.10). Ils sont conçus pour les éoliennes de grande puissance avec une puissance variable et un contrôle de la vitesse [21], [22].

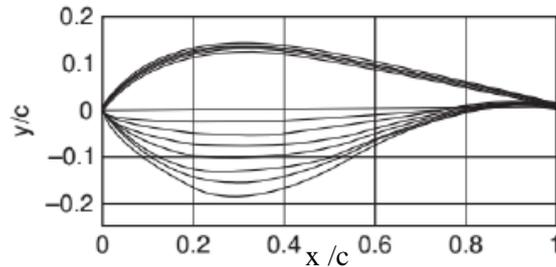


Figure I-8 Profils de série Risø-A [21]

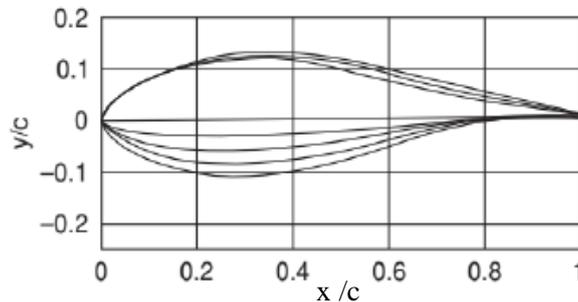


Figure I-9 Profils de série Risø-P [21]

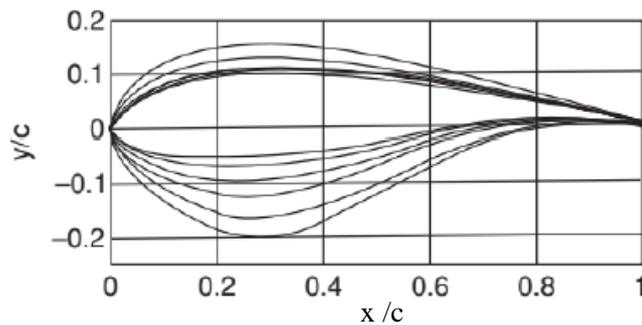


Figure I-10 Profils de série Risø-B [21]

I.6.3.1.3 Portraits Delft :

Conformément à la procédure de conception des profils NERL et RISO, les profils Delft sont les derniers développés à l'Université de Delft aux Pays-Bas, cette évolution est fondée sur le nouveau code R-FOIL qui est une adaptation du code X-FOIL développé à l'Université de Delft nommé R-FOIL. Ces profils apportent insensibilité et rugosité de face d'une part, d'autre part par leur épaisseur importante qui favorise la concrétisation des pales [21], [22].

I.6.3.1- La morphologie des pales :

La morphologie des pales est le critère le plus déterminant de la performance des éoliennes, ce critère repose sur différents éléments tels que le cordon de section profilé, l'angle de torsion et type de profil [23]. Ces paramètres permettent de définir la structure apparente de la lame ou nous constatons des pales d'une distribution constante de la corde à l'angle de torsion et d'autres ont une distribution variable. Les lames sont également à profil variable et d'autres à profil unique. (Tableau I.6).

Tableau I-6 Types des profils Delft [21]

Profil	(t/c %) Max	(x/c)Max	y/c	Re*106	Cl max	α conception	Cl Conception	Cl/Cd Max
DU 96-W-18	18	0.3	0.0018	3	1.26	6.59	1.07	145
DU 00-W-212	21.2	0.3	0.0023	3	1.29	6.5	1.06	132
DU 91-W250	25	0.3	0.0054	3	1.37	6.68	1.24	137
DU 97-W-300	30	0.3	0.0048	3	1.56	9.3	1.39	98
DU 00-W-350	35	0.3	0.01	3	1.39	7	1.13	81
DU 00-W-401	40.1	0.3	0.01	3	1.04	5	0.82	54

I.6.3.2- Distribution d'épaisseur de profil :

Le profil de telle ou telle pale d'éolienne ne présente qu'un seul profil, auquel cas on peut faire la distinction entre une pale dont l'épaisseur de la section transversale est constante et une autre dont l'épaisseur de la section transversale est variable [16]. Cette dernière est le bien souvent employée pour accroître des performances avec la stabilité de fonctionnement des points critiques.

I.7- MODES D'OPERATION D'UNE EOLIENNE

Il existe deux façons d'utiliser l'énergie électrique générée par une éolienne, la première consiste à la raccorder au réseau électrique, la seconde à fournir de l'énergie à une charge isolée [2].

I.7.1- Éolienne raccordée au réseau

Les éoliennes connectées au réseau électrique sont généralement regroupées dans un parc éolien d'environ 5 à 50 éoliennes. Mais il peut aussi y avoir des éoliennes isolées raccordées au réseau [15].

Le courant électrique transmis par le réseau ne doit avoir qu'une fréquence de 50 Hz pour une tension bien définie. Une éolienne raccordée au réseau doit donc produire une tension répondant à ces exigences, peu importe la vitesse du vent. Une première méthode est de conserver la vitesse de rotation du générateur. Ceci est réalisé en régulant l'orientation des pales (contrôle STALL). A vitesse variable, un convertisseur de fréquence doit être employé.

Si la vitesse du vent est trop faible, l'éolienne s'arrêtera car cette baisse de vitesse ne permet plus à l'éolienne de produire cette fréquence. Par conséquent, l'éolienne se transforme en consommateur d'électricité et elle est automatiquement déconnectée du réseau.

Si la vitesse du vent est trop grande (supérieure à 100 km/h, par exemple), l'éolienne sera mise dans une position plus sûre et coupée du réseau pour empêcher les contraintes qui pourraient les briser. Les nouvelles éoliennes peuvent continuer à tourner, mais à une vitesse plus réduite.

I.7.2- Eolienne alimentant une charge isolée

L'énergie éolienne est également employée pour alimenter en énergie des endroits éloignés isolés. Par exemple pour pomper l'eau des champs.

I.8- Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une revue de littérature liée aux énergies éoliennes. Des statistiques sont fournies pour diverses sources de production mondiale d'énergie éolienne ainsi que pour les principaux pays producteurs, à savoir la Chine et les États-Unis. Le potentiel

éolien de l'Algérie est également présenté. La structure des différents types d'éoliennes existantes selon leur axe et leur vitesse de rotation sont présentées à travers leurs qualités et leurs éventuels défauts. De plus, les principes de fonctionnement et de constitution d'un aérogénérateur sont également présentés dans cette première partie de cette thèse.

Le chapitre suivant sera consacré à un phénomène qui cause beaucoup de dégâts aux éoliennes, à savoir, le phénomène de foudre dont le but est de voir quels sont ses effets et les moyens de protection des éoliennes, existants, contre ce phénomène naturel.

Chapitre II : Phénomène de foudre, effets et moyens de protection

II.1- Introduction :

L'énergie éolienne, en tant que source d'énergie propre et renouvelable, joue un rôle crucial dans la transition vers un avenir énergétique plus durable. Cependant, malgré ses nombreux avantages, les parcs éoliens sont confrontés à des défis uniques, dont l'un des plus redoutables est le phénomène de la foudre.

La foudre, un événement naturel imprévisible et dévastateur, représente une menace constante pour les éoliennes et leur infrastructure associée [24]. Lorsque la foudre frappe une éolienne, elle peut causer des dommages importants aux pales, aux générateurs, aux systèmes de contrôle et à d'autres composants critiques, entraînant des temps d'arrêt coûteux et des réparations complexes.

Dans cette optique, il est impératif de comprendre la phénoménologie de la foudre, ses effets et de mettre en place des mesures efficaces de protection. Ce chapitre explorera les différents aspects de ce défi, en examinant en détail le phénomène de foudre, ses effets, les technologies de protection disponibles et les meilleures pratiques pour minimiser les risques et assurer la durabilité des parcs éoliens dans un contexte de plus en plus exposé aux événements météorologiques extrêmes.

II.2- La foudre à travers l'histoire :

Dans les temps anciens, la foudre était le sujet des multiples superstitions en raison de la grande ignorance des hommes d'époque. Comme s'ils ne savaient pas comment expliquer de manière rationnelle ce phénomène, les populations lui attribuaient généralement une certaine divinité [25].

René Descartes (1596-1650) est le premier philosophe qui a cherché à comprendre ce phénomène. Il emploie les mots de Sénèque pour élaborer sa théorie « Le tonnerre se produit, lorsque les nuages plus lourds et plus hauts tombent sur d'autres nuages placés plus bas. L'air contenu entre deux nuages, comprimé par cette chute soudaine, produit un grand dégagement de chaleur, d'où résulte la lumière de l'éclair et le bruit du tonnerre. » [26], [27].

Le physicien Hermann Boerhaave (1668-1738) a démontré que les particules d'eau s'élèvent sous forme de vapeur dans l'air en présence du soleil, formant des nuages et accumulant

de la glace. Les particules fondent en quelques secondes sous l'action du soleil et le frottement intense entre les particules produit des éclairs de lumière et des éclairs le bruit [25].

Le XVIII^{ème} siècle marque le commencement de la modernité scientifique, marquée par une succession de trouvailles aussi éblouissantes qu'essentiels. Ainsi, la découverte de l'électricité entraîne de nombreuses interrogations et rend possibles de nouvelles approches de certains phénomènes comme la foudre et l'orage.

Les développements les plus marquants ont été réalisés par Benjamin Franklin (1706-1790) en grande partie grâce à ses célèbres expériences dites du cerf-volant [28]. Dans le cadre de cette expérimentation, un moment fondamental s'est opéré dans la relation de l'homme avec la foudre. Benjamin Franklin a conçu le premier paratonnerre. Il a remarqué que les conducteurs à bouts pointus au lieu de bouts ronds pouvaient se décharger sans bruit et à une plus longue distance.

Il fallut ensuite patienter jusqu'au XX^{ème} siècle pour que des recherches soient menées afin de plus comprendre la foudre comme un phénomène électrique. Dans un premier temps, en captant de multiples impacts de foudre sur l'Empire State Building de New York grâce à des caméras à objectifs rotatifs [29], [30], la foudre ascendante qui se dirige vers le nuage est souvent initiée à partir de structures élevées telles que l'Empire State Building ou les tours. Apparemment, lorsqu'une foudre ascendante porteuse d'une charge positive entre en contact avec le nuage, il n'y a pas d'arc en retour. Typiquement, le courant mesuré au sol se transforme progressivement en un courant plus ou moins continu de quelques centaines d'ampères [31]. Les avancées les plus significatives dans la recherche d'une compréhension de la foudre d'un point de vue électrique sont dues aux résultats des recherches de Karl Berger [32].

Ces dernières années, les avancées technologiques ont rendu possible la génération de très haut niveau de tension au sein des laboratoires afin de simuler des impacts de foudre. Toutefois, la foudre est encore un phénomène peu compris à bien des égards et reste un sujet de polémique.

II.3- Physique du Phénomène Orageux :

II.3.1- Nuages Orageux :

Les nuages d'orage constituent une masse énorme, le plus souvent de genre cumulonimbus, prenant une superficie de certaines dizaines de kilomètres carrés et d'une hauteur moyenne de 2 km du sol. Ils sont formés de gouttes d'eau en bas et de grains de glace en haut. Ils

apparaissent suite à la manifestation de courants atmosphériques ascendants dont la vitesse peut atteindre plus de 20 m/s [26], [27], [33].

La montée du nuage se fait de façon à ce que la densité soit en équilibre avec l'air ambiant, à environ 10 à 12 km [34], [35], [36]. À cette altitude, les forts courants horizontaux de la stratosphère balayent le haut du nuage, lui attribuant la forme typique d'une "enclume".

On distingue deux types de structures tempêtes : les tempêtes de chaleur et les orages frontaux [26], [25]. Les tempêtes de chaleur ou convectifs résultent de la combinaison de l'effet de l'humidité et du réchauffement de la terre. C'est l'orage de chaleur, un phénomène généralement très localisé, dont la durée n'excède pas une heure et demie, et que l'on rencontre principalement dans les pays de l'Union européenne.

Les orages frontaux ou cycloniques surviennent dans les zones tempérées, où de grandes masses d'air de températures et d'humidité différentes se rencontrent. Les fronts de tempête qui en résulte peuvent durer quelques jours et s'étendre sur des milliers de kilomètres. Ces tempêtes sont généralement plus violentes et se déplacent davantage que les premières.

II.3.2- Electrification du Nuage Orageux :

Les vents forts montants entraînent une friction à travers les distinctes particules présentes dans l'air. Ces derniers provoquent une électrisation statique des particules au sein du nuage. En conséquence, les parties les plus légères des particules chargées positivement sont transportées vers le haut avec des courants ascendants. En revanche, les particules les plus lourdes, à charge négative se déplacent vers la base du nuage [33].

La figure (II.1) montre la distribution des charges électriques dans un nuage orageux et celle du champ électrique au niveau du sol. Il a été observé que lorsque l'intensité du champ électrique atteint -10 à -15 kV/m, il y a une forte probabilité qu'une décharge au sol se produise. Ce phénomène est souvent suivi d'une augmentation soudaine du champ électrique, ce qui peut indiquer la possibilité d'un coup de foudre [37].

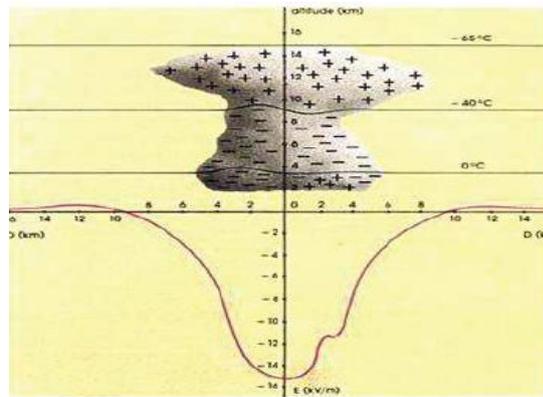


Figure II-1 Séparation des charges dans un nuage orageux [38]

II.4- PHENOMENE DE FOUDRE :

II.4.1- Foudre, Eclair et Tonnerre :

Le phénomène naturel de la foudre consiste en une décharge électrostatique perturbatrice provoquée à la suite de l'accumulation d'électricité statique entre deux nuages d'orage ou encore entre un nuage et le sol [27], [33].

Un éclair désigne une lumière brusque et forte produite par une décharge électrique lors d'un orage. Le bruit qui accompagne la foudre se nomme le tonnerre. Il équivaut à l'onde de choc générée par la dilatation soudaine de l'air due à l'augmentation très importante de la température 30000 °C dans le canal de la foudre. L'onde sonore créée par le choc se répand de façon concentrique autour du canal à une vitesse moyenne d'environ 330 m/s [39]. Si l'on prend en compte que la vitesse de la lumière est de l'ordre de 3.10^8 m/s, en la comparons avec la vitesse du son, on constate que la lumière de l'éclair sera perçue par l'observateur avant le tonnerre.

II.4.2- Les différents types de décharges de foudre :

On peut classer les diverses décharges qui pourraient se manifester en deux grandes catégories évoquées par Cummins et Murphy [40]. Dans la première catégorie, on trouve des décharges de foudre qui se forment à l'intérieur du nuage d'orage, appelées "décharges intra-nuages" ou entre deux nuages « décharges inter-nuages ».

La deuxième classe comprend les décharges de foudre qui proviennent des cumulonimbus et se déplacent vers le sol. Ces décharges au contact du sol sont souvent

nommées « CG », pour « cloud-to-ground ». Une distinction plus fine est faite selon la nature du courant et le sens de propagation.

La Figure II.2 illustre les différents types de décharges de foudre. De cette figure, on peut voir que le sol se charge par influence. Les régions chargées positivement dans le sol s'organisent sous les régions chargées négativement à la base des nuages, et vice versa.

Les décharges de foudre ayant une liaison avec le sol à partir des cumulonimbus représentent environ 25% de l'activité électrique totale au sol, les autres 75% sont des décharges sans contact avec le sol [41].

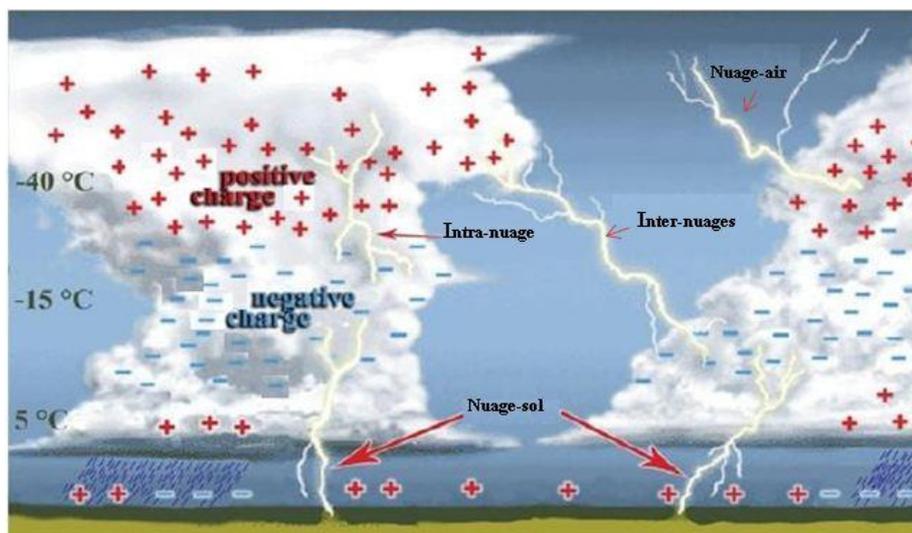


Figure II-2 Différents types de décharges de foudre [34]

II.4.3- Classification des décharges nuage-sol :

Dans la Figure II.3, Dwyer et Uman [34] donnent une description de la propagation des quatre traceurs qui créent une connexion à la terre. Ils diffèrent par le sens et le signe du courant dans le canal formé par la décharge. On distingue quatre catégories de coup de foudre nuage-sol :

- a) Traceur descendant négatif
- b) Traceur ascendant positif
- c) Traceur descendant positif
- d) Traceur ascendant négatif

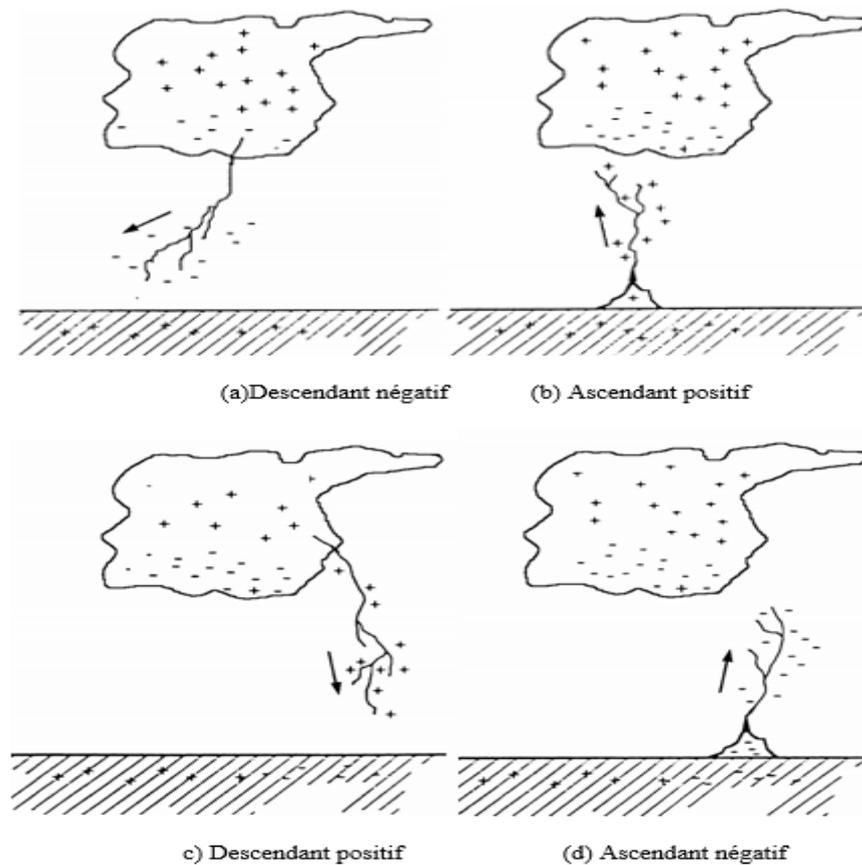


Figure II-3 Les 4 types de développement des décharges de foudre sol-nuage [34]

Plus de 90 % des décharges de foudre nuage-sol sont initiées par des traceurs négatifs descendants [42], [43], [44], [41].

La Figure II.4 montre en détails la propagation d'un traceur descendant négatif nuage-sol. Le déclenchement d'une décharge de foudre au sein d'un nuage d'orage dure généralement quelques millisecondes.

Ce processus crée un traceur négatif qui se déplace du nuage vers le sol en une série de bonds successifs, connus sous le nom de "Stepped Leader", à une vitesse de 105 m/s [39]. En s'approchant du sol, le traceur négatif génère une forte hausse du champ électrique. Ce phénomène peut entraîner la formation d'un traceur ascendant positif au sol, en raison d'un effet de pointe.

Le processus qui relie les deux traceurs est souvent appelé processus d'attachement. Ce processus crée un canal ionisé et conducteur entre la terre et le nuage d'orage, ce qui permet à un courant de foudre important de voyager de la terre à une vitesse d'environ un tiers de la vitesse de la lumière [45], [46]. Le courant électrique sert à neutraliser la charge négative qui se trouve

dans le canal ionisé. La décharge se répand de façon horizontale dans le nuage d'orage sur une distance de plusieurs kilomètres. Des arcs de retour supplémentaires pourraient être envisagés pour neutraliser toute charge restante dans le canal de foudre.

Les coups de foudre positifs, appelés CG+, sont un type de coup de foudre moins courant mais plus intense. Il a été observé qu'ils se produisent généralement vers la fin de la vie d'une cellule orageuse. Des recherches ont montré une corrélation entre la présence de CG+ et la gravité des phénomènes météorologiques observés, ainsi qu'un lien entre les CG+ et la présence de grêle [47], [48], [49].

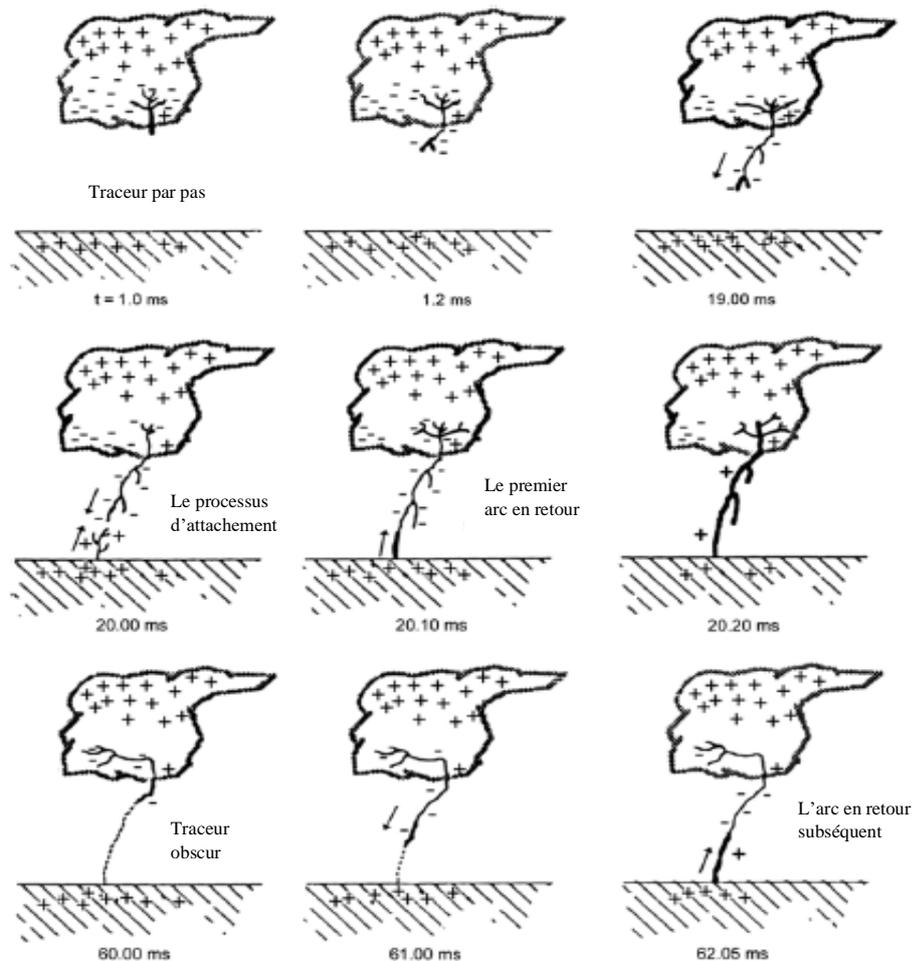


Figure II-4 Illustration des différentes phases d'une décharge négative nuage-sol [34].

II.5- Observations expérimentales des courants de foudre et des champs électromagnétiques associés :

II.5.1- Courant de l'arc en retour :

Les paramètres de la foudre couramment utilisés dans les applications techniques sont l'amplitude du courant, la dérivée maximale du courant et le taux moyen d'augmentation du courant. Ces paramètres sont basés sur des mesures effectuées par Berger et son équipe en Suisse [50] et sont largement adoptés par les normes de protection contre la foudre. Le courant a également été mesuré sur des tours instrumentées. Ces mesures ont également été effectuées et publiées en Russie, en Afrique du Sud et au Japon au cours des 20 dernières années.

Pour mesurer directement le courant de l'arc en retour jusqu'à la base du canal de foudre, il faut connaître le point d'impact de la foudre. Deux techniques expérimentales sont utilisées pour obtenir le courant de foudre et le champ électromagnétique associé, à savoir :

1. Déclenchement artificiel de la foudre Figure II.5
2. Utilisation des tours instrumentées Figure II.6



Figure II-5 Une photo du site d'expérimentation de la foudre déclenchée artificiellement dans le Shandong en 2005 [51]



Figure II-6 Tour de 540 m de hauteur à Moscou [52]

II.6- Caractérisation des champs électromagnétiques de l'arc en retour en fonction de la distance

Lin et al [53] ont publié en 1979 les allures des champs magnétiques azimutaux et des champs électriques verticaux, pour le premier arc en retour et les arcs en retour subséquents, à des positions de 1 à 200 km. Ces résultats sont basés sur diverses mesures prises en Floride (figure II.7).

Quatre particularités du champ électromagnétique ont été recensées par Nucci et al [45].

1. Le champ électromagnétique comporte pour toute distance (entre 1 km et 200 km) un premier pic dont l'intensité est environ inversement proportionnelle à la distance ;
2. La progression en rampe du champ électrique après son pic initial pour les distances proches ;
3. La bosse dans l'allure du champ magnétique à des distances proches. Cette bosse se manifeste après un pic de départ dans l'intervalle $[10\mu\text{s}, 40\mu\text{s}]$;
4. champs électriques et magnétiques lointains qui présentent une inversion de polarité.

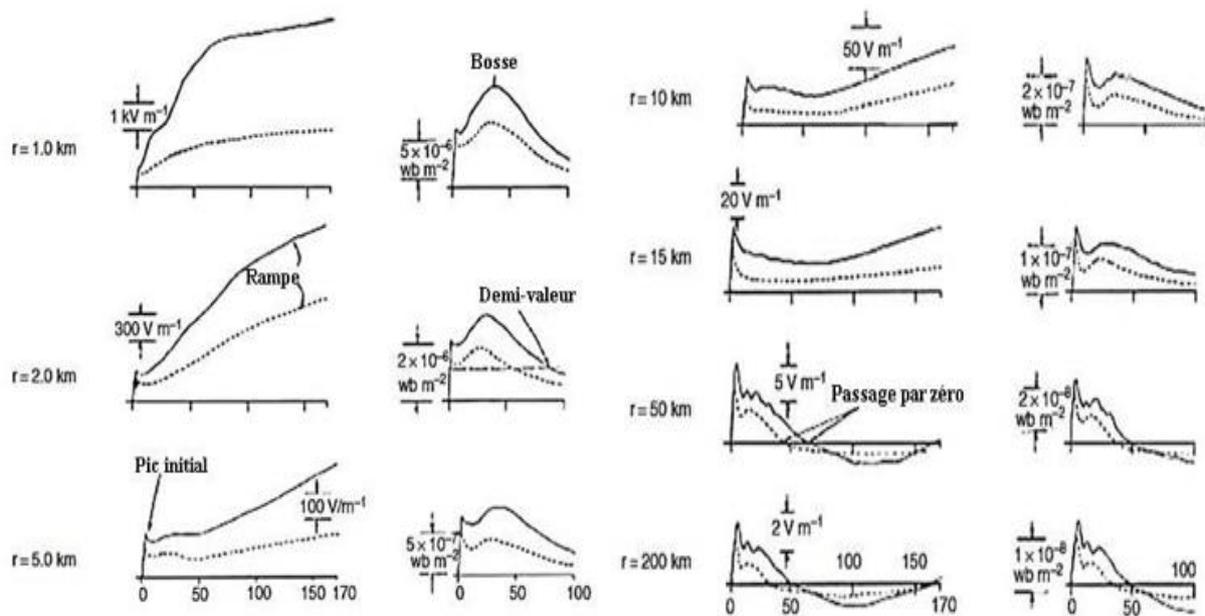


Figure II-7 Champ électrique vertical (colonne gauche) et champ magnétique azimutal (colonne droite) pour le premier arc en retour (ligne continue) et l'arc en retour subséquent (ligne pointillée) à des distances de 1 à 200 km [53]

II.7- Caractéristiques de l'occurrence de la foudre / systèmes de localisation de la foudre :

Le facteur principal permettant de décrire la foudre dans une région est la densité d'éclairs nuage-sol (niveau kéraunique) par unité de temps. Cette particularité a été évaluée par des compteurs de foudre et des enregistrements du système de localisation de la foudre. La localisation des décharges de foudre avec une certaine précision requiert le recours à des réseaux multi-stations. Une présentation des systèmes récents sur la localisation de la foudre est fournie par Cummins et Murphy [40].

Les performances du réseau nord-américain de détection de la foudre (NALDN) ont dernièrement été analysées en se basant sur le déclenchement artificiel de la foudre [54], [55]. Schulz et al [56] ont exposé des données statistiques sur plus de trois millions d'éclairs nuage-sol relevés entre 1992 et 2001 par le système autrichien de détection de la foudre (ALDIS). En 1999, le système de temps d'arrivée à large bande LASA a été étendu à d'autres régions, notamment le Nouveau-Mexique, le Texas, avec l'ajout de 11 stations. Par la suite, des améliorations ont été apportées pour renforcer la couverture du centre-nord de la Floride et des Grandes Plaines, ainsi que pour fournir une capacité 3D dans un rayon de 100 km [57].

II.8- EFFETS DE LA FOUDRE :

On peut distinguer deux catégories d'effets de la foudre, en raison de leurs origines :

- Les effets directs associés à la circulation du courant de foudre ;
- Les effets indirects sous forme de surtensions dans les éléments conducteurs provoqués par le rayonnement électromagnétique de la décharge orageuse et les très grandes variations du potentiel terrestre local.

Le passage du courant de foudre vers la terre et les champs électriques et magnétiques rayonnés provoquent de divers effets :

- effets électriques
- effets thermiques
- effets électrodynamiques
- effets électrochimiques
- effets liés aux champs électromagnétiques.

II.8.1- Effets électriques :

La très grande intensité du courant de foudre circulant dans un sol avec résistance donnée provoquera une élévation de tension dans la terre à proximité du point d'impact (loi d'Ohm) [58]. Une pareille variation du potentiel local n'est pas en soi dangereuse pour un être vivant, tant qu'aucun flux de courant ne se produit. Toutefois, si la propagation du courant de foudre dans le sol engendre des variations de potentiel entre deux points de la terre, cela peut endommager les équipements connectés à la terre.

Les variations du potentiel qui se manifestent sur ces surfaces peuvent être dangereuses pour les êtres vivants [27]. Ces dernières sont spécialement dangereuses pour les animaux domestiques et les animaux à grand espaces entre les pattes (la variation du potentiel peut atteindre plusieurs milliers de volts entre les jambes avant et arrière d'une vache, Figure II.8). Ce qui conduit généralement à l'électrocution de l'animal, car le cœur est placé sur le trajet du courant interne.

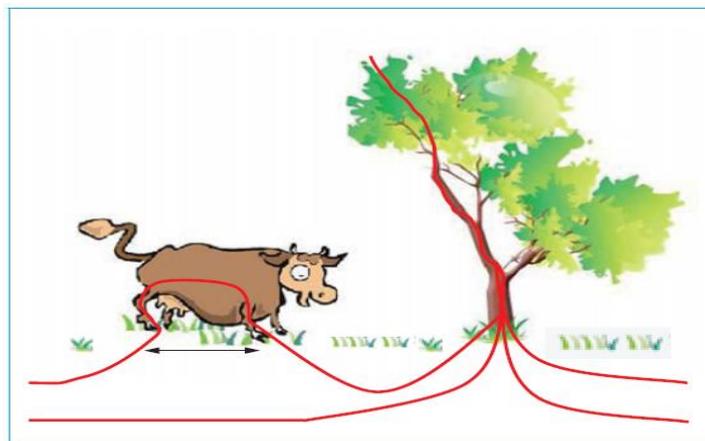


Figure II-8 Tension de pas [58]

II.8.2- Effets thermiques :

Ces effets sont liés à la quantité de charge Q , qui dépend des coefficients d'amplitude et la durée du courant de foudre. En règle générale, la chaleur est générée au niveau où le courant de foudre traverse le conducteur, cette chaleur est suffisante pour entraîner la fusion du conducteur ou l'inflammation des matériaux non conducteurs adjacents. Des éclairs sont capables de percer des plaques métalliques jusqu'à 2 à 3 mm d'épaisseur [58].

L'effet thermique est également lié à l'énergie propre du courant de foudre. Avec des matériaux mauvais conducteurs, beaucoup de chaleur peut être générée lorsqu'un courant de

foudre traverse un matériau comme le bois ou la maçonnerie. L'eau incluse dans le matériau s'évapore immédiatement et la très haute pression qui en résulte peut provoquer une explosion [27], [33]. Dans les sols peu conducteurs (sables siliceux), lors d'un coup de foudre, le sable subit une vitrification en fusion (formant des fulgurites).

Si le courant de foudre a une bonne conductivité sur une grande surface, aucune surchauffe dangereuse et donc aucune inflammation ne se produira. Le courant de foudre est capté et porté au sol par un conducteur métallique de section convenable pour éviter qu'un coup de foudre n'ait des effets thermiques dommageables.

II.8.3- Effets électrodynamiques :

Les courants électriques disposant la possibilité à exercer des forces sur les conducteurs qu'ils franchissent (loi de Laplace). Lors d'un coup de foudre très sévère (100 kA), ces forces atteignent 105 N par mètre pour les conducteurs espacés de 5 mm et 103 N par mètre pour les conducteurs espacés de 50 cm [58]. Pour des écarts plus importants, ces efforts sont presque insignifiants.

Ces forces électrodynamiques ont pour conséquence la détérioration des structures métalliques, l'explosion des structures en béton armé, le mouvement ou l'arrachement des câbles électriques.

II.8.4- Effets électrochimiques :

Ces phénomènes sont principalement dus à la corrosion accélérée des objets métalliques enterrés, tels que les câbles et les tuyaux et des conducteurs de mise à la terre sous l'effet des courants de fuite.

II.8.5- Effets liés aux champs électromagnétiques :

Il a été observé que lors d'un coup de foudre entre un nuage et le sol, les arcs en retour sont considérés comme les sources de rayonnement les plus fortes. Ces arcs produisent des impulsions électromagnétiques qui peuvent dépasser 1 V/m dans la bande de fréquence allant de 0,2 à 20 MHz, et ont un rayon de plus de 200 km [59].

Les coups de foudre sont susceptibles d'endommager ou d'affecter la qualité de service des lignes électriques et de télécommunications, ce qui peut entraîner l'acheminement des perturbations de courants et de tensions jusqu'au dispositif d'extrémité [60]. Il est donc

important de bien comprendre les différents mécanismes des coups de foudre et de prendre les mesures appropriées pour prévenir tout impact négatif.

II.8.6- Effet de la foudre sur les éoliennes :

II.8.6.1- Effet de la hauteur des éoliennes sur les coups de foudre

Bien que des études approfondies aient été menées pour augmenter la puissance des éoliennes, il a été démontré qu'avec seulement, l'augmentation de la hauteur de la tour et de la longueur des pales, il est possible de produire davantage d'énergie même à des vitesses de vent faibles [61]. Par conséquent, les turbines sont construites sur des tours plus hautes afin d'extraire plus d'énergie. La vitesse du vent augmente avec la hauteur au-dessus du sol. Selon des recherches publiées dans la littérature [62], un générateur de 10 kW peut produire 25 % d'électricité en plus s'il est placé à une hauteur de 100 m au lieu de 60 m au-dessus du sol. Toutefois, cette amélioration de la capacité de production d'électricité augmente également les risques liés à la foudre [62].

La probabilité d'un impact d'un coup de foudre sur une éolienne augmente directement avec toute augmentation de la hauteur. Pour cette raison, plus une turbine est haute, plus il y a des systèmes et des dispositifs de contrôle et de protection installés [63].

De même, les zones en grande altitude où la vitesse du vent est la plus élevée sont souvent celles où se trouvent les éoliennes. Ces zones sont également fréquemment soumises aux orages. A plus de 200 mètres au-dessus du sol, les éoliennes modernes sont conçues avec des pales de 80 mètres de long (du moyeu à l'extrémité) [62]. Les critères de conception des éoliennes dans de telles zones devraient exiger un système de protection complet contre la foudre.

II.8.6.2- Dommages causés par la foudre sur les turbines

Selon des études menées au Japon sur les impacts de foudre sur les éoliennes, 88 % d'eux se produisent dans la région de l'extrémité des pales (exemple : figure II.9), qui est généralement considérée comme les 3 derniers mètres de l'extrémité de la pale, et 75 % de tous les dommages liés aux éoliennes a plus de 10 000 KW de puissance nominale sont sur les pales [64], [65].



Figure II-9 Pales d'éoliennes détruite par la foudre.

Le champ électrique auquel un matériau isolant se transforme en conducteur est connu comme la rigidité diélectrique d'une substance. Selon des études menées par des chercheurs [61], une pale doit être protégée contre la foudre selon les trois voies possibles de propagation : 1) depuis l'extérieur de la pale ; 2) entre les laminés composites de la pale ; et 3) à l'intérieur de la cavité de la pale. Lorsque la foudre frappe une éolienne, les températures peuvent dépasser 30000 K [62].

Un coup de foudre peut sérieusement endommager une éolienne de deux manières différentes. La première, "effet direct", provoquée par les charges de courant massives qui traversent la surface de l'éolienne et entraînent une rupture thermique et diélectrique ainsi que des dommages mécaniques. Les conséquences secondaires sont dues aux champs électromagnétiques de la foudre qui agissent sur les systèmes auxiliaires et de contrôle utilisés pour maintenir le bon fonctionnement de l'éolienne [66], [67].

Comme tous les matériaux non conducteurs, la substance se décompose lorsque le champ électrique augmente au-delà de la résistance de rupture diélectrique de cette substance particulière. C'est ce qui se produit lorsque la surface composite d'une pale de l'éolienne est frappée par la foudre. Le matériau de cette surface est susceptible de connaître divers problèmes [68], notamment le délaminage ou la rupture complète, comme le montre la figure II.10. La chaleur résultante est extrêmement intense et rapide.

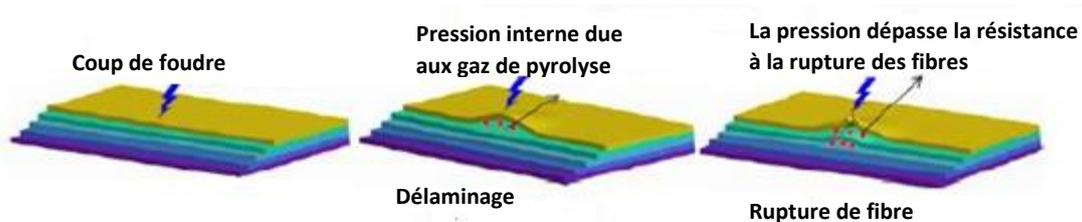


Figure II-10 Délamination et rupture du laminé causées par un réchauffement rapide par effet joule dû à un impact de foudre [69]

II.9- PROTECTION CONTRE LA Foudre :

Les répercussions de la surtension produite par les impacts de la foudre sont parfois multiples comme le vieillissement des composants, destruction des plaques à circuits imprimés, dégradation de lignes, perte des données...etc.

De multiples études sont effectuées sur la protection des structures et des systèmes contre les effets directs et indirects de la foudre [70], [71], [72]. Dans ce qui suit, nous n'avons retenu que trois domaines d'intérêt, à savoir la protection des lignes de distribution contre la foudre [73], [74], [75], [76], la protection des éoliennes [77], [78], [79], contre la foudre et la mise à la terre [80].

II.9.1- Moyens de protection contre les effets de la foudre :

II.9.1.1- Eclateurs :

Ils sont essentiellement faits de deux électrodes dans l'air, l'une reliée au conducteur à protéger et l'autre à la terre, l'écartement entre les électrodes étant fixé pour se déclencher lorsque la surtension du réseau dépasse un niveau de protection choisi (figure II.11)

Ces éclateurs sont facilement réglables afin que leurs caractéristiques puissent être ajustées en fonction de l'altitude et de la fonction qu'ils doivent remplir, comme un éclateur en entrée de sous-station.

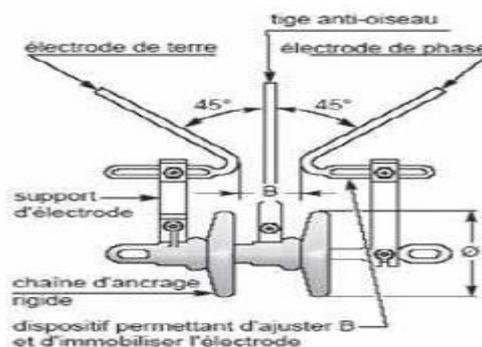


Figure II-11 Eclateur à cornes avec tige anti-oiseau [35], [25].

II.9.1.2- Parafoudres :

Pour empêcher les désavantages au fondement de l'éclateur simple, une famille différente de dispositifs de protection a été créée : les parafoudres.

Un parafoudre est un dispositif similaire à un éclateur qui maintient la surtension dans une certaine plage en faisant passer une onde de courant lorsque la surtension atteint ses bornes. Son principe est établi sur la fluctuation de sa résistance avec la tension.

II.9.1.3- Paratonnerre :

Afin de protéger une structure contre les coups de foudre directs, il est important de favoriser un point d'impact envisageable pour préserver le reste de la structure et conduire le courant électrique vers le sol en minimisant l'impédance du chemin emprunté par la foudre.

Certains types de protection prennent en compte ces problèmes :

- Paratonnerre à dispositifs d'amorçage (PDA) Figure II.12
- Paratonnerre à cage maillée Figure II.13



Figure II-12 paratonnerre a dispositif d'amorçage [35], [25]

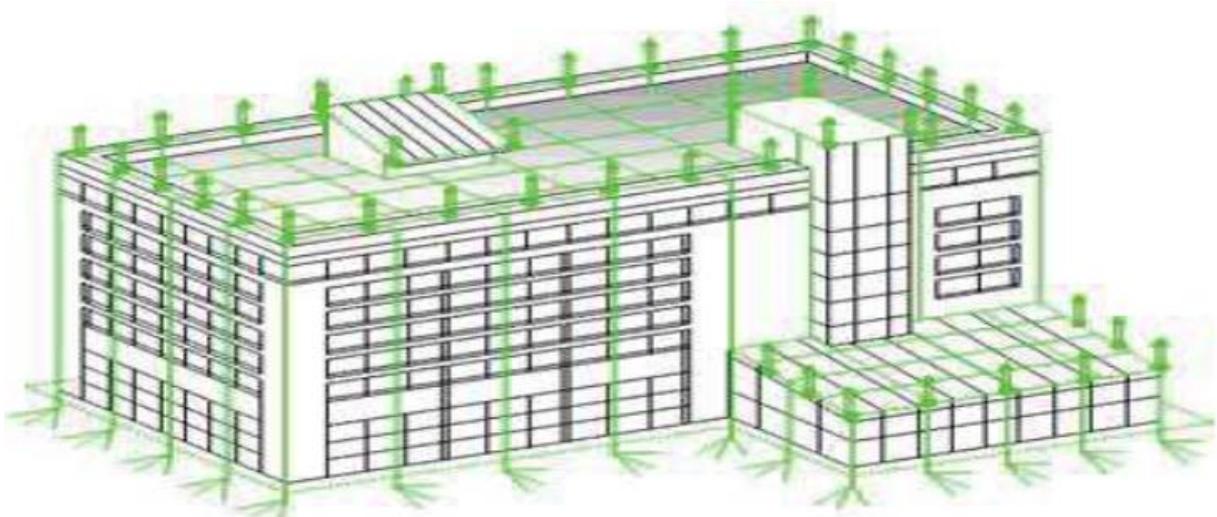


Figure II-13 protection d'un bâtiment par un paratonnerre a cage maillée [25].

II.9.2- Protection des lignes de distribution contre la foudre :

Le défi de la protection contre la foudre des réseaux de moyenne tension a été reconsidéré sérieusement ces dernières décennies en vue de la multiplication des charges sensibles et de la demande grandissante des clients pour une bonne qualité de l'énergie. Un groupe de travail de l'IEEE, chargé d'étudier la performance et la protection des lignes aériennes de distribution contre la foudre a publié la directive IEEE 1410 en 2004 [81], révisé en 2010. Ce guide, destiné aux responsables de la conception des lignes de distribution, fournit des actualités sur les méthodes visant à améliorer les résultats de la protection contre la foudre des lignes de distribution aériennes. Metwally et Heidler [82] ont publié une étude démontrant l'amélioration des performances des lignes aériennes de transmission grâce à l'utilisation de fils de blindage passif. Paolone et al [83] ont étudié l'effet des fils de blindage sur la diminution des tensions induites par la foudre au moyen de simulations numériques. Ils ont par ailleurs comparé leurs résultats numériques avec celles obtenues à l'aide de la formule simplifiée de Rusck [84], [85].

Sur la base d'un modèle expérimental à modeste dimension, Piantini et Janiszewski [86] et Piantini et al. [87] ont examiné la capacité des parafoudres à réduire les amplitudes des tensions induites.

Borghetti et al. [88] ont discuté des méthodes standards pour évaluer les effets indirects de la foudre sur les câbles de distribution. Ils ont proposé une procédure qui prend en compte la distribution statistique des heures de pointe et la croissance du courant de foudre.

D'autres travaux récents sur la protection des réseaux de tension contre la foudre ont été réalisés (voir, par exemple [75], [73]).

II.9.3- Protection des éoliennes contre la foudre :

La vulnérabilité des éoliennes aux coups de foudre est bien connue. Ces derniers peuvent provoquer des dommages significatifs aux composants de l'éolienne [89]. La protection des éoliennes conventionnelles contre la foudre a été discutée en détail (voir, par exemple, [90]). Les problèmes les plus sérieux liés à la protection des longues pales d'éoliennes contre la foudre ont été abordés dans [91], [78], [92]. En particulier, il a été montré que la rotation des pales pouvait avoir une grande influence sur le niveau de foudroiement des éoliennes modernes, car ils déclenchent une autodécharge.

II.9.3.1- Application du concept de zones de protection contre la foudre (LPZ)

Les fabricants des pales de turbines sont confrontés à un problème important en raison de l'intégration des LPS. Les normes relatives aux systèmes de protection contre la foudre (LPS) pour les éoliennes ont été ajoutées à la norme IEC 61400-2 [93].

La figure II.14 montre l'application de la méthode de la sphère roulante à l'assemblage des turbines et que la région de l'extrémité de la pale est extrêmement vulnérable aux coups de foudre. C'est l'une des limites de la norme IEC, qui conseille fortement d'utiliser des analyses et des comparaisons à haute tension et courant afin de garantir l'efficacité du récepteur [93].

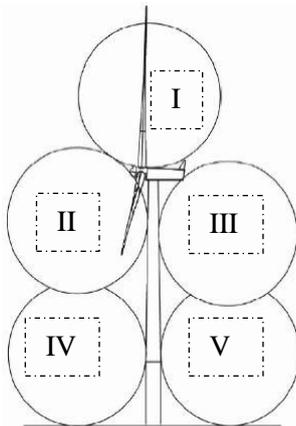


Figure II-14 Application de la méthode de la sphère roulante à l'assemblage des turbines [93]

Un système de protection contre la foudre (LPS) placé sur une éolienne doit être capable de détourner les courants importants de la surface des pales "efficacité de dimensionnement" et d'intercepter de préférence la foudre qui s'approche "efficacité d'interception" [94].

En fonction du pic du courant de foudre, des niveaux de protection sont attribués aux différents composants par des normes correspondantes. Ces niveaux vont de la catégorie I à la catégorie V. Bien que les caractéristiques et les formes d'onde du courant varient pour tous les impacts de foudre, la valeur typique du pic de courant est estimée à 30 kA [62].

Pour créer un système de protection contre la foudre pour une structure, il est utile de la diviser en zones de protection contre la foudre (LPZ) où l'environnement électromagnétique de la foudre est spécifié. [90] La CEI 62305-1 fournit les définitions des zones de protection contre la foudre dans le Figure II.15.

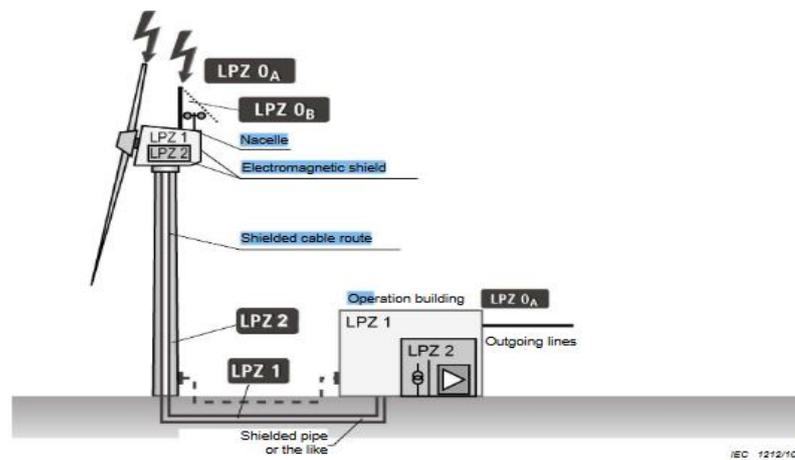


Figure II-15 Division de l'éolienne en diverses zones de protection contre la foudre [90]

LPZ 0 : Zone où la menace est due au champ électromagnétique non atténué de la foudre et où les systèmes internes peuvent être soumis à une surtension totale ou partielle due à la foudre.

LPZ 0A : Zone où un éclair direct et l'ensemble du champ électromagnétique de la foudre constituent une menace. Les systèmes internes peuvent subir une surtension totale ou partielle due à la foudre.

LPZ 0B : La zone est protégée des éclairs directs, mais le risque est lié à l'ensemble du champ électromagnétique de la foudre. Les systèmes internes peuvent subir des surtensions partielles dues à la foudre. Les zones marquées en gris sont la LPZ 0B où la foudre ne peut pas s'attacher, et le reste de la surface de l'éolienne est la LPZ 0A.

LPZ 1 : Le courant de surtension est limité dans cette zone par le partage du courant et les SPD (Surge protective device) à la frontière. Le blindage spatial peut réduire le champ électromagnétique produit par la foudre.

LPZ 2 : Le courant de surtension peut être encore réduit dans cette zone par le partage du courant et des SPD supplémentaires à la frontière. Pour réduire encore le champ électromagnétique de la foudre, un blindage spatial supplémentaire peut être appliqué.

II.9.3.2- Un treillis de blindage métallique :

La frontière entre LPZ 0A ou LPZ 0B et LPZ 1 peut être établie au niveau de la tour ou du couvercle supérieur de la nacelle, s'il y a un couvercle métallique ou un treillis de blindage métallique suffisant pour protéger les composants à l'intérieur (une cage de Faraday entourant

l'intérieur de la nacelle est idéale Figure II.16). Une maille métallique dans un revêtement en GFRP devrait être intégrée dans ce cadre pour définir la nacelle comme LPZ 1. Un grillage de grande dimension, jusqu'à quelques mètres, protégera la nacelle de l'impact direct de la foudre et du courant de retour. La maille peut avoir une excellente atténuation des champs magnétiques et électriques en fonction de la taille et de l'épaisseur de la maille.

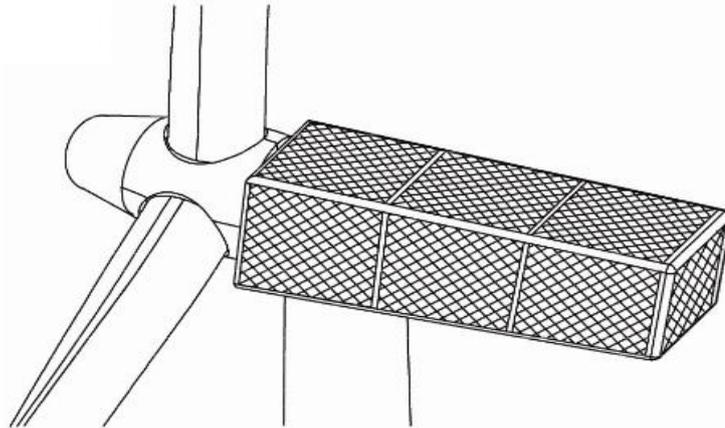


Figure II-16 Maille de petite dimension pour nacelle [90]

II.9.3.3- Système de protection pour les pales d'éoliennes.

La foudre ne devrait pas frapper les pales composées entièrement de matériaux non conducteurs, mais l'expérience a montré que ce n'était pas le cas. La foudre peut frapper des pales dépourvues de composants métalliques et lorsqu'un arc électrique se forme à l'intérieur de la pale, les dommages sont importants.

Il existe plusieurs types de pales en fonction du mécanisme de contrôle et de freinage utilisé et de l'utilisation de matériaux composites isolants et conducteurs. Comme les pales avec un récepteur sous forme de pointe contrôlé par un fil d'acier et pale entièrement constituée de matériaux non conducteurs [90], [95], [68].

Lorsque la foudre frappe une éolienne, une quantité de charges électriques est transférée du nuage à la surface de l'éolienne via le canal de foudre. La charge traverse ensuite la structure de l'éolienne pour trouver un chemin plus avantageux vers la terre. Un système de protection contre la foudre est constitué de structures complémentaires qui offrent à la foudre un chemin simple et moins résistant vers la terre tout en évitant les composants sensibles.

L'utilisation du système de protection contre la foudre « LPS », dans lequel des disques métalliques discrets à haute conductivité sont positionnés sur les différentes surfaces de la lame

et particulièrement exposées à la foudre [67]. La figure II.17 illustre quelques systèmes de récepteurs typiques, comprenant des récepteurs sous forme de disques placés aux extrémités des pales et un maillage couvrant toute la surface de la pale.

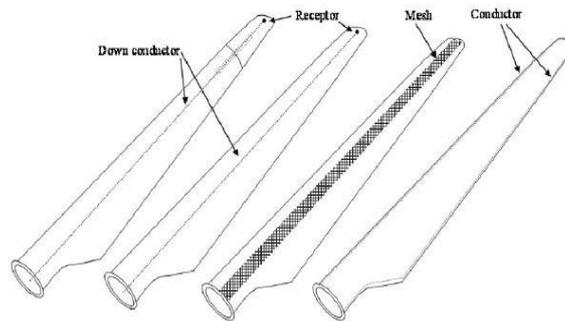


Figure II-17 Systèmes de protection des éoliennes contre la foudre [96]

La foudre avec des pics de courants élevés peut occasionnellement entraîner une petite fusion du matériau du récepteur. Elle peut même endommager la pale en raison de l'augmentation très élevée de la température ou de la pression interne dans la pale [64].

L'utilisation du polymère renforcé de fibres de carbone « CFRP » dans les éoliennes a récemment augmenté en raison de l'allongement des pales, car ce matériau présente un rapport résistance/poids élevé, une qualité très recherchée dans un matériau de pale d'une éolienne. Les pales avec les laminés en CFRP peuvent subir des contraintes internes en raison des courants de Foucault, ce qui peut éventuellement provoquer une rupture [91]. L'utilisation de plusieurs conducteurs descendants dans la pale est l'une des stratégies suggérées par Rachidi (2008) pour minimiser cet impact.

II.9.4- Mise à la terre :

Le fonctionnement des systèmes de mise à la terre aux fréquences industrielles est relativement bien compris. Beaucoup d'efforts ont été déployés, durant les années deux mille, pour modéliser les systèmes de mise à la terre HF [97], [98]. Des modèles particuliers ont été élaborés pour tenir compte de l'ionisation du sol [99], [100] et diverses méthodes numériques ont été utilisées (par exemple, la méthode des éléments finis [101], celle des moments et celle des opérateurs arithmétiques). Pour le domaine fréquentiel et l'analyse transitoire des électrodes mises à la terre dans des conditions de foudre, une revue des techniques de modélisation est donnée dans [102]. Pour les grandes éoliennes, il y aura toujours une structure de fondation étendue qui incorpore de grandes quantités d'acier dans de grandes dimensions. L'acier de la

structure de fondation doit généralement être utilisé à des fins de mise à la terre, car cela permet d'obtenir la résistance de mise à la terre la plus faible possible.

II.10- Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons entrepris une exploration approfondie du phénomène de la foudre, de ses effets dévastateurs et des moyens de protection disponibles, en mettant particulièrement l'accent sur la protection des éoliennes. En commençant par une description détaillée du processus de formation de la foudre, des observations expérimentales du courant de foudre et du champ électromagnétique rayonné, nous avons jeté les bases nécessaires pour comprendre la nature complexe de ce phénomène atmosphérique. Ensuite, nous avons examiné les effets les plus préjudiciables de la foudre, soulignant les dommages potentiels qu'elle peut infliger aux éoliennes et à leurs composants essentiels.

Enfin, nous avons abordé les moyens de protection contre la foudre, en mettant en lumière les différentes stratégies et technologies disponibles pour réduire les risques et préserver l'intégrité des parcs éoliens. Cette revue exhaustive de la littérature nous a permis d'identifier les défis auxquels sont confrontées les éoliennes en matière de protection contre la foudre, tout en mettant en évidence l'importance cruciale de développer et d'implémenter des solutions efficaces dans ce domaine.

En conclusion, cette exploration offre une base pour orienter les efforts de recherche et de développement visant à améliorer la protection des éoliennes contre la foudre, contribuant ainsi à garantir la durabilité et la fiabilité de cette source d'énergie renouvelable essentielle dans un contexte de changement climatique croissant.

Chapitre III : Modélisation et simulation du champ électromagnétique rayonné par l'interaction foudre-éolienne

III.1- Introduction :

L'interaction entre la foudre et les structures élevées, qu'elles soient des tours de télécommunication ou des éoliennes, suscite un intérêt croissant en raison de ses implications sur la sécurité des installations et des équipements électriques. Ce chapitre s'intéresse spécifiquement au rayonnement électromagnétique résultant de l'interaction foudre-éolienne, un phénomène complexe et souvent mal compris, tout en établissant des parallèles avec le rayonnement électromagnétique de l'interaction foudre-tour élevée.

Dans ce chapitre, nous nous pencherons sur une étude approfondie du courant de l'arc en retour, un aspect crucial de l'interaction entre la foudre et les structures élevées telles que les éoliennes. Nous commencerons par discuter brièvement les différents modèles du courant de l'arc en retour, en mettant particulièrement l'accent sur les modèles d'ingénieur que nous avons choisis pour cette analyse.

Ensuite, nous présenterons l'extension de ces modèles pour prendre en compte les objets élevés tels que les pales des éoliennes, reconnaissant ainsi l'importance de considérer la géométrie spécifique des éoliennes dans notre étude de l'interaction foudre-éolienne.

Une fois que nous aurons établi ces bases théoriques, nous nous tournerons vers la modélisation du champ électromagnétique résultant de cette interaction, en utilisant la méthode FDTD (Finite-Difference-Time-Domain). Nous présenterons deux approches de calcul du champ électromagnétique au-dessus et en-dessous d'un sol de conductivité finie : l'une utilisant un code de calcul en Fortran et l'autre en Matlab.

En résumé, ce chapitre offre une analyse approfondie et méthodique des modèles du courant de l'arc en retour, de leur extension pour inclure les objets élevés tels que les éoliennes, et des méthodes de calcul du champ électromagnétique résultant de l'interaction foudre-éolienne. Ces analyses fourniront une base solide pour une compréhension plus approfondie de ce phénomène complexe et aideront à guider la conception et la protection des infrastructures éoliennes contre les effets néfastes de la foudre.

III.2- Classification des modèles du courant de l'arc en retour :

Selon Rakov et Uman [103], les modèles de l'arc en retour sont classés en quatre catégories :

- Modèles physiques,
 - Modèles électromagnétiques,
 - Modèles RLC,
 - Modèles d'ingénieur.
- 1) Les modèles de la première catégorie adoptent une approche physico-chimique décrivant l'évolution d'une décharge électrique dans un plasma contenu dans un volume cylindrique, en faisant intervenir les équations de conservation de masse et d'énergie, les équations d'état et les équations de Maxwell. Malgré leur rigueur théorique, ces modèles n'ont jamais pleinement satisfait en termes de prédiction des champs électromagnétiques rayonnés. De plus, ils sont réputés pour être des modèles lourds, car leur utilisation nécessite une connaissance précise de divers phénomènes physiques difficiles à déterminer avec précision, tels que les coefficients d'ionisation et de recombinaison de l'air, les propriétés thermodynamiques du canal, les conductivités thermiques et électriques du canal, etc.
 - 2) Dans les modèles électromagnétiques, la théorie des antennes est utilisée pour simuler le canal de foudre. La distribution spatio-temporelle du courant le long du canal est déterminée grâce à la résolution numérique des équations de Maxwell. Le calcul du champ électromagnétique s'effectue généralement en utilisant la méthode des moments et la méthode FDTD.
 - 3) Les modèles de la troisième catégorie sont souvent désignés sous les noms de "modèles RLC" ou "modèles des lignes de transmission". Ils décrivent la décharge de foudre comme un processus transitoire sur une ligne de transmission caractérisée par une résistance, une inductance et une capacité, tous par unité de longueur. Ces modèles sont employés pour évaluer le courant de foudre en fonction du temps et de la hauteur, permettant ensuite le calcul du champ électromagnétique rayonné.

- 4) Les modèles de la dernière catégorie sont appelés "modèles d'ingénieur" et sont les plus couramment utilisés par la communauté scientifique. Dans ces modèles, la distribution spatio-temporelle du courant de foudre repose sur des observations expérimentales des paramètres caractéristiques de l'arc en retour, telles que le courant à la base du canal, la vitesse de l'arc en retour et la luminosité. La simplicité caractérise ces modèles, car ils ne prennent pas en compte l'aspect physique détaillé de l'arc en retour. L'objectif de leur utilisation est de reproduire le plus fidèlement possible les courbes expérimentales du champ électromagnétique pour des distances allant de quelques dizaines de mètres à quelques centaines de kilomètres. Ces modèles sont adoptés dans ce chapitre.

III.3- Distribution du courant de foudre dans les modèles d'ingénieur

III.3.1- Géométrie du problème

Dans les modèles d'ingénieur, le courant de l'arc en retour est considéré varier dans l'espace et dans le temps. La figure III.1 illustre la géométrie du problème.

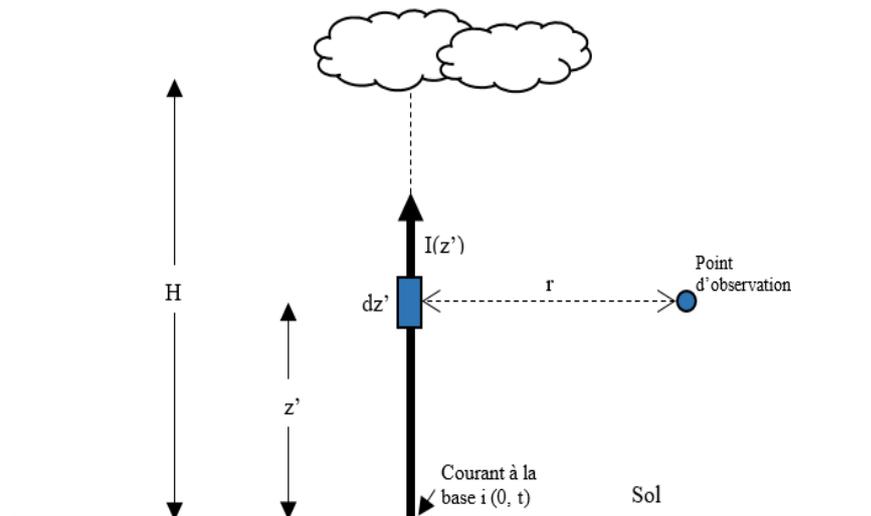


Figure III-1 Géométrie du problème.

III.3.2- Représentation générale des modèles d'ingénieur

Une seule formule générale et compacte peut exprimer la distribution du courant le long du canal de la foudre pour les cinq modèles d'ingénieur (BG, TCS, TL, MTLL, MTLE) (voir [104]) :

$$i(z', t) = P(z') * i\left(0, t - \frac{z'}{v}\right) * u\left(t - \frac{z'}{v^*}\right) \quad (\text{III.1})$$

- u est la fonction d'Heaviside égale à 1 pour $t \geq z'/v$.
- $P(z')$ le facteur d'atténuation du courant dépendant de la hauteur.
- v la vitesse de propagation de l'onde de courant.
- v^* la vitesse de propagation du front de l'arc en retour.

Le modèle de Bruce et Golde (BG) [105] s'agit d'un premier modèle de l'arc en retour visant à intégrer les observations expérimentales dans un modèle mathématique permettant de calculer les champs électromagnétiques loin des arcs en retour.

Dans le modèle TCS, proposé par Heidler en 1985 [106], une source se déplace depuis le sol vers le nuage à une vitesse v . On suppose que le courant, injecté par cette source à la hauteur z , se propage vers le sol à la vitesse de la lumière c .

Dans le modèle DU, proposé en 1990 par Diendorfer et Uman [107], le courant de l'arc en retour se constitue de deux segments. Le premier segment est semblable à celui du modèle TCS, et le second segment représente un courant de polarité opposée avec une décroissance exponentielle.

Le modèle TL considère que le canal de foudre peut être modélisé par une ligne de transmission sans perte. Ainsi, l'onde du courant se dirige du sol vers le nuage sans distorsion ni atténuation.

Dans le modèle de la ligne de transmission modifié avec décroissance linéaire du courant, MTLL, proposé par Rakov et Dulzon [108] en 1987, l'intensité du courant est censé décroître linéairement au fur et à mesure qu'elle se propage dans le canal.

Dans le modèle MTLE, proposée par Nucci et al. En 1988 [109] (voir aussi Rachidi et Nucci [110]), le courant de l'arc en retour décroît exponentiellement pendant qu'il se propage dans le canal.

Le tableau II.1 résume $P(z')$ et v^* pour les cinq modèles présentés, où H représente la hauteur maximale du canal, λ la constante de décroissance du courant et c la vitesse de la lumière.

Tableau III-1 Paramètres $P(z')$ et v^* pour cinq modèles d'ingénieur (adapté de [104]).

Modèle	$P(z')$	v^*
BG	1	∞
TCS	1	-c
TL	1	v
MTLL	$1-z'/H$	v
MTLE	$exp(-z'/\lambda)$	v

III.4- Courant de l'arc en retour à la base du canal de foudre :

III.4.1- Le modèle bi-exponentiel :

On utilise fréquemment la bi-exponentielle en vue de sa facilité d'utilisation. De plus, elle est particulièrement indiquée pour l'analyse fréquentielle du champ électromagnétique du rayonnement de la foudre car sa transformée de Fourier peut être exprimée analytiquement [111].

Le courant du premier arc de retour est déterminé par la formule ci-dessous [111] :

$$i(0, t) = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (\text{III.2})$$

En ce qui concerne l'arc en retour subséquent, une formule composée de l'addition de deux fonctions bi-exponentielles a été utilisée, sous la forme [111]:

$$i(0, t) = I_{01}(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) + I_{02}(e^{-\gamma t} - e^{-\delta t}) \quad (\text{III.3})$$

Le tableau III.2 indique les coefficients pour les deux formes. Ces coefficients, relatifs au temps de montée, à la valeur de crête et à la durée de l'impulsion de courant, sont déterminés afin de restituer le plus exactement possible les courbes expérimentales moyennes relevées par Berger et al [50].

Tableau III-2 Paramètres des fonctions bi-exponentielles[111].

	I_{01} (kA)	α (s ⁻¹)	β (s ⁻¹)	I_{02} (kA)	γ (s ⁻¹)	δ (s ⁻¹)
Premier arc en retour	33.7	9.2*10 ³	4*10 ⁵	-	-	-
Arc en retour subséquent	14.3	18*10 ⁴	3*10 ⁶	10	10 ⁴	9.4*10 ⁴

III.4.2- Fonction d'Heidler :

Les expressions analytiques généralement retenues pour décrire le courant à la base du canal $i_0(t)$ sont fondés sur l'expression analytique proposée par Heidler [106] et généralement appelée "fonction de Heidler", définie par :

$$i_0(t) = \frac{I_0}{\eta} \frac{(t/\tau_1)^{n_3}}{1+(t/\tau_1)^{n_3}} e^{-t/\tau_2} \quad (\text{III.4})$$

Où

- I_0 est l'amplitude du courant au pied du canal

- τ_1 est le taux de remontée de l'impulsion du courant

- τ_2 est la durée de l'impulsion du courant

- n_3 est un indice dont les chiffres sont inclus dans la fourchette entre 2 et 10 [106]

- η est le coefficient de correction d'amplitude du courant, obtenu par

$$\eta = e^{-\left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right) \left(n_3 \frac{\tau_2}{\tau_1}\right)^{1/n_3}} \quad (\text{III.5})$$

La fonction d'Heidler permet de résoudre de nombreuses contraintes :

- ✓ elle a une dérivée temporelle de deuxième ordre nulle à $t = 0$
- ✓ elle est conforme aux courbes mesurées du courant de retour
- ✓ elle offre également la possibilité de régler de manière simple et exacte l'amplitude du courant, la dérivée maximale du courant et la quantité de charge électrique transférée de manière presque indépendante [36].

On utilise couramment la somme de deux fonctions d'Heidler (par exemple Rachidi et al. [112]), ou l'hybridation entre une fonction d'Heidler avec une fonction bi-exponentielle (par exemple Nucci et al [45]).

Tableau III-3 Paramètres des deux fonctions d'Heidler [112].

	$I_{01}(\text{KA})$	$\tau_{11}(\mu\text{s})$	$\tau_{21}(\mu\text{s})$	n_1	$I_{01}(\text{KA})$	$\tau_{12}(\mu\text{s})$	$\tau_{22}(\mu\text{s})$	n_2
Arc subséquent	10.7	0.25	2.5	2	6.5	2	230	2

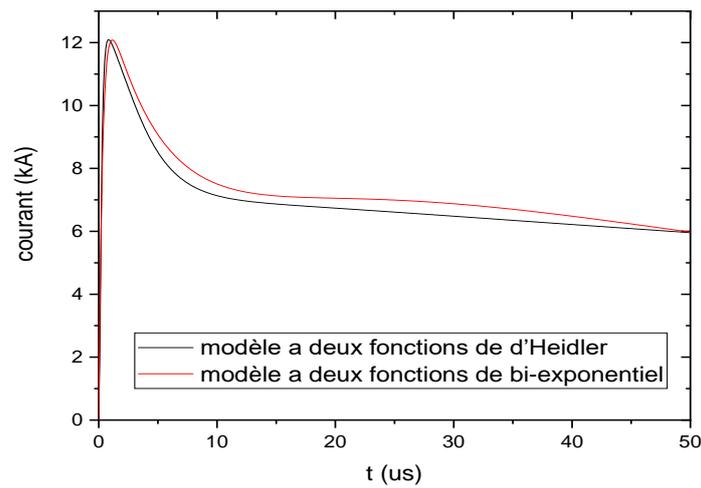


Figure III-2 Courant à la base du canal d'un arc subséquent typique correspondant aux deux modèles (modèle d'Heidler et modèle bi-exponentiel)[111]

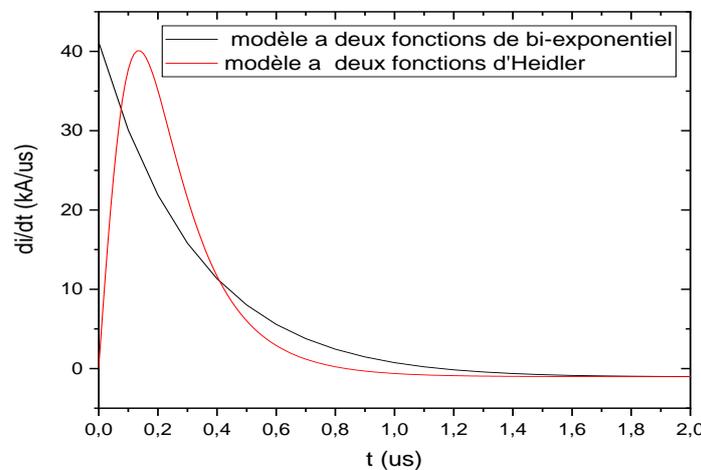


Figure III-3 Dérivée de l'approximation analytique du courant pour les deux modèles [111].

Les deux modèles, bi-exponentiel et fonction d'Heidler, permettent de bien reproduire l'apparence d'onde d'un courant de foudre typique à la base du canal (figure III.2). De plus, la formule (III.4) d'Heidler donne la possibilité d'obtenir des dérivées nulles à $t = 0$, contrairement à la fonction double exponentielle communément adoptée (figure III.3), ce qui correspond bien aux études expérimentales.

Concernant le modèle hybride (Heidler- bi exponentiel) développé par Nucci et al [45] est formulé comme l'addition d'une fonction d'Heidler et d'une fonction bi-exponentielle. L'expression du courant à la base du canal de foudre est donnée par :

$$i_0(t) = \frac{I_{01}}{\eta} \frac{(t/\tau_1)^2}{1+(t/\tau_1)^2} e^{-t/\tau_2} + I_{02}(e^{-t/\tau_3} - e^{-t/\tau_4}) \quad (\text{III.6})$$

Tableau III-4 Paramètres adoptés pour d'expression (III.5) [45]

I_{01} (KA)	τ_1 (μ s)	τ_2 (μ s)	η	I_{02} (KA)	τ_3 (μ s)	τ_4 (μ s)
9.9	0.072	5	0.845	7.5	100.0	6.0

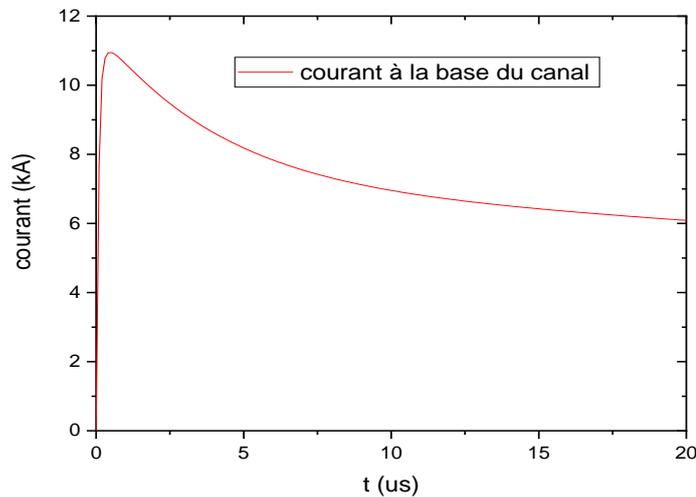


Figure III-4 Allure du courant à la base du canal obtenue grâce au modèle hybride.

La figure. III.4 montre le courant d'arc en retour typique à la base du canal avec le modèle hybride.

Dans ce travail, le courant à base du canal de foudre est représenté par la somme de deux fonctions d'Heidler.

$$i_0(t) = \frac{I_{01}}{\eta_1} \frac{(t/\tau_{11})^2}{1+(t/\tau_{11})^2} e^{-t/\tau_{21}} + \frac{I_{02}}{\eta_2} \frac{(t/\tau_{12})^2}{1+(t/\tau_{12})^2} e^{-t/\tau_{22}} \quad (\text{III.7})$$

Avec :

$$\begin{cases} \eta_1 = \exp \left[\left(-\frac{\tau_{11}}{\tau_{12}} \right) \left(n_1 \frac{\tau_{12}}{\tau_{11}} \right)^{1/n_1} \right] \\ \eta_2 = \exp \left[\left(-\frac{\tau_{21}}{\tau_{22}} \right) \left(n_2 \frac{\tau_{22}}{\tau_{21}} \right)^{1/n_2} \right] \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

Le tableau III.5 montre les paramètres des deux fonctions d'Heidler relatifs au premier arc en retour et les arcs subséquents présentés par Rachidi et al [112], basés sur des données expérimentales de Berger. La figure III.5 illustre les allures des deux courants.

Tableau III-5 Paramètres des deux fonctions d'Heidler [112].

	$I_{01}(\text{KA})$	$\tau_{11}(\mu\text{s})$	$\tau_{12}(\mu\text{s})$	n_1	$I_{02}(\text{KA})$	$\tau_{21}(\mu\text{s})$	$\tau_{22}(\mu\text{s})$	n_2
Premier arc	28	1.8	95	2	-	-	-	-
Arc subséquent	10.7	0.25	2.5	2	6.5	2	230	2

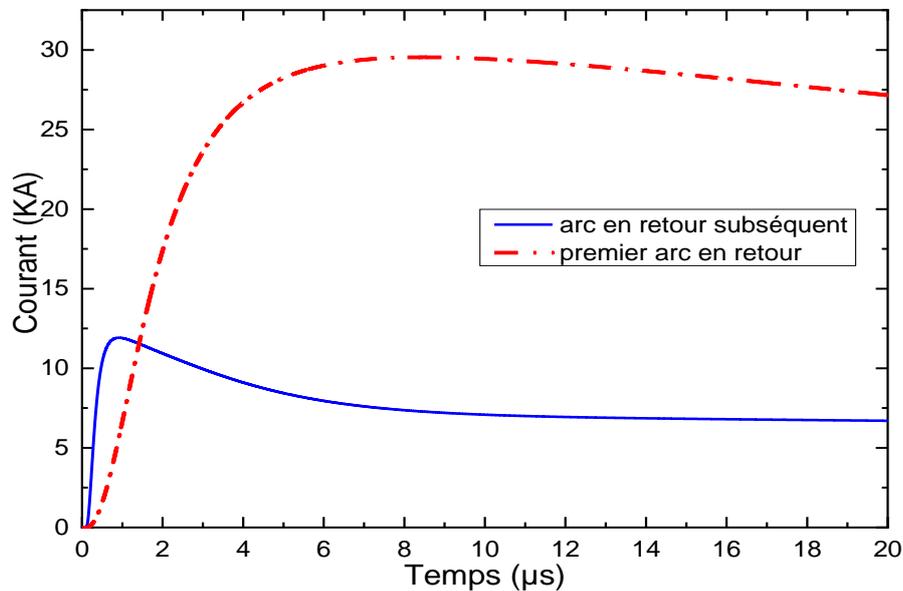


Figure III-5 premier arc et l'arc en retour subséquent à la base du canal.

Les vitesses du premier arc en retour et les arcs en retour subséquents ont pour valeurs respectives : $1,7 \times 10^8$ m/s et $1,5 \times 10^8$ m/s. La constante de décroissance du courant λ dans le modèle MTLE est égale à 2 Km [112].

III.5- Extension des modèles d'ingénieur pour prendre en compte les objets élevés (cas des tours)

III.5.1- Extension des modèles d'ingénieur basés sur la représentation de sources distribuées (modèle de Rachidi)

Rachidi et al. [113] ont introduit une amélioration aux modèles de l'ingénieur, en tenant compte de la présence d'un objet élevé (tour). Cette dernière extension utilise des sources de courant existantes réparties le long du la foudre canal [114], [110]. Un courant $i_0(t)$, injectée au point d'attache de la foudre (en haut de la tour), génère deux impulsions de courant, l'une se déplaçant le long de la tour et l'autre le long du canal de la foudre.

L'onde ascendante se répand le long du canal à la vitesse v tandis que l'onde descendante le long de la tour se répand à la vitesse de la lumière c (figure III.6). La tour est supposée être une ligne de transmission sans perte, électriquement longue, qui se définit par son impédance caractéristique Z_t et qui présente des coefficients de réflexion constants et non nuls au sommet et à la base de la tour, respectivement ρ_t et ρ_g .

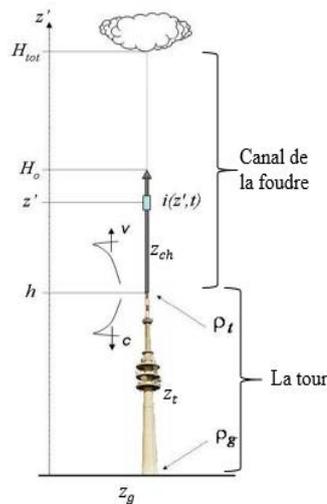


Figure III-6 Propagation des impulsions de courant le long du canal et le long de la tour.

Les répartitions de courant le long de la tour et le long du canal de la foudre sont décrites respectivement par les formules ci-dessous.

$$i(z', t) = (1 - \rho_t) \sum_{n=0}^{\infty} \left[\rho_t^n \rho_g^n i_0 \left(h, t - \frac{h-z'}{c} - \frac{2nh}{c} \right) + \rho_t^n \rho_g^{n+1} i_0 \left(h, t - \frac{h+z'}{c} - \frac{2nh}{c} \right) \right] u \left(t - \frac{h+z'}{c} - \frac{2nh}{c} \right) \quad (\text{III.9})$$

Pour : $0 \leq z' \leq h$

$$i(z', t) = \left[p(z' - h)i_0 \left(h, t - \frac{z' - h}{v^*} \right) - \rho_t i_0 \left(h, t - \frac{z' - h}{c} \right) + \right. \\ \left. (1 - \rho_t)(1 + \rho_t) \sum_{n=0}^{\infty} \rho_g^{n+1} \rho_t^n i_0 \left(h, t - \frac{h+z'}{c} - \frac{2nh}{c} \right) \right] u \left(t - \frac{z' - h}{v} \right) \quad (\text{III.10})$$

Pour : $h \leq z' \leq H$

Où ρ_t et ρ_g sont les coefficients de réflexion au haut et au pied de la tour, respectivement.

h : Hauteur de la tour,

c : Vitesse de la lumière,

v : Vitesse de front de l'arc en retour,

$P(z')$ et v^* sont respectivement le facteur d'atténuation du courant en fonction de la hauteur et la vitesse de propagation du front de l'arc en retour, pour les modèles d'ingénieur les plus couramment utilisés dans le tableau III.2

$u(t)$: une fonction unité

n : est le nombre de réflexions des courants à chaque côté de la tour.

Les coefficients de réflexion sont déterminés à partir des impédances caractéristiques du canal de foudre, de la tour et du sol :

$$\rho_t = \frac{Z_t - Z_{ch}}{Z_t + Z_{ch}} \quad (\text{III.11})$$

$$\rho_g = \frac{Z_t - Z_g}{Z_t + Z_g} \quad (\text{III.12})$$

Où Z_t est l'impédance caractéristique de la tour, Z_{ch} est l'impédance caractéristique du canal de foudre et Z_g est l'impédance du sol.

Ces formules reposent sur le principe du "courant non contaminé" $i_0(h, t)$, qui correspond au courant idéal qui serait constaté au sommet de la tour lorsque les coefficients de réflexion de l'onde du courant à chaque extrémité de la tour sont équivalents à zéro.

Pour une formule de $i_0(h, t)$ donnée, la propagation du courant le long de la tour, représentée par l'équation (III.9), est surtout définie par les paramètres d'une ligne de transmission uniforme sans pertes, pour décrire l'objet élevé.

III.5.2- Extension des modèles d'ingénieur basés sur la représentation de source de tension localisée (modèle de Baba et Rakov)

Une autre méthode pour représenter des sources distribuées par Rachidi et al. [113] a été suggéré par Baba et Rakov [115], [116], en servant d'une source de tension en série située au point de liaison entre le canal de la foudre et l'objet élevé (tour). Ils ont démontré que cette approche permet d'assurer des conditions aux limites adéquates au point d'attache entre la tour et le canal de la foudre. [116]. Baba et Rakov ont représenté la distribution spatio-temporelle du courant le long de la tour et du canal en fonction du courant de court-circuit.

$$i_{sc}(t) = 2i_0(h, t) \quad (\text{III.13})$$

$$i(z', t) = \frac{1-\rho_t}{2} \sum_{n=0}^{\infty} \left[\rho_t^n \rho_g^n i_{sc} \left(h, t - \frac{h-z'}{c} - \frac{2nh}{c} \right) + \rho_g^{n+1} \rho_t^n i_{sc} \left(h, t - \frac{h+z'}{c} - \frac{2nh}{c} \right) \right] \quad (\text{III.14})$$

Pour : $0 \leq z' \leq h$

$$i(z', t) = \frac{1-\rho_t}{2} \left[i_{sc} \left(h, t - \frac{z'-h}{v} \right) - \rho_t i_0 \left(h, t - \frac{z'-h}{c} \right) + \sum_{n=0}^{\infty} \rho_g^n \rho_t^{n-1} (1 + \rho_t) i_{sc} \left(h, t - \frac{z'-h}{v} - \frac{2nh}{c} \right) \right] \quad (\text{III.15})$$

Pour : $h \leq z' \leq H$

III.5.3- Allure des courants au sommet et à base des tours élevées.

Pour chaque modèle ingénieur, l'objet élevé (tour) est considéré comme étant une ligne de transmission idéale. Afin de tenir compte des discontinuités structurelles de certains objets élevés, différentes parties de lignes de transmission en cascade ont été prises en compte [117].

Nous présentons ci-après un aperçu relatif aux phénomènes transitoires qui se déroulent quand un courant de foudre est injecté au sommet d'une tour.

Prenons deux exemples de modèles simplifiés :

- la tour Peissenberg dont la hauteur est de 168 m, avec des coefficients de réflexion définis comme suit $\rho_t = -0,53$ et $\rho_g = 0,7$ [118], [111].

- La tour CN au Canada dont la hauteur est de 553 m, avec des coefficients de réflexion définis comme suit $\rho_t = -0,366$ et $\rho_g = 0,8$ [119], [111].

En reprenant notamment l'expression III.6 pour la somme de deux fonctions de Heidler pour le courant $i(0, t)$ (voir le tableau III.5) et l'expression III.6 établie par Nucci et al [45] (voir tableau III.4).

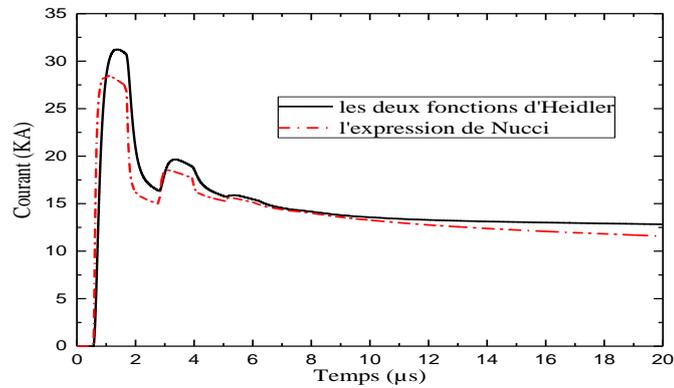


Figure III-7 Courant à la base de la tour Peissenberg (168-m).

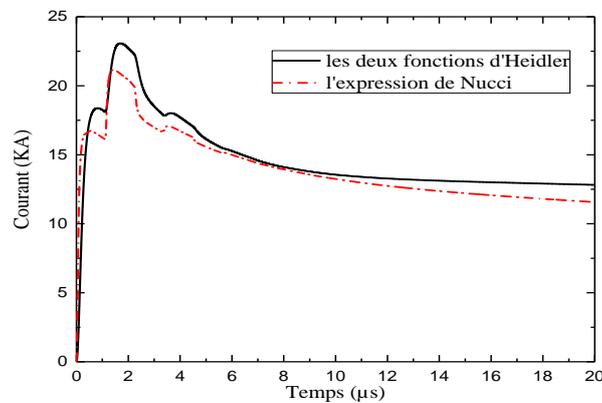


Figure III-8 Courant au sommet de la tour Peissenberg (168-m).

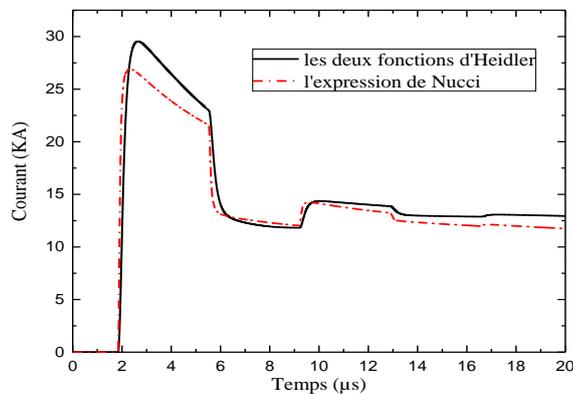


Figure III-9 Courant à la base de la tour CN (553-m).

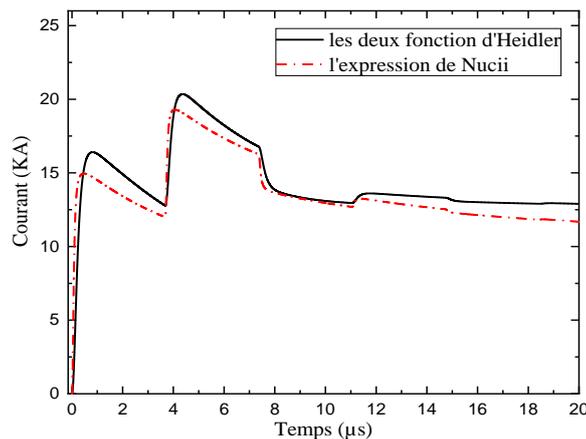


Figure III-10 Courant au sommet de la tour CN (553-m).

III.6- Champ électromagnétique généré par l'interaction d'un coup de foudre avec une tour :

Les modèles d'ingénieur sont employés pour déterminer le courant de l'arc en retour le long de la tour et du canal, dans le cadre d'un coup de foudre déclenché à partir d'un objet élevé (tour). Pour le calcul du champ électromagnétique rayonné, On utilise pratiquement la même géométrie employée lorsque la foudre est initiée au sol, comme représenté sur la figure III. 11.

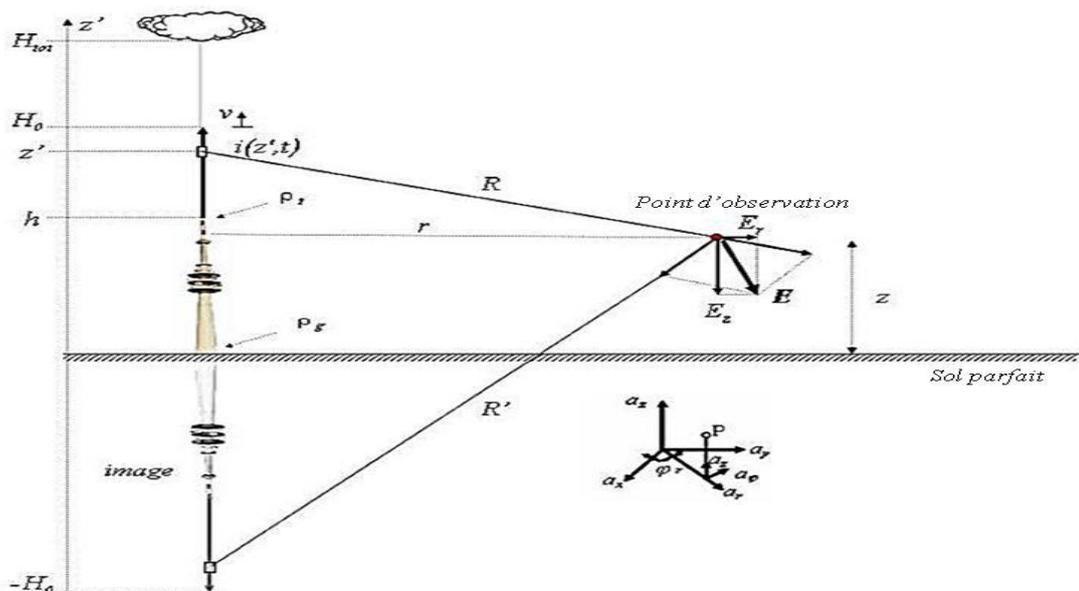


Figure III-11 Géométrie du problème pour le calcul du champ électromagnétique rayonné par la foudre en présence d'une tour (cas d'un sol parfait) [120].

La tour est alors modélisée par une ligne de transmission sans pertes et uniforme. Ce qui change en revanche, c'est l'entrée du problème de calcul du champ, à savoir, la distribution spatio-temporelle du courant le long du conducteur vertical $i_0(z', t)$, qui sera remplacée par deux

distributions de courant différentes, l'une le long du canal de la foudre et l'autre le long de la tour décrites par les modèles de Rachidi [113], ou de Baba et Rakov [115], [116].

III.7- La méthode des Différences Finies dans le Domaine Temporel (FDTD)

III.7.1- L'origine de la FDTD

Considérons la décomposition en série de Taylor d'une forme $f(x)$ développée par décalage autour d'un point x_0 [121].

$$f\left(x_0 + \frac{\delta}{2}\right) = f(x_0) + \frac{\delta}{2}f'(x_0) + \frac{1}{2!}\left(\frac{\delta}{2}\right)^2 f''(x_0) + \frac{1}{3!}\left(\frac{\delta}{2}\right)^3 f'''(x_0) + \dots \quad (\text{III.16})$$

$$f\left(x_0 - \frac{\delta}{2}\right) = f(x_0) - \frac{\delta}{2}f'(x_0) + \frac{1}{2!}\left(\frac{\delta}{2}\right)^2 f''(x_0) - \frac{1}{3!}\left(\frac{\delta}{2}\right)^3 f'''(x_0) + \dots \quad (\text{III.17})$$

Où les nombres premiers signifient la différenciation. En prenant la deuxième équation de la première.

$$f\left(x_0 + \frac{\delta}{2}\right) - f\left(x_0 - \frac{\delta}{2}\right) = \delta f'(x_0) + \frac{2}{3!}\left(\frac{\delta}{2}\right)^3 f'''(x_0) + \dots \quad (\text{III.18})$$

La division de (III.18) par δ produit :

$$\frac{f\left(x_0 + \frac{\delta}{2}\right) - f\left(x_0 - \frac{\delta}{2}\right)}{\delta} = f'(x_0) + \frac{1}{3!} \frac{\delta^2}{2^2} f'''(x_0) + \dots \quad (\text{III.19})$$

Ainsi, le premier terme à gauche est équivalent à la dérivée de la fonction au point x_0 , ainsi qu'un paramètre qui repose sur δ^2 plus un nombre infini des paramètres qui ne sont pas indiqués. Pour les notions non indiquées, celle qui suit repose sur δ^4 et toutes les notions successives reposent sur des puissances encore supérieures de δ . En la réorganisant légèrement, cette relation s'exprime généralement comme suit :

$$\left. \frac{df(x)}{dx} \right|_{x=x_0} = \frac{f\left(x_0 + \frac{\delta}{2}\right) - f\left(x_0 - \frac{\delta}{2}\right)}{\delta} + 0(\delta^2) \quad (\text{III.20})$$

Le terme « 0 » décrit toutes les expressions non spécifiées autrement, et la grandeur entre parenthèses, δ^2 , représente l'ordre le plus bas de δ parmi ces termes cachés. Si δ est assez petit, une approximation raisonnable de la dérivée peut être acquise en ignorant simplement toutes les

expressions figurées par le terme « 0 ». Une approximation de la différence centrale est donnée par :

$$\left. \frac{df(x)}{dx} \right|_{x=x_0} \approx \frac{f\left(x_0+\frac{\delta}{2}\right)-f\left(x_0-\frac{\delta}{2}\right)}{\delta} \quad (\text{III.21})$$

On note que la méthode de la différence centrale donne une estimation de la dérivée de la fonction en x_0 . La forme n'est pas vraiment échantillonnée à ce point, elle est échantillonnée aux points adjacents.

Comme la puissance la plus importante de δ négligée est d'ordre 2, on considère que la différence centrale a une précision d'ordre 2 ou un comportement d'ordre 2. Ce qui implique que si δ est diminué d'un facteur 10, l'erreur dans l'approximation devrait être diminuée d'un facteur 100. Dans le cas d'une valeur limite de δ égale à zéro, l'approximation devient exacte.

III.7.2- L'algorithme de Yee

L'algorithme FDTD présenté par Kane Yee en 1966 [122], utilise la différenciation centrale du second ordre (Figure III.12). Les étapes de l'élaboration de l'algorithme sont comme suit [121]:

1. Remplacement de toutes les dérivées de la loi d'Ampère et de la loi de Faraday par des différences finies.
2. Discrétisation spatiale et temporelle, faisant décalés les champs électriques et magnétiques dans l'espace et dans le temps.
3. Résolution de l'équation aux différences finies :

Le champ électrique à l'instant "n+1 " est calculé en fonction du champ électrique au temps "n" et la valeur du champ magnétique à l'instant « n+1/2 ». Le champ magnétique à l'instant « n+1/2 » est calculé en fonction du champ magnétique à l'instant « n-1/2 », c'est-à-dire, la valeur obtenue dans le pas temporel précédent, et la valeur du champ électrique à l'instant « n ».

4. Répétition de la dernière étape jusqu'à ce qu'à avoir le champ pour toute la durée souhaitée.

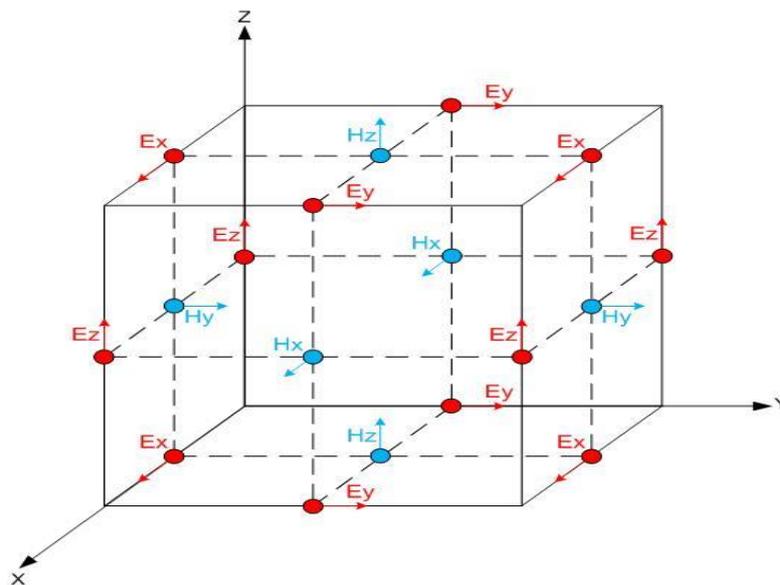


Figure III-12 La cellule de Yee en 3D et en coordonnées cartésiennes [121].

III.8- Principe de la méthode FDTD

La base théorique de la technique FDTD est facile. Afin de pouvoir traiter des problèmes électromagnétiques, les équations de Maxwell doivent être discrétisées dans le temps et l'espace avec des approches par différence centrale.

Débutons par les équations de Maxwell :

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (\text{III.22})$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (\text{III.23})$$

Les symboles utilisés dans les équations sont les suivants : E représente le champ électrique, H représente le champ magnétique. μ , σ et ε représentent, respectivement, la perméabilité magnétique, la conductivité électrique et la permittivité diélectrique du milieu étudié (air ou sol). Les figures. III. 13 - III.15 constituer respectivement la discrétisation temporelle et spatiale du domaine [111].

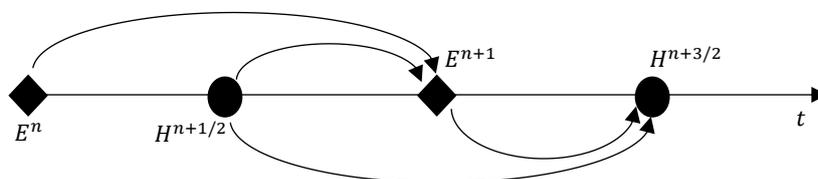


Figure III-13 Principe de la discrétisation temporelle [111]

L'équation III.22 permet d'obtenir la dérivée temporelle du champ magnétique en relation avec la dérivée spatiale du champ électrique. En revanche, l'équation III.23 permet la détermination de la dérivée temporelle du champ électrique en fonction de la dérivée spatiale du champ magnétique. Puisque, la première équation servira à faire avancer le champ magnétique dans le temps alors que la seconde servira à faire avancer le champ électrique, la démarche consiste à avancer un champ, puis l'autre, puis à répéter le mécanisme. Cette démarche est réputée sous le nom de "Leap Frog".

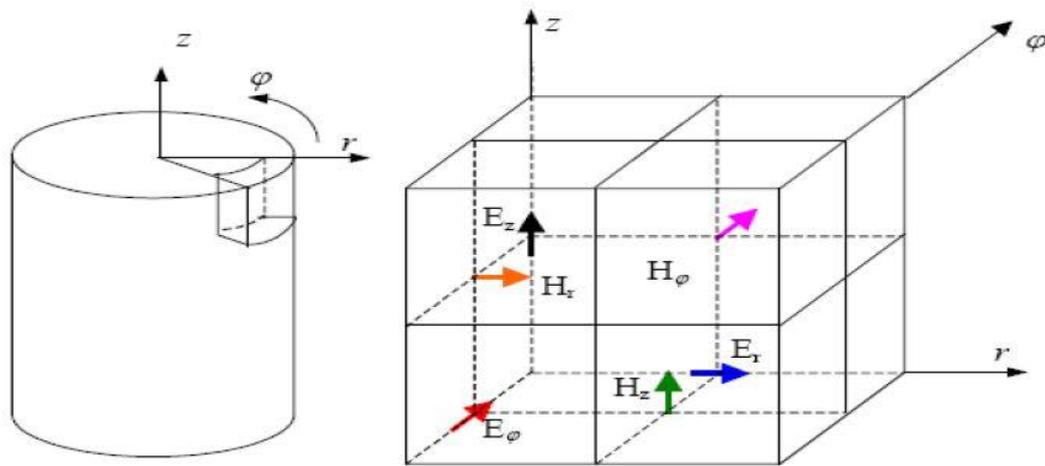


Figure III-14 Maillage spatial en coordonnées cylindriques [111].

Sur les figures III.14-III.15, on remarque un décalage d'un demi-pas dans l'espace et dans le temps entre les composantes du champ électrique E et du champ magnétique H . Ceci est dû au fait qu'on a remplacé la dérivé par la différence finie point centré.

Pour analyser le champ électromagnétique rayonné par la foudre, un cadre de calcul bidimensionnel (2D) avec un système de coordonnées cylindriques peut être employé (voir Figure. III.15 et III.16).

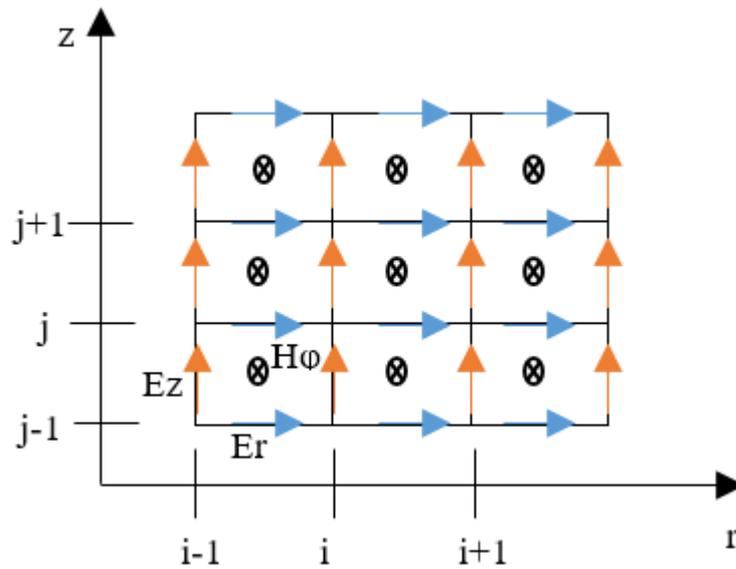


Figure III-15 Domaine de calcul en (2D) avec un système à coordonnées cylindriques [111].

Les équations (III.22) et (III.23) peuvent être écrites sous la forme :

$$\frac{\partial H_{\phi}}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial E_z}{\partial r} - \frac{\partial E_r}{\partial z} \right] \quad (\text{III.24})$$

$$\partial E_r + \varepsilon \frac{\partial E_r}{\partial t} = -\frac{\partial H_{\phi}}{\partial z} \quad (\text{III.25})$$

$$\partial E_z + \varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} = -\frac{1}{r} \frac{\partial (r H_{\phi})}{\partial r} \quad (\text{III.26})$$

Ce système d'équations peut être résolu en utilisant l'approche FDTD.

Tout d'abord, nous définissons chacun des fonctions espace-temps f déterminé en chaque point de l'espace et à chaque instant : $f(i\Delta r, j\Delta z, n\Delta t) = f^n(i, j)$

Ou Δr et Δz représentent les pas spatiaux, respectivement dans les deux directions, radiale et verticale.

Δt est le pas temporel de propagation

i, j et n sont les incréments dans l'espace et dans le temps.

Les valeurs approchées du premier ordre des équations différentielles partielles sont écrites comme suit :

$$\left. \frac{\partial f(r, z, t)}{\partial r} \right| = \frac{f^n(i+\frac{1}{2}, j) - f^n(i-\frac{1}{2}, j)}{\Delta r} \quad (\text{III.27})$$

$$\left. \frac{\partial f(r,z,t)}{\partial z} \right| = \frac{f^n(i,j+\frac{1}{2}) - f^n(i,j-\frac{1}{2})}{\Delta z} \quad (\text{III.28})$$

$$\left. \frac{\partial f(r,z,t)}{\partial t} \right| = \frac{f^{n+\frac{1}{2}}(i,j) - f^{n-\frac{1}{2}}(i,j)}{\Delta t} \quad (\text{III.29})$$

À commencer des équations aux dérivées partielles (III.24) -(III.26) et en utilisant les équations (III.27) -(III.29), nous obtenons les composantes du champ électromagnétique rayonné par la foudre :

$$E_z^{n+1}\left(i, j + \frac{1}{2}\right) = \frac{2\varepsilon - \sigma\Delta t}{2\varepsilon + \sigma\Delta t} E_z^n\left(i, j + \frac{1}{2}\right) + \frac{2\Delta t}{(2\varepsilon + \sigma\Delta t)r_i\Delta r} \begin{bmatrix} r_{i+1/2} H_\phi^{n+1/2}\left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}\right) \\ -r_{i-1/2} H_\phi^{n+1/2}\left(i - \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}\right) \end{bmatrix} \quad (\text{III.30})$$

$$E_r^{n+1}\left(i + \frac{1}{2}, j\right) = \frac{2\varepsilon - \sigma\Delta t}{2\varepsilon + \sigma\Delta t} E_r^n\left(i + \frac{1}{2}, j\right) - \frac{2\Delta t}{(2\varepsilon + \sigma\Delta t)\Delta z} \begin{bmatrix} H_\phi^{n+1/2}\left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}\right) \\ -H_\phi^{n+1/2}\left(i + \frac{1}{2}, j - \frac{1}{2}\right) \end{bmatrix} \quad (\text{III.31})$$

$$H_\phi^{n+1/2}\left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}\right) = H_\phi^{n-1/2}\left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}\right) + \frac{\Delta t}{\mu\Delta r} \left[E_z^n\left(i + 1, j + \frac{1}{2}\right) - E_z^n\left(i, j + \frac{1}{2}\right) \right] - \frac{\Delta t}{\mu\Delta z} \left[E_r^n\left(i + \frac{1}{2}, j + 1\right) - E_r^n\left(i + \frac{1}{2}, j\right) \right] \quad (\text{III.32})$$

III.9- Conditions aux limites absorbantes (ABC)

Quand les équations du champ électromagnétique sont calculées dans le temps par des approches de différences finies dans un espace non délimité (espace libre), il est nécessaire de disposer d'une méthode qui limite le domaine où le champ est étudié. Pour ce faire, on emploie les conditions absorbantes (ABC) aux limites artificielles du domaine pour simuler l'espace libre.

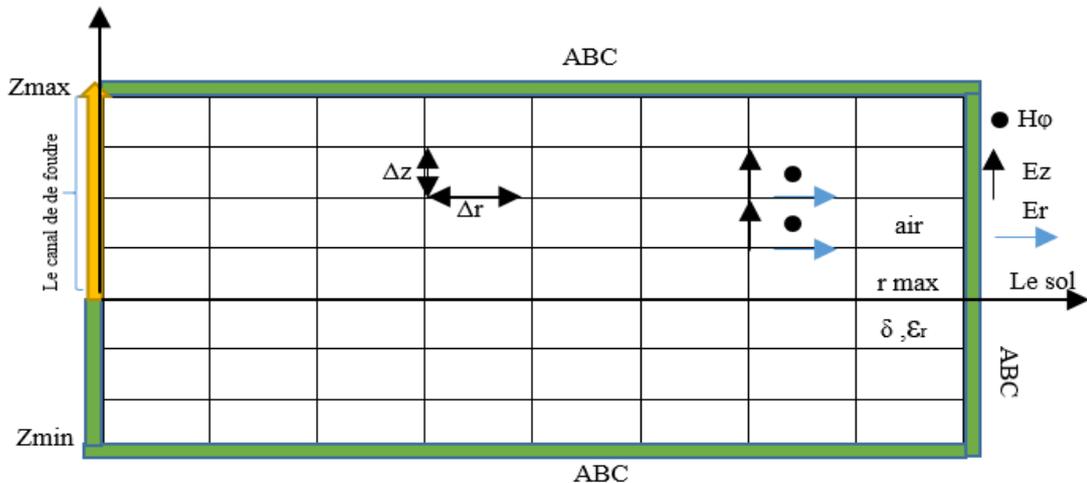


Figure III-16 Maillage FDTD-2D coordonnées cylindrique.

Dans le cadre de ce travail, les règles d'absorption du premier ordre développées par Mur [123] ont été employées. Leurs estimations par différences finies sont les suivantes :

1. Dans la direction r :

$$H_{\varphi}^{n+\frac{1}{2}}\left(i_{max} + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}\right) = \frac{2N-1v\Delta t-\Delta r}{2N+1v\Delta t+\Delta r} H_{\varphi}^{n+\frac{1}{2}}\left(i_{max} - \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}\right) - \frac{v\Delta t-\Delta r}{v\Delta t+\Delta r} H_{\varphi}^{n-\frac{1}{2}}\left(i_{max} + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}\right) + \frac{2N-1}{2N+1} H_{\varphi}^{n-\frac{1}{2}}\left(i_{max} - \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}\right) \quad (\text{III.33})$$

Ou : $i_{max} = N$

2. Dans la direction Z :

$$H_{\varphi}^{n+\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j_{max} + \frac{1}{2}\right) = H_{\varphi}^{n-\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j_{max} - \frac{1}{2}\right) + \frac{v\Delta t-\Delta z}{v\Delta t+\Delta z} \left[H_{\varphi}^{n+\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j_{max} - \frac{1}{2}\right) - H_{\varphi}^{n-\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j_{max} + \frac{1}{2}\right) \right] \quad (\text{III.34})$$

$$H_{\varphi}^{n+\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j_{min} - \frac{1}{2}\right) = H_{\varphi}^{n-\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j_{min} + \frac{1}{2}\right) + \frac{v\Delta t-\Delta z}{v\Delta t+\Delta z} \left[H_{\varphi}^{n+\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j_{min} + \frac{1}{2}\right) - H_{\varphi}^{n-\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j_{min} - \frac{1}{2}\right) \right] \quad (\text{III.35})$$

Ou : $j_{min} = 0, j_{max} = M$

v est la vitesse de propagation du champ électromagnétique dans le milieu (l'air ou le sol).

Dans le cas où le champ électromagnétique se propage dans un sol de permittivité relative ϵ_r , l'approximation haute fréquence de la vitesse est utilisée, à savoir $v = c/\sqrt{\epsilon_r}$.

v : vitesse de propagation du champ dans le sol.

Pour les systèmes de coordonnées cylindriques, le champ au point zéro dans la direction Z ($r = 0$) doit être traité séparément. Dans la zone « non-source », [124] :

$$E_z^{n+1}\left(0, j + \frac{1}{2}\right) = \frac{2\epsilon-6\Delta t}{2\epsilon+6\Delta t} E_z^n\left(0, j + \frac{1}{2}\right) + \frac{8\Delta t}{(2\epsilon+6\Delta t)\Delta r} H_{\varphi}^{n+\frac{1}{2}}\left(\frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}\right) \quad (\text{III.36})$$

Dans la région « source », selon la loi d'Ampère, l'équation de E_z s'écrit :

$$E_z^{n+1} \left(0, j + \frac{1}{2} \right) = \frac{2\varepsilon - 6\Delta t}{2\varepsilon + 6\Delta t} E_z^n \left(0, j + \frac{1}{2} \right) + \frac{8\Delta t}{(2\varepsilon + 6\Delta t)\Delta r} H_\varphi^{n+\frac{1}{2}} \left(\frac{1}{2}, j + \frac{1}{2} \right) - \frac{4\Delta t}{\pi\varepsilon_0\Delta r^2} i^{n+\frac{1}{2}} \left(0, j + \frac{1}{2} \right) \quad (\text{III.37})$$

Où : $i^{n+\frac{1}{2}} \left(0, j + \frac{1}{2} \right)$: est l'élément du courant de l'arc en retour à la hauteur Δz . ($j + 1/2$) et à l'instant Δt . ($n + 1/2$).

III.10- Les considérations requises pour la stabilité d'algorithme FDTD

L'algorithme FDTD requiert des considérations précises. La dimension de la grille devra être une fraction de longueur d'onde $(\Delta r, \Delta z) \leq \lambda_{min}/10$. Pour faire face aux instabilités numériques, l'incrément de temps doit être choisi en accord avec le critère de stabilité

$$\Delta t \leq \min(\Delta r, \Delta z) / 2c.$$

$\min(\Delta r, \Delta z)$ indique la plus petite valeur entre les deux pas Δr et Δz [124].

III.11- Application de la méthode FDTD pour le calcul du champ électromagnétique de la foudre

III.11.1- Coup de foudre tombant sur une éolienne avec un sol homogène

Pour analyser l'environnement électromagnétique de l'arc en retour initié à partir d'une éolienne, l'éolienne est considérée comme une tour Figure III.17, nous appliquerons les équations précédentes pour calculer le champ électromagnétique autour de l'éolienne en adoptant la géométrie présentée dans la Figure III.18. La distance entre les points d'observation et le canal de foudre est de 50 m. Le calcul se fait pour deux points : 10 m au-dessus du sol et 5 m en-dessous du sol.

L'éolienne mesure 151,5 m de hauteur et s'élève jusqu'à 168 m qui représente la hauteur de la tour Peissenberg dont on connaît les coefficients de réflexion au sommet et à la base de la tour $\rho_t = -0,53$ et $\rho_g = 0,7$ [118], [111]. Le calcul est développé sous environnement Matlab. Les résultats seront comparés avec ceux trouvés par Pr. Mimouni [111] sous Fortran.

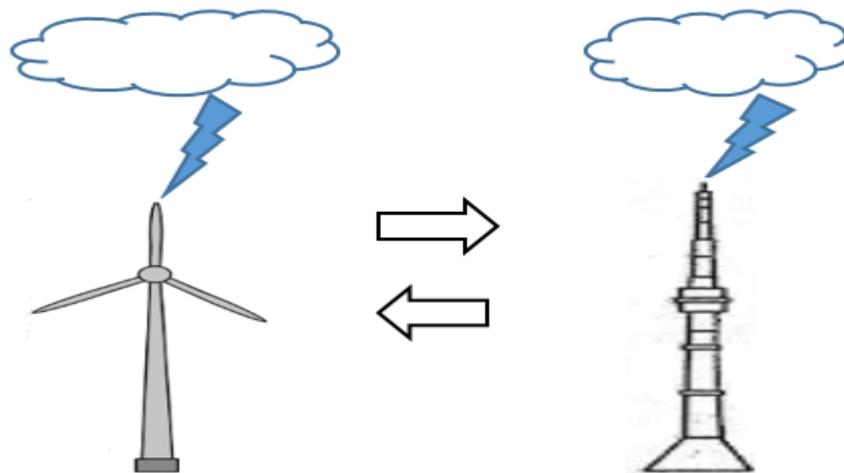


Figure III-17 : représentation de l'éolienne comme une tour

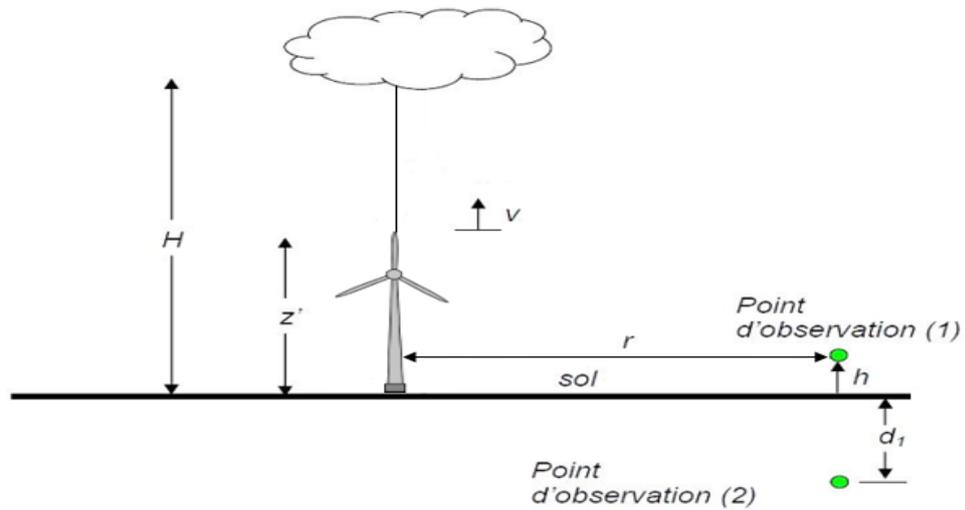


Figure III-18 Géométrie du problème.

Le courant à la base du canal est représenté par deux fonctions d'Heidler (éq. III. 7, chap. III). Les paramètres de ce courant sont fournis sur le tableau III-6.

Tableau III-6 Paramètres du courant de l'arc en retour subséquent. [112]

	$I_{01}(\text{KA})$	$\tau_{11}(\mu\text{s})$	$\tau_{21}(\mu\text{s})$	n_1	$I_{01}(\text{KA})$	$\tau_{12}(\mu\text{s})$	$\tau_{22}(\mu\text{s})$	n_2
Arc subséquent	10.7	0.25	2.5	2	6.5	2	230	2

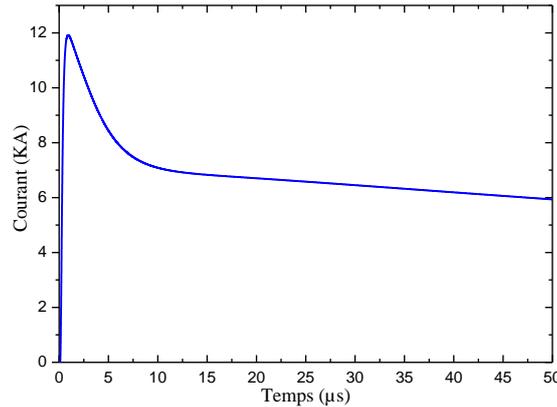


Figure III-19 Courant à la base du canal de foudre

La forme du courant à la base du canal de foudre est représentée sur la figure III.19. Ce courant a une crête de 12 kA et une pente maximale de 40 kA/μs.

Paramètres de simulation :

La hauteur du canal de foudre $H=8000\text{m}$,

La constante de décroissance du courant (modèle MTLE) $\lambda=2000\text{m}$ [110]

La vitesse de front de l'arc en retour, $v=150\text{m}/\mu\text{s}$ [125]

Les pas spatiaux selon l'axe horizontal et vertical Δr et Δz : $\Delta r = \Delta z = 1\text{m}$.

Le pas temporel $\Delta t = 1\text{ns}$,

La permittivité relative du sol $\epsilon_r=10$ [111]

La conductivité électrique du sol $\sigma=0.001\text{ s/m}$

La structure élevée considérée dans cette étude est une éolienne de 168 m de hauteur, soit la même hauteur que la tour Peisenberg en Allemagne. Les coefficients de réflexion au sommet et à la base de la structure sont respectivement, $\rho_t = -0,53$ et $\rho_g = 0,7$. On a pris les mêmes coefficients que ceux de la tour Peisenberg.

Les formules du courant de l'arc en retour $i(z, t)$ le long de la tour ($0 \leq z \leq h$) et le long du canal de foudre ($z \geq h$) développées par *Baba* et *Rakov* [115], [116] :

$$i(z', t) = \frac{1-\rho_t}{2} \sum_{n=0}^{\infty} \left[\begin{array}{l} \rho_t^n \rho_g^n i_{sc} \left(h, t - \frac{h-z'}{c} - \frac{2nh}{c} \right) + \\ \rho_g^{n+1} \rho_t^n i_{sc} \left(h, t - \frac{h+z'}{c} - \frac{2nh}{c} \right) \end{array} \right] \quad (\text{III.38})$$

Pour : $0 \leq z' \leq h$

$$i(z', t) = \frac{1-\rho_t}{2} \left[\begin{array}{l} i_{sc} \left(h, t - \frac{z'-h}{v} \right) - \rho_t i_0 \left(h, t - \frac{z'-h}{c} \right) + \\ \left[\sum_{n=0}^{\infty} \rho_g^n \rho_t^{n-1} (1 + \rho_t) i_{sc} \left(h, t - \frac{z'-h}{v} - \frac{2nh}{c} \right) \right] \end{array} \right] \quad (\text{III.39})$$

Pour : $h \leq z' \leq H$

III.11.2- Champ électromagnétique en dessous du sol

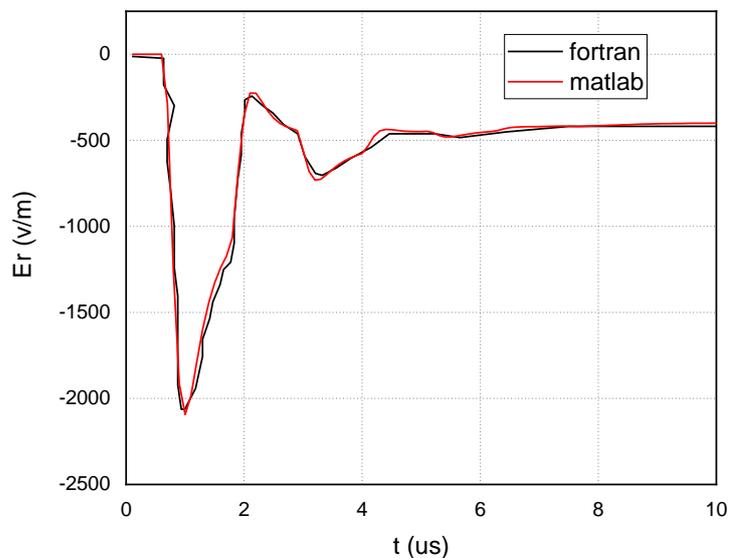


Figure III-20 Champ électrique horizontal à $r = 50\text{m}$, $dl = 5\text{m}$.

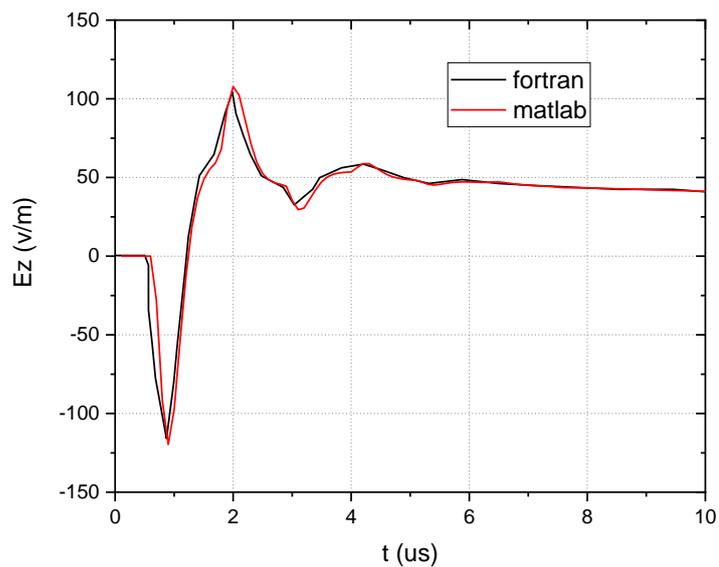


Figure III-21 Champ électrique vertical à $r = 50\text{m}$, $dl = 5\text{m}$.

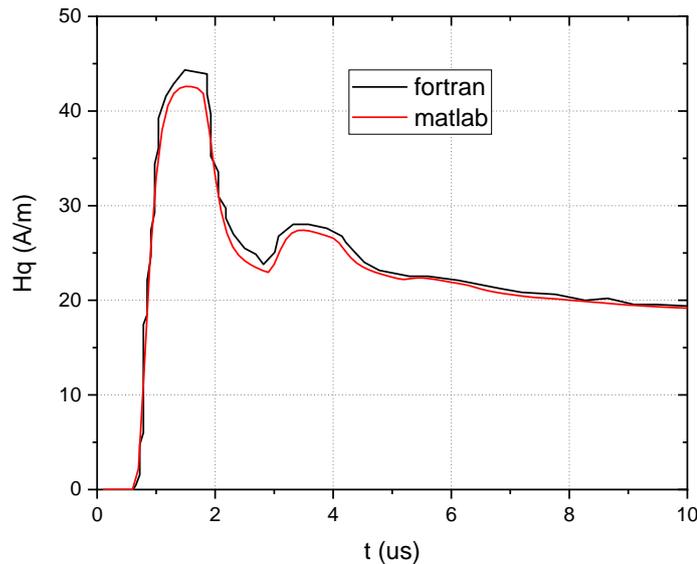


Figure III-22 Champ magnétique azimuthal à $r = 50\text{m}$, $d1 = 5\text{m}$.

Les figures III.20-III.22 illustrent respectivement les composantes, horizontale et verticale du champ électrique et le champ magnétique azimuthal pour l'arc en retour injecté au sommet de l'éolienne. Le point d'observation est localisé à 50m de l'éolienne et à une profondeur de 5m en dessous d'un sol de conductivité finie. Le calcul est effectué par deux simulations sur Matlab et sur fortran. On observe clairement sur ces figures l'effet des réflexions multiples sur les allures des trois composantes du champ électromagnétique. Les résultats obtenus par Matlab sont presque identiques à ceux trouvés par Fortran, ce qui valide notre code de calcul.

Le champ électrique horizontal (Figure III.20) est caractérisé par une polarité négative, qui est facilement influencée par la conductivité du sol. La composante verticale du champ électrique, figure III.21, est caractérisée par une polarité bipolaire et une amplitude inférieure par rapport à celle de la composante horizontale.

Sur la figure III.22, le champ magnétique est caractérisé par une polarité positive, il est aussi, influencé par la conductivité électrique du sol.

III.11.3- Champ électromagnétique au-dessus du sol

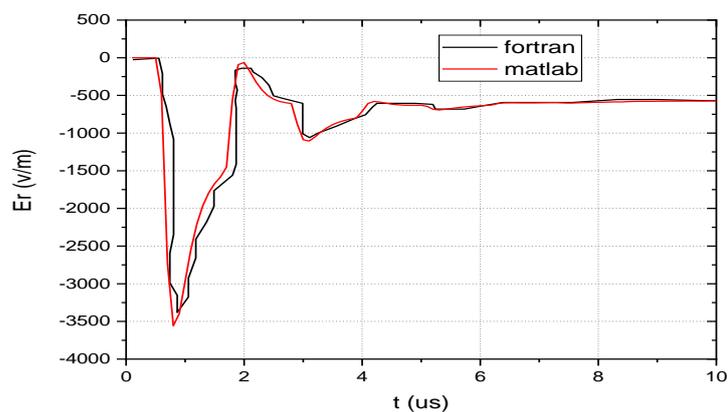


Figure III-23 Champ électrique horizontal à $r = 50\text{m}$, $h = 10\text{m}$.

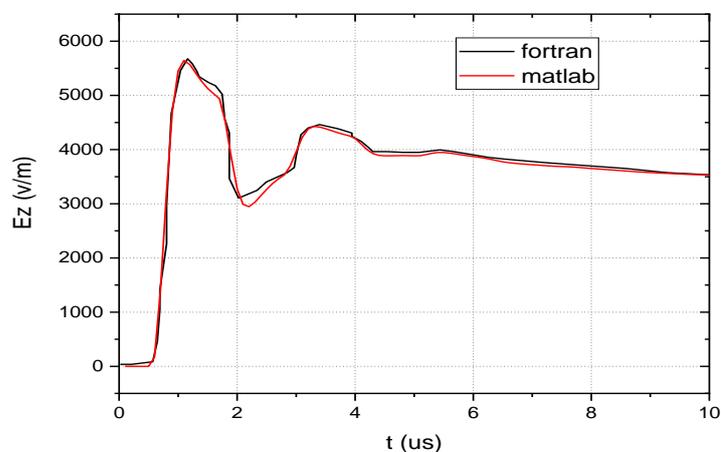


Figure III-24 Champ électrique vertical à $r = 50\text{m}$, $h = 10\text{m}$.

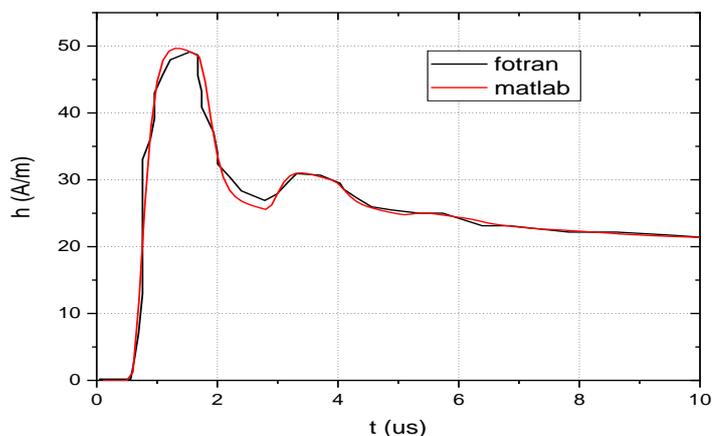


Figure III-25 Champ magnétique azimuthal à $r = 50\text{m}$, $h = 10\text{m}$.

Les figures III.23-III.25 montrent les composantes du champ électromagnétique à une hauteur de 10m du sol. De ces figures, on remarque que :

- Le champ électrique vertical est de polarité positive contrairement au cas en dessous du sol.
- Les amplitudes des composantes du champ électromagnétiques au-dessus du sol sont supérieures par rapport à celles en dessous du sol.
- Les résultats obtenus par Matlab et par Fortran sont presque identiques.

III.12- Conclusion

En conclusion, ce chapitre a fourni un aperçu approfondi et détaillé des modèles du courant de l'arc en retour, de leur extension pour inclure les objets élevés tels que les éoliennes, et la méthode utilisée pour le calcul du champ électromagnétique résultant de l'interaction foudre-éolienne.

Nous avons commencé par examiner les différents modèles du courant de l'arc en retour et comme base pour notre analyse, nous avons choisi le modèle d'ingénieur. Ensuite, nous avons étendu ce modèle pour tenir compte de la présence d'objets élevés tels que les pales des éoliennes, ce qui nous a permis d'obtenir une représentation plus précise et réaliste de l'interaction foudre-éolienne.

Enfin, nous avons exploré deux approches de calcul du champ électromagnétique résultant de cette interaction : l'une utilisant un code de calcul en Fortran et l'autre en Matlab. Ces approches ont permis de quantifier les champs électromagnétiques générés par la foudre à proximité des éoliennes, fournissant ainsi des informations cruciales pour la conception et la protection de ces infrastructures contre les effets néfastes de foudre.

En résumé, ce chapitre constitue une contribution significative à notre compréhension de l'interaction entre la foudre et les éoliennes, en fournissant des outils théoriques et pratiques pour évaluer et atténuer les risques associés à ce phénomène. Ces résultats seront essentiels pour garantir la sécurité et la fiabilité des parcs éoliens exposés à la foudre.

Chapitre IV : Etude des performances des systèmes de protection des éoliennes contre la foudre

IV.1- Introduction :

Les récepteurs installés sur les pales d'éoliennes jouent un rôle crucial dans l'efficacité des systèmes de protection contre la foudre (LSP). Ces systèmes sont essentiels pour assurer la sécurité des infrastructures éoliennes et réduire les risques de dommages causés par les éclairs. Cependant, évaluer la performance de ces systèmes nécessite une compréhension approfondie des interactions complexes entre les récepteurs, les éclairs et les conditions environnementales.

Dans ce chapitre, notre objectif principal est d'étudier en détail les performances des systèmes de protection contre la foudre installée sur les pales d'éoliennes. Nous nous concentrerons sur la prédiction de l'intensité du champ électrique statique sur les surfaces des pales, résultant d'un impact de foudre, en utilisant un modèle numérique d'éolienne développé à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics et d'une analyse par éléments finis.

Une fois notre modèle validé, nous procéderons à une évaluation approfondie du champ électrique au voisinage des récepteurs pour différentes configurations, tenant compte de facteurs tels que la taille et la forme des récepteurs, la position du canal de foudre par rapport à l'éolienne et l'angle de rotation des pales. En comparant l'intensité maximale du champ électrique prédite à proximité des récepteurs, nous pourrions évaluer l'efficacité de l'interception et identifier les facteurs clés qui influent sur la performance des systèmes de protection contre la foudre.

Cette étude revêt une importance cruciale dans le contexte de la sécurité et de la fiabilité des parcs éoliens, en fournissant des informations précieuses pour l'amélioration continue des systèmes de protection contre la foudre et la réduction des risques associés aux phénomènes météorologiques extrêmes.

IV.2- Corrélation entre la foudre et le champ électrique

Il a été démontré que la probabilité d'interception de la foudre est affectée par les champs électriques à proximité des récepteurs installés sur les pales [126].

Karegar et al., 2012 [66] ont examiné l'effet des coups de foudre sur les éoliennes, les résultats de cette analyse ont permis de prédire que le nombre et l'emplacement des récepteurs influent de manière significative sur les chances d'être frappé par la foudre. Des recherches ont été menées par Hernandez et al [127] pour déterminer pourquoi les éoliennes dotées de

récepteurs tombent en panne. Ils ont simulé le champ électrique en utilisant ANSYS APDL V12.1.

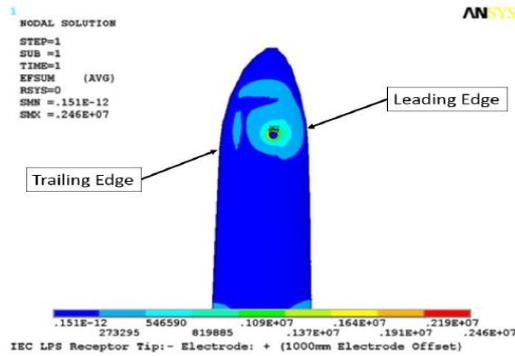


Figure IV-1 Tracé de contour du champ électrique autour du récepteur sur l'éolienne [127]

La présence d'un champ électrique concentré autour des récepteurs métalliques et de l'espace qui les entoure indique que les courants de foudre sont plus susceptibles de se former à cet endroit qu'ailleurs. Le champ électrique simulé est illustré à la Figure IV.1 [128].

En 2016, Wang [69] a utilisé le logiciel Comsol Multiphysics pour créer un modèle complexe d'une éolienne avec des récepteurs afin de simuler les effets de la forme des récepteurs sur la probabilité d'intercepter la foudre. Les résultats de simulation ont été vérifiés à l'aide de données expérimentales recueillies en 2005-2006 par naka et al [129] lors des essais sur une pale d'éolienne. Wang a employé un modèle physique de la foudre dans la modélisation Comsol. La principale conclusion est que le récepteur où le champ électrique est intense présente une grande probabilité pour attirer la foudre.

IV.3- Distance entre le leader de la foudre et l'éolienne :

Dans les recherches précédentes, des modèles trop simplifiés ont été utilisés pour modéliser l'impact des champs électriques de la foudre. Cependant, il a été constaté que les variations de géométrie avaient une influence significative sur le champ électrique, ce qui a conduit à la réalisation d'un modèle précis de la turbine de référence NREL 5 MW dans cette étude. Les effets dynamiques de la turbine ne sont pas pris en compte, mais ils devraient être intégrés dans les recherches pour des études futures. La technique de la sphère roulante de la norme IEC61400-24 est utilisée pour déterminer et estimer la distance entre le leader de la foudre et l'extrémité de la turbine [94], [90].

$$R = 0,6 \cdot I_{peak}^{1,46} \tag{IV .1}$$

Où R représente la distance entre l'éolienne et le canal de foudre (en mètres) et I_{peak} représente le courant maximal durant la propagation de la foudre.

IV.4- Conception d'un modèle d'une éolienne à l'aide de COMSOL Multiphysics

IV.4.1- Représentation des surfaces des turbines et l'air environnant

Afin de représenter les surfaces des turbines et l'air qui les entoure à l'aide du logiciel Comsol, On a choisi un domaine de $4 \times 4 \times 4 \text{ km}^3$. On pose une turbine du type NREL au milieu (figure IV.2).

Le canal de foudre, de forme cylindrique, allant de la surface du nuage (la surface horizontale qui se trouve en haut du domaine) au point le plus haut de l'éolienne est également modélisé. Comme déterminé par l'équation IV- 1, une distance est maintenue entre le traceur de foudre et l'extrémité de la turbine. Une distribution non uniforme de charges électriques dans le canal de foudre est adoptée pour décrire plus précisément la physique de la foudre et le champ électrique associé, ce qui présente l'un des points forts de l'étude de Wang, comme cela a déjà été souligné.

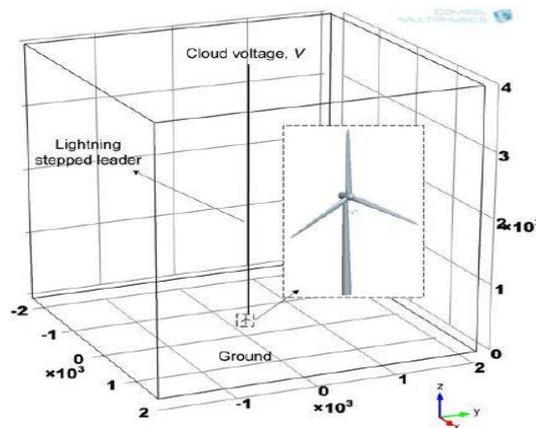


Figure IV-2 Modèle Comsol $4 \times 4 \times 4 \text{ km}^3$ avec l'éolienne et le canal de foudre [69]

IV.4.2- Modèles numériques pour le canal de foudre

Des nombreux modèles numériques ont été mis en place pour illustrer le lien entre la distribution de la charge et le courant. En 2007, un modèle plus précis de distribution de la charge de foudre a été examiné et publié par Cooray [130].

En fait, La densité de charge de foudre est en réalité affectée par les augmentations de champ au niveau du sol. En conséquence, une concentration de la densité de charge est observée lorsque le traceur de foudre se rapproche du sol. Selon Cooray [130], l'équation de la densité de charge dans le canal de foudre est la suivante :

$$\lambda_1(\eta) = a_0 \left(1 - \frac{\eta_1}{H_1 - z_0}\right) \cdot G(z_0) \cdot I_{\text{peak}} + \frac{I_{\text{peak}} \cdot (a_1 + b \cdot \eta_1)}{1 + C \cdot \eta_1 + d \cdot \eta_1^2} \cdot F(z_0), \quad (\text{IV.2})$$

Tableau IV-1 les paramètres liés à l'équation de Cooray

Les paramètres	Valeur des paramètres
η_1	$0 \leq \eta_1 \leq L = z_1 - z_0$
z_0	≥ 10
$G(z_0)$	$1 - (z_0 / H_1)$
H_1	4000m
$F(z_0)$	$0,3\alpha + 0,7\beta$
I_{peak}	30 kA
β	$1 - (z_0 / H_1)$
α	$\exp(-(z_0 - 10) / 75)$
a_0	$1,476 \cdot 10^{-5}$
a_1	$4,857 \cdot 10^{-5}$
b	$3,9097 \cdot 10^{-6}$
C	0,522
d	$3,73 \cdot 10^{-3}$

Dans le cadre de cette étude, toutes les surfaces réceptrices sont désignées en tant que surfaces de terre, y compris les surfaces de terre réelles situées en bas du modèle (c'est-à-dire la surface sur laquelle repose la tour de la turbine). Par ailleurs, les surfaces non conductrices adjacentes à des récepteurs sont attribuées par défaut à une condition aux limites ouverte, ce qui correspond adéquatement à la physique d'une surface non conductrice. Les quatre surfaces latérales du cube représentant l'air ambiant sont également affectées à cette condition aux limites. En outre, une condition aux limites du potentiel, $V_1 = 40 \text{ MV}$ est appliquée à la surface supérieure, simulant ainsi la surface d'un nuage chargé.

IV.4.3- Équations gouvernantes

Le champ électrique dû à la propagation d'un canal de foudre supposé cylindrique est donné par :

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0, \quad (\text{IV.3})$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho_v}{\varepsilon_0}, \quad (\text{IV.4})$$

$$\mathbf{E} = -\nabla\varphi \quad (\text{IV.5})$$

\mathbf{E} représente le champ électrique,

ρ_v : La densité des charges électriques, donnée par :

$$\rho_v = \lambda_1 / \pi r^2 \quad (\text{IV.6})$$

λ_1 : La densité de charge d'un canal de foudre de rayon $r = 1,5$ m. φ représente le potentiel électrique et ε_0 est la valeur de la permittivité diélectrique de l'air.

IV.5- Création du modèle 3D des turbines

Conformément aux critères publiés par le NREL [131], un modèle 3D de l'éolienne a été créé. Des modèles de référence d'éoliennes ont été prises de la littérature (comme par exemple ceux de [94]) dont le but est de valider les résultats de la simulation. La figure IV.3 montre les pales, la tour et l'ensemble du modèle requis pour créer l'éolienne. Une turbine de 5 MW du type NREL a été construite en utilisant COMSOL Multiphysics.



Figure IV-3 Modèle de référence d'une éolienne NREL de 5 MW

Cependant, comme un modèle de référence de pale d'une éolienne est déjà disponible dans Comsol, il a été utilisé dans ce travail pour faciliter la modélisation (Figure IV.4).

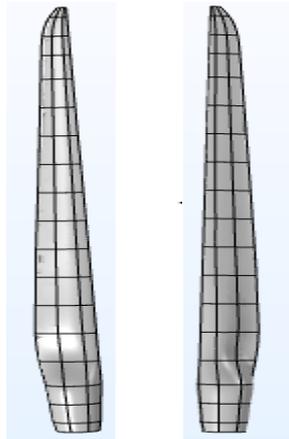


Figure IV-4 : Pale d'éolienne

Une fois la pale et la structure de support modélisées, un assemblage complet de l'éolienne est généré, comme le montre la Figure IV.5. Les spécifications de la turbine [131] mentionnent une inclinaison de 5° de la nacelle par rapport au plan vertical. Un axe a donc été créé le long de la ligne centrale de la nacelle et les trois pales de la turbine sont modélisées autour de cet axe pour obtenir la géométrie correcte. L'assemblage final de la turbine est également modélisé suivant la géométrie de référence. La modélisation est faite de telle sorte que les géométries du modèle actuel soient les mêmes que celles des modèles de référence.

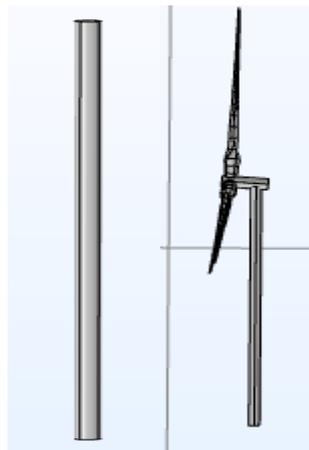


Figure IV-5 A gauche : modèle de la tour de la turbine. A Droite : Achèvement de l'assemblage de la turbine de 5 MW du NREL

Le modèle de turbine de 5 MW du NREL a été utilisé pour étudier l'effet de différents types et tailles de récepteurs sur le champ électrique engendré par la foudre [69]. Afin de valider notre modèle, les récepteurs ont été modélisés sur la turbine pour recréer l'étude réalisée par [94]. La figure IV.6 montre les différents systèmes de récepteurs modélisés sur la pale de la turbine pour effectuer la validation du modèle.

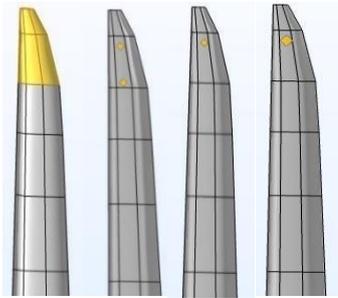


Figure IV-6 Quatre types de récepteurs installés sur la turbine 5MW du NREL

IV.6- Analyse par éléments finis FEM du logiciel Comsol Multiphysics

Dans ce travail, l'analyse FEM pour les calculs du champ électrique a été réalisée à l'aide de Comsol Multiphysics. Une étude en régime permanent a été réalisée à l'aide du module Electrostatique. La turbine est placée au milieu de la face inférieure du cube de $4 \times 4 \times 4 \text{ km}^3$. La face inférieure du cube symbolise la terre, tandis que la face supérieure sert de surface nuageuse de potentiel $40 \text{E}+06 \text{ V}$. On suppose que le canal de foudre est de forme cylindrique, de 1,5 m de rayon et de 3848,5 m de hauteur.

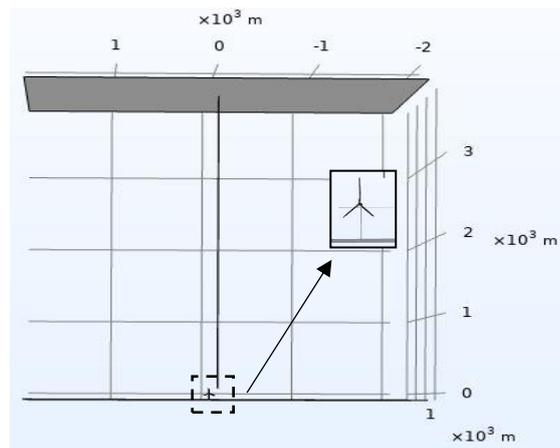


Figure IV-7 Modèle Comsol pour l'analyse FEM du champ électrique

Dans la géométrie de la turbine, la longueur d'arête la plus courte est d'environ 0,4 m, tandis que la longueur d'arête maximale dans le système est de 4000 m. La géométrie compliquée de la surface de la turbine et la grande taille des éléments géométriques utilisés nécessitent l'adoption de processus de maillage multi-échelle. Pour une grande précision, un maillage tétraédrique libre a été appliqué dans tout le domaine. Le tableau IV-2 présente les paramètres du maillage utilisés pour tout le domaine.

Tableau IV-2 Paramètres de maillage utilisés dans les domaines du modèle Comsol actuel.

Paramètres du maillage	Taille maximale de l'élément (m)	Min. Taille de l'élément (m)	Max. Taux de croissance des éléments	Résolution de courbure	Résolution des bords étroits
Domaine	250m	0.017m	1.5	0.5	0.6

La croissance maximale des éléments spécifie la manière dont les éléments du maillage s'étendent en taille. Par exemple, une valeur plus élevée de la "Résolution des bords étroits" crée un maillage plus fin dans les régions étroites du domaine de calcul.

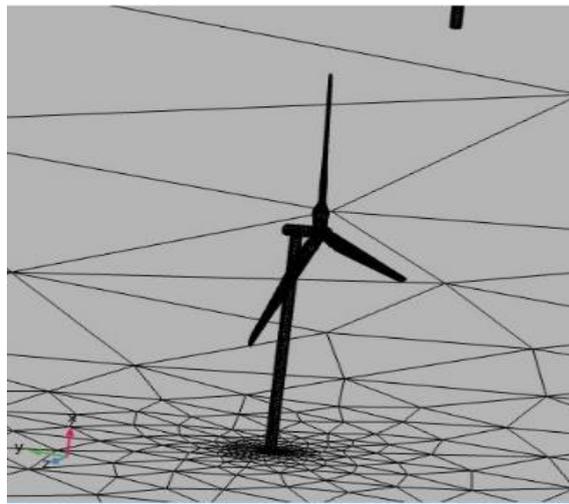


Figure IV-8 Maillage fin sur la surface de découpe de la turbine pour une grande précision

Les éléments de maillage proches de la surface de la turbine sont extrêmement fins, comme on peut le voir sur la figure IV.8, Comme les maillages développés pour notre cas d'étude sont sensiblement plus fins que ceux utilisés pour le même modèle de référence publié dans la littérature, on s'attend à une plus grande précision dans les résultats.

IV.7- Validation du modèle

Dans cette section, Quelques résultats de simulation du champ électrique sur les pales avec le logiciel Comsol seront présentés dont le but est de valider notre modèle de simulation. Le champ électrique est simulé pour différentes tailles et formes des récepteurs. Les résultats sont comparés avec ceux de la référence [94].

Wang et al. [94] ont utilisé le modèle de Cooray pour simuler le champ électrique entourant le canal de la foudre en utilisant une analyse paramétrée dans Comsol. Les mêmes éléments de géométrie décrits précédemment ont été utilisés pour simuler une éolienne de 151.5 m de hauteur. On a utilisé les mêmes paramètres de simulation donnés dans la référence [94].

IV.7.1- Récepteur rond de 0,3 m de rayon :

La Figure IV.9 Présente le champ électrique calculé autour d'un récepteur rond de diamètre 0,3 m. On note un très bon accord entre nos résultats de simulation et ceux de la référence [94]. La différence entre les valeurs du champ électrique maximal est de 7,9 %.

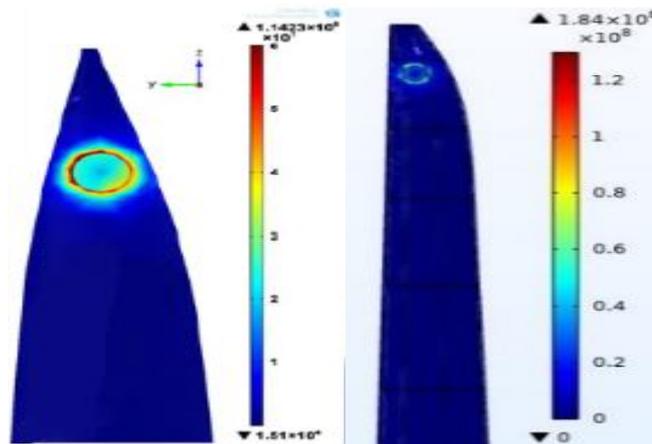


Figure IV-9 Champ électrique autour d'un récepteur rond de diamètre 0.3m A gauche – Modèle de la référence [94]; A droite – notre modèle

IV.7.2- Récepteur rond de 0,2 m de rayon :

Une comparaison similaire est effectuée entre notre modèle et le modèle de référence [94] pour une pale d'éolienne avec un récepteur rond de 0,2 m de rayon. Contrairement au modèle de récepteur de 0,3 m, il existe une grande différence entre les valeurs max de champ électrique des deux modèles. Le récepteur de 0,2 m étant un élément de surface plus petit, on suppose qu'il subit davantage de variations géométriques lors de l'importation des maillages et qu'il présente donc davantage de divergences de maillage dans Comsol. La figure IV.10 montre une comparaison entre les deux modèles. On constate que les déformations de la forme du récepteur affectent les résultats du champ électrique. C'est la principale raison supposée affecter le champ électrique, d'où la plus grande différence dans les valeurs du champ électrique maximal.

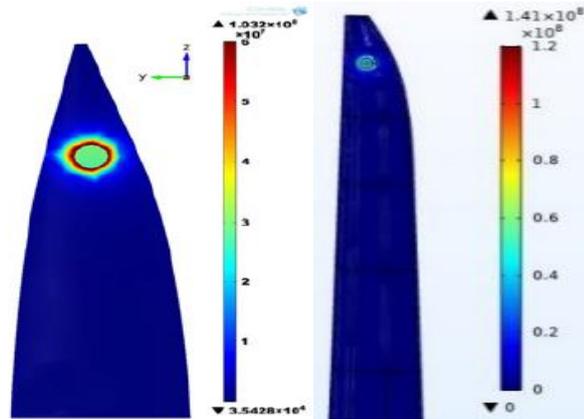


Figure IV-10 Champ électrique autour d'un récepteur rond de diamètre 0.2m : A gauche – Modèle de la référence [94]; A droite – notre modèle

IV.7.3- Conducteur en forme de pointe :

La figure IV.11 compare la distribution du champ électrique pour les deux modèles : le modèle de la référence [94] et le modèle développé, dans le cas d'une pale d'éolienne munie d'un récepteur en forme de pointe, révélant que le champ électrique maximal dans le modèle actuel est plus élevé que celui du modèle de référence. Comme le montre la figure, une concentration de champ électrique est observée sur les bords entre le conducteur et le matériau non-conducteur, agissant comme un point d'attraction de la foudre. La couche supérieure du matériau est une surface conductrice, qui est connectée au conducteur de mise à la terre.

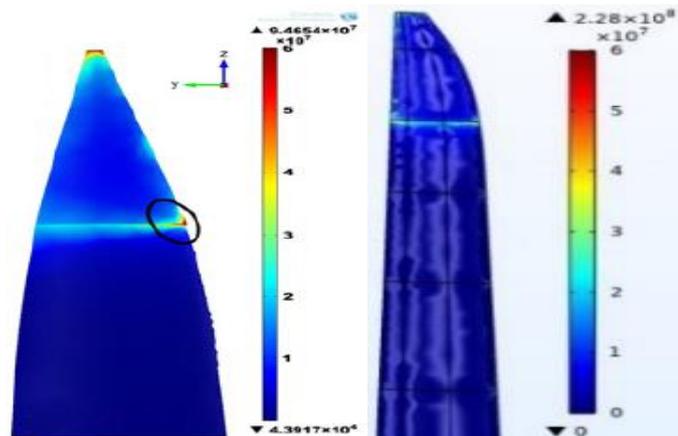


Figure IV-11 Champ électrique pour un récepteur en forme de pointe : A gauche - Modèle de référence [94] ; A droite – notre modèle

IV.7.4- Deux récepteurs ronds de 0,2 m de rayon :

La Figure IV.12 Présente le champ électrique calculé autour de deux récepteurs ronds de diamètre 0,2 m. On note un très bon accord entre nos résultats de simulation et ceux de la référence [94]. La différence entre les valeurs du champ électrique maximal est de 15 %.

Numériquement, avec l'augmentation du nombre de récepteurs, la surface de la pale subit davantage de variations géométriques lors de l'importation des maillages et par conséquent davantage de divergences de maillage dans Comsol. C'est la principale raison supposée affecter le champ électrique.

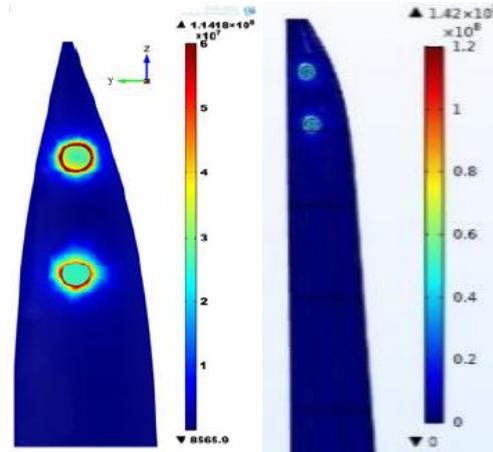


Figure IV-12 Champ électrique pour deux récepteurs ronds de 0.2 m de diamètre : A gauche – Modèle de la référence [94]; A droite – notre modèle

IV.8- Etude des performances des systèmes de protection des éoliennes contre la foudre :

IV.8.1- Effet de la taille et de la forme des récepteurs sur les performances des LPS :

Pour reproduire, le plus fidèlement, un champ électrique exact, l'éolienne de référence de 5 MW du National Renewable Energy Laboratory NREL [131] est utilisée pour construire le modèle de l'éolienne pour les essais d'impact de la foudre, comme mentionné dans plusieurs travaux (voir, par exemple, [132], [133]). L'utilisation d'une forme de pale à l'échelle réelle permet d'obtenir un champ électrique engendré par la foudre plus fiable que l'utilisation de modèles de pales simples [134], Dans ce travail, la taille des pales est de 61,5 m, le rayon du moyeu est de 1,5 m et la hauteur du moyeu est de 90 m. De cette façon, le point le plus haut est à 151,5 m de l'extrémité de l'éolienne avec une seule pale en position verticale.

Pour étudier l'influence des récepteurs, huit configurations différentes de récepteurs (figure IV.13) sont appliquées aux pales de l'éolienne. Ces configurations sont adoptées de la référence [132].

Les configurations 1 à 4 et 6 à 8 concernent différentes formes (forme de pointe supérieure, plaque et disque rond) et différentes tailles (rayon/longueur) des récepteurs situés à l'extrémité de la pale, comme le montre le tableau IV.3 et la figure IV.13. Dans la configuration 5, les récepteurs sont constitués de deux lignes conductrices. Le tableau IV.3 montre également la distance des récepteurs par rapport à l'extrémité supérieure et l'un par rapport à l'autre. Tous les récepteurs des configurations 1 à 8 sont fixés sur le même conducteur descendant à l'intérieur des lames.

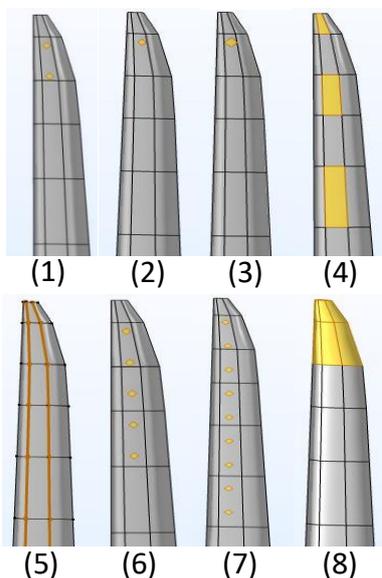


Figure IV-13 les différentes formes et tailles des récepteurs utilisées dans la simulation numérique

Tableau IV-3 HUIT CONFIGURATIONS DE RÉCEPTEURS

Configurations	Caractéristiques du récepteur
Configuration 1	Récepteur en forme de double petit disque de rayon 0,2 m, la distance entre l'extrémité supérieure de la pale et le premier récepteur est de 1,92 m, et entre les deux récepteurs 1,92 m.
Configuration 2	Récepteur en forme de petit disque de rayon 0.2 m, la distance de l'extrémité est de 1,92 m.
Configuration 3	Récepteur en forme de grand disque de rayon 0.3 m, la distance de l'extrémité est de 1,92 m.
Configuration 4	Le récepteur en forme de plaques séparées de 1,92 m les unes par rapport aux autres.
Configuration 5	Récepteurs à deux lignes conductrices.
Configuration 6	5 petits récepteurs en forme de disque de rayons 0,2 m, la distance entre l'extrémité et le premier récepteur est de 1,92 m, et entre deux récepteurs : 1,92 m.
Configuration 7	9 petits récepteurs en forme de disque, rayons de 0,2 m, la distance entre l'extrémité et le premier récepteur 1,92 m, et entre deux récepteurs 1,92 m.
Configuration 8	Récepteur sous forme de pointe à l'extrémité de la pale, d'une longueur de 4 m.

Le programme d'analyse par éléments finis (FEA) de COMSOL Multiphysics est utilisé pour calculer les principales équations (IV.3) à (IV.5). La zone de conception a été définie comme étant de 4000 m de long, 4000 m de largeur et 4000 m de hauteur, en utilisant un modèle d'éolienne comme indiqué sur la figure IV.14. Le canal de foudre est positionné au centre de la zone, à 151,5 m du sol. Nous calculons la distance entre le canal de foudre et la section transversale de l'éolienne en utilisant l'équation (IV.1).

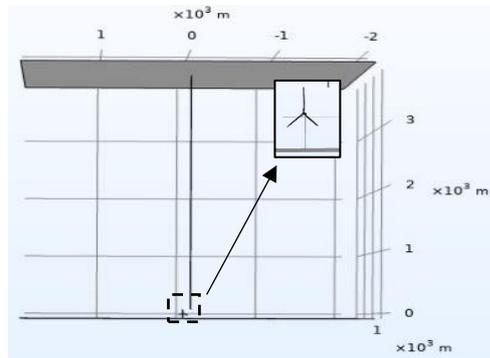


Figure IV-14 Configuration du problème dans COMSOL Multiphysics.

IV.8.1.1- Dimension du maillage utilisé dans la simulation

Les valeurs du champ électrique dépendent de la taille maximale des mailles. La figure IV.15 présente des comparaisons de la distribution attendue de l'intensité du champ électrique dans la zone de l'extrémité de la pale (configuration 2 de la figure IV.13) avec la dimension la plus élevée des éléments du maillage égale à 550 m (figure IV.15 (a)), 450 m (figure IV.15 (b)), 350 m (figure IV.15 (c)) et 250 m pour la configuration(d) de la figure IV.15. Comme le montre la figure, si on compare les amplitudes du champ électrique pour les quatre configurations, on peut choisir un maillage dont la dimension la plus élevée de ses éléments doit être inférieure à 350 m. Pour plus de précision dans nos résultats, on a opté pour une taille maximale des éléments égale ou inférieure à 250 m.

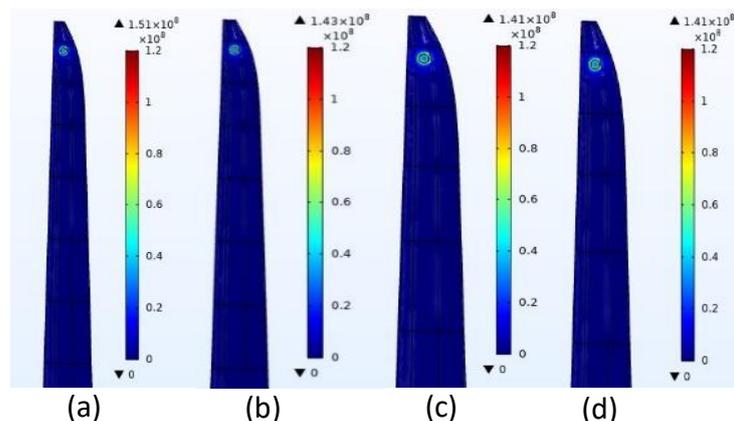


Figure IV-15 Impact des dimensions maximales des mailles sur les distributions attendues de l'intensité du champ électrique dans les régions de la pointe

IV.8.1.2- RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Cette partie de la thèse fournit les résultats de l'intensité du champ électrique prédit sur les surfaces de la pale en utilisant huit configurations de récepteurs. Il convient de noter que seuls les résultats obtenus pour une pale verticale feront l'objet d'une discussion dans cette section, étant donné que l'intensité du champ électrique est significativement plus élevée par rapport à celles des deux autres pales.

La figure IV.16 montre les distributions de l'intensité du champ électrique prédit sur la pale pour les huit cas de figure illustrés sur le tableau IV.3. On peut observer que l'intensité du champ électrique sur la surface de la pale, pour la configuration 8, est la plus élevée comparée aux autres cas, en particulier dans la zone de l'extrémité, qui se situe entre l'extrémité du récepteur et la limite de la pale restante sur le bord de fuite. Ce résultat correspond à ce qui a été constaté expérimentalement dans les références [135], [136] sur des modèles réels de sous-lames de 3 m avec un récepteur à l'extrémité de la lame sous forme de pointe.

Pour les autres configurations présentées dans la figure IV.16, il est clair que les intensités du champ électrique les plus élevées ne se situent pas sur les surfaces des récepteurs, mais plutôt sur les bords extérieurs adjacents à leurs circonférences. Cette observation a été confirmée par des tests expérimentaux ([137], [135], [138], [139]). L'intensité du champ électrique estimée pour les différentes configurations de récepteurs est résumée dans le tableau IV.4.

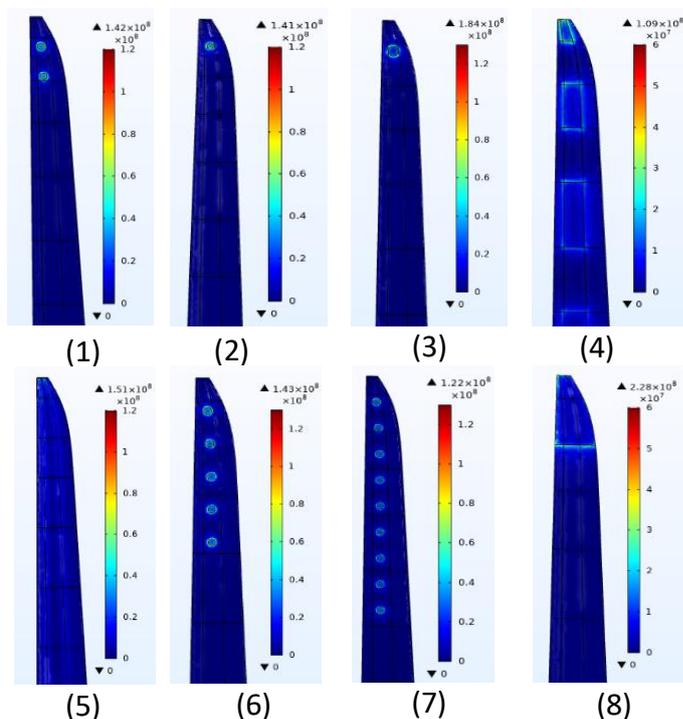


Figure IV-16 Distribution de l'intensité du champ électrique sur la pale pour différentes formes et tailles des récepteurs.

Tableau IV-4 INTENSITÉ MAXIMALE PREDITE DU CHAMP ÉLECTRIQUE

0°	Conf.(1)	Conf.(2)	Conf. (3)	Conf. (4)	Conf. (5)	Conf.(6)	Conf.(7)	Conf.(8)
*10 ⁸ v/m	1,42	1,41	1,84	1,1	1,51	1,43	1,22	2,28

Comme il a été signalé précédemment, l'intensité du champ électrique la plus élevée se trouve dans la configuration 8 (tableau IV.4), représentant une lame avec un récepteur sous forme de pointe (configuration 8). L'intensité du champ la plus faible est repérée pour le cas d'une lame avec des récepteurs sous forme de plaques (configuration 4). Le champ électrique dans le cas d'un récepteur sous forme d'un grand disque (configuration 3) est plus élevé à celui des récepteurs sous forme de petits disques (configurations 1, 2, 6, 7). En outre, pour le récepteur à deux lignes conductrices (configuration 5), l'intensité maximale du champ est inférieure à celle pour le cas des grands récepteurs à disque, mais supérieure à celle des autres récepteurs à disque.

Si l'on considère que l'efficacité de l'interception est directement proportionnelle à l'intensité maximale du champ électrique sur la lame, on constate que les récepteurs en forme de pointe offrent une meilleure efficacité d'interception que les récepteurs en d'autre forme. En outre, il convient de noter que l'intensité maximale du champ sur la lame avec un grand récepteur à disque dépasse celle avec un petit récepteur à disque, ce qui indique que l'augmentation de la taille du récepteur à disque améliore les performances d'interception. L'utilisation d'un plus grand nombre de petits disques offre des possibilités supplémentaires d'intercepter le coup de foudre, mais ne permet pas d'obtenir l'intensité du champ électrique la plus élevée sur la pale.

Pour une étude plus approfondie, nous avons simulé une libération de 20 lignes de champ électrique depuis le canal de foudre jusqu'à la surface de la pale, comme indiqué sur la figure IV.17.

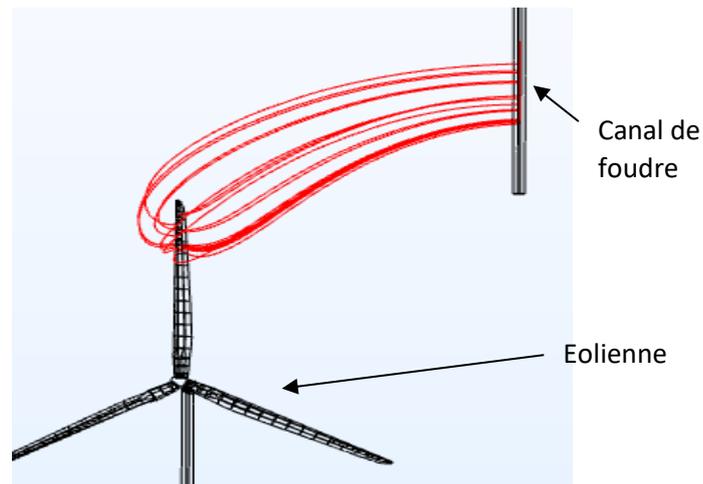


Figure IV-17 Lignes du champ électrique

La figure IV-18 présente les lignes du champ électrique attendues dans la région située à 18 m de l'extrémité de la pale pour huit configurations différentes du récepteur.

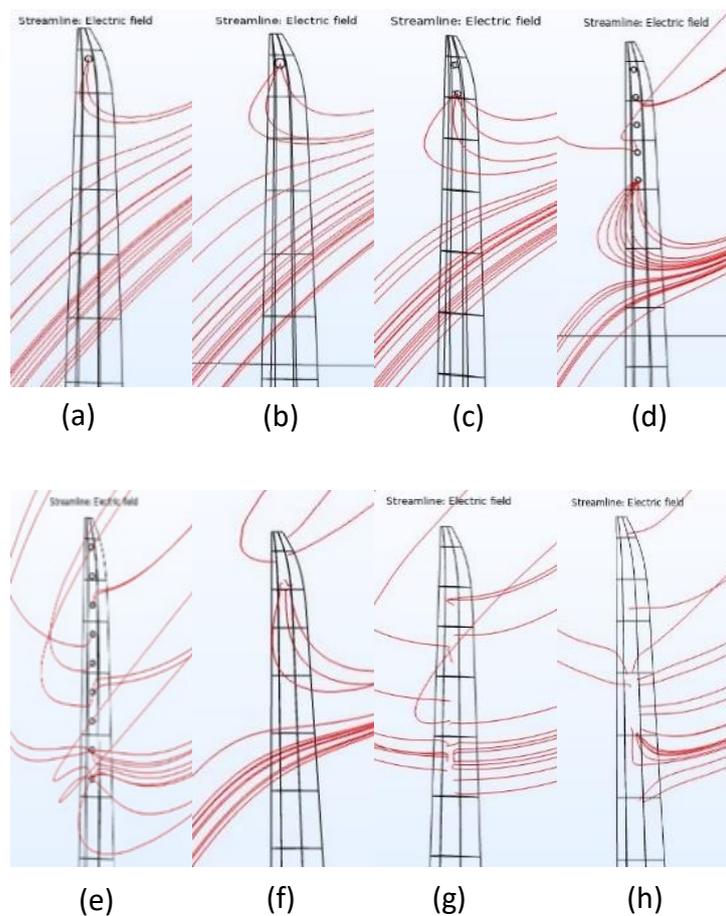


Figure IV-18 Lignes du champ électrique sur la pale de l'éolienne pour diverses configurations du récepteur : (a) récepteur en forme de petit disque ; (b) récepteur en forme de grand disque ; (c) récepteur double en forme de petit disque ; (d) 5 récepteurs en forme de petits disques ; (e) neuf récepteurs en forme de petits disques ; (f) récepteur en forme de pointe (g) récepteurs en forme de plaques ; (h) récepteur en forme de deux lignes

Le tableau IV.5 résume les observations constatées sur la figure IV.18. Pour chaque configuration, on compte le nombre de lignes de champ interceptées par le (s) récepteur (s) sur le nombre total des lignes.

Tableau IV-5 Nombre de lignes interceptées par les récepteurs

Configuration	Nombre de lignes du champ électrique interceptées par rapport au nombre total des lignes
(a) récepteur en forme de petit disque	2/20
(b) récepteur en forme de grand disque	3/20
(c) récepteur double en forme de petit disque	4/20
(d) 5 récepteurs en forme de petits disques	12/20
(e) 9 récepteurs en forme de petits disques	20/20
(f) récepteur en forme de pointe	6/20
(g) récepteurs en forme de plaques	20/20
(h) récepteur en forme de deux lignes	20/20

On peut déduire que les récepteurs en forme de grand disque offrent une interception efficace plus élevée que les récepteurs en forme de petit disque. L'augmentation du nombre de disques augmente l'interception de la foudre. Les récepteurs en forme de pointe offrent une meilleure interception par rapport aux récepteurs en forme de disque mais n'interceptent pas toutes les lignes du champ malgré qu'ils présentent une intensité maximale du champ électrique. En outre, on constate que le récepteur à deux lignes, le récepteur à plaques et les neuf récepteurs à petits disques offrent une meilleure efficacité d'interception que les autres récepteurs.

IV.8.2- Impact du changement de la position du canal de foudre sur les performances des systèmes de protection « LPS » :

Pour étudier l'impact du changement de la position du canal de foudre sur la performance des récepteurs, trois combinaisons différentes de récepteurs (figure IV.19) sont appliquées aux pales d'une éolienne (voir, par exemple, [140], [132]). Les configurations utilisées correspondent à des récepteurs de différentes formes comme indiqué dans le tableau IV.6. Le choix de ces configurations est justifié par le fait que les récepteurs sous forme de disques sont largement utilisés sur les pales des éoliennes surtout sur les pales de plus de 20 m de longueur [90].

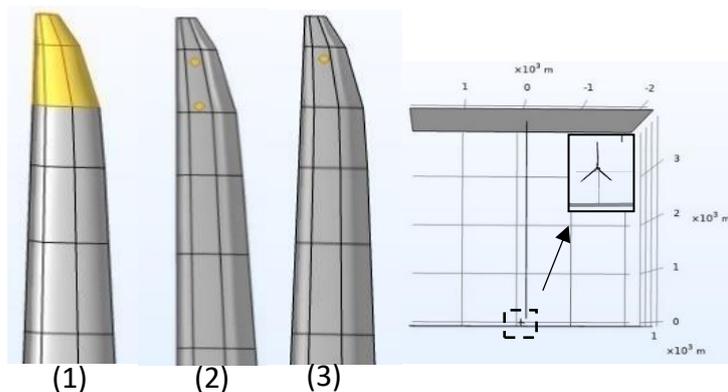
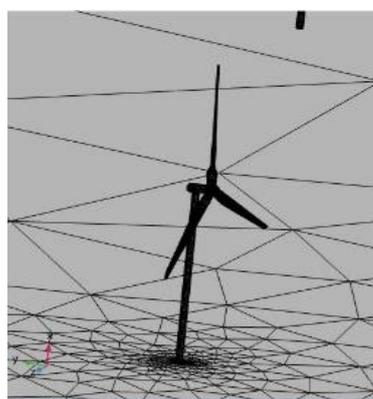


Figure IV-19 trois types de récepteurs utilisés dans l'étude

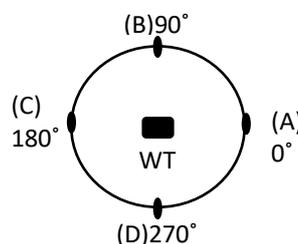
Tableau IV-6 TROIS CONFIGURATIONS DIFFÉRENTES DE RÉCEPTEURS

Configurations	Caractéristiques des récepteurs
Configuration 1	Récepteur sous forme de pointe, d'une longueur de 4 m (extension de l'embout)
Configuration 2	Récepteur formé de deux petits disques de rayon 0,2 m
Configuration 3	Récepteur sous forme de petit disque de rayon 0,2 m

Le logiciel FEA COMSOL Multiphysics est utilisé pour résoudre le problème. Comme le montre la figure IV-20, le domaine de calcul est de $4000 \text{ m} \times 4000 \text{ m} \times 4000 \text{ m}$ en utilisant une découpe de la conception de l'éolienne proposée. L'équation IV.1 détermine la portée de la foudre jusqu'à l'éolienne. Nous avons choisi quatre emplacements de la foudre en tenant compte de la position de l'éolienne, comme l'indique la figure IV.20.



(a) Maillage du domaine de calcul



(b) Positions du canal de foudre Par rapport à l'éolienne

Figure IV-20 Géométrie du Problème

IV.8.2.1- RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Cette partie est consacrée à la présentation des intensités du champ électrique à la surface des pales en utilisant les trois configurations de récepteurs (tableau IV.6). Il est important de noter que seuls les résultats concernant la partie supérieure de la lame verticale sont examinés.

Les figures IV.21, V.22 et V.23 montrent que l'intensité du champ électrique est la plus forte dans la région supérieure de la pale, ce qui peut être déterminé en traçant les distributions de l'intensité du champ électrique pour chaque configuration choisie de récepteurs et pour différentes positions du canal de foudre.

Le tableau IV-7 résume les résultats des intensités maximales du champ électrique pour les configurations illustrées sur les figures IV.21, V.22 et V.23. On constate que pour chacune des trois configurations, l'intensité maximale du champ électrique varie en fonction de la position du canal de foudre par rapport à l'éolienne.

Pour la même position du canal de foudre, le récepteur sous forme de pointe attire mieux l'éclair de foudre que les récepteurs disques simple ou double, comme il a été montré précédemment. On remarque aussi qu'il n'y a pas une seule position privilégiée du canal de foudre pour laquelle l'intensité du champ est maximale pour les configurations choisies de récepteurs, autrement dit, pour chaque cas de récepteurs, le champ électrique est maximal pour une position du canal de foudre différente à celle des autres cas.

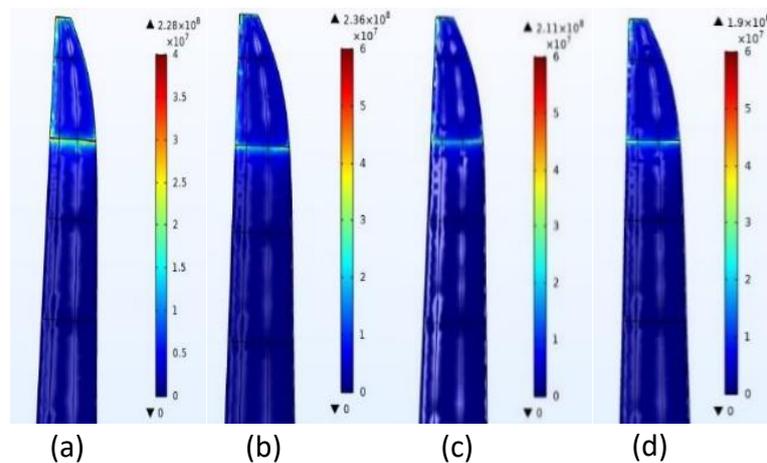


Figure IV-21 Distributions de l'intensité du champ électrique dans la région de la pointe (configuration 1) pour différentes positions du canal de foudre : (a) position A ; (b) position B, (c) position C, (d) position D

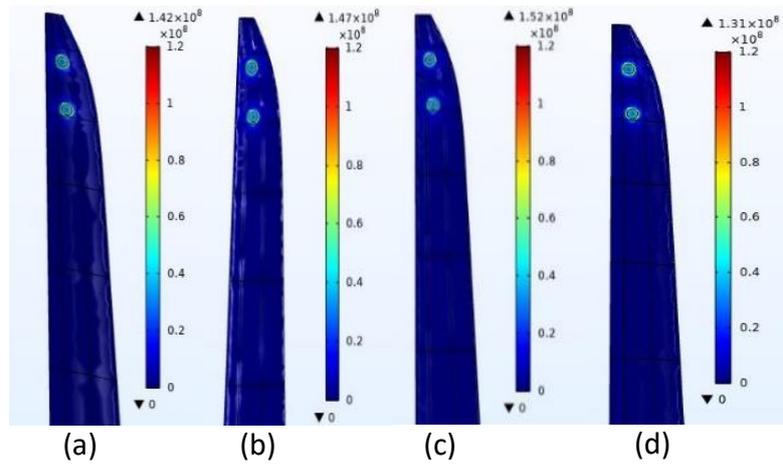


Figure IV-22 Distributions de l'intensité du champ électrique sur la lame avec deux récepteurs sous forme de petits disques (configuration 2) pour différentes positions du canal de foudre: (a) position A ; (b) position B, (c) position C, (d) position D

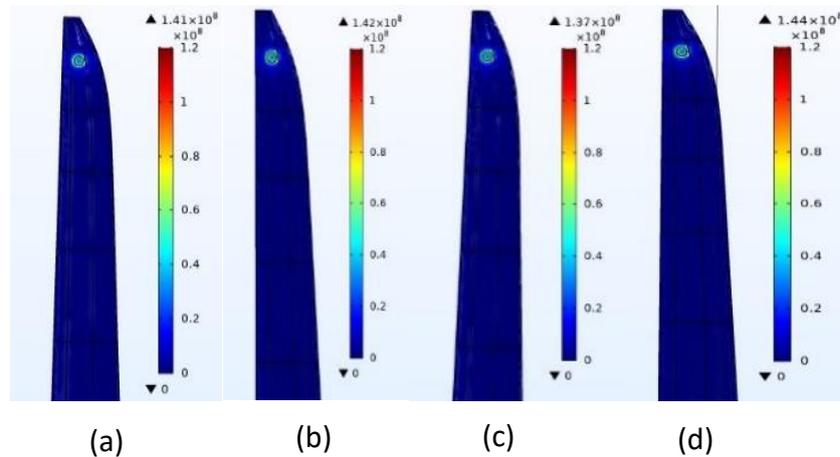


Figure IV-23 Distributions de l'intensité du champ électrique sur la lame avec un récepteur sous forme de petit disque (configuration 3) pour différentes positions du canal de foudre : (a) position A ; (b) position B, (c) position C, (d) position D

Tableau IV-7 INTENSITÉ MAXIMALE DU CHAMP ÉLECTRIQUE

10^8 V/m	A	B	C	D
(1) récepteur sous forme de pointe	2.28	2.36	2.11	1.9
(2) récepteur sous forme de double petits disques	1.42	1.47	1.52	1.31
(3) récepteur sous forme de petit disque	1,41	1,42	1,37	1,44

Pour bien comprendre ces variations, l'intensité du champ électrique sur la pale d'une éolienne pour les trois configurations a été simulée. Les figures suivantes illustrent les variations du champ électrique en fonction de la position sur la pale.

Les figures montrent que l'intensité du champ électrique aux extrémités des récepteurs est supérieure de plus de deux ordres de grandeur à celle du reste de la lame lorsque les récepteurs sont installés.

La figure IV.24 montre que l'intensité du champ électrique sur le bord de fuite pour la première configuration de récepteurs et pour les différentes positions du canal de foudre est presque identique, à l'exception d'une valeur de pointe différente à 57,52 m de la base de la pale. Le pic de champ électrique le plus élevé, de l'ordre de 223,02 MV/m, se trouve en position A du canal de foudre.

La figure IV.25 présente l'intensité champ électrique à travers le bord de fuite pour les configurations de pales équipées de récepteurs Dual petite disc. La figure démontre que ces quatre courbes identiques se superposent, montrant deux pics à 57,90 m et 60,11 m du pied de la pale. Le champ électrique maximal en position A atteint 3,47 MV/m. De même, la figure IV.26 illustre l'intensité du champ électrique sur le bord de fuite avec des récepteurs en forme de petit disque. La figure révèle quatre courbes identiques superposées, avec un pic à 60 m de la base. Le pic le plus élevé du champ électrique se situe en position A, atteignant 3,91 MV/m.

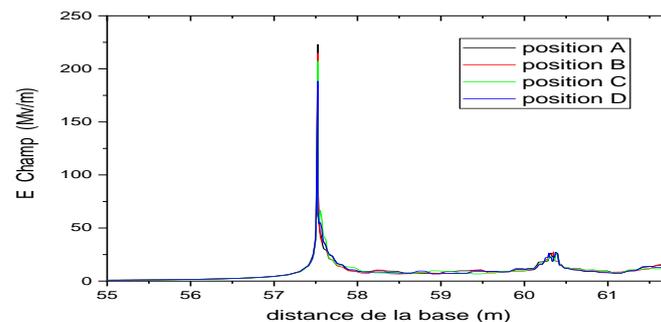


Figure IV-24 Comparaison du champ électrique attendu le long du bord de fuite pour différentes positions du canal de foudre. (Cas de la configuration 1)

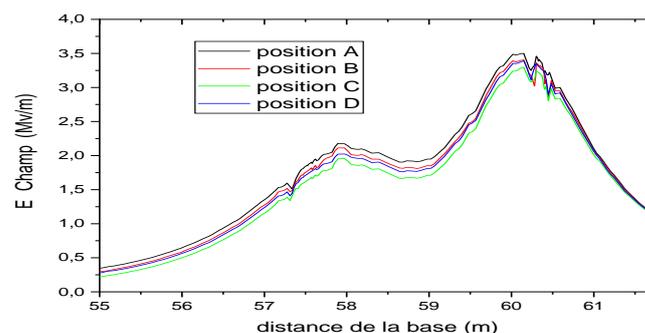


Figure IV-25 Comparaison de l'intensité du champ électrique le long du bord de fuite pour différentes positions du canal de foudre. (Configuration 2)

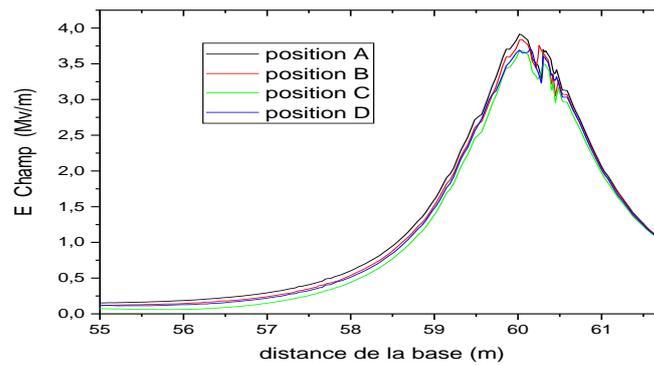


Figure IV-26 Comparaison du champ électrique attendu le long du bord de fuite pour différentes positions du canal de foudre. (Configuration 3)

La figure IV.27 illustre l'intensité du champ électrique au bord d'attaque pour différentes positions avec la configuration 1, qui reste pratiquement identique à l'exception de deux pics distincts, l'un à 57,42 mètres et l'autre à 61,5 mètres de la base de la pale. L'intensité du champ électrique la plus élevée se trouve en position A avec 108,05 MV/m au premier pic.

Dans la figure IV.28, l'intensité du champ électrique au bord d'attaque avec des récepteurs à double petit disque. La figure montre que les quatre courbes sont identiques mais présentent deux pics, l'un à 57,60 mètres de la base de la pale et l'autre à 59,61 mètres de la base. L'intensité du champ électrique la plus élevée est de 6,52 MV/m en position C.

Enfin, la figure IV.29 montre le champ électrique au bord d'attaque avec des récepteurs à petit disque. La figure indique que les courbes pour les quatre positions du canal de foudre sont identiques mais présentent un pic dans le bord d'attaque à 59,61 mètres de la base. L'intensité de champ électrique la plus élevée était de 5,9 MV/m en position B.

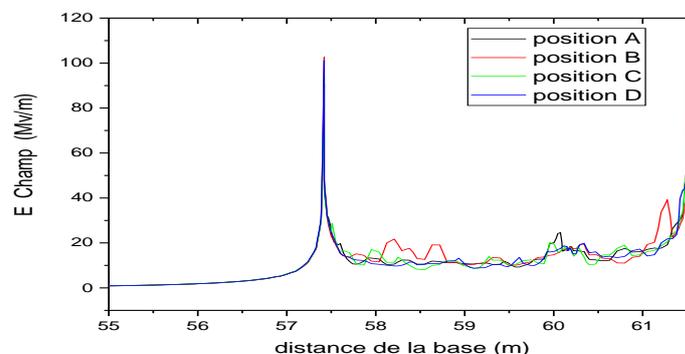


Figure IV-27 Comparaison du champ électrique le long du bord d'attaque pour différentes positions du canal de foudre. (Configuration 1)

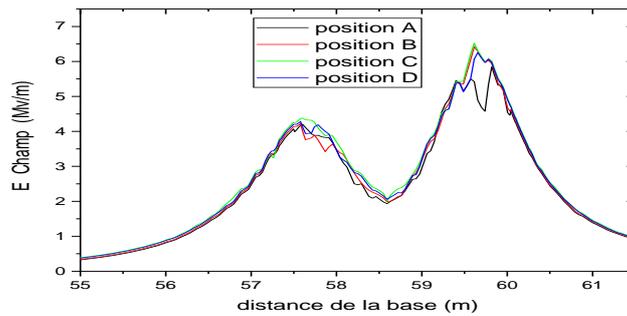


Figure IV-28 Comparaison du champ électrique attendu le long du bord d'attaque pour différentes positions du canal de foudre. (Configuration 2)

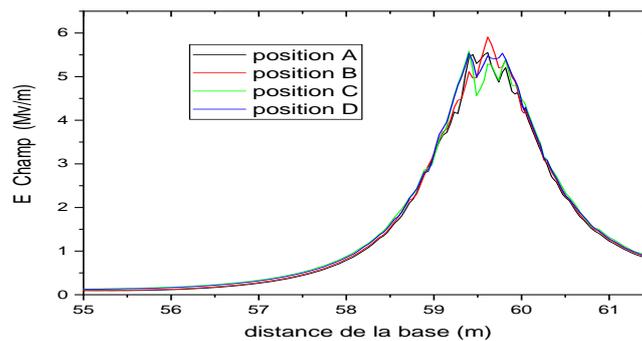


Figure IV-29 Comparaison du champ électrique attendu le long du bord d'attaque pour différentes positions du canal de foudre (Configuration 3)

Nos résultats indiquent que le récepteur sous forme de pointe est nettement plus performant dans les interceptions de foudre que le récepteur à disque pour les différentes positions du canal de foudre. Cela s'explique par le fait que le bord d'attaque et de fuite des pales utilisant des récepteurs à disque sont toujours non conducteurs. La direction d'approche d'un traceur de foudre descendant est un facteur crucial pour la performance du système de protection contre la foudre pour les éoliennes. En général, l'augmentation de la taille du récepteur et du nombre de disques peut également améliorer les performances d'interception.

IV.8.3- Effet de l'angle de rotation des pales d'éoliennes sur les performances des systèmes de protection contre la foudre :

Pour étudier l'effet de l'angle de rotation de la pale sur la performance des récepteurs installés, trois types de récepteurs sont choisis pour notre étude et qui sont montrés sur la figure IV.30, on a aussi choisi trois positions différentes des pales, à 0°, 25° et 50° par rapport à la verticale (figure IV.31). Cet effet a également été discuté dans d'autres travaux (voir, par exemple, [141], [142], [143]).

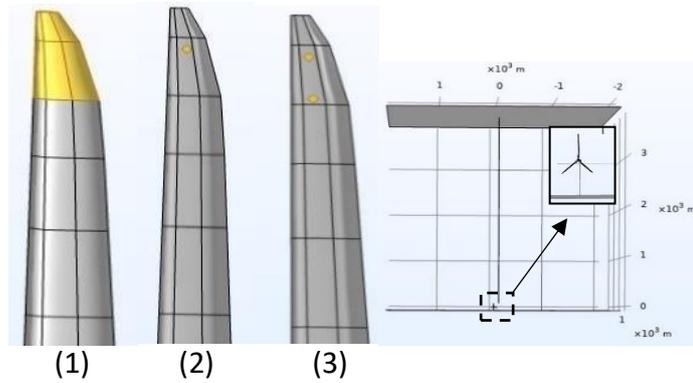


Figure IV-30 les trois différents récepteurs utilisés dans l'étude : (1) récepteur sous forme de pointe, (2) récepteur sous forme de petit disque de rayon 0.2m, (3) récepteur formé de deux disques de rayon 0.2 m chacun

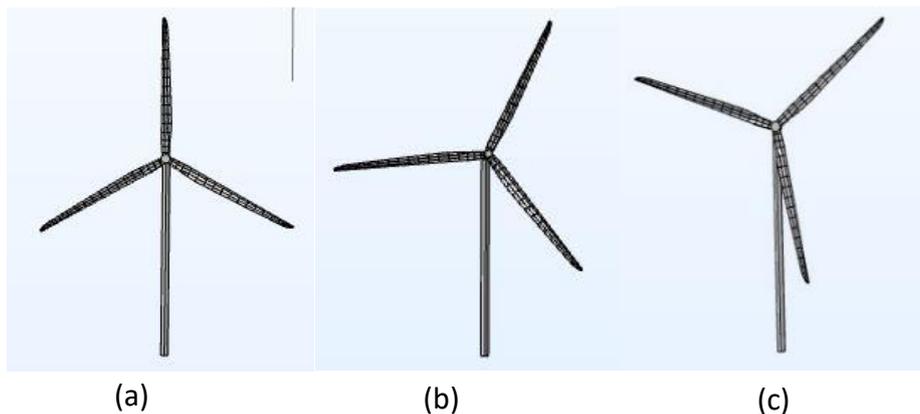


Figure IV-31 Trois angles de rotation des pales d'éoliennes utilisés (a) pale à 0°, (b) à 25° et (c) à 50°.

IV.8.3.1- RÉSULTATS ET DISCUSSIONS :

Le tableau IV.8 présente les intensités maximales du champ électrique à la surface des pales pour les trois angles de rotation de la pale choisis. Il est également important de noter que seuls les résultats concernant la pale supérieure verticale et le changement de position de cette pale sont pris en compte dans cette partie, car les champs électriques correspondants sont beaucoup plus élevés que dans les zones des deux autres pales.

Tableau IV-8 Intensité maximale du champ électrique pour les 3 angles de rotation.

	10^8 V/m	0°	25°	50°
(1) récepteur sous forme de pointe		2.28	2.35	2.81
(2) disque récepteur sous forme de petit disque		1.41	1.38	1.34
(3) récepteur sous forme de double petits disques		1,42	1,44	1,47

Les figures IV.32, V.33 et V.34 et le tableau IV.8 montrent que pour le même récepteur, l'intensité du champ électrique maximale dépend de l'angle de rotation de la pale.

Pour le récepteur sous forme de pointe ou sous forme de doubles petits disques, le champ électrique est maximal pour l'angle de rotation de la pale de 50° , par contre, pour le récepteur sous forme de petit disque, il correspond à un angle de 0° .

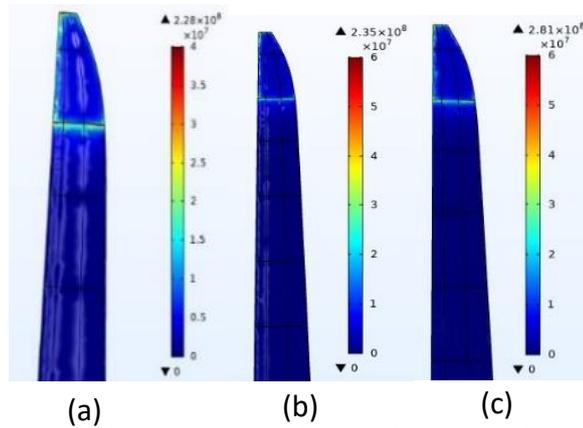


Figure IV-32 Distributions de l'intensité du champ électrique dans la région de la pointe (configuration 1) pour différents angles de rotation de la pale : (a) 0° , (b) 25° , (c) 50°

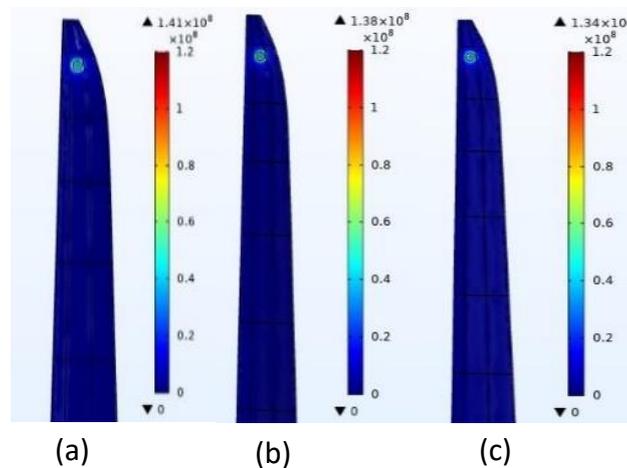


Figure IV-33 Distributions de l'intensité du champ électrique sur la lame avec un récepteur sous forme de petit disque (configuration 2) pour différents angles de rotation de la pale : (a) 0° , (b) 25° , (c) 50°

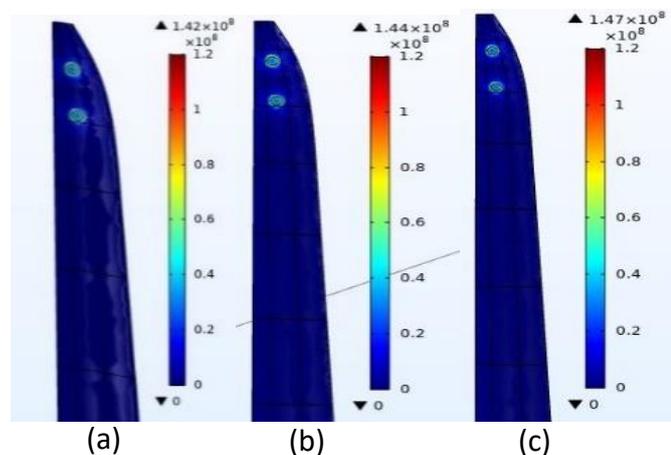


Figure IV-34 Distributions de l'intensité du champ électrique sur la lame avec des récepteur double disques (configuration 3) pour différents angles de rotation de la pale : (a) 0° , (b) 25° , (c) 50°

Pour bien comprendre ces différences, l'intensité du champ électrique sur la pale d'une éolienne pour les trois configurations a été simulée en fonction de la position et pour les différents angles de rotation de la pale.

D'après la figure IV.35, l'intensité du champ électrique pour les différents angles de rotation de la pale munie d'un récepteur sous forme de pointe est presque identique, à l'exception d'une valeur de crête différente à 57,52 m de pied de la pale. Le pic du champ électrique le plus important correspond à un angle de 50° est de 279,25MV/m.

De la figure IIV.36, on peut observer que l'intensité du champ électrique à travers le bord d'attaque, pour différents angles de rotation et avec la configuration 1, est presque identique, à l'exception de deux pics différents, la première valeur à 57,42 m et la seconde à 61,53 m de la base de pale. Le champ électrique le plus élevé correspond à un angle de 50° est de 120,08MV/m au premier pic.

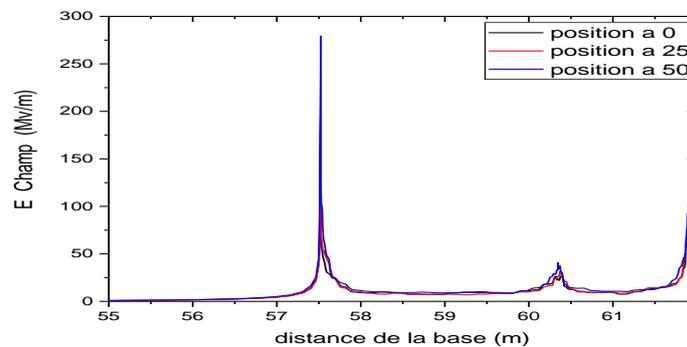


Figure IV-35 Comparaison du champ électrique le long du bord de fuite dans la plage de 55 à 61,5 m pour différents angles de rotation de la pale avec un récepteur de la configuration 1

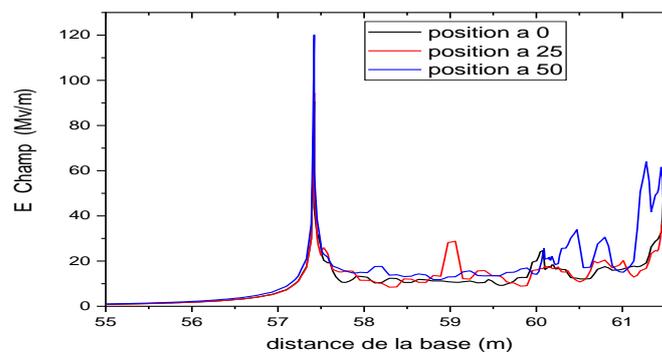


Figure IV-36 Comparaison du champ électrique le long du bord d'attaque dans la plage de 55 à 61,5 m pour différents angles de rotation de la pale (configuration 1)

La figure IV.37 montre l'intensité du champ électrique sur le bord de fuite pour une pale équipée d'un petit récepteur en forme de disque et pour différents angles de rotation de la pale. La figure montre qu'il y a trois courbes identiques, mais l'une au-dessus de l'autre, y compris un pic à 60,05 m de la base. Le pic de champ électrique le plus élevé correspond à un angle de 0° est de 3,89MV/m.

En outre, dans la figure IV.38, les courbes de l'intensité du champ électrique de la configuration 2, à travers le bord d'attaque, sont identiques. Un pic est observé à 59,61 m du pied de pale. Le champ électrique maximum est de valeur 5,56MV/m pour un angle de rotation de 25° .

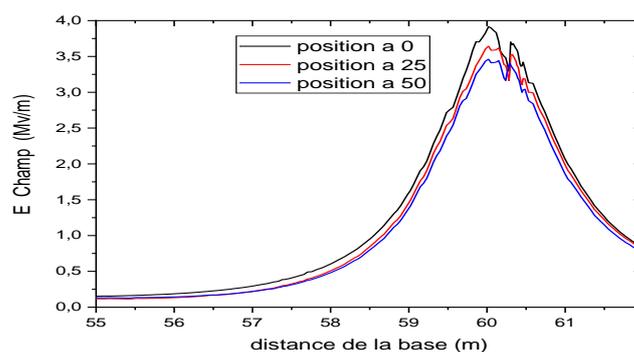


Figure IV-37 Comparaison du champ électrique attendu le long du bord de fuite dans la plage de 55 à 61,5 m pour différents angles de rotation de la pale (configuration 2)

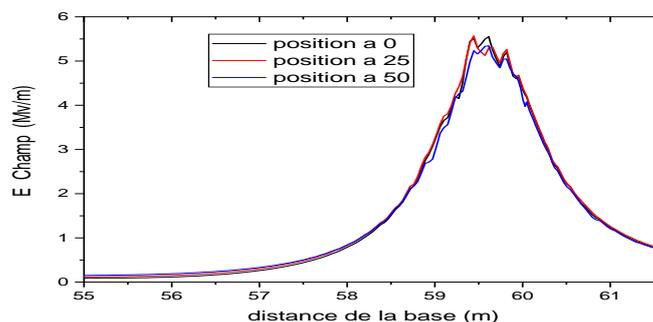


Figure IV-38 Comparaison du champ électrique attendu le long du bord d'attaque dans la plage de 55 à 61,5 m pour différents angles de rotation de la pale (configuration 2)

La figure IV.39 montre l'intensité du champ électrique pour différents angles de rotation à travers le bord de fuite d'une pale munie d'un récepteur formé de deux petits disques (configuration 3). La figure montre qu'il y a trois courbes identiques, mais l'une au-dessus de l'autre, y compris deux pics, l'un à 57,97 m du pied et l'autre à 60,11 m du pied de la pale. Le pic de champ électrique le plus élevé correspond à un angle 0° a une valeur de 3,49 MV/m.

Enfin, la figure IV.40 présente l'intensité du champ électrique pour les trois angles de rotation à travers le bord d'attaque d'une pale avec des récepteurs à double petits disques. La figure montre que les trois courbes sont identiques mais contiennent deux pics, le premier à 57,57 m du pied et le second à 59,65 m de la base de la pale. Pour l'angles de rotation 25° le champ électrique le plus élevé est de 6,40MV/m.

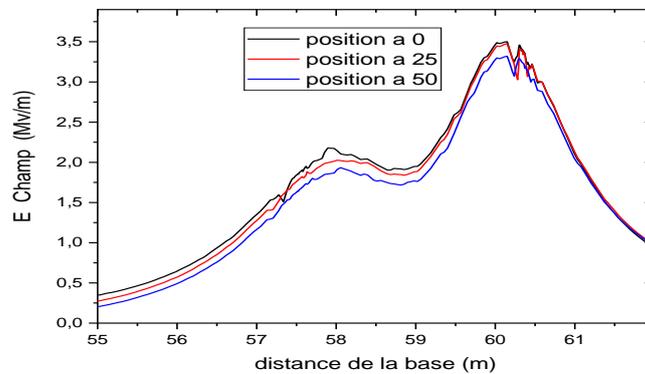


Figure IV-39 Comparaison du champ électrique attendu le long du bord de fuite dans la plage de 55 à 61,5 m pour différents angles de rotation de la pale (configuration 3)

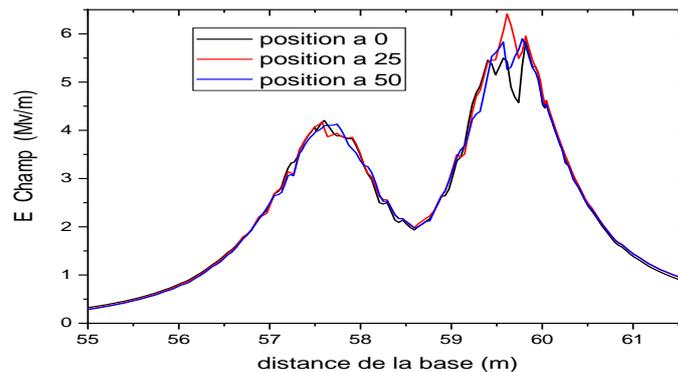


Figure IV-40 Comparaison du champ électrique attendu le long du bord d'attaque dans la plage de 55 à 61,5 m pour différents angles de rotation de la pale (configuration 3)

Ces résultats montrent que l'intensité du champ électrique est nettement plus élevée sur les deux bords lorsque l'on utilise le récepteur à pointe que le récepteur à disque. Cela s'explique par le fait que les bords d'attaque et de fuite des pales utilisant des disques sont faites d'un matériau non conducteur. Les points d'attache du coup de foudre sur la surface d'éolienne sont fortement influencés par la rotation et l'orientation de la pale, comme le montrent les essais en laboratoire présentés dans les références [144], [139].

IV.9- Conclusion

En conclusion, ce chapitre a apporté un éclairage significatif sur les performances des systèmes de protection contre la foudre (LSP) installés sur les pales d'éoliennes. En utilisant un modèle numérique développé avec le logiciel COMSOL Multiphysics, nous avons pu prédire avec précision l'intensité du champ électrique statique sur les surfaces des pales, résultant d'un impact de foudre.

Nos résultats ont révélé l'importance critique des récepteurs installés sur les pales d'éoliennes dans la réduction des risques de dommages causés par la foudre. En évaluant le champ électrique au voisinage des récepteurs pour différentes configurations, nous avons pu identifier les facteurs clés qui influent sur l'efficacité de l'interception et fournir des recommandations pour l'amélioration des systèmes de protection contre la foudre.

Les principales conclusions tirées de l'analyse :

-Les grands récepteurs en forme de disque offrent une meilleure efficacité d'interception que les petits récepteurs.

-L'augmentation du nombre de disques diminue l'intensité maximale du champ électrique sur la lame mais augmente les lignes du champ électrique interceptées.

-Les résultats indiquent que le récepteur à deux lignes, le récepteur en forme de plaque et les récepteurs formés de plusieurs de petits disques (cas de neuf disques) capturent la totalité des lignes du champ électrique même lorsque l'intensité maximale du champ électrique est réduite.

-De plus, le récepteur en forme de pointe affiche le champ électrique le plus intense avec les quatre positions du canal de la foudre, cependant il ne capture pas toutes les lignes de champ.

-Nos résultats démontrent que le récepteur en forme de pointe surpasse de manière significative le récepteur en forme de disque en termes d'interceptions pour les différentes positions du canal de foudre.

-La direction d'approche d'un canal de foudre descendant s'avère être un facteur très important dans la performance d'interception du système de protection contre la foudre d'une éolienne.

- l'intensité du champ électrique sur les deux bords est nettement plus élevée lorsque l'on utilise un récepteur sous forme de pointe que celui sous forme de disque.

- L'efficacité du récepteur et du système de protection contre la foudre est influencée par la position de rotation de la pale.

Conclusion générale

Cette thèse contribue à l'analyse du comportement des systèmes de protection des éoliennes contre la foudre. L'objectif principal est d'étudier les performances de ses systèmes qui jouent un rôle crucial dans la réduction des risques de dommages causés par la foudre.

Nous avons débuté par un examen exhaustif de l'état de l'art sur les énergies éoliennes, soulignant l'évolution mondiale de cette source d'énergie renouvelable et son potentiel en Algérie. Nous avons ensuite exploré en détail le phénomène de la foudre, ses effets dévastateurs sur les éoliennes et les moyens de protection disponibles, mettant en évidence l'importance cruciale de comprendre et de mitiger les risques associés à ce phénomène naturel.

Dans le cadre de notre analyse, nous nous sommes penchés sur l'interaction entre la foudre et les éoliennes du point de vue du champ électromagnétique rayonné, en examinant les modèles du courant de l'arc en retour et les méthodes de calcul du champ électromagnétique résultant de cette interaction. Enfin, nous avons évalué les performances des systèmes de protection contre la foudre installés sur les pales d'éoliennes, en prédisant l'intensité du champ électrique statique sur les surfaces des pales et en identifiant les facteurs clés qui influent sur leur performance.

Les conclusions tirées de cette étude sont comme suit :

- ✓ L'introduction et l'utilisation de récepteurs à grande surface montre une augmentation significative du champ électrique par rapport aux récepteurs de petites formes circulaires. Des récepteurs qui s'étendent sur une zone plus large de la lame améliorent l'efficacité de capture de la foudre par rapport aux récepteurs ronds.
- ✓ Lorsqu'un ensemble des récepteurs est positionné ensemble une accumulation de champ électrique peut être observée sur le récepteur placé à extrémité de la pale au coup de foudre.
- ✓ L'augmentation du nombre de disques diminue l'intensité maximale du champ électrique sur la lame mais augmente la ligne de champ électrique interceptée.
- ✓ le récepteur à deux lignes, le récepteur en forme de plaque et le récepteur formé de plusieurs petits disques capturent la totalité des lignes du champ électrique même lorsque l'intensité maximale du champ électrique sur ses récepteurs est réduite.

- ✓ En outre, le récepteur en forme de pointe présente un champ électrique le plus élevé pour les différentes positions du canal de foudre, mais n'intercepte pas toutes les lignes du champ électrique.
- ✓ La direction d'approche d'un canal de foudre descendant s'avère être un facteur très important dans la performance d'interception du système de protection contre la foudre d'une éolienne.
- ✓ l'angle de rotation des lames affecte l'efficacité du récepteur et par conséquent le système de protection contre la foudre.

Cette étude revêt une importance cruciale dans le contexte de la sécurité et de la fiabilité des parcs éoliens, offrant des pistes précieuses pour l'amélioration continue des systèmes de protection contre la foudre et la réduction des risques associés aux phénomènes météorologiques extrêmes. Ce travail contribue à consolider les fondements de la protection des éoliennes modernes contre la foudre et à promouvoir le développement durable de cette source d'énergie propre et renouvelable.

Il est important de noter que notre étude a ses limites et que des recherches supplémentaires seront nécessaires pour explorer d'autres aspects de l'interaction entre la foudre et les éoliennes, ainsi que pour valider nos résultats expérimentalement. Cependant, nos travaux constituent une contribution significative à la compréhension et à l'amélioration des systèmes de protection contre la foudre dans le contexte des parcs éoliens.

En fin de compte, notre objectif est d'inspirer de nouvelles recherches et innovations dans ce domaine vital, afin de garantir la sécurité et la pérennité des parcs éoliens dans un monde en constante évolution.

Bibliographie

- [1] H. Fathabadi, "Maximum mechanical power extraction from wind turbines using novel proposed high accuracy single-sensor-based maximum power point tracking technique," *Energy*, vol. 113, pp. 1219–1230, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.energy.2016.07.081.
- [2] R. CHEIKH, "Etude et Commande d'une Eolienne à base d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents et d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation," Thèse de doctorat, UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA, 2018. [Online]. Available: <http://thesis.univ-biskra.dz/3914/>
- [3] "Global Wind Report 2022," Global Wind Energy Council. [Online]. Available: <https://gwec.net/global-wind-report-2022/>
- [4] F. Chen *et al.*, "Multi-Terminal Wireless Differential Protection Method for Offshore Wind Power Collection Lines," *IEEE Access*, pp. 1–1, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3392570.
- [5] P. Lakshmanan, R. Sun, and J. Liang, "Electrical collection systems for offshore wind farms: A review," *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 7, no. 5, pp. 1078–1092, Sep. 2021, doi: 10.17775/CSEEJPES.2020.05050.
- [6] S. M. Boudia, "Optimisation de l'Évaluation Temporelle du Gisement Énergétique Éolien par Simulation Numérique et Contribution à la Réactualisation de l'Atlas des Vents en Algérie," Thèse de doctorat, Université de Tlemcen Abou-Bakr Blekaïd -Faculté des Sciences, Tlemcen, 2013.
- [7] B. TOUAL, "Contribution à la Commande et la Gestion des Sources Hybrides d'Énergie Electrique," Thèse de doctorat, Université de Batna 2-Mostefa Ben Boulaïd, Batna, 2019. Accessed: Jun. 24, 2022. [Online]. Available: <http://eprints.univ-batna2.dz/1699/>
- [8] R. ROUABHI, "Contrôle des puissances générées par un système éolien à vitesse variable basé sur une machine asynchrone double alimentée," Thèse de doctorat, Université de Batna 2, Batna, 2016. [Online]. Available: <http://eprints.univ-batna2.dz/324/>
- [9] A. Soualmia, "Amélioration de la chute de tension sur réseau BT par l'apport d'un générateur hybride PV/Eolien.," Thèse de doctorat, Université Frères Mentouri - Constantine 1, Constantine, 2020. [Online]. Available: <http://depot.umc.edu.dz/handle/123456789/5786>
- [10] A. Abdelli, "Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive," Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2007. Accessed: Jan. 17, 2023. [Online]. Available: <https://theses.hal.science/tel-00553540>
- [11] A. Khaireddine, "Modélisation et analyse de l'intégration d'un jumelage éolien- diesel dans un réseau électrique autonome," Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar, ANNABA, 2015.
- [12] M. Smaili, "Modélisation et commande d'un aérogénérateur à machine asynchrone à double alimentation en vue de simulation des problèmes de cogénération," Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Rouyn-Noranda, 2013. [Online]. Available: <https://depositum.uqat.ca/id/eprint/572/>
- [13] D. Mida, "Contribution à la Modélisation d'un Système de Production d'Énergie Electrique Hybride « Eolien – Photovoltaïque », Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider - Biskra, Biskra, 2019. [Online]. Available: <http://thesis.univ-biskra.dz/4352/>

- [14] I. Hamzaoui, "Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur," Thèse de doctorat, Alger, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2008.
- [15] F. Poitiers, "ETUDE ET COMMANDE DE GENERATRICES ASYNCHRONES POUR L'UTILISATION DE L'ENERGIE EOLIENNE- Machine asynchrone à cage autonome - Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau," Thèse de doctorat, l'Ecole polytechnique de Université de Nantes, 2003.
- [16] M. DEBBACHE, "Amélioration de la performance de pale éolienne par considération des paramètres locaux et prend en compte les phénomènes des pertes," Thèse de doctorat, UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA, Biskra, 2018. [Online]. Available: <http://thesis.univ-biskra.dz/3945/>
- [17] M. N. KASBADJI, "EVALUATION DU GISEMENT ENERGETIQUE EOLIEN CONTRIBUTION A LA DETERMINATION DU PROFIL VERTICAL DE LA VITESSE DU VENT EN ALGERIE," Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, Tlemcen, 2006.
- [18] international Electrotechnical Commission, *Wind turbines Part 2: Design requirements for small wind turbines*. British Standards Institution: international Electrotechnical Commission, 2006.
- [19] M. GREBEAUX and F. DEGRAVE, "L'énergie éolienne, une énergie d'avenir ? Wind energy, the energy of the future?," École d'ingénieurs Centre de recherche Mines de Douai, 2014.
- [20] I. H. Abbott and E. V. Doenhoff, *Theory of wing sections*. in Dover publications,. INC. New York,; Dover publications, 1959.
- [21] B. Tony, J. Nick, S. David, and B. Ervin, *Wind Energy Handbook*, 2nd ed. Wiley, 2011. [Online]. Available: <https://www.wiley.com/en-au/Wind+Energy+Handbook%2C+2nd+Edition-p-9781119993926>
- [22] J. F. Manwell, J. G. McGowan, and A. L. Rogers, *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*, 2nd ed. Wiley, 2010. [Online]. Available: <https://www.wiley.com/en-us/Wind+Energy+Explained%3A+Theory%2C+Design+and+Application%2C+2nd+Edition-p-9780470015001>
- [23] P. Giguere and M. S. Selig, *Design of a Tapered and Twisted Blade for the NREL Combined Experiment Rotor*. in NREL. Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory (U.S.), 1999. doi: 10.2172/750919.
- [24] X. Bian *et al.*, "Quantitative characteristics of the striking distance to wind turbine blades based on an improved stochastic lightning model," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 17, no. 10, pp. 2317–2330, 2023, doi: 10.1049/gtd2.12808.
- [25] D. Khelil, "Contribution à la modélisation de la décharge de foudre dans un environnement protégé," Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, 2019. [Online]. Available: <https://repository.usthb.dz/handle/123456789/7822>
- [26] C. Gary and M. P. Demazure, *La foudre: nature, histoire, risques et protection*, 3rd ed. Paris, France: Dunod, 2004.
- [27] D. M. Elsom, *Lightning: Nature and Culture*. Reaktion Books, 2015.

- [28] L. Figuiet, *Les Merveilles de la science ou description populaire des inventions modernes*, Furne, Jouvet (Paris)., vol. 1. Paris, France, 1867. [Online]. Available: <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k24674j>
- [29] C. V. Boys, "Progressive Lightning," *Nature*, vol. 118, no. 2977, Art. no. 2977, Nov. 1926, doi: 10.1038/118749a0.
- [30] K. B. McEachron, "Lightning to the empire state building," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 227, no. 2, pp. 149–217, Feb. 1939, doi: 10.1016/S0016-0032(39)90397-2.
- [31] M. A. Uman, *Lightning*, Revised edition. New York: Dover, 2011.
- [32] K. Berger, "Novel observations on lightning discharges: Results of research on Mount San Salvatore," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 283, no. 6, pp. 478–525, Jun. 1967, doi: 10.1016/0016-0032(67)90598-4.
- [33] P. Bernard and G. Pierre, *Protection Contre La Foudre Des ICPE*. VERNEUIL EN HALATTE: INERIS, 2011. Accessed: Jan. 21, 2024. [Online]. Available: <https://fr.scribd.com/doc/141571775/Protection-Contre-La-Foudre-Des-ICPE>
- [34] J. R. Dwyer and M. A. Uman, "The physics of lightning," *Physics Reports*, vol. 534, no. 4, pp. 147–241, Jan. 2014, doi: 10.1016/j.physrep.2013.09.004.
- [35] A. KHECHEKHOUCHE, "MODELISATION NUMERIQUE DE LA PROTECTION PRIMAIRE CONTRE LA FOUDRE DANS LE CAS DES TERRE HETEROGENES," Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider - Biskra, 2017. [Online]. Available: <http://thesis.univ-biskra.dz/2940/>
- [36] A. Vladimir, U. Rakov, and A. Martin, "Lightning: Physics and Effects:," in Press, no. 9780521035415. , Cambridge, U.K.: Cambridge Univ, 2003. [Online]. Available: <https://www.amazon.com/Lightning-Physics-Effects-Vladimir-Rakov/dp/0521035414>
- [37] E. Perrin, "Modélisation des effets indirects de la foudre sur avion composite," Thèse de doctorat, Limoges, 2010. Accessed: Jul. 28, 2022. [Online]. Available: <http://www.theses.fr/2010LIMO4010>
- [38] C. Gary, *La Foudre. Des Mythologie Antiques A La Recherche Moderne*, 2eme ed. Elsevier Masson, 1994.
- [39] M. Buguet, "Activité d'éclairs et paramètres physiques issus de l'observation radar dans les orages : application au projet HyMeX," Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2012. [Online]. Available: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00761486>
- [40] K. L. Cummins and M. J. Murphy, "An Overview of Lightning Locating Systems: History, Techniques, and Data Uses, With an In-Depth Look at the U.S. NLDN," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 51, no. 3, pp. 499–518, Aug. 2009, doi: 10.1109/TEM.2009.2023450.
- [41] V. A. Rakov, "The Physics of Lightning," *Surv Geophys*, vol. 34, no. 6, pp. 701–729, Nov. 2013, doi: 10.1007/s10712-013-9230-6.
- [42] D. Dib, "L'Impact de La Foudre Sur les Réseaux Electriques Etude , Analyse et Modélisation," Thèse de doctorat, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA, 2007. doi: 10.13140/RG.2.1.1246.4406.

- [43] D. Philippe, *Protection des installations électriques contre la foudre ; installations industrielles tertiaires*, Dunod. in Techn.et Ingenerie. 2003.
- [44] I. Fofana, "Modélisation de la décharge positive dans les grands intervalles d'air," Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 1996. [Online]. Available: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00143944>
- [45] C. A. Nucci, G. Diendorfer, M. A. Uman, F. Rachidi, M. Ianoz, and C. Mazzetti, "Lightning return stroke current models with specified channel-base current: A review and comparison," *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 95, no. D12, pp. 20395–20408, 1990, doi: 10.1029/JD095iD12p20395.
- [46] J. H. Rakotonandrasana, "Modélisation de la décharge négative dans les longs intervalles d'air - Application à la foudre," Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 2008. [Online]. Available: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00372671>
- [47] L. Carey and S. Rutledge, "Electrical and multiparameter radar observations of a severe hailstorm," *Journal of Geophysical Research*, vol. 103, p. 13979, Jun. 1998, doi: 10.1029/97JD02626.
- [48] Y. Seity, S. Soula, P. Tabary, and G. Scialom, "The convective storm system during IOP 2a of MAP: Cloud-to-ground lightning flash production in relation to dynamics and microphysics," *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 129, pp. 523–542, Jan. 2003, doi: 10.1256/qj.02.03.
- [49] S. Tessendorf, L. Miller, K. Wiens, and S. Rutledge, "The 29 June 2000 Supercell Observed during STEPS. Part I: Kinematics and Microphysics," *Journal of The Atmospheric Sciences - J ATMOS SCI*, vol. 62, pp. 4127–4150, Dec. 2005, doi: 10.1175/JAS3585.1.
- [50] K. Berger, R. B. Anderson, and H. Kroninger, "Parameters of lightning flashes," *Electra*, vol. 80, pp. 223–237, 1975.
- [51] X. Qie *et al.*, "Artificially triggered lightning and its characteristic discharge parameters in two severe thunderstorms," *SCI CHINA SER D*, vol. 50, no. 8, pp. 1241–1250, Aug. 2007, doi: 10.1007/s11430-007-0064-2.
- [52] V. A. Rakov, *Fundamentals of Lightning*, 1st edition. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2016.
- [53] Y. T. Lin *et al.*, "Characterization of lightning return stroke electric and magnetic fields from simultaneous two-station measurements," *Journal of Geophysical Research: Oceans*, vol. 84, no. C10, pp. 6307–6314, 1979, doi: 10.1029/JC084iC10p06307.
- [54] J. Jerauld *et al.*, "An evaluation of the U.S. National Lightning Detection Network in Florida using rocket-triggered lightning," *Journal of Geophysical Research*, vol. 110, Oct. 2005, doi: 10.1029/2005JD005924.
- [55] A. Nag *et al.*, "NLDN Responses to Rocket-Triggered Lightning at Camp Blanding, Florida, in 2004–2009," in *2010 30th International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Sep. 2010, pp. 1–8. doi: 10.1109/ICLP.2010.7845955.

- [56] W. Schulz, K. Cummins, G. Diendorfer, and M. Dorninger, "Cloud-to-ground lightning in Austria: A 10-year study using data from a lightning location system," *Journal of Geophysical Research*, vol. 110, May 2005, doi: 10.1029/2004JD005332.
- [57] X.-M. Shao, M. Stanley, A. Regan, J. Harlin, M. Pongratz, and M. Stock, "Total Lightning Observations with the New and Improved Los Alamos Sferic Array (LASA)," *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology - J ATMOS OCEAN TECHNOL*, vol. 23, Oct. 2006, doi: 10.1175/JTECH1908.1.
- [58] D. Sonia AIT-AMAR and Z. Ahmed, "Protection contre la foudre- Principes généraux et normes en vigueur," p. 32, Feb. 10, 2015.
- [59] B. PIQUETTE, *Protection contre la foudre 'des installations classées pour la protection de l'environnement*. in INERIS - Direction des risques accidentels. INERIS - Direction des risques accidentels, 2011.
- [60] K. M. Gektidis, A. I. Ioannidis, and T. E. Tsovilis, "Response time of surge protective devices employing triggered spark gap technology," *IEEE Transactions on Industry Applications*, pp. 1–9, 2024, doi: 10.1109/TIA.2024.3370528.
- [61] S. Arunkumar, "Investigation into Conductive Patterns and Receptor Designs for Effective Lightning Interception," New Mexico Institute of Mining and Technology, Socorro, New Mexico, 2017.
- [62] P. M. Lo, "A simplified model for lightning exposure of wind turbines," Thèse de doctorat, McGill University, Montreal, 2009.
- [63] Q. Zhu *et al.*, "Experimental and Analytical Studies on Lightning Surge Response of the Quadruple-Circuit Transmission Line," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 6879–6886, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3237780.
- [64] S. Yokoyama, N. Honjo, Y. Yasuda, and K. Yamamoto, "Causes of wind turbine blade damages due to lightning and future research target to get better protection measures," in *2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Shanghai, China, Oct. 2014, pp. 823–830. doi: 10.1109/ICLP.2014.6973237.
- [65] A. Candela Garolera, S. F. Madsen, M. Nissim, J. D. Myers, and J. Holboell, "Lightning Damage to Wind Turbine Blades From Wind Farms in the U.S.," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 31, no. 3, pp. 1043–1049, Jun. 2016, doi: 10.1109/TPWRD.2014.2370682.
- [66] H. Bagherian and H. Kazemi Karegar, "Effects of location, size and number of wind turbine receptors on blade lightning protection by voltage distribution analysis," in *2011 International Conference on Advanced Power System Automation and Protection*, Oct. 2011, pp. 1343–1348. doi: 10.1109/APAP.2011.6180587.
- [67] M. I. Lorentzou, N. D. Hatzargyriou, and I. Cotton, "Key issues in lightning protection of wind turbines.," *WSEAS Transactions on Circuits and Systems*, vol. 3, no. 5, pp. 1408–1414, 2004.
- [68] V. Kumar *et al.*, "Non-metallic lightning strike protection coating for wind-turbine blades," *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 1293, no. 1, p. 012028, Nov. 2023, doi: 10.1088/1757-899X/1293/1/012028.

- [69] Y. Wang, "Modeling of lightning-induced thermal ablation damage in anisotropic composite materials and its application to wind turbine blades," Thèse de doctorat, The University of Iowa, Iowa City, Iowa, 2016.
- [70] M. A. Uman, *The Art and Science of Lightning Protection*. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2008, p. 240. doi: 10.1017/CBO9780511585890.
- [71] L. Chen, X. Pei, X. Wei, P. Li, and G. Tang, "Effective Ultra-High-Speed Identification Scheme of Lightning Strikes Suitable for VSC-Based DC Grids," *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 10, no. 2, pp. 548–561, Mar. 2024, doi: 10.17775/CSEEJPES.2021.04690.
- [72] Y. Zhao, Z. Liu, Y. Cui, Y. Fu, and T. Hou, "Surface discharge behavior of the skin of CSRR based frequency selective metamaterial under lightning strike," *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, pp. 1–10, 2023, doi: 10.17775/CSEEJPES.2022.02160.
- [73] H. Huo, D. Wang, H. Chen, C. Zhao, and Q. Cheng, "Considering the Methods of Lightning Protection and Early Warning for Power Transmission Lines Based on Lightning Data Analysis," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 54168–54181, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3387968.
- [74] A. Tatematsu and A. Yamanaka, "Three-Dimensional FDTD-Based Simulation of Lightning-Induced Surges in Secondary Circuits With Shielded Control Cables Over Grounding Grids in Substations," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 65, no. 2, pp. 528–538, Apr. 2023, doi: 10.1109/TEMC.2023.3245206.
- [75] D. Ye, F. Xie, and Z. Hao, "A novel identification scheme of lightning disturbance in HVDC transmission lines based on CEEMD-HHT," *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*, vol. 6, no. 2, pp. 145–154, Jun. 2021, doi: 10.24295/CPSSTPEA.2021.00013.
- [76] A. Borghetti, K. Ishimoto, F. Napolitano, C. A. Nucci, and F. Tossani, "Assessment of the Effects of the Electromagnetic Pulse on the Response of Overhead Distribution Lines to Direct Lightning Strikes," *IEEE Open Access Journal of Power and Energy*, vol. 8, pp. 522–531, 2021, doi: 10.1109/OAJPE.2021.3099596.
- [77] M. Zhou *et al.*, "Experimental Evaluation of Lightning Attachment Characteristic of Two Adjacent Wind Turbines," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 38, no. 2, pp. 879–887, Jun. 2023, doi: 10.1109/TEC.2022.3230150.
- [78] M. Zhou *et al.*, "Investigation of Blade Receptor Number on the Lightning Attachment Behavior of Wind Turbine," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 65, no. 4, pp. 1143–1151, Aug. 2023, doi: 10.1109/TEMC.2023.3277551.
- [79] P. Fontanes, J. Montanyà, M. Arcanjo, M. Urbani, C. Asensio, and C. Guerra-Garcia, "On the Induced Currents to Wind Turbines by the Earth's Atmospheric Electric Potential: Experiments With Drones," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 21277–21290, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3152777.
- [80] Y. Al-Shawesh, S. C. Lim, and M. Nujaim, "Analysis of the Design Calculations for Electrical Earthing Systems," *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, vol. 16, no. 2, Art. no. 2, Apr. 2021, doi: 10.15866/iree.v16i2.16839.
- [81] "IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines," *IEEE Std 1410-2004 (Revision of IEEE Std 1410-1997)*, pp. 1–50, Jul. 2004, doi: 10.1109/IEEESTD.2004.94577.

- [82] I. Metwally and F. Heidler, "Improvement of the lightning shielding performance of overhead transmission lines by passive shield wires," *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on*, vol. 45, pp. 378–392, Jun. 2003, doi: 10.1109/TEMC.2003.811300.
- [83] M. Paolone, C. A. Nucci, E. Petrache, and F. Rachidi, "Mitigation of Lightning-Induced Overvoltages in Medium Voltage Distribution Lines by Means of Periodical Grounding of Shielding Wires and of Surge Arresters: Modeling and Experimental Validation," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 19, pp. 423–431, Feb. 2004, doi: 10.1109/TPWRD.2003.820196.
- [84] S. Rusck, *Induced-lightning overvoltages on power transmission lines with special reference to the overvoltage protection of low voltage networks*. Elanders Boktryckeri Aktiebolag, 1957.
- [85] O. Mohamed, "Etude de l'environnement électromagnétique de la foudre," Thèse de doctorat, Université Ibn Khaldoun-Tiaret-, tiaret, 2018. [Online]. Available: <http://dspace.univ-tiaret.dz/handle/123456789/488>
- [86] A. Piantini and J. M. Janiszewski, "The Effectiveness of Surge Arresters on the Mitigation of Lightning Induced Voltages on Distribution Lines," *8 international symposium on lightning protection*, no. 777–798, Nov. 2005.
- [87] A. Piantini, J. Janiszewski, A. Borghetti, C. A. Nucci, and M. Paolone, "A Scale Model for the Study of the LEMP Response of Complex Power Distribution Networks," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 22, pp. 710–720, Feb. 2007, doi: 10.1109/TPWRD.2006.881410.
- [88] A. Borghetti, C. A. Nucci, and M. Paolone, "An Improved Procedure for the Assessment of Overhead Line Indirect Lightning Performance and Its Comparison with the IEEE Std. 1410 Method," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 22, pp. 684–692, Feb. 2007, doi: 10.1109/TPWRD.2006.881463.
- [89] H. Glushakow, "Effective Lightning Protection For Wind Turbine Generators," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 22, pp. 214–222, Apr. 2007, doi: 10.1109/TEC.2006.889622.
- [90] International Electrotechnical Commission, *Wind turbines. Part 24, Lightning protection*, 1st ed. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2010.
- [91] F. Rachidi *et al.*, "A Review of Current Issues in Lightning Protection of New-Generation Wind-Turbine Blades," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 55, no. 6, pp. 2489–2496, Jul. 2008, doi: 10.1109/TIE.2007.896443.
- [92] S. Molaei and M. Amiri, "Modeling the Transient State of the Wind Turbine and Protection it Against Direct Lightning," in *2020 15th International Conference on Protection and Automation of Power Systems (IPAPS)*, Dec. 2020, pp. 160–166. doi: 10.1109/IPAPS52181.2020.9375583.
- [93] T. Soerensen *et al.*, "The update of IEC 61400-24 lightning protection of wind turbines," presented at the 29th International Conference on Lightning Protection, in 29th International Conference on Lightning Protection. Sweden, Jul. 2008, p. 15.
- [94] Y. Wang and W. Hu, "Investigation of the Effects of Receptors on the Lightning Strike Protection of Wind Turbine Blades," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 59, no. 4, pp. 1180–1187, Aug. 2017, doi: 10.1109/TEMC.2016.2647260.

- [95] P. Xie, X. Shi, and Z. Jiang, "Investigation of lightning attachment characteristics of wind turbine blades with different receptors," *Energy Reports*, vol. 9, pp. 618–626, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.egy.2023.05.085.
- [96] V. Peesapati, I. Cotton, T. Soerensen, T. Krogh, and N. Kokkinos, "Lightning protection of wind turbines—A comparison of measured data with required protection levels," *Renewable Power Generation, IET*, vol. 5, pp. 48–57, Feb. 2011, doi: 10.1049/iet-rpg.2008.0107.
- [97] Y. Liu, M. Zitnik, and R. Thottappillil, "An Improved Transmission-Line Model of Grounding System," *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on*, vol. 43, pp. 348–355, Sep. 2001, doi: 10.1109/15.942606.
- [98] M. Lorentzou, N. Hatziargyriou, and B. C. Papadias, "Time domain analysis of grounding electrodes impulse response," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 18, pp. 517–524, May 2003, doi: 10.1109/TPWRD.2003.809686.
- [99] J. Wang, A. Liew, and M. Darveniza, "Extension of Dynamic Model of Impulse Behavior of Concentrated Grounds at High Currents," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 20, pp. 2160–2165, Aug. 2005, doi: 10.1109/TPWRD.2004.839645.
- [100] N. Mohamad Nor, A. Haddad, and H. Griffiths, "Characterization of Ionization Phenomena in Soils Under Fast Impulses," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 21, pp. 353–361, Feb. 2006, doi: 10.1109/TPWRD.2005.852352.
- [101] A. Habjanic and M. Trlep, "The simulation of the soil ionization phenomenon around the grounding system by the Finite Element Method," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 42, pp. 867–870, May 2006, doi: 10.1109/TMAG.2006.871625.
- [102] L. Grcev, "Modeling of Grounding Electrodes Under Lightning Currents," *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on*, vol. 51, pp. 559–571, Sep. 2009, doi: 10.1109/TEM.2009.2025771.
- [103] V. A. Rakov and M. A. Uman, "Review and evaluation of lightning return stroke models including some aspects of their application," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 40, no. 4, pp. 403–426, Nov. 1998, doi: 10.1109/15.736202.
- [104] V. A. Rakov, "Lightning electromagnetic fields: Modeling and measurements," in *Proc. 12th Int. Zurich Symp. Electromagn. Compat*, 1997, pp. 59–64. [Online]. Available: <http://www.lightning.ece.ufl.edu/PDF/Zurich/digest97c.pdf>
- [105] C. E. R. Bruce and R. H. Golde, "The lightning discharge," *Journal of the Institution of Electrical Engineers - Part II: Power Engineering*, vol. 88, no. 6, pp. 487–505, Dec. 1941, doi: 10.1049/ji-2.1941.0065.
- [106] F. Heidler, "Travelling current source model for LEMP calculations," *Proceedings of 6th international symposium on EMC, Zurich, Switzerland, 29F2*, pp. 157–162, 1985.
- [107] G. Diendorfer and M. A. Uman, "An improved return stroke model with specified channel-base current," *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 95, no. D9, pp. 13621–13644, 1990, doi: 10.1029/JD095iD09p13621.
- [108] V. A. Rakov and A. A. Dulzon, "Results of calculation of the electromagnetic fields of lightning discharges," *Tekhnicheskaya Elektrodinamika. no.* 1, pp. 87–9, 1987.

- [109] C. A. Nucci, C. Mazzetti, F. Rachidi, and M. Ianoz, "On lightning return stroke models for LEMP calculations," *Assoc., Graz, Austria*, 1988.
- [110] F. Rachidi and C. A. Nucci, "On the Master, Uman, Lin, Standler and the Modified Transmission Line Lightning return stroke current models," *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 95, no. D12, pp. 20389–20393, 1990, doi: 10.1029/JD095iD12p20389.
- [111] A. Mimouni, "analyse des problèmes de compatibilité électromagnétique par modélisation et simulation du rayonnement électromagnétique de la foudre," Thèse de doctorat, Université des sciences et de la technologie d'Oran, Mohamed Boudiaf, Oran, 2007.
- [112] F. Rachidi *et al.*, "Current and electromagnetic field associated with lightning-return strokes to tall towers," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 43, no. 3, pp. 356–367, Aug. 2001, doi: 10.1109/15.942607.
- [113] F. Rachidi, V. A. Rakov, C. A. Nucci, and J. L. Bermudez, "Effect of vertically extended strike object on the distribution of current along the lightning channel," *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 107, no. D23, p. ACL 16-1-ACL 16-6, 2002, doi: 10.1029/2002JD002119.
- [114] V. Cooray, "On the concepts used in return stroke models applied in engineering practice," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 45, no. 1, pp. 101–108, Feb. 2003, doi: 10.1109/TEMC.2002.808041.
- [115] Y. Baba and V. A. Rakov, "Lightning electromagnetic environment in the presence of a tall grounded strike object," *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 110, no. D9, 2005, doi: 10.1029/2004JD005505.
- [116] Y. Baba and V. A. Rakov, "On the use of lumped sources in lightning return stroke models," *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 110, no. D3, 2005, doi: 10.1029/2004JD005202.
- [117] V. Shostak, "Modeling of return stroke current for lightning events at a complex tall structure," in *International workshop on electromagnetic radiation from lightning to tall structures, Toronto, Canada*, 2001.
- [118] F. Heidler, J. Wiesinger, and W. Zischank, "Lightning currents measured at a telecommunication tower from 1992 to 1998," in *14th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Zurich, 2001.
- [119] W. Janischewskyj, "Collection and use of lightning return stroke parameters taking into account characteristics of the struck object," in *23rd ICLP (Int. Conference on Lightning Protection), Florence, Italy, 1996*, Florence, Italy, 1996. [Online]. Available: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1570572700849106688>
- [120] J. L. Bermudez, "Lightning currents and electromagnetic fields associated with return strokes to elevated strike objects," Thèse de doctorat, ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE, Lausanne, 2003. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5075/epfl-thesis-2741>
- [121] J. B. Schneider, "Understanding the finite-difference time-domain method," *School of electrical engineering and computer science Washington State University*, vol. 28, 2010.
- [122] K. S. Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equation in isotropic media," *IEEE Trans, an Antenna and propagation*, vol. 14, no. 3, pp. 302–307, 1966.

- [123] G. Mur, "Absorbing Boundary Conditions for the Finite-Difference Approximation of the Time-Domain Electromagnetic-Field Equations," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. EMC-23, no. 4, pp. 377–382, Nov. 1981, doi: 10.1109/TEMC.1981.303970.
- [124] C. Yang and B. Zhou, "Calculation methods of electromagnetic fields very close to lightning," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 46, no. 1, pp. 133–141, Feb. 2004, doi: 10.1109/TEMC.2004.823626.
- [125] A. Mimouni, F. Rachidi, and Z. Azzouz, Eds., "Electromagnetic Environment in the Immediate Vicinity of a Lightning Return Stroke," *Journal of Lightning Research*, 2007.
- [126] X. Wen *et al.*, "Effect of wind turbine blade rotation on triggering lightning: An experimental study," *Energies*, vol. 9, no. 12, p. 1029, 2016.
- [127] Y. Hernández *et al.*, "A First Approach In the Modeling of Failures in Rotor Blades Caused by Lightning Strikes," presented at the 30th International Conference on Lightning Protection, in 30th International Conference on Lightning Protection. Cagliari, Italy, Sep. 2010, p. 7. doi: 10.1109/ICLP.2010.7845942.
- [128] P. Sul, "Concept of a modern method of determining lightning protection zones based on the field computational method," *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*, vol. 1, pp. 29–31, Jul. 2015, doi: 10.15199/48.2015.07.09.
- [129] T. Naka *et al.*, "Study on Lightning Protection Methods for Wind Turbine Blades," *IEEE Transactions on Power and Energy*, vol. 125, no. 10, pp. 993–999, 2005, doi: 10.1541/ieejpes.125.993.
- [130] V. Cooray, V. Rakov, and N. Theethayi, "The lightning striking distance—Revisited," *Journal of Electrostatics*, vol. 65, no. 5, pp. 296–306, May 2007, doi: 10.1016/j.elstat.2006.09.008.
- [131] J. Jonkman, S. Butterfield, W. Musial, and G. Scott, "Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development," National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States), NREL/TP-500-38060, Feb. 2009. doi: 10.2172/947422.
- [132] A. Younes, A. Mimouni, and A. M. Sandid, "Effect of Receptor Forms on Wind Turbine Lightning Protection System for Different Positions of the Lightning Step Leader," *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, vol. 18, no. 6, Art. no. 6, Dec. 2023, doi: 10.15866/iree.v18i6.23859.
- [133] A. Younes and A. Mimouni, "Comparison of various receivers in wind turbines for the Lightning Protection system," in *2022 2nd International Conference on Advanced Electrical Engineering (ICAEE)*, Oct. 2022, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICAEE53772.2022.9962047.
- [134] Y. Wang and O. Zhupanska, "Estimation of the electric fields and dielectric breakdown in non-conductive wind turbine blades subjected to a lightning stepped leader," *Wind Energy*, vol. 20, pp. 927–942, Nov. 2016, doi: 10.1002/we.2071.
- [135] S. ARINAGA, "Experimental study on lightning protection methods for wind turbine blades," *Proceedings of 28th International Conference on Lightning Protection (ICLP 2006)*. Kanazawa, pp. 1493–1496, 2006.
- [136] W. Arif, Q. Li, Z. Guo, M. Aizaz, Y. Ma, and W. H. Siew, *Experimental Study on Interception Failure of Lightning Protection System of Wind Turbine Blade*. 2017. doi: 10.1109/ICET.2017.8281723.

- [137] C. Ruzzo, V. Fiamma, M. Collu, G. Failla, V. Nava, and F. Arena, "On intermediate-scale open-sea experiments on floating offshore structures: Feasibility and application on a spar support for offshore wind turbines," *Marine Structures*, vol. 61, pp. 220–237, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.marstruc.2018.06.002.
- [138] A. M. Abd-Elhady, N. A. Sabiha, and M. A. Izzularab, "Experimental evaluation of air-termination systems for wind turbine blades," *Electric Power Systems Research*, vol. 107, pp. 133–143, Feb. 2014, doi: 10.1016/j.epsr.2013.10.002.
- [139] Z. Guo, Q. Li, W. Yu, W. Arif, Y. Ma, and W. H. Siew, "Experimental Study on Lightning Attachment Manner to Rotation Wind Turbine Blade," in *2018 34th International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Sep. 2018, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICLP.2018.8503300.
- [140] A. Younes and A. Mimouni, "The impact of changing lightning step leader position on the performance of LPS (lightning protection system) for wind turbines," in *12th National Conference on High Voltage*, Sidi-Bel-Abbès, 2022.
- [141] A. Younes and A. Mimouni, "The effect of changing wind turbine blade angles on lightning protection system performance," in *6th International Conference on Electrical Engineering*, Oran, 2023.
- [142] A. Younes and A. Mimouni, "The impact of changing rotation angles of the wind turbine blades on the performance of lightning protection system," in *the computational and applied physics symposium*, Khemis-Miliana, 2023.
- [143] A. Younes and A. Mimouni, "Investigate the impact of the receiver in protecting two wind turbines from lightning; one gets struck by lightning when the blades position of the other's is modified," in *1st international conference on advances in electronics, control and computing technologies*, Mascara, 2023.
- [144] B. M. Radičević and M. S. Savić, "Experimental Research on the Influence of Wind Turbine Blade Rotation on the Characteristics of Atmospheric Discharges," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 26, no. 4, pp. 1181–1190, Dec. 2011, doi: 10.1109/TEC.2011.2162240.