

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
École Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département d'Électrotechnique

Mémoire de Fin d'Étude

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État en Électrotechnique

Présenté par :
CHEBATA Ghania

Simulation 3D de la décharge de foudre descendante négative sur un sol hétérogène

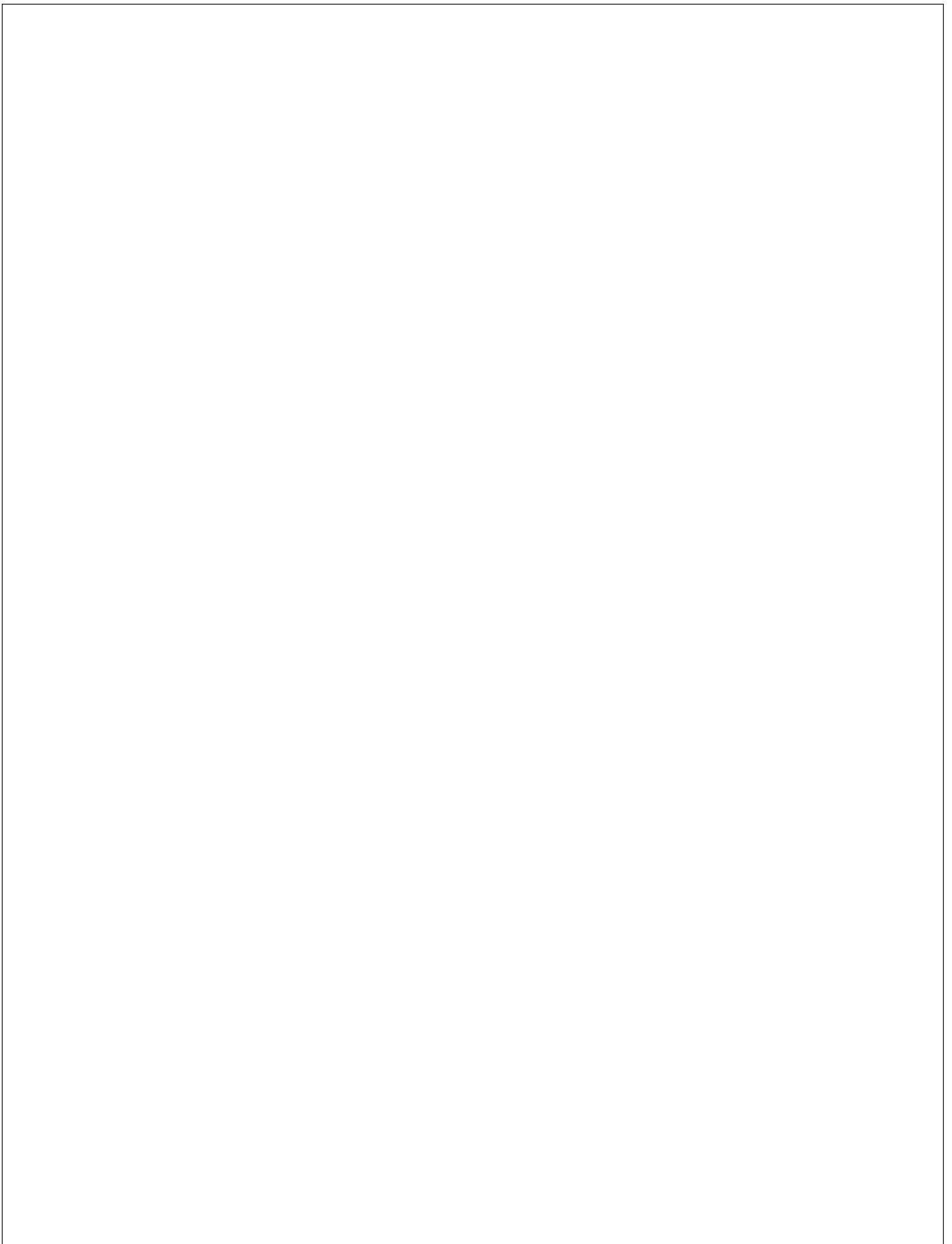
Encadreurs : Promoteur : MEKHALDI Abdelouahab

Co-Promoteur : NACEREDDINE Kamal

Président de Jury : TEGUAR Madjid

Examineur : BENMAHAMED Youcef

ENP 2024



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
École Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département d'Électrotechnique

Mémoire de Fin d'Étude

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État en Électrotechnique

Présenté par :
CHEBATA Ghania

Simulation 3D de la décharge de foudre descendante négative sur un sol hétérogène

Encadreurs : Promoteur : MEKHALDI Abdelouahab
Co-Promoteur : NACEREDDINE Kamal

Président de Jury : TEGUAR Madjid

Examineur : BENMAHAMED Youcef

ENP 2024

ملخص

في إطار هذه الدراسة، تم إجراء محاكاة ثلاثية الأبعاد مفصلة لدراسة التوزيع المكاني للشحنة الكهربائية والحقل الكهربائي على الأرض الناتج عن البرق النازل السلبي. تم اختيار برنامج **MATLAB** خصيصًا لقدراته على نمذجة هذا الظاهرة المعقدة بدقة. باستخدام طريقة العناصر المحدودة لحل معادلة بواسون، هدفت الدراسة إلى الحصول على تمثيل مرئي مفصل لتغيرات الشحنة الكهربائية والحقل الكهربائي على الأرض في كل مرحلة من مراحل العملية، لا سيما عندما يقترب القائد من الأرض. كما سعت الدراسة إلى تقييم تأثير هذه التغيرات على المنشآت الشمسية، التحليل المتعمق الذي نتج عن ذلك أظهر الأهمية البالغة لأخذ زاوية ميل قناة البرق في عين الاعتبار عند تصميم تدابير الحماية من البرق للمنشآت الشمسية.

كلمات مفتاحية:

البرق، البرق السلبي الهابط، الحماية من الصواعق، النموذج الكهروستاتيكي، معادلة بواسون، طريقة العناصر المحدودة (FEM)، برنامج MATLAB، التركيبات الكهروضوئية.

Summary

As part of this study, the objective was to carry out a detailed 3D simulation to study the spatial distribution of the electric charge and electric field on the ground generated by negative downward lightning. MATLAB software was specifically selected for its ability to accurately model this complex phenomenon. Using the finite element method to solve the Poisson's equation, the study aimed to obtain a detailed visual representation of the variations in electric charge and electric field on the ground at each stage of the process, particularly as the tracer approaches of the ground.

The study also sought to assess the impact of these variations on photovoltaic (PV) installations. The resulting in-depth analysis highlighted the crucial importance of considering the inclination angle of the lightning channel in the design of lightning protection measures for PV installations.

Key-words:

Lightning, Negative downward lightning, Lightning protection, Electrostatic model, Poisson's equation, Finite element method (FEM), MATLAB software, Photovoltaic installations.

Résumé

Dans le cadre de cette étude, l'objectif était de réaliser une simulation 3D détaillée pour étudier la distribution spatiale de la charge électrique et du champ électrique au sol générés par la foudre descendante négative. Le logiciel MATLAB a été spécifiquement sélectionné pour sa capacité à modéliser de manière précise ce phénomène complexe. En utilisant la méthode des éléments finis pour résoudre l'équation de Poisson, l'étude visait à obtenir une représentation visuelle détaillée des variations de charge électrique et de champ électrique sur le sol à chaque étape du processus, notamment lorsque le traceur s'approche du sol.

L'étude a également cherché à évaluer l'impact de ces variations sur les installations photovoltaïques (PV). L'analyse approfondie qui en a découlé a mis en évidence l'importance

cruciale de prendre en compte l'angle d'inclinaison du canal de foudre dans la conception des mesures de protection contre la foudre pour les installations PV.

Mots-clés :

Foudre, Foudre négative descendante, Protection contre la foudre, Modèle électrostatique Équation de Poisson, Méthode des éléments finis (MEF), Logiciel MATLAB, Installations photovoltaïques.

Remerciement

Je remercie « Allah » pour la volonté et la santé qu'Il m'a accordées afin d'achever ce mémoire et pour l'accomplissement de ma formation en électrotechnique.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon encadreur Monsieur A. MEKHALDI, ainsi qu'à mon Co-Promoteur, Monsieur K. NACEREDDINE, pour leurs précieux conseils, leur confiance, et leur soutien indéfectible. Grâce à eux, j'ai pu mener à bien ce mémoire.

Je remercie également très sincèrement les membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en examinant et en évaluant mon travail. Leur participation et leurs critiques constructives sont grandement appréciées.

Un grand remerciement va à tous les enseignants du département d'électrotechnique pour leur dévouement et leur enseignement tout au long de mon parcours académique. Leur expertise et leur passion pour la matière ont été une source d'inspiration constante.

À tous, je dis merci.

Dédicace

Je dédie ce mémoire :

À mes parents, pour leur amour inconditionnel, leur soutien indéfectible et leurs sacrifices constants. Votre encouragement et votre foi en moi ont été ma plus grande source de motivation.

À mes frères et sœurs, pour leur compréhension, leur patience et leur soutien tout au long de ce parcours. Vous avez toujours été là pour moi, et je vous en suis infiniment reconnaissant.

À mes amis, Cerine Saoudi et Ilyes Ouamrane, pour leur soutien moral, leur aide précieuse et leurs encouragements constants. Votre amitié et votre présence ont été inestimables.

Enfin, à toutes les personnes qui ont cru en moi et m'ont soutenu d'une manière ou d'une autre.

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale 14

CHAPITRE I: Compréhension du Phénomène Physique de la Foudre, de ses Effets et des Normes de Protection 15

1.1 Introduction	16
1.2 Phénomène physique de la foudre :	16
1.3 Type de coup de foudre :	17
1.3.1 Les éclairs intra-nuageux et inter-nuageux	17
1.3.2 Coup de foudre nuage-sol:	17
1.4 Coup de foudre descendantes négativement :	19
1.5 Paramètre électrique de la foudre:	20
1.5.1 Forme du courant d'arc en retour :	20
1.5.2 Forme d'onde de surtension :	20
1.5.3 L'instant de début de l'impulsion:	20
1.5.4 Le temps de décroissance du courant de foudre :	21
1.5.5 Amplitude de courant :	21
1.6 Effets destructeurs de la foudre:	22
1.6.1 Conséquences catastrophiques pour les personnes ou les animaux :	22
1.6.2 Les incendies:	23
1.6.3 Destruction d'équipements / interruption de service:	23
1.7 Protection contre la foudre :	23
1.7.1 Principe de base de la protection contre la foudre:	24
1.7.2 Protection des équipements et des services :	24
1.7.3 Protection contre les courants de retour :	24
1.7.4 Conception et installation conformes aux normes :	24
1.8 Protection contre la foudre/ modèle électrogéométrique :	25
1.8.1 Distance d'amorçage :	25
1.8.2 Zone de protection :	26
1.8.3 Surface de capture :	28
1.9 Norme de protection contre la foudre :	28
1.10 Protection des équipements électroniques de puissance:	29
1.11 Conclusion	30

CHAPITRE II: Modèle de simulations de la foudre 32

2.1 Introduction:	33
2.2 Modèles de simulation de la foudre :	33
2.2.1 Les modèles basés sur la dynamique des gaz:	33
2.2.2 Les modèles électromagnétiques	33
2.2.3 Les modèles des circuits distribués:	34
2.2.4 Les modèles d'ingénierie	34
2.3 Équations et Modèles Électromagnétiques	34
2.3.1 les équations de Maxwell:	34
2.3.2 Modèles Électromagnétiques	36
2.4 Résolution des Équations Électromagnétiques par la Méthode des éléments Finis	39
2.4.1 Équations aux dérivées partielles	39
2.4.2 Méthodes de résolution	40
2.4.3 Méthode des éléments finis (MEF) et son principe fondamental :	41
2.5 Conclusion	52

CHAPITRE III: Simulation 3D de la foudre descendante négative avec la PDE Toolbox de MATLAB 53

3.1 Introduction	54
3.2 Création de la géométrie	54
3.3 Définition des Conditions aux Limites:	58
3.4 Mise en place des coefficients PDE :	59
3.5 Génération du maillage	60
3.6 Résolution Numérique	61
3.7 Visualisation des Résultats	61
3.8 Résultats et Analyse	75
3.9 Comparaison des résultats obtenus pour leader incliné et verticale	83
3.10 Conclusion	88

CHAPITRE IV: Application à la protection des installations PV 89

4.1 Introduction:	90
4.2 Centrales photovoltaïques	90
4.3 Schéma type d'une installation PV de 1MW	91
4.4 Concept de protection des installations PV	92
4.4.1 Protection contre le foudroiement direct:	93
4.4.2 Protection Contre la Propagation du Courant de Foudre:	93
4.4.3 Protection contre les champs électromagnétiques	94

4.5 Étude de l'influence de l'angle d'inclinaison du canal de foudre sur une installation photovoltaïque	94
4.6 Protections des installations PV en fonctions de points de frappe de foudre	98
4.7 Conclusion	98
CONCLUSION GENERALE	100
RECHERCHES BIBLIOGRAPHIQUES	103
Annexe A: Norme CEI-62305 / NFPA 780	106
Annexe B: Calcul Parallèle en MATLAB	125

Liste des Figures

Figure 1-1 : les éclairs intra-nuageux/inter-nuageux	17
Figure 1-2 : Photo d'une foudre descendante : Photographie d'un éclair descendant négatif faite par Daniel Gauvin en février 2014 dans l'Hérault.	19
Figure 1-3 : Forme du courant de la foudre[8]	19
Figure 1-4 : Forme d'onde de surtension[9]	20
Figure 1-5 : Forme d'onde de choc normalisé par la CEI	20
Figure 1-6 : Distribution Statistique des coups de foudre[10]	21
Figure 1-7 : Montée en potentiel des terres	22
Figure 1-8 : une maison touchée par la foudre	23
Figure 1-9 : Point d'impact d'une structure au sol	25
Figure 1-10 : Zone de protection	26
Figure 1-11 : Sections à travers la zone de protection d'une seule tige verticale	27
Figure 1-12 : La longueur de la zone de protection à une hauteur h_x	28
Figure 1-13 : Zone de capture	28
Figure 2-1 :Méthode de résolution EDP	41
Figure 2-2 :Un domaine d'étude discrétisé en Élément finis	41
Figure 2-3 :Maillage utilisé pour obtenir une solution bidimensionnelle d'une équation magnétostatique obtenue par éléments finis (les lignes donnent la direction du champ et la couleur son intensité)	42
Figure 2-4 :Modèle de simulation avec de nombreux éléments de contact avec ANSYS	44
Figure 2-5 :Modèle de simulation avec ABAQUS	44
Figure 2-6 :Modèle de simulation avec COMSOL	45
Figure 2-7 : Modèle de simulation avec SolidWorks	45
Figure 2-8 : Modèle de simulation avec MATLAB	46
Figure 2-9 :FEA avec MATLAB	49
Figure 2-10 :Une triangulation de Delaunay avec les cercles circonscrits en gris	51
Figure 3-1 : Géométrie représente l'air et la base d'un nuage orageux	55
Figure 3-2 : Géométrie représente l'air et la base d'un nuage orageux	55
Figure 3-3 :Géométrie inclue l'air et un nuage orageux(partie chargé négativement et partie chargé positivement)	56
Figure 3-4 : Géométrie incluant l'air et un nuage orageux (partie chargée négativement et partie chargée positivement) avec zoom sur la région du leader tortueux	57
Figure 3-5 : Géométrie incluant l'air et un nuage orageux (partie chargée négativement et partie chargée positivement) avec zoom sur la région du leader rectiligne verticale	58
Figure 3-6 : Maillage du domaine	61
Figure 3-7 : Distribution spatial du potentiel électrique	62

Figure 3-8 : Lignes équipotentielles avant l'apparition de leader descendant négative pour une coupe à $Y=0$	63
Figure 3-9 : Lignes équipotentielles pour canal ionisé rectiligne vertical situé à une hauteur de 3000 mètres au-dessus du sol	63
Figure 3-10 : Lignes équipotentielles pour canal ionisé rectiligne vertical situé à une hauteur de 2000 mètres au-dessus du sol	64
Figure 3-11 : Lignes équipotentielles pour canal ionisé rectiligne vertical situé à une hauteur de 1000 mètres au-dessus du sol	64
Figure 3-12 : Lignes équipotentielles pour canal ionisé rectiligne vertical situé à une hauteur de 100 mètres au-dessus du sol	65
Figure 3-13 : Lignes équipotentielles pour canal ionisé rectiligne incliné situé à une hauteur de 3000 mètres au-dessus du sol pour une coupe $Y=0$	65
Figure 3-14 : Lignes équipotentielles pour canal ionisé rectiligne incliné situé à une hauteur de 2000 mètres au-dessus du sol pour une coupe $Y=0$.	66
Figure 3-15 : Lignes équipotentielles pour canal ionisé rectiligne incliné situé à une hauteur de 1000 mètres au-dessus du sol pour une coupe $Y=0$	66
Figure 3-16 : Lignes équipotentielles pour canal ionisé rectiligne incliné situé à une hauteur de 100 mètres au-dessus du sol pour une coupe $Y=0$.	67
Figure 3-17 : Lignes équipotentielles pour un canal ionisé rectiligne incliné situé à une hauteur de 100 mètres au-dessus du sol pour des coupes à $Z=100m, 500m, 1000m, 2000m, 3000m$	67
Figure 3-18 :Lignes de champ électrique avant l'apparition de leader descendant	68
Figure 3-19 :Lignes de champ électrique pour un canal ionisé rectiligne vertical situé à une hauteur de 3000 mètres au-dessus du sol	69
Figure 3-20 :Lignes de champ électrique pour un canal ionisé rectiligne vertical situé à une hauteur de 2000 mètres au-dessus du sol	69
Figure 3-21 :Lignes de champ électrique pour un canal ionisé rectiligne vertical situé à une hauteur de 1000 mètres au-dessus du sol	70
Figure 3-22 : Lignes de champ électrique pour un canal ionisé rectiligne vertical situé à une hauteur de 100 mètres au-dessus du sol	71
Figure 3-23 : Lignes de champ électrique pour un canal ionisé rectiligne incliné situé à une hauteur de 3000 mètres au-dessus du sol	72
Figure 3-24 : Lignes de champ électrique pour un canal ionisé rectiligne incliné situé à une hauteur de 2000 mètres au-dessus du sol	73
Figure 3-25 : Lignes de champ électrique pour un canal ionisé rectiligne incliné situé à une hauteur de 1000 mètres au-dessus du sol	74
Figure 3-26 :Lignes de champ électrique pour un canal ionisé rectiligne incliné situé à une hauteur de 100 mètres au-dessus du sol	75
Figure 3-27 :La distribution du champ électrique le long d'un leader vertical de longueur	78
Figure 3-28 :La distribution du champ électrique le long d'un leader vertical de longueur	79

Figure 3-29 : Répartition des vecteurs de champ électrique sur le sol pour un canal ionisé rectiligne incliné au dessus du sol avec une hauteur de 3000 mètres	80
Figure 3-30 : Répartition des vecteurs de champ électrique sur le sol pour un canal ionisé rectiligne incliné au dessus du sol avec une hauteur de 100 mètres	80
Figure 3-31 : Répartition des vecteurs de champ électrique sur le sol pour un canal ionisé rectiligne Verticale au dessus du sol avec une hauteur de 3000 mètres	81
Figure 3-32 : Répartition des vecteurs de champ électrique sur le sol pour un canal ionisé rectiligne Verticale au dessus du sol avec une hauteur de 100 mètres	81
Figure 3-33 : Variation du Champ Électrique pour une Région de Mesure située aux Coordonnées (0,0,0) pour Différents Angles d'Inclinaison	82
Figure 3-34 : champ électrique sur le sol sous la pointe d'un leader vertical et sur la pointe situé à une hauteur de 3000 mètres au-dessus du sol	84
Figure 3-35 : champ électrique sur le sol sous la pointe d'un leader vertical et sur la pointe situé à une hauteur de 2000 mètres au-dessus du sol	84
Figure 3-36 : champ électrique sur le sol sous la pointe d'un leader vertical et sur la pointe situé à une hauteur de 1000 mètres au-dessus du sol	85
Figure 3-37 : champ électrique sur le sol sous la pointe d'un leader vertical et sur la pointe situé à une hauteur de 100 mètres au-dessus du sol	85
Figure 3-38 : champ électrique sur le sol sous la pointe d'un leader incliné et sur la pointe situé à une hauteur de 3000 mètres au-dessus du sol	86
Figure 3-39 : champ électrique sur le sol sous la pointe d'un leader incliné et sur la pointe situé à une hauteur de 2000 mètres au-dessus du sol	86
Figure 3-40 : champ électrique sur le sol sous la pointe d'un leader incliné et sur la pointe situé à une hauteur de 1000 mètres au-dessus du sol	87
Figure 3-41 : champ électrique sur le sol sous la pointe d'un leader incliné et sur la pointe situé à une hauteur de 100 mètres au-dessus du sol	87
Figure 4-1 : La centrale solaire de Cestas (Gironde) édiflée sur 300 ha	91
Figure 4-2 : Le schéma d'une centrale photovoltaïque de 1 MW	92
Figure 4-3 : Un système de protection des installations PV externe contre la foudre	93
Figure 4-4 : Géométrie représentant une centrale solaire de 1 MW	94
Figure 4-5 : Analyse des champs électriques pour un angle d'inclinaison de 15° du leader près d'une centrale photovoltaïque	95
Figure 4-6 : Analyse des champs électriques pour un angle d'inclinaison de 10° du leader près d'une centrale photovoltaïque	95
Figure 4-7 : Analyse des champs électriques pour un angle d'inclinaison de 5° du leader près d'une centrale photovoltaïque	96
Figure 4-8 : Analyse des champs électriques pour un canal ionisé vertical directement au-dessus d'une centrale photovoltaïque	96
Figure A-1 : Type de pertes et risques correspondants dus à différents types de dommages [14].	110

Figure A-2:Procédure pour la décision du besoin de protection et pour le choix des mesures de protection[14].	112
Figure A-3:Procédure d'évaluation des impacts économiques des mesures de protection[14]	113
Figure A-4:Liaison équipotentielle dans une structure avec armature en acier[15]	116
Figure A-5:SPF composants[15]	117
Figure A-6:Exemple de réseau de mise à la terre tridimensionnel constitué du réseau d'équipotentialité interconnecté avec le réseau de prises de terre[16]	118
Figure A-7:Situation de l'IEMF due à un impact de foudre[16]	119
Figure A-8:Surtension entre un conducteur actif la barre équipotentielle[16]	120

Liste des tableaux

Table 4-1 :Correspondance entre puissance et surface d'une ferme solaire	91
Table 2 : Dommages et pertes en divers points d'impact de la foudre	107
Table 3 : valeurs maximales des paramètres de foudre correspondant aux niveaux de protection contre la foudre[6]	108
Table 4 : valeurs minimales des paramètres de foudre et rayon de sphère fictive associé correspondant aux niveaux de protection contre la foudre[6]	109

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

La foudre est un effet spectaculaire de décharge électrique naturelle, qui se produit habituellement pendant les orages et qui découle de la séparation de charges électriques au sein des nuages d'orage et entre les nuages et la terre. On peut observer cette décharge rapide d'énergie sous la forme d'un éclair, souvent accompagné de tonnerre[1].

Les travaux de recherche sur l'amélioration de la protection contre la foudre ont principalement porté sur l'explication du phénomène physique de la décharge électrique. Grâce à ces études, une méthode a été mise au point afin de calculer la répartition du champ électrique au sol. Cette approche s'appuie sur une nouvelle conception du mécanisme d'action de la foudre et est réalisée à l'aide d'un modèle dit « électromagnétique ». Ce modèle représente une méthode cohérente pour prévenir la foudre[2].

Dans notre étude, une simulation 3D de la foudre est réalisée en utilisant le modèle électromagnétique, plus précisément l'électrostatique, afin de améliorer notre compréhension de la répartition des charges spatiales lorsque le canal ionisé chargé négativement se manifeste avant le déclenchement de la foudre. Cela nous permet également d'analyser la distribution du champ électrique au sol pour identifier les points de frappe de la foudre.

Les chapitres principaux de notre sujet sont divisés en quatre . Le premier chapitre introduit les concepts fondamentaux liés à la foudre, en se concentrant sur les coups de foudre descendants négatifs. Il explore les effets destructeurs de la foudre et les méthodes de protection, en mettant l'accent sur les normes de protection. La protection des équipements électroniques de puissance est également abordée.

Le deuxième chapitre présente les modèles théoriques utilisés pour simuler la foudre, en mettant l'accent sur le modèle électromagnétique et la résolution des équations électromagnétiques par la méthode des éléments finis (FEM) en utilisant la boîte à outils PDE de MATLAB.

Le troisième chapitre décrit la création de la géométrie représentant le problème physique de la foudre, la définition des conditions aux limites, la mise en place des coefficients PDE, la génération du maillage, la résolution numérique et la visualisation des résultats. Une analyse des résultats obtenus pour des leaders inclinés et verticaux est également effectuée.

Le quatrième chapitre de notre étude se concentre sur l'application des concepts étudiés à la protection des installations photovoltaïques (PV). Il présente le schéma type d'une installation PV de 1 MW et explore le concept de protection des installations PV contre la foudre. L'influence de l'angle d'inclinaison du canal de foudre sur une installation photovoltaïque est examinée, ainsi que les mesures de protection des installations PV en fonction des points de frappe de la foudre.

1. CHAPITRE I
Compréhension du Phénomène Physique
de la Foudre, de ses Effets et des Normes
de Protection

1.1 Introduction

La foudre, ce phénomène électrique spectaculaire et parfois dévastateur, a depuis longtemps captivé l'attention des chercheurs à travers le monde. Au-delà de son aspect impressionnant, la foudre suscite un intérêt scientifique profond en raison des nombreux défis et opportunités qu'elle offre pour la recherche.

1.2 Phénomène physique de la foudre :

La foudre est un phénomène naturel impressionnant et potentiellement dangereux qui résulte de l'accumulation et de la décharge de charges électriques dans l'atmosphère, souvent associée à des nuages d'orage. Pour qu'un orage prend naissance et se forme, il est nécessaire que l'air chaud et humide près de la surface soit déséquilibré par rapport à l'air froid en altitude, déclenchant ainsi son ascension. Lorsque l'air chaud s'élève, il se refroidit en prenant de l'altitude selon le principe d'Archimède, entraînant une augmentation de son humidité relative jusqu'à atteindre son point de saturation, ce qui provoque la condensation et la formation d'un nuage, généralement sous forme de cumulus fractus[3].

Malgré le refroidissement avec l'altitude, l'air chaud reste plus chaud que son environnement, ce qui continue de soutenir son ascension. Le nuage évolue ensuite du stade de cumulus fractus au stade de cumulus humilis, puis à des stades plus avancés tels que le cumulus mediocris et le cumulus congestus. Lorsque le nuage atteint la tropopause et continue de croître, il se transforme en cumulonimbus, marquant le début de l'orage. À l'intérieur de nuages d'orage Les collisions entre différentes particules de glace s'accompagnent d'échanges de charges électriques dont la polarité dépend de la température. la plus petite particule (un cristal de glace) emporte une charge positive alors que la plus grosse (agrégat givré ou grésil) emporte une charge négative. Si la température est supérieure à -15°C , la polarité s'inverse : le petit cristal emporte une charge négative, alors la grosse particule emporte une charge positive. Comme les petits cristaux sont transportés en altitude par les courants ascendants alors que les plus gros chutent vers la surface, une sédimentation des charges apparaît progressivement. La séparation progressive des charges électriques produit dans le nuage un champ électrique d'intensité croissante, Lorsque l'intensité du champ électrique dépasse ainsi quelques centaines de kV/m, l'air devient localement conducteur et des petites étincelles porteuses de charges électriques se développent spontanément depuis les extrémités des hydrométéores[4]. Ces petites étincelles de foudre se réunissent pour former des précurseurs, qui s'étirent sur quelques mètres de longueur. À l'intérieur du nuage, ces précurseurs bondissent par segments d'environ une centaine de mètres, parcourus en quelques microsecondes. Leur progression est erratique, Lorsque des précurseurs portant des charges opposées se rencontrent, leur annulation brusque engendre un courant électrique intense le long du canal ionisé . Certains précurseurs de foudre, particulièrement énergétiques, continuent leur progression en dehors du nuage de manière saccadée. À leur extrémité, ils peuvent induire une augmentation du champ électrique, formant des pointes. Lorsque ces précurseurs provenant du nuage rencontrent ceux s'élevant depuis la surface, la neutralisation de la charge électrique entre

le nuage et la terre permet le passage d'un courant d'une intensité importante entraîne un éclair nuage-sol, De nouvelles neutralisations peuvent se produire jusqu'à une dizaine de fois le long du canal ionisé formé, créant ce que l'on appelle des arcs en retour. Ces arcs en retour ont une durée totale inférieure à une seconde et sont reconnaissables visuellement par la présence de nombreux éclairs palpitant[5].

1.3 Type de coup de foudre :

Lorsque des nuages d'orage se forment, ils accumulent des charges électriques à différents niveaux, créant ainsi des disparités de potentiel entre leur sommet, leur centre et leur base. Lorsque cette différence de potentiel devient suffisamment importante, elle peut provoquer une rupture dans l'air entre ces zones chargées, déclenchant ainsi des éclairs. Ces éclairs peuvent se produire à l'intérieur d'un même nuage ou entre des nuages adjacents.

1.3.1 Les éclairs intra-nuageux et inter-nuageux

sont plus probables car les distances entre les différentes zones chargées sont plus courtes que la distance entre ces zones et le sol. Cependant, à mesure que l'orage se développe verticalement et que les charges électriques s'intensifient, les éclairs nuage-sol deviennent plus fréquents . Ainsi, le changement de proportion entre les éclairs intra-nuageux/inter-nuageux et les éclairs nuage-sol donne des indications sur l'évolution et l'intensification de l'orage[6].

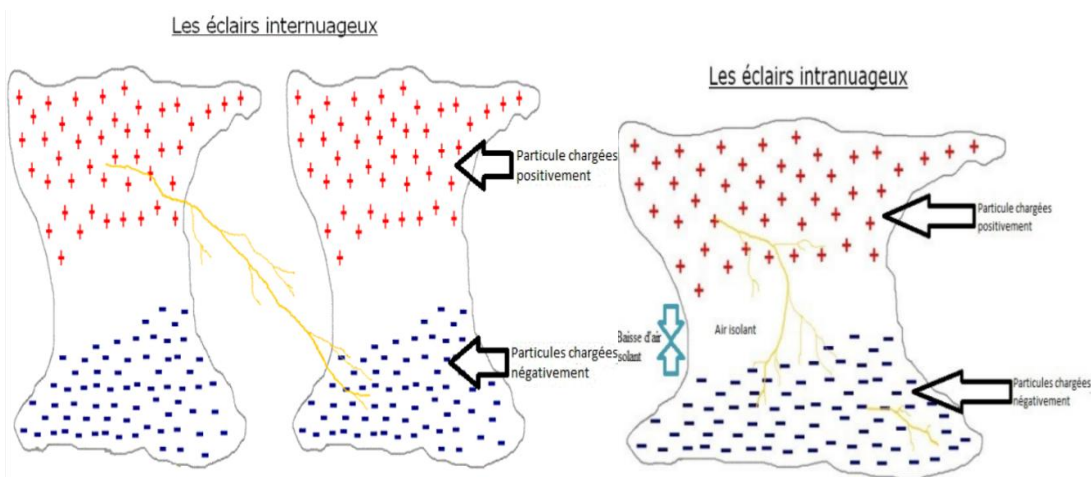


Figure 1-1 : les éclairs intra-nuageux/inter-nuageux

1.3.2 Coup de foudre nuage-sol:

Il existe deux types de foudre nuage-sol : soit descendant (sommet du nuage vers le sol) ou soit ascendant (sol vers base du nuage). Le type descendant est le plus fréquent mais un basculement de ce type vers le type ascendant est souvent indicatif de temps violent car le nuage est alors particulièrement développé. Le type ascendant se produit également souvent à l'avant du nuage proprement dit, car il part de l'enclume ce qui peut surprendre les gens qui se pensent à l'abri en

voyant l'orage dans le lointain. Le type ascendant est le plus fréquent dans le cas de coup de foudre sur des structures de grande hauteur (tour, pylône).

Les éclairs nuage-sol sont classés en quatre catégories selon[7] :

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

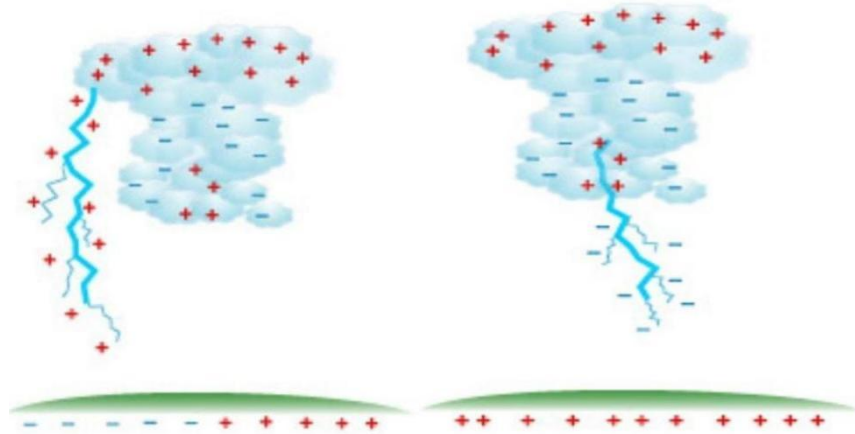


Figure A : Coup de foudre descendant positif. **Figure B** : Coup de foudre descendant négatif

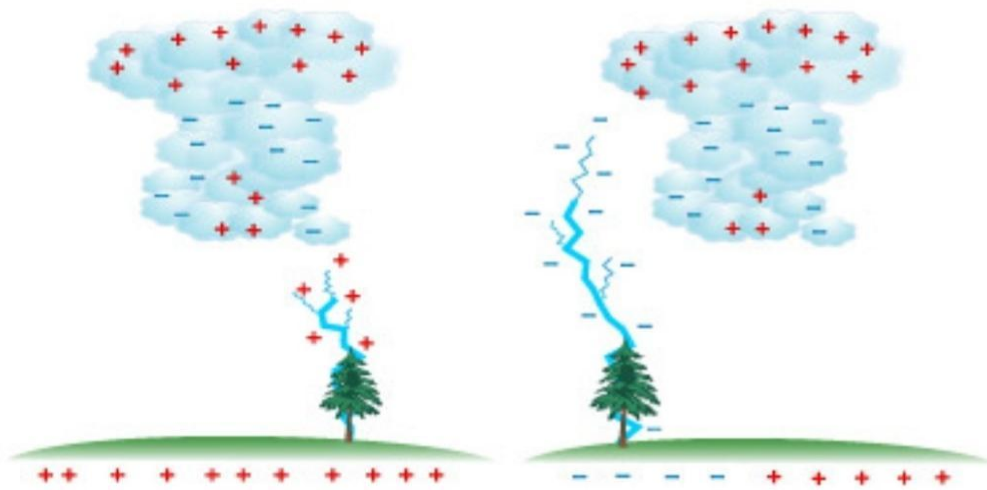


Figure C : Coup de foudre ascendant positif

Figure D : Coup de foudre ascendant négatif

Figure 1-b: Type de décharge[7]

Les plus courantes et sont déclenchées par un traceur descendant chargé négativement. Catégorie (A) représentent moins de 10% des éclairs nuage-sol, sont également déclenchés par un traceur descendant, chargé positivement (décharges positives). Les coups de foudre des catégories (C) et (D) déclenchés par des traceurs ascendants, sont plutôt rares et se produisent généralement au sommet des montagnes ou sur de longues structures[7].

1.4 Coup de foudre descendantes négativement :

Plus de 90% des coupe de foudre sont de type descendante négative :



Figure 1-2 : Photo d'une foudre descendante : Photographie d'un éclair descendant négatif faite par Daniel Gauvin en février 2014 dans l'Hérault.

Ce phénomène se caractérise par des déplacements successifs du traceur depuis la base d'un nuage jusqu'au sol (traceur par pas), formant un canal chargé négativement. Ce canal ionisé permet le déplacement des charges dans le nuage, progressant à travers des bonds lumineux successifs et créant de nouveaux canaux ionisés. À quelques dizaines de mètres au-dessus du sol, le traceur intensifie le champ électrique, déclenchant des décharges ascendantes, favorisées par l'effet de pointe des aspérités du relief. Une onde de potentiel de sol neutralise le canal du traceur, générant un arc en retour qui chauffe rapidement le canal à des milliers de degrés Kelvin, produisant un tonnerre. Des séquences d'arcs en retour peuvent suivre, avec le dernier arc associé à un fort courant qui élimine la charge résiduelle du nuage de l'ordre de 100 A qui draine la charge résiduelle du nuage[8].

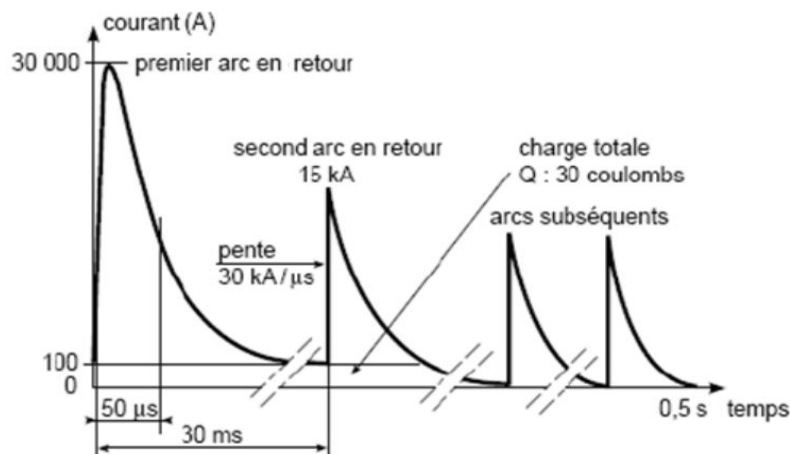


Figure 1-3 : Forme du courant de la foudre[8]

1.5 Paramètre électrique de la foudre:

1.5.1 Forme du courant d'arc en retour :

Le courant de foudre est impulsionnel et se caractérise par une valeur de crête, un front de montée jusqu'à la crête (ou temps de montée), et un temps de décroissance.

1.5.2 Forme d'onde de surtension :

La foudre est un phénomène physique qui correspond à une source de courant impulsionnel, avec une série de décharges électriques sur un court laps de temps. La forme d'onde réelle varie considérablement, avec un front de montée jusqu'à l'amplitude maximale (de 1 à 20 microsecondes) suivi d'une décroissance rapide de quelques dizaines de microsecondes. Le domaine spectral associé s'étend de 10 kHz à plusieurs MHz[9].

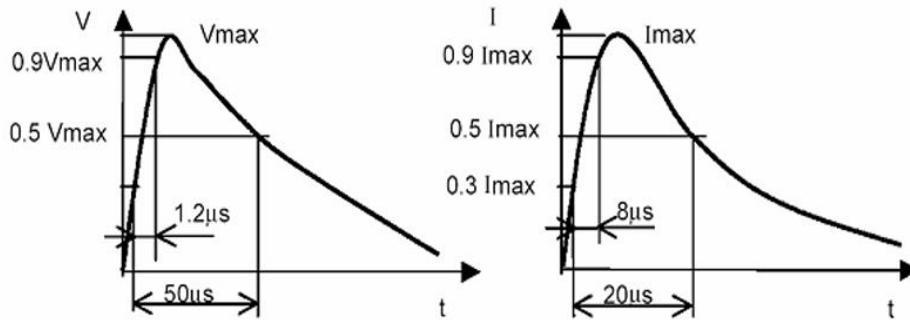


Figure 1-4 : Forme d'onde de surtension[9]

1.5.3 L'instant de début de l'impulsion:

L'instant de début de l'impulsion étant souvent malaisé à déterminer, on définit une origine et une durée de front conventionnelles .

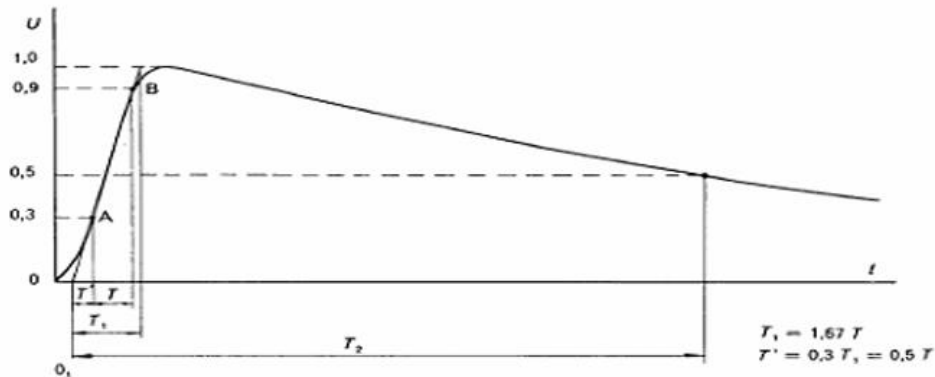


Figure 1-5 : Forme d'onde de choc normalisé par la CEI

1.5.4 Le temps de décroissance du courant de foudre :

Le temps de décroissance du courant de foudre correspond à la période entre le début de l'impulsion et le moment où l'amplitude du courant retombe à 50% de sa valeur maximale. Pour les coups négatifs, cette durée est d'environ 100 microsecondes, tandis que pour les coups positifs, elle est d'environ 1000 microsecondes.

1.5.5 Amplitude de courant :

La répartition des intensités des différents coups de foudre est représentée sur un graphique qui regroupe les données mondiales. Sur cet graphique, l'axe des abscisses représente le logarithme de l'intensité du coup de foudre (en kA), tandis que l'axe des ordonnées représente la probabilité qu'un coup de foudre dépasse une intensité donnée. Les courbes obtenues forment un faisceau de droites. La probabilité P qu'un coup de foudre dépasse une intensité I donnée est exprimée par :

$$\log(P) = 2 - I/60 \quad (1.1)$$

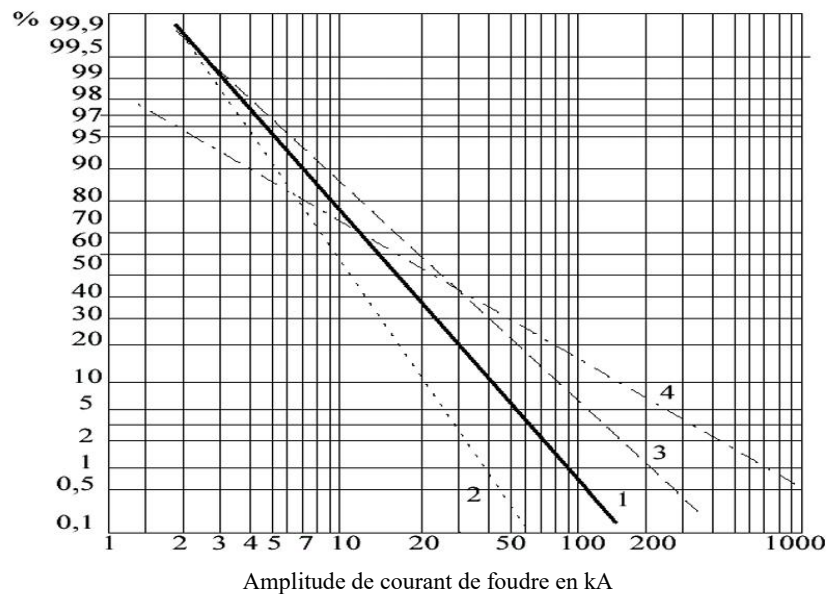


Figure 1-6 : Distribution Statistique des coups de foudre[10]

- (1) première décharge d'un coup de foudre négatif
- (2) décharge secondaire d'un coup de foudre négatif
- (3) moyenne
- (4) coups de foudre positifs

La valeur moyenne de l'intensité se situe vers 25 kA

1.6 Effets destructeurs de la foudre:

Les effets destructeurs de la foudre représentent un danger significatif pour les personnes, les biens, les équipements et les structures, soulignant ainsi l'importance cruciale de leur protection.

1.6.1 Conséquences catastrophiques pour les personnes ou les animaux :

Lorsqu'un être humain ou un animal est touché par la foudre, plusieurs types de mécanismes peuvent se produire :

Choc direct : La foudre frappe directement la tête, le point le plus haut de la personne ou de l'animal debout. Si la foudre est attirée par un objet tel qu'un parapluie ou un piolet, le courant peut traverser le corps jusqu'au sol, en sortant par les pieds s'ils sont en contact direct avec le sol. Si le courant passe par la cage thoracique, il peut affecter le cœur.

Choc latéral : Cela se produit lorsque la foudre frappe à proximité, par exemple sur un arbre, et que l'électricité se propage à travers une dérivation. Dans ce cas, l'énergie transmise est généralement moins importante. Le courant peut suivre la surface du corps, causant des brûlures.

Choc par contact avec un objet foudroyé : Si un objet touché par la foudre entre en contact avec une personne ou un animal, les points d'entrée et de sortie du courant peuvent être visibles.

Tension de pas : Ce mécanisme implique des différences de potentiel électrique autour du point d'impact de la foudre, créant des niveaux électriques différents sous les membres inférieurs (ou les quatre membres pour les animaux). Cela peut provoquer un courant à travers les membres, généralement en évitant le thorax, ce qui le rend moins dangereux.

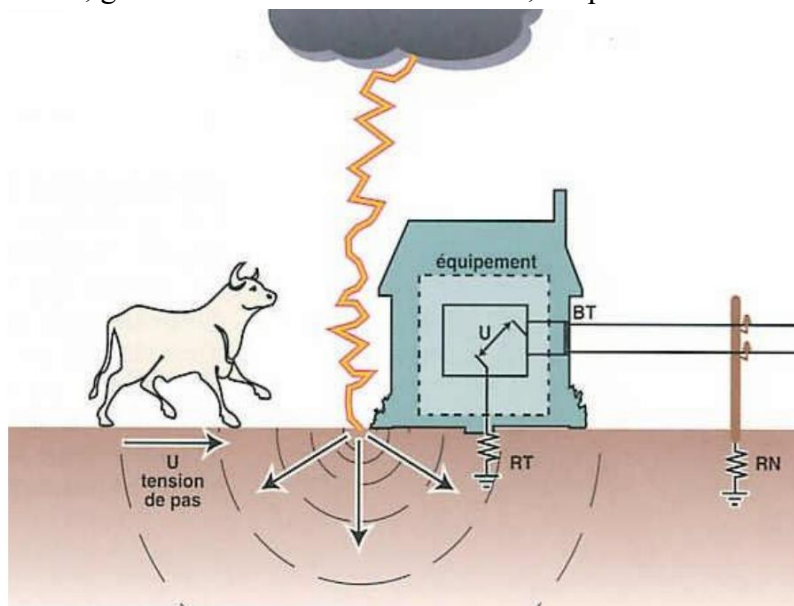


Figure 1-7 : Montée en potentiel des terres

1.6.2 Les incendies:

Le foudroiement d'une habitation ou d'un arbre en pleine forêt peut engendrer un départ de feu, qui parfois peut prendre de grandes proportions, notamment en forêt, en cas de sécheresse persistante. Les incendies sur les habitations consécutifs à une chute de foudre sont souvent la résultante d'un court-circuit électrique et d'une très grosse surtension. L'incendie peut également démarrer par foudroiement d'un matériau très inflammable (produits chimiques, paille, bois sec).



L'incendie s'est déclarée aux alentours de 17h mardi 20 juin, alors que de violents orages s'abattaient dans le secteur • © Ville de Labourse

Figure 1-8 : une maison touchée par la foudre

1.6.3 Destruction d'équipements / interruption de service:

En plus des incendies, la foudre peut causer des dommages importants aux installations électriques, quel que soit leur niveau de sophistication. Lorsqu'un éclair frappe directement une installation ou à proximité, il génère une surtension transitoire. Dans ce dernier cas, un rayonnement électromagnétique ou une augmentation du potentiel de la terre se produit. Les surtensions transitoires, parfois de plusieurs milliers de volts, endommagent partiellement ou totalement les composants électroniques ou électriques de divers équipements ou matériaux connectés aux réseaux filaires.

1.7 Protection contre la foudre :

Les effets dévastateurs du risque de foudre sur les personnes et les biens peuvent être évités grâce à une protection efficace des bâtiments et des structures. Outre les dangers d'incendie et d'explosion, les surtensions provoquées par la foudre peuvent endommager, vieillir prématurément ou faire dysfonctionner les équipements, voire causer des interruptions ou des pertes de production.

1.7.1 Principe de base de la protection contre la foudre:

Le principe de base de la protection contre la foudre est de fournir un chemin de faible résistance pour l'électricité de la foudre afin de la diriger en toute sécurité vers la terre, éloignant ainsi les risques de dommages aux structures et aux personnes. Voici les principes clés de la protection contre la foudre :

Capture de la foudre :

Les paratonnerres, ou dispositifs de capture de la foudre, sont installés sur les structures pour attirer la foudre. Ils sont conçus pour avoir une pointe acérée qui facilite l'ionisation de l'air et l'attraction de la foudre.

Conduction sécurisée :

Une fois captée, l'électricité de la foudre doit être conduite en toute sécurité vers le sol. Cela est généralement réalisé à l'aide de conducteurs de descente, qui sont des câbles métalliques épais et résistants conçus pour gérer le courant élevé de la foudre.

Mise à la terre :

À la base de la structure, les conducteurs de descente sont connectés à un système de mise à la terre adéquat. La mise à la terre fournit un chemin sûr pour l'électricité de la foudre vers le sol, où elle est dispersée en toute sécurité.

1.7.2 Protection des équipements et des services :

En plus de protéger les structures, il est également important de protéger les équipements sensibles et les services contre les surtensions induites par la foudre. Cela peut être réalisé en utilisant des dispositifs de protection contre les surtensions (Normes CEI 62305-4).

1.7.3 Protection contre les courants de retour :

Les courants de foudre peuvent également causer des dommages en remontant par les systèmes de mise à la terre ou les équipements électriques. Des dispositifs de protection appropriés doivent être installés pour minimiser ce risque.

1.7.4 Conception et installation conformes aux normes :

Tous les composants de protection contre la foudre doivent être conçus et installés conformément aux normes de sécurité applicables pour assurer une protection efficace.

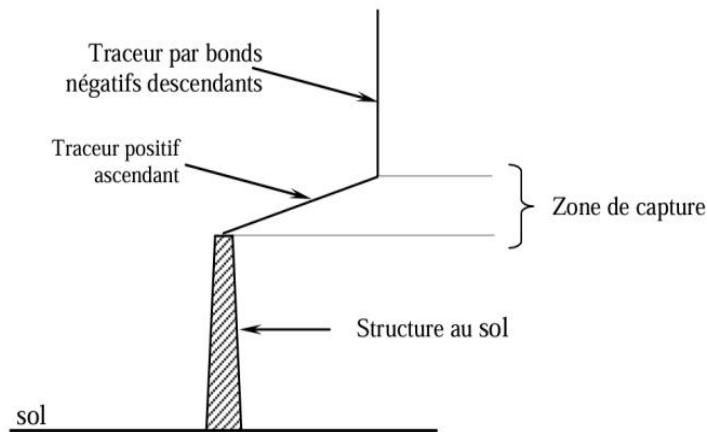


Figure 1-9 : Point d'impact d'une structure au sol

1.8 Protection contre la foudre/ modèle électro géométrique :

Les dégâts causés par la foudre ont incité des chercheurs du monde entier à développer des méthodes de protection contre ce phénomène. Ces efforts s'intègrent dans une recherche plus vaste visant à mieux comprendre la foudre et ses divers aspects.

1.8.1 Distance d'amorçage :

Un concept clé en matière de protection contre la foudre est la distance d'amorçage. Elle désigne la distance à laquelle un éclair descendant détermine son point d'impact final, après avoir atteint une certaine distance au-dessus du sol. Ce processus est influencé par l'intensification locale du champ électrique et l'émission de streamers ascendants par les structures environnantes. La charge du leader, qui est en corrélation avec le courant de foudre, détermine cette distance, d'après k.berger plus la charge est importante, plus la distance d'amorçage est grande . En accord avec d'autres chercheurs, Whitehead a proposé une expression mathématique pour calculer cette distance d'amorçage[11].

$$D = 10 I^{(2/3)} \quad (1.2)$$

D: distance d'amorçage (m)

I: valeur de crête du courant de foudre (KA)

1.8.2 Zone de protection :

Méthode de Sphère roulante:

Le modèle électrogéométrique utilise une sphère imaginaire dont la tête du traceur était le centre cette sphère fictive de rayon D pour représenter le trajet d'un éclair vers le sol, où le premier objet touché par cette sphère détermine le point d'impact de l'éclair. Pour un paratonnerre vertical, un traceur négatif se dirige vers le sol au voisinage du paratonnerre la sphère fictive associée à sa tête peut atteindre le sol suivant trois possibilités :

la tige seulement (sphère (a)), le sol uniquement (sphère (b)), ou les deux à la fois la tige seulement (sphère (c)), définissant ainsi la zone de protection.

Pour délimiter cette zone, on examine les sphères touchant à la fois la tige et le sol, dont les centres délimitent la zone d'attraction de la tige. Dans un plan perpendiculaire au sol, cette zone est une droite lorsque les rayons D sont inférieurs à h_c , mais devient une parabole à partir de :

$$D = h_c$$

Sa projection sur le sol est décrite par l'équation[3]:

$$OX = h_c \sqrt{2(D/h_c) - 1} \quad (1.3)$$

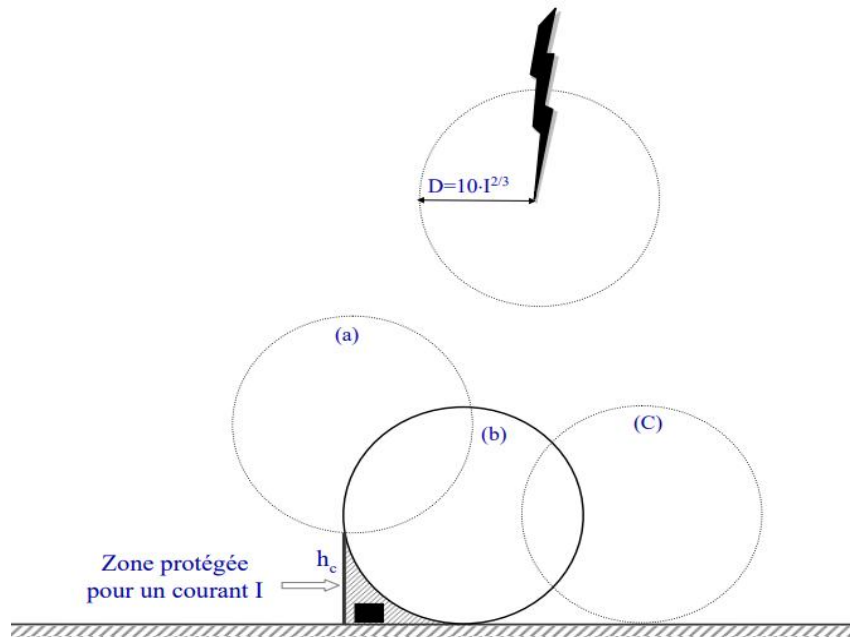


Figure 1-10 : Zone de protection

Le principe de la sphère roulante est aujourd'hui l'une des méthodes les plus couramment utilisées pour estimer les zones de protection contre la foudre , cette méthode repose sur plusieurs hypothèses simplificatrices, l'une des plus significatives étant que la distance d'impact au sol est égale à celle de la tige verticale, alors qu'en réalité la distance d'orientation de la décharge de

foudre est différente, selon l'objet à frapper . il est évident qu'une ellipsoïde devrait être utilisée, au lieu d'une sphère alors un modèle elliptique a été développé[11].

Le modèle elliptique :

Lorsque l'on considère une seule tige, sa zone de protection est générée par un ellipsoïde qui est tourné autour de la tige verticale, étant en contact permanent avec le sol et la pointe de la tige.

La représentation graphique de la zone de protection obtenue est présentée dans la figure (1-11).

les zones de protection semblent être générées par une ellipse ayant le grand demi-axe noté a, et le petit demi-axe noté b est égal à la distance d'impact au sol, D. La situation la plus courante est celle décrite dans le cas a), où h < D. Où le grand demi-axe noté a de l'ellipsoïde:

$$a = D \sqrt{\frac{S^2 - (D-h)^2}{D^2 - (D-h)^2}} \tag{1.4}$$

tandis que la distance latérale L peut être déterminé par l'expression suivante :

$$L = \sqrt{S^2 - (D - h)^2} \tag{1.5}$$

En ce qui concerne les dimensions de la zone de protection pour une seule tige verticale, les paramètres les plus significatifs sont la longueur de la zone protégée au niveau du sol, l0, et à une certaine hauteur hx . De la figure (1-11), la longueur de la zone protégée au niveau du sol est notée l01÷03, pour les trois cas analysés, et est égale à la distance latérale L. Un objet du sol, ayant une hauteur hx, sera protégé par la tige verticale, seulement s'il est placé à une distance latérale lx de la tige, comme suggéré dans la figure(1-12). il apparaît que le modèle elliptique fournit des dimensions plus grandes que la méthode de la sphère roulante, surtout dans le plan horizontal au niveau du sol .

Le modèle proposé ne peut être mis en œuvre que pour les systèmes de protection contre la foudre basés sur des paratonnerres [11].

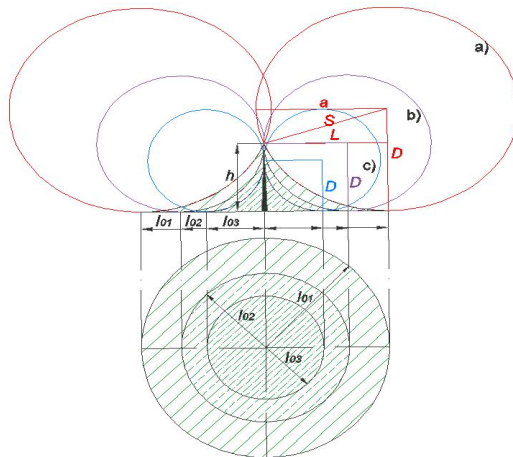


Figure 1-11: Sections à travers la zone de protection d'une seule tige verticale

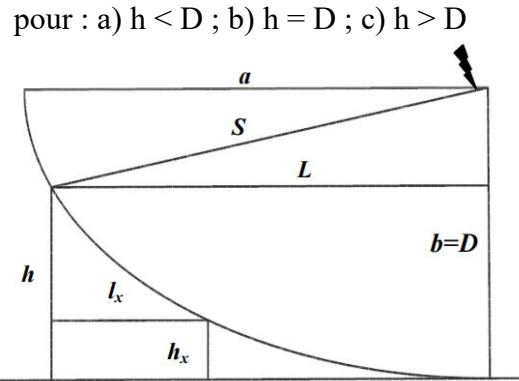


Figure 1-12: La longueur de la zone de protection à une hauteur h_x

1.8.3 Surface de capture :

La figure suivante illustre différentes sphères fictives associées à des distances d'amorçage variées, correspondant à différents courants de foudre. Lorsque la hauteur de protection H et la distance d'amorçage D sont données, le volume capté par la tige est formé d'un cône prolongé par un paraboléoïde de révolution. La surface de capture de la tige, qui constitue la base de ce volume, peut être calculée à l'aide de la formule [12]:

$$S = \pi \cdot H^2 \cdot (2(D/H) - 1) \quad (1.6)$$

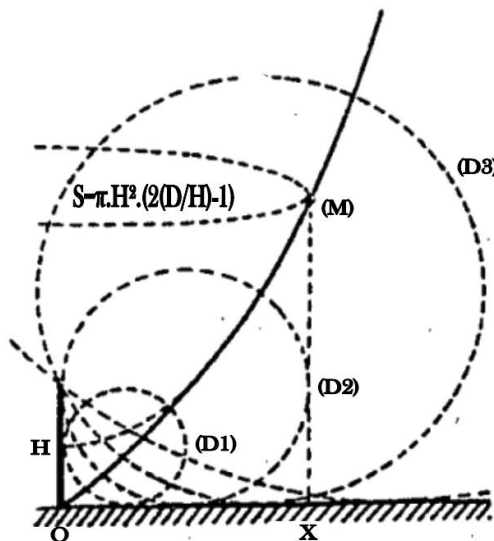


Figure 1-13 : Zone de capture

1.9 Norme de protection contre la foudre :

Il existe plusieurs normes internationales et nationales qui définissent les exigences et les bonnes pratiques en matière de protection contre la foudre. Deux des normes les plus largement utilisées sont la norme NFPA 780 aux États-Unis et la norme IEC 62305 au niveau international.

IEC 62305 (International Electrotechnical Commission) : Cette norme est utilisée au niveau international et fournit des lignes directrices pour la protection contre la foudre des structures, des équipements et des personnes. Elle est composée de:

IEC-62305-1: Critère généraux de protection contre la foudre.

IEC-62305-2: Évaluation des risques.

IEC-62305-3: Dommages aux structure et risque de vie.

IEC-62305-4: Protection contre les défaillances des réseaux internes.

NFPA 780 (National Fire Protection Association) : Cette norme est largement utilisée aux États-Unis pour la conception, l'installation, l'inspection et la maintenance des systèmes de protection contre la foudre. Elle couvre divers aspects tels que la conception des systèmes de capture, la mise à la terre, la protection des structures et des équipements, ainsi que les exigences de maintenance .

La norme NFPA 780 et la norme CEI 62305 sont des normes relatives à la protection contre la foudre, mais elles diffèrent dans leurs détails et exigences spécifiques. La NFPA 780 est utilisée aux États-Unis, tandis que la CEI 62305 est internationale. La CEI 62305 utilise un système de zonage basé sur le risque, tandis que la NFPA 780 utilise un système basé sur la hauteur du bâtiment. Les normes diffèrent dans leurs exigences de conception, d'installation, de maintenance, et de documentation des systèmes de protection contre la foudre (voir

Annexe A)[13][14][15][16][17].

1.10 Protection des équipements électroniques de puissance:

La protection des équipements électroniques de puissance contre la foudre est essentielle pour éviter les dommages causés par les surtensions transitoires induites par la foudre. Ces surtensions peuvent endommager gravement les composants électroniques sensibles, entraînant des temps d'arrêt coûteux et des réparations onéreuses.

Pour protéger les équipements d'électronique de puissance contre la foudre en conformité avec les normes de protection contre la foudre, il est essentiel de suivre les principes des normes pertinentes telles que la NFPA 780 (États-Unis) ou la norme IEC 62305 (norme internationale)[16][17].

➤ Évaluation des risques :

Effectuer une analyse des risques pour déterminer les zones les plus exposées aux coups de foudre et les équipements les plus sensibles.

➤ Classification des zones :

Classer les zones en fonction de leur niveau de protection requis selon les normes NFPA 780 ou IEC 62305.

➤ **Conception du système de protection :**

- Installer des parafoudres à l'entrée principale de l'alimentation électrique pour dévier les surtensions vers la terre.
- Utiliser des parafoudres spécifiques pour les lignes de communication et les signaux de contrôle.
- Assurer une bonne mise à la terre pour faciliter l'évacuation des surtensions.
- Utiliser des dispositifs de coupure automatique pour isoler les équipements en cas de surtension.

➤ **Installation des paratonnerres :**

Installer des paratonnerres selon les normes pour protéger les structures et les équipements contre les coups de foudre directs.

➤ **Blindage et protection des câbles :**

Utiliser des câbles blindés pour réduire l'impact des surtensions induites.

Utiliser des boîtiers de protection pour les équipements sensibles.

➤ **Suppression des transitoires :**

Installer des dispositifs de suppression des transitoires pour limiter les surtensions transitoires à un niveau sûr.

Utiliser des filtres pour réduire les interférences électromagnétiques.

➤ **Maintenance et inspection :**

Effectuer régulièrement des inspections et des tests conformément aux normes pour garantir le bon fonctionnement du système de protection.

➤ **Documentation et enregistrements :**

Tenir des registres détaillés de l'installation, de l'entretien et des tests conformément aux exigences des normes.

1.11 Conclusion

En conclusion, ce premier chapitre a posé les bases essentielles pour la compréhension du phénomène complexe de la foudre et de ses impacts. Nous avons examiné en détail les différents types de coups de foudre, en mettant l'accent sur les coups de foudre descendantes négativement qui présentent un intérêt particulier pour notre étude ainsi les paramètres électriques de la foudre. En outre, nous avons abordé les effets destructeurs de la foudre, mettant en lumière les risques pour les personnes, les animaux, les équipements et les services. La protection contre la foudre a été présentée comme une solution cruciale pour atténuer ces risques, en soulignant l'importance du respect des normes de conception et d'installation.

Enfin, nous avons introduit le modèle électrogéométrique de protection contre la foudre, en mettant en avant des concepts clés tels que la distance d'amorçage, la zone de protection et la surface de capture. Nous avons également mentionné les normes de protection contre la foudre qui guident la conception et la mise en œuvre des systèmes de protection.

Ce chapitre jettera les bases théoriques nécessaires pour la suite de notre étude, qui portera sur la protection des équipements électroniques de puissance contre les effets néfastes de la foudre. Le

prochain chapitre approfondira notre analyse en examinant les différentes méthodes de protection disponibles et en proposant des recommandations pour une protection efficace.

2. CHAPITRE II

Modèle de simulations de la foudre

2.1 Introduction:

Les fondements théoriques des équations et des modèles électromagnétiques sont examinés dans ce chapitre afin de comprendre et d'analyser les phénomènes électromagnétiques, comme la foudre. Dans un premier temps, nous aborderons les équations de Maxwell qui décrivent le fonctionnement des champs électromagnétiques, en mettant l'accent sur les formulations électrostatiques, magnétostatique et dynamiques.

Par la suite, nous étudierons les diverses méthodes de résolution de ces équations, en soulignant la méthode des éléments finis comme une méthode numérique fréquemment employée pour résoudre les équations aux dérivées partielles (PDE) qui en résultent. Finalement, nous aborderons l'utilisation de la boîte à outils PDE de MATLAB pour résoudre ces équations de manière concrète, en mettant en évidence ses principales fonctionnalités dans le domaine de la modélisation électromagnétique.

2.2 Modèles de simulation de la foudre :

Les modèles de l'arc en retour ont été étudiés par de nombreux chercheurs ces dernières années : Nucci et al. 1990[18], Thottappillil et Uman 1993[19], Nucci 1995[20], Thottappillil et al. 1997[21], Rakov et Uman 1998[22], Gomes et Cooray 2000[23], Rakov 2002[24]. Rakov a identifié quatre principaux modèles de l'arc en retour. :

2.2.1 Les modèles basés sur la dynamique des gaz:

La catégorie des modèles "modèles du gaz dynamique" est définie par la première catégorie. Le canal de la foudre est considéré dans ces modèles comme un segment court d'une colonne cylindrique de plasma chauffée par le passage d'un courant variable dans le temps. Initialement conçus pour des décharges en laboratoire, ces modèles ont ensuite été utilisés pour la modélisation des courants de la foudre. Ce modèle est aussi connu sous le nom de « modèle physique ». Les paramètres du canal de l'arc en retour, tels que le rayon, la température et la pression, ont été définis par Braginskii en utilisant le principe du choc fort (« strong shock »)[25]. Toutefois, bien que théoriquement rigoureux, ces modèles n'ont jamais été parfaitement satisfaisants en matière de prédiction des champs électromagnétiques rayonnés.

2.2.2 Les modèles électromagnétiques

Les modèles électromagnétiques, également connus sous le nom de modèles de deuxième classe, reposent sur la représentation du canal de foudre comme une antenne avec pertes. Il est essentiel de résoudre numériquement les équations de Maxwell afin de déterminer la répartition du courant le long du canal, ce qui permet de calculer les champs électriques et magnétiques lointains[26][27].

2.2.3 Les modèles des circuits distribués:

La troisième catégorie de modèles, également connue sous le nom de « modèles RLC » ou « modèles des lignes de transmission », représente la décharge de foudre comme un processus transitoire sur une ligne de transmission caractérisée par une résistance, une inductance et une capacité par unité de longueur. Ces modèles sont utilisés pour calculer le courant de foudre en fonction du temps et de la hauteur, ainsi que pour évaluer le champ électromagnétique émis par cette décharge[28][29].

2.2.4 Les modèles d'ingénierie

Les modèles d'ingénieur sont largement utilisés dans la communauté scientifique. Ils se basent sur des observations telles que le courant à la base du canal de foudre, la vitesse de propagation ascendante du front d'onde et le profil de luminosité du canal. Ces modèles, bien que simples et ne tenant pas compte de l'aspect physique de l'arc en retour, visent à reproduire fidèlement les courbes expérimentales du champ électromagnétique sur des distances allant de quelques dizaines de mètres à quelques centaines de kilomètres[30][31].

Nous employons les modèles électromagnétiques dans cette étude.

2.3 Équations et Modèles Électromagnétiques

Les modèles électromagnétiques nécessitent des représentations mathématiques et physiques afin de saisir et anticiper le comportement des champs électriques et magnétiques dans divers systèmes et situations. De nombreux secteurs de l'ingénierie et de la science utilisent ces modèles pour élaborer des systèmes électriques et électroniques, pour améliorer les communications sans fil, pour étudier les phénomènes naturels tels que la foudre.

L'ensemble des phénomènes électromagnétiques est régi par les équations de Maxwell.

2.3.1 les équations de Maxwell:

Nous disposons alors du système d'équations suivant :

➤ Equation de Maxwell-Faraday

$$\overrightarrow{\text{Rot}}(\vec{E}) = - \partial \vec{B} / \partial t \quad (2.1)$$

➤ Equation de Maxwell-Ampère

$$\overrightarrow{\text{Rot}}(\vec{H}) = \vec{J} + \partial \vec{D} / \partial t \quad (2.2)$$

➤ Equation de conservation du flux magnétique

$$\text{Div } \vec{B} = 0 \quad (2.3)$$

➤ Equation de Maxwell-Gauss

$$\text{Div } \vec{D} = \rho \quad (2.4)$$

Les équations (2.1) et (2.2) sont les équations de couplage électromagnétique.

Les équations (2.3) et (2.4) sont les équations de conservation.

Pour définir complètement les phénomènes électromagnétiques a l'intérieur d'un milieu, on rajoute aux quatre équations précédentes les lois de comportement des milieux ainsi que la loi d'Ohm :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{B}_r \quad (2.5)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (2.6)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.7)$$

Avec:

E : Vecteur champ électrique [V/m]

H : Vecteur champ magnétique[A/m]

B : Vecteur induction magnétique[T]

D : Vecteur induction électrique (vecteur déplacement électrique) [C/m]

$\partial D / \partial t$: la densité du courant de déplacement négligeable à basse fréquence[A/m²]

ρ : Densité volumique de charge électriques [C/m]

μ : La perméabilité magnétique

ϵ : Permittivité diélectrique

σ :conductivité électrique [S.m-1]

Et avec:

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$$

tel que :

ε_0 est la Permittivité diélectrique du vide [F/m]

ε_r est la Permittivité relative du milieu considéré [F/m]

μ_0 est la Perméabilité magnétique du vide [H/m]

μ_r est la Perméabilité relative du milieu considéré [H/m]

L'équation (2.5) détermine la relation entre le champ et l'induction magnétique, et L'équation (2.6) décrit la relation entre l'induction D et le champ électrique E .

2.3.2 Modèles Électromagnétiques

Les équations qui décrivent le couplage électromagnétique entre les effets magnétiques et électriques peuvent être dans certains cas découplés en donnant naissance à des modèles plus simples qui sont :

- Modèle électrostatique.
- Modèle magnétostatique.
- Modèle électrocinétique.
- Modèle magnétodynamique.

Le modèle électrostatique:

Le champ électrostatique est généré par des charges fixes présentes dans le cadre de l'étude. Les équations qui s'appliquent sont :

$$\overline{\text{Rot}}(\vec{E}) = 0 \quad (2.8)$$

$$\text{Div } \vec{D} = \rho \quad (2.9)$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (2.10)$$

La relation (2.8) permet de définir une fonction potentiel scalaire électrique V , ou tension électrique, telle que :

$$\vec{E} = -\overrightarrow{Grad} V \quad (2.11)$$

Le modèle se ramène alors à l'équation :

$$Div (\varepsilon \overrightarrow{Grad} V) + \rho = 0 \quad (2.12)$$

Le modèle électrocinétique

Le modèle électrocinétique est utilisé pour étudier la répartition du courant électrique dans des conducteurs isolés soumis à des différences de potentiel continues.

Il est régit par les équations suivantes :

$$\overrightarrow{Rot}(\vec{E})=0 \quad (2.13)$$

$$Div \vec{J} = \rho \quad (2.14)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.15)$$

L'équation (2.13) implique qu'il existe un potentiel électrique scalaire V , Ce potentiel est appelé la tension électrique, on aura donc à résoudre :

$$\vec{E} = -\overrightarrow{Grad} V \quad (2.16)$$

$$Div (\sigma \overrightarrow{Grad} V) = 0 \quad (2.17)$$

Modèle magnétostatique

Dans le cas de ce modèle, on peut avoir deux sortes de formes :

Le modèle magnétostatique scalaire:

Dans ce modèle, on considère que les courants électriques sont négligeables dans la région étudiée et que les champs électriques et magnétiques sont constants dans le temps. Dans cette approximation, les équations de Maxwell se simplifient et nous obtenons les relations suivantes :

$$\overrightarrow{Rot} \vec{H} = 0 \quad \text{car les courants sont nuls} \quad (2.18)$$

$$\text{Div } \vec{B} = 0 \quad \text{conservation du champ} \quad (2.19)$$

Cela s'applique aux dispositifs pour lesquels les champs sont générés par des forces magnétomotrices externes et ne dépendent pas du dispositif lui-même, ou par l'effet d'aimants permanents, pour lesquels la loi suivante s'applique :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{B}_r \quad (2.20)$$

La relation (2.18), implique qu'il existe une fonction Φ potentiel scalaire magnétique telle que :

$$\vec{H} = \overrightarrow{\text{Grad}} \Phi \quad (2.21)$$

On obtient alors :

$$\text{Div}(\mu \overrightarrow{\text{Grad}} \Phi) = \text{Div } \vec{B}_r \quad (2.22)$$

Le modèle magnétostatique vectoriel :

le champ magnétique est généré par des sources indépendantes du temps, ce qui signifie que le terme $\partial B / \partial t$ est nul. Dans ce cas, les champs électrique E et magnétique B sont découplés. Cependant, si l'on souhaite modéliser un objet parcouru par des courants non nuls, les équations suivantes sont obtenues :

$$\overrightarrow{\text{Rot}}(\vec{H}) = J \quad (2.23)$$

$$\text{Div } \vec{B} = 0 \quad (2.24)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{B}_r \quad (2.25)$$

L'équation (2.24), Cela permet de définir une fonction vectorielle A, appelée potentiel vecteur magnétique, de telle sorte que :

$$\vec{B} = \overrightarrow{\text{Rot}} A \quad (2.26)$$

Pour définir complètement le potentiel vecteur magnétique A, on doit fixer sa divergence en utilisant la jauge de Coulomb :

$$\text{Div } A = 0 \quad (2.27)$$

Les équations (1.24), (1.26) et (1.27) conduisent à :

$$\overrightarrow{\text{Rot}}(1/\mu \overrightarrow{\text{Rot}} A) = J + \overrightarrow{\text{Rot}}(1/\mu \overrightarrow{B}_r) \quad (2.28)$$

Le modèle magnétodynamique:

Ce modèle est utilisé pour les appareils électromagnétiques où les sources de courant ou de tension fluctuent au fil du temps. En d'autres termes, le coefficient $\partial B / \partial t$ n'est pas nul, ce qui entraîne la coupure des champs électriques et magnétiques par la présence des courants induits. En partant des deux premières équations de Maxwell (2.1) et (2.3) sans terme source:

$$\overrightarrow{\text{Rot}} \overrightarrow{E} = -\partial B / \partial t \quad (2.29)$$

$$\text{Div } \overrightarrow{B} = 0 \quad (2.30)$$

en effectuant des manipulations mathématiques appropriées Dans le cas ou les courant induits par mouvement sont nuls et aussi le $\overrightarrow{\text{Grad}} V$ en axisymétrie est nul n arrive à la dernière équation suivante :

$$\overrightarrow{\text{Rot}} (v \overrightarrow{\text{Rot}} A) + \sigma \partial A / \partial t = J s \quad (2.31)$$

L'utilisation de ce modèle est très répandue dans l'étude des machines électriques, des dispositifs de chauffage par induction, des transformateurs, etc[32].

2.4 Résolution des Équations Électromagnétiques par la Méthode des éléments Finis

Des phénomènes électromagnétiques, comme ceux qui se produisent dans des événements naturels tels que la foudre, sont représentés par des équations aux dérivées partielles (EDP), qui représentent diverses formes géométriques.

2.4.1 Équations aux dérivées partielles

Les Équations aux Dérivées Partielles (EDP) sont des équations mathématiques qui impliquent des dérivées partielles d'une fonction inconnue de plusieurs variables indépendantes. Elles sont utilisées pour modéliser des phénomènes qui varient dans l'espace et dans le temps. Les EDP sont essentielles en physique, en ingénierie, en biologie et dans de nombreux autres domaines pour décrire le comportement de systèmes complexes[33].

Classification des EDP basée sur le type d'équation

Les équations aux dérivées partielles peuvent être classées en fonction du type d'équation qu'elles représentent. Les trois principales catégories de classification sont les équations aux dérivées partielles linéaires et homogènes du second-ordre et sont les suivantes :

- Équations elliptiques : Les équations elliptiques représentent des phénomènes de régularité, où la fluctuation de la solution est maintenue stable, tels que :

En électrostatique, on utilise l'équation de poisson :

$$\nabla^2 \phi = -\rho/\epsilon \quad (2.32)$$

afin de déterminer le potentiel électrique ϕ en présence de charges électriques ρ .

- Équations hyperboliques : Ces équations modélisent des phénomènes de propagation où les informations se propagent à une vitesse finie, tels que :

L'équation des ondes:

$$\partial^2 u / \partial t^2 = c^2 \nabla^2 u \quad (2.33)$$

Afin de modéliser la propagation des ondes, où u est la fonction d'onde et c est la vitesse de propagation de l'onde.

- Équation parabolique: Ces équations modélisent des phénomènes de diffusion, où les variations de la solution sont lissées au fil du temps, tels que :

l'équation de la chaleur (ou l'équation de diffusion) en une dimension, qui est donnée par:

$$\partial u / \partial t = \alpha \partial^2 u / \partial x^2 \quad (2.34)$$

$u(x,t)$ est la fonction inconnue dépendant de la position x et du temps t , et α est une constante qui détermine le taux de diffusion de la chaleur. Cette équation modélise la propagation de la chaleur dans un matériau en fonction du temps, où les variations de température sont lissées au fil du temps en raison de la diffusion thermique[33].

2.4.2 Méthodes de résolution

Ces équations sont généralement résolues par des méthodes analytiques ou approchées, mais pour des géométries complexes, on utilise des méthodes numériques basées sur la discrétisation du domaine qui est étudié.

Méthodes analytiques:

Les méthodes analytiques visent à trouver une solution exacte de l'EDP. Elles sont souvent limitées à des cas simples en raison de la complexité des équations. Parmi les méthodes analytiques les plus courantes, on trouve la méthode de séparation des variables, la méthode des caractéristiques et la méthode de Laplace.

Méthodes numériques

Les méthodes numériques sont utilisées lorsque les solutions analytiques ne sont pas possibles ou pratiques à trouver. Elles consistent à discrétiser l'espace et le temps pour résoudre l'EDP sur un ensemble fini de points. Parmi les méthodes numériques les plus utilisées, on trouve les

différences finies, les éléments finis, les volumes finis et les méthodes des éléments finis de frontière.

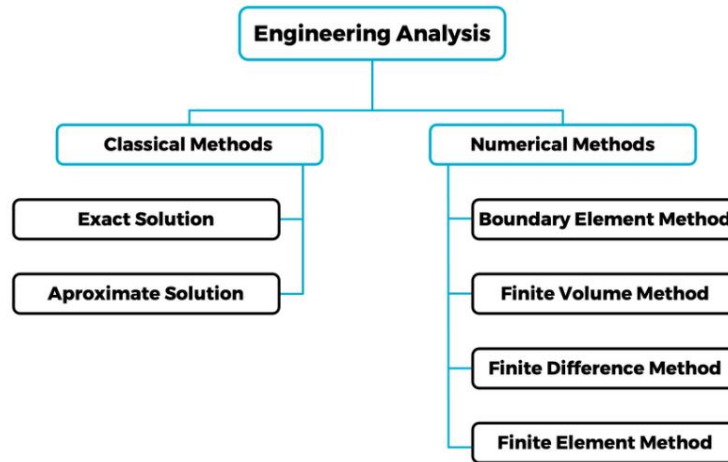


Figure 2-1: Méthode de résolution EDP

2.4.3 Méthode des éléments finis (MEF) et son principe fondamental :

La méthode des éléments finis est une approche universelle et adaptée aux géométries complexes ainsi qu'aux matériaux non linéaires. Elle consiste à diviser le domaine d'étude en éléments finis, tels que des triangles pour les structures 2D ou des tétraèdres/prismes pour les structures 3D. Sur chaque élément, l'inconnue est exprimée par des fonctions d'interpolation simples basées sur les valeurs aux sommets de l'élément, en respectant les conditions de continuité globale. En assemblant ces éléments, on obtient une solution pour l'ensemble du domaine.

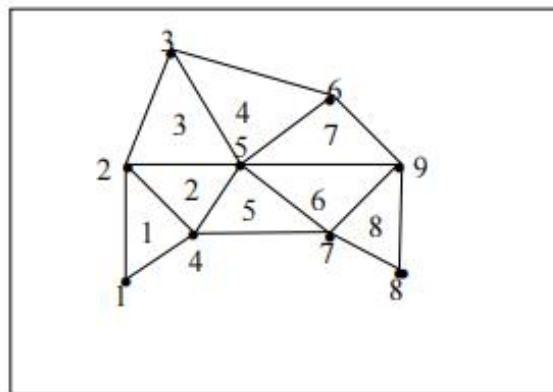


Figure 2-2: Un domaine d'étude discrétisé en Éléments finis

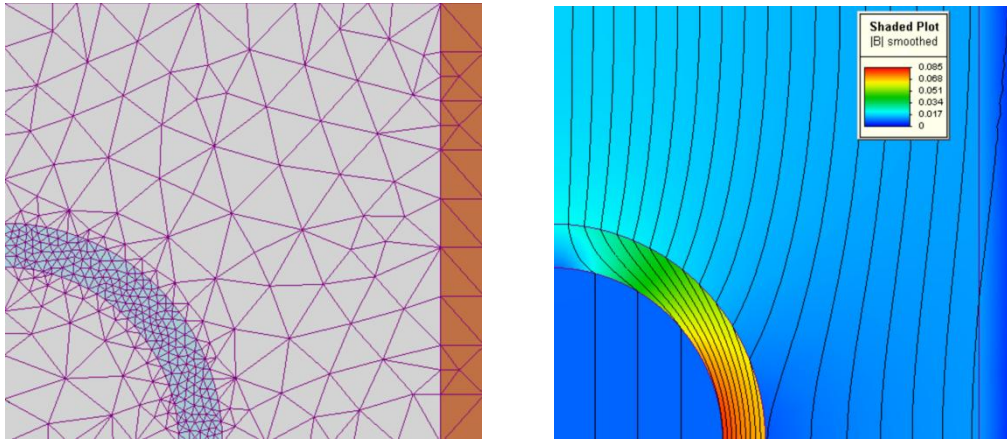


Figure 2-3:Maillage utilisé pour obtenir une solution bidimensionnelle d'une équation magnétostatique obtenue par éléments finis (les lignes donnent la direction du champ et la couleur son intensité)

Motivations

Les ingénieurs font appel à la méthode des éléments finis pour diverses raisons importantes. Cette approche permet d'échapper aux contraintes des modèles analytiques, en particulier en ce qui concerne [34]:

- ❖ La capacité à s'adapter aux géométries complexes et aux grandes déformations.
- ❖ Il est possible de représenter des chargements complexes et diversifiés.
- ❖ La considération des actions matérielles non linéaires et complexes.
- ❖ Il est possible de résoudre des problèmes multi-physiques.
- ❖ La mise en place informatique est simplifiée grâce à l'utilisation de logiciels spécialisés.
- ❖ L'aptitude à s'adapter aux conditions aux limites changeantes.
- ❖ La vérification des résultats expérimentaux.
- ❖ La possibilité de maximiser l'efficacité de la conception.

Principe de base de la Méthode des éléments finis:

Principes de base et son application pratique :

- **Domaine d'étude** : La première étape de la MEF consiste à définir le domaine d'étude, c'est-à-dire la région de l'espace dans laquelle le problème physique est défini. Cette région peut être représentée par des formes géométriques simples telles que des rectangles, des cercles ou des polygones en 2D, ou des cubes, des sphères ou des polyèdres en 3D[35].
- **Formulation du problème** : Une fois le domaine défini, le problème physique est formulé sous forme d'une EDP[35].
- **Spécification des Conditions aux Bords**:Les conditions aux limites du domaine doivent être spécifiées pour obtenir une solution significative.Les conditions de Neumann, aussi appelées conditions de bord du premier type, fixent la dérivée normale de la solution le long

de la frontière. Elles décrivent souvent un flux ou un échange de quantité à travers la frontière, comme la chaleur qui quitte un matériau.

Les conditions de Dirichlet, ou conditions de bord du deuxième type, fixent directement la valeur de la solution le long de la frontière. Elles spécifient généralement un état ou une valeur imposée à la frontière, comme la température d'une surface chauffée.

En combinant ces deux types de conditions aux limites, il est possible de résoudre une variété de problèmes physiques et d'obtenir des solutions précises et significatives pour des phénomènes complexes[36].

- **Maillage du domaine** : Le domaine est discrétisé en un ensemble d'éléments finis, tels que des triangles en 2D, et des tétraèdres ou des hexaèdres en 3D. Chaque élément est défini par un ensemble de nœuds où les valeurs de la solution sont calculées[37].
- **Approximation de la solution** : Pour résoudre l'EDP, une approximation de la solution est construite en utilisant des fonctions d'interpolation sur chaque élément fini. Ces fonctions d'interpolation sont définies de manière à ce que la solution approximée soit continue et différentiable sur tout le domaine.
- **Assemblage du système d'équations** : Une fois que les approximations locales sont définies, un système d'équations linéaires est assemblé en combinant les contributions de tous les éléments finis. Ce système d'équations est généralement de grande taille et peut être résolu numériquement à l'aide de techniques telles que la méthode de Gauss ou la méthode de Jacobi.
- **Résolution Numérique**: Une fois le domaine, l'équation et les conditions aux bords définies, la solution numérique de l'EDP est obtenue en résolvant un système d'équations linéaires résultant de la discrétisation de l'équation sur le maillage. Cette étape permet d'obtenir une approximation numérique de la solution du problème physique[38].

Logiciels de MEF:

Pour résoudre des problèmes de champ dans un domaine spécifique en utilisant la méthode des éléments finis, vous pouvez envisager d'utiliser des logiciels tels que:

ANSYS: ANSYS est largement utilisé pour sa capacité à gérer des simulations multiphysiques complexes. Il est particulièrement apprécié pour sa capacité à modéliser des problèmes comportant des non-linéarités, des matériaux complexes et des géométries difficiles.

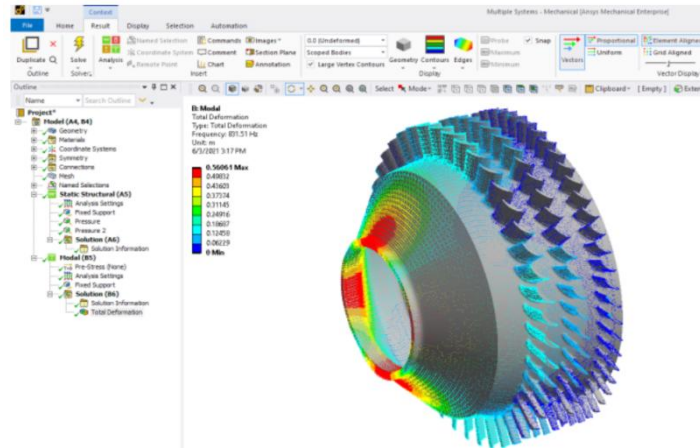


Figure 2-4: Modèle de simulation avec de nombreux éléments de contact avec ANSYS

ABAQUS : ABAQUS est reconnu pour sa capacité à résoudre des problèmes de structures complexes, notamment en intégrant des comportements non linéaires et des contacts multiples.

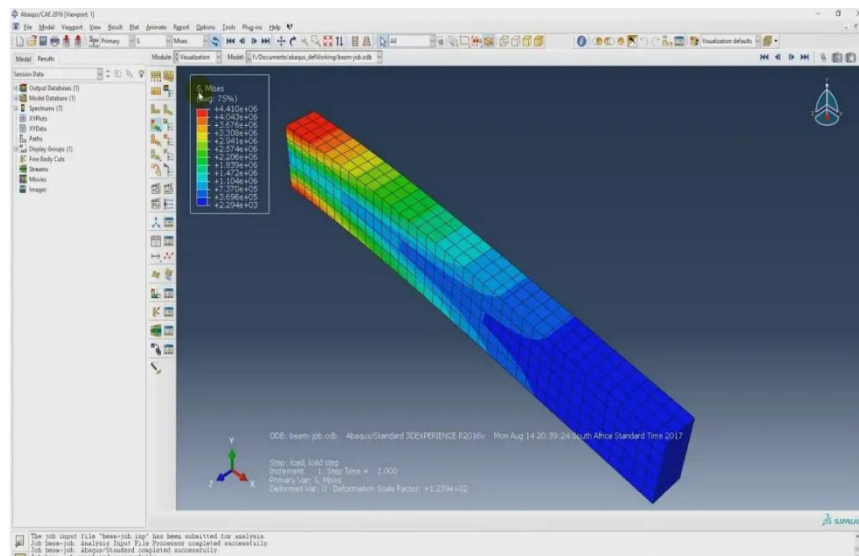


Figure 2-5: Modèle de simulation avec ABAQUS

COMSOL Multiphysics : COMSOL est utilisé pour sa polyvalence dans la modélisation de problèmes couplés. Il permet de résoudre une large gamme de problèmes en combinant différentes physiques.

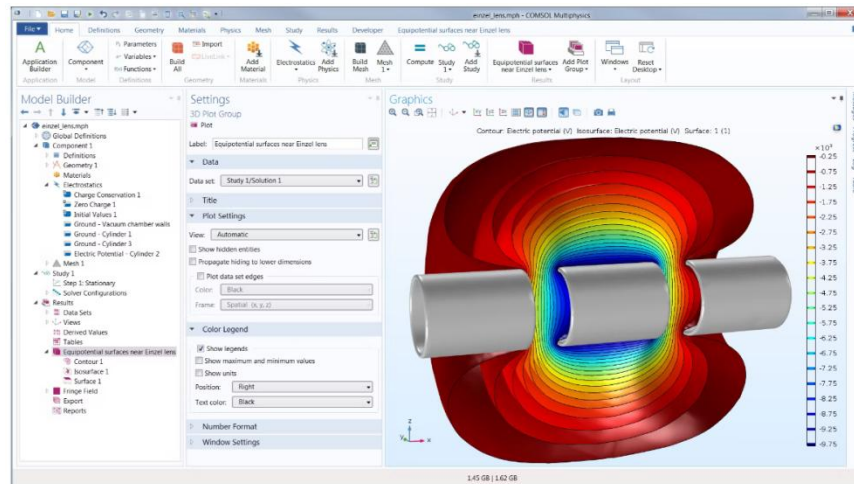


Figure 2-6: Modèle de simulation avec COMSOL

SolidWorks Simulation : SolidWorks Simulation est un module intégré à SolidWorks qui utilise la méthode des éléments finis pour l'analyse de structures et de systèmes mécaniques, offrant une intégration étroite avec la conception assistée par ordinateur (CAO).

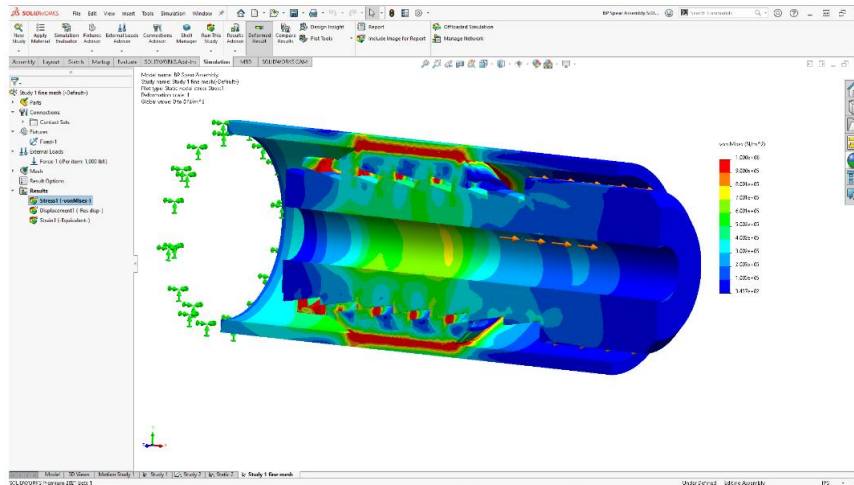


Figure 2-7: Modèle de simulation avec SolidWorks

Ces logiciels offrent des outils pour la modélisation, la simulation et l'analyse de problèmes de champ dans des domaines tels que la mécanique des structures, la thermique, l'électromagnétisme, etc.

Parmi ces logiciels, MATLAB est également un outil puissant pour la résolution de problèmes de champ dans un domaine spécifique, en particulier lorsqu'il s'agit d'équations aux dérivées partielles (EDP) qui peuvent être résolues numériquement à l'aide de la méthode des éléments finis (FEM).

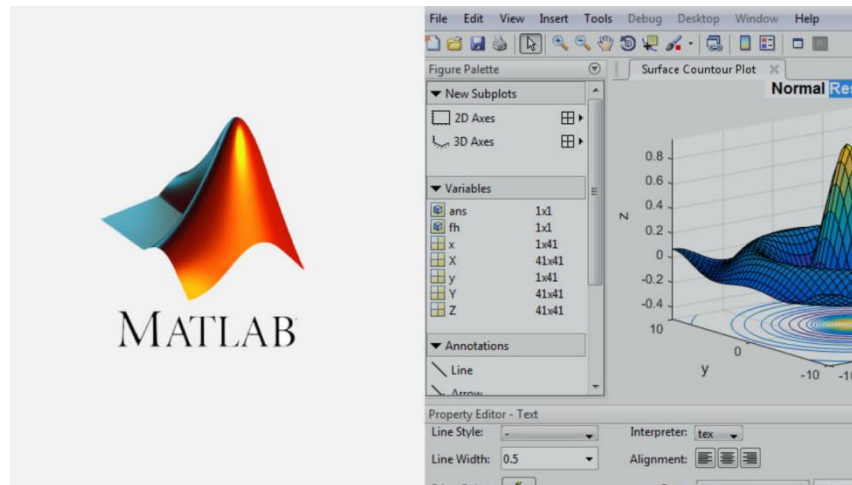


Figure 2-8: Modèle de simulation avec MATLAB

MATLAB offre plusieurs avantages pour la MEF :

- ❖ MATLAB offre une syntaxe simple et intuitive, ce qui facilite la mise en œuvre des algorithmes de la MEF. Les fonctions intégrées de MATLAB permettent de gérer facilement les opérations matricielles nécessaires à la résolution des systèmes d'équations résultant de la discrétisation par la MEF.
- ❖ En utilisant MATLAB, les ingénieurs et les chercheurs peuvent rapidement développer des programmes pour la MEF en raison de sa convivialité et de sa facilité d'apprentissage. Cela permet d'itérer plus rapidement dans la conception et l'analyse des modèles.
- ❖ MATLAB offre une variété de fonctionnalités pour la MEF, y compris des outils pour la génération de maillages, la visualisation des résultats, l'optimisation de la conception, et bien plus encore. Cela en fait un outil complet pour la résolution de problèmes de MEF.
- ❖ MATLAB est un langage de programmation complet qui permet aux utilisateurs de personnaliser et d'étendre ses fonctionnalités pour répondre à des besoins spécifiques en matière de MEF. Les utilisateurs peuvent également intégrer des algorithmes externes ou des bibliothèques pour une analyse plus approfondie.
- ❖ MATLAB dispose d'une vaste communauté d'utilisateurs et de développeurs qui peuvent fournir un soutien précieux pour la résolution de problèmes spécifiques à la MEF. De plus, MathWorks, la société derrière MATLAB, propose une documentation complète et des exemples pour aider les utilisateurs à démarrer[39][40].

PDE Toolbox MATLAB

La résolution d'équations aux dérivées partielles (EDP) avec MATLAB consiste à utiliser le PDE Toolbox de MATLAB pour trouver des solutions numériques aux problèmes physiques décrits par des EDP.

La boîte à outils des équations aux dérivées partielles (Partial Differential Equation Toolbox™) est un ensemble de fonctions pour résoudre des équations aux dérivées partielles (EDP) scalaires de la forme suivante :

$$m\partial^2 u/\partial t^2 + d\partial u/\partial t - \nabla \cdot (c \nabla u) + au = f \quad (2.35)$$

et les équations aux valeurs propres de la forme suivante:

$$m\partial^2 u/\partial t^2 + d\partial u/\partial t - \nabla \cdot (c \otimes \nabla u) + au = f \quad (2.36)$$

Où:

$$-\nabla \cdot (c \otimes \nabla u) + au = \lambda^2 mu \quad (2.37)$$

Les coefficients m, d, c, a et f peuvent être des fonctions de l'emplacement (x, y et, en 3D, z), sauf pour les problèmes de valeurs propres, ils peuvent également être des fonctions de la solution u ou de son gradient.

Pour les EDP scalaires, il existe deux choix de conditions aux limites pour chaque arête ou face :

Condition de Dirichlet

Conditions aux limites de Neumann généralisées

L'algorithme principal du Partial Differential Equation Toolbox™ utilise la méthode des éléments finis (FEM) pour les problèmes définis sur des domaines bornés en 2-D ou en 3-D. La FEM approxime une solution en minimisant la fonction d'erreur associée, trouvant automatiquement la combinaison linéaire des fonctions de base qui est la plus proche de la solution u

Pour expliquer le processus de minimisation de la fonction d'erreur associée à l'approximation de la solution u en utilisant la méthode des éléments finis, nous pouvons reprendre l'équation de base d'une EDP elliptique :

$$d\partial u/\partial t - \nabla \cdot (c \nabla u) + au = f \quad \text{dans } \Omega \quad (2.38)$$

avec les conditions aux limites de Dirichlet

$$u = r \quad \text{sur } \partial\Omega_d \quad (2.39)$$

et les conditions aux limites de Neumann généralisées

$$\nabla u \cdot n + qu = g \quad \text{sur } \partial\Omega_n \quad (2.40)$$

où :

n est la normale extérieure unitaire.

Le processus de FEM commence par la conversion de la forme forte de cette équation en une forme faible. En multipliant l'équation par une fonction test v et en intégrant sur le domaine Ω , nous obtenons :

$$\int_{\Omega} (-\nabla \cdot (c \nabla u) + au - f) v \, d\Omega = 0 \quad \forall v \quad (2.41)$$

En utilisant la formule de Green pour le premier terme, nous obtenons :

$$\int_{\Omega} (c \nabla u \cdot \nabla v + auv) \, d\Omega - \int_{\partial\Omega_n} (c \nabla u \cdot n) v \, d\Omega_n + \int_{\partial\Omega_d} (qu) v \, d\Omega_d = \int_{\Omega} f v \, d\Omega \quad (2.42)$$

nous subdivisons le domaine Ω en petits éléments Ω_e , où $\Omega = \cup \Omega_e$. En utilisant les fonctions de base ϕ_i pour le sous-espace des fonctions admissibles u_h et des fonctions de test v_h , nous écrivons :

$$u_h = \sum_{j=1}^N U_j \phi_j \quad (2.43)$$

Les coefficients scalaires U_i sont des inconnues à déterminer. En utilisant u_h dans la forme faible discrétisée de l'EDP et en choisissant chaque ϕ_i comme fonction de test v_h , nous obtenons un système de N_p équations en termes de N_p inconnues U_i .

La FEM donne un système linéaire :

$$KU = F \quad (2.44)$$

où la matrice K et le côté droit F contiennent des intégrales en termes des fonctions de test ϕ_i , ϕ_j , et des coefficients c , a , f , q , g définissant le problème.

Le vecteur solution U contient les coefficients d'expansion de u_h , qui sont également les valeurs de u_h à chaque nœud x_k ($k=1,2,3$ pour un problème en 3-D) puisque $u_h(x_k) = U_i$

Pour résoudre le système linéaire résultant, on utilise des solveurs numériques intégrés dans MATLAB, ce qui nous permet d'obtenir les coefficients U_i , qui représentent les valeurs de la solution u aux nœuds du maillage.

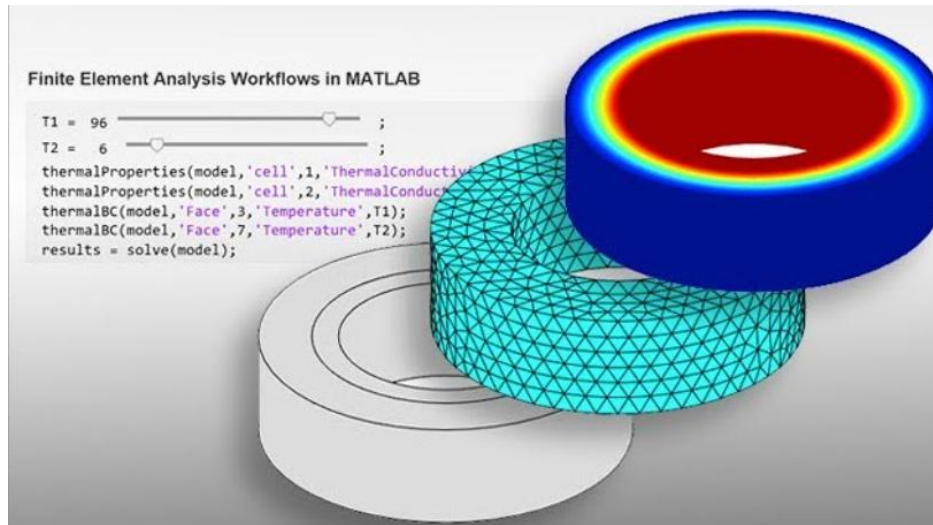


Figure 2-9: FEA avec MATLAB

Création de Géométries 3D sur MATLAB:

Grâce à MATLAB PDE Toolbox, il est envisageable de créer des structures en 3D et de résoudre des équations aux dérivées partielles. Cette approche s'avère efficace pour la représentation et la simulation de phénomènes physiques rigoureux.

La géométrie en trois dimensions désigne la définition mathématique d'un objet en trois dimensions. La forme, la taille et la disposition spatiale de l'objet sont définies par elle, ainsi que les caractéristiques géométriques essentielles comme les surfaces, les arêtes et les volumes. La géométrie 3D est employée en FEA afin de générer un modèle numérique de la structure physique à étudier. La géométrie est définie à partir d'une de ces sources:

STL or STEP file

Lors de l'analyse par éléments finis (FEA), l'utilisation de fichiers STL ou STEP est courante pour définir des géométries 3D complexes avec précision. Ces formats permettent de représenter des modèles géométriques de manière standardisée, facilitant ainsi leur utilisation dans des environnements de FEA.

- Le format STL (Standard Tessellation Language) est utilisé pour représenter des modèles 3D sous forme de maillages de triangles, souvent utilisé pour l'impression 3D et la visualisation.
- Le format STEP (Standard for the Exchange of Product model data) est un format de fichier neutre permettant d'échanger des données de modèles 3D entre différents logiciels de CAO, conservant les informations de géométrie exacte du modèle.

Les fichiers STL sont plus adaptés pour une géométrie en évolution en raison de leur simplicité, de leur légèreté et de leur compatibilité avec les logiciels de visualisation facilitant ainsi leur manipulation et leur intégration dans des processus de travail variés[41].

Création de fichier STL:

1-Utilisation de logiciels de modélisation:

Pour créer un modèle 3D, utilisez un logiciel de modélisation 3D tel que Blender, Autodesk Fusion 360 ou SolidWorks. Exportez ensuite le modèle au format STL en sélectionnant l'option "Exporter" ou "Save As" et en choisissant le format STL.

2-Utilisation de la fonction "stlwrite" sur MATLAB:

La fonction "stlwrite" en MATLAB permet également de créer un fichier STL à partir d'une triangulation. Elle offre des options pour spécifier le format du fichier (binaire ou texte) et des attributs supplémentaires pour chaque triangle de la triangulation. Ces attributs peuvent être utilisés pour stocker des informations telles que des couleurs ou des propriétés spécifiques à l'application. L'importation d'un fichier STL dans MATLAB peut être réalisée en utilisant la fonction "importGeometry" de la toolbox "Partial Differential Equation Toolbox".

"fegeometry" est une représentation interne utilisée par FEATool pour représenter la géométrie d'un modèle importé à partir d'un fichier STL, facilitant ainsi les calculs et les simulations basées sur la méthode des éléments finis[41].

geometryFromMesh:

geometryFromMesh crée une forme 3D à partir d'un maillage donné, en utilisant les nœuds et les éléments du maillage. Le processus de création d'une géométrie 3D à partir d'un maillage avec "geometryFromMesh" est le suivant :

-Le maillage initial est défini par des nœuds (vertices) et d'éléments (faces ou éléments finis).

-En appelant la fonction geometryFromMesh avec les données de sommets et de faces du maillage, MATLAB crée un objet de géométrie 3D exploitable. Cette étape permet la conversion et la manipulation du maillage en objet géométrique.

-Une fois l'objet géométrique créé, il est possible de le manipuler de diverses manières dans MATLAB. Cela inclut la visualisation pour l'analyse visuelle, la transformation pour des modifications géométriques, et l'analyse pour étudier les propriétés de la géométrie.

Si le maillage représente uniquement une surface délimitant un volume fermé, utilisez la fonction "generateMesh" pour générer un maillage[41].

volumes de base:

Cette méthode consiste à créer des géométries en utilisant des primitives géométriques telles que des cylindres, des cubes, et des sphères. En utilisant les fonctions multicylindre, multicuboid, multisphère respectivement. Cette méthode est simple et efficace pour créer des formes de base[41].

Triangulation:

- Triangulation en 2-D ou 3-D: La création d'une géométrie à partir d'une triangulation permet de représenter une forme en utilisant des triangles connectés existantes sous forme matricielle. Cette représentation discrète permet de décrire la forme de manière mathématique. En utilisant les sommets et les triangles de la triangulation, on peut créer un objet géométrique dans MATLAB pour effectuer des manipulations, des analyses ou des visualisations sur la forme[41].
- triangulation à partir fegeometry : La fonction "triangulation" permet de créer un objet de triangulation à partir de données de géométrie finie (fegeometry). Cet objet représente la forme géométrique à l'aide de triangles, facilitant ainsi les calculs et les manipulations géométriques[41].
- La triangulation de Delaunay: La triangulation de Delaunay d'un ensemble de points dans le plan consiste à créer des triangles entre ces points de telle sorte qu'aucun point ne se trouve à l'intérieur du cercle circonscrit de ces triangles. Cette méthode permet d'éviter les triangles qui sont étirés ou trop petits. Sur MATLAB, la fonction "delaunayTriangulation " est utilisée pour effectuer une triangulation de Delaunay. Elle prend en entrée les coordonnées des points à trianguler et renvoie une matrice d'indices représentant les triangles formés par ces points[41][42].

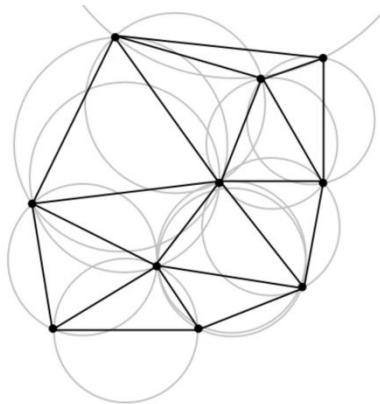


Figure 2-10: Une triangulation de Delaunay avec les cercles circonscrits en gris

géométrie 2D en une géométrie 3D:

L'extrusion est une opération couramment utilisée en modélisation 3D pour créer des formes 3D à partir de formes 2D.

La fonction "extrude " en MATLAB permet d'extruder une géométrie 2D dans le plan XY le long de l'axe Z pour créer une géométrie 3D. Elle prend en entrée les coordonnées des sommets de la géométrie 2D et spécifie la longueur de l'extrusion le long de l'axe Z. La fonction retourne les coordonnées des sommets de la géométrie 3D résultante, qui peut être utilisée pour la visualisation ou d'autres opérations géométriques.

Remarque: Il est important de noter que la fonction extrude en MATLAB extrude une géométrie 2D de manière linéaire le long de l'axe Z, produisant une géométrie 3D avec une forme constante le long de cet axe[41].

Comparaison entre les méthodes:

Lors de l'analyse par éléments finis (FEA), la création de géométries 3D à partir de fichiers STL ou STEP est courante. MATLAB offre plusieurs méthodes pour créer ces géométries, chacune avec ses avantages et ses limitations.

- ❖ L'importation de fichiers STL/STEP existants est simple et conserve la précision des données géométriques, mais elle est limitée aux capacités du format de fichier d'origine et ne permet pas de contrôler la création de la géométrie.
- ❖ La création de géométries de base à l'aide de primitives géométriques offre un contrôle total sur la forme et la taille des géométries, mais elle est limitée aux formes de base et peut être fastidieuse pour des géométries complexes.
- ❖ L'extrusion d'une géométrie 2D permet de créer rapidement des formes 3D à partir de dessins ou de plans 2D, mais produit une géométrie 3D avec une forme constante le long de l'axe Z et est limitée à des variations simples le long de cet axe.
- ❖ la triangulation à partir de fegeometry est adaptée pour les calculs et les manipulations géométriques, la triangulation de Delaunay est utilisée pour éviter les triangles étirés, et la triangulation en 2-D ou 3-D offre un contrôle sur la création de la géométrie.

2.5 Conclusion

En conclusion, ce chapitre a posé les bases essentielles pour la compréhension des phénomènes électromagnétiques, en mettant en avant les équations de Maxwell comme outil fondamental. Nous avons exploré la méthode des éléments finis, une approche mathématique puissante et polyvalente, appliquée avec succès à la résolution numérique des équations électromagnétiques complexes, ainsi que l'utilisation de la boîte à outils PDE de MATLAB, qui offre un cadre pratique et efficace pour implémenter ces méthodes numériques et résoudre les équations aux dérivées partielles qui régissent les phénomènes électromagnétiques. Ces concepts constituent un fondement solide pour l'analyse et la modélisation des phénomènes électromagnétiques, tels que la foudre.

3. CHAPITRE III

Simulation 3D de la foudre descendante négative avec la PDE Toolbox de MATLAB

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons la progression de notre travail sur la simulation de la foudre descendante négative, initialement conçue en deux dimensions, et son extension vers une simulation tridimensionnelle. Traditionnellement, les simulations en 2D ont permis de capturer certains aspects de ce phénomène, mais elles restent limitées par leur incapacité à représenter pleinement les variations spatiales et les caractéristiques tridimensionnelles du terrain et des structures affectées.

Pour surmonter ces limitations, notre travail se concentre sur le développement d'une simulation 3D de la foudre descendante négative. Nous considérons un sol où le potentiel est nul, simplifiant ainsi les conditions aux limites. Cette approche nous permet de focaliser sur la dynamique de la décharge de foudre sans complexifier le modèle avec les variations des propriétés du sol.

Notre approche inclut la modélisation détaillée de la géométrie du phénomène physique et des conditions aux limites appropriées, ainsi que l'application de méthodes de résolution avancées pour les équations différentielles partielles (EDP) régissant les phénomènes électromagnétiques, en particulier la méthode des éléments finis. Nous employons des outils tels que MATLAB et la PDE Toolbox pour mettre en œuvre ces simulations.

Dans ce travail, nous nous concentrons spécifiquement sur la partie électrostatique du phénomène, avant l'interaction entre le leader descendant et le leader ascendant. Nous modélisons les conditions électriques et le champ électrostatique généré par le leader descendant, sans aborder la phase du courant de retour. Cette approche permet de mieux comprendre les premiers stades de la formation de la foudre et les distributions de potentiel qui en résultent.

3.2 Création de la géométrie

Afin de rendre le phénomène physique de la foudre descendante négative réaliste, il est primordial de reproduire fidèlement son environnement et ses éléments. Nous avons procédé à plusieurs étapes de création de la géométrie physique pour la simulation. Les étapes suivantes sont suivies pour créer la géométrie:

Création de la zone d'air : On commence par créer un volume pour représenter l'air qui est un cuboïde de longueur 10000[mètres] et largeur 10000[mètres] et avec une hauteur de 15000[mètres], l'environnement où se déroule la décharge de foudre. Ce volume est généralement large et s'étend sur une grande distance verticale pour capturer la décharge descendante de la foudre.

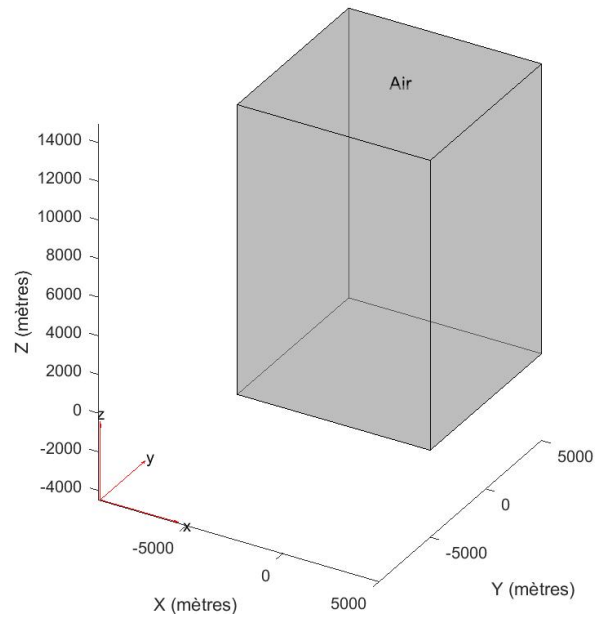


Figure 3-1: Géométrie représente l'air et la base d'un nuage orageux

Création de la Région inférieure du nuage chargé négativement (nuage négatif) : Par la suite, un volume correspondant à la base du nuage chargé négativement (composé de gouttelettes d'eau), a été ajouté. Ce volume, de dimensions 4000[mètres] de long, 4000[mètres] de large et 1500[mètres] de haut, est positionné à 4000[mètres] au-dessus du sol. Sa forme cuboïde simplifie la modélisation de cette partie du nuage.

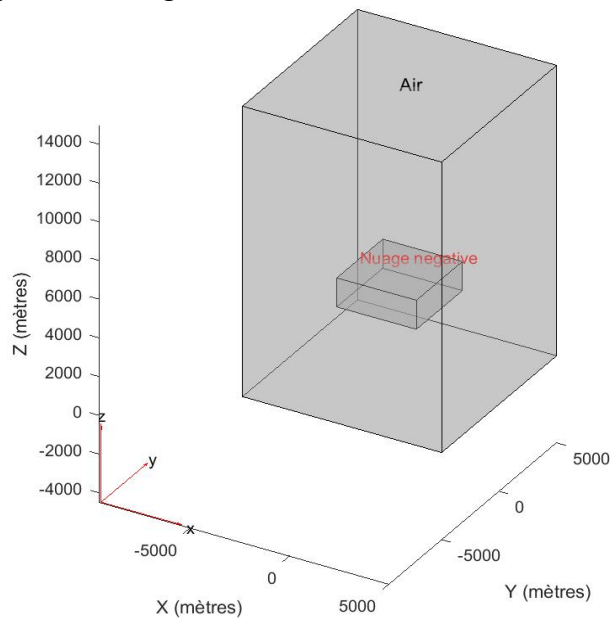


Figure 3-2: Géométrie représente l'air et la base d'un nuage orageux

Création de la Région supérieure du nuage chargée positivement (nuage positif) : Après cela, un volume a également été ajouté afin de représenter la partie supérieure du nuage, qui est chargée positivement (composée de cristaux de glace). La longueur de ce volume est de

6000[mètres], la largeur de 6000[mètres] et la hauteur de 1500[mètres], et il est situé à 4000[mètres] au-dessus de la base du nuage. Il peut aussi être cuboïde, comme la base du nuage. Ces nuages sont essentiels pour simuler les conditions électriques réalistes entre les charges négatives du nuage bas et le sol.

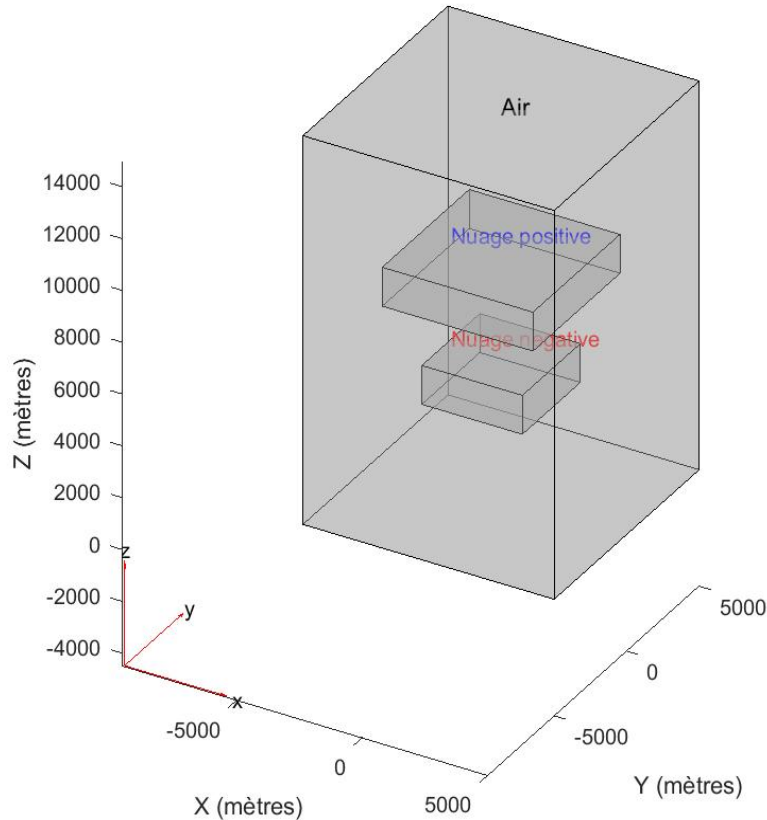


Figure 3-3: Géométrie inclue l'air et un nuage orageux(partie chargé négativement et partie chargé positivement)

Création du Step de Leader : La géométrie du leader descendant, qui représente le canal ionisé par lequel la foudre se propage, a été créée et intégrée en utilisant un fichier STL. Cette approche permet un contrôle précis des coordonnées du leader, offrant ainsi la flexibilité nécessaire pour ajuster sa position et sa forme selon les besoins de la simulation. Nous avons créé deux formes différentes pour le leader.

Leader Tortueux : La forme sinueuse du leader tortueux a été modélisée de manière réaliste en définissant des points représentant les sommets de sa structure. Nous avons également utilisé un fichier STL pour former sa géométrie par triangulation, en prenant en compte son épaisseur de 0,005 m. Par la suite, nous avons représenté cette structure de manière à obtenir une représentation tridimensionnelle claire et précise du dirigeant.

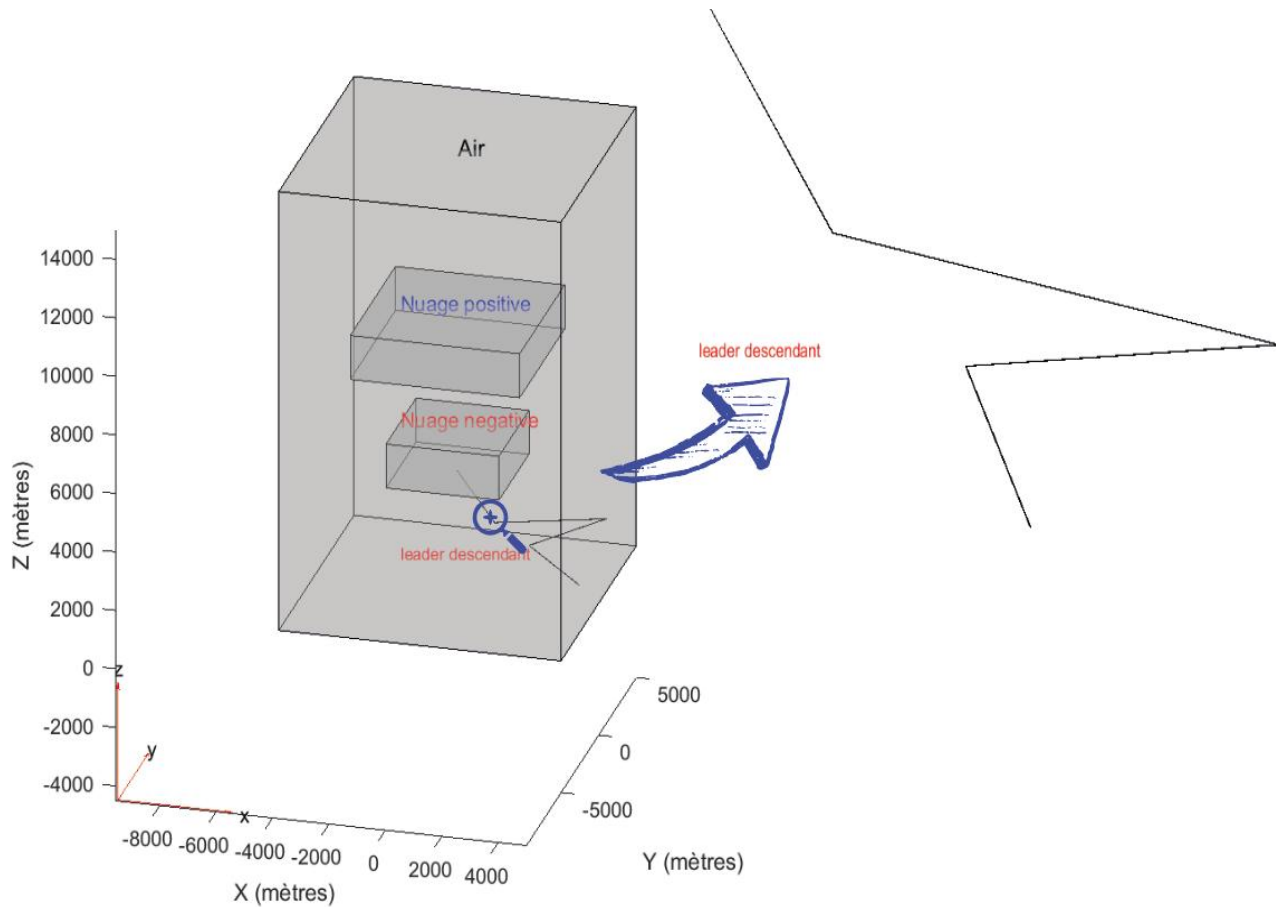


Figure 3-4: Géométrie incluant l'air et un nuage orageux (partie chargée négativement et partie chargée positivement) avec zoom sur la région du leader tortueux

Leader Rectiligne : Pour simplifier la modélisation, nous avons supposé un leader sans tortuosité. Nous avons défini sa structure comme un parallélépipède rectiligne en spécifiant les sommets, avec la possibilité d'incliner cette géométrie à différents angles. Ensuite, nous avons utilisé un fichier STL pour générer sa géométrie par triangulation, en veillant à ce que l'épaisseur soit de 0,005 m. Enfin, nous avons visualisé cette géométrie pour obtenir une représentation tridimensionnelle claire et précise du leader.

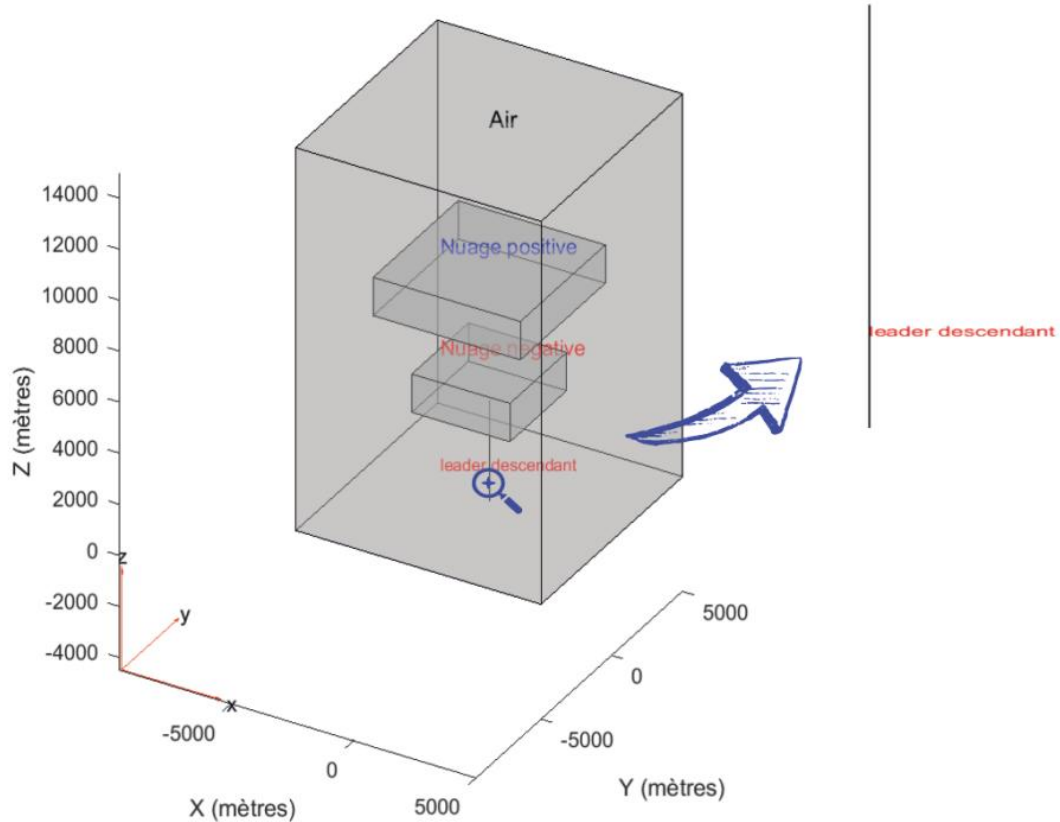


Figure 3-5: Géométrie incluant l'air et un nuage orageux (partie chargée négativement et partie chargée positivement) avec zoom sur la région du leader rectiligne verticale

Pour chaque cas La longueur du leader a été ajustée pour étudier son influence sur le sol. Après avoir créé et visualisé la géométrie du problème, plusieurs étapes ont été suivies pour intégrer cette géométrie dans le modèle de simulation .

3.3 Définition des Conditions aux Limites:

Dans notre modélisation, l'utilisation des conditions aux limites est fondamentale pour représenter de manière précise les interactions électriques entre les différents composants du système de la foudre descendante. Nous avons utilisé des conditions de Dirichlet et de Neumann pour définir les différents potentiels électriques et les surfaces neutres.

Conditions de Dirichlet :

- Nuage chargé négativement : On a fixé le potentiel électrique du nuage bas chargé négativement à $-30,000,000$ volts. pour représenter l'accumulation importante de charges négatives typique à la base des nuages d'orage.
- Nuage chargé positivement : Le potentiel électrique du nuage haut est fixé à $30,000,000$ volts. pour représenter la séparation des charges à l'intérieur du nuage d'orage.
- Leader : Dans notre simulation, nous avons fixé le potentiel du leader descendant à

-30,000,000 volts, ce qui correspond au potentiel du nuage bas chargé négativement. Cette décision de modélisation reflète la réalité où le leader transporte les charges négatives du nuage vers le sol.

Conditions de Neumann :

➤ Air : Pour l'air, des conditions de Neumann sont appliquées aux faces représentant l'environnement atmosphérique, avec une valeur de 0. Cela signifie qu'il n'y a pas de flux de charges à travers ces surfaces, les rendant électriquement neutres. Ces conditions modélisent correctement l'environnement où l'air n'influence pas directement les potentiels appliqués par les nuages ou le leader.

En modélisant ces conditions aux limites, on peut reproduire les scénarios réalistes d'un orage et nous permet d'analyser correctement la distribution des champs électriques et les effets de la foudre dans un environnement tridimensionnel.

3.4 Mise en place des coefficients PDE :

Après avoir défini les conditions aux limites, nous avons spécifié les coefficients des équations aux dérivées partielles (PDE) pour modéliser les propriétés électriques du système. Nous avons choisi de résoudre l'équation de Poisson pour étudier le modèle électrostatique du phénomène de la foudre avant le déclenchement du courant de retour. Cette approche implique l'étude des distributions de charge, des champs électriques statiques et des potentiels électriques avant que le processus dynamique de l'éclair ne se produise.

$$m\partial^2 u / \partial t^2 + d\partial u / \partial t - \nabla \cdot (c\nabla u) + au = f \quad (3.1)$$

Dans notre étude, nous avons utilisé l'équation de Poisson, qui est une équation aux dérivées partielles (EDP) elliptique de base. Les paramètres spécifiques que nous avons utilisés sont les suivants :

$$m = 0$$

$$d = 0$$

$$c = 8.85 \times 10^{-12}$$

$$a = 0$$

$$f = 0$$

L'équation de Poisson est généralement formulée comme :

$$-\nabla \cdot (c\nabla u) = f \quad (3.2)$$

En tenant compte de nos paramètres spécifiques, cette équation se simplifie à :

$$-\nabla \cdot (8.85 \times 10^{-12} \cdot \nabla u) = 0 \quad (3.3)$$

Coefficient de permittivité de l'air (ϵ) : Le coefficient "c" représente la permittivité de l'air, qui mesure la capacité de l'air à se polariser en réponse à un champ électrique. Sa valeur est généralement prise comme étant celle du vide, soit $8,85 \times 10^{-12}$ F/m.

Terme source : Le terme "f" correspond au terme source de l'équation de Poisson, dépendant de la distribution des charges électriques dans le système. Dans notre modèle, nous avons supposé qu'il n'y a pas de source externe de charges électriques, ce qui signifie que le coefficient de terme source est nul. Nous avons donc considéré uniquement les charges présentes initialement dans notre configuration, sans introduction de nouvelles charges externes.

3.5 Génération du maillage

Une fois les coefficients PDE spécifiés, on a généré un maillage tridimensionnel du domaine de simulation. Ce maillage divise l'espace en éléments finis pour faciliter le calcul numérique des champs électriques. Cependant, on a rencontré des problèmes de temps de calcul, surtout pour le modèle avec un leader tortueux. La complexité géométrique de ce modèle nécessite un maillage plus raffiné, ce qui augmente significativement le temps d'exécution.

Pour surmonter ce problème, on a entrepris les étapes suivantes :

- Calcul parallèle : On a tenté d'utiliser le calcul parallèle avec la fonction "spmd" pour répartir les tâches sur plusieurs processeurs (voir Annexe B). Malgré cette approche, le temps de calcul est resté largement coûteux et n'a pas répondu à nos attentes en termes de réduction significative du temps d'exécution.
- Hypothèse d'un canal de leader descendant vertical direct ou incliné : En raison des limitations rencontrées avec le calcul parallèle, on a opté pour une simplification du modèle en considérant un canal de leader descendant vertical ou incliné, en négligeant la tortuosité. De nombreuses études ont examiné les champs électromagnétiques des canaux de foudre en supposant une orientation verticale par rapport au sol [26][43][44]. Bien que la plupart des canaux de foudre réels soient inclinés, les calculs pour des canaux verticaux ou inclinés sont plus simples et rapides.

En se basant sur l'hypothèse d'un canal de leader descendant vertical direct ou incliné sans tortuosité et en se concentrant sur le modèle électrostatique, on a pu améliorer l'efficacité des simulations tout en obtenant des résultats pertinents pour l'étude du phénomène de la foudre. Cette approche permet de continuer à explorer les distributions de charge et les champs électriques dans des conditions réalistes sans être limités par les contraintes de temps de calcul.

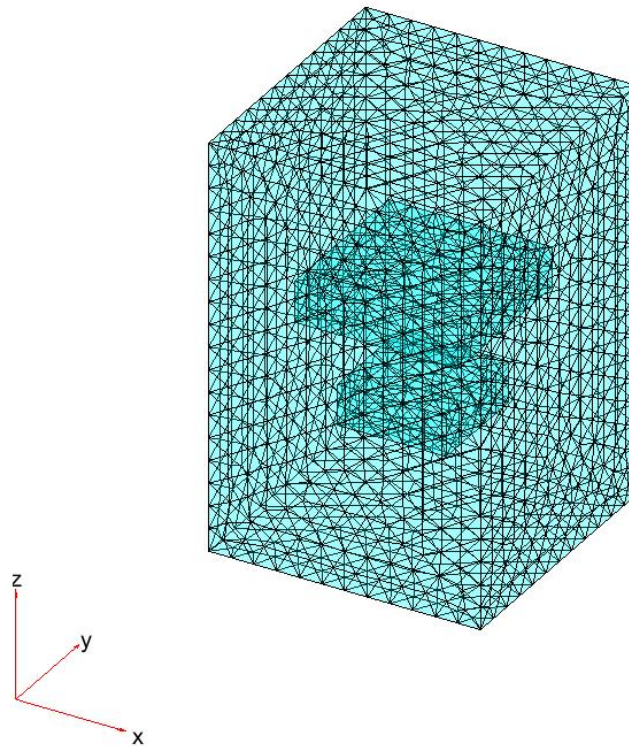


Figure 3-6: Maillage du domaine

3.6 Résolution Numérique

Après avoir généré le maillage, on a résolu numériquement l'équation de Poisson spécifiée pour modéliser les propriétés électriques du système. Cette résolution nous a permis d'obtenir la distribution du potentiel électrique dans notre domaine de simulation. Ensuite, en calculant le gradient de ce potentiel électrique, on a pu déterminer la variation spatiale de l'intensité du champ électrique, ce qui permet de comprendre comment le champ électrique est réparti dans l'espace autour du canal de leader descendant simulé. Cette information est essentielle pour étudier le phénomène de la foudre dans son aspect électrostatique et pour analyser comment les différentes configurations du canal de foudre affectent le champ électrique environnant.

3.7 Visualisation des Résultats

Après avoir résolu numériquement l'équation de Poisson et obtenu la distribution du potentiel électrique, on a procédé à la visualisation des résultats pour mieux comprendre les phénomènes électrostatiques dans notre simulation.

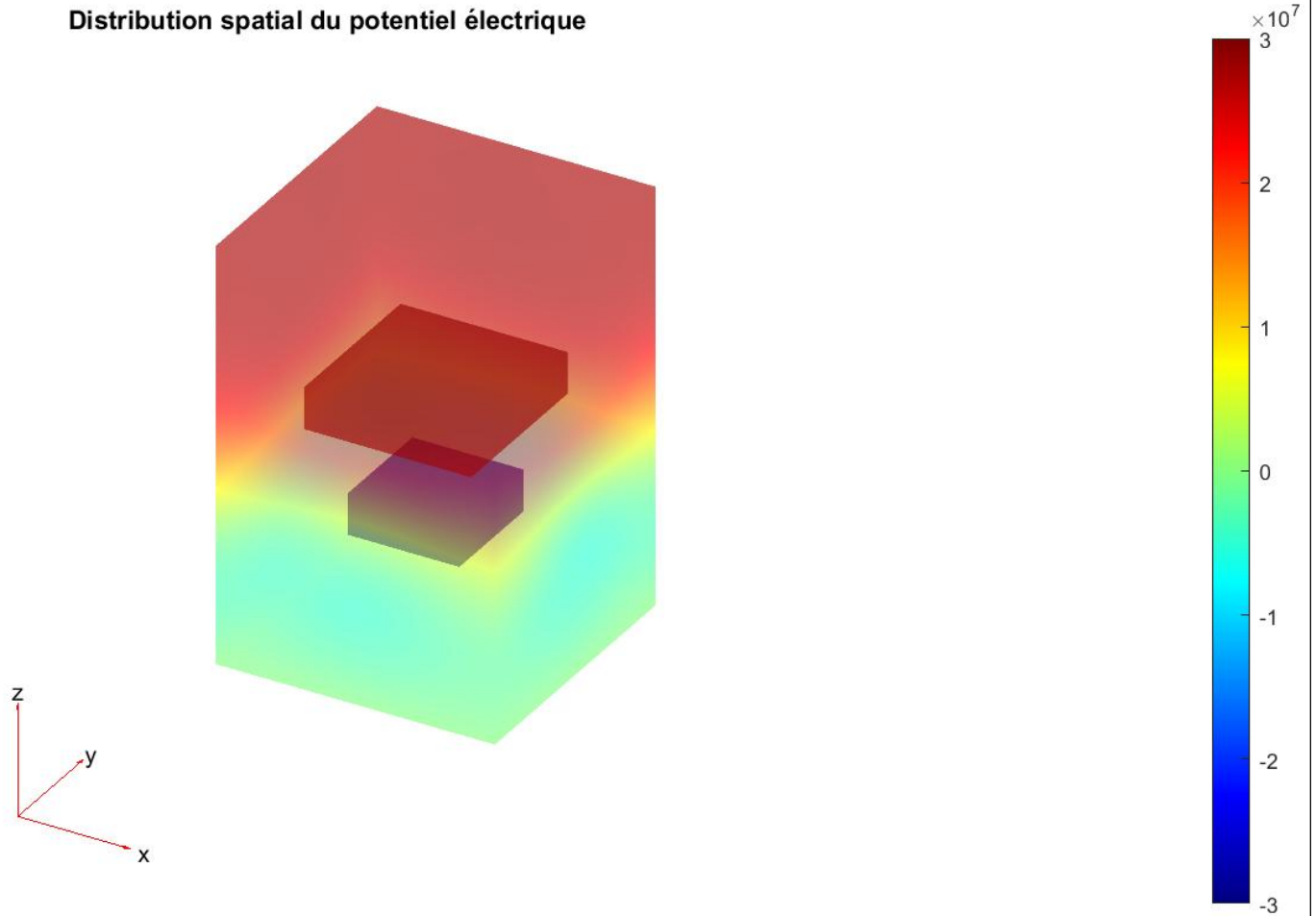


Figure 3-7: Distribution spatial du potentiel électrique

Les figures ci-dessous présentent la visualisation des lignes équipotentiels pour les deux configurations du canal de leader étudiées.

1) Visualisation des Lignes Équipotentiels :

On a visualisé les lignes équipotentiels pour deux configurations différentes du canal de leader :

- Un canal de leader rectiligne vertical

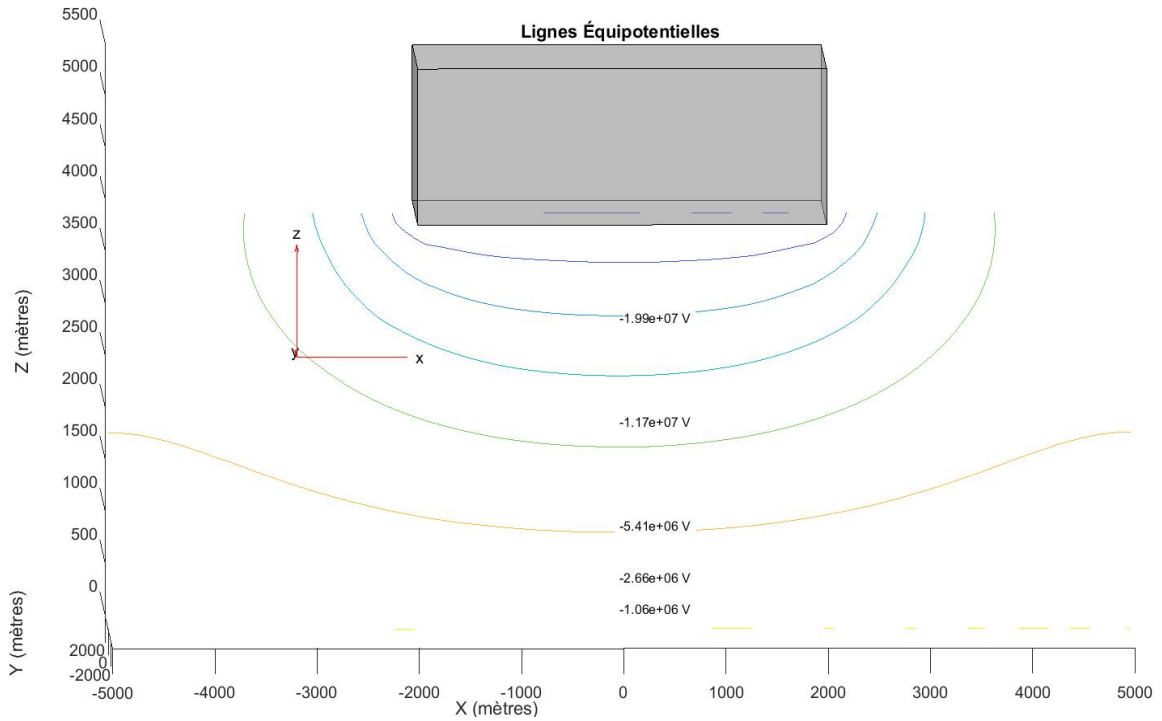


Figure 3-8: Lignes équipotentielles avant l'apparition de leader descendant négative pour une coupe à $Y=0$

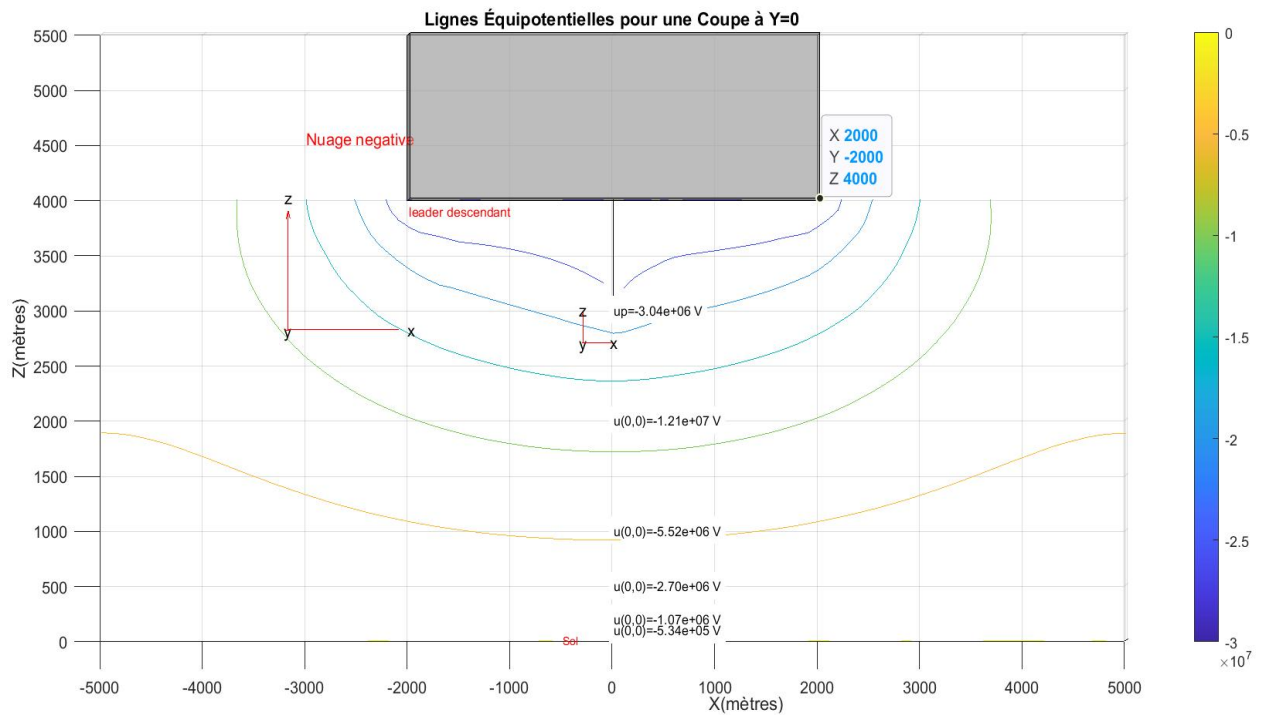


Figure 3-9: Lignes équipotentielles pour canal ionisé rectiligne vertical situé à une hauteur de 3000 mètres au-dessus du sol

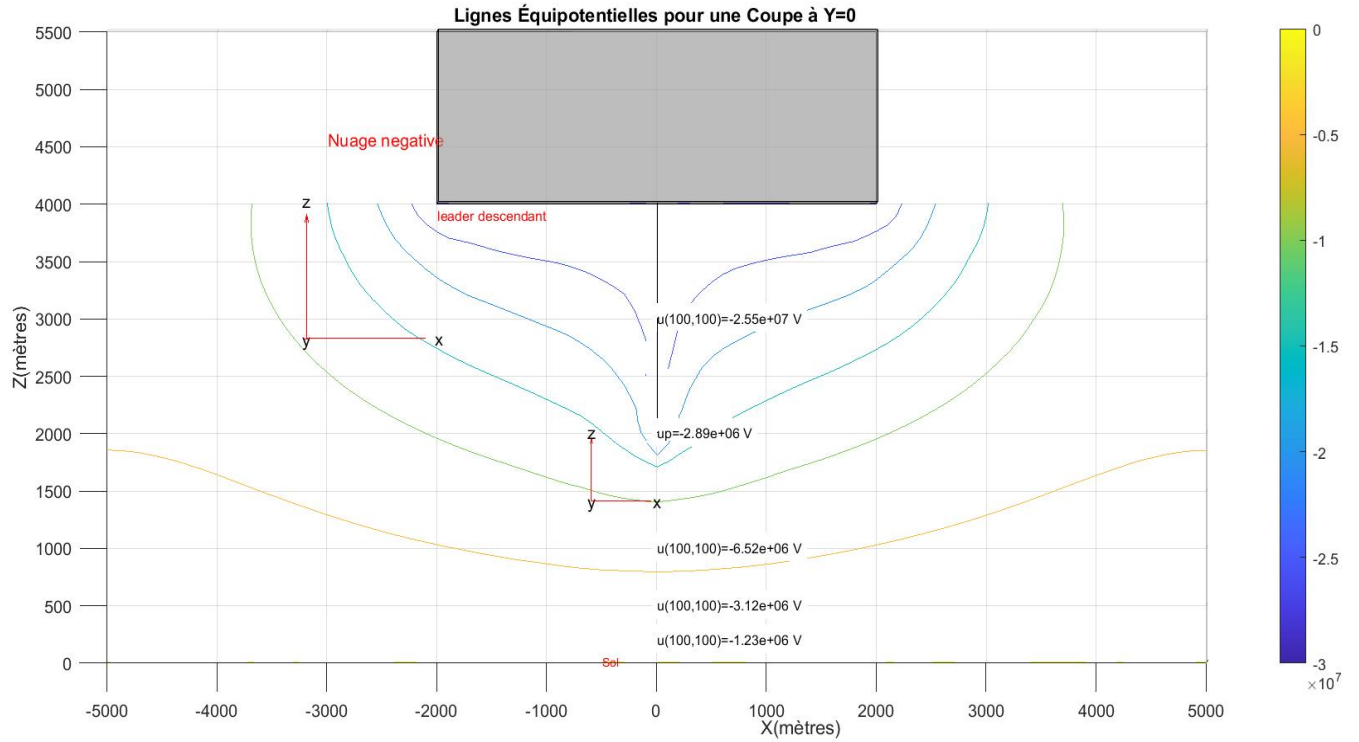


Figure 3-10: Lignes équipotentiels pour canal ionisé rectiligne vertical situé à une hauteur de 2000 mètres au-dessus du sol

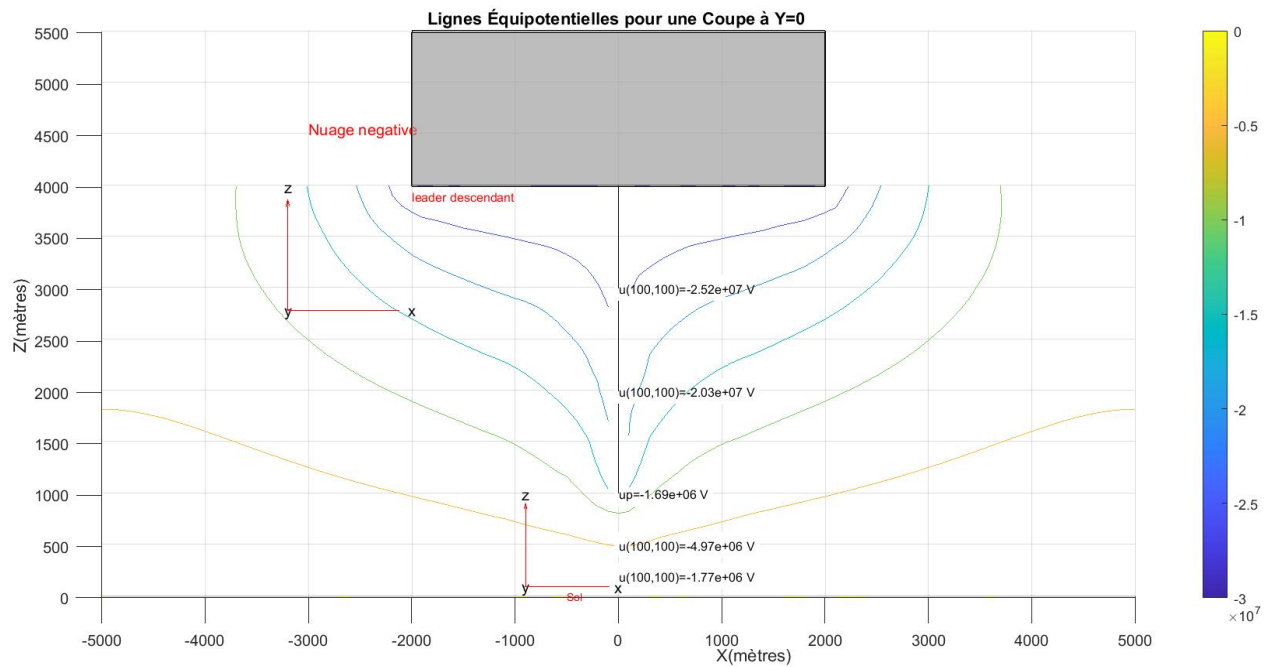


Figure 3-11: Lignes équipotentiels pour canal ionisé rectiligne vertical situé à une hauteur de 1000 mètres au-dessus du sol

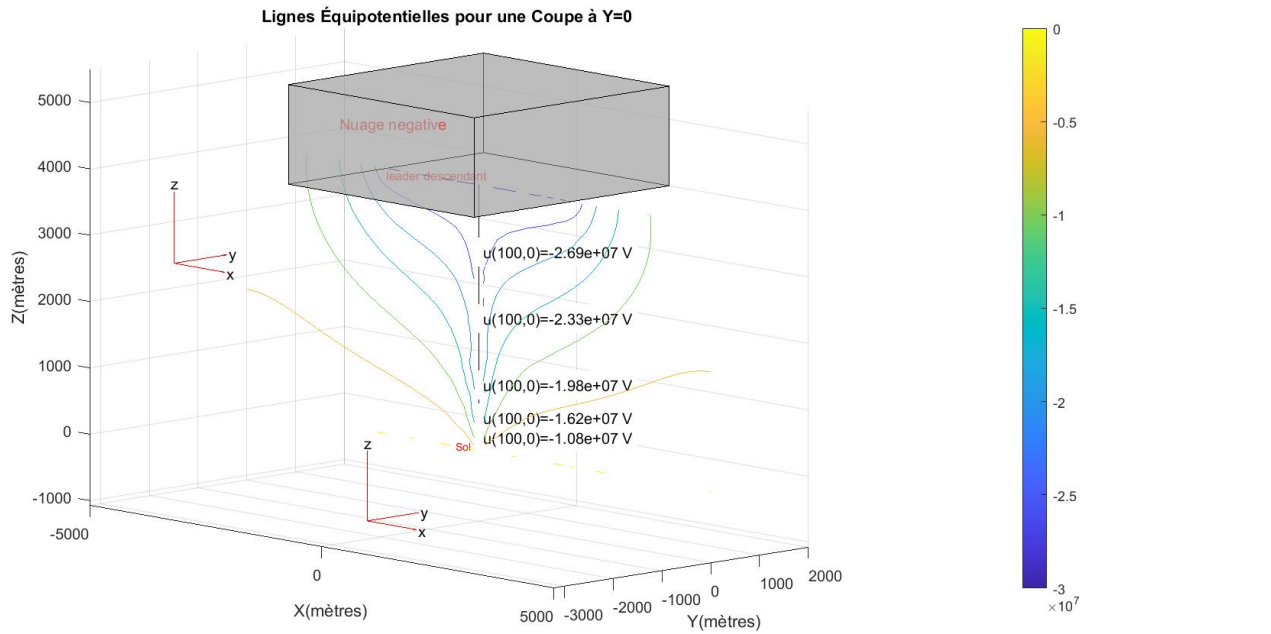


Figure 3-12: Lignes équipotentiellles pour canal ionisé rectiligne vertical situé à une hauteur de 100 mètres au-dessus du sol

➤ Un canal de leader rectiligne incliné par rapport à la base du nuage

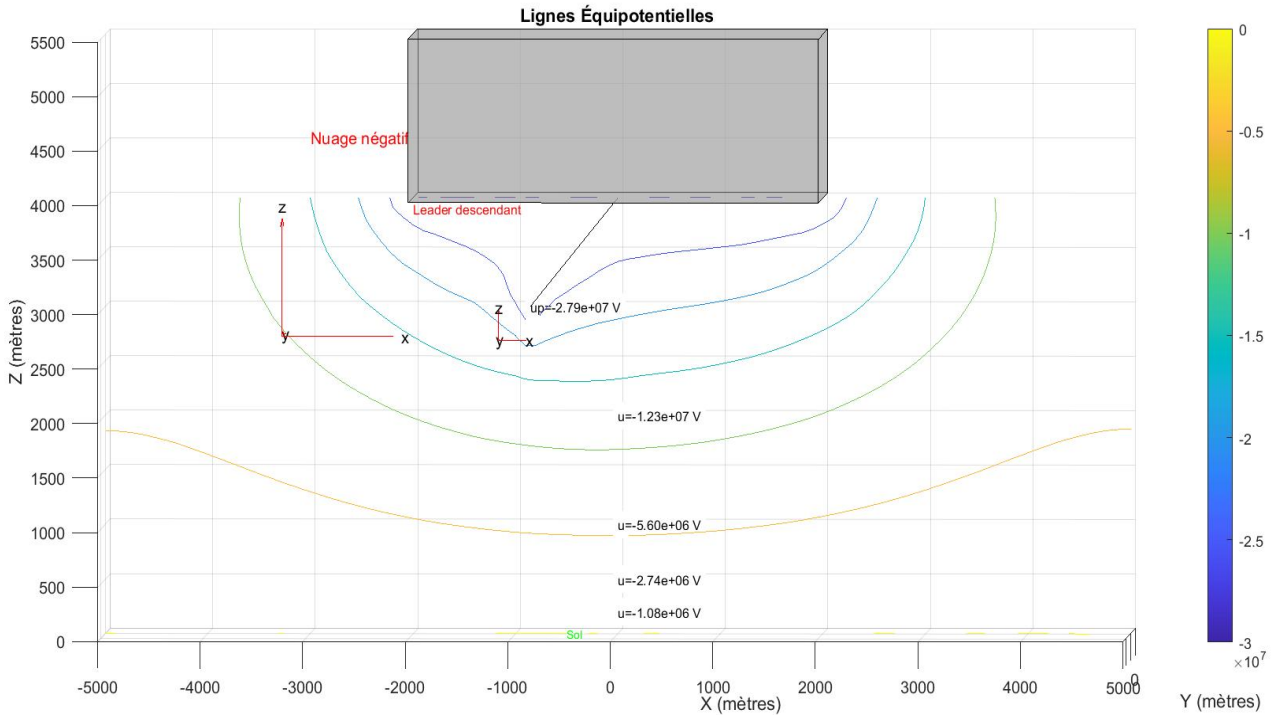


Figure 3-13: Lignes équipotentiellles pour canal ionisé rectiligne incliné situé à une hauteur de 3000 mètres au-dessus du sol pour une coupe Y=0

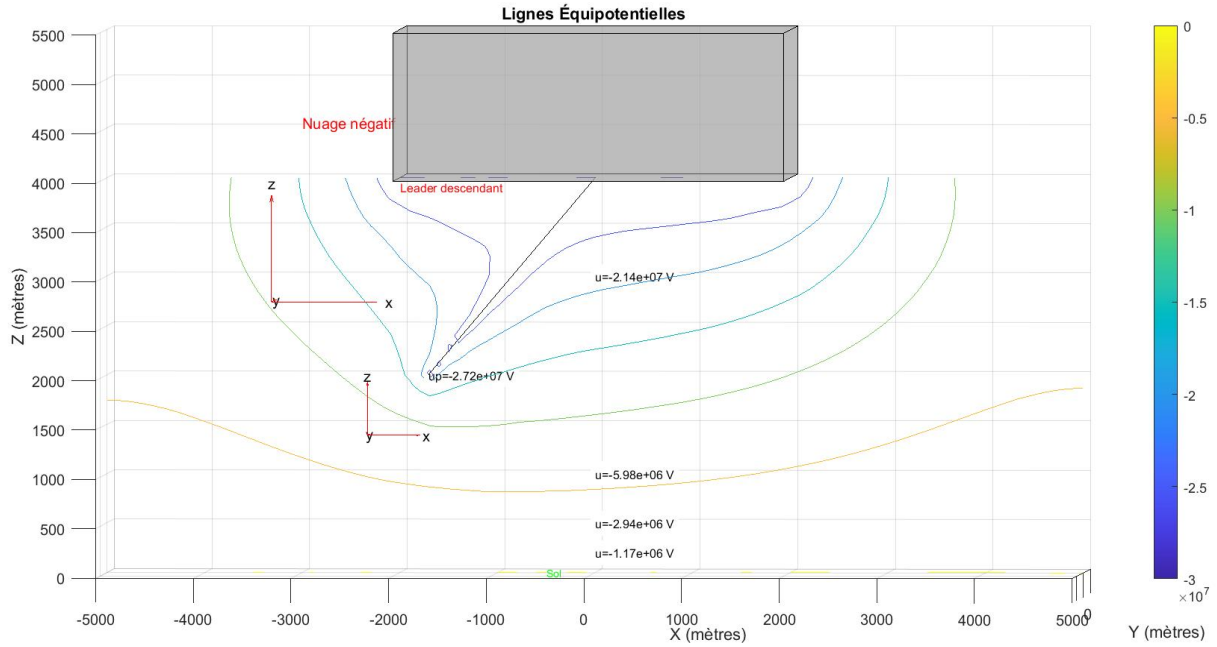


Figure 3-14: Lignes équipotentiels pour canal ionisé rectiligne incliné situé à une hauteur de 2000 mètres au-dessus du sol pour une coupe Y=0.

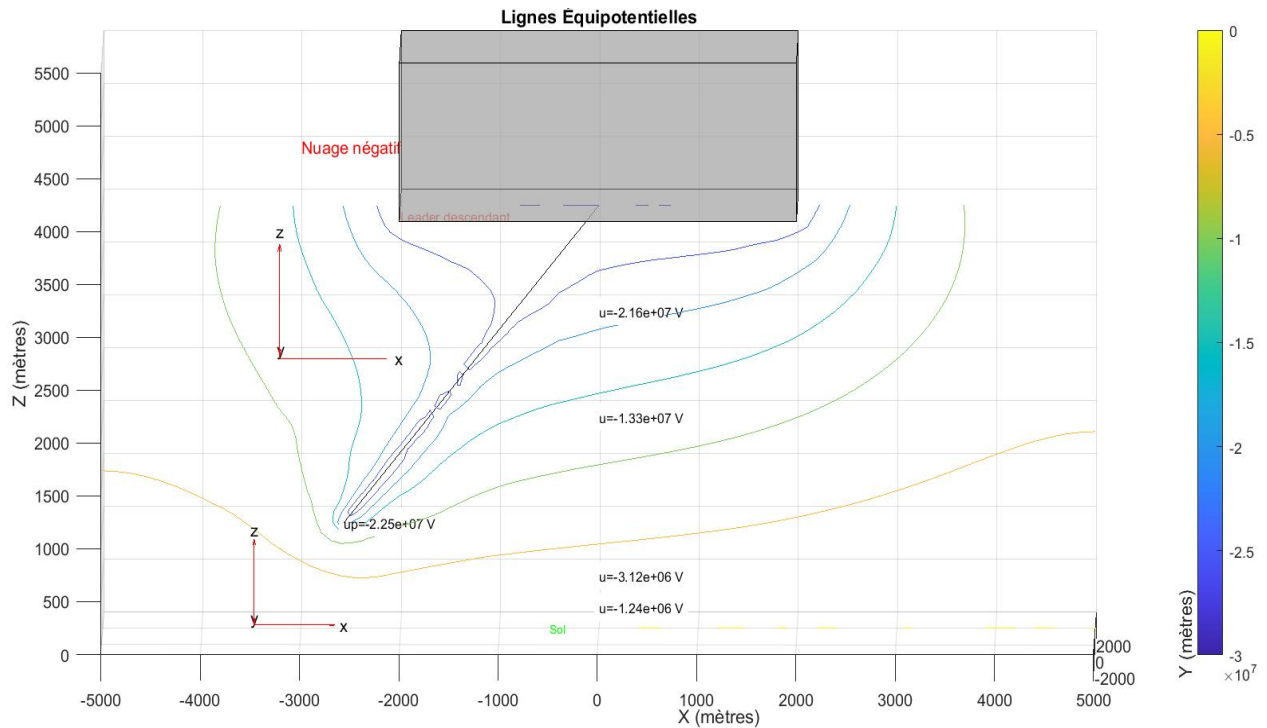


Figure 3-15: Lignes équipotentiels pour canal ionisé rectiligne incliné situé à une hauteur de 1000 mètres au-dessus du sol pour une coupe Y=0

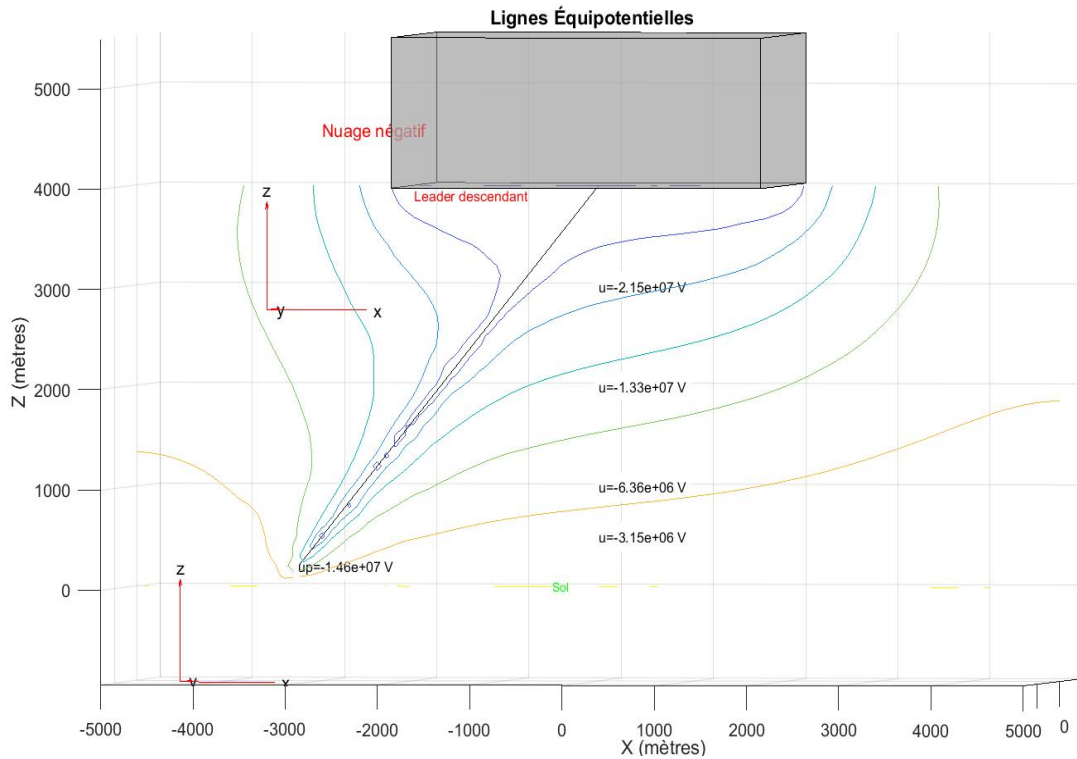


Figure 3-16: Lignes équipotentielles pour canal ionisé rectiligne incliné situé à une hauteur de 100 mètres au-dessus du sol pour une coupe $Y=0$.

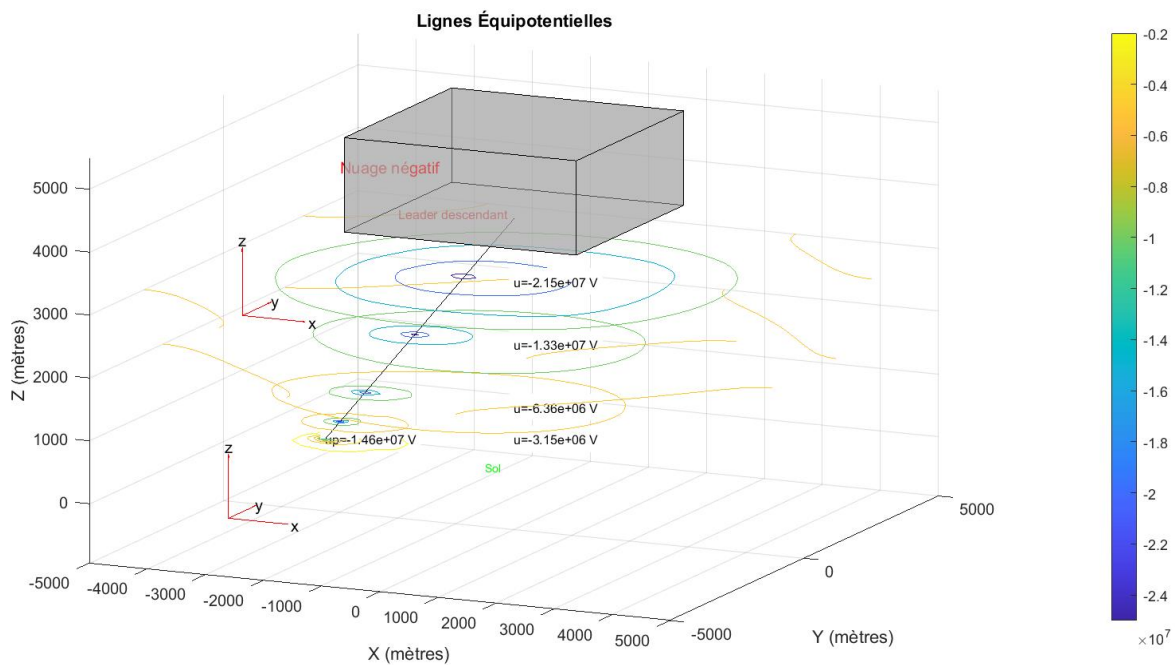


Figure 3-17: Lignes équipotentielles pour un canal ionisé rectiligne incliné situé à une hauteur de 100 mètres au-dessus du sol pour des coupes à $Z=100\text{m}$, 500m , 1000m , 2000m , 3000m

2) Visualisation des Lignes de Champ Électrique :

On a visualisé les résultats sous forme de vecteurs de champ électrique, qui montrent la direction et l'intensité du champ en chaque point, ainsi que de lignes de champ électrique, qui illustrent la trajectoire que suivrait une particule chargée sous l'influence de ce champ. Ces visualisations offrent une perspective claire sur les interactions électrostatiques dans le phénomène de la foudre.

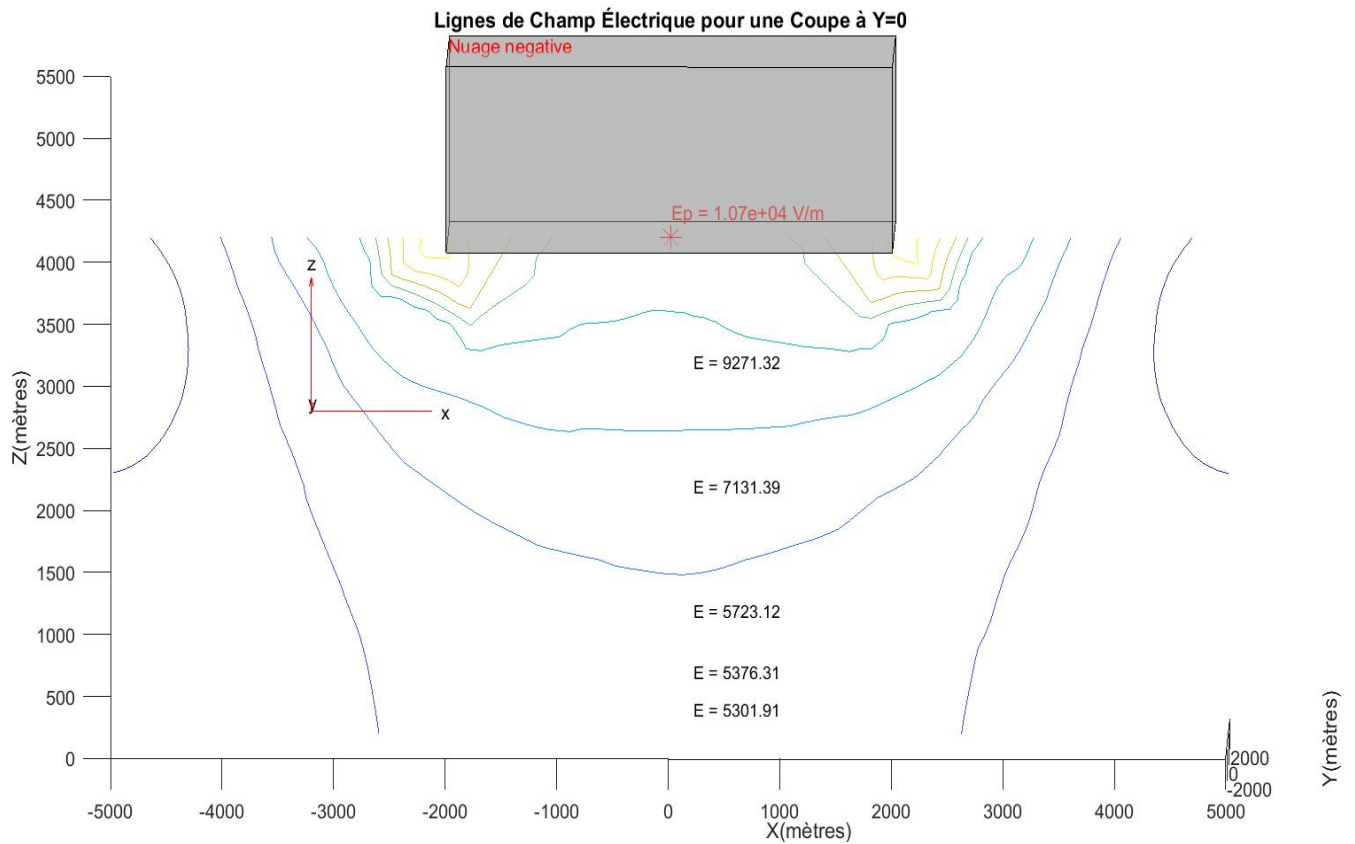


Figure 3-18:Lignes de champ électrique avant l'apparition de leader descendant

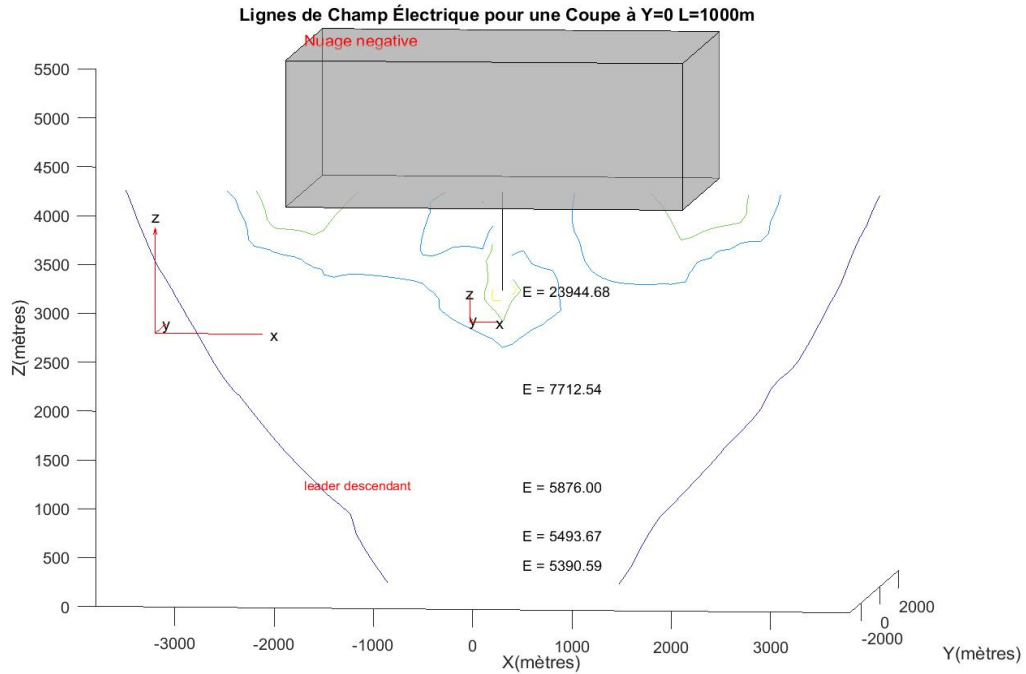


Figure 3-19: Lignes de champ électrique pour un canal ionisé rectiligne vertical situé à une hauteur de 3000 mètres au-dessus du sol

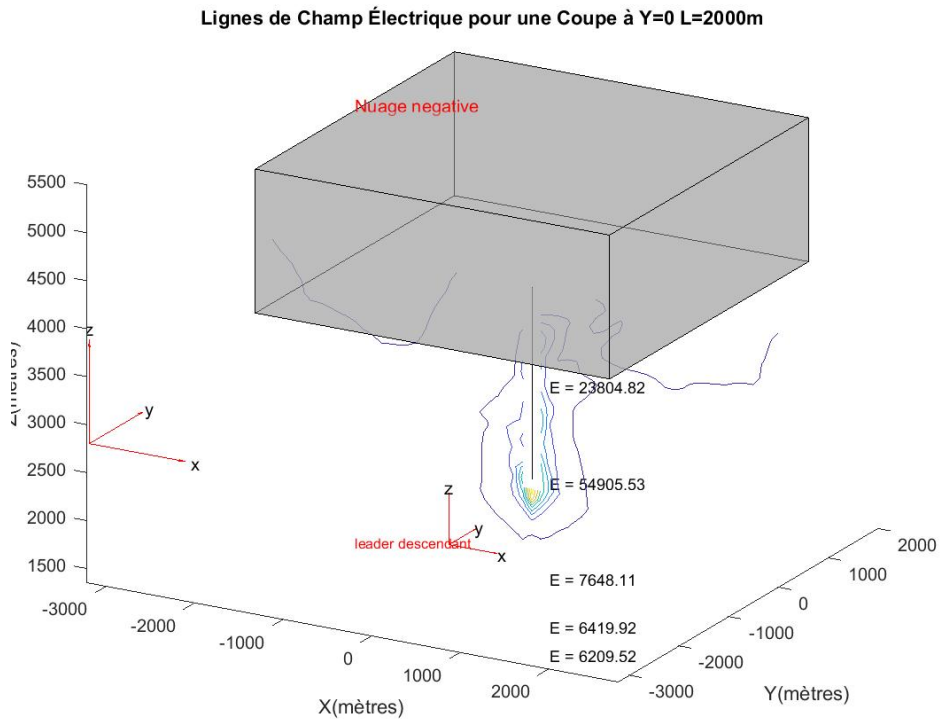


Figure 3-20: Lignes de champ électrique pour un canal ionisé rectiligne vertical situé à une hauteur de 2000 mètres au-dessus du sol

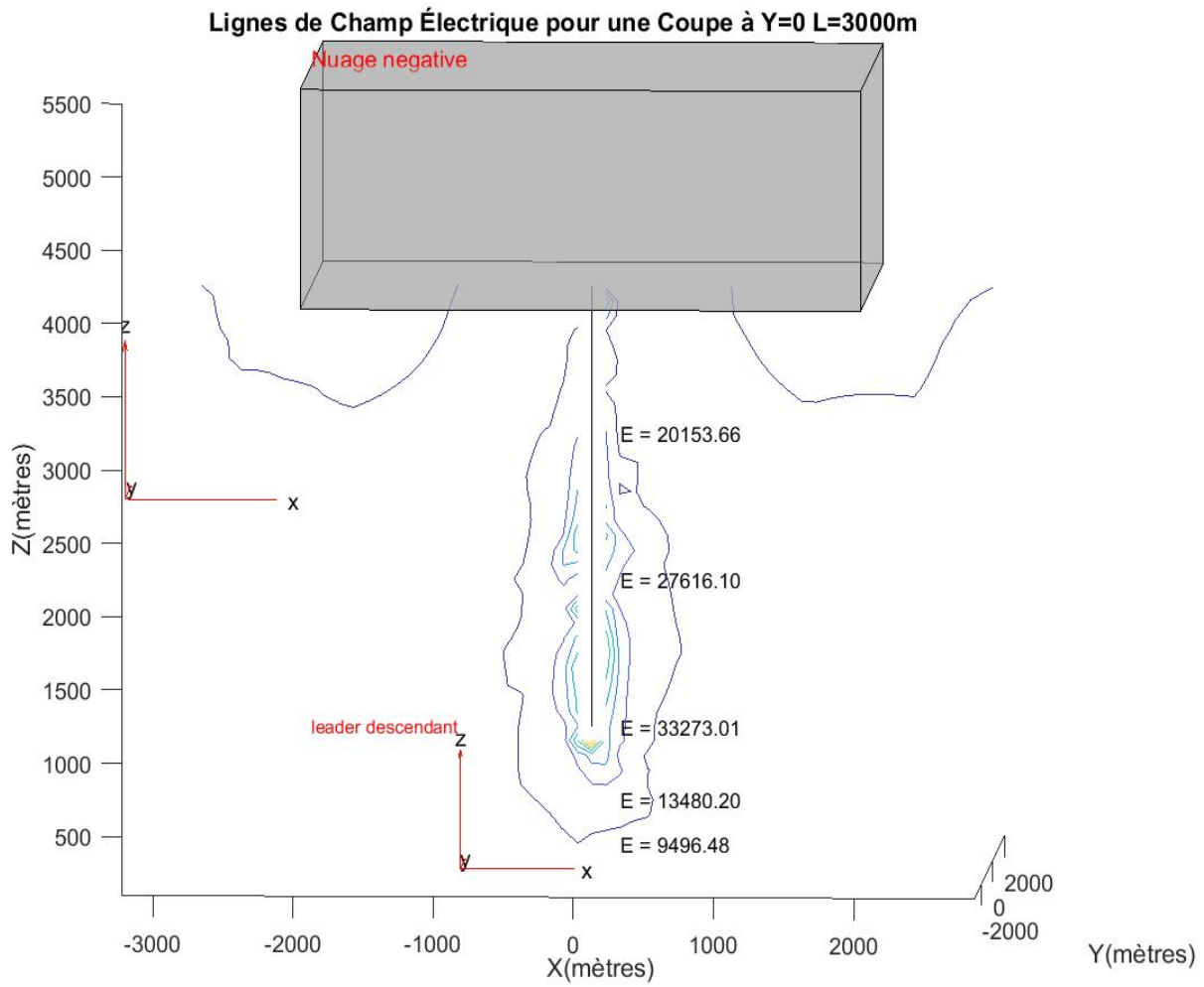


Figure 3-21: Lignes de champ électrique pour un canal ionisé rectiligne vertical situé à une hauteur de 1000 mètres au-dessus du sol

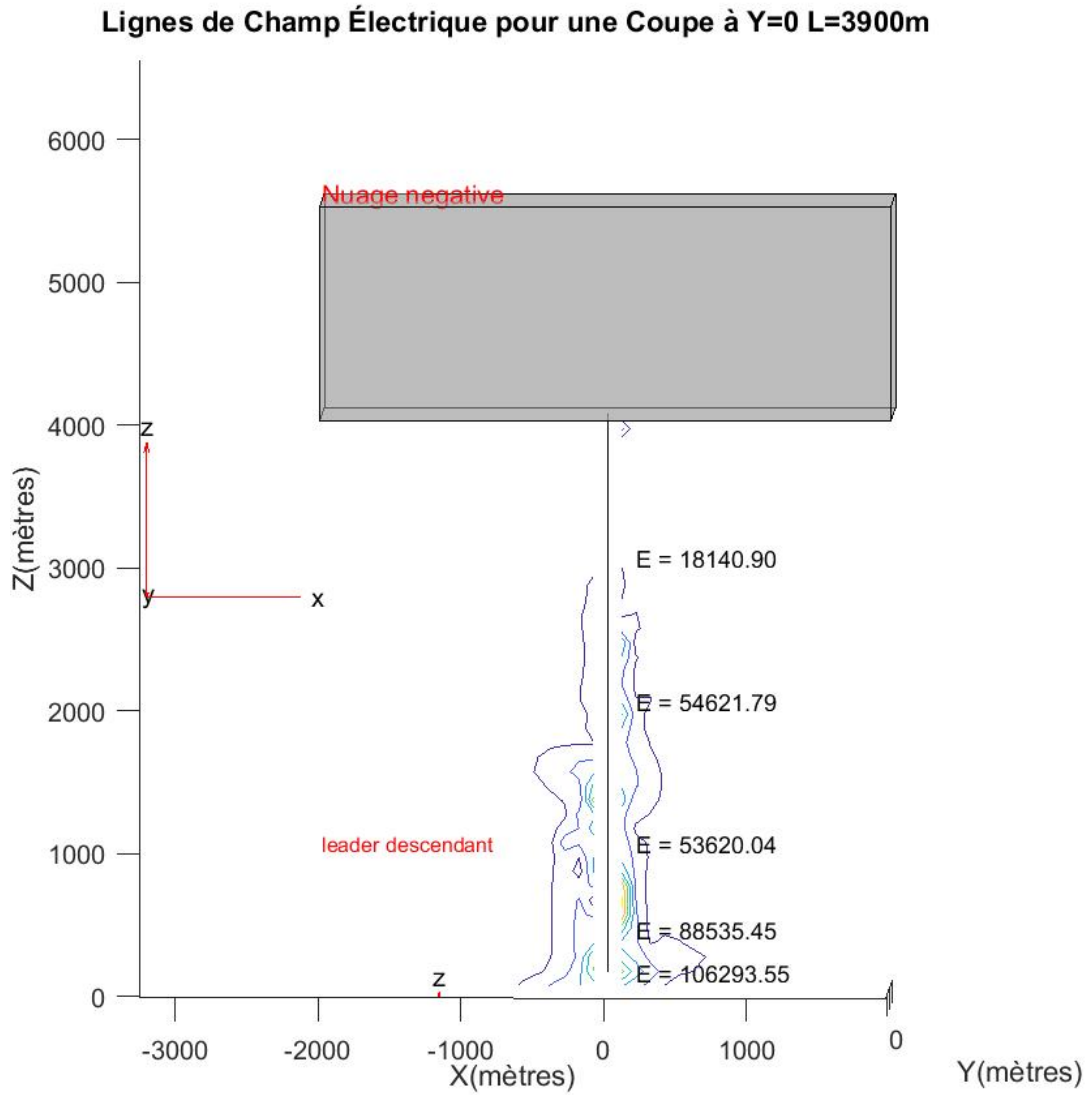


Figure 3-22: Lignes de champ électrique pour un canal ionisé rectiligne vertical situé à une hauteur de 100 mètres au-dessus du sol

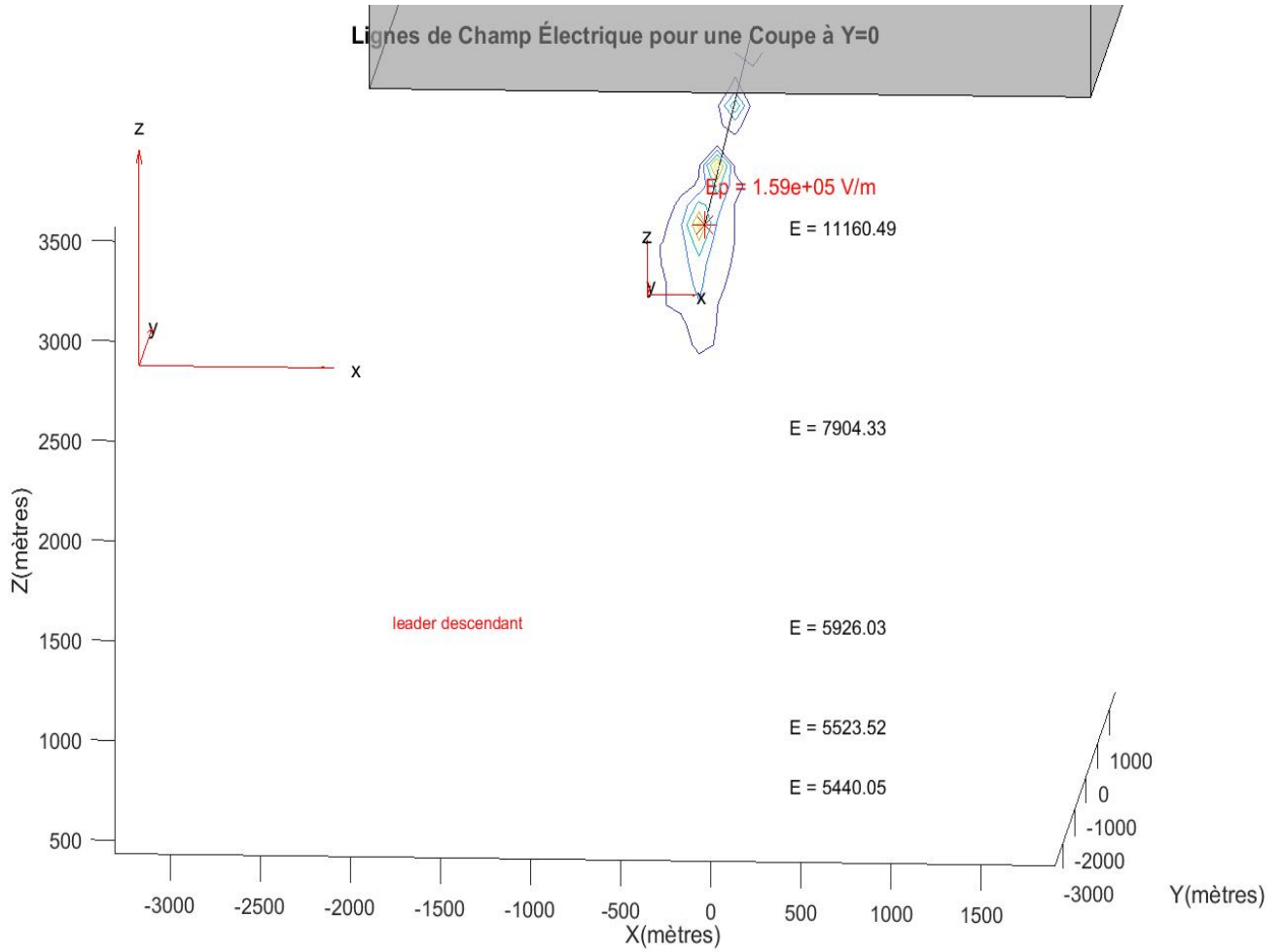


Figure 3-23: Lignes de champ électrique pour un canal ionisé rectiligne incliné situé à une hauteur de 3000 mètres au-dessus du sol

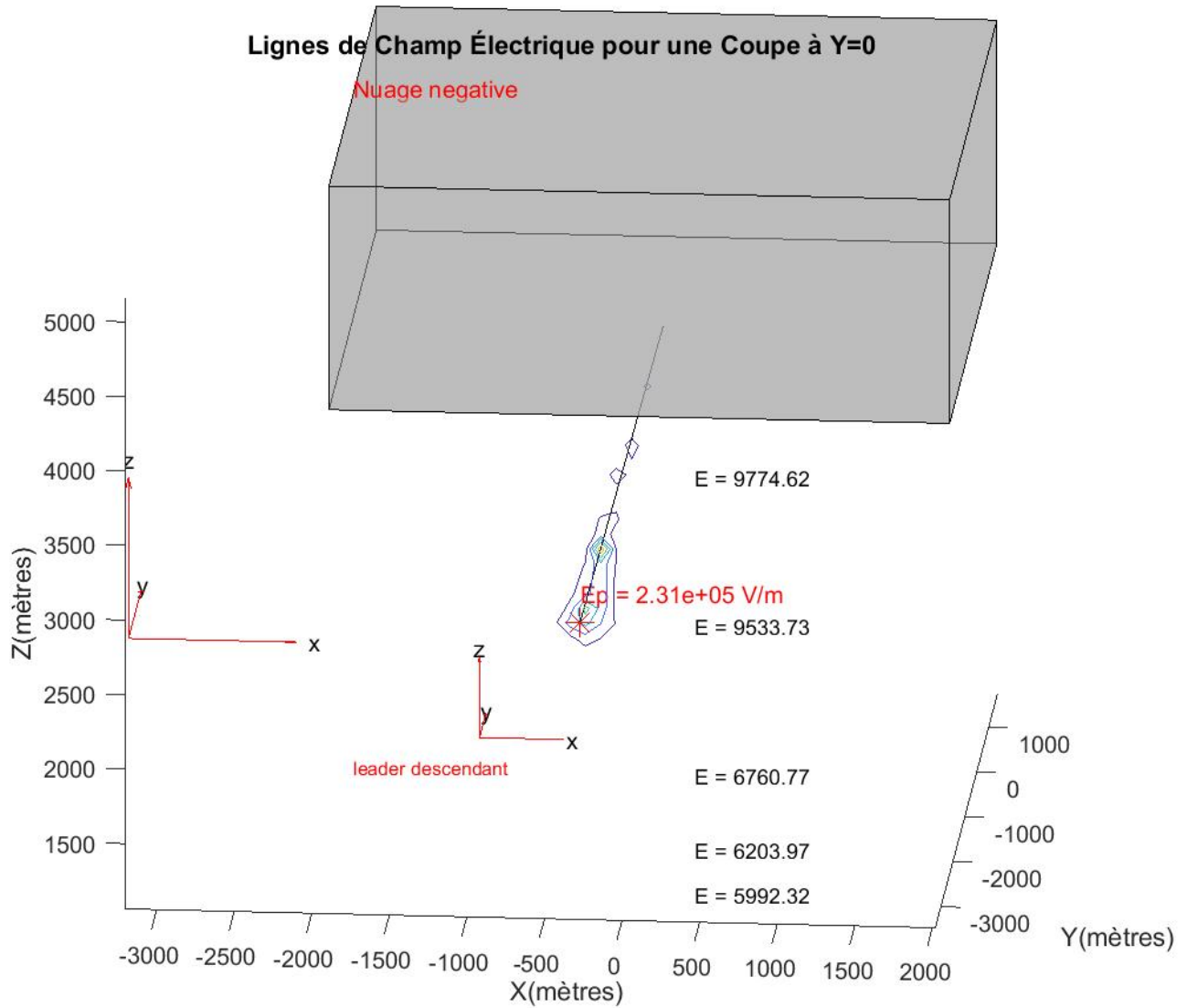


Figure 3-24: Lignes de champ électrique pour un canal ionisé rectiligne incliné situé à une hauteur de 2000 mètres au-dessus du sol

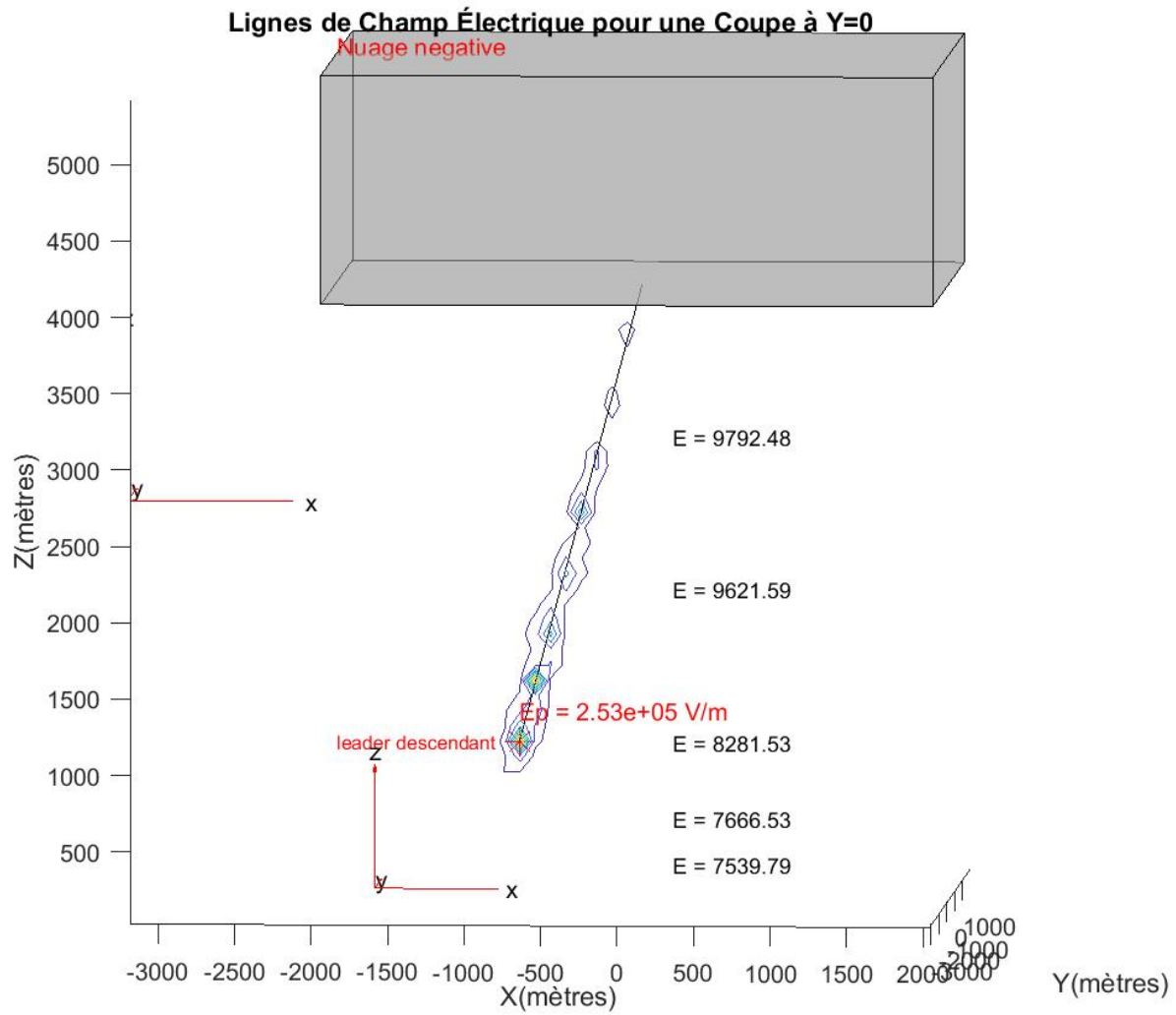


Figure 3-25: Lignes de champ électrique pour un canal ionisé rectiligne incliné situé à une hauteur de 1000 mètres au-dessus du sol

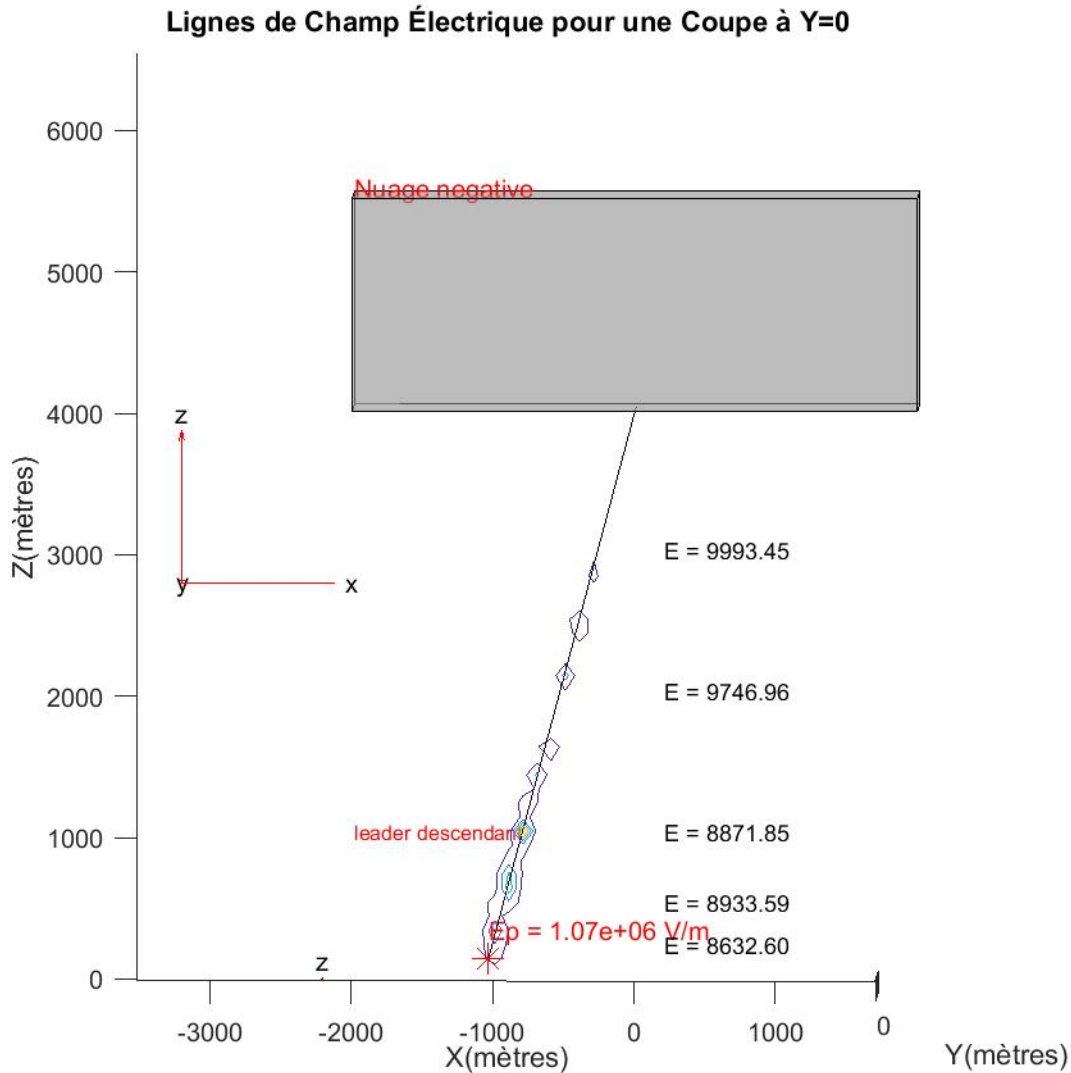


Figure 3-26: Lignes de champ électrique pour un canal ionisé rectiligne incliné situé à une hauteur de 100 mètres au-dessus du sol

3.8 Résultats et Analyse

Après avoir visualisé les résultats pour mieux comprendre les phénomènes électrostatiques dans notre simulation, nous avons procédé à une analyse détaillée pour tirer des conclusions significatives.

➤ Analyse des Résultats de Potentiel Électrique

1) Avant l'apparition du leader:

Avant l'apparition du leader descendant (voir figure 3-8), les lignes équipotentielles montrent la distribution du potentiel électrique en l'absence de ce leader. On observe que le potentiel électrique diminue à mesure que l'on s'éloigne du nuage négatif. Cette diminution du potentiel

électrique en s'éloignant du nuage est due à la répartition des charges électriques dans le nuage. Le nuage étant chargé négativement, il crée un potentiel électrique élevé à proximité et ce potentiel diminue progressivement à mesure que l'on s'éloigne du nuage.

2) Après l'apparition du leader descendant:

a) Diminution du Potentiel Électrique à la pointe du Leader:

Après l'apparition du leader descendant, on remarque que à mesure que le leader s'approche du sol, que ce soit pour un leader rectiligne vertical ou un leader rectiligne incliné, le potentiel à la pointe du leader diminue. Cette diminution s'explique par la redistribution des charges où Les charges négatives dans le leader cherchent à se distribuer uniformément le long du leader influencées par l'attraction exercée par le sol qui étant à un potentiel nul ou légèrement positif par induction, attire les charges négatives du leader. Cette distribution sur une plus grande longueur réduit le potentiel à la pointe, entraînant une diminution du potentiel électrique à la pointe.

b) Augmentation du Potentiel Électrique au Voisinage du Leader:

On peut remarquer aussi que le potentiel électrique dans l'environnement voisinage de leader augmente à chaque fois que le leader descend. Cette augmentation du potentiel au voisinage du leader s'explique par la concentration des charges au niveau du leader. Le leader descendant transporte des charges négatives du nuage vers la terre. À mesure que le leader descend, il accumule ces charges, augmentant ainsi la densité de charge dans le leader lui-même. Cette accumulation de charges négatives dans le leader crée un potentiel électrique élevé autour du leader, car les charges cherchent à se répartir dans l'espace environnant.

Les valeurs du potentiel pour chaque scénario sont présentées dans les figures 3-9 à 3-17.

➤ **Analyse des Résultats de Champ Électrique**

1) Avant l'apparition du leader descendant:

Avant l'apparition du leader descendant, le champ électrique diminue à mesure que l'on s'éloigne du nuage négatif. Cette diminution du champ électrique en s'éloignant du nuage est due à la répartition des charges électriques dans le nuage. Étant chargé négativement, le nuage crée un champ électrique élevé à proximité, mais ce champ diminue progressivement à mesure que l'on s'éloigne du nuage (Voir figure (3.18)).

Ainsi, La forme géométrique du cuboïde influence la distribution du champ électrique. Les coins et les bords ont tendance à montrer des concentrations de champ plus élevées.

2) Après l'apparition du leader descendant:

a) Augmentation du Champ Électrique au Voisinage du Leader:

On remarque que le champ électrique dans l'environnement voisinage du leader augmente également. Cette augmentation s'explique par l'accumulation de charges électriques le long du canal du leader, ce qui intensifie le champ électrique localement.

b) Augmentation du Champ Électrique à la pointe du leader:

On remarque que le champ électrique reste particulièrement intense et concentré à la pointe du leader, car le champ électrique "gradient de potentiel" est une mesure de la variation du potentiel électrique par unité de distance. Lorsque le leader s'approche du sol, la distance entre sa pointe et le sol diminue. Par conséquent, la variation du potentiel électrique à la pointe du leader sur cette distance plus courte devient plus importante, créant ainsi un gradient de potentiel plus prononcé. Cette variation rapide du potentiel sur une distance plus courte signifie qu'il y a une grande différence de potentiel électrique sur une petite distance, ce qui correspond à un champ plus élevé à la pointe de leader. Les valeurs de champ électrique sont affichées aux figures suivantes :

- pour un leader rectiligne vertical voir les figures(3-19),(3-20),(3-21),(3-22).
- pour un leader rectiligne incliné voir les figures(3-23),(3-24),(3-25),(3-26).

c) Évolution du Champ Électrique en Fonction de la Hauteur du Leader:

On remarque pour des hauteurs supérieures à 100 m, les vecteurs de champ électrique sortent de la pointe du leader (Voir figure 3-27). Cela indiquant que cette zone agit comme une source de champ électrique en raison de la concentration de charges négatives.

Lorsque le leader atteint environ 100 m de hauteur, on observe un changement : les vecteurs de champ électrique deviennent entrants à la pointe du leader (Voir figure 3-28). Cela peut être interprété comme suit :

-À cette hauteur (100 m), le leader est suffisamment proche de la terre pour que les charges positives induites sur le sol exercent une influence significative, attirant les charges négatives du leader et créant ainsi des vecteurs de champ dirigés vers la pointe du leader.

- L'inversion du champ électrique à la pointe du leader peut indiquer que le leader est en phase de préparation pour la décharge finale vers le sol. Le champ électrique entrant signale l'imminence de la connexion entre le leader et le sol, permettant la neutralisation rapide des charges.

-En observant les résultats, une anomalie est perceptible dans le champ électrique au milieu du leader. Cette observation pourrait être imputée aux limites inhérentes des outils de visualisation de MATLAB, qui peuvent éprouver des difficultés à représenter de manière précise les phénomènes complexes.

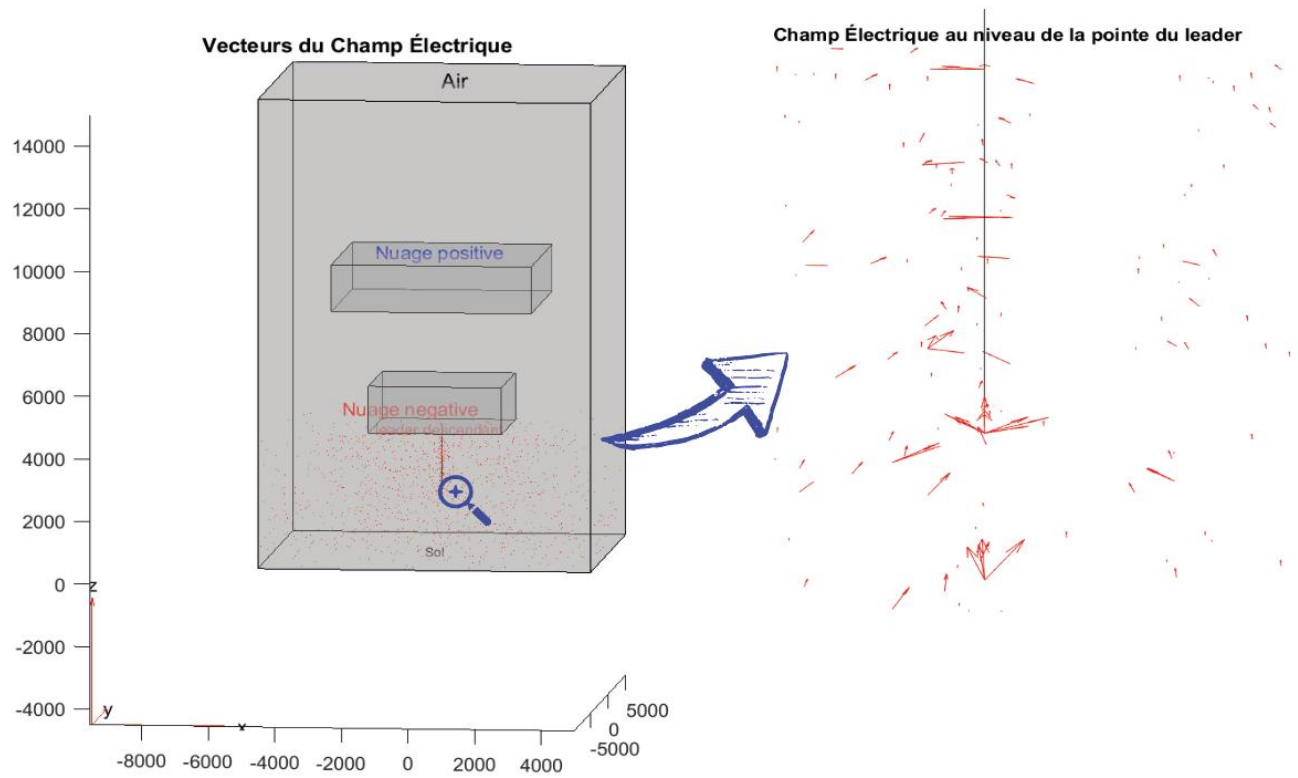


Figure 3-27: La distribution du champ électrique le long d'un leader vertical de longueur $L=2000\text{m}$

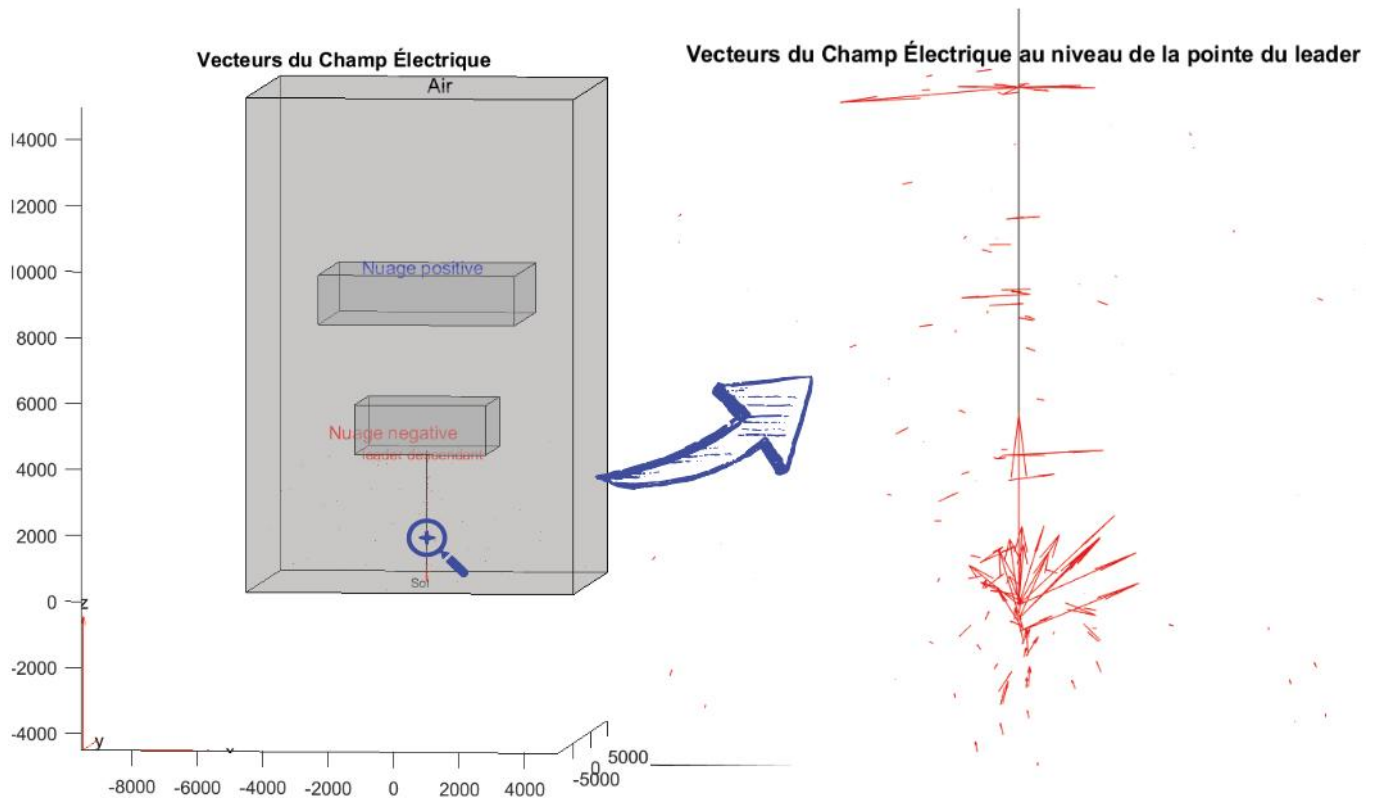


Figure 3-28: La distribution du champ électrique le long d'un leader vertical de longueur $L=3900m$

d) Concentration du Champ Électrique sur le Sol:

En observant les figures(3-29)(3-30)(3-31)(3.32), on remarque que chaque fois que la longueur du leader augmente, le champ électrique au sol se concentre de plus en plus sous la pointe du leader. Cette concentration du champ électrique au sol est particulièrement notable pour un leader rectiligne vertical ou incliné.

Pour un leader ionisé rectiligne vertical ou incliné de longueur $L=1000m$ le champ électrique est déjà concentré sous la pointe du leader, mais à mesure que la longueur augmente à 2000m, 3000m et 3900m, cette concentration au sol devient encore plus prononcée. Cela s'explique par l'accumulation de charges négatives à l'extrémité du leader, qui induit une augmentation de l'intensité du champ électrique dans cette région spécifique.

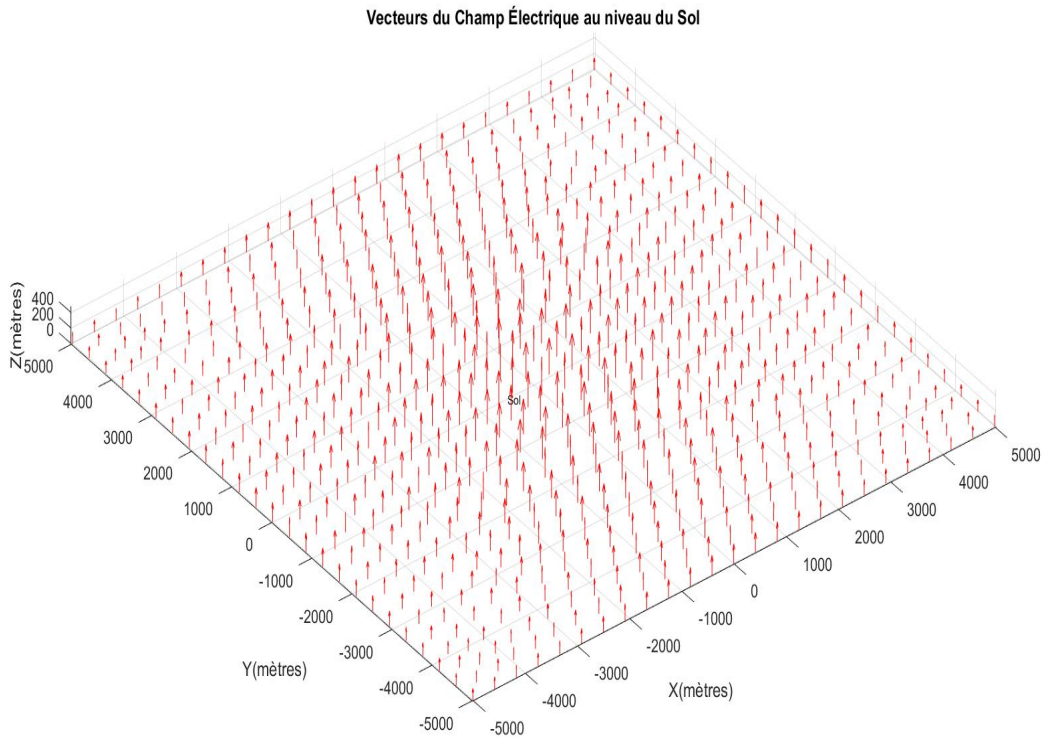


Figure 3-29: Répartition des vecteurs de champ électrique sur le sol pour un canal ionisé rectiligne incliné au dessus du sol avec une hauteur de 3000 mètres

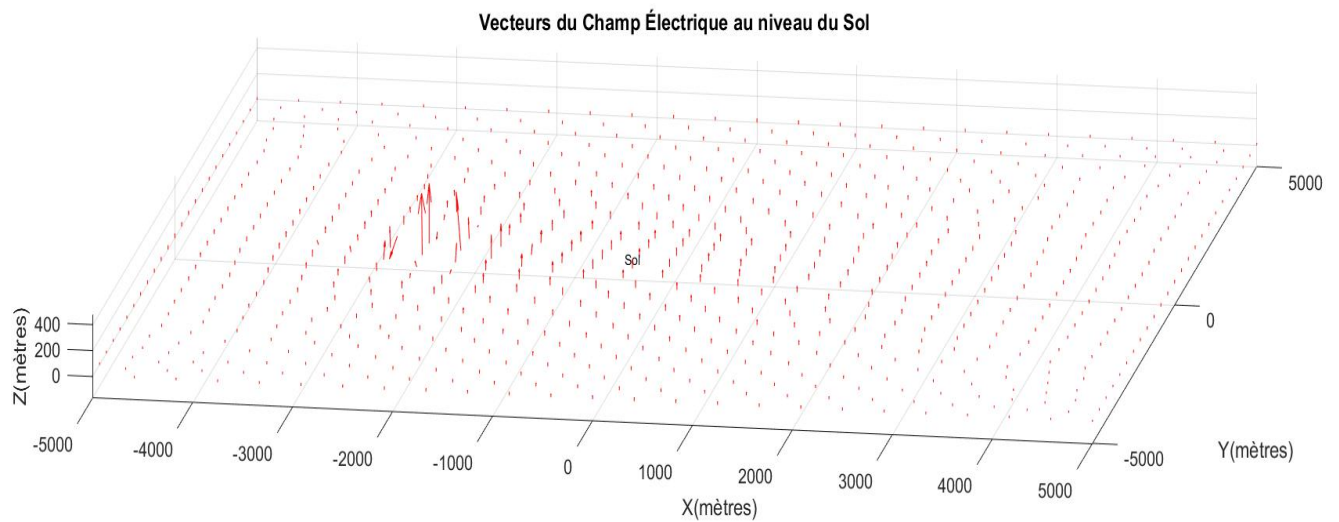


Figure 3-30: Répartition des vecteurs de champ électrique sur le sol pour un canal ionisé rectiligne incliné au dessus du sol avec une hauteur de 100 mètres

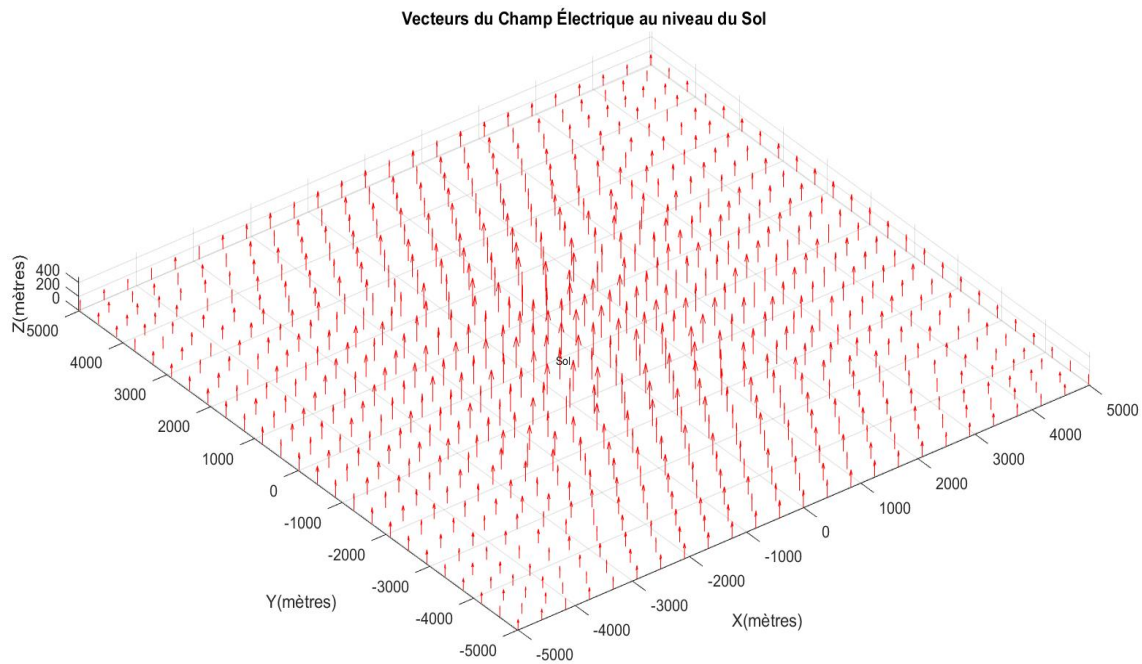


Figure 3-31: Répartition des vecteurs de champ électrique sur le sol pour un canal ionisé rectiligne Verticale au dessus du sol avec une hauteur de 3000 mètres

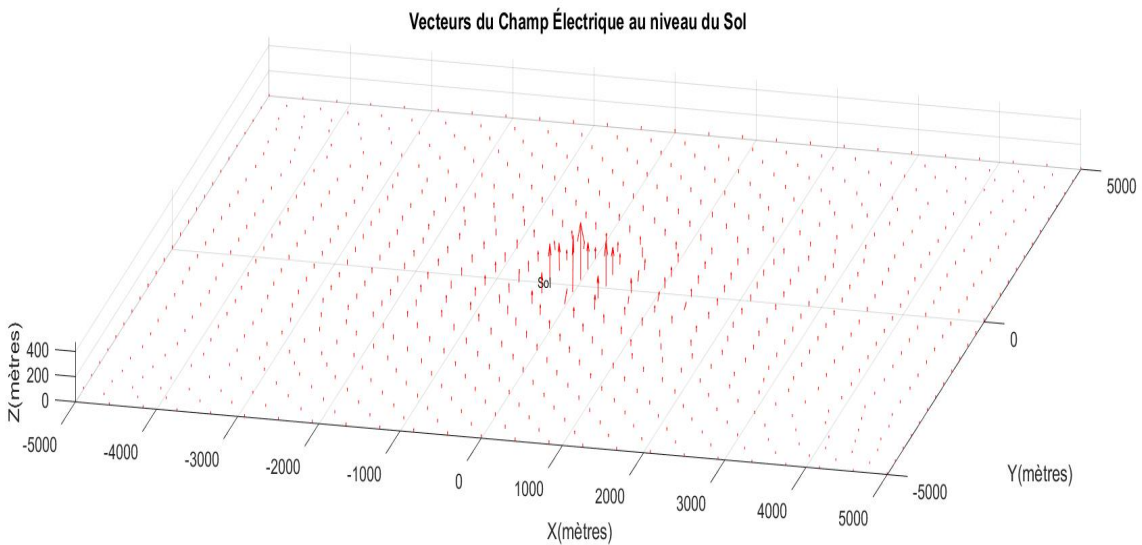


Figure 3-32: Répartition des vecteurs de champ électrique sur le sol pour un canal ionisé rectiligne Verticale au dessus du sol avec une hauteur de 100 mètres

e) Influence de l'angle d'inclinaison sur une région de mesure:

On remarque que l'angle d'inclinaison du leader de foudre influence la distance entre la pointe du leader et la région de mesure située à la position ($x = 0$ mètres, $y = 0$ mètres, $z = 0$ mètres), ce qui peut contribuer à la variation du champ électrique observée (figure 3-33). Lorsque l'angle d'inclinaison augmente, le leader se déplace vers une position plus éloignée de la région de mesure. Cette augmentation de la distance réduit l'effet direct du leader sur la région de mesure, ce qui peut conduire à une diminution du champ électrique mesuré à cet endroit. Ainsi, en plus des effets sur la répartition des charges le long du canal et sur l'effet de pointe, la variation de la distance entre la pointe du leader et la région de mesure est un facteur clé à considérer dans l'interprétation de la diminution du champ électrique avec l'augmentation de l'angle d'inclinaison.

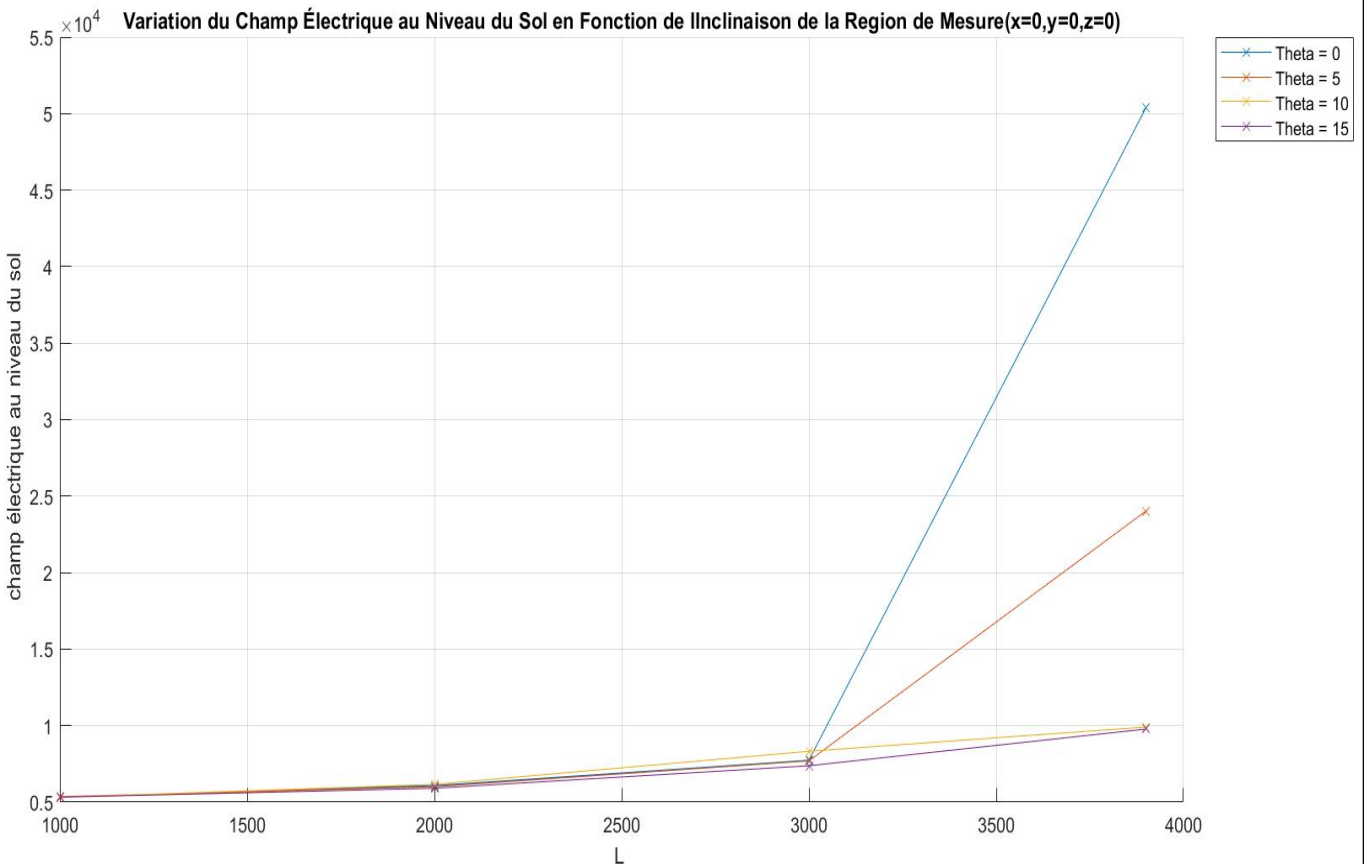


Figure 3-33: Variation du Champ Électrique pour une Région de Mesure située aux Coordonnées (0,0,0) pour Différents Angles d'Inclinaison

3.9 Comparaison des résultats obtenus pour leader incliné et verticale:

➤ **Potentiel Électrique:**

On remarque que le potentiel électrique à la pointe du leader rectiligne incliné est plus intense par rapport au leader rectiligne vertical (voir les figures 3-9 à 3-17). Cette différence de potentiel à la pointe entre un leader vertical et un leader incliné peut être due principalement à la répartition des charges le long de chaque leader et à la distance parcourue par ces charges.

Leader Vertical : Les charges sont réparties le long d'une ligne verticale, ce qui peut limiter la surface sur laquelle elles s'accumulent à la pointe du leader. Cela conduit à un potentiel électrique à la pointe relativement faible par rapport à celui de l'incliné.

Leader Incliné : Les charges sont réparties sur une surface plus grande en inclinaison, ce qui permet une accumulation de charges plus importante à la pointe, conduisant à un potentiel électrique à la pointe relativement élevé par rapport à celui du leader vertical.

Ainsi, le potentiel électrique à la pointe d'un leader vertical diminue de manière significative par rapport à celui d'un leader incliné.

Leader Vertical : les charges ont tendance à se concentrer davantage à la pointe du leader en raison de la gravité. Cette concentration de charges à la pointe entraîne une chute rapide du potentiel électrique.

Leader incliné: la répartition des charges est plus étalée sur une plus grande distance. La composante verticale de la gravité influence la distribution de charges, mais il y a aussi une composante horizontale due à l'inclinaison. Cette répartition plus uniforme entraîne une variation plus graduelle du potentiel le long du leader.

➤ **Champ électrique:**

On remarque que le champ électrique sous la pointe d'un leader vertical est plus important que sous un leader incliné. Cette différence peut s'expliquer par la variation plus importante du potentiel électrique en se rapprochant du sol pour un leader vertical par rapport à un leader incliné (Voir les figures de 3-34 à 3-41 pour une illustration visuelle de ces phénomènes).

➤ **Champ Électrique au Sol:**

Les illustrations ci-dessous démontrent que le champ électrique au sol sous la pointe d'un leader vertical est plus intense que sous un leader incliné. Cela peut être expliqué par une concentration plus élevée des charges alignées verticalement. En revanche, la répartition plus large des charges dans un leader incliné réduit la concentration du champ électrique sous la pointe, même si le champ à la pointe reste élevé. Cette différence de concentration et de répartition des charges entre les deux configurations explique pourquoi le champ électrique au sol sous la pointe d'un leader vertical est plus intense comparé à un leader incliné.

Les valeurs du champ au niveau de la pointe de leader ainsi que le sol sous la pointe de leader rectiligne incliné et verticale sont affichés sur les figures suivantes:

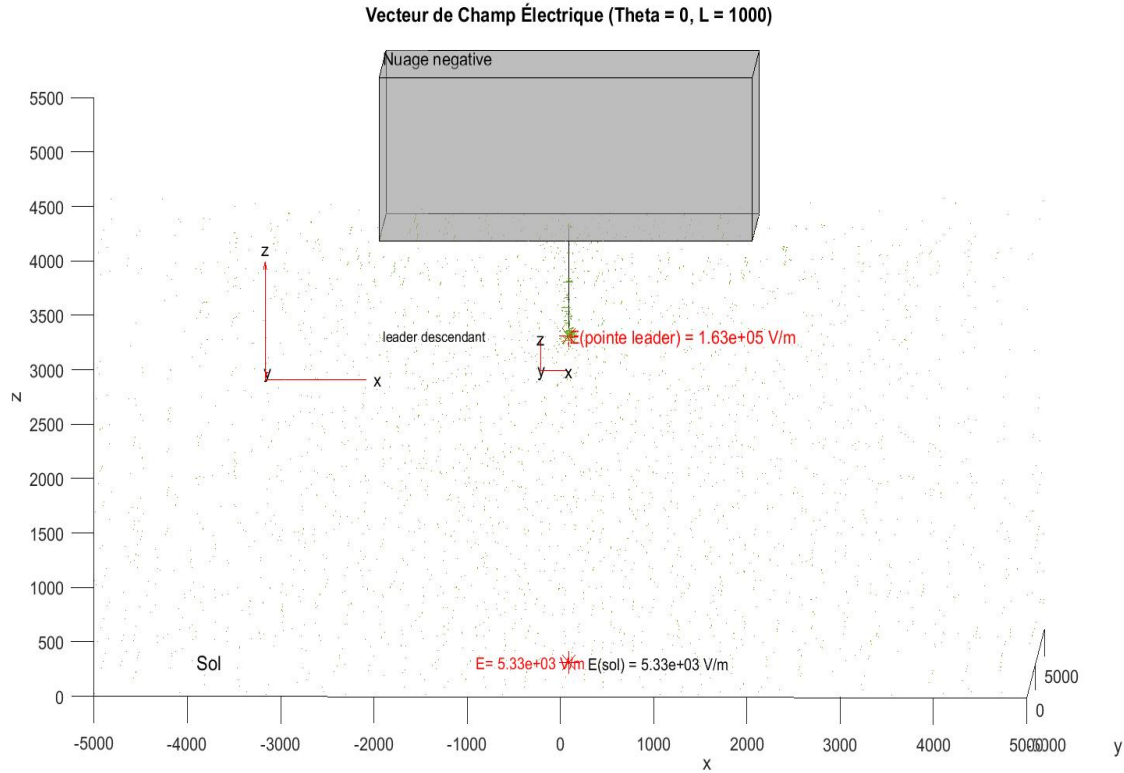


Figure 3-34: champ électrique sur le sol sous la pointe d'un leader vertical et sur la pointe situé à une hauteur de 3000 mètres au-dessus du sol

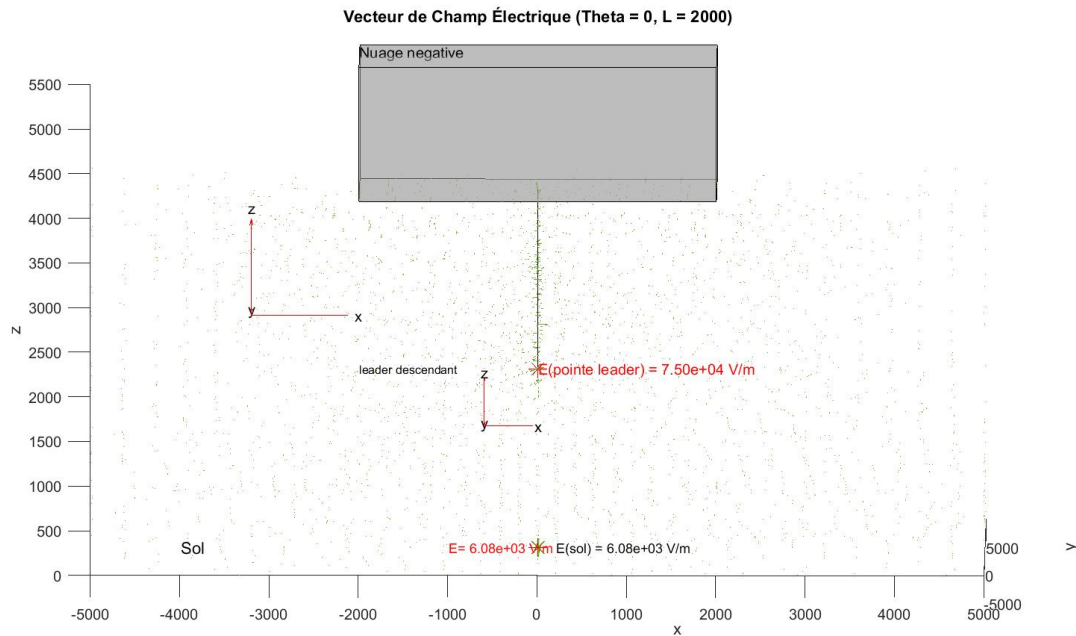


Figure 3-35: champ électrique sur le sol sous la pointe d'un leader vertical et sur la pointe situé à une hauteur de 2000 mètres au-dessus du sol

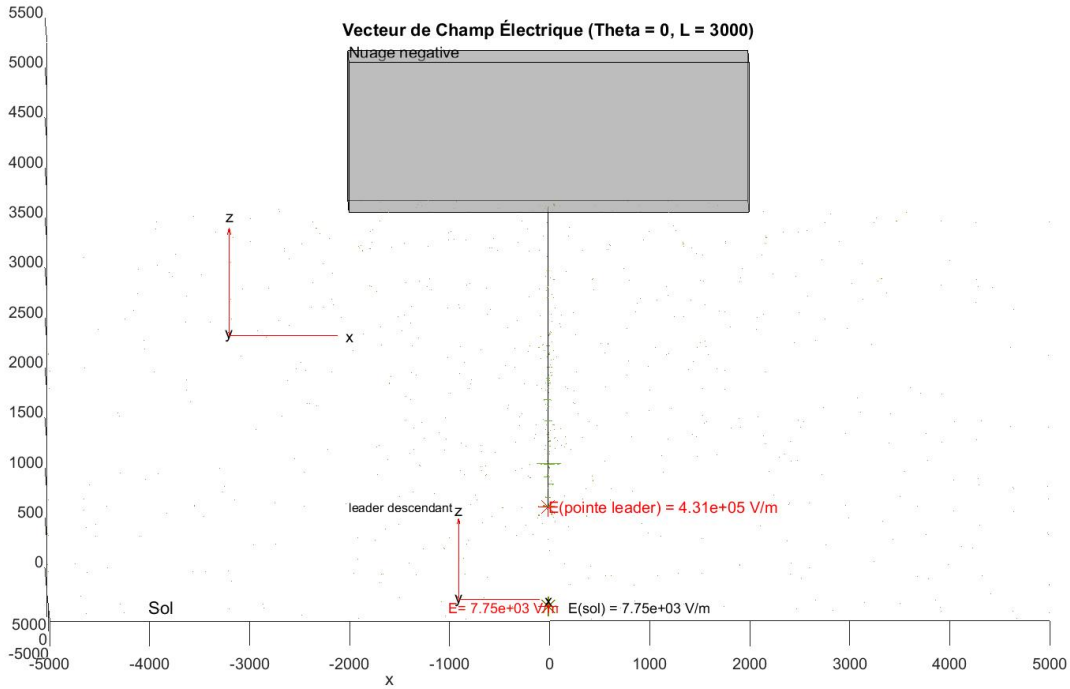


Figure 3-36: champ électrique sur le sol sous la pointe d'un leader vertical et sur la pointe situé à une hauteur de 1000 mètres au-dessus du sol

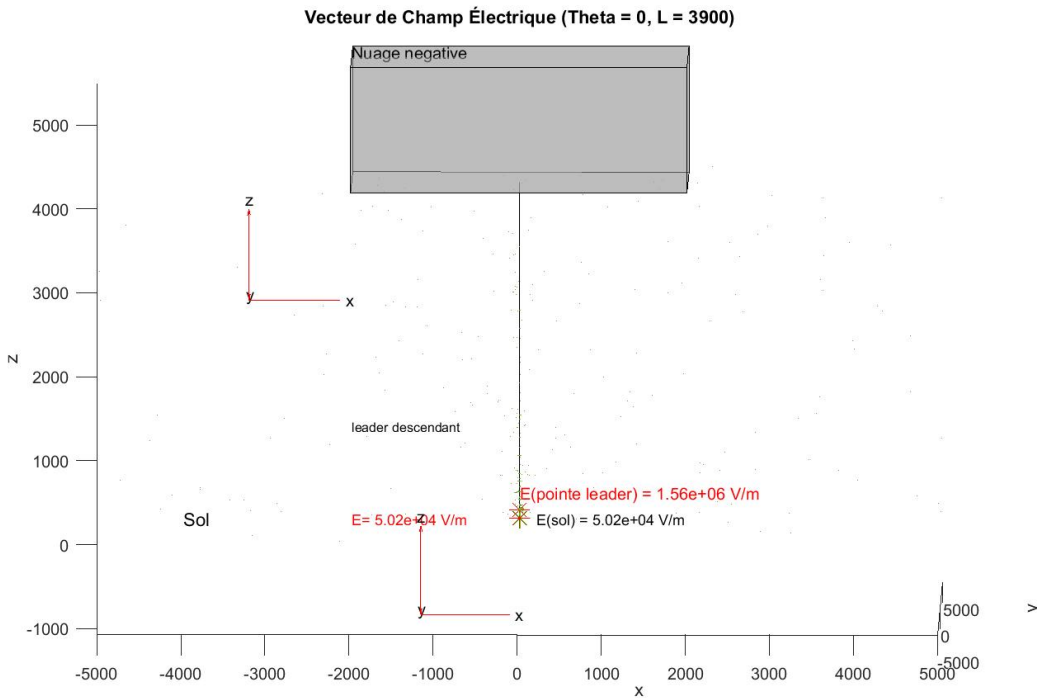


Figure 3-37: champ électrique sur le sol sous la pointe d'un leader vertical et sur la pointe situé à une hauteur de 100 mètres au-dessus du sol

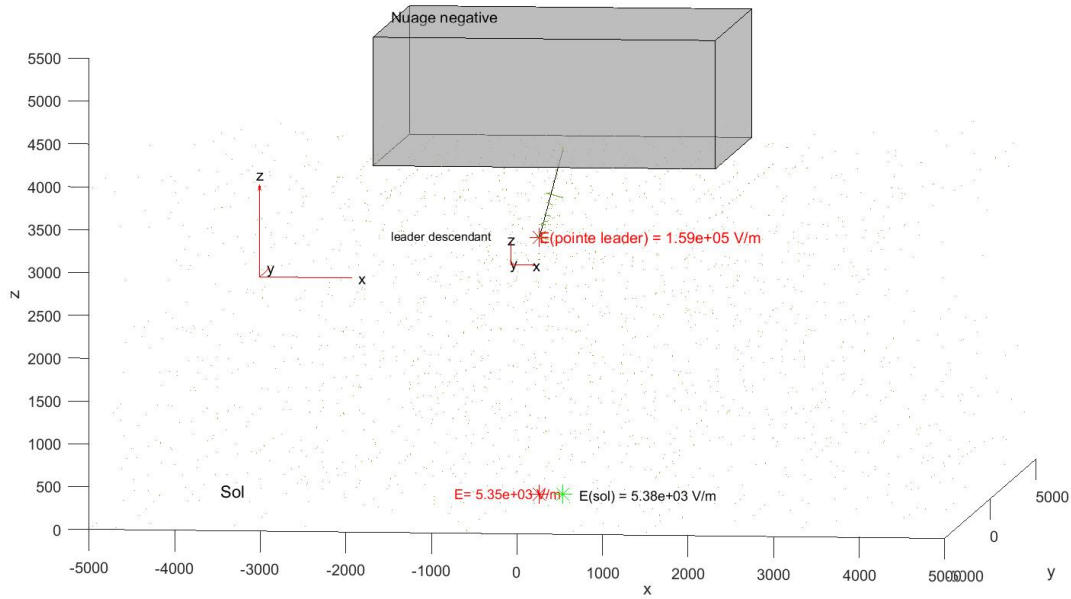


Figure 3-38: champ électrique sur le sol sous la pointe d'un leader incliné et sur la pointe situé à une hauteur de 3000 mètres au-dessus du sol

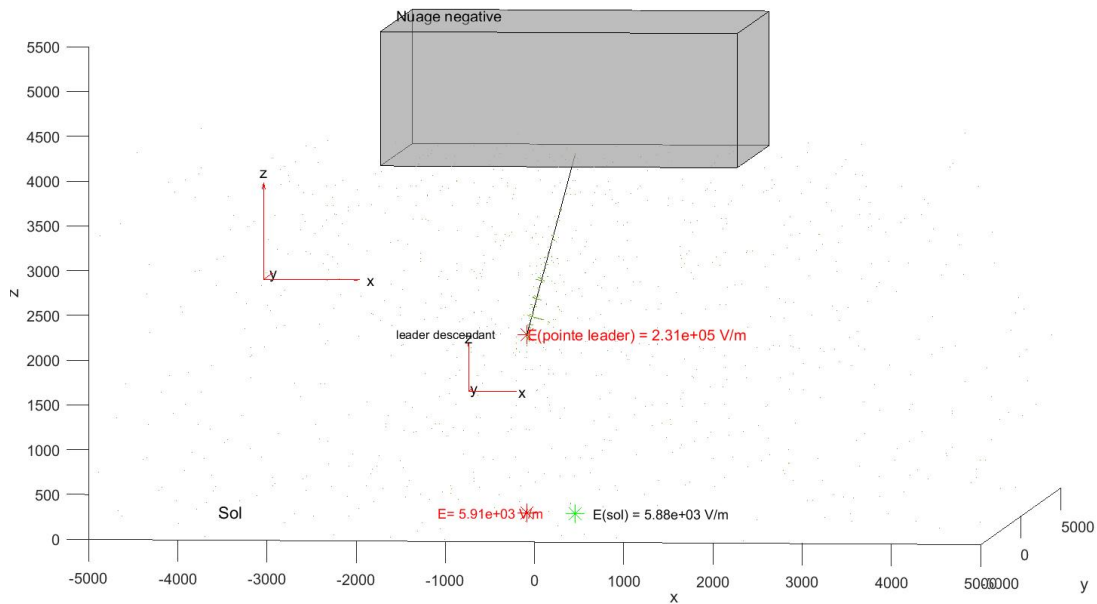


Figure 3-39: champ électrique sur le sol sous la pointe d'un leader incliné et sur la pointe situé à une hauteur de 2000 mètres au-dessus du sol

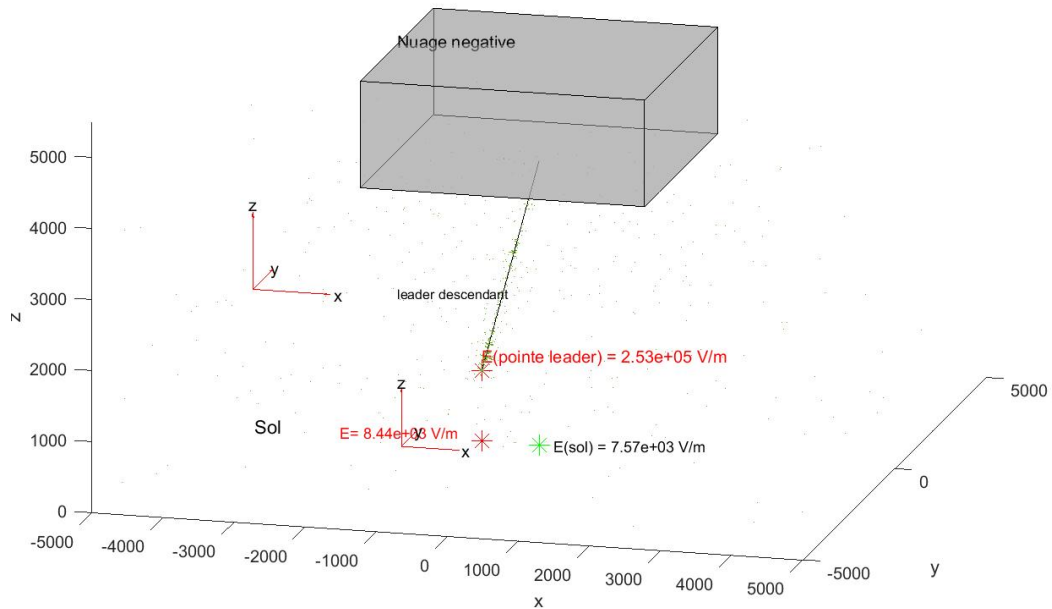


Figure 3-40: champ électrique sur le sol sous la pointe d'un leader incliné et sur la pointe situé à une hauteur de 1000 mètres au-dessus du sol

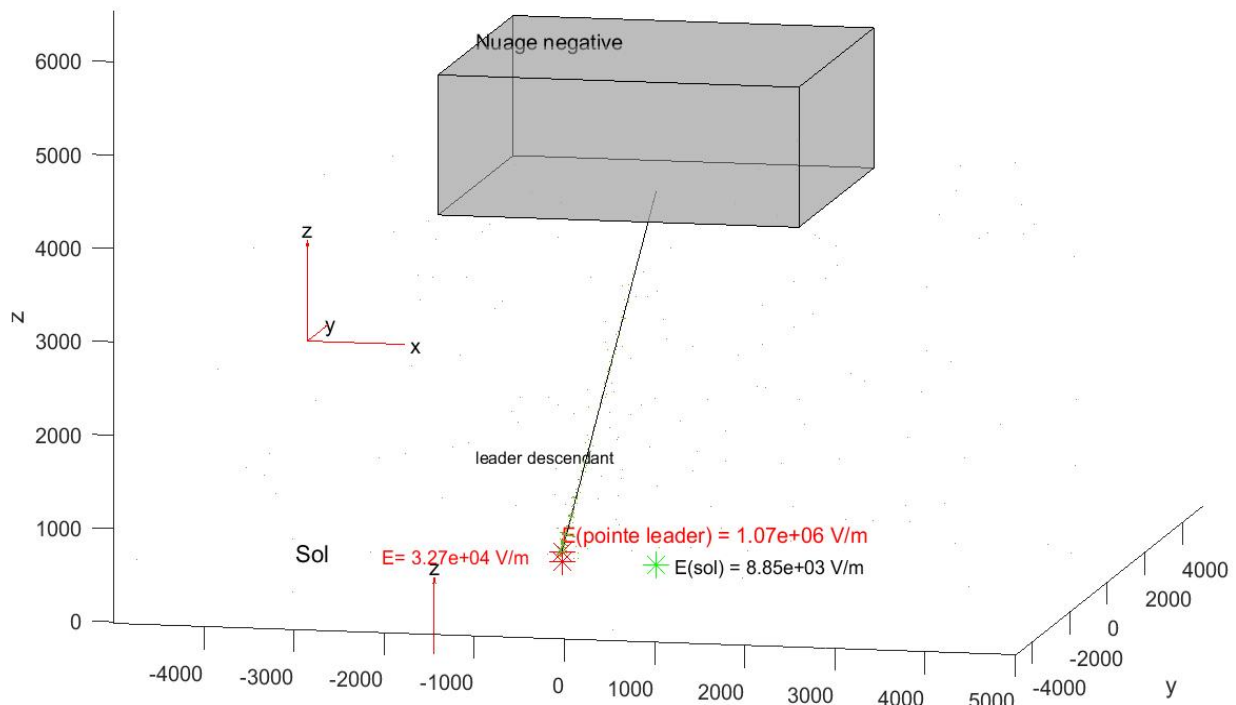


Figure 3-41: champ électrique sur le sol sous la pointe d'un leader incliné et sur la pointe situé à une hauteur de 100 mètres au-dessus du sol

3.10 Conclusion :

Ce chapitre a permis d'explorer et d'analyser en profondeur les phénomènes électrostatiques associés aux leaders de foudre, en mettant l'accent sur la distribution des potentiels et des champs électriques avant et après l'apparition du leader descendant. Les principales étapes de la méthodologie, incluant la création de la géométrie, la définition des conditions aux limites, la mise en place des coefficients de l'équation de Poisson, ainsi que le maillage et la résolution numérique, ont été détaillées pour assurer une compréhension claire du processus de modélisation. Les analyses montrent que la configuration et l'orientation du leader jouent un rôle crucial dans la distribution des potentiels et des champs électriques. Les résultats obtenus pour les leaders rectilignes verticaux et inclinés présentent des différences notables en termes de potentiel à la pointe et de concentration du champ électrique au sol. Pour un leader rectiligne vertical, les charges sont réparties le long d'une ligne verticale, ce qui limite la surface sur laquelle elles s'accumulent à la pointe du leader. Cela conduit à un potentiel électrique relativement faible à la pointe comparé à un leader incliné, et à une concentration plus intense du champ électrique au sol. En revanche, pour un leader rectiligne incliné, les charges sont réparties sur une surface plus grande, permettant une accumulation plus importante à la pointe, conduisant ainsi à un potentiel plus élevé à la pointe. Cependant, la concentration du champ électrique au sol est moins intense que celle observée sous un leader vertical.

La longueur du leader influence également de manière significative la distribution du champ électrique. À mesure que la longueur du leader augmente, le champ électrique au sol se concentre de plus en plus sous la pointe du leader. Pour des leaders de grande longueur, cette concentration devient encore plus prononcée, ce qui est particulièrement notable pour les leaders rectilignes verticaux ou inclinés. Cette augmentation de la longueur du leader entraîne une accumulation accrue des charges négatives à l'extrémité du leader, augmentant ainsi l'intensité du champ électrique dans cette région spécifique.

4. CHAPITRE IV
Application à la protection des
installations PV

4.1 Introduction:

Les centrales photovoltaïques (PV) jouent un rôle crucial dans la transition vers des sources d'énergie renouvelables. En convertissant la lumière solaire en électricité, ces installations offrent une solution durable et écologique pour répondre aux besoins énergétiques croissants. Cependant, comme toute infrastructure en extérieur, les centrales PV sont exposées à divers risques environnementaux, notamment la foudre. La protection contre la foudre est donc essentielle pour garantir la pérennité et la fiabilité des installations PV. Dans ce chapitre, nous allons aborder les particularités des installations PV du point de vue de la protection contre la foudre. Nous présenterons un schéma type d'une installation PV de 1 MW, expliquant les composants clés et leur disposition. Ensuite, nous détaillerons les concepts de protection des installations PV, en soulignant les mesures préventives et les dispositifs de sécurité à mettre en place. Nous examinerons également l'influence de l'angle d'inclinaison du canal de foudre sur les installations PV. Enfin, nous discuterons des protections des installations PV en fonction des points de frappe de foudre, fournissant des recommandations spécifiques pour chaque scénario afin de maximiser la sécurité et l'efficacité des systèmes photovoltaïques.

4.2 Centrales photovoltaïques

Les fermes solaires, aussi connues sous le nom de centrales solaires photovoltaïques, sont des installations cruciales dans la transition vers des sources d'énergie plus durables. Elles varient en taille, des installations domestiques aux vastes parcs solaires commerciaux. Typiquement composées de milliers de panneaux solaires photovoltaïques, ces installations captent la lumière du soleil et la convertissent en électricité. La surface nécessaire pour installer une ferme solaire de cette capacité varie en fonction de l'efficacité des panneaux, de leur disposition et de l'espace requis pour éviter l'ombrage entre les rangées de panneaux. Par exemple, une ferme solaire de 1 MW peut nécessiter entre 2 et 3 hectares de surface. En général, plus la puissance installée est élevée, plus la surface nécessaire augmente, comme indiqué dans le tableau ci-dessous. Pour une puissance de 4 à 5 MW, il peut être nécessaire d'avoir entre 10 et 13 hectares, et pour une puissance de 20 MW, la surface peut atteindre de 30 à 50 hectares. Ces chiffres donnent un aperçu de la relation entre la puissance installée et la surface requise pour une ferme solaire, en mettant en lumière l'importance de la planification et de l'aménagement du site pour maximiser l'efficacité et la production d'électricité [45].

<i>Puissance installée en mégawatt-crête (MWc)</i>	<i>Surface nécessaire en hectare (ha)</i>
<i>0,1 à 0,2 MW</i>	<i>0,3 ha</i>
<i>0,5 MWc</i>	<i>1 ha</i>
<i>1 MWc</i>	<i>2 à 3 ha</i>

<i>4 à 5 MWc</i>	<i>10 à 13 ha</i>
<i>10 MWc</i>	<i>18 à 23 ha</i>
<i>20 MWc</i>	<i>30 à 50 ha</i>

Table 4-1:Correspondance entre puissance et surface d'une ferme solaire



Figure 4-1:La centrale solaire de Cestas (Gironde) édifée sur 300 ha

4.3Schéma type d'une installation PV de 1MW

Une installation photovoltaïque (PV) de 1 MW comprend différents éléments indispensables pour produire de l'électricité grâce à l'énergie solaire :

- **Modules solaires (panneaux solaires)** : ils convertissent l'énergie solaire en électricité (courant continu, DC) et sont habituellement composés de 3000 à 4000 modules, chacun ayant une puissance de 250 à 350 watts.
- **Boîtes de jonction (AJB - Array Junction Box)** : elles regroupent les sorties des modules PV et les connectent à la boîte combinatrice DC.
- **Boîte combinatrice DC (DC Combiner Box)** : elle combine les sorties DC de plusieurs boîtes de jonction et les achemine vers l'onduleur.
- **Onduleur (Inverter 1 MW)** : il convertit le courant continu (DC) produit par les modules PV en courant alternatif (AC) utilisable par le réseau électrique.

- **Transformateur** : il augmente la tension de l'AC pour la transmission sur la ligne de bus de 22 kV.
- **Ligne de bus de 22 kV et ligne de distribution** : elles transmettent l'électricité convertie vers le réseau électrique pour la distribution.

Ce schéma illustre le processus de conversion de l'énergie solaire en électricité d'une installation photovoltaïque de 1 MW.

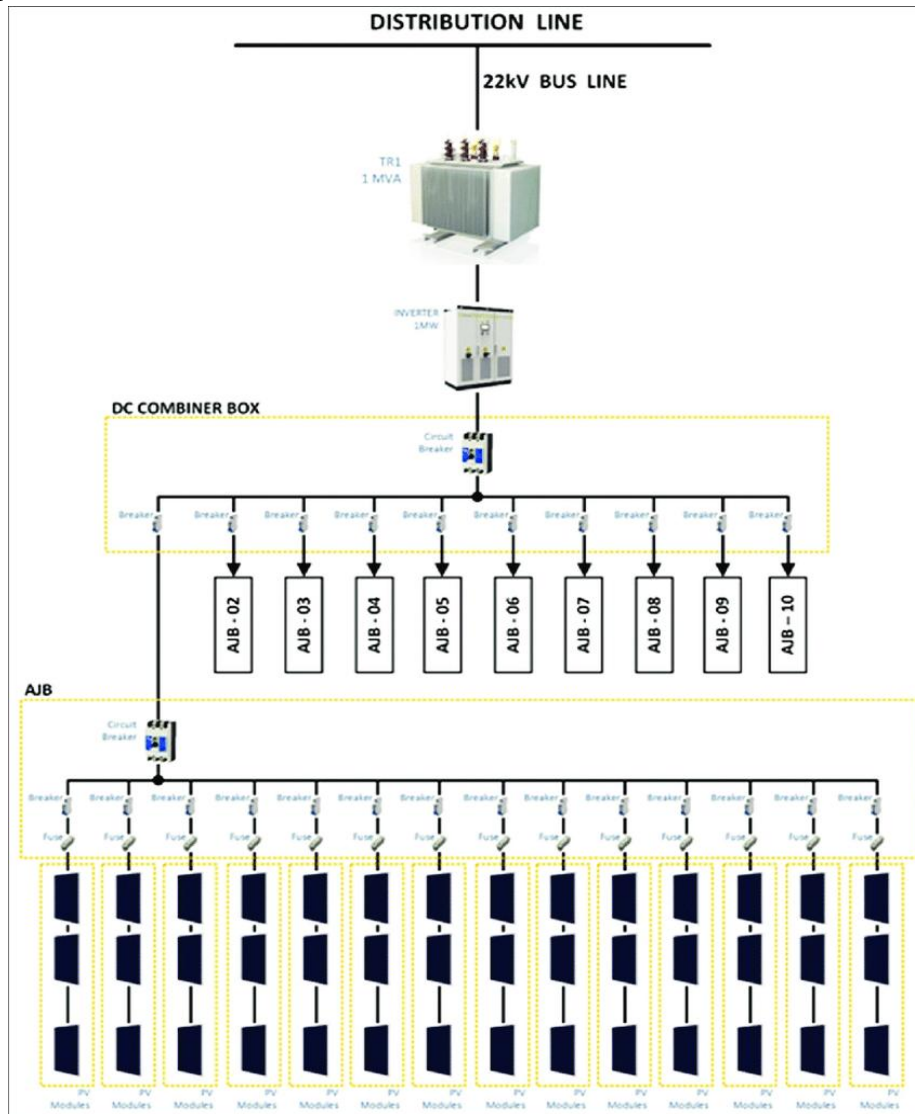


Figure 4-2:Le schéma d'une centrale photovoltaïque de 1 MW

4.4 Concept de protection des installations PV

Les installations photovoltaïques, tout comme tout système électrique, sont exposées aux dangers causés par la foudre. De manière régulière, des éléments de ces installations sont détruits, que ce soit les régulateurs ou les onduleurs, ce qui entraîne une diminution de la fiabilité et une augmentation des frais d'exploitation pour compenser les dommages. Il est essentiel de préserver

ces installations sensibles contre trois risques majeurs liés à la foudre : le foudroiement direct, la propagation du courant de foudre à travers le réseau de distribution électrique et les champs électromagnétiques.

4.4.1 Protection contre le foudroiement direct:

Un système de protection externe contre la foudre comprend des dispositifs de capture, de dérivation et de mise à la terre. Les installations photovoltaïques doivent être protégées contre les coups de foudre directs à l'aide de paratonnerres efficaces (Voir Annexe A).

- **Dispositifs de Capture :** Les paratonnerres peuvent être des dispositifs à amorçage ou des pointes de capture simples, fixés mécaniquement sur les structures métalliques où les modules photovoltaïques sont montés. Le nombre et le modèle de paratonnerres sont déterminés selon le calcul du niveau de protection basé sur l'analyse du risque publié dans la norme IEC 62305-2.
- **Mise à la Terre :** Le système de protection contre la foudre doit avoir son propre système de mise à la terre qui doit être relié au système général de mise à la terre au moyen d'un éclateur pour les maintenir séparés pendant le fonctionnement normal de l'équipement, sans possibilité de provoquer de bruit électromagnétique ou de corrosion. Pour la prise de terre des paratonnerres, il est préférable d'utiliser des électrodes verticales de deux ou trois mètres de long formant un triangle qui est la configuration la plus appropriée pour dissiper rapidement le courant de foudre, qui est impulsionnel [46].

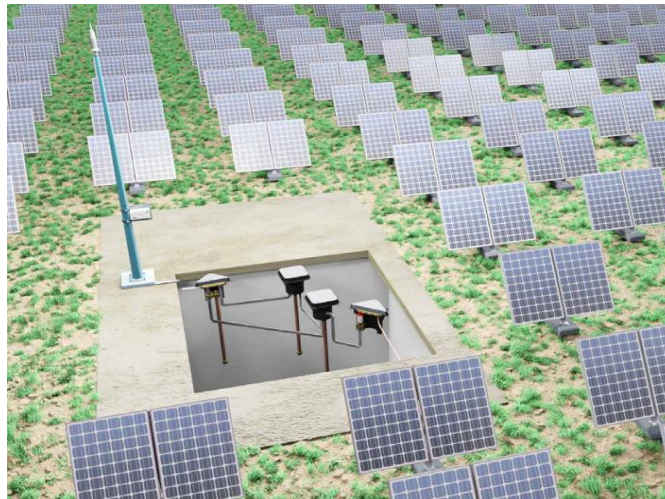


Figure 4-3: Un système de protection des installations PV externe contre la foudre

4.4.2 Protection Contre la Propagation du Courant de Foudre:

Les surtensions transitoires, causées par les impacts directs de la foudre ou par les surtensions induites sur le réseau électrique, peuvent endommager les composants des installations photovoltaïques. Pour protéger contre ces surtensions (Voir Annexe A) :

- **Parafoudres :** Des parafoudres de Type 1 sont nécessaires à l'entrée de l'alimentation principale pour protéger contre les courants de foudre directs. Les parafoudres de Type 2 et

de Type 3 offrent une protection supplémentaire en réduisant les surtensions résiduelles atteignant les équipements sensibles.

4.4.3 Protection contre les champs électromagnétiques

Les champs électromagnétiques générés par les éclairs peuvent induire des courants et des surtensions dans les installations photovoltaïques même si celles-ci sont protégées contre les impacts directs. Les mesures de protection incluent :

- **Mise à la terre et équipotentialité** : Toutes les masses métalliques (panneaux solaires, clôtures, coffrets, supports) doivent être reliées à la terre pour assurer l'équipotentialité et éviter les différences de potentiel.
- **Blindage et cheminement des câbles** : Utilisation de câbles blindés et de chemins de câbles conçus pour minimiser les effets des champs électromagnétiques. Les chemins de câbles doivent être posés de manière à réduire les boucles qui peuvent induire des tensions parasites.

4.5 Étude de l'influence de l'angle d'inclinaison du canal de foudre sur une installation photovoltaïque

Dans le but de mener cette étude, nous avons continué notre simulation 3D pour étudier l'impact de l'angle d'inclinaison du canal de foudre sur une centrale photovoltaïque de 1 MW. Les dimensions de surface de la centrale ont été prises en considération pour la création de la géométrie de notre ferme solaire. Selon le tableau précédent, nous avons dépensé 2,25 hectares. Les modules photovoltaïques ont été représentés avec un cuboïde de 150 mètres de long, 150 mètres de large et 3 mètres de haut, ainsi qu'un poste de transformation de 10 mètres de long, 10 mètres de large et 6 mètres de haut. Par la suite, nous avons incorporé cette nouvelle géométrie dans notre modèle actuel afin d'effectuer une analyse approfondie.

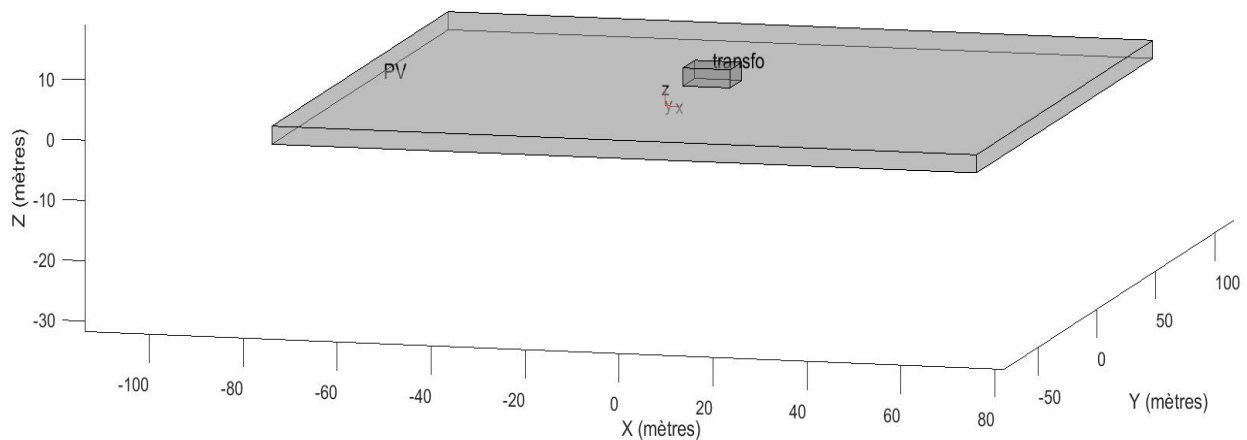


Figure 4-4: Géométrie représentant une centrale solaire de 1 MW

Après la création de cette géométrie (Voir figure 4.2) , on a attribué un potentiel de 0 pour la géométrie créée, en tenant compte du fait qu'elle est mise à la terre. Ensuite, on a exécuté notre simulation à nouveau pour obtenir les résultats pour différents angles d'inclinaison.

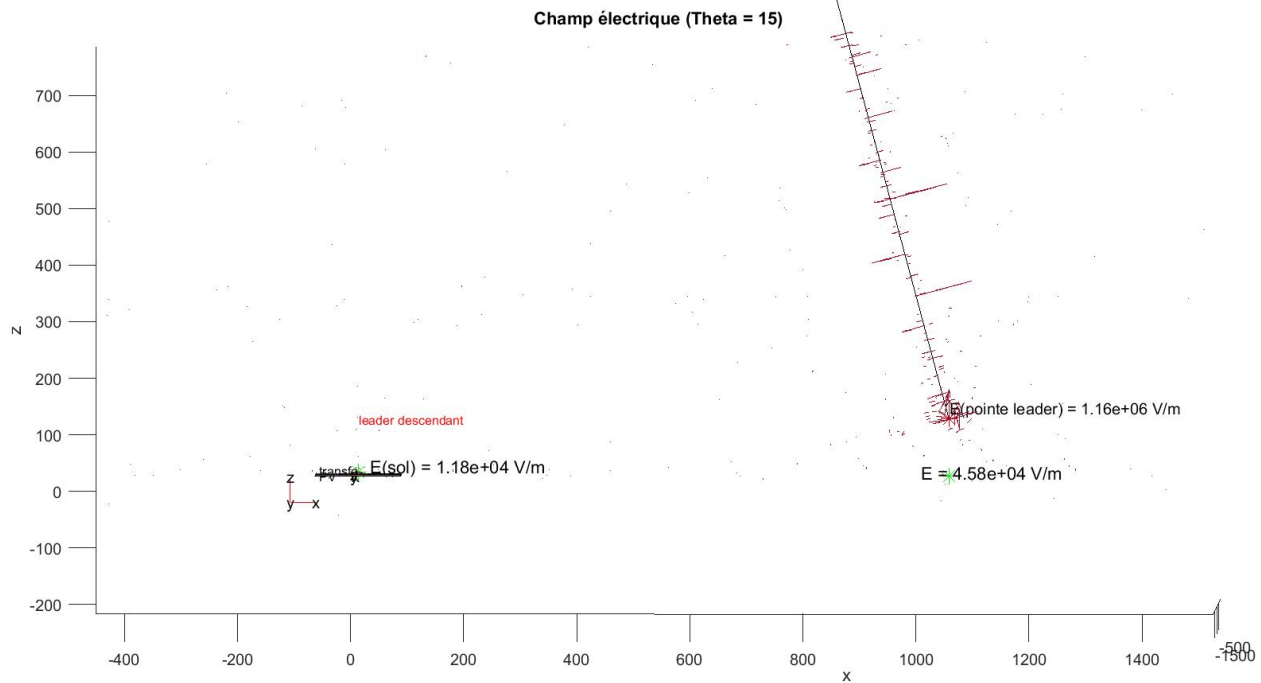


Figure 4-5: Analyse des champs électriques pour un angle d'inclinaison de 15° du leader près d'une centrale photovoltaïque

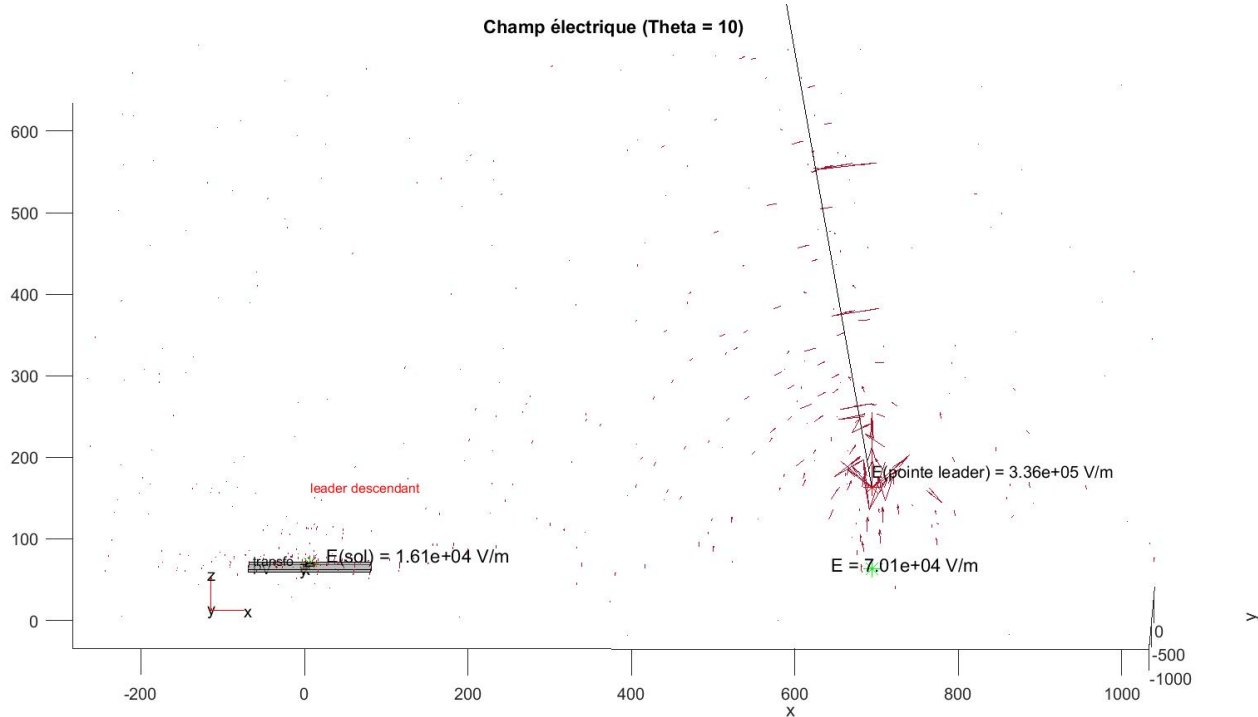


Figure 4-6: Analyse des champs électriques pour un angle d'inclinaison de 10° du leader près d'une centrale photovoltaïque

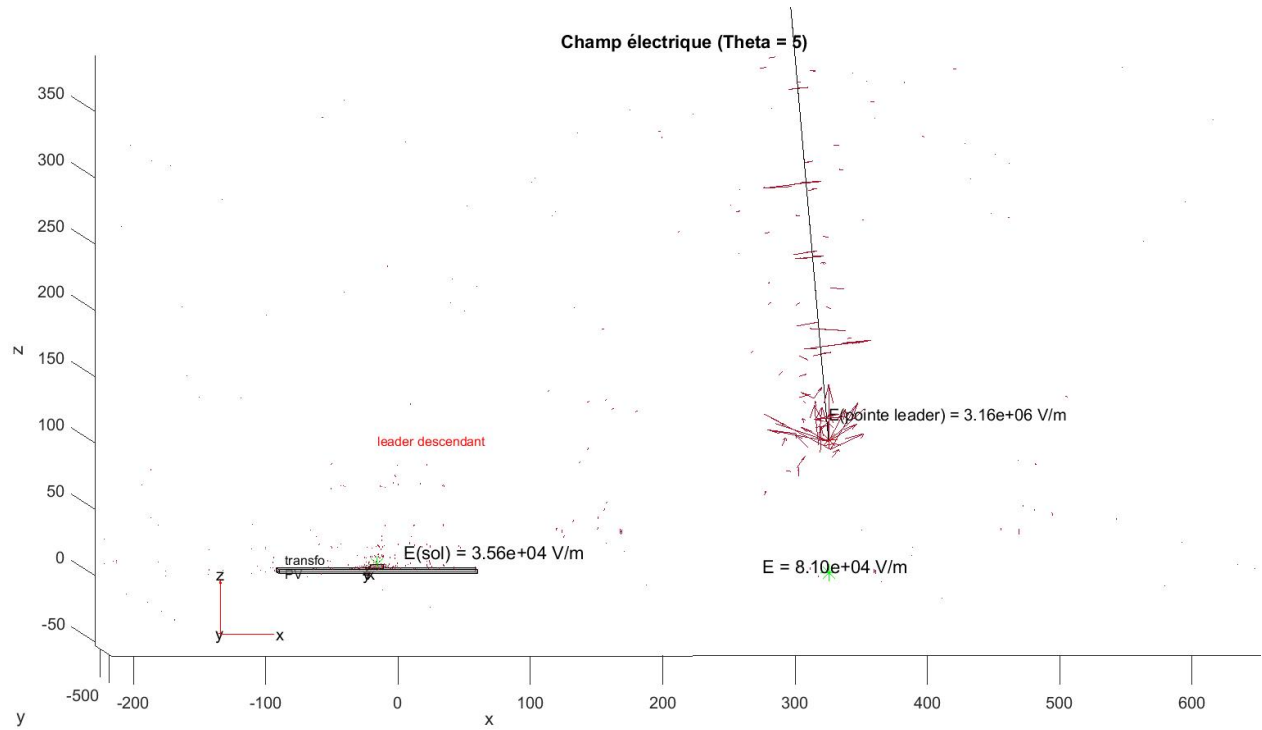


Figure 4-7: Analyse des champs électriques pour un angle d'inclinaison de 5° du leader près d'une centrale photovoltaïque

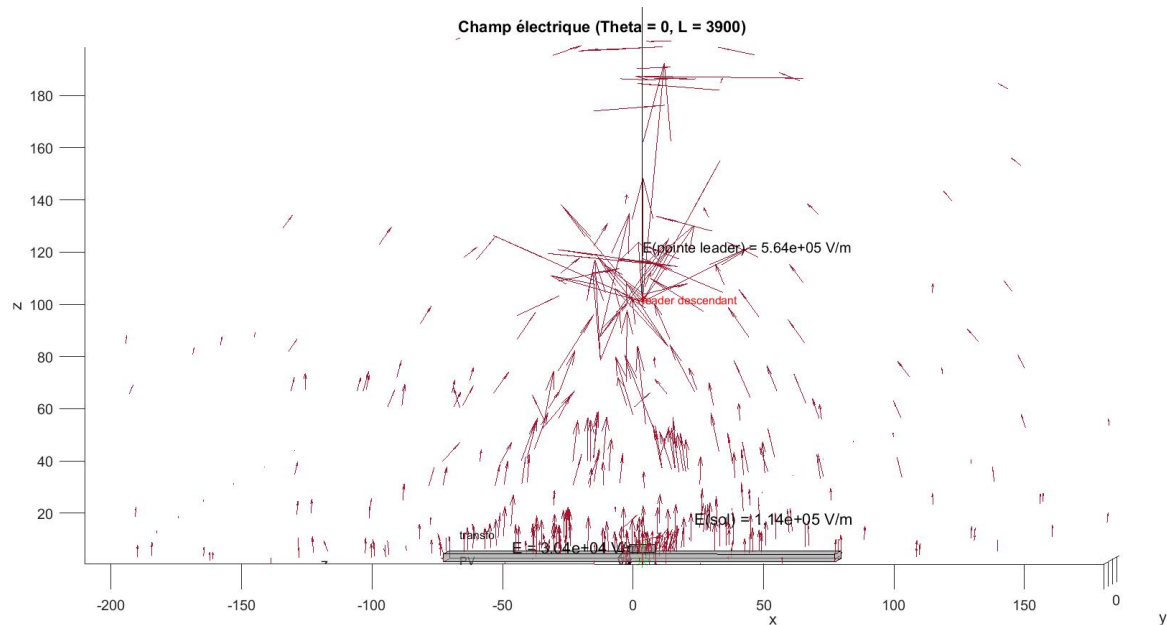


Figure 4-8: Analyse des champs électriques pour un canal ionisé vertical directement au-dessus d'une centrale photovoltaïque

Après analyse des résultats obtenus, plusieurs observations significatives se dégagent. En examinant les divers angles d'inclinaison du canal de foudre par rapport à une centrale solaire, et en tenant compte du fait que le leader se trouve à une hauteur de 100 mètres au-dessus du sol, il est notable que plus l'angle d'inclinaison du canal de foudre augmente, plus celui-ci s'éloigne de l'installation photovoltaïque (PV). Cette observation est cohérente avec les principes de géométrie, où un angle plus important entraîne une distance plus grande entre le canal de foudre et la centrale solaire.

En examinant les champs électriques au sol, on constate que la proximité du canal de foudre incliné par rapport au sol génère un champ électrique plus intense sous la pointe du leader incliné que celui observé au niveau de l'installation photovoltaïque. On a pour un angle de 15° , le champ au sol sous la pointe de leader correspond à $4.58 \times 10^4 \text{V/m}$, tandis que celui au niveau de la centrale est de $1.18 \times 10^4 \text{V/m}$ (Voir figure 4.3) Cette différence s'explique par la proximité du canal de foudre incliné par rapport au sol à cet endroit précis, induisant des champs électriques plus élevés à proximité immédiate.

À mesure que l'angle d'inclinaison diminue, on remarque que le canal de foudre se rapproche de la centrale solaire, entraînant une augmentation du champ électrique au sol sous la pointe du leader. Cependant, ce champ reste intense par rapport à celui au niveau de la centrale. Pour un angle de 10° , le champ au sol sous la pointe de leader est de $7.01 \times 10^4 \text{V/m}$, tandis que celui au niveau de la centrale est de $1.61 \times 10^4 \text{V/m}$. Pour un angle de 5° , le champ au sol sous la pointe de leader est de $8.10 \times 10^4 \text{V/m}$, tandis que celui au niveau de la centrale est de $3.56 \times 10^4 \text{V/m}$ (Voir figures (4.4),(4.5)). Ces résultats soulignent l'effet de proximité du canal de foudre incliné par rapport à la centrale, même avec des angles d'inclinaison relativement faibles.

Une observation importante est que lorsque l'angle d'inclinaison atteint zéro, correspondant à un leader vertical directement au-dessus de la centrale solaire, le champ électrique au niveau de la centrale devient très intense, atteignant $1.14 \times 10^5 \text{V/m}$ au niveau du poste de transformation à une hauteur de 6 mètres par rapport au sol (Voir figure 4.6). Cette intensité accrue s'explique par la distance minimale entre le canal de foudre et la centrale, augmentant ainsi l'intensité du champ électrique ressenti à cet endroit précis.

Il est possible de conclure que pour les angles d'inclinaison de 5, 10 et 15 degrés, la foudre est plus susceptible de frapper le sol à proximité de la pointe du leader, là où le champ électrique est plus intense. Cela peut être critique pour les centrales photovoltaïques (PV) car les champs électromagnétiques rayonnés peuvent induire des courants qui provoquent des surtensions transitoires. En revanche, lorsque le leader est vertical par rapport au PV, le champ électrique est particulièrement intense dans le transformateur, qui est considéré comme l'objet le plus haut dans cette région, ce qui implique que la foudre est plus susceptible de frapper le transformateur en premier.

4.6 Protections des installations PV en fonctions de points de frappe de foudre

On a déterminé ces mesures de protection en nous basant sur le concept de protection contre la foudre des installations photovoltaïques, en particulier en considérant les différentes inclinaisons du canal de foudre et les risques associés à chaque cas. En nous appuyant sur ce concept, on a élaboré les recommandations spécifiques de protection pour chaque scénario.

En tenant compte des résultats de nos simulations où le canal de foudre est incliné à des angles de 5, 10 et 15 degrés, éloignant potentiellement le point de frappe direct de la centrale solaire photovoltaïque, on recommande les mesures de protection suivantes :

- **Protection contre les Surtensions Induites** : Même en cas de foudre indirecte, des surtensions peuvent être induites dans les câbles et les équipements. Il est recommandé d'utiliser des parafoudres de Type 2 et 3, installés à des points stratégiques de l'installation, pour protéger les équipements sensibles tels que les onduleurs, les régulateurs et les systèmes de surveillance contre les surtensions induites.
- **Mise à la Terre** : Une mise à la terre adéquate est essentielle pour disperser efficacement l'énergie de la foudre. Une bonne mise à la terre réduit les risques de dommages aux équipements.
- **Surveillance Continue** : Un système de surveillance continue pour détecter toute surtension ou problème électrique, permettant de réagir rapidement en cas de besoin.

Pour le cas où le canal de foudre est vertical (angle d'inclinaison de 0 degré) et qu'il y a un risque direct de frappe de la centrale solaire, des mesures de protection supplémentaires sont nécessaires, notamment :

- **Paratonnerres à Dispositif d'Amorçage** : pour intercepter efficacement les coups de foudre directs.
- **Parafoudres de Type 1** : pour protéger les équipements contre les surtensions directes causées par la foudre.
- **Protection des Structures Métalliques** : Renforcer la protection des structures métalliques de la centrale en installant des pointes de capture et en assurant une mise à la terre adéquate.

4.7 Conclusion

Nous pouvons conclure que la lutte contre la foudre dans les installations photovoltaïques est un domaine complexe et crucial pour assurer la sécurité des équipements et assurer la continuité des activités. Ce chapitre a souligné les spécificités des installations photovoltaïques en ce qui concerne la protection contre la foudre, en exposant le schéma standard d'une installation de 1MW, le concept de protection, l'influence de l'angle d'inclinaison du canal de foudre et les mesures de protection recommandées en fonction des points de frappe de la foudre.

Il est primordial de tenir compte de ces facteurs lors de la conception, de l'installation et de l'entretien des installations photovoltaïques afin d'assurer leur efficacité et leur longévité. Il est essentiel de adopter une approche proactive, comprenant une analyse approfondie des risques et

la mise en place de mesures de protection appropriées, afin de réduire les risques associés à la foudre et garantir le bon fonctionnement des installations photovoltaïques.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale :

Dans l'ensemble, ce mémoire établit des bases essentielles pour comprendre la foudre et ses impacts variés. La première partie se concentre sur les coups de foudre descendantes négatives et les paramètres électriques associés, soulignant les risques significatifs pour les personnes, les animaux, les équipements et les services. La protection contre la foudre, conforme aux normes internationales, émerge comme une solution essentielle pour atténuer ces risques.

La deuxième partie du mémoire pose les bases nécessaires pour une compréhension approfondie des phénomènes électromagnétiques. En mettant en avant les équations de Maxwell comme outil fondamental, cette section explore les principes théoriques sous-jacents à la propagation et à l'interaction des champs électromagnétiques. Les équations de Maxwell fournissent un cadre mathématique robuste pour décrire les comportements complexes des champs électromagnétiques. L'application de la méthode des éléments finis pour résoudre ces équations est également examinée en détail, soulignant son importance dans l'analyse et la modélisation des phénomènes électromagnétiques. En utilisant la boîte à outils PDE de MATLAB, nous avons démontré comment ces concepts théoriques peuvent être appliqués de manière pratique pour simuler et analyser les phénomènes liés à la foudre.

La troisième partie intègre la modélisation électromagnétique dans notre simulation, en particulier l'utilisation du modèle électrostatique pour résoudre l'équation de Poisson par la méthode des éléments finis avec la boîte à outils PDE de MATLAB. La méthodologie, incluant la création de la géométrie, la définition des conditions aux limites, l'établissement des coefficients de l'équation de Poisson, le maillage et la résolution numérique, fournit un cadre robuste pour la simulation 3D de la foudre sur des terrains hétérogènes. Les résultats obtenus pour les leaders rectilignes verticaux et inclinés révèlent des différences significatives en termes de potentiel à la pointe et de concentration du champ électrique au sol, soulignant l'importance de ces paramètres dans la conception des systèmes de protection contre la foudre.

La quatrième partie du mémoire se concentre sur la protection contre la foudre dans les installations photovoltaïques, un domaine particulièrement complexe et crucial pour garantir la sécurité des équipements et la continuité des activités. Ce chapitre examine les spécificités des installations photovoltaïques en ce qui concerne la protection contre la foudre. En exposant le schéma standard d'une installation de 1 MW, il met en lumière le concept de protection et l'influence de l'angle d'inclinaison du canal de foudre. Les mesures de protection recommandées sont discutées en fonction des points de frappe de la foudre, soulignant l'importance d'une conception, d'une installation et d'un entretien rigoureux des systèmes de protection. L'adoption d'une approche proactive, qui comprend une analyse approfondie des risques et la mise en place de mesures de protection appropriées, est primordiale pour réduire les risques associés à la foudre et garantir le bon fonctionnement des installations photovoltaïques.

Dans cette simulation, le modèle électrostatique de la foudre a été étudié pour comprendre la distribution du potentiel électrique et le champ électrique lors de la formation du leader de foudre, avant le déclenchement du courant de retour. Bien que la foudre soit un phénomène électromagnétique complexe, l'utilisation du modèle électrostatique offre une perspective claire sur ces aspects cruciaux.

Pour simplifier la simulation, la forme géométrique du leader a été représentée comme un canal rectiligne, vertical ou incliné. Cette simplification s'appuie sur plusieurs études qui ont examiné le champ électrique de la foudre en modélisant le canal comme une antenne rectiligne verticale ou inclinée. En réalité, le canal de foudre est tortueux et chaque saut peut être représenté par une antenne dans le modèle électromagnétique complet. Cependant, pour réduire le temps d'exécution et faciliter le maillage, cette simplification a été adoptée.

Ainsi, malgré la nature complexe et tortueuse du canal de foudre, la simplification en un canal rectiligne permet une analyse efficace, tout en maintenant une précision acceptable pour les objectifs de la simulation.

RECHERCHES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Rakov, V.A. and Uman, M.A. "Lightning Physics and Effect". Cambridge University Press,(2003)
- [2] Cooray, V. "*The Lightning Flash*". IET,(2003)
- [3] F. Rachidi , " La foudre et ses effets électromagnétiques". Eté 2004.
- [4] C.Gary , "la foudre des mythologies antiques a la recherche moderne". Edition Masson, 1994.
- [5] website Encyclopédie de l'environnement .
- [6] website techno-Science.Net
- [7] F. A. Fisher, J. A Plumer, R.A.Perala, " Lightning protection of aircraft ", LightningTechnologie Inc. 1990
- [8] Mr : MAKOUDI Hamid, "Étude de la compatibilité électromagnétique des circuits électroniques", Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Faculté de Génie Électrique Et d'Informatique.
- [9] François Gerard : « Généralité sur la foudre et les surtensions ». Octobre 2008 .
- [10] C.Gary : « La foudre : Des méthodologies antiques à la recherche moderne », Edition Masson, 1994, pp : 3-11.
- [11] K.NACEREDDINE: thèse Magister protection contre la foudre sur un sol hétérogène ; simulation numérique 29 décembre 1992
- [12] Dragos Machidon1: A New Model Based on Electro-geometrical Theory for Estimating the Lightning Protection Zones May ; Bucharest, Romania ,23-25, 2013
- [13] International Electrotechnical Commission. (2010). IEC 62305-1:2010 Protection against lightning - Part 1: General principles. Geneva: IEC.
- [14] International Electrotechnical Commission. (2010). IEC 62305-2:2010 Protection against lightning - Part 2: Risk management. Geneva: IEC.
- [15] International Electrotechnical Commission. (2010). IEC 62305-3:2010 Protection against lightning - Part 3: Physical damage to structures and life hazard. Geneva: IEC.
- [16] International Electrotechnical Commission. (2010). IEC 62305-4:2010 Protection against lightning - Part 4: Electrical and electronic systems within structures. Geneva: IEC.
- [17] National Fire Protection Association. (2019). NFPA 780: Standard for the Installation of Lightning Protection Systems. Quincy, MA: NFPA.
- [18] C.A. Nucci, "Lightning return stroke current models with specified channel base current: A review and comparison", Journal of Geophysical Research, Vol. 95, n°. D12, pp. 20395 -20408, 1990.
- [19] R. Thottappillil "Comparaison of lightning return stroke models", Journal of Geophysical research, Vol. 98, pp. 22903-22914, 1993.
- [20] C. Nucci, "Lightning-induced voltages on overhead power lines", in Electra, pp. 74-102, 1995.
- [21] R, Thottappillil, V. Rakov, and M. Uman, "Distribution of charge along the lightning channel: relation to remote electric and magnetic fields and to return stroke models",

Journal of Geophysical Research, 102 (D6), pp. 6987-7006, 1997.

[22] M.A. Uman, "Review and evaluation of lightning return stroke models including some aspects of their application", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 40 (4), 403-26, 1998.

[23] C. Gomes and V. Cooray, "Concepts of lightning return stroke models", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 42 (1), pp. 82-96, 2000.

[24] V. Rakov, "Lightning return stroke modeling: Recent Developments", International Conference on Grounding and Earthing - GROUND 2002, Rio de Janeiro, Brazil, 2002.

[25] V. Amoruso, F. Lattarulo, « Remarks on lightning electromagnetics », Eng. Analysis with Boundary Elements, Elsevier, 2003.

[26] V. Rakov, A new lightning return stroke model based on antenna theory DECEMBER 27, 2000.

[27] F. Rachidi, « Effets électromagnétiques de la foudre sur les lignes de transmission aériennes: modélisation et simulation », thèse N° 974, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1991.

[28] N. Theethayi et V. Cooray, "Sur la représentation du processus de retour d'éclair comme une impulsion de courant se propageant le long d'une ligne de transmission", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20 (2), pp. 823-837, 2005.

[29] N. Theethayi et V. Cooray, "Modèle de ligne de transmission - une idéalisation ou une réalité", Conférence Power tech, 23-26 juin, Bologne, Italie, 2003.

[30] V. Javor, Améliorations dans le calcul du champ électromagnétique de la foudre en utilisant des modèles de ligne de transmission modifiés, Institut des systèmes électroniques et d'information, Université d'État de Novgorod, 2013.

[31] E. Petrache, "Couplage du champ électromagnétique de la foudre aux réseaux de lignes de transmission aériennes et aux câbles enterrés", École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Thèse N° 3024 (2004).

[32] H. BECHA, Modélisation des Phénomènes Electromagnétiques Couplés par la des Volumes Finis et de la Paramétrisation dans les Systèmes Amagnétiques de chauffage par Induction, thèse de Magister, Univ Biskra, Algérie, 2001

[33] Strauss, W.A, Équations aux dérivées partielles : une introduction 2ème éd. John Wiley & Sons (2008).

[34] <https://www.jousefmurad.com/fem/the-finite-element-method-beginners-guide/#motivationFFAA>

[35] Zohdi, T.I. "Introduction à la méthode des éléments finis : théorie, programmation et applications." (2019).

[36] Elman, H., Silvester, D., Wathen, A. "Éléments finis et solveurs itératifs rapides : avec des applications en dynamique des fluides incompressibles." (2014).

[37] Larson, M.G., Bengzon, F. "La méthode des éléments finis : théorie, implémentation et applications." (2013).

- [38]Quarteroni, A., Valli, A. "Approximation numérique des équations aux dérivées partielles." (2021).
- [39]Kattan, P. I. MATLAB Guide to Finite Elements: An Interactive Approach. Springer(2015).
- [40]Reddy, J. N. An Introduction to the Finite Element Method. McGraw-Hill Education (2017).
- [41]<https://www.mathworks.com>
- [42]Mark de Berg · Otfried Cheong Marc van Kreveld · Mark Overmars Computational Geometry Algorithms and Applications 3ème éd,2008.
- [43]Andrew S. Podgorski, "THREE DIMENSIONAL TIME DOMAIN MODELLING OF LIGHTNING",Transactions IEEE sur la distribution d'énergie, Vol. PWRD-2, n° 3, (juillet 1987).
- [44]Mahdi Izadi,"Expressions analytiques pour les champs électromagnétiques associés aux canaux de foudre inclinés dans le domaine temporel",Faculté de génie, Université Putra Malaysia, Selangor, Malaisie, (30 janvier 2012).
- [45]<https://www.choisir.com/energie/articles/168782/le-guide-complet-des-fermes-solaires>.
- [46]https://at3w.com/upload/ficheros/INSTALLATIONS_PHOTOVOLTAIQUES_FR.pdf.
- [47]Chapman, B. et coll. (2007). Utilisation d'OpenMP : programmation parallèle de mémoire partagée portable. Presse du MIT.
- [48]<https://www.mathworks.com/products/parallel-computing.html>.

Annexe A: Norme CEI-62305 / NFPA 780

1. IEC-62305-1: Critère généraux

La norme CEI 62305, intitulée "Protection contre la foudre", est une norme internationale qui définit les principes généraux de protection contre la foudre pour les structures, les équipements et les personnes. Elle est publiée par la Commission électrotechnique internationale (CEI) et est largement utilisée dans le monde entier comme référence pour la protection contre la foudre.

La présente partie de la CEI 62305 fournit des principes généraux à suivre pour protéger les structures contre la foudre, y compris leurs installations, leur contenu et les personnes qui s'y trouvent[13].

1.1 Dommages dus à la foudre:

Le courant de foudre est la principale source de dommages. Les dommages sont classés en quatre catégories en fonction de l'emplacement du point d'impact de la foudre : S1 pour les impacts directs sur une structure, S2 pour les impacts à proximité d'une structure, S3 pour les impacts directs sur un service, et S4 pour les impacts à proximité d'un service.

1.1.1 Types de dommages:

Les dommages causés par un coup de foudre dépendent des caractéristiques de la structure protégée, notamment le type de construction, le contenu, le type de service et les mesures de protection prises.

Trois types principaux de dommages peuvent survenir :

D1, des blessures aux personnes causées par un choc électrique.

D2, des dommages physiques.

D3, la défaillance des réseaux de puissance et de communication.

1.1.2 Type de pertes:

Chaque type de dommage, seul ou combiné avec d'autres, peut entraîner différentes pertes dans la structure protégée. Les pertes dépendent des caractéristiques de la structure et de son contenu. Les types de pertes à considérer sont les suivants :

L1, perte de vie humaine ou blessures graves.

L2, perte de service public.

L3, perte d'héritage culturel.

L4, perte de valeurs économiques, incluant la structure, son contenu et la perte d'activité

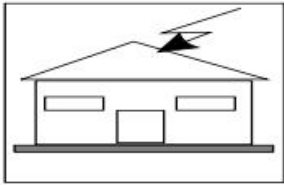
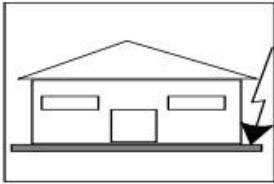
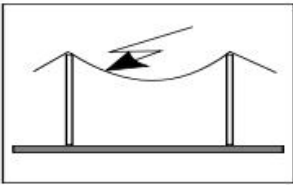
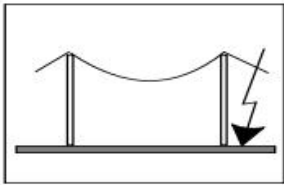
Coup de foudre		Structure	
Point d'impact	Source de dommages	Type de dommages	Type de pertes
	S1	D1 D2 D3	L1, L4 ^a L1, L2, L3, L4 L1 ^b , L2, L4
	S2	D3	L1 ^b , L2, L4
	S3	D1 D2 D3	L1, L4 ^a L1, L2, L3, L4 L1 ^b , L2, L4
	S4	D3	L1 ^b , L2, L4

Table 2 : Dommages et pertes en divers points d'impact de la foudre

1.2 Critères de base pour la protection des structures et des services:

1.2.1 Généralités :

Il n'est souvent ni possible ni économiquement faisable d'obtenir des mesures assurant une protection maximale contre la foudre. La discontinuité de l'écran et/ou son épaisseur inappropriée permet la pénétration du courant de foudre, entraînant des dommages physiques, un danger de mort et des défaillances des réseaux internes. Les mesures de protection doivent être conçues pour l'ensemble des paramètres du courant de foudre prévus, en tenant compte du niveau de protection requis[13].

1.2.2 Niveaux de protection contre la foudre :

La norme CEI 62305 définit quatre niveaux de protection contre la foudre, notés I, II, III et IV. Chaque niveau de protection correspond à des valeurs spécifiques de courant de foudre, à la fois minimums et maximums, pour chaque type de coup de foudre (positif ou négatif).

Pour le niveau de protection I, les valeurs de courant issues des coups positifs doivent avoir une probabilité inférieure à 10%, tandis que celles issues des coups négatifs doivent avoir une probabilité inférieure à 1%. Les valeurs maximales de courant pour le niveau de protection I sont réduites de 75% pour le niveau II, et de 50% pour les niveaux III et IV .

Premier choc positif			NPF			
Paramètres du courant	Symbole	Unité	I	II	III	IV
Courant crête	I	kA	200	150	100	
Charge de choc	Q_{SHORT}	C	100	75	50	
Energie spécifique	W/R	MJ/ Ω	10	5,6	2,5	
Paramètres de temps	T_1 / T_2	$\mu s / \mu s$	10 / 350			
Premier choc négatif ^a			NPF			
Paramètres du courant	Symbole	Unité	I	II	III	
Courant crête	I	kA	100	75	50	
Raideur moyenne	di/dt	kA/ μs	100	75	50	
Paramètres de temps	T_1 / T_2	$\mu s / \mu s$	1 / 200			
Choc subséquent			NPF			
Paramètres du courant	Symbole	Unité	I	II	III	IV
Courant crête	I	kA	50	37,5	25	
Raideur moyenne	di/dt	kA/ μs	200	150	100	
Paramètres de temps	T_1 / T_2	$\mu s / \mu s$	0,25 / 100			
Coup de foudre de longue durée			NPF			
Paramètres du courant	Symbole	Unité	I	II	III	IV
Charge du coup de foudre de longue durée	Q_{LONG}	C	200	150	100	
Paramètre de temps	T_{LONG}	s	0,5			
Bavure			NPF			
Paramètres du courant	Symbole	Unité	I	II	III	IV
Charge éclair	Q_{FLASH}	C	300	225	150	

^a L'utilisation de cette forme de courant ne concerne que les calculs, pas les essais.

Table 3 : valeurs maximales des paramètres de foudre correspondant aux niveaux de protection contre la foudre[13]

Critère d'interception			NPF			
	Symbole	Unité	I	II	III	IV
Courant crête minimal	<i>I</i>	kA	3	5	10	16
Rayon de la sphère fictive	<i>r</i>	m	20	30	45	60

Table 4 : valeurs minimales des paramètres de foudre et rayon de sphère fictive associé correspondant aux niveaux de protection contre la foudre[13]

1.2.3 Protection des structures :

- Protection contre les dommages physiques et danger de la mort(CEI 62305-3)[15].
- Protection contre les défaillances des réseaux internes (CEI 62305-4)[16].

2. IEC-62305-2: Évaluation des risques

2.1 Généralités

Ce passage de la norme CEI 62305 concerne l'évaluation des risques liés aux coups de foudre au sol dans une structure. Il propose une procédure pour évaluer ce risque, déterminer la limite supérieure du risque tolérable, et choisir les mesures de protection appropriées pour réduire le risque à une valeur inférieure ou égale à cette limite[14].

2.2 Risques dus à la foudre:

2.2.1 Risques:

Le risque, noté R, est une mesure de la perte annuelle moyenne probable. Pour chaque type de perte potentielle dans une structure, un risque correspondant doit être évalué. Les risques à évaluer sont les suivants :

R1 pour la perte de vie humaine ou les blessures graves.

R2 pour la perte de service public.

R3 pour la perte d'héritage culturel.

R4 pour la perte de valeurs économiques.

Pour évaluer les risques, il faut définir et calculer les composantes appropriées du risque.

Les composantes de risque à prendre en compte pour chaque type de perte dans une structure sont données sous la forme :

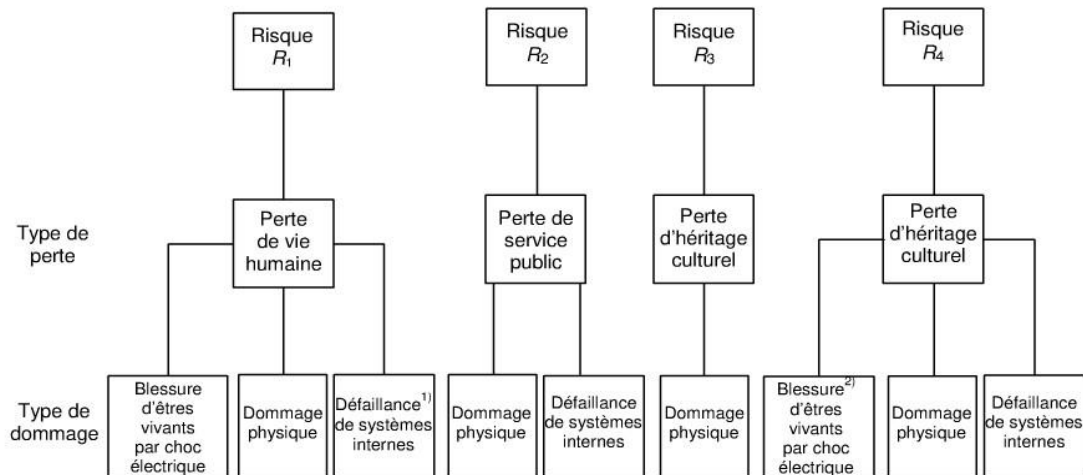
$$R_x = N_x \times P_x \times L_x$$

Où:

N_x est le nombre annuel d'événements dangereux.

P_x est la probabilité de dommages pour une structure.

L_x est la perte consécutive.



IEC 2613/10

Figure A-1: Type de pertes et risques correspondants dus à différents types de dommages[14].

2.2.2 Risque tolérable RT:

Des valeurs représentatives du risque tolérable RT, lorsque les coups de foudre impliquent des pertes humaines ou des pertes de valeurs sociales ou culturelles, sont données pour ce qui concerne les pertes de valeurs économiques (L4), la méthode applicable consiste à réaliser la comparaison de rentabilité (coûts-avantages).

2.3 Procédure particulière pour évaluer le besoin de protection :

Conformément à la CEI 62305-1 Pour chacun des risques R1, R2 et R3 les étapes suivantes doivent être suivies :

- identification des composantes Rx constituant le risque;
- calcul des composantes de risque identifiées Rx;
- calcul du risque total R ;
- identification du risque tolérable RT;
- comparaison du risque R avec la valeur tolérable RT

Si $R \leq RT$, une protection contre la foudre n'est pas nécessaire.

Si $R > RT$, des mesures de protection doivent être prises.

2.4 Procédure d'évaluation des impacts économiques de la protection :

Plus de la nécessité de protéger une structure contre la foudre, il peut être avantageux d'évaluer les bénéfices économiques de la mise en place de mesures de protection pour réduire les pertes économiques (L4) ainsi l'évaluation des composantes du risque R4 permet à l'utilisateur d'évaluer le coût des pertes économiques avec ou sans mesures de protection[14].

La méthode d'évaluation des impacts économiques d'une protection nécessite :

- l'identification des composantes RX constituant le risque R4 ;

- le calcul des composantes du risque RX identifiées, en l'absence de mesures de protection nouvelles ou supplémentaires ;
 - le calcul du coût annuel des pertes dû à chacune des composantes du risque RX ;
 - le calcul du coût annuel CL de la perte totale en l'absence de mesures de protection ;
 - l'adoption des mesures de protection choisies ;
 - le calcul des composantes du risque RX en présence de mesures de protection choisies ;
 - le calcul du coût annuel des pertes résiduelles dû à chacune des composantes du risque RX dans la structure protégée ;
 - le calcul du coût total annuel CRL des pertes résiduelles en présence des mesures de protection choisies ;
 - le calcul du coût annuel CPM des mesures de protection choisies; la comparaison des coûts.
- Le coût des pertes totales CL dans la structure peut être calculé par la formule suivante :

$$CL=R \times ct$$

Le coût total CRL des pertes résiduelles dans la structure malgré les mesures de protection peut être calculé par la formule:

$$CRL=R' \times ct$$

- Le coût annuel CPM des mesures de protection peut être calculé par la formule :

$$CPM = CP \times (i + a + m)$$

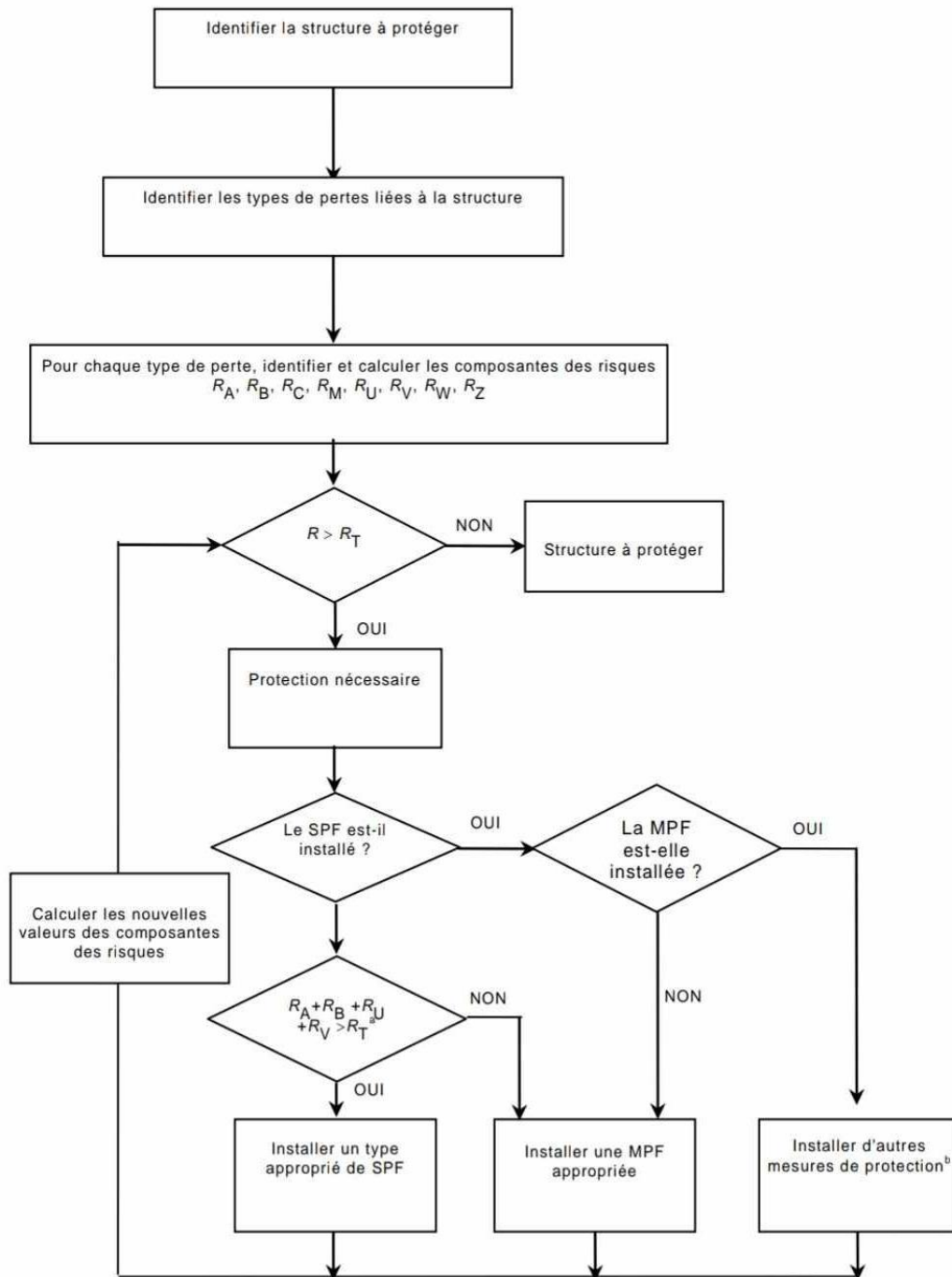
Avec:

CP : est le coût des mesures de protection ;

i : est le taux d'intérêt;

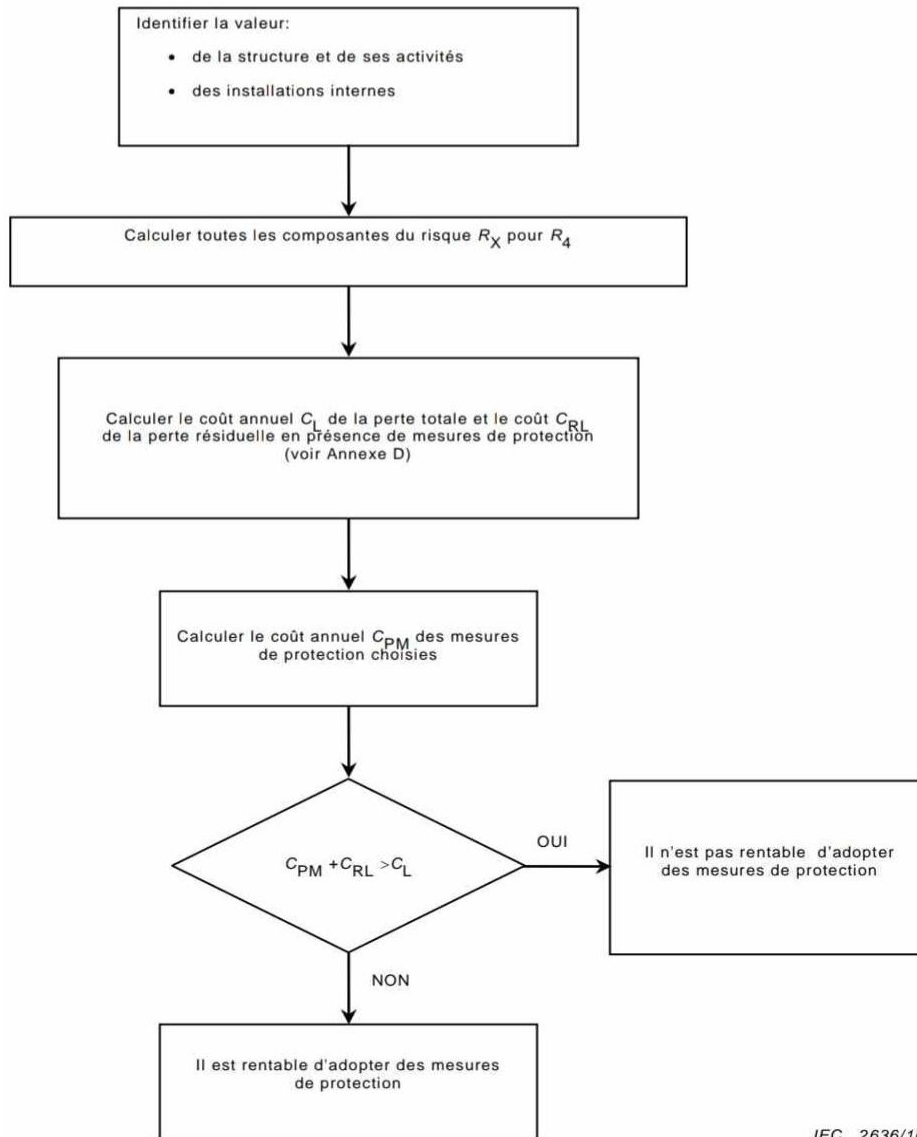
a : est le taux d'amortissement;

m : est le coût de maintenance.



IFC 2635/10

Figure A-2: Procédure pour la décision du besoin de protection et pour le choix des mesures de protection[14].



IEC 2636/10

Figure A-3: Procédure d'évaluation des impacts économiques des mesures de protection[14]

2.5 Mesures de protection :

Les mesures de protection visent à réduire le risque associé à différents types de dommages. Elles doivent être conformes aux normes suivantes pour être considérées comme fiables : la CEI 62305-3 pour la protection contre les blessures aux personnes et les dommages physiques dans une structure, et la CEI 62305-4 pour la protection contre les défaillances des réseaux de puissance et de communication[15][16].

2.5.1 Choix des mesures de protection :

Le concepteur doit choisir les mesures de protection les plus adaptées en fonction de la répartition de chaque composante de risque du risque total R , ainsi que des aspects techniques et économiques des différentes mesures. Les paramètres critiques doivent être identifiés pour déterminer la mesure la plus efficace de réduction du risque R . Plusieurs mesures de protection individuelles ou combinées peuvent être nécessaires pour atteindre la condition $R \leq RT$ pour chaque type de perte. La solution doit être choisie en fonction de cette condition, en tenant compte des aspects techniques et économiques. Une méthode simplifiée de choix de mesures de protection est présentée dans la figure 3. Il est important que l'installateur et l'architecte identifient les composantes de risque les plus critiques et les réduisent, en tenant compte des aspects économiques[14].

3. Norme 62305-3: dommage aux structure et risque de vie

3.1 Généralités :

Ce passage de la norme IEC 62305 traite de la protection des structures contre les dommages physiques et les blessures aux êtres vivants causés par les tensions de contact et de pas. La principale mesure de protection recommandée est le système de protection contre la foudre (NPS), comprenant des systèmes externes et internes[15].

3.2 Système de protection contre la foudre externe :

3.2.1 Généralités :

Le système de protection contre la foudre externe est conçu pour intercepter les éclairs directs vers la structure, les éclairs latéraux inclus, et pour diriger le courant de la foudre du point d'impact vers la terre, en dispersant ce courant sans causer de dommages thermiques, mécaniques ou d'étincelles dangereuses.

3.2.2 Les systèmes d'air-termination :

Les systèmes d'air-termination sont des éléments essentiels des systèmes de protection contre la foudre, conçus pour intercepter les éclairs et les diriger en toute sécurité vers la terre.

Ils peuvent être composés de différentes combinaisons d'éléments tels que:

- des pointes,
- des câbles caténares
- des conducteurs maillés.

La méthode de la sphère roulante est en effet utilisée pour le positionnement du système de terminaison d'air.

3.2.3 Systèmes de descente de terre :

Les descentes de terre dans les systèmes de protection contre la foudre doivent être conçues pour fournir plusieurs chemins de courant parallèles et minimiser la longueur des chemins de courant. Les descentes doivent être installées de manière à prolonger directement les conducteurs d'air-termination, en évitant les boucles et en restant droites et verticales. Les descentes peuvent être en surface ou dans un mur, en fonction du matériau, avec des précautions pour les matériaux combustibles . Certains composants naturels de la structure, peuvent servir de descentes s'ils respectent des critères spécifiques.

Enfin, des joints de test doivent être installés sur chaque descente, sauf pour les descentes naturelles combinées avec des électrodes de terre de fondation.

3.2.4 Le système de mise à la terre :

Le système de mise à la terre essentiel pour disperser le courant de foudre dans le sol et minimiser les surtensions, doit avoir une résistance faible (de préférence inférieure à 10 Ω à basse fréquence).

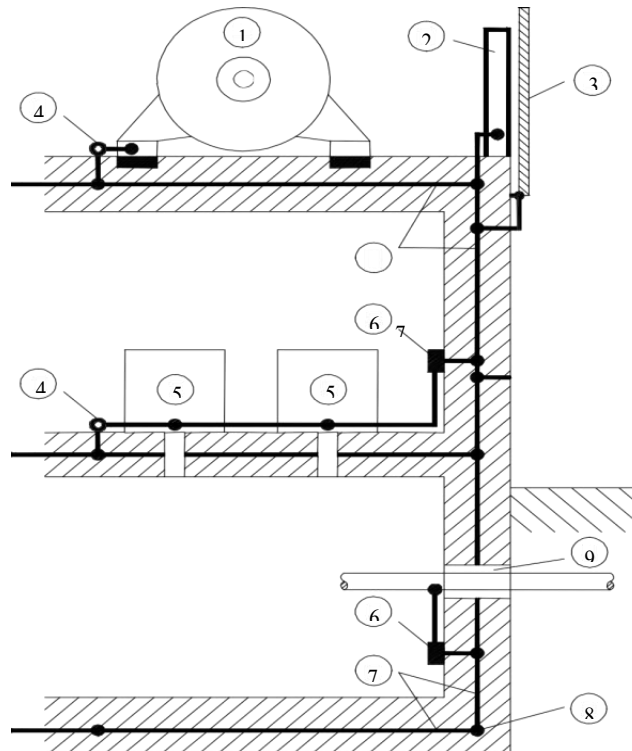
3.3 Système de protection contre la foudre interne:

Le système de protection contre la foudre interne vise à éviter les étincelles dangereuses à l'intérieur de la structure protégée, dues au courant de foudre circulant dans le système externe ou d'autres parties conductrices. Ces étincelles peuvent se produire entre le système externe et divers composants tels que :

- les installations métalliques,
- les systèmes internes et les parties conductrices externes connectées à la structure.

3.3.1 La liaison équipotentielle:

La liaison équipotentielle contre la foudre consiste à interconnecter le système de protection contre la foudre (SPF) avec les installations métalliques, les systèmes internes, les parties conductrices externes et les lignes connectées à la structure pour prévenir les étincelles dangereuses à l'intérieur de la structure.



- 1.Équipement électrique de puissance
- 2.Poutre en acier
- 3.Revêtement métallique de la façade
- 4.Joint de liaison
- 5.Équipement électrique ou électronique
- 6.Armature en acier dans le béton
- 7.Électrode de terre de fondation
- 8.Entrée commune pour différents services
- 9.Barre de liaison

Figure A-4:Liaison équipotentielle dans une structure avec armature en acier[15]

3.4Les composants du SPF :

Les composants du système de protection contre la foudre doivent être robustes pour résister aux effets électromagnétiques du courant de foudre et aux contraintes mécaniques accidentelles, afin d'éviter tout dommage. Ils doivent être fabriqués à partir des matériaux spécifiés et avoir des caractéristiques de performance équivalentes. Les terminaisons d'air et les descentes de terre doivent être solidement fixées pour résister aux forces électrodynamiques ou mécaniques, avec des distances de fixation recommandées. Le nombre de connexions le long des conducteurs doit être minimisé, et les connexions doivent être sécurisées par divers moyens.

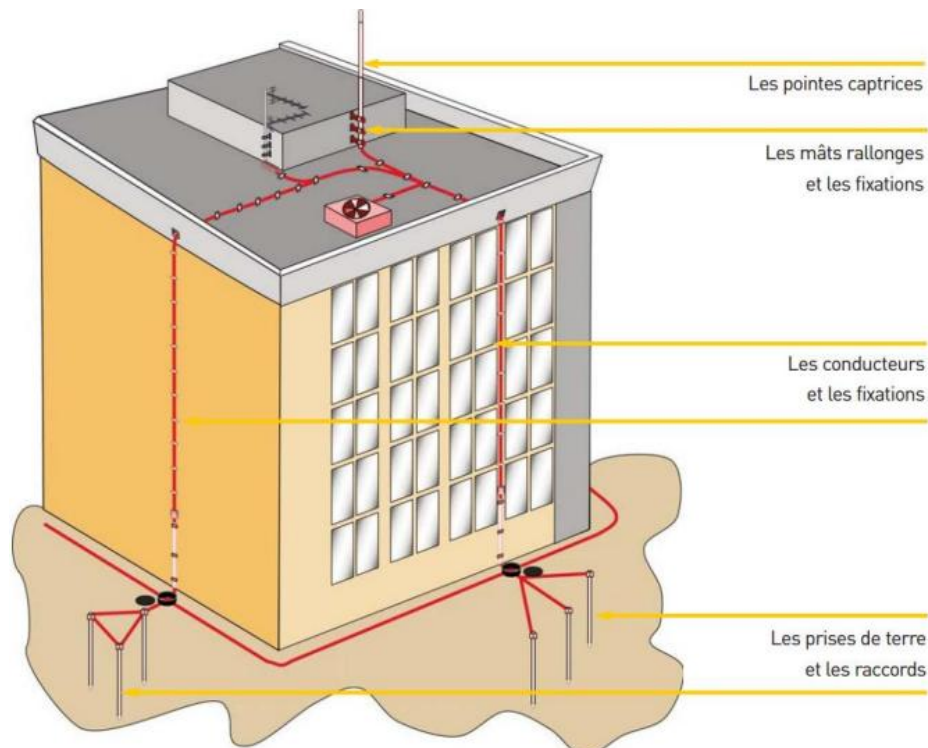


Figure A-5:SPF composants[15]

4. IEC-62305-4 : Protection contre les défaillances des réseaux internes

4.1 Généralités :

La présente partie de la CEI 62305 fournit des informations relatives à la conception, à l'installation, à l'inspection, à la maintenance et aux essais d'une installation de protection de réseau de puissance et de communication (MPF) visant à réduire le risque de défaillances permanentes dû aux impulsions électromagnétiques de foudre (IEMF) dans une structure. Le courant de foudre et son champ magnétique associé sont les principales sources de dégradation, ce dernier ayant la même forme d'onde que le courant de foudre.

L'influence du champ électrique de foudre est généralement négligeable en matière de protection[16].

4.2 Les victimes des dégradations

Ce sont les réseaux internes dans et sur la structure, qui ont une faible immunité contre les chocs et les champs magnétiques. Les réseaux externes peuvent être affectés par le champ magnétique non amorti et parfois par les coups de foudre directs s'ils sont exposés. Les réseaux

internes peuvent être endommagés par le champ magnétique restant amorti, les chocs internes conduits ou induits, ainsi que les chocs externes conduits par les lignes entrantes.

4.3 Conception et mise en œuvre de MPF:

Les réseaux électriques et de communication sont vulnérables aux impulsions électromagnétiques de la foudre, ce qui peut entraîner des pannes. Pour éviter ces défaillances, il est essentiel de mettre en place des mesures de protection contre ces impulsions. La protection s'appuie sur le concept de zones de protection contre la foudre (ZPF), qui divisent les zones à protéger en volumes spécifiques adaptés au niveau d'immunité des réseaux internes. Ces zones sont délimitées en fonction des mesures de protection mises en place et varient en fonction de la sévérité de l'impulsion électromagnétique.

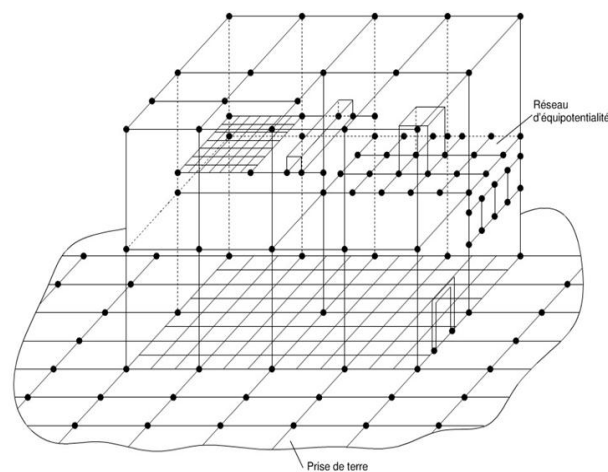
4.4 Mpf fondamentale :

1. Mise à la terre et équipotentialités:

- La mise à la terre écoule et disperse le courant de foudre à la terre.
- Le réseau d'équipotentialité minimise les différences de potentiel et peut réduire le champ magnétique.

a) Réseau prise de terre:

Pour améliorer les performances du réseau de prises de terre, il est recommandé d'intégrer la prise de terre en boucle autour de la structure, ou celle dans le béton à la périphérie de la base, à un réseau maillé situé sous et autour de la structure, avec une maille d'environ 5 mètres. De plus, les armatures en acier du béton enterré peuvent être utilisées pour former un maillage interconnecté tous les 5 mètres, ce qui offre des performances similaires.



IEC 277410

Figure A-6: Exemple de réseau de mise à la terre tridimensionnel constitué du réseau d'équipotentialité interconnecté avec le réseau de prises de terre[16]

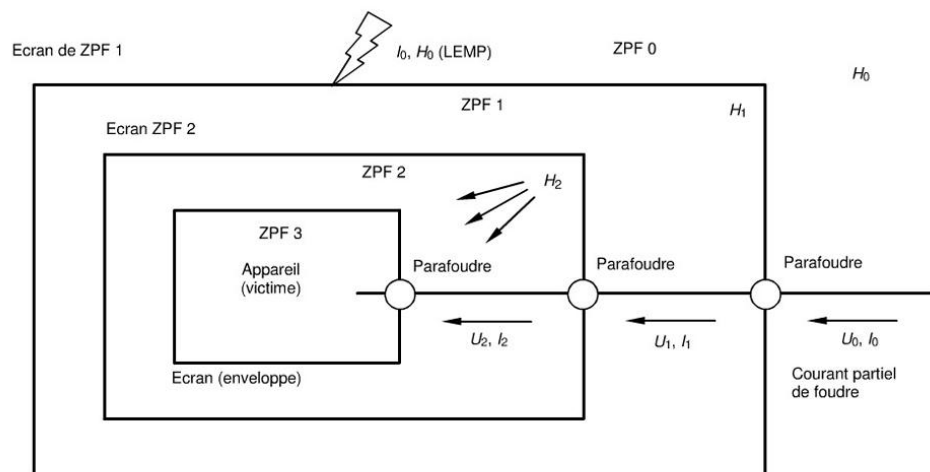
b) Réseau d'équipotentialités :

Un réseau d'équipotentialité de faible impédance est crucial pour éviter les différences de potentiel dangereuses dans la zone de protection contre la foudre (ZPF) intérieure et pour réduire le champ magnétique. Ce réseau peut être constitué d'une structure maillée tridimensionnelle, intégrant les parties conductrices de la structure ou des réseaux internes, et en mettant à la terre les parties métalliques à la frontière de chaque ZPF. Il est essentiel d'interconnecter les éléments métalliques dans et sur la structure, tels que les armatures en béton, les rails d'ascenseurs, etc. Les barres d'équipotentialité et les écrans magnétiques doivent être intégrés de manière similaire pour assurer une protection adéquate.

2. Écran magnétique et cheminement

Le champ magnétique occasionné à l'intérieur d'une ZPF par des coups de foudre directs ou proches de la structure ne peut être réduit que par un écran spatial des ZPF. Les chocs induits dans les réseaux de communication peuvent être minimisés soit par écran spatial, soit par cheminement et blindage ou par association des deux méthodes.

La figure illustre l'impact de la foudre sur la structure et identifie les zones de protection contre la foudre (ZPF 0, ZPF 1 et ZPF 2).



IEC 2780/10

Figure A-7: Situation de l'IEMF due à un impact de foudre[16]

a) Écran spatiaux en grille :

En pratique, les écrans à large volume des zones de protection contre la foudre (ZPF) sont souvent formés par des éléments naturels de la structure, comme les armatures métalliques des plafonds, murs et planchers, la charpente métallique, ou encore les toits et façades métalliques. Ces éléments forment un écran spatial en grille.

3. Chemin et blindage des lignes

Pour réduire les chocs induits dans les réseaux internes, il est recommandé d'utiliser des chemins de câbles appropriés pour réduire la surface de boucle d'induction, ainsi que des câbles écrantés ou des conduits métalliques pour diminuer les effets inductifs internes. Une combinaison des deux méthodes peut également être efficace.

4. Les interfaces d'isolement

Les interfaces d'isolement sont utilisées pour éviter les courants de perturbation à fréquence industrielle causés par des boucles de grande surface ou un manque de mise à la terre adéquate. Elles comprennent des équipements isolés de classe II, des transformateurs, des câbles en fibre optique et des coupleurs optiques. Ces interfaces aident à réduire les effets des perturbations électromagnétiques et peuvent être protégées contre les surtensions avec des parafoudres, selon les normes de la CEI 60664-1[13].

5. Parafoudre

Pour contrôler les surtensions conduites dans les lignes, il convient d'installer des parafoudres à l'entrée de toute ZPF et éventuellement en amont des matériels à protéger.

pour les parafoudres de type à limitation de tension, le niveau de protection efficace résultant, noté UP/F , est la somme de la tension en sortie du parafoudre, UP , et de la chute de tension de câblage dans les liaisons, ΔU . Pour les parafoudres de type à coupure, le niveau de protection efficace résultant, noté Up/F , est le plus élevé entre Up et ΔU .

$$UP/F = UP + \Delta U$$

(pour un (des) parafoudre(s) de type à limitation de tension);

$$Up/F = \max(Up, \Delta U)$$

(pour un (des) parafoudre(s) de type à coupure);

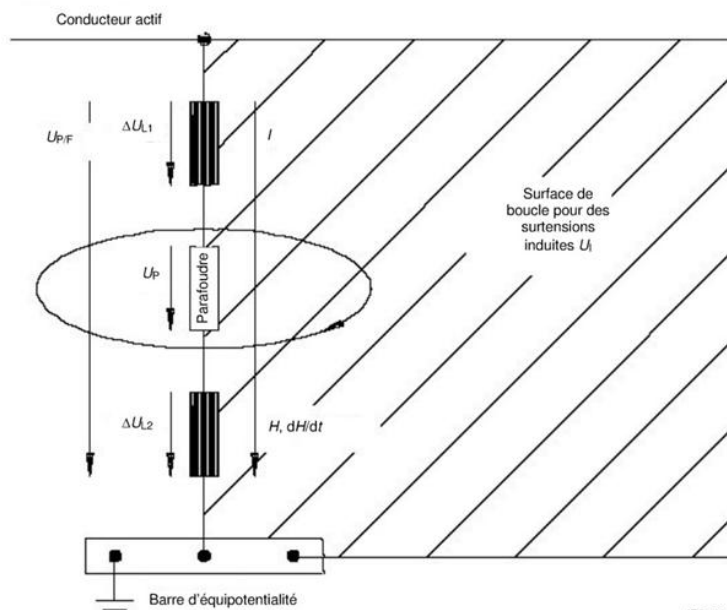


Figure A-8: Surtension entre un conducteur actif la barre équipotentielle[16]

Les normes actuelles définissent trois types de parafoudres pour les installations électriques basse tension monophasées et triphasées.

Type 1:

Ces parafoudres sont capables d'écouler un courant de foudre très important, généralement de la Terre vers le réseau de distribution d'énergie. En effet, ils sont installés dans le tableau électrique principal lorsque le bâtiment est équipé d'un paratonnerre.

Type 2:

Il s'agit de parafoudres destinés à écouler les courants générés par des coups de foudres indirects et provoquant des surtensions induites ou conduites sur le réseau de distribution d'énergie. Ils sont installés dans le tableau principal de distribution.

Type 3:

Ces parafoudres sont installés en complément des parafoudres de Type 2 et sont destinés à réduire les surtensions aux bornes des équipements sensibles ou critiques. Leur capacité d'écoulement de courant est très limitée. En conséquence ils ne peuvent être utilisés seuls.

5. Norme NFPA 780:

5.1 Généralités :

La NFPA (National Fire Protection Association) est une organisation qui établit des normes et des codes de sécurité relatifs à la protection contre les incendies et d'autres dangers connexes.

NFPA 780 est une norme pour l'installation des systèmes de protection contre la foudre. Elle fournit des exigences d'installation des systèmes de protection contre la foudre pour protéger les personnes et les biens contre les risques d'incendie et les dangers associés à l'exposition à la foudre[17].

5.2 Exigences Générales:

1. Matériaux:

Ce point fournit des exigences générales pour la protection des structures contre la foudre, notamment en ce qui concerne les matériaux et leur utilisation. Les structures doivent être protégées selon deux classes de matériaux : classe I pour les structures ne dépassant pas 75 pieds (23 mètres) de hauteur et classe II pour les structures dépassant cette hauteur et Les conducteurs de classe II de la partie supérieure doivent être prolongés jusqu'au sol et interconnectés avec le reste du système. Les systèmes de protection doivent être fabriqués à partir de matériaux résistants à la corrosion ou protégés contre la corrosion.

2. Connecteurs et raccord:

Assurer la compatibilité des connecteurs et raccords avec le conducteur et les surfaces d'installation et utiliser des connecteurs et raccords bimétalliques pour le raccordement de métaux différents.

3. Dommages mécaniques ou déplacement :

Protéger les parties du système de protection contre la foudre sujettes aux dommages mécaniques avec un moulage ou un revêtement protecteur.

4. Utilisation de l'aluminium :

Ne pas installer d'équipement de protection contre la foudre en aluminium en contact direct avec des matériaux de toiture en cuivre ou d'autres surfaces en cuivre. Utiliser des raccords bimétalliques pour connecter les descentes en aluminium à l'équipement de mise à la terre en cuivre ou en cuivre plaqué.

5. Dispositifs de terminaison des décharges :

Inclure des pointes d'air, des mâts métalliques, des parties métalliques permanentes des structures et des fils de terre aériens comme dispositifs de terminaison des décharges.

6. Pointes d'air :

La pointe d'une pointe d'air ne doit pas être à moins de 10 pouces au-dessus de l'objet ou de la zone à protéger et doivent être fixées contre le renversement ou le déplacement.

7. Mâts de protection contre la foudre :

Les mâts métalliques doivent être conformes ou protégés par un dispositif de terminaison des décharges et les mâts non métalliques doivent être pourvus d'au moins un dispositif de terminaison des décharges.

8. Fils de terre aériens :

Le matériau du fil de terre aérien doit être choisi pour minimiser la corrosion.

9. Mâts isolés et fils de terre aériens :

Calculer la distance minimale entre un mât ou un fil de terre aérien et la structure à protéger pour éviter les éclairs latéraux.

10. Dispositifs de terminaison des éclairs sur toits:

Les dispositifs de terminaison des éclairs doivent être installés le long des crêtes et des crêtes intermédiaires, avec des spécifications pour les toits dépassant certaines dimensions.

11. Zones de protection :

La géométrie de la structure doit déterminer la zone de protection.

12. Méthodes pour déterminer la zone de protection globale :

La méthode de la sphère roulante définit la zone de protection en fonction de l'espace non envahi par une sphère roulante ayant un rayon de la distance de frappe déterminée.

13. Conducteurs :

Les conducteurs principaux doivent interconnecter tous les dispositifs de terminaison de la frappe et doivent former deux voies ou plus vers la terre, sauf exceptions avec protection .

14. Fixations de conducteurs :

Les conducteurs doivent être fixés à la structure à des intervalles ne dépassant pas 3 pieds (1 mètre) et peuvent être réalisées avec des clous, vis, boulons ou adhésif selon les besoins avec matériaux identiques à ceux du conducteur ou également résistants à la corrosion.

15. Ancrages en maçonnerie :

Les ancrages en maçonnerie pour attacher des matériaux de protection contre la foudre doivent avoir un diamètre extérieur minimum de 1/4 de pouce (6,4 mm) et Les trous pour les ancrages doivent être de la bonne taille et réalisés dans la brique, la pierre ou l'autre unité de maçonnerie plutôt que dans les joints de mortier.

16. Raccords de connecteur :

Les raccords utilisés pour les connexions requises aux corps métalliques dans ou sur une structure doivent être fixés au corps métallique par boulonnage, brasage, soudage, vissage ou connecteurs à haute compression répertoriés à cet effet. Les connexions de conducteurs doivent être de type boulonné, soudé, à haute compression ou à sertir.

17. Électrodes de mise à la terre :

Les conducteurs de descente des systèmes de protection contre la foudre doivent se terminer à une électrode dédiée ou au système d'électrodes de mise à la terre d'un bâtiment. Les électrodes de mise à la terre doivent être conçues, dimensionnées et installées conformément aux exigences spécifiques. Les conducteurs de descente doivent être fixés de manière permanente aux électrodes de mise à la terre à l'aide de connecteurs appropriés.

18. Liaison commune des systèmes mis à la terre :

Pour les structures de plus de 60 pieds de hauteur, l'interconnexion doit se faire sous forme d'un conducteur de boucle de terre. Cette interconnexion comprend tous les systèmes d'électrodes de mise à la terre des bâtiments, tels que la protection contre la foudre, le service électrique, les communications et les électrodes de mise à la terre du système d'antenne.

19. Égalisation des potentiels :

L'égalisation des potentiels au niveau du sol est requise et l'égalisation des potentiels au niveau intermédiaire doit être réalisée en interconnectant les conducteurs de descente du système de protection contre la foudre et les autres supports mis à la terre aux niveaux intermédiaires entre le toit et la base d'une structure.

20. Liaison des Corps Métalliques :

Pour protéger les structures contre la foudre, les corps métalliques fournissant un chemin vers la terre pour les courants de foudre doivent être liés au système de protection. Les mâts métalliques longs doivent être connectés aux éléments en acier de la structure, tandis que les antennes doivent être reliées au système de protection avec des conducteurs spécifiques. Les dispositifs de protection contre les surtensions doivent être installés aux points stratégiques, avec des caractéristiques adaptées à la protection requise. Ces installations doivent être coordonnées avec la capacité de courant disponible de l'alimentation et respecter les normes de mise à la terre.

Annexe B: Calcul Parallèle en MATLAB

1. Introduction

le calcul parallèle est une technique essentielle pour accélérer les calculs scientifiques et d'ingénierie. En exploitant les capacités de calcul des processeurs modernes qui comportent souvent plusieurs cœurs, le calcul parallèle permet de diviser un problème en sous-problèmes indépendants qui peuvent être résolus simultanément. MATLAB offre plusieurs fonctionnalités pour effectuer des calculs parallèles, notamment le Parallel Computing Toolbox, qui permet d'utiliser efficacement le calcul parallèle sur un ordinateur local ou sur des clusters informatiques. L'utilisation du calcul parallèle permet en effet de partager la mémoire du processeur entre les différents cœurs, ce qui permet d'augmenter la vitesse de calcul en traitant plusieurs tâches en parallèle[47].

2. Méthodes de Calcul Parallèle en MATLAB

➤ **Utilisation de la Fonction "parfor":**

La fonction "parfor" est une version parallèle de la boucle (for) standard en MATLAB.

- 1) Elle permet d'itérer sur un ensemble de valeurs en parallèle, distribuant les calculs sur plusieurs cœurs de processeur.
- 2) Chaque itération de la boucle peut être exécutée de manière indépendante et en parallèle, Utile lorsque les itérations de la boucle n'ont pas de dépendances entre elles et peuvent être exécutées dans n'importe quel ordre[33].
- 3) Parallélisme de données : chaque itération traite un ensemble différent de données.

➤ **Utilisation de la Fonction "spmd":**

La fonction spmd (Single Program, Multiple Data) permet d'exécuter du code en parallèle sur plusieurs travailleurs MATLAB.

- 1) Le code à l'intérieur de spmd s'exécute sur chaque travailleur de manière indépendante.
- 2) Utile pour exécuter des tâches qui peuvent être divisées en sous-tâches indépendantes et exécutées en parallèle[48].
- 3) Parallélisme de tâches : chaque travailleur exécute une partie différente du code.

➤ **Fonctions "parfeval" et "fetchOutputs"**

La fonction "parfeval" est utilisée pour exécuter une fonction en parallèle, tandis que "fetchOutputs" permet de récupérer les résultats de manière asynchrone sur des travailleurs parallèles, ce qui signifie que le programme principal peut continuer à s'exécuter pendant que les fonctions sont en cours d'exécution[48].

3. Avantages du Calcul Parallèle en MATLAB

- **Gain de Temps** : Le calcul parallèle permet d'accélérer les calculs en répartissant la charge sur plusieurs cœurs de processeur.
- **Traitement de Données Volumineuses** : Pour les ensembles de données volumineux, le calcul parallèle peut significativement réduire le temps de traitement.
- **Facilité d'Utilisation** : MATLAB offre des outils simples pour mettre en œuvre le calcul parallèle, ce qui le rend accessible même aux utilisateurs novices.

Le calcul parallèle en MATLAB est une technique puissante pour accélérer les calculs complexes. En utilisant les fonctions "parfor" et "spmd", "parfeval" et "fetchOutputs" , les utilisateurs peuvent exploiter efficacement les capacités de traitement parallèle de leur matériel informatique. L'adoption du calcul parallèle peut entraîner des améliorations significatives des performances et ouvrir de nouvelles possibilités pour le traitement de données complexes.

Cependant, sur un ordinateur normal, vous serez limité par le nombre de cœurs de votre processeur et par la quantité de mémoire disponible. Pour des tâches plus intensives en calcul, vous pourriez envisager d'utiliser un cluster ou un service de cloud computing pour bénéficier de davantage de ressources de calcul.

