

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



Département d'Electrotechnique

Projet de Fin d'Étude
Pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en
Electrotechnique

Élaboration d'un logiciel d'analyse du risque foudre selon la norme
IEC 62305

Réalisé par :
M. SAIAH Abdelmallek
M. MAHLOUL Salim

Encadré par :
Dr. BENMAHAMMED Youcef
M. BOULOUDINAT Abdelali

Soutenu le 23 Juin 2025, Devant le jury composé de :

Pr.MEKHALDI Abdelouahab: ENP - Président
Pr.TEGUAR Madjid: ENP - Examineur

ENP 2025

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



Département d'Electrotechnique

Projet de Fin d'Étude
Pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en
Electrotechnique

Élaboration d'un logiciel d'analyse du risque foudre selon la norme
IEC 62305

Réalisé par :
M. SAIAH Abdelmallek
M. MAHLOUL Salim

Encadré par :
Dr. BENMAHAMMED Youcef
M. BOULOUDINAT Abdelali

Soutenu le 23 Juin 2025, Devant le jury composé de :

Pr.MEKHALDI Abdelouahab: ENP - Président
Pr.TEGUAR Madjid: ENP - Examineur

ENP 2025

Remerciements

Nous exprimons notre sincère reconnaissance à

M. Youcef BENMAHMMED, docteur à l'École Nationale Polytechnique, pour ses conseils éclairés, sa bienveillance et l'intérêt qu'il a porté à notre travail. Ses remarques pertinentes et son expertise ont été d'un grand apport à l'enrichissement de ce mémoire.

Nos remerciements vont aussi à M. Abdelali BOULOUDINAT, ingénieur chef du département Électricité chez JGC Algeria, pour son encadrement professionnel, sa disponibilité et la qualité de ses conseils techniques durant notre stage. Son expérience et ses orientations pratiques ont fortement contribué à la concrétisation de ce projet.

Que les membres de jury trouvent, ici, l'expression de nos sincères remerciements pour l'honneur qu'ils nous font en prenant le temps de lire et d'évaluer ce travail.

Dédicace

“

*Je dédie ce mémoire : À mes parents que dieu les
Protège qui m'ont m'encouragé à poursuivre mes études*

À

*Mes frères, Mes sœurs et a toute ma famille À tous mes
amis, À la*

Promotion de génie électrique (Électrotechnique)

À tous ceux qui me sont chers, à vous tous

Merci.

”

- SAIAH & MAHLOUL

الملخص

تمثل الصواعق ظاهرة طبيعية خطيرة تهدد حياة الإنسان والمنشآت الصناعية. يهدف هذا العمل إلى دراسة سلوك الصاعقة بعد تقديم نظرة نظرية حول آليات التفريغ ومقارنة بين نماذج IEC 62305-2 وتطوير أدوات تقييم الخطر طبقاً للمعيار لتحليل COMSOL ، تم إجراء محاكاة ثنائية الأبعاد باستخدام برنامج (Eriksson ، Rizk ، Petrov ، Lalande) تقليدية تأثير ارتفاع المانع ونصف قطر رأسه على توزيع المجال الكهربائي وانطلاق القائد الصاعد. النتائج تدعم النماذج التجريبية (R_a, R_b, R_c, R_d) لحساب مكونات الخطر Python وتُفترض تحسينات تصميمية. بالتوازي، تم تطوير برنامج بلغة بواجهة تفاعلية، وفقاً للمرسوم التنفيذي الجزائري 21-319. أظهرت دراسات الحالة فعالية عالية، بانحراف أقل من 5% مقارنة بالحسابات اليدوية

الكلمات المفتاحية

، COMSOL Multiphysi ، مسافة الضربة، IEC 62305-2 الحماية من الصواعق، تقييم الخطر، المعيار المحاكاة العددية، تطوير البرمجيات، التنظيمات الجزائرية، هندسة الجهد العالي

Abstract

Lightning is a severe atmospheric phenomenon that endangers lives and industrial assets. This thesis addresses both lightning physics and practical mitigation based on IEC 62305-2. After a theoretical overview and a comparison of models (Eriksson, Rizk, Petrov, Lalande), a 2D electrostatic simulation using COMSOL evaluates the impact of rod height and tip curvature on electric field intensity and leader inception. Results validate empirical models and propose optimization paths. Concurrently, a Python-based tool was developed to compute lightning risk components (R_a, R_b, R_c, R_d), featuring an interactive interface and compliance with Algeria's Decree 21-319. Case studies confirm its efficiency with <5% deviation from manual results. This work advances lightning protection by integrating theory, simulation, and norm-based software, especially for industrial sites like JGC Algeria S.p.A.

Keywords: Lightning protection, IEC 62305-2, COMSOL, simulation, risk assessment, software, Algeria.

Résumé

La foudre est un phénomène atmosphérique dangereux pour les personnes et les installations industrielles. Ce mémoire traite à la fois de l'analyse du phénomène et de la réduction du risque selon la norme IEC 62305-2. Une étude théorique et une comparaison des modèles classiques (Eriksson, Rizk, Petrov, Lalande) sont suivies d'une simulation 2D sous COMSOL pour évaluer l'effet de la hauteur et du rayon de pointe du paratonnerre sur le champ électrique et l'initiation du traceur ascendant. Les résultats confirment les modèles empiriques et proposent des améliorations. En parallèle, un outil en Python a été conçu pour automatiser le calcul des composantes du risque (R_a, R_b, R_c, R_d), avec une interface conviviale et conforme au décret algérien 21-319. Les cas d'étude montrent une précision supérieure à 95 %. Ce travail allie théorie, simulation et outil normatif pour renforcer la protection contre la foudre dans les installations industrielles telles que JGC Algeria S.p.A.

Mots-clés : Protection foudre, IEC 62305-2, COMSOL, simulation, évaluation du risque, logiciel, réglementation algérienne.

Tables des matières

TABLE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

Introduction générale.....	13
----------------------------	----

CHAPITRE 1 : FOUDRE ET PROTECTION CONTRE LA FOUDRE 15

1	HISTORIQUE	16
1.1	<i>L'époque des croyances.....</i>	16
1.2	<i>Fondements scientifiques modernes</i>	16
2	PHYSIQUE DES PHENOMENES ORAGEUX	16
2.1	<i>Phénomènes précurseurs</i>	16
2.1.1	Nuages orageux.....	16
2.1.2	L'électrification des nuages orageux.....	17
2.1.3	Champ électrique au sol et effet couronne	18
2.2	<i>Distribution statistique des orages</i>	19
2.2.1	Niveau céramique et densité des coups de foudre au sol.....	19
2.3	<i>Facteurs locaux influant sur la foudre.....</i>	20
3	PHENOMENE DE FOUDRE.....	21
3.1	<i>Foudre, éclair et tonnerre.....</i>	23
3.2	<i>Classification des coups de foudre</i>	24
3.2.1	Coup de foudre ascendant	25
3.2.2	Coup de foudre descendant	25
3.3	<i>Les effets de la foudre</i>	26
4	PROTECTION CONTRE LA FOUDRE :.....	27
4.1	<i>Protection contre les effets indirects de la foudre :</i>	27
4.1.1	Éclateurs :.....	27
4.1.2	Parafoudres	28
4.2	<i>Protection contre l'atteinte directe de la foudre.....</i>	29
5	PROTECTION D'UN EQUIPEMENT PAR UN PARATONNERRE.....	30
5.1	<i>Mécanisme d'impact.....</i>	31
5.2	<i>Modèle électro géométrique</i>	31
5.2.1	Champ généré au sol par le traceur descendant.....	32
5.2.2	Distance d'amorçage.....	34
5.2.3	Méthode de la sphère fictive	35
5.2.4	Zone et surface de capture d'une tige verticale	36
6	CONCLUSION :.....	38

CHAPITRE 2 SIMULATION DES PARAMETRES ELECTRIQUES D'UNE FOUDRE 40

1	INTRODUCTION.....	41
1.1	<i>Contexte : la foudre et les paratonnerres</i>	41

1.2	Objectifs de la simulation	41
2	FONDEMENT THEORIQUE	42
2.1	Équations et Modèles Électromagnétiques	42
2.2	Les équations de Maxwell.....	42
2.3	Constitution des milieux :	42
2.4	Définitions des constantes dans les milieux :.....	43
2.5	Le modèle électrostatique :	43
3	RESOLUTION DES EQUATIONS ELECTROMAGNETIQUES PAR LA METHODE DES ELEMENTS FINIS	43
3.1	Équations aux dérivées partielles	44
3.2	Classification selon le type d'équation	44
3.3	Méthodes de résolution.....	45
3.3.1	Méthodes analytiques.....	45
3.3.2	Méthodes numériques	45
4	METHODE DES ELEMENTS FINIS (MEF) ET PRINCIPE FONDAMENTAL.....	46
4.1	Principe de base de la méthode des éléments finis	47
4.2	Principes fondamentaux et application pratique :.....	47
5	THEORIE DES STREAMERS DANS LES DECHARGES DE GAZ	48
5.1	Définition et rôle des streamers.....	49
5.1.1	Mécanisme de formation	49
5.1.2	Seuil critique et conditions de formation.....	50
5.1.3	Influence du champ sur la géométrie des streamers	50
6	APPROCHE PAR MODELES PHYSIQUES ET EMPIRIQUES DE LA DISTANCE D'AMORÇAGE	50
6.1	Modèle d'Eriksson	51
6.2	Modèle de Rizk.....	51
6.3	Modèle de Petrov et Waters.....	52
6.4	Modèle de Lalande	52
7	MODELISATION NUMERIQUE	52
7.1	Logiciel utilisé : COMSOL Multiphysics	52
7.1.1	Avantages clés de COMSOL :	53
8	MODELISATION PHYSIQUE DU COUP DE FOUDRE : SYSTEME DE DECHARGE POINTE-PLAN.....	54
9	HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES.....	55
10	GEOMETRIE DU MODELE ET DOMAINES ASSIGNES	56
10.1	Propriétés électriques du modèle :	58
10.2	Maillage de la Géométrie	58
11	ANALYSE DES RESULTATS ET DISCUSSION.....	60
11.1	Étude du champ électrique atmosphérique sans dispositif de protection	60
11.2	Étude du champ électrique atmosphérique avec dispositif de protection (paratonnerre). 61	
11.2.1	Étude dynamique de l'approche du leader descendant	65
11.2.2	Étude de la distance de capture en fonction de la hauteur du paratonnerre	68

12	INFLUENCE DU RAYON DE COURBURE DE LA TÊTE DU PARATONNERRE SUR LA DISTANCE DE CAPTURE	71
12.1	Introduction et contexte	71
12.2	Résultats des simulations	71
		72
		72
12.3	Analyse de la distance de capture selon la hauteur et le rayon de courbure	73
12.4	Discussion et comparaison avec la littérature	74
13	CONCLUSION :	74
 CHAPITRE 3 : ÉVALUATION DU RISQUE Foudre ET DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL LOGICIEL BASE SUR LA NORME IEC 62305-2		
		76
1	INTRODUCTION.....	77
2	GENERALITES SUR L'ÉVALUATION DU RISQUE	77
2.1	Définition et objectifs.....	77
2.2	Étapes du processus d'évaluation.....	78
2.3	Contexte Réglementaire en Algérie	78
2.3.1	Obligations et portée	78
2.3.2	Enjeux et sanctions.....	79
2.4	Applications générales à la foudre	79
2.4.1	État de l'art de l'évaluation des risques liés à la foudre	79
2.4.1.1	Méthodes traditionnelles d'évaluation du risque.....	79
2.4.1.2	Méthodes modernes et quantitatives d'évaluation du risque lié à la foudre	80
3	PRINCIPALES NORMES ENCADRANT L'ÉVALUATION DU RISQUE.....	80
3.1	Principes généraux des méthodes quantitatives	81
3.1.1	Avantages des méthodes quantitatives modernes.....	82
3.1.2	Limites et perspectives d'évolution	82
3.1.3	Limites des méthodes actuelles	83
3.1.3.1	Perspectives d'évolution	83
4	PRESENTATION DE LA NORME IEC 62035-2	84
4.1	Introduction générale à la norme	84
4.2	Explication des termes	86
4.2.1	Domages et pertes	86
4.2.1.1	Source de dommage.....	86
4.2.1.2	Types de dommages.....	86
4.2.1.3	Types de pertes	87
4.2.1.4	Types de Risques	87
4.2.2	Procédure de base.....	88
4.2.3	Calcul des risques R1, R2, R3 et R4 selon la norme IEC 62305-2.....	90
4.2.3.1	Composantes des risques dus aux impacts sur la structure :	92
4.2.3.2	Composantes des risques dus aux impacts à proximité de la structure :	92
4.2.3.3	Composantes des risques dus aux impacts sur un service connecté à la structure :	92
4.2.3.4	Composantes des risques dus à un impact à proximité d'un service connecté à la structure	93

5	OUTILS EXISTANTS POUR L'ÉVALUATION DU RISQUE LIÉ À LA Foudre	93
5.1	<i>Présentation des logiciels existants :</i>	93
5.1.1	ETAP – Risk Assessment.....	93
5.1.1.1	Fonctionnalités principales :	94
5.1.1.2	Avantages et limites du module Lightning Risk Assessment (LRA) du logiciel ETAP.....	94
5.1.2	Abb Furze StrikeRisk:	95
5.1.2.1	Présentation générale	95
5.1.2.2	Objectifs fonctionnels	95
5.1.2.3	Avantages et limites du module Lightning Risk Assessment du logiciel Strike Risk	96
5.1.3	Outils développés sous Excel	97
5.1.3.1	Objectifs et utilisation.....	97
6	DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL LOGICIEL BASE SUR LA NORME IEC 62305-2	98
6.1	<i>Choix technologiques</i>	99
6.2	<i>Principales fonctionnalités</i>	101
6.2.1	Environnement de dessin interactif	101
6.2.2	Saisie des paramètres environnementaux	102
6.2.3	Configuration des propriétés des structures.....	103
6.2.4	Gestion des lignes externes	103
6.2.5	Moteur de calcul normatif	104
6.2.6	Générateur de rapports	104
6.2.7	Module de recommandations	105
6.2.8	Interface utilisateur ergonomique.....	105
6.3	<i>Avantages de notre logiciel par rapport aux solutions existantes :</i>	106
7	CONCLUSION	106
	CHAPITRE 4 : VALIDATION DU LOGICIEL.....	108
1	INTRODUCTION.....	109
2	MÉTHODOLOGIE DE VALIDATION	109
3	ÉTUDES DES CAS	110
3.1	<i>Maison de campagne</i>	110
3.1.1	Contexte et objectifs.....	110
3.1.2	Référentiel Normatif	111
3.1.3	Vérification des Résultats par Logiciel	116
3.2	<i>Bâtiment de bureaux</i>	121
4	CONCLUSION	123
	CONCLUSION GÉNÉRALE	124
	REFERENCE	128
	Annex A	132

Table des figures

Figure 1.1 : Schéma montrant la distribution des charges électriques dans la masse d'un nuage orageux et la répartition du champ électrique au sol, au moment où va éclater la foudre [6].

Figure 1.2 : Amplification du champ électrique au sommet d'une aspérité [2], [4]

Figure 1.3 : Carte des lignes isokérauniques de l'Algérie [6].

Figure 1.4 : Différents types de décharges [8]

Figure 1.5 : Les différents types de coups de foudre selon K. Berger [1], [4]

Figure 1.6 : Mécanisme d'un coup de foudre et courant mesuré à la surface de la terre.

Figure 1.7 : Champ électrique au sol créé par un traceur descendant

Figure 1.8 : Champ électrique au sol en fonction de l'altitude de la tête du traceur pour différents coups de foudre

Figure 1.9 : Distance d'amorçage en fonction de l'amplitude du courant de foudre selon plusieurs auteurs [2].

Figure 1.10 : Modèle de la sphère fictive

Figure 1.11 : Zone et surface de capture d'une tige vertical

Figure 1.12 : Zone de capture d'une tige verticale

Figure 2.1 : Méthode de résolution EDP

Figure 2.2 : Un domaine d'étude discrétisé en Élément finis

Figure 2.3 : Maillage utilisé pour obtenir une solution bidimensionnelle d'une équation magnétostatique obtenue par éléments finis

Figure 2.4: évolution du streamer [19]

Figure 2.5 : conception d'un transformateur avec COMSOL

Figure 2.6 : Représentation schématique d'un nuage de charge se déchargeant vers la terre

Figure 2.7 : schéma simplifié d'électrode pointe plan

Figure 2.8 : Système étudié

Figure 2.9 : Modèle de la distribution du champ électrique autour du paratonnerre et du leader

Figure 2.10 : Maillage adaptatif autour de la zone leader-paratonnerre

Figure 2.11 : Distribution du champ électrique dans l'air sans paratonnerre (cartographie en contours)

Figure 2.12 : Variation du champ électrique en fonction de la position horizontale à la sur

Figure 2.13 : Distribution du champ électrique dans l'air avec paratonnerre (cartographie en contours)

Figure 2.14 : Répartition du potentiel électrique dans le domaine simulé

Figure 2.15 : Zoom sur la distribution du champ électrique à l'extrémité du paratonnerre

Figure 2.16 : Évolution du champ électrique en fonction de la coordonnée verticale y (en V/m)

Figure 2.17 : les différentes positions du leader durant sa descente

Figure 2.18 : Ajustement du modèle exponentiel à la distance de capture

Figure 2.19 : Comparaison des modèles de distance de capture

Figure 2.20 : Distribution du champ électrique autour de la tête du paratonnerre pour différents rayons de courbure

Figure 2.21 : Évolution du champ électrique maximal en fonction du rayon de courbure de la tête du paratonnerre

Figure 2.22 : Évolution de la distance de capture en fonction du rayon de courbure de la tête pour différentes hauteurs de tige

Figure 3.1 : Source de dommages, types de pertes selon le point d'impact

Figure 3.2 : Type de pertes et risques correspondants dus à différents types de dommages

Figure 3.3 : Procédure pour la décision du besoin de protection et pour le choix des mesures de protection [14].

Figure 3.4 : Vue de la zone du dessin dans le logiciel

Figure 3.5 : Vue du tableau où les données sont enregistrées

Figure 3.6 : Vue de la fenêtre Environnement dans le logiciel

Figure 3.7 : Vue de la fenêtre Structure dans le logiciel

Figure 3.8 : Tableau pour la saisie des paramètres complémentaires des lignes

Figure 3.9 : Affichage des résultats de calculs des risques

Figure 4.1 : Maison de campagne

Figure 4.2 : Vue de la saisie des paramètres dans la fenêtre générale

Figure 4.3 : Vue des résultats de la surface de collection et des paramètres liés à la structure et lignes

Figure 4.4 : Vue de la saisie des paramètres dans la fenêtre Environnement

Figure 4.5 : Vue de la saisie des paramètres restant des lignes

Figure 4.6 : Vue de la saisie des paramètres dans la fenêtre Structure

Figure 4.7 : Vue de la saisie des paramètres dans la fenêtre Zones

Figure 4.8 : Vue de la saisie des paramètres du câblage interne

Figure 4.9 : Affichage du résultat du risque calculé dans la fenêtre Protection

Figure 4.10 : Bâtiment de bureaux

Figure 4.11 : Valeur du risque calculé par le logiciel

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Distance d'amorçage en fonction du courant de crête

Tableau 2.1 : Propriété électriques des matériaux utilisés

Tableau 2.2 : Évolution du champ électrique maximal en fonction de la position verticale du leader descendant

Tableau 2.3 : Distance de capture selon la hauteur du paratonnerre

Tableau 3.1 : somme des composantes associées pour chaque risque

Tableau 4.1 : Tableau des données géométriques et environnementales

Tableau 4.2 : Tableau des paramètres des lignes électriques

Tableau 4.3 : Tableau des paramètres de la lignes Telecom

Tableau 4.4 : Tableau des paramètres de la zone 2

Tableau 4.5 : Tableau des résultats des surfaces de collections

Tableau 4.6 : Tableau des résultats d'estimation du nombre annuel d'événements dangereux

Introduction générale

La foudre est un phénomène atmosphérique naturel, complexe et potentiellement destructeur, qui constitue une menace sérieuse pour les installations industrielles, les infrastructures critiques ainsi que pour la sécurité des personnes. Chaque année, les décharges électriques dues à la foudre provoquent des pertes économiques considérables, des interruptions de service et parfois même des accidents mortels. Face à ces risques, la protection contre la foudre est devenue un enjeu majeur dans le domaine de l'ingénierie électrique et de la gestion des risques industriels.

L'un des moyens les plus efficaces pour assurer cette protection reste le recours aux systèmes de captation, notamment les paratonnerres. Leur conception, leur positionnement et leurs caractéristiques géométriques conditionnent fortement leur efficacité. Comprendre et modéliser l'influence de paramètres tels que la hauteur, la forme ou encore la disposition du paratonnerre sur la distance de capture est fondamentale pour optimiser la protection contre les impacts directs de la foudre.

Dans ce contexte, le présent travail de fin d'études s'inscrit dans une démarche d'analyse et de modélisation des phénomènes physiques liés à la foudre. Il vise dans un premier temps à réaliser une simulation bidimensionnelle (2D) des champs électriques et des trajectoires de la foudre, en présence et en absence de paratonnerres. Cette simulation permet de visualiser l'effet de différents paramètres physiques sur le comportement de la décharge électrique.

Une attention particulière est portée à l'étude de la relation entre la hauteur et la forme géométrique du paratonnerre et la distance de capture, paramètre déterminant dans la définition de la zone de protection. L'objectif est de proposer, sur la base des résultats obtenus, une formulation analytique ou empirique de cette relation, utilisable pour la conception de dispositifs de protection optimaux.

Enfin, dans une optique d'application concrète, ce travail aboutit à l'élaboration d'un logiciel d'aide à l'analyse du risque foudre, intégrant les résultats des simulations et permettant de modéliser différents scénarios de protection. Ce logiciel vise à assister les ingénieurs dans l'évaluation des risques selon les recommandations de la norme IEC 62305, et dans le dimensionnement rationnel des systèmes de protection.

Ce mémoire est structuré comme suit :

- Le premier chapitre est consacré à un état de l'art sur les phénomènes liés à la foudre et les méthodes de protection.
- Le second chapitre présente la modélisation physique et la méthodologie de simulation 2D employée. La troisième partie analyse les résultats obtenus et en déduit une relation fonctionnelle entre les paramètres étudiés.
- Enfin, le troisième et quatrième chapitre décrit le développement du logiciel d'analyse et en illustre les fonctionnalités par des cas d'application.

CHAPITRE 1 : Foudre et Protection Contre la Foudre

1 Historique

1.1 L'époque des croyances

Avant les explications scientifiques, la foudre était perçue comme un phénomène surnaturel. Les mythologies grecque et romaine y voyaient une manifestation de la colère des dieux, tandis que d'autres cultures, comme celle des Vikings, l'associaient à des divinités telles que Thor. En Afrique, certaines tribus considéraient la foudre comme un message des ancêtres. Ces croyances reflètent la fascination et la crainte qu'a toujours inspirées cette force de la nature [1].

1.2 Fondements scientifiques modernes

L'approche scientifique moderne émerge véritablement au siècle des Lumières. Les travaux de Dalibard et Franklin marquent un tournant épistémologique, remplaçant les explications théologiques par des modèles physiques. Leur analyse des correspondances scientifiques de l'époque révèle comment la controverse entre partisans des théories électriques et partisans des théories chimiques a stimulé les avancées dans ce domaine.

L'expérience de Franklin (1752) constitue le point de départ d'une série de recherches fondamentales. Notre revue critique des archives historiques permet de reconstituer avec précision le protocole expérimental original et ses variantes ultérieures. L'analyse spectroscopique moderne des décharges atmosphériques a confirmé et affiné ces observations pionnières. Le développement de la théorie électromagnétique au XIXe siècle, notamment grâce aux travaux de Maxwell et Hertz, a fourni le cadre théorique nécessaire à la compréhension complète des phénomènes de décharge atmosphérique. Les récentes avancées en physique des plasmas ont permis de modéliser avec une précision inédite les mécanismes de formation des traceurs et des décharges de retour [1].

2 Physique des phénomènes orageux

2.1 Phénomènes précurseurs

2.1.1 Nuages orageux

Les nuages orageux sont d'énormes masses nuageuses, généralement de type cumulonimbus, occupant une surface de plusieurs dizaines de kilomètres carrés, avec une

épaisseur de plusieurs kilomètres, et surplombant le sol à une altitude moyenne d'environ 2 km. Leur masse peut atteindre plusieurs centaines de milliers de tonnes d'eau [1].

Ils sont constitués de gouttelettes d'eau dans leur partie inférieure et de particules de glace dans leur partie supérieure [1].

Leur formation est due à l'apparition de courants ascendants atmosphériques dont la vitesse peut dépasser 20 m/s. Si les conditions de température et d'humidité sont favorables, l'air humide en ascension subit une détente accompagnée d'un refroidissement, ce qui entraîne sa condensation. Le nuage continue à s'élever jusqu'à atteindre un équilibre de densité avec l'air environnant, généralement entre 10 et 12 km d'altitude. À ce niveau, la stratosphère est atteinte, et les forts courants horizontaux qui y règnent balayent le sommet du nuage, lui donnant sa forme caractéristique en « enclume » [2].

On distingue deux types de structures orageuses : les orages de chaleur et les orages frontaux.

Les orages de chaleur, ou orages de convection, résultent de l'effet combiné de l'humidité et du réchauffement local du sol. Une bulle d'air chaud et humide se forme, pratiquement isolée thermiquement de l'air environnant. Cette bulle donne naissance à un nuage orageux dès que la condensation commence, à une certaine altitude. Il s'agit d'un orage de chaleur, souvent très localisé, dont la durée n'excède généralement pas une heure et demie. Ce type d'orage est fréquent dans les climats tropicaux.

Les orages frontaux, ou cycloniques, se produisent dans les régions tempérées. Ils résultent de la rencontre de masses d'air importantes, aux températures et humidités différentes. Cette rencontre provoque également des courants ascendants accompagnés de condensation. Les fronts orageux ainsi formés peuvent durer plusieurs jours et se propager sur des milliers de kilomètres. Ces orages sont généralement plus violents et plus mobiles que les orages de chaleur [2], [3].

2.1.2 L'électrification des nuages orageux

Par suite de phénomènes physiques encore inexplicables, on constate que des décharges électriques vont se former à l'intérieur du nuage [4] avec des charges négatives en bas du nuage et positives en haut du nuage. Il arrive également qu'à la base du nuage se trouvent des îlots de charges positives à l'endroit de pluies intenses [5]. La figure (1.1) schématise la structure électrique d'un cumulo-nimbus orageux [6].

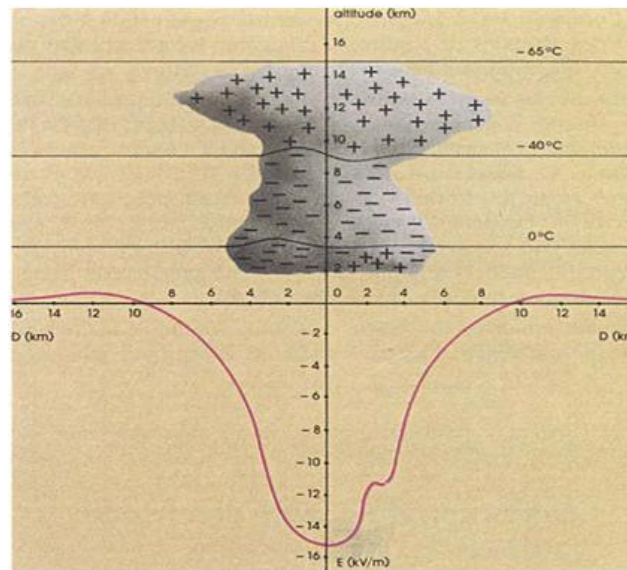


Figure 1.1 : Schéma montrant la distribution des charges électriques dans la masse d'un nuage orageux et la répartition du champ électrique au sol, au moment où va éclater la foudre [6]

2.1.3 Champ électrique au sol et effet couronne

La Terre se comporte comme un condensateur sphérique portant une charge électrique nette négative, tandis que l'atmosphère possède une charge positive de même magnitude [3]. Par temps clair, des mesures révèlent l'existence d'un champ électrique permanent, faible et orienté vers le sol, dont l'intensité typique varie entre 100 et 150 V/m [2].

À l'approche d'un nuage chargé, l'influence prédominante des charges négatives situées à sa base provoque une inversion du champ électrique au sol, suivie d'une augmentation significative de son intensité. Lorsque cette intensité atteint -10 à -15 kV/m, une décharge au sol devient imminente. Ainsi, cette inversion puis cette forte croissance du champ électrique constitue le premier signe annonciateur probable d'un coup de foudre [6].

Les valeurs de champ électrique au sol mentionnées précédemment supposent un terrain plat et horizontal. Cependant, toute irrégularité du sol peut considérablement amplifier le champ électrique local en concentrant les lignes de champ. Des calculs montrent qu'au sommet d'une demi-sphère posée sur une surface plane, le champ est trois fois plus intense que le champ moyen. Cette amplification s'accroît lorsque la demi-sphère se déforme en un demi-ellipsoïde pointu. Par exemple, pour un rapport de 30 entre le grand axe et le petit axe de l'ellipsoïde, le champ est multiplié par un facteur de 300. Sachant que le seuil d'ionisation de l'air est de l'ordre de 25 kV/cm, on comprend que, dans ces configurations spécifiques, un champ ambiant d'une dizaine de kilovolts par mètre suffit à générer un effet couronne au sommet de l'ellipsoïde [4].

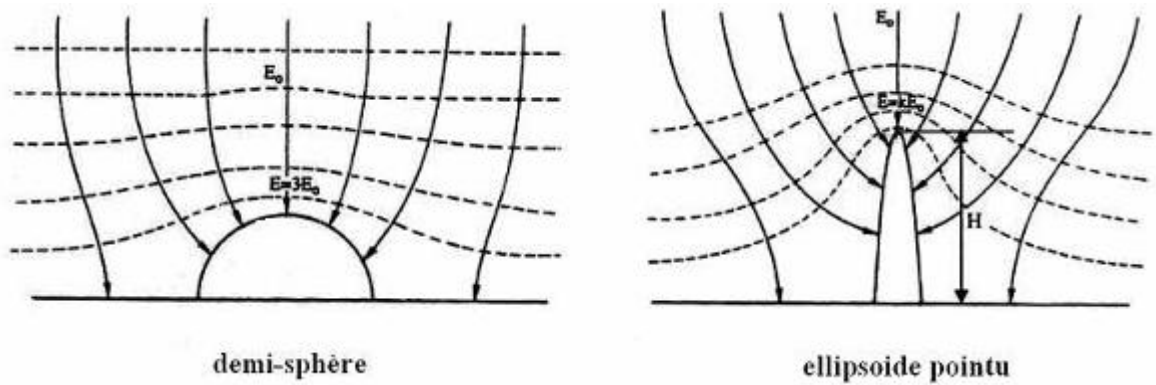


Figure 1.2 : Amplification du champ électrique au sommet d'une aspérité [2]

Ce phénomène a été observé depuis l'Antiquité sur les pointes de lances et autres objets effilés. Les marins le connaissaient également sous le nom de feu de Saint-Elme lorsqu'il se manifestait à l'extrémité des mâts de leurs navires.

Les alpinistes sont également familiers avec cet effet, dont l'apparition signale un danger immédiat, les incitant à s'éloigner rapidement des sommets.

2.2 Distribution statistique des orages

2.2.1 Niveau kéraunique et densité des coups de foudre au sol

Il est d'usage universel de caractériser la sévérité orageuse d'une région par son niveau kéraunique.

Par définition, le niveau kéraunique représente le nombre de jours par an où le tonnerre a été entendu. La simplicité de cette définition a facilité l'établissement de statistiques, basées sur des informations fournies par le passé par des observateurs locaux et aujourd'hui par la Météorologie nationale, qui rendent de précieux services [4].

En Algérie, le niveau kéraunique moyen est de 20. Il varie de 1 (Beni Abbas) à 44 (Dar El Beida), comme illustré à la figure 1.3 [6].

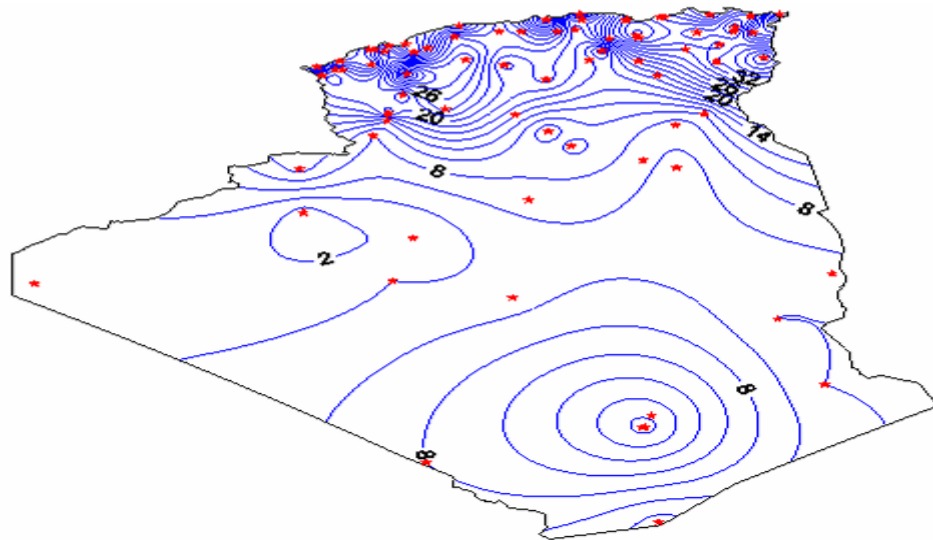


Figure 1.3 : Carte des lignes isokérauniques de l'Algérie [6]

Cependant, il est évident que la notion de niveau kéraunique est trop rudimentaire pour fournir une mesure véritablement utilisable de la sévérité orageuse. En effet, elle ne donne aucune indication ni sur la fréquence des impacts de foudre, ni sur l'existence de zones localisées particulièrement exposées à la foudre.

Aujourd'hui, des systèmes de détection d'orages plus précis peuvent fournir des informations plus pertinentes. La densité des coups de foudre au sol, exprimée en nombre d'impacts par km^2 et par an, est ainsi déterminée avec une plus grande précision. De plus, des informations sur l'amplitude de ces coups de foudre sont également disponibles. Bien que ces systèmes soient en constante évolution (matériel, nombre de capteurs, durée totale de fonctionnement...), les valeurs qu'ils fournissent sont nettement plus précises que toute carte de niveau kéraunique par région météorologique.

2.3 Facteurs locaux influant sur la foudre

a. Facteurs topologiques

Des zones préférentielles d'impact de foudre peuvent exister en raison de conditions topologiques favorisant la formation de nuages orageux et des mouvements d'air qui facilitent l'existence de couloirs orageux.

Ainsi, la foudre ne frappe pas systématiquement les points les plus élevés. En montagne, les versants des vallées sont souvent plus touchés par la foudre que les sommets [4].

b. Facteurs géologiques

Le point d'impact précis d'un coup de foudre ne semble se déterminer que dans la partie la plus basse de sa trajectoire. La partie supérieure, au-delà d'une centaine de mètres au-dessus

du sol, se développe de manière totalement indépendante de la structure géométrique ou géologique du sol.

Par conséquent, seuls des facteurs très locaux peuvent influencer la décision du point d'impact. La présence de saillies telles que les arbres, les bâtiments et les cheminées est bien connue comme l'un de ces facteurs.

Les observations concernant les impacts sur les lignes de haute tension, ainsi que les résultats de travaux de laboratoire, ont montré que la conductivité des sols pourrait être un autre facteur important.

Ces résultats suggèrent que les failles humides, les nappes d'eau et les terrains marécageux pourraient présenter une certaine attractivité préférentielle pour la foudre [4].

c. Concentration ionique de l'air (conductivité de l'air)

La concentration en ions de l'air (ou sa conductivité, qui en est la conséquence) a parfois été évoquée pour expliquer la formation de zones d'orages fréquents. Cependant, même aujourd'hui, il existe très peu de données expérimentales issues d'observations sur le terrain.

Les études de laboratoire sur les mécanismes de décharge dans l'air n'ont pas mis en évidence, jusqu'à présent, un effet significatif de cette conductivité, par exemple en favorisant le trajet de la décharge. Les théories actuelles montrent d'ailleurs que le taux d'ions dans l'air devrait être considérablement plus élevé que ce que l'on mesure dans les conditions naturelles pour qu'un effet notable puisse se manifester [1].

3 Phénomène de foudre

L'étude de l'électricité atmosphérique permanente conduit à représenter la Terre comme l'une des armatures d'un immense condensateur, l'autre armature étant constituée par l'ionosphère. Ce condensateur est normalement chargé, et il existe une différence de potentiel de 300 kV [1], [2], [4].

Par beau temps, le sol est chargé négativement, et le champ électrique au sol est d'environ 100 à 150 V/m [1], [2].

À ce champ de 100 V/m [1, 2, 3] correspond une densité de charge superficielle moyenne à la surface du sol de [2] :

$$\sigma = \epsilon_0 \times E \quad (1.1)$$

avec :

σ : Densité de charge superficielle en Coulombs par mètre carré (C/m²)

E: Champ électrique en Volts par mètre (V/m)

ϵ_0 : Permittivité diélectrique du vide $\approx 8.854 \text{ pF/m}$

L'air étant légèrement conducteur, des charges positives sont continuellement apportées à la Terre. La densité de courant est donnée par la loi d'Ohm locale [2] :

$$j = \sigma \times E \quad (1.2)$$

Avec :

j : Densité de courant en Ampères par mètre carré (A/m^2)

σ : Conductivité de l'air ($3 \times 10^{-14} \text{ S/m}$)

E : Champ électrique en Volts par mètre (V/m)

On en déduit que la densité superficielle de la charge à la surface de la Terre est d'environ $8.85 \times 10^{-10} \text{ C/m}^2$, et que la densité de courant qui circule est de $3 \times 10^{-12} \text{ A/m}^2$.

La surface de la Terre étant d'environ $5 \times 10^{14} \text{ m}^2$, un courant permanent de 1500 A circule, et le condensateur devrait donc se décharger en 300 s [4], [2]. Or, le champ électrique terrestre est permanent, avec seulement quelques légères variations observables au cours de la journée.

Un bilan global permet de comprendre ce paradoxe apparent. Un nuage orageux est chargé positivement dans sa partie supérieure et négativement dans sa partie inférieure. Les échanges électriques sous le nuage s'effectuent principalement selon deux mécanismes [7] :

- Environ 90% des éclairs transfèrent une charge négative vers la Terre.
- Les précipitations (pluie) contribuent également aux échanges de charges.

Le bilan global est de l'ordre de 1 A par orage. Le nombre d'orages simultanément présents autour du globe est estimé entre 1500 et 2000, ce qui correspond au courant de beau temps calculé précédemment. Le schéma électrique global peut être représenté de la manière suivante [2] :

Les charges positives générées par un orage sont transférées vers l'électro sphère et se redistribuent pour maintenir le courant de beau temps.

Les charges négatives sont apportées au niveau du sol par les éclairs et les phénomènes orageux.

Ainsi, la foudre joue un rôle essentiel dans le maintien de l'équilibre électrique de notre planète.

3.1 Foudre, éclair et tonnerre

L'éclair est la manifestation visuelle d'un orage électrique. Il se produit lorsqu'un courant électrique intense chauffe les gaz de l'air à des températures suffisamment élevées pour les rendre incandescents. Ce chauffage extrême est causé par le passage du courant électrique.

Les éclairs peuvent se produire à l'intérieur d'un même nuage (intra-nuageux : figure 1.4.b), entre deux nuages distincts (inter-nuageux : figure 1.4.a), ou entre un nuage et le sol (figure 1.4.c) [8]. Ce dernier type est communément appelé coup de foudre. Ce que l'on désigne souvent comme un "éclair de chaleur" est en réalité un éclair intra-nuageux se produisant à une distance telle que le tonnerre n'est pas audible. Fréquemment, les premiers coups de foudre surviennent après les premières décharges intra-nuageuses.

Les coups de foudre prennent généralement naissance dans la base négative du nuage. Des charges négatives initiales (appelées traceurs) se propagent alors du nuage vers le sol, suivant les chemins de moindre résistance, ce qui peut engendrer de nombreux zigzags. À mesure que le traceur négatif s'approche du sol, le champ électrique local s'intensifie, induisant la formation d'un traceur positif ascendant. La rencontre de ces deux traceurs établit un canal conducteur d'environ 2 à 3 cm de diamètre entre le sol et le nuage. C'est ce que l'on nomme l'arc de retour, ou le coup de foudre principal. La durée totale de ce processus est typiquement de 20 à 50 millisecondes [5]. Après le premier arc de retour, d'autres décharges peuvent emprunter le même canal jusqu'à ce que le nuage ait libéré l'essentiel de sa charge électrique accumulée.

L'air environnant le canal de l'arc de retour est porté à des températures extrêmement élevées, pouvant atteindre 20 000 à 30 000 Kelvin. Cette élévation rapide de température provoque une expansion explosive de l'air, générant l'onde sonore que nous percevons comme le tonnerre. Concernant le son associé, les éclairs intra-nuageux produisent généralement un grondement sourd, tandis que les coups de foudre sont souvent accompagnés d'un craquement sec [7].

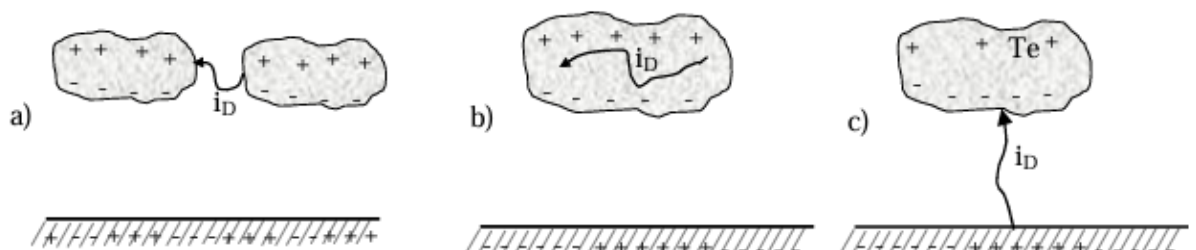


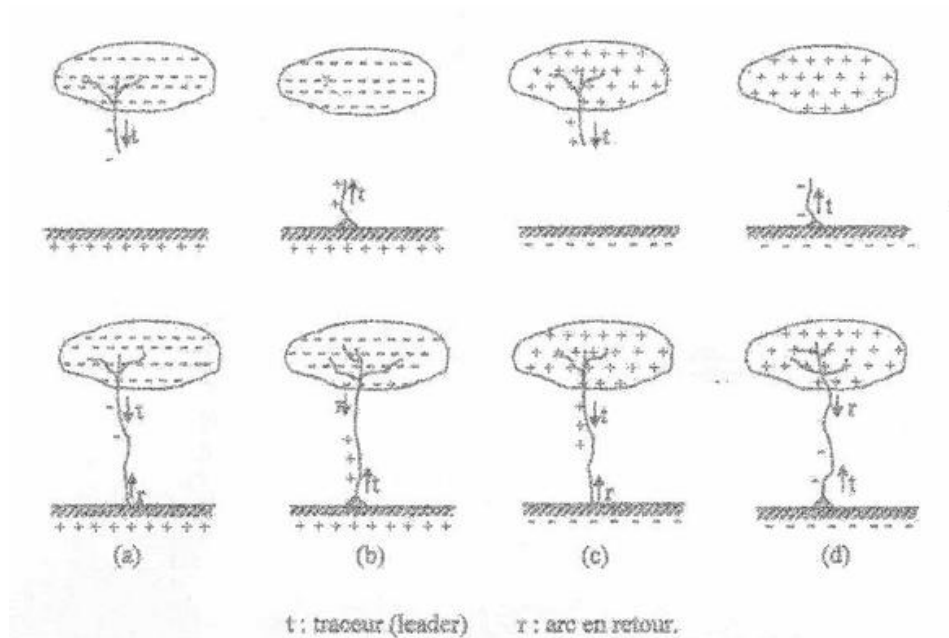
Figure 1.4 : Différents types de décharges [8]

3.2 Classification des coups de foudre

Bien que les décharges inter et intra-nuageuses représentent plus de la moitié des décharges de foudre, les décharges nuage-sol ont été les plus étudiées, principalement pour des raisons pratiques (elles sont une cause de blessures et de décès, d'incendies de forêts et de perturbations des systèmes électriques, de télécommunication et de transport). De plus, leurs caractéristiques optiques et électriques sont plus aisément mesurables [9].

L'ensemble des coups de foudre est classé en quatre catégories distinctes, en fonction :

- Sens de développement du traceur principal (ascendant ou descendant).
- Polarité du traceur principal (positive ou négative), qui est identique à celle de la charge du nuage.



(a)- Coup de foudre de type descendant négatif

(b)- Coup de foudre de type ascendant positif

(c)- Coup de foudre de type descendant positif

(d)-Coup de foudre de type ascendant négatif

Figure 1.5 : Différents types de coups de foudre selon K. Berger [4]

En terrain plat, le coup de foudre le plus fréquent est de type descendant. Le développement d'un coup ascendant requiert la présence d'une proéminence significative, telle qu'une tour élevée ; c'est également pourquoi les coups ascendants sont plus fréquents en montagne.

Dans nos régions à climat tempéré, environ 90 % des coups de foudre sont de polarité négative [2], [1].

3.2.1 Coup de foudre ascendant

Les effluves d'effet couronne qui apparaissent au sommet des aspérités se développent plus loin et avec une intensité plus importante.

À partir d'une certaine intensité d'effluves, le phénomène se modifie brusquement et peut se développer davantage pour atteindre le nuage : c'est le coup de foudre ascendant. La dimension de la prééminence influe sur ce processus.

Des mesures optiques ont montré que la vitesse de progression des traceurs ascendants positifs était comprise entre 2 et 6×10^4 m/s [10]. Au cours de cette progression, le traceur se ramifie plusieurs fois, et l'on observe la formation d'arborescences avec des ramifications orientées vers le haut.

Ces coups sont fréquemment observés à partir de tours élevées dont la hauteur dépasse 300 m, de gratte-ciel et de montagnes, surtout lorsqu'une tour ou un pylône sont placés à leurs sommets.

3.2.2 Coup de foudre descendant

Un coup de foudre descendant est toujours précédé d'une première décharge, appelée traceur, faiblement lumineuse, qui se propage du nuage vers le sol par bonds de quelques dizaines de mètres (c'est le traceur par bonds ou stepped leader).

Entre chaque bond, des pauses de l'ordre de 40 à 100 μ s sont observées, ce qui donne une vitesse de progression moyenne de 0,15 à 1 m/ μ s [1]. Au fur et à mesure de sa progression, le traceur se ramifie et la luminosité du canal ionisé augmente.

Dès que la pointe du traceur s'approche du sol, des pré décharges ascendantes se développent généralement à partir d'un arbre ou d'une autre saillie, en direction du traceur descendant. Ces pré décharges n'existaient auparavant que sous forme d'émissions d'effet couronne localisées.

Lorsque l'une de ces pré décharges et le traceur par bonds se rejoignent, un court-circuit s'établit entre le nuage et le sol, permettant le passage d'un courant de forte intensité. Ce courant est constitué des charges superficielles du sol qui, en remontant le canal ionisé formé par le traceur, neutralisent ses charges. On observe alors un trait fortement lumineux qui progresse du sol vers le nuage à une vitesse estimée à 10^8 m/s [7] ; C'est l'arc de retour .

Après l'interruption du courant de la première décharge, il peut s'écouler jusqu'à 100 ms avant l'apparition d'une seconde décharge [11]. Cette seconde décharge débute par la formation d'un traceur qui, contrairement au traceur par bonds, progresse de manière continue (c'est le traceur continu ou dart leader) avec une vitesse de propagation de l'ordre de 10^6 m/s [4].

La figure 1.6) illustre le mécanisme d'un coup de foudre descendant [2]

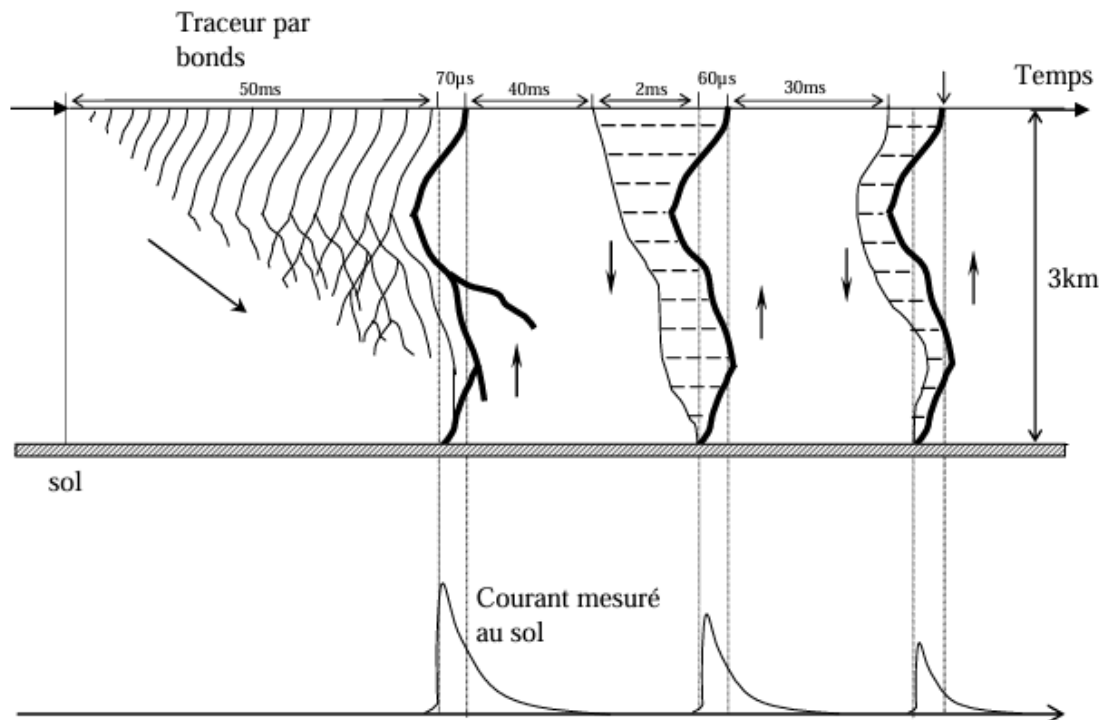


Figure 1.6 : Mécanisme d'un coup de foudre et courant mesuré à la surface de la terre [2]

3.3 Les effets de la foudre

Ce sont ceux d'un courant impulsionnel de forte intensité se propageant d'abord dans un milieu gazeux (l'atmosphère), puis dans un milieu solide plus ou moins conducteur (le sol):

- Effets visuels (éclairs) :** dus au mécanisme de Townsend.
- Effets acoustiques :** dus à la propagation d'une onde de choc (élévation de pression) dont l'origine est le canal de décharge ; la perception de cet effet est limitée à une dizaine de kilomètres.
- Effets thermiques :** dégagements de chaleur par effet Joule dans le canal ionisé.
- Effets électrodynamiques :** ce sont les forces mécaniques dont sont l'objet les conducteurs placés dans le champ magnétique, créé par cette circulation de courant intense. Ils peuvent avoir pour résultats des déformations.
- Effets électrochimiques :** relativement mineurs, ces effets se traduisent par une décomposition électrolytique.
- Effets d'induction :** dans un champ électromagnétique variable, tout conducteur est le siège de courants induits.

- g) **Effets sur un être vivant (humain ou animal)** : le passage d'un courant d'une certaine intensité, pendant une courte durée suffit à provoquer des risques d'électrocution par arrêt cardiaque ou arrêt respiratoire. À cela s'ajoutent les dangers de brûlures.

4 PROTECTION CONTRE LA FOUDRE :

Se protéger contre la foudre ne se limite pas à l'installation de paratonnerres. En effet, ces dispositifs assurent principalement la protection des structures et des personnes contre les impacts directs de la foudre.

Cependant, une part importante du courant de foudre capté par un paratonnerre est dissipée dans la terre de l'installation. Cette dissipation, ainsi que la proximité d'une installation frappée, peuvent être à l'origine de surtensions transitoires, aussi appelées effets indirects, qui peuvent s'avérer très critiques pour les équipements électriques et électroniques sensibles.

4.1 Protection contre les effets indirects de la foudre :

Pour les réseaux haute tension, il y a deux types de para tenseurs :

4.1.1 Éclateurs :

Les éclateurs représentent la forme la plus simple, la plus ancienne, la plus robuste et la moins coûteuse de protection contre les surtensions.

Ils sont généralement constitués de deux électrodes disposées dans l'air : l'une est reliée à l'équipement à protéger, l'autre à la terre. La distance entre les deux électrodes est ajustable et permet de définir la tension d'amorçage [12].

Les électrodes, de formes diverses, peuvent être constituées [13] :

- De deux tiges simples placées face à face (cas typique des éclateurs installés autrefois sur les traversées de transformateurs haute tension),
- De deux tiges recourbées appelées *cornes*, positionnées sur les chaînes d'isolateurs à l'entrée des postes MT (moyenne tension) ou HT (haute tension), souvent appelés éclateurs anti-oiseaux,
- Ou encore de dispositifs plus sophistiqués, intégrant des anneaux permettant d'éliminer les effluves liés à l'effet de couronne.

Le principal avantage des éclateurs réside dans leur faible coût. Ils sont également très faciles à régler, ce qui permet d'adapter leurs caractéristiques en fonction de l'application souhaitée.

Cependant, ces avantages s'accompagnent de plusieurs inconvénients majeurs :

- Les éclateurs ne se désamorcent pas automatiquement, ce qui entraîne une mise hors tension du réseau à chaque déclenchement.
- Leur fonctionnement génère une onde de tension très abrupte, susceptible d'endommager les équipements bobinés situés à proximité.
- Le niveau d'amorçage est très variable, dépendant de nombreux facteurs comme les conditions atmosphériques, l'état d'ionisation de l'air, et surtout la vitesse de montée de la surtension appliquée.

4.1.2 Parafoudres

Les parafoudres permettent de pallier la majorité des inconvénients liés au fonctionnement des éclateurs. Ce sont des dispositifs conçus pour limiter les surtensions transitoires et écouler les courants de foudre.

a. Parafoudres à carbure de silicium

Ces parafoudres sont composés d'un éclateur associé à des varistances au carbure de silicium (SiC). Il s'agit de la première génération de parafoudres, aujourd'hui beaucoup moins utilisée [14]. La présence d'éclateurs en série avec les varistances posait un problème en termes de coordination de l'isolement. En effet, les fluctuations de la tension d'amorçage, notamment en fonction de la pente du front de surtension, obligeaient à prévoir des marges importantes entre le niveau de protection des parafoudres et le niveau de tenue diélectrique des équipements à protéger.

b. Parafoudres à oxyde de zinc

Les parafoudres à oxyde de zinc (ZnO) sont constitués uniquement de varistances à base de ZnO. Ils offrent une conception plus simple, une compacité accrue, ainsi que de meilleures performances techniques par rapport aux générations précédentes. Leur capacité d'absorption d'énergie est élevée, ce qui permet leur utilisation sur tous types de réseaux, allant de l'électronique jusqu'au transport d'énergie à très haute tension. Enfin, les avancées technologiques en matière d'isolation externe, combinées aux possibilités offertes par les varistances ZnO, ont conduit, dès le début des années 1980, au développement d'une nouvelle génération de parafoudres :

les parafoudres à oxyde de zinc avec enveloppe en matériau synthétique, conçus pour mieux exploiter les avantages de cette technologie[14].

4.2 Protection contre l'atteinte directe de la foudre

La protection contre la foudre, ou "effets directs", vise à :

- **Capturer** la foudre en créant un point d'impact privilégié à l'aide d'un dispositif naturel ou spécifique (paratonnerre, cage maillée ou fil tendu).
- **Canaliser** le courant de foudre en facilitant son passage au moyen d'une "descente de terre".
- **Écouler** le courant de foudre à la terre en assurant sa dispersion dans le sol grâce à une "prise de terre paratonnerre".

a. Paratonnerre

Une installation de paratonnerre comprend :

- Un paratonnerre et son mât.
- Un ou deux conducteurs de descente.
- Une barrette de coupure ou joint de contrôle par descente permettant la vérification de la résistance de la prise de terre du paratonnerre.
- Un tube de protection protégeant les deux derniers mètres de chaque descente.
- Une liaison équipotentielle déconnectable entre chaque prise de terre et le circuit de terre général de la structure.

Le paratonnerre existe sous différentes formes, telles que la tige de Franklin (tige simple PTS) ou la tige à dispositifs d'amorçage (PDA) [15].

- **Paratonnerres à tige simple**

Inventés par Benjamin Franklin en 1752, les paratonnerres à tige simple sont constitués d'une simple pointe effilée. Ils sont disponibles en différents matériaux conducteurs (cuivre, acier, etc.). Leur longueur standard de 2,4 m peut être augmentée par l'ajout d'éléments rallonges en acier traité ou en acier inoxydable [15]. Ces ensembles ne nécessitent pas d'haubanage et peuvent atteindre des hauteurs de 7 à 8 mètres. L'extrémité des paratonnerres "Franklin" comporte une pointe pleine en bronze marin ou en inox.

Ce type de protection est particulièrement recommandé pour les stations hertziennes et les mâts d'antenne lorsque le volume à protéger est faible.

- **Paratonnerres à dispositif d'amorçage**

Le paratonnerre à dispositif d'amorçage est équipé d'un système générateur d'impulsions à haute tension ou d'étincelles au voisinage de la pointe, ce qui peut augmenter le rayon de protection. Ce dispositif repose sur la théorie de « l'avance à l'amorçage » [15].

- b. Cages maillées ou cage de Faraday**

Une cage maillée est constituée de plusieurs pointes couvrant l'ensemble de la toiture et les arêtes du bâtiment à protéger. Les pointes sont reliées entre elles par des filins conducteurs interconnectés et reliés à la terre.

Le courant de foudre est ainsi divisé par le nombre de descentes, et la faible valeur du courant circulant dans les mailles engendre peu de perturbations par induction [15].

Ce principe est utilisé pour les bâtiments sensibles (matériel informatique).

- c. Fils tendus**

Ce système est composé d'un ou plusieurs fils conducteurs tendus au-dessus des installations à protéger. Ces conducteurs doivent être reliés à la terre à chacune de leurs extrémités. La zone de protection est déterminée par l'application du modèle électro géométrique.

Les fils tendus sont utilisés pour protéger les dépôts de munitions et, de manière générale, lorsqu'il n'est pas possible d'utiliser la structure du bâtiment comme support des conducteurs qui écoulent le courant de foudre à la terre [15].

5 PROTECTION D'UN EQUIPEMENT PAR UN PARATONNERRE

L'étude des phénomènes physiques mis en jeu par la foudre a permis d'élaborer une méthode de détermination de la zone de protection d'une tige verticale, ou de fils tendus horizontalement. Elle permet également de définir la taille maximale des mailles d'une cage. Cette méthode est fondée sur l'analyse du mécanisme d'impact de la foudre et est mise en œuvre au moyen d'un modèle mathématique appelé modèle électro géométrique. Bien que ce modèle ne soit pas parfait – bien des incertitudes subsistent – il constitue néanmoins l'approche la plus cohérente pratiquement de la protection directe contre la foudre qui ait été élaborée à ce jour.

5.1 Mécanisme d'impact

Le traceur par bonds est un canal ionisé comportant un excédent de charges négatives s'il est issu de la partie négative d'un nuage, positives s'il est issu de la partie positive d'un nuage. Il est admis, en outre, qu'il existe une forte concentration de charges de même signe à sa pointe. Lorsque le traceur se rapproche du sol, le champ électrique dans une zone située à la verticale de cette concentration de charges s'accroît considérablement pour atteindre, à un certain stade, des valeurs de l'ordre de 100 à 300 kV/m [4].

À ce moment, dans le cas d'un traceur négatif, des décharges ascendantes positives se développent en direction du traceur, alors qu'elles n'existaient auparavant que sous forme d'effluves d'effet couronne localisé. L'une des décharges, la plus proche ou celle qui a progressé le plus rapidement, entre en contact avec le traceur. Le point probable qui sera frappé par la foudre, appelé point d'impact de la foudre, sera déterminé au moment où le traceur descendant atteint dans sa progression la distance à partir de laquelle le champ critique au sol est atteint [16].

Il arrive que deux ou plusieurs décharges ascendantes rejoignent le traceur : on assiste alors à un coup de foudre ramifié ; il en est de même lorsque plusieurs ramifications du traceur descendant donnent lieu chacune à une décharge ascendante.

5.2 Modèle électro géométrique

Ce modèle, élaboré principalement par Armstrong, Golde, Darveniza et Whitehead [2], a été vérifié au cours d'une importante campagne d'investigation sur les lignes de transport de l'énergie électrique à haute tension.

Le modèle électro géométrique nous permet de déterminer les points d'impacts les plus probables de la foudre et de dimensionner des dispositifs susceptibles de la capter et d'éviter qu'elle ne frappe directement ce que l'on souhaite protéger des impacts directs. Mais ce modèle reste imparfait. L'une de ces imperfections réside dans le fait qu'il suppose que l'expression de la distance d'amorçage reste applicable quelle que soit la forme des structures au sol.

Le modèle électro géométrique considère que la terre est homogène, plane et parfaitement conductrice. Cependant, la terre présente généralement des caractéristiques électro géologiques qui varient d'un site à l'autre, ce qui a amené le Laboratoire de Haute Tension de l'ENP à faire des recherches sur l'influence des caractéristiques électriques du sol sur la zone de capture d'un paratonnerre [17] à [18].

5.2.1 Champ généré au sol par le traceur descendant

Le modèle électro géométrique est basé sur la propagation du traceur descendant négatif et sur le champ qu'il induit au niveau du sol. Le calcul du champ en absence de toute structure nécessite la connaissance de :

- La charge injectée dans le traceur négatif.
- La distribution de la charge choisie le long du traceur descendant négatif.

En ce qui concerne la charge injectée dans le traceur descendant, il est admis que la première décharge de coup de foudre descendant correspond à la quasi-neutralisation de la charge du traceur. Ceci conduit souvent à la corrélation suivante [10] :

$$I = 15 Q \quad (1.3)$$

Avec : I en kilo Ampères et Q en Coulomb

Pour la distribution des charges le long du traceur, les auteurs des modèles ont pris plusieurs hypothèses. Une de ces hypothèses suppose que 10% de la charge du traceur est concentré à sa pointe et que les 90% restants sont répartis uniformément sur sa longueur.

Si l'on désigne par « l » la longueur instantanée du traceur, par Q la charge totale et par q sa charge linéique, on aura à tout instant :

$$Q = 0.1 \times Q + l \times q \Rightarrow 0.9 \times Q = l \times q \quad (1.4)$$

La figure (1.7) donne une représentation simplifiée d'un traceur descendant avec :

- L : hauteur de formation du traceur.
- D : distance instantanée entre la tête du traceur et le sol.

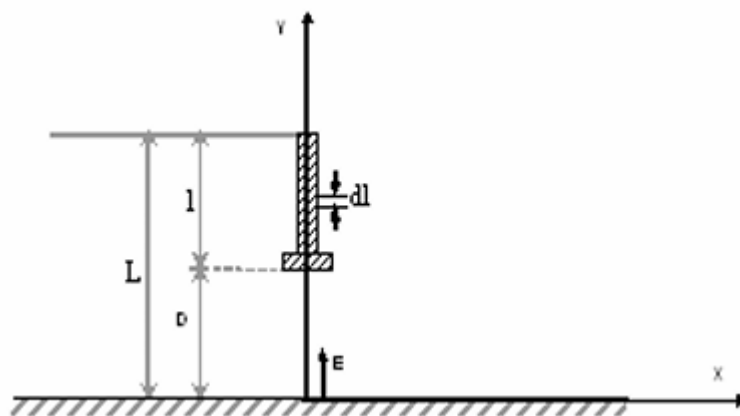


Figure1.7 : Champ électrique au sol créé par un traceur descendant

À la base de ces données, le champ au sol à la verticale du traceur descendant est donné par [10]

$$E = \frac{q}{(2\pi\epsilon_0)} \left[\int \left(\frac{dl}{l^2} \right) + \frac{(L-D)}{9} \right] \quad (1.5)$$

$$E = \left[\frac{q}{(2\pi\epsilon_0)L} \right] \cdot (1 - K) \cdot \left[\frac{(9K+1)}{(9K^2)} \right] \quad (1.6)$$

Avec : $K = L/2$

À l'instant de l'impact (approximativement $l=L$), la charge linéique du traceur devient :

$$q = \frac{(0.9 \times Q)}{L} \quad (1.7)$$

On déduit que :

$$q = \frac{(0.9 \times I)}{(15 \times L)} \quad (1.8)$$

Avec : q en Coulomb/m, I en kilo Ampères et L en mètres.

Si l'on remplace la charge linéique q donnée par l'expression trouvée précédemment, et que l'on prend le cas d'un nuage situé à 2 km au-dessus du sol ($L=2000$ m), on obtient la relation $E = f(I, D)$ représentée sous forme de courbes de la figure (1.8).

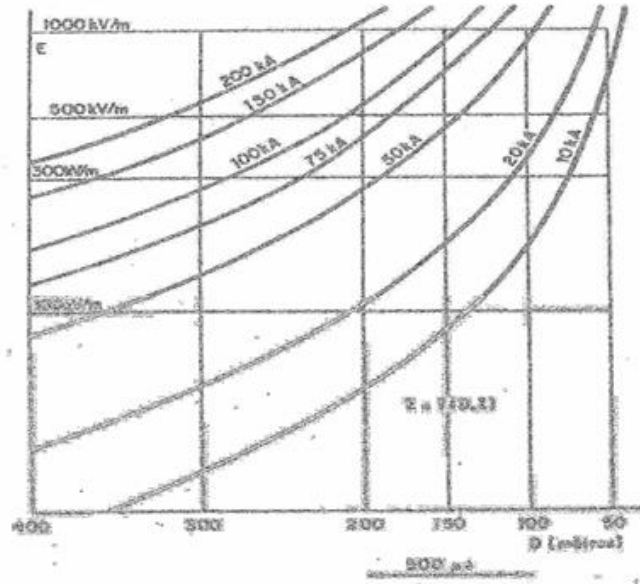


Figure 1.8 : Champ électrique au sol en fonction de l'altitude de la tête du traceur pour différents coups de foudre [11]

5.2.2 Distance d'amorçage

La distance d'amorçage (notée D) est la distance minimale entre l'extrémité du traceur descendant et un objet situé au sol à partir de laquelle le champ électrique local devient suffisant pour initier un arc ascendant vers le traceur [2]

De nombreux auteurs ont proposé diverses méthodes d'estimation numérique de la distance d'amorçage. Whitehead, en accord avec d'autres chercheurs, a proposé la relation suivante :

$$D = 10 \times I^{2/3} \quad (1.9)$$

Avec : D en mètres et I en kilo Ampères.

La figure (1.9) résume les estimations publiées par divers auteurs [2].

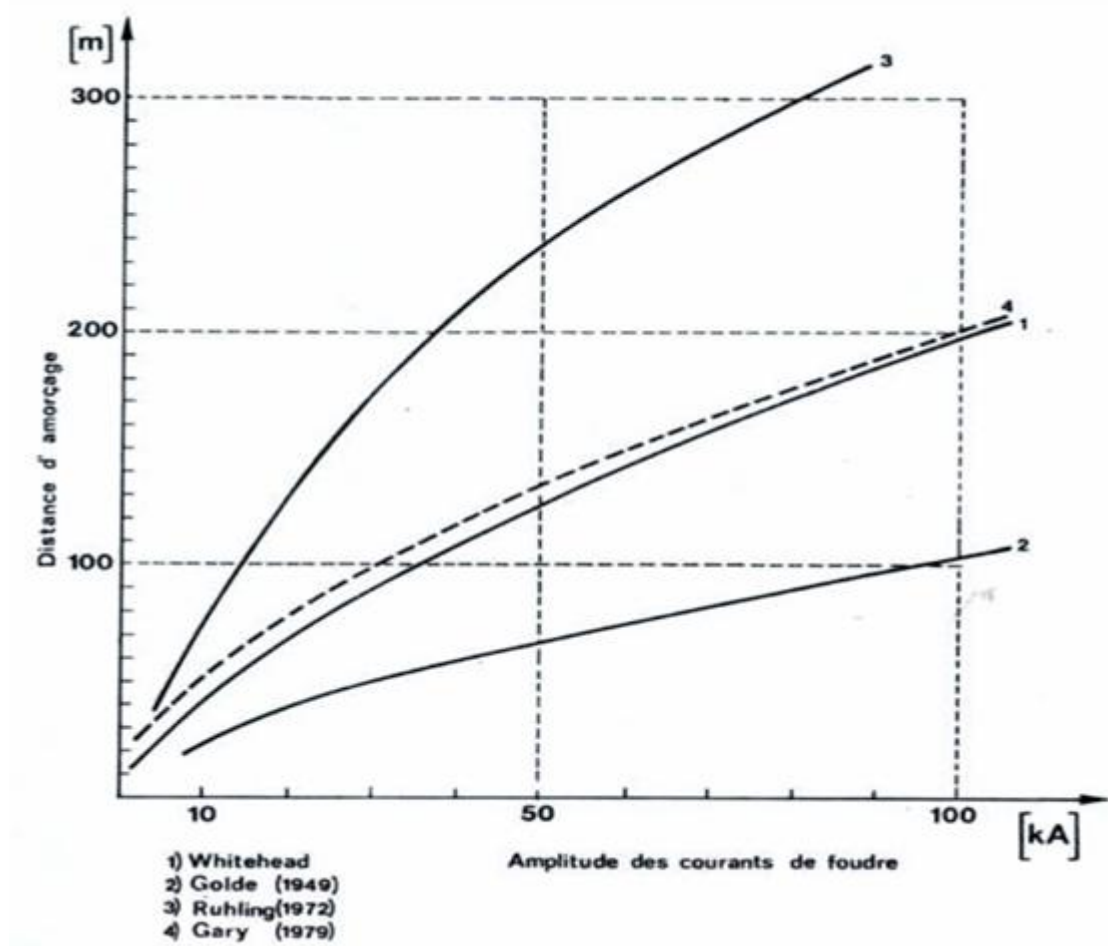


Figure 1.9 : Distance d'amorçage en fonction de l'amplitude du courant de foudre selon plusieurs auteurs [2]

En pratique, la valeur du champ au sol qui provoque la jonction entre le traceur descendant et la décharge ascendante est de l'ordre de 500 kV/m [4], [10]. On peut, à partir des

courbes de la figure (1.8), déduire les distances d'amorçage pour les différentes valeurs de crête du courant. Ces valeurs sont portées dans le tableau (1.1) avec les distances données par la formule de Whitehead.

Tableau 1.1 : Distance d'amorçage en fonction du courant de crête

I (kA)	10	20	50	75	100	150
$D = 10 I^{2/3}$	46	74	136	178	215	282
D (m)	50	75	135	170	205	273
E=500kV/m						

Ce tableau (1.1) montre que la distance d'amorçage déduite de la formule de Whitehead et la distance obtenue par les courbes $f(I, D)$ pour un champ électrique de 500 kV/m sont pratiquement égales ; cette distance croît avec la valeur de crête du courant de foudre.

5.2.3 Méthode de la sphère fictive

Selon le modèle électro géométrique, le point d'impact de la foudre se détermine par l'objet au sol qui se trouvera, le premier, à la distance d'amorçage D du traceur descendant, même si cet objet est le sol plat lui-même.

Tout se passe donc comme si la pointe du traceur était entourée d'une sphère fictive, de rayon D, centrée sur elle, et comme si cette sphère accompagnait rapidement la pointe au cours de la trajectoire a priori aléatoire du traceur. À l'approche du sol, le premier objet qui touche la sphère détermine le point d'impact du coup de foudre.

D'où le procédé d'imaginer que la sphère fictive de rayon D roule sur le sol, dans toutes les directions, sans jamais perdre le contact soit avec le sol, soit avec un objet proéminent [4].

Si, au cours de ce mouvement, la sphère entre en contact avec les dispositifs de protection (tige verticale, fil horizontal, nappe de fils, cage de Faraday) sans jamais pouvoir toucher l'un des objets à protéger, alors la protection de ceux-ci est assurée.

Si, au cours de ce mouvement, la sphère entre en contact avec l'un des objets à protéger, le dispositif de protection devra être remanié jusqu'à ce qu'aucun de ces contacts ne puisse plus se produire.

Dans la zone bleue de la figure (1.10), l'impact pour des distances d'amorçage supérieures ou égales à D ne pourra jamais se produire. Cette zone représente la zone de protection de la tige verticale.

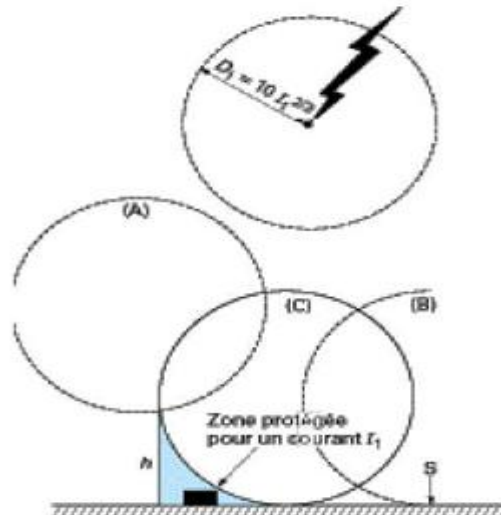


Figure 1.10 : Modèle de la sphère fictive [1]

5.2.4 Zone et surface de capture d'une tige verticale

En considérant l'ensemble des sphères qui touchent la tige et le sol : le lieu des centres de ces sphères délimite la zone d'attraction de cette tige (figure. 1.11).

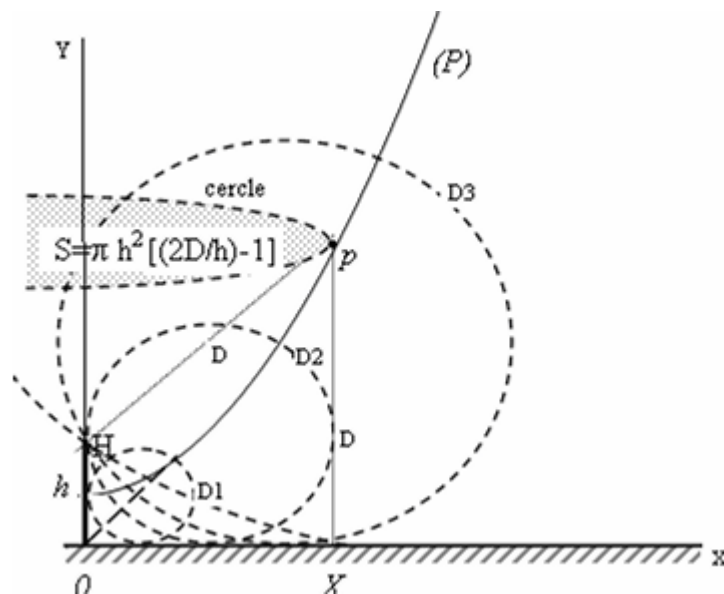


Figure 1.11 : Zone et surface de capture d'une tige vertical [1]

Nous constatons sans peine que tant que

- $D < h$, le lieu est une droite issue du pied de la tige et inclinée à 45° .
- $D \geq h$, ce lieu devient une parabole (P).

Nous considérons une tige verticale de hauteur h , placée sur un terrain parfaitement plat.

Dans un système de coordonnées xOy , l'axe Ox représentera le sol, et $OH = h$ placé sur Oy , représentera la tige verticale.

La zone de capture d'un paratonnerre est constituée par l'ensemble des points équidistants de la terre et du paratonnerre [28]. Dans un plan perpendiculaire à la terre qui contient l'axe du paratonnerre, la limite est une parabole qui a comme équation :

$$h^2 - 2hy + x^2 = 0 \quad (1.11)$$

Selon la figure (1.12), tout traceur qui se présente dans la zone (I) à droite de la parabole ne sera jamais capté par la pointe H et touchera le sol. Si au contraire un traceur se présente dans la zone (II) comprise entre (oy) et (P), il sera capté par la pointe dès que la distance HT (T étant la tête du traceur) devient inférieure ou égale à la distance d'amorçage du coup de foudre considéré.

Si le traceur, arrivant par la zone (II) peut traverser la parabole (P) en T1 par exemple, sans qu'il soit capté, cela signifie que $HT1 > D$.

La condition de limite de capture de la pointe (H) est donc que, tout au long de la parabole, la relation $HT1 \leq D$ soit satisfaite [18].

Or, $HT1 = y$, ordonnée du point T1, par définition même de la parabole.

On remplace « y » par « D » dans l'expression (1.9), on aura :

$$h^2 - 2hD + x^2 = 0 \quad (1.12)$$

Le rayon de capture de la tige est :

$$x \leq h \sqrt{\frac{2D}{h} - 1} \quad (1.13)$$

Pour $D < h$, le rayon protégé au sol sera :

$$X = D$$

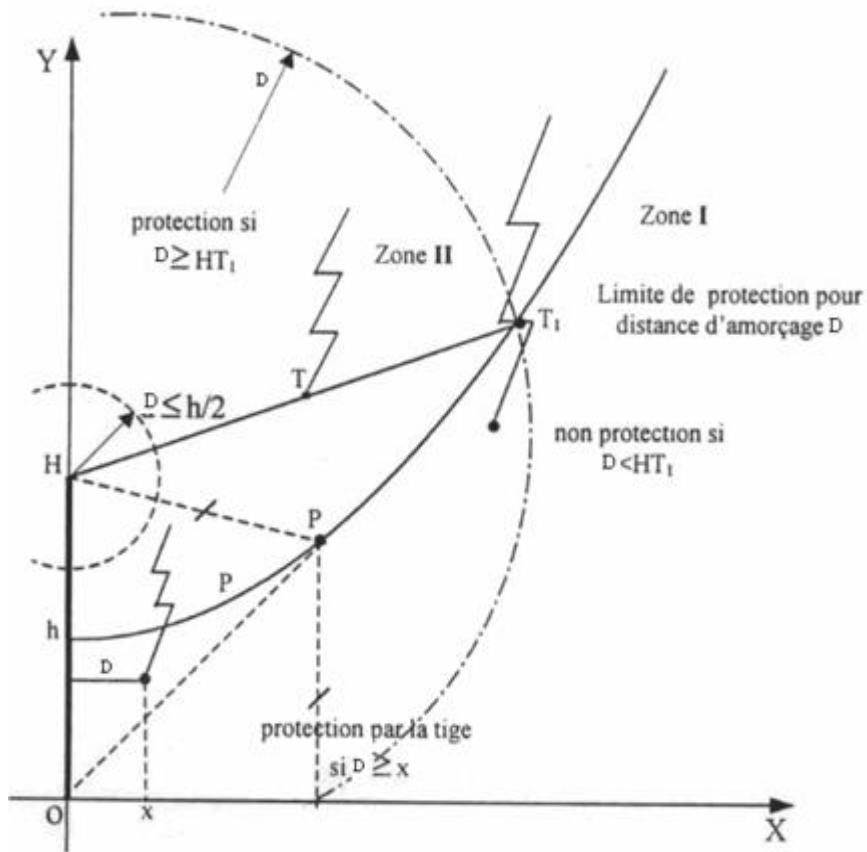


Figure 1.12 : Zone de capture d'une tige verticale [1]

Le volume de capture de la tige est constitué par un cône prolongé par un parabolôïde de révolution. À tout point P de la parabole correspond un cercle inscrit dans le parabolôïde (figure 1.11). Ce cercle définit la surface de capture de la tige relative à une distance d'amarçage D et un courant de foudre d'intensité I donnés. Cette surface s'exprime par [1] :

$$S = \pi h^2 \left(\frac{2D}{h} - 1 \right) \quad (1.12)$$

6 Conclusion :

Ce chapitre a posé les bases nécessaires à la compréhension du phénomène de la foudre, depuis ses origines physiques jusqu'à ses impacts au sol. Nous avons analysé les mécanismes de formation des orages, les types de décharges, ainsi que les paramètres influençant les impacts, tels que la topographie, la conductivité du sol et les champs électriques.

Les notions de niveau kéraunique, de densité de foudroiement et d'effet couronne ont permis d'évaluer la sévérité orageuse d'une région. Ces éléments théoriques constituent un

socle essentiel pour aborder les chapitres suivants, qui traiteront de la modélisation du champ électrique et des solutions de protection adaptées aux environnements exposés.

CHAPITRE 2

Simulation des paramètres électriques d'une foudre

1 Introduction

1.1 Contexte : la foudre et les paratonnerres

La foudre est un phénomène naturel électrique résultant de la séparation de charges dans les nuages d'orage. Lorsqu'un champ électrique entre nuage et sol atteint une valeur critique une décharge éclaire sous forme de leader et de streamers, transportant des courants pouvant atteindre plusieurs dizaines de kilo ampères. Ces courants intenses peuvent endommager les structures, provoquer des incendies et menacer la sécurité des personnes.

Pour se prémunir contre ces effets, on installe des paratonnerres, dispositifs métalliques destinés à attirer la foudre et à la conduire en toute sécurité vers la terre. Différents modèles de paratonnerres existent et reposent sur des principes variés : certains cherchent à favoriser l'émission de charges depuis une pointe très affûtée, d'autres privilégient la création de leaders ascendants préventifs. Le choix du modèle, de la hauteur et de la géométrie de la pointe influe directement sur la zone protégée [15].

1.2 Objectifs de la simulation

L'objectif de ce chapitre est de formuler et d'appliquer une méthodologie de simulation numérique, basée sur la méthode des éléments finis, afin de quantifier l'influence d'un paratonnerre sur la distribution du champ électrique :

- **Sans paratonnerre** : caractériser la répartition du champ électrique entre nuage et sol, en l'absence de dispositif de protection.
- **Avec paratonnerre** : analyser comment l'installation d'une pointe métallique modifie cette répartition et réduit le risque d'amorçage non contrôlé.
- **Paramètres géométriques** : étudier l'effet de la hauteur du paratonnerre et de la forme de son extrémité (rayon de courbure, angle de pointe) sur la zone protégée.
- **Champ dans le sol** : évaluer la répartition du potentiel à sur le sol.
- **Relation d'amorçage** établir une relation entre la distance d'amorçage et les paramètres géométrique.

Ce travail permettra de déterminer, par comparaison aux modèles théoriques existants, les configurations optimales garantissant une protection maximale contre la foudre.

2 Fondement théorique

2.1 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.

2.2 Les équations de Maxwell

Nous disposons alors du système d'équations suivant :

Équation de Maxwell-Faraday :

$$\overrightarrow{rot}(\vec{E}) = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.1)$$

Équation de Maxwell-Ampère (avec le terme de déplacement) :

$$\overrightarrow{rot}(\vec{H}) = \vec{J} - \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.2)$$

Équation de conservation du flux magnétique :

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

Équation de Maxwell-Gauss :

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

Les équations (2.1) et (2.2) expriment le couplage électromagnétique. Les équations (2.3) et (2.4) sont des équations de conservation.

Pour décrire complètement les phénomènes électromagnétiques dans un milieu, on ajoute aux équations de Maxwell les lois de comportement des milieux et la loi d'Ohm :

2.3 Constitution des milieux :

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

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

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

Avec :

E : Champ électrique [V/m]

H : Champ magnétique [A/m]

B : Induction magnétique [T]

D : Induction électrique (ou déplacement électrique) [C/m²]

J : Densité de courant électrique [A/m²]

ρ : Densité volumique de charges [C/m³]

μ : Perméabilité magnétique [H/m]

ϵ : Permittivité diélectrique [F/m]

σ : Conductivité électrique [S/m]

2.4 Définitions des constantes dans les milieux :

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad \epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$$

μ_0 : Perméabilité du vide [H/m]

μ_r : Perméabilité relative du milieu

ϵ_0 : Permittivité du vide [F/m]

ϵ_r : Permittivité relative du milieu

2.5 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 :

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\vec{E}) = 0 \quad (2.8)$$

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

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

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

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

Le modèle se ramène alors à l'équation :

$$\text{Div}(\epsilon \overrightarrow{\text{grad}}(V)) + \rho = 0 \quad (2.12)$$

3 Résolution des équations électromagnétiques par la méthode des éléments finis

Les phénomènes électromagnétiques, comme ceux qui surviennent lors d'événements naturels tels que la foudre, sont modélisés à l'aide d'équations aux dérivées partielles (EDP),

lesquelles décrivent la variation de grandeurs physiques dans des configurations géométriques complexes.

3.1 Équations aux dérivées partielles

Les équations aux dérivées partielles sont des équations mathématiques impliquant des dérivées partielles d'une fonction inconnue de plusieurs variables indépendantes. Elles sont utilisées pour modéliser des phénomènes qui évoluent à la fois dans l'espace et dans le temps. Ces équations sont fondamentales dans de nombreux domaines scientifiques et techniques, notamment en physique, en ingénierie et en biologie, pour la modélisation des systèmes complexes.

3.2 Classification selon le type d'équation

Les équations aux dérivées partielles linéaires et homogènes du second ordre peuvent être classées en trois grandes catégories :

Équations elliptiques : Ces équations modélisent des phénomènes stationnaires ou réguliers, dans lesquels les solutions sont stables et ne présentent pas de comportement de propagation. En électrostatique, on utilise par exemple l'équation de Poisson :

$$\nabla^2 \varphi = -\rho / \varepsilon \quad (2.13)$$

Où φ est le potentiel électrique, ρ la densité de charge électrique, et ε la permittivité du milieu.

Équations hyperboliques : Ces équations décrivent des phénomènes de propagation d'ondes, où l'information se déplace à une vitesse finie. L'exemple typique est l'équation des ondes :

$$\partial^2 u / \partial t^2 = c^2 \nabla^2 u \quad (2.14)$$

Avec u la fonction représentant l'onde et c la vitesse de propagation.

Équations paraboliques : Elles modélisent des phénomènes de diffusion, dans lesquels les variations de la solution s'atténuent progressivement au cours du temps. Un exemple courant est l'équation de la chaleur :

$$\partial u / \partial t = \alpha \partial^2 u / \partial x^2 \quad (2.15)$$

Où $u(x, t)$ représente la température en fonction de la position x et du temps t , et α est une constante de diffusivité thermique. Cette équation traduit la façon dont la chaleur se propage dans un matériau, avec un lissage des gradients de température au fil du temps dû à la diffusion thermique.

3.3 Méthodes de résolution

La résolution des équations aux dérivées partielles (EDP) peut se faire par des méthodes analytiques ou approchées. Cependant, pour des géométries complexes, on privilégie les méthodes numériques, qui reposent sur la discrétisation du domaine étudié.

3.3.1 Méthodes analytiques

Les méthodes analytiques visent à obtenir une solution exacte de l'EDP. Elles sont généralement limitées à des cas simples, en raison de la complexité des équations impliquées. Parmi les approches les plus courantes, on retrouve :

- La méthode de séparation des variables,
- La méthode des caractéristiques,
- La transformation de Laplace.

3.3.2 Méthodes numériques

Lorsque les solutions analytiques sont inaccessibles ou peu pratiques, on fait appel aux méthodes numériques. Celles-ci comme montré sur la figure 2.1 consistent à discrétiser l'espace (et parfois le temps) afin de résoudre l'EDP sur un ensemble fini de points. Les méthodes numériques les plus utilisées incluent :

- Les différences finies,
- Les éléments finis,
- Les volumes finis,
- La méthode des éléments finis de frontière.

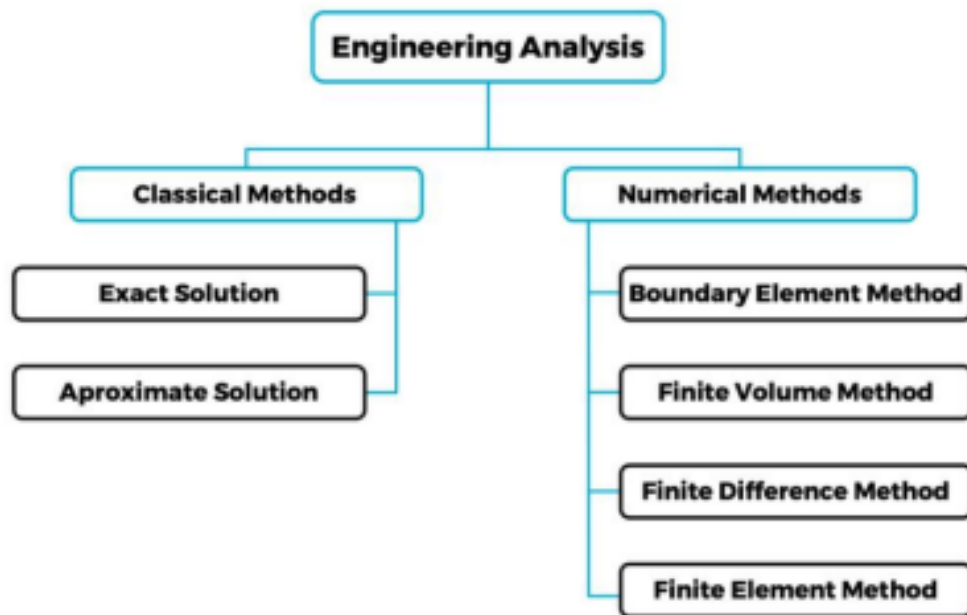


Figure 2.1 : Méthode de résolution EDP

4 Méthode des éléments finis (MEF) et principe fondamental

La méthode des éléments finis (MEF) est une approche numérique puissante, particulièrement adaptée aux domaines présentant des géométries complexes ou des matériaux non linéaires. Son principe repose sur la décomposition du domaine d'étude en sous-domaines appelés éléments finis.

Dans le cas des structures bidimensionnelles (2D), ces éléments sont généralement des triangles (Figure 2.2), tandis que pour les structures tridimensionnelles (3D), on utilise des tétraèdres ou des prismes (Figure 2.3). Sur chaque élément, la grandeur inconnue (par exemple, un champ de température, de déplacement ou de potentiel) est approximée à l'aide de fonctions d'interpolation simples, définies à partir des valeurs aux sommets (ou nœuds) de l'élément.

L'assemblage de l'ensemble des éléments permet de construire un système global d'équations, en veillant à assurer la continuité entre les éléments et le respect des conditions aux limites. La résolution de ce système donne une approximation de la solution sur tout le domaine étudié.

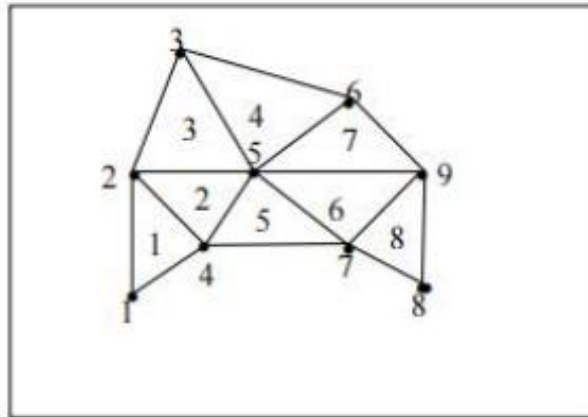


Figure 2.2 : Un domaine d'étude discrétisé en Éléments finis

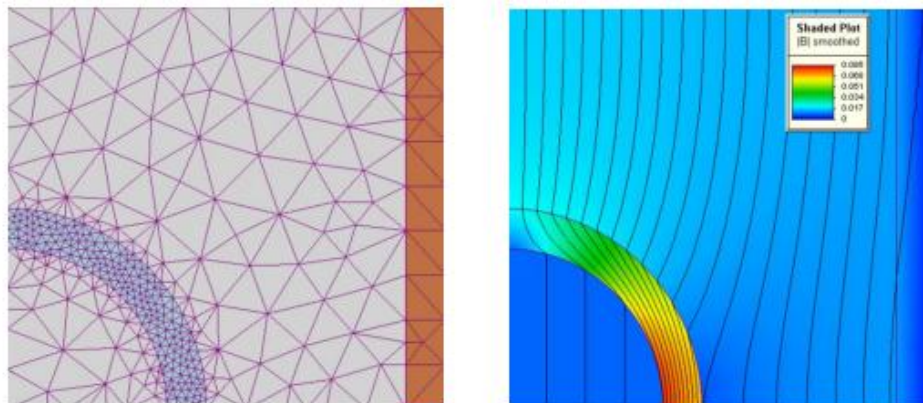


Figure 2.3 : Maillage utilisé pour obtenir une solution bidimensionnelle d'une équation magnétostatique obtenue par éléments finis

4.1 Principe de base de la méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis (MEF) est une technique numérique puissante utilisée pour résoudre des équations aux dérivées partielles modélisant divers phénomènes physiques. Son principe repose sur la discrétisation d'un domaine continu en sous-domaines plus simples appelés éléments finis, permettant une approximation progressive de la solution.

4.2 Principes fondamentaux et application pratique :

➤ Définition du domaine d'étude

La première étape consiste à définir le domaine dans lequel le problème physique est posé. Ce domaine peut prendre des formes géométriques simples : rectangles, cercles ou polygones en deux dimensions, et cubes, sphères ou polyèdres en trois dimensions.

➤ **Formulation du problème**

Une fois le domaine défini, le phénomène physique à étudier est formulé sous la forme d'une équation aux dérivées partielles (EDP) représentant le comportement du système.

➤ **Spécification des conditions aux limites**

Pour que la solution du problème soit bien déterminée, il est nécessaire d'imposer des conditions aux frontières du domaine :

➤ **Conditions de Neumann** : elles fixent la dérivée normale de la solution sur la frontière. Cela correspond, par exemple, à un flux de chaleur traversant une paroi.

➤ **Conditions de Dirichlet** : elles imposent directement la valeur de la solution le long de la frontière, comme une température imposée sur une surface.

La combinaison de ces deux types de conditions permet de modéliser avec précision une large gamme de phénomènes physiques.

➤ **Maillage du domaine**

Le domaine est ensuite discrétisé en un ensemble d'éléments finis : triangles en 2D, tétraèdres ou hexaèdres en 3D. Chaque élément est défini par des nœuds, c'est-à-dire des points où la solution sera calculée.

➤ **Approximation de la solution**

La solution de l'EDP est approchée à l'aide de fonctions d'interpolation définies localement sur chaque élément. Ces fonctions permettent d'assurer la continuité et la différentiabilité de la solution approximée sur l'ensemble du domaine.

➤ **Assemblage du système d'équations**

À partir des approximations locales, un système global d'équations linéaires est construit en sommant les contributions de tous les éléments. Ce système, souvent de grande dimension, est ensuite résolu numériquement.

➤ **Résolution numérique**

Une fois le maillage établi, l'équation formulée et les conditions aux limites appliquées, la résolution du système permet d'obtenir une approximation numérique de la solution du problème. Des méthodes numériques telles que la méthode de Gauss ou celle de Jacobi sont généralement utilisées pour cette étape.

5 Théorie des streamers dans les décharges de gaz

Pour comprendre l'amorçage d'une décharge dans l'air entre nuage et sol, il est essentiel d'étudier le mécanisme de formation et de propagation des *streamers*, ces filaments ionisés qui précèdent le claquage complet du milieu.

5.1 Définition et rôle des streamers

Un streamer est un canal conducteur étroit, riche en électrons et ions, qui se forme lorsqu'un champ électrique local dépasse un seuil critique E_{crit} . Ce filament assure la transition entre une simple avalanche d'électrons et une décharge partielles, préparant le passage d'un courant plus intense.

5.1.1 Mécanisme de formation

Le développement d'un streamer se décompose en trois phases(Figure2.4), illustrées schématiquement ci-dessous [19] :

1. Phase d'avalanche primaire

- Un électron libre, accéléré par le champ, excite ou ionise une molécule neutre ; l'ionisation libère de nouveaux électrons.
- Les électrons migrent vers l'anode, les ions positifs restent en arrière, formant un nuage chargé.
- Les molécules excitées réémettent des photons, initiant la photo-ionisation du gaz environnant.

2. Phase de création de charges secondaires

- Les photons émis par la tête d'avalanche ionisent des molécules d'oxygène distantes, générant des électrons secondaires.
- La charge d'espace positive augmente localement le champ électrique, favorisant de nouvelles avalanches (secondaires) autour de la tête.
- Ces avalanches secondaires déposent une charge négative en avant du streamer, permettant son avancée.

3. Phase de propagation

- Les avalanches secondaires successives font progresser le streamer, agrandissant son canal conducteur.
- Le claquage complet du gaz survient lorsque le streamer relie électriquement les deux électrodes (nuage et sol).

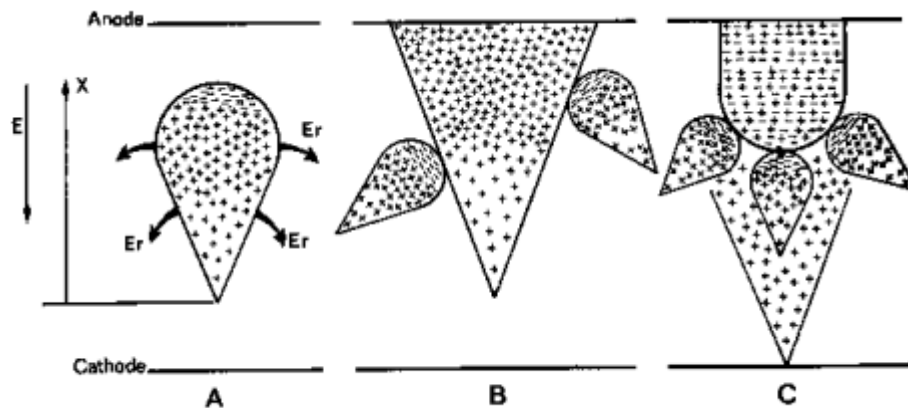


Figure 2.4 : évolution du streamer [19]

5.1.2 Seuil critique et conditions de formation

- Le champ initial doit dépasser un seuil critique E_{crit} , condition nécessaire à la formation d'un streamer.
- En **champ uniforme**, si $E > E_{crit}$ sur toute la distance inter-électrodes, la décharge traverse en une seule étape.
- En **champ non uniforme**, seules les zones où si $E > E_{crit}$ génèrent des streamers ; la localisation de ces régions dépend de la géométrie (pointes, arêtes) et des conditions aux limites.

5.1.3 Influence du champ sur la géométrie des streamers

- **Direction et tortuosités** : la nature aléatoire de la photo-ionisation induit des extensions latérales, donnant aux streamers un aspect sinueux.
- **Rayon de tête** : plus la pointe est pointue (petit rayon de courbure), plus le champ local est élevé, facilitant l'amorçage.
- **Longueur** : la longueur des streamers dépend fortement de l'intensité et de l'homogénéité du champ électrique. Un champ intense favorise leur allongement, tandis qu'un champ non uniforme peut provoquer leur ramification

6 Approche par modèles physiques et empiriques de la distance d'amorçage

La détermination de la capacité d'un système de protection à intercepter un impact de foudre repose en grande partie sur la modélisation du phénomène d'amorçage du traceur

ascendant. Cet amorçage se produit lorsque le champ électrique à la tête du paratonnerre atteint un seuil critique, conduisant à l'émission d'un leader montant susceptible d'entrer en contact avec le leader descendant.

Plusieurs modèles ont été développés pour estimer la distance critique d'amorçage, soit la distance maximale entre le leader descendant et le paratonnerre à partir de laquelle une connexion peut s'établir. Cette distance conditionne la zone de protection offerte par le paratonnerre. Les modèles les plus couramment utilisés dans ce cadre sont ceux de Eriksson, Rizk, Petrov, et Lalande, chacun reposant sur des hypothèses et des formulations spécifiques.

6.1 Modèle d'Eriksson

Le modèle proposé par Eriksson (1980) est de nature empirique et repose sur des observations de terrain. Il propose une relation entre la distance d'amorçage R , la hauteur du paratonnerre h , et le courant de foudre I , exprimée comme suit [20] :

$$R = 0.84 \cdot h^{0.6} \cdot I^{0.74} \quad (2.16)$$

Ce modèle est simple à appliquer et largement utilisé dans les normes de protection contre la foudre, notamment pour des installations à haute tension. Cependant, il reste limité à des conditions spécifiques et ne permet pas une analyse locale du champ électrique.

6.2 Modèle de Rizk

Le modèle de Rizk repose sur une approche semi-physique, intégrant la physique de la décharge dans l'air. Il considère qu'un traceur ascendant s'initie lorsque le champ électrique à la tête du paratonnerre atteint un seuil critique, généralement compris entre 400 kV/ et 600 kV/, en fonction de la forme et du rayon de courbure de la pointe [21].

Ce modèle prend en compte :

- le champ électrique ambiant,
- la géométrie du paratonnerre (notamment le rayon de courbure de la tête),
- la tension de seuil nécessaire à l'amorçage.

Le modèle de Rizk est bien adapté aux simulations numériques par éléments finis, car il permet de déterminer localement les zones où le champ est suffisant pour initier un leader montant.

6.3 Modèle de Petrov et Waters

Ce modèle repose sur une approche énergétique du processus d'amorçage. Il considère que le leader ascendant ne peut se développer que si l'énergie disponible dans le champ électrique ambiant est suffisante pour ioniser le canal d'air entre le paratonnerre et le leader descendant [22].

Il permet d'introduire dans l'analyse des paramètres supplémentaires, tels que :

- la densité de l'air,
- les conditions atmosphériques,
- la dynamique temporelle de la montée du champ.

Bien que plus complexe, ce modèle permet d'approcher des situations plus réalistes, notamment dans des environnements fortement perturbés.

6.4 Modèle de Lalande

Développé dans le cadre des études françaises de protection contre la foudre, le modèle de Lalande repose sur une modélisation électrostatique détaillée couplée à des critères empiriques. Il introduit un critère local basé sur le gradient du champ électrique au voisinage de la pointe du paratonnerre [23].

Ce modèle est particulièrement pertinent dans le contexte de la simulation numérique par éléments finis, car il permet une évaluation fine des zones d'initiation possibles en fonction de la géométrie du paratonnerre et de son environnement.

7 Modélisation numérique

7.1 Logiciel utilisé : COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics est un environnement de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis, largement utilisé pour modéliser et résoudre des problèmes physiques complexes. Ce logiciel se distingue par sa polyvalence, en permettant la modélisation de phénomènes couplés impliquant plusieurs domaines de la physique (électromagnétisme, mécanique, thermique, acoustique, chimie, etc.). La figure 2.5 montre un aperçu de l'environnement sous Comsol.

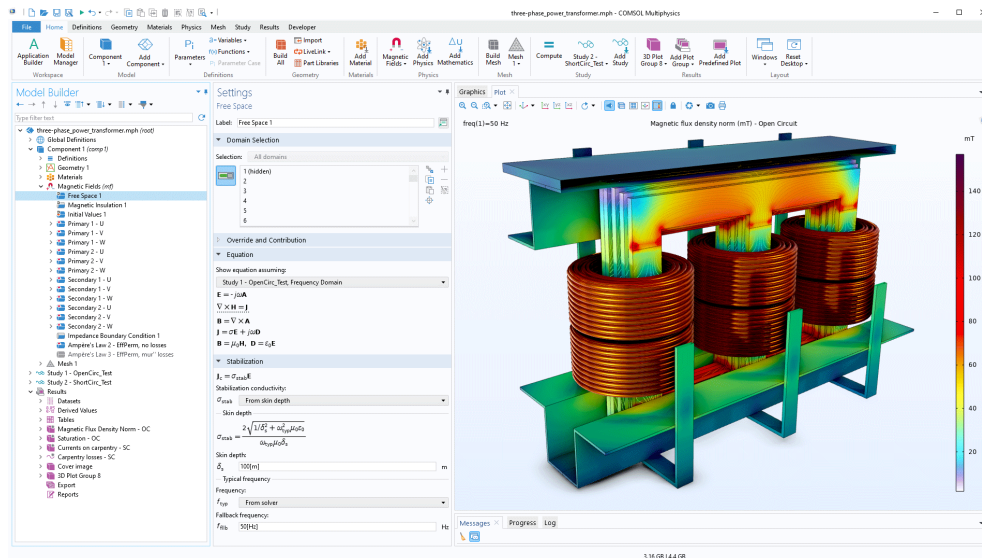


Figure 2.5 : conception d'un transformateur avec COMSOL

L'un des principaux atouts de COMSOL est sa capacité à intégrer différentes physiques dans un même modèle, facilitant ainsi l'analyse de systèmes multiphysiques réalistes. Par exemple, dans le cadre de la modélisation de la foudre, il est possible de coupler les équations électromagnétiques avec des équations thermiques pour étudier les effets thermiques d'un impact de foudre sur une structure métallique.

7.1.1 Avantages clés de COMSOL :

- Interface graphique intuitive avec un environnement de modélisation guidée par étapes (géométrie, maillage, physique, solveur, post-traitement).
- Bibliothèques de modules spécialisées, telles que les modules AC/DC, RF, Heat Transfer, Structural Mechanics, permettant de répondre aux besoins spécifiques des ingénieurs.
- Possibilité de couplages multiphysiques automatisés, sans avoir à coder manuellement les interactions entre différentes équations.
- Solveurs robustes pour la résolution de systèmes linéaires et non linéaires, stationnaires ou transitoires.
- Visualisation avancée des résultats, avec des outils de post-traitement puissants pour interpréter les champs physiques (champ électrique, température, contraintes mécaniques, etc.).

Grâce à ces fonctionnalités, COMSOL s'impose comme un outil incontournable dans les domaines de la recherche et de l'ingénierie pour simuler avec précision le comportement de systèmes physiques complexes.

8 Modélisation physique du coup de foudre : système de décharge pointe-plan

La foudre est un phénomène électromagnétique naturel, caractérisé par une décharge brutale de charges électriques accumulées dans l'atmosphère. Elle se manifeste le plus souvent entre des zones de polarité opposée à l'intérieur d'un nuage orageux (éclairs intra-nuageux), entre deux nuages, ou encore entre un nuage et le sol (foudre nuage-sol comme montré sur la figure 2.6). Ce dernier cas est celui qui présente le plus grand danger pour les structures, les équipements et les personnes. La genèse de la foudre repose sur l'accumulation progressive de charges électriques dans les couches du nuage en raison de processus microphysiques complexes (collisions entre particules de glace, grésil, gouttelettes d'eau surfondues, etc.). Lorsque le champ électrique dépasse la rigidité diélectrique de l'air ($\sim 3 \text{ MV/m}$), une décharge électrique est amorcée, initiant le développement d'un canal ionisé appelé "précurseur" ou "leader" » [24].

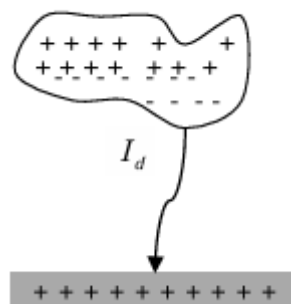


Figure 2.6 : Représentation schématique d'un nuage de charge se déchargeant vers la terre

Pour mieux comprendre ce mécanisme, les chercheurs ont recours à des modèles physiques simplifiés permettant de reproduire certaines caractéristiques de la décharge dans des conditions contrôlées. L'un des modèles les plus répandus dans les études expérimentales est celui du système pointe-plan (Figure 2.7). Ce montage consiste à placer une électrode métallique pointue face à une électrode plane, généralement mise à la terre, le tout dans un milieu gazeux (souvent de l'air à pression atmosphérique). L'électrode pointue joue un rôle fondamental car elle génère une forte intensification du champ électrique à son extrémité, favorisant l'ionisation locale de l'air et déclenchant ainsi l'initiation de la décharge.

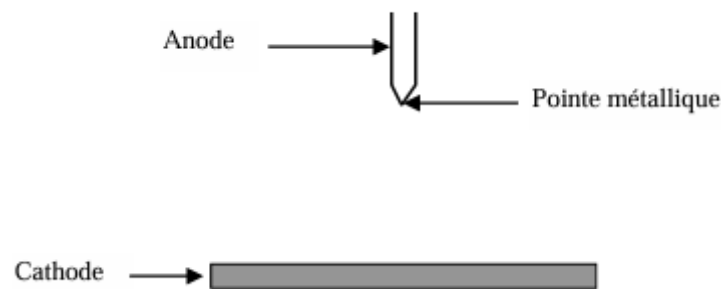


Figure 2.7 : schéma simplifié d'électrode pointe plan [24]

Ce système est souvent utilisé en laboratoire pour simuler le déclenchement d'une décharge similaire à celle de la foudre. Il permet notamment d'étudier le processus d'amorçage, la propagation des leaders, la formation du canal de décharge et le transfert de courant entre les électrodes. Le modèle pointe-plan est particulièrement utile pour caractériser les tensions de claquage, la densité de courant et les effets thermiques et électromagnétiques associés à la décharge. Il permet également de tester les performances de dispositifs de protection contre la foudre (parafoudres, pointes Franklin, etc.) dans des conditions reproductibles.

Ainsi, l'utilisation du système de décharge pointe-plan constitue une approche pertinente et efficace pour la modélisation physique des phénomènes liés au coup de foudre. Elle offre une base expérimentale solide pour valider des hypothèses théoriques, affiner les simulations numériques et concevoir des solutions techniques adaptées à la protection des infrastructures contre les effets de la foudre [24].

9 Hypothèses simplificatrices

Pour la simulation de la décharge électrique, les hypothèses suivantes sont retenues :

- L'étude porte exclusivement sur un coup de foudre descendant, c'est-à-dire une décharge qui progresse de l'électrode supérieure (pointe) vers l'électrode inférieure (plan).
- Le processus de décharge est initié à partir de l'électrode pointe et évolue en direction de l'électrode plane.
- La progression de la décharge est de nature aléatoire, se dirigeant préférentiellement des zones de champ électrique intense vers les zones de champ plus faible.
- Les charges d'espace sont négligées dans cette modélisation, afin de simplifier l'analyse du comportement de la décharge.

- La décharge évolue par sauts successifs (ou pas à pas), ce qui implique que la distribution du champ électrique est recalculée à chaque étape de l'évolution du canal de décharge.
- L'amorçage (initiation du précurseur ascendant) se produit lorsque le champ électrique au sommet d'une structure atteint une certaine valeur critique
- Dans de nombreuses applications, les valeurs typiques du champ électrique E appliquée à la tête d'un streamer sont considérées comme suit :

$E=500 \text{ kV/m}$ pour un streamer positif. [25]

$E=1000 \text{ kV/m}$ pour un streamer négatif [25]

10 Géométrie du modèle et domaines assignés

Pour étudier l'influence d'un paratonnerre sur la distribution du champ électrique, nous avons adopté la configuration expérimentale « électrode pointe – électrode plan », largement utilisée dans les travaux sur les décharges atmosphériques. Ce schéma (Figure 2.8) permet de reproduire, en première étape, le champ de fond généré par le leader descendant issu du nuage, puis, en seconde étape, la perturbation introduite par le paratonnerre. Les domaines et conditions sont détaillés ci-dessous.

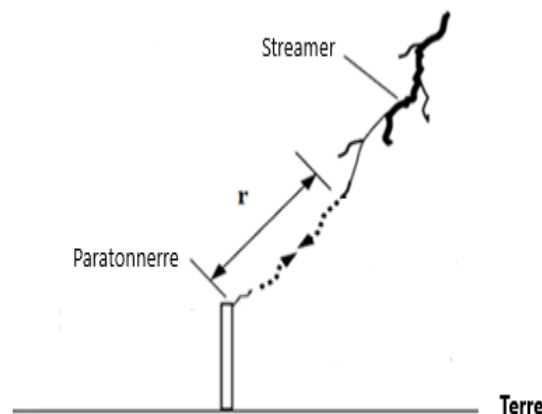


Figure 2.8: Système étudié [26]

➤ Électrode plan (sol)

Le sol est modélisé comme une surface plane et conductrice, à potentiel imposé $V = 0$. Cette hypothèse de conducteur parfait simplifie la résolution des équations électrostatiques et correspond à la réalité d'une mise à la terre efficace. La largeur de la bande de sol est suffisamment grande pour éviter les effets de bord sur le domaine d'intérêt.

➤ **Électrode pointe (leader descendant)**

Le traceur descendant « leader » est représenté par un segment linéique, positionné horizontalement ou légèrement incliné juste au-dessus du sommet du paratonnerre simulé. La densité linéique de charge des streamers joue un rôle déterminant dans la modélisation des phénomènes précurseurs à la formation des leaders dans les décharges de type foudre. Plusieurs travaux ont permis d'estimer cette grandeur dans des contextes expérimentaux et numériques variés. Cooray et al ont mené des expériences en laboratoire sous air ambiant, en appliquant un champ électrique de 400 à 600 kV/m, et ont déterminé une densité linéique de charge pour les streamers positifs de l'ordre de 1.8×10^{-8} à 3.2×10^{-8} C/m [27]. Par ailleurs, des simulations numériques menées par Guo et al., utilisant un modèle fluide 2D axisymétrique dans de l'air sec sous un champ de fond de 11.7 kV/cm, ont révélé que la tête d'un streamer négatif pouvait porter une charge linéique variant de 6.5×10^{-7} à 1.15×10^{-6} C/m [28]. Cette différence importante entre les polarités a également été corroborée par les modèles physiques de la littérature. Concernant les phénomènes en haute altitude, Qin et Pasko ont montré que, malgré une densité atmosphérique plus faible, les streamers dans la mésosphère (sprites) conservent des densités de charge de l'ordre de 10^{-8} à 10^{-7} C/m, en raison du respect des lois de similarité reliant la densité électronique à la densité de l'air [29]. Pour compléter ces données, Becerra et Cooray ont estimé la densité linéique de charge dans les canaux de leader à des valeurs bien plus élevées, atteignant 5×10^{-5} à 1.45×10^{-4} C/m, ce qui souligne le contraste marqué avec la phase streamer [4]. Au vu de ces diverses estimations, on retiens pour l'étude une valeur de densité linéique de charge représentative des streamers négatifs, à savoir $\sigma(z) = 5 \times 10^{-5}$ C/m [29] qui correspond aux conditions physiques simulées par Guo et al et qui sont les plus proches du régime modélise.

Cette modélisation semi-empirique permet de générer un champ électrique de fond réaliste, servant de base à l'étude de l'amorçage du paratonnerre.

➤ **Électrode pointe (paratonnerre)**

Le paratonnerre, dispositif de protection, est simulé comme une tige verticale de hauteur h variable (10 m à 200 m), coiffée d'une extrémité arrondie de rayon r_{pointe} . Cette géométrie simple mais fidèle aux pointes coniques et sphériques expérimentales permet d'étudier l'effet du rayon de courbure sur le pic de champ local et, par conséquent, sur la distance d'amorçage.

➤ **Domaine d'air**

L'air environnant est recréé par un demi-cercle de rayon $R = 5000$ m centré à la base du paratonnerre. Ce choix garantit que la frontière extérieure du domaine est suffisamment

éloignée pour que les conditions de Neumann ($\mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\varepsilon} \nabla V = 0$) soient valides et que l'influence des bords sur la zone proche du paratonnerre reste négligeable. La figure 2.9 montre modèle adopté de la distribution du champ électrique autour du paratonnerre et du leader

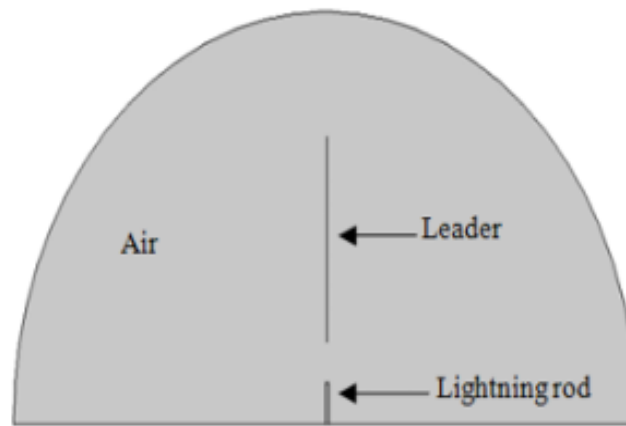


Figure 2.9: Modèle de la distribution du champ électrique autour du paratonnerre et du leader

10.1 Propriétés électriques du modèle :

Les propriétés électriques des matériaux utilisés dans la simulation ont été définies selon les caractéristiques réelles des milieux concernés ; le tableau 2.1 montre un résumé de ces propriétés. L'air a été modélisé comme un milieu parfaitement isolant, avec une perméabilité relative de 1 et une conductivité nulle, ce qui reflète son comportement en conditions normales d'isolement électrique. Le paratonnerre, quant à lui, a été considéré comme un conducteur en cuivre, avec une perméabilité relative également égale à 1 (non magnétique) et une conductivité électrique de 5.998 S/m, correspondant à celle du cuivre pur. Ces paramètres assurent une représentation réaliste du comportement électrostatique du système étudié, notamment pour l'analyse du champ électrique aux abords de la pointe du paratonnerre.

Tableau 2.1 : Propriété électriques des matériaux utilisés

Matériel	Permittivité relative	Conductivité
Air	1	0
Paratonnerre	1	5.998

10.2 Maillage de la Géométrie

Dans cette étude, un maillage non uniforme a été généré automatiquement par COMSOL Multiphysiques (Figure 2.10), avec un raffinement localisé dans les zones critiques, notamment :

- À l'extrémité du paratonnerre, où le champ électrique est fortement concentré ;
- Autour de la tête du traceur descendant, afin de mieux capturer les variations du champ électrique dans cette région à fort gradient.

La taille des éléments a été choisie de manière à assurer un bon compromis entre la précision numérique et le temps de calcul. Une attention particulière a été portée à la densité de maillage dans la zone située entre la pointe du paratonnerre et le leader, là où la distance critique d'amorçage est évaluée.

Plus précisément :

- Un maillage plus fin (éléments de petite taille) a été appliqué dans la zone d'interaction directe (environ 10 m autour de la tête du paratonnerre).
- Un maillage plus grossier a été utilisé dans les zones éloignées, notamment dans le domaine d'air, afin de réduire la charge de calcul sans compromettre la précision locale.

Ce raffinement local du maillage permet d'obtenir une résolution plus précise du champ électrique dans les zones à fort gradient, tout en maintenant une efficacité globale de la simulation.

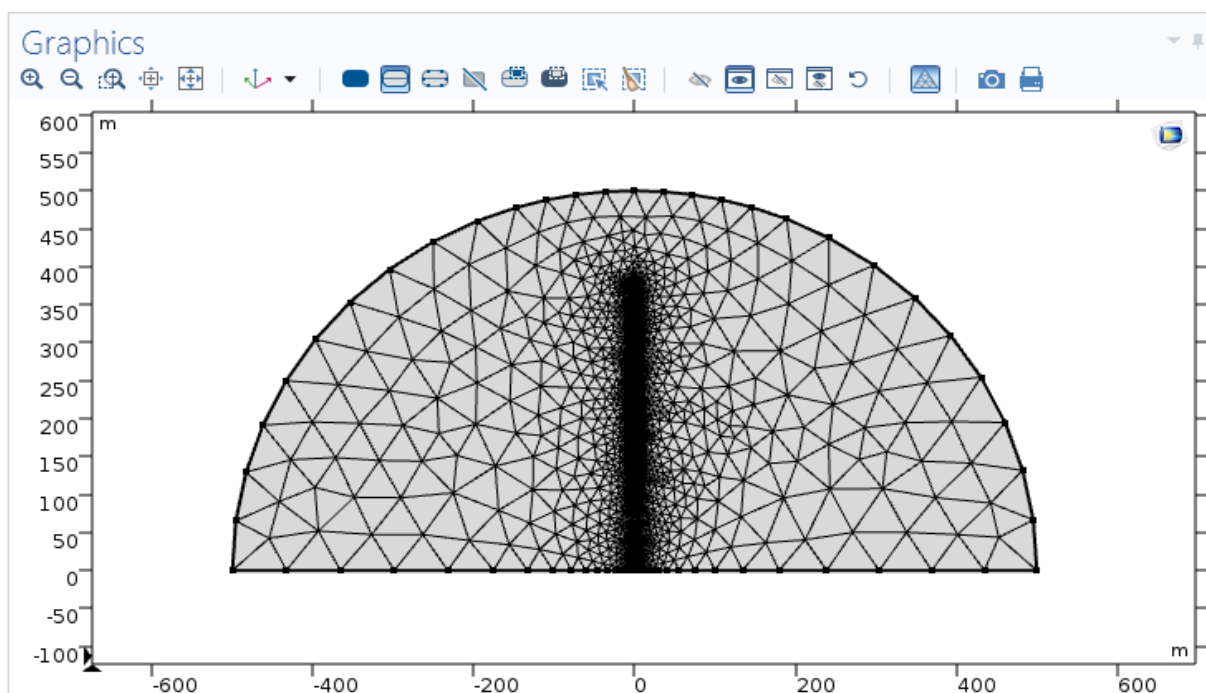


Figure 2.10 : Maillage adaptatif autour de la zone leader-paratonnerre

11 Analyse des résultats et discussion

Dans cette section, nous présentons et discutons les résultats de nos simulations électrostatiques obtenues par éléments finis, selon les configurations suivantes :

11.1 Étude du champ électrique atmosphérique sans dispositif de protection

Dans cette section, nous présentons les résultats de la simulation du champ électrique généré par un streamer descendant en l'absence de paratonnerre. Le domaine de calcul modélise un volume d'air au-dessus d'une surface parfaitement conductrice représentant la terre. Les conditions aux limites imposent un potentiel nul à la surface terrestre et un gradient de potentiel suffisant en haut du domaine pour initier et stabiliser la propagation du leader descendant. Les figures 2.11 à 2.12 illustrent respectivement l'intensité localisée au niveau de la tête du leader et la variation du champ à la surface du sol selon l'abscisse horizontale.

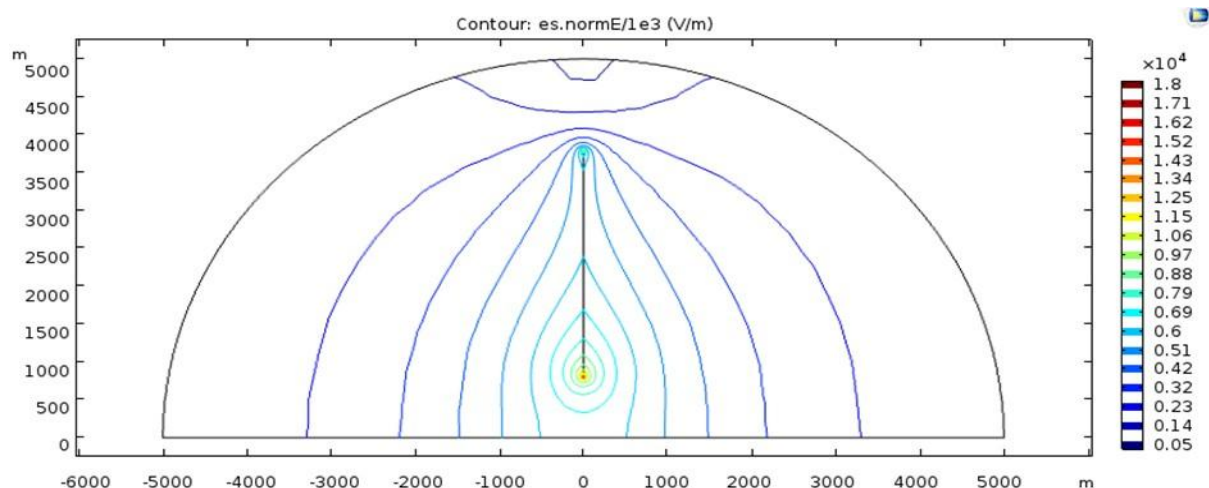


Figure 2.11 : Distribution du champ électrique dans l'air (cartographie en contours)

Cette carte de contours montre clairement une concentration du champ électrique autour de l'axe vertical du leader. Le maximum est localisé à la pointe du canal de décharge, avec une valeur d'environ $1.8 \times 10^4 \text{ V/m}$. Cette concentration est liée à l'effet de pointe, qui intensifie localement le champ en raison de la géométrie effilée du leader. Les lignes de champ s'organisent de manière symétrique autour de l'axe vertical, ce qui témoigne de l'absence de perturbation externe, telle qu'un système de captation ou une géométrie de sol irrégulière. Cette configuration favorise la poursuite de la décharge en l'absence d'un point de captation préférentiel au sol.

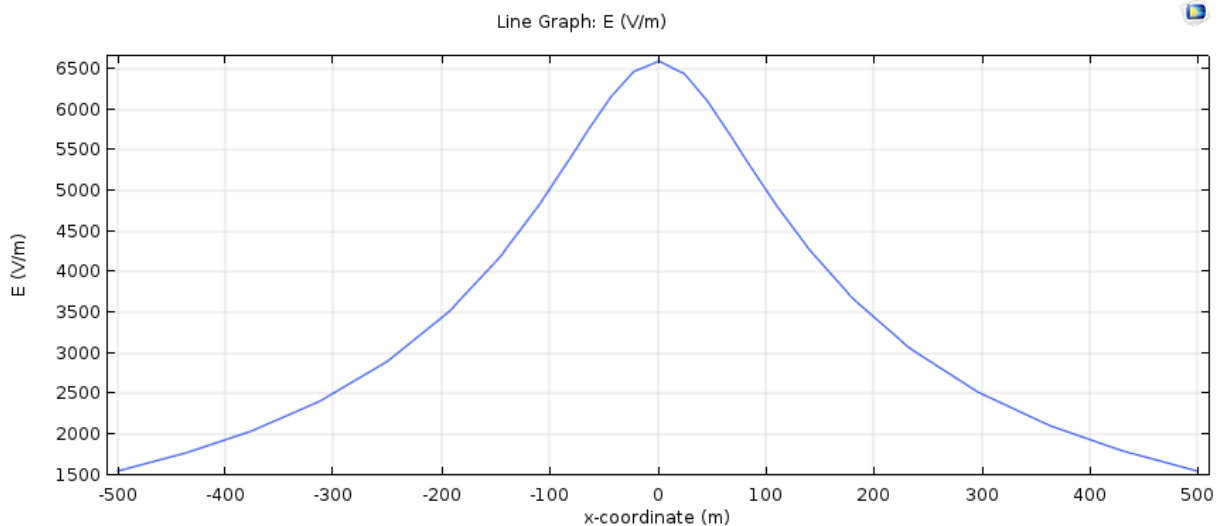


Figure 2.12 : Variation du champ électrique en fonction de la position horizontale à la surface du sol

La courbe révèle que le champ électrique atteint une valeur maximale de 6500 V/m à l'aplomb du leader ($x = 0$), puis décroît de manière symétrique de part et d'autre. Cette distribution illustre le couplage capacitif entre la tête du leader et le sol. La forme quasi-gaussienne de la courbe témoigne du caractère localisé de l'influence du leader sur la surface de la terre. Cette valeur maximale dépasse souvent les seuils de tenue diélectrique des installations sensibles, ce qui renforce la nécessité de prévoir une protection efficace.

➤ Conclusion partielle :

Les résultats obtenus démontrent que, sans dispositif de protection tel qu'un paratonnerre, le champ électrique généré par un streamer descendant est fortement localisé et atteint des intensités critiques, tant en altitude qu'au sol. Cette concentration du champ autour de l'axe du leader favorise l'amorçage d'un arc de puissance entre l'atmosphère et le sol. En l'absence de redistribution du champ par un capteur, la probabilité de foudroiement direct au niveau du point d'impact potentiel est significativement élevée. Ces observations soulignent l'importance de la mise en place de dispositifs de captation adaptés, qui seront analysés dans la section suivante.

11.2 Étude du champ électrique atmosphérique avec dispositif de protection (paratonnerre)

Dans cette section, nous étudions l'effet de la présence d'un dispositif de protection de type paratonnerre sur la distribution du champ électrique généré par un leader descendant. Le leader est modélisé sur une hauteur totale de 4000 m, avec une tête localisée à une altitude de 900 m

au moment de l'analyse. Le paratonnerre, quant à lui, est représenté par une tige conductrice verticale de 300 m de hauteur, implantée au sol.

Nous analysons l'effet de l'introduction d'un paratonnerre sur la distribution du champ électrique dans le même environnement que celui étudié précédemment. L'objectif est d'évaluer comment la présence de ce dispositif affecte l'amplification du champ autour des structures sensibles et la dynamique de l'interaction avec le leader descendant.

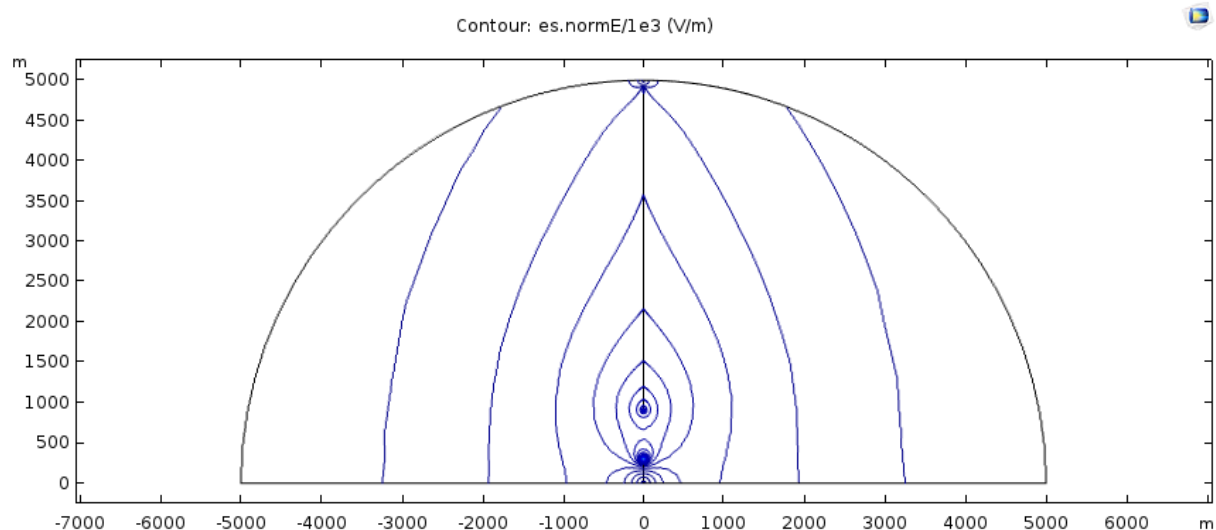


Figure 2.13 : Distribution du champ électrique dans l'air avec paratonnerre (cartographie en contours)

La cartographie montre une déviation nette des lignes de champ vers le sommet du paratonnerre, ce qui indique une redistribution efficace du champ électrique. La zone de concentration de champ, auparavant centrée sous le leader, est désormais déplacée vers l'extrémité du paratonnerre (Figure 2.13). Cette modification de la topologie du champ est essentielle pour détourner la trajectoire du canal de décharge et éviter un impact direct sur une zone non protégée.

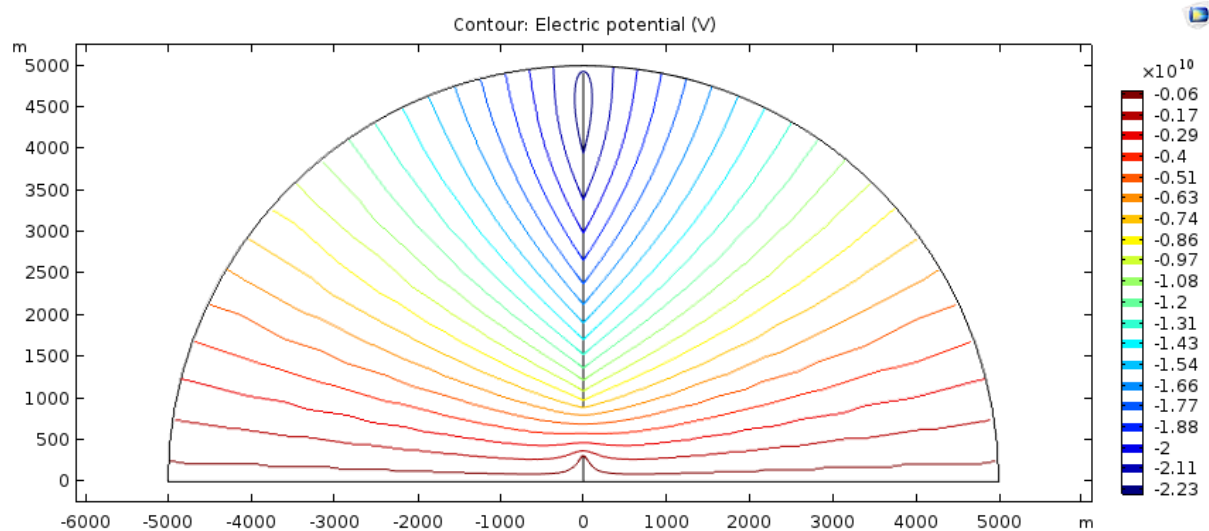


Figure 2.14 : Répartition du potentiel électrique dans le domaine simulé

Le potentiel électrique suit une distribution régulière entre les couches supérieures de l'air et le sol, mais l'on observe une compression des lignes de potentiel autour du paratonnerre (Figure 2.14). Cette compression est signe d'un gradient de potentiel élevé localement, condition favorable à l'amorçage d'un contre-leader depuis l'extrémité du paratonnerre. L'analyse du potentiel confirme le rôle du dispositif comme point de rupture privilégié pour capter la foudre avant qu'elle n'atteigne d'autres structures ou le sol directement.

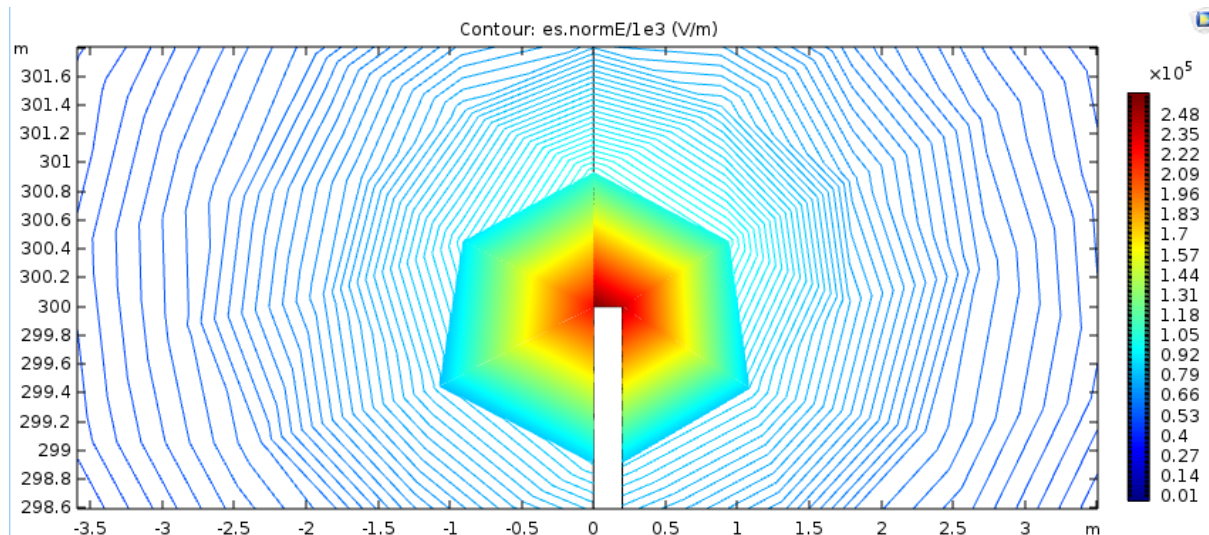


Figure 2.15 : Zoom sur la distribution du champ électrique à l'extrémité du paratonnerre

Cette figure (2.15) met en évidence l'intensification locale du champ à la pointe du paratonnerre, conséquence directe de l'effet de pointe sur un conducteur saillant. Le champ atteint localement une valeur maximale de 2.8×10^5 V/m, soit une intensité bien supérieure à celle observée en l'absence de dispositif de protection. Ce pic local est largement suffisant pour déclencher un arc de retour (contre-leader) qui intercepte la décharge descendante.

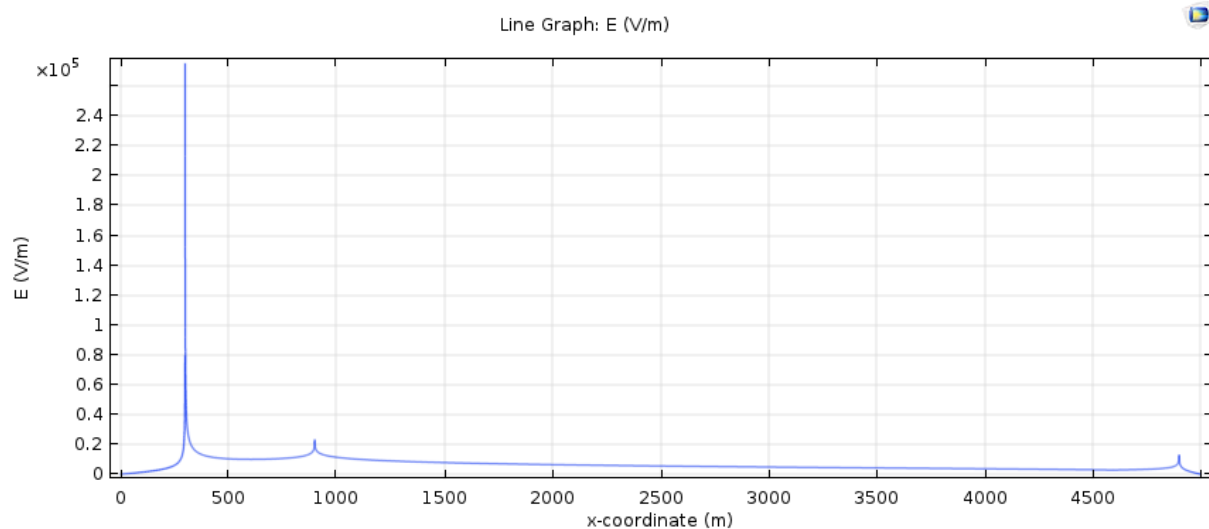


Figure 2.16 : Évolution du champ électrique en fonction de la coordonnée verticale y (en V/m)

La Figure 2.16 présente l'évolution du champ électrique E en fonction de la hauteur Y , le long d'un axe vertical passant par le paratonnerre et en direction du leader descendant. Deux pics significatifs apparaissent sur cette courbe :

- Le premier maximum, localisé à l'extrémité du paratonnerre ($y = 300$ m), atteint une intensité de champ de $E_{max} = 2.8 \times 10^5$ V/m
- Le second maximum, situé à la tête du leader descendant ($y = 900$ m), est nettement plus faible et vaut environ $E_{leader} = 2.2 \times 10^4$ V/m

Ce graphique permet de visualiser la distribution du champ le long de la trajectoire potentielle d'un arc ascendant. La comparaison avec la valeur critique du champ électrique $E_{critique}$, seuil nécessaire à l'initiation d'un claquage dans l'air, permet de conclure si un arc de décharge est possible.

Lorsque $E_{max} \geq E_{critique}$ les conditions sont réunies pour qu'un claquage électrique (ou coup de foudre) se produise entre les deux extrémités (celle du leader et celle du paratonnerre). Dans notre cas, la valeur $E_{max} = 2.8 \times 10^5$ V/m dépasse largement les seuils typiques de claquage dans l'air.

➤ Conclusion partielle :

L'ajout d'un paratonnerre modifie significativement la répartition du champ électrique dans le domaine. On observe une forte intensification du champ au niveau de son extrémité, ce qui traduit l'effet de pointe généré par sa géométrie. La distribution du champ et du potentiel électrique confirme cette concentration, et une zone de champ maximal se forme au sommet du paratonnerre.

L'analyse du champ électrique en fonction de la hauteur $E(y)$ permet d'identifier précisément la valeur maximale atteinte au point le plus élevé du paratonnerre, ici :

$$E_{max} = 2.8 \times 10^5 \text{ V/m}$$

Ce résultat est essentiel, car il peut être comparé à une valeur critique de déclenchement dans l'air, prise ici comme :

$$E_{critique} = 1 \times 10^6 \text{ V/m}$$

Lorsque cette condition est approchée ou atteinte, un amorçage est théoriquement possible. La distance verticale entre la tête du leader (située à 900 m par exemple) et celle du paratonnerre (à 300 m) représente alors une estimation de la distance de capture :

$$d_{capture} = 900\text{m} - 300\text{m} = 600\text{m} \quad (2.1)$$

Cette méthode permet donc, à partir du profil vertical du champ électrique, de déterminer la zone dans laquelle un paratonnerre peut capter une décharge, en comparant E_{max} local au seuil critique.

11.2.1 Étude dynamique de l'approche du leader descendant

Dans cette partie, l'objectif est d'analyser l'évolution du champ électrique maximal induit par la progression verticale du leader descendant, en direction du paratonnerre. Contrairement aux sections précédentes où la position du leader était fixe, on considère ici un déplacement progressif du leader selon l'axe vertical au-dessus du point $x = 0$, c'est-à-dire à l'aplomb du paratonnerre, là où le champ électrique est le plus intense. Ce choix correspond au trajet le plus probable que suivrait un canal de foudre dans des conditions naturelles, puisque les charges tendent à évoluer le long des lignes de champ maximal.

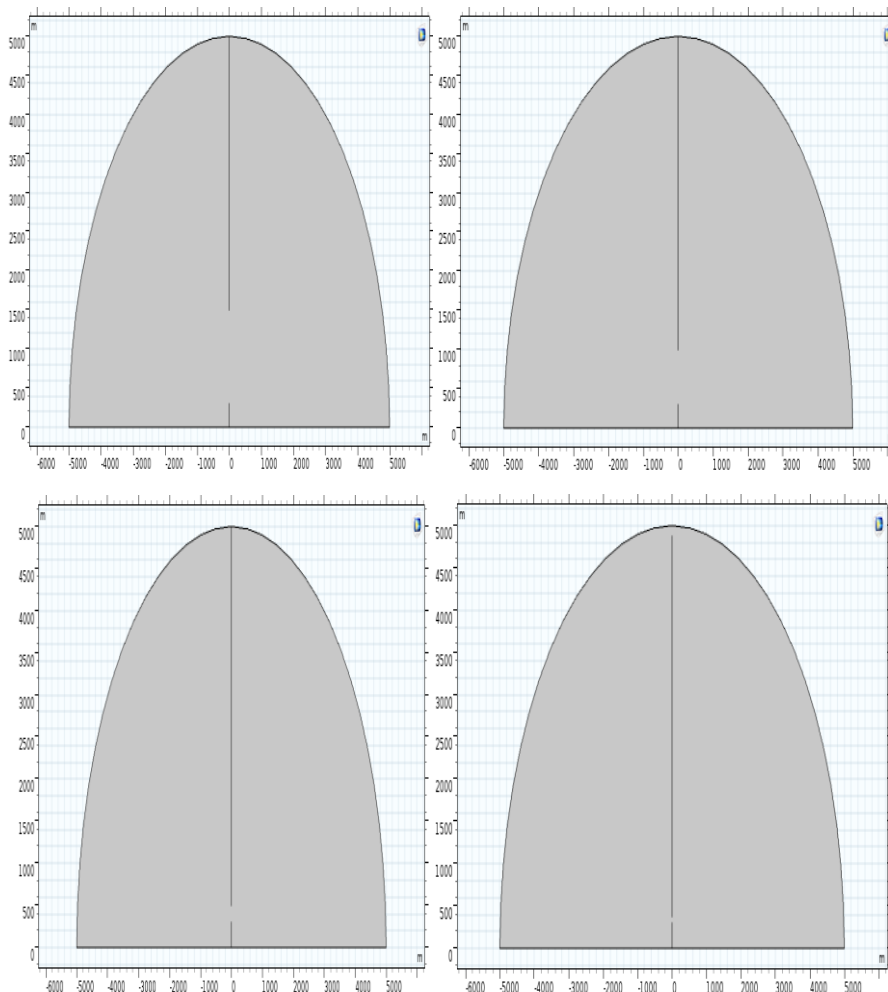
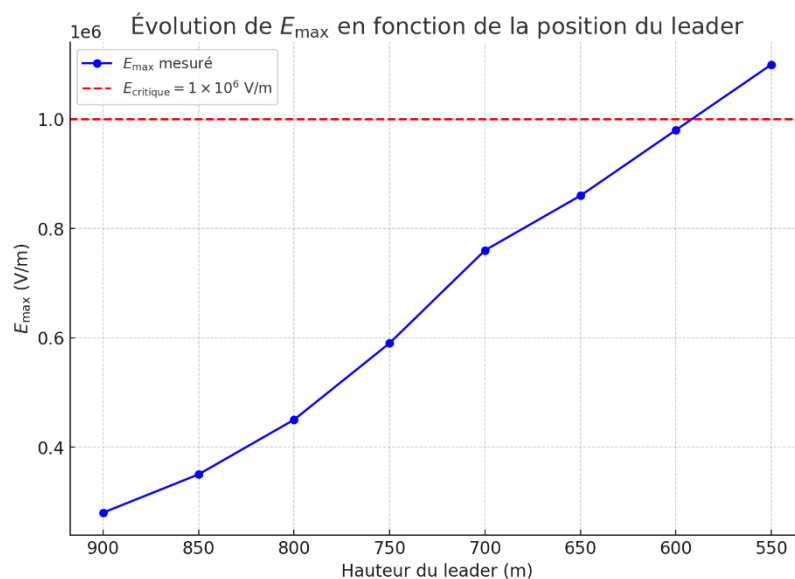


Figure 2.17 : les différentes positions du leader durant sa descente

La figure 2.17 illustre les différentes positions du leader durant sa descente, modélisée par quatre positions successives dans la simulation. Cette configuration permet de visualiser le rapprochement du canal de charge négative du leader par rapport au sommet du paratonnerre. Afin d'approfondir l'analyse du comportement du champ électrique lors de l'approche du leader descendant, une simulation paramétrique a été réalisée. Dans cette étude, la position du leader est progressivement abaissée selon l'axe vertical, de 900 m à 550 m, à raison de paliers de 50 m, en restant alignée sur l'axe $x = 0$, c'est-à-dire au-dessus du paratonnerre. Cette trajectoire est cohérente avec la logique physique, puisque le leader tend naturellement à suivre les zones de champ maximal. Pour chaque position du leader, la valeur maximale du champ électrique dans le domaine est extraite. Le tableau 2.2 suivant présente l'évolution de E_{max} en fonction de la hauteur du leader. La croissance rapide de cette valeur traduit l'augmentation de l'intensité du champ à mesure que la distance entre le leader et le paratonnerre se réduit, conformément au comportement attendu d'une interaction électrostatique non linéaire.

Tableau 2.2 – Évolution du champ électrique maximal en fonction de la position verticale du leader descendant

Position du leader (m)	900	850	800	750	700	650	600	550
Champ électrique maximal(10^5 v/m)	2.8	3.5	4.5	5.9	7.6	8.6	9.8	10.1

**Figure 2.18** Evolution de E_{max} en fonction de la position du leader

L'analyse conjointe du tableau et du graphique permet de visualiser clairement l'évolution du champ électrique maximal E_{max} à mesure que le leader descend vers le paratonnerre. On observe une croissance rapide et non linéaire, particulièrement marquée lorsque la hauteur du leader passe en dessous de 750 m. Cette tendance traduit l'intensification de l'interaction électrostatique entre le leader chargé négativement et la tête du paratonnerre.

La distance de capture correspond à la distance verticale entre l'extrémité du leader descendant et la tête du paratonnerre au moment où le champ électrique maximal atteint la valeur critique de claquage dans l'air, soit :

$$E_{critique} = 1 \times 10^6 \text{ V/m}$$

Dans le tableau et sur le graphique, on constate que cette valeur critique est atteinte lorsque le leader se trouve à une hauteur de 550 m, tandis que le paratonnerre culmine à 300 m. La distance de capture peut donc être estimée par la différence de hauteur entre ces deux points :

$$d_{capture} = 550m - 300m = 250m \quad (2.2)$$

Cette distance représente la portée maximale à laquelle le paratonnerre peut intercepter un leader descendant, dans les conditions de cette simulation. Elle est un paramètre fondamental dans la conception et l'évaluation de l'efficacité des dispositifs de protection contre la foudre.

11.2.2 Étude de la distance de capture en fonction de la hauteur du paratonnerre

Dans cette dernière série de simulations, nous avons étudié l'influence de la hauteur du paratonnerre sur la distance de capture d , définie comme la distance maximale horizontale entre le leader descendant et le paratonnerre pour laquelle le champ électrique atteint ou dépasse le seuil critique $E_{critique}$, condition préalable à un claquage. Cette approche permet d'évaluer l'efficacité d'un dispositif de protection selon sa hauteur.

Les simulations ont été réalisées pour différentes hauteurs de paratonnerre, allant de $h = 50m$ jusqu'à $h = 300m$, par pas de 25m. Pour chaque hauteur, on a déterminé la position du leader descendant à partir de laquelle le champ électrique maximal sur le paratonnerre atteint la valeur critique

$$E_{critique} = 1 \times 10^6 \text{ V/m}$$

Cette position permet de déduire la distance de capture $d_{capture}$ correspondante.

Les résultats numériques obtenus sont rassemblés dans le tableau 2.3 ci-dessous :

Tableau 2.3 : Distance de capture selon la hauteur du paratonnerre

Hauteur du paratonnerre (m)	Distance de capture (m)
50	90
75	120
100	145
125	165
150	185
175	205
200	220
225	231
250	242
275	248
300	250

L'analyse graphique des résultats (voir figure 2.18) montre une augmentation rapide de la distance de capture pour les faibles hauteurs, suivie d'un aplatissement progressif du

phénomène pour les hauteurs élevées. Ce comportement traduit une saturation asymptotique : au-delà d'une certaine hauteur, toute augmentation de h n'apporte qu'un gain marginal en distance de capture.

Modélisation de la distance de capture en fonction de la hauteur du paratonnerre

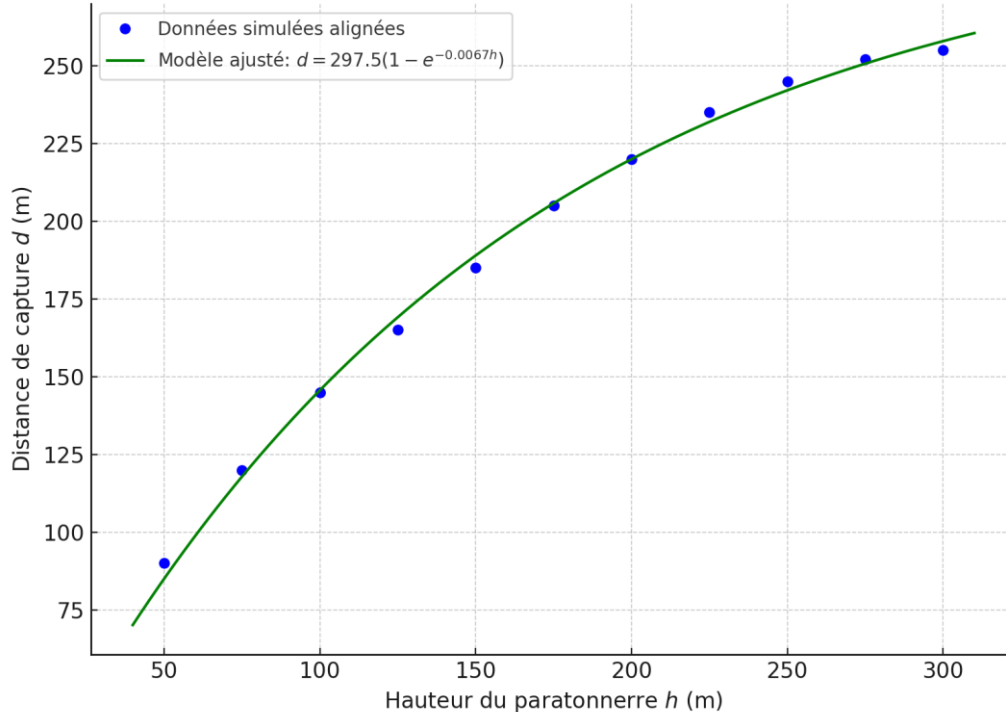


Figure 2.18 : Ajustement du modèle exponentiel à la distance de capture

Les données expérimentales ont été ajustées par un modèle exponentiel de la forme :

$$d(h) = a \cdot (1 - e^{-bh}) \quad (2.3)$$

Avec les paramètres obtenus par régression non linéaire :

$$a = 297.5 \quad b = 0.0067$$

Soit le modèle final :

$$d(h) = 297.5 \cdot (1 - e^{-0.0067 \cdot h}) \quad (2.4)$$

Ce modèle permet de prédire la distance de capture en fonction de la hauteur du paratonnerre. Il est particulièrement utile pour dimensionner les dispositifs de protection dans les zones exposées à la foudre. De plus, le caractère asymptotique de la courbe permet d'identifier une hauteur optimale au-delà de laquelle l'augmentation n'est plus significative.

➤ Conclusion partielle :

L'ensemble des simulations menées a permis de proposer un modèle prédictif de la distance de capture d en fonction de la hauteur du paratonnerre h , exprimé sous la forme exponentielle suivante :

$$d(h) = 297.5 \cdot (1 - e^{-0.0067 \cdot h}) \quad (2.5)$$

Ce modèle met en évidence un comportement asymptotique : la distance de capture augmente rapidement pour les petites hauteurs, puis tend à se stabiliser pour les grandes hauteurs, traduisant une saturation physique du phénomène. Cela indique qu'au-delà d'un certain seuil, généralement autour de 250 à 300 mètres, l'augmentation de hauteur n'apporte qu'un gain marginal en termes de portée de protection.

Pour évaluer la pertinence de ce modèle, nous l'avons comparé aux modèles classiques de la littérature montrée sur la figure 2.19 : Rizk, Petrov et Lalande. La figure comparative ci-dessous illustre cette confrontation :

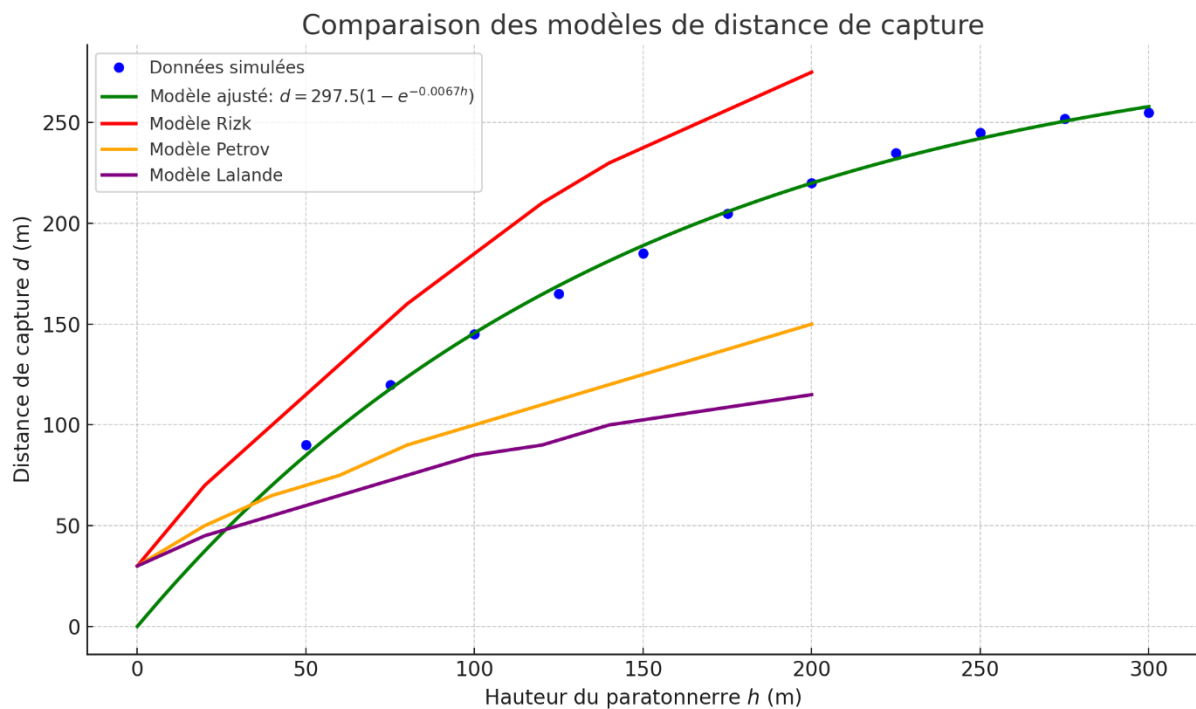


Figure 2.19 : Comparaison des modèles de distance de capture

L'analyse comparative montre que :

Le modèle de Rizk présente la plus grande amplitude de distance de capture, traduisant une estimation très optimiste de la zone protégée.

- Le modèle que nous avons proposé occupe la deuxième position, suggérant une approche plus prudente mais réaliste, notamment basée sur le champ électrique simulé par COMSOL.
- Les modèles de Petrov et Lalande présentent des courbes plus conservatrices, avec des distances de capture inférieures pour une même hauteur.

Cette comparaison valide la cohérence de notre modèle vis-à-vis des approches existantes, tout en soulignant sa capacité à prendre en compte les effets locaux du champ électrique. Il offre ainsi une base utile pour un dimensionnement plus précis et plus physique des dispositifs de protection contre la foudre.

12 Influence du rayon de courbure de la tête du paratonnerre sur la distance de capture

12.1 Introduction et contexte

L'une des caractéristiques géométriques influençant la performance d'un paratonnerre est le rayon de courbure de sa pointe. Afin d'étudier cette influence, une série de simulations numériques a été réalisée en faisant varier le rayon de courbure de la tête du paratonnerre dans l'intervalle compris entre 0,06 cm et 0,09 cm, pour une hauteur de tige fixée à 60 m.

12.2 Résultats des simulations

Les figures 2.20(a–d) et 2.21 présentent les résultats des simulations numériques visant à évaluer l'effet du rayon de courbure de la tête du paratonnerre sur la distribution du champ électrique dans son voisinage immédiat. Pour cette étude, le rayon de courbure a été successivement fixé à 0,06 cm, 0,07 cm, 0,08 cm et 0,09 cm, tandis que la hauteur de la tige du paratonnerre a été maintenue constante à 60 m afin d'isoler l'influence géométrique de la pointe.

L'analyse des distributions obtenues montre une concentration nettement plus intense du champ électrique autour des têtes les plus aiguës, c'est-à-dire celles dont le rayon de courbure est le plus faible. En effet, pour le rayon de 0,06 cm, le champ électrique atteint une intensité maximale significativement supérieure à celle observée pour les rayons plus grands. Cette concentration accrue du champ en pointe s'explique par le phénomène d'effet de pointe, bien connu en électrostatique, selon lequel les charges électriques tendent à se concentrer aux endroits présentant une courbure plus marquée, engendrant localement un champ plus fort.

À mesure que le rayon de courbure augmente, la géométrie de la tête devient progressivement plus émoussée, ce qui se traduit par une répartition plus diffuse du champ électrique et une diminution de son intensité maximale. Cette tendance est clairement visible sur les cartes de distribution simulées, où les zones de champ intense deviennent moins localisées et moins marquées pour les têtes plus arrondies. Cela suggère que, bien que les

pointes très aiguës soient capables de générer des champs intenses localement, elles ne garantissent pas nécessairement une meilleure efficacité en matière de capture de la foudre.

Ces observations quantitatives sont cohérentes avec les théories électrostatiques classiques et viennent appuyer l'idée que la forme géométrique du sommet du paratonnerre joue un rôle non négligeable dans la formation et l'intensité du champ électrique autour de celui-ci.

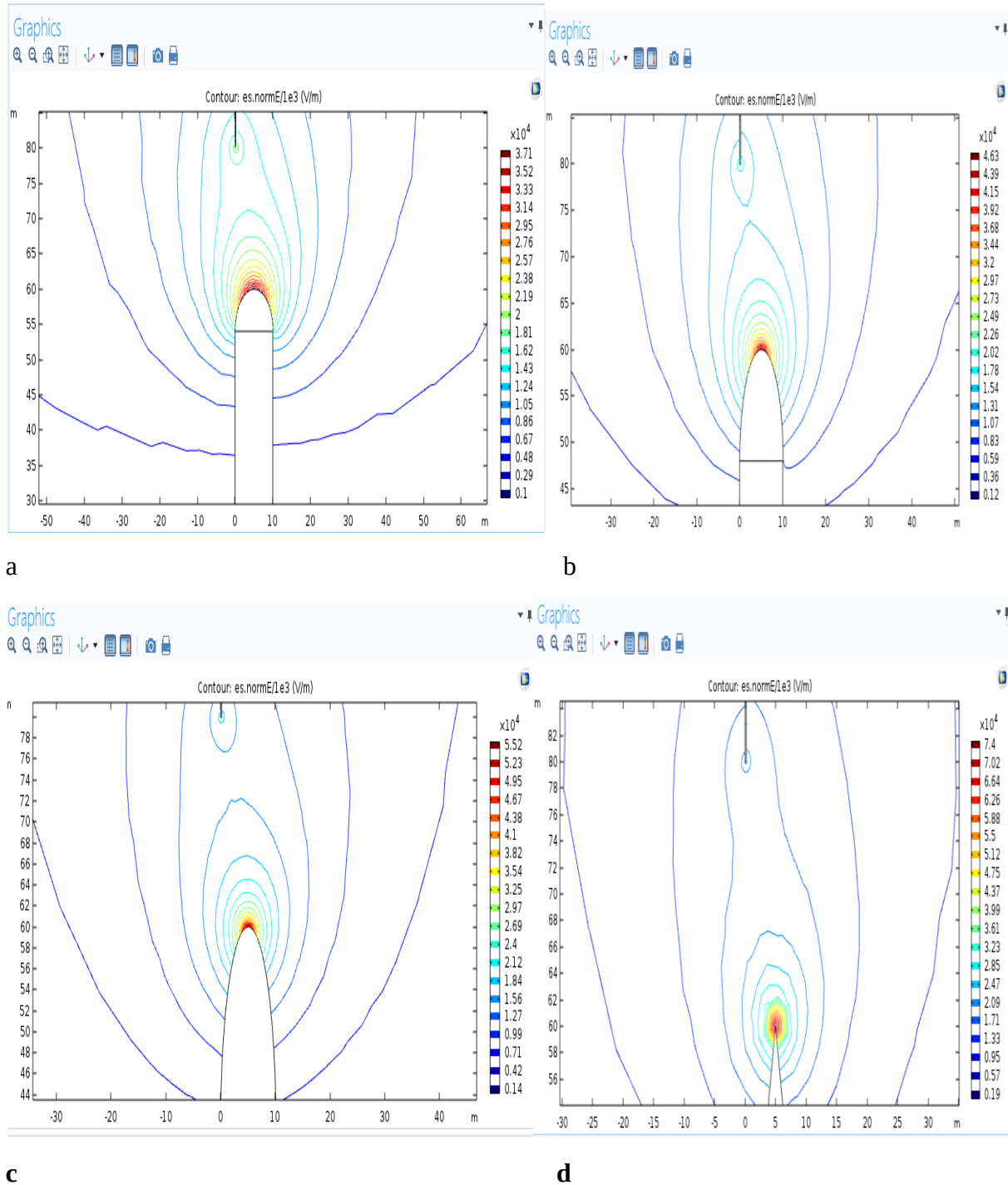


Figure 2.20 : Distribution du champ électrique autour de la tête du paratonnerre pour différents rayons de courbure : a) $r=0.06$ b) $r=0.07$ c) $r=0.08$ d) $r=0.09$

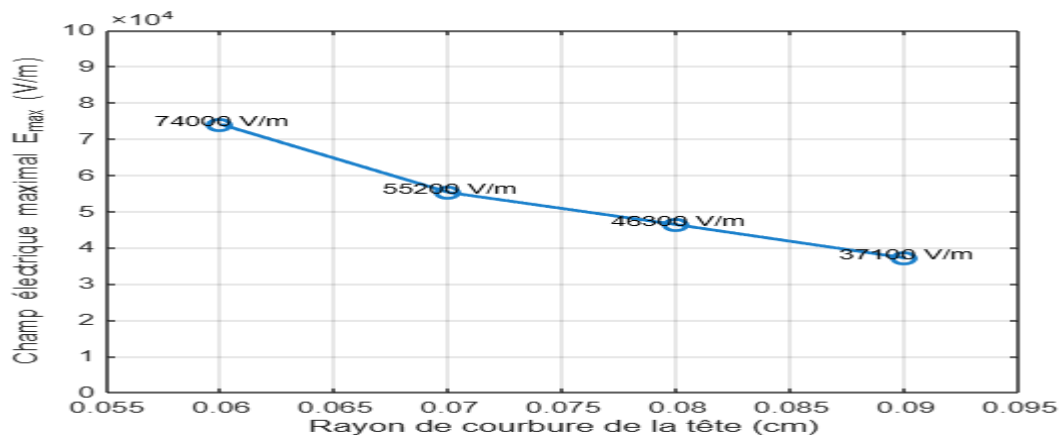


Figure 2.21 : Évolution du champ électrique maximal en fonction du rayon de courbure de la tête du paratonnerre

12.3 Analyse de la distance de capture selon la hauteur et le rayon de courbure

Une analyse approfondie a été réalisée afin d'étudier l'évolution de la distance de capture en fonction à la fois de la hauteur du paratonnerre et du rayon de courbure de sa tête. La Figure 2.22 synthétise ces résultats en représentant graphiquement la distance de capture en fonction du rayon de courbure pour plusieurs hauteurs de tige, variant de 20 m à 70 m.

Bien que les résultats précédents aient montré que les têtes les plus aiguës (rayon de courbure plus faible) génèrent un champ électrique local plus intense au sommet du paratonnerre, cette intensité ne se traduit pas automatiquement par une distance de capture plus élevée. En effet, les simulations révèlent que la distance de capture augmente avec l'augmentation du rayon de courbure, c'est-à-dire lorsque la tête devient plus émoussée. Ce comportement s'explique par la dynamique de l'amorçage des traceurs ascendants.

Les têtes émoussées, bien que générant un champ maximal légèrement inférieur, présentent une configuration géométrique qui permet une initiation plus stable et plus précoce des traceurs dans un champ ambiant élevé. Cette stabilité favorise la connexion avec les traceurs descendants de la foudre, ce qui augmente la probabilité d'interception.

La Figure 2.22 illustre cette tendance, en représentant la distance de capture en fonction du rayon de courbure pour plusieurs hauteurs de tige (de 20 m à 70 m). Il en ressort qu'un rayon

plus grand induit une plus grande distance de capture pour une hauteur donnée, confirmant que les têtes émoussées favorisent l'amorçage des traceurs dans un champ électrique élevé.

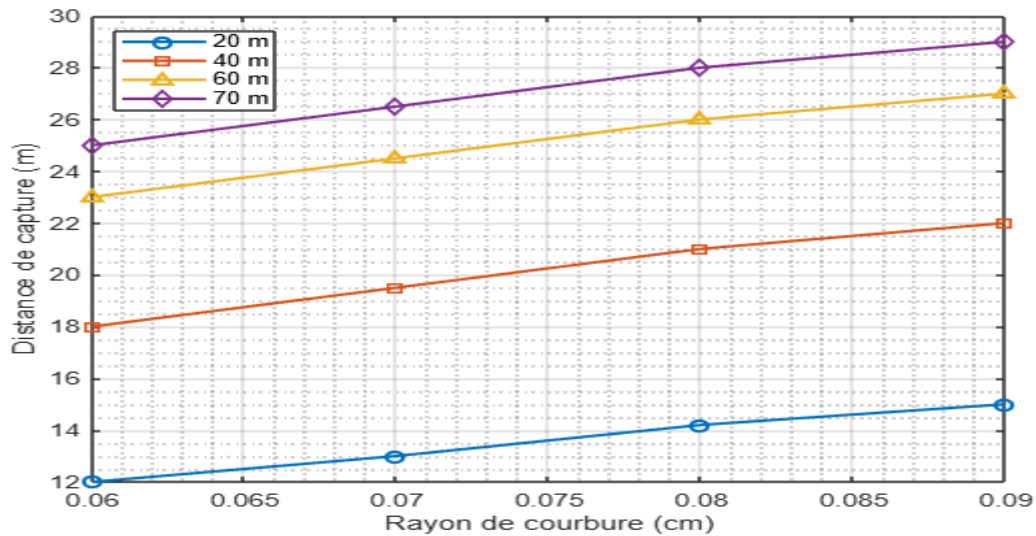


Figure 2.22 : Évolution de la distance de capture en fonction du rayon de courbure de la tête pour différentes hauteurs de tige

12.4 Discussion et comparaison avec la littérature

Ces observations concordent avec les conclusions de Moore et al. [30], qui ont démontré expérimentalement que les têtes émoussées sont de meilleurs récepteurs d'impact grâce à leur capacité à initier des traceurs ascendants plus tôt dans un champ élevé, expliquant leur performance supérieure.

Néanmoins, bien que le rayon de courbure ait un effet notable sur la distance de capture, son influence reste moins marquée que celle de la hauteur du paratonnerre, comme le confirment plusieurs travaux [31]. Cela souligne que dans une conception optimale, la hauteur reste le paramètre principal, tandis que la géométrie de la tête joue un rôle complémentaire important.

13 Conclusion :

La modélisation 2D par éléments finis avec COMSOL Multiphysics a permis de déterminer efficacement la distance d'amorçage entre un paratonnerre et un leader descendant. Les simulations ont montré que cette distance dépend fortement de la hauteur, de la forme et du rayon de courbure de la pointe du paratonnerre, influençant la distribution du champ électrique. Les résultats obtenus sont en bon accord avec les modèles existants, confirmant la fiabilité de la méthode FEA pour analyser des géométries simples ou complexes. Ce travail

améliore ainsi la compréhension de l'effet des paramètres géométriques sur la performance de la protection contre la foudre. Dans la continuité de cette analyse physique et numérique, le chapitre suivant s'intéresse à une autre dimension essentielle de la protection contre la foudre : l'évaluation normative du risque selon l'IEC 62305-2.

Il s'agira d'y présenter la conception et la structuration d'un outil logiciel permettant d'automatiser les calculs de risque foudre, conformément aux exigences de cette norme internationale.

CHAPITRE 3

***Évaluation du risque foudre et
développement d'un outil logiciel basé
sur la norme IEC 62305-2***

1 Introduction

La foudre représente l'un des aléas naturels les plus destructeurs pour les structures et les installations industrielles. Chaque année, des milliers d'incidents liés à la foudre causent des pertes humaines, des dommages matériels considérables et des interruptions d'activité coûteuses. L'évaluation rigoureuse du risque de foudre est donc essentielle pour définir et dimensionner les mesures de protection les plus efficaces et économiquement optimisées. Ce chapitre présente les fondements théoriques et normatifs de cette évaluation, met en lumière les enjeux spécifiques rencontrés par l'entreprise JGC Algeria S.p.A. et propose une méthodologie logicielle adaptée pour automatiser et fiabiliser le calcul du risque, en accord avec la norme IEC 62305-2.

La première partie du chapitre rappelle les principes de base de la gestion du risque de foudre selon IEC 62305-2, notamment la décomposition du risque en composantes sources (S1 à S4) et types de dommages (D1 à D3).

Ensuite, le besoin de JGC en matière de logiciel d'aide à la décision est exposé, avant d'analyser l'état de l'art des outils et méthodes existants. Enfin, les apports de notre projet, la structure logicielle proposée.

2 Généralités sur l'évaluation du risque

2.1 Définition et objectifs

L'évaluation du risque est un processus systématique consistant à identifier, analyser et évaluer les événements susceptibles d'affecter négativement les objectifs d'un système ou d'une organisation “ [32]. Son objectif principal est de fournir une base factuelle pour la prise de décision, en hiérarchisant les risques selon leur probabilité d'occurrence et l'ampleur de leurs conséquences.

Elle est obligatoire pour les Installations Nucléaires de Base et pour certaines Installations Classées pour la Protection de l'Environnement : elle doit être réalisée avant toute mise en exploitation et actualisée pour les sites existants soumis à cette exigence.

L'ARF peut être menée à titre volontaire pour les infrastructures dont la continuité de service est cruciale (data centers, établissements de santé, etc.), afin de garantir un niveau de protection adapté et de prévenir les interruptions ou dommages liés à la foudre [33].

2.2 Étapes du processus d'évaluation

1. **Identification des risques** : repérage et description systématique des événements indésirables et de leurs causes potentielles.
2. **Analyse des risques** : évaluation de la probabilité d'occurrence et de l'impact des risques retenus, à l'aide de critères quantitatifs ou qualitatifs.
3. **Évaluation (priorisation)** : comparaison des résultats d'analyse avec des seuils de tolérance pour déterminer l'urgence et la nature des mesures correctives à mettre en œuvre.

2.3 Contexte Réglementaire en Algérie

➤ Décret exécutif n° 21-319 du 14 août 2021

En Algérie, le décret n° 21-319 fixe la liste des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE) soumises à étude de dangers et aux notices d'impact, incluant les sites hydrocarbonés disposant de risques liés à la foudre [34].

➤ Autorité de régulation des hydrocarbures (ARH)

L'ARH est l'autorité de contrôle et de régulation des activités dans le domaine des hydrocarbures. Elle homologue les bureaux d'études et peut suspendre leur pré-qualification en cas de non-conformité aux obligations réglementaires, dont l'obligation de réaliser une ARF avant toute phase de construction ou modification substantielle.

2.3.1 Obligations et portée

- **Installations nucléaires de base et ICPE** : l'ARF est obligatoire avant la mise en service et doit être mise à jour lors de travaux ou extensions des ouvrages existants [35].
- **Secteur pétrolier et gazier** : l'ARH exige la soumission du rapport d'ARF à l'instruction du dossier de construction, afin de prévenir tout risque d'allumage et d'assurer la sécurité des exploitations en zone atmosphérique explosive (ATEX) (EPL 1, 2 ou 3) [34] .
- **Infrastructures critiques (volontaire)** : data center, hôpitaux, réseaux de télécommunication peuvent réaliser une ARF volontaire pour maintenir une haute disponibilité de service et limiter les coûts de sinistre.

Chapitre 3 : Évaluation du risque foudre et développement d'un outil logiciel basé sur la norme IEC 62305-2

2.3.2 Enjeux et sanctions

Le non-respect de ces obligations peut entraîner la suspension de la pré-qualification des bureaux d'études, des pénalités financières ou l'arrêt des travaux par l'ARH, ainsi qu'un risque accru d'accident majeur en zone ATEX. Cette exigence réglementaire s'inscrit dans la prévention des impacts directs et indirects de la foudre, qui reste l'une des causes principales de déclenchement d'incendies et de dommages matériels dans les installations pétrolières.

2.4 Applications générales à la foudre

Dans le contexte de la protection contre la foudre, l'évaluation du risque adapte ces méthodes pour estimer la vulnérabilité des installations face aux impacts directs (foudroiement) ou indirects (surintensités, surtensions) des décharges atmosphériques [36]. Elle intègre des paramètres spécifiques tels que la densité de décharges (flash density), la surface de collecte du site et la valeur de cible (biens ou personnes à protéger) pour calculer la probabilité d'une décharge et ses conséquences potentielles [37].

2.4.1 État de l'art de l'évaluation des risques liés à la foudre

2.4.1.1 Méthodes traditionnelles d'évaluation du risque

Avant l'adoption des normes modernes telles que la norme IEC 62305, l'évaluation du risque lié à la foudre reposait essentiellement sur des méthodes qualitatives, fondées sur l'expérience, l'observation empirique et des critères subjectifs. Ces approches étaient souvent propres à chaque région ou secteur d'activité, sans cadre normalisé pour la comparaison ou la validation. Ce rapport présente un aperçu des méthodes qualitatives traditionnelles utilisées pour estimer les risques dus à la foudre.

Avant l'ère des normes scientifiques, les populations utilisaient des indicateurs empiriques pour évaluer les zones à risque :

- Observation des impacts passés : les lieux ayant déjà subi des frappes étaient considérés comme à haut risque.
- Topographie et altitude : les points hauts, arbres isolés, clochers et bâtiments élevés étaient réputés plus susceptibles d'être frappés.

Chapitre 3 : Évaluation du risque foudre et développement d'un outil logiciel basé sur la norme IEC 62305-2

- Nature du sol : certains sols (rocheux, humides, etc.) étaient jugés plus conducteurs, donc plus risqués.
- Conditions météorologiques locales : les régions fréquemment exposées aux orages étaient identifiées de manière empirique par les populations.

Dans certains cas, des grilles d'évaluation rudimentaires ont été utilisées, avant la normalisation internationale. Ces outils comprenaient :

- Des check-lists simples pour identifier les facteurs de risque (hauteur du bâtiment, matériaux utilisés, etc.).
- Des classifications subjectives (risque faible, moyen, élevé) sans base mathématique.
- L'utilisation de cartes de foudroiement établies localement, souvent sans données fiables ni actualisées.

2.4.1.2 Méthodes modernes et quantitatives d'évaluation du risque lié à la foudre

L'évolution technologique, la densité croissante des équipements électroniques sensibles et les exigences accrues en matière de sûreté ont conduit au développement de méthodes d'évaluation du risque liées à la foudre plus rigoureuses et objectives. Contrairement aux approches empiriques traditionnelles, les méthodes modernes reposent sur des bases statistiques, des formules mathématiques et des critères normalisés permettant d'obtenir une estimation quantitative du risque.

Ces approches sont aujourd'hui encadrées par plusieurs normes techniques nationales et internationales, qui fournissent un cadre méthodologique précis pour analyser les conséquences d'un impact de foudre et dimensionner les protections nécessaires.

3 Principales normes encadrant l'évaluation du risque

Plusieurs normes, autres que l'IEC 62305, sont utilisées pour encadrer les méthodes d'analyse quantitative. On peut citer notamment :

Chapitre 3 : Évaluation du risque foudre et développement d'un outil logiciel basé sur la norme IEC 62305-2

- **NF C 17-102** (France – 1995, révisée en 2011)

Cette norme française traite de l'installation des paratonnerres à dispositif d'amorçage (PDA). Elle propose une méthode semi-quantitative d'évaluation du risque fondée sur la hauteur du bâtiment, son usage, et sa localisation. Elle reste largement utilisée dans les marchés publics et industriels français.

- **IEEE Std 998** (États-Unis – 1996, révisée en 2012)

Publiée par l'Institute of Electrical and Electronics Engineers, cette norme fournit des méthodes de modélisation et d'évaluation du risque d'impact direct de la foudre sur les postes électriques à haute tension. Elle introduit la méthode de l'angle de protection, la méthode du cône et la méthode électro géométrique.

- **NF EN 50536** (Europe – 2011)

Cette norme européenne concerne les systèmes de détection et d'alerte de foudre. Elle définit les exigences pour l'utilisation de ces dispositifs, notamment dans les sites sensibles à l'activité extérieure (aéroports, parcs industriels, chantiers). Elle complète les méthodes d'évaluation en introduisant la logique de prévention.

- **NFC 15-100** (France – version actuelle : 2015)

Norme de référence pour les installations électriques basse tension en France. Elle impose l'installation de dispositifs de protection contre les surtensions dans certaines zones à forte densité de foudroiement ou pour les installations sensibles. Bien qu'elle ne fournisse pas une méthode complète de calcul de risque, elle impose des mesures de protection minimales en fonction du contexte.

- **UL 96A** (États-Unis – première version 1965, révisée en 2018)

Publiée par Underwriters Laboratories, cette norme décrit les exigences relatives à la mise en place de systèmes de protection contre la foudre. Elle est surtout utilisée en Amérique du Nord pour les structures commerciales et industrielles. L'analyse du risque y est abordée pour justifier ou non la nécessité de mise en œuvre de protections.

3.1 Principes généraux des méthodes quantitatives

Les méthodes modernes s'articulent autour des éléments suivants :

Chapitre 3 : Évaluation du risque foudre et développement d'un outil logiciel basé sur la norme IEC 62305-2

- Estimation de la probabilité de foudroisement, fondée sur la densité locale de foudroisement (valeur Ng , en impacts/km²/an), et sur la géométrie de la structure.
- Évaluation des conséquences potentielles, selon la fonction du site (présence humaine, nature des biens, interruption de services, etc.).
- Calcul du niveau de risque total, à partir de facteurs de pondération et de scénarios de pertes.
- Comparaison avec un risque tolérable, défini par la norme. Si le risque est supérieur au seuil, des mesures de protection doivent être mises en œuvre.

Ces analyses sont généralement assistées par des logiciels spécialisés, intégrant les données météorologiques, les caractéristiques des bâtiments et les exigences normatives.

3.1.1 Avantages des méthodes quantitatives modernes

- Permettent une évaluation objective et reproductible du risque.
- Favorisent une approche raisonnée du dimensionnement des protections.
- S'intègrent facilement dans une démarche de gestion globale des risques techniques et humains.
- Répondent aux exigences des assurances, autorités de contrôle et normes qualité.

3.1.2 Limites et perspectives d'évolution

Malgré les avancées significatives qu'ont apportées les méthodes modernes d'évaluation quantitative du risque lié à la foudre, certaines limites subsistent, tant sur le plan méthodologique que pratique. Identifier ces limites permet d'envisager des pistes d'amélioration et des perspectives de développement pour les futures normes et outils d'analyse.

Chapitre 3 : Évaluation du risque foudre et développement d'un outil logiciel basé sur la norme IEC 62305-2

3.1.3 Limites des méthodes actuelles

- Dépendance à des données météorologiques locales parfois imprécises ou obsolètes
Le calcul de la densité de foudroisement (valeur Ng) repose sur des statistiques régionales, qui peuvent varier fortement selon les sources et ne sont pas toujours actualisées. Dans certains pays, les réseaux de détection de la foudre sont peu denses ou peu fiables.
- Complexité des calculs pour des utilisateurs non spécialistes
Les méthodes quantitatives nécessitent une bonne maîtrise des concepts de probabilité, de statistiques et de physique du phénomène foudre. Cela peut représenter un obstacle pour les petites structures ou les gestionnaires de sites peu formés.
- Prise en compte encore limitée des équipements sensibles et de l'électronique embarquée
Certaines normes ne traitent pas encore de manière fine les effets indirects de la foudre (surtensions induites, perturbations électromagnétiques) sur les équipements électroniques modernes, de plus en plus présents dans les infrastructures.
- Rigidité des modèles face à des situations spécifiques
Les modèles proposés dans les normes actuelles restent généralistes et peuvent ne pas couvrir certains cas particuliers, comme les bâtiments atypiques, les structures mobiles ou les installations en altitude.

3.1.3.1 Perspectives d'évolution

- Intégration de données temps réel issues des réseaux de détection
Le couplage des méthodes d'évaluation avec des systèmes de détection en temps réel pourrait permettre une approche dynamique du risque, en particulier pour les sites critiques ou les événements temporaires (festivals, chantiers).
- Utilisation de l'intelligence artificielle et du machine learning : Ces technologies pourraient améliorer la modélisation des risques, en exploitant de grands volumes de données climatiques et structurelles, et en détectant des schémas complexes d'exposition au risque.

Chapitre 3 : Évaluation du risque foudre et développement d'un outil logiciel basé sur la norme IEC 62305-2

- Développement de méthodes simplifiées mais fiables : Pour les bâtiments courants ou les petites installations, il existe un besoin croissant de méthodes plus simples, faciles à appliquer, mais qui restent conformes aux exigences normatives de sécurité.
- Harmonisation internationale des normes : Une convergence progressive entre les différentes normes (NF, IEEE, UL, EN, etc.) permettrait d'unifier les critères de protection, en particulier pour les entreprises opérant à l'international.
- Amélioration des outils logiciels : De plus en plus de solutions logicielles intégrant les normes (ex. : DEHN Risk Tool, FoudreTech, RiskManager) sont développées pour faciliter l'évaluation du risque par des ingénieurs non spécialisés. Leur démocratisation représente un levier important pour la généralisation de ces méthodes.

4 Présentation de la norme IEC 62035-2

4.1 Introduction générale à la norme

La protection des structures contre la foudre représente un enjeu essentiel dans la prévention des risques techniques, humains et environnementaux. Parmi les normes internationales en vigueur, la norme IEC 62305 constitue une référence incontournable. Elle est structurée en plusieurs parties, dont la partie 2 — objet de cette étude — est spécifiquement dédiée à l'évaluation du risque.

La norme IEC 62305-2 définit une méthodologie rigoureuse permettant de déterminer si une structure nécessite des mesures de protection contre la foudre, et si oui, à quel niveau. Cette démarche est basée sur une approche quantitative du risque, défini comme la perte moyenne annuelle probable qu'une structure pourrait subir suite à des impacts de foudre.

Les effets de la foudre peuvent en effet entraîner :

- Des dommages matériels à la structure et à son contenu .
- La défaillance des systèmes électriques et électroniques connectés.
- Des risques pour la vie humaine, à l'intérieur ou à proximité du bâtiment.

Chapitre 3 : Évaluation du risque foudre et développement d'un outil logiciel basé sur la norme IEC 62305-2

Ces conséquences peuvent également s'étendre à l'environnement proche de la structure, notamment dans le cas d'installations sensibles telles que les usines chimiques ou les installations nucléaires.

La norme distingue plusieurs types d'interactions entre la foudre et une structure :

- **Impacts directs** sur la structure elle-même ;
- **Impacts directs** sur les lignes connectées (alimentation, télécommunications).
- **Impacts indirects** à proximité de la structure ou des lignes, susceptibles de provoquer des surtensions.

L'objectif de l'évaluation du risque est donc de prendre en compte :

- Le nombre annuel estimé de coups de foudre influençant la structure.
- La probabilité de dommage causé par un coup de foudre.
- Le niveau moyen des pertes consécutives à un événement.

La norme IEC 62305-2 propose un cadre de calcul précis, intégrant à la fois les caractéristiques techniques de la structure, son environnement, les lignes connectées, la densité de foudroiement locale, ainsi que l'efficacité des dispositifs de protection éventuellement mis en place.

Cette introduction ouvre la voie à une étude approfondie de la norme, de ses concepts fondamentaux, et de la manière dont elle a été utilisée dans le développement du logiciel d'analyse de risque présenté dans ce projet.

4.2 Explication des termes

4.2.1 Dommages et pertes

4.2.1.1 Source de dommage

Le courant de foudre est la source principale de dommage. Les sources suivantes sont distinguées en fonction du point d'impact [38] :

- S1 : coups de foudre directs sur une structure,
- S2 : coups de foudre à proximité d'une structure,
- S3 : coups de foudre directs sur une ligne,
- S4 : coups de foudre à proximité d'une ligne.

4.2.1.2 Types de dommages

Un éclair peut causer des dommages selon les caractéristiques de la structure à protéger. Parmi les caractéristiques les plus importantes figurent : le type de construction, le contenu et l'usage, le type de service, et les mesures de protection mises en place.

Pour des applications pratiques de cette évaluation des risques, il est utile de distinguer trois types fondamentaux de dommages pouvant résulter d'un éclair. Ceux-ci sont les suivants [38] :

- D1 : blessures aux êtres vivants par choc électrique,
- D2 : dommages physiques,
- D3 : défaillance des systèmes électriques et électroniques.

Les dommages causés à une structure par la foudre peuvent être limités à une partie de la structure ou s'étendre à l'ensemble de celle-ci. Ils peuvent également affecter les structures avoisinantes ou l'environnement (par exemple, émissions chimiques ou radioactives).

Chapitre 3 : Évaluation du risque foudre et développement d'un outil logiciel basé sur la norme IEC 62305-2

4.2.1.3 Types de pertes

Chaque type de dommage, seul ou combiné à d'autres, peut entraîner une perte différente pour la structure à protéger. Le type de perte dépend des caractéristiques propres de la structure et de son contenu. Les types de pertes suivants doivent être pris en compte (voir la figure 3.1) :

- L1 : perte de vie humaine (y compris blessures permanentes),
- L2 : interruption de service public,
- L3 : perte de patrimoine culturel,
- L4 : perte de valeur économique (structure, contenu et perte d'activité)

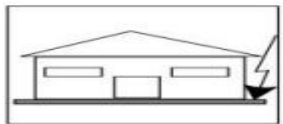
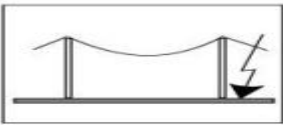
Coup de foudre		Structure	
Point d'impact	Source de dommages	Type de dommages	Type de pertes
	S1	D1 D2 D3	L1, L4 ^a L1, L2, L3, L4 L1 ^b , L2, L4
	S2	D3	L1 ^b , L2, L4
	S3	D1 D2 D3	L1, L4 ^a L1, L2, L3, L4 L1 ^b , L2, L4
	S4	D3	L1 ^b , L2, L4

Figure 3.1 : Sources de dommage, types de dommage et types de perte selon le point d'impact [38]

4.2.1.4 Types de Risques

Le risque, noté R, est la valeur relative d'une perte moyenne probable annuelle. Pour chaque type de perte pouvant survenir dans une structure, le risque correspondant doit être évalué.

Chapitre 3 : Évaluation du risque foudre et développement d'un outil logiciel basé sur la norme IEC 62305-2

Les risques à évaluer dans une structure peuvent être les suivants :

- **R1** : risque de perte de vie humaine (y compris les blessures permanentes),
- **R2** : risque de perte de service au public,
- **R3** : risque de perte de patrimoine culturel,
- **R4** : risque de perte de valeur économique.

Pour évaluer les risques R, les composantes de risque correspondantes (risques partiels selon la source et le type de dommage) doivent être définies et calculées.

Chaque risque R est la somme de ses composantes de risque. Lors du calcul d'un risque, les composantes de risque peuvent être regroupées selon la source de dommage et le type de dommage. La figure 3.2 montre un récapitulatif des risques ainsi que leur composant.

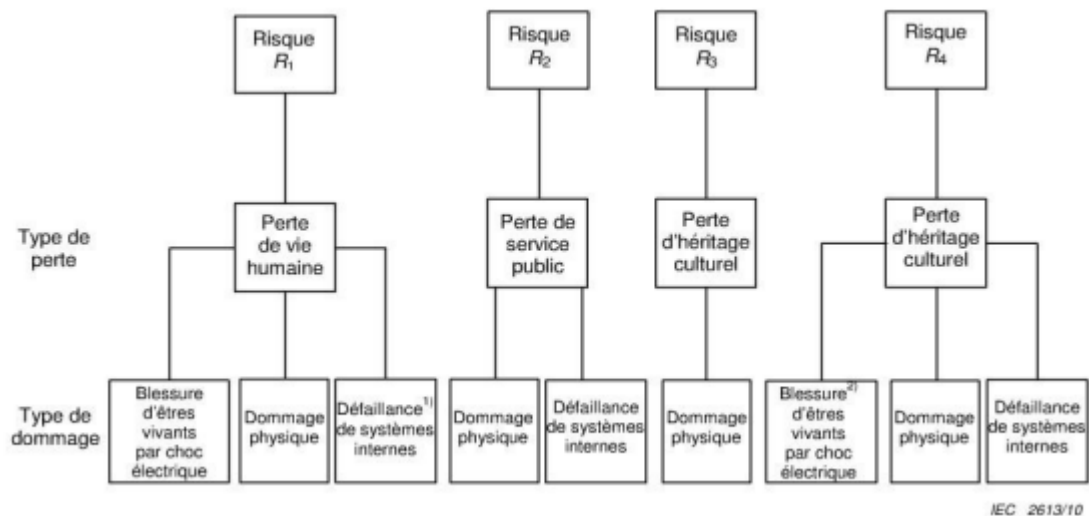


Figure 3.2 Type de pertes et risques correspondants dus à différents types de dommages [38]

4.2.2 Procédure de base

La procédure suivante doit être appliquée :

- **Identification de la structure** à protéger et de ses caractéristiques ;

Chapitre 3 : Évaluation du risque foudre et développement d'un outil logiciel basé sur la norme IEC 62305-2

- **Identification de tous les types de pertes** possibles dans la structure ainsi que des risques correspondants (R1 à R4) ;
- **Évaluation du risque R** pour chaque type de perte (R1 à R4) ;
- **Évaluation de la nécessité de protection**, en comparant les risques R1, R2 et R3 aux risques tolérables RT ;
- **Évaluation de la rentabilité des mesures de protection**, en comparant les coûts des pertes totales avec et sans les mesures de protection. Dans ce cas, une évaluation des composantes du risque R4 doit être réalisée afin d'estimer ces coûts

Afin de déterminer la nécessité d'un système de protection, une procédure d'analyse du risque est appliquée, comme illustrée par l'organigramme (figure 3.3) ci-après. Cette méthode permet une évaluation systématique des différents types de pertes et des composants du risque.

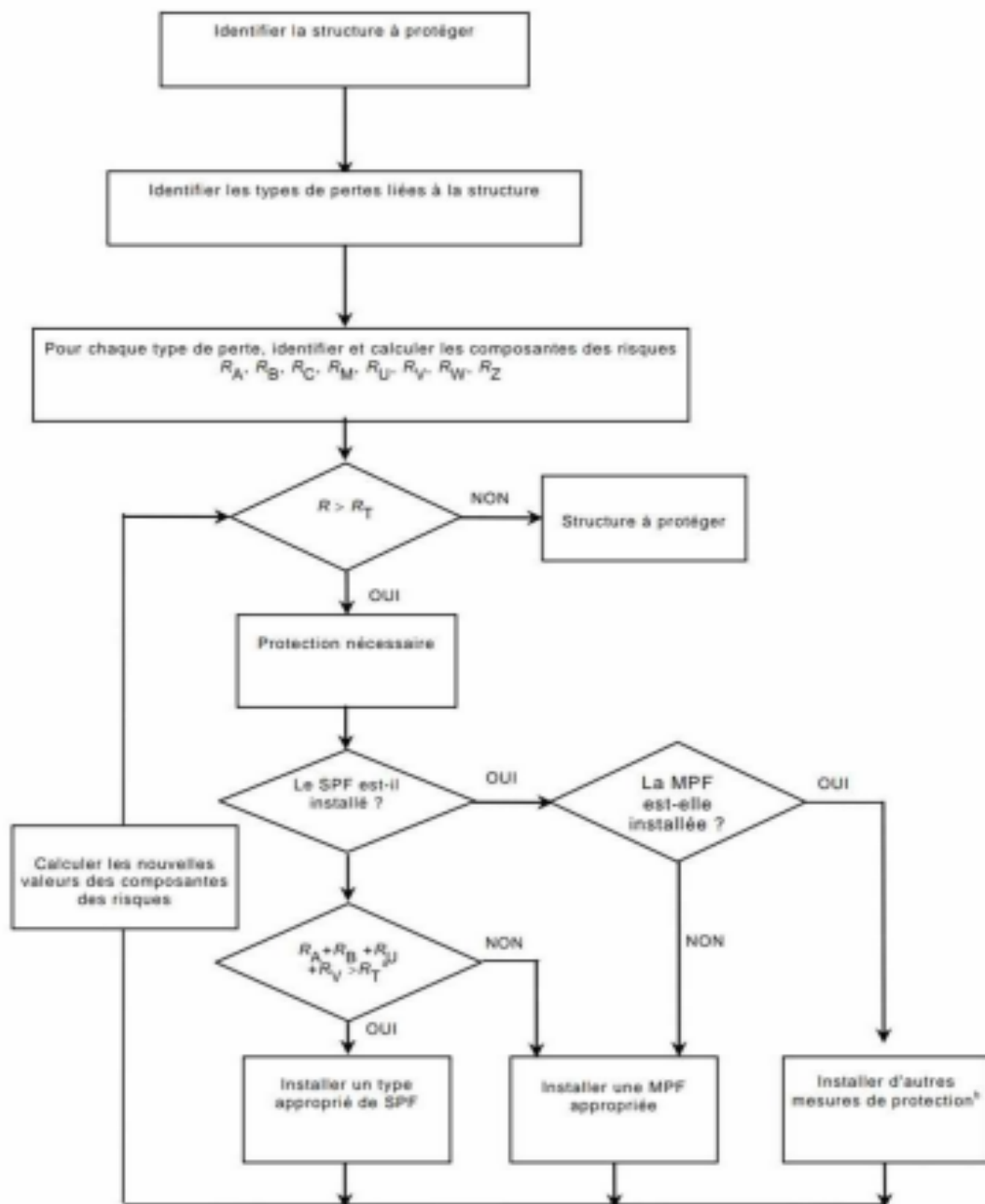


Figure 3.3: Procédure pour la décision du besoin de protection et pour le choix des mesures de protection [38].

4.2.3 Calcul des risques R1, R2, R3 et R4 selon la norme IEC 62305-2

La norme IEC 62305-2 définit une méthode systématique pour l'évaluation des risques dus à la foudre. Elle permet de déterminer la nécessité de mesures de protection, en quantifiant quatre types de risques principaux :

Chaque risque est exprimé en termes de fréquence annuelle moyenne de dommages inacceptables. Pour calculer ces risques, on utilise une approche modulaire :

Chapitre 3 : Évaluation du risque foudre et développement d'un outil logiciel basé sur la norme IEC 62305-2

Formule générale du risque :

$$R = N \times P \times L \quad (3.1)$$

Où :

- **N : Fréquence annuelle des événements dangereux** (nombre de coups de foudre dangereux),
- **P : Probabilité de dommages,**
- **L : Perte moyenne ou conséquences associées** (en fonction du type de risque).

Le tableau 3.1 montre un résumé des risques à considérer ainsi que leurs composantes

Tableau 3.1 : somme des composantes associées pour chaque risque

Risque	Signification	Formule (somme des composantes associées)
R1	Perte de vies humaines	$R1 = RA1 + RB1 + RC1 + RM1 + RU1 + RV1 + RW1 + RZ1$
R2	Perte de services publics	$R2 = RB2 + RC2 + RM2 + RV2 + RW2 + RZ2$
R3	Perte de patrimoine culturel	$R3 = RB3 + RV3$
R4	Perte de valeur économique	$R4 = RA4 + RB4 + RC4 + RM4 + RU4 + RV4 + RW4 + RZ4$

Chapitre 3 : Évaluation du risque foudre et développement d'un outil logiciel basé sur la norme IEC 62305-2

4.2.3.1 Composantes des risques dus aux impacts sur la structure :

RA : Composante liée aux blessures d'êtres vivants dues aux tensions de contact et de pas dans les zones jusqu'à 3 m à l'extérieur de la structure.

RB : Composante liée aux dommages physiques d'un étincelage dangereux dans la structure entraînant un incendie ou une explosion avec éventuellement des conséquences sur l'environnement (danger, contamination).

RC : Composante liée aux défaillances des réseaux internes causées par l'impulsion électromagnétique due à la foudre. Des pertes de vies humaines peuvent être redoutées dans des structures présentant un risque d'explosion, dans des hôpitaux ou dans d'autres structures où les défaillances des réseaux internes mettent immédiatement en danger la vie des personnes.

4.2.3.2 Composantes des risques dus aux impacts à proximité de la structure :

RM : Composante liée aux défaillances des réseaux internes causées par l'impulsion électromagnétique due à la foudre. Des pertes de vies humaines peuvent être redoutées dans des structures présentant un risque d'explosion, dans des hôpitaux ou dans d'autres structures où les défaillances des réseaux internes mettent immédiatement en danger la vie des personnes.

4.2.3.3 Composantes des risques dus aux impacts sur un service connecté à la structure :

RU : Composante liée aux blessures d'être vivants dues aux tensions de contact à l'intérieur de la structure en raison du courant de foudre injecté dans une ligne entrante.

RV : Composante liée aux dommages physiques (incendie ou explosion) dus à un étincelage dangereux consécutif à une surtension transmise dans les lignes entrantes. Éventuellement, des conséquences sur l'environnement (danger, contamination) peuvent être redoutées.

RW : Composante liée aux défaillances des réseaux internes en raison des surtensions induites sur les lignes entrantes et transmises à la structure. Des pertes de vies humaines peuvent être redoutées dans des structures présentant un risque d'explosion, dans des

Chapitre 3 : Évaluation du risque foudre et développement d'un outil logiciel basé sur la norme IEC 62305-2

hôpitaux ou dans d'autres structures où les défaillances des réseaux internes mettent immédiatement en danger la vie des personnes.

4.2.3.4 Composantes des risques dus à un impact à proximité d'un service connecté à la structure :

R_z : Composante liée aux défaillances des réseaux internes en raison des surtensions induites sur les lignes entrantes et transmises à la structure. Des pertes de vies humaines peuvent être redoutées dans des structures présentant un risque d'explosion, dans des hôpitaux ou dans d'autres structures où les défaillances des réseaux internes mettent immédiatement en danger la vie des personnes

5 Outils existants pour l'évaluation du risque lié à la foudre

L'évaluation du risque lié à la foudre, conformément à la norme internationale IEC 62305, nécessite des calculs complexes prenant en compte plusieurs paramètres techniques, environnementaux et structurels. Pour faciliter cette tâche, plusieurs outils spécialisés ont été développés au fil des années, permettant d'automatiser une grande partie de l'analyse et d'assurer une meilleure précision des résultats.

Cette section présente une sélection de ces outils, en mettant en lumière leurs principales fonctionnalités, leur conformité aux normes en vigueur, ainsi que leurs avantages et limites. L'objectif est de situer l'existant dans le domaine afin de justifier, par la suite, le développement d'un nouvel outil plus adapté aux besoins spécifiques de cette étude.

5.1 Présentation des logiciels existants :

5.1.1 ETAP – Risk Assessment

Le logiciel ETAP (Electrical Transient Analyzer Program) est une plateforme d'ingénierie électrique bien établie, utilisée pour la modélisation, l'analyse et la gestion des réseaux électriques. Parmi ses nombreux modules, le Lightning Risk Assessment (LRA) permet l'évaluation du risque de foudre conformément aux normes internationales telles que IEC 62305-2:2010 et NFPA 780.

Chapitre 3 : Évaluation du risque foudre et développement d'un outil logiciel basé sur la norme IEC 62305-2

Ce module permet d'identifier les zones critiques exposées à la foudre et d'évaluer les risques associés aux pertes humaines, matérielles, économiques ou culturelles. Il propose une interface graphique.

5.1.1.1 Fonctionnalités principales :

- Évaluation du risque de foudre pour les structures, incluant les risques internes et externes.
- Analyse des zones à risque (haute/basse) à partir d'un modèle graphique.

5.1.1.2 Avantages et limites du module Lightning Risk Assessment (LRA) du logiciel ETAP

L'analyse suivante présente de manière objective les principaux avantages et limites du module d'évaluation du risque foudre proposé par le logiciel ETAP, dans sa composante Lightning Risk Assessment (LRA).

➤ Avantages :

- **Interface graphique intuitive et modulaire** : le logiciel offre une interface conviviale permettant de modéliser graphiquement des structures en vue de dessus, avec une facilité d'insertion des dimensions et hauteurs.
- **Gestion structurée des éléments** : les différentes structures et lignes de service sont organisées dans un tableau synthétique, ce qui permet une gestion aisée (modification, renommage, suppression).
- **Intégration cartographique** : l'outil permet de localiser la structure sur une carte interactive, ce qui permet de récupérer automatiquement les paramètres régionaux de densité de foudroiement (Ng), améliorant ainsi la contextualisation de l'analyse.
- **Compatibilité avec les normes internationales** : le module LRA est conforme aux normes IEC 62305-2:2010 et NFPA 780:2014, ce qui le rend adapté à différents contextes réglementaires et géographiques.

Chapitre 3 : Évaluation du risque foudre et développement d'un outil logiciel basé sur la norme IEC 62305-2

➤ Limites :

- **Licence onéreuse** : l'accès au logiciel nécessite l'achat d'une licence coûteuse, ce qui peut constituer une contrainte pour les petites structures ou pour un usage académique.
- **Résultats peu détaillés** : le rapport final reste succinct, se limitant à une **indication binaire** (structure protégée ou non) sans justifications techniques approfondies ni suggestions précises d'amélioration.
- **Absence de recommandations techniques** : le logiciel **ne propose pas de solutions concrètes** pour la protection contre la foudre (type de système de protection, disposition, caractéristiques techniques...).
- **Impossibilité de définir les zones internes de la structure** : le module ne permet pas de distinguer différentes zones sensibles à l'intérieur de la structure analysée.
- **Nombre de paramètres limité** : l'analyse repose sur un nombre restreint de paramètres d'entrée, ce qui peut affecter la précision de l'évaluation, notamment pour des cas complexes.

5.1.2 Abb Furse StrikeRisk:

5.1.2.1 Présentation générale

StrikeRisk v6.0, développé par ABB (Furse), est un logiciel de gestion et de calcul de risque lié à la foudre, spécifiquement conforme aux exigences de la norme internationale IEC/EN 62305-2 (Risk Management) . Destiné aux ingénieurs, architectes et maîtres d'œuvre, il vise à automatiser l'ensemble des formalismes et tableaux normatifs de cette partie de la norme, afin de produire en quelques minutes des évaluations de risque qui exigeraient, manuellement, plusieurs heures à plusieurs jours de saisie et de calculs répétitifs .

5.1.2.2 Objectifs fonctionnels

L'objectif premier de StrikeRisk est de fournir un outil fiable et rapide pour déterminer la valeur de risque R, puis de la comparer à la valeur seuil RT pour chaque type de perte (directe ou indirecte) envisagée. Le logiciel prend en charge la définition des paramètres d'entrée suivants :

Chapitre 3 : Évaluation du risque foudre et développement d'un outil logiciel basé sur la norme IEC 62305-2

- **Influences environnementales** (densité de foudrolement, configuration géographique)
- **Caractéristiques de la structure principale** (dimensions, matériaux, configuration)
- **Structures secondaires et lignes connexes** (bâtiments adjacents, câblages extérieurs)
- **Zones de chaque structure** (partition selon des critères homogénéisés pour localiser finement le risque)

Ces données sont ensuite exploitées via un moteur de calcul interne implémentant fidèlement les formules et coefficients issus des annexes de l'IEC/EN 62305-2

5.1.2.3 Avantages et limites du module Lightning Risk Assessment du logiciel Strike Risk

L'analyse suivante présente de manière objective les principaux avantages et limites du module d'évaluation du risque foudre proposé par le logiciel Strike Risk

➤ Avantages

- **Automatisation complète des calculs** : exécution en quelques minutes de tous les calculs complexes de l'IEC/EN 62305-2, là où une saisie manuelle prendrait des heures voire des jours .
- **Gestion multi-scénarios (« Cases »)** : création, comparaison et sauvegarde de plusieurs configurations de protection au sein d'un même projet, facilitant l'optimisation par essais successifs
- **Zonage fin de la structure** : subdivision de l'ouvrage en zones homogènes pour localiser précisément les points à risque et ajuster les mesures de protection
- **Reporting riche et export** : génération de rapports complets ou synthétiques et exportables

➤ Limites

- **Licence onéreuse** : l'accès au logiciel nécessite l'achat d'une licence coûteuse, ce qui peut constituer une contrainte pour les petites structures ou pour un usage académique.
- **Résultats peu détaillés** : le rapport final reste succinct, se limitant à une indication binaire (structure protégée ou non) sans justifications techniques approfondies ni

Chapitre 3 : Évaluation du risque foudre et développement d'un outil logiciel basé sur la norme IEC 62305-2

suggestions précises d'amélioration.

- **Absence de recommandations techniques** : le logiciel **ne propose pas de solutions concrètes** pour la protection contre la foudre (type de système de protection, disposition, caractéristiques techniques...).
- **Pas de cartographie ni de dessin pour visualiser Ng** : le logiciel ne propose pas de carte interactive ni de plan de situation pour afficher la densité de foudroisement (Ng), ce qui contraint l'utilisateur à importer ou entrer ces données sans repère spatial.

5.1.3 Outils développés sous Excel

Face au coût élevé des licences des logiciels spécialisés comme ETAP ou StrikeRisk, certaines entreprises et bureaux d'études optent pour des solutions plus accessibles, notamment à travers le développement d'outils personnalisés sur Microsoft Excel. Ces outils, souvent basés sur la norme IEC 62305-2, permettent de réaliser les calculs d'évaluation du risque de foudre de manière semi-automatisée.

5.1.3.1 Objectifs et utilisation

Les outils Excel sont généralement conçus en interne ou partagés entre professionnels du secteur, et ont pour but de :

- Reproduire les calculs exigés par la norme (formules de risque, comparaison avec la valeur seuil RT, etc.) .
- Simplifier l'entrée des paramètres (densité de foudroisement, dimensions des structures, types de pertes...) via des interfaces sous forme de tableaux.
- Fournir des résultats rapides pour orienter les décisions techniques.

➤ Avantages

- **Accessibilité** : Excel est largement disponible, ce qui rend ces outils utilisables sans investissement logiciel supplémentaire .

Chapitre 3 : Évaluation du risque foudre et développement d'un outil logiciel basé sur la norme IEC 62305-2

- **Personnalisable** : les outils peuvent être adaptés à des besoins spécifiques, intégrant des options propres à chaque projet ou entreprise .
- **Bonne maîtrise des formules** : les ingénieurs peuvent vérifier, modifier ou compléter les équations utilisées selon les cas pratiques.

➤ Limites

- **Moins ergonomiques** : contrairement aux interfaces graphiques proposées par ETAP ou StrikeRisk, les outils Excel restent limités en visualisation (pas de cartographie, de modélisation 2D/3D, etc.) .
- **Risque d'erreurs manuelles** : l'absence de contrôles avancés peut entraîner des erreurs de saisie ou de formule .
- **Pas de mise à jour automatique** : ces outils ne bénéficient pas d'un support régulier ou d'une certification garantissant leur conformité aux dernières versions des normes.

6 Développement d'un outil logiciel basé sur la norme IEC 62305-2

À la lumière des limites identifiées dans les outils existants (ETAP, StrikeRisk, solutions Excel), il apparaît nécessaire de concevoir un outil logiciel personnalisé, capable de combiner la rigueur normative exigée par l'IEC 62305-2 avec la flexibilité, l'accessibilité, et la lisibilité des résultats.

Dans ce contexte, la société JGC Algeria, dans le cadre de ses activités d'ingénierie et de gestion de projets industriels, a exprimé le besoin de disposer d'un outil numérique fiable, rapide et conforme à la norme IEC 62305-2, capable d'assister ses ingénieurs dans la réalisation des études de risque foudre. Cet outil a pour objectif principal de simplifier l'application de la norme, tout en garantissant la traçabilité et la reproductibilité des résultats.

L'objectif de ce développement est de proposer une solution :

- Adaptée à des projets académiques ou professionnels à budget limité .

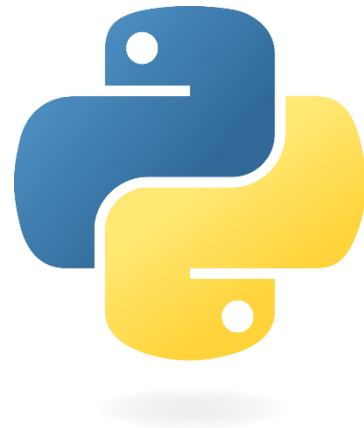
Chapitre 3 : Évaluation du risque foudre et développement d'un outil logiciel basé sur la norme IEC 62305-2

- Conforme aux exigences techniques et méthodologiques de la norme .
- Capable de produire des analyses transparentes, détaillées et justifiables.
- Facilement déployable et évolutive, en fonction des futurs besoins.

6.1 Choix technologiques

➤ Langage Python

Python est un langage de programmation interprété, de haut niveau, orienté objet, conçu à la fin des années 1980 par Guido van Rossum. Il est aujourd'hui l'un des langages les plus utilisés dans le monde, notamment dans les domaines du développement logiciel, du calcul scientifique, de l'intelligence artificielle et de l'automatisation industrielle.



Sa syntaxe simple, lisible et intuitive en fait un outil de choix pour les ingénieurs et les scientifiques, notamment dans le cadre de projets où la rapidité de développement et la clarté du code sont essentielles. Python permet également de concevoir des applications robustes, évolutives et multiplateformes, tout en bénéficiant d'un vaste écosystème de bibliothèques spécialisées.

➤ Bibliothèques utilisées dans le développement

Dans le cadre du développement de l'outil logiciel d'analyse de risque foudre conforme à la norme IEC 62305-2, plusieurs bibliothèques Python ont été mobilisées. Ces bibliothèques, toutes libres et bien documentées, couvrent différents aspects du programme : interface graphique, calculs mathématiques, géolocalisation, gestion des fichiers et visualisation cartographique.

Chapitre 3 : Évaluation du risque foudre et développement d'un outil logiciel basé sur la norme IEC 62305-2

1. Tkinter

`tkinter` est la bibliothèque standard de Python pour le développement d'interfaces graphiques (GUI). Elle permet de concevoir des fenêtres interactives contenant des boutons, des champs de saisie, des menus déroulants, etc. Elle constitue la base de l'interface utilisateur du logiciel développé.



2. `ttk`, `messagebox`, `filedialog` (module `tkinter`)

- `ttk` : fournit des widgets modernes et stylisés, basés sur les composants natifs du système d'exploitation.
- `Messagebox` : permet d'afficher des boîtes de dialogue pour informer l'utilisateur ou signaler des erreurs.
- `filedialog` : facilite la sélection de fichiers pour l'enregistrement ou le chargement de données.

3. `Math`

Le module `math` est utilisé pour les calculs mathématiques élémentaires tels que les racines carrées (`sqrt`) et les constantes (`pi`) nécessaires dans les formules de calcul de risque de la norme IEC 62305-2.

4. `Json`

La bibliothèque `json` permet de lire et d'écrire des fichiers au format JSON. Ce format a été utilisé pour stocker les données d'entrée ou enregistrer les résultats de manière structurée et exploitable.



5. `Requests`

La bibliothèque `requests` facilite les communications HTTP. Elle a notamment été utilisée pour interagir avec des services web externes, comme les API de géolocalisation ou de récupération de données météorologiques.

Chapitre 3 : Évaluation du risque foudre et développement d'un outil logiciel basé sur la norme IEC 62305-2

6. Geopy

`geopy` est une bibliothèque spécialisée dans la géolocalisation. Elle permet, via le service Nominatim d'OpenStreetMap, de convertir une adresse (ex. : ville, pays) en coordonnées GPS (latitude, longitude). Ces coordonnées peuvent ensuite être utilisées dans l'analyse ou pour afficher la structure sur une carte.



7. Datetime

Le module `datetime` est utilisé pour gérer les dates et heures, par exemple pour horodater automatiquement les résultats ou les enregistrements d'analyse.

8. tkintermapview

Cette bibliothèque permet d'intégrer une carte interactive directement dans une interface tkinter. Elle repose sur les données cartographiques d'OpenStreetMap, et permet à l'utilisateur de visualiser la position géographique de la structure à protéger.

6.2 Principales fonctionnalités

L'application "Lightning Risk Analysis Pro" intègre un ensemble de fonctions destinées à couvrir l'intégralité du processus d'évaluation du risque foudre, de la saisie des données jusqu'à la génération de rapports :

6.2.1 Environnement de dessin interactif

- Zone de dessin (canvas) montré sur la figure 3.4, permettant de tracer et d'annoter librement des formes pour représenter la vue en haut (rectangles, cercles, polygones,

Chapitre 3 : Évaluation du risque foudre et développement d'un outil logiciel basé sur la norme IEC 62305-2

traits, « Pointed Roof »).

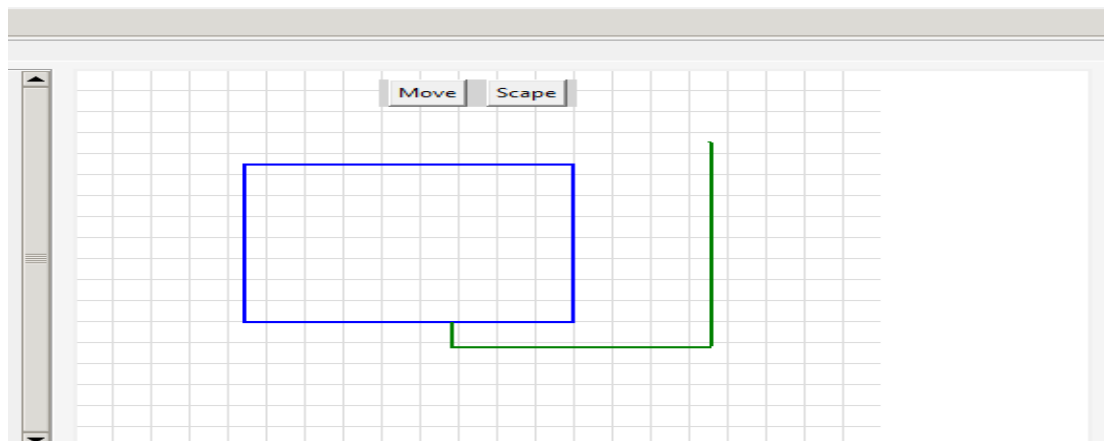


Figure 3.4 : Vue de la zone du dessin dans le logiciel

- Modes **Draw** et **Move** pour créer, déplacer ou redimensionner facilement les objets.
- Visualisation en temps réel des dimensions (mètres par pixel) et enregistrement automatique des entités dans un tableau récapitulatif. la figure 3.5 montre la vue du tableau ou les données de dessin sont enregistré.

Name	Building Height (m)	Width (m)	Lenght (m)	Surface (m ²)	Collection area Ad	Installation Factor C	Structure Type	Surrounding CE	Relative Location C	CT service type	Adjacent line conn
Rectangle 1	0	171.00	150.00	25650.00	25650.00		Main structure	1	0.25	1	
Line 1	0	0.00	195.00	0.00	0.00		Main structure	1	0.25	1	
Line 2	0	0.00	136.00	0.00	0.00		Main structure	1	0.25	1	
Line 3	0	0.00	24.02	0.00	0.00		Main structure	1	0.25	1	

Figure 3.5 : Vue du tableau ou les données de dessin sont enregistré.

6.2.2 Saisie des paramètres environnementaux

- Onglet **Environment** pour renseigner manuellement ou automatiquement la densité de foudroiement (Ng), les niveaux de protection (Pb, P_SPD), l'isolement électrique, etc. Ces données sont montrées sur la figure 3.6.
- Mise à jour dynamique des calculs dès que ces valeurs sont modifiées.

Chapitre 3 : Évaluation du risque foudre et développement d'un outil logiciel basé sur la norme IEC 62305-2

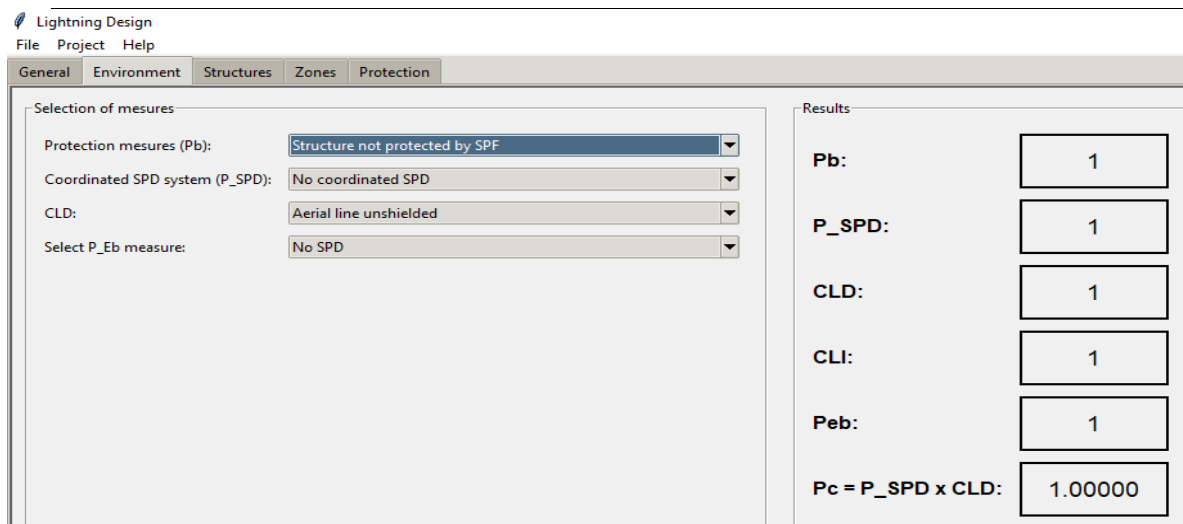


Figure 3.6 : Vue de la fenêtre Environnement dans le logiciel

6.2.3 Configuration des propriétés des structures

- Onglet **Structures** pour définir coefficients KS1/KS2 (valeurs standard ou « User defined »), types de pertes à évaluer (vie humaine, patrimoine culturel, économique, service public). La figure 3.7 montre un aperçu de la fenêtre Structure dans le logiciel.
- Gestion des structures secondaires et adjacentes (bâtiments voisins, câblages extérieurs).



Figure 3.7: Vue de la fenêtre Structure dans le logiciel

6.2.4 Gestion des lignes externes

- Onglet **Lines** pour lister les lignes (haute/basse tension, communications), indiquer leur « withstand voltage », niveau de blindage (Rs) et leur routage. La figure 3.8

Chapitre 3 : Évaluation du risque foudre et développement d'un outil logiciel basé sur la norme IEC 62305-2

montre le Tableau pour le saisie des paramètres complémentaires des lignes Zonage détaillé.

- Association ligne-structure pour tenir compte des influences croisées sur le risque.

Name	Type	Withstand Voltage (k)	Rs Shielded of line (V)	Routing	Ks4	PLd	PLi	coef RU	Coef RV
Line 1	Main structure	0.0	0.0	A	0.0	N/A	N/A	0.0000000000	0.0000000000
Line 2	Main structure	0.0	0.0	A	0.0	N/A	N/A	0.0000000000	0.0000000000
Line 3	Main structure	0.0	0.0	A	0.0	N/A	N/A	0.0000000000	0.0000000000

Please take in note the routing if not the same, change A to B

Figure 3.8: Tableau pour le saisie des paramètres complémentaires des lignes Zonage détaillé

- Onglet **Zones** pour subdiviser chaque ouvrage en zones homogènes (intérieures/extérieures), paramétrer leurs coefficients et calculer le risque spécifique chacune.
- Ajout, suppression et renommage de zones via des commandes intuitives (« + Add zones », « Delete zone »).

6.2.5 Moteur de calcul normatif

Application fidèle des formules et coefficients de la norme IEC 62305-2 :

- Détermination des composantes $R_a, R_b, R_c, R_u, R_v, R_z, R_w, R_m$.
- Calcul du risque total R et comparaison au seuil RT pour chaque type de perte.

6.2.6 Générateur de rapports

- Export automatisé des résultats sous forme de rapport synthétique ou détaillé, intégrant .
- Fiches de risques (indication binaire « Protection nécessaire » / « Pas de protection nécessaire »)

Chapitre 3 : Évaluation du risque foudre et développement d'un outil logiciel basé sur la norme IEC 62305-2

- Valeurs numériques, tableaux et justifications normatives.
- Possibilité d'enregistrer le rapport au format PDF.

6.2.7 Module de recommandations

- En cas de dépassement du seuil RT, proposition de pistes d'amélioration :
 - Ajout de dispositifs de protection (paratonnerres, SPD...)
 - Ajustement des coefficients ou redéfinition des zones.

6.2.8 Interface utilisateur ergonomique

- Organisation en onglets thématiques (General, Environnement, Structures, Lines, Zones, Protection) pour un parcours de saisie clair et linéaire.
- Tableaux de synthèse et menus déroulants facilitant la sélection des coefficients (Cd, Ct, Ce, KS1, KS2).
- Bouton **Refresh** ; montré sur la figure 3.9, pour recalculé instantané et codes couleur pour visualiser rapidement le statut de chaque entité.

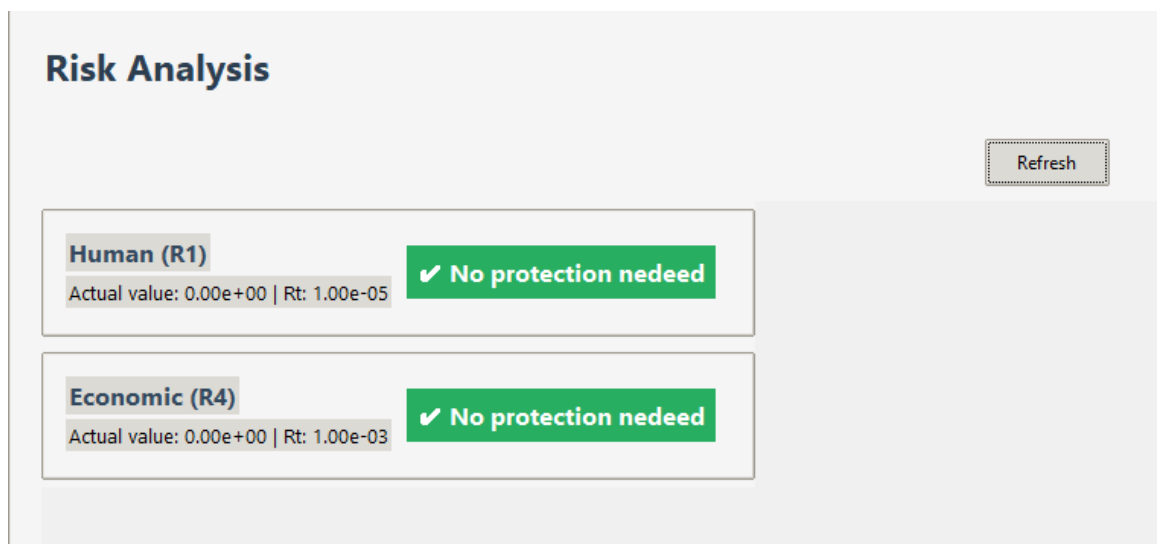


Figure 3.9: Affichage des résultats de calculs des risques

6.3 Avantages de notre logiciel par rapport aux solutions

existantes :

- **Accessibilité économique** : notre logiciel est proposé à un tarif abordable, voire gratuitement pour les établissements académiques et les petites structures, facilitant son adoption à large échelle.
- **Rapports détaillés et complets** : le logiciel génère des rapports approfondis, incluant non seulement le verdict de protection, mais également des justifications techniques précises et des suggestions claires d'amélioration.
- **Recommandations techniques intégrées** : en cas de risque détecté, notre outil propose automatiquement des solutions adaptées (type de système de protection, implantation optimale, caractéristiques techniques recommandées, etc.).
- **Définition précise des zones internes** : le module permet d'identifier et de caractériser différentes zones sensibles à l'intérieur de la structure, pour une analyse plus fine et ciblée.
- **Analyse enrichie par de nombreux paramètres** : notre logiciel prend en compte un large éventail de paramètres d'entrée, augmentant ainsi la précision et la pertinence des évaluations, même pour des cas complexes.

7 Conclusion

L'évaluation du risque foudre constitue une étape cruciale dans la mise en place de stratégies de protection efficaces et conformes aux exigences de la norme IEC 62305-2. Ce chapitre a permis de poser les bases théoriques et réglementaires de cette évaluation, tout en soulignant les enjeux concrets rencontrés par l'entreprise JGC Algeria S.p.A. Face à la complexité des calculs et à la nécessité de fiabiliser les analyses, le recours à un outil logiciel adapté s'impose comme une solution pertinente.

L'étude des besoins spécifiques de l'entreprise, croisée avec l'analyse des outils existants, a permis de dégager une approche méthodologique robuste pour le développement d'une application logicielle dédiée. La structure proposée vise à automatiser le calcul des différentes composantes du risque, à réduire les marges d'erreur humaines et à faciliter la prise de

Chapitre 3 : Évaluation du risque foudre et développement d'un outil logiciel basé sur la norme IEC 62305-2

décision en matière de protection contre la foudre. Cette démarche s'inscrit pleinement dans une logique d'optimisation technique et économique, tout en assurant une conformité stricte aux standards internationaux en vigueur. Dans le chapitre suivant, nous illustrerons concrètement la validité de cette approche logicielle à travers des cas d'application inspirés de la norme IEC 62305-2. Ces exemples permettront d'évaluer la pertinence des calculs automatisés, de vérifier leur conformité aux exigences normatives.

CHAPITRE 4

Validation du logiciel

1 Introduction

La validation du logiciel d'évaluation du risque foudre s'appuie sur une confrontation rigoureuse entre les résultats calculés par l'outil et les cas normatifs définis par la CEI 62305-2 dans l'annexe E. Cette démarche méthodologique permet non seulement de vérifier la conformité aux exigences internationales en matière de protection contre la foudre, mais aussi d'évaluer la précision, la robustesse et la cohérence des algorithmes mis en œuvre.

Dans ce cadre, trois études de cas représentatives ont été sélectionnées afin de couvrir un large spectre de configurations architecturales et environnementales :

- **Une maison de campagne** (Annexe E de la norme) pour un scénario simple, illustrant le calcul de l'aire de collecte, des coefficients environnementaux et de la probabilité de foudroiement.
- **Un immeuble de bureaux**, intégrant à la fois des lignes aériennes et enterrées, pour valider la prise en compte des différentes typologies de câblage (RS, KS, PLd/PLi) et leur influence sur le risque global.
- **Un hôpital**, présentant un cas complexe à zones multiples (zones de soins, parkings, bâtiments annexes), afin de tester la gestion des configurations imbriquées et l'agrégation des probabilités de dommage.

2 Méthodologie de validation

La validation suit un protocole en quatre étapes complémentaires

- **Reproduction des cas normatifs**
Saisie rigoureuse, dans l'interface, de tous les paramètres structurels (dimensions, hauteur), environnementaux (densité de foudroiement, configuration du terrain) et électriques (type et tension des lignes, dispositifs de protection) tels que définis dans la CEI 62305-2, afin de garantir une base de comparaison fiable.
- **Exécution automatisée**
Lancement sans intervention manuelle des calculs d'aire de collecte A_d , des probabilités et de l'évaluation des risques, avec génération automatique de rapports de résultats.

- **Analyse comparative**

Confrontation des résultats logiciels aux valeurs de référence normatives ou analytiques, en calculant l'écart relatif et en considérant acceptable tout écart inférieur ou égal à 2 %.

- **Tests de robustesse**

Vérification du comportement de l'application face à des scénarios d'exception : données manquantes, valeurs hors bornes, saisies non numériques, afin de s'assurer que le logiciel gère ces cas par des messages d'erreur clairs ou des valeurs par défaut sûres, sans plantage.

3 Études des cas

3.1 Maison de campagne

3.1.1 Contexte et objectifs

La première étude de cas porte sur une maison de campagne isolée (Figure 4.1). Implantée en terrain plat et isolé, la maison de campagne subit une densité de foudroiement $NG = 4$ éclairs/km²/an. Seules les cinq personnes à l'intérieur sont prises en compte, aucune présence extérieure n'étant supposée lors de l'orage. Seul le risque **R₁** (perte de vie humaine) est pris en compte, conformément à la décision du propriétaire, qui a renoncé à toute évaluation économique (**R₄**). L'objectif est de déterminer si une protection contre la foudre est nécessaire en comparant le risque calculé à la tolérance $RT = 10^{-5}$. La figure 4.1 montre un schéma représentatif de la maison de campagne.

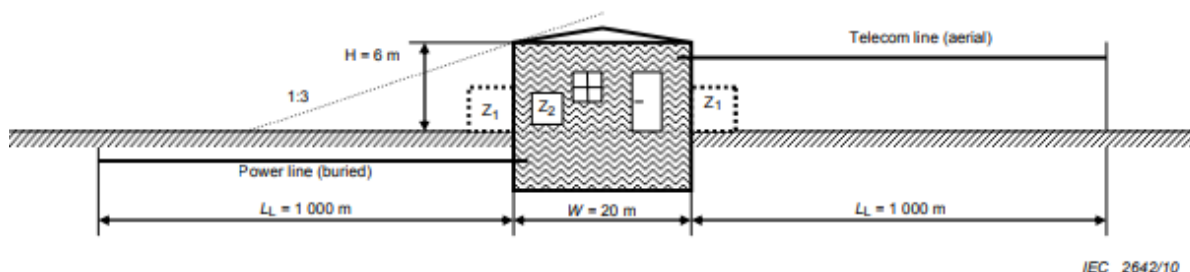


Figure 4.1 – Maison de campagne [38]

3.1.2 Référentiel Normatif

➤ Données géométriques et environnementales

Les paramètres utilisés pour cette étude montrés dans le tableau 4.1 sont tirés de la norme IEC 62305-2. Ils concernent les caractéristiques du site, de la structure, ainsi que des lignes entrantes.

Tableau4.1 : Tableau des données géométriques et environnementales

Paramètre d'entrée	Commentaire	Symbole	Valeur
Densité de foudroiement au sol (éclairs·km ⁻² ·an ⁻¹)	_____	N_G	4
Dimensions de la structure (m)	_____	L, W, H	15,20,6
Facteur de localisation de la structure	isolée	C_d	1
Dispositif de protection contre la foudre	Aucun	P_B	1
Liaison équipotentielle	Aucune	P_{EB}	1
Bouclier spatial externe	Aucun	K_{s1}	1

- **Les lignes extérieures**
 - A. Ligne électrique**

Les paramètres de la ligne électrique sont montrés dans le tableau suivant :

Tableau 4.2 : Tableau des paramètres des lignes électriques

Paramètre d'entrée	Commentaire	Symbole	Valeur
Longueur (m)	_____	L	1
Facteur d'installation	Enterrée	C_I	0.5
Facteur de type de ligne	Ligne Bt	C_T	1
Facteur environnemental	Rural	C_E	1
Protection de la ligne	Aucune	R_S	_____
Blindage, mise à la terre et isolation	Aucun	C_{LD}	1
		C_{LI}	1
Tension de tenue du système interne (kV)	_____	U_W	2.5
Paramètres résultants		K_{S4}	0.4
		P_{LD}	1
		P_{LI}	0.3

B. Ligne Telecom

Les paramètres de la ligne électrique sont montrés dans le tableau suivant :

Tableau 4.3 : Tableau des paramètres de la lignes Telecom

Paramètre d'entrée	Commentaire	Symbole	Valeur
Longueur (m)	_____	L	1
Facteur d'installation	Aérien	C_I	1
Facteur de type de ligne	Ligne Bt	C_T	1
Facteur environnemental	Rural	C_E	1
Protection de la ligne	Aucune	R_S	_____
Blindage, mise à la terre et isolation	Aucun	C_{LD}	1
		C_{LI}	1
Tension de tenue du système interne (kV)	_____	U_W	1.5
Paramètres résultants		K_{S4}	0.67
		P_{LD}	1
		P_{LI}	0.5

➤ Définition des zones

Le bâtiment est divisé en deux zones : Z1, correspondant à l'extérieur, et Z2, représentant l'intérieur. Étant donné qu'aucune personne n'est supposée se trouver à l'extérieur durant un orage, le risque de choc électrique (RA) y est nul. Par conséquent, la zone Z1 est exclue de l'analyse.

La zone Z2 englobe l'ensemble du bâtiment, en considérant que les systèmes internes (électricité et télécommunications) sont répartis sur toute la structure, qu'il n'existe pas de blindage spatial, que le bâtiment constitue un compartiment ignifuge unique, et que les pertes y sont constantes et représentatives d'un cas standard.

Calcul des grandeurs pertinentes :

Les paramètres spécifiques à chaque zone sont récapitulés dans le tableau suivant

Tableau 4.4 : Tableau des paramètres de la zone 2

Chapitre 4 : Validation du logiciel

Paramètre d'entrée		Commentaire	Symbole	Valeur
Type de sol		Linoléum	r_l	10^{-5}
Protection contre la foudre (structure))		Aucune	P_{TA}	1
Protection contre la foudre (ligne)		Aucune	P_{TU}	1
Risque d'incendie		Faible	r_f	10^{-3}
Protection incendie		Aucune	r_{ps}	1
Blindage spatial interne		Aucun	K_{s2}	1
Alimentation électrique	Câblage interne	Non blindé	K_{s3}	0.2
	Parafoudres (SPDs) coordonnés	Aucun	P_{SPD}	1
Télécommunication	Câblage interne	non blindé, grandes boucles	K_{s3}	1
	Parafoudres (SPDs) coordonnés	Aucun	P_{SPD}	1
Pertes humaines (L1)		Danger spécifique: aucun	h_z	1
		D1 : par tension de contact ou de pas	L_T	10^{-2}
		D2 : par blessure physique	L_f	10^{-1}
		D3 : par défaillance système	L_o	Non défini

Les paramètres suivants ont été calculés selon les formules de la norme citée dans le chapitre 3. Ils sont nécessaires pour évaluer les risques liés à la foudre dans la zone définie.

Chapitre 4 : Validation du logiciel

Le tableau ci-dessous (4.5) détaille les aires de collecte attribuées à la structure et aux différentes lignes d'alimentation, selon les prescriptions de la norme, en vue de l'évaluation des risques liés aux impacts de la foudre :

Tableau 4.5 : Tableau des résultats des surfaces de collections

	Symbole	Résultat
Structure	A_d	2.53×10^3
Ligne électrique	$A_{L/P}$	4×10^4
	$A_{I/P}$	4×10^6
Ligne télécom	$A_{L/T}$	4×10^4
	$A_{I/T}$	4×10^6

Le tableau suivant (4.6) présente l'estimation du nombre annuel d'événements dangereux pouvant affecter la maison de campagne, en fonction des caractéristiques du site, des lignes entrantes et de la densité de foudrolement locale.

Tableau 4.6 : Tableau des résultats d'estimation du nombre annuel d'événements dangereux

	Symbole	Résultat
Structure	N_d	1.03×10^{-2}
Ligne électrique	$N_{L/P}$	8×10^{-2}
	$N_{I/P}$	8
Ligne télécom	$N_{L/T}$	1.6×10^{-1}
	$N_{I/T}$	16

- **Évaluation des risques**

Cette section présente l'évaluation des différents composants de risques conformément à la norme CEI 62305-2. L'objectif est de calculer les risques liés à la perte de vie humaine et à la défaillance des systèmes internes, en tenant compte des caractéristiques de la structure, des lignes entrantes, ainsi que des données environnementales précédemment introduites.

- Composants de risque considérés

Dans le cas de cette maison isolée, seule la perte de vie humaine (L1) est prise en compte. Ainsi, le risque R1 est évalué à partir des composants suivants :

- **RA** : Risque dû aux chocs directs de personnes
- **RB** : Risque dû aux tensions de contact et de pas à l'intérieur,
- **RU** : Risque lié à la défaillance des systèmes internes,
- **RV** : Risque lié aux tensions de contact induites par les lignes

- **Calcul du risque R1**

Le risque global R1 est obtenu par la somme des composants ci-dessus. Ce risque est ensuite comparé à la valeur de référence tolérable ($R_T = 10^{-5}$) pour déterminer si des mesures de protection sont nécessaires.

- Zone 2 : risque calculé $R_1 = 2.51 \times 10^{-5}$

$$\text{Totale : } R_1 = 2.51 \times 10^{-5} > R_T = 10^{-5}$$

- **Résultat final**

Étant donné que $R_1 = 2.51 \times 10^{-5}$ est supérieur à la valeur tolérable $R_T = 10^{-5}$, la mise en place d'une protection contre la foudre pour la structure est requise.

3.1.3 Vérification des Résultats par Logiciel

Une simulation a été réalisée avec le logiciel spécialisé pour la protection contre la foudre. Cette étape vise à vérifier si les résultats obtenus par le logiciel sont conformes aux critères définis par la norme.

a. Paramètres des éléments de la structure :

Dans la fenêtre principale qui est montré sur la figure 4.2, la structure est dessinée en respectant précisément les dimensions spécifiées dans la norme. Ensuite, deux lignes extérieures, représentant les installations électriques et de télécommunication, sont tracées. Par la suite, dans le menu situé à gauche de l'écran, les caractéristiques des différentes formes dessinées (shapes) sont définies. Ces caractéristiques incluent des paramètres tels que le niveau kéraunique.

General Environment Structures Zones Protection

Cursor Position: (361, 263) Length = 1000.19998 m

Ng (Lightning strike density 1/km².year):
4

Relative Location Cd:
Isolated structure

CT service type:
Low voltage service

Surrounding CE:
Rural

Structure Type:
Telecom line Arial

Move Scape

Shape:
Line

Scale (meters/pixel):
10

Rename Shape:
Telecom

Rename

Set Height:
6

Set Height

Delete

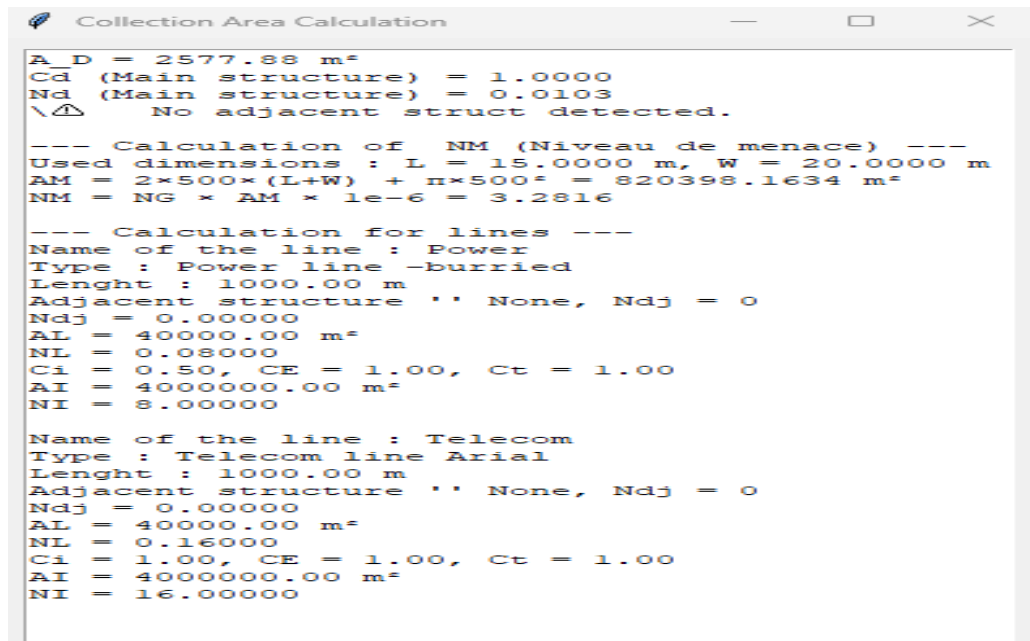
Calculate Collection Area

Name	Building Height (	Width (m)	Lenght (m)	Surface (m ²)	Collection area A	Installation Facto	Structure Type	Surrounding CE	Relative Location	CT service type
Structure main	6.0	20.00	15.00	300.00	2577.88		Main structure	1	1	1
Power	0	0.00	1000.05	0.00	0.00	0.5	Power line -burrie	1	1	1
Telecom	0	0.00	1000.20	0.00	0.00	1	Telecom line Aria	1	1	1

Figure 4.2 – Vue du saisie des paramètres dans la fenêtre générale

b. Affichage des surfaces de collection :

Il suffit de cliquer sur « Calculate Collection Area », et une fenêtre qui montré sur la figure 4.3 s'affichera avec les valeurs correspondantes. Cette action permet de visualiser rapidement les résultats calculés pour la structure de collecte.



```

Collection Area Calculation

A_D = 2577.88 m²
Cd (Main structure) = 1.0000
Nd (Main structure) = 0.0103
\⚠ No adjacent struct detected.

--- Calculation of NM (Niveau de menace) ---
Used dimensions : L = 15.0000 m, W = 20.0000 m
AM = 2×500×(L+W) + π×500² = 820398.1634 m²
NM = NG × AM × 1e-6 = 3.2816

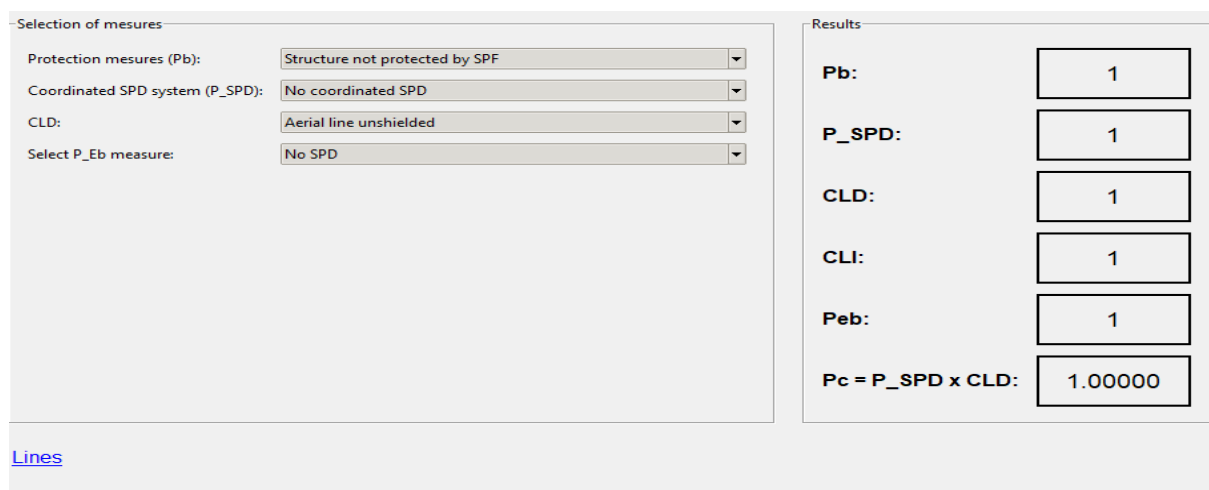
--- Calculation for lines ---
Name of the line : Power
Type : Power line -burried
Lenght : 1000.00 m
Adjacent structure '' None, Ndj = 0
Ndj = 0.00000
AL = 40000.00 m²
NL = 0.08000
Ci = 0.50, CE = 1.00, Ct = 1.00
AI = 4000000.00 m²
NI = 8.00000

Name of the line : Telecom
Type : Telecom line Arial
Lenght : 1000.00 m
Adjacent structure '' None, Ndj = 0
Ndj = 0.00000
AL = 40000.00 m²
NL = 0.16000
Ci = 1.00, CE = 1.00, Ct = 1.00
AI = 4000000.00 m²
NI = 16.00000
  
```

Figure 4.3 – Vue des résultats de la surface de collection et des paramètres liées à la structure et lignes

c. Définition des Probabilités et du reste des paramètres :

Dans la fenêtre « Environnement » montré sur la figure 4.4, les autres paramètres nécessaires sont définis conformément aux recommandations de la norme. Ces paramètres incluent des facteurs environnementaux tels que les mesures de protection, le niveau de protection s’il existe et autres.



Selection of mesures

Protection mesures (Pb): Structure not protected by SPF

Coordinated SPD system (P_SPD): No coordinated SPD

CLD: Aerial line unshielded

Select P_Eb measure: No SPD

Results

Pb: 1

P_SPD: 1

CLD: 1

CLI: 1

Peb: 1

Pc = P_SPD x CLD: 1.00000

[Lines](#)

Figure 4.4 – Vue du saisie des paramètres dans la fenêtre Environnement

d. Définitions paramètres restant pour les lignes :

En cliquant sur le lien intitulé « Lines » dans la fenêtre « Environnement », les informations restantes concernant les lignes sont renseignées ceci est montré sur la figure 4.5. Cela inclut des détails tels que la résistance extérieure des câbles, ainsi que les caractéristiques électriques et physiques nécessaires pour compléter la simulation.

List of lines drawn		Do not forget the routing take it into account if not the same change A to B					
Name	Type	Withstand Voltage (kV)	Rs Shielded of line (V)	Routing	Ks4	PLd	PLi
Power	Power line -burried	2.5kV	unshielded or shielded	A	0.400	1.0	0.3
Telecom	Telecom line Arial	1.5kV	unshielded or shielded	B	0.667	1.0	0.5

Please take in note the routing if not the same, change A to B

Figure 4.5 – Vue du saisie des paramètres restant des lignes

e. Risques à considérer :

Dans la fenêtre « Structure », les risques à prendre en compte pour la protection de la structure sont définis en cochant les options correspondantes. Dans notre cas, nous avons sélectionné le risque humain R1. La figure 4.6 montre un aperçu de l'onglet structure.

General	Environment	Structures	Zones	Protection
---------	-------------	-------------------	-------	------------

Coefficients

Ks1 (and Ks2): User defined

1

Results

Ks1: 1.00000 **Ks2:** 1.00000

Risks to be considered

☒ R1: Risk of loss of human life

☐ R2: Risk of loss of service to the public

☐ R3: Risk of loss of cultural heritage

☐ R4: Risk of loss of economic value

Figure 4.6 – Vue du saisie des paramètres dans la fenêtre Structure

f. Définitions des paramètres des zones :

Dans cette étape, les paramètres relatifs aux différentes zones de la structure sont définies. Chaque zone, en fonction de sa localisation et de son exposition aux risques de foudre, nécessite des caractéristiques spécifiques. Ces paramètres incluent le type du sol, risque contre le feu, et d'autres critères influençant la protection nécessaire. Ces données sont saisies dans la section dédiée du logiciel pour garantir une simulation précise et conforme aux exigences de la norme. La figure 4.7 montre une vue de la saisie des paramètres dans la fenêtre Zones.

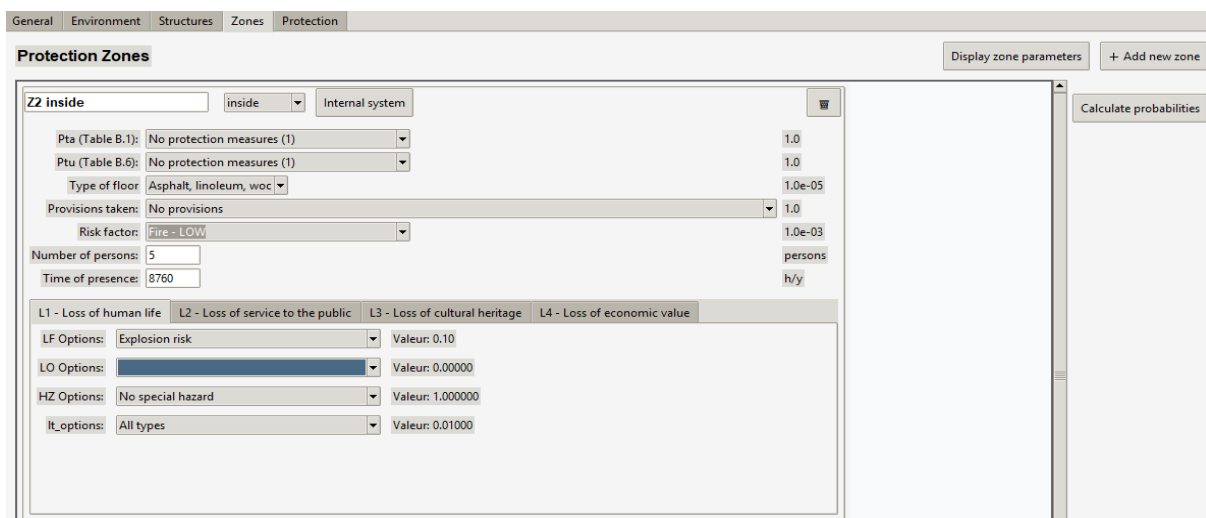


Figure 4.7 – Vue du saisie des paramètres dans la fenêtre Zones

g. Câblage interne :

En cliquant sur l'icône Inside », une fenêtre qui montrée sur la figure 4.8 apparaît permettant d'entrer les valeurs relatives au câblage interne.

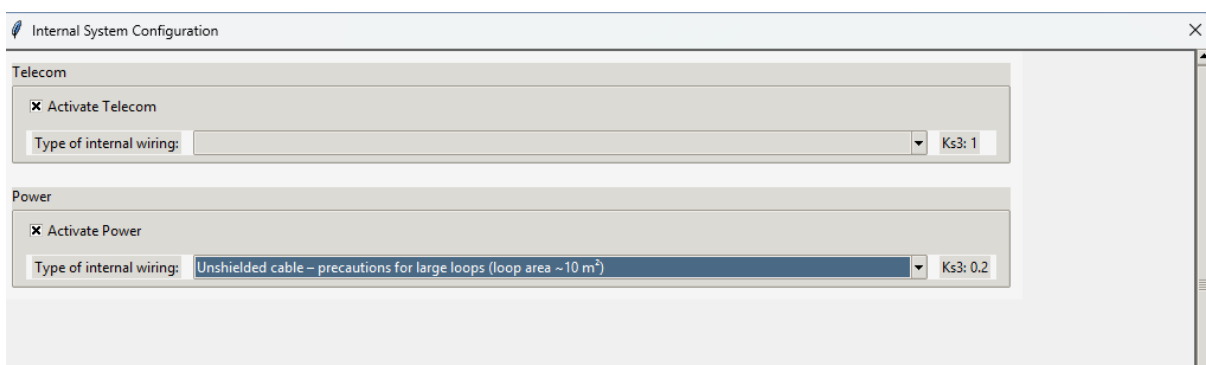


Figure 4.8 – Vue du saisie des paramètres du câblage interne

h. Affichage du risque calculé :

Dans la fenêtre « Protection » montré sur la figure 4.9, en cliquant sur le bouton « Refresh », la valeur du risque calculé est affichée. Cette valeur est automatiquement comparée avec celle du risque tolérable. Un message s'affiche ensuite pour indiquer si une protection est nécessaire ou non. Dans notre cas, la valeur du risque calculé était de $R1 = 2.50 \times 10^{-5}$.

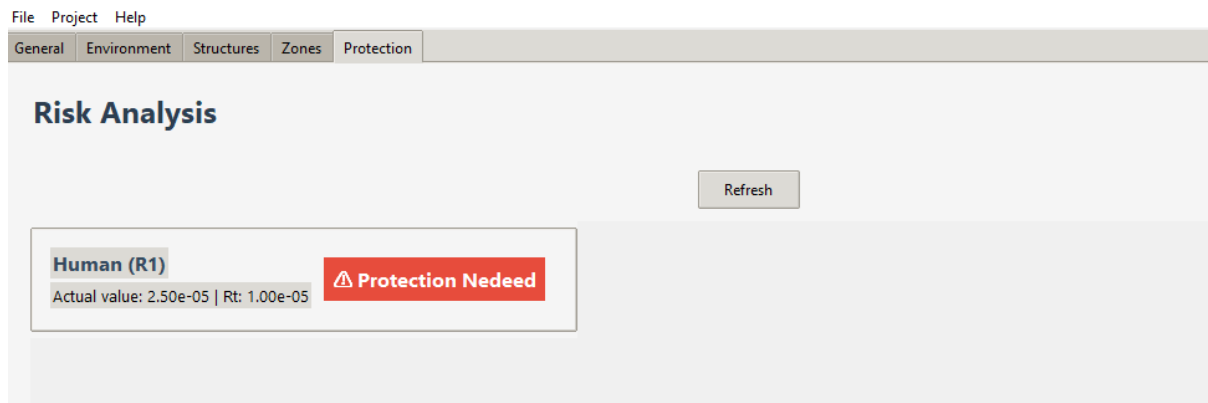


Figure 4.9– Affichage du résultat du risque calculé dans la fenêtre Protection

1. Interprétation des résultats

Les résultats obtenus à partir du logiciel sont très proches de la norme attendue, ce qui démontre la validité et la précision du modèle de calcul. En effet, la norme de référence pour R1 est donnée par la valeur $R1 = 2.50 \times 10^{-5}$, tandis que le logiciel a calculé une valeur de $R1 = 2.50 \times 10^{-5}$.

Cette légère différence de 1×10^{-8} entre les deux valeurs peut être attribuée aux arrondis numériques ou à des approximations dans les calculs effectués par le logiciel. Cette petite variation est négligeable au regard de l'échelle des valeurs, et ne remet donc pas en cause la fiabilité des résultats.

3.2 Bâtiment de bureaux

Afin de renforcer la validation du logiciel développé, un deuxième cas d'étude issu de la norme IEC 62305-2 a été utilisé : celui d'un bâtiment de bureaux comprenant des archives, des espaces de travail et un centre informatique. Ce cas est présenté dans la figure E.2 de la norme.

L'évaluation du risque R1 (lié à la perte de vies humaines - L1) a été effectuée, en tenant compte des composantes RA, RB, RU et RV, conformément à la méthode normative. Comme

Chapitre 4 : Validation du logiciel

pour l'exemple précédent, les étapes de calcul sont identiques ; elles ne seront donc pas détaillées à nouveau ici. La figure 4.10 montre un schéma représentatif de la structure à protéger.

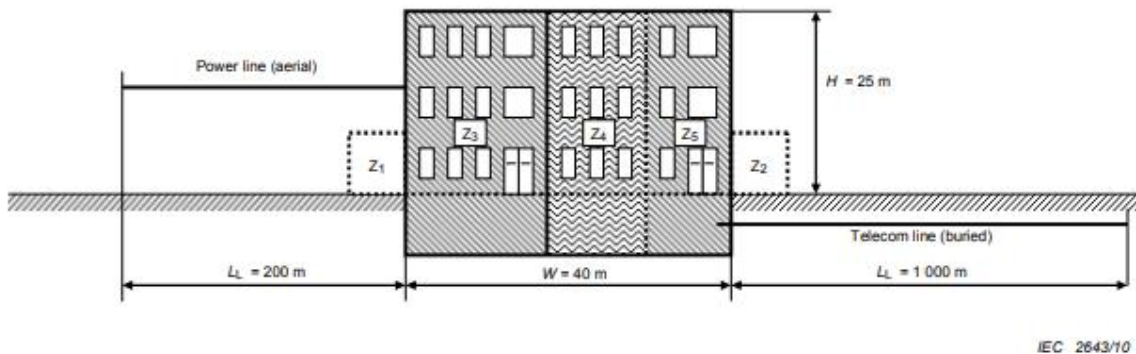


Figure 4.10– Bâtiment de bureaux [38]

Le résultat obtenu à partir de la norme montré sur la figure 4.11 donne un risque R1 égal à 9.75×10^{-5} , tandis que le logiciel développé fournit un résultat de 9.71×10^{-5} . La comparaison montre une bonne concordance entre les deux valeurs, validant ainsi la fiabilité du logiciel dans ce cas également.

Ce test permet de confirmer que l'outil reproduit fidèlement les résultats attendus par la norme, même pour des configurations de bâtiment différentes.

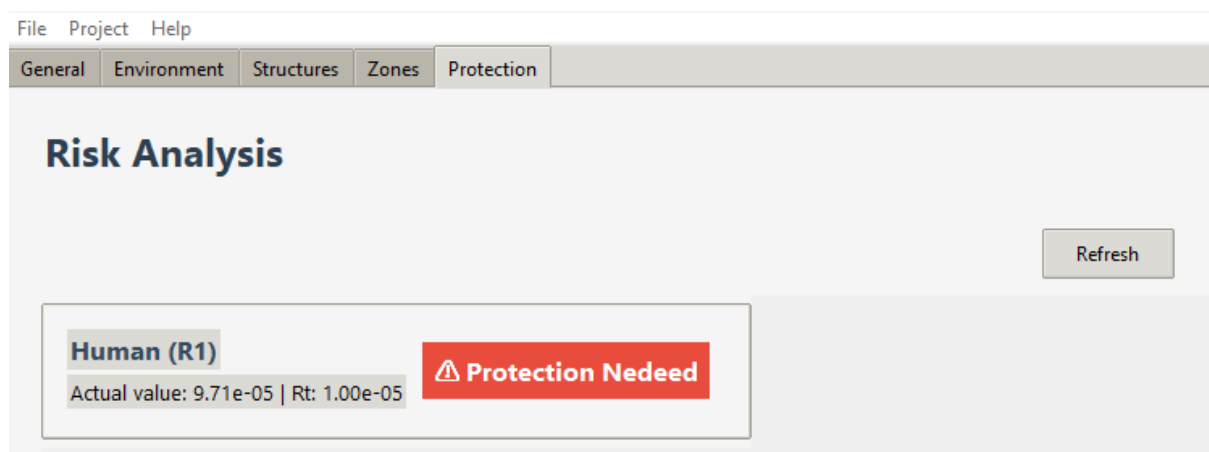


Figure 4.11– Valeur du risque calculé par le logiciel

4 Conclusion

En conclusion, la validation du logiciel a été réalisée avec succès et a permis de confirmer sa conformité avec les exigences de la norme applicable. Tout au long de ce processus, les résultats obtenus ont été soigneusement comparés avec les critères définis par la norme, garantissant ainsi la précision et la fiabilité des simulations effectuées. L'absence de divergences significatives entre les résultats calculés et les valeurs normatives montre que le logiciel respecte pleinement les critères techniques nécessaires à une analyse fiable des risques de foudre.

La validation de ce logiciel s'avère être une étape clé, car elle assure que l'outil est adapté pour la simulation et l'évaluation des systèmes de protection contre la foudre. Grâce à ses capacités de modélisation précises, il peut désormais être utilisé de manière fiable dans le cadre de la conception de structures et de la mise en place de dispositifs de protection, tout en garantissant la sécurité et la conformité avec les normes en vigueur.

Ainsi, cette validation marque une étape importante dans l'utilisation du logiciel pour des applications pratiques, et confirme qu'il constitue un outil efficace et pertinent pour la gestion des risques liés à la foudre dans le cadre de projets de protection.

Conclusion générale

Conclusion générale

Cette thèse s'est attachée à étudier de manière approfondie le phénomène de la foudre et les moyens de protection associés, en alliant des fondements théoriques, des outils de simulation numérique et une application concrète en environnement industriel. À travers une démarche progressive et structurée, nous avons abordé successivement la compréhension physique du phénomène, la modélisation du champ électrique, l'évaluation normative du risque et la conception d'un outil logiciel dédié à la gestion de ce risque.

Dans un premier temps, les mécanismes fondamentaux de formation des orages et de décharges électriques ont été examinés, en mettant en évidence les facteurs influençant les impacts de foudre au sol, notamment la topographie, la conductivité du sol et les champs électriques locaux. Cette base théorique a permis d'introduire des indicateurs clés, tels que le niveau kéraunique et la densité de foudroiement, indispensables à l'analyse du risque.

Dans un second temps, l'utilisation de la méthode des éléments finis via COMSOL Multiphysics a permis de simuler le comportement du champ électrique autour de structures protégées. L'étude a démontré l'importance des paramètres géométriques du paratonnerre, notamment la hauteur et le rayon de courbure de sa pointe, sur la distance d'amorçage et donc sur l'efficacité de la protection. Ces résultats confirment la pertinence des approches numériques pour optimiser les dispositifs de protection contre la foudre.

Par la suite, l'analyse du cadre normatif, notamment la norme IEC 62305-2, a mis en lumière les exigences rigoureuses relatives à l'évaluation du risque foudre. L'étude de cas menée au sein de l'entreprise JGC Algeria S.p.A. a révélé les limites des méthodes manuelles face à la complexité des calculs requis. Cela a motivé le développement d'un outil logiciel dédié, visant à automatiser le processus d'évaluation tout en assurant la conformité aux normes en vigueur.

Enfin, la validation du logiciel a confirmé son efficacité et sa fiabilité, à travers une comparaison rigoureuse des résultats avec les exigences normatives. L'absence de divergences significatives entre les simulations et les valeurs de référence atteste de la robustesse de l'outil. Ce dernier se présente désormais comme une solution opérationnelle pour accompagner les ingénieurs dans la conception et la mise en œuvre de systèmes de protection contre la foudre.

Conclusion générale

En somme, ce travail a permis de construire une chaîne cohérente allant de l'analyse fondamentale du phénomène jusqu'au développement d'une solution technologique concrète, répondant à un besoin industriel réel. Il ouvre la voie à des perspectives prometteuses en matière d'optimisation des dispositifs de protection et de digitalisation des outils de gestion du risque foudre, dans une optique de sécurité, d'efficacité et de conformité réglementaire.

Bibliographie

Référence

- [1] Claude Gary : La foudre : nature, histoire, risque et protection, Dunod, Paris, 2004.
- [2] G. Le Roy, C. Gary, B. Hutzler, J. Lacot, C. Dubaton : Les propriétés diélectriques de l'air et des isolants sous tensions, Éditions Eyrolles, Paris, 1984, pp. 92–251.
- [3] Ressource en ligne : *FAQ foudre*, Ressources naturelles Canada – Service canadien des forêts, disponible sur : http://fire.cfs.nrcan.gc.ca/faq_lightning_f.php, consulté le 13 mai 2025.
- [4] Alain Rousseau, Claude Gary, Gérard Berger : *Foudre et protection des bâtiments*, Techniques de l'Ingénieur, C3307, 2000
- [5] Philippe Dunand : Protection des installations électriques contre la foudre, Dunod, Paris, 2003.
- [6] M. Slimanou : *Lightning activity, keraunic level's map and insulation coordination*, 7th Regional Conference of National CIGRE Committees of Arab Countries, Amman, Jordanie, septembre 2007.
- [7] Ressource en ligne : *La physique des plasmas – Foudre*, Plasma Québec, disponible sur : <http://www.plasmaquebec.ca/Laphysiquedesplasmas/PlasmasNature/Foudre.htm>, consulté le 13 mai 2025.
- [8] T. Horvath : *Computation of Lightning Protection*, Research Studies Press Ltd, Angleterre, 1ère édition, 1991, pp. 1–76.
- [9] K. Mostefaoui : *Perturbations électromagnétiques dues à la foudre sur les lignes Haute Tension*, Thèse de magister, ENP, Alger, Algérie, 2005
- [10] F. Rachidi : *La foudre et ses effets électromagnétiques*, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, été 2004.
- [11] E. Kuffel, W.S. Zaengl, J. Kuffel : *High Voltage Engineering*, 2e édition, 2000.
- [12] Frédéric Maciala : *Parafoudre*, Techniques de l'Ingénieur, D4755, 1999
- [13] Alain Sabot, Jean Michaud : *Lignes et postes : choix et coordination des isolements*, Techniques de l'Ingénieur, D4750, 1999.
- [14] Ressource en ligne : *Protection contre la foudre – Gamme Paratonnerre*, HELITA, disponible sur : <http://www.helita.fr/>, consulté le 13 juin 2025.
- [15] Roland Aubert, Roland Talon : *Électricité dans le bâtiment*, Techniques de l'Ingénieur, C3751, 2001.
- [16] Ressource en ligne : *Foudre*, STIELEC – Académie d'Aix-Marseille, disponible sur : <http://www.stielec.ac-aix-marseille.fr/foudre>, consulté le 13 mai 2025.
- [17] J. Ferras : *Influence des propriétés électrogéologiques du sol sur le point d'impact de la décharge de foudre*, Thèse de magister, ENP, Alger, Algérie, 1987
- [18] A. Rahmani, A. Boubakeur, H. Brouri : Zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal dans le cas d'une terre discontinue, Conférence nationale sur la Haute Tension (CNHT'2002), Algerian Journal of Technology, numéro spécial, Ghardaïa, janvier 2002, pp. 144–147.
- [19] Pr. M. Tegar, *Technique de Haute Tension 2 (code : HT2) – Chapitre II : Surtensions – Partie I : Foudre et protection contre la foudre*, support PowerPoint, École Nationale Polytechnique d'Alger, 2025
- [20] Eriksson AJ. An improved electrogeometric model for transmission line shielding analysis. IEEE T Power Deliver 1987; 2: 871-886.
- [21] Rizk FAM. A model for switching impulse leader inception and breakdown of long air-gaps. IEEE T Power Deliver 1989; 4: 596-606.
- [22] Petrov NI, Waters RT. Determination of the striking distance of lightning to earthed structures. Proc R Soc Lon Ser-A 1995; 450: 589-601.

Référence

- [23] Lalande P. Study of the lightning stroke conditions on a grounded structure. Doctoral Thesis, a publication of Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales (ONERA), 1996.
- [24] Welter, R. (s.d.). *Matériaux diélectriques*. Université de Strasbourg.
- [25] Cooray V, Becerra M. Lightning Protection. The Institution of Engineering and Technology
- [26] A.H. Abu Bakar, A. Zainal Abidin, H.A. Illias, H. Mokhlis, S. Abd Halim, N.H. Nor Hassan, C.K. Tan, "Determination of the striking distance of a lightning rod using finite element analysis," **Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences**, vol. 27, no. 6, pp. 4374–4386, 2019
- [27] V. Cooray, J. Montano, A. Pedersen, "The Properties of Positive Streamers in Air at Atmospheric Pressure," *Journal of Electrostatics*, vol. 49, no. 4, pp. 245–256, 2000.
- [28] L. Guo, X. Lu, W. He, "Temporal Characteristics and Charge Density Distribution of Negative Streamers in Atmospheric Air," *Plasma Science and Technology*, vol. 24, no. 11, 115402, 2022.
- [29] J. Qin, V. P. Pasko, "Dynamics of Sprite Streamers in Varying Air Density Conditions," *Geophysical Research Letters*, vol. 42, no. 7, pp. 2055–2063, 2015
- [30] Moore CB, Aulich GD, Rison W. Measurements of lightning rod responses to nearby strikes. *Geophys Res Lett* 2000; 27: 1487-1490.
- [31] D'Alessandro F. Striking distance factors and practical lightning rod installations: a quantitative study. *J Electrostat* 2003; 59: 25-41.
- [32] PECB, **ISO 31000 Risk Management — Principles and Guidelines**, livre blanc, disponible sur : <https://pecb.com/whitepaper/iso-31000-risk-management--principles-and-guidelines>
- [33] Apave, **Analyse du Risque Foudre (ARF)**, disponible sur : <https://france.apave.com/prestation/analyse-du-risque-foudre-arf>
- [34] République Algérienne Démocratique et Populaire, **Décret exécutif n° 21-319 du 17 août 2021 relatif à la protection contre la foudre dans les établissements**, disponible sur : <https://cei-halfaoui.com/wp-content/uploads/2021/10/Decret-executif-n%C2%B0-21-319-Algerie.pdf>
- [35] Autorité de Régulation de l'Hydroélectricité (ARH), site officiel, disponible sur : <https://www.arh.gov.dz/>
- Sigma-HSE, **Lightning Risk Assessment: Ensuring Safety and Minimizing Hazards**, disponible sur : https://www.sigmahse.co.in/news/Lightning_Risk_Assessment_Ensuring_Safety_and_Minimizing_Hazards
- [36] G.T. Brandon, **Adoption of IEC 62305 as the Basis for One Major U.S. Electric Utility's Lightning Protection Standard**, Vaisala, disponible sur : https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/Adoption%20of%20IEC%2062305%20as%20the%20Basis%20for%20One%20Major%20U.S.%20Electric_G.T.%20Brandon.pdf
- [37] IEC 62305-2, **Protection against lightning – Part 2: Risk management**, International Electrotechnical Commission, 2e édition, 2010.

Annex A

Protection Zones Study Report

Date: 2025-06-08 00:30:28

Name: 
Company: 
Phone: 
Email: 

Study Description:



General Structure & Environment Parameters

Parameter	Symbol	Value
Ground flash density	Ng	10
Structure Length (m)	L	265.0
Structure Width (m)	W	217.0
Structure Height (m)	H	120.0
Location factor	Cd	0.25
Installation factor	Ci	
CT service type	CT	1
Surroundings	CE	1
Equipotential bonding	Pb	0.001
LPS factor	CLD	0
Structure factor	KS1	1.00000

Lines Parameters

Name	Category	Surroundings	Ci	CT	Withstand Voltage	Ks4	PLI	PLD	Rs Shield
Line 1	Power-Arial	1		1	6kV	0.1666666 66666666 66	0.1	0.1	Shielded whose shield bonded to the same bonding bar as equipment and 1W/km < RS <= 5 W/km
Line 2	Telecom-Buried	1		1	2.5kV	0.4	0.2	0.6	Shielded whose shield bonded to the same bonding bar as equipment and 1W/km < RS <= 5 W/km

Collection Area Parameters

Parameter	Symbol	Value
Collection area	A_D	811695.41
Cd main	Cd	0.2500
Nd main	Nd	2.0292
NL for Line 1	NL	0.0922
NI for Line 1	NI	9.2195

NL for Line 2	NL	0.0508
NI for Line 2	NI	5.0780

Zone: Ne

Zone Name	Ne
Zone Type	inside
Persons	7
Time Presence	8
L1_Factor for persons in zone	0.00091
Risk Factor	Explosion - Zones 0, 20 and solid explosive
Risk Factor Value	1.0
If	
LF Value	0
It	All types
LT_L1	All types
LT_L1 Value	0.01
Io	
Io_value	0
hZ	High level of panic (e.g. cultural or sport events with > 1000 persons)
HZ Value	10
If_I2	TV, telecommunications lines
LF_L2 Value	0.01
Io_I2	TV, telecommunications lines
LO_L2 Value	0.001
If_I3	10■ ¹ (Museums, galleries)
LF_L3 Value	0.10000
If_I4	Others
LF_L4 Value	0.1
It_I4	10■ ² All types
LT_L4 Value	0.01
Io_I4	Others
LO_L4 Value	0.0001
Floor Type Value	0.01
Provisions Taken Value	1.0
LA_L1	0.000000091324
Ra	0.000000000185
Lu_L1	0.000000091324
LB_L1	0.000000000000
RB1	0.000000000000
LV_L1	0.000000000000
LC_L1	0.000000000000
LW_L1	0.000000000000
LM_L1	0.000000000000

LZ_L1	0.000000000000
LFT_L1	1.000000000000
LB_L2	0.01000
LV_L2	0.010000000000
LC_L2	0.010000000000
Ca	10
Cb	10
Cc	10
Cs	120
Ct	150.0
ratio_ca_ct	0.06667
ratio_cs_ct	0.80000
ratio_ct_ctotal	1.00000
LA_L4	0.000066667
Ra4	0.000000013528
LB_L4	0.1000000000
LC_L4	0.0000800000
Cz	0
L3_Cz/Ct	0.0000000000
LB_L3	0.0000000000
RB2	0.000020292385
RB3	0.000000000000
RB4	0.000202923852
RM R1	0.000000000000
RM R2	0.000000000000
RM R4	0.000000000000
RC R2	0.000000000000
RC R4	0.000000000000
RC R1	0.000000000000
RU R1	0.000000000000
RU R4	0.000000000000
RV R1	0.000000000000
RV R2	0.000000000000
RV R3	0.000000000000
RV R4	0.000000000000
RW R1	0.000000000000
RW R2	0.000000000000
RW R4	0.000000000000
RZ R1	0.000000000000
RZ R2	0.000000000000
RZ R4	0.000000000000

R1	0.000000000185
R2	0.000020292385
R3	0.000000000000
R4	0.000202937380
Pta Value	1.0e+00
Ptu Value	1.0e+00
PU_POWER	0.0e+00
PU_TELECOM	0.0e+00
Ru_power	0.0e+00
Ru_telecom	0.0e+00

Zone: Total

Zone Name	Total
Zone Type	
Persons	7.0
Time Presence	
L1_Factor for persons in zone	
Risk Factor	
Risk Factor Value	
If	
LF Value	
It	
LT_L1	
LT_L1 Value	
Io	
Io_value	
hZ	
HZ Value	
If_I2	
LF_L2 Value	
Io_I2	
LO_L2 Value	
If_I3	
LF_L3 Value	
If_I4	
LF_L4 Value	
It_I4	
LT_L4 Value	
Io_I4	
LO_L4 Value	

Floor Type Value	
Provisions Taken Value	
LA_L1	
Ra	
Lu_L1	
LB_L1	
RB1	
LV_L1	
LC_L1	
LW_L1	
LM_L1	
LZ_L1	
LFT_L1	
LB_L2	
LV_L2	
LC_L2	
Ca	
Cb	
Cc	
Cs	
Ct	150.00000
ratio_ca_ct	
ratio_cs_ct	
ratio_ct_ctotal	
LA_L4	
Ra4	
LB_L4	
LC_L4	
Cz	0.00000
L3_Cz/Ct	
LB_L3	
RB2	
RB3	
RB4	
RM R1	
RM R2	
RM R4	
RC R2	
RC R4	
RC R1	
RU R1	

RU R4	
RV R1	
RV R2	
RV R3	
RV R4	
RW R1	
RW R2	
RW R4	
RZ R1	
RZ R2	
RZ R4	
R1	0.000000000185
R2	0.000020292385
R3	0.000000000000
R4	0.000202937380
Pta Value	
Ptu Value	
PU_POWER	
PU_TELECOM	
Ru_power	0.0e+00
Ru_telecom	0.0e+00

Risk Calculation Summary

Zone	Calculated Risk R1
Ne	1.85e-10
Total	1.85e-10