

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



Mémoire de Fin d'Étude

Présenté à

L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Réseaux électriques

Présenté par

BELILA Khaled et DJEDID Med El Mehdi

Thème

Modélisation du Champ Electrique dans un Système Tige-Plan avec paratonnerre vertical sous Tension de Choc de Foudre

Soutenu le 26/05/2016. Devant le jury composé de :

Mr. GUIA Talal.

Maitre de conférences Président

Mr. KHECHEKHOUCHe Ali.

Maitre de conférences Rapporteur

Mr. MERAZGA Ezzeddine.

Maitre de conférences Examineur

Année Universitaire 2015/2016

REMERCIEMENT

Nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir prêté force patience et courage afin d'achever nos études en restant en bonne et parfaite santé.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à tous ceux qui ont contribué à élaborer ce modeste travail :

A monsieur Khechkehouche Ali notre encadreur pour ses conseils et directives.

A monsieur Guia Talal pour son aide.

A monsieur Merarga Exddine.

Aux membres du jury qui ont respecté leurs critiques et orientation.

Comme nous remercions profondément l'ensemble des enseignants qui ont veillé pour notre formation.

Et en fin nous remercions tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin pour mener à bien notre projet de fin de cycle.

Merci

Dédicace

Je dédie ce travail à :

- ☞ *Mes père et ma mère première la deuxième.*
- ☞ *Mes grandes parents et mes grand mères.*
- ☞ *Mes frères et sœurs .*
- ☞ *Mes oncles chacun par son nom.*
- ☞ *Mes fidèles amis chacun par son nom.*
- ☞ *Me partenaire dans un travail « Djedid Med El mehdi ».*
- ☞ *Mont aide mes professeurs mon encadreur
« Khechekhouché Ali ».*
- ☞ *Tout la promotion master 2016.*

BELILA KHALED

Dédicace

Je dédie ce travail à :

- ☞ *Mes très chers parents et ma mère de et qui m'a offert le soutien morale afin de réussir mes buts dans étude*
- ☞ *Mes frères et sœurs.*
- ☞ *Tous mes parents*
- ☞ *M'ont aidé mes professeur « M. Khechkehouche Ali »*
- ☞ *mes amis dans étude et travail*
- ☞ *ma partenaire << Belila Khaled >>*
- ☞ *A tout la promotion 2016*

DJEDID MED ELMEHDI

ملخص:

درسنا في هذا العمل توزيع الحقل الكهربائي على صفيحة متجانسة بوجود مانعة الصواعق في وضعها العمودي في نظام نقطة مع صفيحة.

وبعد الدراسة لاحظنا أنه كلما زاد طول مانعة الصواعق العمودية نقص الحقل الكهربائي بجوارها وينعدم تحتها أي بمعنى أن خطوط الحقل الكهربائي تتجمع في رأس مانعة الصواعق، وأيضاً كلما ابتعدت مانعة الصواعق عن مكان سقوط البرق نلاحظ أن قيمة الحقل الكهربائي زادت في المسقط العمودي للبرق.

الكلمات المفتاحية: الحقل الكهربائي، صفيحة متجانسة، مانعة الصواعق العمودية، نظام نقطة مع صفيحة، البرق، جهد نبضة البرق

Résumé :

L'objectif de notre travail est de déterminer expérimentalement l'intensité du champ électrique sur la surface d'un plan homogène en prés en ce d'un paratonnerre vertical dans un système tige- plan.

Nous constatons que pour les grandes hauteurs du paratonnerre (h/h_c est petit) la valeur du champ électrique est faible. Ceci peut être expliqué par le fait que plus le paratonnerre a une hauteur élevée plus il attire un plus grand nombre de lignes de champ, aussi au fût et à mesure que le paratonnerre s'éloigne de la tige HT (D/h_c augmente), on remarque que le champ augmente, cas où le paratonnerre n'a pratiquement aucune influence (valeur du champ égale à celle correspondant à la configuration sans paratonnerre).

Mots-clés : champ électrique, plan homogène, paratonnerre vertical, système tige-plant, la foudre, tension d'impulsion.

Abstract:

The aim of our work is to experimentally determine the intensity of the electric field on the surface of a homogeneous plan meadows in a vertical lightning rod in a rod-plane system.

We note that for the great heights of the lightning rod (h / h_c is small) the value of the electric field is weak. This can be explained by the fact that over the lightning rod has high height more it attracts a larger number of field lines, and also to fût as the lightning away from the HV pin (D / h_c increases) we note that the field increases, if the lightning rod has practically no influence (field value equal to that corresponding to the lightning rod without configuration).

Keywords: electric fierd, homogeneous plane, vertical lightning rod, rod-plant system, lightning, pulse voltage

Chapitre I: Foudre et la protection contre la foudre

Figure .I.1: Eclaire de la foudre, image prise en Floride USA.....	03
Figure .I.2: Répartition du champ électrique dans un nuage orageuse.....	04
Figure .I.3: Catégories de coups de foudre.....	05
Figure .I.4: Développement du traceur par pas (stepped leader).....	06
Figure .I.5: Développement de l'arc en retour (return stroke).....	07
Figure .I.6: Traceur obscur (d'art leader) et arc en retour subséquent (subséquent return stroke)	07
Figure.I.7: Séquence traceur descendant – arc en retour dans éclair.....	07
Figure .I.8: ondes typiques de tension et de courant dans le canal de la foudre.....	08
Figure .I.9: Forme d'onde de choc de foudre normalisée par la CEI.....	09
Figure .I.10: Distribution Statistique des coups de foudre.....	10
Figure .I.11: Point d'impact sur une structure au sol.....	12
Figure .I.12: Système tige-plan avec terre mauvaise conductrice.....	12
Figure .I.13: Influence de la conductivité et de l'épaisseur de la couche mauvaise conductrice sur la tension à 100% de décharges disruptives ($U_{100\%}$).....	13
Figure .I.14: La tension à 50% de décharges disruptives ($U_{50\%}$) en fonction de la conductivité du sol ($e=5\text{cm}$).....	14
Figure .I.15: Système tige-plan avec terre hétérogène.....	15
Figure .I.16: Tension $U_{50\%}$ en fonction de la distance dans le cas de la tige négative.....	
(a) $h = 4\text{cm}$ (b) $h = 14\text{cm}$	15
Figure .I.17: Configuration du système tige-plan avec sol discontinu.....	16
Figure .I.18: Variation de $U_{50\%}$ en fonction de la distance d	16
Figure.I.19: Modèle expérimental de terre discontinue en présence de la sonde à capacité répartie.....	17
Figure .I.20: Champ électrique au sol en fonction de la position (d/h) de la sonde $h=12\text{cm}$	17
Figure .I.21: Champ électrique au sol en fonction de la position (d/h) de la sonde $h=16\text{cm}$	18
Figure .I.22: Champ électrique mesuré au sol en fonction de la position (d/h) de la sonde $h = 12 \text{ cm}$	18
Figure .I.23: Champ électrique mesuré au sol en fonction de la position (d/h) de la sonde $h = 16 \text{ cm}$	18

Chapitre II: Techniques expérimentales

Figure.II.1: Schéma simplifié d'un étage d'un générateur de choc.....	20
Figure.II.2: Forme d'onde de choc de foudre.....	22
Figure.II.3: Panneau de contrôle utilisé pour effectuer les tests.....	23
Figure.II.4: Transformateur à haute tension utilisé pour l'essai de claquage de l'a.....	24
Figure.II.5: Modèle expérimental du système tige - plan sans paratonnerre.....	27
Figure.II.6: Modèle expérimental du système tige - plan avec paratonnerre.....	27

Chapitre III:Simulation et interpretation des resultats

Figure. III .01 : Détermination des tensions $U_{0\%}$ pour les différentes hauteurs de la tige haute tension.....	31
Figure .III .02: Evolution de la tension $U_{0\%}$ en fonction de l'intervalle d'air h.....	32
Figure .III .03: Modèle de la simulation son paratonnerre.....	33
Figure .III .04: Distribution du champ électrique sans paratonnerre pour h=80cm.....	34
Figure. III .05 : Le courbe de distribution du champ électrique sans paratonnerre.....	34
Figure .III . 06: Distribution du champ électrique sans paratonnerre pur h=10cm.....	35
Figure. III .07: Le courbe de distribution du champ électrique sans paratonnerre.....	35
Figure. III .08: Modèle de la simulation avec paratonnerre.....	38
Figure .III .09: Distribution du champ électrique avec paratonnerre D=0cm.....	38
Figure .III .10: Le courbe de distribution du champ électrique avec paratonnerre D=0cm.....	39
Figure. III . 11: Distribution du champ électrique avec paratonnerre D=2cm.....	39
Figure. III . 12: Le courbe de distribution du champ électrique avec paratonnerre D=2cm.....	40
Figure .III .13: Distribution du champ électrique avec paratonnerre D=4cm.....	40
Figure. III .14: Le courbe de distribution du champ électrique avec paratonnerre D=4cm.....	41
Figure .III .15: distribution du champ électrique avec paratonnerre D=6cm.....	41
Figure. III .16: Le courbe de distribution du champ électrique avec paratonnerre D=6cm.....	42
Figure.III .17: Distribution du champ électrique avec paratonnerre D=8cm.....	42
Figure. III.18: Le courbe de distribution du champ électrique avec paratonnerre D=8cm.....	43
Figure .III .19: distribution du champ électrique avec paratonnerre D=3cm.....	43
Figure III .20: Le courbe de distribution du champ électrique avec paratonnerre D=3cm.....	44
Figure .III .21: distribution du champ électrique avec paratonnerres D=6cm.....	44
Figure .III .22: Le courbe distribution du champ électrique avec paratonnerre D=6cm.....	45
Figure.III.23: distribution du champ électrique avec paratonnerre D=12cm.....	45

LISTES DES FIGURE

Figure. III .24: Le courbe de distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=12\text{cm}$	46
Figure. III .25: distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=4\text{cm}$	46
Figure. III .26: Le courbe distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=4\text{cm}$	47
Figure. III .27: distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=8\text{cm}$	47
Figure .III .28: Le courbe de distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=8\text{cm}$	48
Figure .III .29: distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=16\text{cm}$	48
Figure. III .30: Le courbe distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=16\text{cm}$	49
Figure .III .31: Distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=0\text{cm}$	49
Figure .III.32: Le courbe de distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=0\text{cm}$	50
Figure. III .33: Distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=2\text{cm}$	50
Figure .III.34: Le courbe de distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=2\text{cm}$	51
Figure .III .35: Distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=5\text{cm}$	51
Figure .III.36: Le courbe de distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=5\text{c}$	52
Figure. III .37: Distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=10\text{cm}$	52
Figure. III.38: Le courbe de distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=10\text{cm}$	53
Figure. III .39: Distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=0\text{cm}$	53
Figure .III.40: Le courbe de distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=0\text{cm}$	54
Figure. III . 41: Distribution du champ électrique avec paratonnerre.....	
$D=3\text{cm}$	54
Figure. III.42: Le courbe de distribution du champ électrique avec paratonnerre.....	
$D=3\text{cm}$	55
Figure .III .43: Distribution du champ électrique avec paratonnerre.....	
$D=5\text{cm}$	56
Figure .III.44: Le courbe de distribution du champ électrique avec paratonnerre.....	
$D=5\text{c}$	56
Figure. III .45: Distribution du champ électrique avec paratonnerre.....	
$D=7\text{cm}$	57
Figure. III.46: Le courbe de distribution du champ électrique avec paratonnerre	
$D=7\text{cm}$	57
Figure .III .47: Distribution du champ électrique avec paratonnerre.....	
$D=14\text{cm}$	58
Figure .III.48: Le courbe de distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=14\text{cm}$	59
Figure. III .49: Distribution du champ électrique avec paratonnerre.....	
$D=0\text{cm}$	59

LISTES DES FIGURE

Figure .III .50: le courbe de Distribution du champ électrique avec paratonnerre D=0cm.....	60
Figure. III .51: Distribution du champ électrique avec paratonnerre D=5cm.....	60
Figure .III .52: le courbe de Distribution du champ électrique avec paratonnerre D=5cm.....	61
Figure. III .53: Distribution du champ électrique avec paratonnerre D=10cm.....	61
Figure. III .54: le courbe de Distribution du champ électrique avec paratonnerre D=10cm	62
Figure. III .55: Distribution du champ électrique avec paratonnerre D=20cm.....	62
Figure. III .56: le courbe de Distribution du champ électrique avec paratonnerre D=20cm.....	63

Listes des tableaux:

Tableau II.1: Configuration considérées pour les mesures a)-h=8cm;b)-h=10cm.....	28
---	----

LISTS DES SYMEBOL

S.C.R : la méthode de la sonde à capacité répartie.

T.R: Transformateur de réglage.

T.H.T: Transformateur de haute tension.

D: Redresseur.

R_c: Résistance de charge.

R_s: Résistance série équivalente.

R_p: Résistance parallèle équivalente.

C₁: Condensateur de choc.

C₂: Condensateur de charge.

T.H.T : transformateur de haute tension .

EDP: les équations aux dérivées partielles.

AC: courant alternative.

DC: courant continu.

HT: haute tension.

δ: influence de la densité de l'air.

SOMMAIRE.		
	<i>Introduction générale</i>	01
<i>CHAPITRE I</i>	GENERALITES SUR LA Foudre	03
	INTRODUCTION	03
I.1.	<i>LA Foudre ET LE MECANISME DE LA FORMATION DE L'ORAGE</i>	03
I.2.	<i>CATEGORIES DE COUPS DE Foudre</i>	04
I.2.1.	<i>Décharges négatives nuage-sol</i>	05
I.3.	<i>L'ENERGIE DE LA Foudre</i>	08
I.4.	<i>PARAMETRES ELECTRIQUES DE LA Foudre</i>	08
I.5.	<i>LES EFFETS DE LA Foudre</i>	10
I.6.	<i>PROTECTION CONTRE LA Foudre</i>	11
I.6.1.	<i>Point d'impact</i>	11
I.7.	<i>INFLUENCE DES PROPRIETES ELECTROGEOLOGIQUES DU SOL SUR RIGIDITE DIELECTRIQUE DE L'AIR</i>	12
I.7.1.	<i>Cas d'un sol homogène mauvais conducteur</i>	12
I.7.2.	<i>Cas d'un sol hétérogène</i>	15
I.7.3.	<i>Cas d'un sol discontinu</i>	16
	CONCLUSION	19
<i>CHAPITRE II</i>	TECHNIQUES EXPERIMENTALES	20
	INTRODUCTION	20
II.1.	<i>GENERATION DES ONDES DE CHOC</i>	20
II.1.1.	<i>Générateur de choc</i>	20
II.1.2.	<i>Tension de choc délivrée</i>	21
II.2.	<i>DESCRIPTION DE L'EQUIPEMENT UTILISE POUR LA MESURE DE TENSION DE CLAQUAGE DE L'AIR</i>	22
II.2.1.	<i>Panneau de contrôle</i>	22
II.2.2.	<i>Disjoncteur</i>	23
II.2.3.	<i>Transformateur à haute tension</i>	24
II.2.4.	<i>Filtre à haute tension</i>	24
II.2.5.	<i>Diviseur de tension</i>	25
II.3.	<i>DETERMINATION DE LA TENSION U₀%</i>	25
II.4.	<i>CORRECTIONS ATMOSPHERIQUES</i>	25
II.4.1.	<i>Influence de la densité de l'air</i>	25
II.4.2.	<i>Influence de l'humidité</i>	26
II.5.	<i>MODÈLE EXPERIMENTAL</i>	26

Sommaire

<i>CHAPITRE III</i>	<i>SIMULATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS</i>	29
	<i>INTRODUCTION</i>	29
III.1.	<i>SYSTEME TIGE-PLAN SANS PARATONNERRE</i>	30
III.1.1.	<i>Détermination de la tension $u_0\%$</i>	30
III.1.2.	<i>Distribution du champ électrique au sol</i>	32
III.1.3.	<i>Discussion sur l'effet du paratonnerre</i>	32
III.2.	<i>SYSTEME TIGE- PLAN AVEC PARATONNERRE</i>	36
III.2.1.	<i>Influence de la position du paratonnerre</i>	36
III.2.2.	<i>Influence de la hauteur du paratonnerre</i>	37
	<i>CONCLUSION</i>	62
	<i>CONCLUSION GÉNÉRAL</i>	63
	<i>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES</i>	64

Introduction
générale

INTRODUCTION GENERALE

La foudre est un phénomène naturel qui a surpris et effrayé l'homme à travers les âges, un courant électrique passe d'un nuage à un autre ou d'un nuage à la terre de la même manière que circule la tension dans l'installation de votre maison.

Les principales études, dans le but d'atteindre une meilleure protection, avaient pour objet l'explication du phénomène physique de la décharge électrique. Ces investigations ont permis d'élaborer une méthode de détermination de la zone de protection. Cette méthode est basée sur une nouvelle connaissance du mécanisme d'impact de la foudre, et est mise en œuvre au moyen d'un modèle appelé « modèle électro géométrique ». Bien que ce dernier constitue, néanmoins, une approche cohérente de la protection contre la foudre dans le cas d'un sol homogène et parfaitement conducteur, hypothèse rarement rencontrée en réalité, il ne présente pas une perfection absolue. En effet, sa formulation simplifiée actuelle néglige un grand nombre de paramètres essentiels à une bonne détermination des points d'impact de la foudre. Parmi ces paramètres, les propriétés électro géologiques semblent avoir une influence importante sur les caractéristiques des décharges atmosphériques.

Le premier chapitre de ce mémoire débute par un exposé sur la physique des orages et les caractéristiques électriques de la foudre. La compréhension de ces phénomènes nous aide à concevoir un tel système de protection contre la foudre. Nous présentons ainsi une brève description des mécanismes d'impacts, qui expliquent comment se décide le point de chute d'un coup de foudre. Nous analysons ensuite le foudrolement des lignes aériennes et les processus de formation des défauts. Ainsi, nous décrivons les techniques de protection par câble de garde qui font appel aux modèles électro géométriques.

avec la présentation de l'influence des propriétés électro géologiques du sol sur le point d'impact de la foudre en présence d'un paratonnerre horizontal et vertical . Les principaux résultats d'investigations sur des terres homogènes, hétérogènes et discontinues sont analysés. En effet, notre étude accomplit celle faite récemment au Laboratoire de l'ENP sur les zones d'attraction d'un paratonnerre vertical dans le cas d'une terre discontinue.

INTRODUCTION GENERALE

Les techniques expérimentales utilisées dans notre étude sont présentées avec soin dans le deuxième chapitre.

Ensuite, nous présentons dans le troisième chapitre les différents résultats qui mettent en relief l'influence de plusieurs paramètres sur la distribution du champ électrique au sol au présence d'un paratonnerre vertical dans le cas de terre homogène bonne conductrice.

Chapitre I

INTRODUCTION:

Dès le commencement du transport de l'énergie électrique, les ingénieurs ont été confrontés à la foudre et ses effets sur les ouvrages tels que les lignes ou les postes d'extrémités. Ils se sont rapidement aperçus que ce phénomène atmosphérique constituait l'une des contraintes majeures dont il fallait tenir compte. Malgré le grand nombre de travaux consacrés à la foudre par les chercheurs de nombreux pays, depuis plusieurs décennies, ce phénomène reste encore assez mal connu. Les connaissances acquises résument à des données macroscopiques essentiellement descriptives. Cette situation provient en grande partie de la nature insaisissable de la foudre qui frappe où elle veut et quand elle veut [01].

I.1.LA Foudre ET LE MECANISME DE LA FORMATION DE L'ORAGE:

La foudre est définie comme une décharge électrique d'une longueur de plusieurs kilomètres associée à une impulsion de courant transitoire de très forte amplitude. La source la plus commune de la foudre est la séparation des charges dans les nuages d'orage : les cumulo-nimbus. Les orages les plus fréquents font suite à des fronts froids, à l'arrivée d'un de ceux-ci, la masse d'air froid s'infiltré sous l'air chaud et le soulève; ceci engendre des turbulences dans l'air chaud rejeté en altitude: ainsi se forment les nuages d'orage ou les cumulo-nimbus[2].



Figure .I.1.Eclaire de la foudre, image prise en Floride USA

La distribution des charges dans un nuage d'orage est présentée dans la figure ci-dessous. La partie supérieure, constituée de glace, est chargée positivement, tandis que la partie inférieure constituée de gouttelettes d'eau est chargée négativement. Souvent, un îlot de charges positives est enserré dans cette masse de charges négatives.

A l'approche d'un nuage orageux, le champ électrique atmosphérique au sol qui est de l'ordre d'une centaine de volts par mètre par beau temps commence par s'inverser, puis croît dans de fortes proportions. Lorsqu'il atteint 10 à 20 kV/m, une décharge au sol est imminente.

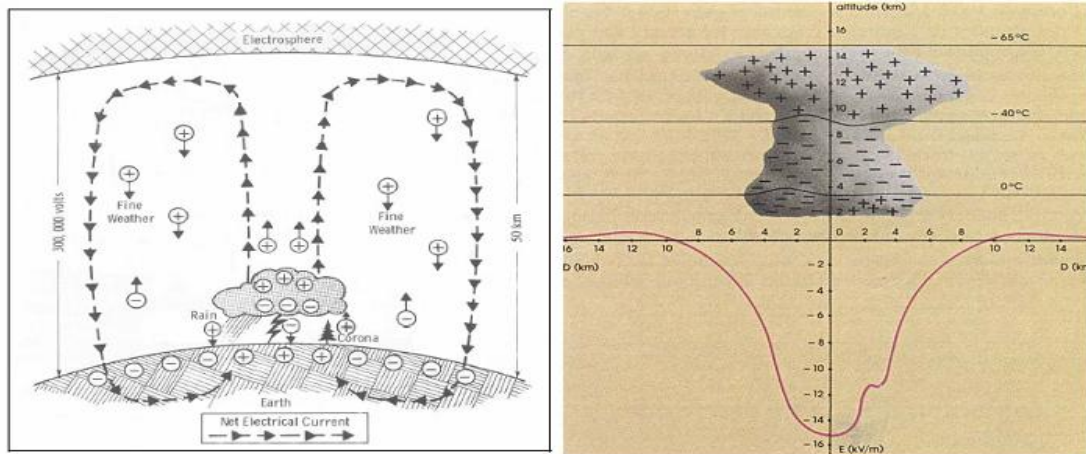


Figure 1.2. Répartition du champ électrique dans un nuage orageux [2].

I.2. CATEGORIES DE COUPS DE FOUDRE [02]:

Bien que les décharges inter et intra-nuages constituent plus de la moitié des décharges de foudre, ce sont surtout les décharges nuage-sol qui ont été l'objet d'études les plus poussées; ceci dû essentiellement aux raisons d'ordre pratique (cause de blessure et mort, incendies de forêts, et perturbations des systèmes électriques de télécommunication et de transport), et aussi du fait qu'il est plus facile de mesurer les caractéristiques optiques et électriques des décharges nuage-sol.

Les décharges de foudre nuage-sol ont été subdivisées en quatre catégories. Ces catégories sont définies selon d'une part la direction, ascendante ou descendante, du traceur (leader en anglais) qui déclenche la décharge, et d'autre part le signe de la charge portée par le traceur, positive ou négative. La figure ci-dessous illustre les quatre catégories des décharges nuage-sol.

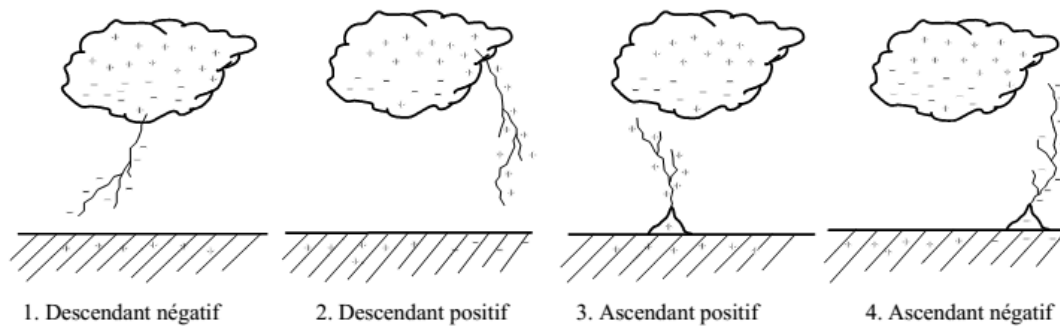


Figure I.3. Catégories de coups de foudre

Dans les régions tempérées, plus de 90% des coups de foudre nuage-sol sont de la catégorie 1, ce type de décharges, appelées décharges négatives, peuvent par conséquent être considérées comme la forme la plus commune des décharges nuage-sol. Cette forme de décharge est déclenchée par un traceur descendant chargé négativement. Les coups de foudre appartenant à la 3ème catégorie sont aussi déclenchés par un traceur descendant, mais chargé positivement (décharge dite positive). Cette catégorie regroupe moins de 10% des décharges nuage-sol.

Enfin, les décharges des catégories 2 et 4 qui sont déclenchées par des traceurs ascendants, sont relativement rares et apparaissent généralement aux sommets des montagnes ou des longues structures.

I.2.1. DECHARGES NEGATIVES NUAGE-SOL:

Une décharge négative (nuage-sol) typique apporte une quantité de charge négative de quelques dizaines de Coulomb à la terre. La décharge totale est appelée éclair et a une durée de l'ordre de 0.5 seconde. Chaque éclair est constitué de plusieurs composantes de décharge dont typiquement trois ou quatre impulsions de courant de forte amplitude dites arcs en retour. Chaque arc en retour dure environ 1 ms, la séparation entre deux arcs en retour successifs étant typiquement plusieurs dizaines de millisecondes. La figure ci-dessous illustre le processus d'un éclair négatif; plusieurs phases peuvent y être distinguées:

La décharge préliminaire (preliminary breakdown, en anglais) intervient à l'intérieur du nuage, très probablement entre les régions N et p. Cette décharge déclenche le développement d'un canal chargé négativement vers le sol appelé traceur par pas (stepped leader). La progression de ce canal s'effectue par une série de bonds(ou pas) lumineux successifs, chaque bond ayant une longueur de quelques dizaine de mètres et une durée d'environ 1 microseconde; deux bonds successifs sont séparés par une pause de l'ordre de 50 microsecondes. Le traceur apporte une quantité de charges négatives de l'ordre de 10 Coulomb vers le sol avec une vitesse moyenne de 2.10^5 m/s. A chaque pas du traceur correspond une impulsion de courant d'amplitude supérieure à 1 kA. Ces dernières sont associées à des impulsions de champs

électrique et magnétique d'une durée d'environ 1 microseconde et des temps de montée inférieurs à 0.1 microseconde. A l'approche du sol, le traceur dont le potentiel par rapport à la terre est environ -10 MV provoque une intensification du champ électrique et initie une ou plusieurs décharges ascendantes (upward-connecting leader): cette phase est appelée le processus d'attachement (attachement process). La jonction entre une des décharges ascendantes et le traceur par pas s'effectue à quelques dizaines de mètres au-dessus du sol. Le canal du traceur est alors déchargé lorsqu'une onde de potentiel de sol, le premier arc en retour (first return stroke), se propage vers le nuage et neutralise le canal chargé par le traceur avec une vitesse décroissante en fonction de la hauteur de l'ordre de $1/3$ de la vitesse de la lumière. Le premier arc en retour produit un courant au niveau du sol d'une valeur de pic typique de 30 kA et d'un temps de montée de l'ordre de quelques microsecondes. La durée de l'impulsion du courant à la mi-hauteur est de l'ordre de 50 microsecondes.

Après la phase de l'arc en retour, l'éclair peut disparaître. Néanmoins, si une quantité résiduelle de charges est encore présente au sommet du canal, il se développe dans le canal précédemment tracé un traceur obscur (d'art leader) à une vitesse de l'ordre de $3 \cdot 10^8$ m/s apportant une charge d'environ 1 Coulomb associée à un courant de 1 kA. Entre la fin du premier arc en retour et le début du traceur obscur, une activité électrique, se manifeste; il existe cependant un doute quant à l'influence de cette activité et le déclenchement du traceur obscur.

Le traceur obscur déclenche en fin l'arc en retour subséquent (subséquent return stroke). Le courant des arcs en retour subséquents mesurés à la base du canal ont généralement un temps de montée plus rapide que le courant du premier arc en retour. De nouvelles séquences traceur-arc peuvent ensuite se produire, donnant parfois jusqu'à 15 arcs en retour. Le dernier arc en retour est souvent à l'origine d'un fort courant de l'ordre de 100 A (continuing current) qui draine la charge résiduelle de la cellule orageuse[03].

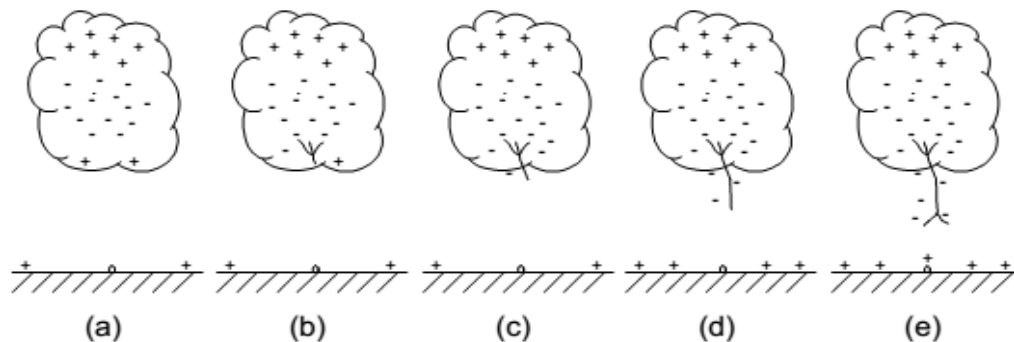


Figure .I.4. Développement du traceur par pas (stepped leader).

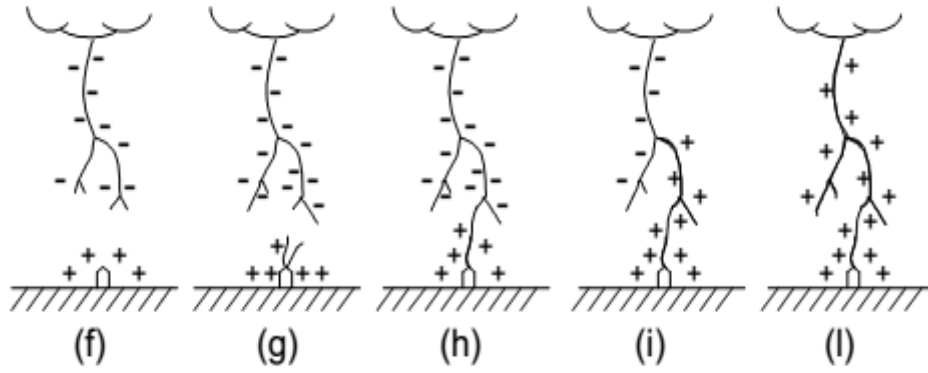


Figure I.5. Développement de l'arc en retour (return stroke)

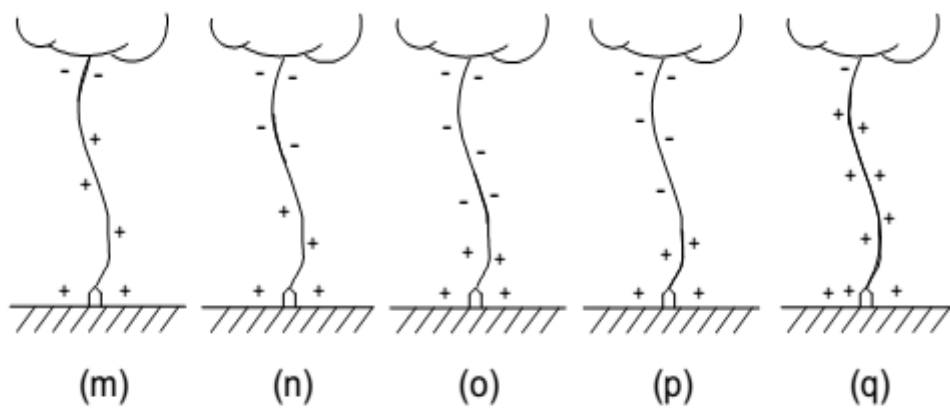


Figure I.6. Traceur obscur (d'art leader) et arc en retour subséquent (subséquent return stroke)

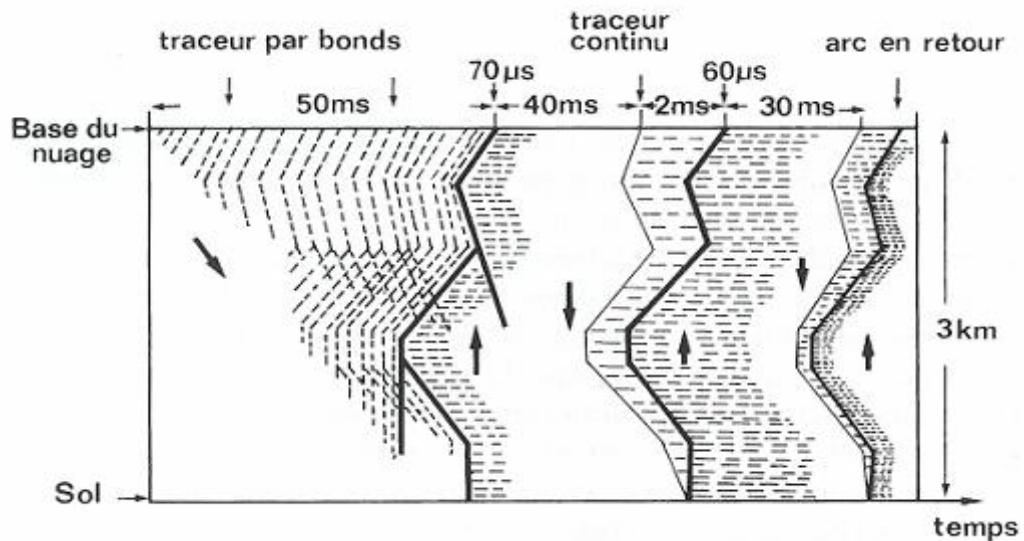


Figure I.7. Séquence traceur descendant – arc en retour dans un éclair[02].

I.3.L'ENERGIE DE LA Foudre [02]:

Est-il intéressant de capter l'énergie de la foudre ? C'est là une question souvent posée. On pourrait croire en effet que l'énergie électrique dissipée par les orages est importante. En réalité, s'il est exact que la puissance instantanée de la foudre est énorme (10^6 à 10^7 MW), la puissance moyenne reste relativement modeste. Pour s'en convaincre, il suffit d'intégrer l'énergie dissipée annuellement par l'ensemble des coups de foudre frappant le territoire français. En se basant sur une différence de potentiel nuage-sol de 100 MV et une charge moyenne par éclair de 20 C, on arrive à une puissance permanente de moins de 100 MW, soit moins du dixième d'une tranche nucléaire moderne. De plus, on imagine les difficultés techniques qu'il faudrait résoudre pour capter une énergie aussi diffuse et aléatoire que celle de la foudre.

I.4. PARAMETRES ELECTRIQUES DE LA Foudre:[02]

✓ *Forme du courant d'arc en retour :*

Ce courant est de nature impulsionnelle, et sa forme se caractérise par une valeur de crête, un front de montée jusqu'à la crête (ou temps de montée), un temps de décroissance fig.I.8 . il existe plusieurs modèles qui représentent ce courant dans le canal de la foudre que nous allons décrire dans les chapitres suivants.

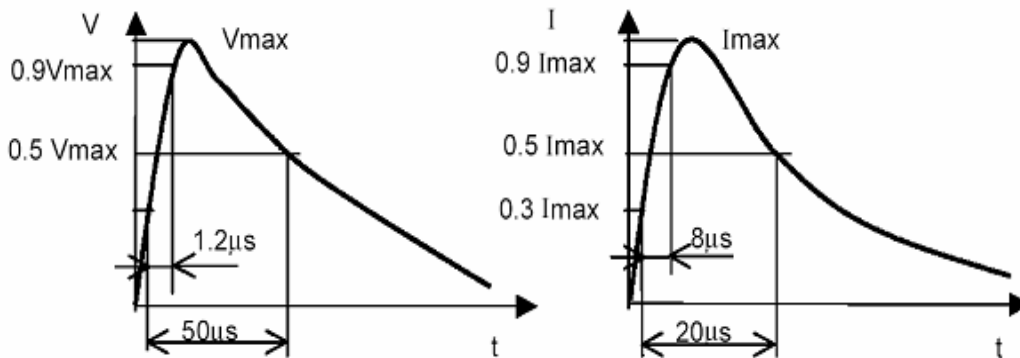


Figure I.8. ondes typiques de tension et de courant dans le canal de la foudre[02].

✓ *Forme d'onde de Surtension :*

Le phénomène physique de la foudre correspond à une source de courant impulsionnel, à savoir une suite de décharges d'une quantité d'électricité sur un court intervalle de temps. La forme d'onde fig.I.8 réelle est très variable : elle consiste en un front de montée jusqu'à l'amplitude maximale (de 1 microseconde à 20 microsecondes) suivi d'une queue de décroissance de quelques dizaines de microsecondes. Le domaine spectral associé s'étend dans une bande de 10 kHz à plusieurs MHz.

✓ **Valeur de crête du courant :**

Valeur maximale atteinte par l'intensité d'une impulsion de courant. Cette valeur est variable d'un coup de foudre à l'autre, et couvre une très grande plage d'intensités. Les valeurs de crête s'étendent de 2 à 200 kilo-ampères pour les coups négatifs, avec une médiane d'environ 30 kilo-ampères, et de 5 à 300 kilo-ampères pour les coups positifs, avec une médiane d'environ 35 kilo-ampères.

✓ **Temps de montée :**

Durée entre l'instant du début de l'impulsion de courant et l'instant où ce courant atteint sa valeur maximale. Cette durée est de 2 à 20 microsecondes pour le "premier coup", de 0,1 à 1 microseconde pour les "coups subséquents" des coups de foudre négatifs. Elle est de l'ordre de 100 à 200 microsecondes pour les coups positifs.

✓ **Durée conventionnelle de front:**

L'instant de début de l'impulsion étant souvent malaisé à déterminer, on définit une origine et une durée de front conventionnelles (figure suivante) comme suit :

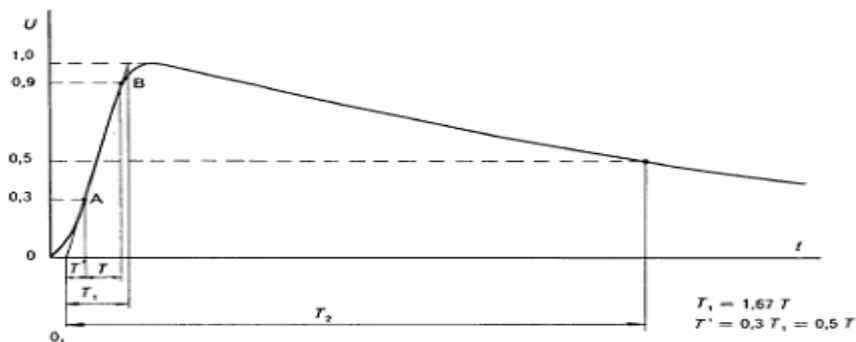


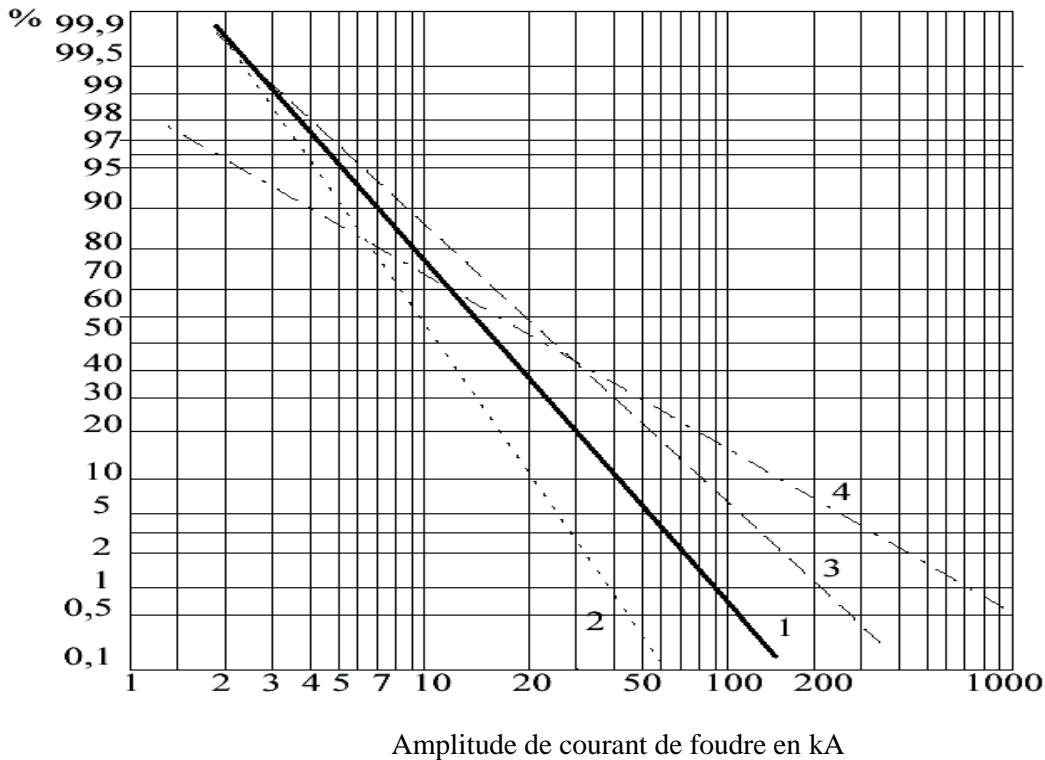
Figure I.9. Forme d'onde de choc de foudre normalisée par la CEI

✓ **Temps de décroissance :**

Durée entre l'origine conventionnelle et l'instant où la valeur de l'onde est retombée à 50 % de la valeur de crête. Pour les courants de foudre, cette durée est de l'ordre de 100 microsecondes pour les coups négatifs, et de l'ordre de 1000 microsecondes pour les coups positifs.

✓ **Intensité des différents coups de foudre:**

La distribution des intensités des courants de foudre est reportée sur un abaque regroupant toutes les données mondiales. Sont portées en abscisse le logarithme de l'intensité du coup de foudre (en kA), et en ordonnée la probabilité qu'a un coup de foudre de dépasser une intensité donnée. Les courbes ainsi obtenues représentent un faisceau de droites[02].



- Amplitude de courant de foudre en kA
- (1) coups de foudre négatifs : première décharge
 - (2) coups de foudre négatifs : décharge secondaire
 - (3) moyenne
 - (4) coups de foudre positifs

Figure I.10. Distribution Statistique des coups de foudre[05]

La lecture de la courbe (10) (moyenne) indique que l'intensité d'un coup de foudre négatif atteindra des valeurs supérieures à 2 kA dans 99,7 % des cas. La valeur moyenne de l'intensité se situe vers 25 kA.

I.5.LES EFFETS DE LA FOUDRE: [01]

Les effets de la foudre sont liés aux caractéristiques du courant de foudre, et par conséquent on peut s'attendre aux effets suivants:

✓ *Effet thermique:*

L'intégrale d'action permet de calculer l'énergie libérée par une charge située au point de chute de la foudre, si l'on connaît sa résistance équivalente. Dans la mesure où cette résistance reste constante, l'énergie dissipée s'écrira :

$$w = R \int_{t_i}^{t_f} i^2 dt$$

Où t_i et t_f sont respectivement le temps initial et final du phénomène.

Des effets thermiques importants apparaissant donc surtout en des points de fortes

résistances, comme dans les mauvais conducteurs, où beaucoup d'énergie est libérée sous forme de chaleur par le passage de courant.

✓ **Effet électrodynamique:**

Des effets mécaniques plus au moins importants peuvent se produire, là où des parties du chemin parcouru par la foudre se trouvent dans un champ magnétique d'une autre partie.

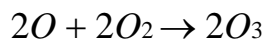
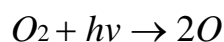
Dans ce cas, plus l'écart entre ces parties est faible, plus les effets deviennent importante.

✓ **Effets conduits ou rayonnés:**

La mauvaise cohérence de raisonnement entre paratonnerre, descente et prise de terre fait que sur une infrastructure existant, en plus des perturbations rayonnées, des perturbations conduites sont captées par induction sur les circuits intérieurs

✓ **Effets chimiques:**

La décharge électrique de l'éclair apporte une énergie suffisante pour que la relation chimique suivante ait lieu à partir de l'oxygène de l'air O_2



où :

h : constante de Planck : $6.63 \cdot 10^{-34}$

ν : fréquence de l'onde lumineuse.

✓ **Effets acoustiques:**

Le déclenchement extrêmes rapide du premier arc en retour génère une chaleur considérable (30000 K) et une pression très élevée du canal de foudre (2 atmosphère et plus) . Il est à l'origine des ondes de choc, elle même à l'origine de l'onde sonore (tonnerre). Le niveau de pression acoustique peut atteindre 155 dB .

✓ **Effets électromagnétiques:**

La foudre génère des ondes électromagnétiques à large spectre de fréquence qui atteint les fréquences de transmission radiophoniques provoquant ainsi des perturbations radio phoniques.

I.6.PROTECTION CONTRE LA Foudre:[06]

I.6.1.point d'impact:

On a vu dans les paragraphes précédents que l'impact serait le point à la terre où l'intensité du champ électrique est la plus élevée au moment du saut final. Sur un sol plan, ce sont les points culminants (tours, roches, arbres, etc..) qui facilitent le développement d'une telle

décharge atmosphérique. Ainsi, entre ces points, il est probable que la décharge atteigne l'endroit de faible résistance.

La figure .I.11 schématise les étapes intervenant dans le coup de foudre au sol. On remarquera que le point d'impact du coup de foudre est déterminé par l'endroit où s'amorce la contre-décharge de capture. Aussi, tous les modèles de prévision du point d'impact se basent sur la propagation des traceurs par bonds négatifs ainsi que sur les critères de formation des contre décharge de capture.

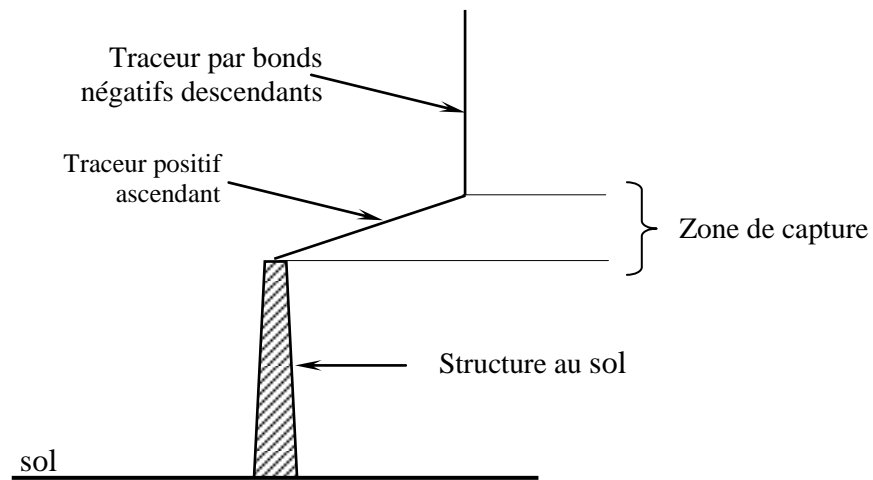


Figure .I.11. Point d'impact sur une structure au sol

1.7. INFLUENCE DES PROPRIETES ELECTROGEOLOGIQUES DU SOL SUR RIGIDITE DIELECTRIQUE DE L'AIR:

1.7.1. CAS D'UN SOL HOMOGENE MAUVAIS CONDUCTEUR:

Le modèle expérimental réduit utilisé est représenté à la figure .I.12, où la terre est constituée d'une couche d'eau distillée de conductivité et d'épaisseur variables, reposant sur un plan conducteur mis à la terre.

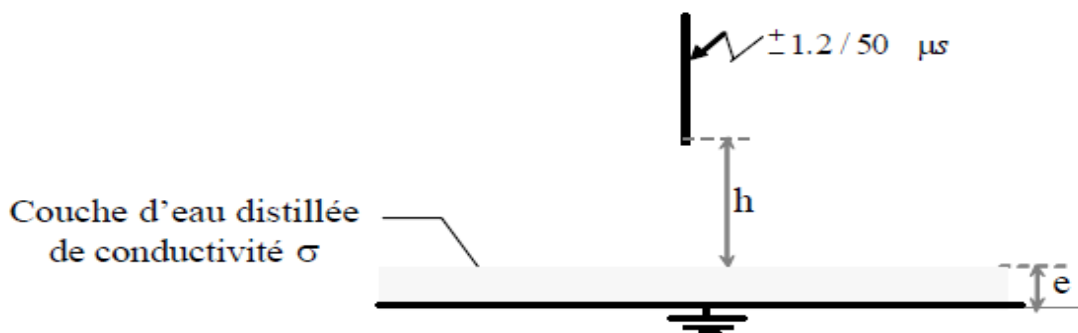
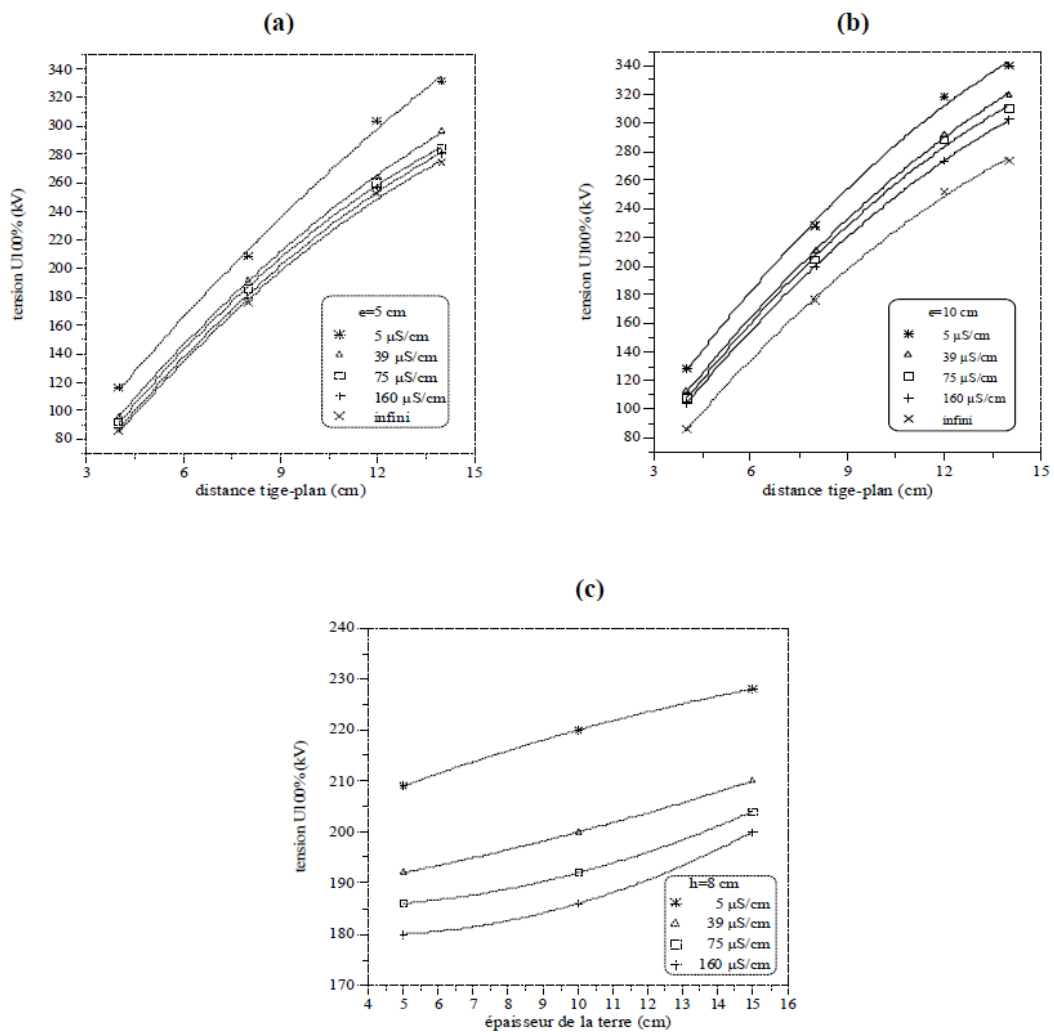


Figure .I.12. Système tige-plan avec terre mauvaise conductrice.

D'après des essais effectués selon la configuration de la figure .I.13, il a été constaté que la tension à 100% de décharge disruptive ($U_{100\%}$) dans le cas d'un intervalle pointe-plan avec sol faiblement conducteur est influencée par la conductivité (s) et l'épaisseur (e) de la couche mauvaise conductrice. En effet, la tension $U_{100\%}$ augmente lorsque la conductivité du sol diminue et de même pour une même conductivité lorsque l'épaisseur de la couche de la terre augmente figure.I.13 ceci est dû à la diminution de la présence d'ions ou d'électrons libres dans le volume d'eau. Ce fait diminue ainsi la valeur du champ électrique[07] .



- (a) Influence de la conductivité sur la tension $U_{100\%}$ pour $e= 5$ cm.
- (b) Influence de la conductivité sur la tension $U_{100\%}$ pour $e= 10$ cm.
- (c) Influence de l'épaisseur sur la tension $U_{100\%}$ pour $h= 8$ cm.

Figure .I.13. Influence de la conductivité et de l'épaisseur de la couche mauvaise conductrice sur la tension à 100% de décharges disruptives ($U_{100\%}$)[08]

Une autre étude sur l'influence de la conductivité du sol mauvais conducteur sur la tensions à 50% de décharges disruptives ($U_{50\%}$) des petits intervalles d'air tige-plan aux ondes de choc de foudre positif et négatif, montre que la rigidité de l'intervalle tige-plan augmente lorsque la conductivité du sol diminue, de plus ces courbes démontrent que lorsque la conductivité devient très élevée, le système avec sol mauvais conducteur devient équivalent au système avec sol conducteur Figure.I.14.[06][09].

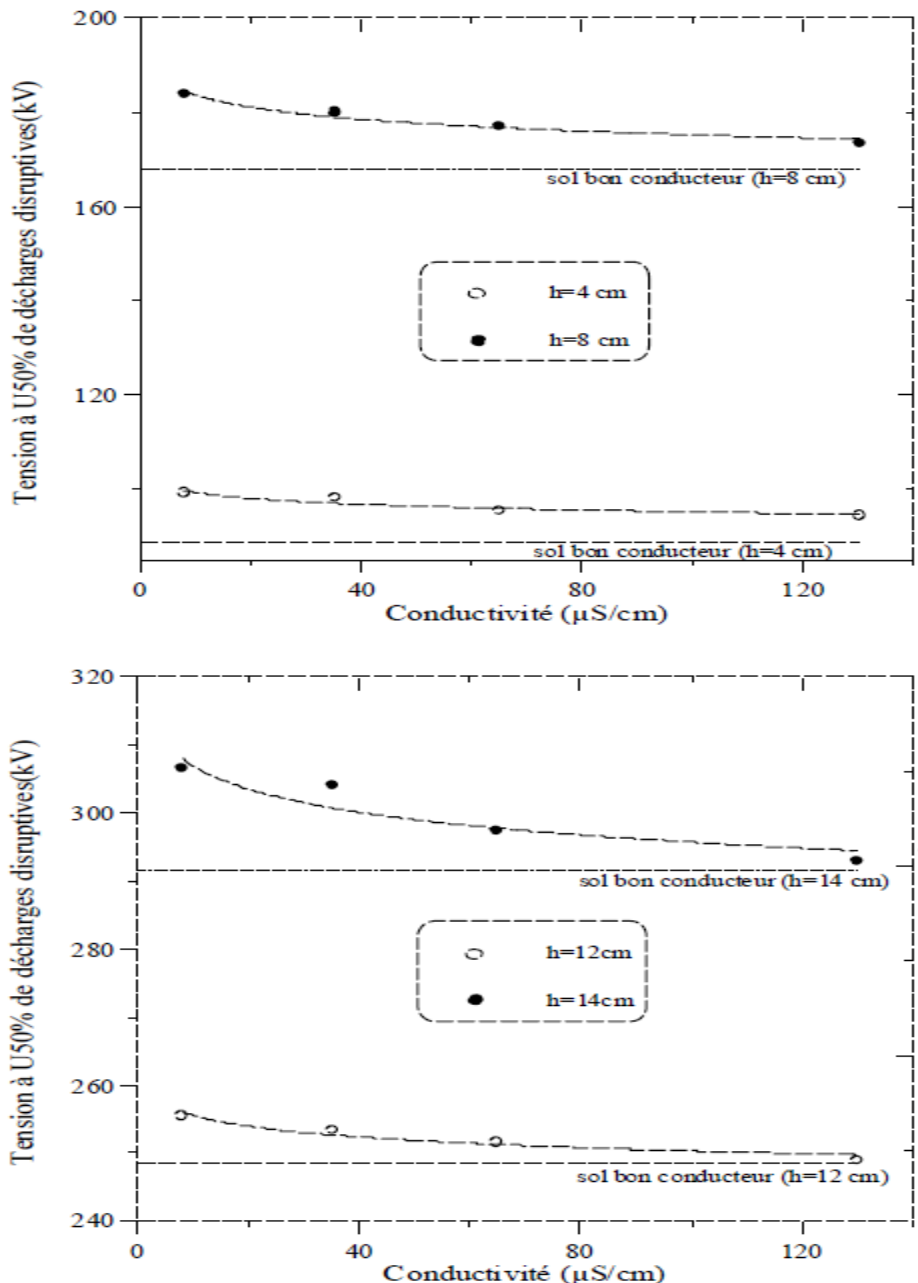


Figure I.14. La tension à 50% de décharges disruptives ($U_{50\%}$) en fonction de la conductivité du sol ($e=5cm$).[06]

I.7.2 CAS D'UN SOL HETEROGENE:

Le modèle expérimental utilisé pour étudier la configuration tige-plan avec terre hétérogène est représenté à la figure .I.15, où le plan est constitué de deux parties, l'une très bonne conductrice (plaque d'aluminium) et l'autre mauvaise conductrice constituée d'une couche d'eau distillée de conductivité variable[06]. La position de la tige est déterminée par sa hauteur h par rapport au sol et par la distance d entre son axe et l'interface séparant les deux milieux qui constituent la terre. Cette distance est considérée positive lorsque la tige est située au-dessus de la partie mauvaise conductrice et négative dans l'autre cas.

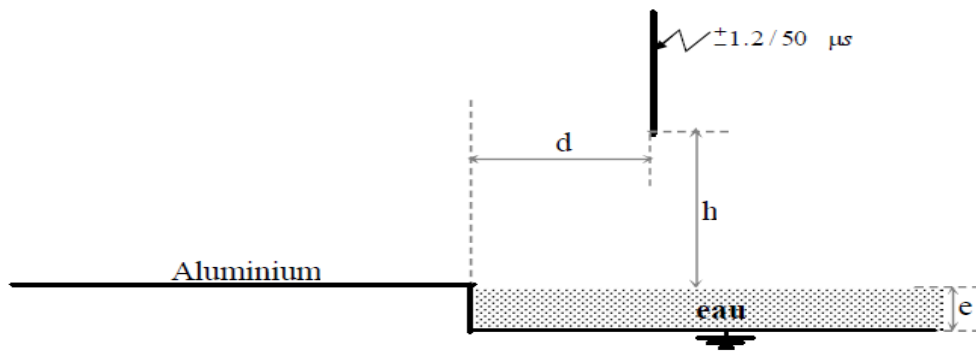


Figure .I.15. Système tige-plan avec terre hétérogène[06].

D'après les résultats d'essais obtenus pour la polarité négative figure .I.16 a et b, il a été constaté que, la rigidité de l'intervalle d'air tige-plan avec terre hétérogène dépend étroitement de la position de la tige par rapport à l'interface ; cette influence est plus importante lorsque la conductivité de la partie mauvaise conductrice est plus faible. Il est à noter que, pour les grandes distances d positives, la configuration tige-plan hétérogène tend vers le système tige-sol homogène de même longueur et de même conductivité de sol, tandis que, pour les grandes distances d négatives, la configuration tige-plan hétérogène tend vers le système tige-plan bon conducteur de même longueur.

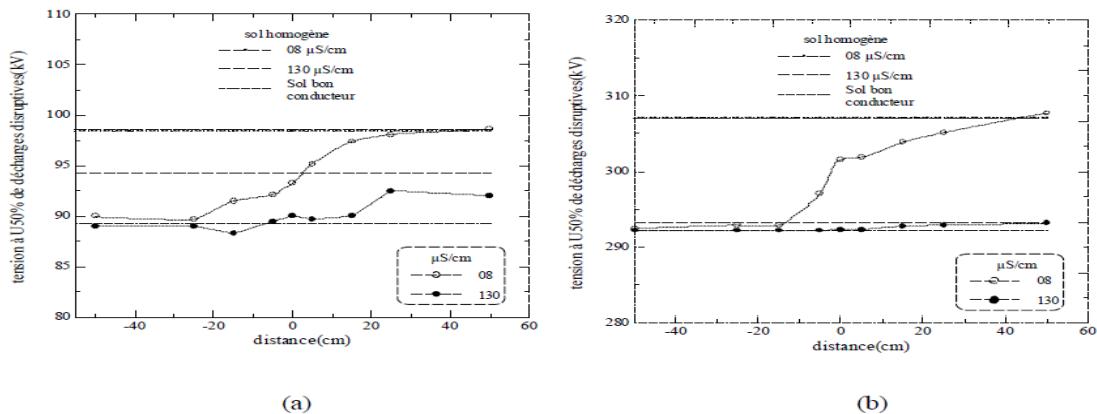


Figure .I.16. Tension $U_{50\%}$ en fonction de la distance dans le cas de la tige négative.

(a) $h = 4\text{cm}$ (b) $h = 14\text{cm}$. [06]

I.7.3 CAS D'UN SOL DISCONTINU:

Le modèle expérimental utilisé pour étudier la configuration tige-plan avec terre discontinue est représenté à la figure .I.17.[06]

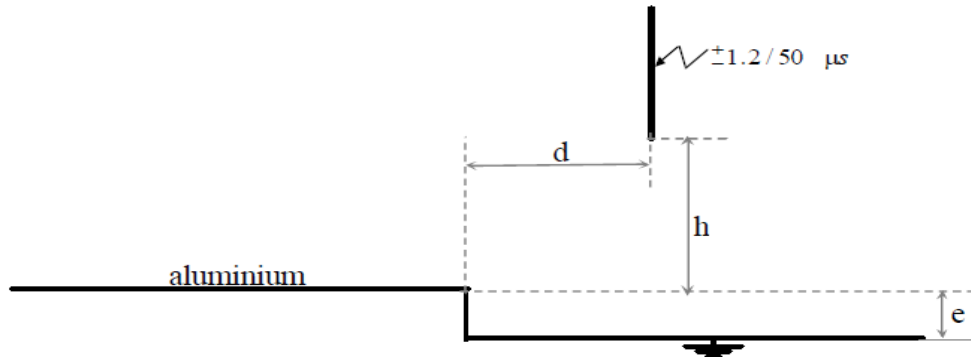


Figure .I.17. Configuration du système tige-plan avec sol discontinu.

Le système tige-plan avec sol discontinu est caractérisé, par la longueur de l'intervalle h ainsi que par la profondeur (e), la polarité de la tige et la distance d entre l'axe de cette dernière et l'interface. Les résultats obtenus au laboratoire de l' ENP sont présentés à la figure.I.18.

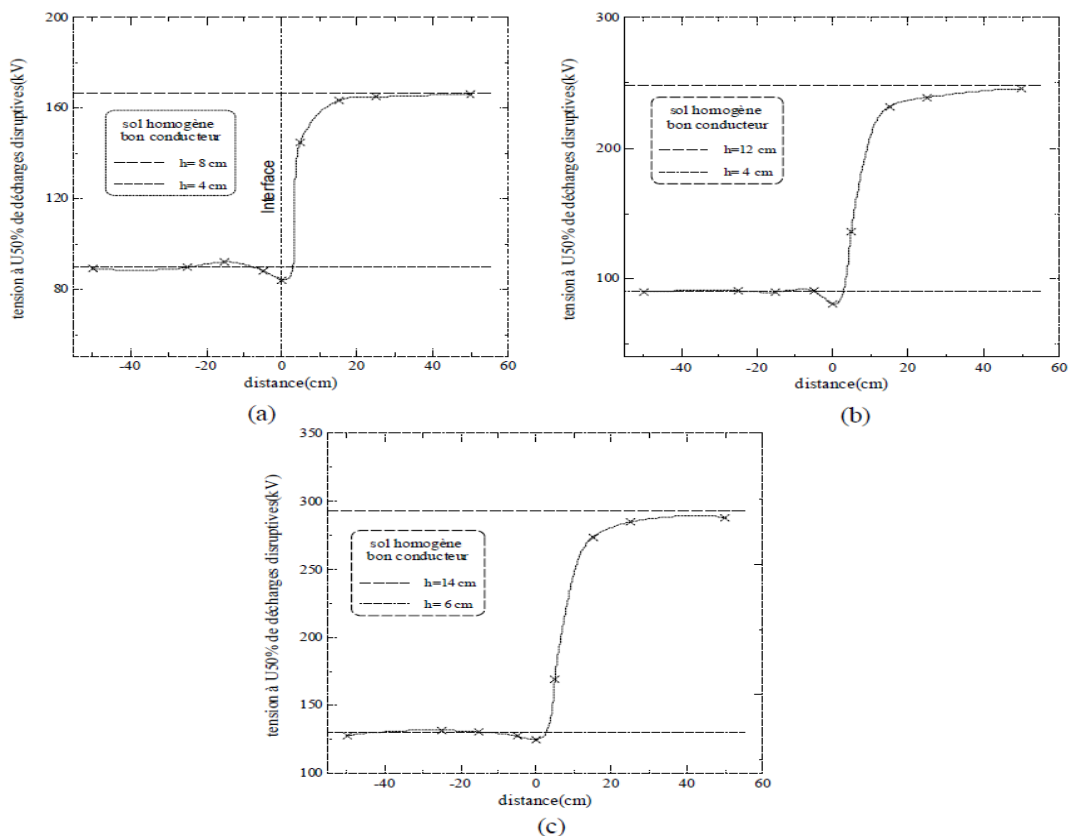


Figure .I.18. Variation de $U_{50\%}$ en fonction de la distance d.[06]

Polarité négative : a) e= 4 cm, h= 4 cm.

b) e= 8 cm, h= 4 cm

c) e= 8 cm, h= 6 cm.

Dans le cas de la configuration avec terre discontinue des mesures de champ ont été effectuées utilisant la sonde à capacité répartie figure.I.19 .[10]

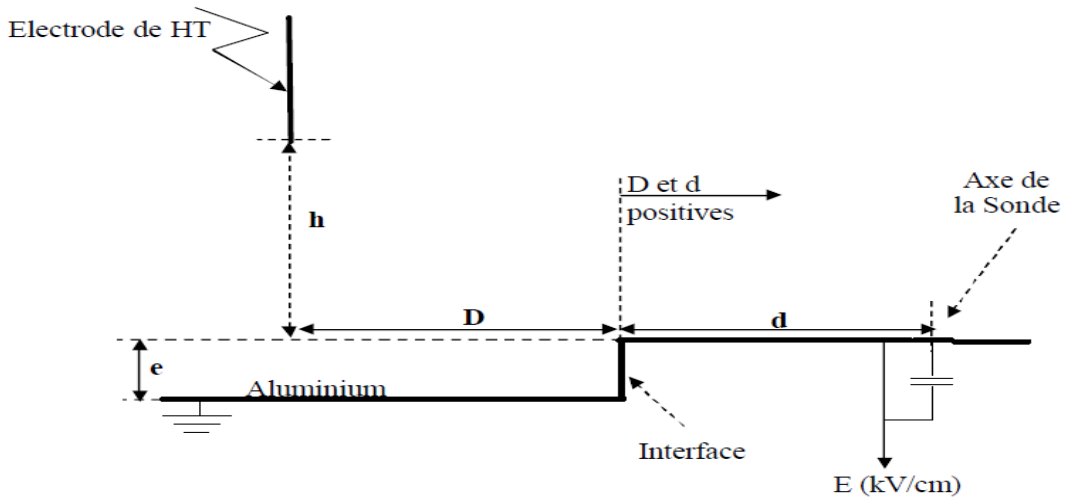


Figure .I.19.Modèle expérimental de terre discontinue en présence de la sonde à capacité répartie [10]

Avec :

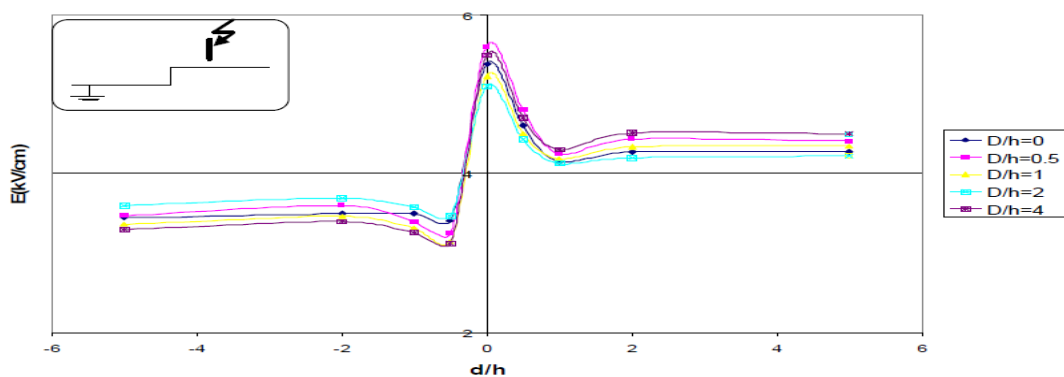
h : hauteur de l'électrode de haute tension au-dessus de la partie haute du plan discontinu.

e : profondeur de l'interface.

d : distance horizontale entre l'interface et la sonde.

D : distance horizontale entre l'interface et l'axe de la tige haute tension.

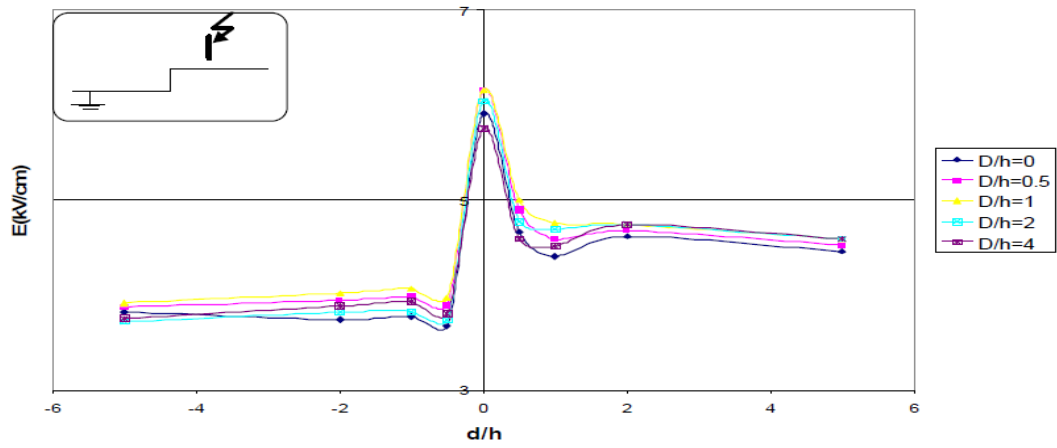
Les mesures du champ électrique le long du plan discontinu, ont permis d'aboutir aux résultats présentés à la figure (20 à 23).[10]



$$U = 0.5U0\%$$

Figure .I.20.Champ électrique au sol en fonction de la position (d/h) de la sonde.

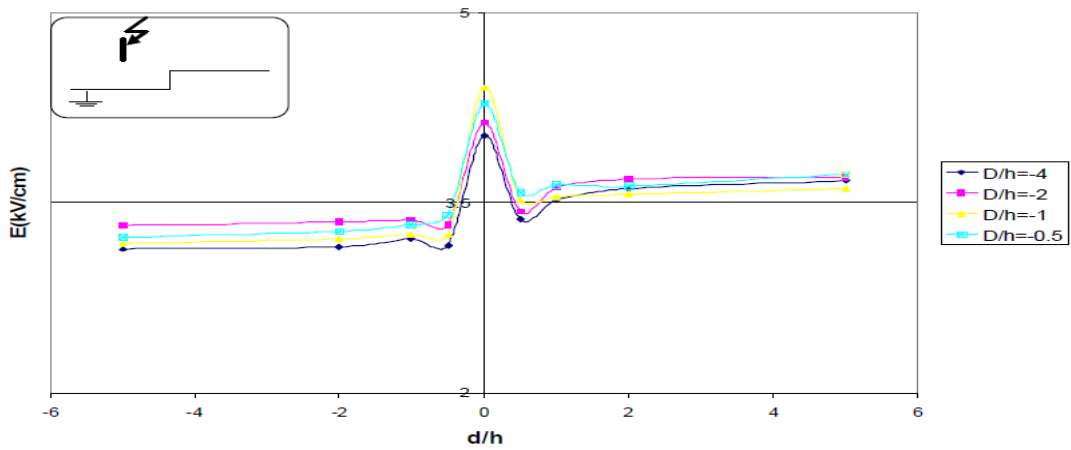
h=12cm.



$U = 0.5U_0\%$

Figure .I.21. Champ électrique au sol en fonction de la position (d/h) de la sonde.

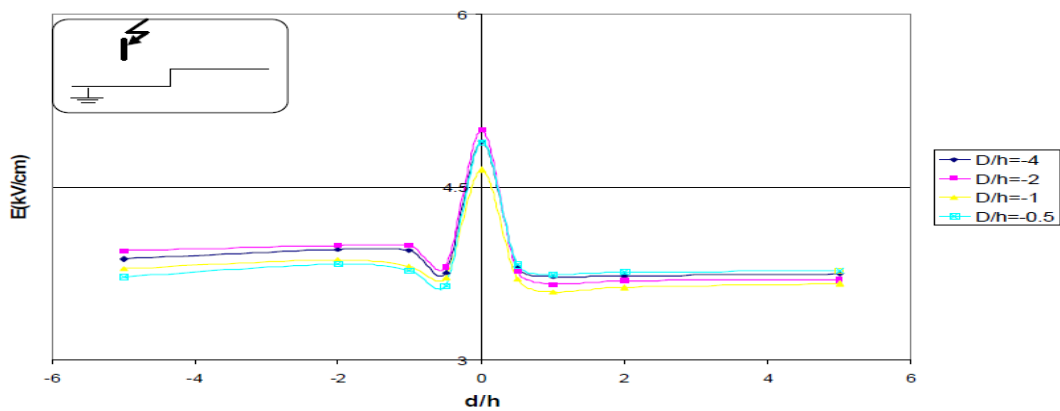
$h=16$ cm.



$U=0.5U_0\%$

Figure .I.22. Champ électrique mesuré au sol en fonction de la position (d/h) de la sonde

$h = 12$ cm



$U=0.5U_0\%$

Figure .I.23. Champ électrique mesuré au sol en fonction de la position (d/h) de la sonde

$h = 16$ cm

I.8.CONCLUSION:

Ces résultats dépendent étroitement de la polarité de la tige et montrent que: Pour les grandes distances d , le comportement de l'intervalle sous tension négative est similaire à son comportement sous tension positive. Le système est équivalent au système tige-plan avec sol homogène bon conducteur de même longueur pour les distances négatives, et de longueur majorée avec la valeur de l'épaisseur e pour les distances positives. Au voisinage de l'interface, la tension à 50% de décharges disruptives à polarité négative est inférieure à celle obtenue dans le cas du sol bon conducteur de même longueur. Cette discontinuité dans l'évolution de la tension $U_{50\%}$ a disparu dans le cas de la tige positive. Ceci est dû au rôle de l'interface qui aurait le même effet qu'une pointe, transformant le système tige-plan en système tige-tige qui est moins rigide que le système tige négative-plan, est plus rigide que le système tige positive-plan.

En polarité négative, l'influence de la discontinuité est plus importante lorsque la profondeur augmente (h étant constante).

La rigidité diélectrique du système pointe-pointe étant inférieure à celle du système pointe-plan, l'intensité du champ mesurée au niveau de l'interface, est beaucoup plus importante que celle en d'autres points du sol. Ceci est dû au fait que l'interface renforce localement le champ électrique, ce qui provoque l'élévation de celui-ci, et l'apparition parfois de décharges sur l'interface dans certains cas ($d/h=0$ et $D/h=0$), malgré le choix d'un niveau de tension d'essais relativement bas par rapport à la tension $U_{0\%}$ correspondant à 0,1% de décharge disruptive dans le cas du sol homogène.

Au voisinage de l'interface, nous observons une sorte de discontinuité dans l'évolution de l'intensité du champ électrique. Celle-ci, en diminuant, devient inférieure à la valeur obtenue dans le cas du sol homogène bon conducteur de même longueur. Ceci met en valeur le rôle important de l'interface sur l'attraction des lignes de champ.[01]

Chapitre II

INTRODUCTION:

Dans le but d'étudier l'influence du paratonnerre sur la distribution du champ électrique sur le sol, nous avons effectué de nombreux essais et mesures sur un modèle expérimental réduit au Laboratoire de Haute Tension de Université Hama Lakhdar El oued.

Nous présentons dans ce chapitre, le circuit d'essai ainsi que la méthode utilisée pour déterminer la tension $U_{0\%}$ du système tige-plan. Nous présentons aussi la configuration du système expérimental réduit.

II.1. GENERATION DES ONDES DE CHOC:

II.1.1 . GENERATEUR DES CHOCS :

Le générateur de choc est de type Marx (figure.II.1), ayant les caractéristiques suivantes :

- Nombre d'étages = 1
- Tension nominale = 100 kV
- Energie = 4 kJ

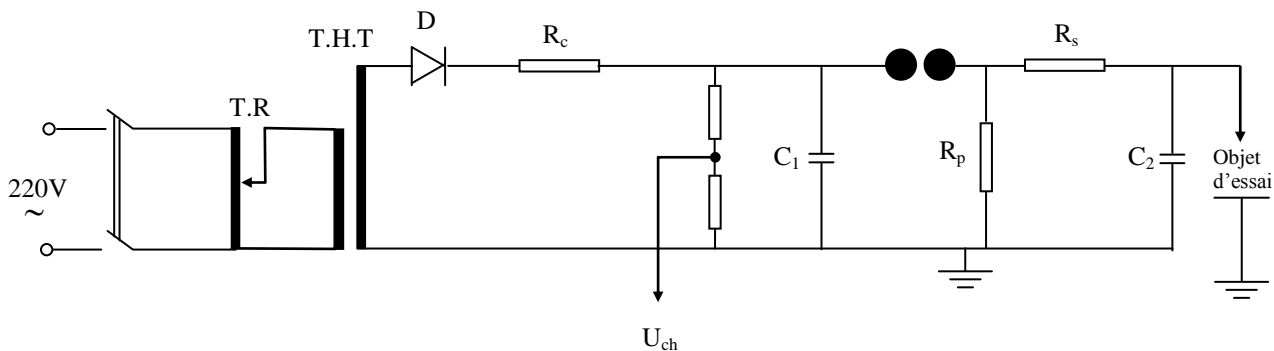


Figure II.1. Schéma simplifié d'un étage d'un générateur de choc [01]

Avec :

T.R : Transformateur de réglage

T.H.T: Transformateur de haute tension

D : Redresseur

R_c : Résistance de charge

R_s : Résistance série équivalente

R_p : Résistance parallèle équivalente

C_1 : Condensateur de choc, C_2 : Condensateur de charge

La tension continue destinée à la charge du générateur de choc est fournie par un redresseur D de tension monophasée. Une résistance destinée à limiter le courant de charge à une valeur admissible est placée en série avec le redresseur. Ce dernier est alimenté par un transformateur de haute tension (T.H.T).

La charge des condensateurs de choc s'effectue à travers des résistances R_c . Les éclateurs à sphère de tous les étages sont étalonnés à un écartement égal. Ce dernier est fixé en fonction du niveau de tension de charge appliquée.

Au cours de la charge des condensateurs, la tension aux bornes des éclateurs à sphères augmente. Lorsque les éclateurs sont amorcés, chaque condensateur se décharge à travers les résistances R_s, R_p [06]. La tension générée appliquée à l'objet d'essais est égale à la tension au borne d'un étage multipliée par le nombre d'étages qui est égale à 1 dans notre cas.

II.1.2.TENSION DE CHOC DELIVREE:

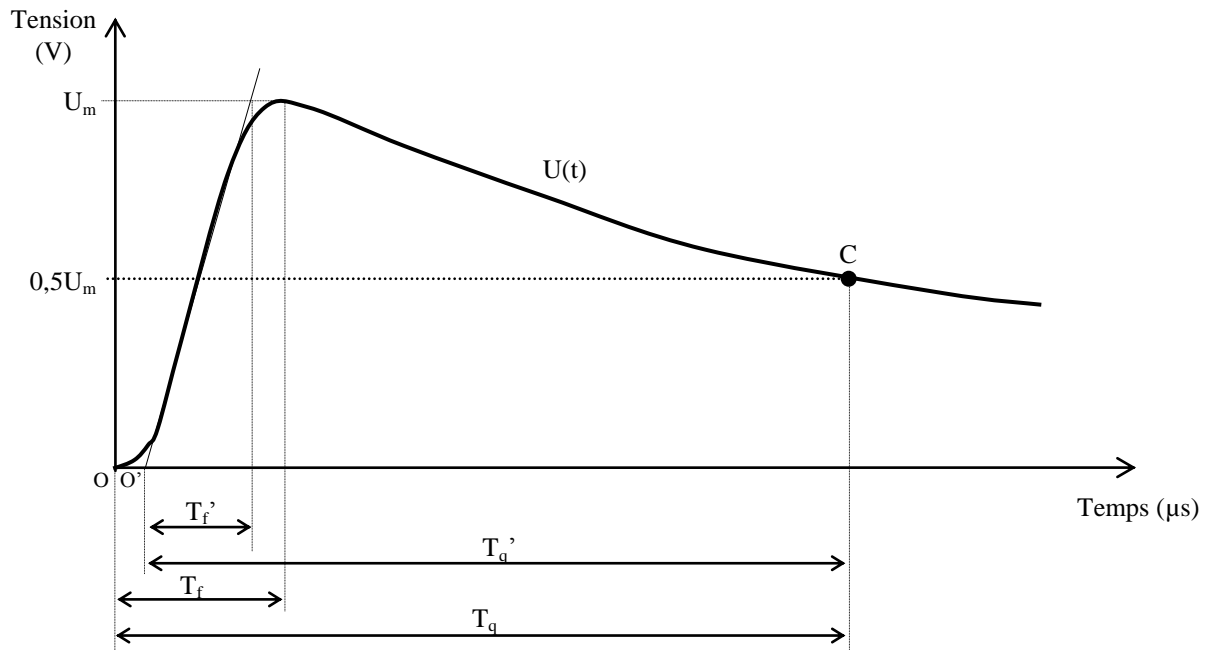
La tension délivrée par le générateur de choc, simulant les surtensions d'origine atmosphérique, est une impulsion unipolaire bi-exponentielle dont la forme est normalisée conformément aux recommandations de la CEI [01][06]. Ces ondes se définissent par les paramètres suivants:

- La constante de temps de front T_f
- La constante de temps de mi-amplitude T_q
- L'amplitude maximum U_m

La forme de tension générée par le générateur de choc répond à l'équation suivante :

$$U(t) = U_m [\exp(-t/T_q) - \exp(-t/T_f)] \quad (\text{II.1})$$

La CEI donne l'onde de forme normalisée dite «choc 1,2/50 μs » comme l'onde la plus adoptée pour les essais en chocs de foudre. Le temps de front T_f de cette onde est de 1,2 μs et le temps de mi-amplitude T_q est de 50 μs . En effet, le choc 1,2/50 μs simule assez bien la forme d'un courant de foudre sévère [01].



O : origine de la tension de choc O' : origine conventionnelle de la tension de choc
 T_f : durée du front T_f' : durée du front
 T_q : durée de mi-amplitude T_q' : durée conventionnelle de mi-amplitude

Figure II.2. Forme de l'onde de choc de foudre.

II.2. DESCRIPTION DE L'EQUIPEMENT UTILISE POUR LA MESURE DE TENSION DE CLAQUAGE DE L'AIR [11] :

La brève description de tous les équipements utilisés pour la mesure de la tension de claquage de l'air est donnée ci-dessous.

II.2.1. PANNEAU DE CONTROLE :

Le panneau de commande se compose de tous les instruments de mesure, y compris la sécurité, le contrôle de commutation tels que voltmètre, ampèremètre, disjoncteur, alarme etc., qui est représenté sur la Fig. II.3. La fonction principale du panneau de commande est de contrôler tous les équipements sous test.



Figure II.3. Panneau de contrôle utilisé pour effectuer les tests.

II.2.2.DISJONCTEUR [11] :

Un disjoncteur est un interrupteur électrique à commande automatique destiné à protéger un circuit électrique contre les dommages causés par une surcharge ou un court-circuit. La fonction principale du disjoncteur est d'identifier des défauts dans le circuit et l'isoler. Dans les circuits à haute tension défauts se produisant principalement des défauts symétriques, asymétriques défauts et les défauts de terre. Une fois qu'un défaut est détecté et les contacts dans le disjoncteur doit s'ouvrir pour interrompre le circuit, de l'énergie emmagasinée mécaniquement contenue dans le disjoncteur est utilisé pour séparer les contacts et, bien que partie de l'énergie requise peut être obtenue à partir du courant de défaut lui-même. Les contacts du disjoncteur doivent porter le courant de charge sans échauffement excessif, et doivent également résister à la chaleur de l'arc produit lors de la coupure du circuit. Des contacts sont en cuivre ou en alliages de cuivre, alliages d'argent, et d'autres matériaux. La durée de vie des contacts est limitée par l'érosion due à l'interruption de l'arc. Disjoncteurs miniatures et haute tension ont des contacts remplaçables. Lorsqu'un courant est interrompu, un arc est généré. Cet arc doit être contenu refroidi et éteint de manière contrôlée, de sorte que l'écart entre les contacts peut encore supporter la tension dans le circuit d'alimentation. Par conséquent, une fois que la condition de défaut a été effacée, les contacts doivent être à nouveau fermés pour rétablir le courant au circuit interrompu. Les disjoncteurs sont faits dans différentes tailles, à partir de petits appareils qui protègent un appareil ménager individuel à grande appareillage conçu pour protéger les industries des circuits d'alimentation haute tension. Ces disjoncteurs hauts tension améliorent la stabilité et la disponibilité du système.[11]

II.2.3. TRANSFORMATEUR A HAUTE TENSION:

Un transformateur est un dispositif statique. Il transfère l'énergie électrique d'un circuit à un autre circuit à travers des conducteurs à couplage inductif les bobines de transformateurs. Un courant variant dans l'enroulement primaire crée un flux magnétique variable dans le noyau du transformateur et donc un champ magnétique variable à travers l'enroulement secondaire. Ce champ magnétique variable induit une force électromotrice variable (FEM) dans l'enroulement secondaire. Cet effet est appelé induction mutuelle. Dans cet agencement haute tension transformateur élévateur ayant la puissance nominale de 5 kVA, 220V / 100kV est utilisé qui est représenté sur la figure II.4. Lorsque la tension augmente, le courant diminue dans la même proportion.[11]



Figure II.4. Transformateur à haute tension utilisé pour l'essai de claquage de l'air.

II.2.4. FILTRE A HAUTE TENSION :

En haute tension les réseaux électriques subies principalement des harmoniques d'ordre supérieur dans l'alimentation, de réduire ces harmoniques les filtres à haute tension sont le plus souvent utilisés. En raison des harmoniques d'ordre supérieur; augmentation des pertes, des problèmes de résonance entre les parties inductifs et capacitifs du réseau d'alimentation, à la surcharge des condensateurs, conduisant à un vieillissement défectueux et prématurée, l'interférence avec les télécommunications et les ordinateurs, les perturbations dans les systèmes de télécommande centralisée et des courants élevés à neutre. Ces filtres ont plusieurs avantages tels que le facteur de puissance plus élevée, une stabilité améliorée des pertes de tension de

réseau, le filtrage des harmoniques dans le système, évite les problèmes de résonance et l'amplification des perturbations électriques.

II.2.5.DIVISEUR DE TENSION :

Le diviseur de tension est également une partie importante de l'expérience utilisée pour la mesure de la haute tension. Diviseur de tension est également connu comme un diviseur de potentiel. Ceci est un circuit linéaire simple qui produit une tension de sortie (V_{sort}) qui est une fraction de la tension d'entrée ($V_{\text{entré}}$). Division de tension se réfère à la séparation d'une tension entre les composantes du diviseur. Il est couramment utilisé pour créer une tension de référence ou pour obtenir un signal basse tension proportionnelle à la tension à mesurer, et peut également être utilisé comme atténuateur de signal à basse fréquence. Diviseur potentiel est utilisé pour mesurer des tensions dans les équipements électriques, le gain raisonnable sans perte de stabilité du circuit

II.3.DETERMINATION DE LA TENSION $U_{0\%}$:

La tension $U_{0\%}$ est la tension pour laquelle on a une disruption certaine de l'intervalle d'air entre les deux électrodes du système à étudier. Pour déterminer cette tension, la méthode des paliers multiples constants a été appliquée. Elle consiste à appliquer trois paliers de tension différents avec application de 20 chocs par palier. Le temps entre deux chocs successifs est de l'ordre de 20 secondes. Plus le nombre de paliers appliqué est grand plus l'interpolation des points sera meilleure et donc une bonne précision lors de l'extrapolation pour déterminer $U_{0\%}$. En effet, cette dernière correspond à la fréquence de décharge de 0,1% sur une échelle gauss-arithmétique.[11]

Les fréquences de décharge en fonction des tensions d'essais correspondantes sont généralement distribuées selon une régression linéaire sur une échelle Gausso-arithmétique. Ceci correspond à ce qu'ont obtenu d'autres auteurs [01]. La distribution normale a été donc vérifiée et admise dans notre présente étude.

II.4.CORRECTIONS ATMOSPHERIQUES:

II.4.1. INFLUENCE DE LA DENSITE DE L'AIR :

On sait que la température et la pression, en modifiant la densité du gaz, influent sur la rigidité diélectrique de l'air. Dans la CEI 60, on trouve la notion de densité relative qui est définie comme étant le rapport de la densité de l'air dans les conditions de pressions P et de température T, à la densité de l'air dans les conditions atmosphériques de référence dites normales, c'est à dire :

$$\delta = 0,289 \frac{P}{273+T} \quad (\text{II.2})$$

- Température ambiante $T_o = 20 \text{ }^\circ\text{C}$
- Pression atmosphérique $P_o = 1013 \text{ mbar}$ (= 760 mmHg)

La pression P est en mbar et la température T en $^\circ\text{C}$.

Cette équation (II.2) est utilisée pour convertir la tension de décharge U mesurée dans les conditions atmosphériques d'essais (température T et pression P) à la valeur U_o qui aurait été obtenue dans les conditions normales (T_o et P_o) citées ci-dessus.

$$U_o = \frac{U}{(\delta)^n} \quad , n \leq 1 \quad (\text{II.3})$$

L'exposant n dépend de la forme d'onde, de la longueur d'intervalle et de la position des électrodes. Dans le cas d'un intervalle pointe-plan soumis à une onde de choc de foudre, n est égale à l'unité.[06]

II.4.2.INFLUENCE DE L'HUMIDITE:

La tension d'amorçage est particulièrement moins sensible aux variations de l'humidité dans le cas des ondes rapides ou très rapides, C'est le cas pour les chocs de foudre négatifs. Ainsi, nous ne tiendrons pas compte de ce facteur. Durant nos essais l'humidité relative variait entre 37% et 38% .

II.5.MODELE EXPERIMENTAL:

Le système utilisé est constitué d'une tige en fer de 0.7 cm de diamètre mise sous tension de type choc de foudre négatif $-1.2/50 \text{ } \mu\text{s}$, et d'un plan en fer de 15 mm d'épaisseur, ayant une surface de $1 \times 1 \text{ m}^2$. Différents niveaux de tension de choc de foudre négative ont été appliqués correspondant à différentes hauteurs de la tige mise sous tension de choc de foudre.

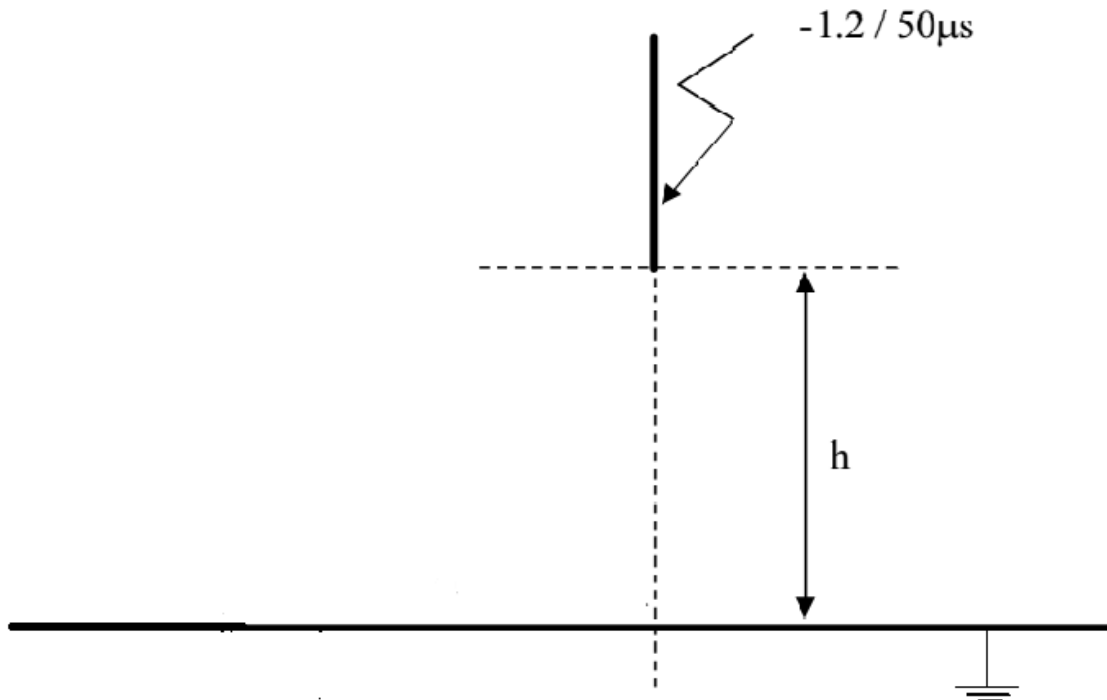


Figure II.5. Modèle expérimental du système tige - plan sans paratonnerre.

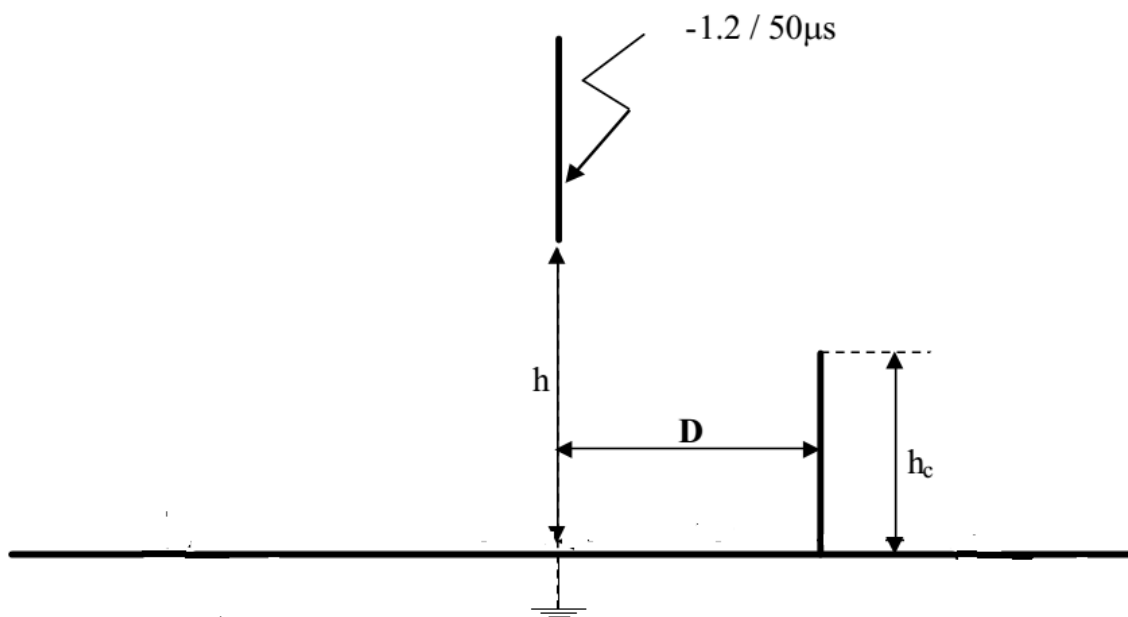


Figure II.6. Modèle expérimental du système tige - plan avec paratonnerre.

Avec :

h : hauteur de l'électrode de haute tension au plan.

h_c : hauteur du paratonnerre.

D : distance vertical entre le paratonnerre et l'axe de la tige haute tension.

La position du paratonnerre est déterminée par sa hauteur (h_c) par rapport au sol et par la distance (D) entre son axe et l'axe de la tige. Les distances h sont les même qu'en système sans paratonnerre, et D sont choisies de telle sorte que les essais soient effectués pour le rapport D/h_c identiques pour différentes valeurs de h , correspondants à chaque distance h choisie. Pour une hauteur h donnée, nous appliquons le même niveau de tension d'essais quelle que soit la hauteur ou la position de paratonnerre par rapport à la tige.

Pour chaque valeur de la hauteur de la tige h , le choix de paramètres (h_c , D) s'effectue de la façon suivante :

- ✓ On choisit la valeur de h_c , en respectant les rapports suivants : $h/h_c = 1, 1.5, 2$
- ✓ Les rapports entre D et h sont : $D = 0h_c, 0.5h_c, 1h_c, 2h_c$.

Cela nous permettra d'observer l'influence de la présence d'un paratonnerre vertical sur la distribution du champ électrique au - dessous d'une électrode simulant un traceur descendant ayant le même potentiel que la base du nuage d'où il prendrait naissance.

Les différentes distances utilisées sont données dans le tableau II.1.

h (cm)	8	8	8
h_c (cm)	8	6	4
D (cm)	4, 8, 16	3, 6, 12	0, 2, 4, 8

a)- $h=8$ cm

h (cm)	10	10	10
h_c (cm)	10	7	5
D (cm)	0,5,10,20	0,3.5,7,14	0,2.5,5,10

b)- $h=10$ cm

Tableau II.1: Configuration considérées pour les mesures

a)- $h=8$ cm;b)- $h=10$ cm

Chapitre III

INTRODUCTION:

Ce chapitre concerne l'étude de l'influence du paratonnerre vertical sur la distribution du champ électrique sur un plan continu conducteur. Nous commençons d'abord par la présentation des résultats concernant le système tige-plan sans paratonnerre, qui servira de référence pour la comparaison des résultats. Nous abordons ensuite l'étude de l'influence de la position et de la hauteur du paratonnerre sur la distribution du champ électrique à l'inter face du plan.

La programmation informatique permet l'évolution de l'efficacité des méthodes des résolutions des différents problèmes en particulier, les équations aux dérivées partielles, et constitué aussi un outil puissant qui aide à l'étude et de développent de tel méthode, parmi les raisons qui montrent l'importance de cet outil est que quelque niveaux d'analyse ne sont pas faisables avec les outils mathématique, traditionnel, surtout qu'on est on face d'un problème complexe.

L'évaluation des méthodes de résolution se fait en calculant l'erreur commise et le temps d'exécution (donc la complexité) de leurs programmes.

Dans cette partie nous allons présenter les résultats de simulation obtenus à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics 4.3, qui utilise la méthodes des éléments finis.

COMSOL Multiphysics est un environnement interactif puissant pour la modélisation et la résolution de toutes sortes de problèmes scientifiques et techniques basées sur les équations aux dérivées partielles (EDP). Avec ce logiciel vous pouvez facilement étendre les modèles classiques pour un type de la physique, dans les modèles multiphysiques, qui permettent de résoudre les phénomènes physiques couplés. Accéder à ce pouvoir ne nécessite pas une connaissance approfondie des mathématiques ou de l'analyse numérique. Grâce à le mode intégré physique, il est possible de construire des modèles en définissant les quantités physiques pertinentes, telles que les propriétés des matériaux, les charges, les contraintes, les sources et les flux, plutôt que par la définition des équations sous-jacentes. Vous pouvez toujours appliquer ces variables, expressions, ou des numéros directement à des domaines solides, les limites, les bords, et les points de manière indépendante de la maille de calcul.

COMSOL Multiphysics puis compile en interne un ensemble d'équations aux dérivées partielles représentant l'ensemble du modèle. Vous pouvez accéder à la puissance de COMSOL

Multiphysics tant que produit autonome grâce à une interface utilisateur graphique flexible, ou par programmation de script dans la langue COMSOL Script ou dans le langage MATLAB.

Nous utilisons la AC/DC Module est un logiciel optionnel qui s'étend environnement COMSOL Multiphysics ® de modélisation avec des interfaces utilisateur personnalisées et des fonctionnalités optimisées pour l'analyse des effets électromagnétiques, les composants et systèmes. Comme tous les modules de la famille COMSOL, il fournit une bibliothèque de modèles prédéfinis prêts à terme qui font qu'il est plus rapide et plus facile à analyser les problèmes spécifiques à chaque discipline.

Ce module particulier résout les problèmes dans les domaines généraux de champ électrostatiques, des champs magnétostatiques, et les champs quasi-statique. Les modes d'application (interfaces de modélisation) inclus ici sont entièrement multi-physique permis les équations sous-jacentes de l'électromagnétisme sont automatiquement disponibles dans tous les modes d'application de la caractéristique unique à COMSOL Multiphysics. Cela rend également la modélisation non standard facilement accessible [03] .

III .1.SYSTEME TIGE-PLAN SANS PARATONNERRE:

III .1.1.DETERMINATION DE LA TENSION $U_{0\%}$:

Nous sommes intéressés à la tension $U_{0\%}$ de décharge disruptive afin de déterminer le niveau de cette dernière.

Ce niveau de tension nous permettrons d'éviter les décharges disruptives au niveau du sol à cause de sa sensibilité aux forts courants.

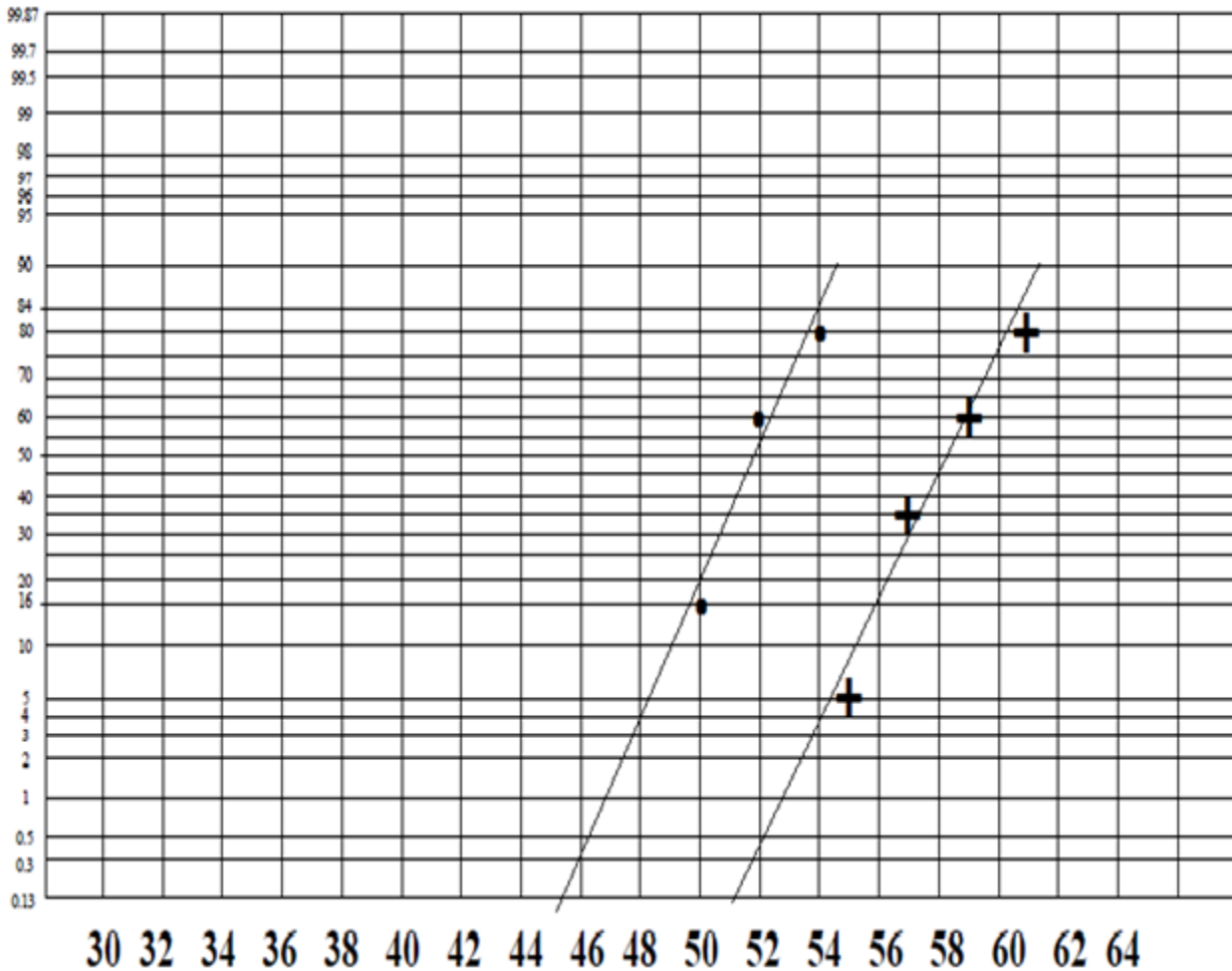
Les caractéristiques de probabilité de décharge $P = f(U)$ à partir desquelles nous avons déterminé la tension de tenue $U_{0\%}$ pour chaque hauteur (h) choisie, sont présentées à la figure III.1 .

On a remarqué que la probabilité de foudroiement en fonction de la tension appliquée suivait une loi normale : plus la tension augmentait plus la probabilité de foudroiement augmente.

Nous avons considéré $U_{0\%}$ comme étant la tension ayant une probabilité de décharge égale à 0,1 % sur l'échelle gausso- arithmétique.

D'après les mesures, nous constatons que la tension $U_{0\%}$ croît linéairement avec l'augmentation de la longueur de l'intervalle d'air h la figure III.2 .

Les valeurs de $U_{0\%}$ obtenues pour 8, 10 cm sont prises aussi comme niveau de tension dans les paramètres de modélisation pour les calculs du champ sur le plan pour les différentes positions et hauteurs du paratonnerre.



$h=8\text{cm}(\cdot)$

$h=10\text{cm}(+)$

$U_{0\%}=45\text{ kV}\rightarrow h=8\text{cm}$

$U_{0\%}=51\text{ kV}\rightarrow h=10\text{cm}$

Figure III .01. Détermination des tensions $U_{0\%}$ pour les différentes hauteurs de la tige haute tension

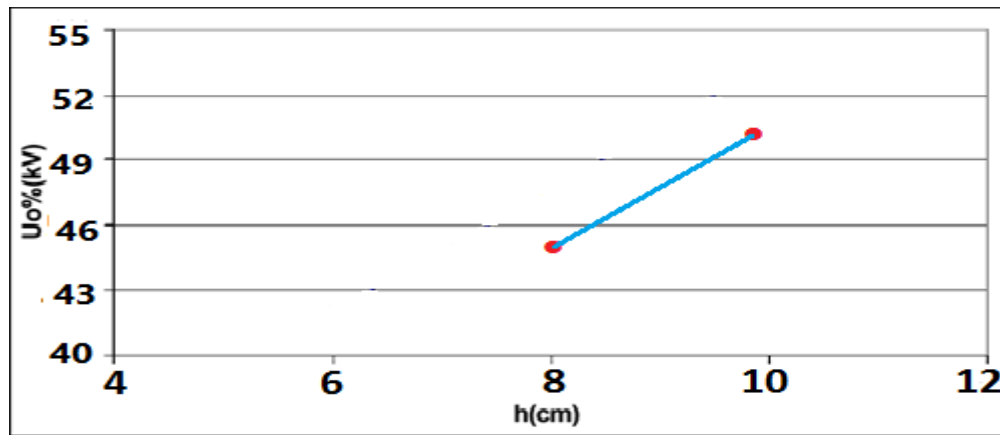


Figure III .02. Evolution de la tension $U_{0\%}$ en fonction de l'intervalle d'air h

III .1.2.DISTRIBUTION DU CHAMP ELECTRIQUE AU SOL :

Afin d'obtenir une référence pour la comparaison des résultats du système tige- plan avec paratonnerre avec ceux du système tige- plan sans paratonnerre, nous déterminons d'abord la distribution du champ dans le cas du système tige- plan sans paratonnerre, en fonction de la position de la sol et de la hauteur h de la tige sous haute tension dans le cas niveau de tension ($U_{0\%}$).

pour le niveau de tension $U_{0\%}$, nous constatons que l'intensité du champ électrique diminue au fur et à mesure qu'on éloigne au sol de l'axe de la tige (h augmente) puis elle tend vers une valeur constante pour les h auteurs $h = 8\text{cm}$ et $h = 10\text{cm}$. La diminution est plus importante pour les grandes hauteurs de la tige ($h=10\text{cm}$).

III.1.3. DISCUSSION SUR L'EFFET DU PARATONNERRE:

Afin d'illustrer l'influence du paratonnerre sur la distribution du champ électrique au sol pour notre système d'électrodes tige - plan, on définit le rapport E/E_0 par le rapport entre le champ calculé dans la configuration avec paratonnerre et le champ calculé sans paratonnerre.

La remarque générale qu'on peut tirer des figures (III.3) à (III.56) est que le rapport E/E_0 prend la valeur la plus faible pour les positions du paratonnerre proche de la tige ($D/hc=0, 0.5, 1,2$) puis croit avec l'augmentation du rapport D/hc . Cette remarque est prévisible et normale car la position du paratonnerre directement sous l'axe de la tige HT ou proche est la meilleure position pour éliminer ou réduire le champ électrique sur la plan. On peut expliquer ce phénomène par l'effet de la zone de protection du paratonnerre de telle sorte que les objets situés

directement au - dessous du paratonnerre sont pratiquement protégés et le champ sera très réduit par rapport aux autres régions loin du paratonnerre.

Au fûr et à mesure que le paratonnerre s'éloigne de la tige HT (D/h_c augmente), on remarque que le rapport E/E_0 augmente jusqu'à l'unité, cas où le paratonnerre n'a pratiquement aucune influence (valeur du champ égale à celle correspondant à la configuration sans paratonnerre).

Cette remarque est valable même pour les positions du paratonnerre loin de la tige HT , c'est à dire que le paratonnerre n'a pas une influence sur le champ que dans un domaine limité.

Ainsi le rapport E/E_0 dans le demi-plan qui contient le paratonnerre est inférieur à celui se trouvant dans l'autre [12].

✓ **Modèle de la simulation:**

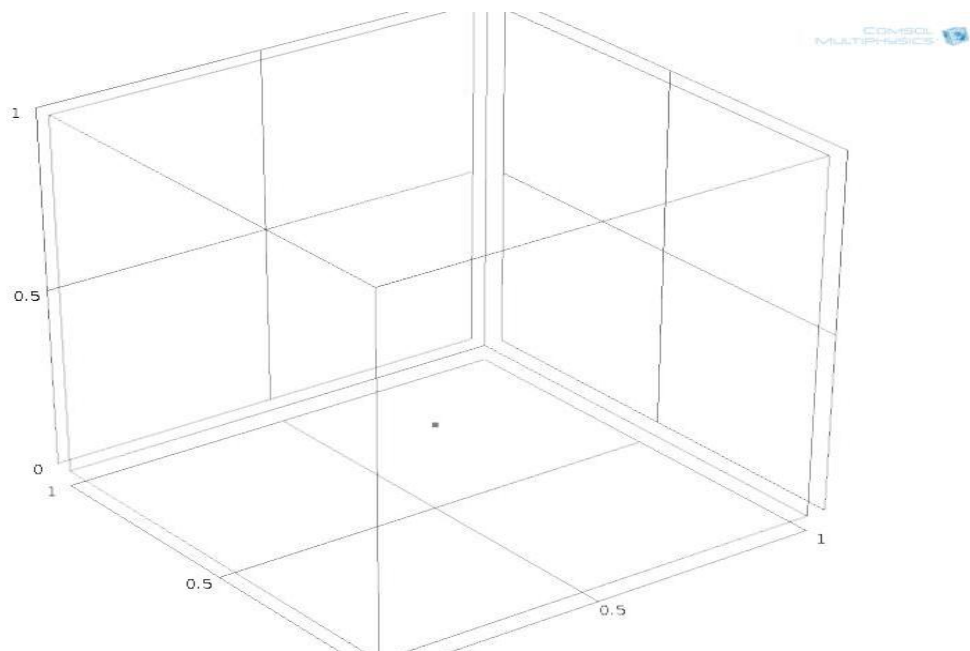


Figure III.03. Modèle de la simulation son paratonnerre

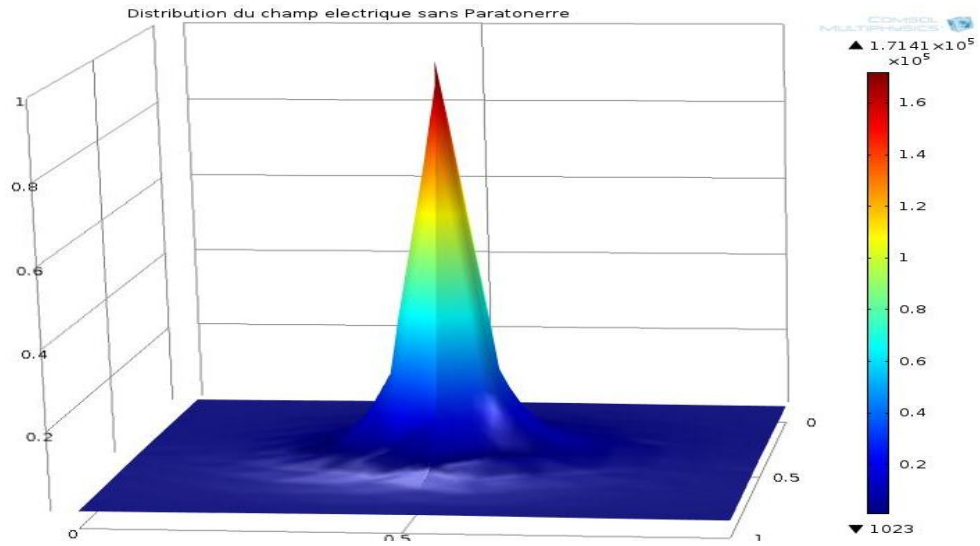


Figure III .04. Distribution du champ électrique sans paratonnerre pour $h=8\text{cm}$

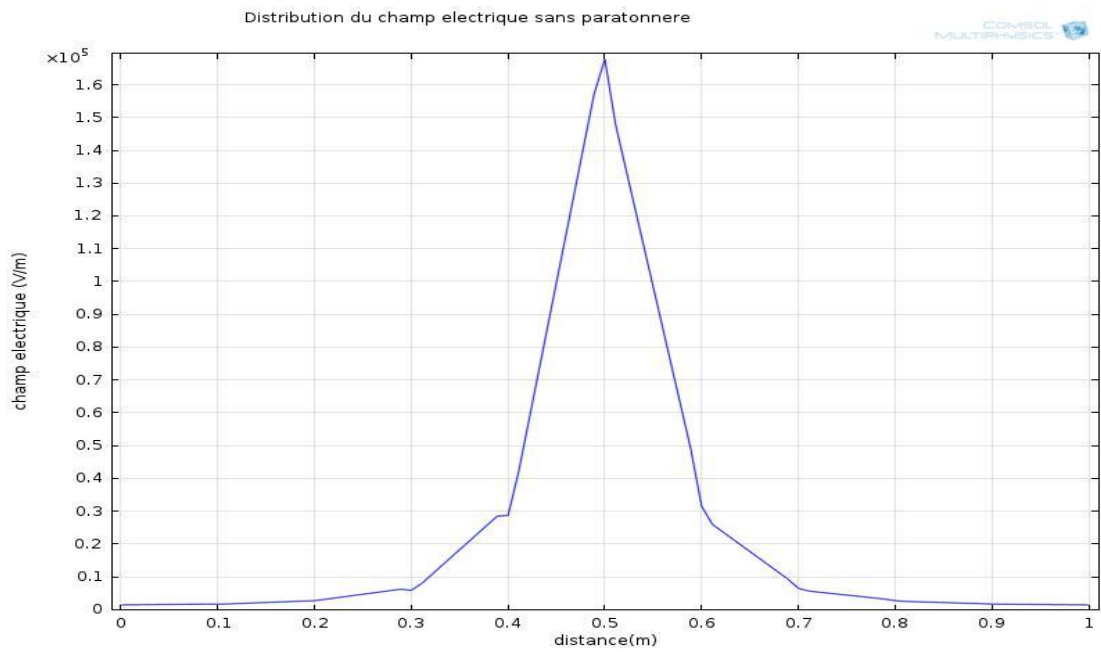


Figure III .05. Le courbe de distribution du champ électrique sans paratonnerre pour $h=8\text{cm}$

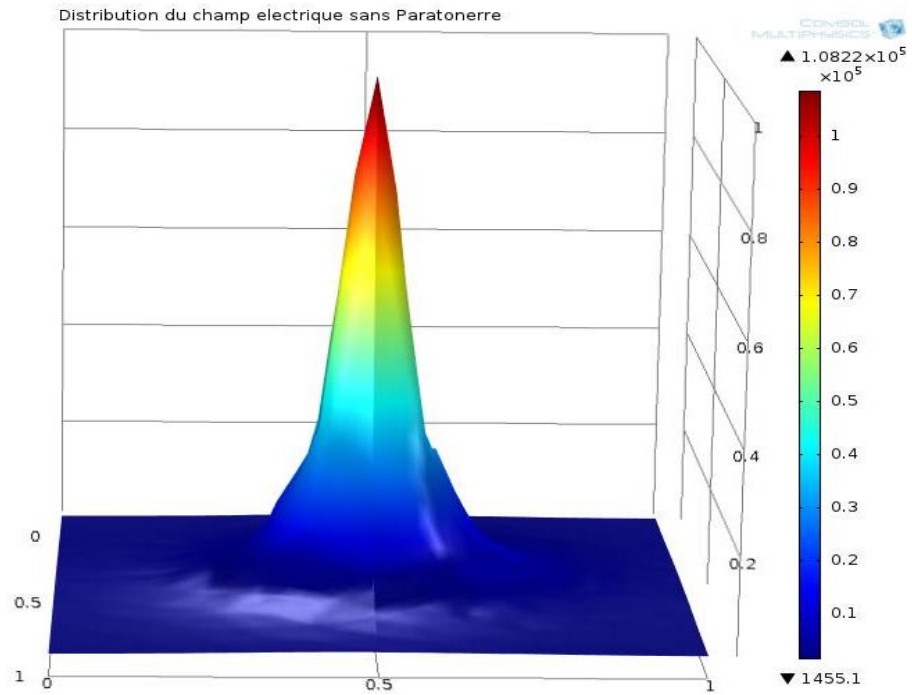


Figure III .06. Distribution du champ électrique sans paratonnerre Pour $h=10\text{cm}$

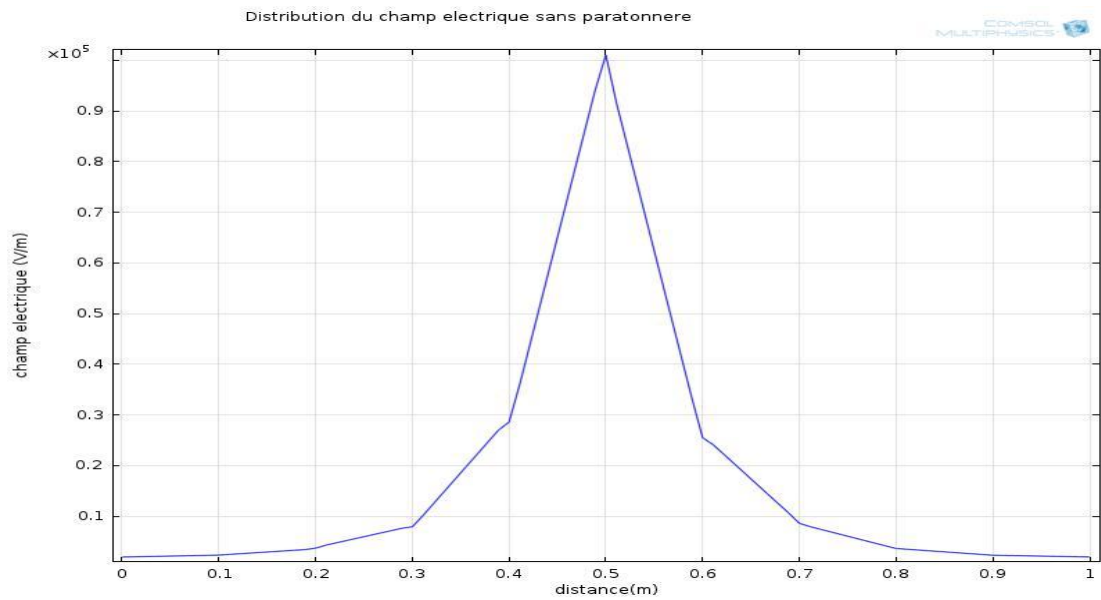


Figure III .07. Le courbe de distribution du champ électrique sans paratonnerre pour $h=10\text{cm}$

III .2.SYSTEME TIGE- PLAN AVEC PARATONNERRE:

Dans cette partie, nous avons comme objectif l'étude de l'influence du paratonnerre sur la distribution du champ électrique au sol dans le cas du système tige - plan sous tension de choc de foudre négative en fonction des paramètres suivants:

- La distance (D) entre l'axe de la tige HT et le paratonnerre.
- La hauteur du paratonnerre (h_c).
- La longueur de l'intervalle d'air tige e- plan (h).

III .2.1.INFLUENCE DE LA POSITION DU PARATONNERRE:

Dans un premier lieu, nous nous intéressons à l'influence de la position du paratonnerre pour les trois hauteurs de la tige ($h=8, 10\text{cm}$), ainsi que les quatre hauteurs relatives du paratonnerre ($h/h_c = 1, 1.5, 2$) et ceci pour le niveau de tension $U_{0\%}$.

position du paratonnerre est définie par la distance D entre l'axe de la pointe et le paratonnerre. Ces différentes valeurs relatives de D sont les suivantes : $D/h_c=0, 0.5, 1, 2,$.

D'après ces figures nous constatons que plus le paratonnerre se rapproche de la tige (D/h_c diminue) plus le champ sur le plan diminue. Nous expliquons ce résultat par le fait que le paratonnerre joue un rôle attractif important des lignes de champ électrique, donc nous pouvons conclure que plus le paratonnerre se rapproche de la tige sous tension plus il capte une grande quantité de lignes de champ et le champ électrique devient relativement fort sur la pointe du paratonnerre augmentant ainsi la probabilité de décharge sur le paratonnerre où le champ est intense.

Nous constatons ainsi, que l'intervalle d'air tige- paratonnerre constitue un chemin préférable pour les lignes de champ électrique, surtout lorsque le paratonnerre est proche de la tige. En effet, le système pointe- plan avec paratonnerre se comporte comme un système pointe- pointe mais moins rigide que le système tige - plan. Ceci justifie la présence de décharges disruptives vers le paratonnerre pour les faibles valeurs de D/h_c (paratonnerre proche de la tige), malgré l'application de niveaux de tension relativement faibles, dans le cas de la configuration avec $h=10\text{cm}$, $D/h_c=1$ et $U=U_{0\%}$.

Pour une position donnée du paratonnerre, le champ électrique au sol diminue au voisinage du paratonnerre. Cette tendance est expliquée par l'attraction des lignes de champ électrique par le paratonnerre, ce qui affaiblit le champ électrique au voisinage du paratonnerre et qui justifie aussi que le champ électrique dans le demi - plan qui contient le paratonnerre devient confondue avec celle donnée par le système tige- plan sans paratonnerre [13] .

III.2.2.INFLUENCE DE LA HAUTEUR DU PARATONNERRE:

nous constatons que pour les grandes hauteurs du paratonnerre (h/h_c est petit) la valeur du champ électrique est faible. Ceci peut être expliqué par le fait que plus le paratonnerre a une hauteur élevée plus il attire un plus grand nombre de lignes de champ. Par conséquent, le champ électrique au sol diminue et la probabilité de foudroiement du paratonnerre augmente. A fur et à mesure que la hauteur du paratonnerre diminue, on assiste à une augmentation du champ électrique au niveau du sol. Pour les petites hauteurs de h_c (h/h_c grand), la valeur de champ électrique augmente. On note aussi que le champ électrique dans le demi - plan qui contient le paratonnerre est inférieur à celui correspondant à l'autre demi - plan, à cause de la forte attraction des lignes de champ électrique par le paratonnerre, ce qui affaiblit le champ électrique au niveau du sol.

Au-dessous de la tige, nous remarquons la forte augmentation du champ électrique sur le plan pour le niveau de tension $U_{0\%}$ lorsque le paratonnerre s'éloigne de l'axe de la tige pour différentes hauteurs du paratonnerre. Ceci est valable lorsque la hauteur du paratonnerre diminue. Cette augmentation est beaucoup plus importante et plus remarquable si le niveau de tension plus faible [10].

✓ **Modèle de la simulation:**

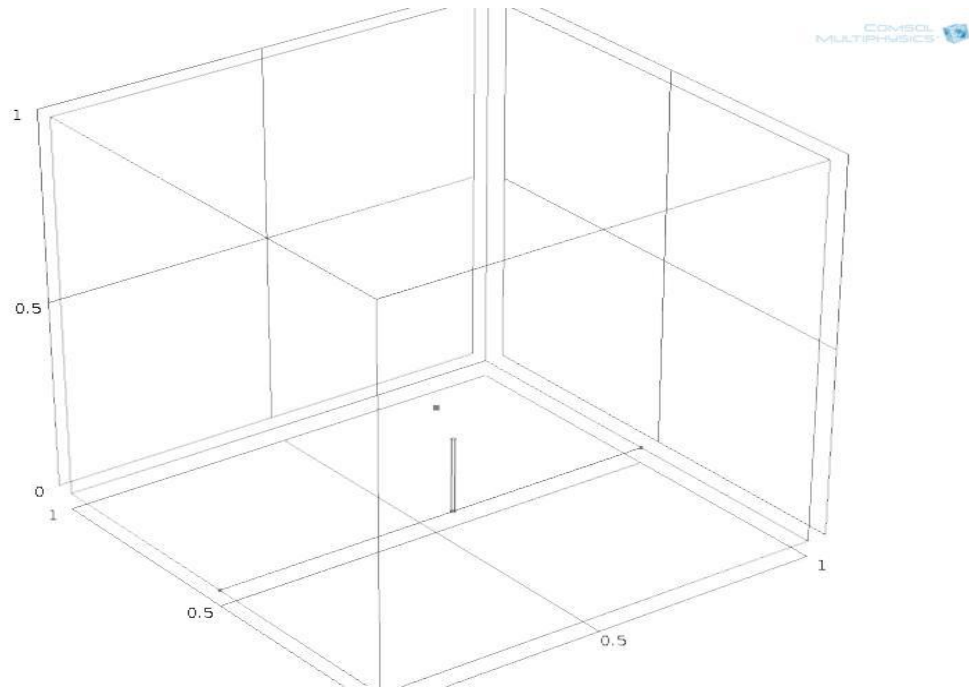


Figure III.08. Modèle de la simulation avec paratonnerre

- $h=8;h_c=4;D=0$ cm

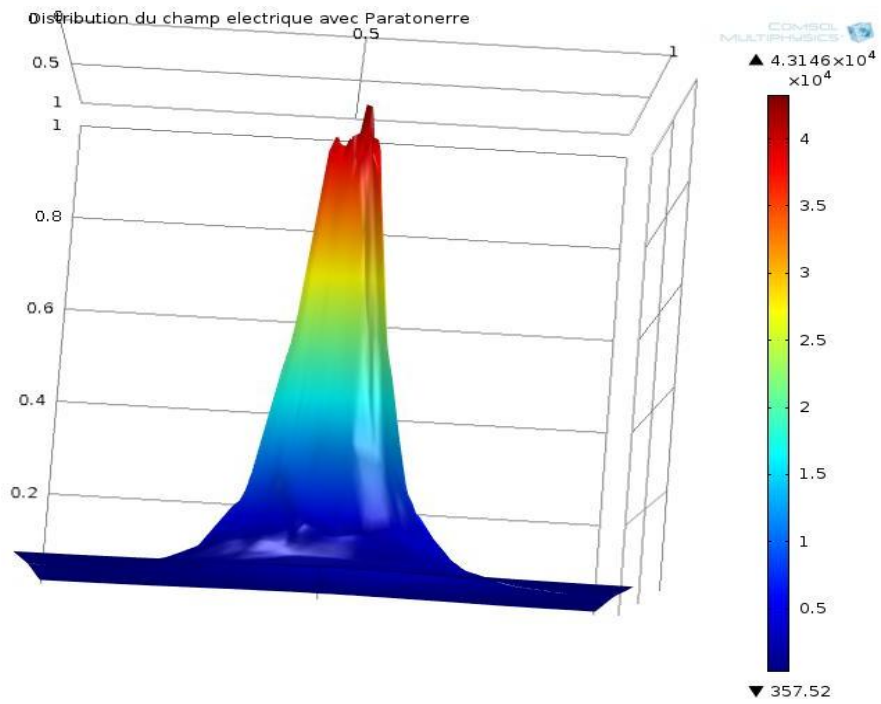


Figure III .09. Distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=0$ cm

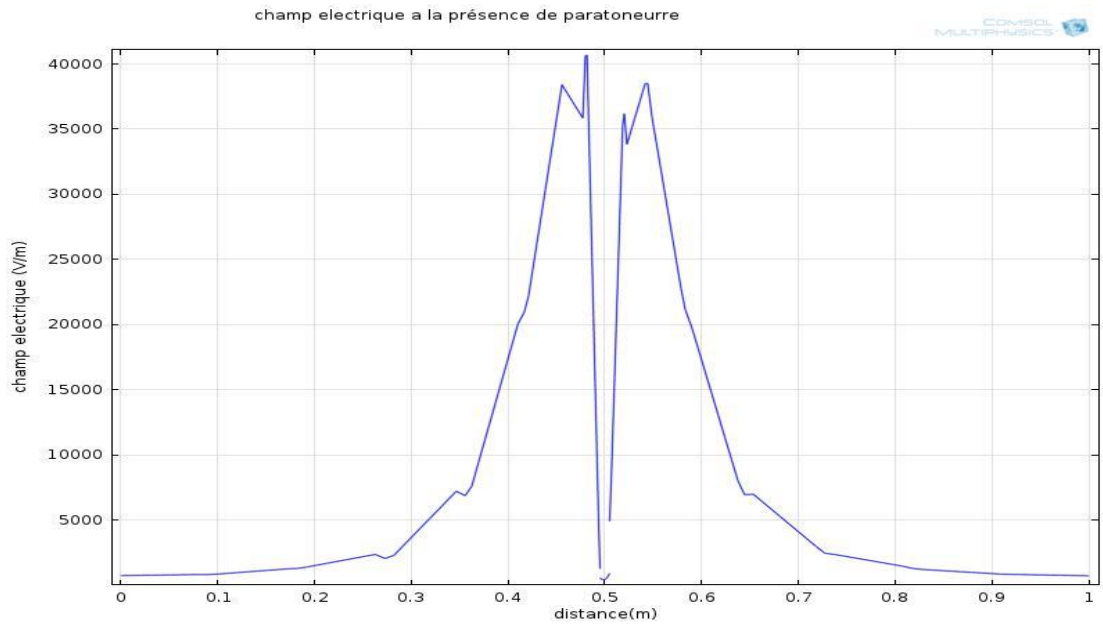


Figure III .10. Le courbe de distribution du champ électrique avec paratoneur

$D=0\text{ cm}$

- $h=8;h_c=4;D=2\text{ cm}$

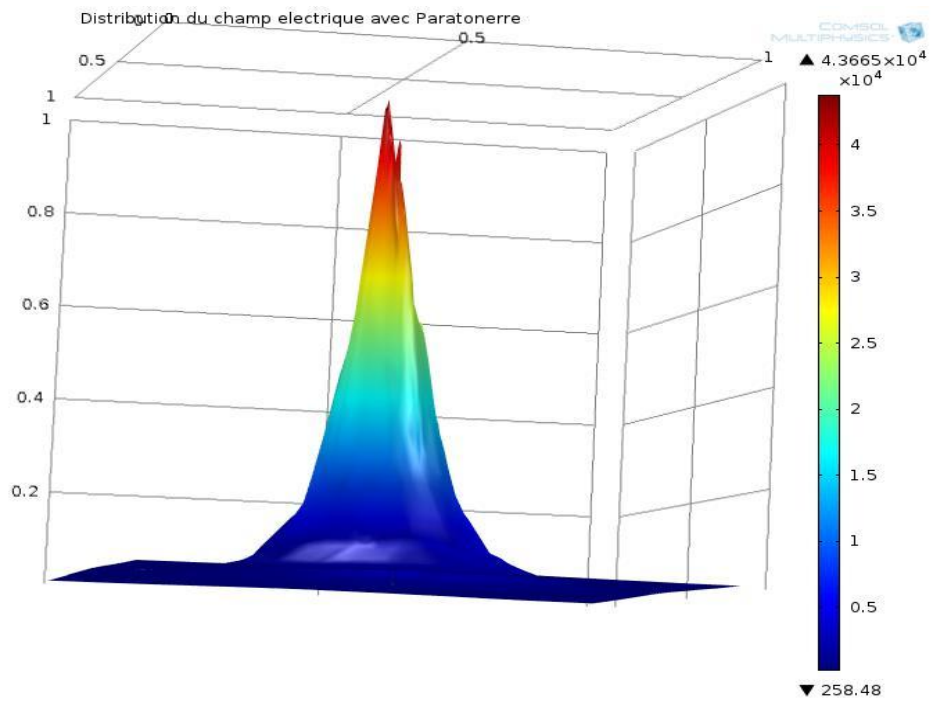


Figure III .11. Distribution du champ électrique avec paratoneur $D=2\text{ cm}$

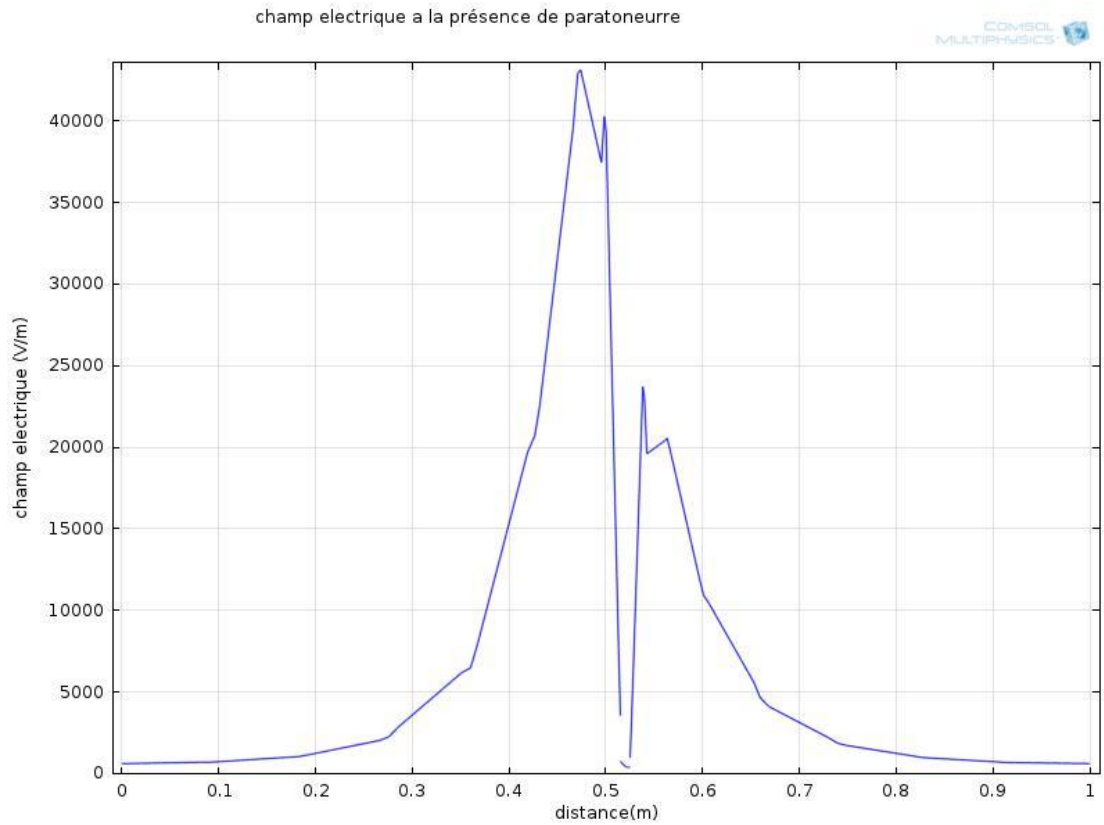


Figure III.12. le courbe de distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=2\text{ cm}$

- $h=8;h_c=4;D=4\text{ cm}$

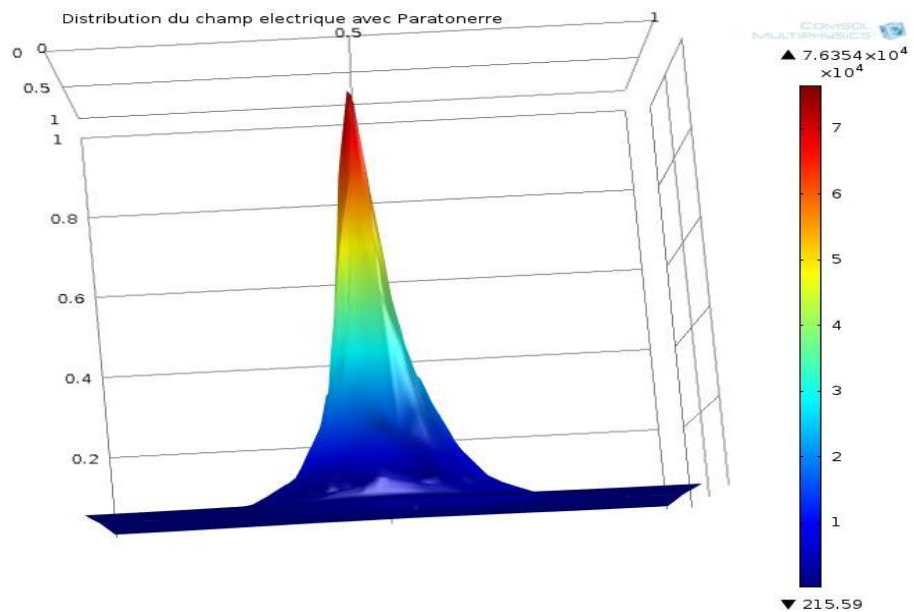


Figure III .13. Distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=4\text{ cm}$

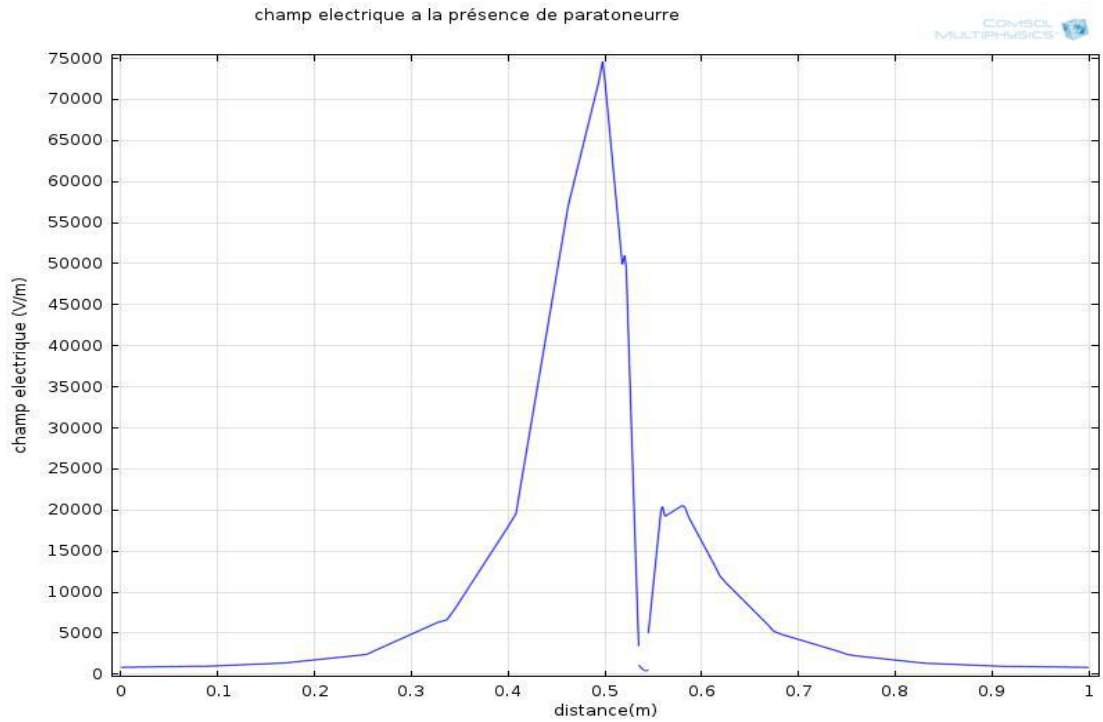


Figure III .14. Le courbe de distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=4$ cm

- $h=8;h_c=4;D=6$ cm

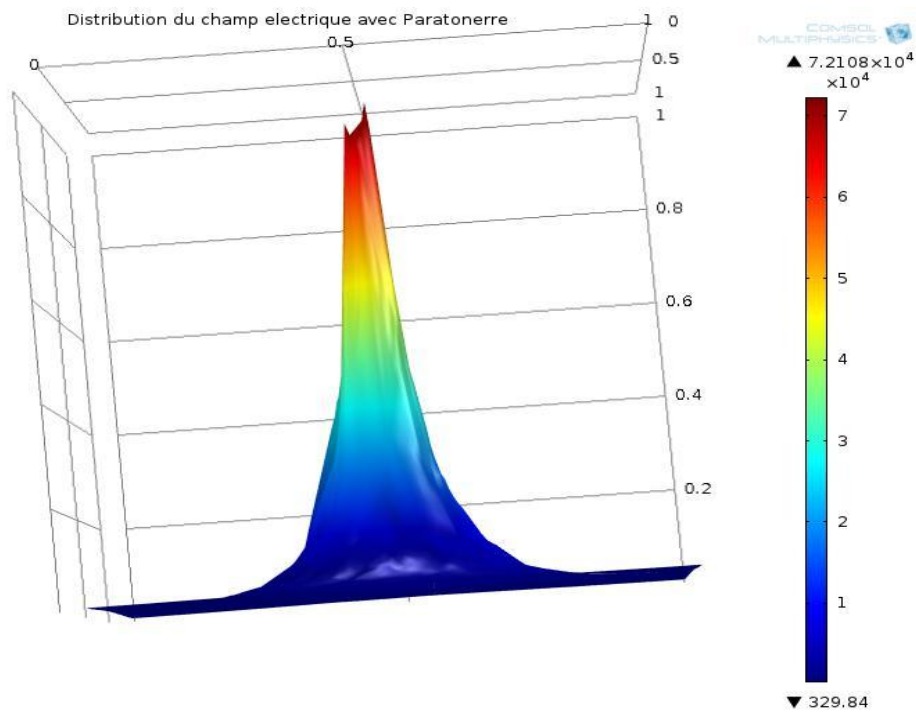


Figure III.15. distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=6$ cm

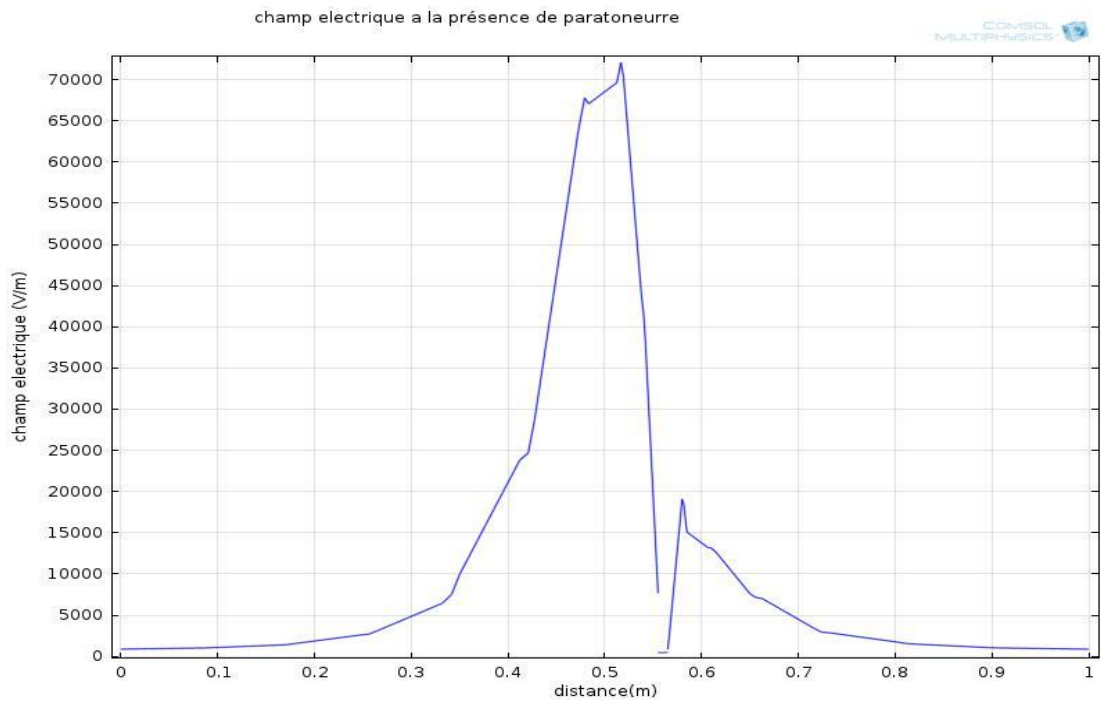


Figure III.16. Le courbe de distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=6\text{ cm}$

- $h=8;hc=4;D=8\text{ cm}$

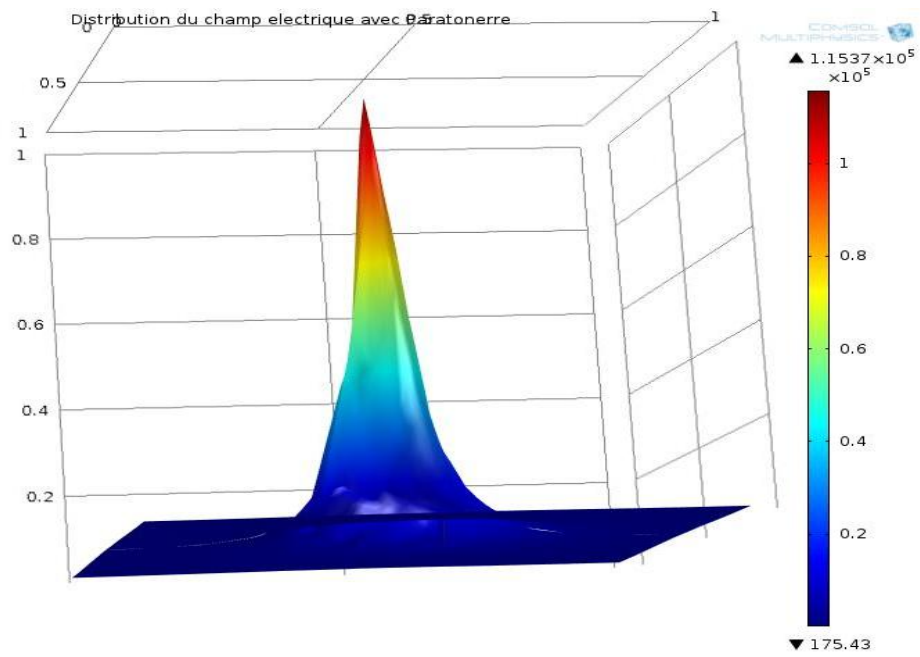


Figure III.17. Distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=8\text{ cm}$

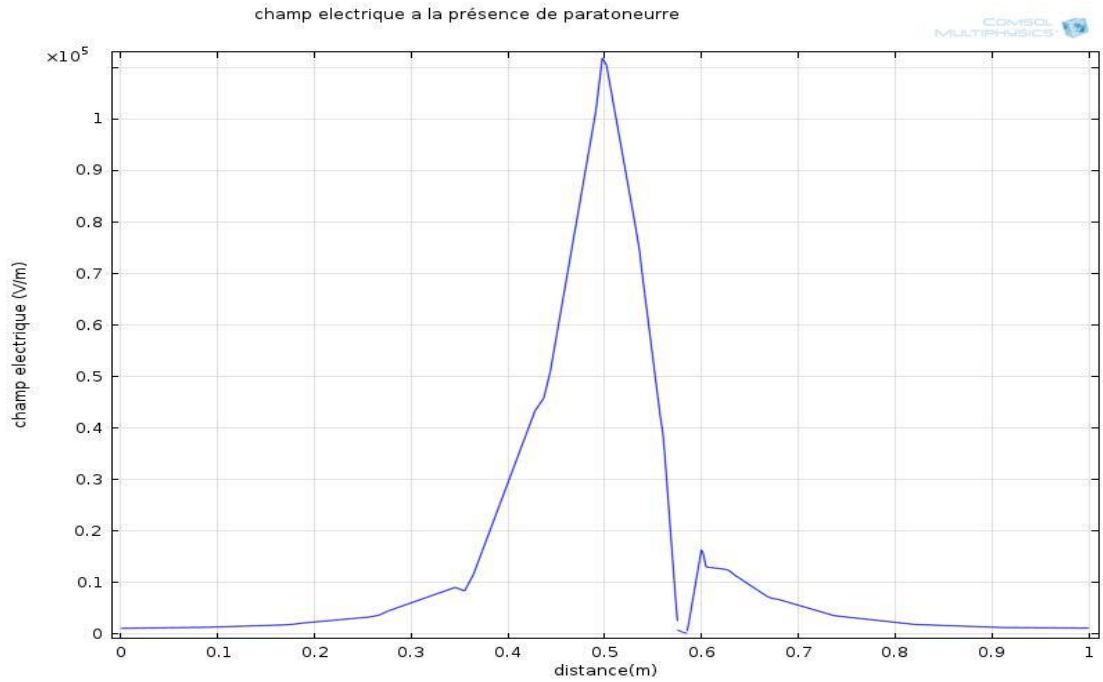


Figure III.18. Le courbe de distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=8$ cm

- $h=8;hc=6;D=3$ cm

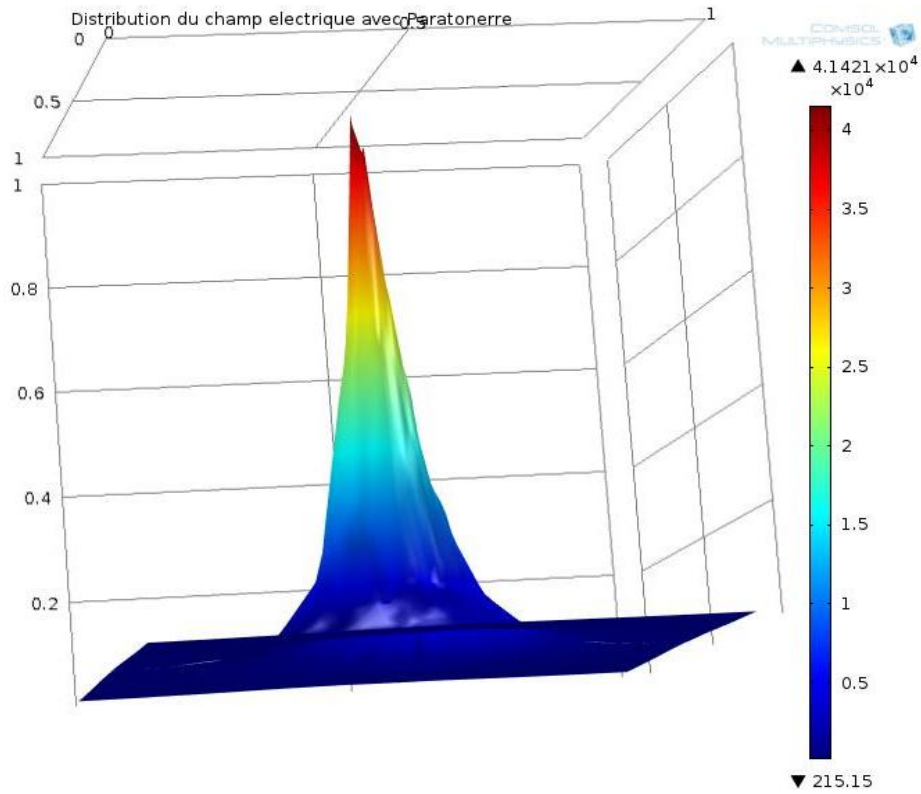


Figure III .19. distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=3$ cm

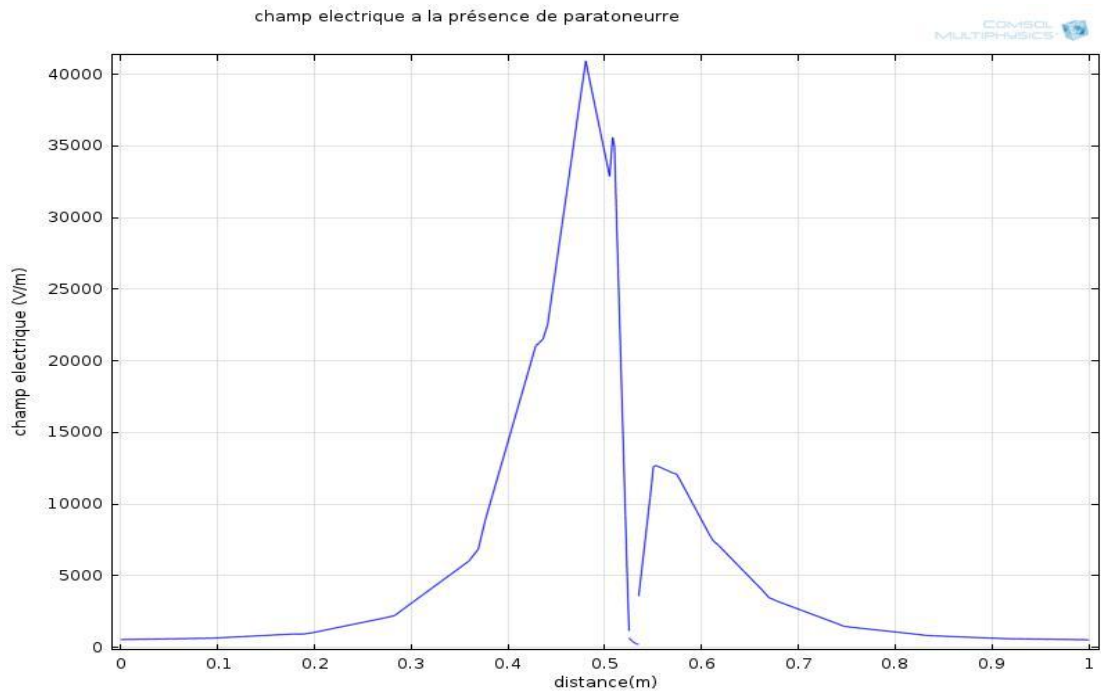


Figure III.20. Le courbe de distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=3\text{ cm}$

- $h=8;hc=6;D=6\text{cm}$

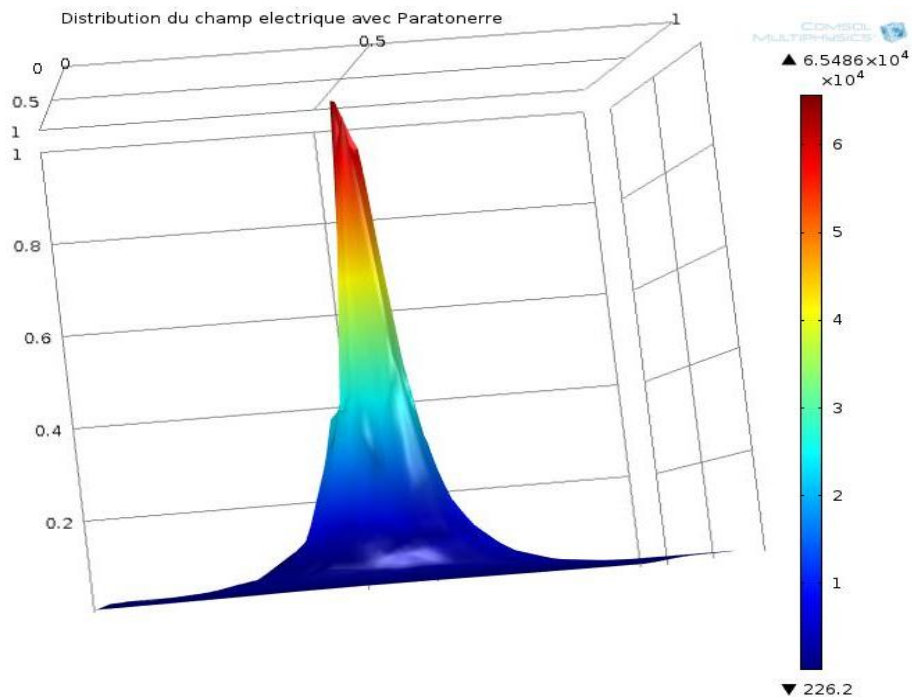


Figure III .21. distribution du champ électrique avec paratonnerres $D=6\text{cm}$

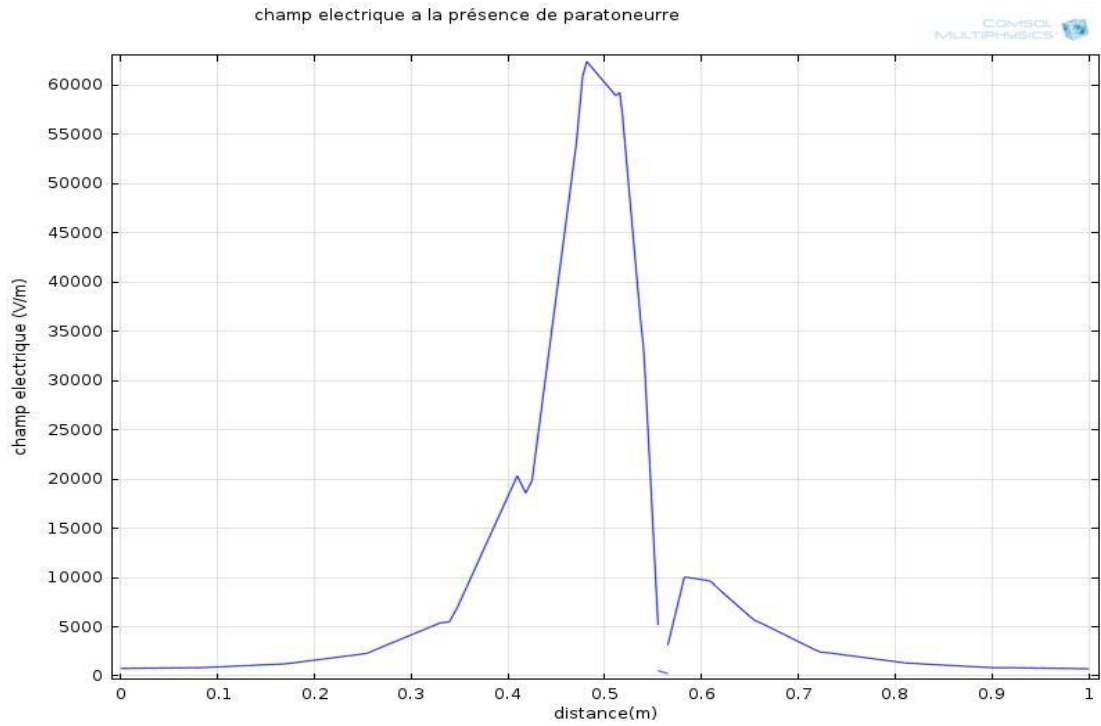


Figure III.22. Le courbe de distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=6\text{cm}$

- $h=8;h_c=6;D=12\text{ cm}$

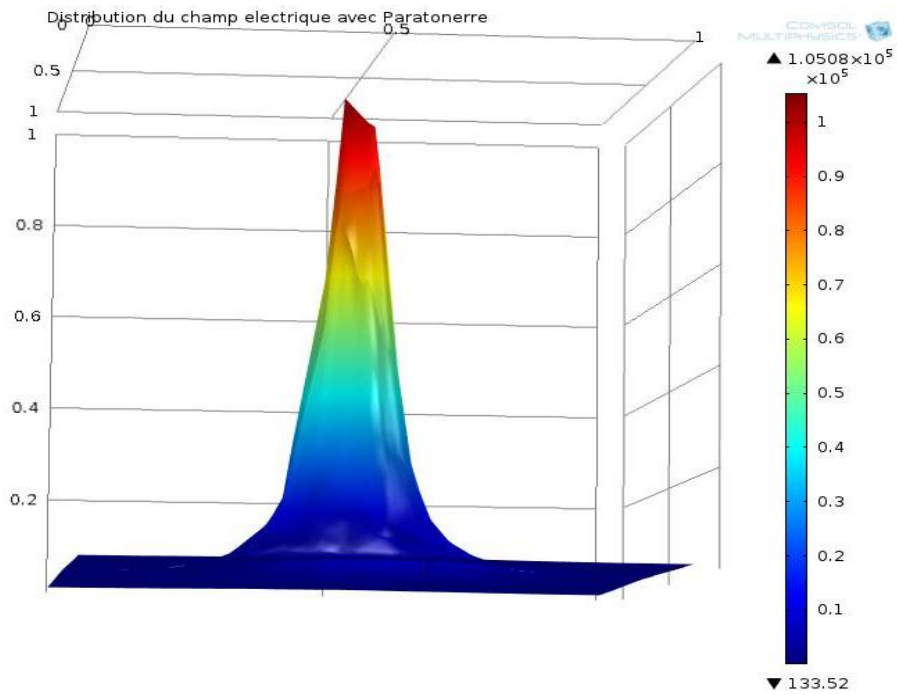


Figure III.23. distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=12\text{ cm}$

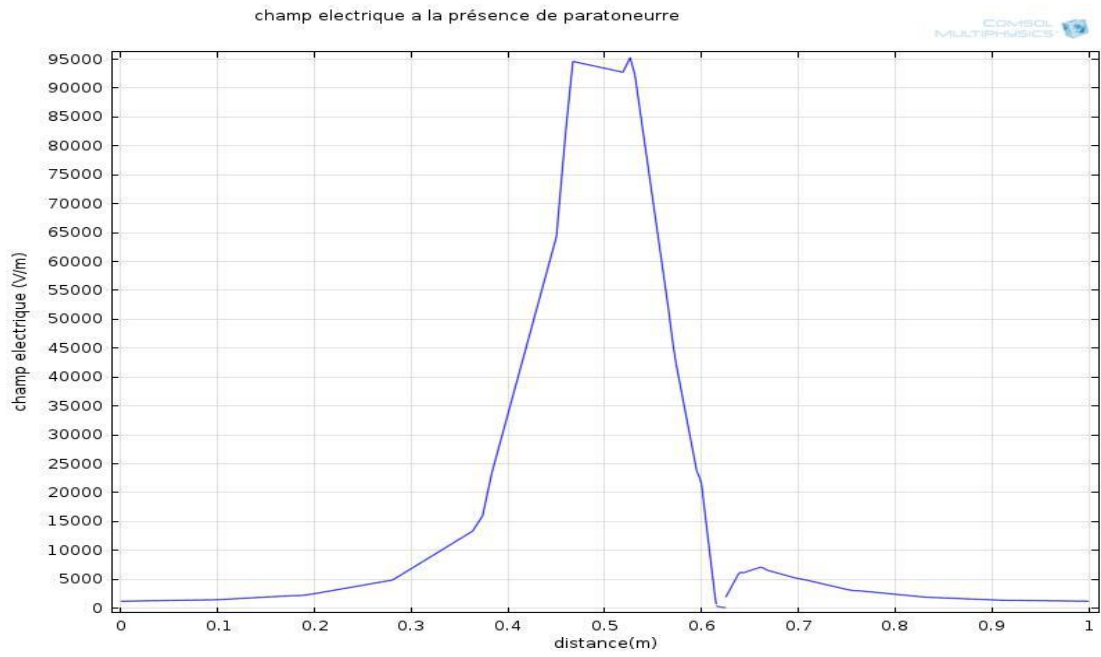


Figure III.24. Le courbe de distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=12\text{ cm}$

- $h=8;hc=8;D=4\text{ cm}$

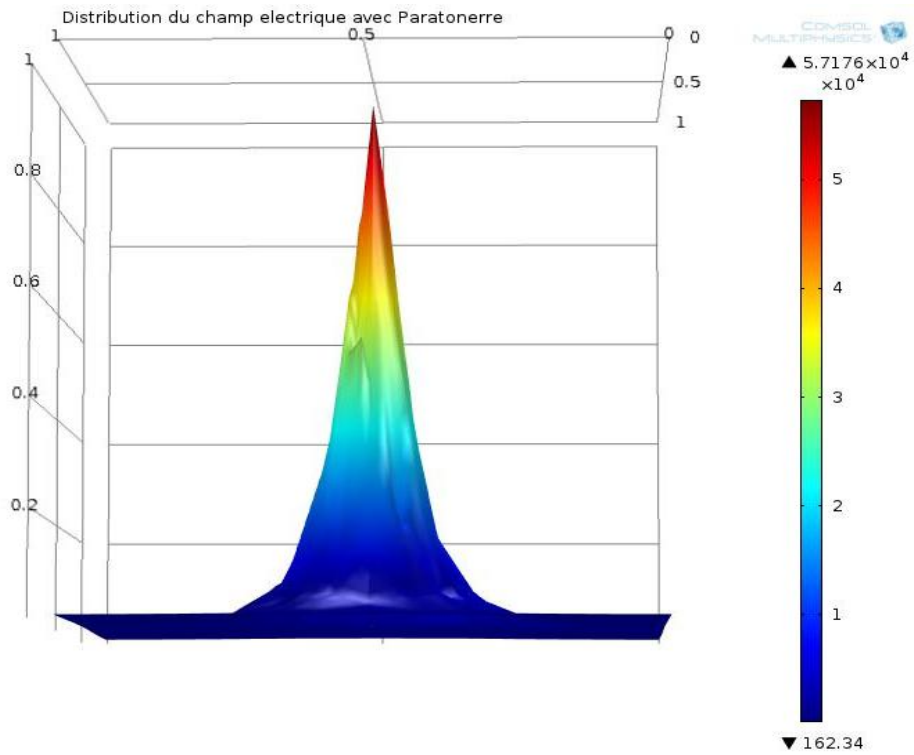


Figure III.25. distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=4\text{ cm}$

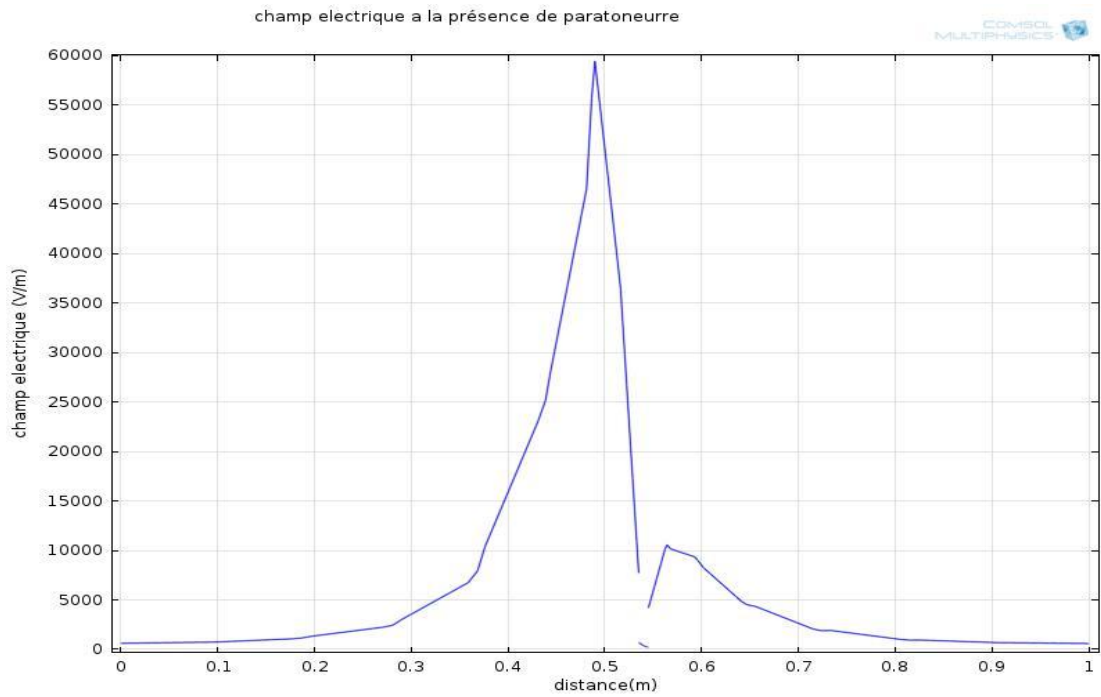


Figure III .26. Le courbe de distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=4\text{ cm}$

- $h=8;h_c=8;D=8\text{ cm}$

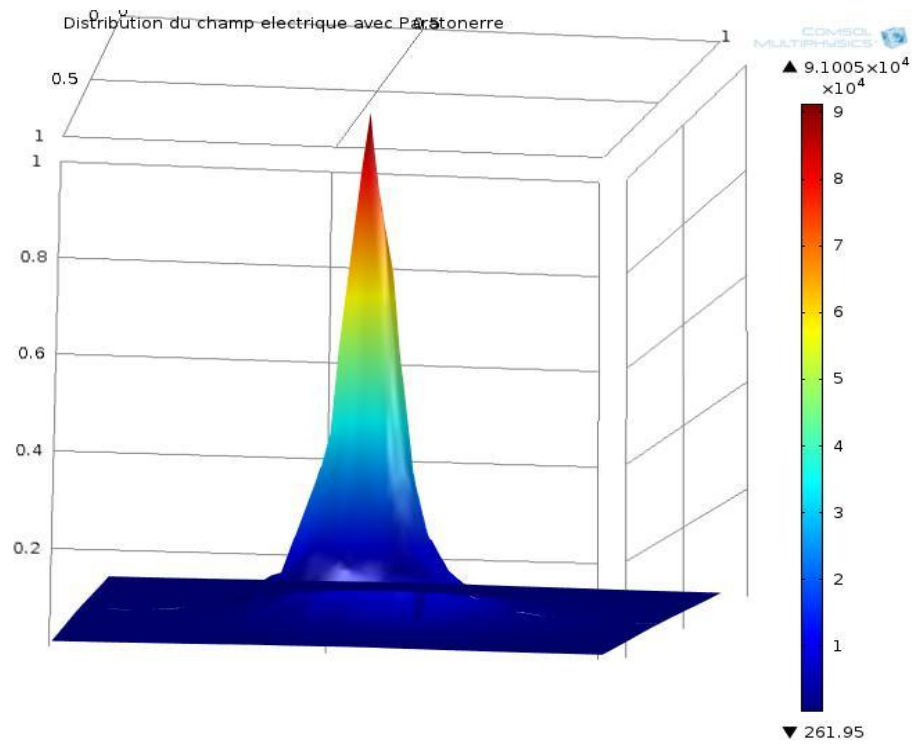


Figure III .27. distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=8\text{ cm}$

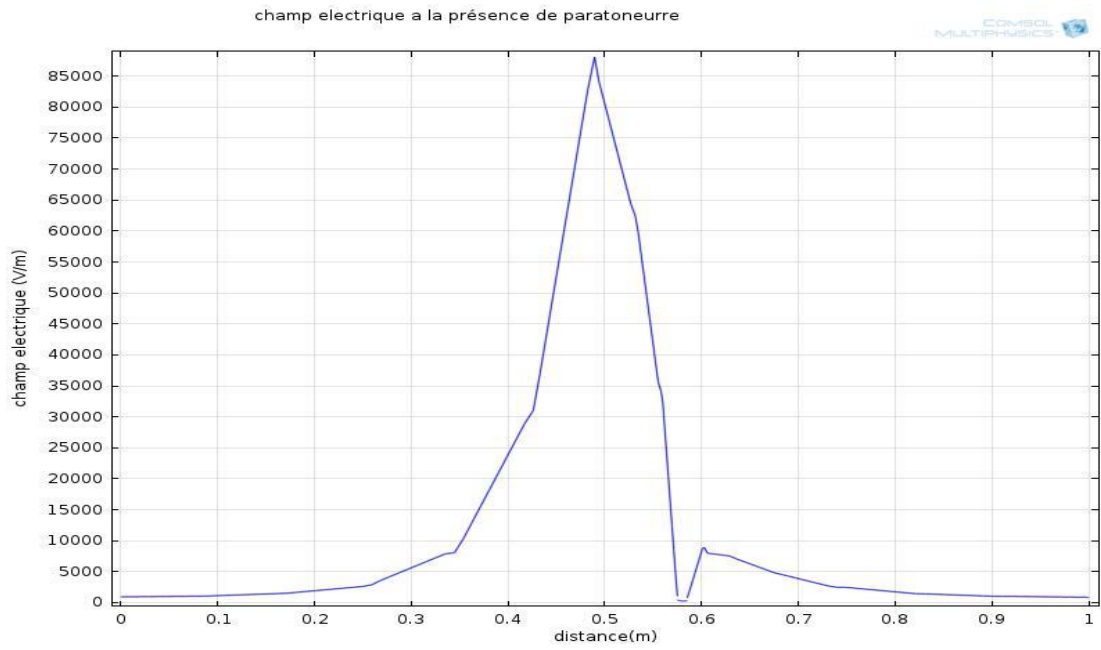


Figure III .28.Le courbe de distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=8\text{ cm}$

- $h=8;h_c=8;D=16\text{ cm}$

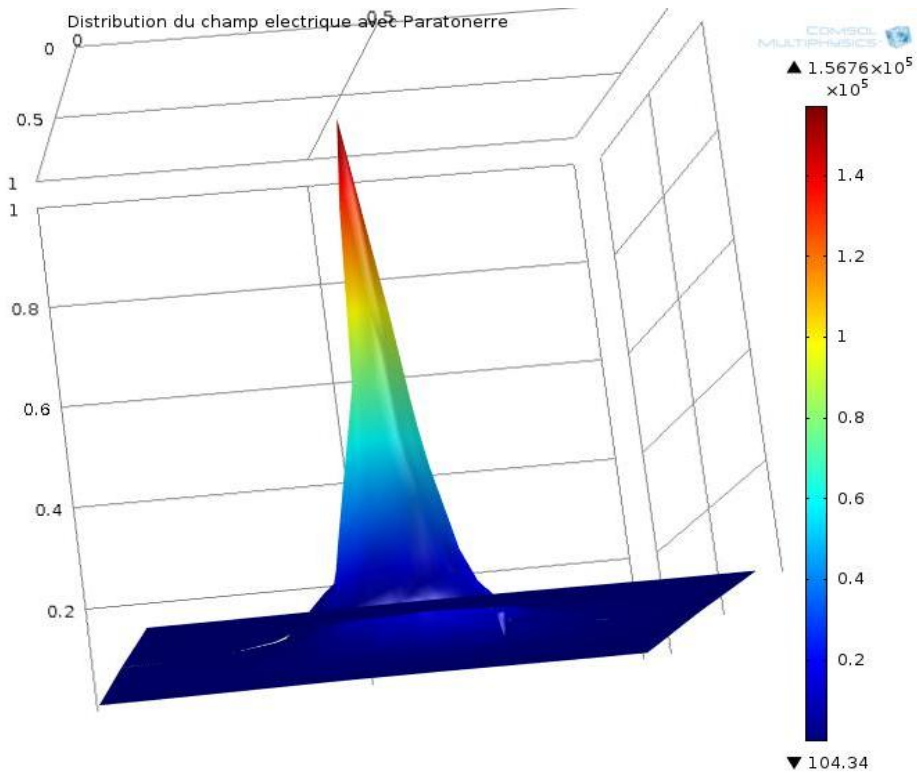


Figure III .29.distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=16\text{ cm}$

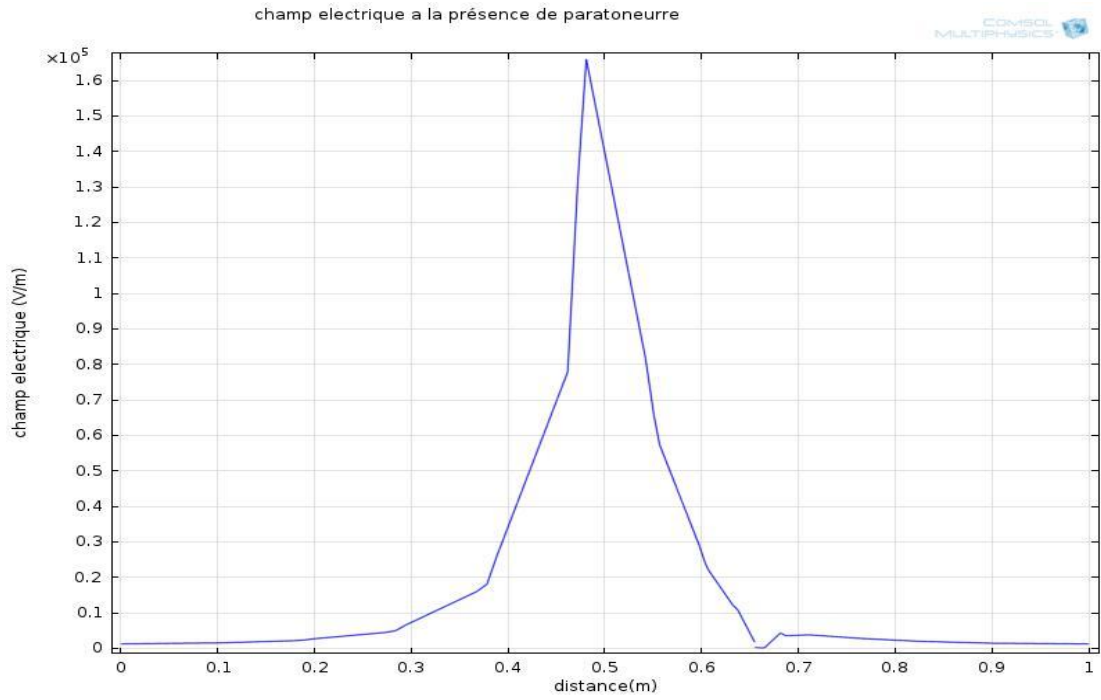


Figure III.30. Le courbe de distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=16$ cm

✓ $h=10; h_c=5; D=0$ cm

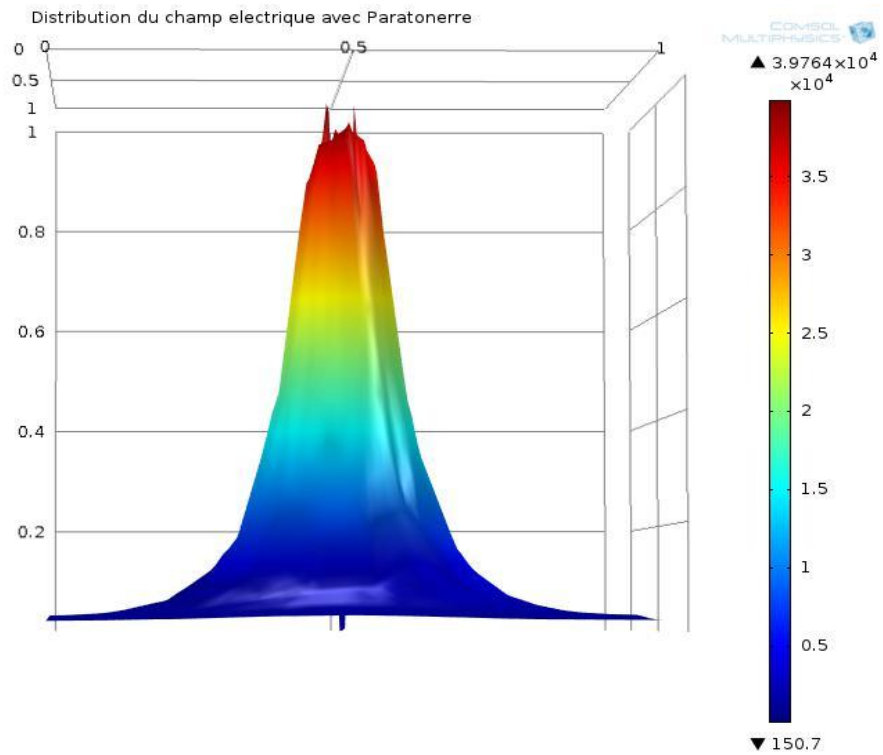


Figure III.31. Distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=0$ cm

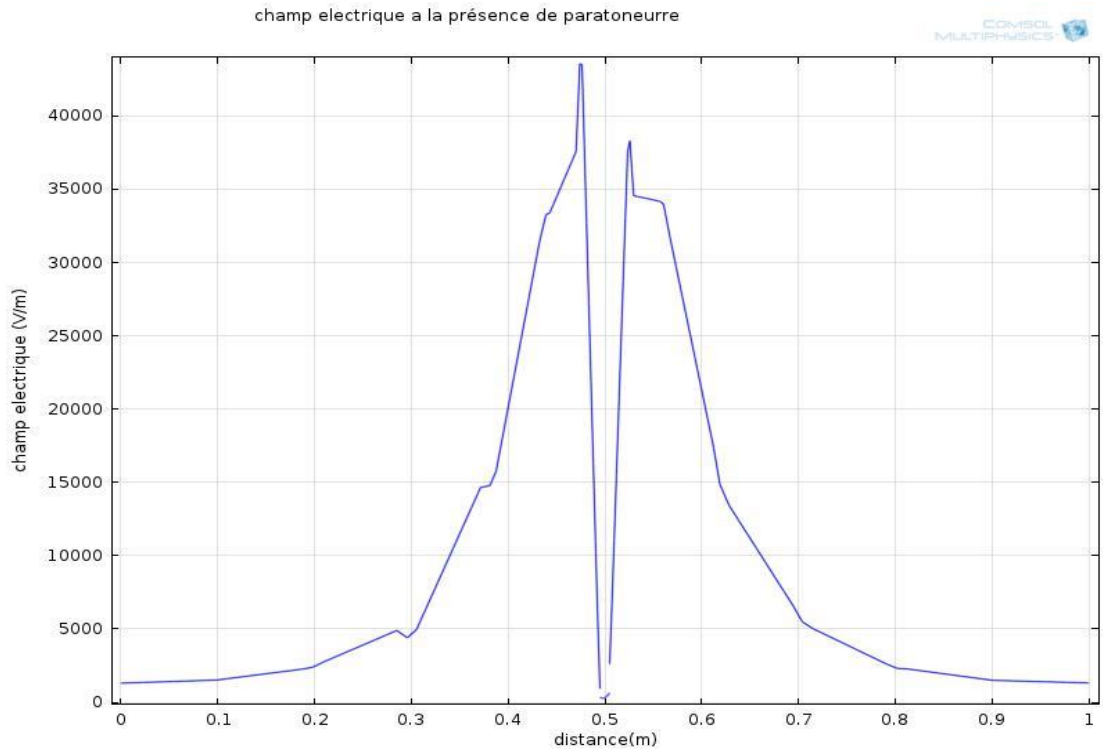


Figure III.32. Le courbe de distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=0$ cm

✓ $h=10; h_c=5; D=2$ cm

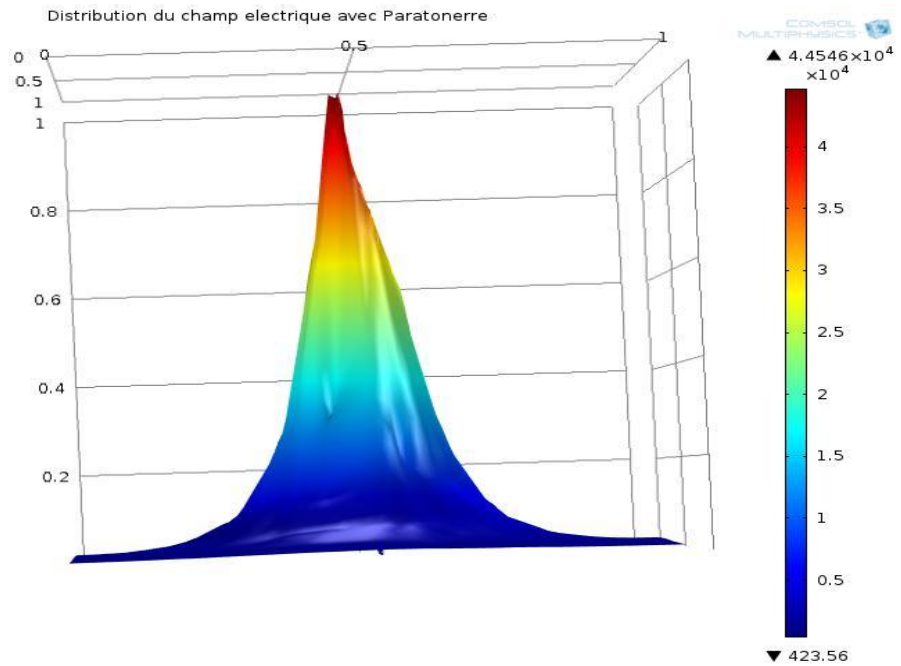


Figure III .33. Distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=2$ cm

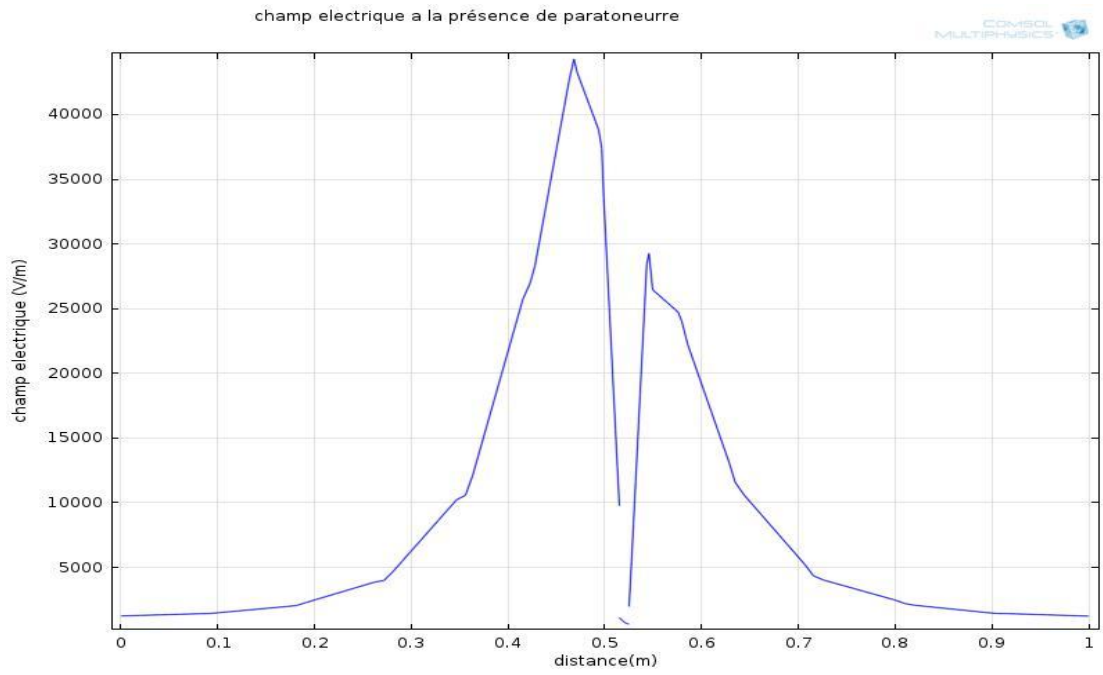


Figure III.34. Le courbe de distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=2\text{ cm}$

- $h=10;h_c=5;D=5\text{ cm}$

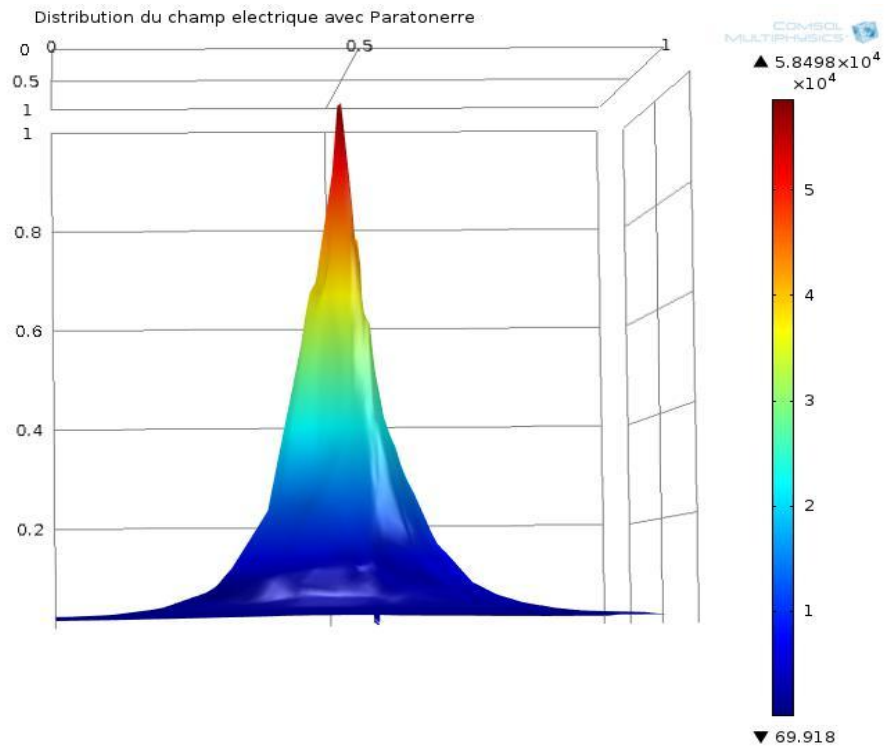


Figure III .35. Distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=5\text{ cm}$

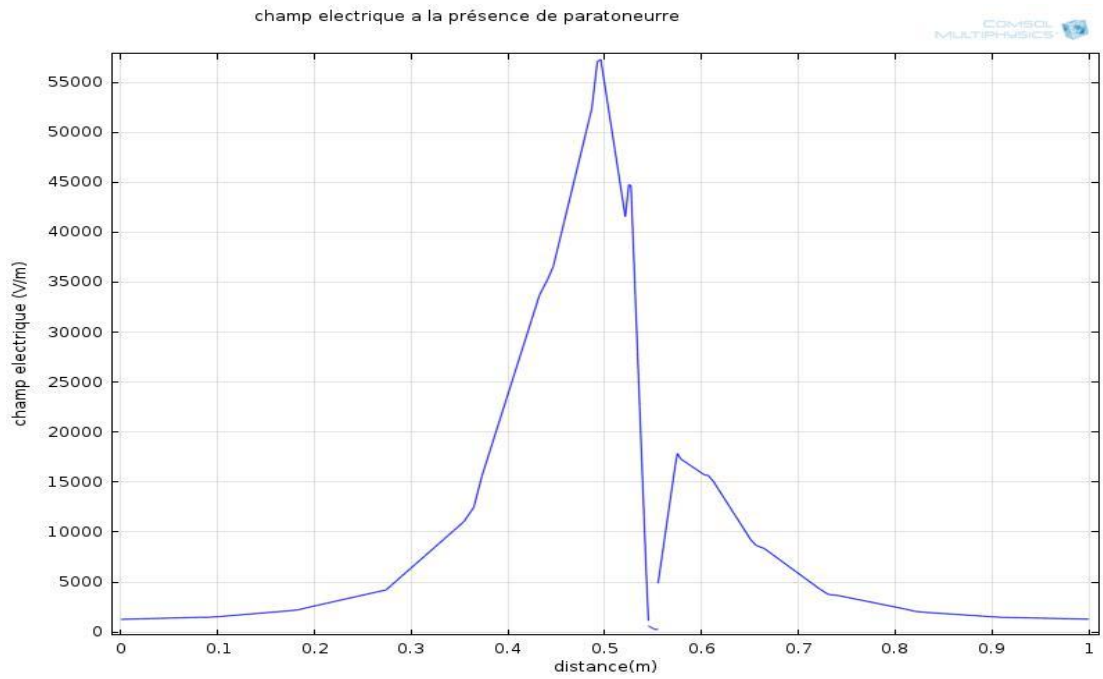


Figure III.36. Le courbe de distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=5\text{ cm}$

- $h=10;h_c=5;D=10\text{ cm}$

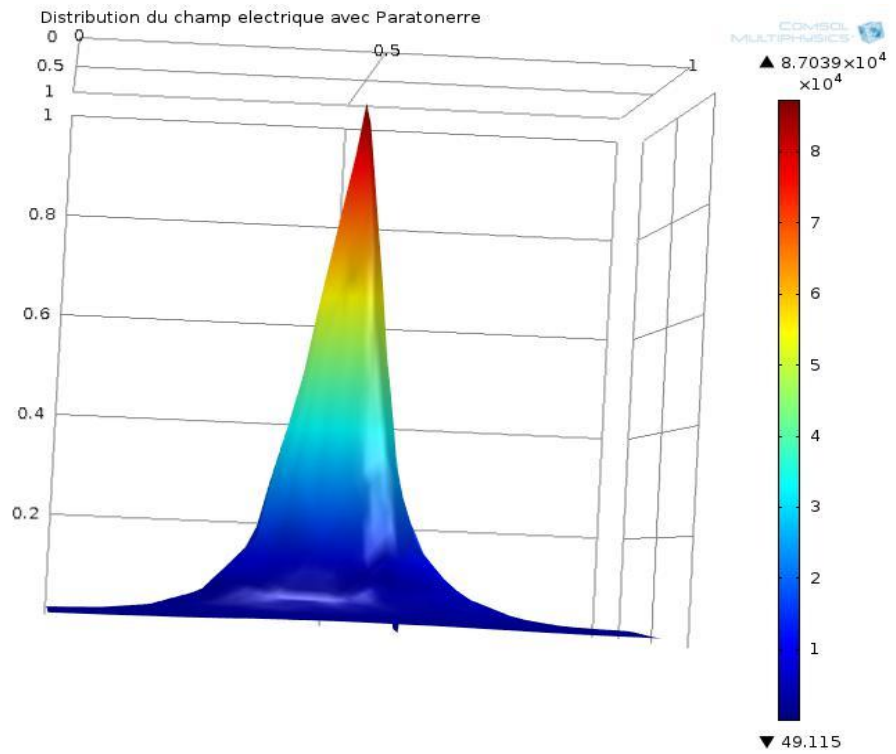


Figure III.37. Distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=10\text{ cm}$

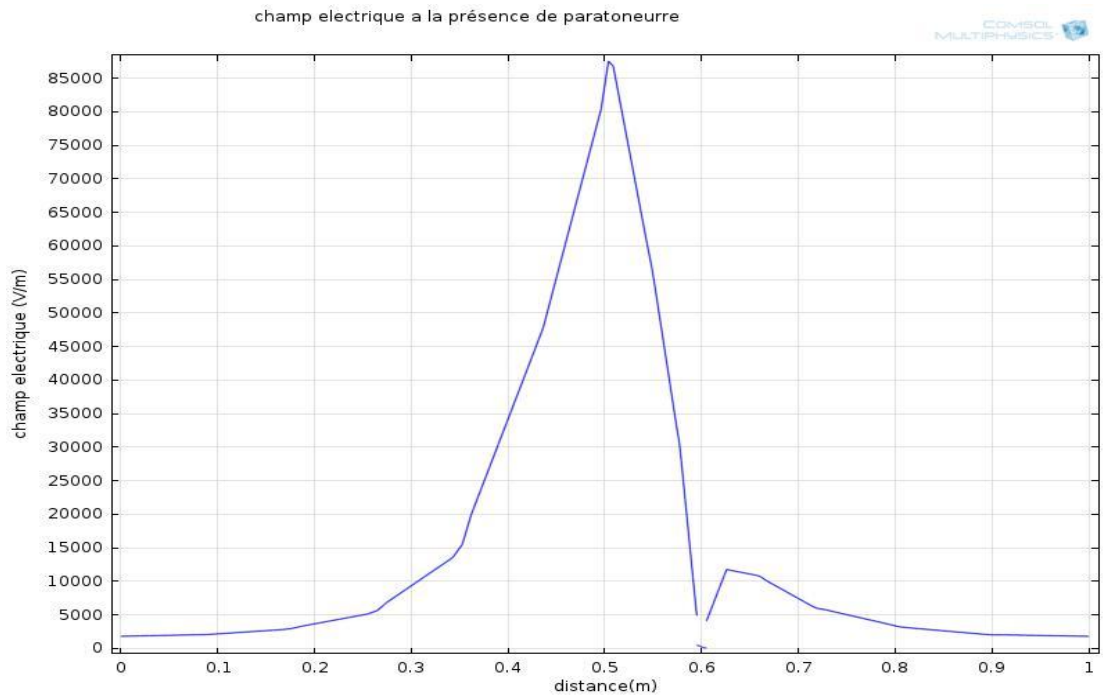


Figure III.38. Le courbe de distribution du champ électrique avec paratoneur $D=10\text{cm}$

- $h=10;h_c=7;D=0\text{ cm}$

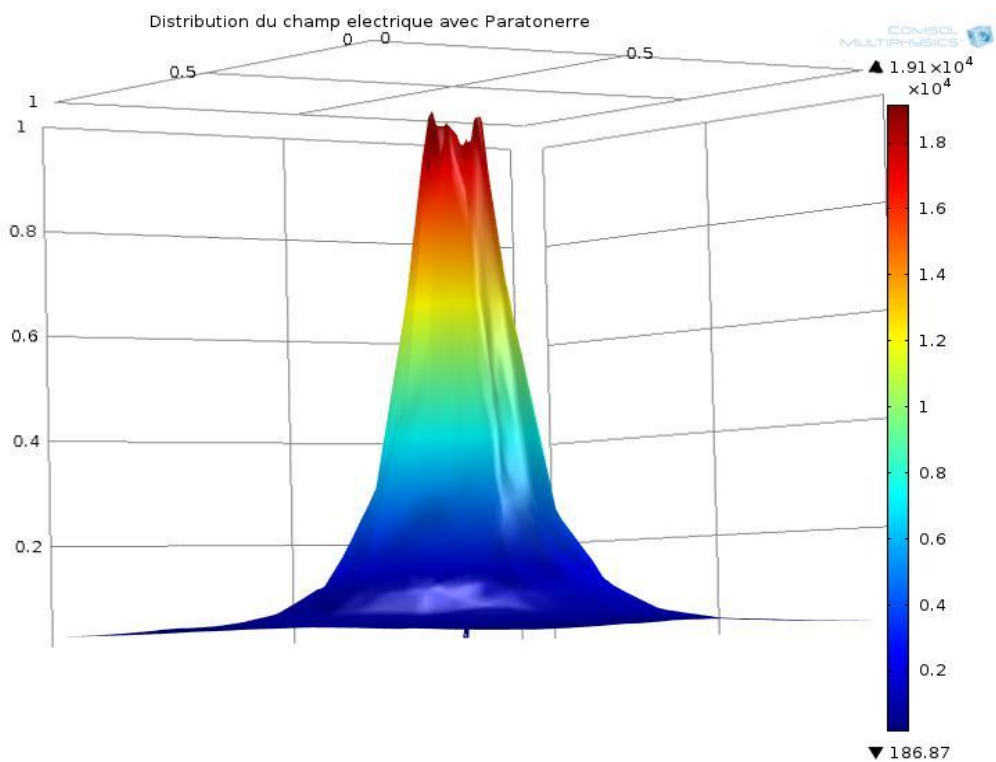


Figure III.39. Distribution du champ électrique avec paratoneur $D=0\text{cm}$

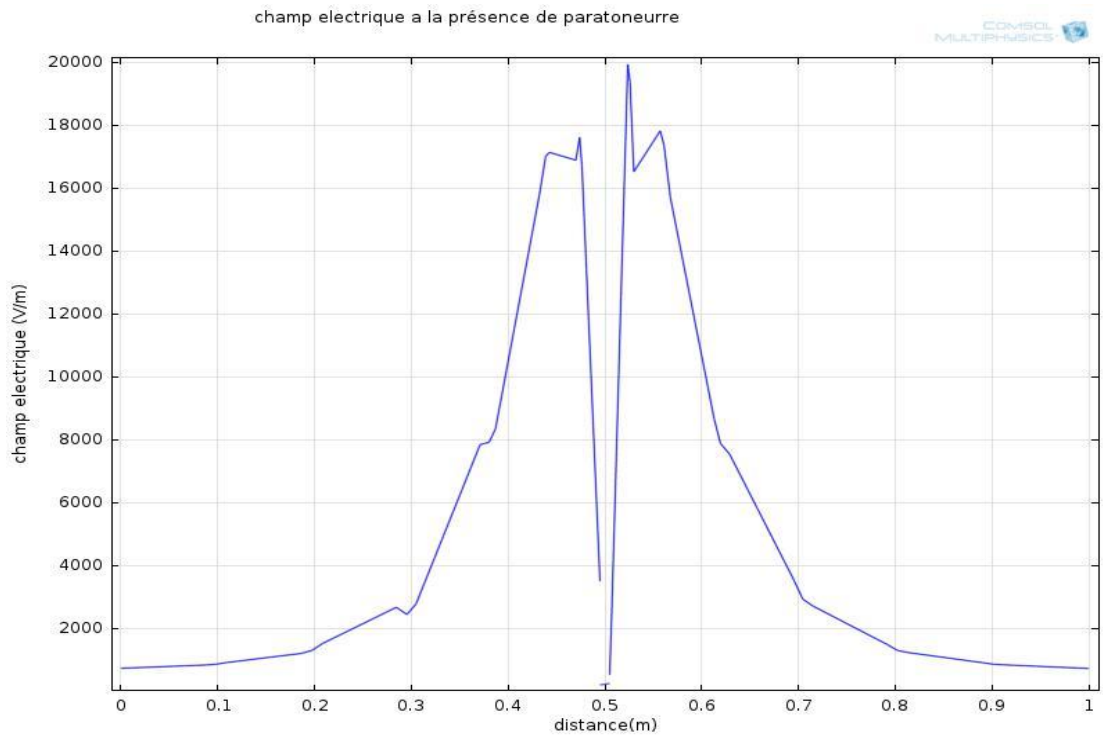


Figure III.40. Le courbe de distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=0\text{cm}$

- $h=10; h_c=7; D=3\text{ cm}$

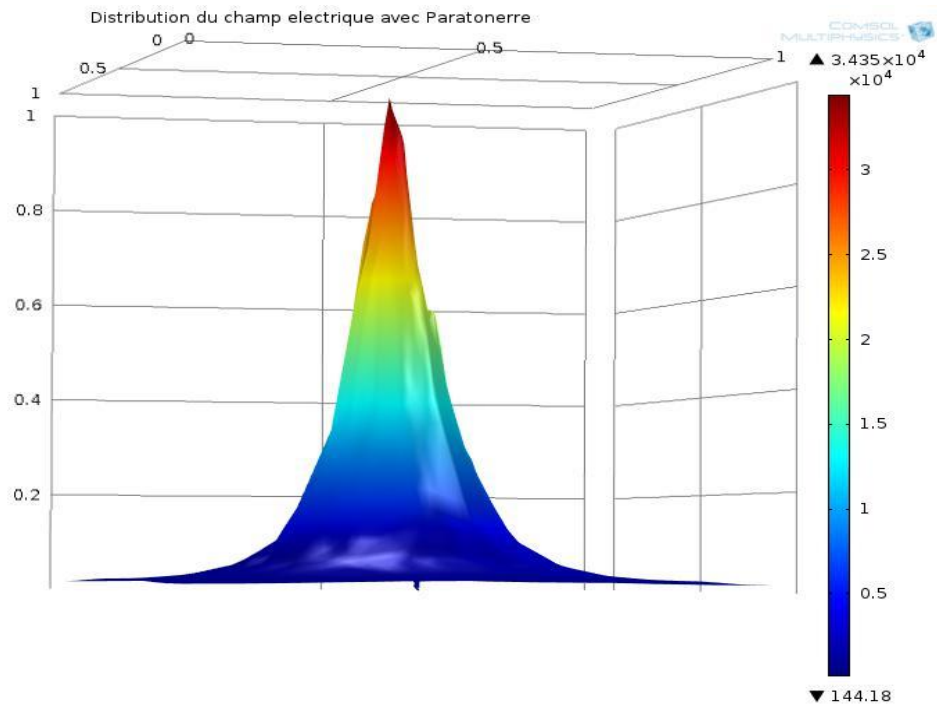


Figure III.41. Distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=3\text{cm}$

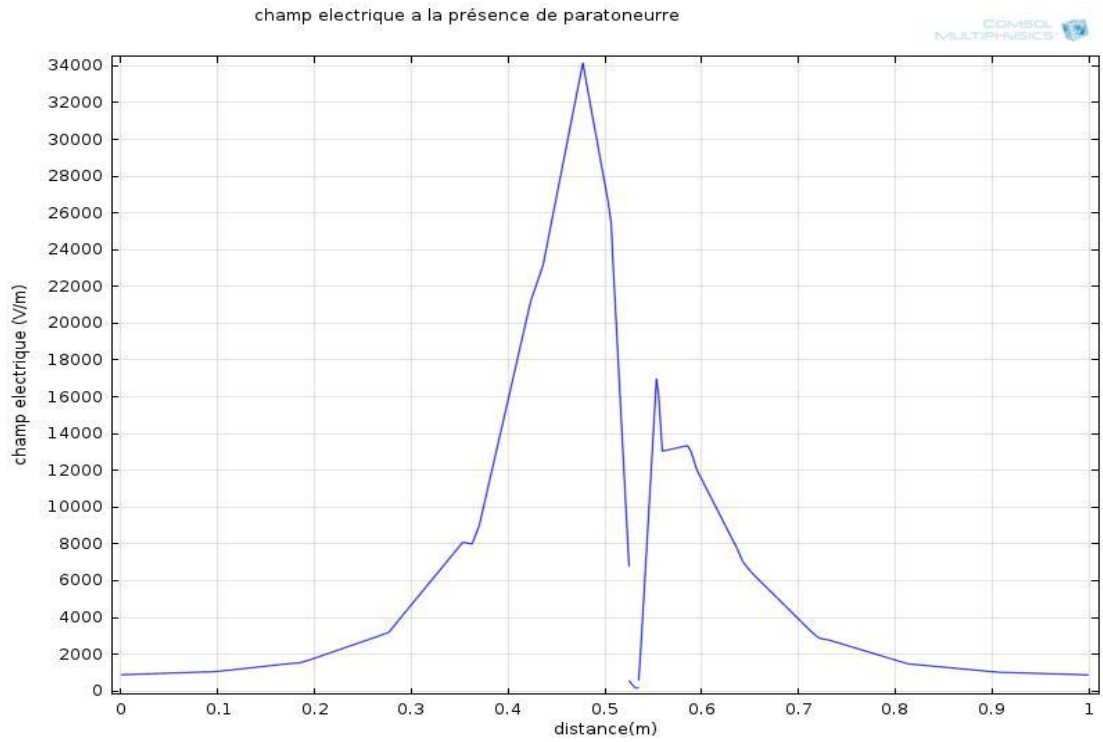


Figure III.42. Le courbe de distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=3\text{cm}$

- $h=10;h_c=7;D=5\text{ cm}$

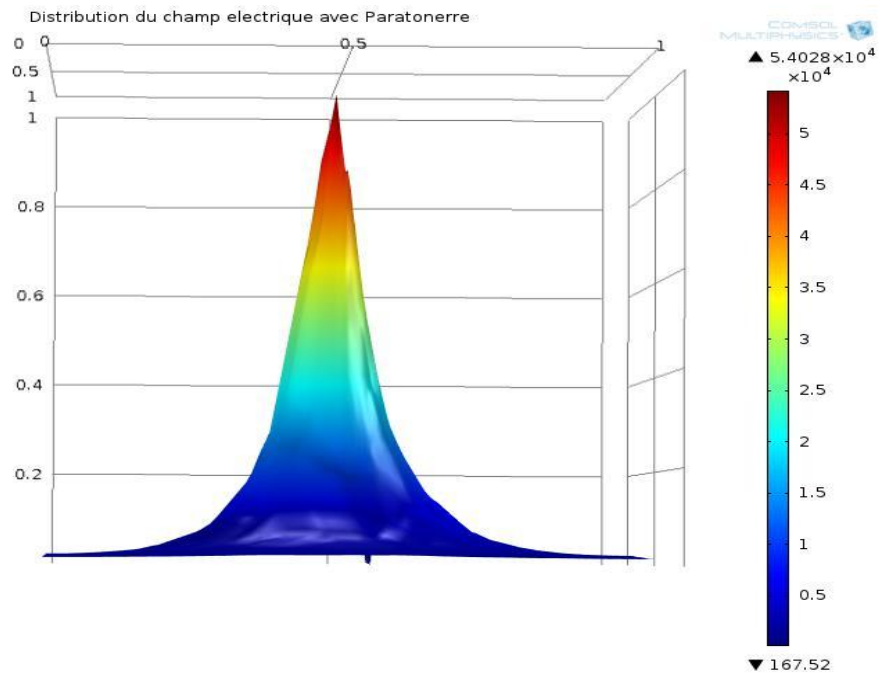


Figure III.43. Distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=5\text{cm}$

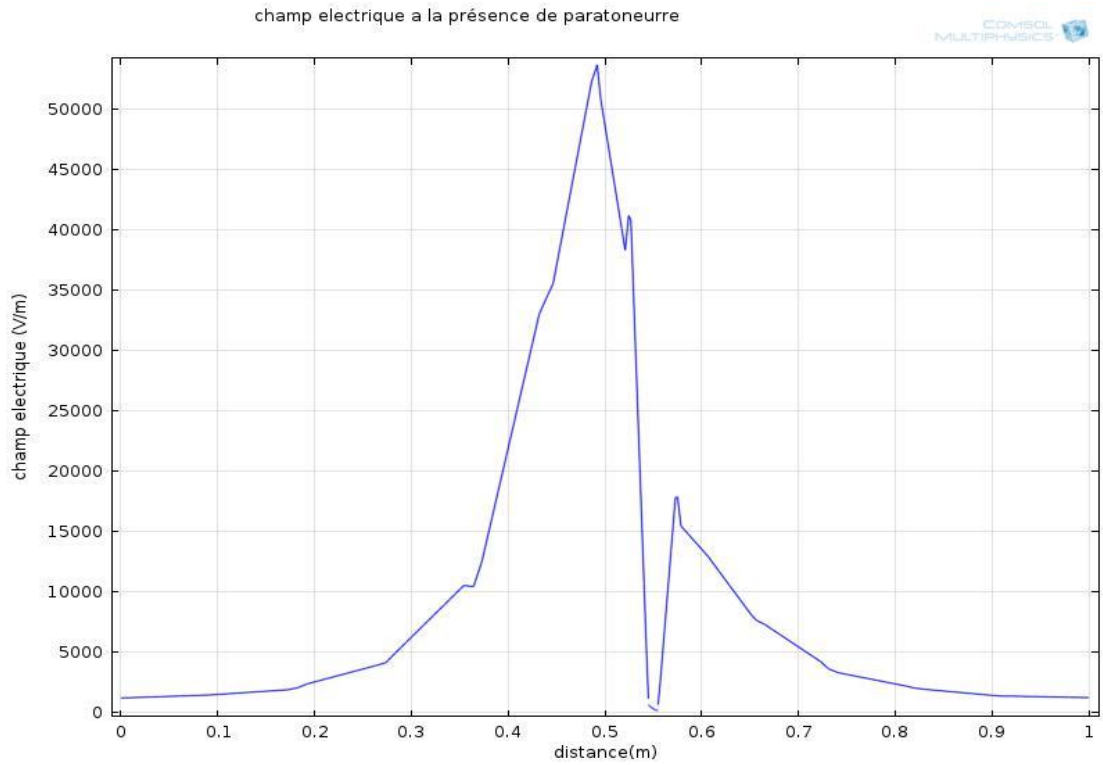


Figure III.44. Le courbe de distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=5\text{cm}$

- $h=10;h_c=7;D=7\text{ cm}$

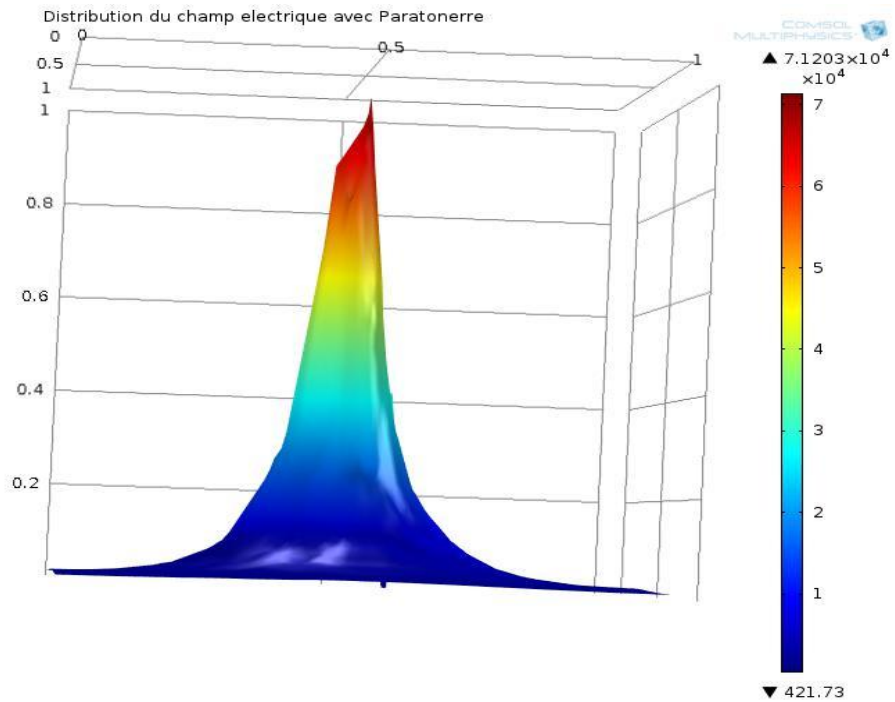


Figure III .45. Distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=7\text{cm}$

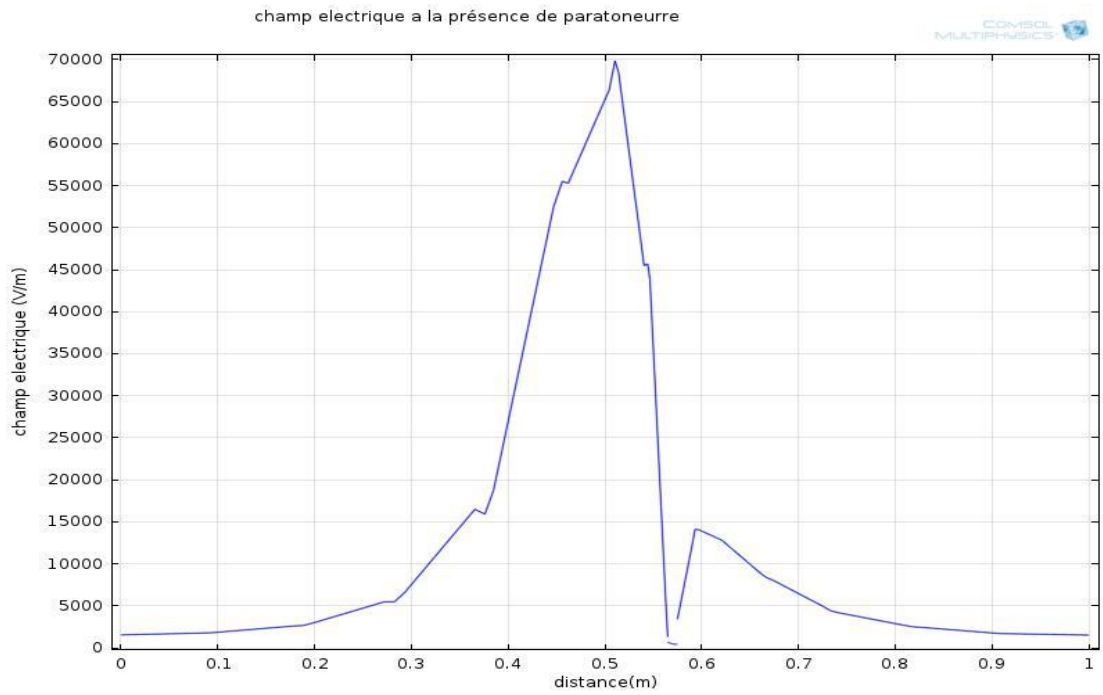


Figure III.46. Le courbe de distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=7\text{cm}$

- $h=10;h_c=7;D=14\text{cm}$

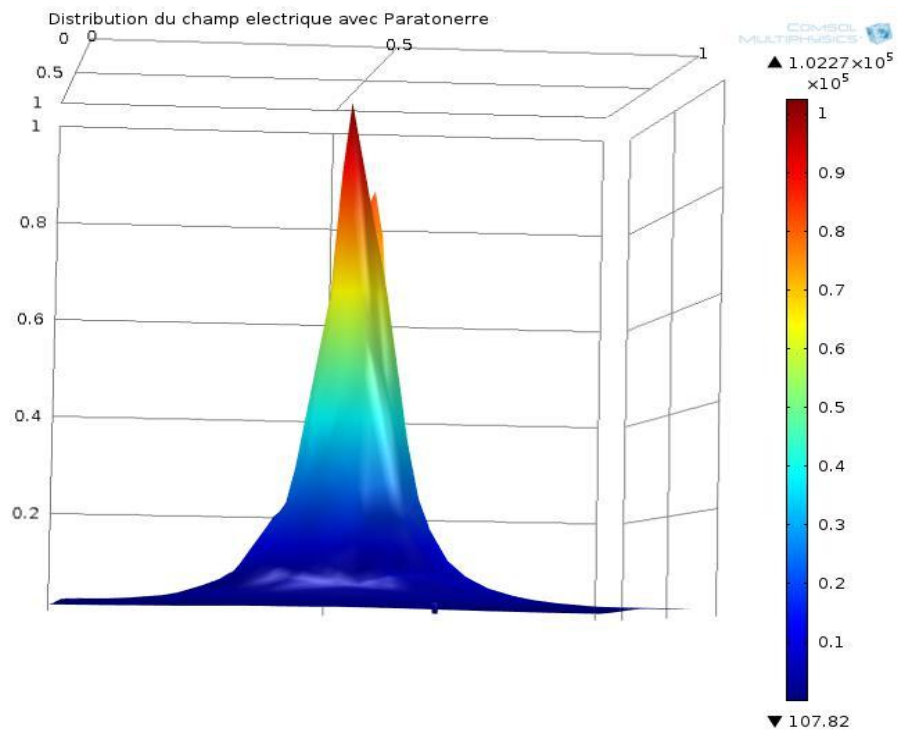


Figure III.47. Distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=14\text{cm}$

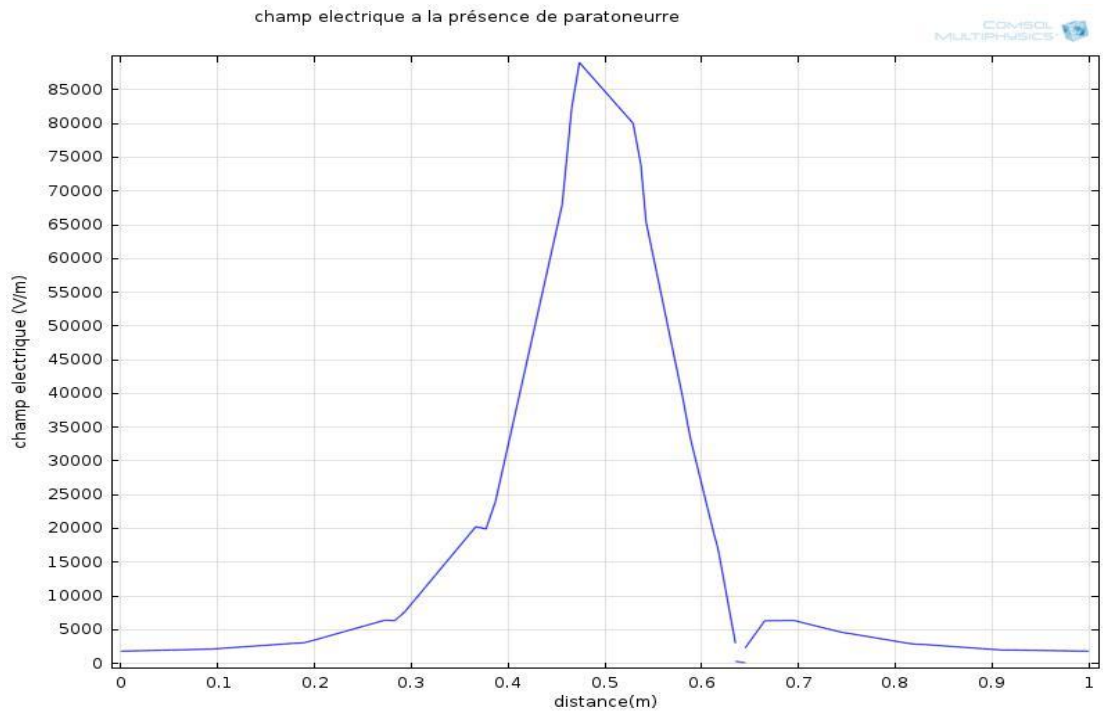


Figure III.48. Le courbe de distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=14\text{cm}$

- $h=10;h_c=10;D=0.5\text{cm}$

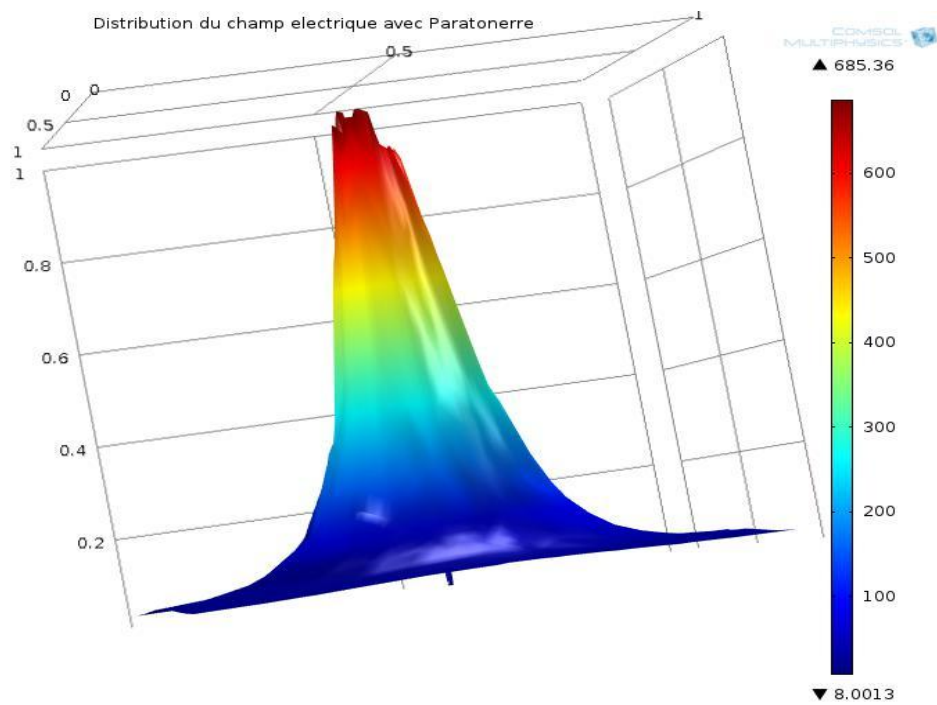


Figure III.49. Distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=0.5\text{cm}$

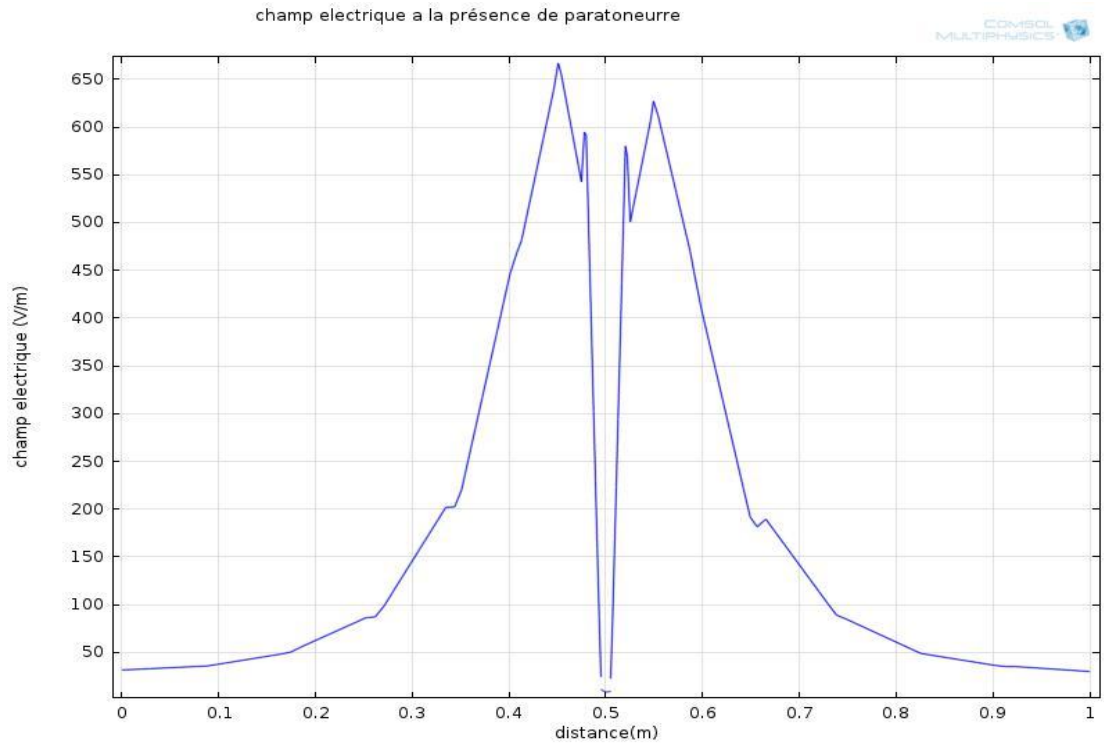


Figure III.50. le courbe de Distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=0cm$

- $h=10;h_c=10;D=5cm$

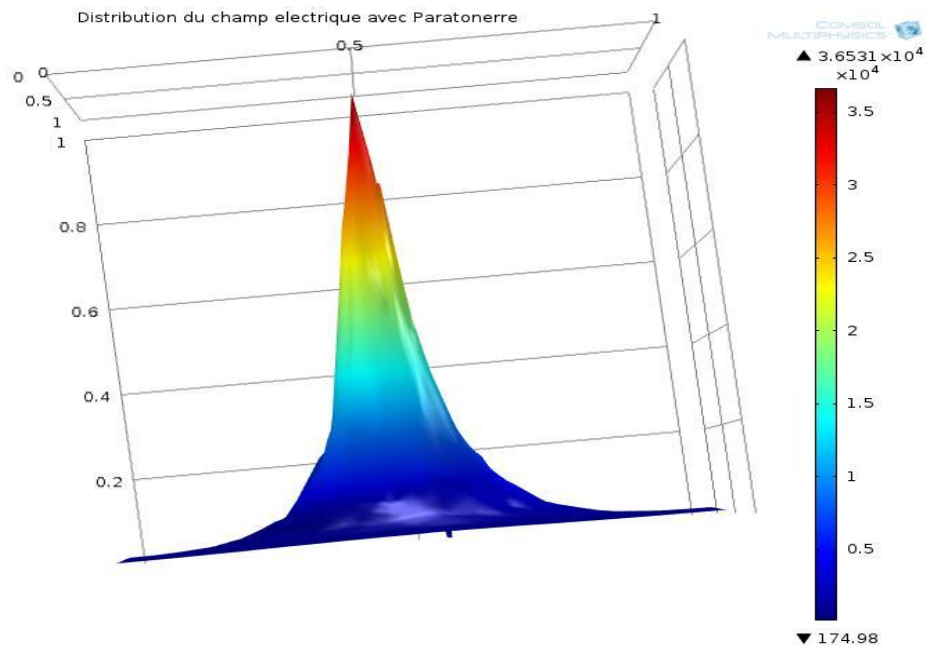


Figure III.51. Distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=5cm$

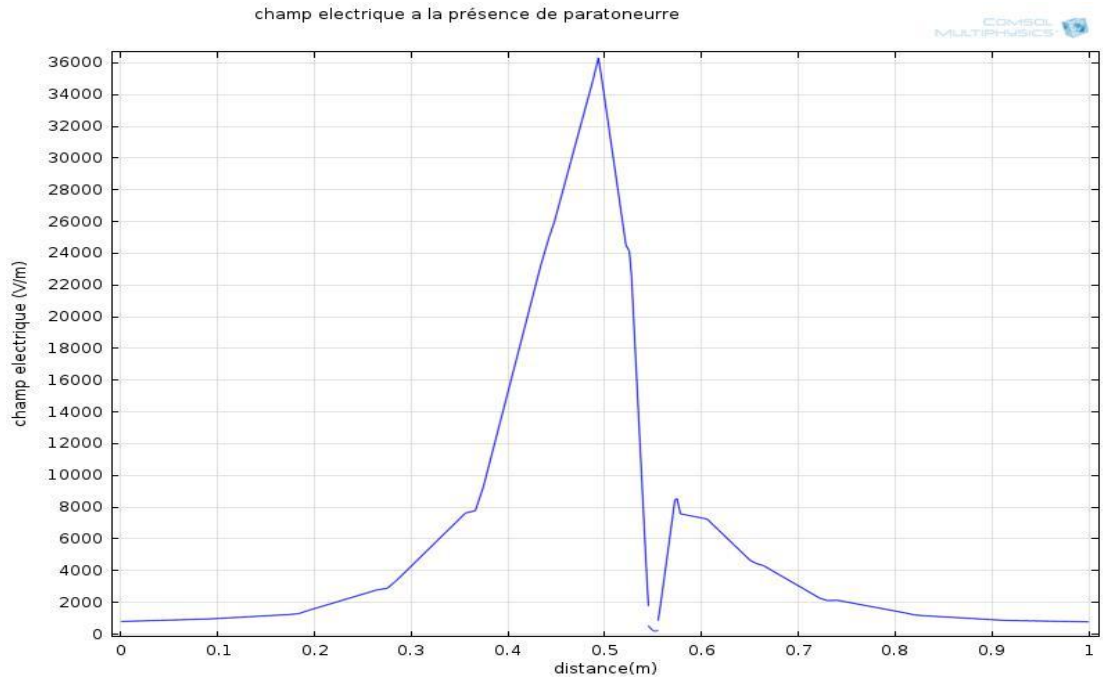


Figure III.52. le courbe de Distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=5cm$

- $h=10;h_c=10;D=10cm$

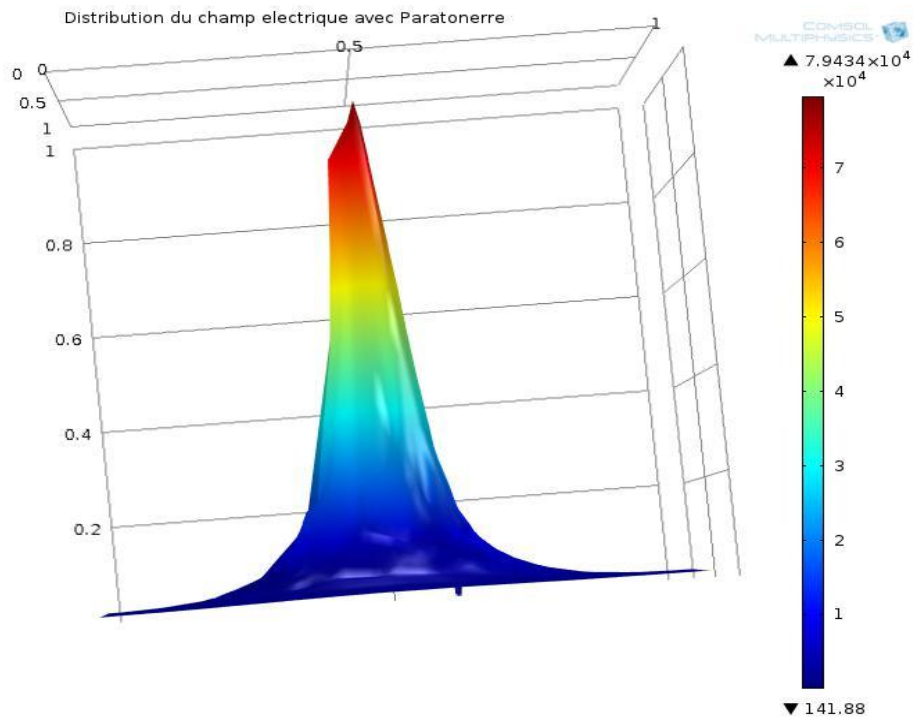


Figure III.53. Distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=10cm$

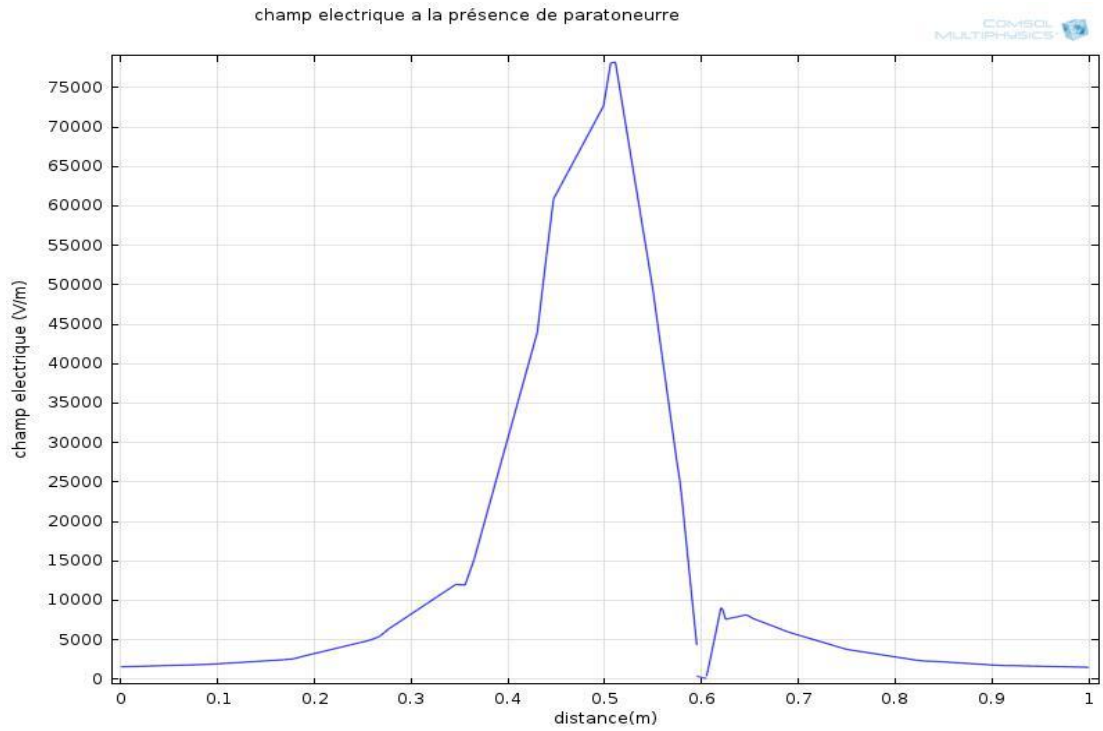


Figure III.54. le courbe de Distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=10\text{cm}$

- $h=10;h_c=10;D=20\text{cm}$

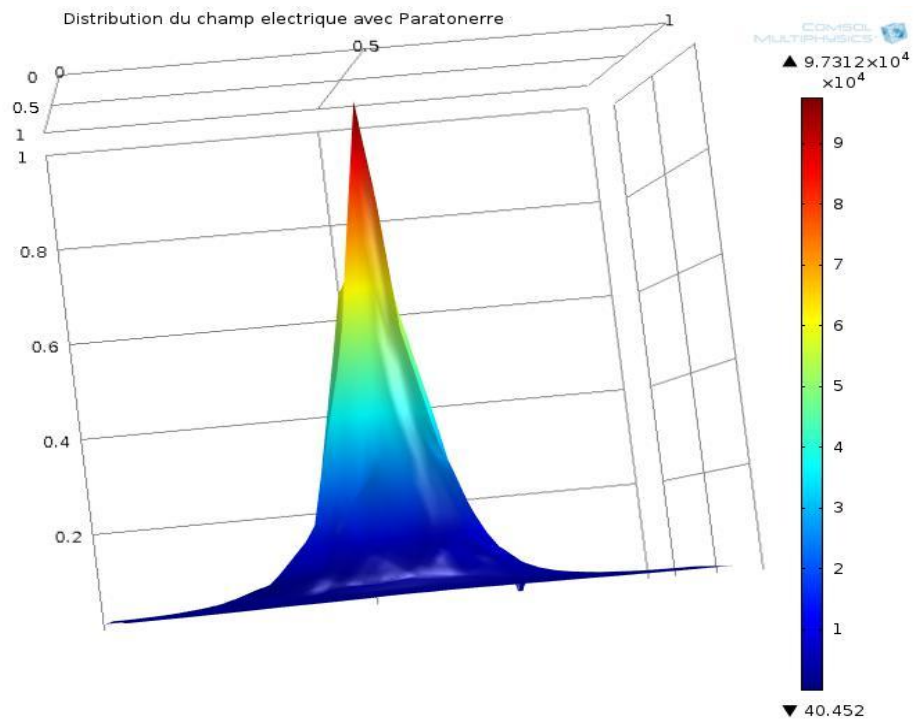


Figure III.55. Distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=20\text{cm}$

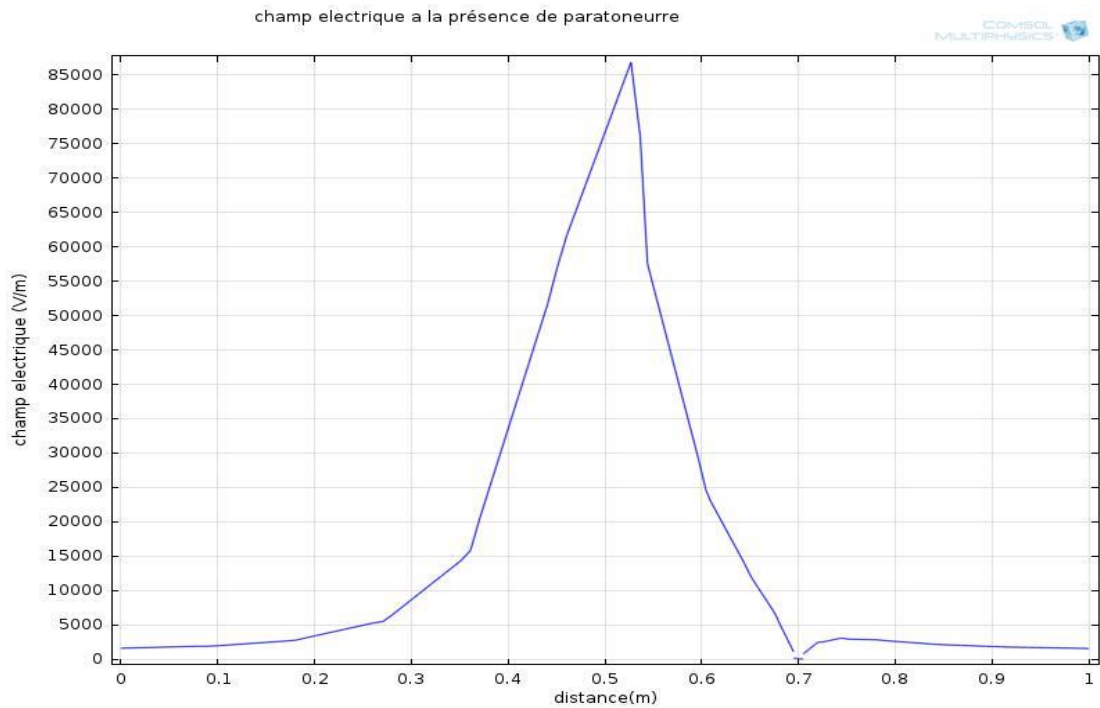


Figure III.56. le courbe de Distribution du champ électrique avec paratonnerre $D=20\text{cm}$

III-3 CONCLUSION:

Si des progrès importants ont pu être obtenus récemment dans le domaine de la protection contre la foudre, c'est essentiellement grâce aux recherches menées dans les laboratoires de haute tension à travers le monde.

Notre travail nous a permis d'examiner l'influence un paratonnerre vertical sur la distribution du champ électrique dans un système tige-plan.

Les divers essais effectués ont permis d'obtenir l'intensité du champ électrique à la surface du sol, en fonction de plusieurs paramètres :

- ✓ Intervalle d'air (h) entre la tige HT et le plan.
- ✓ Position relative d e la tige (D/h) entre l'axe de la tige et le paratonnerre.
- ✓ La hauteur relative du paratonnerre h/h_c

Utilisant cette programme (COMSOL), nous avons déterminé la distribution du champ au sol, aussi bien dans le cas d'un plan sans paratonnerre que dans celui d'un plan avec paratonnerre.

Conclusion

générale

CONCLUSION GENERALE

Si des progrès importants ont pu être obtenus récemment dans le domaine de la protection contre la foudre, c'est essentiellement grâce aux recherches menées dans les laboratoires de haute tension à travers le monde.

Notre travail nous a permis d'examiner l'influence qu'aurait un paratonnerre vertical sur la distribution du champ électrique dans un système tige - plan sous tension de choc de foudre négative.

Les résultats d'essais obtenus, nous mènent à faire les constatations suivantes:

- ✓ La présence du paratonnerre diminue considérablement l'intensité de champ électrique. surtout dans les zones proches du paratonnerre. Pour les zones loin de la tige sous tension, l'influence du paratonnerre est faible.
- ✓ Plus la hauteur du paratonnerre est grande plus l'effet attractif du paratonnerre est meilleur .
- ✓ L'affaiblissement du champ électrique par le paratonnerre est très grand quand le niveau de tension appliqué augmente.
- ✓ La position du paratonnerre directement sous l'axe de la tige est la position préférable pour réduire énormément le champ électrique au sol.
- ✓ Le champ électrique mesuré dans la configuration avec paratonnerre est toujours inférieur à celui mesuré sans paratonnerre.

- [01]: **MEZAI Djamel**: Mesure du Champ Electrique par la Méthode de la Sonde à Capacité Repartie dans un Système Tige-Plan avec paratonnerre vertical sous Tension de Choc de Foudre, Thèse de Magister, ENP, Alger, Algérie, 2006.
- [02]: **Dib Djalel**: L'Impact de La Foudre Sur les Réseaux Electriques Etude Analyse et Modélisation, Thèse de DOCTORAT D'ETAT, Annaba, 2006/2007.
- [03]: **FRIDJAT Med Djemoui et MEGUERHI Mohammed**: (Modélisation numérique de la protection primaire contre la foudre dans un system tige plan avec paratonnerre), mémoire master université hamma lakhdar el-oued 2014.
- [04]: **C. E. I.60** : « Techniques d'essais de haute tension », 1973, (60- 01/02).
- [05]: **C. Gary** : « La foudre : Des méthodologies antiques à la recherche moderne », Edition Masson, 1994, pp : 3-11.
- [06]: **BROURI Hocine**: Détermination des zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal dans le cas d'une terre discontinue, Thèse de Magister, ENP, Alger, Algérie, 2000.
- [07]: **K. Nacereddine** : « Zone Protection contre la foudre sur un sol hétérogène : Simulation numérique », Thèse de Magister, ENP, Alger, Algérie 1994.
- [08]: **A. Boubakeur** : « Influence of earth electrogeological properties on lightning »
- [09]: **Rapport de l'ENERIS** : « Protection des installations industrielles contre les effets de la foudre », N°22, Juillet-Aout 1995 .
- [10]: **A. Khechekhouché** : « Mesure du champ électrique par la méthode de la sonde à capacité répartie dans un système Tige-Terre discontinue sous tension de choc de foudre », Thèse de Magister, ENP, Alger, Algérie, 2004.
- [11]: **Documentation TURKO**: laboratoire le université Hama lakhdar el-oued 2016.
- [12]: **E. Kuffel, W. S. Zaengl**: « High voltage engineering », Pergamon Press, G.B; 1ère Ed; 1984. pp: 463-488.
- [13]: **A. Chouchou** : « Détermination des zones d'attraction d'un paratonnerre vertical dans le cas d'une terre discontinue », Thèse de Magister, ENP, Alger, Algérie, 1999.