

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique



Université d'EL-Oued
Faculté des Sciences et de Technologies

Mémoire de Fin d'Etude
En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et de Technologies

Filière: Génie Électrique

Spécialité: Réseaux Électriques

Thème

***Modélisation numérique de la
protection primaire contre la
foudre dans un système pointe
plan avec paratonnerre***

Dirigé par :
Mr. KHECHEKHOUCHE Ali

Réalise par :
FRIDJAT Med Djemoui
MEGUERHI Mohammed

Soutenu 23-24 Juin 2014

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

"و يرسل الصواعق فيصيب بها من يشاء"

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

سورة - الرعد -

Remerciements

En préambule à ce mémoire, nous tenons à remercier «DIEU» qui nous a aidé pour que ce modeste travail soit achevé et pour que nous ayons réussi.

Nous souhaitions adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire.

*Nous tient à remercier sincèrement le professeur encadreur **Khechekhouché ALI**, qui, en tant que Directeur de mémoire, s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'il a bien voulu me consacrer et sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.*

Nous précieux remerciements vont au président et les membres de jury pour l'honneur qu'ils ont accepté de juger ce travail.

Nous adressons nos sincères remerciements à tous les professeurs de département de science technique : BEN ATTOUS DJILANI, GUIA TALAL, LABBI YASSINE, ZEGUEB BOUBAKER, ALLAL ABDERRAHIME... , intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté à nous rencontrer et répondre à nos questions durant nos recherches.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui m'ont toujours soutenue et encouragée au cours de la réalisation de ce mémoire. Merci à tous et à toutes.

Dédicaces

Je dédie ce travail à mon cher papa, Monsieur FRIDJAT MOKHTAR , qui a toujours cru en moi et a mis à ma disposition tous les moyens nécessaires pour que je réussisse dans mes études.

À ma chère mère, HAMIDA ZINEB , que je ne cesse de remercier pour tout ce qu'elle m'a donné. Elle m'a supporté 9 mois dans son ventre et a fait de moi l'homme que je suis aujourd'hui. Que Dieu la récompense pour tous ces bienfaits.

À ma seul et unique sœur : SAFA.

À mes frères : ABD ESSATAR, CHAOUKI ET BILAL.

À AHLAM

À toutes mes ami(e)s : MOHAMMED, ZINNEDINE, TAREK, AMARA, MED SEGHIR, ELHADI, RADHIA, SALAH, KAMAL, RZOUKA, MED BARIKA, MOUNIR, ZAKARIA, HICHAM, DJALAL et SAMIA Que je considère comme des frères.

À toute ma grande famille éparpillée un peu partout sous d'autre firmament et surtout mes cousins et cousines, surtout ISSAM, AYOUB, AYMEN, ANOUAR, IBRAHIM

À tous mes professeurs, en particuliers surtout : Monsieur khechkhouche et madame nawal.

À tous ceux qui m'aiment et tous ceux que j'aime. Que dieux vous garde, vous comble de santé, et vous donne longue vie.

Mohammed Djemoui

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, à ma mère MEGUERHI FATIMA...

A mon père MEGH'UERHI BACHIR , ma grand famille , qui a été mon ombre durant toutes les années des études, et qui a veillé tout au long de ma vie à m'encourager, à me donner l'aide et à me protéger.

Que dieu les garde et les protège.

A mes amies : MED DJEMOUI, TAREK, AMARA, ZINNEDINE, MED SEGHIR, ELHADI, SALAH, KAMAL, ABDERRAZAK, RADHIA, NORA, HADJER et SAMIA.

A tous mes professeurs, en particuliersurtout : Monsieur k'hechkhouche et madamenawal

A tous ceux qui me sont chères.

A tous ceux qui m'aiment.

A tous ceux que j'aime.

Je dédie ce travail.

Mohammed

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS.....	
DEDICACE.....	
SOMMAIRE	I
LISTE DES FIGURES.....	V
LISTE DES TABLEAUX.....	VIII
INTRODUCTION GENERALE.....	1

CHAPITRE I: foudre et protection contre la foudre

I.1. Introduction :	3
I.2. Historique	3
I.2.1. L'époque des croyances	3
I.2.2. les premières recherches	4
I.3. Le phénomène de la foudre	5
I.4. Les nuages orageux	6
I.4.1. les orages de chaleur :	7
I.4.2. les orages océaniques :	7
I.5. Formation des nuages.....	7
I.6. Electrification des nuages orageux :	8
I.7. Champ électrique et orages :	8
I.8. formation des éclairs et déclenchement de la foudre :	9
I.9. Les coups de foudre :	10
I.9.1. Coup de foudre descendant négatif :	10
I.9.2. Coup de foudre descendant positif :	11
I.9.3. Coup de foudre ascendant positif :	11
I.9.4. Coup de foudre ascendant négatif :	12

I.10.	Physique de décharge	13
I.11.	Effets de la foudre sur des installations :.....	13
I.11.1.	Effets visuels (éclairs).....	14
I.11.2.	Effets acoustiques	14
I.11.3.	Effets thermiques	14
I.11.4.	Effet électrodynamiques	14
I.11.5.	Effets électrochimiques.....	14
I.11.6.	Effets d'induction.....	14
I.11.7.	Effets sur un être vivant (humain ou animal).....	14
I.12.	Mécanisme du coup de foudre descendant négatif.....	14
I.13.	Protection contre la foudre	16
I.13.1.	Point d'impact.....	16
I.14.	Modèle électrogéométrique.....	17
I.15.	Zone de protection.....	18
I.15.1.	Zone de capture d'un paratonnerre horizontal	18
I.15.2.	Zone de capture d'une tige verticale	19
I.16.	Influence des propriétés électrogéologiques du sol sur la décharge de foudre	20
I.17.	Propriétés électrogéologiques de la terre et distribution du champ au sol	20
I.18.	Conclusion.....	22

CHAPITRE II: Méthode numérique pour calculé du champ électromagnétique

II.1.	Introduction	23
II.2.	Présentation de la méthode des éléments finis	24
II.3.	Principe de la méthode des éléments finis	24
II.4.	Formulations des équations d'électromagnétique	25
II.5.	Equation de continuité.....	27

II.6.	Formulation problème électromagnétique.....	27
II.7.	Conditions aux limites.....	29
II.8.	Condition de transmission.....	31
II.9.	Discrétisation et approximation	31
II.10.	Formulation intégrale	33
II.11.	Conclusion.....	36

CHAPITRE III: modèle expérimentale

III.1	Introduction	37
III.2.1	Cas d'un sol discontinu sans paratonnerre.....	37
III.2.2	Cas d'un sol discontinu avec paratonnerre horizontal	42
III.2.3	Configuration du modèle expérimental.....	43
III.3	Détermination des zones d'attraction dans le cas de terre discontinue	44
III.3.1	Détermination des fréquences d'impact.....	44
III.3.2	Tracé des zones d'attraction.....	45
III.3.2.1	Influence de la distance relative du paratonnerre par rapport à l'interface	46
III.4	Paratonnerre situé sur la partie haute de la terre discontinue	47
III.4.1	Première configuration: Paratonnerre horizontal situé entre l'axe de la décharge et l'interface.....	47
III.4.2	Deuxième configuration: L'axe de la décharge situé entre l'interface et le paratonnerre horizontal.....	49
III.5	Paratonnerre situé sur la partie basse de la terre discontinue	51
III.5.1	3 ^{ème} configuration : L'axe de la décharge situé entre l'interface et le paratonnerre horizontal	51
III.5.2	Quatrième configuration : Paratonnerre horizontal situé entre l'interface et l'axe de la décharge	53
III.6	Conclusion.....	54

CHAPITRE IV: Simulation et interpretation de resultat

IV.1. Introduction	55
IV.2. Cas de terre discontinu sans paratonnerre :	56
IV.2.1. Distribution du champ selon la position de la tige HT:	56
IV.2.1.1. La première essai :	57
IV.2.1.2. La deuxième essai :	58
IV.2.1.3. Le troisième essai:	58
IV.3. Cas de terre discontinu avec paratonnerre horizontal	60
IV.3.1. Distribution du champ selon la position de la paratonnerre horizontal :	60
IV.3.2. Paratonnerre situé sur la partie haute de la terre discontinue :	61
IV.3.2.1. Première configuration: Paratonnerre horizontal situé entre l'axe de la décharge et l'interface :	61
IV.3.2.2. Deuxième configuration: L'axe de la décharge situé entre l'interface et le paratonnerre horizontal	63
IV.3.3. Paratonnerre situé sur la partie basse de la terre discontinue	65
IV.3.3.1. 3 ^{ème} configuration : L'axe de la décharge situé entre l'interface et le paratonnerre horizontal	65
IV.3.3.2. Quatrième configuration : Paratonnerre horizontal situé entre l'interface et l'axe de la décharge	67
IV.4. Influence de la hauteur de paratonnerre	69
IV.5. Conclusion	70
CONCLUSION GENERALE	71
BIBLIOGRAPHIQUE	72

Liste de figures

Chapitre I: Foudre et la protection contre la foudre

Figure I.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	9
Figure I.2- Différents types de décharges	10
Figure I.3- Coup de foudre descendant négatif	11
Figure I.4- Coup de foudre descendant positif	11
Figure I.5- Coup de foudre ascendant positif	12
Figure I.6- Coup de foudre ascendant négative	12
Figure I.7- Déroulement spatio-temporel d'un coup descendant et courant mesurés à la surface de la terre.	15
Figure I.8- Point d'impact sur une structure au sol	17
Figure I.9 Zone de protection d'un paratonnerre horizontal.	18
Figure I.10 Zone de protection d'un paratonnerre vertical.	19
Figure I.11 Zone de protection d'un paratonnerre vertical de hauteur h .	20

Chapitre II: Méthode numérique pour calculé du champ électrique

Figure II.1- Élément triangulaire.	32
---	----

Chapitre III: Modèle expérimental

Figure III.1- Variation de $U_{50\%}$ en fonction de la distance D' .	38
Figure III.2. Modèle expérimental de terre discontinue en présence de la sonde à capacité répartie	38
Figure III.3. Champ électrique au partie haute desol en fonction de la position (d'/h) de la sonde. $h=12\text{cm}$.	39
Figure III.4. Champ électrique au partie haute desol en fonction de la position (d'/h) de la sonde. $h=16\text{cm}$.	40

Figure III.5. Champ électrique au partie basse desol en fonction de la position (d'/h) de la sonde. $h=12\text{cm}$.	40
Figure III.6. Champ électrique au partie basse desol en fonction de la position (d'/h) de la sonde. $h=16\text{cm}$.	41
Figure III.7- Modèle expérimental de terre discontinue en présence de paratonnerre horizontal.	42
Figure III.8- Configurations du modèle expérimental dans le cas de terre discontinue.	44
Figure III.9- Détermination des distances $d_{90\%}$ et $d_{100\%}$	45
Figure III.10- Exemple des zones d'attraction obtenues avec des distances $d_{90\%}$ et $d_{100\%}$	46
Figure III.11- Zones d'attraction pour la première configuration de la terre discontinue.	48
Figure III.12- Zones d'attraction pour la deuxième configuration de la terre discontinue.	50
Figure III.13- Zones d'attraction pour la deuxième configuration de la terre discontinue.	52
Figure III.14- Zones d'attraction pour la quatrième configuration de la terre discontinue.	53

Chapitre IV: Simulation et interprétation des résultats

Figure IV. 1 - Modèle de la simulation	57
Figure IV.2 Distribution de champ électrique par rapport à la hauteur de la tige HT	57
Figure IV. 3- Champ électrique (tige HT au dessus partie haute)	59
Figure IV. 4- Champ électrique (tige HT au dessus partie basse)	60
Figure IV.5- Distributions des champs électrique pour la première configuration de la terre discontinue ($h=20\text{ cm}$)	61
Figure IV.6- Distributions des champs électrique pour la première configuration de la terre discontinue ($h=15\text{ cm}$)	62

Figure IV.7- Distributions des champs électrique pour la première configuration de la terre discontinue ($h=12$ cm)	62
Figure IV.8- Distributions des champs électrique pour la deuxième configuration de la terre discontinue ($h=20$ cm)	63
Figure IV.9- Distributions des champs électrique pour la deuxième configuration de la terre discontinue ($h=15$ cm)	64
Figure IV.10- Distributions des champs électrique pour la deuxième configuration de la terre discontinue ($h=12$ cm)	64
Figure IV.11- Distributions des champs électrique pour la troisième configuration de la terre discontinue ($h=20$ cm)	65
Figure IV.12- Distributions des champs électrique pour la troisième configuration de la terre discontinue ($h=15$ cm)	66
Figure IV.13- Distributions des champs électrique pour la troisième configuration de la terre discontinue ($h=12$ cm)	66
Figure IV.14- Distributions des champs électrique pour la quatrième configuration de la terre discontinue ($h=20$ cm)	67
Figure IV.15- Distributions des champs électrique pour la quatrième configuration de la terre discontinue ($h=15$ cm)	68
Figure IV.16- Distributions des champs électrique pour la quatrième configuration de la terre discontinue ($h=12$ cm)	68
Figure IV.17- Distributions des Champs électrique au sol en fonction de la position (h/h_c)	69

INTRODUCTION GENERALE

On observe des phénomènes électriques dans la vie de tous les jours, mais dans la nature, les plus spectaculaires sont ceux qui se produisent durant les orages.

Parmi toutes les formes de décharges atmosphériques, la décharge nuage-sol-nuage est la moins fréquente mais certainement la plus contraignante et la mieux étudiée. Elle présente à peu près le tiers de la totalité des décharges atmosphériques que connaît le globe terrestre. Ces décharges provoquent chaque année de nombreux accidents, destructions ou perturbations.

Vu que la foudre est par essence un phénomène aléatoire et donc incontrôlable, les recherches modernes se donnent comme principale mission la meilleure compréhension du phénomène physique et le développement des moyens efficaces pour se protéger de ses effets. Ces recherches ont menées, au développement de nouvelles méthodes de détection et de modélisation des coups de foudre, à une connaissance améliorée du processus physique de la décharge, à une meilleure compréhension de l'interaction entre la foudre et une structure au sol, et à des conditions d'essais plus valides.

La simulation de la distribution du champ électrique au sol vise à une meilleure connaissance des conditions d'impact et à l'amélioration du modèle électrogéométrique. En effet, la formulation simplifiée actuelle de ce dernier ne tient pas compte des propriétés électrogéologiques du sol. Pour examiner l'influence de ces propriétés, un nombre considérable de travaux ont été effectués au laboratoire de Haute Tension de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger. Ces travaux ont été consacrés à l'étude de la distribution du champ électrique au sol en présence des paratonnerres avec les terres hétérogènes et les terres mauvaises conductrices.

Notre travail s'inscrit dans le même axe de recherche et consiste à examiner l'influence de la discontinuité de la terre sur l'intensité du champ électrique au sol avec paratonnerre horizontal.

Dans la premier chapitre, nous étudions la phénomène de la foudre, et son effet en sens thermique, électrique, magnétoélectrique et statique, après ça nous avons fait un étude de la protection contre la foudre (paratonnerre verticale et horizontale) et la zone de capture de parafoudre.

Dans le deuxième chapitre est consacré aux méthodes de calcul de champ électrique rayonné par la foudre, et après ça nous avons parlé à la méthode des éléments finis qui est utilisée pour résoudre le problème en question

Dans le troisième chapitre, ce sont les résultats expérimentaux, avec différents essais pour obtenir un modèle pour la comparaison avec notre simulation.

Ensuite, nous présentons dans le quatrième chapitre les différents résultats qui mettent en relief l'influence de plusieurs paramètres (positions de la tige HT en la premier partie et en la deuxième la positions des paratonnerre horizontale) sur les disruptions des champs électrique dans le cas de terre discontinue.

Enfin, nous terminons ce travail par une conclusion générale.

Chapitre I
Foudre et protection
contre la foudre

I.1. Introduction :

La foudre est l'un des phénomènes naturels les plus courants et les plus spectaculaires. Depuis que Benjamin Franklin a démontré, il y a deux cents ans, qu'il s'agissait d'une gigantesque décharge électrique, nombreux sont les chercheurs qui ont étudié les nuages et les éclairs. Pourtant, malgré la mise au point de nouveaux appareillages et de nouvelles techniques de recherche, l'origine des éclairs et le mécanisme d'électrisation des nuages pluvieux nous échappent encore.

Benjamin Franklin avait mis le doigt sur l'une des difficultés fondamentales du problème. En 1752, il observa que " les nuages d'une ondée orageuse sont le plus souvent dans un état d'électricité négative, mais parfois dans un état d'électricité positive ".

Depuis ces mots écrits par Benjamin Franklin, on admet que la foudre est un transfert de charges électriques, soit positives soit négatives, d'une région d'un nuage à une autre, où entre le nuage et la terre.

I.2. Historique

I.2.1. L'époque des croyances

Les traces laissées à travers les siècles par les différentes civilisations comportent pratiquement toutes des représentations plus ou moins évidentes de la foudre. Bien que des peintures rupestres comportent des symboles pouvant être attachés au phénomène de foudre, les historiens situent la première représentation de la foudre durant la première époque de Babylone.

Pour les Grecs, la foudre était la manifestation de la colère de Zeus (Roi des dieux dans la mythologie grecque). Il en était de même pour les romains avec leur Dieu Jupiter. D'autres croyances sont beaucoup plus poétiques. Ainsi le peuple Basutos en Afrique pense que la foudre est un oiseau magique, nommé Umpudolo qui plonge des nuages vers le sol [2].

Plus tard, au Moyen Age, l'église et son idéologie vont s'emparer de ce phénomène naturel: être victime de la foudre était alors considéré comme un châtiment. De nombreux saints sont invoqués pour se protéger contre cette punition divine.

I.2.2. les premières recherches

L'histoire de la foudre et celle de l'électricité se rejoignent au *XVIII^e* siècle. En 1745[2], l'invention de la bouteille de Leyde va faire progresser les études théoriques sur l'électricité. Cet ancêtre du condensateur permet en effet de provoquer des étincelles beaucoup plus violentes que les machines électrostatiques utilisées jusque-là. Ces décharges électriques, s'accompagnent également de détonations relativement intenses. Le rapprochement avec le phénomène foudre est alors très vite envisagé par un bon nombre de scientifiques. En 1748[1], l'abbé Nallet dresse une liste de similitudes entre la foudre et les décharges électriques. D'autres études du même type sont publiées à la même époque. Le 07 novembre 1749 [2], une étude comparative et très complète a été publiée par un scientifique américain dont le nom restera lié à la foudre : Benjamin Franklin. Ses travaux vont se poursuivre et il décrira, dans un mémoire datant de l'été 1750, une expérience permettant de démontrer la nature électrique du nuage orageux. L'idée de l'expérience de cerf volant était née.

C'est en 1752 [2] que Benjamin Franklin réalise sa fameuse expérience. Son objectif était de déterminer si les éclairs étaient un phénomène électrique. Franklin et son fils de 21 ans, William, construisent un cerf-volant, formé de deux bandes légères de cèdre, en croix, attachées à un mouchoir en soie. Ils attachent un long fil métallique en haut du cerf-volant pour attirer l'électricité. Ils fixent également une ficelle au cerf-volant afin de le tenir, et Franklin père noue un ruban de soie sur la ficelle, près de la région qu'il tient à la main. Une clé, en fin, est rattachée au ruban, ainsi qu'une bouteille de Leyde. Benjamin Franklin réalise son expérience sous le pas d'une porte, de façon à ce que le ruban de soie attaché à la clé et à la bouteille de Leyde ne soit pas mouillé par la pluie.

Une fois le protocole de l'expérience élaboré, les deux hommes attendent l'arrivée d'un orage. Comme Franklin l'avait prédit lorsque des nuages passent au dessus du cerf-volant, des charges négatives traversent le fil métallique du cerf-volant et parviennent jusqu'à la clé. La charge rentre dans la bouteille de Leyde, ce qui démontre clairement la présence d'électricité.

Franklin tenait le cerf-volant par le tissu de soie isolant : il était ainsi protégé de l'électricité. Mais quand il tend son doigt pour toucher la clé, il reçoit un choc dû aux charges négatives de la clé ; elles sont assez fortes pour qu'une étincelle saute de la clé à sa main. Par

miracle, cette charge n'était pas assez forte pour être mortelle. Dans d'autres circonstances, le coup d'éclair aurait pu tuer instantanément les deux individus

L'expérience de Franklin a montré avec succès que les éclairs étaient en fait de l'électricité statique [3].

I.3. Le phénomène de la foudre

L'étude de l'électricité atmosphérique permanente conduit à représenter la terre comme une armature d'un immense condensateur, la seconde armature étant constituée par l'ionosphère. Ce condensateur est normalement chargé et il existe une différence de potentiel de 300 kV [1, 2, 4]. Le sol étant chargé négativement par beau temps. Le champ électrique au sol est d'environ 100 à 150 V/m [1, 2]. A ce champ de 100 V/m [1, 2, 5] correspond une densité de charge superficielle moyenne à la surface du sol de [2]:

$$\sigma = E \times \varepsilon_0 \quad (1.1)$$

Avec :

σ : Densité de charge superficielle en Coulombs par mètre carré (C/m^2)

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 vont être apportées à la terre. La densité de courant est égale à [2] :

$$J = \gamma \times E \quad (1.2)$$

Avec :

J : densité de courant en Ampères par mètre carré (A/m^2)

γ : Conductivité de l'air ($3 \times 10^{-14} \Omega^{-1}/m$)

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 $8.85 \times 10^{-10} (C/m^2)$ et que la densité de courant qui circule est de $3 \times 10^{-12} (A/m^2)$. La surface de la terre étant d'environ $5 \times 10^{14} m^2$. Un courant permanent de 1500 A circule et le condensateur devrait donc se décharger en 300 s [1, 2]. Or le champ électrique terrestre est permanent. Seules quelques légères variations sont observables en cours de journée.

Un bilan global permet de comprendre ce paradoxe apparent. Un nuage orageux est chargé positivement en partie haute et négativement en partie basse. Les échanges électriques sous le nuage s'effectuent suivant deux mécanismes [2]:

- 90% des éclairs apportent une charge négative à la terre.
- Pluie.

Le bilan global est de l'ordre de 1A par orage. Le nombre d'orages simultanément présents autour du globe est compris entre 1500 et 2000, ce qui correspond au courant de beau temps calculé ci-dessus[2] :

- Les charges positives d'un orage sont transférées vers l'électrosphère et sont redistribuées pour fournir le courant de beau temps.
- Les charges négatives sont apportées au niveau du sol par les éclairs et le phénomène orageux.

La foudre participe à l'équilibre électrique de notre planète.

I.4. Les nuages orageux

Les nuages orageux sont d'énormes masses généralement du type cumulonimbus, en forme d'enclume, couvrant plusieurs kilomètres carrés, et atteignant souvent dix kilomètres et plus d'altitude. Ils sont constitués de gouttes d'eau à leur partie inférieure, de particules de glace à leur partie supérieure. Leur formation est due à l'apparition de courants atmosphériques ascendants dont la vitesse peut dépasser 20 m/s, provoqués par la convection naturelle ou par la rencontre d'air chaud humide et d'air froid [6].

On distingue deux sortes d'orages :

I.4.1. les orages de chaleur :

Naissent d'un effet de réchauffement des sols associés à une forte humidité. Ce sont des orages locaux. Une bulle d'air chaud et humide s'élève et forme un nuage à des altitudes où peut s'initier la condensation de l'air. Un tel orage ne dure généralement que 1 à 2 heures [7].

I.4.2. les orages océaniques :

Ou frontaux se forment lors de la rencontre de masses d'air importantes, de température et d'humidité différentes. Cette rencontre produit des mouvements de convection ascendants, accompagnés de phénomènes de condensation. Ces orages peuvent présenter des fronts de centaines de kilomètres, persister durant des jours et se propager sur des milliers de kilomètres [7]. Parallèlement aux phénomènes thermodynamiques décrits ci-dessus, il se produit une séparation de charges électriques au sein du nuage. De multiples hypothèses ont été avancées pour expliquer la séparation de ces charges, mais aucune de ces théories n'est satisfaisante pour expliquer la totalité du phénomène.

I.5. Formation des nuages

Les nuages orageux sont d'énormes masses, généralement de type cumulo-nimbus, qui peuvent s'étendre sur plusieurs kilomètres carrés et qui se situent généralement entre des altitudes variant de 2 à 15 km. Ils sont constitués par des gouttes d'eau à leur partie inférieure et des particules de glaces à leur partie supérieure. Leur formation est due à l'apparition des courants atmosphériques ascendants dont la vitesse peut dépasser 20 km/h. Si les conditions de température et d'humidité sont convenables, il se produit une détente de l'air humide au cours de son ascension avec refroidissement entraînant la condensation.

L'ascension du nuage se produit jusqu'à ce que l'équilibre de densité soit atteint avec l'air environnant, vers 10 à 12 km d'altitude. A ce niveau, la stratosphère est atteinte, et les violents courants horizontaux qui y règnent balayent le sommet du nuage, lui donnant la forme caractéristique dite << en enclume >>. Or, l'air n'est pas un diélectrique parfait. Il existe toujours un certain nombre d'ions positifs et négatifs créés par les radiations cosmiques ou par la radioactivité naturelle au sol. Ces ions sont entraînés par le champ électrique (les

ions négatifs se dirigent vers le bas et les positifs vers le haut) ; ce mouvement va engendrer un courant électrique atmosphérique qui a pour effet de décharger le condensateur terrestre.

Une évaluation approximative [3] a permis d'obtenir une densité de courant de $3.10^{-12} A/m^2$ ce qui correspond sensiblement à un courant permanent de 1500A pour le globe terrestre.

I.6. Electrification des nuages orageux :

Deux types de théories qui tentent d'expliquer l'activité électrique des orages, mais aucune n'est franchement satisfaisante.

- La première attribue un rôle essentiel aux porteurs de charges libres positifs et négatifs, dont la répartition à l'intérieur du nuage dépendra de leur entraînement par les mouvements de convection naturelle du nuage [7].

- La deuxième théorie s'appuie sur des processus de frottement des particules glacées, constituant la partie supérieure du nuage, les unes sur les autres. Chaque particule prendrait une charge négative, tandis que les éclats de glace arrachés par le frottement seraient chargés positivement. Il y aurait ensuite séparation des charges grâce à la pesanteur, les particules tomberaient à la base du nuage tandis que les éclats seraient entraînés vers le haut par les courants d'air ascendants. Le nuage fonctionnerait alors comme une machine à frottement. De manière générale, on aboutit au modèle d'un nuage chargé positivement à son sommet et chargé négativement à sa base. Cependant il existe souvent une toute petite charge positive à l'extrémité basse du nuage, mais celle-ci reste négligeable [8].

I.7. Champ électrique et orages :

Lorsque le nuage est mûr pour éclater en orage, il constitue un vaste dipôle, créant des champs électriques entre les différentes couches intérieures, de même qu'entre sa base et la surface de la terre.

Notons qu'il existe en permanence dans l'atmosphère un champ électrique faible qui est mesuré sur un terrain plat et par beau temps, est de l'ordre de 100 à 150 volts par mètre, et qui est dû à des charges positives situées à des altitudes de l'ordre de cinquante kilomètres.

On pense que les orages jouent un rôle important dans la genèse de ces charges. Au moment de la formation ou de l'approche d'un nuage orageux, sous l'influence des charges négatives qui sont disposées à sa base, et dont l'effet devient prépondérant, le champ électrique au sol commence à s'inverser, puis croît dans de fortes proportions.

Lorsque son intensité atteint -10 à -15 kV/m, on peut dire qu'une décharge au sol est imminente. Cette inversion, puis cette forte croissance du champ électrique, est donc le premier signe annonçant la chute probable de la foudre. La mesure de ces variations est d'ailleurs utilisée dans des appareils et d'alarme sur certains chantiers à risque.

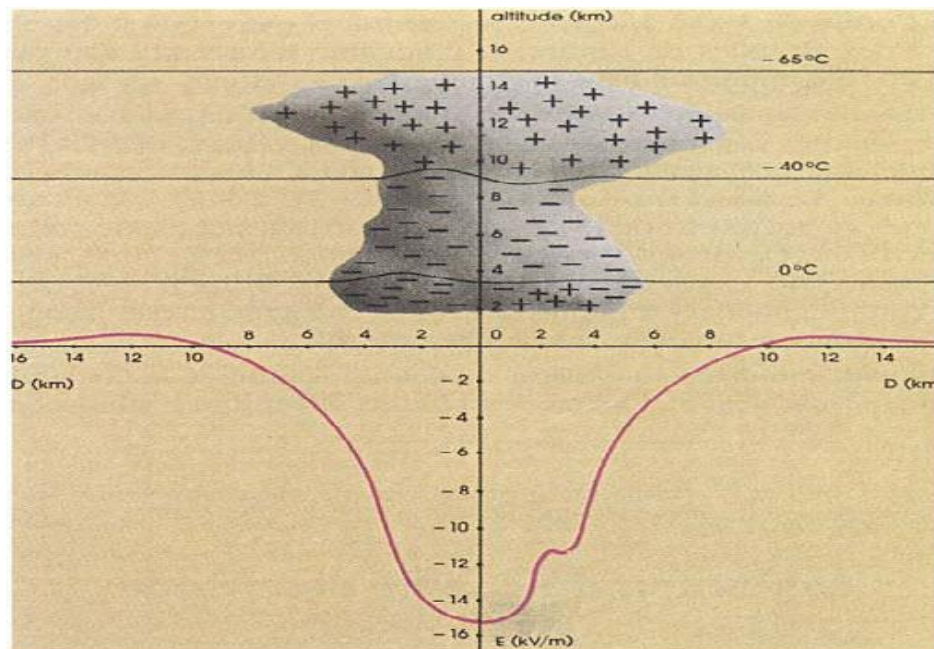


Figure I.1 Schéma montrant la distribution des charges électriques dans la masse d'un nuage orageux et la répartition du champ électrique au sol, au moment où va éclater la foudre [6]

I.8. formation des éclairs et déclenchement de la foudre :

L'éclair est en fait un court-circuit permettant le rééquilibrage des charges positives et négatives à l'intérieur du nuage. Ce rééquilibrage se produit par la formation de décharge électrique. Parmi celles-ci, il existe l'éclair et la foudre qu'il faut distinguer, bien que dans le langage courant il n'existe aucune distinction entre ces deux termes :

▪ La décharge qui se produit à l'intérieur même d'un nuage, ou entre deux nuages orageux, est appelée l'éclair intra-nuage ou inter-nuage Figure (I.2) (a) et (b).

▪ La décharge qui frappe le sol est appelée foudre ou coup de foudre Figure (I.2) (c). Précisons que 90% des décharges se produisent à l'intérieur des nuages (éclaires). Et seulement 10% des décharges frappent le sol, ce sont les coups de foudre. [12] [6].

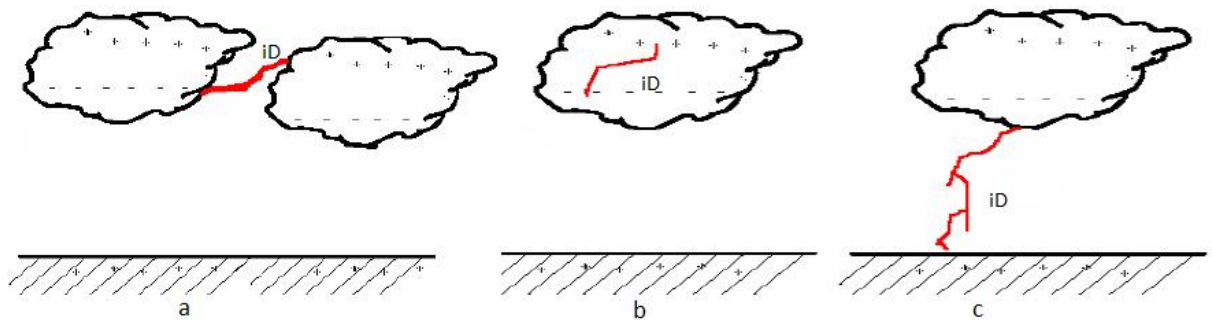


Figure I.2 Différents types de décharges [9]

I.9. Les coups de foudre :

Les coups de foudre peuvent être classés suivant certains critères. En effet cette classification s'effectue en fonction du sens de développement du traceur principal (descendant ou ascendant). Il existe donc les coups de foudre descendants et ascendants.

Ensuite, cette classification s'effectue en fonction de la polarité des charges écouées (négatives ou positives). Conventionnellement, on dit qu'un coup de foudre est négatif lorsque c'est la partie négative du nuage qui se décharge, et il est positif c'est la partie positive du nuage qui se décharge. Dans les régions tempérées, la prédominance des charges négatives en bas du nuage explique que 70 à 90% des coups de foudre soient négatifs : ceci correspond à l'émission d'un précurseur négatif descendant du nuage [9] [12].

I.9.1. Coup de foudre descendant négatif :

Ici, le traceur est négatif et se produit dans la partie négative du nuage. Ce traceur progresse en direction du sol par bonds successifs d'environ 10 mètres. Dès qu'un traceur arrive à proximité du sol, un traceur ascendant, issu généralement d'un relief, apparaît et se dirige dans la direction du traceur descendant. Lorsque le traceur descendant et le traceur ascendant se rejoignent, il se produit un court-circuit entre le nuage et le sol. Celui-ci va

permettre le passage d'un courant à forte intensité. Ce courant remonte du sol vers le nuage et on remarque à ce moment un trait fortement lumineux Figure (I.3) [6] [12].

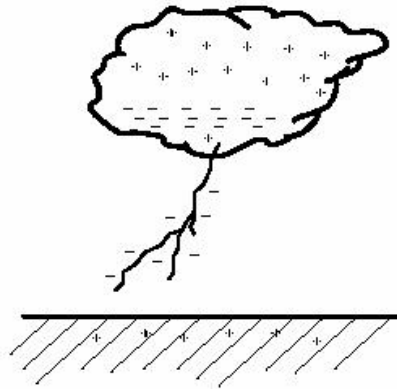


Figure I.3 *Coup de foudre descendant négatif* [12]

I.9.2. Coup de foudre descendant positif :

Le coup de foudre descendant positif se produit de la même manière que le coup de foudre ascendant négatif. La seule différence est dans la nature du traceur principal. En effet, celui-ci est de nature positive et naît dans la zone positive du nuage. Contrairement au traceur négatif, celui-ci progresse de manière continue et non par bonds successifs. Sa vitesse de progression est la même que pour le traceur par bonds : de ordre de 0.2 à 1 mètre par microseconde Figure (I.4).

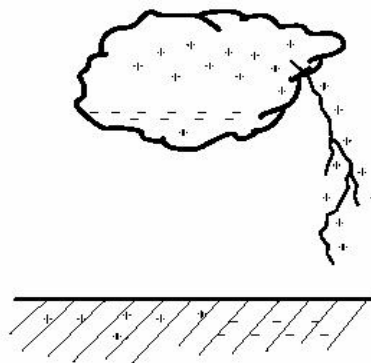


Figure I.4 *Coup de foudre descendant positif* [12].

I.9.3. Coup de foudre ascendant positif :

Ce type de connexion correspond au cas où le champ électrique au sol créé par le nuage est suffisamment intense pour qu'un précurseur puisse se développer du sol vers le nuage. Ceci

est généralement le cas lors qu'il existe au sol structures de grande hauteur (plusieurs dizaines de mètres). Ce type de connexion est aussi fréquent dans les régions montagneuses Figure (I.5) [12].

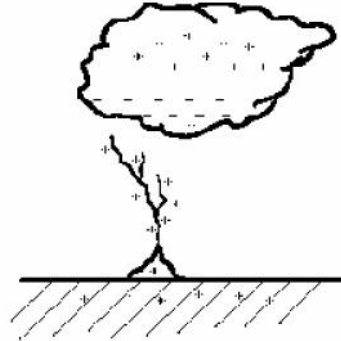


Figure I.5 *Coup de foudre ascendant positif* [12].

I.9.4. Coup de foudre ascendant négatif :

A partir de certaine grande hauteur (pic de montagne, pylône de télécommunication, immeuble élevé) il arrive parfois qu'un traceur ascendant progresse spontanément vers le nuage, lorsque les conditions de champ électrique le permettent ; la charge de la base du nuage est alors positive Figure (I.6) [12].

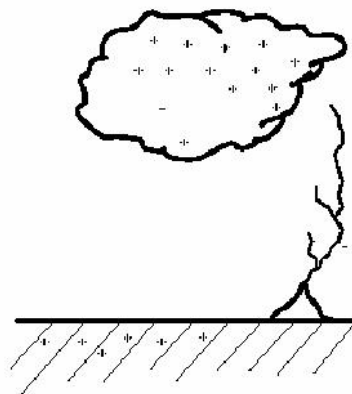


Figure I.6 *Coup de foudre ascendant négatif* [12].

Dans les régions tempérées, plus de 90% des coups de foudre nuage-sol sont de la 1ère catégorie 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 2ème 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 3 et 4 qui sont déclenchées par des traceurs ascendants, sont relativement rares et apparaissent généralement aux sommets des montagnes ou des longues structures [9].

I.10. Physique de décharge

On sait que lorsque l'air, qui est isolant, est soumis localement à un champ électrique supérieur à un seuil de l'ordre de 30kV/cm dans les conditions normales de température et de pression, il se produit une décharge électrique qui rend le gaz conducteur : c'est le phénomène de claquage de l'isolant. A la pression atmosphérique, le phénomène initial se présente ainsi : un électron germe créé, par exemple, par un rayon cosmique, est accéléré par le champ électrique et, par bombardement sur un atome ou une molécule, arrache un autre électron ; il se produit ainsi une multiplication électronique ou avalanche.

A partir d'un certain moment, la densité des espèces ionisées ainsi créées est telle qu'elles forment un plasma, c'est à dire un milieu neutre et conducteur ; les avalanches ont toutes les chances de se produire à l'extrémité d'une pointe métallique, c'est à dire à un endroit où le champ électrique est, par suite de la configuration géométrique, plus fort qu'ailleurs ; on obtient alors ce que l'on appelle une décharge couronne ; le filament de plasma qui se forme à cet endroit se comporte comme un véritable prolongement de la pointe, et, si le champ électrique est assez fort, le phénomène se transporte rapidement vers l'avant : on dit qu'on a affaire à une instabilité convective d'ionisation, qui progresse comme un dard. Quand le dard progresse, il peut, si le courant qu'il transporte est suffisant (des centaines d'ampères), se transformer en traceur de résistivité nettement moins élevée formé de plasma à haute température [11].

I.11. Effets de la foudre sur des installations :

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):

I.11.1.Effets visuels (éclairs) : dus au mécanisme de Townsend.

I.11.2.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.

I.11.3.Effets thermiques : dégagements de chaleur par effet Joule dans le canal ionisé.

I.11.4.Effet 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.

I.11.5.Effets électrochimiques : relativement mineurs, ces effets se traduisent par une décomposition électrolytique.

I.11.6.Effets d'induction : dans un champ électromagnétique variable, tout conducteur est le siège de courants induits.

I.11.7.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. A cela s'ajoutent les dangers de brûlures.

I.12. Mécanisme du coup de foudre descendant négatif

A l'œil nu, le coup de foudre apparaît comme une seule décharge lumineuse, tandis que les équipements photographiques à grande vitesse, utilisés sur sites, ont montré que son développement est formé en plusieurs phases. La figure I.7 illustre ces différentes phases et les courants de foudre induits au sol.

L'étincelle peut avoir lieu en une région de charges négatives du nuage où l'intensité du champ local s'approche de l'intensité du champ d'ionisation (égale à environ 30 kV/cm en atmosphère, ou 10 kV/cm en présence de gouttes d'eau).

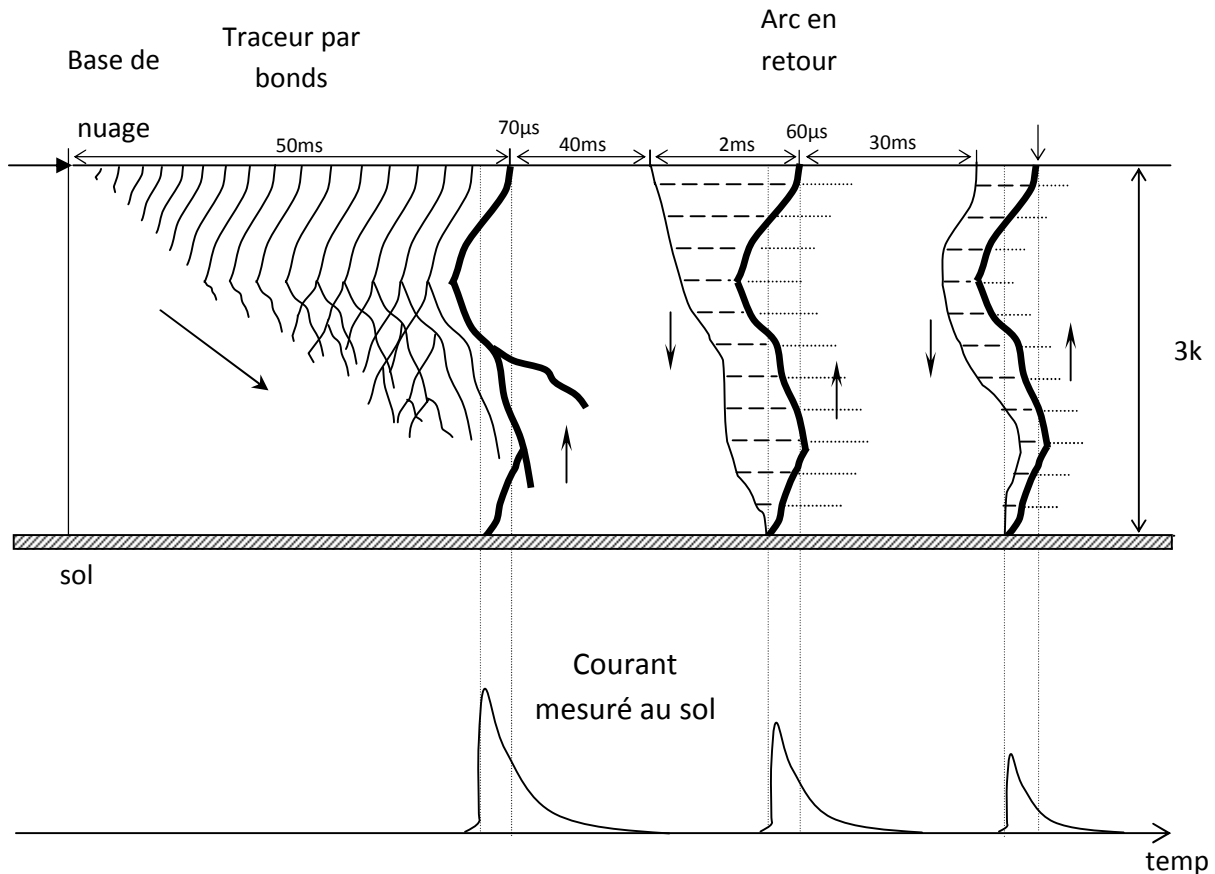


Figure I.7 Déroulement spatio-temporel d'un coup descendant et courant mesurés à la surface de la terre.

Durant la première étape, le traceur par bonds (en Anglais: stepped leader), se développe en zigzag par sauts de 50 m à 100 m séparés par des temps d'arrêts. La pointe du traceur « pilote streamer » se propage vers les zones d'air vierges avec une vitesse d'environ 0,1 m/μs. Le pilote streamer est suivi par le stepped leader qui a une vitesse d'environ 0,5 m/μs. et un courant de quelques centaines d'Ampères.

Dès que le traceur s'approche du sol, le champ électrique provoque une concentration de charges au niveau du sol, beaucoup plus accentuée au niveau de certains points de grandes hauteurs (généralement des tours, des pylônes ou des arbres...). Des pré décharges ascendantes positives, appelées décharges de connexion, prennent naissance à partir de ces points à la terre dès que l'intensité critique du champ électrique y est atteinte. Lorsque les deux traceurs se rejoignent, l'Arc principal ou l'arc en retour se propage depuis le sol, avec une grande vitesse (environ 50 m/μs) en traversant le canal ionisé établie auparavant.

L'arc en retour génère un courant de forte intensité et de faible durée: quelques kilos ampères à plusieurs dizaines de kiloampères pendant des dizaines à des centaines de microsecondes. Le passage de ce courant accroît brutalement, par chauffage, la luminosité du canal ionisé (l'éclaire) ainsi que la pression à l'intérieur du canal par rapport à la pression de l'extérieur. La température du canal est de 15.000°C à 20.000°C. L'onde résultante provoque le coup de tonnerre.

Souvent, l'arc en retour est suivi de décharges subséquentes, dont le traceur de la deuxième décharge est appelé trait flèche ou « d'art leader ». Le trait progresse d'une façon continue suivant le même trajet du traceur par bonds mais avec une vitesse 10 fois plus grande [13].

Il reste à signaler que les décharges nuages-terre représentent seulement 10% de l'ensemble des décharges atmosphériques. La majorité de ces dernières s'effectue entre nuages. On les appelle dans ce cas « sheet leader » en Anglais

I.13. Protection contre la foudre

I.13.1. Point d'impact

Au moment du saut final l'impact serait le point à la terre où l'intensité du champ électrique est la plus élevée. Sur un sol plan, ce sont les points culminants (tours, roches, arbres, etc..) qui facilitent le développement d'une telle décharge atmosphérique.

La figure I.8 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 [14].

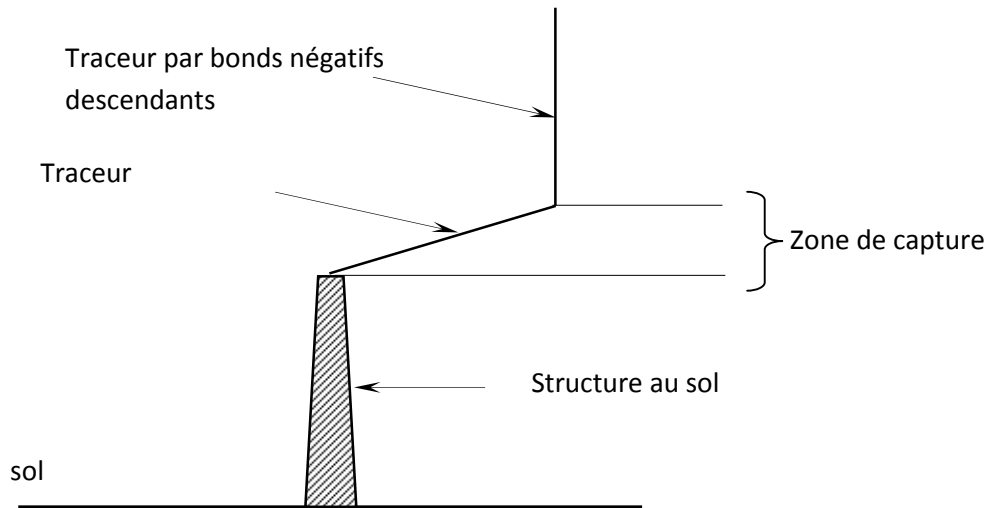


Figure I.8 Point d'impact sur une structure au sol

I.14. Modèle électrogéométrique

Afin de prédire les points d'impact de la foudre et de dimensionner ainsi des dispositifs susceptibles de la capter et d'éviter qu'elle ne frappe directement ce que l'on souhaite protéger des impacts directs, des modèles électrogéométriques ont été développés. L'électricien a essayé de modéliser, dans une expression analytique simple, la distance entre l'extrémité du traceur par bonds descendant et un objet au sol pour laquelle une décharge ascendante peut se développer à partir de cet objet. Cette distance « D » appelée distance d'amorçage (striking distance) est donnée par l'expression générale suivante:

$$D(I) = \alpha I^\beta \quad (I.3)$$

Où I est l'amplitude de la crête du futur courant de foudre de l'arc en retour. Il n'existe pas à l'heure actuelle de modèle universellement reconnu et les paramètres α et β varient dans d'assez grande proportions: β varie entre 0,6 et 0,8 et α entre 6 et 10, ce dernier étant fonction de la hauteur de la structure susceptible d'attirer la foudre. En accord avec d'autres chercheurs, Whitehead [24] a proposé l'expression suivante :

$$D(I) = 10 \cdot I^{2/3} \quad (I.4)$$

Où D est la distance d'amorçage, exprimée en mètre. I est la valeur crête du courant de foudre, exprimé en kA.

I.15. Zone de protection

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

I.15.1. Zone de capture d'un paratonnerre horizontal

Considérons l'ensemble des sphères qui touchent simultanément le paratonnerre horizontal et le sol. Le lien des centres de ces sphères délimite la zone d'attraction du paratonnerre horizontal. Ainsi, on montre que :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Si } D < h : \text{Effet du paratonnerre horizontal non envisagé.} \\ \text{Si } D \geq h : X^2 - 2Yh + h^2 = 0 \end{array} \right.$$

Où h est la hauteur du paratonnerre horizontal. En réalité on obtient une surface de symétrie axiale autour du paratonnerre horizontal dont la hauteur maximale d'un objet protégé est : $P = 2.d - h$ (figure I.9).

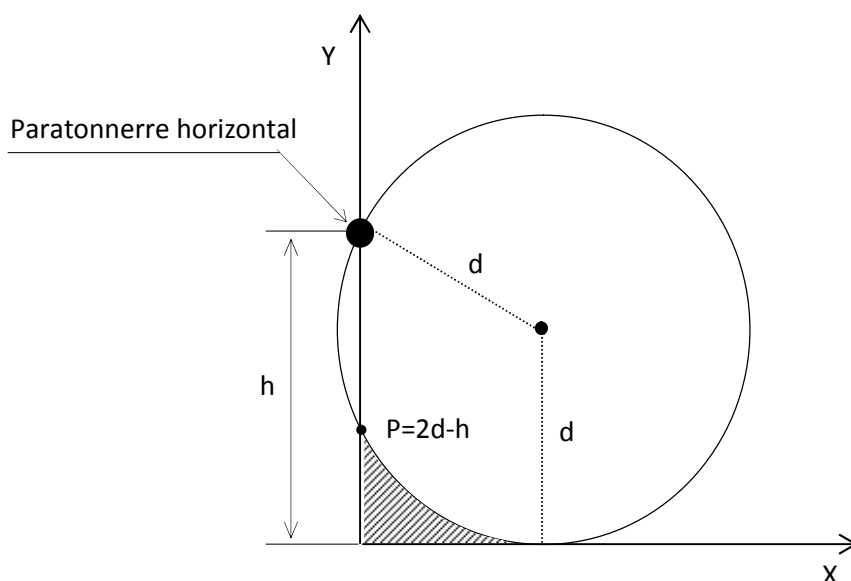


Figure I.9 Zone de protection d'un paratonnerre horizontal.

I.15.2. Zone de capture d'une tige verticale

La construction géométrique d'une tige verticale (figure I.10) est la même que la précédente. Sauf que la zone de protection a une symétrie de révolution au lieu d'une symétrie axiale. Donc le volume de capture est constitué d'un cône est d'un parabolôïde (figure I.11), on a :

$$\begin{cases} \text{Si } D < h: Y = X \\ \text{Si } D \geq h: X^2 - 2Yh + h^2 = 0 \end{cases}$$

où h est la hauteur de la tige verticale. La surface de capture, dans ce cas est définie par :

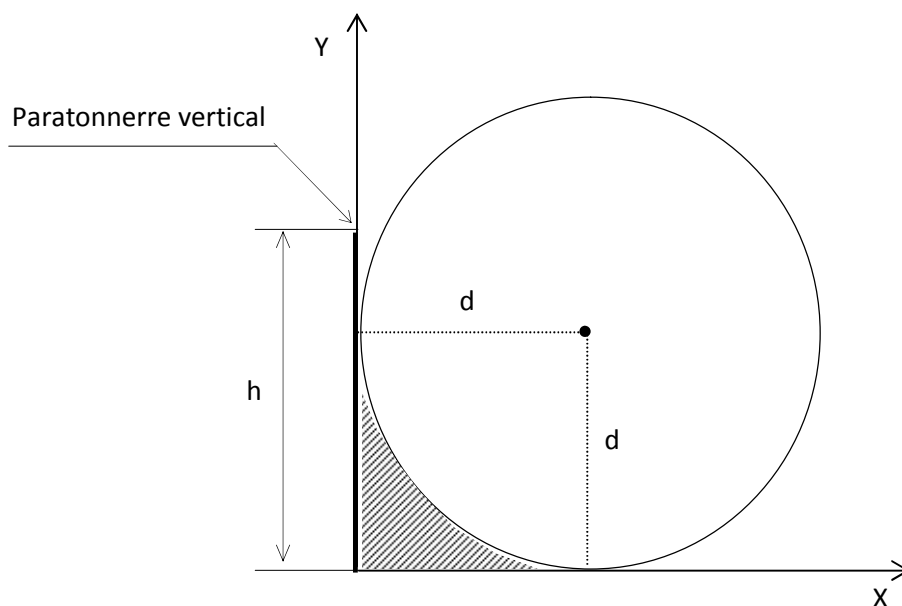
$$S = \pi h^2 [(2d/h) - 1]$$


Figure I.10 Zone de protection d'un paratonnerre vertical.

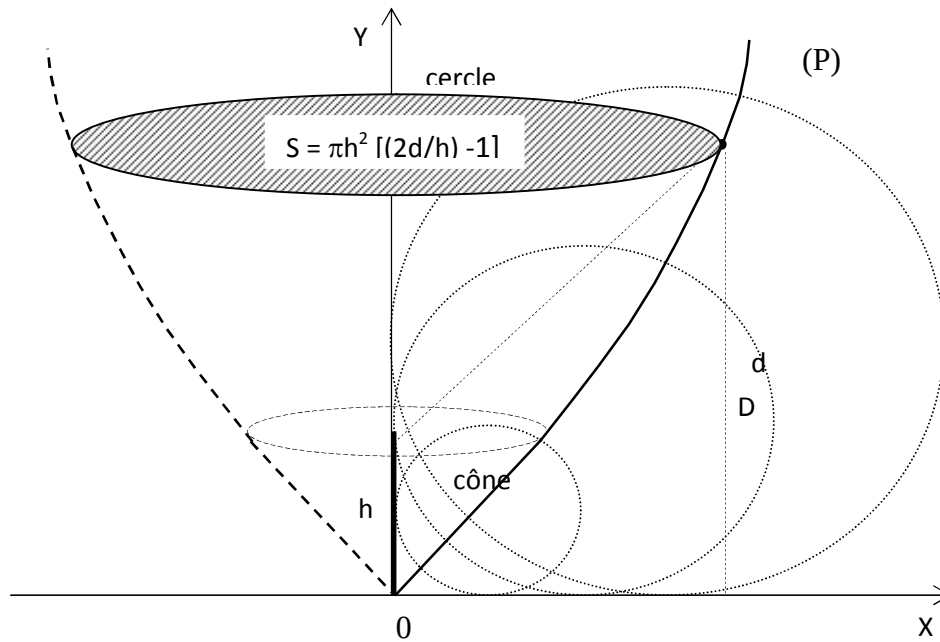


Figure I.11 Zone de protection d'un paratonnerre vertical de hauteur h .

I.16. Influence des propriétés électrogéologiques du sol sur la décharge de foudre

Le modèle électrogéométrique est largement utilisé, dans le domaine de la protection contre la foudre. Ce modèle, qui est basé sur le calcul de la distance d'amorçage en fonction de l'intensité du courant de l'arc en retour, ignore les caractéristiques électrogéologiques du sol.

Plusieurs travaux sur la fréquence de foudroiement d'un lieu donné de la terre, ont confirmé que la nature du sol pourrait avoir une influence considérable sur la position finale du point d'impact de la foudre. Ceci a amené le laboratoire de Haute Tension de l'ENP à s'intéresser à l'influence des propriétés électrogéologiques du sol sur l'attraction des décharges de foudre par un paratonnerre [15].

I.17. Propriétés électrogéologiques de la terre et distribution du champ au sol

Au-dessous d'un nuage orageux, le sol est constitué de plusieurs matériaux qui diffèrent par leurs propriétés électrogéologiques, et présente généralement une structure stratifiée. Du point de vue électrique, les différents matériaux qui le constituent, sont caractérisés par leur et leur permittivité relative. Les valeurs de ces deux paramètres déterminent la nature du sol.

Sous l'effet du champ électrique nuage-sol et de la prédécharge, les porteurs de charges se déplacent vers la surface de la terre.

Soient σ la conductivité du sol, ε sa permittivité, et ρ sa densité volumique de charges. L'équation de continuité s'écrit [15] :

$$\frac{d\rho}{dt} + \frac{\sigma}{\varepsilon} \cdot \rho = 0 \quad (I.5)$$

La solution de cette équation différentielle est donnée par :

$$\rho(t) = \rho_0 \cdot e^{-(t-t_0)/T_c} \quad (I.6)$$

Avec : ρ_0 ; densité de charge initiale à l'instant $t = t_0$.

$T_c = \varepsilon/\sigma$; Constante de temps.

D'après l'expression (I.2), la densité volumique de charge diminue en exponentielle, ce qui traduit le déplacement des charges vers la surface du sol ; contribuant ainsi à l'augmentation de l'intensité du champ électrique à son niveau. La vitesse de déplacement de ces charges est liée aux valeurs des paramètres σ et ε et plus précisément à la constante de temps T_c . La valeur de ce paramètre pour les matériaux conducteurs est de l'ordre de $T_{c(\min)} = 1.4 \cdot 10^{-19}$ s, tandis que, pour les matériaux isolants $T_{c(\max)} = 9.3 \cdot 10^6$ s.

On constate que les matériaux isolants ont une constante du temps T_c beaucoup plus forte que celle des conducteurs, d'où l'idée, qu'en présence de deux sols différents du point de vue électrogéologique, le plus foudroyé serait celui qui a une conductivité σ plus élevée

I.18. Conclusion

Le fort champ électrique statique qui précède l'éclair indique l'imminence d'un choc. L'éclair génère un champ magnétique variable bien plus perturbateur que la variation du champ électrique. Les effets du champ magnétique sont sévères car il pénètre au cœur des immeubles ou il agit par l'induction de surtension.

La foudre peut aussi perturber ou détruire des équipements par des impulsions directement propagées par les câbles externes. Quelle que soit la résistance de la prise de terre, toute canalisation conductrice qui pénètre dans une installation devrait y être raccordée.

De même, tout conducteur électrique externe devrait être protégé par un éclateur.

Les réseaux à fils tendus sont intéressants quand la sûreté de la protection prime sur l'esthétique. Dans tous les cas, les conducteurs de descentes à la terre doivent être multiples et si possible relié aux masses internes.

Un tel maillage est efficace contre les chocs directs par division du courant et contre les effets induits par cage de Faraday.

Chapitre II
Méthodes numériques
pour calculé du champ
électromagnétique

II.1. Introduction

Des prémices a aujourd'hui, deux problèmes majeurs se sont posés aux ingénieurs et chercheurs: celui de l'analyse et celui de la conception de systèmes électromagnétiques. Le premier consiste à déterminer les performances d'une structure donnée, alors que le second a pour mission de trouver la structure répondant à un besoin donné.

De nombreuses méthodes empiriques et analytiques ont été développées. Ces dernières basées sur des modèles simplificateurs deviennent insuffisantes, dès que la complexité de la géométrie s'accroît et que certains matériaux possèdent des caractéristiques non linéaires. La résolution de tels problèmes nécessite de recourir à des méthodes numériques.

L'approche numérique, offre une modélisation fine des phénomènes physiques en accédant aux variables locales et aux variations spatio-temporelles des différentes grandeurs.

Depuis les années 70, des progrès considérables ont été réalisés dans le domaine de la modélisation numérique. De nombreuses méthodes vivent le jour (éléments finis, méthode des moments, intégrales de frontières, ...) et ont été améliorées depuis. La méthode des éléments finis est une méthode de référence qui s'est imposée par la précision des résultats qu'elle fournit. Elle est très utilisée pour la résolution des divers problèmes rencontrés en pratique : stationnaires ou non, linéaires ou non, définis dans un domaine géométrique quelconque à une, deux ou trois dimensions.

Pour des configurations complexes comme celle des machines électriques, la méthode des éléments finis est une méthode numérique puissante pour la résolution des problèmes de champ électromagnétique.

De plus, cette méthode permet d'intégrer divers méthodes de prise en compte de phénomènes inhérents au fonctionnement de ces machines, tels les phénomènes de saturation magnétique, les couples pulsatoires du à un entrefer variable, le mouvement relatifs des parties statoriques et rotoriques [16].

Dans ce qui suit nous présentons la méthode des éléments finis ainsi que son application à la modélisation des dispositifs électromagnétiques ce qui est le cas des machines électriques. Un aperçu sur les méthodes de prise en compte du mouvement est également donné.

II.2. Présentation de la méthode des éléments finis

Historiquement, les premiers développements de la méthode des éléments finis ont été proposés par Richard Courant dans les années 1940, mais ce sont les mécaniciens qui ont développé, popularisé et démontré l'efficacité de cette méthode dans les années 1950-1960. En 1970, Silvester et son équipe de l'université MC Gill aMontréal se sont intéressés, a l'adaptation de cette méthode, a la résolution des problèmes elliptiques de l'Electrotechnique.

La méthode des éléments finis est fréquemment utilisée pour modéliser précisément et finement des systèmes électrotechniques. Cette méthode permet de tenir compte de la géométrie de la machine et permet une approche systématique des problèmes magnétiques. De plus un couplage entre les grandeurs électriques, mécaniques, et magnétiques peut être réalisé. Les éléments finis permettent également une étude tridimensionnelle, ce qui apporte une très grande finesse dans la connaissance du système.

La méthode des éléments finis est l'une des méthodes numériques les plus utilisées actuellement pour résoudre d'une manière efficace les équations différentielles aux dérivées partielles des problèmes physiques.

II.3. Principe de la méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis peut être définie comme une méthode d'approximation des équations aux dérivées partielles qui régit les phénomènes physiques et leurs conditions aux limites.

Le principe bien connu de la méthode est de discrétiser le domaine d'étude en de multiples éléments puis de résoudre localement, dans chacun de ceux-ci, les équations associées à la formulation retenue. Les inconnues élémentaires sont alors définies par une combinaison linéaire, pondérée par des polynômes d'interpolation. La précision du calcul est liée à la finesse du maillage et au degré de ces polynômes. Leurs coefficients ne dépendent que de la géométrie et de sa discrétisation. Finalement, on obtient après assemblage un système matriciel d'équations, pouvant tenir compte de certains non linéarités, comme celle intervenant dans le noyau ferromagnétique [17].

II.4. Formulations des équations d'électromagnétique

Les équations locales de l'électromagnétisme ou «équations de Maxwell» décrivent le comportement local dans le temps et dans l'espace des grandeurs électriques et magnétiques et leurs interactions mutuelles. Les quatre équations suivantes présentent la forme la plus générale des équations de Maxwell :

- Equation de Maxwell-Faraday

$$\text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.1})$$

- Equation de Maxwell-Ampère

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II.2})$$

- Equation de conservation de flux magnétique

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{II.3})$$

- Equation de Maxwell-Gauss

$$\text{div} \vec{D} = \rho \quad (\text{II.4})$$

Avec :

$\vec{E} \text{ (V.m}^{-1}\text{)}$ Champ électrique,

$\vec{B} \text{ (T)}$ Induction magnétique,

$\vec{H} \text{ (A.m}^{-1}\text{)}$ Champ magnétique,

$\vec{J} \text{ (A.m}^{-2}\text{)}$ Densité de courant,

$\vec{D} \text{ (C.m}^{-2}\text{)}$ Induction électrique,

$\rho \text{ (C.m}^{-3}\text{)}$ Charge volumique,

$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \text{ (A.m}^{-2}\text{)}$ Densité de courant de déplacement.

La résolution de ces équation ne peut s'effectuer sans les relation constitutives du milieu [18].

Une relation constitutive décrit localement le comportement des grandeurs électromagnétiques dans un matériau donné. Dans le cas des matériaux isotropes ces relations s'écrivent :

- Les relations du milieu

- ❖ Pour les matériaux magnétiques

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{B}_r(T) \quad (\text{II.5})$$

Avec : $\mu = \mu_0 \mu_r$

où :

$\vec{B}_r(T)$ Induction magnétique rémanente (cas d'aimants permanents),

$\mu_0 (\text{H} \cdot \text{m}^{-1})$ Perméabilité magnétique du vide ; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$,

μ_r Perméabilité magnétique relative du milieu,

$\mu (\text{H} \cdot \text{m}^{-1})$ Perméabilité magnétique absolue,

- ❖ Pour les matériaux diélectriques

$$\vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E} \quad (\text{II.6})$$

Avec : $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$

Et où :

$\epsilon_0 (\text{F} \cdot \text{m}^{-1})$ Permittivité électrique du vide ; $\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^9$,

ϵ_r Permittivité électrique relative du milieu,

$\epsilon (\text{F} \cdot \text{m}^{-1})$ Permittivité électrique absolue,

- La loi d'ohm

$$\vec{J} = \vec{J} + \sigma \vec{E} \quad (\text{II.7})$$

Avec :

$\sigma (\text{S} \cdot \text{m}^{-1})$ Conductivité électrique,

$\vec{J}_s (\text{A} \cdot \text{m}^{-1})$ Densité de courant provenant des enroulements d'alimentation.

Les relations précédentes sont données dans le cas le plus général : dans un matériau ferromagnétique sans induction rémanente, le terme B_r de l'équation (II.5) devient nul [18].

Dans le cas des aimants permanents, l'induction rémanente $\vec{B}_r$ s'exprime en fonction du vecteur aimantation $\vec{M}$ comme suit :

$$\vec{B}_r = \mu_0 \vec{M} \quad (\text{II.8})$$

II.5. Equation de continuité

Cette équation est obtenue par la combinaison des équations (II.2) et (II.4) qui traduit la conservation de charge électrique donnée par :

$$\text{div} \vec{j} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (\text{II.9})$$

II.6. Formulation problème électromagnétique

Pour les fréquences utilisées en électrotechnique, les courants de déplacement $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ sont négligeables devant les courants de conduction ce qui se traduit par $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \ll \vec{j}$; l'équation (II.2) s'écrit alors :

$$\text{rot} \vec{A} = \vec{j} \quad (\text{II.10})$$

A partir de l'équation (I.3) on peut introduire un potentiel vecteur magnétique (A) tel que :

$$\vec{j} = \text{rot} \vec{A} \quad (\text{II.11})$$

D'après le théorème d'Helmoltz, un vecteur ne peut être défini que si son rotationnel et sa divergence sont simultanément donnés. Dans ce cas, la relation (II.11) ne suffit pas à définir le vecteur $\vec{A}$, il faut en plus définir sa divergence pour garantir l'unicité de la solution. Dans notre étude, nous utiliserons la jauge de Coulomb, soit :

$$\text{div} \vec{A} = 0 \quad (\text{II.12})$$

La substitution de (II.11) dans (II.1) nous donne :

$$\text{rot} \left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = 0 \quad (\text{II.13})$$

La relation (II.14) implique qu'il existe un potentiel scalaire V tel que :

$$\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\vec{\nabla} V \quad (\text{II.14})$$

D'où :

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \vec{\nabla} V \quad (\text{II.15})$$

La substitution de son expression (II.15) dans l'équation (II.7) nous donne :

$$\vec{J} = \vec{J}_s - \partial \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \sigma \vec{\nabla} V \quad (\text{II.16})$$

A partir de (II.5), (II.10), (II.16), l'équation qui régit les phénomènes magnétiques est :

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \cdot \text{rot} \vec{A} \right) = \vec{J}_s - \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \sigma \vec{\nabla} V + \text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \cdot \vec{r} \right) \quad (\text{II.17})$$

Dans le cas des systèmes de géométries complexes où la circulation des champs suit les trois directions de l'espace, la modélisation tridimensionnelle est incontournable. Néanmoins, une telle modélisation (par exemple par la méthode des éléments finis) conduit à des systèmes algébriques de grande taille dont la résolution peut s'avérer coûteuse en temps de calcul à cause des techniques employées.

En exploitant les particularités des dispositions des matériaux dans les systèmes, on peut parfois se ramener à des modèles bidimensionnels qui représentent assez correctement les phénomènes pour des coûts de calcul raisonnables.

Dans les machines électriques à flux radial (auxquelles nous nous intéressons), la disposition des conducteurs dans le sens longitudinal favorise l'établissement du champ magnétique dans les plans transversaux. La distribution du champ est supposée invariante suivant la directions longitudinale. Un modèle bidimensionnel permet ainsi d'obtenir la solution avec une précision jugée suffisante. C'est pourquoi nous limiterons notre étude à la résolution des équations électromagnétiques en 2D.

L'invariance selon l'axe Oz, perpendiculaire au plan Oxy de l'étude, conduit aux deux points suivants :

- Le potentiel vecteur A n'a qu'une composante (selon Oz),
- Le vecteur densité de courant J n'a qu'une composante (selon Oz).

Ceci se traduit par :

$$\left. \begin{aligned} \vec{A} &= A(x, y, t)_z \text{ (II.18)} \\ \vec{J} &= J(x, y, t)_z \text{ (II.19)} \end{aligned} \right\}$$

Le potentiel V dans les applications qui nous intéressent (modélisation des machines électriques alimentées en tension) est une grandeur fixée à gradient nul.

De ce fait l'équation (II.17) s'écrit sous la forme :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -J_s + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} \left(\left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} (B_r)_y \right) \right) - \left(\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} (B_r)_x \right) \right) \right) \quad \text{(II.20)}$$

II.7. Conditions aux limites

Généralement, on rencontre quatre types de conditions aux limites :

- Condition de Dirichlet

Cette condition impose la valeur exacte de l'inconnue sur la frontière extérieure du domaine de résolution.

$$A = g_0 \quad \text{(II.21)}$$

Avec A : Fonction inconnue du problème

g_0 : Une constante

On parle de condition de Dirichlet homogène quand $A=0$ le long de la frontière du domaine.

- Condition de Neumann

C'est une condition qui nous renseigne sur la valeur de la composante normale de l'inconnue sur la limite du domaine étudié.

$$\frac{\partial A}{\partial n} = g_0 \text{ (II.22)}$$

Habituellement, on parle de Neumann homogène sur les plans de symétrie, quand $\frac{\partial A}{\partial n} = 0$, défini le long de la frontière du domaine.

- Condition mixte Dirichlet – Neumann (de Robin)

C'est la combinaison des deux types de condition aux limites. Elle s'exprime par :

$$a A + b \frac{\partial A}{\partial n} = g \quad \text{(II.23)}$$

Où :

A et b : constantes définies sur le domaine d'étude et g : la valeur de l'inconnue sur la frontière.

- Condition de périodicité et d'antipériodicité

Elles sont dites aussi cycliques et anti-cycliques.

$$A|_{\Gamma} = K \cdot A|_{\Gamma+d\Gamma} \quad \text{(II.24)}$$

Avec A : Fonction inconnue.

$d\Gamma$: Période spatiale (suivant le contour Γ).

$K=1$: Cyclique.

$K=-1$: Anti-Cyclique.

Ces deux conditions sont utilisées pour exploiter la symétrie inhérente dans quelque problèmes, afin de réduire les dimensions du domaine d'étude, ainsi que dans ceux à frontière ouvertes.

II.8. Condition de transmission

Un champ électromagnétique traversant deux milieux continus différents subit une discontinuité et n'est plus différentiable. Afin de résoudre les équation de Maxwell dans un domaine entier contenant des sous-domaines avec différentes propriétés de matériaux, il est donc nécessaire de considérer les conditions de transmission (ou d'interface), qui s'énoncent comme suit :

- Conservation de la composante tangentielle du champ électrique $\vec{E}$

$$\vec{n} \wedge (\vec{E}_1 - \vec{E}_2) = 0 \quad (\text{II.25})$$

- Conservation de la composante normale de l'induction magnétique $\vec{B}$

$$\vec{n} \cdot (\vec{B}_1 - \vec{B}_2) = 0 \quad (\text{II.26})$$

- Discontinuité de la composante tangentielle du champ magnétique $\vec{H}$, si les courants surfaciques $\vec{K}_S$ existent

$$\vec{n} \wedge (\vec{H}_1 - \vec{H}_2) = \vec{K}_S \quad (\text{II.27})$$

- Discontinuité de la composante normale de l'induction électrique $\vec{D}$, si les charges surfaciques ρ_s existent

$$\vec{n} \cdot (\vec{D}_1 - \vec{D}_2) = \rho_s \quad (\text{II.28})$$

Avec :

$\vec{n}$: La normale à l'interface .

K_S et ρ_s sont respectivement, la densité de courant et la densité de charges, portées par la surface de séparation.

II.9. Discrétisation et approximation

L'idée fondamentale de la méthode des éléments finis est de subdiviser la région à étudier en petites sous régions appelées élément finis constituant le maillage. Les fonctions inconnues sont approximées sur chaque élément fini par une simple fonction appelée fonction de forme qui est continue et définie sur chaque élément seul. La forme des éléments est directement liée à la dimension du problème (2D ou 3D). Pour une géométrie en (2D), on utilise généralement des triangles ou des quadrilatères ; pour une géométrie en (3D), on utilise les tétraèdres, les prismes ou les hexaèdres.

La discrétisation est une étape importante dans l'analyse éléments finis car la précision des résultats dépend de la méthode de discrétisation et de la finesse de cette subdivision en sous-domaines.

La fonction inconnue est approchée dans chaque élément par une fonction d'interpolation nodale, faisant intervenir les valeurs de l'inconnue aux nœuds de ces éléments ainsi que les coordonnées géométriques de ces nœuds.

L'inconnue A est décrite dans chaque élément e par une combinaison linéaire des valeurs A_i^e aux nœuds [19] :

$$A = \sum_{i=1}^3 \alpha_i^e A_i^e \quad (\text{II.29})$$

Les α_i sont les fonctions de pondération devant vérifier :

$$\alpha_i^e(x_j, y_j) = \begin{cases} 1 & \text{Si } i = j \\ 0 & \text{Si } i \neq j \end{cases}$$

Dans le cas du calcul du champ dans les structures électromagnétique, les éléments de forme triangulaire sont les plus utilisés [57,58]. Cette subdivision exclusivement triangulaire du premier ordre a l'avantage de s'adapter à toute configuration géométrique et permet de traiter des expressions simples.

Dans le cas de l'élément triangulaire représenté sur la figure (II.1), les fonctions de pondération sont :

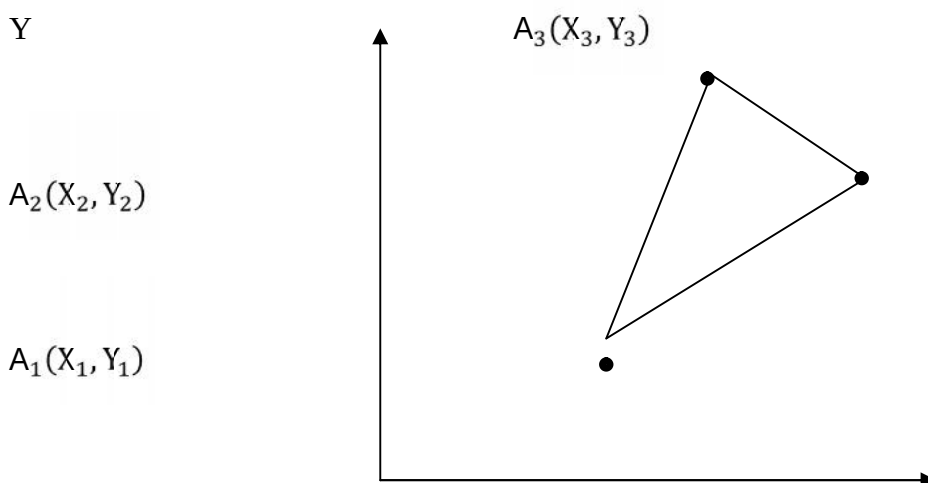


Figure.II.1.Elément triangulaire.X

$$\alpha_1 = \frac{1}{2\Delta} [(x_2 \cdot y_3 - x_3 \cdot y_2) + (y_2 - y_3) \cdot x + (x_3 - x_2) \cdot y]$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{2\Delta} [(x_3 \cdot y_1 - x_1 \cdot y_3) + (y_3 - y_1) \cdot x + (x_1 - x_3) \cdot y]$$

$$\alpha_3 = \frac{1}{2\Delta} [(x_1 \cdot y_2 - x_2 \cdot y_1) + (y_1 - y_2) \cdot x + (x_2 - x_1) \cdot y]$$

Où : Δ est l'aire de l'élément.

$$2\Delta = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{vmatrix} = (x_1 \cdot y_2 - x_2 \cdot y_1)(x_3 \cdot y_1 - x_1 \cdot y_3)(x_2 \cdot y_3 - x_3 \cdot y_2)$$

D'où :

$$\Delta = \frac{[(x_1 \cdot y_2 - x_2 \cdot y_1)(x_3 \cdot y_1 - x_1 \cdot y_3)(x_2 \cdot y_3 - x_3 \cdot y_2)]}{2}$$

$$= \frac{1}{2} [(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1)] \quad (\text{II.30})$$

II.10. Formulation intégrale

On procède à la résolution par la méthode des éléments finis de l'équation régissant le comportement électromagnétique des structures étudiées soit par la minimisation d'une fonctionnelle liée à l'énergie emmagasinée dans les éléments (méthode variationnelle), soit par une formulation intégrale du problème (méthode des résidus pondérés). Ces deux méthodes sont équivalentes et conduisent à partir d'un certain point, aux mêmes développements mathématiques.

La méthode des résidus pondérés consiste à rechercher sur le domaine d'étude Q les fonctions $A(x,y)$ qui annulent la forme intégrale suivante :

$$W = \int_{\Omega} \Psi \cdot R(A) d\Omega = 0 \quad (\text{II.31})$$

Où R est le résidu de l'approximation défini par:

$$R(A) = L(A) - F_v \quad (\text{II.32})$$

Avec L : L'opérateur différentiel:

F_v : Fonction défini sur le domaine d'étude Q:

A : Potentiel magnétique. inconnue de l'équation (11.32)

Dans le cas de l'équation (II. 20), le résidu $R(A)$ peut s'écrire sous la forme suivante :

$$R(A) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) + J_s - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \left(\left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} (B_r)_y \right) \right) - \left(\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} (B_r)_x \right) \right) \right) \quad (II.33)$$

La substitution de (II.33) clans (II.31) , nous permet d'obtenir:

$$W = \int_{\Omega} \Psi \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) + J_s - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \left(\left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} (B_r)_y \right) \right) - \left(\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} (B_r)_x \right) \right) \right) \right) d\Omega \quad (II.34)$$

Après une intégration par parties, on petit écrire :

$$\begin{aligned} W = & \iint_{\Omega} \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial \Psi}{\partial x} \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial \Psi}{\partial y} \frac{\partial A}{\partial y} \right) d\Omega + \iint_{\Omega} \Psi \left(-J_s + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} \right) d\Omega \\ & + \int_{\Omega} \frac{1}{\mu} \left(- \left(\frac{\partial \Psi}{\partial x} (B_r)_y \right) + \left(\frac{\partial \Psi}{\partial y} (B_r)_x \right) \right) d\Omega - \int_{\Gamma} \Psi \frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial n} d\Gamma = 0 \end{aligned} \quad (II.35)$$

La condition de NEUMANN implicite permet d'éliminer le terme $\int_{\Gamma} \Psi \frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial n} d\Gamma$

$$\begin{aligned} W = & \iint_{\Omega} \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial \Psi}{\partial x} \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial \Psi}{\partial y} \frac{\partial A}{\partial y} \right) d\Omega + \iint_{\Omega} \Psi \left(-J_s + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} \right) d\Omega \\ & + \int_{\Omega} \frac{1}{\mu} \left(- \left((B_r)_y \frac{\partial \Psi}{\partial x} \right) + \left((B_r)_x \frac{\partial \Psi}{\partial y} \right) \right) d\Omega = 0 \end{aligned} \quad (II.36)$$

L'intégration sur un élément nous donne :

$$\begin{aligned} W = & \iint_{\Omega^e} \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial \Psi^e}{\partial x} \frac{\partial A^e}{\partial x} + \frac{\partial \Psi^e}{\partial y} \frac{\partial A^e}{\partial y} \right) d\Omega + \iint_{\Omega^e} \Psi \left(-J_s + \sigma \frac{\partial A^e}{\partial t} \right) d\Omega \\ & + \int_{\Omega^e} \frac{1}{\mu} \left((B_r)_x \frac{\partial \Psi^e}{\partial y} - (B_r)_y \frac{\partial \Psi^e}{\partial x} \right) d\Omega = 0 \end{aligned} \quad (II.37)$$

Après approximation de la fonction inconnue l'équation (II.37) devient :

$$W = \iint_{\Omega^e} \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial \Psi^e}{\partial x} \frac{\partial \alpha^{eT}}{\partial x} + \frac{\partial \Psi^e}{\partial y} \frac{\partial \alpha^{eT}}{\partial y} \right) A^e d\Omega + \iint_{\Omega^e} \Psi^e \sigma \alpha^e \frac{\partial A^e}{\partial t} d\Omega - \iint_{\Omega^e} \alpha^{eT} J_s d\Omega \\ + \iint_{\Omega^e} \frac{1}{\mu} \left((B_r)_x \frac{\partial \Psi^e}{\partial y} + (B_r)_y \frac{\partial \Psi^e}{\partial x} \right) d\Omega = 0 \quad (\text{II.38})$$

Le choix de la fonction de pondération est multiple et amène a plusieurs méthodes, entre autres, la méthode de Galerkin qui consiste à choisir comme fonction de pondération Ψ_i^e la fonction d'interpolation α_i^e . L'application de cette méthode l'équation (II. 38) avec l'intégration sur un élément nous donne:

$$W = \iint_{\Omega^e} \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial \alpha^e}{\partial x} \left(\frac{\partial \alpha^{eT}}{\partial x} \right) + \frac{\partial \alpha^e}{\partial y} \left(\frac{\partial \alpha^{eT}}{\partial y} \right) \right) A^e d\Omega + \iint_{\Omega^e} \Psi^e \sigma \alpha^{eT} \frac{\partial A^e}{\partial t} d\Omega - \iint_{\Omega^e} \alpha^{eT} J_s d\Omega \\ + \iint_{\Omega^e} \frac{1}{\mu} \left((B_r)_x \frac{\partial \alpha^e}{\partial y} + (B_r)_y \frac{\partial \alpha^e}{\partial x} \right) d\Omega = 0 \quad (\text{II.39})$$

Sous forme matricielle l'expression de W^e s'écrit :

$$W^e(A) = [S]^e [A]^e - [P]^e + \sigma [T]^e \frac{[A]^e}{\partial t} - [K]^e \quad (\text{II.40})$$

ou : $[S]^e$: est une matrice carrée (3x3) dont le terme général est donnée par :

$$S_{ij}^e = \iint_{\Omega^e} \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial \alpha_i}{\partial x} \frac{\partial \alpha_j}{\partial x} + \frac{\partial \alpha_i}{\partial y} \frac{\partial \alpha_j}{\partial y} \right) d\Omega \quad (\text{II.41})$$

$[P]^e$: Est la matrice source (vecteur sollicitation). c 'est une matrice colonne de dimension 3 dont le terme général est donné par:

$$P_i^e = \iint_{\Omega^e} \alpha^{eT} J_s \alpha_i^e d\Omega \quad (\text{II.42})$$

Et $[T]^e$: est une matrice carrée (3x3) dont le terme général est donnée par :

$$T_{ij}^e = \iint_{\Omega^e} \alpha_i^e \alpha_j^e d\Omega \quad (\text{II.43})$$

$$K_i = - \iint_{\Omega^e} \frac{1}{\mu} \left((B_r)_x \frac{\partial \alpha_i^e}{\partial y} + (B_r)_y \frac{\partial \alpha_i^e}{\partial x} \right) d\Omega \quad (\text{II.44})$$

L'assemblage sur tous les éléments nous donne :

$$[S][A] + \sigma[T] \frac{\partial[A]}{\partial t} = [P] + [K] \quad (\text{II.45})$$

On regroupant tous les termes sources dans un vecteur $[F]$, l'équation (II.45) devient :

$$[S][A] + \sigma[T] \frac{\partial[A]}{\partial t} = [F] \quad (\text{II.46})$$

Dans le cas statique, la relation (II.46) se réduit à :

$$[S][A] = [F] \quad (\text{II.47})$$

II.11. Conclusion

La méthode des éléments finis est arrivée aujourd'hui à un degré de maturité et est en fait un des outils d'analyse les plus utilisés dans les disciplines de l'ingénieur.

Associer aux techniques graphiques interactive propres à l'informatique moderne et aux méthodes utilisées dans le domaine de conception assisté par ordinateur (utilisation de bases de données technique) elle peut être mise à la portée de la plus part des ingénieurs.

Chapitre III
Modèle expérimental

III.1 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 l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger (ENP).

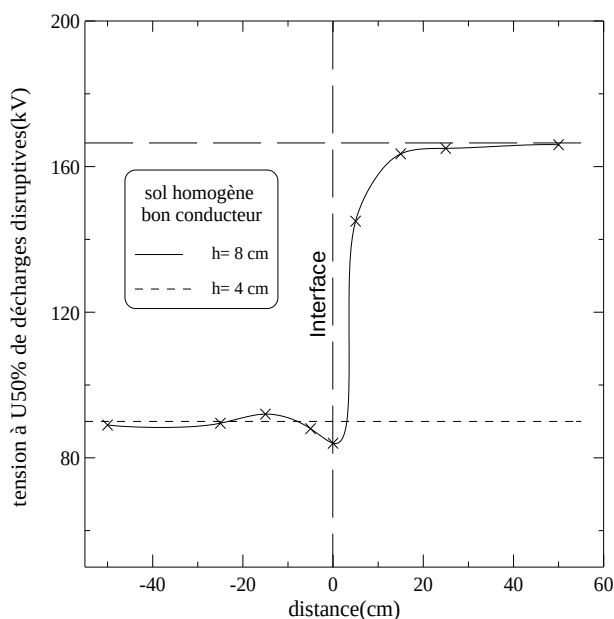
Nous présentons dans ce chapitre, le circuit d'essai ainsi que la méthode utilisée pour déterminer la tension $U_{0\%}$ du système tige-plan. Nous présentons aussi la configuration du système expérimental réduit.

III.2 Modèle expérimental

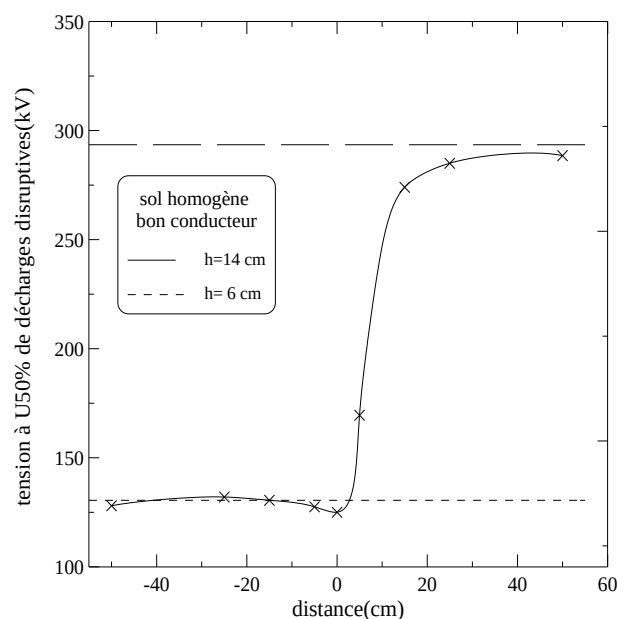
III.2.1 Cas d'un sol discontinu sans paratonnerre

Le modèle expérimental utilisé pour étudier la configuration tige-plan avec terre discontinu est représenté à la figure (III.2).

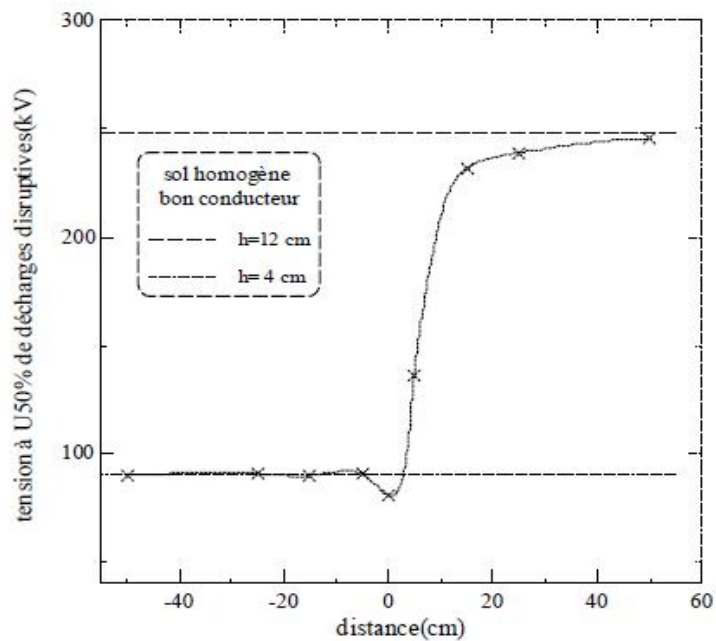
Le système tige-plan avec sol discontinu est caractérisé, par la longueur de l'intervalle ainsi que par la profondeur (e), la polarité de la tige et la distance d entre l'axe de cette dernière et l'interface. Les résultats obtenus au laboratoire de l'ENP sont présentés à la figure (III.1) [20].



(a) $e=4$ cm, $h=4$ cm



(b) $e=8$ cm, $h=6$ cm



(c) $e=8\text{cm}$, $h=4\text{cm}$

Figure III.1- Variation de $U_{50\%}$ en fonction de la distance D' .

Dans le cas de la configuration avec terre discontinue des mesures de champ ont été effectuées utilisant la sonde à capacité répartie (figure III.2) [21].

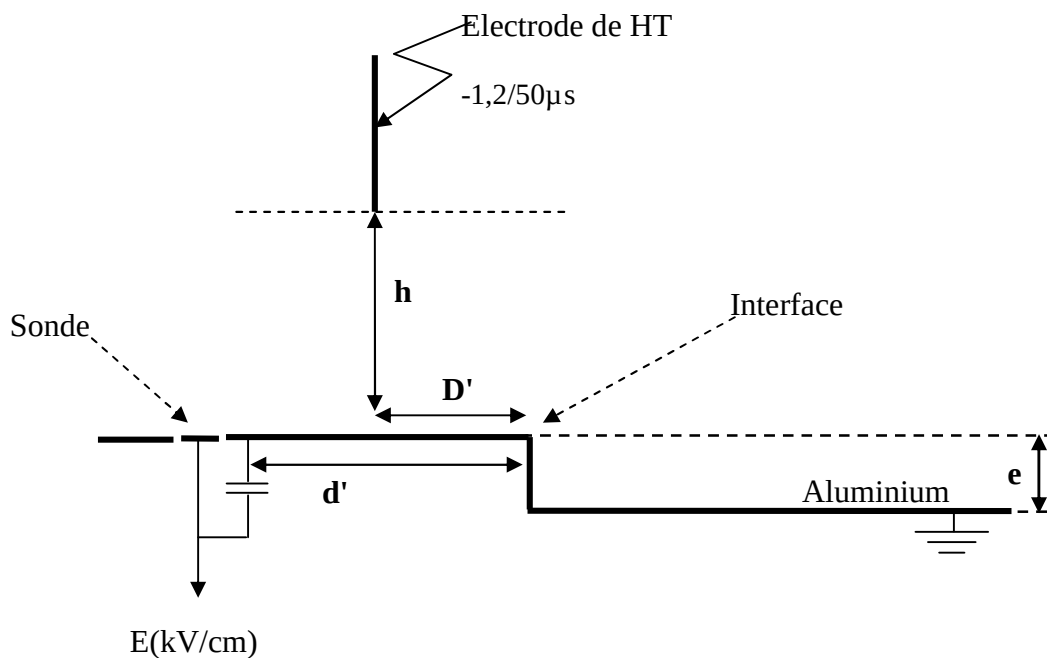


Figure III.2- Modèle expérimental de terre discontinue en présence de la sonde à capacité répartie

Avec :

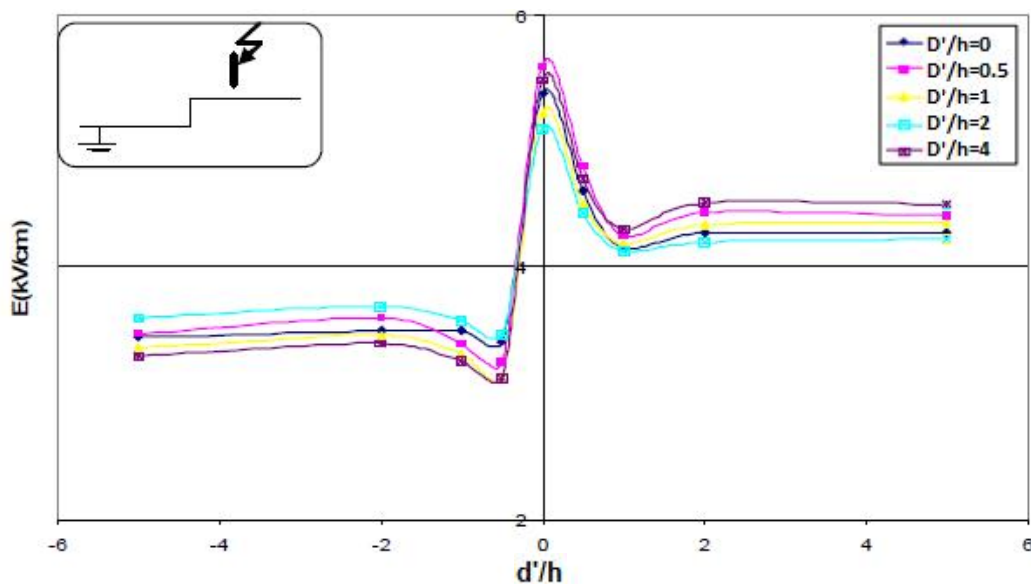
h : hauteur de l'électrode de haute tension au-dessus de la partie haute du plan discontinu.

e : profondeur de l'interface.

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

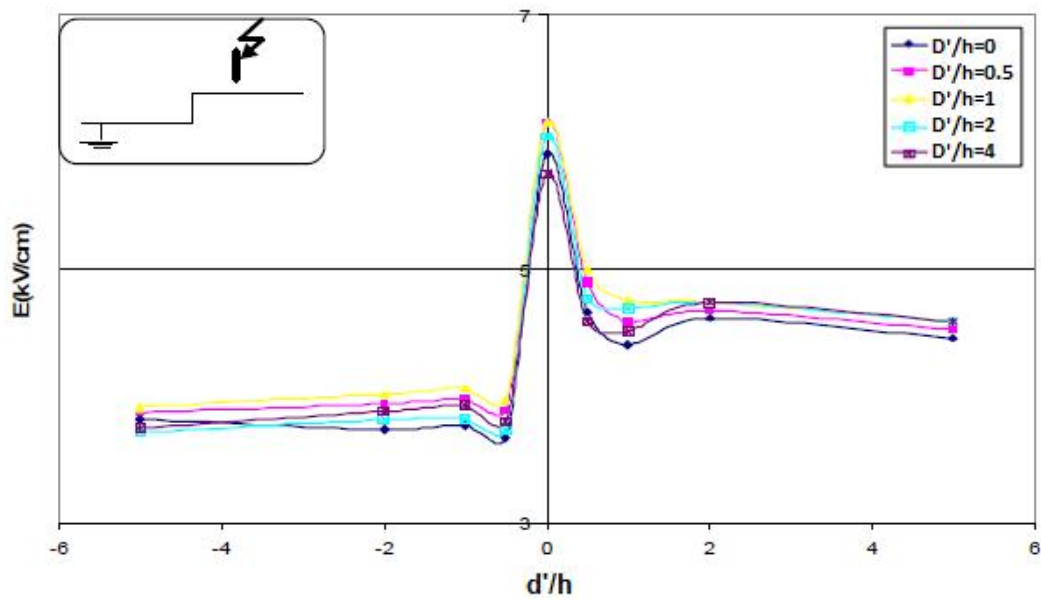
D' : distance horizontale entre l'interface et l'axe de la tige haute tension.

Les mesures du champ électrique le long du plan discontinu, ont permis d'aboutir aux résultats présentés à la figure (III.3 à III.6) [21].



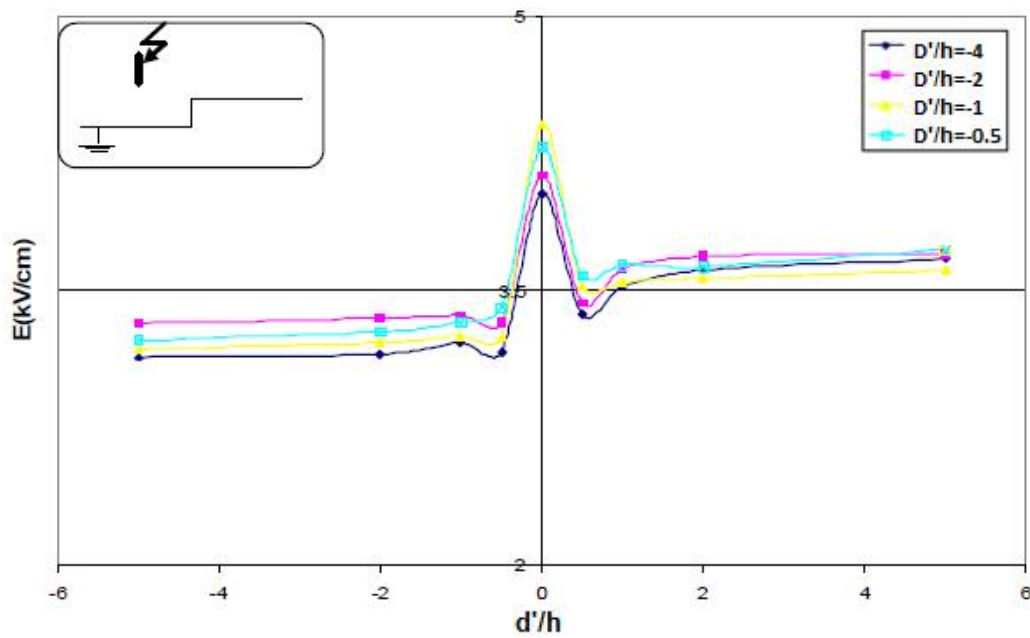
$$U = 0.5U_0\%$$

Figure III.3. Champ électrique au partie haute de sol en fonction de la position (d'/h) de la sonde, $h=12\text{cm}$.



$$U = 0.5U_{0\%}$$

Figure III.4. Champ électrique au partie haute de sol en fonction de la position (d'/h) de la sonde. $h=16$ cm.



$$U=0.5U_{0\%}$$

Figure III.5. Champ électrique mesuré au partie basse de sol en fonction de la position (d'/h) de la sonde. $h = 12$ cm.

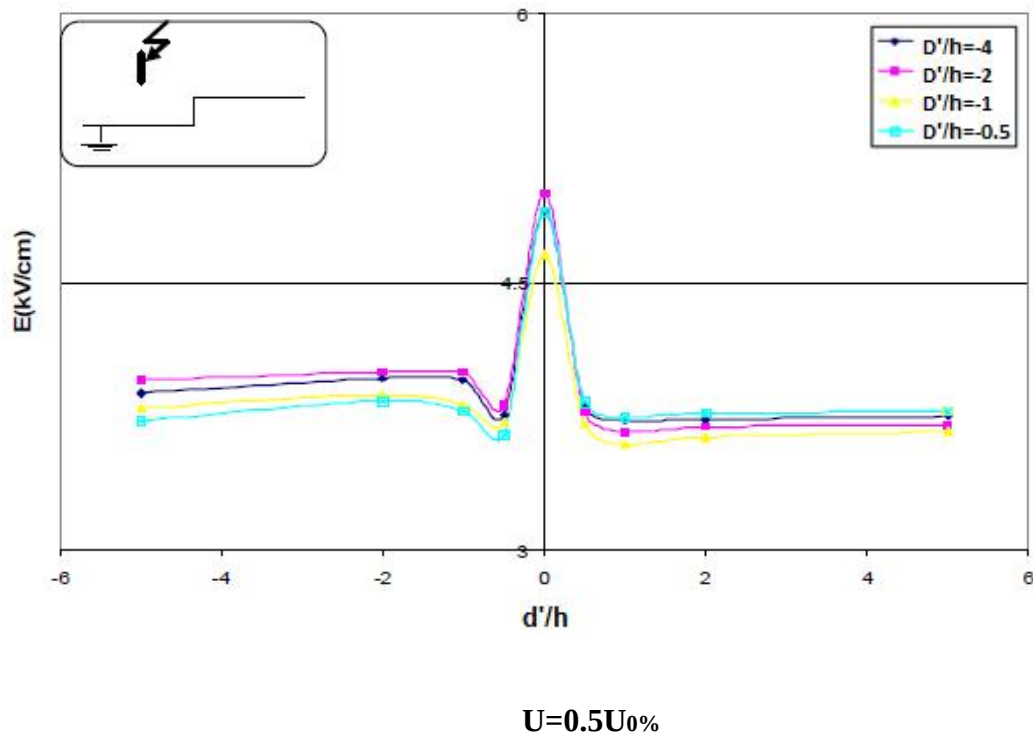


Figure III.6. Champ électrique mesuré au partie basse de sol en fonction de la position (d'/h) de la sonde. $h = 16$ cm.

Les résultats:

➤ 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% 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.

III.2.2 Cas d'un sol discontinu avec paratonnerre horizontal

La terre discontinue est constituée de deux plaques en aluminium de 4 mm d'épaisseur ayant chacune une surface de $1,2 \times 1,2 \text{ m}^2$. La première (la partie haute) présente à l'une de ses extrémités un coude d'un angle de 90° qui simule l'interface. La deuxième (la partie basse) est une simple plaque horizontale. En joignant les deux parties, la terre de type discontinu aura une surface de $2,4 \times 1,2 \text{ m}^2$ et une interface perpendiculaire de profondeur «e» (figure III.7). Le paratonnerre horizontal est simulé par un fil tendu parallèlement à l'interface et ayant un diamètre D_p . Il est relié à la terre à l'une de ses extrémités.

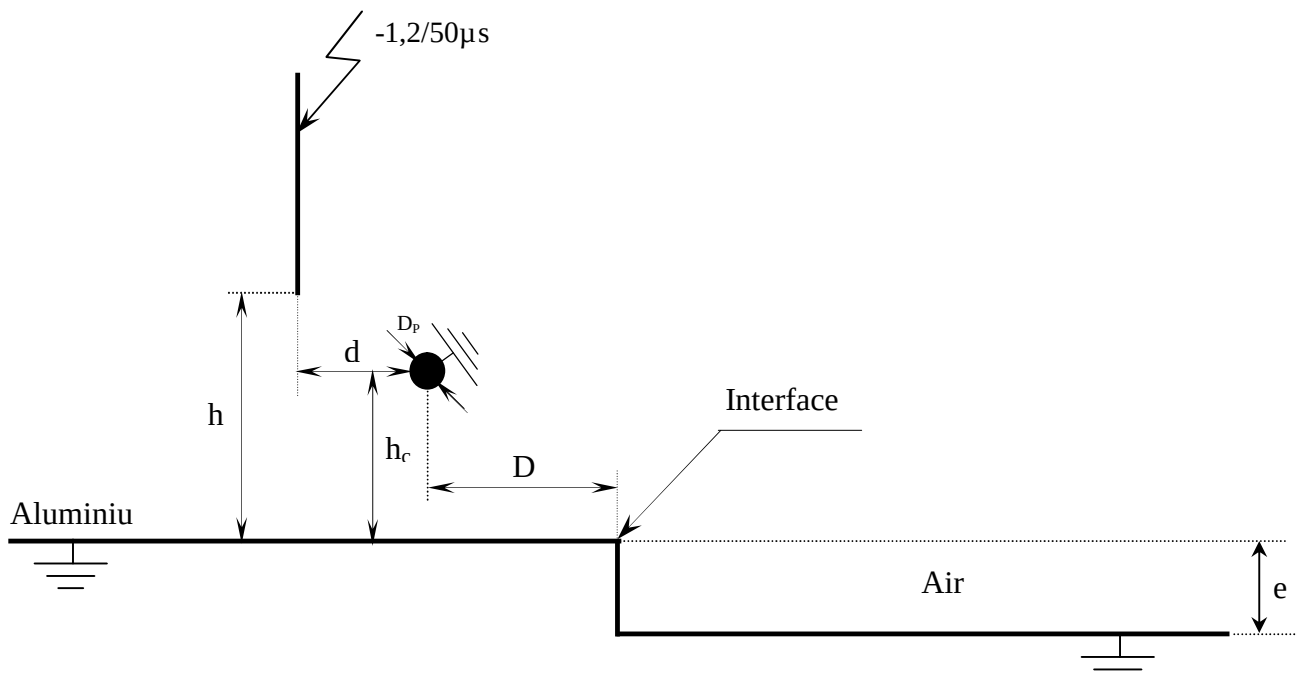


Figure III.7-Modèle expérimental de terre discontinue en présence de paratonnerre horizontal.

Comme présentée à la figure III.7, une configuration du modèle d'essais présentant la terre discontinue est définie par les paramètres suivants : D_p , h_c , h , e , d et D tel que :

- D_p : diamètre du paratonnerre horizontal,
- h_c : hauteur de suspension du paratonnerre horizontal,
- h : hauteur de l'électrode de haute tension par rapport à la plaque du modèle d'essais,
- e : profondeur de l'interface,
- d : distance horizontale entre l'axe de la tige de haute tension et le contour du paratonnerre,
- D : distance horizontale entre l'interface et le centre du paratonnerre.

III.2.3 Configuration du modèle expérimental

Après la détermination des tensions $U_{100\%}$ pour les différentes hauteurs h et la détermination des zones d'attraction pour différents diamètres du paratonnerre horizontal dans le cas de terre homogène conductrice, nous procédons à l'étude des différentes configurations de terre discontinue en présence du paratonnerre horizontal. A cet effet, nous distinguons, selon la position du paratonnerre les deux cas suivants :

1^{er} cas : Paratonnerre situé sur la partie haute de la terre discontinue.

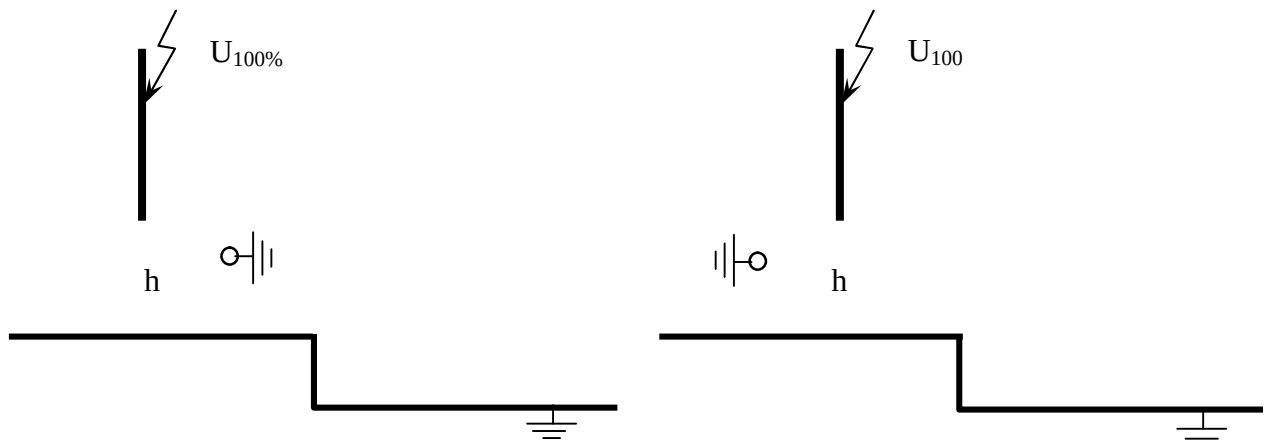
a- Première configuration : Paratonnerre horizontal situé entre l'axe de la décharge et l'interface.

b- Deuxième configuration : Axe de la décharge situé entre l'interface et le paratonnerre horizontal.

2^{ème} cas : Paratonnerre situé sur la partie basse de la terre discontinue.

c- Troisième configuration : Axe de la décharge situé entre l'interface et le paratonnerre horizontal.

d- Quatrième configuration : Paratonnerre horizontal situé entre l'axe de la décharge et l'interface.



(a) Première configuration

(b) Deuxième configuration

(1) Paratonnerre au dessus de la partie haute de la terre discontinue

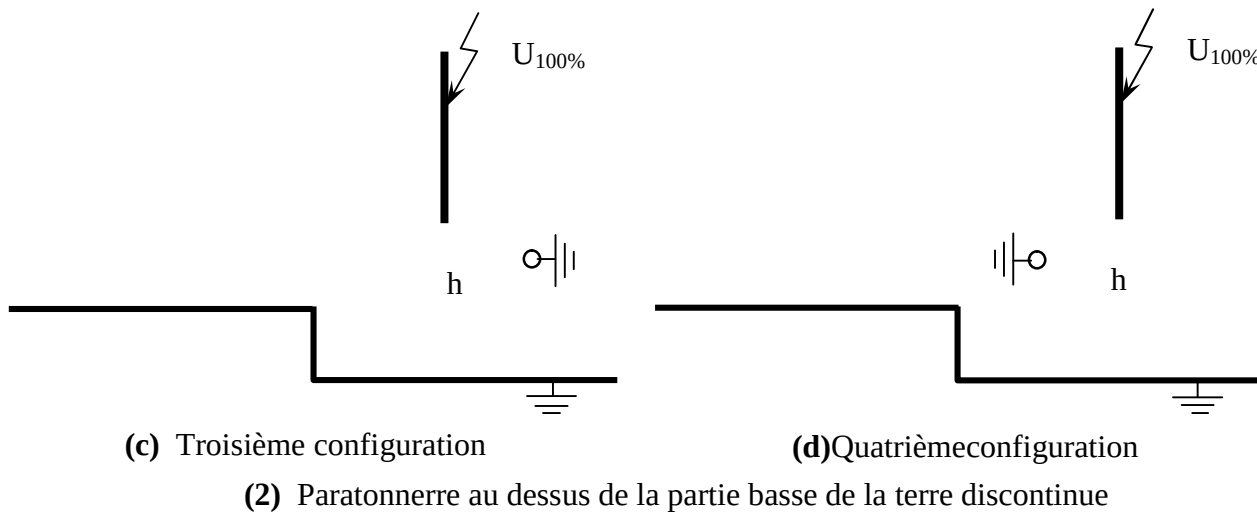


Figure III.8-Configurations du modèle expérimental dans le cas de terre discontinue.

III.3 Détermination des zones d'attraction dans le cas de terre discontinue

III.3.1 Détermination des fréquences d'impact

Nous avons défini tout d'abord les paramètres de la configuration à étudier h/h_c , D/h_c , e/h_c et D_p/h_c . Ceci se fait comme suit :

Le choix des hauteurs de la tige de haute tension h est limité par l'amplitude des tensions délivrées par le générateur de choc. Nous avons choisi les rapports h/h_c suivants (1, 2, 3 et 3,5). Ainsi nous avons essayé de garder la hauteur du paratonnerre h_c égal à 4cm pendant tous les essais.

Dans le but d'une comparaison éventuelle entre nos résultats et ceux obtenus par A. Chouchou [22] nous avons pris dans la majorité des cas les mêmes rapports D/h_c . Ces derniers dépendent en premier lieu de la configuration de la terre discontinue étudiée.

Les diamètres des paratonnerres varient entre 0,5 et 12mm. Après le choix des rapports h/h_c , D/h_c , e/h_c et D_p/h_c qui définissent la configuration à étudier, nous avons procédé aux choix des distances d , c'est à dire des rapports d/h_c . Puis, nous avons appliqué au système la tension $U_{100\%}$ correspondante, convertie aux conditions atmosphériques de l'essai. Nous avons réalisé des séries de 50 chocs espacés d'environ 30 secondes et on compte le nombre de chocs atteignant le paratonnerre N_c . La fréquence d'impact au paratonnerre est :

$$f_c = N_c / 50$$

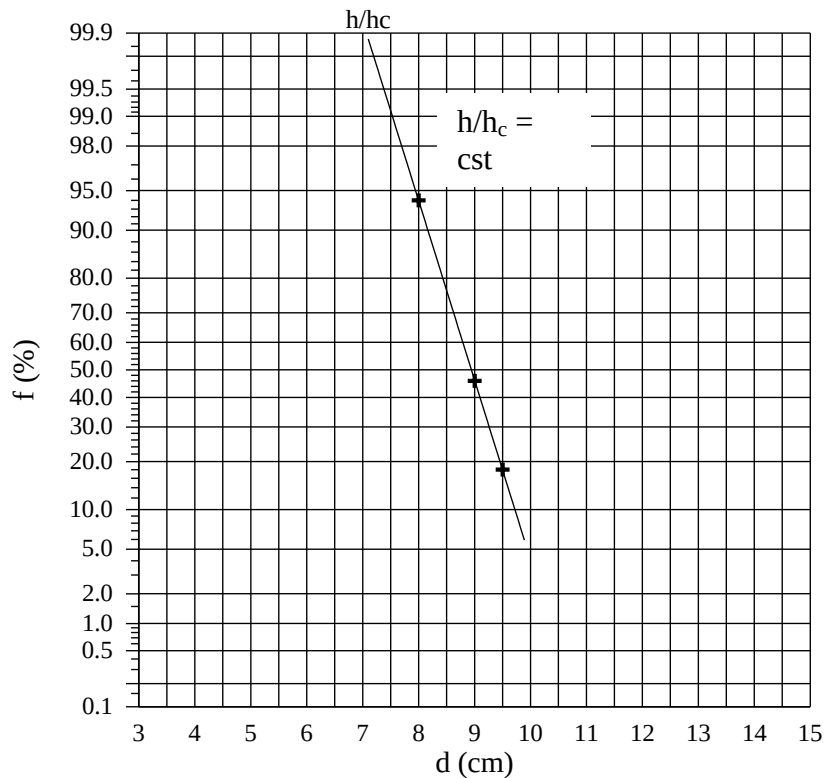


Figure III.9- Détermination des distances $d_{90\%}$ et $d_{100\%}$

Dans la majorité des cas, nous avons réalisé les essais pour trois distances d (distance horizontale entre l'axe de la tige et le paratonnerre horizontal) pour chaque rapport h/h_c . Ces points sont rapportés sur un papier à échelle Gausso-arithmétique $f_c = f(d)$ (figure III.9).

III.3.2 Tracé des zones d'attraction

Nous avons effectué les essais selon la même procédure pour quatre rapports h/h_c . Finalement, les points $(d/h_c, h/h_c)$ correspondant à $d_{90\%}$ et $d_{100\%}$ permettent de définir la zone d'attraction du paratonnerre horizontal (figure III.10).

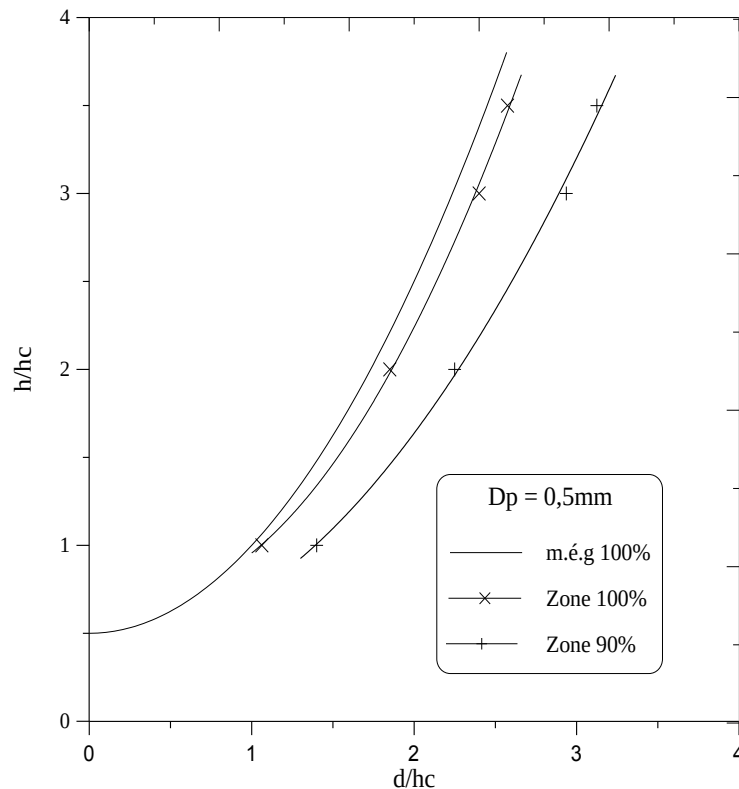


Figure III.10- Exemple des zones d'attraction obtenues avec des distances $d_{90\%}$ et $d_{100\%}$

III.3.2.1 Influence de la distance relative du paratonnerre par rapport à l'interface

Pour un diamètre du paratonnerre D_p fixe, nous avons fait varier la distance D (distance entre le contour du paratonnerre et l'interface) pour apprécier l'influence de l'interface sur les zones d'attraction définies pour une terre discontinue.

Cette étude permet aussi de déterminer le rapport D/h_c à partir duquel l'interface n'a aucune influence sur les zones d'attraction. Par conséquent, pour des rapports supérieurs à D/h_c , les zones d'attraction se confondraient avec celle définie par le modèle électrostatique.

Dans le cas de l'influence des rapports D/h_c , nous avons comparé les zones d'attraction obtenues à la zone définie dans le cas de la terre homogène conductrice. Nous avons utilisé les zones correspondant à 90% de décharge au paratonnerre, étant donné que la détermination de $d_{90\%}$ comporte moins d'erreur que celle de $d_{100\%}$.

Comme nous l'avons mentionné dans ce chapitre (III.2.3), quatre configurations du système tige-plan dans le cas de terre discontinue ont été définies selon la position du paratonnerre et de la tige par rapport à l'interface.

III.4 Paratonnerre situé sur la partie haute de la terre discontinue

III.4.1 Première configuration: Paratonnerre horizontal situé entre l'axe de la décharge et l'interface

➤ Influence du rapport D/h_c

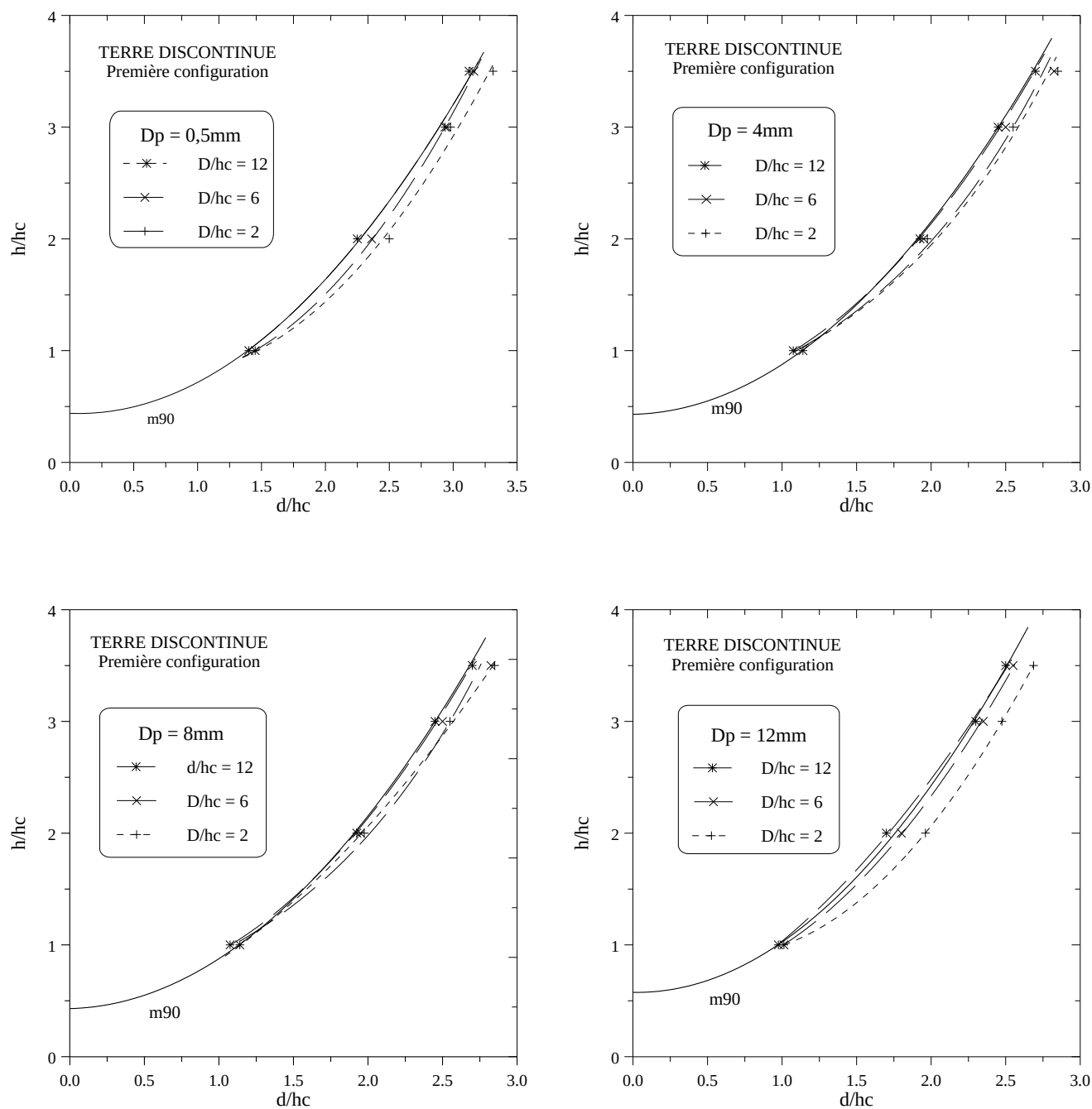
Pour un diamètre du paratonnerre fixe, nous avons déterminé les zones d'attraction en fonction de la distance horizontale relative du paratonnerre par rapport à l'interface (D/h_c égal à 2, 6 et 12).

Les zones obtenues ont été comparées à celle du même diamètre correspondant à 90% de décharge au paratonnerre dans le cas d'une terre homogène conductrice.

Les zones d'attraction obtenues pour les différents diamètres (figure III.11) sont plus larges que celle définie dans le cas de terre homogène conductrice. Ainsi, les zones s'élargissent au fur et à mesure que le rapport D/h_c diminue. Pour un rapport D/h_c égal ou supérieur à 12, les zones se confondent avec celle définie pour une terre homogène conductrice.

La présence du paratonnerre au voisinage de l'interface influe sur la trajectoire de la décharge qui définit le point d'impact. Plus le paratonnerre est relativement proche de l'interface, plus la fréquence d'impact sur le paratonnerre est grande et par conséquent la zone d'attraction s'élargit.

Le résultat obtenu est similaire à celui obtenu dans le cas du paratonnerre vertical [22].



m90 : Zone d'attraction du paratonnerre horizontal pour une terre homogène conductrice.

Figure III.11-Zones d'attraction pour la première configuration de la terre discontinue.

III.4.2 Deuxième configuration: L'axe de la décharge situé entre l'interface et le paratonnerre horizontal

C'est l'un des cas les plus significatifs sur l'influence de l'interface et la validité du modèle électrogéométrique dans le cas de la terre discontinue.

➤ Influence du rapport D/h_c

Les zones d'attraction sont plus petites que celle définie pour un sol homogène bon conducteur. Plus le paratonnerre est proche de l'interface (D/h_c relativement petit), plus la zone d'attraction est réduite. Nous expliquons ce résultat par la présence d'un champ électrique relativement fort au niveau de l'interface augmentant la probabilité de décharge au sol où le champ est plus intense. Lorsque le paratonnerre horizontal est éloigné de l'interface (D/h_c relativement grand), la zone d'attraction s'approche de celle définie pour une terre homogène conductrice. L'interface n'a aucun effet sur les zones lorsque D/h_c est supérieur ou égal à 8. (figure III.12).

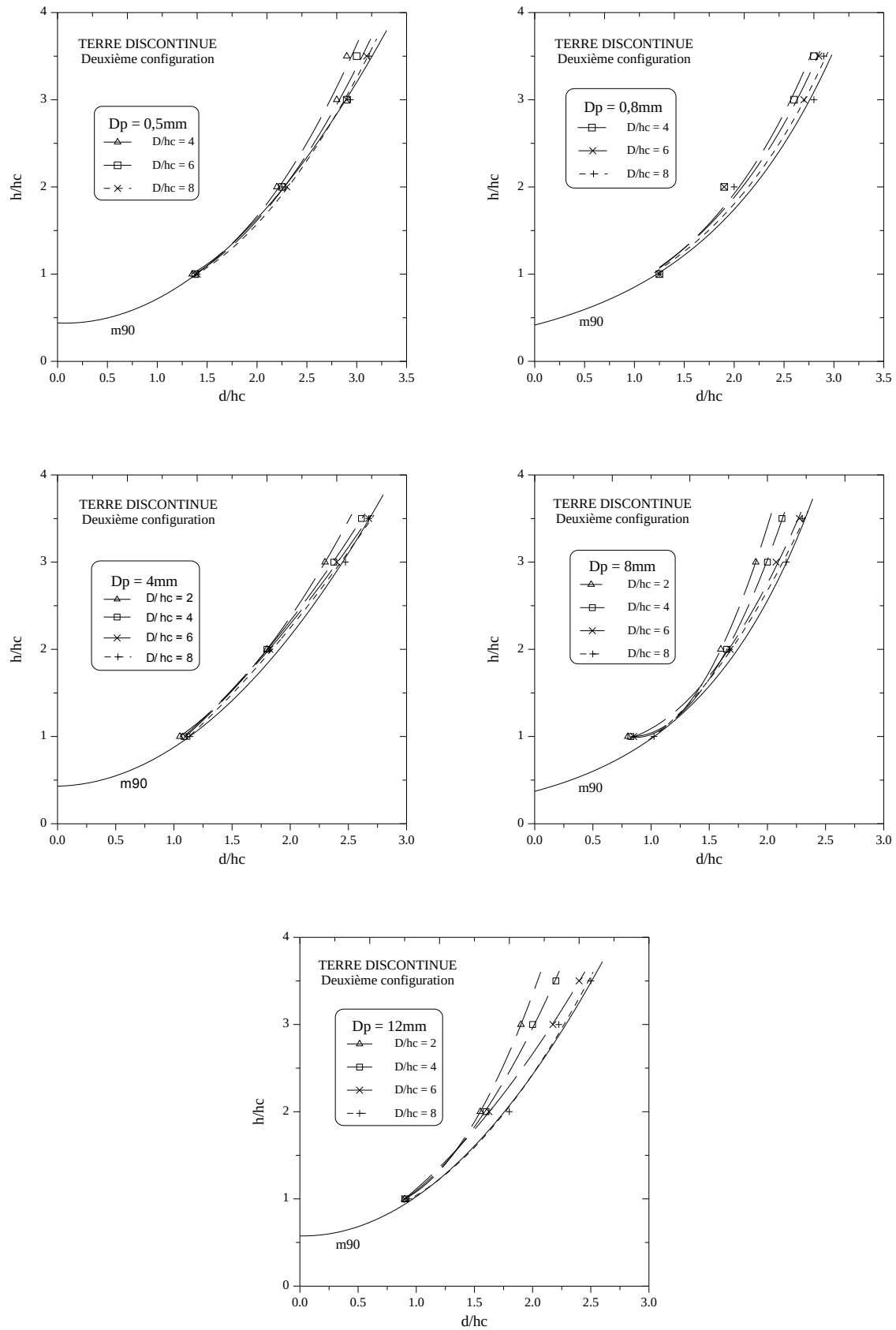


Figure III.12-Zones d'attraction pour la deuxième configuration de la terre discontinue.

III.5 Paratonnerre situé sur la partie basse de la terre discontinue

III.5.1 3^{ème} configuration : L'axe de la décharge situé entre l'interface et le paratonnerre horizontal

➤ Influence des rapports D/h_c

De point de vue position de la tige mise sous haute tension, on prévoit que l'interface joue un rôle attractif important sur les décharges jaillissant le système tige-interface, tige-paratonnerre ou tige-sol. En effet, pour ce dernier cas, les décharges ne sont pas envisagées que pour un rapport D/h_c supérieur ou égal à 4.

Nous avons considéré, lors de l'étude de cette configuration, les trois rapports D/h_c : 4, 6 et 10. Ces derniers représentent respectivement la position proche, moyenne, et éloignée de l'axe de la tige verticale par rapport à l'interface. Les diamètres du paratonnerre horizontal étudiés sont : 0.5, 0.8, 4, 8 et 12mm. Les résultats des essais réalisés sont donnés dans les tableaux 3.1 de l'annexe C.

Les zones d'attraction diminuent au fur et à mesure que le paratonnerre s'éloigne de l'interface (D/h_c augmente) (figure III.13). Cette tendance est expliquée par le rapprochement de la tige de haute tension par rapport à l'interface. L'intervalle d'air tige-interface constitue un chemin préférentiel pour les décharges électriques. En effet, le système tige-interface, qui est un système pointe-pointe, est moins rigide qu'un système pointe négative-plan [BOU98], c'est pourquoi nous n'avons pas remarqué, pour le rapport D/h_c égal à 4, des décharges vers le sol. Dès que le rapport D/h_c augmente (D/h_c supérieur à 4), les zones d'attraction s'élargissent à cause de la diminution de la fréquence d'impact sur l'interface. Lorsque le paratonnerre est situé suffisamment loin de l'interface (D/h_c supérieur ou égal à 10) la zone d'attraction tend à devenir confondue avec celle du modèle électrogéométrique. Dans ce dernier cas, l'influence de l'interface devient négligeable.

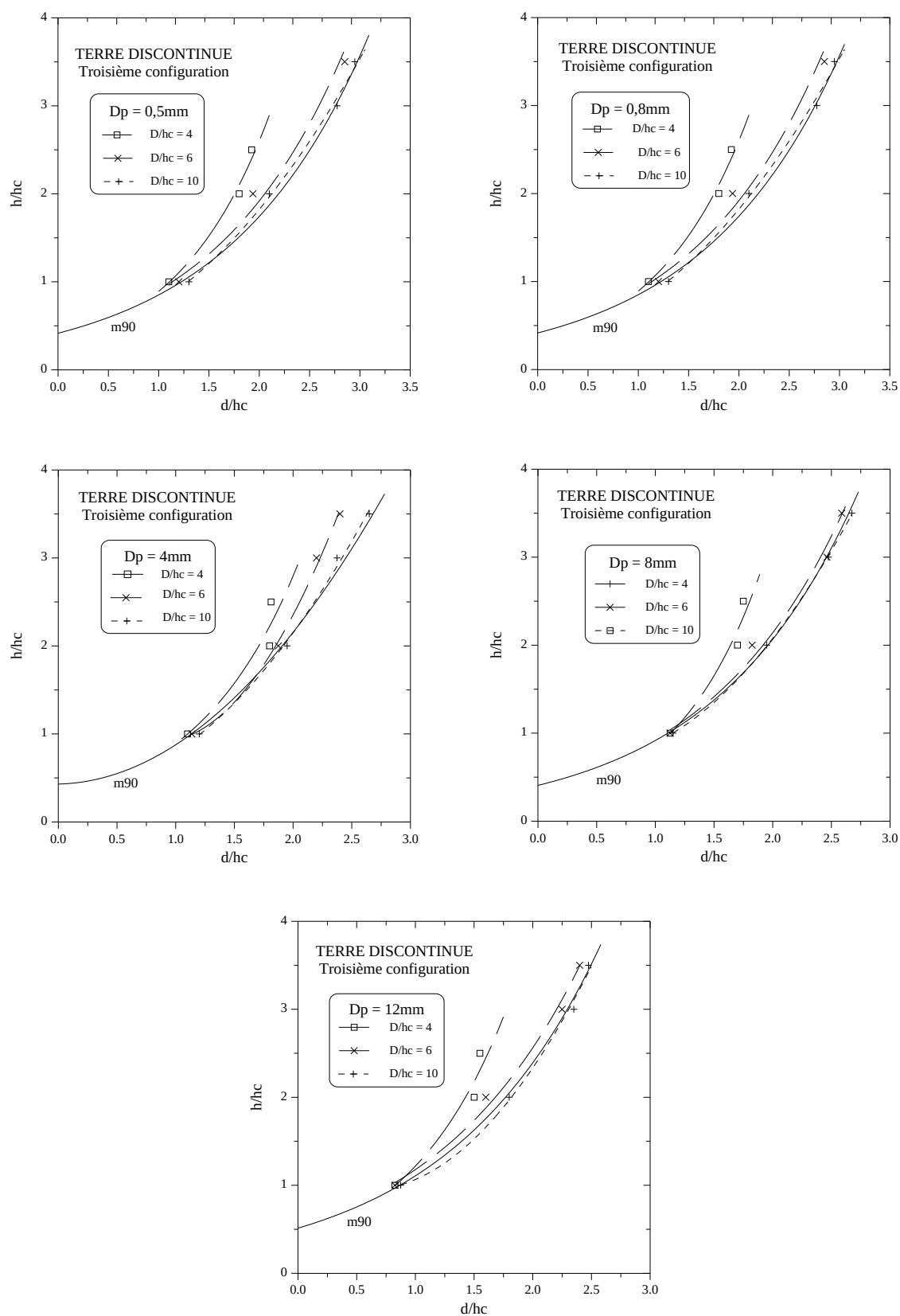


Figure III.13-Zones d'attraction pour la troisième configuration de la terre discontinue.

III.5.2 Quatrième configuration : Paratonnerre horizontal situé entre l'interface et l'axe de la décharge

Cette configuration est symétrique à la première. Pour cette raison, nous nous sommes limité à l'étude de deux diamètres du paratonnerre horizontal. Le premier représente les paratonnerres à faibles diamètres (D_{p1} égal à 0,5mm) et le deuxième représente ceux de grands diamètres (D_{p2} égal à 12mm). Nous avons étudié quatre rapports D/h_c : 1, 2, 6 et 10.

➤ Influence du rapport D/h_c

Nous remarquons des zones d'attraction plus larges que celle définie dans le cas d'un sol homogène bon conducteur. L'élargissement des zones d'attraction est plus prononcé lorsque le paratonnerre est relativement proche de l'interface (D/h_c petit). Lorsque le paratonnerre horizontal est relativement éloigné de l'interface (D/h_c supérieur ou égal à 10). La zone d'attraction est confondue avec celle définie dans le cas de la terre homogène conductrice.

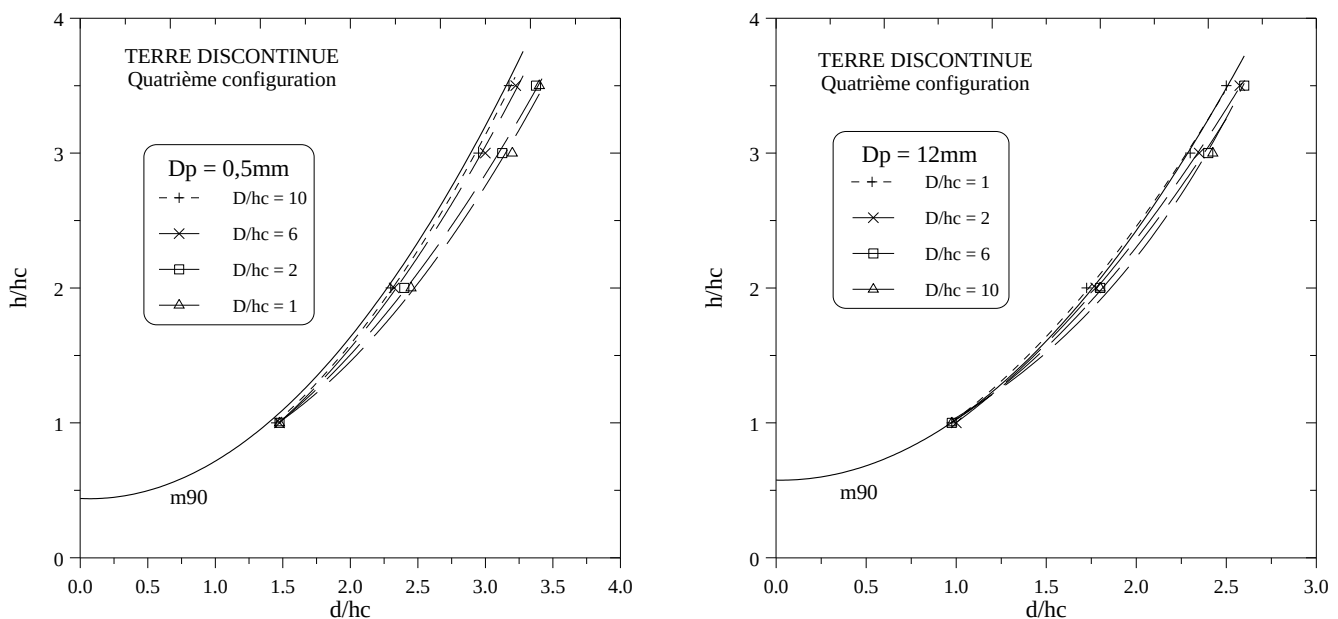


Figure III.14-Zones d'attraction pour la quatrième configuration de la terre discontinue.

III.6 Conclusion

Nous pouvons conclure que l'hétérogénéité du sol modifie considérablement la distribution du champ électrique sur la surface de l'électrode mise à la terre. Cette modification est caractérisée par une augmentation du champ électrique au niveau de l'interface, suivant le rapport des conductivités des milieux composant le sol et suivant la distance entre l'axe de la tige et l'interface. Ceci aurait pour effet d'augmenter la fréquence de foudroiement de l'interface.

La caractéristique linéaire de la relation liant la tension $U_{50\%}$ et la longueur de l'intervalle est conservée quelle que soit la nature du sol.

Le système pointe négative-plan reste toujours plus rigide que le système pointe positive-plan quelle que soit la nature du sol.

Dans le but, et avant d'entamer l'étude de l'influence de la présence de paratonnerres sur la distribution du champ dans les systèmes avec terre hétérogène

Chapitre IV
Simulation et
interprétation des
résultats

IV.1. Introduction

Ce chapitre concerne l'étude de l'influence du paratonnerre horizontal sur la distribution du champ électrique sur un plan discontinu 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'interface 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 4.2, qui utilise la méthodes des éléments finis.

COMSOL Multiphysics est un puissant environnement interactif 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.

IV.2. Cas de terre discontinu sans paratonnerre :

IV.2.1. Distribution du champ selon la position de la tige HT:

On cette partie de la simulation, nous avons fait le calcul avec une terre discontinu (avec plusieurs positions de tige HT), pour avoir la distribution de champ électrique au deux surface de la terre.

- ✓ Surface de partie haute: 50 cm x 100 cm
- ✓ Surface de partie basse: 50 cm x 100 cm
- ✓ Surface de l'interface : 10 cm x 100 cm
- ✓ Matériel de la plaque: Aluminium.

• **Modèle de la simulation:**

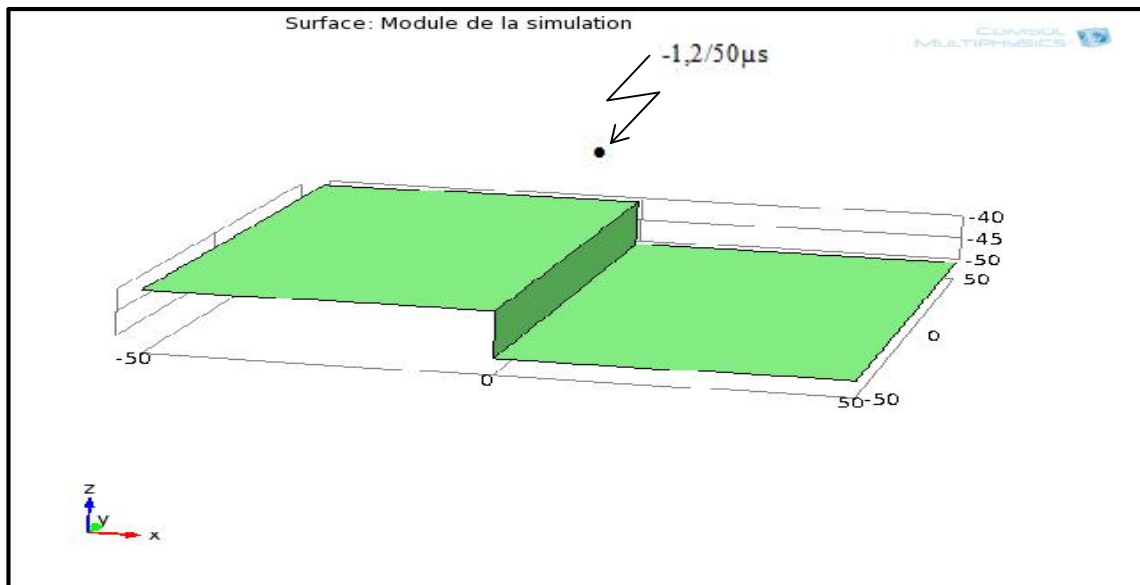


Figure IV. 1 - Modèle de la simulation

IV.2.1.1. La première essai :

Pour la position de la tige HTau-dessus de l'interface, avec des hauteurs, $h= 50,40, 30$, et 20 cm.

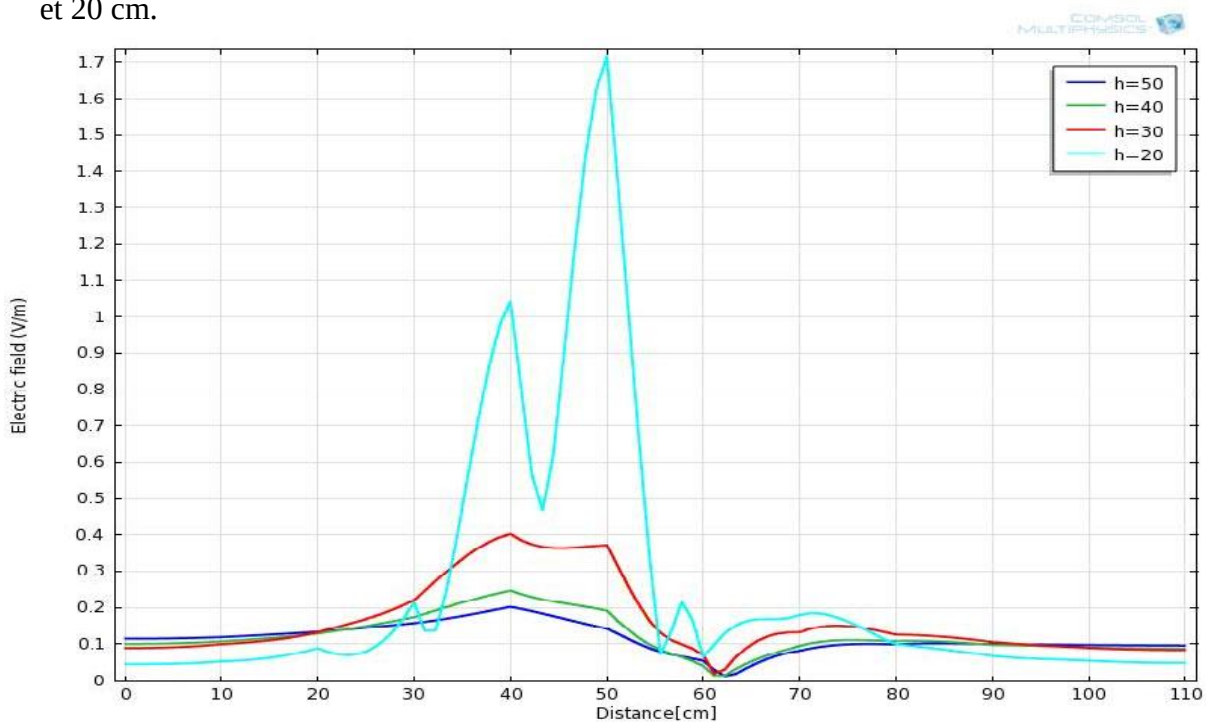


Figure IV.2 Distribution de champ électrique par rapport à la hauteur de la tige HT

IV.2.1.2. La deuxième essai :

Cette essai est consacré pour les paramètres de tige au-dessus de la partie haute de terre discontinue, avec un niveau de tension applique au tige HT, nous avons calculé le champ électrique au niveau de deux surfaces de la terre.

On variant la position du tige HT (D')

- $D' = -20$ cm à la parité haut, $h = 30$ cm
- $D' = -10$ cm à la partie haut de la terre, $h = 30$ cm.

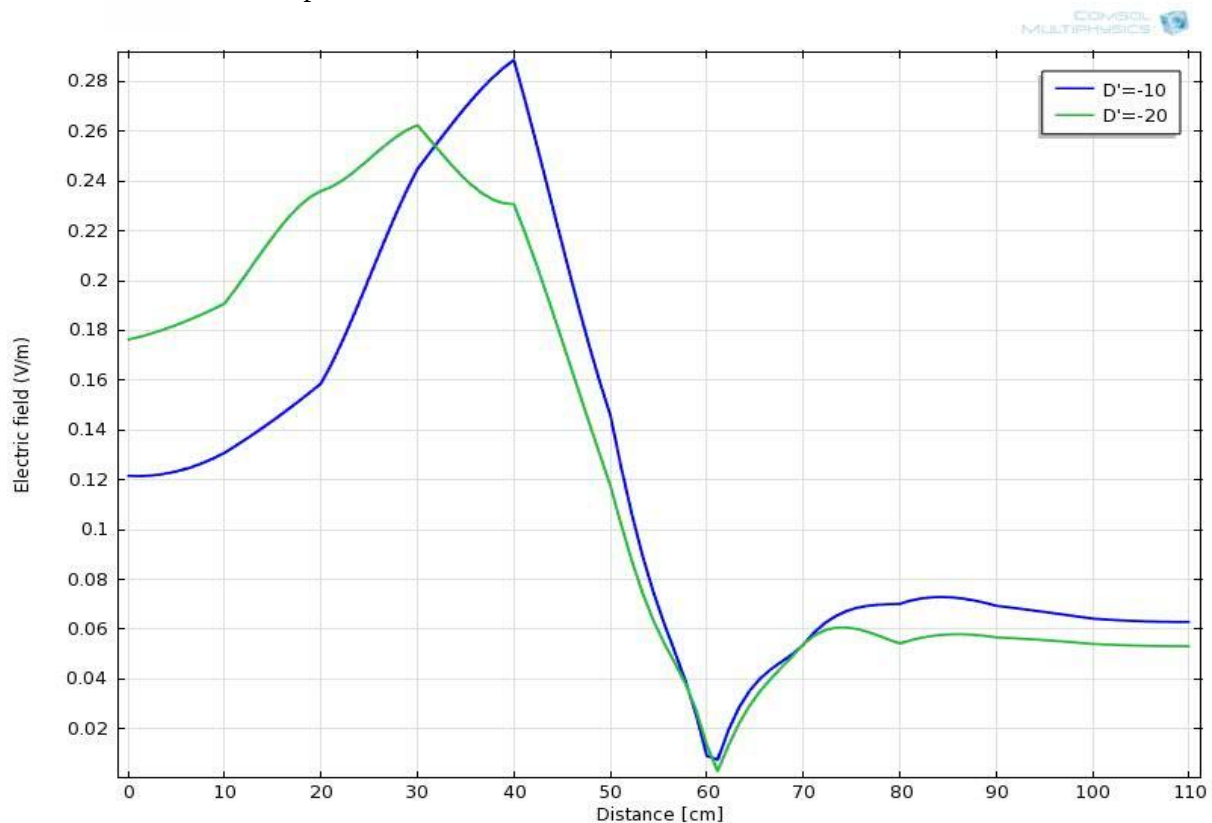


Figure IV. 3- Champ électrique (tige HT au dessus partie haute)

IV.2.1.3. Le troisième essai:

Cette essai est consacré pour les paramètres de modèle avec sol discontinu où la tige HT et au-dessus de la partie basse avec plusieurs position, nous avons calculé la distribution du champ électrique au niveau de surface de la terre discontinu.

On variant la position de la tige HT (D')

$e = 10$ cm (la longueur de l'interface).

- $D' = 20$ cm à la partie basse de la terre, $h = (30 + e)$ cm
- $D' = 10$ cm à la partie basse de la terre, $h = (30 + e)$ cm

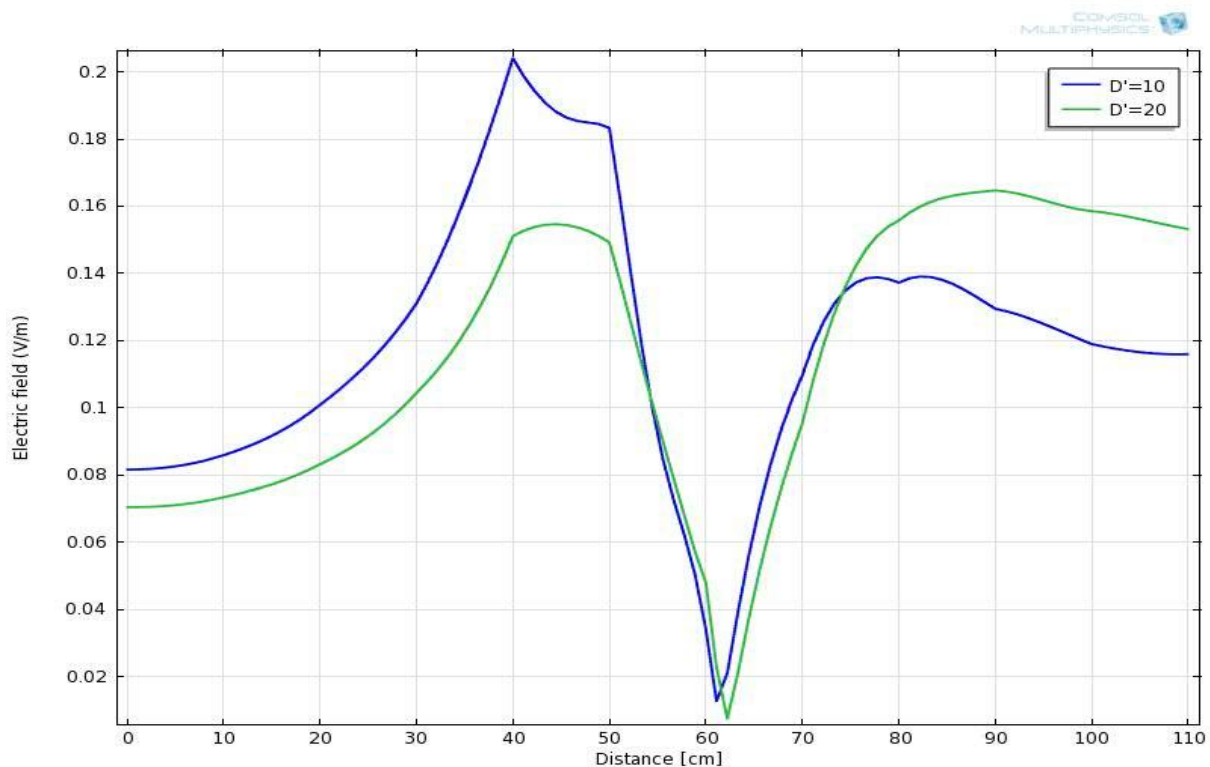


Figure IV. 4- Champ électrique (tige HT au dessus partie basse)

Au voisinage de l'interface ($D' \approx 0$), les résultats obtenus montrent que l'intensité du champ électrique est plus forte.

Au niveau de l'interface ($D' = 0$), le système tige-interface se comporte comme un système tige-tige. Or sous tension négative, celui-ci est moins rigide que le système tige-plan.

A cause de l'intensité de champ plus importante dans l'intervalle tige-tige, le champ s'accroît sur l'interface d'une valeur très élevée par rapport aux autres points du plan discontinu.[21]

Ces résultats, confirment les recherches abordées par la modèle expérimentales de haute tension sur la rigidité des intervalles d'air tige-plan discontinu.

En ce qui concerne, le champ sur la partie basse de la terre discontinue, de même configuration (la tige au-dessus de la partie haute), les résultats de simulations montrent que, l'intensité du champ diminue, et tend vers un niveau inférieur au niveau des valeurs du champ sur la partie haute. Cela dû à l'élévation de distance de tige HT ($h+e$).

On note que la distribution du champ électrique sur la partie basse prend ainsi la valeur la plus faible, au cours de son évolution sur le plan côté partie basse.

Nous constatons que l'interface joue un rôle attractif important sur la distribution des lignes du champ au sol discontinu.

IV.3. Cas de terre discontinu avec paratonnerre horizontal

IV.3.1. Distribution du champ selon la position de la paratonnerre horizontal :

On cette partie de la simulation, nous avons comme objectif l'étude de l'influence du paratonnerre sur la distribution du champ électrique au terre discontinu (avec plusieurs positions de paratonnerre horizontal et la hauteur de la tige HT). Comme nous l'avons mentionné dans le troisième chapitre (III.2.3), quatre configurations du système tige-plan dans le cas de terre discontinue ont été définies selon la position du paratonnerre et de la tige par rapport à l'interface. Notre distance utilisée donne dans le tableau IV-1 Le distance en [cm]

H	30			30			30		
Hc	20			15			12		
D partie basse	0	10	20	0	7.5	15	0	6	12
	30	40	50	22.5	30	37.5	24	30	
D partie haute	0	-10	-20	0	-7.5	-15	0	-6	-12
	-30	-40	-50	-22.5	-30	-37.5	-24	-30	

Tableau IV.1 Configurations considérées pour les mesures

IV.3.2. Paratonnerre situé sur la partie haute de la terre discontinue :

IV.3.2.1. Première configuration: Paratonnerre horizontal situé entre l'axe de la décharge et l'interface :

Nous avons étudié dans la première configuration les distributions des champs électrique pour la hauteur du paratonnerre horizontal ($h_c=20,15$ et 12).et pour différents rapports D/h_c (0 , -0.5 et -1).

➤ Influence du rapport D/h_c :

Nous avons déterminé les distributions des champs en fonction de la distance horizontale relative du paratonnerre par rapport à l'interface à partir de nous rapport (D/h_c).

La présence du paratonnerre au voisinage de l'interface influe sur la trajectoire de la décharge qui définit le point d'impact. Plus le paratonnerre est relativement proche de l'interface, plus la fréquence d'impact sur le paratonnerre est grande et par conséquent la zone de distribution de champ électrique et diminue.

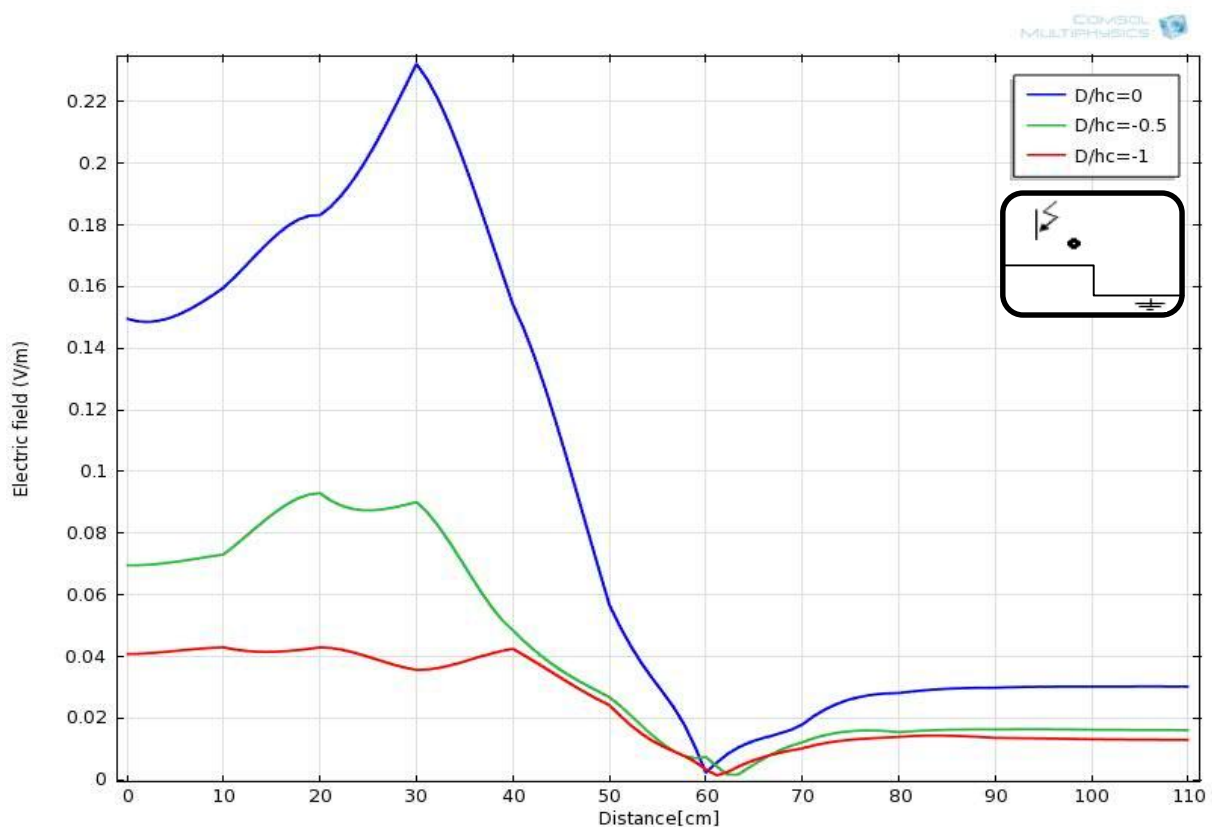


Figure IV.5-Distributions des champs électrique pour la première configuration de la terre discontinue ($h=20$ cm)

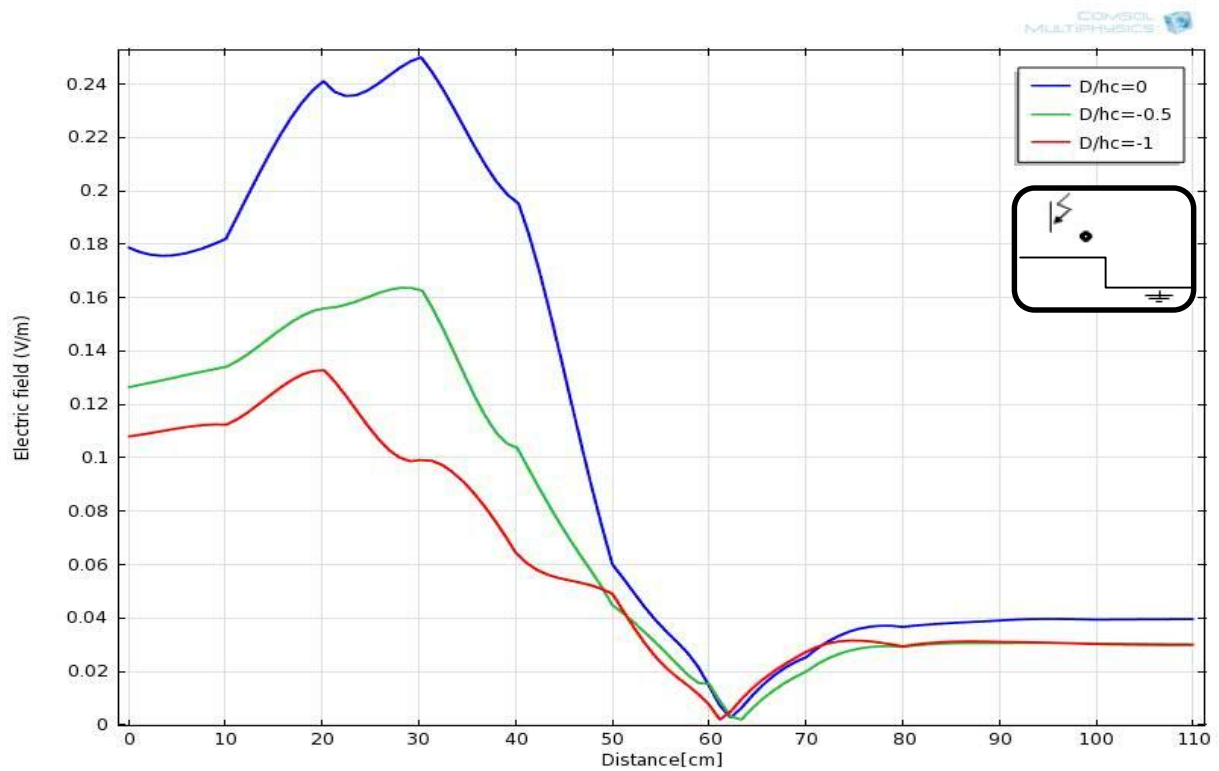


Figure IV.6-Distributions des champs électrique pour la première configuration de la terre discontinue ($h=15$ cm)

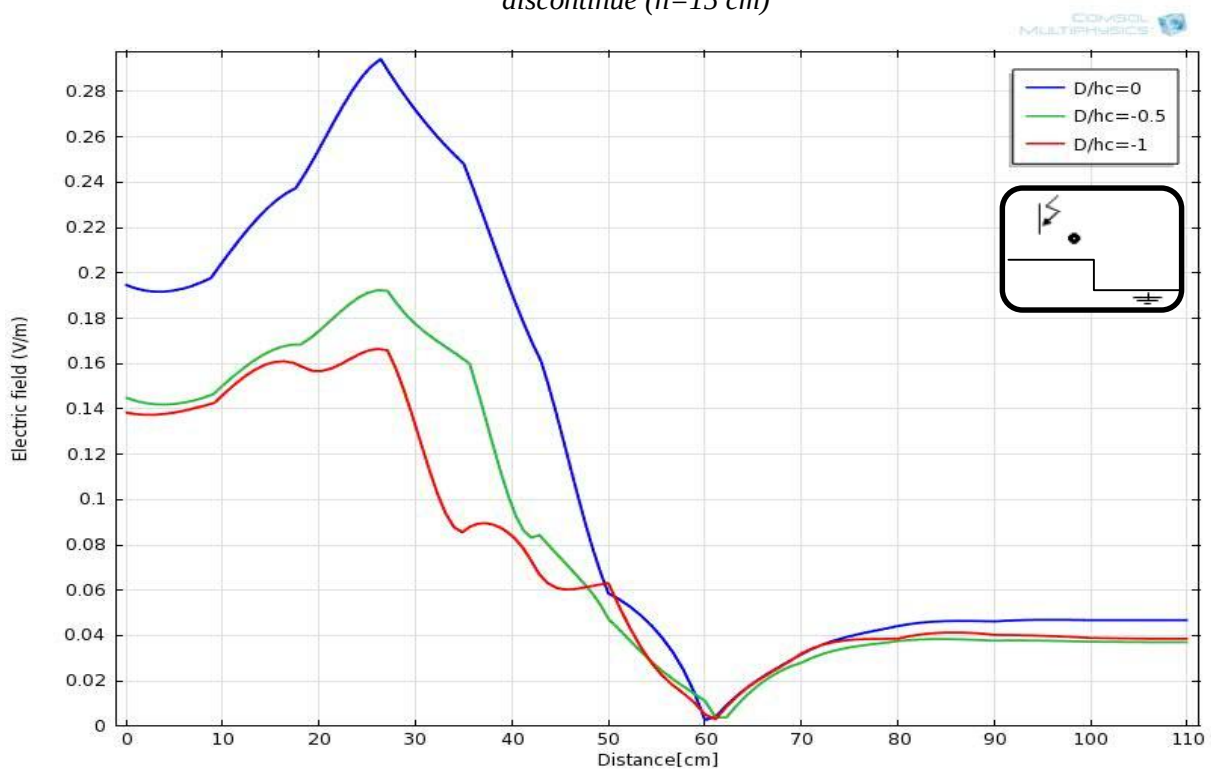


Figure IV.7-Distributions des champs électrique pour la première configuration de la terre discontinue ($h=12$ cm)

IV.3.2.2. Deuxième configuration: L'axe de la décharge situé entre l'interface et le paratonnerre horizontal

C'est l'un des cas les plus significatifs sur l'influence de l'interface et la validité du modèle électrogéométrique dans le cas de la terre discontinue.

Les résultats d'essais sont rapportés dans la figure pour la hauteur du paratonnerre horizontal ($h_c=20,15$ et 12 cm) et pour différents rapports D/h_c (-1.5 , -2 et -2.5).

➤ Influence du rapport D/h_c

Nous expliquons ce résultat par la présence d'un champ électrique relativement fort au niveau de l'interface augmentant la probabilité de décharge au sol où le champ est plus intense. Lorsque le paratonnerre horizontal est éloigné de l'interface (D/h_c relativement grand).

L'interface n'a aucun effet sur les zones lorsque D/h_c est supérieur ou égal à -2.5 (le système comme cas sans paratonnerre).

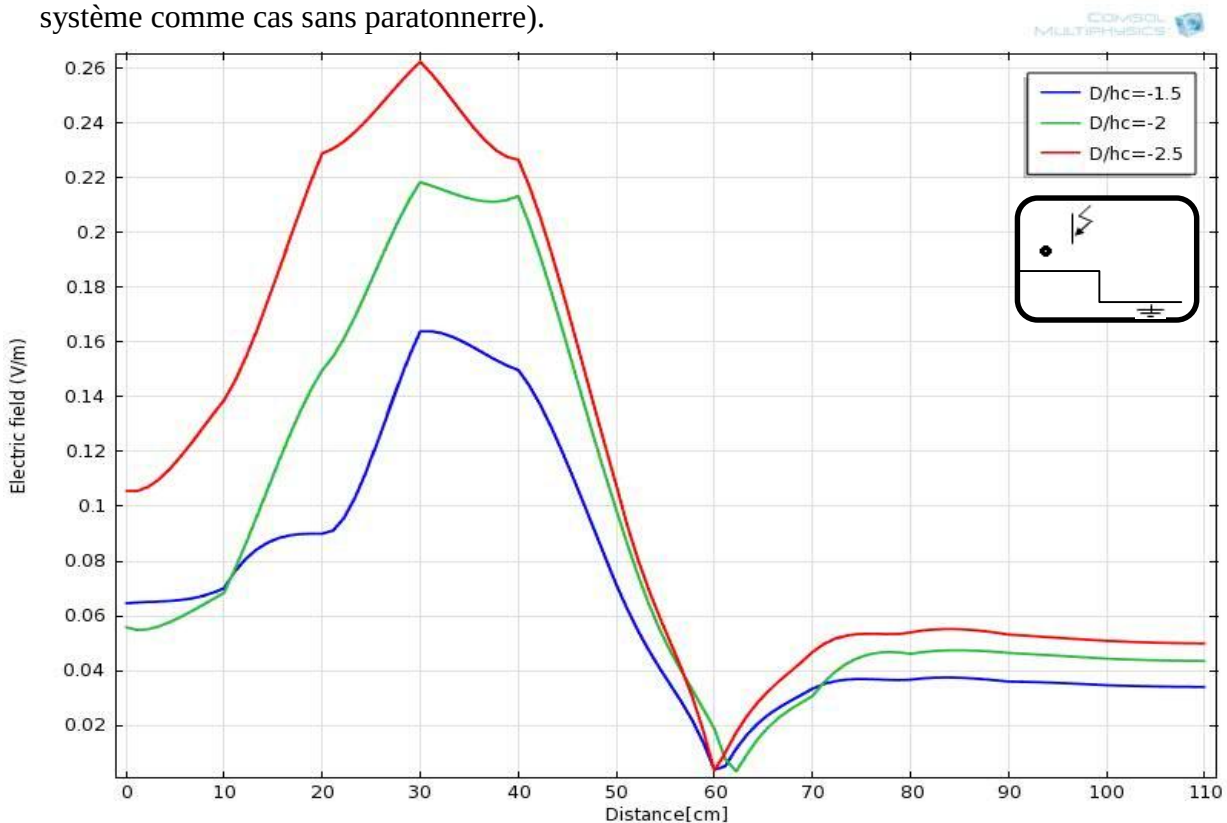


Figure IV.8-Distributions des champs électrique pour la deuxième configuration de la terre discontinue ($h=20$ cm)

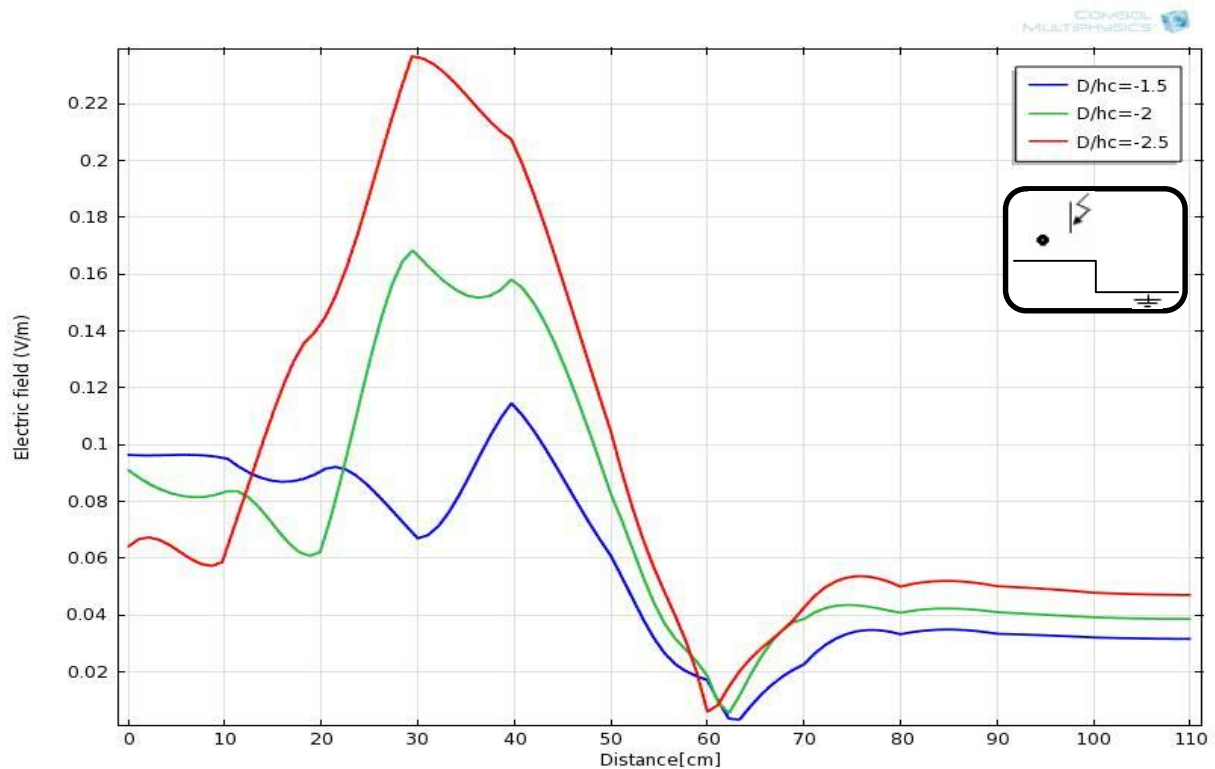


Figure IV.9-Distributions des champs électrique pour la deuxième configuration de la terre discontinue ($h=15$ cm)

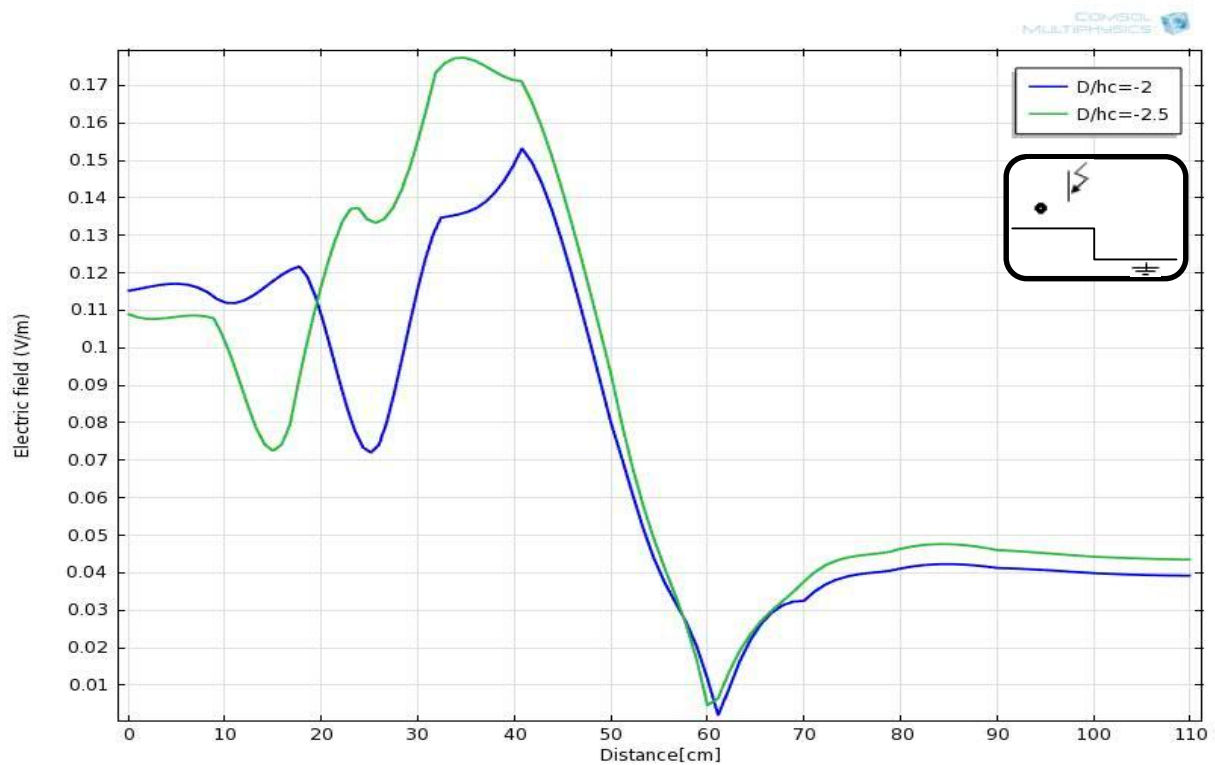


Figure IV.10-Distributions des champs électrique pour la deuxième configuration de la terre discontinue ($h=12$ cm)

IV.3.3. Paratonnerre situé sur la partie basse de la terre discontinue

IV.3.3.1. 3^{ème} configuration : L'axe de la décharge situé entre l'interface et le paratonnerre horizontal

Cette configuration est symétrique à la deuxième. nous avons étudié les rapports ($D/h_c=1.5, 2$ et 2.5).

➤ Influence des rapports D/h_c

De point de vue position de la tige mise sous haute tension, on prévoit que l'interface joue un rôle attractif important sur les décharges jaillissant le système tige-interface, tige-paratonnerre ou tige-sol.

Les zones des distributions de champ électrique augmentent au fur et à mesure que le paratonnerre s'éloigne de l'interface (D/h_c augmente) (figure IV.11 jusqu'au IV.13). Cette tendance est expliquée par le rapprochement de la tige de haute tension par rapport à l'interface. L'intervalle d'air tige-interface constitue un chemin préférentiel pour les décharges électriques. En effet, le système tige-interface, qui est un système pointe-pointe, est moins rigide qu'un système pointe négative-plan.

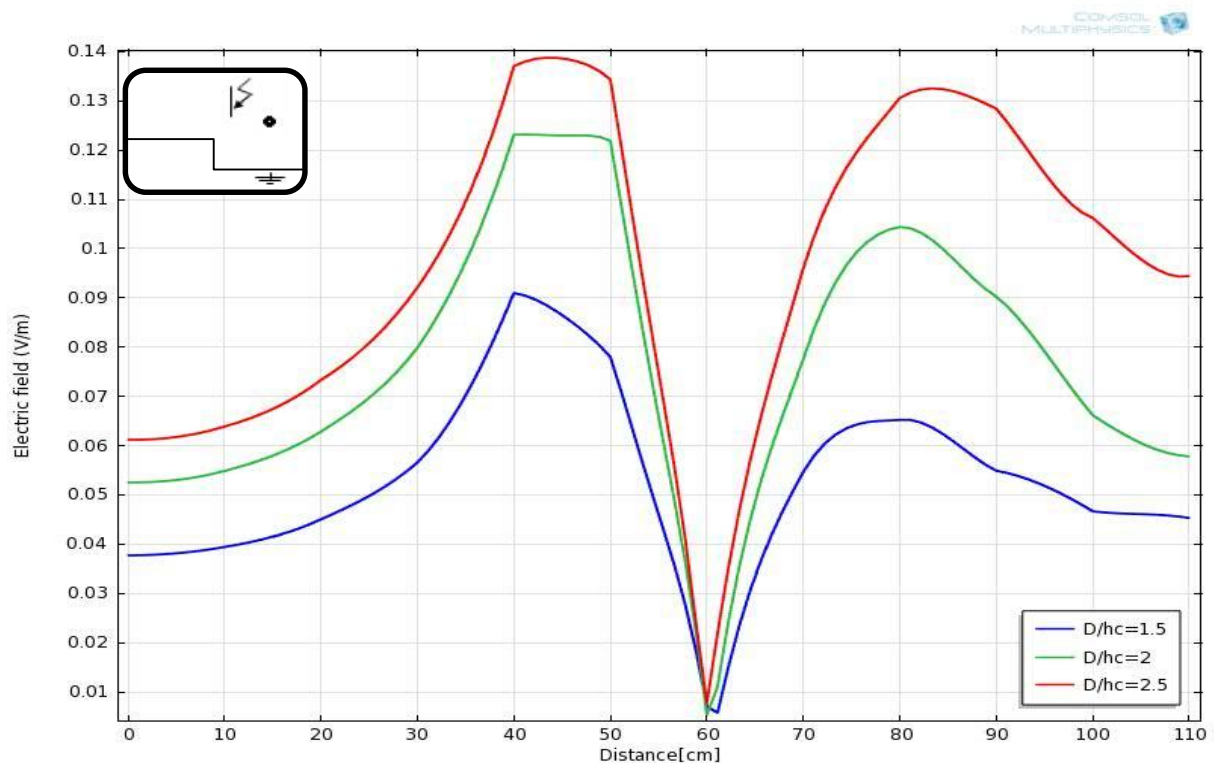


Figure IV.11-Distributions des champs électrique pour la troisième configuration de la terre discontinue ($h=20$ cm)

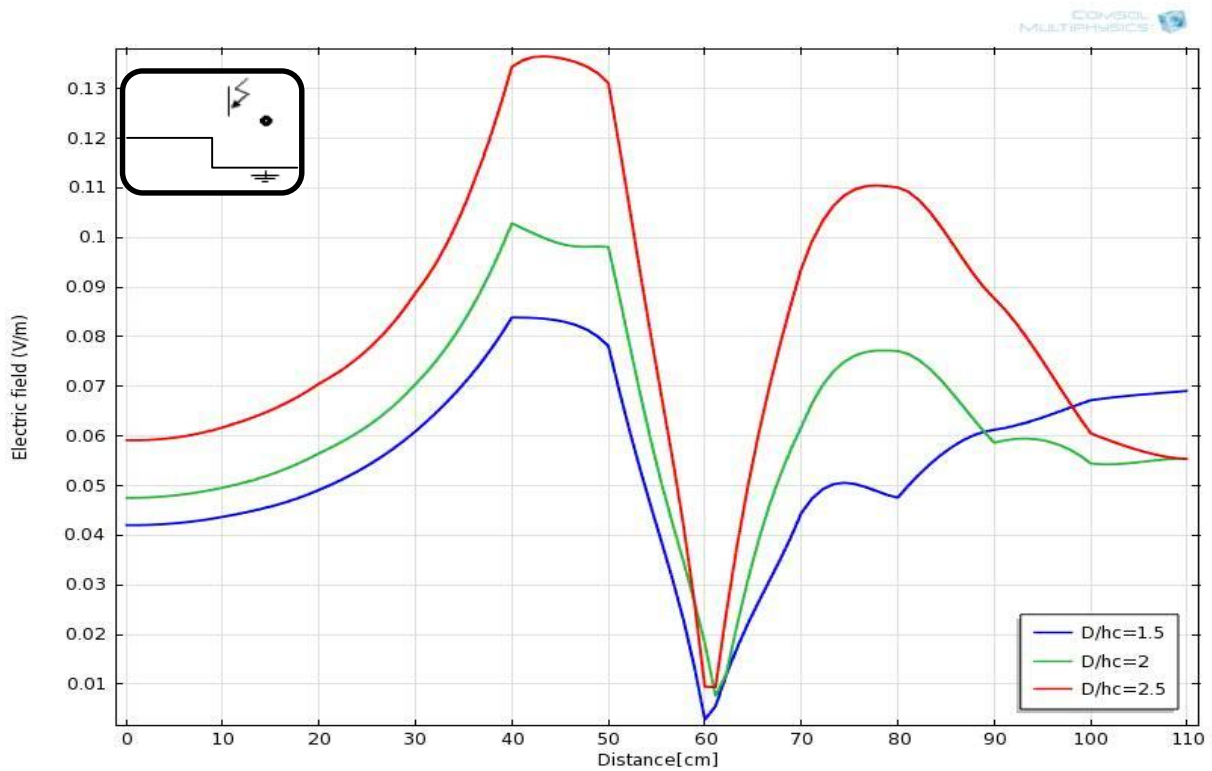


Figure IV.12- Distributions des champs électrique pour la troisième configuration de la terre discontinue ($h=15$ cm)

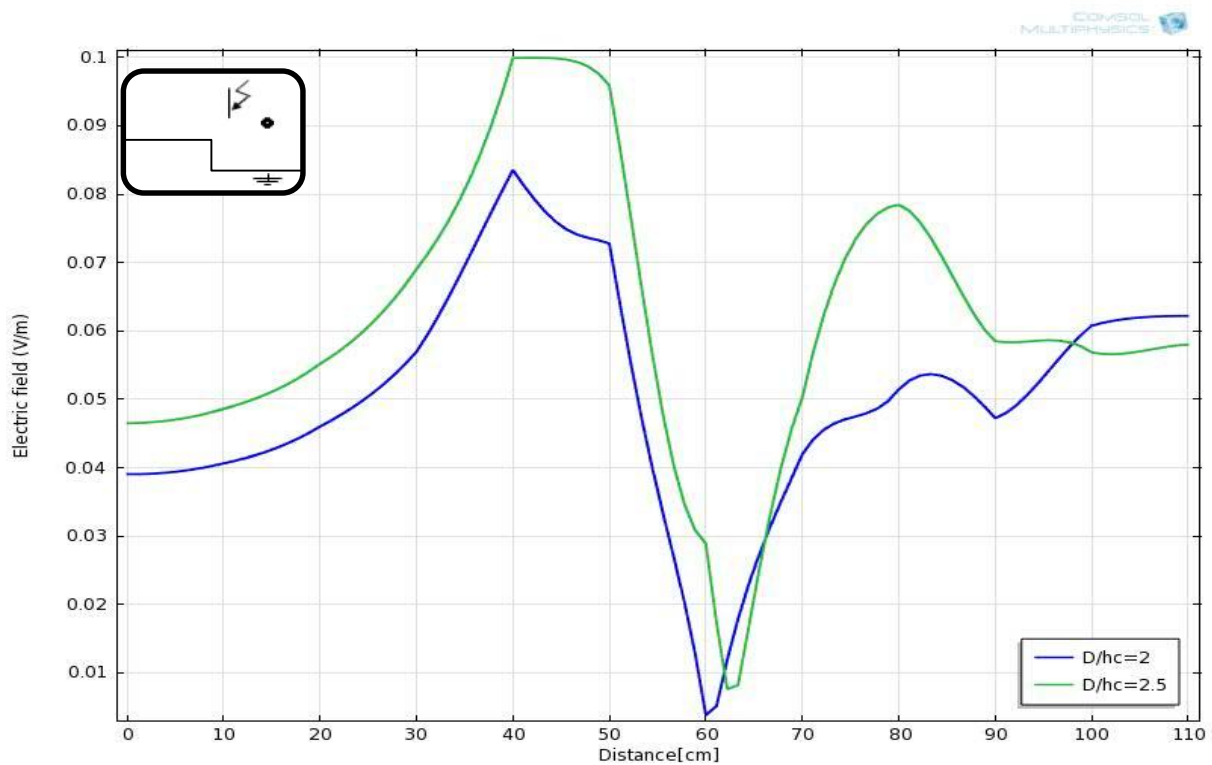


Figure IV.13- Distributions des champs électrique pour la troisième configuration de la terre discontinue ($h=12$ cm)

IV.3.3.2. Quatrième configuration : Paratonnerre horizontal situé entre l'interface et l'axe de la décharge

Cette configuration est symétrique à la première. nous avons étudié les rapports ($D/h_c=0, 0.5$ et 1).

➤ Influence du rapport D/h_c

La figure IV.14 jusqu'au IV.16 illustre les résultats obtenus

L'élargissement des distributions des champs électrique est plus prononcé lorsque le paratonnerre est relativement proche de l'interface (D/h_c petit).

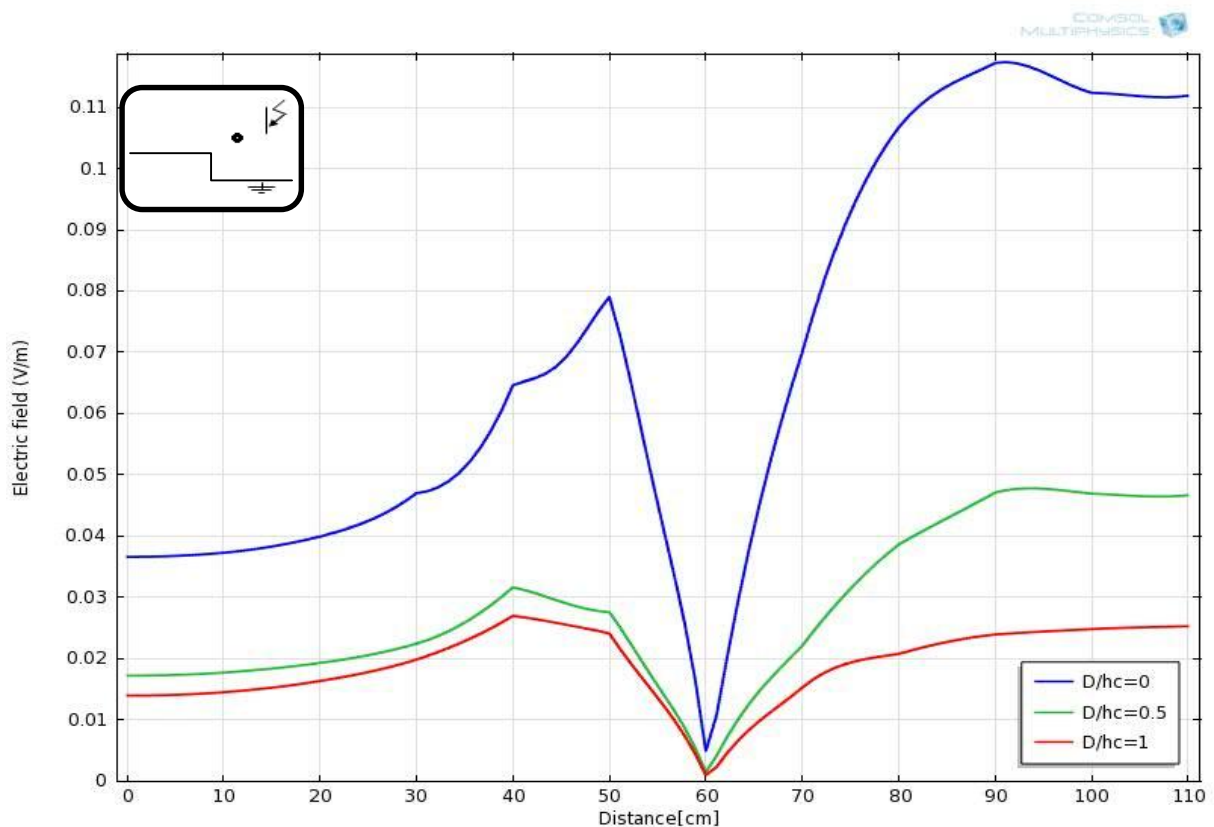


Figure IV.14-Distributions des champs électrique pour la quatrième configuration de la terre discontinue ($h= 20\text{cm}$)

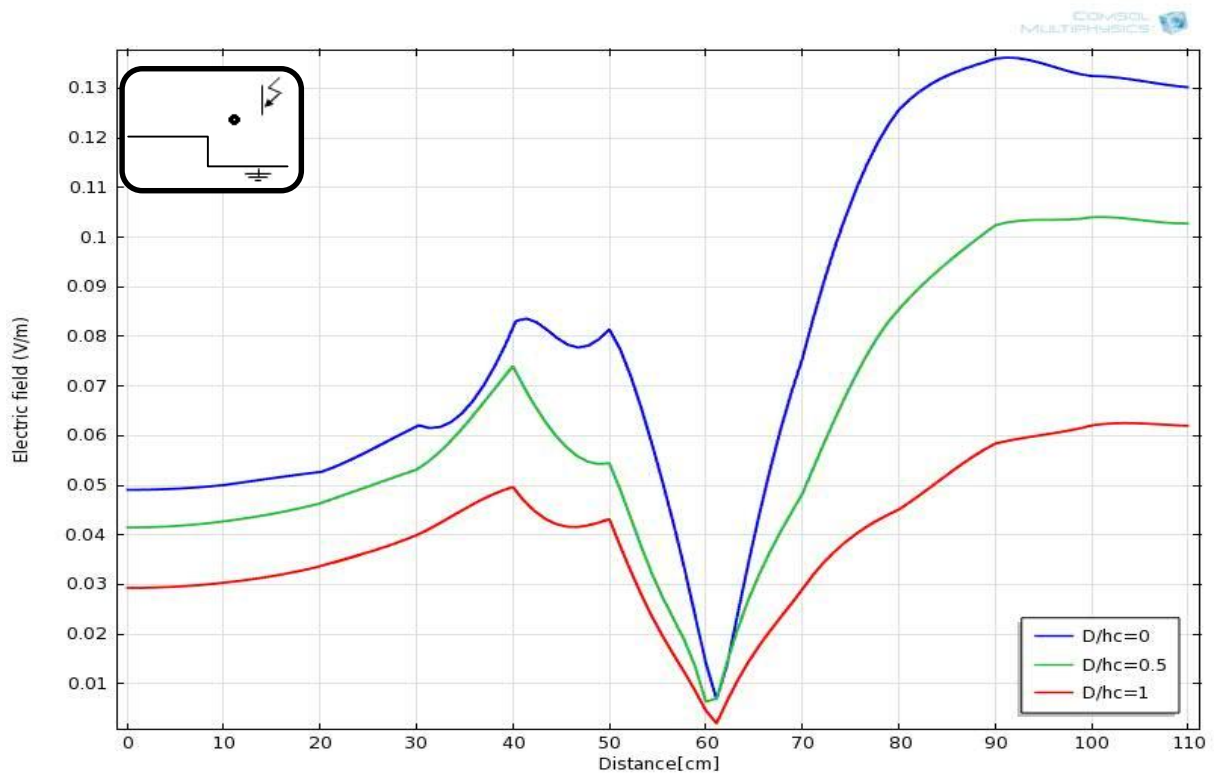


Figure IV.15-Distributions des champs électrique pour la quatrième configuration de la terre discontinue ($h=15$ cm)

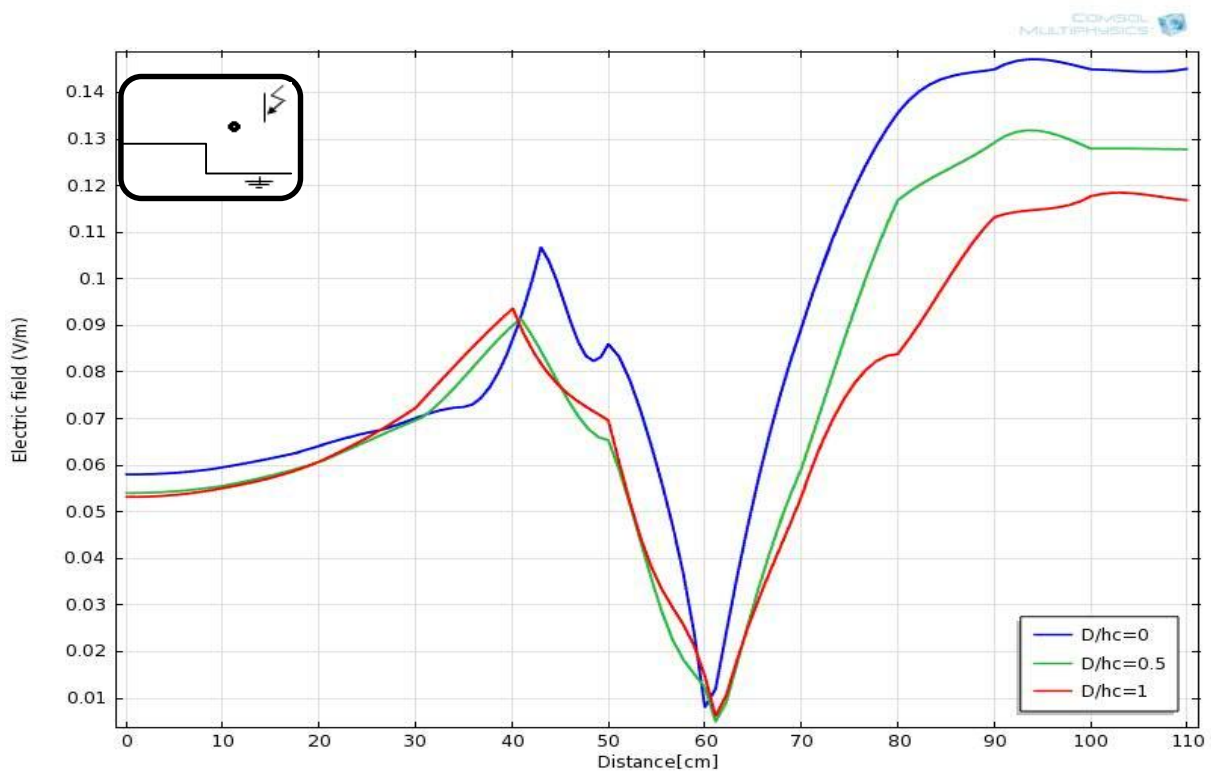


Figure IV.16-Distributions des champs électrique pour la quatrième configuration de la terre discontinue ($h=12$ cm)

IV.4. Influence de la hauteur de paratonnerre

Les résultats d'essais sont rapportés dans la figure pour le position de la tige HT ($h=30$ et $D=0$), et pour le positions du paratonnerre horizontal ($D = 0$), et pour différents rapports h/h_c (1.15, 1.57, 2.5, et 6).

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.

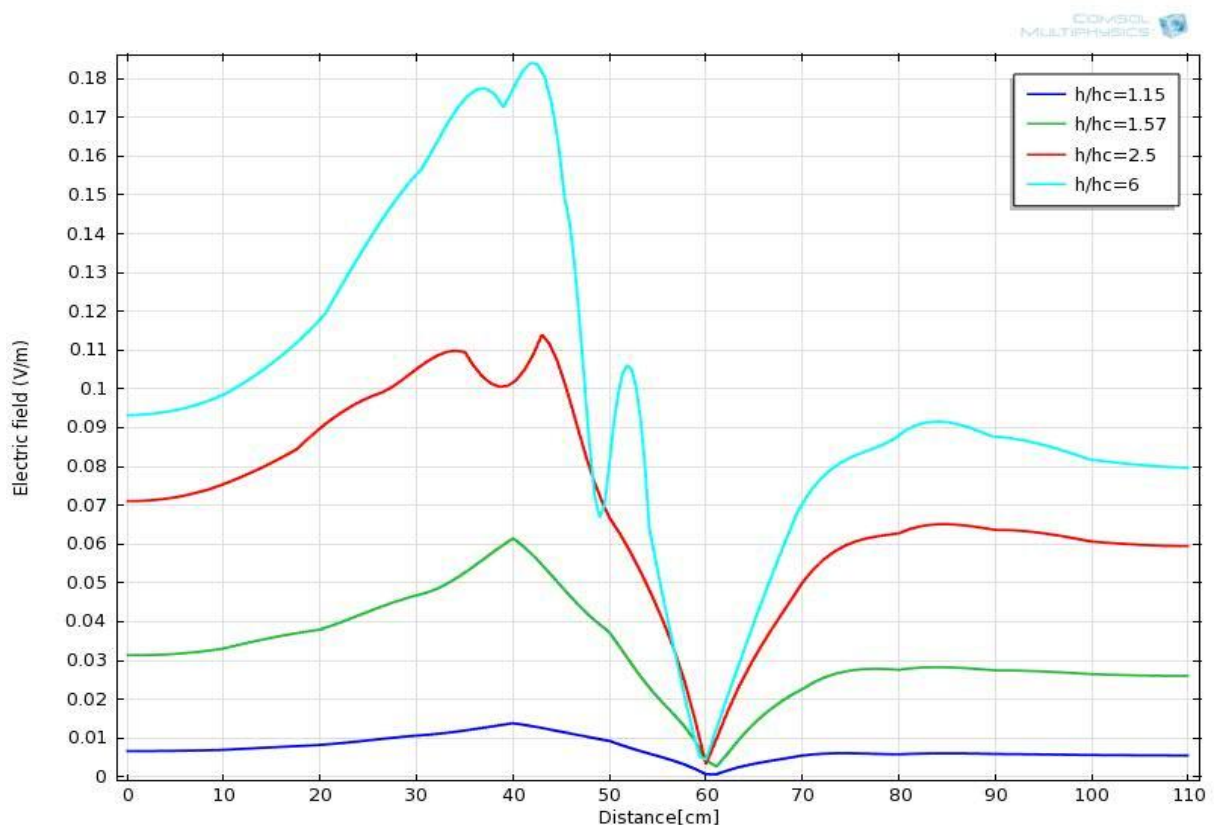


Figure IV.17-Distributions des Champs électrique au sol en fonction de la position (h/h_c)

IV.5. 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 qu'aurait un paratonnerre horizontale sur la distribution du champ électrique dans un système tige-plan.

Nous pouvons conclure que le :

- Discontinuité du sol modifie considérablement la distribution du champ électrique sur la surface de la terre.
- La hauteur de la tige HT qui variée le champ électrique

L'influence de paratonnerre horizontale sur le variation de champ électrique par rapport l'interface dans quatre position :

1^{er} cas : Paratonnerre situé sur la partie haute de la terre discontinue :

- a-** Première configuration : Paratonnerre horizontal situé entre l'axe de la décharge et l'interface.
- b-** Deuxième configuration : Axe de la décharge situé entre l'interface et le paratonnerre horizontal.

2^{ème} cas : Paratonnerre situé sur la partie basse de la terre discontinue :

- c-** Troisième configuration : Axe de la décharge situé entre l'interface et le paratonnerre horizontal.
- d-** Quatrième configuration : Paratonnerre horizontal situé entre l'axe de la décharge et l'interface.

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. Les chercheurs des laboratoires de Haute Tension ont contribué dans ces travaux en étudiant l'influence des propriétés électrogéologiques du sol sur la distribution du champ électrique en introduisant des dispositifs mis à la terre (paratonnerre) horizontal ou vertical. En effet, ces propriétés sont considérées comme l'une des insuffisances du modèle électrogéométrique. Notre travail est orienté vers la détermination de la distribution du champ électrique au sol en présence d'un paratonnerre horizontal dans le cas de terre discontinue. Arrivés au terme de ce travail, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- L'influence de la discontinuité de la terre sur l'intensité du champ, dépend en premier lieu de la position de l'axe de la décharge par rapport à l'interface et au paratonnerre. Ceci est dû au champ électrique relativement intense au voisinage de l'interface.

- Dans le cas du paratonnerre situé entre l'interface et la tige de haute tension, sur la partie haute ou basse de la terre discontinue, l'intensité du champ électrique diminue sur l'interface lorsque le paratonnerre horizontal qui joue un rôle de barrière pour attirer le champ électrique.

- Lorsque le paratonnerre horizontal est relativement éloigné de l'interface, l'intensité du champ électrique se confond avec l'intensité définie dans le cas d'un sol discontinue sans paratonnerre.

- Dans le cas où la tige de haute tension est située entre le paratonnerre et l'interface, la présence d'un champ électrique relativement fort au niveau de l'interface augmentant la probabilité de décharge au sol où le champ est plus intense. Lorsque le paratonnerre horizontal est éloigné de l'interface. En plus des résultats obtenus, ce travail nous a permis :

- D'enrichir les connaissances permettant de comprendre la plupart des manifestations de la foudre, bien que plus qualitativement que quantitativement.

- De se familiariser avec les différents dispositifs de modélisation du champ électrique en de haute tension.

BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] -**Claude Gary** « La foudre : Nature, histoire risque et protection », Dunod, Paris, 2004.
- [2] -**Philippe Dunand** « Protection des installations électriques contre la foudre», Dunod, Paris, 2003.
- [3] -**J.Arianer** "les processus d'ionisation ". Cours université Paris sud .2004.
- [4] -**Alain Sabot, Jean Michaud** « Lignes et postes : choix et coordination des isolements », Technique de l'Ingénieur, D4750, 1997.
- [5] **C.Christopoulos** « Modeling of lightning and interaction with structures », Engineering Science and Education Journal, August 1997.
- [6]- **C.GARY** "la foudre des mythologies antiques à la recherche moderne".Edition Masson.1994
- [7]- **J.Michel** "Protection des Systèmes Electriques"_ Electricité de France, Division Ingénierie Nucléaire, SEPTEN- HAURE – 2004
- [8]-**Présentation INSA** de Lyon en partenariat avec EDF/SEPTEN - juin 2004
- [9] -**A. Xemard, A. Sabot, P. Lalande, M. Nguyen** ; « Modèles électrogéométriques utilisés en électrotechnique : Comparaison et utilisation par EDF.», Foudre et Montagne, Chamonix, France, 1994.
- [10]-**Un compte-rendu d'une conférence de Serge Chauzy**, scientifique travaillant sur l'électrostatique lié à l'atmosphère.
- [11]-**Site de Patrice Pezillier**, personne travaillant sur la foudre dans le cadre d'un T.I.P.E
- [12]- **F.Rachidi** "La foudre et ses effets électromagnétiques". École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2004.
- [13]-Le risque foudre et les Installations Classées pour la Protection de l'Environnement.Septembre 2001.
- [14] -**A. Xemard, A. Sabot, P. Lalande, M. Nguyen** ;

- « Modèles électrogéométriques utilisés en électrotechnique : Comparaison et utilisation par EDF. », Foudre et Montagne, Chamonix, France, 1994. [15] -**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. [16] -**Z. Shoujun. D. Kiing, T. G. Hen**. "Finite element method based on equivalent magnetic energy method for computation of 2D nonlinear current field". Journal of Shanghai University, vol.1, No.3. Décembre 1997.
- [17] -**A. Lefèvre**. "Contribution à la modélisation électrique, électromagnétique et thermique des transformateurs : Application à l'étude de l'échauffement sur charges non linéaires", Thèse de doctorat de l'université de Nantes. Octobre 2006.
- [18] -**M. Boutaayamou**. "Méthode de perturbation pour la modélisation par éléments finis des systèmes électrostatiques en mouvement — Application aux MEMS Electrostatiques". thèse de doctorat. Université de Liège, Novembre 2008.
- [19] -**E. Chauveau**, "Contribution au calcul électromagnétique et thermique des machines électriques : application à l'étude de l'influence des harmoniques sur l'échauffement des moteurs asynchrones" «, thèse de Doctorat de l'université de Nantes, 2001. [20] -**H. Brouri** : « Détermination des zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal dans le cas d'une terre discontinue », Thèse de Magister, ENP, Alger, Algérie, 2000. [21] -**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. [22] -**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.