

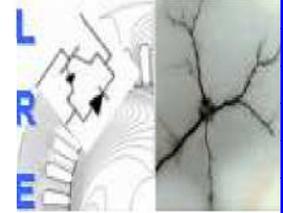
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
**ECOLE NATIONALE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE**



Laboratoire de Recherche en Electrotechnique

Laboratoire de Haute Tension

Département de Génie Electrique



## Mémoire de Magister

En Electrotechnique

Option : Réseaux Electriques et Haute Tension

Présenté par

**BOURENANE Haiat**

Ingénieur d'Etat en Electrotechnique de l'Université de Tiaret

Thème

---

# Champ Electrique sous Tension de Choc de Foudre dans les Intervalles d'Air Tige-Plan avec Paratonnerre Horizontal

---

Soutenu le : 07/ 07/ 2009 devant le jury composé des membres :

Président : M<sup>r</sup> : A.BOUBAKEUR

Professeur, ENSP

Rapporteur: M<sup>r</sup> : A.MEKHALDI

Professeur, ENSP

Examineurs :

M<sup>r</sup> : M.TEGUAR

Maître de conférences, ENSP

M<sup>r</sup> : L. NEZLI

Maître de conférences, ENSP

M<sup>r</sup> : R.TAHMI

Maître de conférences, ENSP

*E.N.S.P. 10, Avenue Hassen-Badi, El Harrach, ALGER.*

*A mes parents*  
*A mes sœurs et frères*  
*Et à toutes mes amies*

## *Remerciements*

Je remercie tout d'abord Dieu de m'avoir prêté santé et volonté pour mener à terme ce mémoire.

Ce travail a été réalisé sous la direction scientifique de Monsieur le Professeur A. MEKHALDI. Qu'il trouve ici l'expression de ma sincère reconnaissance pour ses précieuses directives, sa disponibilité et ses conseils.

J'adresse mes vifs remerciements à Monsieur le Professeur A. BOUBAKEUR de me faire honneur en acceptant de présider le jury.

Que Messieurs M. TEGUAR (Maître de conférences), R. TAHMI (Maître de conférences), et L. NEZLI (Maître de conférences), soient remerciés d'avoir accepté d'examiner mon travail.

Un remerciement particulier, à mes parents et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.



# **SOMMAIRE**

## SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	1
<b>CHAPITRE I Foudre et protection contre la foudre</b>	
INTRODUCTION.....	3
I.1 PHYSIQUE DES PHENOMENES ORAGEUX.....	3
I.1.1 Phénomènes précurseurs.....	3
I.1.1.1 Nuages orageux.....	3
I.1.1.2 L'électrification des nuages orageux.....	4
I.1.1.3 Champ électrique au sol et l'effet couronne.....	4
I.1.2 Sévérité orageuse.....	5
I.1.2.1 Niveau céramique et la densité des coups de foudre au sol.....	5
I.1.2.2 Facteurs locaux influant sur la foudre.....	6
a. Facteurs topologiques.....	6
b. Facteurs géologiques.....	7
c. Concentration ionique de l'air (conductivité de l'air).....	7
I.2 PHENOMENE DE Foudre.....	7
I.2.1 Foudre, éclair et tonnerre.....	7
I.2.2 Classification des coups de foudre.....	8
I.2.2.1 Coup de foudre ascendant.....	9
I.2.2.2 Coup de foudre descendant.....	10
I.2.3 Les effets de la foudre.....	11
a. Effet thermique.....	11
- Effets liés à la quantité de charge Q.....	11
- Effets liés à l'intégrale de courant.....	12
b. Effets électrodynamiques.....	12
c. Effets chimiques.....	12
d. Effets d'induction.....	13
e. Effets acoustiques.....	13
g. Effets sur l'homme.....	13
I.3 PROTECTION CONTRE LA Foudre.....	13
I.3.1 Protection contre les effets indirects de la foudre.....	13
I.3.1.1 Eclateurs :.....	14
I.3.1.2 Parafoudres.....	14
a. Parafoudres à carbure de silicium.....	14
b. Parafoudres à oxyde de zinc.....	15
I.3.2 Protection contre l'atteinte direct de la foudre.....	15
a. Paratonnerre.....	15
- Paratonnerres à tige simple.....	16
- Paratonnerres à dispositif d'amorçage.....	16
b. Cages maillées ou cage de Faraday.....	16
c. Fils tendus.....	16
I. 4 PROTECTION D'UN EQUIPEMENT PAR UN PARATONNERRE.....	17
Introduction.....	17

I.4.1 Mécanisme d'impact .....	17
I.4.2 Modèle électrogéométrique.....	17
I.4.2.1 Champ généré au sol par le traceur descendant .....	18
I.4.2.2 Distance d'amorçage.....	20
I.4.2.3 Méthode de la sphère fictive .....	22
I.4.2.4 Zone et surface de capture d'une tige verticale.....	23
I.4.2.5 Zone de capture d'un fil tendu .....	25
I.5 PROTECTION DES LIGNES AERIENNES CONTRE LA Foudre.....	26
I.5.1 foudroiement d'une ligne .....	26
I.5.1.1 Coup de foudre sur un conducteur de phase .....	26
I.5.1.2 Coup de foudre sur un câble de garde ou un pylône .....	27
I.5.1.3 Coup de foudre sur le sol à proximité de la ligne .....	27
I.5.2 Câble de garde et défauts d'écran .....	28
I.5.2.1 Principe de protection .....	28
I.5.2.2 Nombre de défauts d'écran .....	28
I.5.3 Positionnement du câble de garde.....	29
I.5.3.1 Construction géométrique du modèle .....	29
I.5.3.2 Angle de protection .....	30
I.5.4 CONCLUSION .....	30

## **CHAPITRE II METHODES D'EVALUATION DU CHAMP ELECTRIQUE**

INTRODUCTION.....	31
II.1 METHODES ANALYTIQUES ET NUMERIQUES .....	
II.1.1 Méthodes des charges fictives .....	32
II.1.2 Méthodes des différences finies.....	32
II.1.3 Méthodes des éléments frontières.....	32
II.1.4 Méthodes des éléments finis .....	33
Introduction .....	33
II.1.4.1 Conditions aux limites .....	33
II.1.4.2 Maillage .....	33
II.1.4.3 Formulation du potentiel.....	34
II.1.4.4 Résolution de Laplacien.....	35
II.2 METHODES EXPERIMENTALES .....	36
II.2.1 METHODE DIRECTE .....	36
II.2.1.1 Voltmètre électrostatique.....	37
II.2.2 METHODE INDIRECTE DE WILSON.....	38
II.2.3 METHODE INDIRECTE DU VOLTMETRE ROTATIF (MOULIN A CHAMP ELECTRIQUE) .....	39
II.2.4 METHODE DE LA SONDE A CAPACITE REPARTIE (SCR) .....	40
II.2.5 CONCLUSION.....	41

## **CHAPITRE III TECHNIQUES EXPERIMENTALES**

INTRODUCTION.....	42
-------------------	----

III. 1 GENERATEUR DE CHOCS DE Foudre DE L'ENP .....	42
III. 1.1 Description .....	42
III. 1.2 Tension de choc délivrée .....	43
III. 1.3 Détermination de la tension $U_{0\%}$ .....	44
III. 1.4 Corrections atmosphériques .....	44
III. 1.4.1 Facteur de correction de densité relative de l'air $k_d$ .....	44
III. 1.4.2 Facteur de correction de l'humidité $k_h$ .....	45
III.2 MODELE EXPERIMENTAL.....	45
III.3 MESURE DU CHAMP PAR LA METHODE DE LA SONDE A CAPACITES REPARTIE (S. C. R.).....	47
III.3.1 Circuit de mesure.....	47
III.3.2 Expression du champ mesuré .....	48
III.3.3 Détermination de la constante de la sonde $K_S$ .....	50
III.3.4 Formes des signaux obtenus avec l'oscilloscope .....	51
<b>CHAPITRE IV   RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATIONS</b>	
INTRODUCTION .....	52
IV.1 SYSTEME TIGE-PLAN SANS PARATONNERRE.....	52
IV.1.1 Détermination de la tension $U_{0\%}$ .....	52
IV.1.2 Distribution de champ électrique en fonction de la distance axe de la pointe- axe de la sonde .....	54
IV.2 SYSTEME TIGE-PLAN AVEC PARATONNERRE.....	56
IV.2.1 Influence du paratonnerre.....	56
IV.2.2 Discussion sur l'effet du paratonnerre .....	61
<b>CHAPITRE V   CALCUL DU CHAMP ET VALIDATION</b>	
INTRODUCTION .....	65
V.1 SIMULATION DU MODELE EXPERIMENTAL .....	65
V.2 CALCUL DU CHAMP ELECTRIQUE.....	67
V.3 DISTRIBUTION DU CHAMP EN FONCTION DE LA DISTANCE TIGE-DE LA SONDE .....	70
V.3.1 Système pointe-plan sans paratonnerre. ....	70
V.3.2 Système pointe-plan avec paratonnerre .....	71
V.3.2.1 Influence de la position du paratonnerre .....	71
V.3.2.2 Influence de la hauteur du paratonnerre .....	78
V.3.2.3 Discussion sur l'effet du paratonnerre.....	85
V.4 Détermination de l'écart entre les valeurs du champ obtenu expérimentalement et celles du champ calculé .....	92
V.4.1 Système pointe-plan sans paratonnerre .....	92

V.4.2 Système pointe-plan avec paratonnerre .....	93
CONCLUSION GENERALE .....	95
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....	96

# **INTRODUCTION GENERALE**

## INTRODUCTION GENERALE

Qui n'a jamais sursauté au grondement sourd ou au craquement sec du tonnerre?  
Qui n'a jamais été fasciné par la puissance d'un coup de foudre?

Connue par tous, la foudre terrorise et fascine les hommes depuis toujours.

René Descartes lui-même, pourtant considéré comme le grand penseur rationaliste du 17<sup>ième</sup> siècle, écrivait: "La foudre résulte de l'explosion des exhalations sulfureuses de l'atmosphère sous la pression, lorsqu'un nuage plus lourd tombe sur un nuage plus léger !"

Ce n'est que depuis le 18<sup>ème</sup> siècle, que les chercheurs ont su expliquer physiquement ce phénomène naturel.

Dans un premier temps, la légende veut que ce soit grâce aux cerfs-volants que l'on ait pu mettre en évidence l'origine électrostatique de la foudre.

Vers 1750, l'abbé Nollet [1] fait un rapprochement entre la foudre et l'étincelle électrique. Sa théorie est renforcée par les expériences du français Jean Théophile Desaguliers, de l'allemand Johann Heinrich Winckler et de l'américain Benjamin Franklin.

La foudre cause des dégâts impressionnants, cela constitue non seulement un danger pour les êtres vivants et les constructions, mais elle induit aussi des risques graves pour les réseaux électriques, les équipements électroniques ou informatiques ainsi que pour les réseaux de télécommunications, d'où la nécessité d'une protection sécuritaires [1].

Dans le but d'atteindre une meilleure protection contre la foudre, les principales études ont permis d'élaborer une nouvelle méthode de détermination de la zone de protection d'un paratonnerre. Cette méthode est basée sur la connaissance du mécanisme d'impact de la foudre et est mise en œuvre au moyen d'un modèle mathématique appelé le modèle électrogéométrique [2].

Le champ électrique est l'un des principaux paramètres d'estimation du niveau de danger de la foudre et donc de protection. Ainsi, notre travail contribue à étudier l'influence d'une tige horizontale sur la répartition du champ électrique dans un intervalle tige-plan par la mesure ou le calcul du champ électrique.

Le premier chapitre de ce mémoire débute par un exposé sur la nature de la foudre, son origine, son mécanisme et ses caractéristiques électriques. La compréhension de ces phénomènes nous aide à concevoir un système de protection contre la foudre. Nous analysons ensuite le foudroiement des lignes aériennes et les processus de formations des défauts. Ainsi nous décrivons la technique de protection par câble de garde qui fait appel au modèle électrogéométrique.

Le deuxième chapitre consiste à présenter les méthodes de mesure et de calcul du champ électrique au sol. Nous présentons deux parties :

- ✦ Dans la première partie, nous présentons sommairement certaines méthodes analytiques et numériques de calcul du champ et nous donnons plus de détails sur la méthode des éléments finis que nous avons retenue pour le calcul du champ dans notre cas.
- ✦ La deuxième partie est consacrée aux différentes méthodes de mesure du champ électrique et nous nous intéressons plus particulièrement à celle utilisée dans notre expérimentation à savoir la méthode de la sonde à capacité répartie. Cette méthode a été élaborée au laboratoire de physique de la décharge de l'Ecole Supérieure d'Electricité (Supélec) dans une étude précédemment effectuée en collaboration avec le laboratoire de Haute Tension de l'ENP [3].

Nous exposons dans le troisième chapitre les techniques expérimentales utilisées dans notre étude.

Les résultats expérimentaux et leurs interprétations font l'objet du quatrième chapitre.

Dans le cinquième chapitre, nous utilisons le logiciel FEMM (Finite Element Method Magnetics) pour compléter la partie expérimentale qui n'a pas pu être effectuée à cause de la panne du générateur de choc de foudre. Enfin dans ce même chapitre, nous présentons les différences entre les résultats expérimentaux et ceux obtenus par FEMM. Nous terminons par une conclusion générale sur notre travail.

***CHAPITRE I***  
***FOUDRE ET PROTECTION***  
***CONTRE LA Foudre***

## INTRODUCTION

La foudre est un phénomène naturel qui frappe par hasard et souvent de façon inattendue un point sur terre. Elle peut avoir des conséquences graves sur les êtres humains, sur les animaux et sur les biens matériels.

Pour assurer une protection adéquate contre la foudre, il est nécessaire tout d'abord de comprendre la physique des orages et les caractéristiques électriques de la foudre.

## I.1 PHYSIQUE DES PHENOMENES ORAGEUX

### *I.1.1 Phénomènes précurseurs*

#### **I.1.1.1 Nuages orageux**

Les nuages orageux sont d'énormes masses généralement de type cumulo-nimbus, occupant une surface de quelques dizaines de kilomètres carrés, ayant une épaisseur de plusieurs kilomètres et surplombant le sol à une hauteur moyenne de 2 km. Leur masse est de l'ordre de centaines de milliers de tonnes d'eau. Ils sont constitués de gouttes d'eau à leur partie inférieure et de particules de glace à leur partie supérieure [4].

Leur formation est due à l'apparition des courants atmosphériques ascendants dont la vitesse peut dépasser 20 m/s. 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 >> [2].

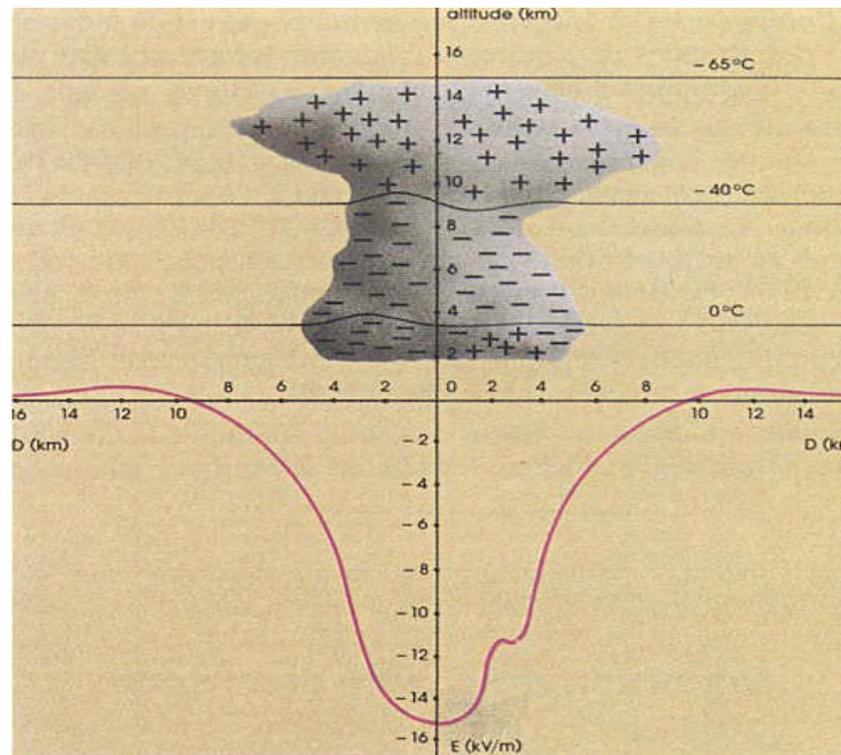
On distingue deux sortes de structures orageuses, les orages de chaleur et les orages frontaux.

Les orages de chaleur ou de convection naissent de l'effet combiné de l'humidité et du réchauffement local du sol : il se forme alors une « bulle » d'air chaude et humide, qui s'élève pratiquement isolée thermiquement de l'air environnant. Cette bulle formera un nuage orageux aux altitudes où la condensation commence. C'est l'orage de chaleur, souvent très localisé, dont la durée n'excède pas une heure et demi environ et que l'on rencontre surtout dans les climats tropicaux.

Les orages frontaux ou cycloniques se produisent dans les régions tempérées, correspondant à la rencontre de masses d'air importantes dont la température et l'humidité sont différentes. Cette rencontre produit également des courants ascendants accompagnés de condensation. Les fronts orageux ainsi formés peuvent durer plusieurs jours et se propager sur des milliers de kilomètres. Ces orages sont en général plus violents et plus mobiles que les premiers [2], [5].

### I.1.1.2 L'électrification des nuages orageux

Par suite des phénomènes physiques encore inexpliqués, on constate que des décharges électriques vont se former à l'intérieur du nuage, des charges négatives en bas du nuage et positives en haut du nuage. Il arrive également qu'à la base du nuage se trouvent des îlots de charges positives à l'endroit de pluies intenses. La figure (I.1) schématise la structure électrique d'un cumulo-nimbus orageux [6].



**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.1.1.3 Champ électrique au sol et l'effet couronne

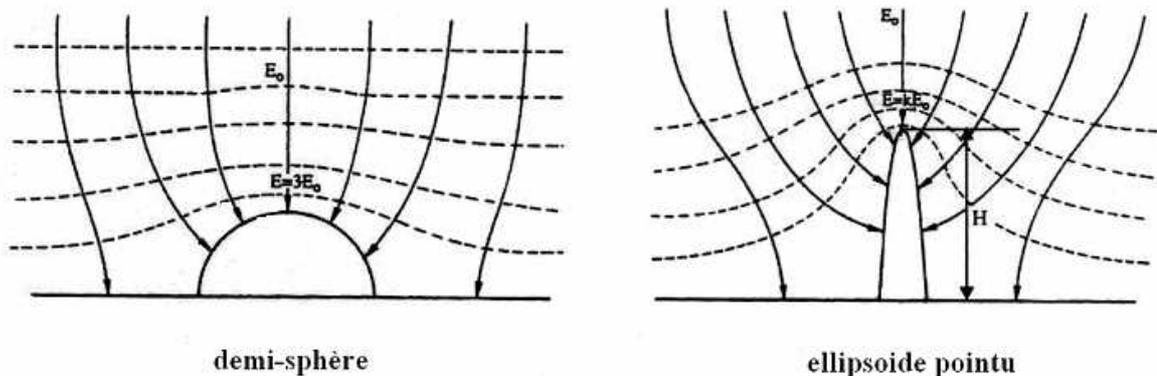
La terre agit comme condensateur sphérique avec une charge électrique nette négative, par contre, l'atmosphère porte une charge identique opposée (une charge positive) [7].

Des mesures montrent qu'il existe par beau temps un champ électrique faible permanent, dirigé vers le bas dont l'amplitude est de l'ordre de 100 à 150 V/m [2].

A l'approche d'un nuage chargé, 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.

Les valeurs de champ électrique au sol indiquées précédemment supposent un sol horizontal plat. Or, on sait que toute aspérité, par un effet de concentration des lignes de champ électrique, peut considérablement augmenter le champ local. On peut calculer qu'au sommet d'une demi-sphère posée sur un plan le champ est le triple du champ moyen. Lorsque la demi-sphère se déforme pour devenir un demi-ellipsoïde pointu, cet effet s'accroît encore.

Ainsi, pour un rapport entre grand axe et petit axe de l'ellipsoïde égal à 30, le champ est multiplié par un facteur 300. Comme le seuil d'ionisation de l'air atmosphérique est de l'ordre de 25 kV/cm, on voit que, dans ces conditions particulières, il suffit d'un champ ambiant d'une dizaine de kilovolts par mètre pour provoquer un effet de couronne au sommet de l'ellipsoïde [4].



**Figure I.2 :** Amplification du champ électrique au sommet d'une aspérité [2], [6]

Ce phénomène a été observé dès l'Antiquité sur des extrémités de lances et autres objets pointus et était également connu des marins sous le nom de feu de Saint-Elme, alors qu'il se produisait au bout des mâts des bateaux.

Il est aussi connu des alpinistes, qui savent que son apparition signifie danger immédiat et qu'il convient alors de s'éloigner rapidement des cimes.

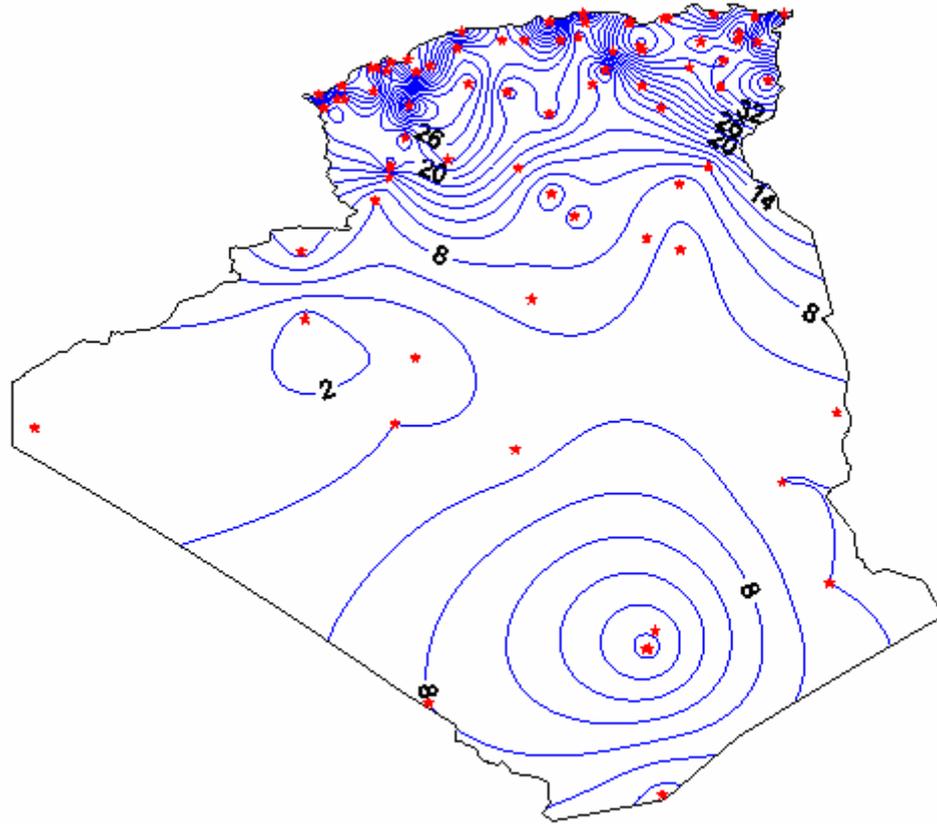
## ***1.1.2 Sévérité orageuse***

### **1.1.2.1 Niveau kéraunique et la densité des coups de foudre au sol**

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

Par définition, le niveau kéraunique est le nombre de jours par an où le tonnerre a été entendu. La simplicité même de cette définition a permis l'établissement de statistiques, à partir de renseignements fournis par le passé par les bonnes volontés locales et aujourd'hui par la Météorologie nationale, qui rendent d'appréciables services [4].

En Algérie, le niveau kéraunique moyen est de 20. Il change de 1 (Beni Abbas) à 44 (Dar EL Beida) figure I.3. [8].



**Figure I.3 :** Carte des lignes isokérauniques de l'Algérie [8].

Il est cependant évident que la notion de niveau kéraunique est trop rudimentaire pour pouvoir fournir une mesure utilisable de la sévérité orageuse, car elle ne donne aucune indication, ni sur la fréquence de foudroiement, ni sur l'existence de zones localisées particulièrement foudroyées.

Aujourd'hui, des systèmes de détection d'orages plus précis peuvent donner des informations intéressantes. La densité de coups de foudre au sol qui est exprimée en nombre de coups par  $\text{km}^2$  et par an est ainsi déterminée avec plus de précision et des informations sur l'amplitude de ces coups de foudre sont aussi disponibles. Bien que ces systèmes soient en évolution (moyens matériels, nombre de capteurs, durée totale de fonctionnement...), les valeurs qu'ils fournissent sont nettement plus précises que n'importe quelle carte de niveau kéraunique par région météorologique.

### **I.1.2.2 Facteurs locaux influant sur la foudre**

#### **a. Facteurs topologiques**

Des zones préférentielles peuvent exister du simple fait des conditions privilégiées de formation des nuages orageux, puis des mouvements d'air qui favorisent l'existence des couloirs orageux.

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

**b. Facteurs géologiques**

Le point d'impact exact d'un coup de foudre ne semble se déterminer que dans la partie la plus inférieure de sa trajectoire ; la partie supérieure, disons au-delà d'une centaine de mètres au-dessus du sol, se développe de façon totalement indépendante de la structure géométrique ou géologique de ce dernier.

Ce ne sont donc que des facteurs tout à fait locaux qui peuvent avoir une action sur la décision de l'impact. La présence de saillies, arbres, bâtiments, cheminées est bien connue comme étant l'un de ces facteurs.

Les observations concernent le foudroiement des lignes de haute-tension, ainsi que les résultats de travaux de laboratoires qui ont montré que la conductivité des sols pourrait être un autre facteur important.

Ces résultats permettraient d'allouer aux failles humides, aux nappes d'eau, à des terrains marécageux, une certaine attirance préférentielle pour la foudre [4].

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

La concentration en ions de l'air (ou sa conductivité, celle-ci étant la conséquence de celle-là) a parfois été invoquée pour expliquer un nid d'orages. Mais, même aujourd'hui, il n'existe pratiquement pas de données expérimentales à partir d'observations sur le terrain.

Les études de laboratoire sur les mécanismes de décharge dans l'air n'ont pas mis en évidence, jusqu'à présent, un effet de cette conductivité, par exemple en favorisant le trajet de la décharge, les théories actuellement disponibles montrent d'ailleurs que le taux d'ions dans l'air devrait être considérablement plus élevé que ce que l'on peut mesurer dans les conditions naturelles pour qu'un effet sensible puisse se manifester [6].

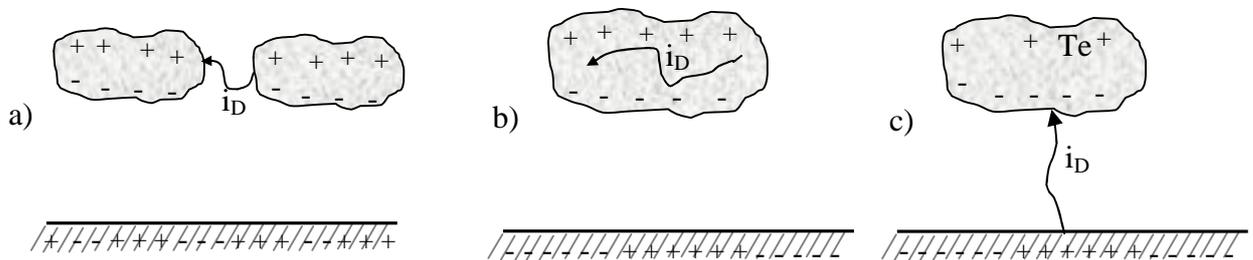
**I.2 PHENOMENE DE Foudre*****I.2.1 Foudre, éclair et tonnerre***

La manifestation visuelle de l'orage électrique est l'éclair. Un éclair se produit lorsqu'un courant électrique chauffe les gaz de l'air à des températures suffisantes pour les rendre lumineux. Lorsqu'un courant électrique passe, il chauffe l'air à des températures très élevées.

Les éclairs peuvent exister à l'intérieur même d'un nuage, (intra-nuages : figure I.4.b), entre deux nuages (inter nuage : figure I.4.a) ou vers le sol (figure I.4.c) [10]. Ce dernier type est aussi appelé coup de foudre. Ce qu'on appelle communément un éclair de chaleur est en fait un éclair à l'intérieur d'un nuage à une distance trop grande pour qu'on puisse entendre le tonnerre. Souvent, les premiers coups de foudre surviennent après les premières décharges intra-nuageuses.

Les coups de foudre naissent généralement dans la base négative du nuage. Des charges négatives partent alors du nuage et se propagent vers le sol (un traceur) en cherchant les zones où il y a le moins de résistance. De nombreux zigzags peuvent à ce moment apparaître. Lorsque le traceur approche du sol, le champ électrique augmente, ce qui cause la formation d'un traceur positif ascendant. Lorsque les deux traceurs se rejoignent, il y a ouverture d'un chemin conducteur de 2 ou 3 cm de diamètre entre le sol et le nuage. C'est ce qu'on appelle l'arc de retour ou le coup de foudre. La durée de tout ce processus est de 20 à 50 millisecondes. Après le premier éclair, il peut se produire d'autres arcs de retour dans le même chemin et ce, jusqu'à ce que le nuage se décharge de toute l'électricité accumulée.

L'air qui entoure l'arc de retour est chauffé à une température qui peut atteindre de 20 000 à 30 000 Kelvin. Cette augmentation rapide de la température cause une explosion de l'air. C'est le tonnerre. En ce qui concerne les éclairs intranuageux, on entend un grondement sourd et pour les coups de foudre, c'est un craquement sec [9].



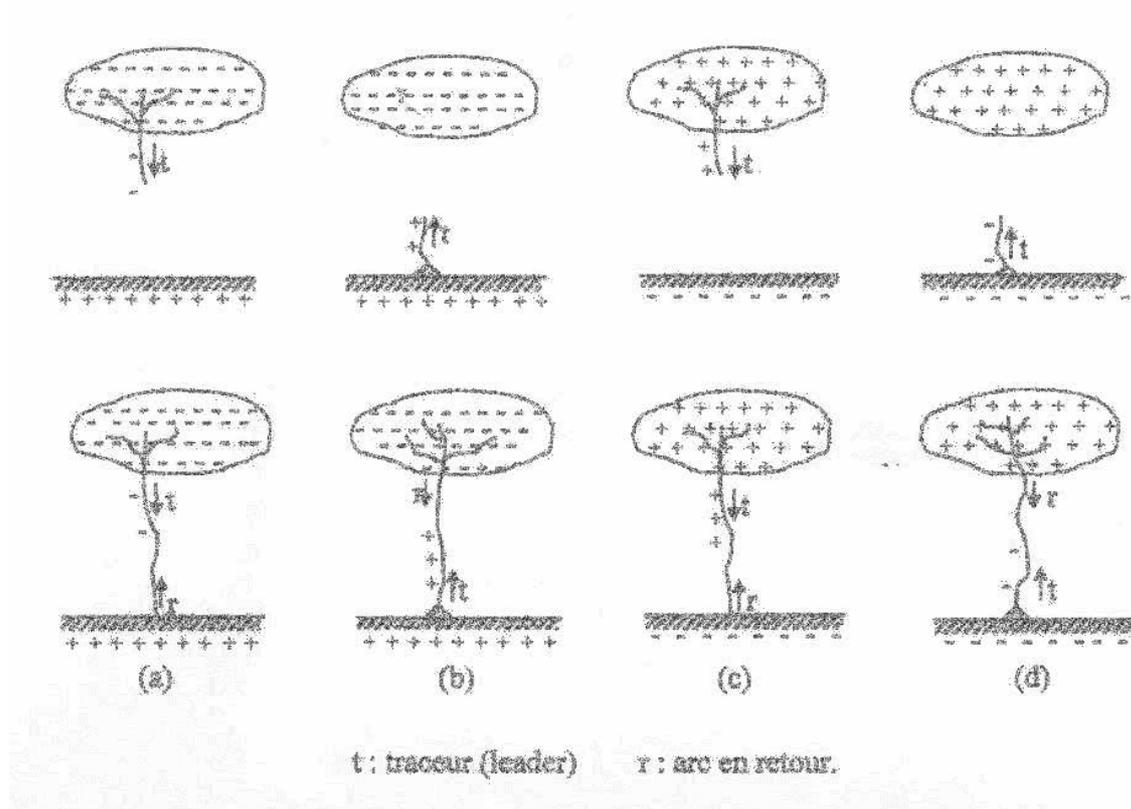
**Figure I.4** : Différents types de décharges [10]

### ***1.2.2 Classification des coups de foudre***

Bien que les décharges inter et intra-nuages constituent plus de la moitié des décharges de foudre, ce sont surtout les décharges nuage-sol qui ont été l'objet d'études les plus poussées; ceci est dû aux raisons d'ordre pratique (cause de blessure et mort, incendies de forêts, et perturbations des systèmes électriques de télécommunication et de transport), et aussi du fait qu'il est plus facile de mesurer les caractéristiques optiques et électriques des décharges nuage-sol [11].

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

- du sens de développement du traceur principal ascendant ou descendant
- de la polarité du traceur principal positive ou négative qui est identique à celle de la charge de nuage.



- (a) - Coup de foudre du type descendant négatif
- (b) - Coup de foudre du type ascendant positif
- (c) - Coup de foudre du type descendant positif
- (d) - Coup de foudre du type ascendant négatif

**Figure I.5 :** Les différents types de coup de foudre selon K. Berger [4], [6]

En pays plat, le coup de foudre de loin le plus fréquent est descendant. Pour qu'un coup ascendant puisse se développer, il faut la présence d'une proéminence importante, telle qu'une tour élevée ; c'est aussi la raison pour laquelle le coup ascendant se produit plus fréquemment en montagne.

Dans nos régions à climat tempéré, 90 % des coups de foudre sont négatifs [2], [4].

### I.2.2.1 Coup de foudre ascendant

Les effluves d'effet de couronne qui apparaissent au sommet des aspérités se développent d'autant plus loin et avec plus d'intensité que la dimension de la prééminence est importante.

A partir d'une certaine intensité d'effluves, le phénomène se modifie brusquement et peut se développer plus loin pour atteindre le nuage, c'est le coup de foudre ascendant.

Des mesures optiques ont montré que la vitesse de progression des traceurs ascendant positif était comprise entre 2 et  $6 \cdot 10^4$  m/s [33]. Au cours de cette progression, le traceur se ramifie plusieurs fois, et on assiste à la formation d'arborescences avec des ramifications orientées vers le haut.

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

### **I.2.2.2 Coup de foudre descendant**

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

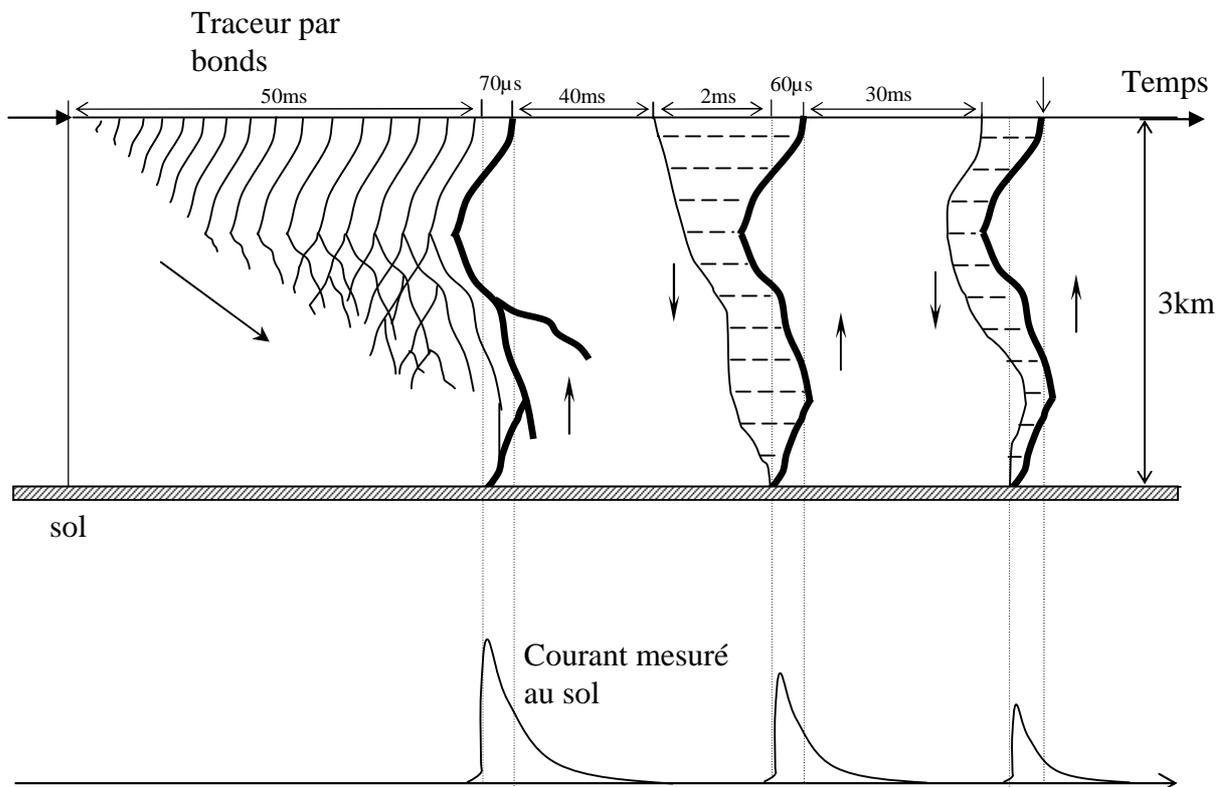
Entre les bonds, on observe des temps d'arrêt de l'ordre de 40 à 100  $\mu$ s, avec une vitesse de progression moyenne de 0,15 à 1 m/ $\mu$ s [6]. Au fût et à mesure que ce traceur progresse, la décharge se ramifie et la luminosité du chemin ionisé s'accroît.

Dès que la pointe du traceur se rapproche du sol, des prédécharges ascendantes se développent généralement depuis un arbre, une saillie, en direction du traceur descendant, alors qu'elles n'existaient auparavant que sous forme d'effluves d'effet couronne localisées.

Lorsque l'une de ces prédécharges et le traceur par bonds se rejoignent, il s'établit un court-circuit entre le nuage et le sol, qui va permettre le passage d'un courant de forte intensité. Ce courant est en fait constitué par les charges superficielles du sol qui, en remontant le canal ionisé formé par le traceur, neutralisent les charges de ce dernier ; on observe alors un trait fortement lumineux qui progresse depuis le sol jusqu'au nuage avec une vitesse estimée à  $10^8$  m/s. C'est l'arc de retour ou « return stroke ».

Lorsque le courant de la première décharge cesse de s'écouler, il peut se passer 100 ms [4] avant qu'une seconde décharge n'apparaisse. Cette seconde décharge commence par l'apparition d'un traceur qui contrairement au traceur par bonds, progresse d'une façon continue (c'est le trait flèche ou dart leader) dont la vitesse de propagation est de l'ordre de  $10^6$  m/s [4].

La figure (I.6) montre le mécanisme d'un coup de foudre descendant [2], [4], [6], [12].



**Figure I.6 :** Mécanisme d'un coup de foudre et courant mesuré à la surface de la terre.

### *1.2.3 Les effets de la foudre*

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

#### **a. Effet thermique**

##### **- Effets liés à la quantité de charge Q**

Ce sont les effets de fusion au point d'entrée du courant de foudre dans un conducteur électrique, désignés par le terme traces d'impact.

Sur les installations de protection contre la foudre, on les observe surtout sur les pointes aiguës, où l'on constate parfois une fusion de l'extrémité de la pointe, sur quelques millimètres au maximum.

Sur des surfaces planes (tôles), on constate des traces de fusion qui peuvent, pour des tôles très minces, évoluer jusqu'au percement complet [4].

- Effets liés à l'intégrale de courant  $\int i^2 dt$

L'intégrale d'action permet de calculer l'énergie libérée par une charge située au point de chute de la foudre, si l'on connaît sa résistance équivalente. Dans la mesure où cette résistance reste constante, l'énergie dissipée s'écrira [4]:

$$W=R \int i^2 dt \quad (I.1)$$

Des effets thermiques importants apparaissent donc surtout en des points de fortes résistances, comme dans les mauvais conducteurs, où beaucoup d'énergie est libérée sous forme de chaleur par le passage de courant. C'est pourquoi l'eau contenue dans le bois, la maçonnerie et les matériaux analogues est échauffée et vaporisée. Du fait de la brièveté du phénomène dans son ensemble, et comme conséquence de la surpression qui en résulte, il se produit des éclatements d'allure explosive d'arbres, de mâts en bois, de poutres et de murailles.

### b. Effets électrodynamiques

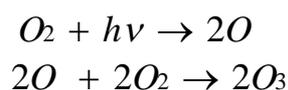
Des effets mécaniques de quelque importance ne peuvent se manifester que là où des parties du chemin parcouru par la foudre sont disposées les unes par rapport aux autres de telle façon que l'une d'elles se trouve dans le champ magnétique créé par l'autre. Dans ce cas, plus l'écart entre ces parties est faible, plus les effets deviennent grands

Par le fait de l'interaction réciproque entre le courant de foudre dans un conducteur et le champ magnétique terrestre, il ne peut se développer que des effets mécaniques de l'ordre de 10 N au plus par mètre de conducteur ; ces effets sont anodins [4].

À côté de ces forces de répulsion qui, dans des cas rares, peuvent causer des déformations de conducteurs, il y a aussi de puissants efforts d'attraction entre des voies parallèles offertes au courant de foudre, lorsque leur écartement est assez faible. C'est ainsi que des antennes tubulaires minces s'écrasent et que des conducteurs parallèles s'entrechoquent.

### c. Effets chimiques

La décharge électrique de l'éclair apporte une énergie suffisante qui peut transformer l'oxygène de l'air  $O_2$  en ozone par la relation chimique suivante [13]:



Où :

h : Constante de Planck :  $6,63.10^{-34}$

$\nu$  : Fréquence de l'onde lumineuse.

**d. Effets d'induction**

Le rayonnement électromagnétique dû à la foudre produit des tensions induites dans les circuits formant des boucles et peut entraîner la destruction ou le dysfonctionnement des appareils.

**e. Effets acoustiques**

Le déclenchement extrêmement rapide du premier arc en retour génère une chaleur considérable (30000 K) et une pression très élevée du canal de foudre (2 atmosphère et plus) [13]. Il est à l'origine de l'onde de choc, elle même à l'origine de l'onde sonore (tonnerre). Le niveau de pression acoustique peut atteindre 155 dB [11].

**f. Effets lumineux**

Un courant électrique de la foudre chauffe les gaz de l'air à des températures suffisantes et les rend lumineux.

Ces effets sur les installations sont limités aux équipements optiques. Chez l'homme, des lésions oculaires peuvent survenir.

**g. Effets sur l'homme**

Deux classes d'effets peuvent être distinguées :

- Les uns, directement liés au foudroiement, sont de nature thermique, électrique et auditive. Ils sont spécifiques à la foudre.
- Les autres indirects, sont les conséquences des effets d'un foudroiement : incendies, chutes d'objets, courants électriques de défaut à fréquence industrielle.

**I.3 PROTECTION CONTRE LA Foudre**

Se protéger contre la foudre ne consiste pas uniquement en la seule mise en place de paratonnerres. En effet, l'installation de paratonnerres assure uniquement la protection des structures et des personnes contre les impacts de foudre ("effets directs").

De plus, une portion non négligeable du courant du coup de foudre capté par un paratonnerre est dissipée dans la terre de l'installation. Enfin, la chute de la foudre sur ou à proximité d'une installation est à l'origine de surtensions transitoires ("effets indirects") qui peuvent être très critiques pour les équipements.

***I.3.1 Protection contre les effets indirects de la foudre***

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

### I.3.1.1 Eclateurs

Les éclateurs sont les plus simples, les plus anciens, les plus robustes et les moins chers des moyens de protection.

Ils sont généralement constitués de deux électrodes dans l'air, l'une relié à l'élément à protéger, l'autre à la terre, la distance entre ces deux électrodes est réglable et détermine la tension d'amorçage [14].

Les électrodes, de formes variées, sont constituées [15] :

- de deux simples tiges placées l'une en face de l'autre (c'est le cas particulier des éclateurs de protection montés dans le passé sur les traversées de transformateurs à haute tension).
- de deux tiges recourbées appelée cornes et positionnées sur les chaînes d'isolateurs en entrée de postes MT (éclateurs anti-oiseaux) ou HT.
- ou bien de dispositifs plus élaborés, les électrodes d'amorçage étant complétées par des anneaux destinés à éliminer les effluves d'effet de couronne.

Le principal avantage des éclateurs est leur faible prix, ils sont aussi très facilement réglable de sorte que leurs caractéristiques peuvent être ajustées suivant leur fonction.

Malheureusement, ces avantages ne vont pas sans de nombreux inconvénients, énumérés ci-après.

Les éclateurs ne se désamorcent pas d'eux même; ils provoquent donc une mise hors tension du réseau après chaque fonctionnement.

Le fonctionnement des éclateurs conduit à une onde de tension coupée à front raide susceptible de provoquer des avaries au matériel bobiné situé à proximité.

Le niveau d'amorçage est très fluctuant, il dépend de nombreux paramètres tels que les conditions atmosphériques, l'état d'ionisation de l'air et surtout de la vitesse de montée de la surtension appliquée.

### I.3.1.2 Parafoudres

Les parafoudres permettent d'éviter la plupart des inconvénients inhérents au principe de l'éclateur.

Les parafoudres sont des dispositifs destinés à limiter les surtensions transitoires et à écoulent les courants de foudre.

#### a. Parafoudres à carbure de silicium

Ils sont constitués d'éclateurs et de varistances au carbure de silicium (SiC). Ils représentent la première génération mais, à l'heure actuelle, ils sont moins utilisés.

La présence d'éclateurs en série maintenait un inconvénient ennuyeux en coordination de l'isolement, à savoir les fluctuations des tensions d'amorçage en fonction, en particulier, de la pente du front de la surtension, ce qui imposait de prendre des marges plus importantes entre les niveaux de protection des parafoudres et les niveaux de tenue des matériels à protéger.

### **b. Parafoudres à oxyde de zinc**

Ils sont constitués uniquement de varistances à base d'oxyde de zinc (ZnO). Les parafoudres à oxyde de zinc sont en effet, plus compacts, de conception plus simple et offrent des caractéristiques techniques supérieures.

Leur capacité d'absorption d'énergie est élevée et on peut les utiliser sur tous les réseaux, de l'électronique jusqu'au transport d'énergie à très haute tension.

Enfin, signalons que les progrès technologiques dans le domaine des isolations externes, associés aux nouvelles perspectives de mise en oeuvre des varistances ZnO, ont permis, dès le début des années quatre-vingt, le développement d'une nouvelle génération de parafoudres, visant à mieux exploiter les avantages de la technologie ZnO. Il s'agit des parafoudres à oxyde de zinc à enveloppe en matériau synthétique.

### ***1.3.2 Protection contre l'atteinte direct de la foudre***

La protection contre la foudre ou "effets directs" consiste à [16] :

-Capturer la foudre en constituant un point d'impact privilégié avec un dispositif de capture naturel ou spécifique (paratonnerre, cage maillée ou fil tendu),

-canaliser le courant de foudre en facilitant son passage au moyen d'une "descente de terre",  
-écouler le courant de foudre à la terre en assurant sa dispersion dans le sol avec une "prise de terre paratonnerre".

### **a. Paratonnerre**

Une installation de paratonnerre comporte [17] :

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

Le paratonnerre existe sous différentes formes tels que tige de Franklin (tige simple PTS) ou tige à dispositifs d'amorçage (PDA).

**- Paratonnerres à tige simple**

Les paratonnerres à tige simple sont constitués d'une simple pointe effilée, ils ont été inventés par Benjamin Franklin en 1752.

Ils existent en différents matériaux conducteurs (cuivre, acier, ext...), leur longueur standard de 2,4 m peut-être sensiblement agrandie par l'adjonction d'éléments rallonges en acier traité ou acier inoxydable. Ces ensembles ne nécessitent pas de haubanage et peuvent atteindre des hauteurs de 7 à 8 mètres. L'extrémité des paratonnerres "Franklin" comporte une pointe pleine en bronze marin ou inox.

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

**- Paratonnerres à dispositif d'amorçage**

Le paratonnerre à dispositif d'amorçage dispose d'un système générateur d'impulsions à haute tension ou d'étincelles au voisinage de la pointe, pouvant augmenter le rayon de protection. Ce dispositif repose sur la théorie « de l'avance à l'amorçage » [18].

**b. Cages maillées ou cage de Faraday**

Elle est constituée de plusieurs pointes, couvrant toute la toiture et les arêtes du bâtiment à préserver. Les pointes sont reliées entre elles par des filins conducteurs interconnectés, reliés à la terre.

En effet, le courant de foudre est divisé par le nombre des descentes et la faible valeur du courant circulant dans les mailles crée peu de perturbations par induction.

Ce principe est utilisé pour les bâtiments sensibles (matériel informatique) [19].

**c. Fils tendus**

Ce système est composé d'un ou plusieurs fils conducteurs tendus au-dessus des installations à protéger, ces conducteurs doivent être reliés à la terre à chacune de leur extrémité. La zone de protection se détermine par application du modèle électro-géométrique.

Les fils tendus sont utilisés pour protéger les dépôts de munition et en règle générale lorsqu'il n'est pas possible d'utiliser la structure du bâtiment comme support des conducteurs qui écoulent le courant de foudre à la terre [17].

## I. 4 PROTECTION D'UN EQUIPEMENT PAR UN PARATONNERRE

### *Introduction*

L'étude des phénomènes physiques mis en jeu par la foudre a permis d'élaborer une méthode de détermination de la zone de protection d'une tige verticale, ou de fils tendus horizontalement. Elle permet également de définir la taille maximale des mailles d'une cage. Cette méthode est fondée sur l'analyse du mécanisme d'impact de la foudre et est mise en œuvre au moyen d'un modèle mathématique appelé modèle électrogéométrique.

Bien que ce modèle ne soit pas parfait – bien des incertitudes subsistent – il constitue néanmoins l'approche la plus cohérente pratiquement de la protection directe contre la foudre qui ait été élaborée à ce jour.

### *1.4.1 Mécanisme d'impact*

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

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

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

### *1.4.2 Modèle électrogéométrique*

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

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

Le modèle électrogéométrique considère que la terre est homogène plane et parfaitement conductrice. Cependant la terre présente généralement des caractéristiques électrogéologiques qui varient d'un site à l'autre ce qui a amené Le Laboratoire de Haute Tension de l'ENP de faire des recherches sur l'influence des caractéristiques électrogéologiques du sol sur la zone de capture d'un paratonnerre [20] à [32].

#### I.4.2.1 Champ généré au sol par le traceur descendant

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

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

En ce qui concerne la charge injectée dans le traceur descendant, il est admis que la première décharge de coup de foudre descendant correspond à la quasi-neutralisation de la charge du traceur. Ceci conduit souvent à la corrélation suivante [33] :

$$I = 15Q \quad (\text{I. 2})$$

Avec : I en kiloAmpères et Q en Coulomb

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

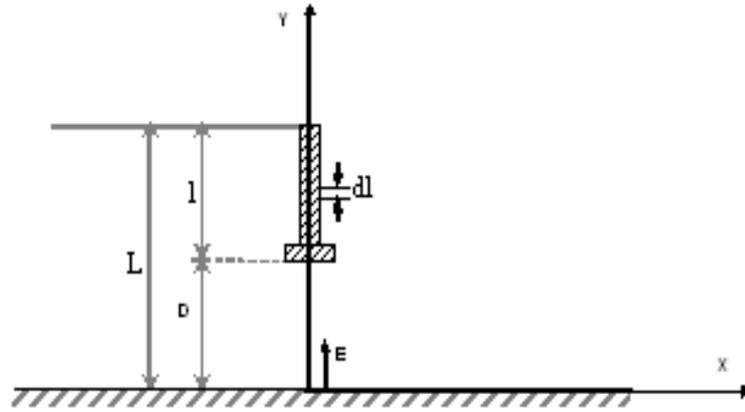
Si l'on désigne par l la longueur instantanée du traceur, par Q la charge totale et par q sa charge linéique, on aura à tout instant :

$$Q = 0.1Q + lq \Rightarrow 0.9Q = lq \quad (\text{I.3})$$

La figure (I.7) donne une représentation simplifiée d'un traceur descendant avec :

L : hauteur de formation du traceur.

D : distance instantané entre la tête du traceur et le sol.



**Figure I.7 :** Champ électrique au sol créé par un traceur descendant

A la base de ces données, le champ au sol à la verticale du traceur descendant est donné par [33] :

$$E = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \left[ \int \frac{dl}{l^2} + \frac{L-D}{9} \right] \quad (I.4)$$

$$E = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 L} (1-K) \left[ \frac{9K+1}{9K^2} \right] \quad (I.5)$$

Avec :  $K = D/L$  (I.6)

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

$$q = \frac{0.9Q}{L} \quad (I.7)$$

De (I.7) et (I.2) on déduit que :

$$q = \frac{0.9I}{15L} \quad (I.8)$$

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

Si on remplace la charge linéique q donnée par l'expression (I.4), et on prend le cas d'un nuage situé à 2km au-dessus du sol ( $L=2000m$ ), on obtient la relation  $E=f$  (I.D) représentée sous forme de courbes de la figure (I.8).

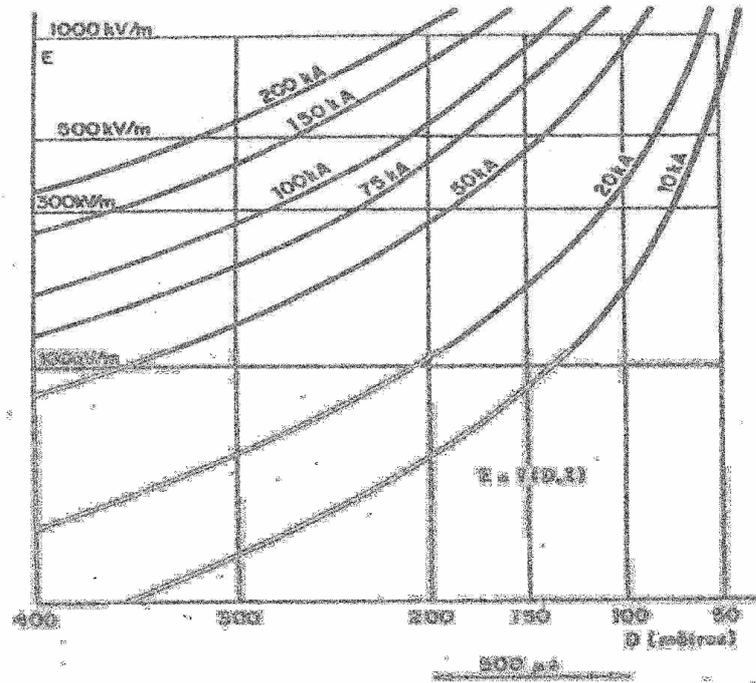


Figure I. 8 : Champ électrique au sol en fonction de l'altitude de la tête du traceur pour différents coups de foudre.

#### I.4.2.2 Distance d'amorçage

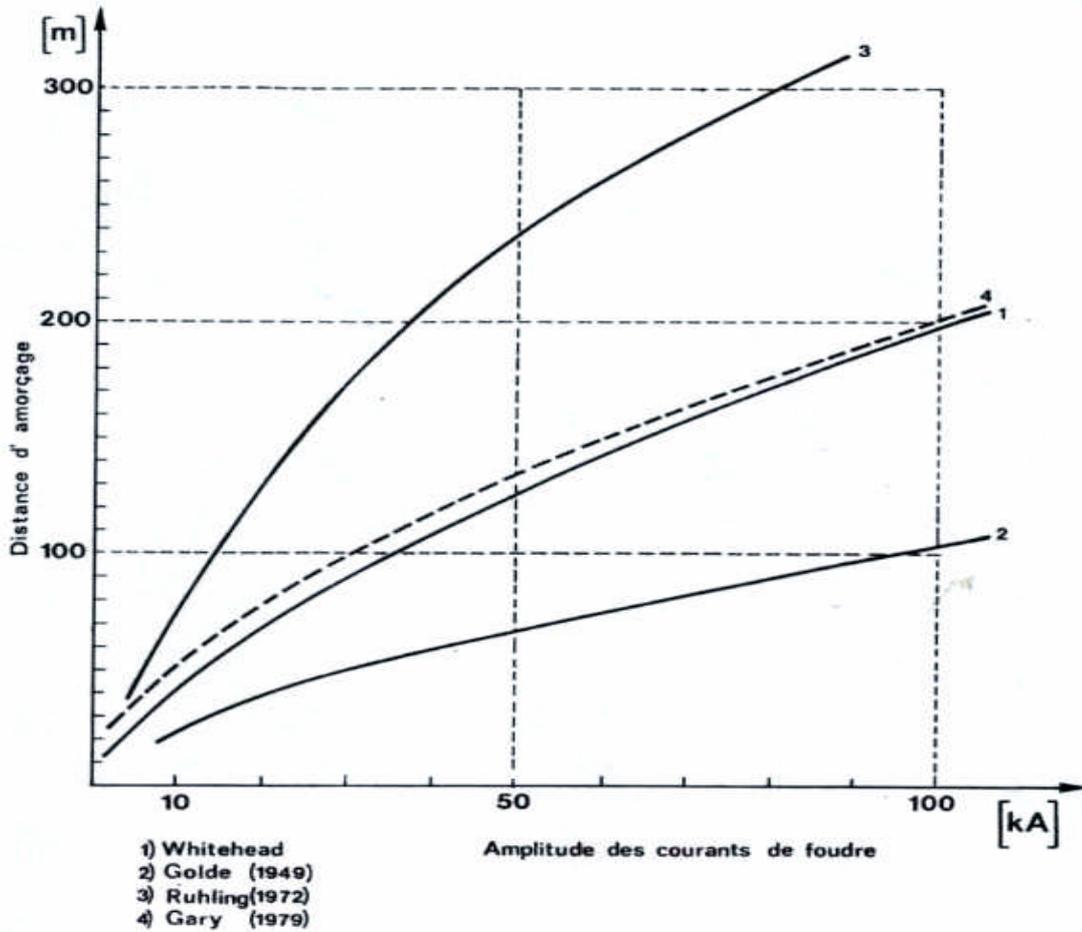
De nombreux auteurs ont proposé diverses méthodes d'estimation numérique de la distance d'amorçage.

Whitehead en accord avec d'autres chercheurs a proposé la relation suivante :

$$D = 10I^{2/3} \tag{I.9}$$

Avec : D en mètres et I en kiloAmpères

La figure (I.9) résume les estimations publiées par divers auteurs [2].



**Figure I.9 :** Distance d’amorçage en fonction de l’amplitude du courant de foudre selon plusieurs auteurs [2]

En pratique, la valeur du champ au sol qui provoque la jonction entre le traceur descendant et la décharge ascendante est de l’ordre de 500kV/m [4], [33]. On peut, à partir des courbes de la figure (I.8), déduire les distances d’amorçage pour les différentes valeurs de crête du courant. Ces valeurs sont portées dans le tableau (I.1) avec les distances données par la formule de whitehead.

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

**Tableau I.1 :** Distance d’amorçage en fonction du courant de crête

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

### I.4.2.3 Méthode de la sphère fictive

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

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

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

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

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

Dans la zone bleue de la figure (I.10), l'impact pour des distances d'amorçages supérieures ou égales à  $D$  ne pourra jamais se produire. Cette zone représente la zone de protection de la tige verticale.

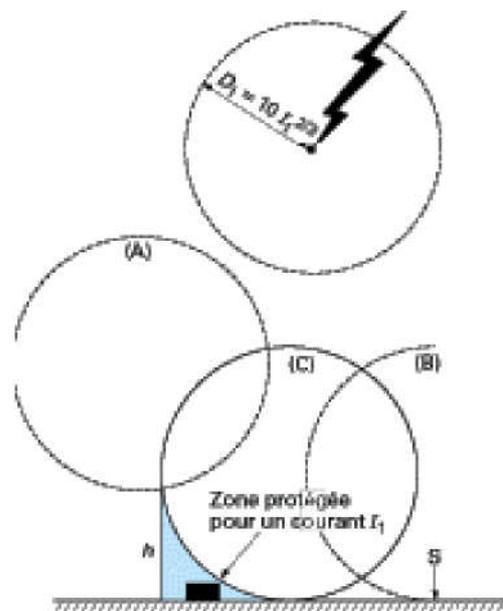
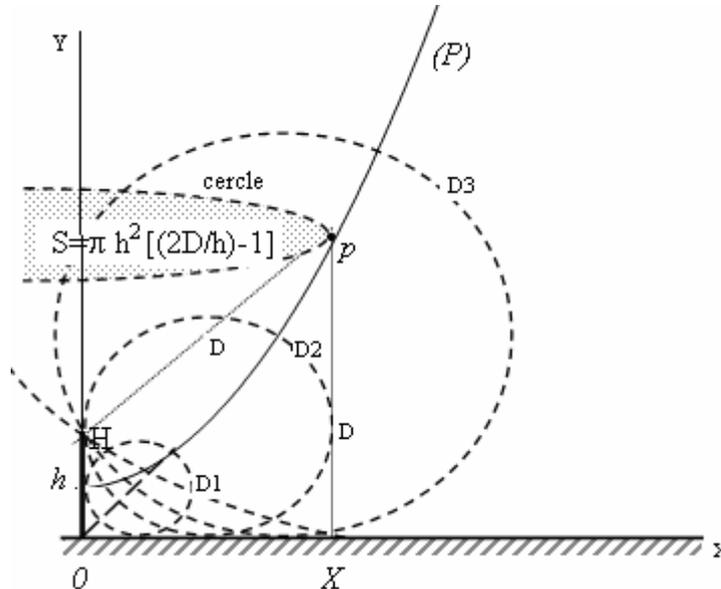


Figure I.10 : Modèle de la sphère fictive

**I.4.2.4 Zone et surface de capture d'une tige verticale**

En considérant l'ensemble des sphères qui touchent la tige et le sol : le lieu des centres de ces sphères délimite la zone d'attraction de cette tige : (fig. I.11)



**Figure I.11 : Zone et surface de capture d'une tige verticale**

Nous constatons sans peine que tant que

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

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

Dans un système de coordonnées  $xoy$ , l'axe  $ox$  représentera le sol, et  $OH=h$  placé sur  $oy$ , représentera la tige verticale.

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

$$h^2 - 2hy + x^2 = 0 \tag{I.10}$$

Selon, la figure (I.12), tout traceur qui se présente dans la zone (I) à droite de la parabole, ne sera jamais capté par la pointe et touchera le sol. Si au contraire un traceur se présente dans la zone (II) compris entre  $(oy)$  et (P), il sera capté par la pointe dès que la distance  $HT$  ( $T$  étant la tête du traceur) devient inférieure ou égale à la distance d'amorçage du coup de foudre considéré.

Si le traceur, arrivant par la zone (II) peut traverser la parabole (P) en  $T_1$  par exemple, sans qu'il soit capté, cela signifie que  $HT_1 > D$

La condition de limite de capture de la pointe (H) est donc que, tout au long de la parabole, la relation  $HT_1 \leq D$  soit satisfaite [32].

Or,  $HT_1=y$ , ordonnée du point  $T_1$ , par définition même de la parabole.

On remplace « y » par « D » dans l'expression (I.10), on aura :

$$h^2 - 2hD + x^2 = 0 \tag{I.11}$$

Le rayon de capture de la tige est :

$$x \leq h \sqrt{\frac{2D}{h} - 1} \tag{I.12}$$

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

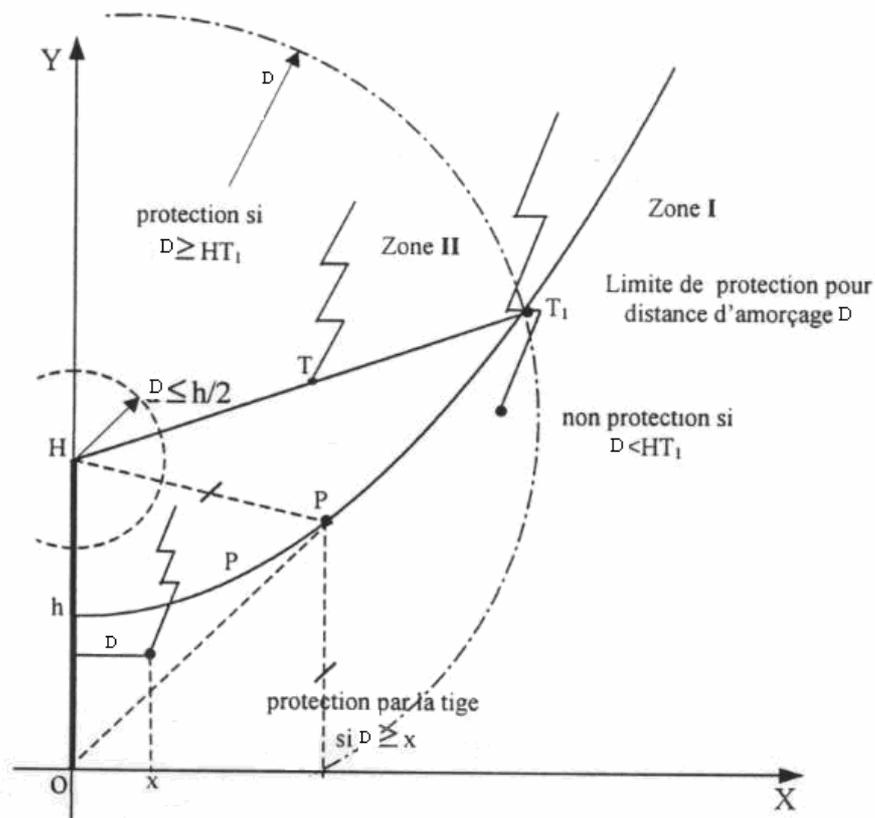


Figure I.12 : Zone de capture d'une tige verticale

Le volume de capture de la tige constitué par un cône prolongé par un parabolôïde de révolution. A tout point P de la parabole correspond un cercle inscrit dans le parabolôïde (figure I.11). Ce cercle définit la surface de capture de la tige relative à une distance d'amorçage D et un courant de foudre d'intensité I donnés. Cette surface s'exprime par [4]:

$$S = \pi h^2 \left( \frac{2D}{h} - 1 \right) \quad (\text{I.13})$$

#### I.4.2.5 Zone de capture d'un fil tendu

Si la hauteur  $h$  du fil est inférieure au rayon de la sphère fictive  $D$ , la détermination de la zone d'attraction du paratonnerre horizontal se fait comme précédemment, en liant les centres des sphères fictives qui touchent simultanément le fil et le sol, le rayon de protection est :

$$x \leq h \sqrt{\frac{2D}{h} - 1} \quad (\text{I.14})$$

Si  $D < h$  : l'effet du paratonnerre n'existe plus, la hauteur maximale d'un objet pour qu'il soit protégé est :  $p = 2D - h$  (figure I.13).

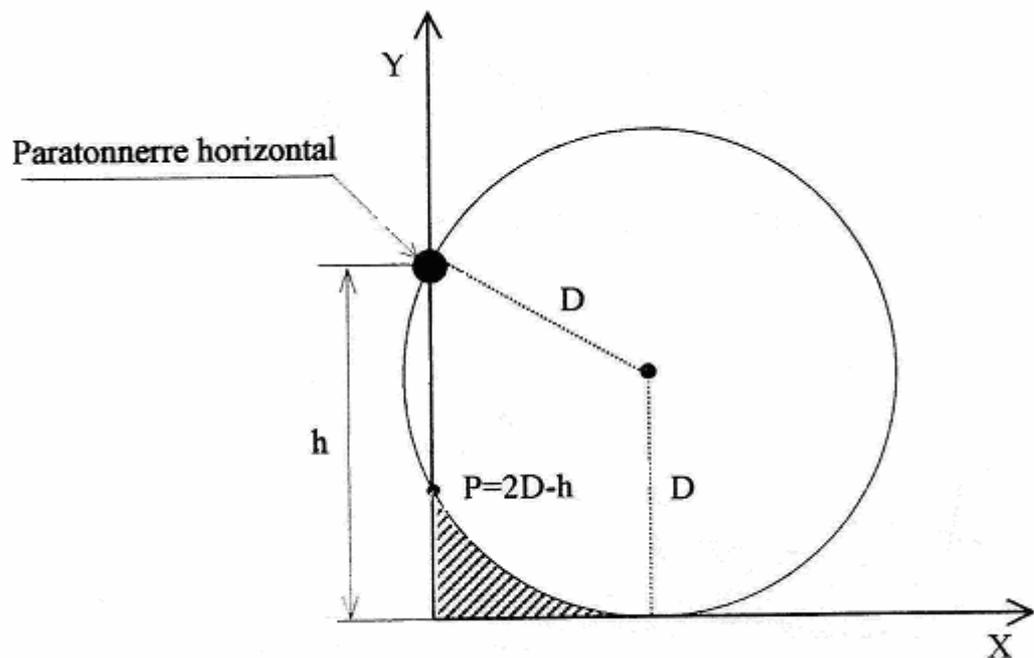


Figure I.13 : Zone de protection d'un paratonnerre horizontal ( $D < h$ ).

## I.5 PROTECTION DES LIGNES AERIENNES CONTRE LA Foudre

### I.5.1 foudroiement d'une ligne

A partir du modèle électro-géométrique, la fréquence de foudroiement d'une ligne se calcule en tenant compte le niveau céramique local et de la surface de capture de l'élément considérée. On définit le foudroiement d'une ligne par le nombre d'impacts de foudre par cent kilomètres de ligne et par an.

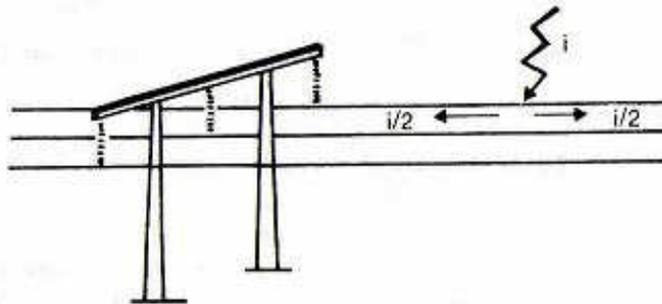
Lorsqu'un coup de foudre tombe sur ou à proximité d'une ligne d'un réseau électrique, il va provoquer une surtension transitoire à front rapide ou très rapide [15] dont l'effet diffère suivant le point d'impact [2] [13] [15].

#### I.5.1.1 Coup de foudre sur un conducteur de phase

Lorsque la foudre tombe sur un conducteur de phase d'une ligne, le courant  $i(t)$  se répartit par moitié de chaque côté du point d'impact et se propage le long des conducteurs qui présentent une impédance d'onde  $Z_c$  (figure I. 14).

Il s'en suit une onde de tension associée :

$$U(t) = Z_c \frac{i(t)}{2} \quad (I.15)$$



**Figure I.14 :** Coup de foudre sur un conducteur de phase [34].

Au niveau d'un pylône où le conducteur est suspendu par une chaîne d'isolateur la tension croît et se propage [34] :

- en onde pleine si  $Z_c \left( \frac{I_{\max}}{2} \right) < U_a$
- en onde coupée si  $Z_c \left( \frac{I_{\max}}{2} \right) \geq U_a$

Avec  $U_a$  : tension d'amorçage à l'onde de choc de la chaîne d'isolateurs ou des éventuels éclateurs de protection.

La valeur limite du courant de foudre au delà de laquelle il y a amorçage, donc interruption de service, est appelée courant critique  $I_c$  :

$$I_c = 2 \frac{U_a}{Z_c} \quad (\text{I.16})$$

### I.5.1.2 Coup de foudre sur un câble de garde ou un pylône

Afin de protéger une ligne des impacts directs de la foudre, on place au dessus des conducteurs actifs un ou plusieurs câbles de garde, que l'on fixe directement au sommet des pylônes, sans aucun isolateur [6]. Ces conducteurs ont pour rôle de capter les décharges et d'écouler les courants de foudre à la terre par l'intermédiaire des pylônes.

La tension aux bornes de la chaîne d'isolateurs dépend de la résistance de prise de terre  $R$  et de la self-inductance  $L$  du pylône. La contrainte appliquée s'écrit :

$$U(t) = Ri(t) + L \frac{di}{dt} \quad (\text{I.17})$$

Cette tension peut atteindre la limite d'amorçage à l'onde de choc de la chaîne d'isolateurs. Il s'agit de « l'amorçage en retour ». Quoiqu'il en soit, l'effet du câble de garde sera globalement bénéfique, puisqu'il conduit à répartir l'écoulement du courant de foudre sur plusieurs pylône, et par conséquent réduit les surtensions appliquées aux chaînes d'isolateurs [2]. La figure I.15 illustre le mécanisme d'amorçage en retour.

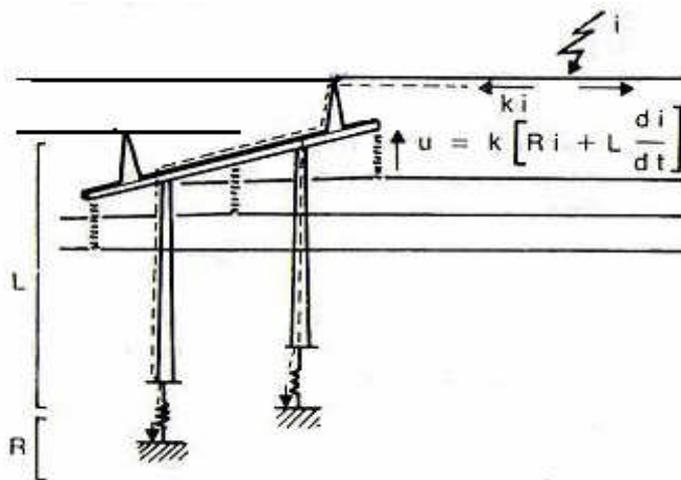


Figure I.15 : Coup de foudre sur un câble de garde [34].

### I.5.1.3 Coup de foudre sur le sol à proximité de la ligne

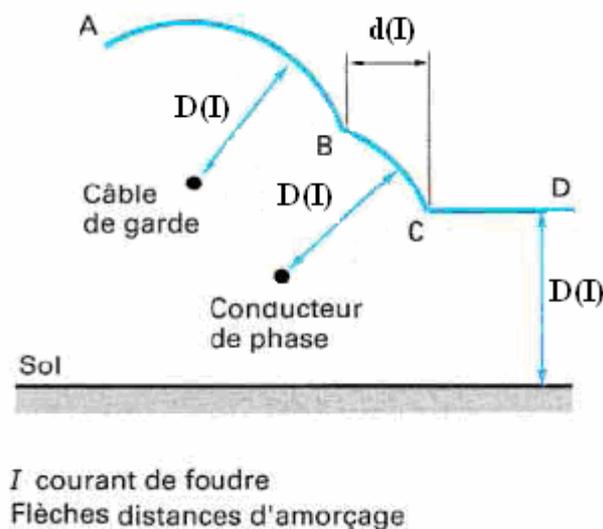
Le couplage électromagnétique entre le canal de foudre et la ligne aérienne est la cause de surtensions induites sur cette dernière. En effet, ces surtensions n'ont pas d'importance sur le réseau de transport d'énergie électrique, car elles restent inférieures au niveau de tenue des lignes et des matériels.

## I.5.2 Câble de garde et défauts d'écran

### I.5.2.1 Principe de protection

Considérons un traceur par bonds négatif descendant vers le sol au voisinage d'une ligne aérienne équipée d'un câble de garde. À une certaine distance du sol, il convient de savoir sur quel objet va se terminer la descente du traceur [15].

Le modèle électrogéométrique modélise ce concept par la distance d'amorçage  $D(I)$ . Si toutes les distances d'amorçage sont égales (câble de garde, conducteur de phase, sol), le traceur terminera sa descente sur la structure la plus proche. La figure (I.16) schématise cette situation pour une valeur donnée du courant de foudre prospectif.



**Figure I.16 :** Ligne protégée par un câble de garde [15].

Les arcs de cercle centrés sur le câble de garde et le câble de phase ont un rayon égal à la distance d'amorçage  $D(I)$  et la droite horizontale DC est aussi à une distance  $D(I)$  du sol.

- Si le traceur par bonds descendant négatif, ayant le courant prospectif  $I$  touche :
- l'arc AB, le traceur terminera sa descente sur le câble de garde, ce qui est le but recherché.
  - le segment CD, il terminera sa descente sur le sol.
  - l'arc BC, il terminera sa descente sur le conducteur de phase, on dit qu'il y a alors défaut d'écran.

### I.5.2.2 Nombre de défauts d'écran

Il est clair que tout traceur tombant sur la bande  $d(I)$  entraînera un défaut d'écran. Le nombre de défauts d'écrans  $dN_e$  sur la ligne de longueur  $L$ , pour des valeurs de crête de courant de foudre comprises entre  $I$  et  $I + dI$ , est [15] :

$$dN_e = n_s L d(I) f_s(I) dI \quad (\text{I.18})$$

Avec :

$n_s$  : Densité de coups de foudre.

$f_s(I)$  : Densité de probabilité au sol des valeurs de crête des courants de foudre.

Si le courant  $I$  augmente, la distance de capture  $D(I)$  augmente et  $d(I)$  diminue. A partir d'une certaine valeur du courant  $I_{\max}$ ,  $d(I)$  devient nul et il n'y a plus de défaut d'écran à partir de ce courant. En fait, seuls les courants de foudre faibles (quelques kA) peuvent provoquer des défauts d'écran.

Pour qu'il y ait défaut, il faut que la valeur crête du courant de foudre soit supérieure au courant critique  $I_c$ . Le nombre de défauts d'écran devient :

$$N_e = n_s L \int_{I_c}^{I_{\max}} d(I) f_s(I) dI \quad (\text{I.19})$$

C'est le nombre de défauts que les concepteurs essaient de minimiser par un choix judicieux des positions du câble de garde et des conducteurs de phases.

### 1.5.3 Positionnement du câble de garde

#### 1.5.3.1 Construction géométrique du modèle

Le positionnement du câble de garde est basé sur le principe du modèle électrostatique. Ce dernier se construit de la façon suivante [13] :

On considère un système d'axes  $xoz$ , dans lequel l'axe  $ox$  représente le sol et on place un conducteur actif de ligne en  $S$  (figure I.17)

On trace la parabole  $P$  définie par le lieu des points à égale distance du conducteur  $S$  et du sol. D'après l'hypothèse du modèle électrostatique, la zone I est une région sans danger pour la ligne.

On trace un arc de cercle  $s$  centré sur la phase  $S$ , de rayon  $d_c$  et coupant la parabole en  $M$ . La zone II est caractérisée par le fait que tout traceur par bond pénétrant dans celle-ci, touchera le conducteur  $S$  en absence du câble de garde. Cependant, comme cette zone est caractérisée par des distances d'amorçage inférieure à  $d_c$ , le courant présumé correspondant sera inférieur au courant critique  $I_c$  et l'impact de la foudre n'aura pas de conséquences.

Il reste donc la zone III dans laquelle le câble de garde  $G$  devra jouer son rôle. Traçons l'arc  $m$  de rayon  $d_c$  et de centre le point  $M$ . la condition que doit remplir le point  $G$  est :  $QG < QS$ , quelle que soit la position d'un point  $Q$  dans la zone III. En effet tout point situé au dessus de la médiatrice  $MN$  remplit cette condition. L'arc de cercle  $m$  est le lieu d'efficacité optimale du câble de garde protégeant le conducteur  $S$ .

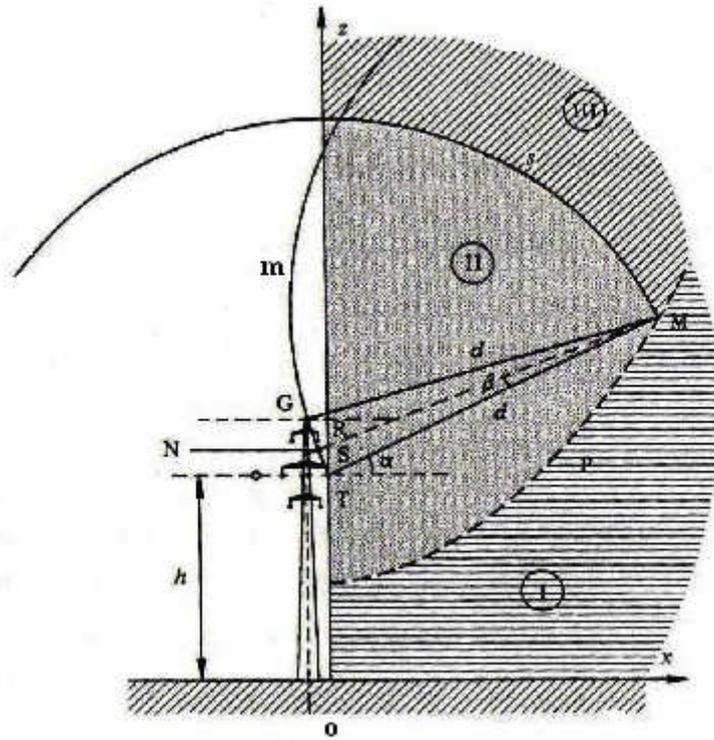


Figure I.17 : Construction du modèle électrogéométrique dans le cas d'une ligne [13].

### I.5.3.2 Angle de protection

L'angle de protection  $\theta_0$  est défini comme l'angle  $\overline{GS} - \overline{GO}$ . Il est calculé comme

$$\theta_0 = \alpha - \beta$$

$$\alpha = \arcsin\left(1 - \frac{h}{d_c}\right) \quad [\text{rad}] \quad (\text{I.20})$$

Où  $h = \overline{SO}$  est la hauteur de la phase S par rapport au sol.

$$\beta = \arcsin\frac{n}{2d} \quad [\text{rad}] \quad (\text{I.21})$$

Où  $n = \overline{GS}$  est la distance entre le conducteur de garde G et la phase S, alors :

$$\theta_0 = \arcsin\left(1 - \frac{h}{d_c}\right) - \arcsin\frac{n}{2d_c} \quad [\text{rad}] \quad (\text{I.22})$$

Les angles de protection couramment adoptés sont de l'ordre de  $30^\circ$  [13].

### I.5.4 CONCLUSION

On peut dire qu'aujourd'hui, les dispositifs de protection et leurs techniques de mise en œuvre sont assez perfectionnés pour que les accidents et les dégâts puissent être évités dans la grande majorité des cas.

De mêmes les réseaux électriques ont bénéficié de ces travaux, de sorte qu'aujourd'hui, ils ne subissent plus qu'exceptionnellement des dommages, et l'alimentation électrique n'est plus que rarement interrompue lorsqu'ils sont frappés par la foudre [6].

## **CHAPITRE II**

# ***METHODES D'EVALUATION DU CHAMP ELECTRIQUE***

## INTRODUCTION

L'évaluation du champ électrique joue un rôle très important dans la construction et la résolution des problèmes d'équipements utilisés sous haute tension.

Les méthodes d'évaluation du champ électriques sont [35] :

- Méthodes analogiques
- Méthodes analytiques et numériques
- Méthodes expérimentales

Nous nous sommes intéressés aux deux dernières méthodes, pour cela nous décomposons ce chapitre en deux parties essentielles :

- ▶ Dans la première partie, nous présentons sommairement certaines méthodes analytiques et numériques de calcul du champ en donnant plus de détails sur la méthode des éléments finis que nous avons retenue pour le calcul du champ dans notre cas.
- ▶ La deuxième partie est consacrée aux différentes méthodes de mesure de champ électrique et nous nous intéressons plus particulièrement à celle utilisée dans notre expérimentation à savoir la méthode de la sonde à capacité répartie. Cette méthode a été élaborée au laboratoire de physique de la décharge de l'Ecole Supérieure d' Electricité (Supélec) dans une étude précédemment effectuée en collaboration avec le Laboratoire de Haute Tension de l'ENP [3].

## II.1 METHODES ANALYTIQUES ET NUMERIQUES

Dans ce qui suit nous présentons sommairement certaines méthodes analytiques et numériques de calcul du champ en donnant plus de détails sur la méthode des éléments finis que nous avons retenue pour le calcul du champ dans le chapitre V.

### II.1.1 Méthode des charges fictives

Son principe est basé sur la simulation de la distribution superficielle des charges électriques à la surface des électrodes par une distribution discrète des charges fictives à l'intérieur des conducteurs. Leurs emplacements et leurs grandeurs doivent satisfaire les conditions aux limites de la tension connue sur la surface des électrodes.

La précision de cette méthode dépend du nombre des charges fictives introduites pour la résolution du système à étudier.

### II.1.2 Méthode des différences finies

C'est une méthode basée sur l'approximation de l'opérateur différentiel par un opérateur aux différences finies. Le système d'équations résultant est traité sous forme matricielle. Cette méthode n'est pas pratique ou peu précise lorsque les champs ne sont pas homogènes [35].

Les principales étapes à suivre pour exécuter cette méthode sont :

1. La discrétisation du domaine d'étude pour définir le réseau de nœuds à considérer.
2. l'écriture des équations potentielles aux différences finies en chaque nœud.
3. la résolution du système d'équations.

Nous utiliserons par la suite l'équation  $\vec{E} = -\text{grad}V$  pour le calcul de l'intensité du champ électrique en chaque point du domaine, nous noterons aussi que la précision de cette méthode dépend de l'ordre atteint dans le développement en série de Taylor utilisé pour l'approximation des dérivées partielles par des différences finies et aussi du pas de discrétisation.

### II.1.3 Méthode des éléments frontières

Méthode numérique basée sur la discrétisation de la frontière uniquement plutôt que le domaine tout entier, d'où la convergence rapide de la solution. La formulation de cette méthode se repose sur la méthode générale des résidus pondérés [36].

Pour une résolution numérique de la méthode des intégrales frontières, il faut suivre les étapes suivantes :

1. Discrétisation de la frontière.
2. Calcul des coefficients d'influence et formation du système matriciel.
3. Résolution des équations.

## II.1 .4 Méthode des éléments finis

### Introduction

La méthode des éléments finis est un outil mathématique appliqué pour résoudre les équations différentielles avec conditions aux limites.

Cette méthode consiste à "minimiser l'énergie" dans la région d'intérêt. Celle-ci est découpée en petits éléments (triangles, rectangles, ..) dans chacun desquels on admet une variation linéaire ou quadratique du champ, ce qui permet une résolution matricielle simple. Pour une bonne précision, il est cependant nécessaire de diviser une région comportant de grandes variations de champ en de plus nombreux éléments, il existe différentes approches à l'approximation par éléments finis, mais la plus utilisée est la méthode variationnelle [35] [37] [38].

La méthode variationnelle substitue la recherche du minimum d'une fonctionnelle à la résolution directe de l'équation aux dérivées partielles. La méthode s'applique essentiellement aux problèmes pour lesquels on connaît la fonctionnelle, ce sont les problèmes stationnaires telle que l'équation de Poisson :

$$\nabla \cdot (\varepsilon \cdot \nabla V) = -\rho \quad (\text{II.1})$$

Avec :

$V$ : la fonction recherchée,

$\varepsilon, \rho$ : Les caractéristiques physiques du milieu.

En effet, pour les équations décrivant les phénomènes stationnaires, la fonctionnelle à minimiser est l'énergie [22].

#### II.1.4.1 Conditions aux limites

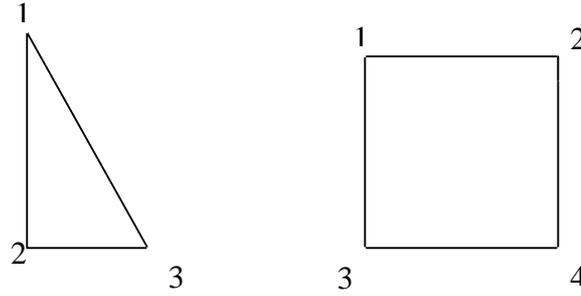
Elles concernent tous les points qui sont sur le bord du maillage (la frontière du domaine). Il y a deux types de conditions aux limites [37]:

- ▶ Type DIRICHLET: la valeur de la fonction est connue.
- ▶ Type NEUMANN: la dérivée normale de la fonction est nulle.

#### II.1.4. 2 Maillage

La première étape d'une résolution en éléments finis consiste à discrétiser le domaine d'étude concerné à l'aide de triangles, de quadrangles, de tétraèdres et autres de telle façon à former un maillage (Figure II.14).

Dans notre étude, le maillage est effectué par des éléments triangulaires.



a. élément triangulaire

b. élément rectangulaire

**Figure II.1:** Différents types d'élément de maillage [37].

Le maillage doit contenir toutes les informations utiles lors de traitement de toutes les étapes de calcul. La présentation du maillage doit contenir pour chaque élément les informations suivantes [37] :

- ▶ La topologie de l'élément (coordonnées des sommets),
- ▶ Le numéro de l'élément,
- ▶ La nature physique de sous-domaine que l'élément renferme,
- ▶ Les potentiels aux nœuds tout en tenant compte des conditions aux limites et des valeurs imposées,
- ▶ Les numéros des nœuds.

### II.1.4. 3 Formulation du potentiel

Considérons un élément fini triangulaire (e) dont les trois sommets sont indiqués par les chiffres 1, 2, 3. Le potentiel approximé sur cet élément sous une forme bilinéaire est [37] [38] :

$$V^{(e)}(x, y) = a^{(e)} + b^{(e)}x + c^{(e)}y \quad (\text{II.2})$$

Où les coefficients  $a^{(e)}$ ,  $b^{(e)}$ ,  $c^{(e)}$  peuvent être calculés en fonction des valeurs du potentiel aux sommets 1, 2, 3 soient  $V_1, V_2, V_3$  :

$$\begin{aligned} V_1 &= a^{(e)} + b^{(e)}x_1 + c^{(e)}y_1 \\ V_2 &= a^{(e)} + b^{(e)}x_2 + c^{(e)}y_2 \\ V_3 &= a^{(e)} + b^{(e)}x_3 + c^{(e)}y_3 \end{aligned} \quad (\text{II.3})$$

Le système d'équation (II.3) est un système de trois équations à trois inconnues dont la résolution donne les solutions suivantes :

$$\begin{aligned} a^{(e)} &= [(x_2y_3 - x_3y_2)V_1 + (x_1y_3 - x_3y_1)V_2 + (x_1y_2 - x_2y_1)V_3] / \det \\ b^{(e)} &= [(y_2 - y_3)V_1 + (y_3 - y_1)V_2 + (y_1 - y_2)V_3] / \det \\ c^{(e)} &= [(x_3 - x_2)V_1 + (x_1 - x_3)V_2 + (x_2 - x_1)V_3] / \det \end{aligned} \quad (\text{II.4})$$

Avec  $\det$  : déterminant du système (II.3)

$$\det = \det \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{vmatrix} = (x_2 y_3 - x_3 y_2) - (x_1 y_3 - x_3 y_1) + (x_1 y_2 - x_2 y_1) \quad (\text{II.5})$$

On remplace les coefficients  $a^{(e)}$ ,  $b^{(e)}$ ,  $c^{(e)}$  dans la relation (II.2) et en mettant chacun des potentiels  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  en facteur, on obtient :

$$V^{(e)}(x, y) = \phi_1^{(e)}(x, y) \cdot V_1 + \phi_2^{(e)}(x, y) \cdot V_2 + \phi_3^{(e)}(x, y) \cdot V_3 \quad (\text{II.6})$$

Avec :

$$\begin{aligned} \phi_1^{(e)}(x, y) &= [(x_2 y_3 - x_3 y_2) + (y_2 - y_3)x + (x_3 - x_2)y] / \det \\ \phi_2^{(e)}(x, y) &= [(x_3 y_1 - x_1 y_3) + (y_3 - y_1)x + (x_1 - x_3)y] / \det \\ \phi_3^{(e)}(x, y) &= [(x_1 y_2 - x_2 y_1) + (y_1 - y_2)x + (x_2 - x_1)y] / \det \end{aligned} \quad (\text{II.7})$$

$\phi_1^{(e)}$ ,  $\phi_2^{(e)}$  et  $\phi_3^{(e)}$  sont appelées fonctions bilinéaires en  $x$  et  $y$ . On note :

$$V(x, y) = [\phi]^T \cdot [V] \quad (\text{II.8})$$

$$\text{Avec } [V] = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix}$$

#### II.1. 4. 4 Résolution de Laplacien

La résolution de Laplacien revient à résoudre la formulation variationnelle.

D'après la relation (II.8) la formulation variationnelle s'écrit sous la forme suivante :

$$F = \frac{1}{2} [V]^T \cdot [M] \cdot [V] \quad (\text{II.9})$$

Afin de minimiser l'énergie, la dérivée de la formulation variationnelle par rapport au potentiel  $V$  doit être nulle :

$$\frac{\partial F}{\partial V} = 0 \quad (\text{II.10})$$

$$[M] \cdot [V] = 0 \quad (\text{II.11})$$

Avec  $[M]$  qui intervient sous la forme d'une somme intégrale appliquée à chacun des éléments de découpage.

Dans le cadre de notre travail, nous exploiterons un logiciel de calcul, basé sur la méthode des éléments finis, FEMM (Finite Element Method Magnetics) [39].

## II. 2 METHODES EXPERIMENTALES

Il existe différentes techniques, directes ou indirectes, de mesure de champ que nous énumérons là-dessous. Elles permettent de donner des valeurs de l'intensité du champ électrique à la surface du plan en fonction de la distance inter électrode [13].

### II. 2. 1 METHODE DIRECTE

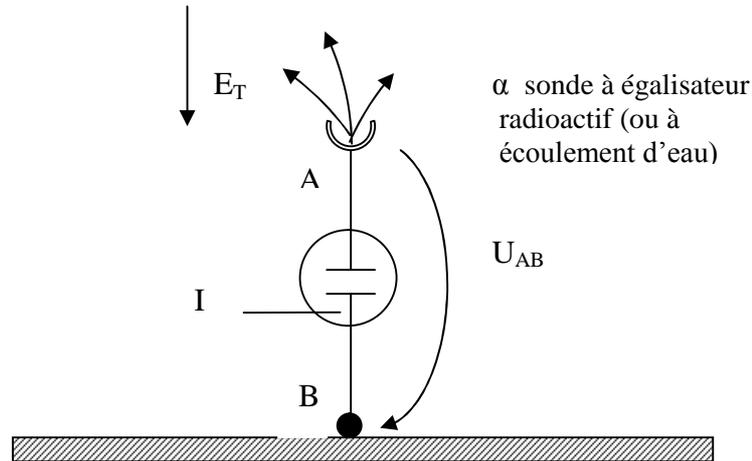
Cette méthode consiste à déterminer le champ  $E_T$  à la surface de la terre à partir d'un voltmètre électrostatique qui mesure la différence de potentiel  $U$  entre un point  $B$  de la terre et un point  $A$  située à une altitude connue (fig II.2).

Etant donné que la résistance interne de la source est très grande (la conductivité électrique atmosphérique au niveau du sol est très faible  $\sigma = 23 \cdot 10^{-15}$  S/m, par beau temps), il est nécessaire d'utiliser un ioniseur radioactif. On a recours, en général, à une substance émettrice de particules  $\alpha$  (noyau d'hélium  ${}^4_2He$ ) lourdes et peu pénétrantes, générées par des substances telles que l'uranium. L'égalisateur radioactif est placé sur la sonde du voltmètre pour augmenter localement la conductivité électrique de l'air, afin de délivrer un courant  $I$  suffisant ou, en d'autres termes, de permettre à la sonde d'acquiescer le potentiel du point auquel elle se trouve :

$$U = V_A - V_B = \int_A^B E_T dr_{AB} \quad V \quad (II.12)$$

D'où :

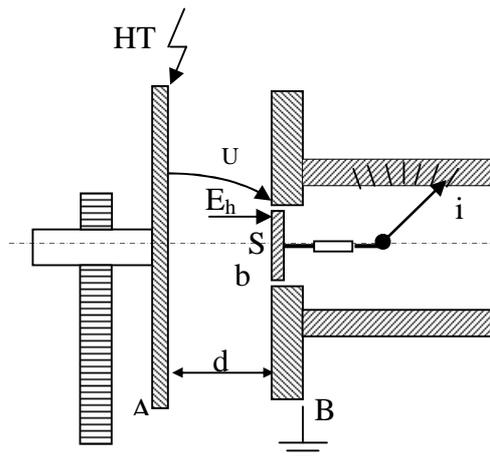
$$E_T = \frac{U}{AB} \quad V/m$$



**Figure II.2 :** Méthode directe de mesure des champs électriques [13]

### II.2.1.1 Voltmètre électrostatique

Ce voltmètre est constitué de deux électrodes planes et parallèles A et B telles que le champ électrique  $E_h$  soit homogène entre elles [33]. La pression électrostatique subie par l'électrode de mesure b, placée au centre de l'électrode B, entraîne la déviation de l'aiguille i se déplaçant sur une échelle pouvant être étalonnée directement en kilovolts (Figure.II.3). Les gammes de mesure de l'appareil se règlent en modifiant la distance d.



**Figure.II.3 :** Voltmètre électrostatique

## II. 2. 2 METHODE INDIRECTE DE WILSON

Cette méthode consiste à déterminer le champ électrique  $E_{Tm}$ , à la surface du sol, en mesurant les charges électriques  $Q$  à la surface de celui-ci.

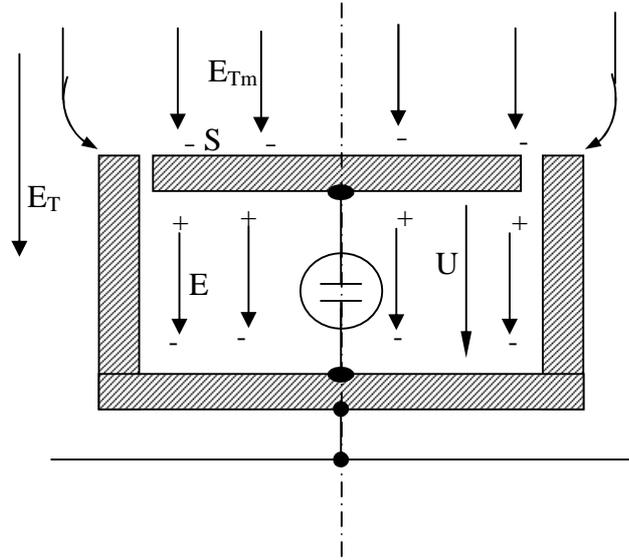


Figure.II.4 : Méthode de Wilson

D'après le théorème de Gauss on a :

$$\varepsilon_0 ES = CU \quad (\text{II.13})$$

$C$  : la capacité de l'électrode de surface  $S$ , contre le boîtier mis à la terre. Alors le champ électrique  $E_{Tm}$  est égal à :

$$E_{Tm} = \frac{CU}{\varepsilon_0 S} \quad (\text{II.14})$$

Toute sonde placée dans un champ électrique provoque des perturbations à ce dernier. Pour définir l'acuité maximale d'un champ régnant entre deux électrodes de forme géométrique quelconque, on peut comparer le champ électrique homogène équivalent  $E_T = U/d$  entre ces deux électrodes au champ électrique maximal  $E_{Tm}$ . C'est pour cette raison que l'on introduit un facteur de forme  $\eta$ .

$$E_T = \eta E_{Tm}$$

Avec :  $E_{Tm}$  : le champ électrique mesuré.

$E_T$  : le champ électrique à la surface du sol.

### II.2.3 METHODE INDIRECTE DU VOLTMETRE ROTATIF (MOULIN A CHAMP ELECTRIQUE)

La méthode du voltmètre rotatif pour la détermination du champ électrique  $E_{Tm}$  à la surface du sol est basée sur la mesure du courant  $i(t)$ , résultant de la variation de la capacité ( $dC/dt$ ) entre un rotor tournant à la vitesse  $n$  et un stator fixe. La valeur moyenne du courant mesuré  $i(t)$  est [13] :

$$I_m = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt = \frac{1}{T} Q(t) \quad (A) \quad (II.15)$$

Comme la vitesse de rotation  $n$  (vitesse angulaire en tour par seconde) est liée à la période  $T$  par la relation :

$$n = \frac{1}{T} \quad (s^{-1})$$

Alors :  $Q(t) = I_m / n \quad (C) \quad (II.16).$

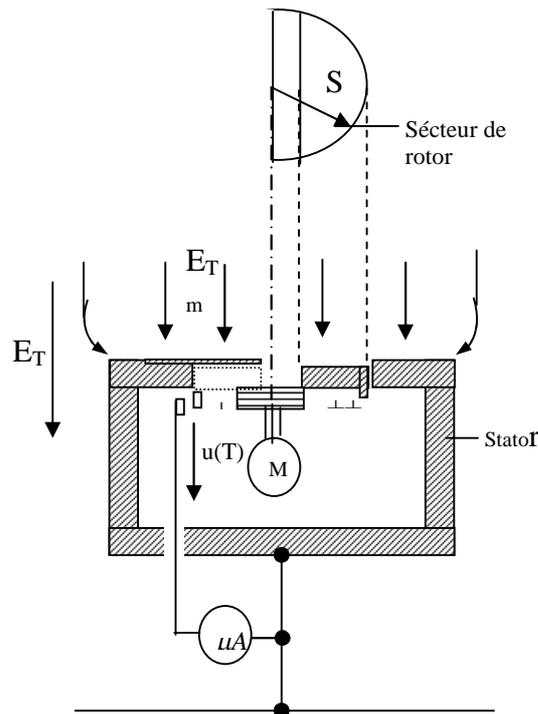


Figure II.5 : Méthode du voltmètre rotatif.

La densité de charge à la surface de la partie de la sonde exposée aux lignes de champ est :

$$\sigma_s = \epsilon_0 \cdot E_{Tm} \quad (II.16)$$

Avec

$$\sigma_s = \frac{Q}{S/2}$$

D'où: S: section de la sonde

$E_{Tm}$ : le champ mesuré

On obtient :

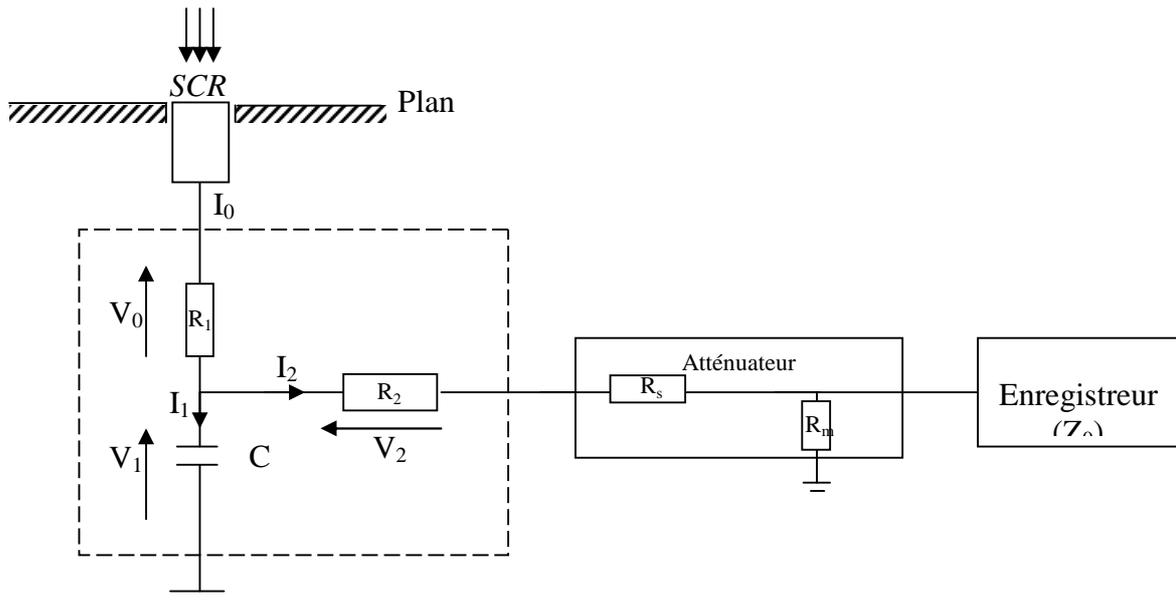
$$E_{Tm} = \frac{\delta_s}{\epsilon_0} = \frac{2 \cdot I_m}{\epsilon_0 \cdot S \cdot n} = \frac{2 \cdot I_m}{\epsilon_0 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot n} \quad V/m \quad (\text{II.17})$$

## II.2.4 METHODE DE LA SONDE A CAPACITE REPARTIE (SCR)

Une méthode de mesure du champ électrique, lors de la décharge couronne négative en géométrie tige-plan, est développée au moyen d'une sonde à capacité répartie. Elle est incorporée, à un même niveau de surface, sur un système d'électrodes tige-plan.

La sonde à capacité répartie a une grande précision, avec une large bande passante, utilisée pour les méthodes de mesure très rapide et sans contact.

Cette méthode consiste à déterminer le champ électrique  $E_T$  à la surface du sol, en mesurant la quantité des charges (Q) recueillie à la surface de la sonde. Les mesures sont effectuées à l'aide d'un dispositif de mesures constitué par une résistance et un condensateur monté en filtre passe-bas, comme le montre la figure II.6.



**Figure II.6 :** Méthode de la sonde à capacité répartie (SCR)

L'antenne est constituée de deux résistances  $R_1$  et  $R_2$  ainsi que d'une capacité  $C$ . Il est nécessaire d'utiliser un diviseur de tension (Atténuateur  $R_m$ ,  $R_s$ ) pour recueillir le signal de la tension  $V_1$  aux bornes de la capacité  $C$ . Le signal sera visualisé sur l'oscilloscope (Enregistreur).

## II.2.5 CONCLUSION

Les diverses méthodes de mesure de champ électrique permettent de donner les valeurs de l'intensité du champ électrique à la surface du plan en fonction de la distance inter électrodes ( $h$ ). Ces résultats pourront servir à déterminer d'autres paramètres, telles que la conductivité de l'effet couronne et la densité de la charge d'espace, au voisinage immédiat du plan. Dans notre travail, nous utilisons la méthode de la sonde à capacité répartie, pour déterminer le champ électrique au plan, pour la pointe sous tension impulsionnelle.

**CHAPITRE III**

***TECHNIQUES EXPERIMENTALE***

### III.1 INTRODUCTION

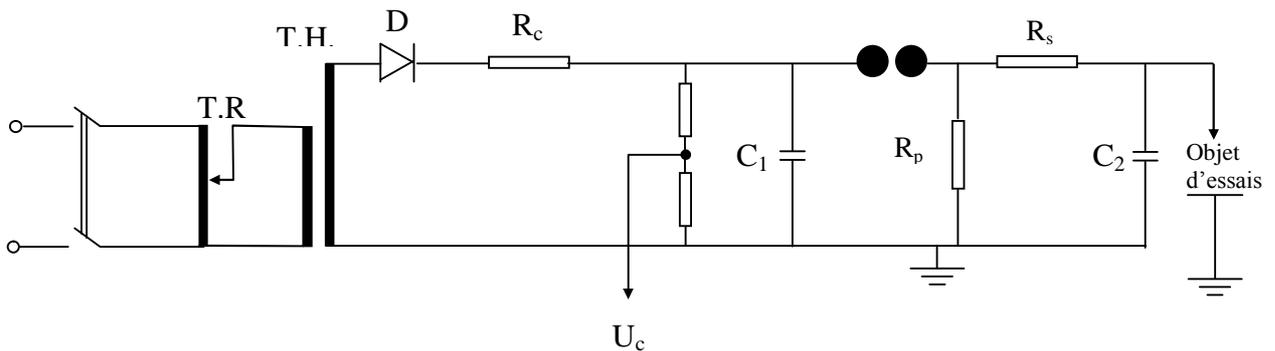
Dans ce chapitre, Nous présentons le circuit d'essai ainsi que la méthode utilisée pour déterminer la tension  $U_{0\%}$  du système pointe-plan, qui sera appliquée par la suite au système avec paratonnerre horizontal. Nous donnons le circuit utilisé pour la mesure du champ électrique au sol par la méthode de la sonde à capacité répartie (S.C.R).

### III.2 GENERATEUR DE CHOCS DE Foudre DE L'ENP

#### III.2.1 Description

Le générateur de chocs est de type Marx, avec des dispositifs de charge et de commande installés sur un châssis unique et mobile [40], ayant les caractéristiques suivantes :

- Nombre d'étages = 8
- Tension nominale = 600 kV (tension de charge nominale par étage égale à 75 kV)
- Energie = 4 kJ



**Figure III.1** : Schéma simplifié du générateur de choc

Avec :

- T.R : transformateur de réglage
- T.H.T : Transformateur de haute tension
- D : Redresseur
- $R_c$  : Résistance de charge.
- $R_s$  : Résistance série équivalente  $((8 \times 10) + 150) \Omega$
- $R_p$  : Résistance parallèle équivalente  $8 \times 430 \Omega$
- $C_1$  : Condensateur de choc 22.5 nF.
- $C_2$  : Condensateur de charge 2 nF.

La tension continue destinée à la charge du générateur de choc est fournie par un redresseur D de tension monophasée. Ce dernier est alimenté par un transformateur de haute tension (T.H.T). La charge des condensateurs de choc s'effectue à travers des résistances  $R_c$ . La résistance d'amortissement  $R_c$  empêche une charge trop rapide de  $C_1$ .

La constante de temps lors du processus de charge  $\tau = R_c.C_1$  est de l'ordre de 10 à 20 s. Lorsque la tension disruptive  $U_o$  de l'éclateur E est atteinte,  $C_1$  se décharge brusquement dans  $C_2$  à travers les résistances  $R_s$  et  $R_p$ . La résistance de queue d'onde  $R_p$  étant beaucoup plus grande que  $R_s$ , la capacité  $C_2$  va se charger rapidement et  $C_1$  se décharge lentement. La tension générée appliquée à l'objet d'essais est égale à la tension aux bornes d'un étage multipliée par le nombre d'étages qui est égal à 8 dans notre cas.

### III.2.2 Tension de choc délivrée

La tension délivrée par le générateur de choc, simulant les surtensions d'origine atmosphérique, est une impulsion unipolaire bi-exponentielle dont la forme est normalisée conformément aux recommandations de la CEI 60 [41]. L'onde délivrée est définie par les paramètres suivants:

- La constante de temps de front  $\tau_f$
- La constante de temps de mi-amplitude  $\tau_q$
- L'amplitude maximum  $U_m$
- La forme de la tension générée par le générateur de choc répond à l'équation suivante:

$$U(t) = U_m[\exp(-t/\tau_q) - \exp(-t/\tau_f)] \quad (\text{III.1})$$

La CEI 60 donne l'onde de forme normalisée dite « choc 1,2/50  $\mu\text{s}$  » comme l'onde la plus adoptée pour les essais en choc de foudre. La durée conventionnelle de front  $T_f$  de cette onde est de 1.2  $\mu\text{s}$  et la durée conventionnelle de mi-amplitude  $T_q$  est de 50  $\mu\text{s}$ . En effet le choc 1.2/50  $\mu\text{s}$  simule assez bien la forme de l'onde de tension de foudre.

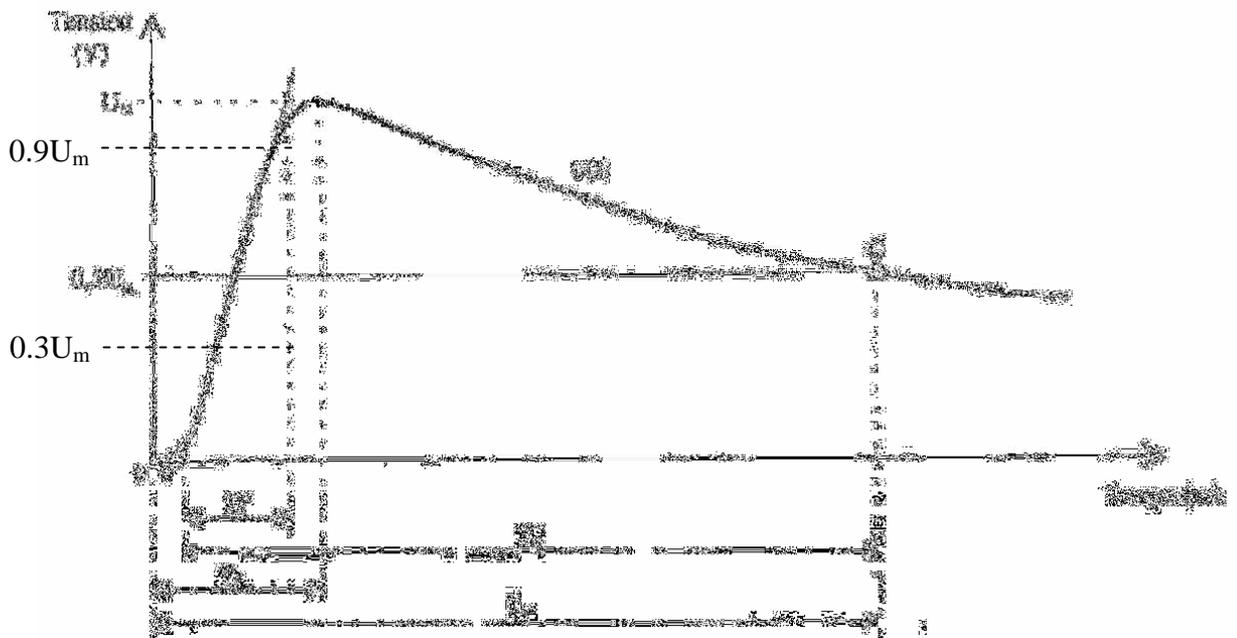


Figure III.2 : Forme de l'onde de choc de foudre [41].

O : Origine de la tension de choc

O' : origine conventionnelle de la tension de choc

T<sub>f</sub> : durée de front

T<sub>f</sub>' : durée conventionnelle de front

T<sub>q</sub> : durée de mi-amplitude

T<sub>q</sub>' : durée conventionnelle de mi-amplitude

### III.2.3 Détermination de la tension U<sub>0%</sub>

La tension U<sub>0%</sub> est la tension la plus élevée qu'on peut appliquer à un système d'intervalle d'air sans qu'il y ait décharge. Pour déterminer cette tension, nous utilisons la méthode des paliers multiples constants. Elle consiste à appliquer trois paliers de tension différents avec application de 20 chocs par palier. Le temps entre deux chocs successifs est de l'ordre de 30 secondes. Plus le nombre de paliers appliqué est grand plus l'interpolation des points sera meilleure et donc une bonne précision lors de l'extrapolation pour déterminer U<sub>0%</sub>. En effet, cette dernière correspond à la fréquence de décharge de 0.1% sur une échelle gauss-arithmétique.

Les fréquences de décharge en fonction des tensions d'essais trouvées sont généralement distribuées selon une régression linéaire sur une échelle gauss-arithmétique. Ceci correspond à ce qu'ont obtenu d'autres auteurs [3] [23] [26] [42] [43].

La distribution normale a été donc vérifiée et admise dans notre présente étude.

### III.2.4 Corrections atmosphériques

La tension de décharge disruptive dépend des conditions atmosphériques régnantes. En appliquant les facteurs de correction, une tension mesurée peut être convertie à la valeur qui aurait été obtenue sous les conditions atmosphériques de référence. Réciproquement, une tension d'essai spécifiée pour les conditions de référence peut être convertie en la valeur équivalente dans les conditions régnant au cours de l'essai.

Dans la CEI 60 [41], on définit deux facteurs de corrections. La tension de décharge est proportionnelle à k<sub>d</sub> / k<sub>h</sub>.

#### III.2.4.1 Facteur de correction de densité relative de l'air k<sub>d</sub>

Dans les conditions atmosphériques de référence dites normales, c'est à dire:

Température ambiante T<sub>0</sub> = 293 K

Pression atmosphérique P<sub>0</sub> = 1013 mbar (= 760 mmH)

Le facteur k<sub>d</sub> est donné par :

$$k_d = \left( \frac{P}{P_0} \right)^m \left( \frac{T_0}{T} \right)^n \quad (\text{III.2})$$

La pression P est en mbar et la température T en K.

Les exposants m et n dépendent de la forme d'onde. Dans le cas d'un intervalle pointe-plan soumis à une onde de choc de foudre, m et n sont égaux à l'unité.

### III.2.4.2 Facteur de correction de l'humidité $k_h$

De façon semblable, le facteur de correction de l'humidité est donné par la CEI 60 par:

$$k_h = (k)^w \quad (\text{III.3})$$

L'exposant  $w$  dépend de la forme d'onde. Dans le cas d'un intervalle pointe-plan soumis à une onde de choc de foudre négatif  $w$  est égal à 0. Ainsi, nous ne tiendrons pas compte de ce facteur.

## III.3 Modèle expérimental

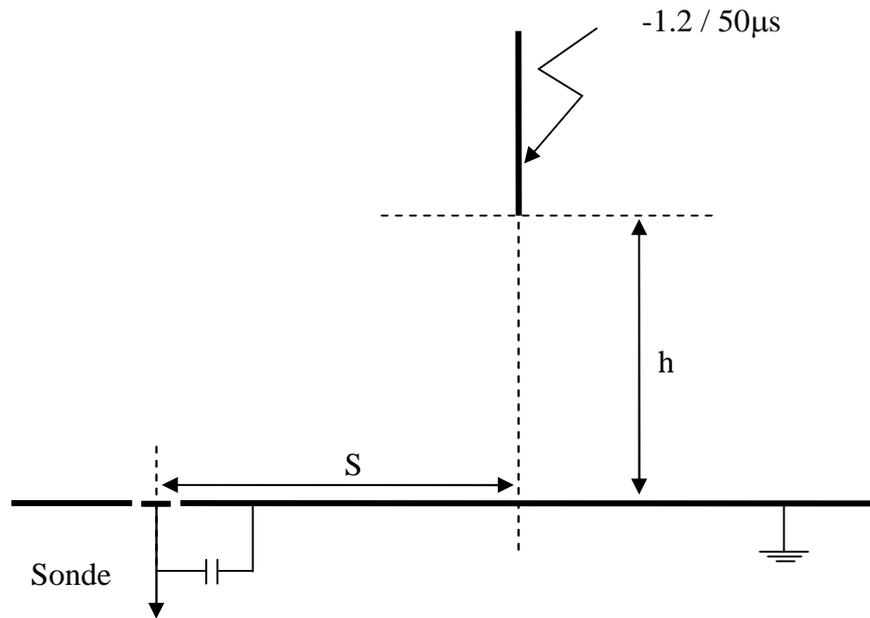
Le schéma du modèle d'essai sans paratonnerre est donné à la figure (III.3) et celui avec paratonnerre à la figure (III.4).

**Choix de l'électrode pointue :** L'électrode pointue est une tige en cuivre de diamètre 4.8 mm et de 1.2 m de longueur.

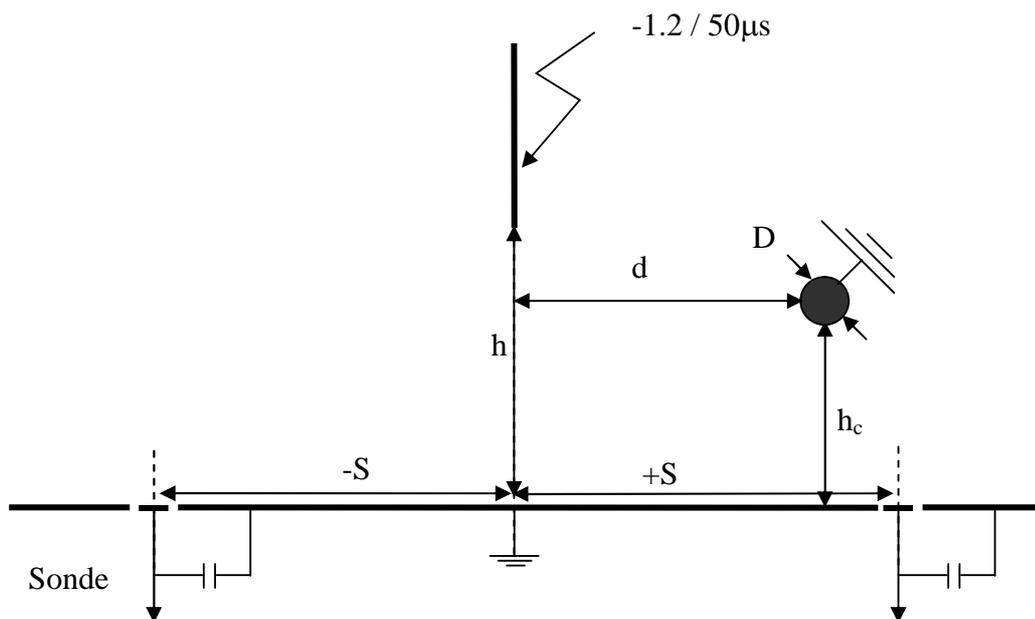
**Choix de l'électrode plane :** Le plan est une plaque en aluminium de forme carrée, de 1000 mm de côté et de 4 mm d'épaisseur.

**Choix des paratonnerres :** Le paratonnerre est une tige conductrice de diamètre 4mm et de longueur 1000 mm, il est important de choisir une tige suffisamment longue pour éviter l'effet des bords.

Plusieurs niveaux de tension de choc de foudre négatif ont été appliqués correspondant à différentes hauteurs de la tige mise sous tension de choc de foudre négatif -1.2/50  $\mu\text{s}$ . Pour chaque niveau de tension, nous enregistrons les formes d'ondes captées par la sonde et visualisées à l'aide d'un oscilloscope numérique de marque TEKTRONIX TDS 340 A 100 MHz.



**Figure III.3 :** Modèle expérimental du système tige-plan sans paratonnerre.



**Figure III.4 :** Modèle expérimental du système tige-plan avec paratonnerre situé à droite de la tige.

Avec :

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

**h<sub>c</sub>** : hauteur du paratonnerre situé à droite de la tige sous tension.

**D** : diamètre du paratonnerre horizontal.

**-S, +S** : distance horizontale entre l'axe de la tige haute tension et la sonde.

**d** : distance horizontale entre le paratonnerre et l'axe de la tige haute tension.

La position du paratonnerre est déterminée par sa hauteur ( $h_c$ ) par rapport au sol et par la distance ( $d$ ) entre son axe et l'axe de la tige. La distance ( $S$ ) est considérée positive lorsque l'axe de la sonde est situé dans le demi-plan contenant le paratonnerre et négative dans l'autre cas.

Les distances  $h$  sont les mêmes qu'en système sans paratonnerre, mais les distances ( $S$ ) et ( $d$ ) sont choisies de telle sorte que les essais soient effectués pour des rapports  $S/h$  et  $d/h_c$  respectivement identiques pour différentes valeurs de  $h$ .

Les deux niveaux de tension utilisés sont  $0.2U_{0\%}$  et  $0.4U_{0\%}$  des systèmes tige-plan correspondants à chaque distance  $h$  choisie. Pour une hauteur  $h$  donnée, nous appliquons le même niveau de tension d'essais quelle que soit la hauteur ou la position du paratonnerre par rapport à la tige.

Cela nous permettra d'observer l'influence du paratonnerre horizontal sur la distribution du champ électrique sur le sol.

Les différentes distances utilisées sont données dans le tableau III.1 ci-dessous

$h(\text{cm})$	8	12	16
$h_c (\text{cm})$	2, 4, 6	2, 3, 4, 6, 8	4, 8, 11
$d/h_c$	0, 1, 2, 4	0, 1, 2, 4	0, 1, 2, 4
$S/h$	-4, -3, -2, -1, 0, 0.5, 1, 2, 3, 4	-4, -3, -2, -1, 0, 0.5, 1, 2, 3, 4	-4, -3, -2, -1, 0, 0.5, 1, 2, 3, 4

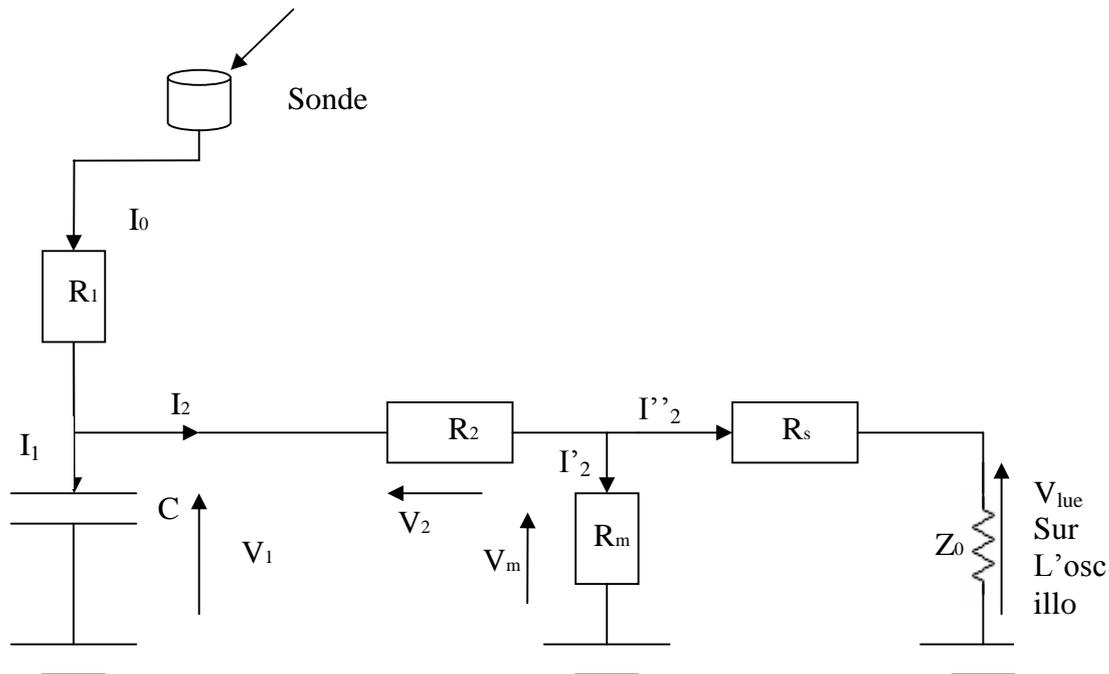
**Tableau III.1** : Les différents paramètres considérés pour les mesures.

### III.4 MESURE DU CHAMP PAR LA METHODE DE LA SONDE A CAPACITE REPARTIE (S. C. R).

#### III.4.1 Circuit de mesure

La sonde de 6.12 mm de diamètre est reliée à travers une résistance  $R_1$  à un condensateur de charge ( $C$ ).

Il est nécessaire d'utiliser un diviseur de tension ( $R_m, R_s$ ) pour recueillir le signal de la tension  $V_1$  aux bornes de la capacité  $C$  reliée en parallèle, au diviseur de tension.



**Figure III.5 :** Schéma du circuit de mesure

Avec

$R_2$  : résistance d'adaptation du câble de mesure.

$R_m$  : résistance de l'atténuateur ou diviseur.

$R_s$  : résistance de protection.

$Z_0$  : impédance d'entrée de l'oscilloscope.

$Z_e = Z_0 + R_s$  : impédance d'entrée du dispositif de mesure.

### III.3.2 Expression du champ mesuré

$$Q = \int \sigma ds = \epsilon_0 E.S \quad (\text{Surface de la sonde}) \quad (\text{III.4})$$

$$I_0 = I_1 + I_2 = I_1 + I'_2 + I''_2 \quad (\text{III.5})$$

$$\frac{dQ}{dt} = \epsilon_0 S \frac{dE}{dt} = C \frac{dV_1}{dt} + \frac{V_m}{R_m} + \frac{V_m}{Z_e} = C \frac{dV_1}{dt} + V_m \left( \frac{1}{R_m} + \frac{1}{Z_e} \right) \quad (\text{III.6})$$

$$\Rightarrow \frac{dV_1}{dt} + \frac{V_m}{C} \left( \frac{1}{R_m} + \frac{1}{Z_e} \right) = \frac{\epsilon_0 S}{C} \frac{dE}{dt} \quad (\text{III.7})$$

$$\left( \frac{1}{R_m} + \frac{1}{Z_e} \right) \rightarrow 0 \quad R_m \text{ et } Z_e \text{ relativement grands par rapport à } R_2$$

$$\Rightarrow \frac{dV_1}{dt} = \frac{\varepsilon_0 S}{C} \frac{dE}{dt}$$

$$\Rightarrow V_1(t) = \frac{\varepsilon_0 S}{C} E(t) \quad (\text{III.8})$$

$$V_1(t) = V_2(t) + V_m(t) = R_2 I_2 + R_m I_2$$

$$V_1(t) = R_2 I_2 + (R_m // Z_e) I_2 \quad R_m \ll Z_e$$

$$V_1(t) = (R_2 + (R_m // Z_e)) I_2 \quad R_m \gg R_2$$

$$V_1(t) = R_m I_2$$

$$V_1(t) = V_m(t) \quad (\text{III.9})$$

$$\text{Donc : } V_1(t) = V_m(t) = \frac{\varepsilon_0 S}{C} E(t) \quad (\text{III.10})$$

$$\Rightarrow E(t) = \frac{C}{\varepsilon_0 S} V_m(t) \quad (\text{III.11})$$

Les valeurs des composantes d'antenne ( $C, R_1$ ) sont choisies, de façon que, la constante de temps d'antenne soit plus petite par rapport à celle du signal d'entrée, pour pouvoir le capter.

Pour les autres composantes du circuit, le choix est basé sur l'élimination du problème de réflexion du signal à travers le câble.

Ainsi nous avons utilisé les valeurs suivantes :

$$R_1 = 47\Omega, \quad R_2 = 50\Omega, \quad R_m = 6.6k\Omega, \quad R_s = 4.5M\Omega, \quad C = 25.10^{-12} \text{ F}, \quad \phi_{\text{sonde}} = 6.12 \text{ mm},$$

$Z_0 = 1M\Omega$  : impédance d'entrée de l'oscilloscope.

$$E(t) = \frac{25.10^{-12}}{8,854.10^{-12} \cdot \pi \left( \frac{6.12}{2} \right)^2 \cdot 10^{-6}} V_1(t) \quad (\text{III.12})$$

$$E(t) = 95,947 \cdot V_1(t) \quad [\text{kV/m}]$$

$$\text{Ou } E(t) = 0,95947 \cdot V_1(t) \quad [\text{kV/cm}] \quad (\text{III.13})$$

Si  $V_{\text{lue}}$  désigne la tension lue sur l'oscilloscope et comme  $V_1 = V_m$ , on a :

$$\frac{V_m}{R_s + Z_0} = \frac{V_{lue}}{Z_0} \Rightarrow V_m = \frac{R_s + Z_0}{Z_0} V_{lue} \quad (\text{III.15})$$

$$\Rightarrow V_m = V_1 = \frac{R_s + Z_0}{Z_0} \cdot V_{lue}$$

Donc  $V_1 = 5,5 \cdot V_{lue}$

$$E(t) = 0,95947 \times 5,5 \cdot V_{lue}(t) \quad [\text{kV/cm}] \quad (\text{III.16})$$

Ces valeurs sont corrigées par les coefficients de correction atmosphérique.

### III.3.3 Détermination de la constante de la sonde $K_s$

Pour déterminer la constante de la sonde  $K_s$ , nous effectuons d'abord nos essais pour un système plan-plan, en suivant la procédure suivante :

- Maintenir une distance plan-plan ( $h$ ) aussi petite que possible et faire varier la tension sans présence d'arc électrique et lire la valeur sur l'oscilloscope.
- Déterminer les champs par la méthode théorique et calculer le rapport entre les valeurs du champ mesuré et théorique.

En choisissant  $h = 8 \text{ cm}$  nous obtenons :

U (kV)	E (théorique) = U/h(kV/cm)
40	5
48	6
56	7

U (kV)	Vlue (V)	E (expérimental)	$K_s$
40	3.3500	17.6782	0.2828
48	3.8240	20.1795	0.2973
56	4.6214	24.3875	0.2870

Les valeurs de  $K_s$  sont obtenues en utilisant la relation :

$$K_s = E_{th} / E_{exp} \quad (\text{III.17})$$

$$\text{d'où : } K_s = \frac{0.2828 + 0.2973 + 0.2870}{3} \Rightarrow K_s = 0.289$$

La valeur finale du champ électrique au sol est donnée par la formule suivante :

$$E(t) = 0.289 \times (0,95947 \times 5,5 \times V_{luc}(t)) \text{ [kV/cm]} \quad (\text{III.18})$$

$$E(t) = 1.525 \times V_{luc}(t) \text{ [kV/cm]}$$

### III.3.4 Formes des signaux obtenus avec l'oscilloscope

Pour les essais de mesure de champ, nous avons utilisé un oscilloscope numérique de marque TEKTRONIX TDS 340 A 100 MHz, qui nous permet d'avoir la valeur de chaque point du signal plus particulièrement la valeur de crête du signal reçu.

La démarche de mesure est d'enregistrer pour chaque position de la sonde, cinq signaux, en appliquant deux niveaux égaux à  $0.2 U_{0\%}$  et  $0.4 U_{0\%}$  ; ce qui assure une application de tension sans décharge.

Nous considérons que la valeur  $V_{luc}$  est le signal moyen des cinq signaux enregistrés par l'oscilloscope numérique. Nous nous intéressons à la valeur de crête de ces signaux. Cette dernière est considérée comme étant la valeur du champ, en la multipliant par le rapport de mesure.

Nous donnons ici la forme d'onde obtenue sans décharge (figure III.6).

L'axe des abscisses est l'axe de temps.

L'axe des ordonnées représente la tension du signal reçu.

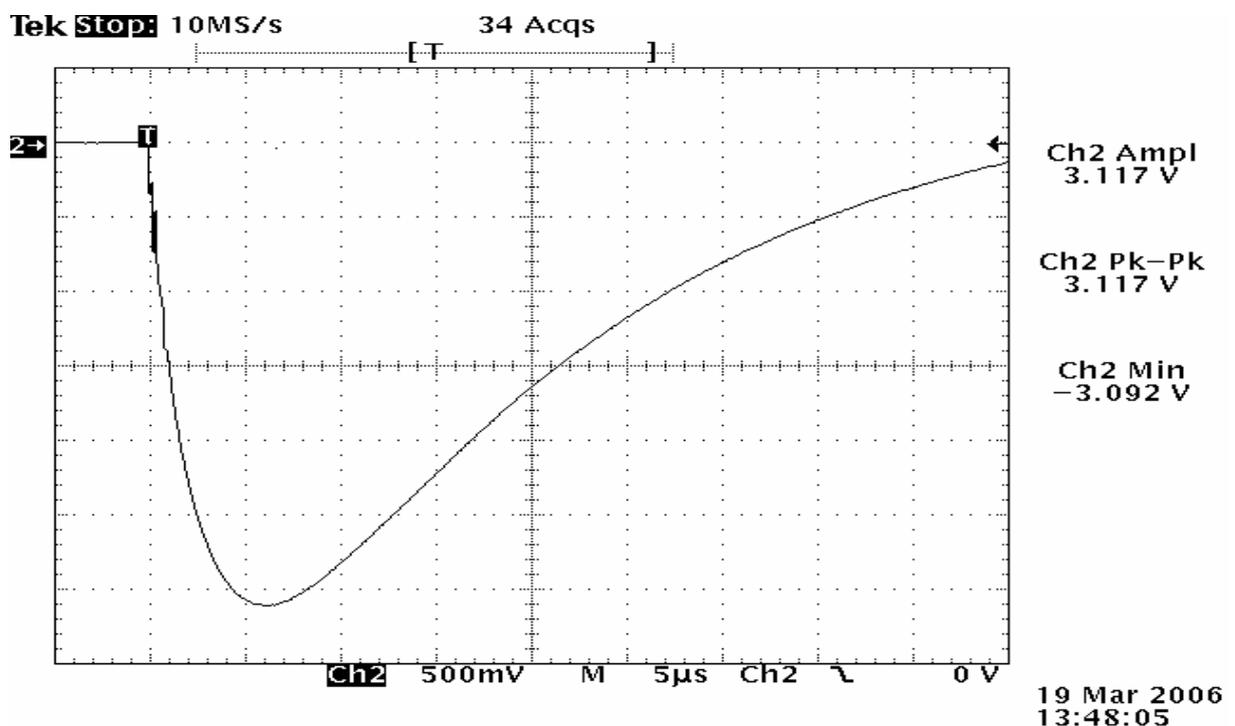


Figure III.6 : forme d'onde donnée par l'oscilloscope numérique [43].

**CHAPITRE IV**

***RESULTATS EXPERIMENTAUX ET  
INTERPRETATIONS***

## IV.1 INTRODUCTION

Ce chapitre traite de l'influence du paratonnerre horizontal sur la distribution du champ électrique sur un plan homogène conducteur.

Nous commençons d'abord par la présentation des résultats concernant le système tige-plan sans paratonnerre, afin de vérifier le modèle électrogéométrique et d'avoir une référence pour la comparaison des résultats. Nous abordons ensuite l'étude de l'influence de la position et de la hauteur du paratonnerre horizontal sur la distribution du champ électrique à la surface du plan.

## IV.2 SYSTEME TIGE-PLAN SANS PARATONNERRE

### *IV.2.1 Détermination de la tension $U_{0\%}$*

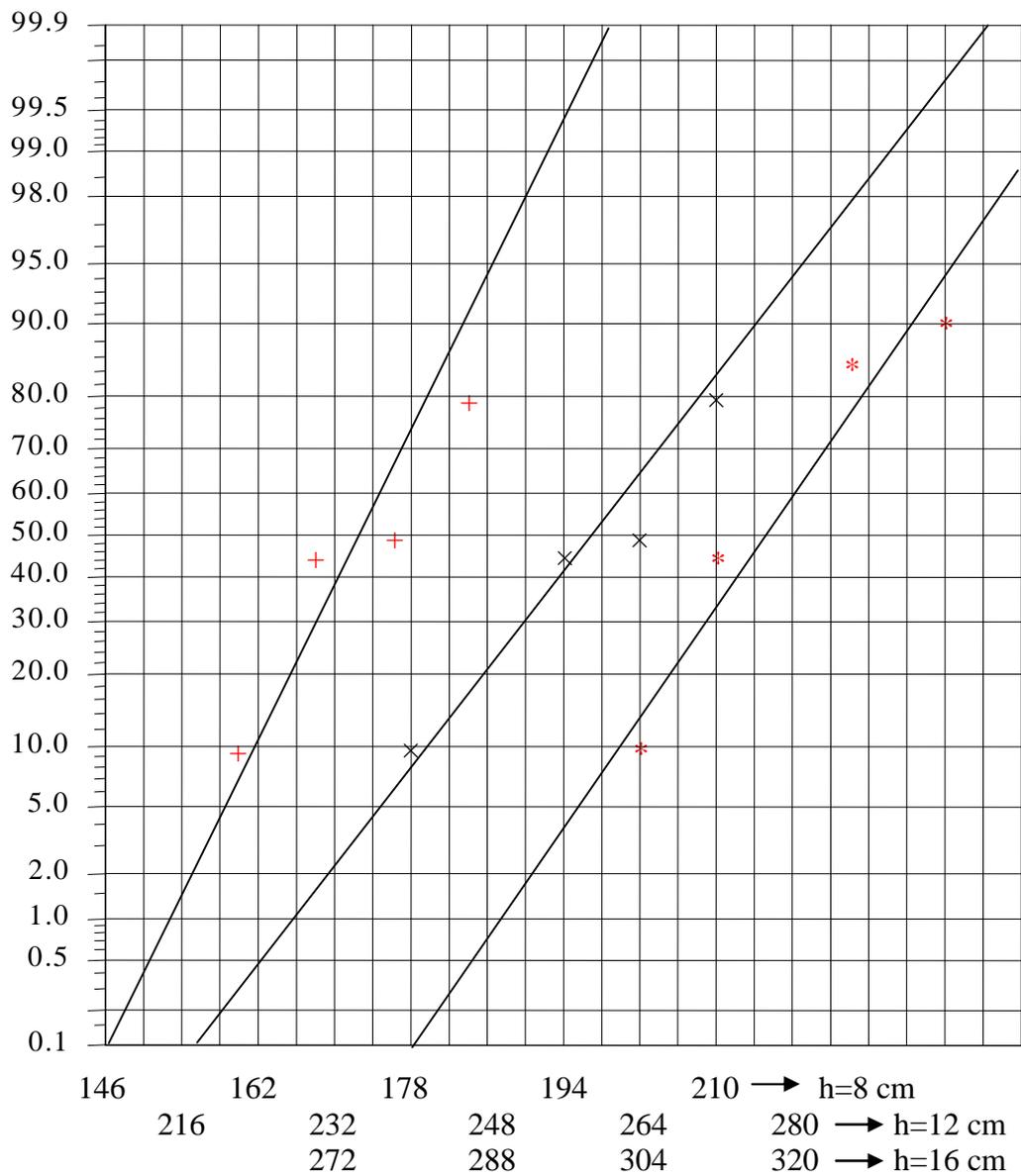
Nous nous sommes intéressés à la tension  $U_{0\%}$  de décharge disruptive afin de déterminer les niveaux de tension d'essais choisis égaux à  $0.2U_{0\%}$  et  $0.4U_{0\%}$  pour les mesures du champ électrique évitant ainsi les décharges disruptives au niveau de la sonde à cause de sa sensibilité aux forts courants.

Les caractéristiques de probabilité de décharge  $P = f(U)$ , à partir desquelles nous avons déterminé par extrapolation la tension de tenue  $U_{0\%}$  pour chaque distance inter électrode ( $h$ ) choisie, sont présentées à la figure (IV.1). Nous avons considéré  $U_{0\%}$  comme étant la tension ayant une probabilité de décharge égale à 0,1% sur l'échelle gausso-arithmétique.

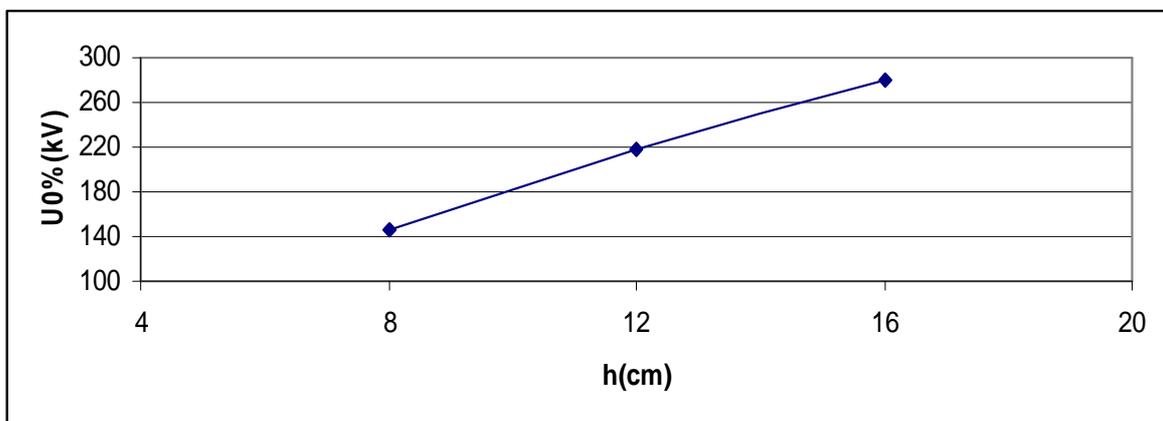
On a remarqué que la fréquence de décharge en fonction de la tension appliquée suivait une loi normale : plus la tension augmentait plus la probabilité de décharge augmente.

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

Les valeurs de  $U_{0\%}$  obtenues pour 8, 12 et 16 cm sont prises aussi comme niveau de tension d'essais dans les mesures de champ sur le plan pour les différentes positions et hauteurs du paratonnerre.



**Figure IV.1 :** Détermination des tensions  $U_{0\%}$  pour les différentes distances inter électrodes  $h$ .



**Figure IV.2 :** Evolution de la tension  $U_{0\%}$  en fonction de la longueur de l'intervalle d'air  $h$ .

### ***IV.2.2 Distribution de champ électrique en fonction de la distance axe de la pointe- axe de la sonde***

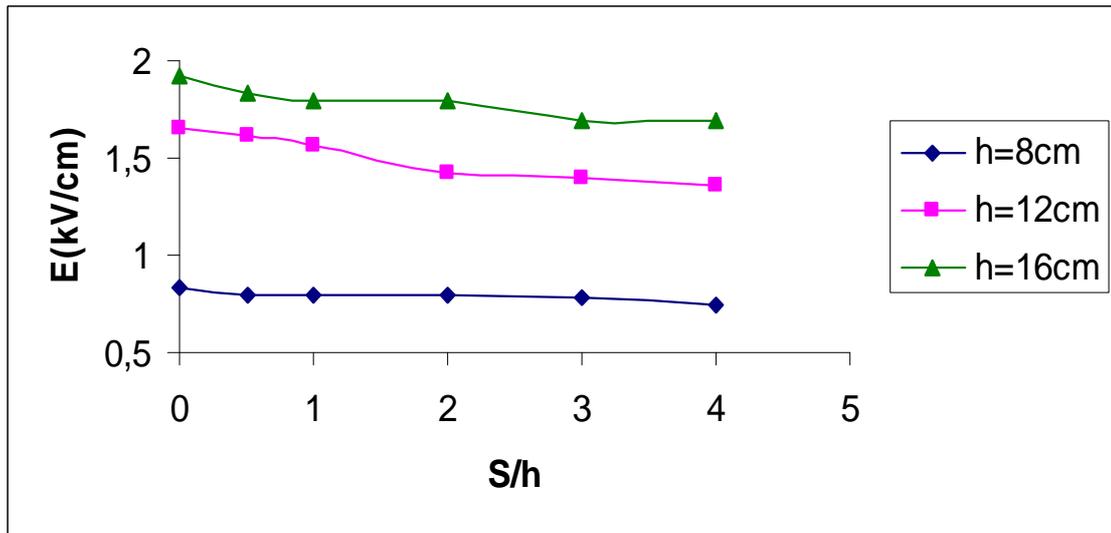
Afin d'étudier l'influence d'un paratonnerre sur la répartition de champ électrique, nous déterminons d'abord les valeurs du champ au plan en fonction de la position de l'axe de la sonde et de la hauteur  $h$  de la tige.

D'après la figure IV.3 et IV.4 avec les deux niveaux de tension  $0.2U_{0\%}$  et  $0.4U_{0\%}$ , nous constatons que l'intensité du champ électrique prend une valeur maximale pour  $S/h=0$  et diminue au fur et à mesure qu'on éloigne la sonde de l'axe de la pointe ( $S/h$  augmente) puis elle tend vers une valeur constante à partir d'une position relative  $S/h$  supérieure ou égale à 2.

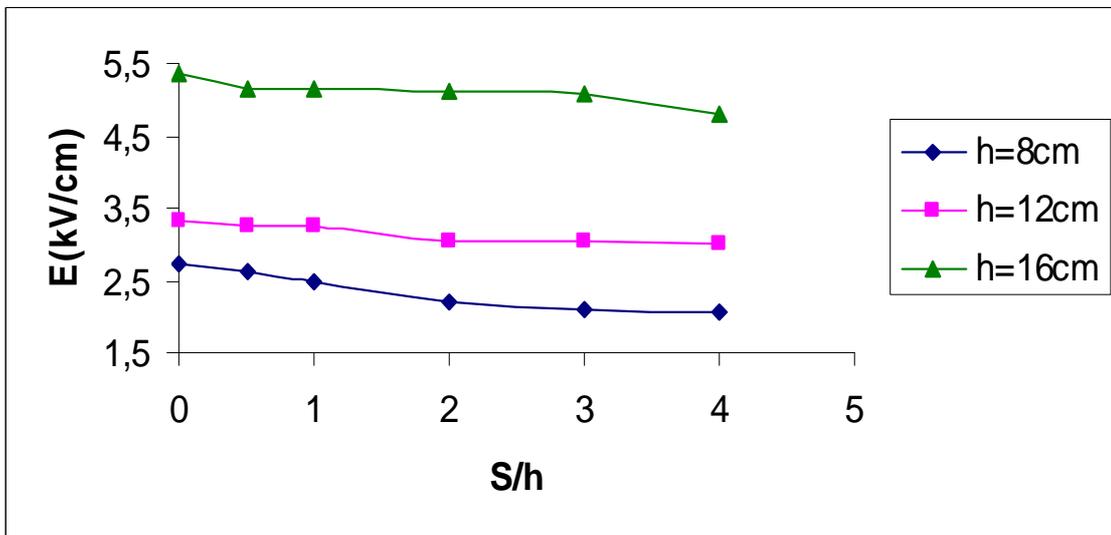
Pour les différentes positions de la sonde ( $S/h$ ) et pour les deux niveaux de tension appliqués, nous remarquons que l'intensité du champ augmente avec la hauteur  $h$ . Cette augmentation serait due au niveau de tension appliqué à la tige, correspondant à 0,2 et 0,4  $U_{0\%}$  de chaque hauteur  $h$ .

La valeur du champ électrique croît en augmentant la tension appliquée ce qui justifie que la valeur du champ électrique au sol est proportionnelle à la quantité de charge contenue dans le traceur.

L'augmentation du champ au sol pourrait être expliquée par la forte probabilité d'existence de charges d'espace dans l'intervalle pointe-plan.



**Figure IV.3 :** Champ électrique mesuré au sol en fonction de la position  $S/h$  de la sonde.  
Niveau de tension  $U=0.2U_{0\%}$ .



**Figure IV.4 :** Champ électrique mesuré au sol en fonction de la position  $S/h$  de la sonde.  
 $U=0.4 U_{0\%}$ .

### IV.3 SYSTEME TIGE-PLAN AVEC PARATONNERRE

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

- Le niveau de tension appliqué.
- La longueur de l'intervalle d'air tige-plan ( $h$ ).
- La distance ( $S$ ) entre l'axe de la sonde et celui de la tige.
- La distance ( $d$ ) entre l'axe de la tige HT et le paratonnerre.
- La hauteur du paratonnerre ( $h_c$ ) situé à droite de la tige sous tension.

#### IV.3.1 Influence du paratonnerre

Dans un premier lieu, nous nous intéressons à l'influence de la position du paratonnerre pour les trois hauteurs de la tige ( $h=8, 12, 16$  cm), ainsi que les trois hauteurs relatives du paratonnerre ( $h/h_c=1.5, 2, 4$  cm) et ceci pour les deux niveaux de tension  $U=0.2U_0\%$  et  $0.4U_0\%$ .

La position du paratonnerre est définie par la distance  $d$  entre l'axe de la pointe et le paratonnerre. Les différentes valeurs relatives de  $d$  sont les suivantes :  $d/h_c=0, 1, 2, 4$ . Sur les figures IV.5 à IV.7 sont représentées les allures du champ électrique sur le plan pour différentes positions relatives de la sonde  $S/h$  variant de  $-4$  à  $+4$ .

D'après ces figures, nous constatons que le champ électrique mesuré dans la configuration avec paratonnerre est toujours inférieur à celui mesuré sans paratonnerre.

Nous remarquons que plus le paratonnerre se rapproche de la tige plus le champ sur le plan diminue. Nous expliquons ce résultat par le fait que le paratonnerre joue un rôle attractif important des lignes de champ électrique, donc le champ électrique devient relativement fort sur le paratonnerre augmentant ainsi la probabilité de décharge sur le paratonnerre où le champ est intense.

Nous constatons ainsi, que l'intervalle d'air tige-paratonnerre constitue un chemin préférable pour les lignes de champ électrique, surtout lorsque le paratonnerre est proche de la tige. En effet, le système pointe-plan avec paratonnerre se comporte dans ce cas comme un système pointe-pointe qui est moins rigide que le système tige négative-plan [3].

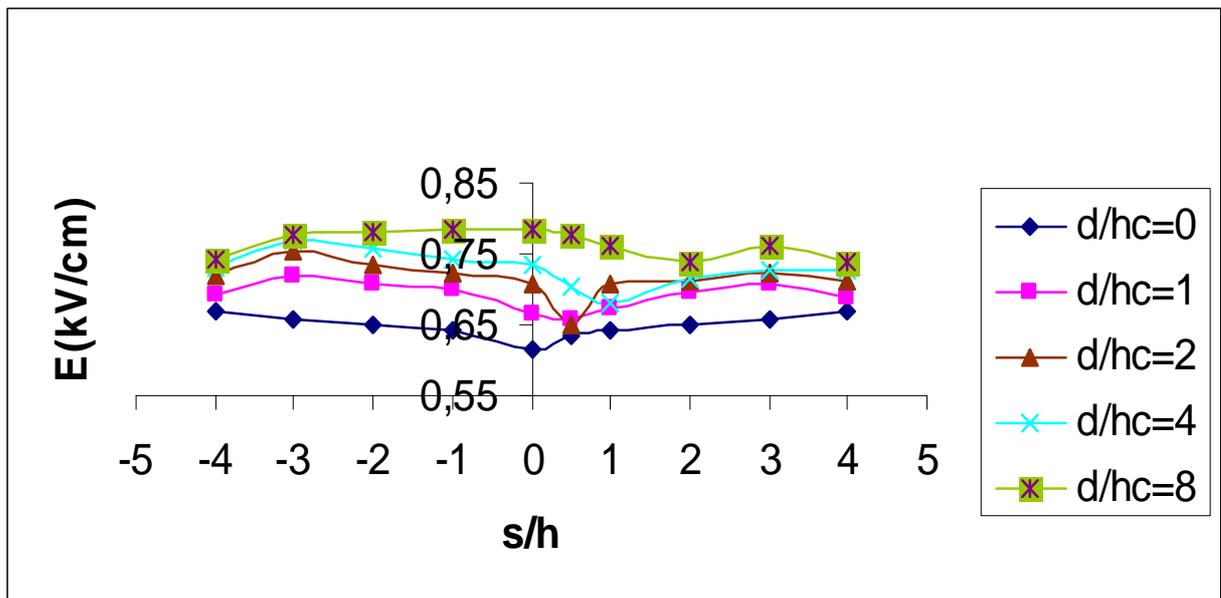
Pour une position donnée du paratonnerre, le champ électrique au sol diminue au voisinage du paratonnerre. Cette tendance est expliquée par l'attraction des lignes de champ électrique par le paratonnerre, ce qui affaiblit le champ électrique au voisinage du paratonnerre et qui justifie aussi que le champ électrique dans le demi-plan qui contient le paratonnerre est plus faible que celui mesuré dans l'autre demi-plan. Quand la sonde s'éloigne

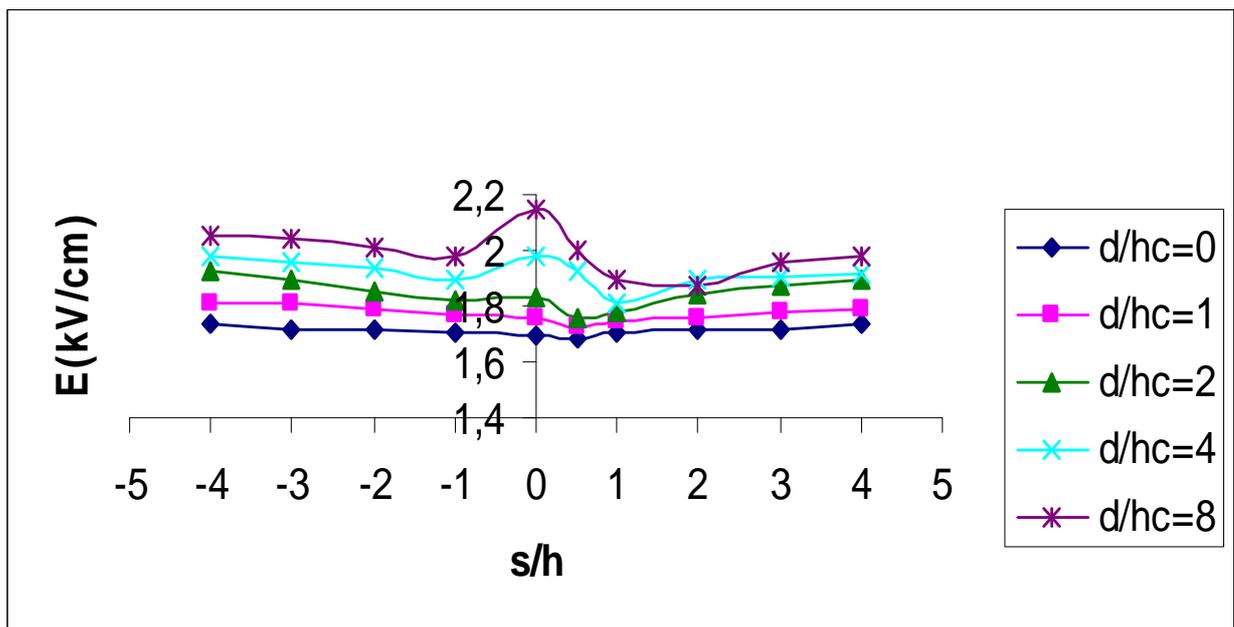
du paratonnerre la valeur du champ mesurée augmente et devient confondue avec celle donnée par le système tige-plan sans paratonnerre.

Lorsque le paratonnerre s'éloigne de l'axe de la tige, le champ sur le plan augmente. Ce résultat est similaire à celui obtenu par K.Necereddine et D. Mezai [22], [43].

Nous remarquons que plus la hauteur du paratonnerre augmente plus le champ électrique sur le plan diminue et la probabilité de foudroiement du paratonnerre augmente.

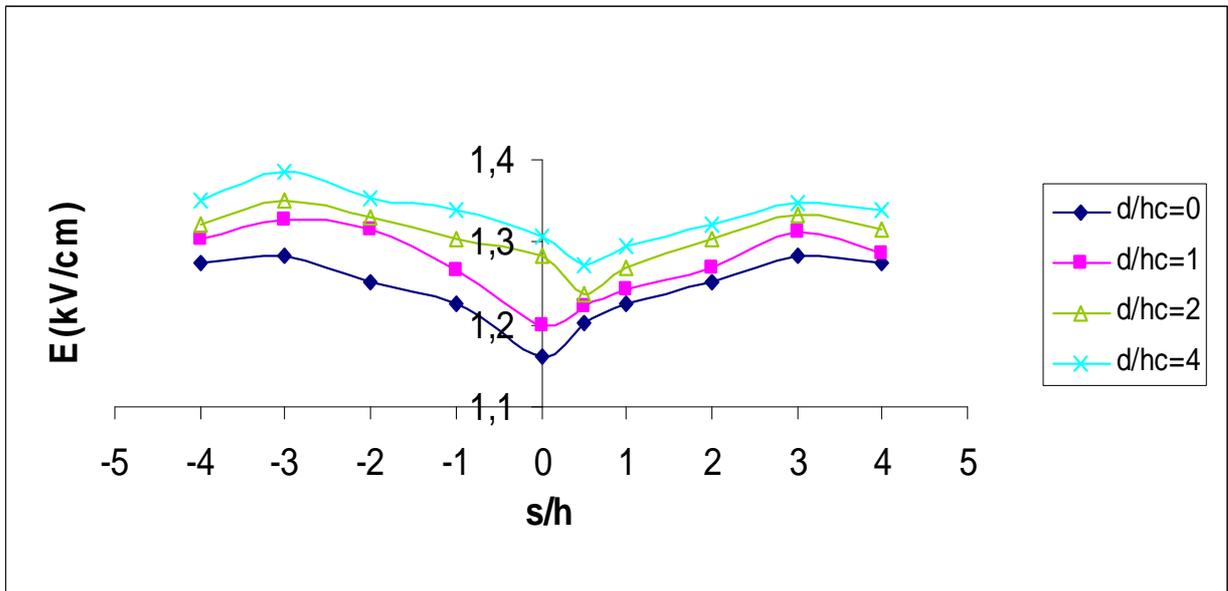
Les figures IV.5 à IV.7 nous permettent de constater que le champ électrique n'a pas dépassé la valeur de 5kV/cm, la valeur de champ électrique suffisante pour que les streamers s'amorcent à partir du sol. Ceci justifie que les niveaux de tension appliqués n'engendraient pas de décharges disruptives.



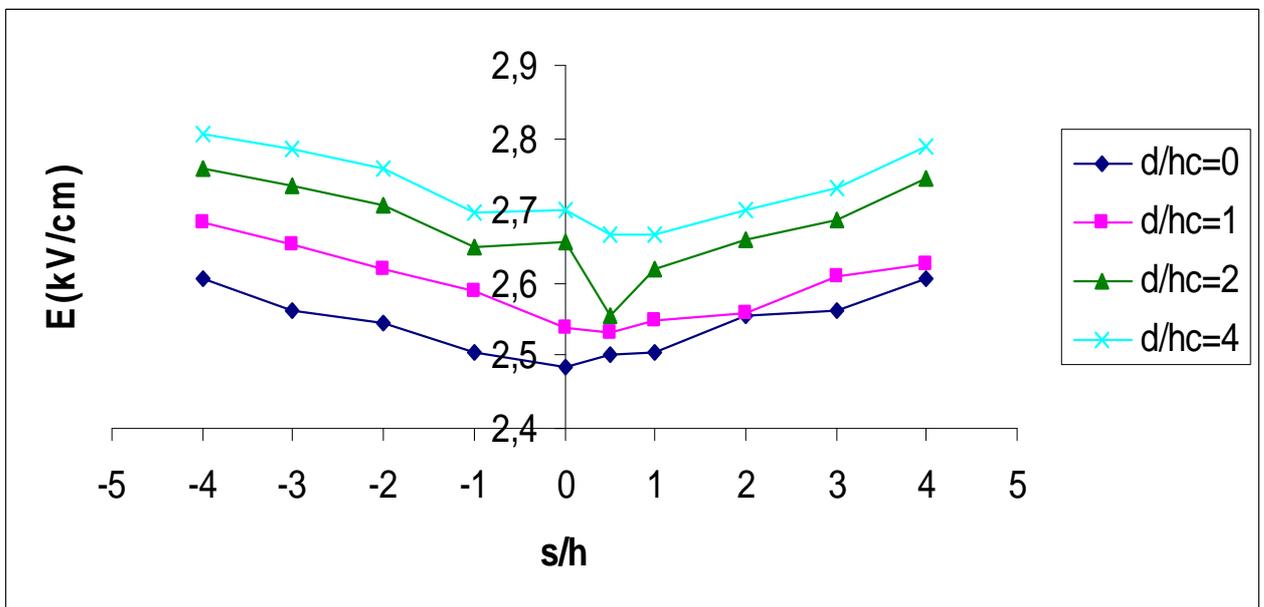
$$U=0.2U_{0\%}$$


$$U=0.4U_{0\%}$$

**Figure IV.5.** Champ électrique au sol en fonction de la position de la sonde ( $S/h$ ).  
 $h=8$  cm,  $hc=2$  cm

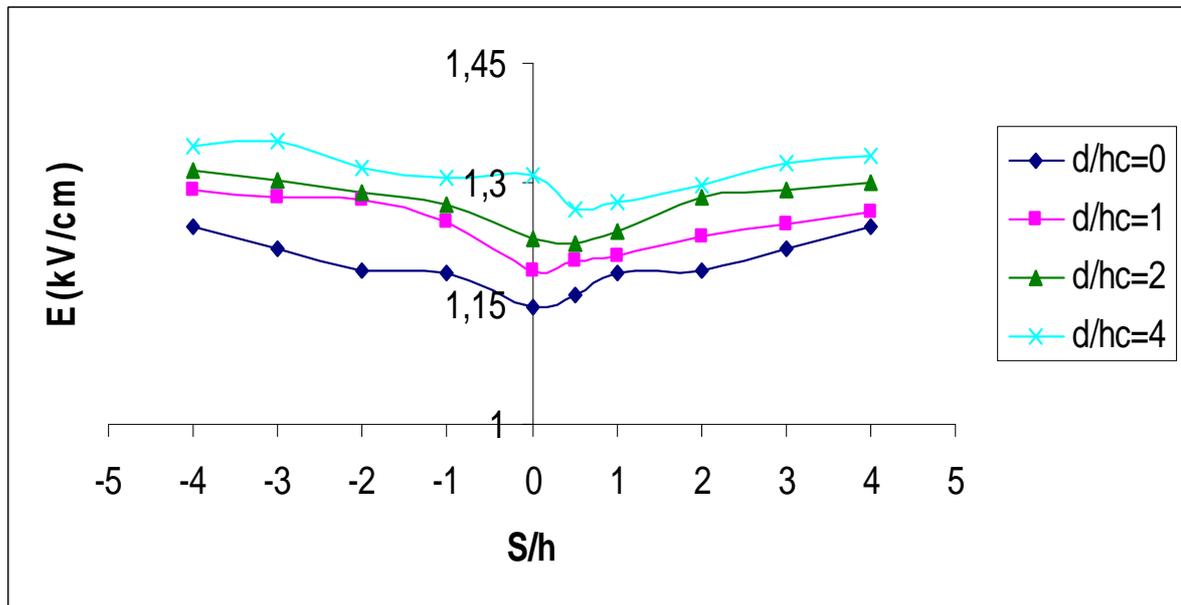


$U=0.2U_{0\%}$

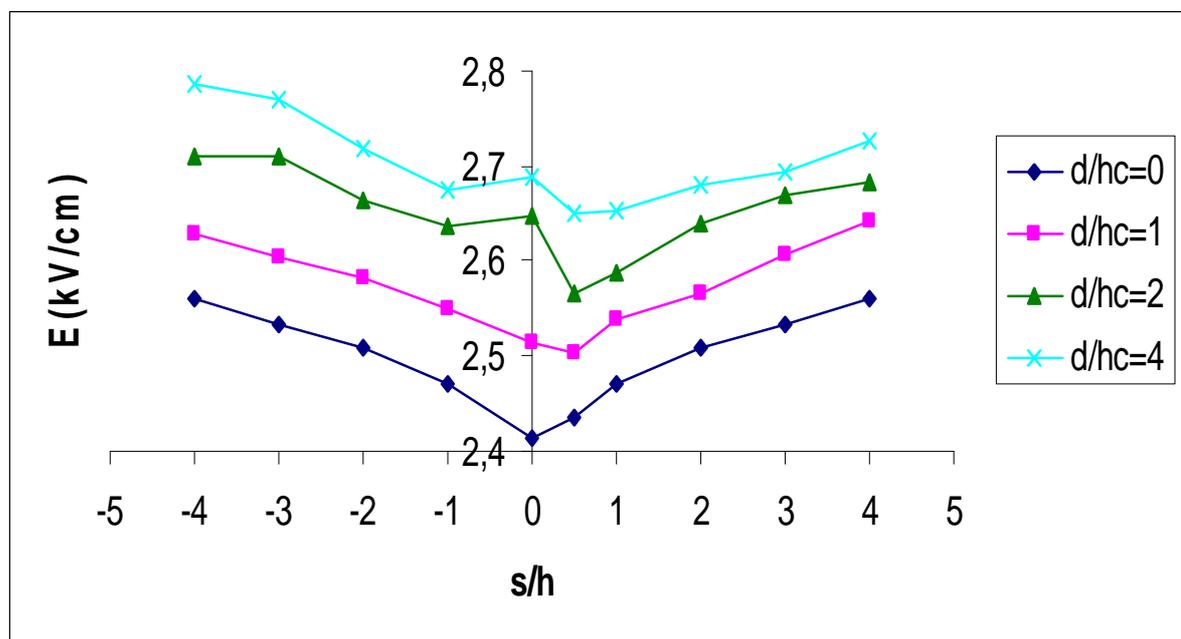


$U=0.4U_{0\%}$

**FigureIV.6** : Champ électrique au sol en fonction de la position de la sonde (S/h).  
 $h=12$  cm,  $hc=2$  cm



$U=0.2U_{0\%}$



$U=0.4U_{0\%}$

FigureIV.7 : Champ électrique au sol en fonction de la position de la sonde ( $S/h$ ).  
 $h=12$  cm,  $hc=4$  cm

### *IV.3.2 Discussion sur l'effet du paratonnerre*

Pour illustrer l'influence du paratonnerre sur la distribution du champ électrique au sol pour notre système d'électrodes tige-plan en fonction de la position de la sonde  $S/h$ , nous avons tracé la courbe de la variation du rapport  $E/E_0$  en fonction de la position de la sonde ( $S/h$ ).

$E$  : le champ électrique mesuré dans la configuration avec paratonnerre.

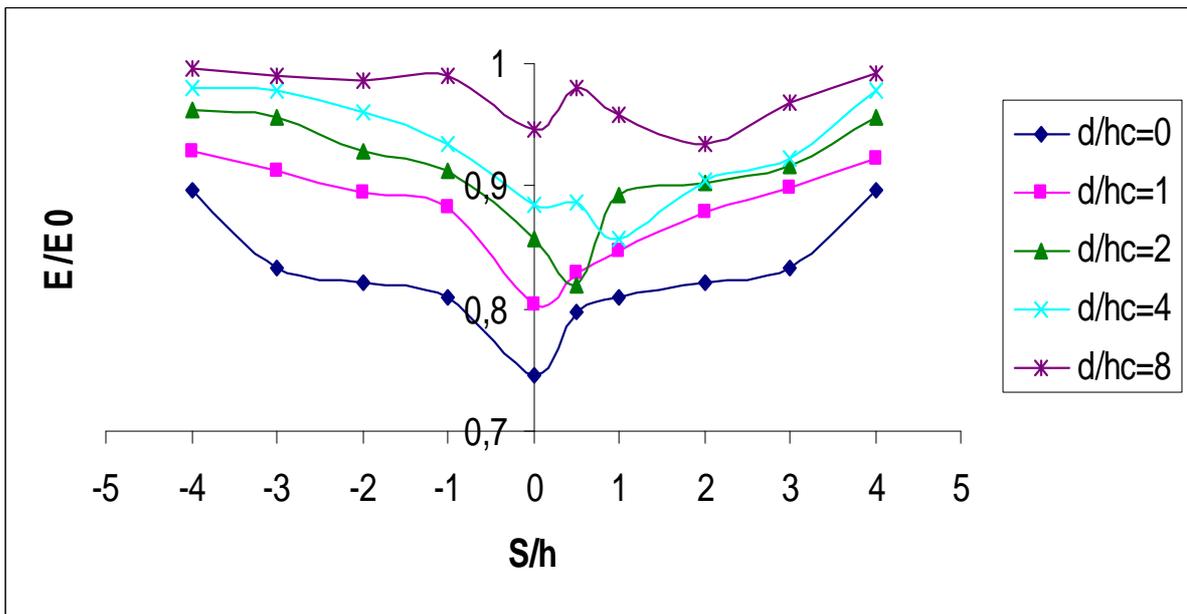
$E_0$  : le champ électrique mesuré dans la configuration sans paratonnerre.

D'après les figures (IV.8) à (IV.10), nous constatons que le rapport  $E/E_0$  prend la valeur la plus faible pour les positions du paratonnerre proche de la tige ( $d/hc=0, 1$ ) puis croît avec l'augmentation du rapport  $d/hc$ . Cette remarque est prévisible et normale car la position du paratonnerre directement sous l'axe de la tige HT ou proche est la meilleure position pour éliminer ou réduire le champ électrique sur le plan. On peut caractériser ce phénomène par l'effet de la zone de protection du paratonnerre de telle sorte que les objets situés directement au-dessous du paratonnerre sont pratiquement protégés et le champ sera très réduit par rapport aux autres régions loin du paratonnerre.

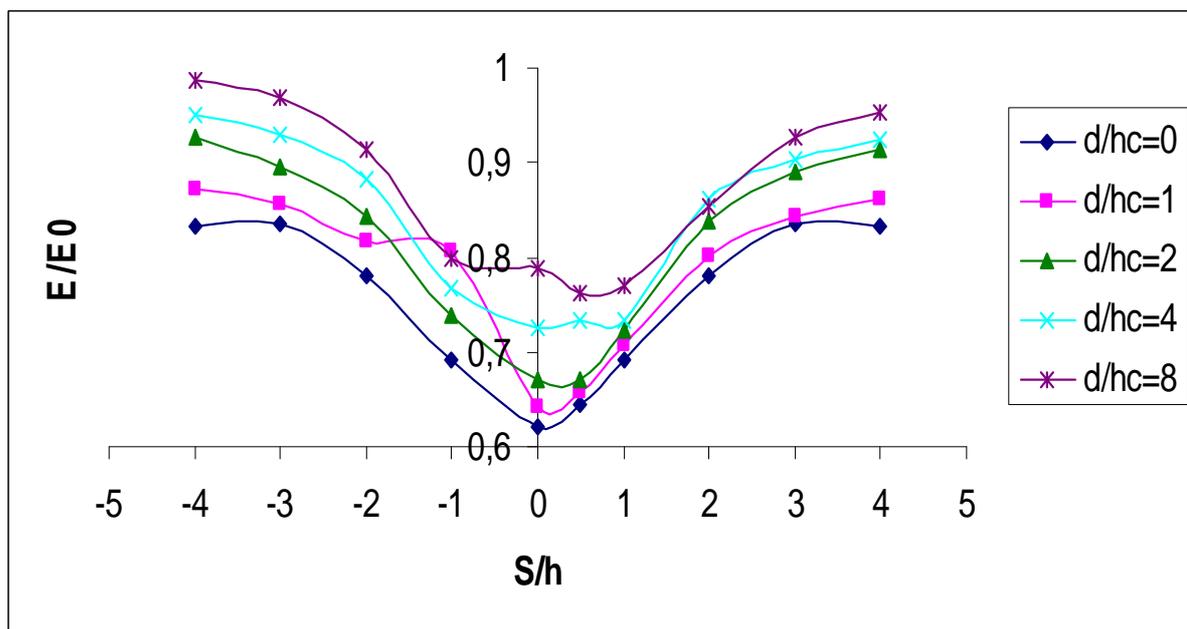
Au fur et à mesure que le paratonnerre s'éloigne de la tige HT ( $d/hc$  augmente), nous remarquons que le rapport  $E/E_0$  augmente jusqu'à l'unité, cas où le paratonnerre n'a pratiquement aucune influence (valeur du champ égale à celle correspondant à la configuration sans paratonnerre).

Nous constatons que le rapport  $E/E_0$  prend la valeur la plus faible pour les positions de la sonde proche du paratonnerre ( $S/h= -1, 0,1$ ) puis croît avec l'augmentation du rapport  $S/h$ .

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

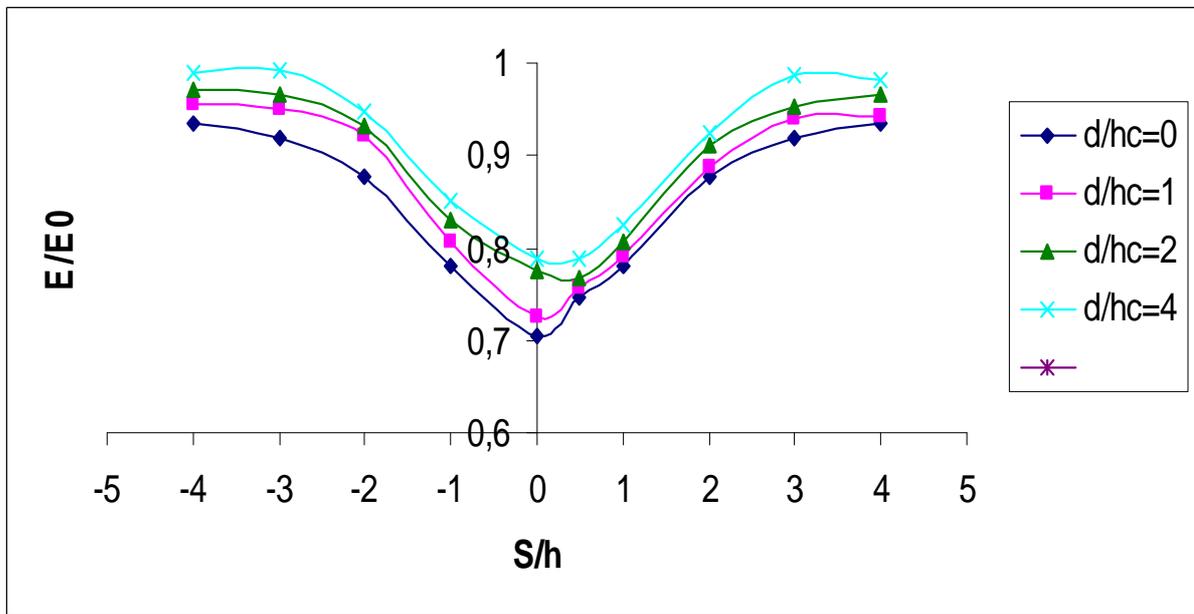


$U=0.2U_{0\%}$

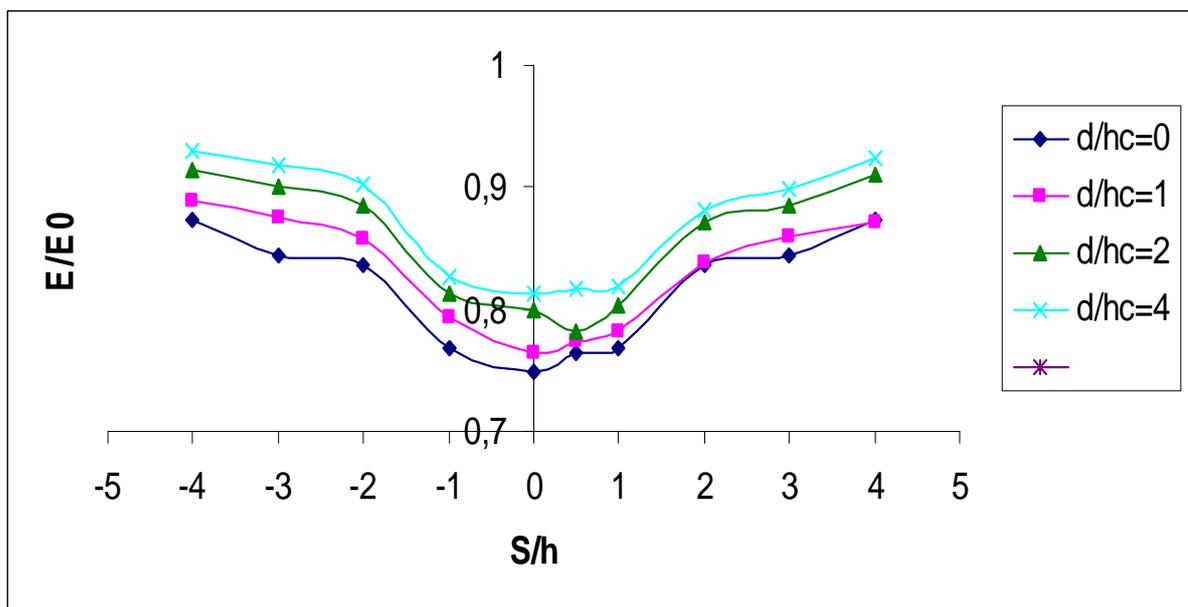


$U=0.4U_{0\%}$

**FigureIV.8** : Variation du rapport  $E/E_0$  en fonction de la position de la sonde ( $S/h$ ).  
 $h=8$  cm,  $hc=2$  cm.

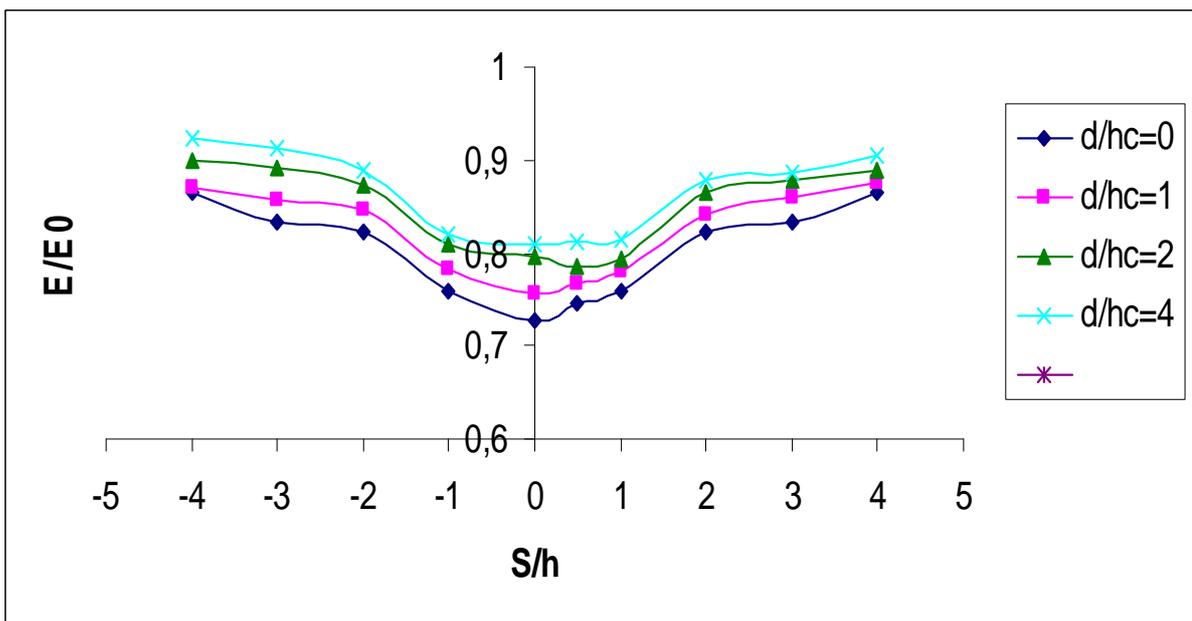
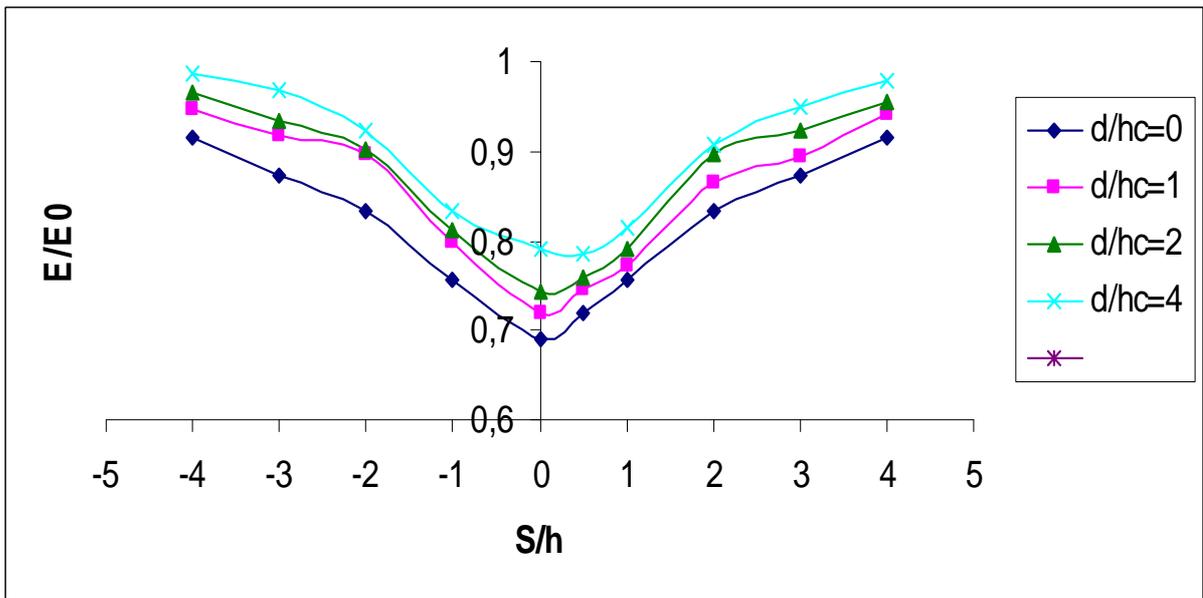


$U=0.2U_{0\%}$



$U=0.4U_{0\%}$

**FigureIV.9.** Variation du rapport  $E/E_0$  en fonction de la position de la sonde( $S/h$ ).  
 $h=12$  cm,  $hc=2$  cm



**FigureIV.10.** Variation du rapport  $E/E_0$  en fonction de la position de la sonde( $S/h$ ).  
 $h=12$  cm,  $hc=4$  cm.

**CHAPITRE V**

**CALCUL DU CHAMP ET  
VALIDATION**

## INTRODUCTION

Dans cette partie de notre travail, nous nous intéressons au calcul du champ pour les différentes configurations considérées expérimentalement en utilisant le logiciel FEMM. Celui-ci utilise une méthode numérique qui est la méthode des éléments finis que nous avons décrite au chapitre II.

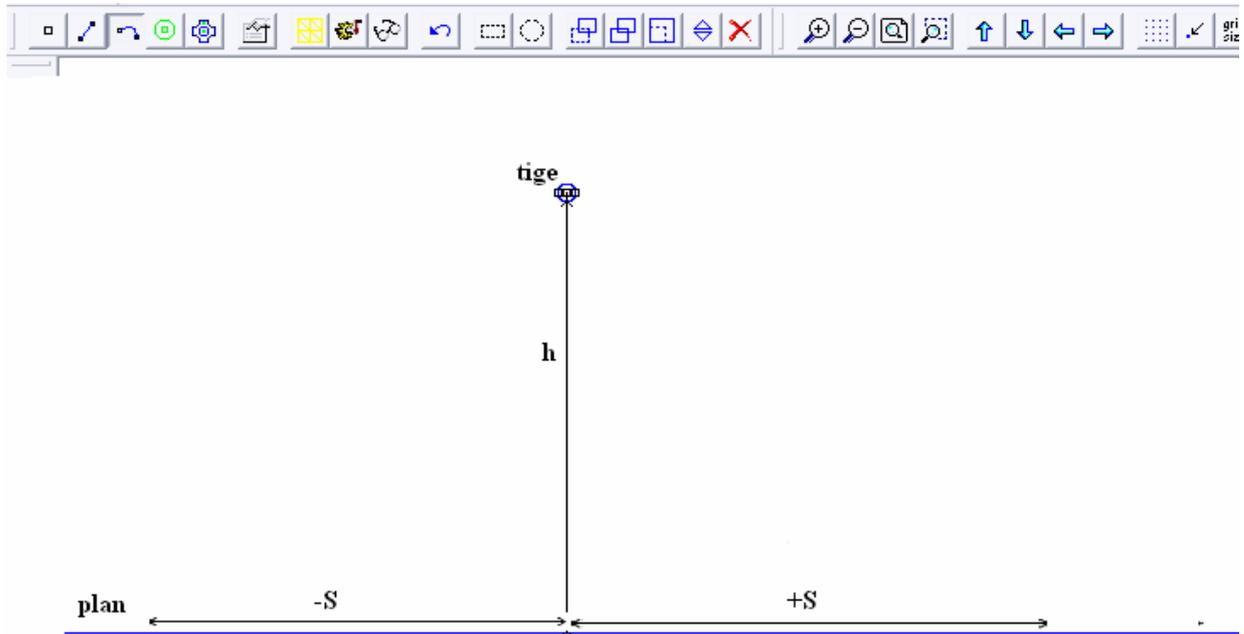
Au début, nous présentons le modèle expérimental simulé, la répartition du champ électrique sur toute la grille, la variation du champ électrique sur l'axe des abscisses ainsi que la place de chaque outil mathématique dans la procédure de simulation. Ensuite, nous exposons l'effet de la position et de la hauteur du paratonnerre sur la distribution du champ électrique à la surface du plan.

A la fin de ce chapitre, nous comparons les résultats calculés à ceux obtenus expérimentalement.

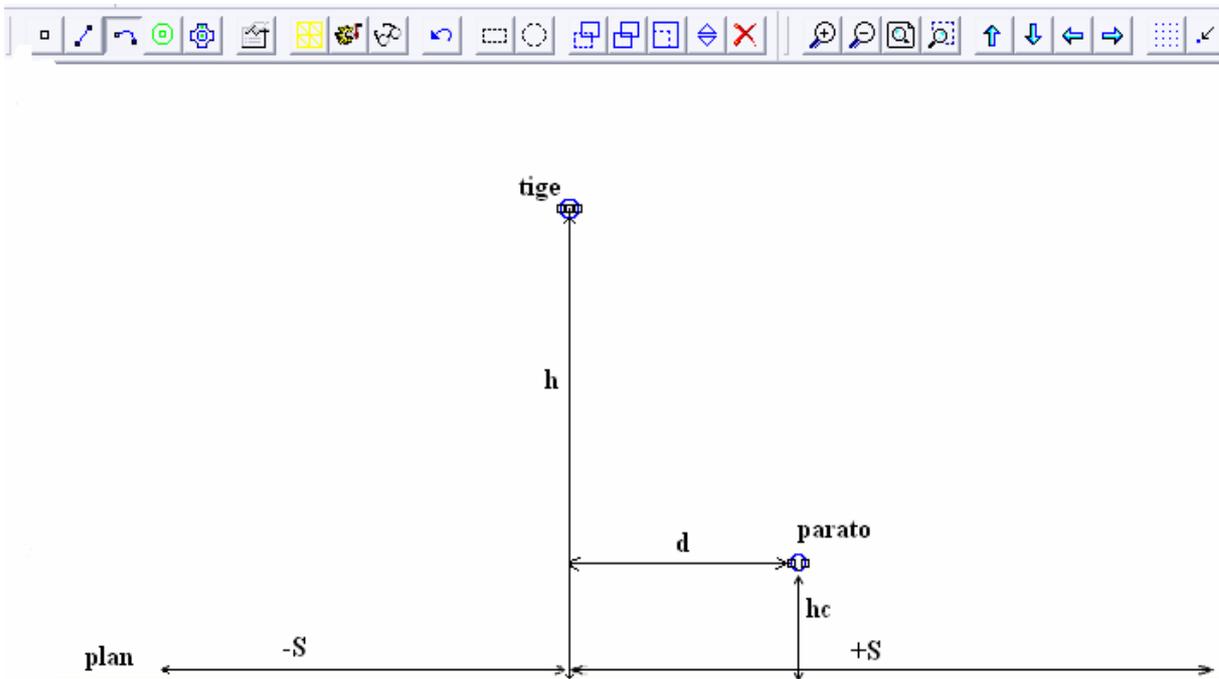
### V.1 SIMULATION DU MODELE EXPERIMENTAL

Le système simulé est constitué d'une tige de diamètre de 4.8 mm qui représente la tête du traceur de foudre, située en parallèle à une distance  $h$  d'une électrode plane. Un paratonnerre horizontal situé à une distance  $h_c$  d'une électrode plane et à une distance  $d$  de l'axe verticale de la tige.

Le paratonnerre est relié à la terre tandis que la pointe est portée au potentiel  $0,2U_0\%$  et  $0,4U_0\%$ .



**Figure V.1:** Modèle de base du système pointe-plan sans paratonnerre.



**Figure V.2:** Modèle de base du système pointe-plan avec paratonnerre situé à droite de la tige.

## V.2 CALCUL DU CHAMP ELECTRIQUE

Les problèmes électrostatiques, dont fait partie notre travail, étudient le comportement de l'intensité du champ électrique « E » et de la densité du flux électrique (induction électrique) « D ». Il y a deux conditions que ces grandeurs doivent satisfaire. La première est la forme locale du théorème de Gauss, qui indique que le flux sortant de n'importe quel volume fermé est égal à la charge contenue dans ce volume :

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho \quad (\text{V.1})$$

$\rho$  : représente la densité de charge volumique.

La deuxième condition est la forme locale de la loi d'Ampère en boucle, en régime statique :

$$\operatorname{rot} \vec{E} = \vec{0} \quad (\text{V.2})$$

L'induction et le champ sont également liés par l'intermédiaire du rapport constitutif :

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (\text{V.3})$$

$\varepsilon$  est la permittivité diélectrique

En utilisant le potentiel scalaire électrique V, défini par la relation suivante :

$$\vec{E} = -\operatorname{grad} V \quad (\text{V.4})$$

Nous pouvons tirer la répartition du potentiel, décrite par la loi de Poisson :

$$\Delta V = \rho / \varepsilon \quad (\text{V.5})$$

En négligeant la charge d'espace et en considérant l'évolution de la décharge dans un plan (x, y), l'équation aux différences partielles à résoudre est :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right) = 0 \quad (\text{V.6})$$

Afin que la résolution du potentiel (équation V.6) soit faite, il est indispensable de définir en premier lieu une condition aux limites. Ainsi, sur le cercle extérieur à notre système, nous considérons la composante normale du potentiel comme étant nulle,  $\frac{\partial v}{\partial n} = 0$  (condition aux limites de type Neumann). De cette façon, les frontières n'influent pas sur le modèle qui se retrouve isolé.

En second lieu, nous réalisons un maillage comportant des éléments de forme triangulaire.

Finalement, la répartition du champ est déduite de la relation champ-potentiel (V.4).

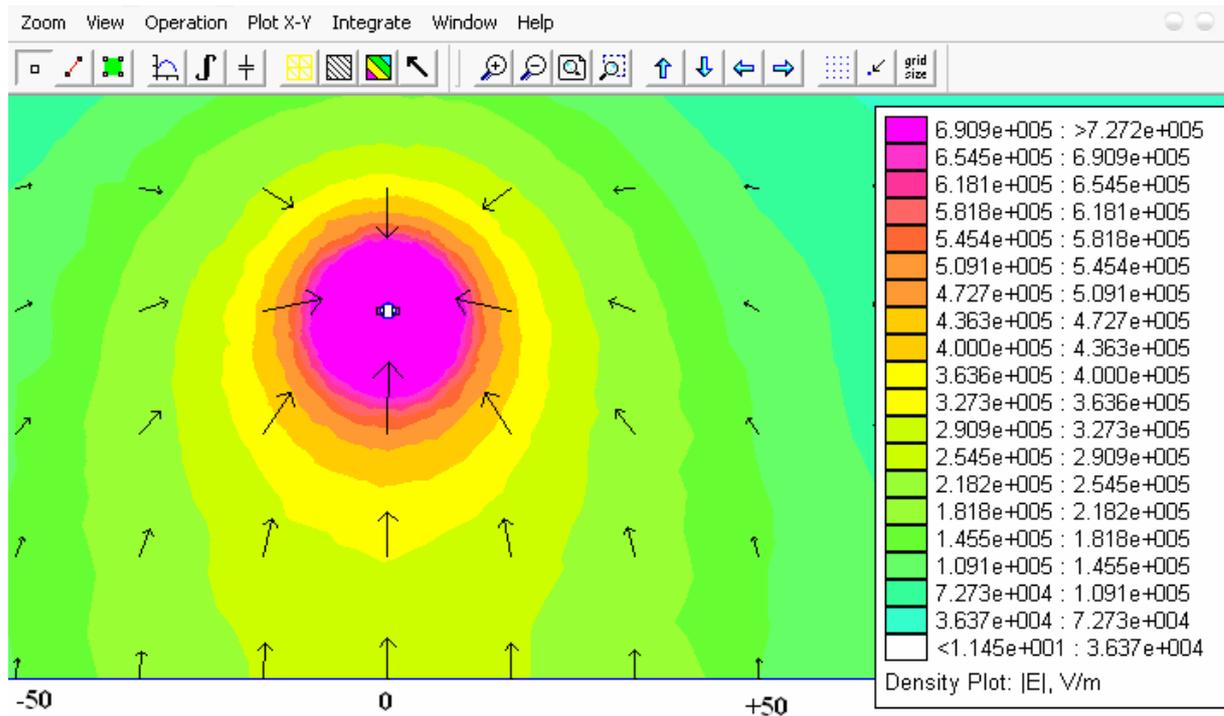


Figure V.3 : Répartition du champ électrique dans un système pointe-plan sans paratonnerre

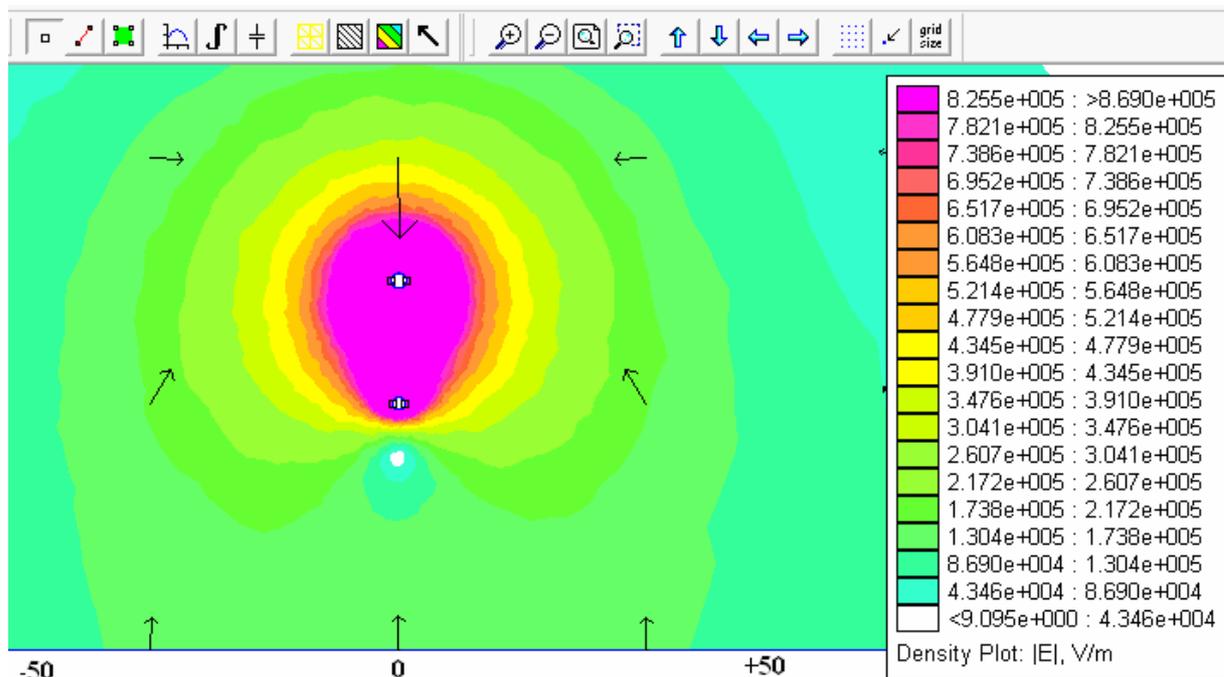
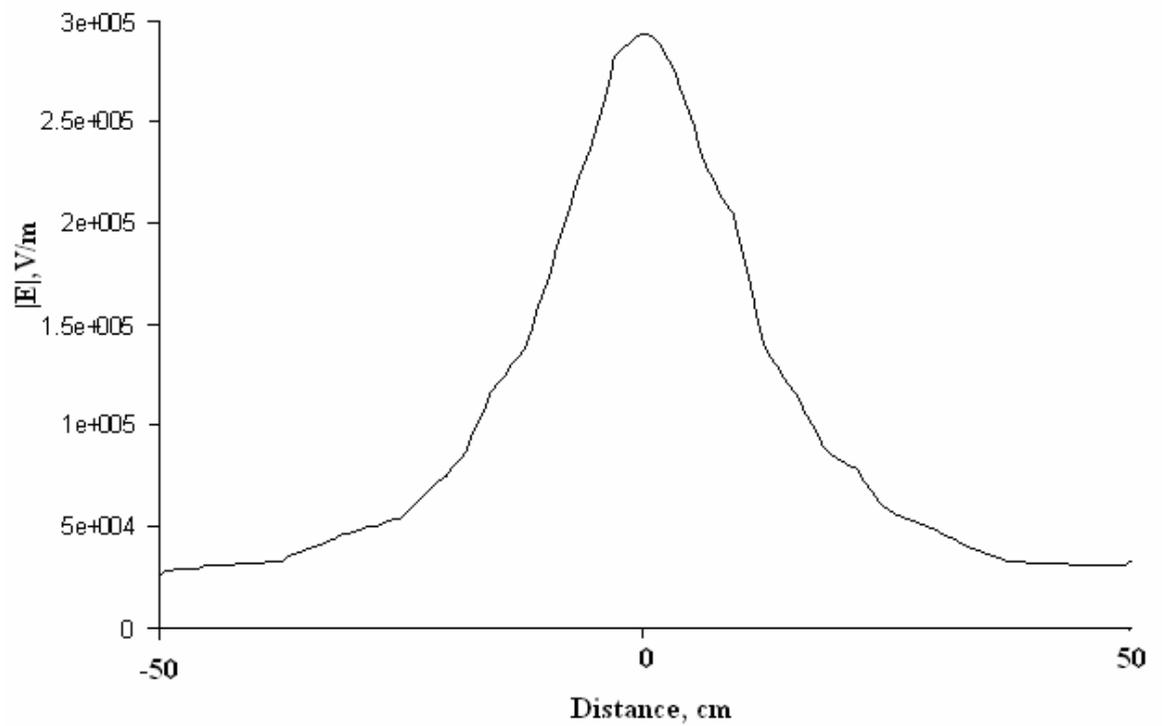
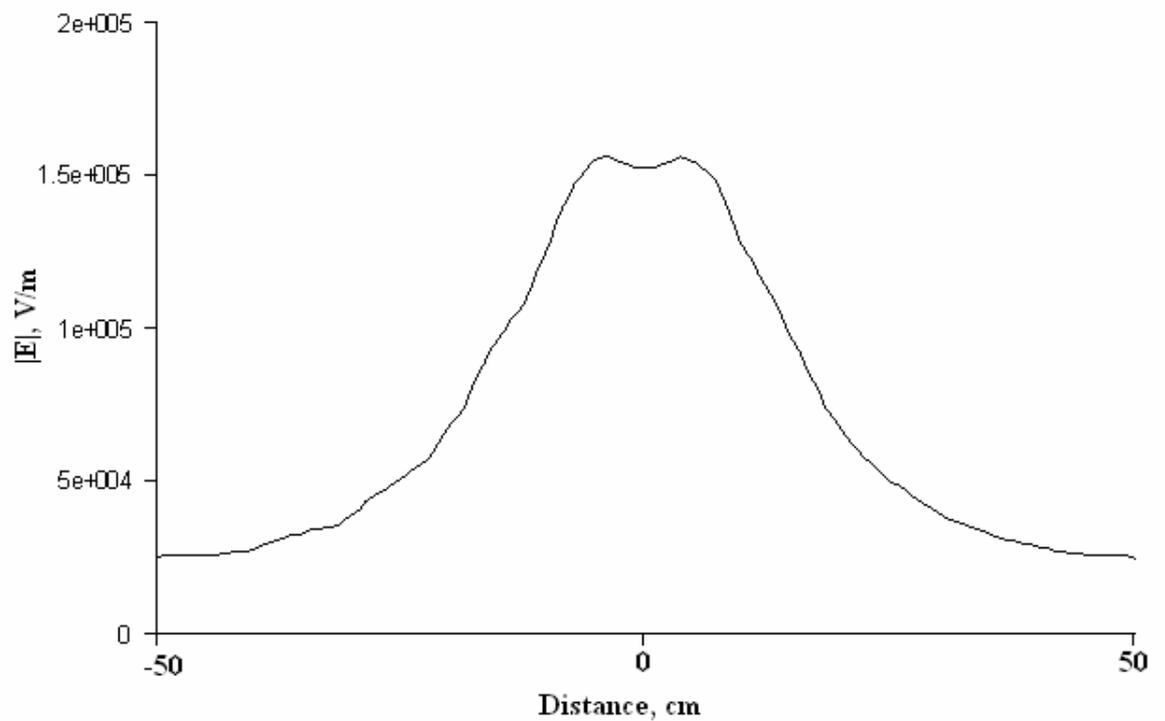


Figure V.4 : Répartition du champ électrique dans un système pointe-plan avec paratonnerre

$$d/h_c=0$$



**Figure V.5 :** Variation du champ électrique dans un système pointe-plan sans paratonnerre.



**Figure V.6 :** Variation du champ électrique dans un système pointe-plan avec paratonnerre  
 $d/h_c=0$ .

### V.3 DISTRIBUTION DU CHAMP EN FONCTION DE LA DISTANCE TIGE-AXE DE LA SONDE

#### V.3.1 Système pointe-plan sans paratonnerre.

D'après les figure V.7 et V.8, pour les deux niveaux de tension  $0.2U_{0\%}$  et  $0.4U_{0\%}$ , nous constatons que l'intensité du champ électrique prend une valeur maximale pour  $S/h=0$  (il est bien illustré sur la figure V.5) et diminue au fur et à mesure qu'on éloigne la sonde de l'axe de la pointe ( $S/h$  augmente) puis elle tend vers une valeur constante.

Pour les différentes positions de la sonde ( $S/h$ ), nous remarquons que la hauteur de la pointe ( $h$ ) a une grande influence sur la valeur du champ au sol. En effet, nous constatons que l'intensité du champ augmente avec la hauteur  $h$ . Cette augmentation serait due au niveau de tension appliqué à la tige.

La valeur du champ électrique croît en augmentant la tension appliquée ce qui justifie que la valeur du champ électrique au sol est proportionnelle à la quantité de charge contenue dans le traceur.

L'augmentation du champ au sol pourrait être expliquée par la forte probabilité d'existence de charges d'espace dans l'intervalle pointe-plan [22].

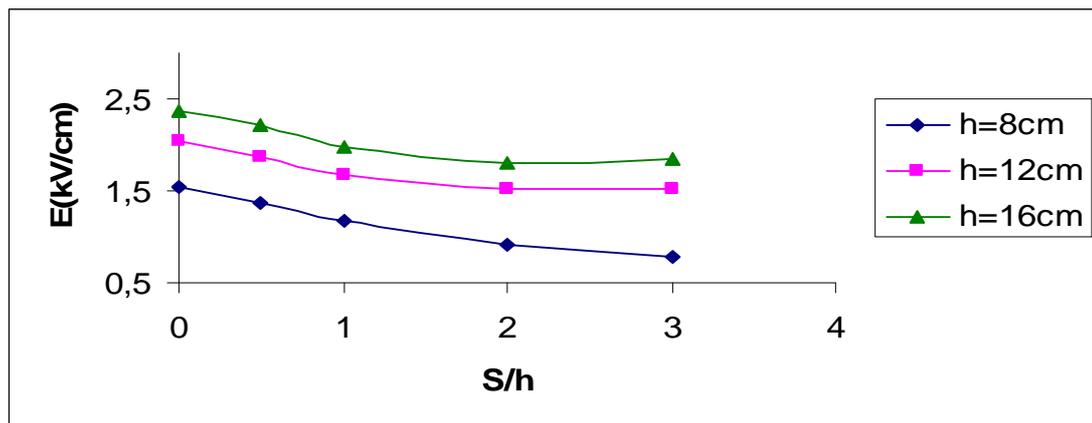


Figure V.7 : Champ électrique calculé au sol en fonction de la position de la sonde  $S/h$   
 $U=0.2U_{0\%}$

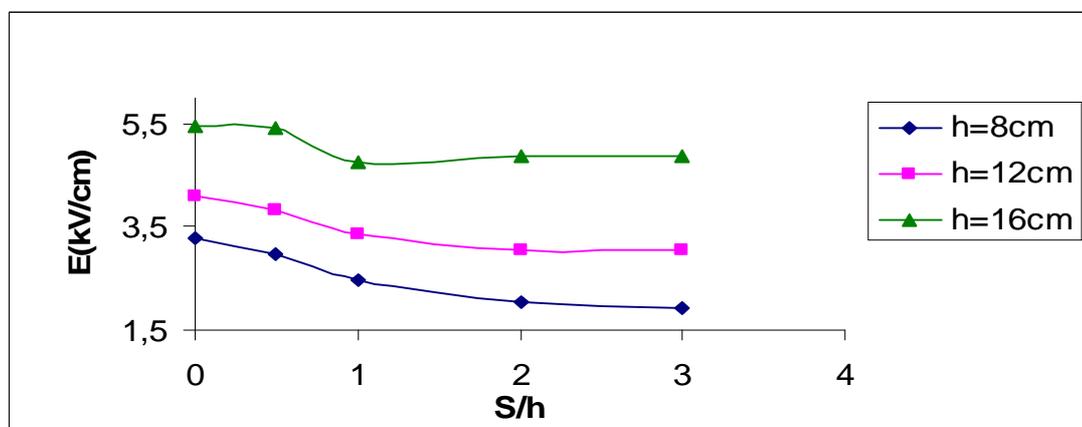


Figure V.8 : Champ électrique calculé au sol en fonction de la position de la sonde  $S/h$   
 $U=0.4U_{0\%}$

### V.3.2 Système pointe-plan avec paratonnerre

#### V.3.2.1 Influence de la position du paratonnerre

Dans un premier temps, nous vérifions l'influence de la position du paratonnerre pour les trois intervalles d'air ( $h=08, 12, 16$  cm), pour les trois hauteurs relatives du paratonnerre ( $h/h_c=1.5, 2, 4$ ) et ceci pour les deux niveaux de tensions  $U=0.2U_{0\%}$  et  $0.4U_{0\%}$ .

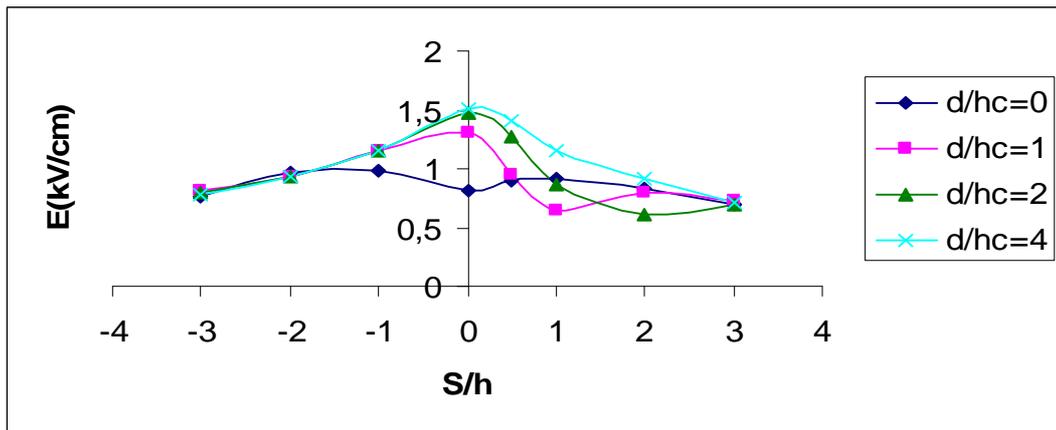
La position du paratonnerre est définie par la distance  $\mathbf{d}$  entre l'axe de la pointe et le paratonnerre. Ces différentes valeurs relatives de  $\mathbf{d}$  sont:  $d/h_c=0, 1, 2, 4$ .

D'après les figures V.9 à V.14, nous constatons que plus le paratonnerre se rapproche de la tige ( $d/h_c$  diminue) plus le champ sur le plan diminue, nous pouvons conclure que plus le paratonnerre se rapproche de la tige sous tension plus il capte une grande quantité de lignes de champ, et le champ électrique devient relativement fort sur la pointe du paratonnerre augmentant ainsi la probabilité de décharge en cette pointe.

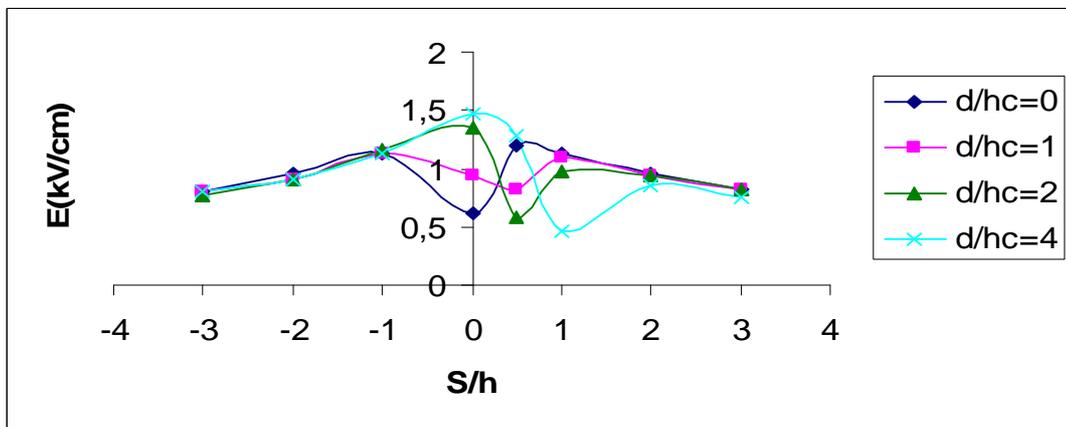
Pour une position donnée du paratonnerre, le champ électrique au sol diminue au voisinage du paratonnerre. Cette tendance est expliquée par l'attraction des lignes de champ électrique par le paratonnerre, ce qui affaiblit le champ électrique au voisinage du paratonnerre. Ceci justifie aussi le fait que le champ électrique dans le demi-plan qui contient le paratonnerre est plus faible que celui calculé dans l'autre demi-plan. Quand la sonde s'éloigne du paratonnerre la valeur du champ calculée augmente et devient confondue avec celle calculé dans un système tige-plan sans paratonnerre.

Les figures V.9 à V.14 nous permettent de constater que le champ électrique n'a pas dépassé la valeur de  $5\text{kV/cm}$ , la valeur de champ électrique suffisante pour que les streamers s'amorcent à partir du sol pouvons conduire au claquage.

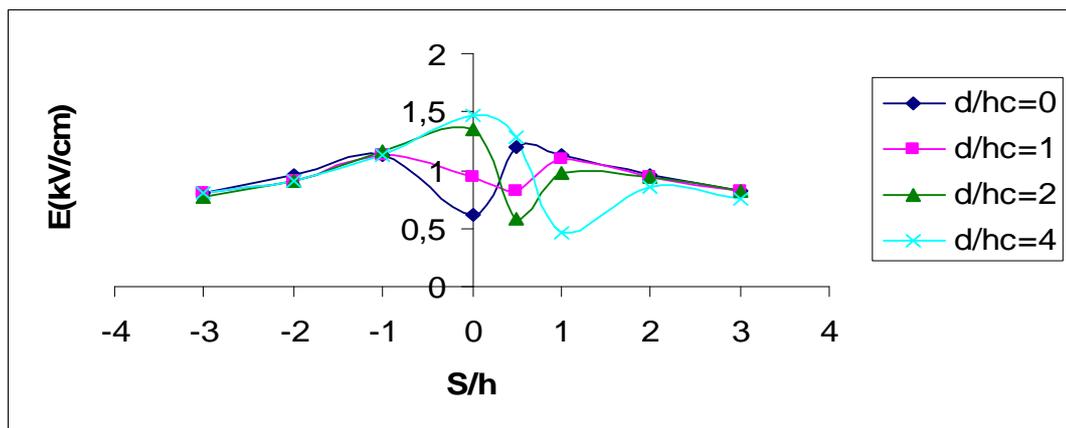
Pour les positions juste au-dessous de la tige  $S/h=0$ , nous remarquons que le champ augmente lorsque le paratonnerre s'éloigne de l'axe de la tige, même avec la diminution de la hauteur du paratonnerre.



hc=6 cm

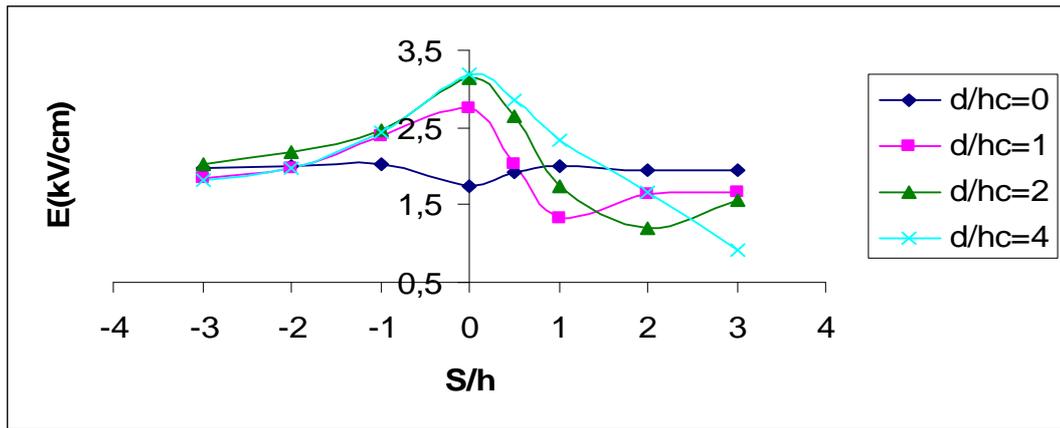


hc=4 cm

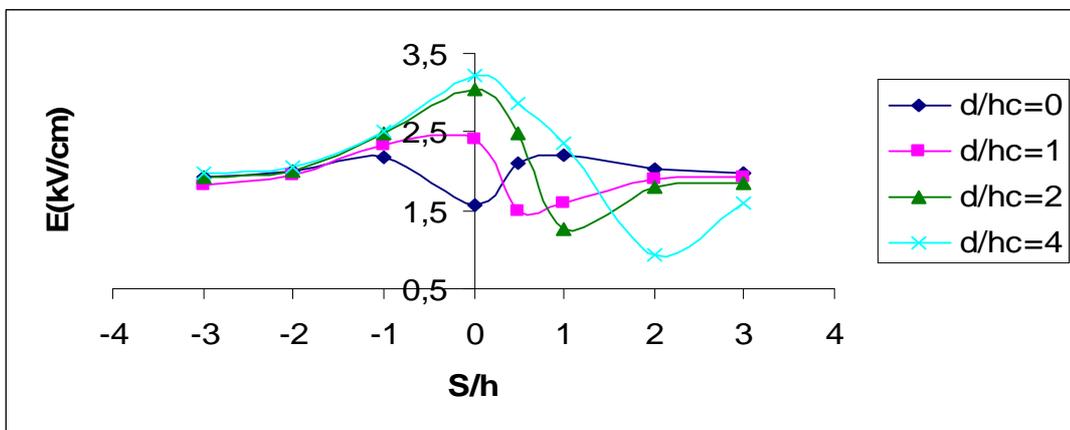


hc=2 cm

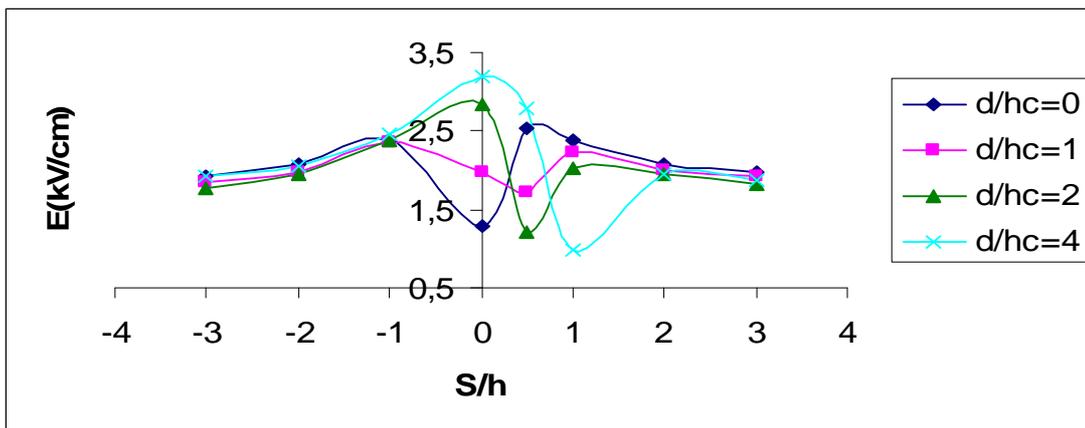
Figure V.9 : Champ électrique calculé au sol en fonction de la position de la sonde S/h  
 $h=8$  cm,  $U=0.2U_{0\%}$ .



hc=6 cm

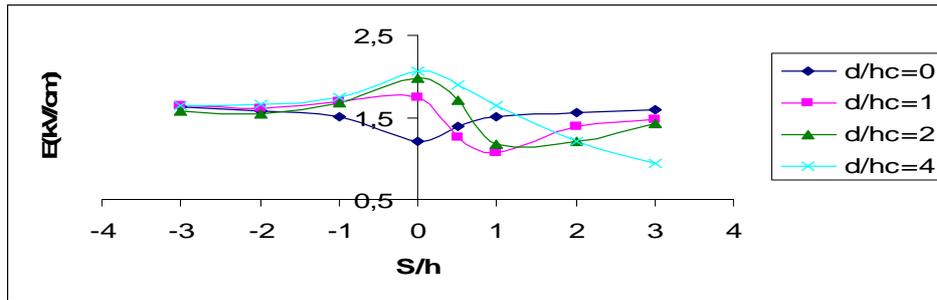


hc=4 cm

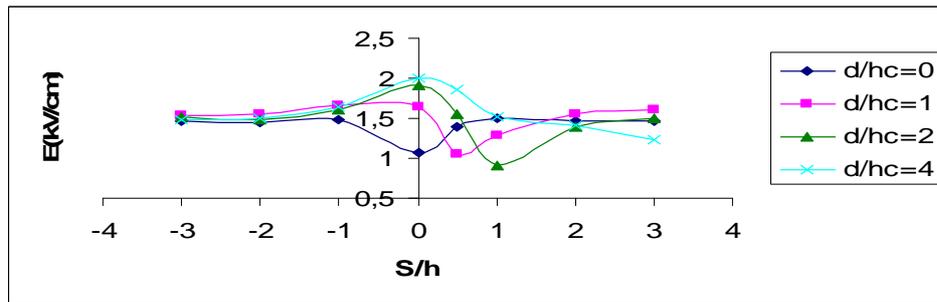


hc=2 cm

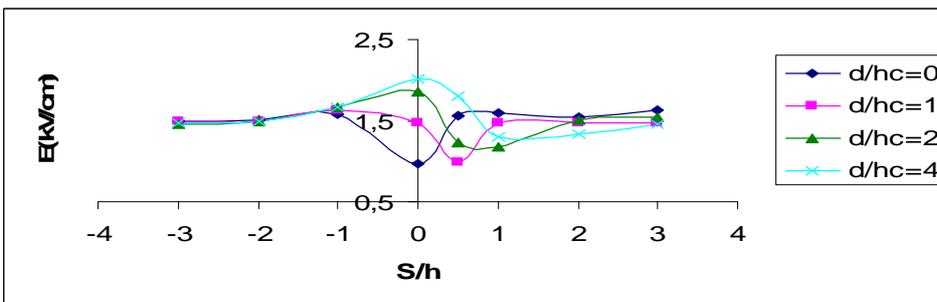
**Figure V.10 :** Champ électrique calculé au sol en fonction de la position de la sonde S/h  
h=8 cm, U=0.4 U<sub>0%</sub>.



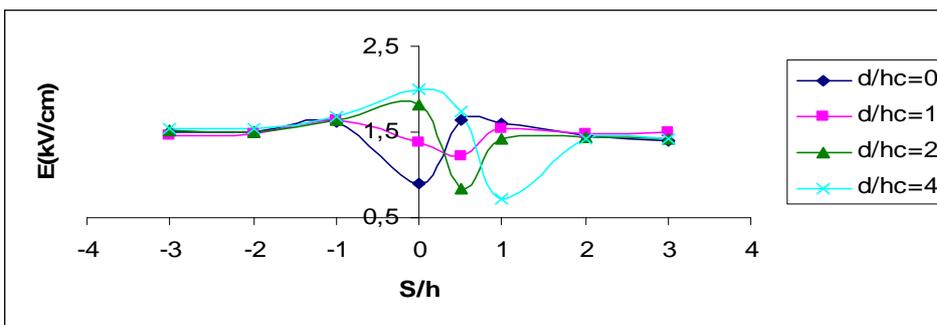
hc=8 cm



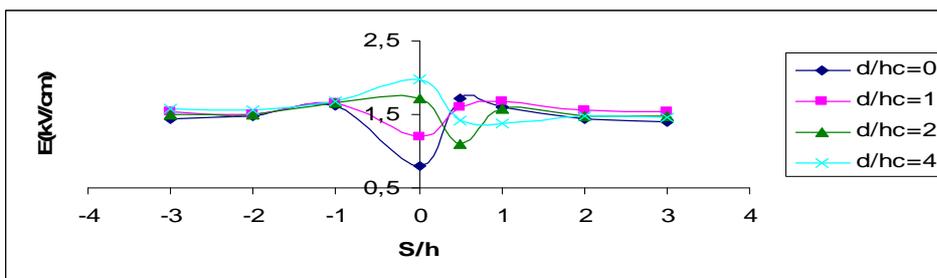
hc=6 cm



hc=4 cm

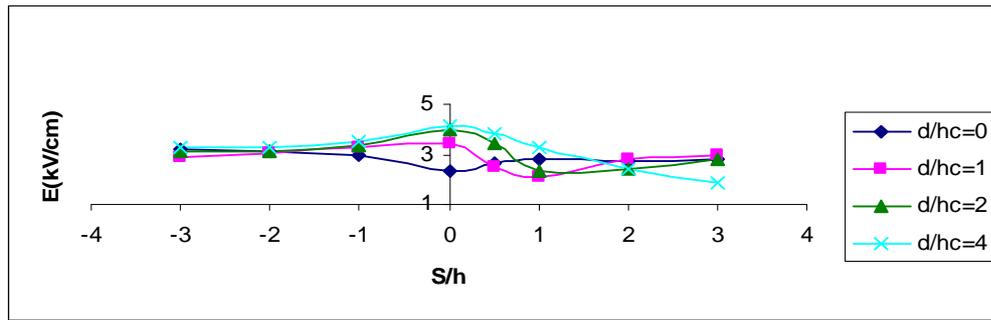


hc=3 cm

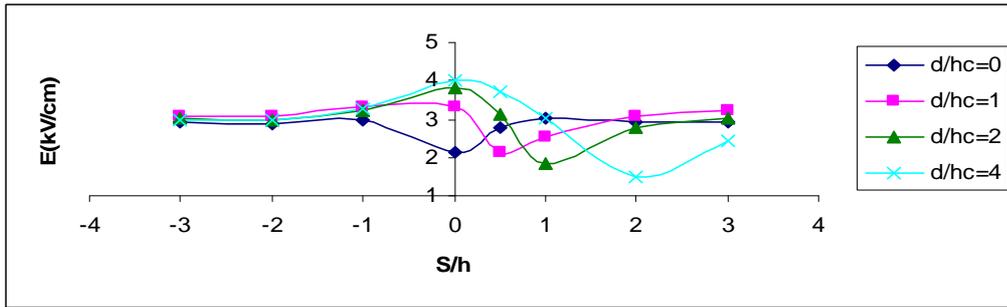


hc=2 cm

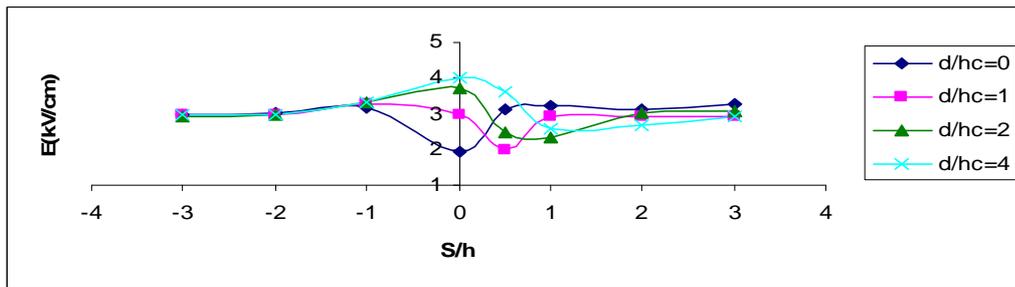
Figure V.11 : Champ électrique calculé au sol en fonction de la position de la sonde  $S/h$   
 $h=12$  cm,  $U=0.2 U_{0\%}$ .



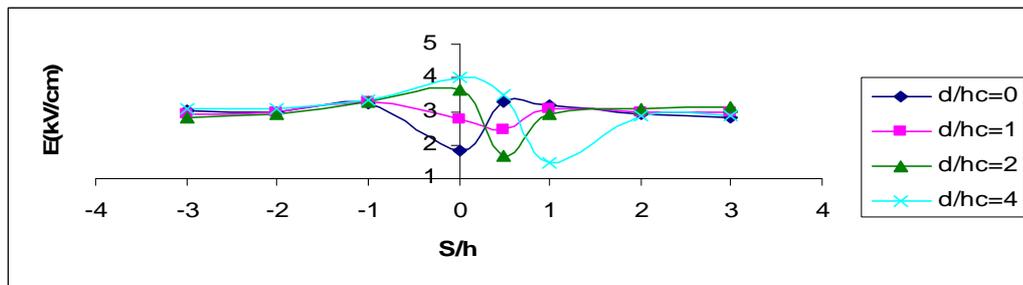
hc=8 cm



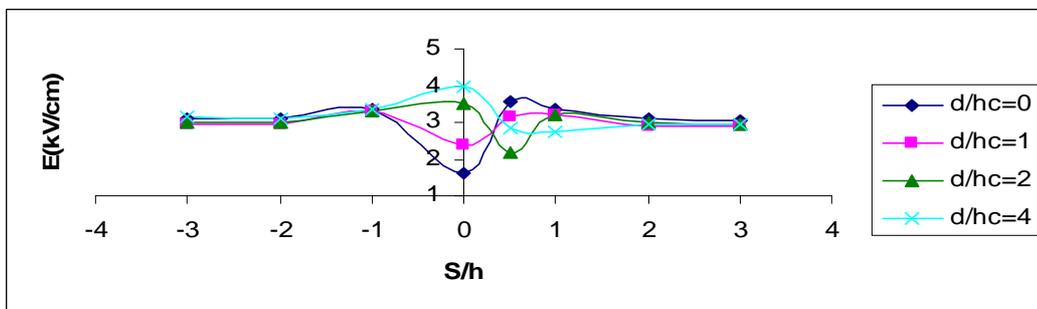
hc=6 cm



hc=4 cm

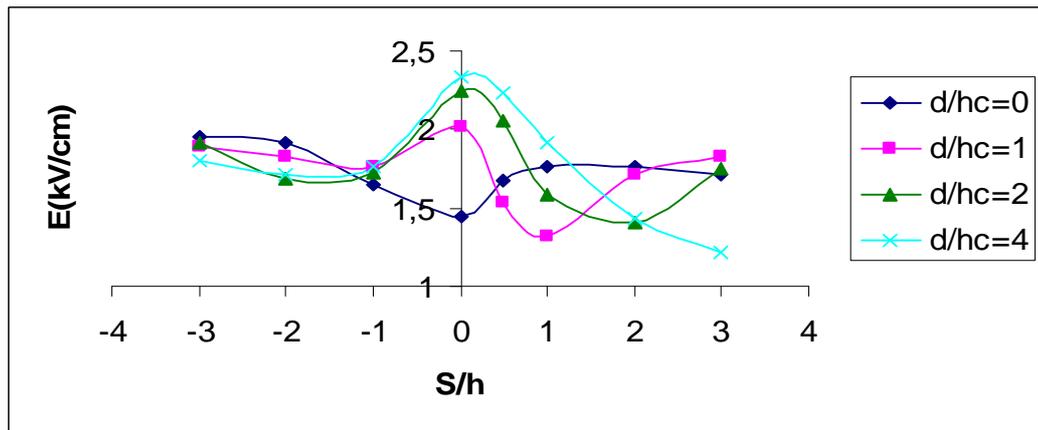


hc=3 cm

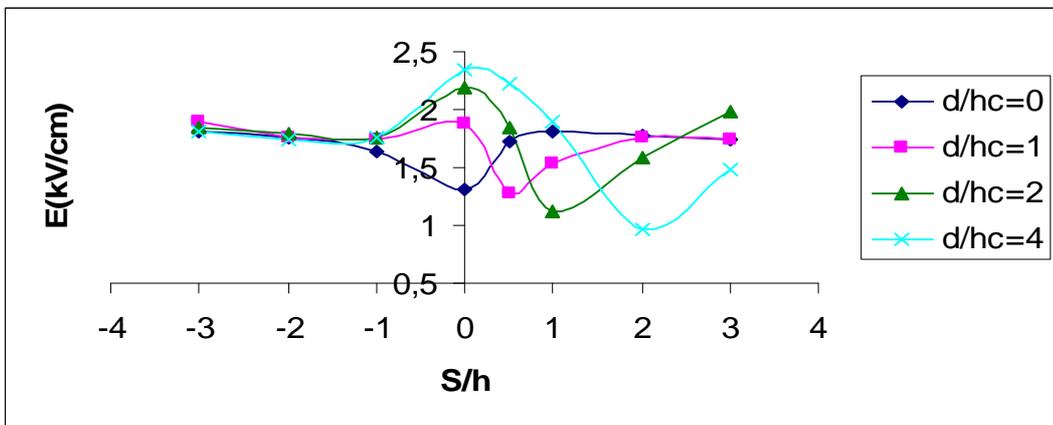


hc=2 cm

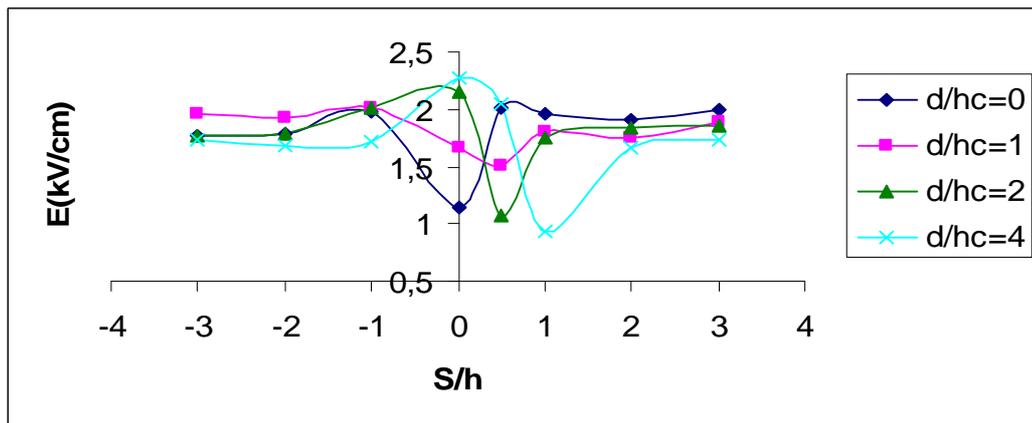
**Figure V.12 :** Champ électrique calculé au sol en fonction de la position de la sonde  $S/h$   
 $h=12$  cm,  $U=0.4 U_{0\%}$ .



hc=11 cm

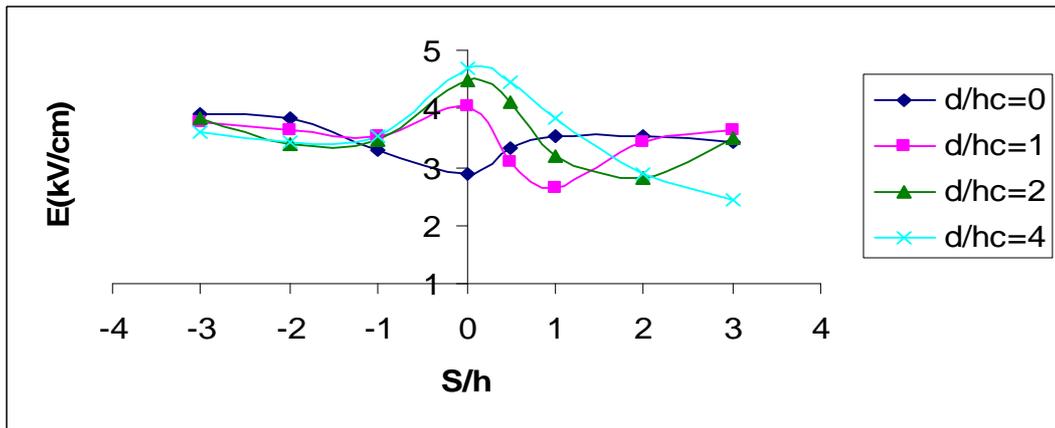


hc=8 cm

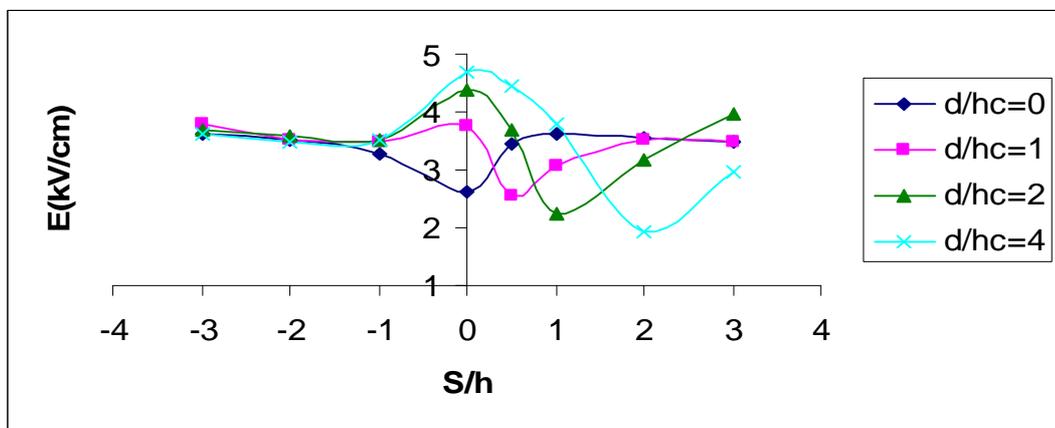


hc=4 cm

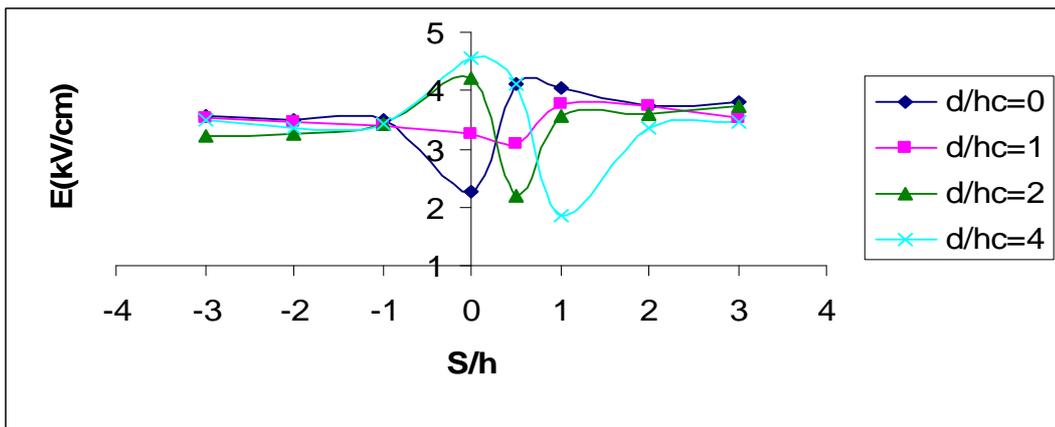
**Figure V.13 :** Champ électrique calculé au sol en fonction de la position de la sonde  $S/h$   
 $h=16$  cm,  $U=0.2 U_{0\%}$ .



hc=11cm



hc=8 cm



hc=4 cm

**Figure V.14** : Champ électrique calculé au sol en fonction de la position de la sonde S/h  
 $h=16$  cm,  $U=0.4 U_{0\%}$

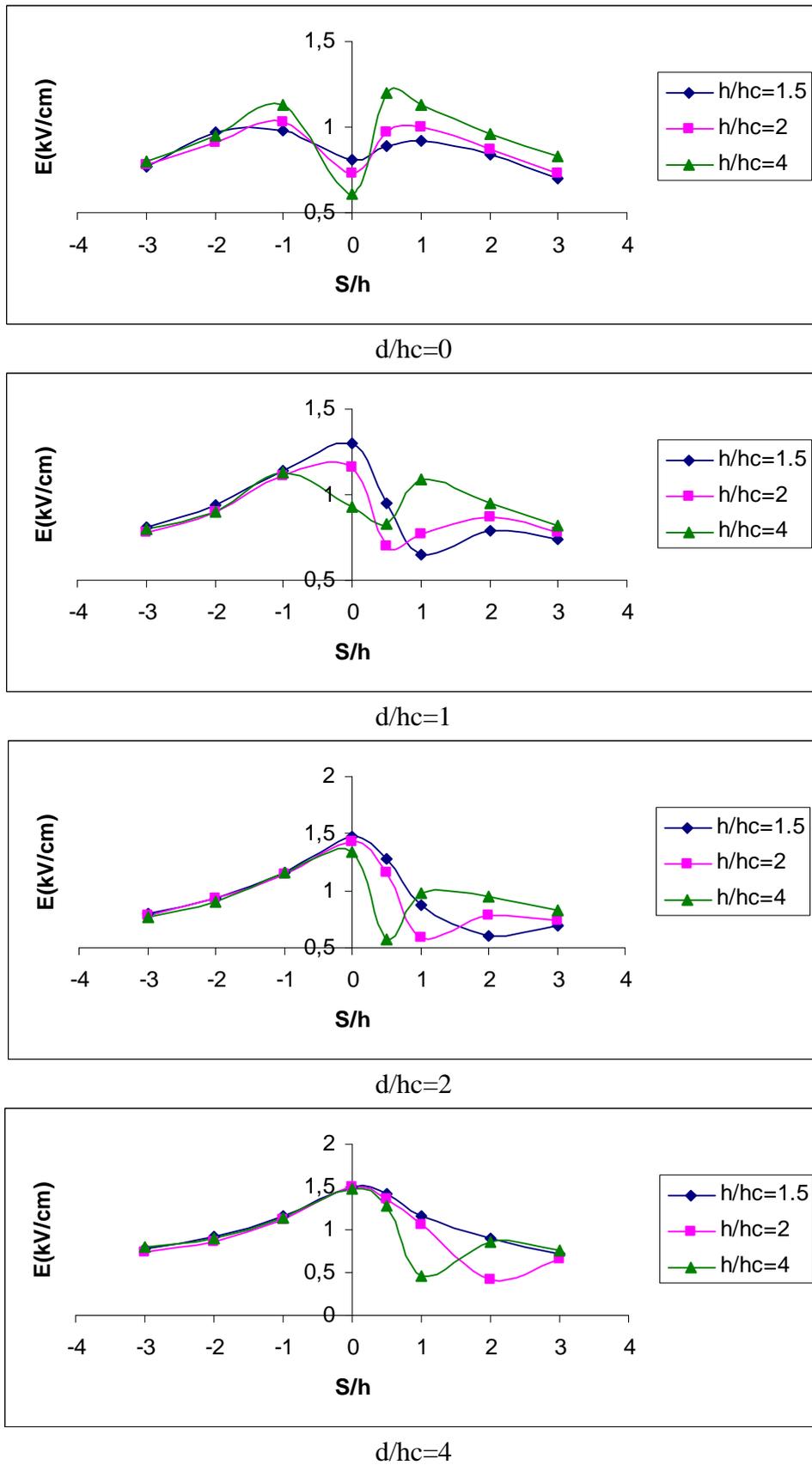
### V.3.2.2 Influence de la hauteur du paratonnerre

D'après les figures V.15 à V.20, nous remarquons que pour les petites hauteurs du paratonnerre ( $h/h_c$  grand), la valeur du champ au sol est considérable.

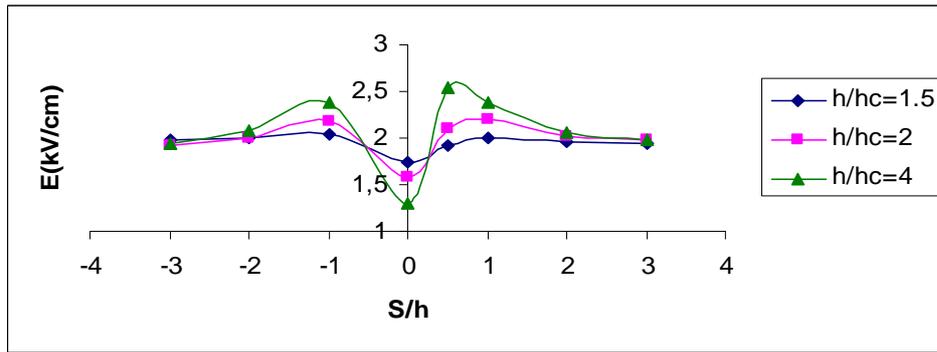
Au fût et à mesure que la hauteur du paratonnerre augmente, la valeur du champ électrique au sol diminue. Ceci peut être expliqué par le fait que plus le paratonnerre a une hauteur élevée, plus il attire un grand nombre de lignes de champ et plus la probabilité de foudroiement du paratonnerre augmente.

Pour les positions de la sonde au-dessous de la tige ( $S/h=0$ ), nous observons la forte augmentation du champ électrique sur le plan lorsque le paratonnerre s'éloigne de l'axe de la tige pour différentes hauteurs du paratonnerre.

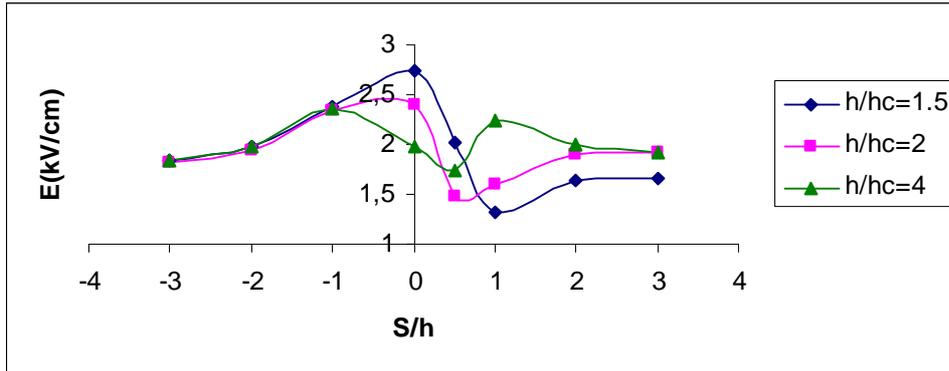
Nous constatons aussi que le champ électrique dans le demi-plan à droite de la tige qui contient le paratonnerre est inférieur à celui correspondant à l'autre demi-plan à cause de la forte attraction des lignes de champ électrique par le paratonnerre, ce qui affaiblit le champ au sol.



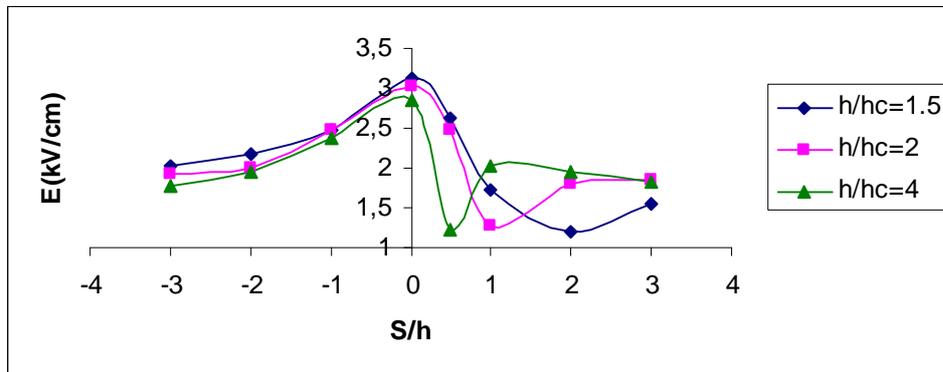
**Figure V.15 :** Champ électrique calculé au sol en fonction de la position de la sonde  $S/h$   
 $h=8$  cm,  $U=0.2 U_{0\%}$



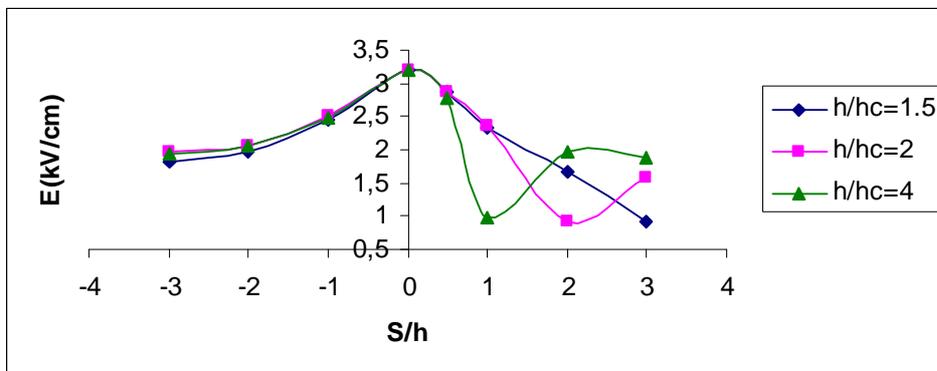
$d/hc=0$



$d/hc=1$



$d/hc=2$



$d/hc=4$

**Figure V.16 :** Champ électrique calculé au sol en fonction de la position de la sonde  $S/h$   
 $h=8$  cm,  $U=0.4 U_{0\%}$

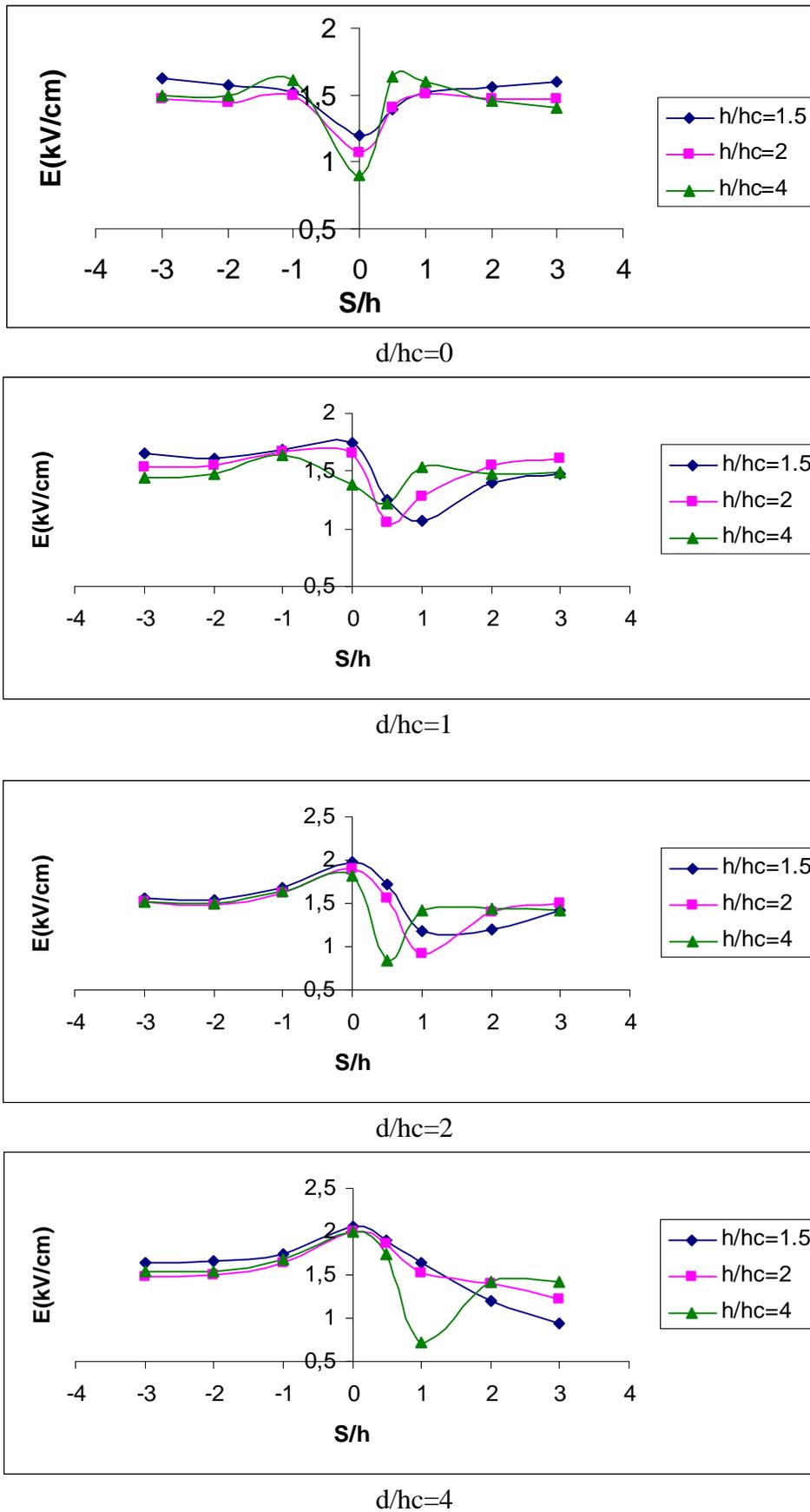
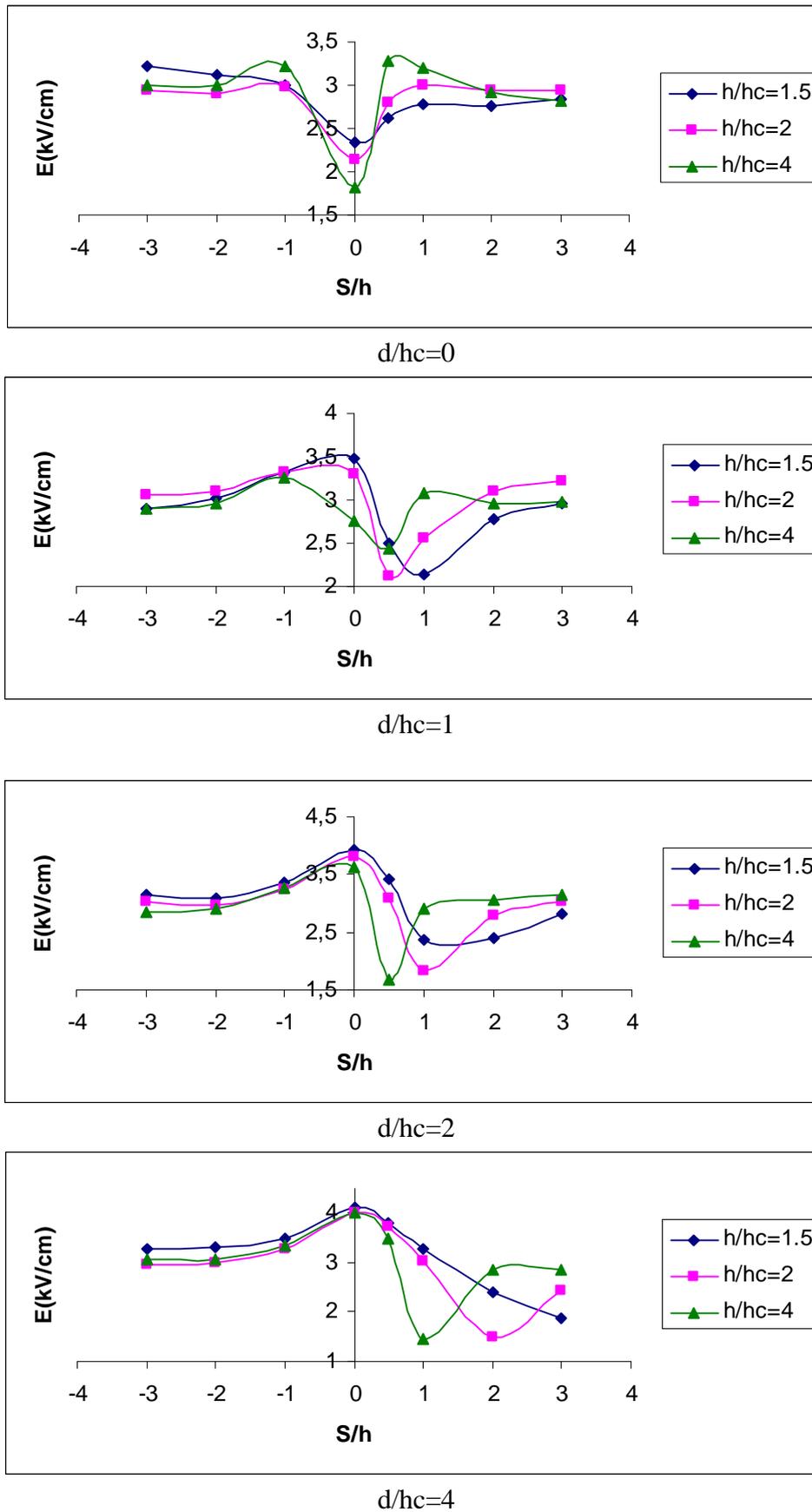
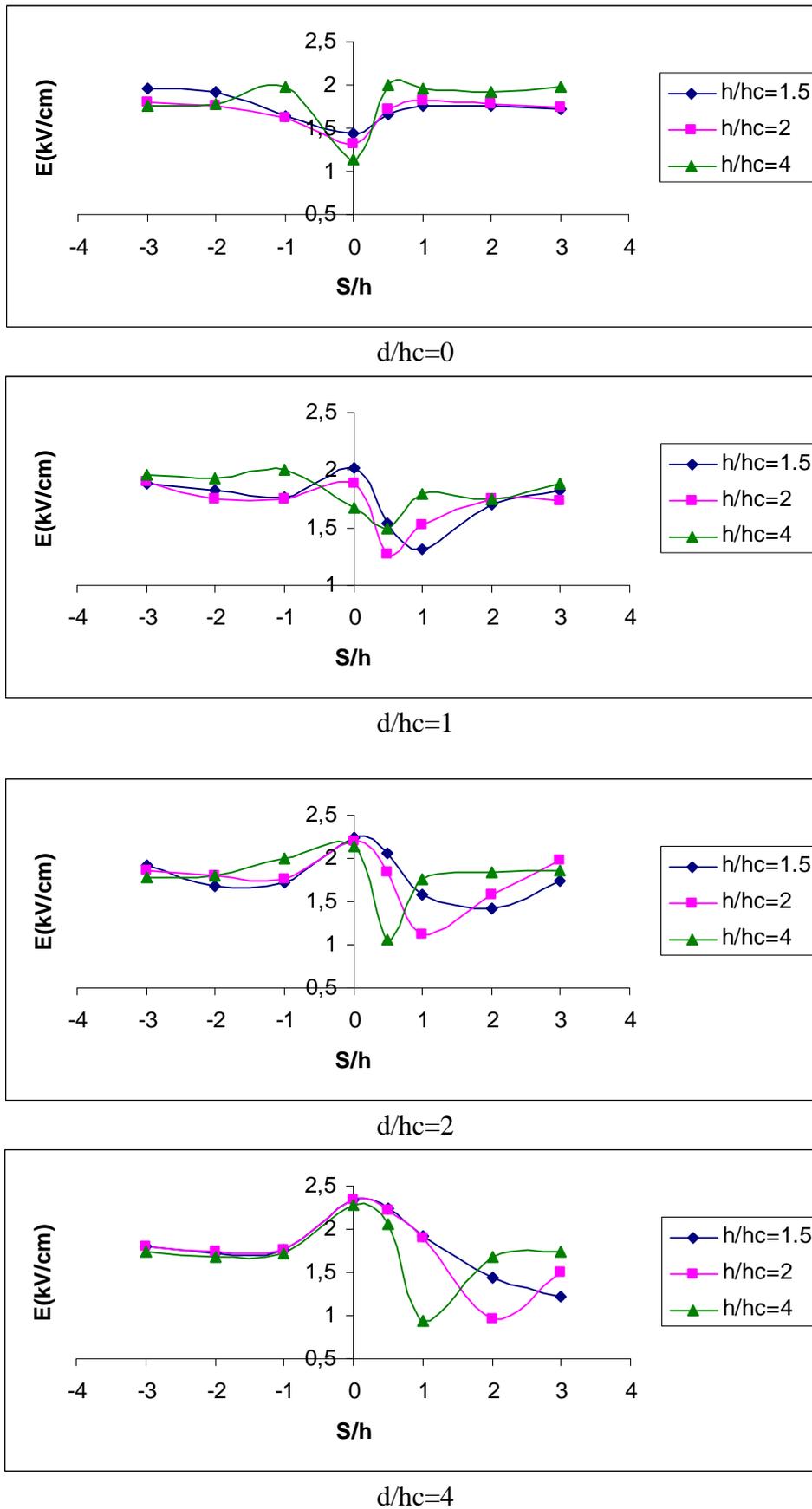


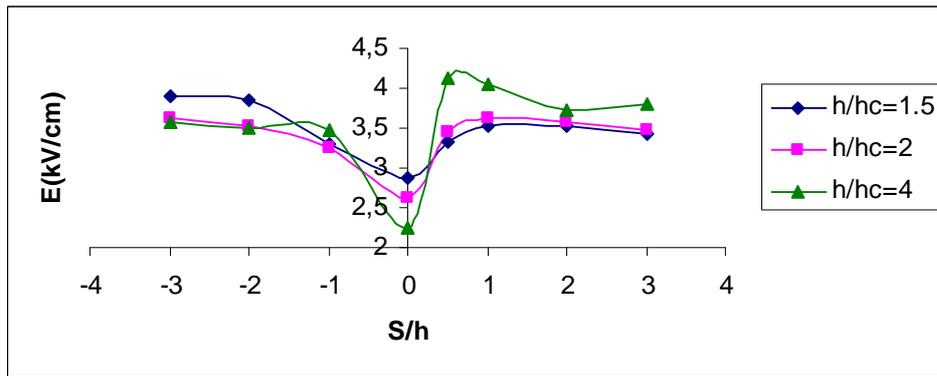
Figure V.17 : Champ électrique calculé au sol en fonction de la position de la sonde  $S/h$   
 $h=12$  cm,  $U=0.2 U_{0\%}$



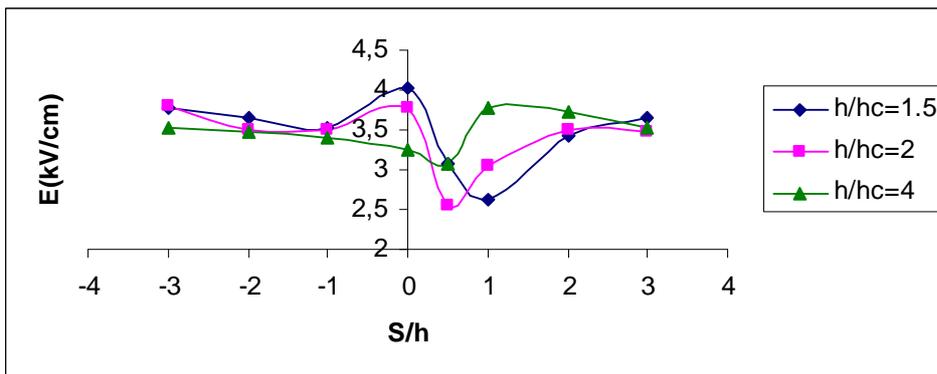
**Figure V.18 :** Champ électrique calculé au sol en fonction de la position de la sonde  $S/h$   
 $h=12$  cm,  $U=0.4 U_{0\%}$



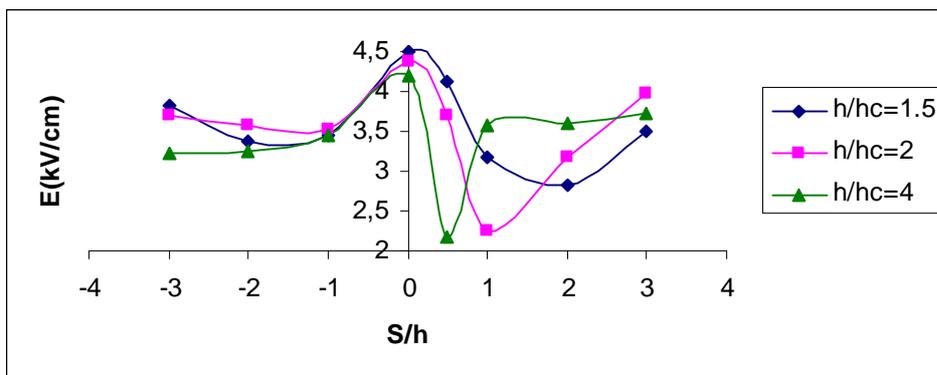
**Figure V.19 :** Champ électrique calculé au sol en fonction de la position de la sonde  $S/h$   
 $h=16$  cm,  $U=0.2 U_{0\%}$



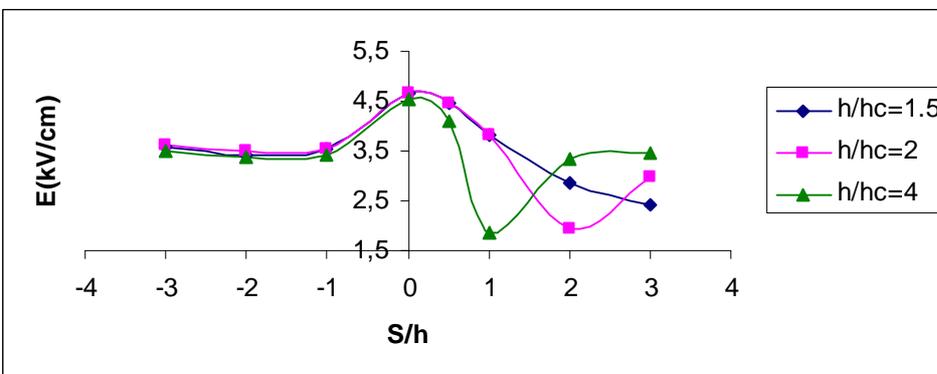
d/hc=0



d/hc=1



d/hc=2



d/hc=4

Figure V.20 : Champ électrique calculé au sol en fonction de la position de la sonde S/h  
 $h=16$  cm,  $U=0.4 U_{0\%}$

### V.3.2.3 Discussion sur l'effet du paratonnerre

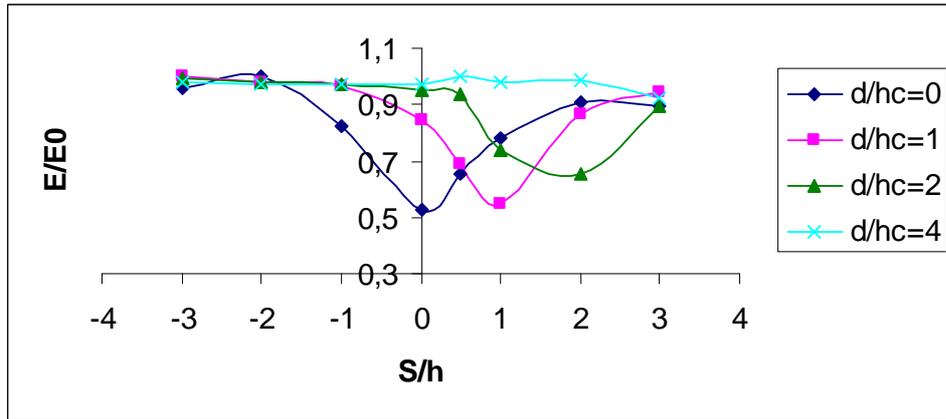
Pour illustrer l'influence du paratonnerre sur la distribution du champ électrique au sol dans le cas d'un système d'électrodes tige-plan en fonction de la position de la sonde  $S/h$ , on définit le rapport  $E/E_0$  par le rapport entre le champ calculé dans la configuration avec paratonnerre et le champ calculé sans paratonnerre.

D'après les figures (V.21) à (V.26) et pour les deux niveaux de tension  $U=0.2U_{0\%}$ ,  $0.4U_{0\%}$ , nous constatons que le rapport  $E/E_0$  atteint la valeur la plus faible pour les positions de la sonde au-dessous du paratonnerre, puis croît en éloignant la sonde du paratonnerre. On peut expliquer ce phénomène par l'effet de la zone de protection du paratonnerre de telle sorte que les objets situés directement au-dessous du paratonnerre sont pratiquement protégés et le champ sera très réduit par rapport aux autres régions loin du paratonnerre.

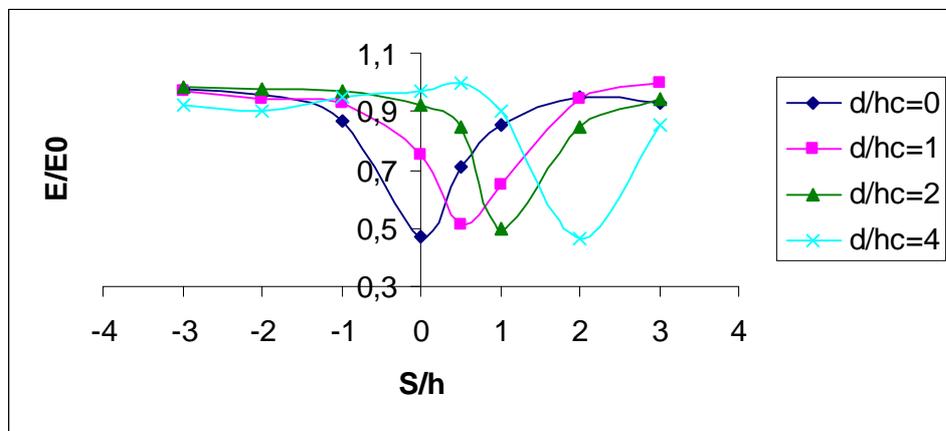
Au fur et à mesure que la sonde s'éloigne du paratonnerre, on voit que le rapport  $E/E_0$  augmente jusqu'à l'unité (valeur du champ égale à celle correspondant à la configuration sans paratonnerre), cas où le paratonnerre n'a pratiquement aucun effet.

Pour les positions de la sonde les plus proches de la tige ( $S/h=0, 0.5$ ), le champ électrique atteint la plus faible valeur pour la position du paratonnerre plus proche de la tige ( $d/hc=0$ ), et augmente en augmentant le rapport  $d/hc$ .

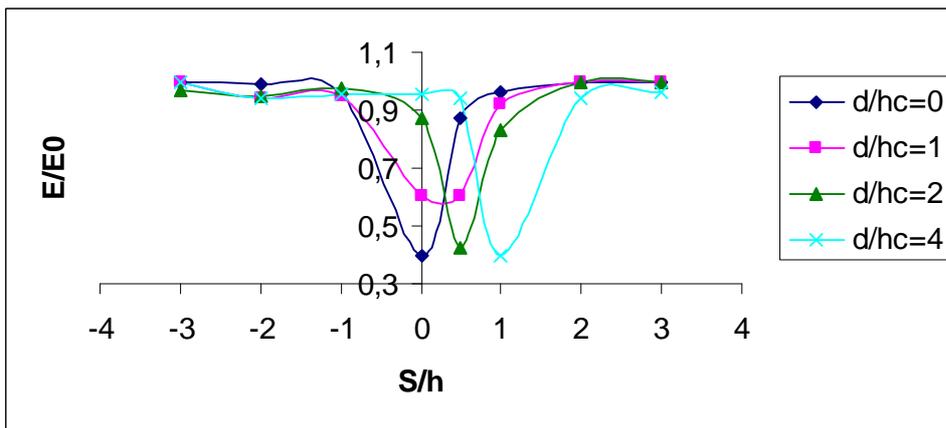
Ainsi le rapport  $E/E_0$  dans le demi-plan à droite de la tige qui contient le paratonnerre est inférieur à celui se trouvant dans l'autre.



$hc=6$  cm

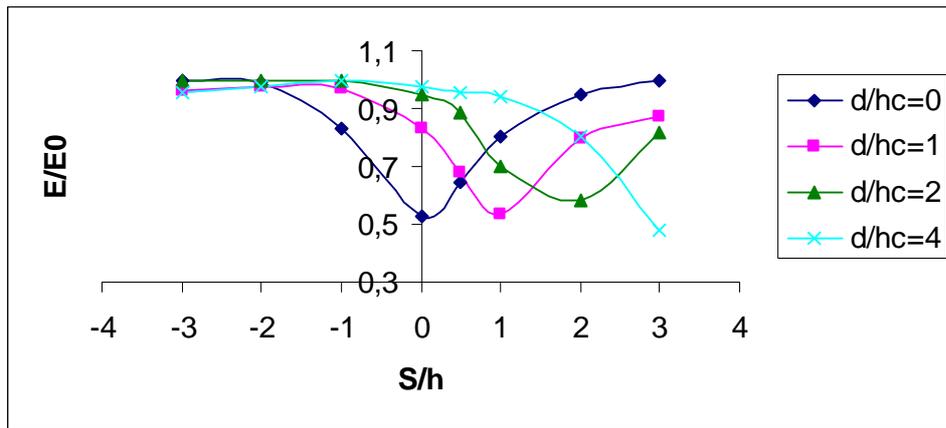


$hc=4$  cm

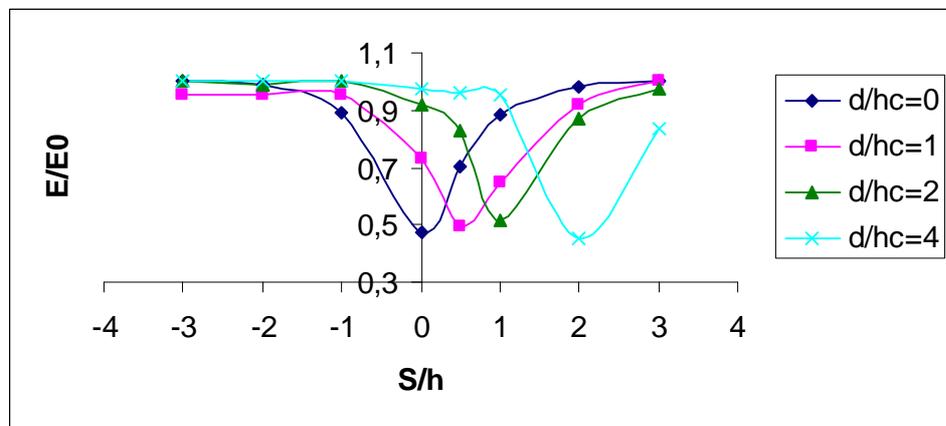


$hc=2$  cm

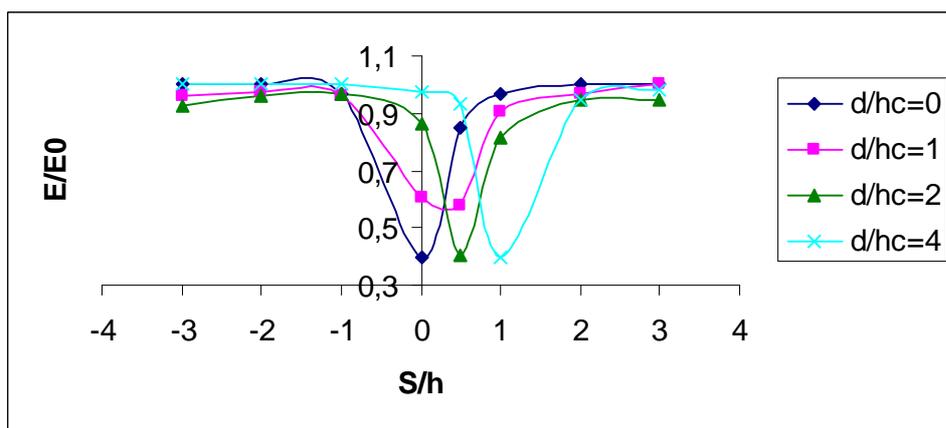
**Figure V.21:** Variation du rapport  $E/E_0$  en fonction de position de la sonde ( $S/h$ )  
 $h=8$  cm,  $U=0,2U_{0\%}$ .



hc=6 cm

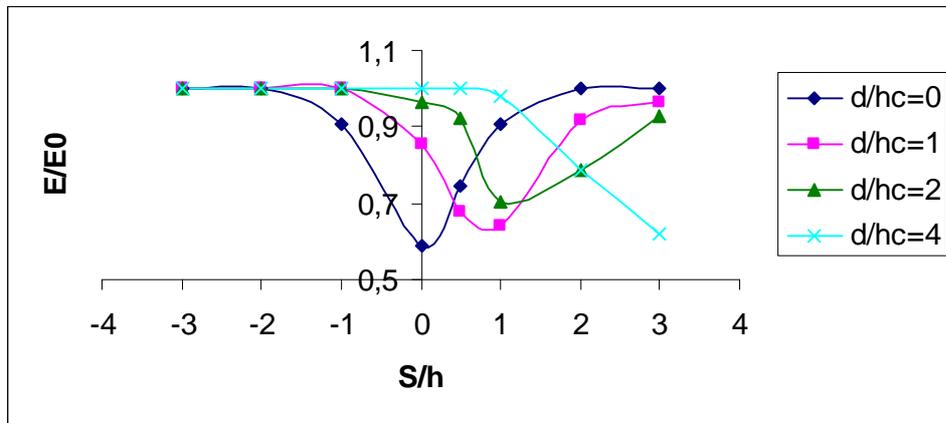


hc=4 cm

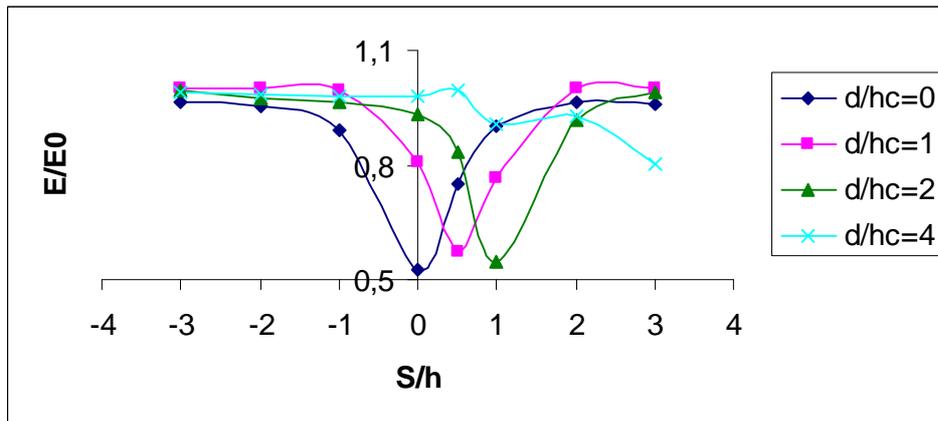


hc=2 cm

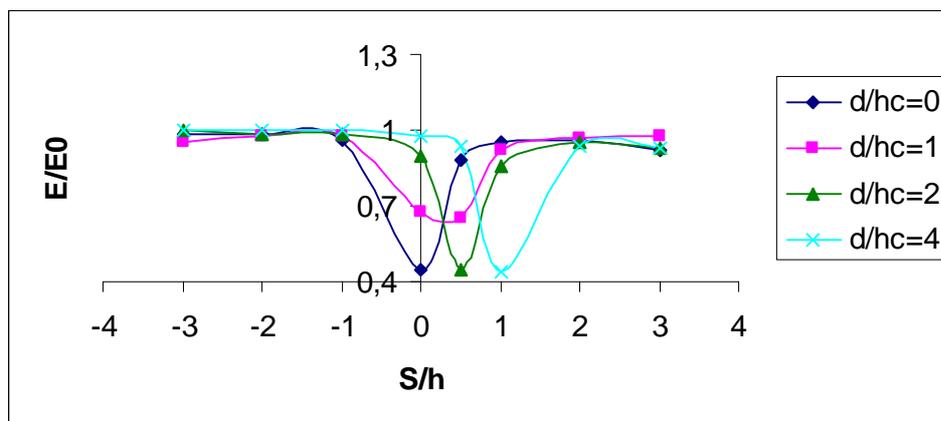
**Figure V.22 :** Variation du rapport  $E/E_0$  en fonction de position de la sonde ( $S/h$ ).  
 $h=8$  cm,  $U=0,4 U_{0\%}$ .



hc=8 cm

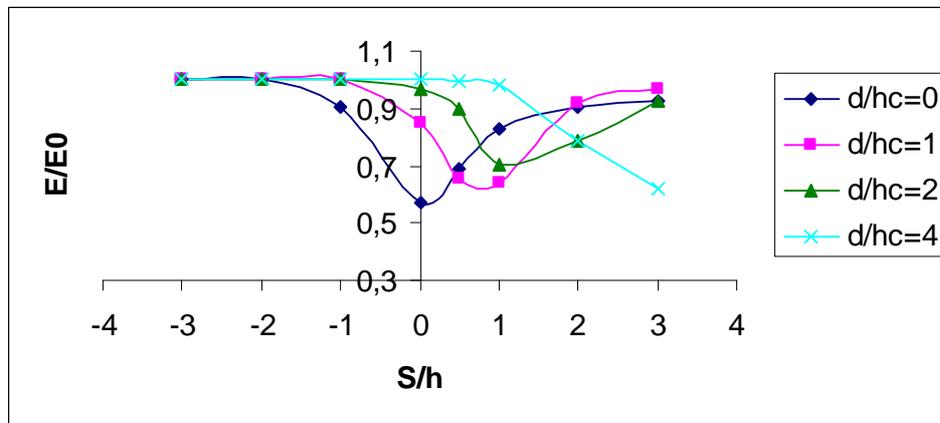


hc=6 cm

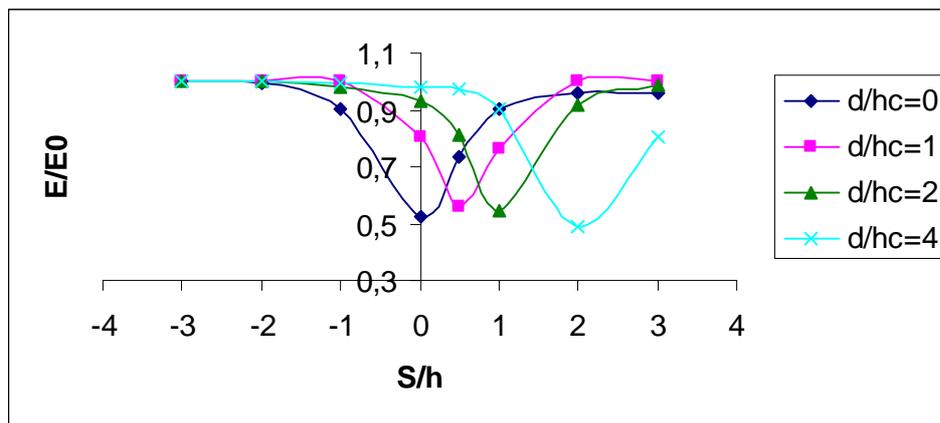


hc=3 cm

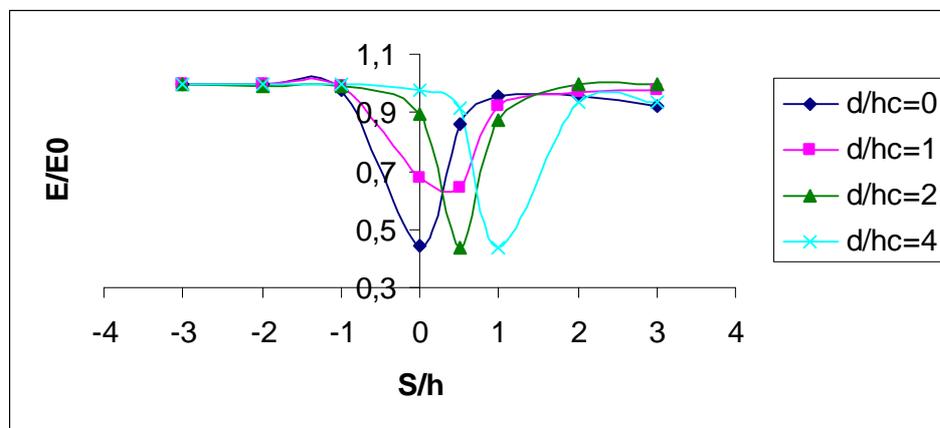
**Figure V.23 :** Variation du rapport  $E/E_0$  en fonction de la position de la sonde ( $S/h$ )  
 $h=12$  cm,  $U=0,2 U_{0\%}$ .



hc=8 cm

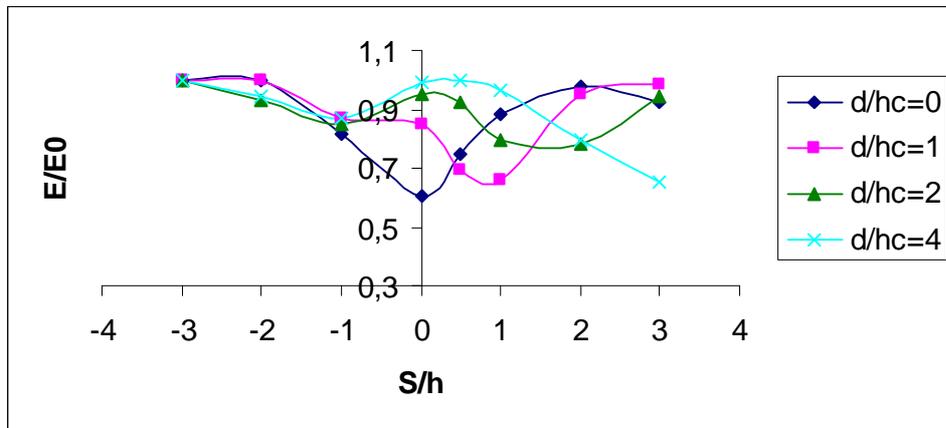


hc=6 cm

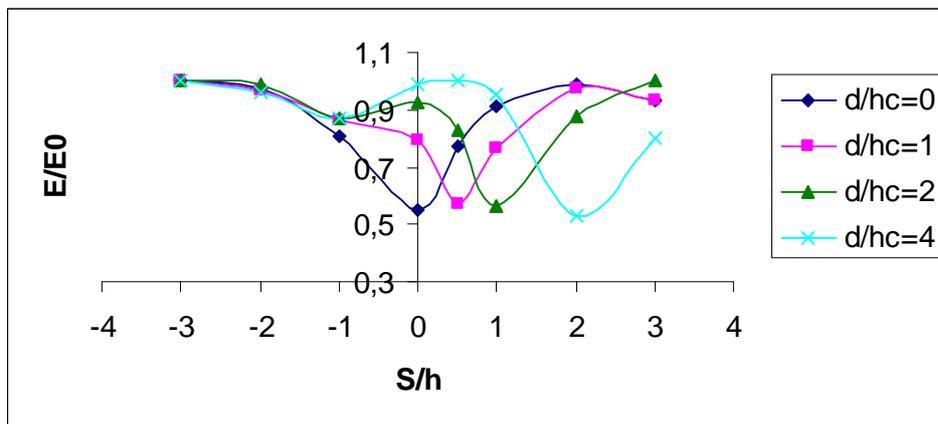


hc=3 cm

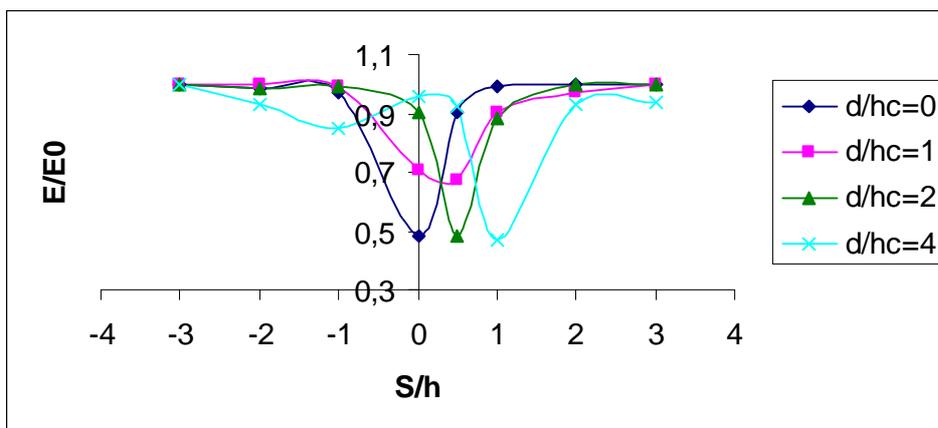
**Figure V.24 :** Variation du rapport  $E/E_0$  en fonction de la position de la sonde ( $S/h$ ).  
 $h=12$  cm,  $U=0,4 U_{0\%}$ .



hc=11 cm

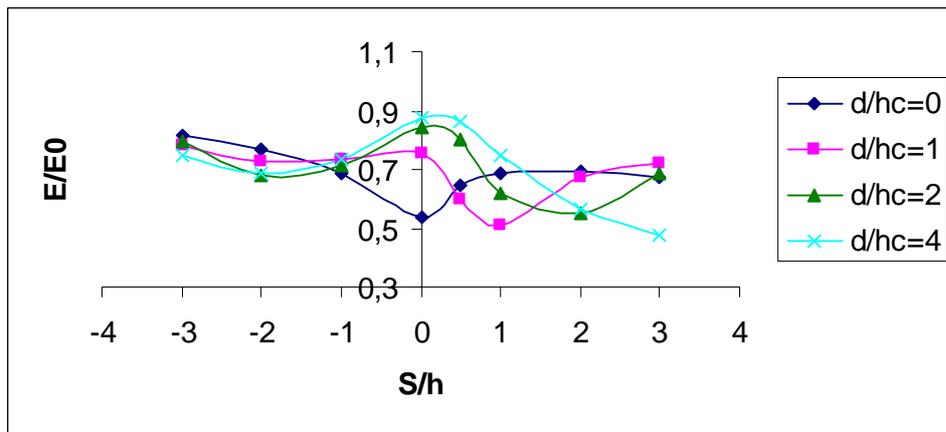


hc=8 cm

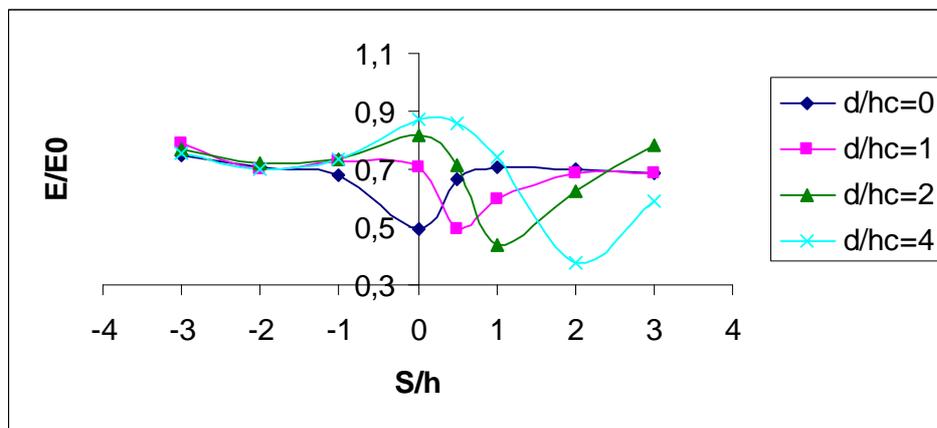


hc=4 cm

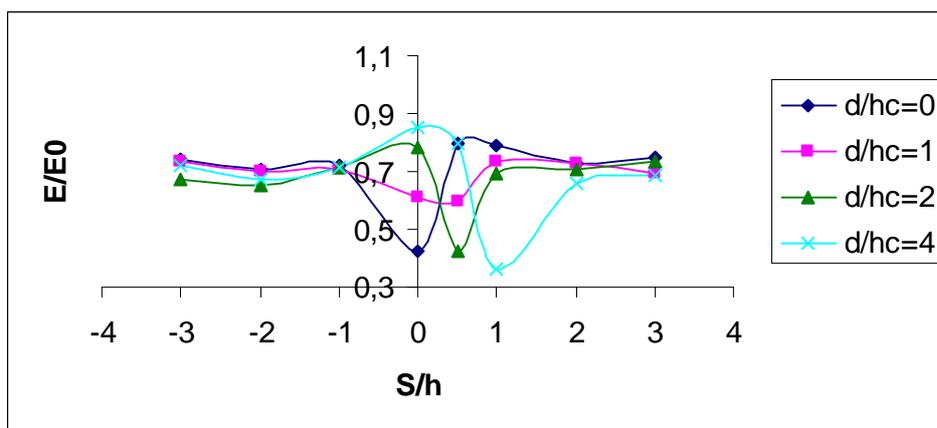
**Figure V.25 :** Variation du rapport  $E/E_0$  en fonction de la position de la sonde ( $S/h$ ).  
 $h=16$  cm,  $U=0,2 U_{0\%}$ .



$hc = 11$  cm



$hc = 8$  cm



$hc = 4$  cm

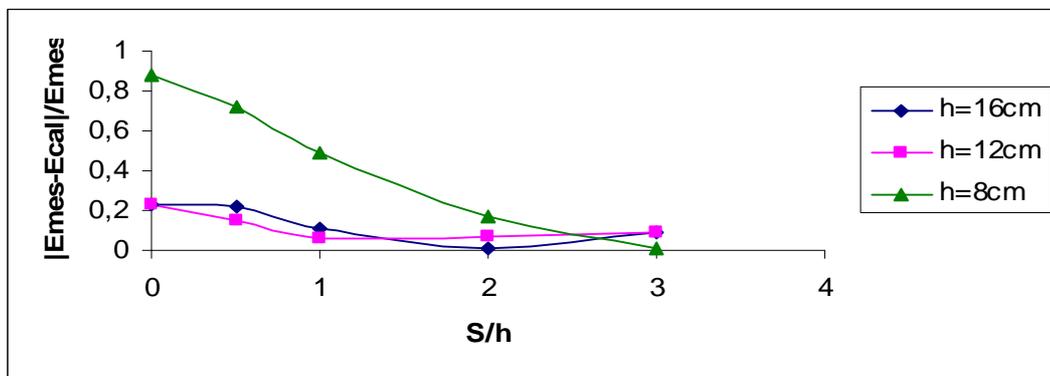
**Figure V.26 :** Variation du rapport  $E/E_0$  en fonction de la position de la sonde ( $S/h$ ).  
 $h = 16$  cm,  $U = 0,4 U_{0\%}$ .

## V.4 Détermination de l'écart entre les valeurs du champ obtenu expérimentalement et celles du champ calculé

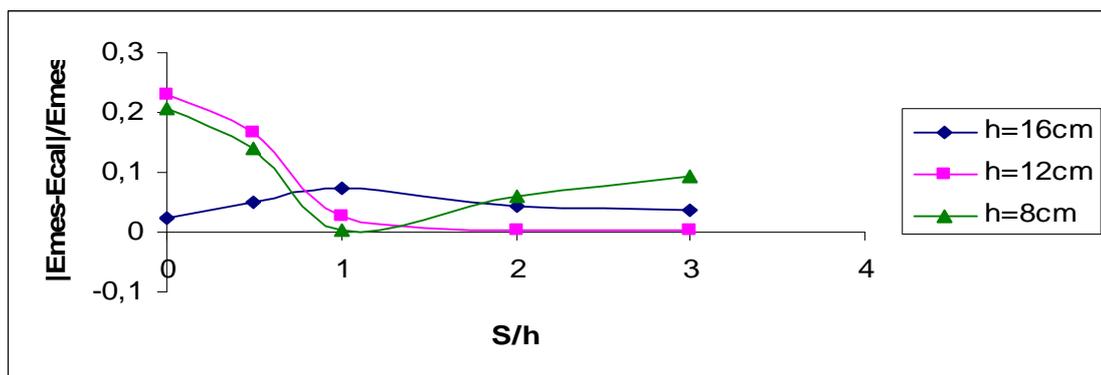
### V.4.1 Système pointe-plan sans paratonnerre

Nous présentons aux figures V.27 et V.28 les courbes qui illustrent l'écart entre les valeurs du champ électrique obtenu expérimentalement et celles du champ calculé dans un système pointe-plan sans paratonnerre. Les trois intervalles d'air considérés sont:  $h=8, 12, 16$  cm. Les niveaux de tensions appliqués sont  $U=0,2U_{0\%}$  et  $U=0,4U_{0\%}$ .

D'après ces figures, nous remarquons que pour  $h=8$  cm et pour  $U=0,2U_{0\%}$ , l'erreur relative est importante au voisinage de la tige sous tension ( $S/h=0, 1$ ) et égale à 45%. Nous constatons que plus la hauteur de la tige augmente plus l'erreur relative  $|E_{mes}-E_{cal}|/E_{mes}$  diminue.



**Figure V.27 :** Erreur relative du champ calculé au champ mesuré en fonction de la position de la sonde ( $S/h$ ) pour  $U=0,2U_{0\%}$



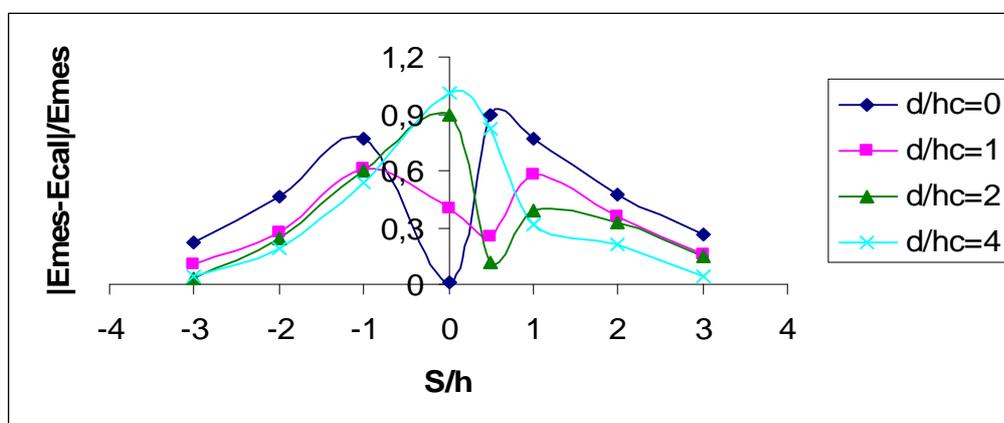
**Figure V.28 :** Erreur relative du champ calculé au champ mesuré en fonction de la position de la sonde ( $S/h$ ) pour  $U=0,4U_{0\%}$

### V.4.2 Système pointe-plan avec paratonnerre

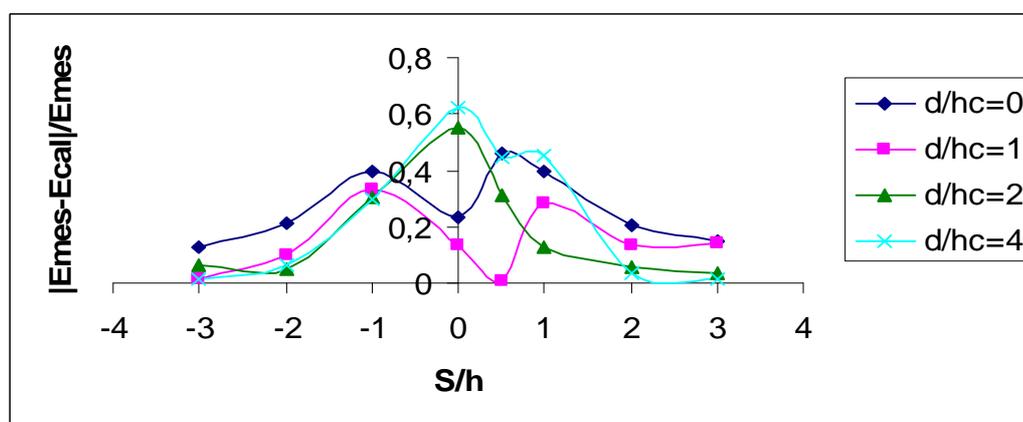
Les figures V.29, V.30, V.31 et V.32 représentent l'écart entre les valeurs du champ électrique obtenu expérimentalement et celles du champ calculé dans un système pointe-plan avec paratonnerre. Les deux intervalles d'air considérés sont:  $h=8$ ,  $12$ . Les niveaux de tensions appliqués sont  $U=0,2U_{0\%}$  et  $U=0,4U_{0\%}$ .

D'après ces figures, nous remarquons que l'erreur relative  $|E_{mes}-E_{cal}|/E_{mes}$  au voisinage de la tige sous tension est considérable. Par exemple pour  $h=12\text{cm}$ ,  $h_c=4\text{cm}$  et  $U=0,2U_{0\%}$ , nous avons trouvé que la valeur de l'erreur relative varie entre la valeur minimale 8% et la valeur maximale 40%.

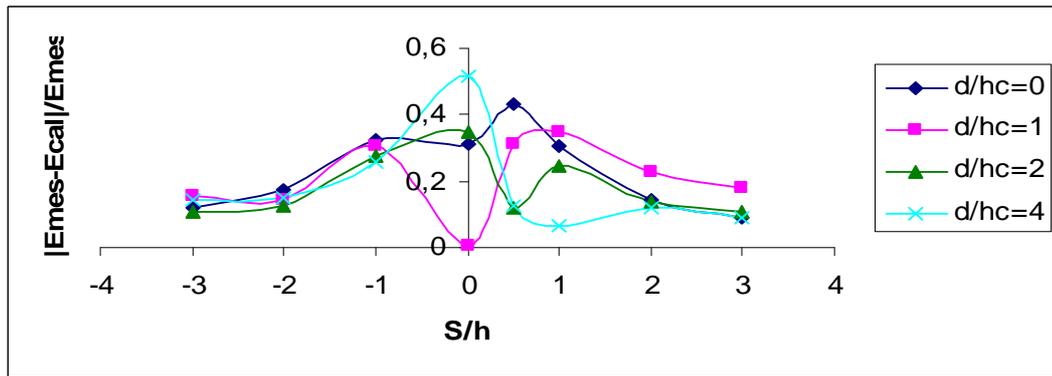
Nous pouvons dire que cette importante erreur est due à la présence des charges d'espace, des décharges couronne et des décharges streamers éventuellement.



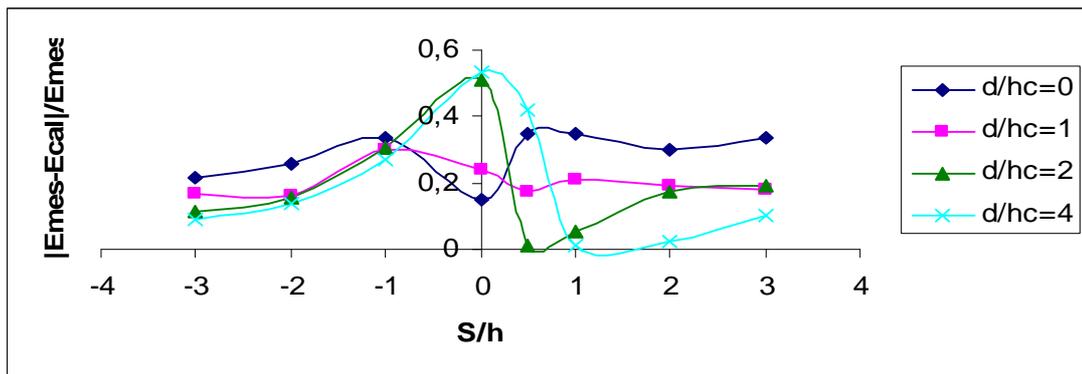
**Figure V.29 :** Erreur relative du champ calculé au champ mesuré en fonction de la position de la sonde ( $S/h$ ) pour  $h=8$  cm,  $h_c=2$  cm,  $U= 0.2 U_{0\%}$



**Figure V. 30 :** Erreur relative du champ calculé au champ mesuré en fonction de la position de la sonde ( $S/h$ ) pour  $h=8$  cm,  $h_c=2$  cm,  $U=0.4 U_{0\%}$

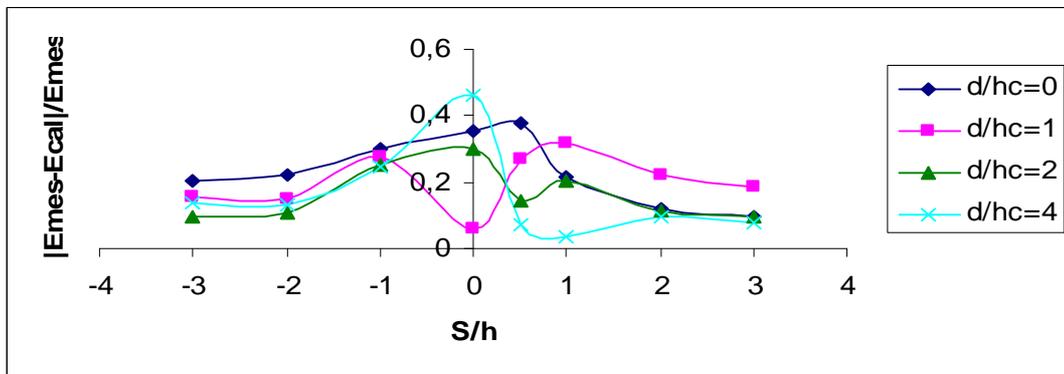


hc=2 cm

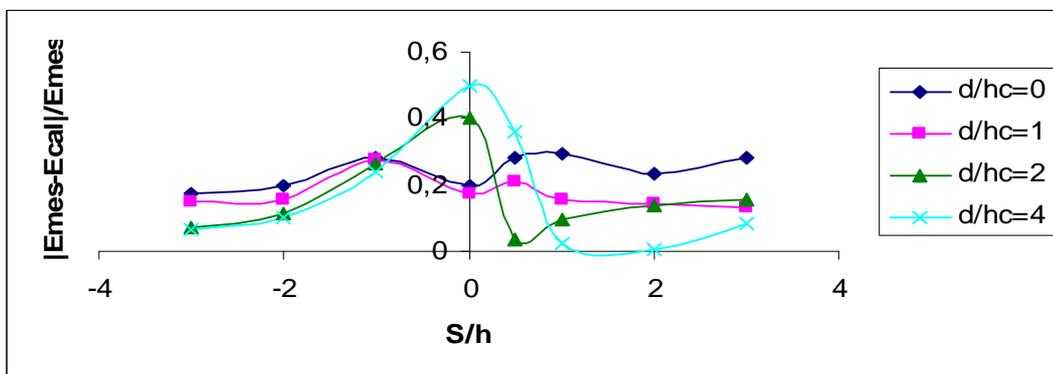


hc=4 cm

Figure V.31 : Erreur relative du champ calculé au champ mesuré en fonction de la position de la sonde ( $S/h$ ) pour  $h=12$  cm,  $0,2U_{0\%}$



hc=2 cm



hc=4 cm

Figure V.32 : Erreur relative du champ calculé au champ mesuré en fonction de la position de la sonde ( $S/h$ ) pour  $h=12$  cm,  $0,4U_{0\%}$ .

# **CONCLUSION GENERALE**

## Conclusion générale

D'après les résultats des deux méthodes de mesure et de calcul du champ électrique, nous sommes arrivés aux conclusions suivantes :

- Dans un système pointe-plan sans paratonnerre, l'intensité du champ électrique prend une valeur maximale au dessous de la pointe et diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne de l'axe de la pointe.
- La présence du paratonnerre diminue considérablement l'intensité du champ électrique sur le sol surtout dans les zones proche du paratonnerre.
- L'intensité du champ électrique dans la configuration avec paratonnerre à droite de la tige sous tension est toujours inférieure à celui mesuré sans paratonnerre.
- Le champ électrique est intense sur le paratonnerre et il est de plus en plus intense quand ce dernier se rapproche de la tige haute tension.
- Le système pointe-plan avec paratonnerre se comporte comme un système pointe-pointe où la rigidité diélectrique est inférieure à celle du système pointe négative-plan.
- Plus la hauteur du paratonnerre augmente plus l'intensité du champ sur le paratonnerre augmente plus le champ sur le sol diminue et plus la probabilité de foudroiement du paratonnerre augmente.

En comparant les résultats obtenus, l'écart entre les valeurs du champ calculé par FEMM et celles obtenu expérimentalement est important à cause d'apparition des charges d'espace, des décharges couronne et des décharges streamers.

Le travail élaboré dans notre étude, laisse les portes ouvertes devant d'éventuels recherches futures. Ainsi, nous proposons nos perspectives de recherche sur:

- La mesure du champ électrique dans un système tige-plan avec la méthode de la sonde à capacité répartie sous tension de choc de foudre :
  - En utilisant un modèle expérimental avec paratonnerre avec terre discontinue.
  - En utilisant des modèles de paratonnerre vertical ou horizontal avec différents diamètres.
- Calcul numérique du champ électrique dans un système tige-plan en utilisant des logiciels convenables jusqu'obtention d'un faible écart entre les résultats expérimentaux et ceux obtenus numériquement.

# **BIBLIOGRAPHIE**

---

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- [1] « [www.EDF.fr](http://www.EDF.fr) ».
- [2] G. Le Roy, C. Gary, B. Hutzler, J. Lacot, C. Dubaton : « Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions », Ed Eyrolles, Paris, 1984, pp : 92-251.
- [3] 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.
- [4] Alain Rousseau, Claude Gary, Gérard Berger : « Foudre et protection des bâtiments », Techniques de l'Ingénieur, C3307, 2000.
- [5] Philippe Dunand : « Protection des installations électriques contre la foudre », Dunod, Paris, 2003.
- [6] Claude Gary : « La foudre : Nature, histoire risque et protection », Dunod, Paris, 2004.
- [7] [http://fire.cfs.nrcan.gc.ca/faq\\_lightning\\_f.php#one](http://fire.cfs.nrcan.gc.ca/faq_lightning_f.php#one). « FAQ (réponses aux questions fréquemment posées) sur la foudre - Les feux de forêt au Canada ».
- [8] M. Slimanou: « Lightning activity keraunic level's map and insulation coordination », 7<sup>th</sup> regional conference of national cigre committees of Arab countries, AMMAN-JORDON, September 2007.
- [9] <http://www.plasmaquebec.ca/Laphysiquedesplasmas/PlasmasNature/Foudre.htm>.
- [10] T. Horvath: « Computation of lightning protection », Research studies press LTD, England; 1<sup>ère</sup> Ed; 1991. pp: 1-76.
- [11] K. Mostefaoui : « Perturbations électromagnétiques dues à la foudre sur les lignes Haute Tension », Thèse de Magister, ENP, Alger, Algérie, 2005.
- [12] E. Kuffel, W.S. Zaengl, J. Kuffel: « High Voltage Engineering », Second Edition, 2000.
- [13] M. Aguet, M. Lanoz : « HAUTE TENSION », VOL. XXII, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1990.

- [14] Frédéric Maciala : «Parafoudre», Technique de l'Ingénieur, D4755, 1999.
- [15] Alain Sabot, Jean Michaud : « Lignes et postes : choix et coordination des isolements », Technique de l'Ingénieur, D4750, 1999.
- [16] <http://www.franklin-france.com/spip.php?article>.
- [17] « Protection contre la foudre », Gamme Paratonnerre, HELITA, [www.helita.fr](http://www.helita.fr)
- [18] Roland Aubert, Roland Talon : «Electricité dans le bâtiment- mise en œuvre», Technique de l'Ingénieur, C 3751, 2001.
- [19] <http://www.stielec.ac-aix-marseille.fr/foudre>.
- [20] 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.
- [21] R. Belaïcha : « Zone d'attraction d'un paratonnerre vertical dans le cas d'une terre mauvaise conductrice », Thèse de magister, ENP, Alger, Algérie 1992.
- [22] K. Nacereddine : « Zone de protection contre la foudre sur un sol hétérogène : Simulation numérique», Thèse de magister, ENP, Alger, Algérie 1994.
- [23] A. Rahmani : « Détermination des zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal dans le cas d'une terre discontinue», Thèse de magister, ENP, Alger, Algérie 1996.
- [24] S.A.A. Boumaza : « Amorçage au choc de foudre des intervalles d'air tige-plan avec terre hétérogène», Thèse de magister, ENP, Alger, Algérie 1998.
- [25] 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.

[26] 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.

[27] A. Boubakeur, R. Belaïcha: «Modèle de protection contre la foudre dans le cas d'une terre mauvaise conductrice», proceeding of 2nd CEA Algies nov. 29-30 1994 / Vol. 1

[28] A. Boubakeur: « Influence of earth electrogeological properties on lightning protection modelisation », proceeding of the IEEE, International annual conference, IEEE'79, Vol.1, Batna, Dec 1997, pp.17-21.

[29] A. Boubakeur, S.A.A. Boumaza, R. Belaïcha, R. Boudissa: « Influence of earth heterogeneity on negative lightning breakdown », proceeding of the 23<sup>rd</sup> International conference of lightning protection (ICLP), paper 4.12, Birmingham, 1998.

[30] A. Boubakeur, A. Chouchou, S.A.A. Boumaza: « Influence of earth discontinuity on the capture zones of vertical lightning conductor », proceeding of the 25<sup>th</sup> International conference on lightning protection, Rhodes, Greece, September 2000.

[31] A. Boubakeur, A. Chouchou, H. Brouri, A. Rahmani : « Influence of earth discontinuity on the capture zones of lightning conductor », proceeding of the 26<sup>th</sup> International conference on lightning protection, Poland, September 2002.

[32] A. Rahmani, A. Boubakeur, H. Brouri : « Zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal dans le cas d'une terre discontinue », Conférence nationale sur la Haute Tension, CNHT'2002, Algerian journal of technology, Special Issue, Ghardaïa, Janvier 2002, pp. 144-147.

[33] C. Gary : « La foudre : Des méthodologies antiques à la recherche moderne », Edition Masson, 1994, pp : 3-11.

[34] Metz-Noblat « la foudre et les installations électriques HT », Cahier Technique Merlin Gérin n° 168, 1993.

[35] AFFOLTER Jean-François : « HAUTE TENSION », Yverdon-Les-Bains, octobre 2000.

[36] C.A. Brebbia : « Topic in Boundary Element Research », vol .6, Electromagnetic

Applications, Springer-verlag, 1989.

[37] N.K. Bedoui, « Réalisation d'un programme de calcul d'équipotentiels, d'énergie dissipée et des capacités équivalentes d'un système électrostatique », Rapport DEA, Ecole Centrale de Lyon, 1998

[38] J. Sabonnadière, JL. Coulomb : « Calcul des champs électromagnétiques », Technique de l'Ingénieur, D3020, 1988.

[39] David Meeker, « Finite Element Method Magnetics », CD-Rom, Version 4.0, User's Manual, June 17, 2004.

[40] M. Dobardzic : « Station d'essais au choc à haute tension », rapport Interne, laboratoire de la Haute Tension de L'ENP, Alger, Algérie, juin ,1972.

[41] C.E.I.60: Commission Electrotechnique International «Techniques d'essais de haute tension », 1973, (60-01/02).

[42] B.Boubekki : « Mesure du champ électrique dans un système pointe-plan avec barrière isolante sous tension de choc de foudre. », Thèse de Magister, ENP, Alger, Algérie, 2006.

[43] D.Mezai : « Mesure du champ électrique par la méthode de la sonde à capacité répartie dans un système tige-plan avec paratonnerre vertical sous tension de choc de foudre », thèse de magister, ENP, Alger, Algérie, 2006.