

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



**Département de Génie Electrique
MEMOIRE**

Présenté pour obtenir

LE GRADE DE MAGISTER EN ELECTROTECHNIQUE

Option : **Réseaux Electriques et Haute Tension**

par

MEZAI Djamel

Ingénieur d'Etat en Electrotechnique ENP- Alger

Thème

**Mesure du Champ Electrique par la
Méthode de la Sonde à Capacité
Repartie dans un Système Tige-Plan
avec paratonnerre vertical sous Tension
de Choc de Foudre**

Soutenu le : / / 2006 devant la commission d'examen :

Président :	M ^r : O. TOUHAMI	Professeur, ENP
Rapporteurs:	M ^r : A.MEKHALDI M ^r : A.BOUBAKEUR	Professeur, ENP Professeur, ENP
Examineurs :	M ^r : M.TEGUAR M ^r : R.TAHMI M ^r : S.BOUAZABIA	Maître de conférences, ENP Maître de conférences, ENP Maître de conférences, USTHB
Invité :	M ^r : GHEZAILI	Docteur, Ingénieur, CREDEG

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

?? O?? ? TuU R?U ??W?? B ??? T f sJ?TuUf?y ?œu??R? R UtrŠ?? StrRP D?Ž t?R
 r?R?tsRP? ?U?r?Ur?yru R?u O? r????S?RU?? s???W?RP ???Šs?Ruu?r?U? ???µ ??
 u??Ry ?i ?œu??R? ? RUu r??? ryU??RYURU?S??R?uu u uzR U??Tsur? R?TI R?U R
 ĵr?l R?U?U?sf?d r???Š?i f tO?r?r?i r???y ĵ Uts?R?S?R M?RP?r?U?r?f?sJ?R?
 B ??? T f sJ? R?U ??W??œ R??RŠ?R?U ĵrŠ??i ??YBS?urT ?i ?uŠOsR r?UR
 B ??? T f sJ?TuU ?œR??RŠ?R?U ??œu??R? R ?S?T???? ????

Résumé :

L’objectif de notre travail est de déterminer expérimentalement l’intensité du champ électrique sur la surface d’un plan homogène en présence d’un paratonnerre vertical dans un système tige-plan. Ce système simulerait la phase finale d’un coup de foudre descendant négatif (traceur par bonds). Ainsi, nous avons utilisé une sonde à capacité répartie pour déterminer l’intensité du champ en différents points du sol pour différentes configurations du système utilisé.

Les résultats de nos travaux contribuent à l’amélioration de l’interprétation des résultats d’investigations précédemment faites au Laboratoire de Haute Tension de l’ENP dans le domaine de la rigidité des intervalles d’air tige-plan.

Mots clé : mesure de champ électrique, rigidité des intervalles d’air, paratonnerre.

Abstract:

The aim of our research investigations is to determine practically the electric field intensity on the surface of a homogeneous plane of a rod-plane arrangement with vertical lightning rod. This system simulates the final step of a negative lightning stepped leader just before the final impact. Thus, we have used a probe with distributed capacity to determine the field intensity in various points of the ground for various used system configurations.

Our investigations contribute to improve the interpretation of investigations results previously carried out at the ENP High Voltage Laboratory in the field of rod- plane air gaps strength.

Key words : electric field measurement, air gaps strength, lightning rod.



SOMMAIRE

Sommaire

<i>INTRODUCTION GENERALE</i>	1
Chapitre I Foudre et protection contre la foudre	
<i>INTRODUCTION</i>	3
<i>I.1 ELECTRICITE ATMOSPHERIQUE ET PHENOMENE PRECURSEUR</i>	3
<i>I.1.1 LE CONDENSATEUR TERRESTRE ET LE COURANT ATMOSPHERIQUE PERMANENT</i>	3
<i>I.1.2 LE NUAGE ORAGEUX</i>	4
I.1.2.1 Formation des nuages	4
I.1.2.2 Formation des charges électriques.....	4
<i>I.1.3 CHAMP ELECTRIQUE AU SOL</i>	5
<i>I.2 SEVERITE ORAGEUSE</i>	7
<i>I.2.1 NIVEAU KERAUNIQUE ET LA DENSITE DES COUPS DE Foudre AU SOL</i>	
<i>I.2.2 FACTEURS LOCAUX INFLUENCANT LE Foudre</i>	8
a) Facteur topologique :.....	8
b) Facteurs géologiques :.....	8
c) Conductivité de l'air :.....	9
<i>I.2.3 DISPOSITIF DE MESURE DE LA DENSITE DE Foudre</i>	9
a) Compteur CIGRE :.....	9
b) Compteur optique.....	9
c) Comptage et localisation par triangulation.....	10
<i>I.3 CLASSIFICATION ET DESCRIPTION DES COUPS DE Foudre</i>	10
<i>I.3.1 CLASSIFICATION DES COUPS DE Foudre</i>	10
<i>I.3.2 DEROULEMENT D'UN COUP DE Foudre</i>	11
I.3.2.1 Coup de foudre ascendant	11
I.3.2.2 Coup de foudre descendant	12
<i>I.4 FORMES ET AMPLITUDES DES IMPULSIONS DES COUPS DE Foudre</i>	13
<i>I.4.1 FORMES DES DECHARGES NEGATIVES</i>	13
<i>I.4.2 FORMES DES DECHARGES POSITIVE</i>	14
<i>I.4.3 DISTRIBUTION DES AMPLITUDES</i>	14
<i>I.4.4 AUTRES PARAMETRES CARACTERISANT LA Foudre</i>	16
<i>I.4.5 TABLEAU RECAPITULATIF DES PARAMETRES DE Foudre</i>	16
<i>I.4.6 LES EFFETS DE LA Foudre</i>	17
Effet thermique	17
Effet électrodynamique u	18
Effets conduits ou rayonnés	18
Effets chimiques	18
Effets acoustiques.....	18
Effets électromagnétiques	18

<i>I.5 PROTECTION CONTRE LA Foudre</i>	19
<i>I.5.1 INTRODUCTION</i>	19
<i>I.5.2 LE MECANISME D'IMPACT D'UN COUP DE Foudre</i>	19
<i>I.5.3 LE MODELE ELECTROGEOMETRIQUE</i>	20
I.5.3.1 Champ généré au sol par le traceur descendant	20
I.5.3.2 Distance d'amorçage du modèle de Whitehead	23
I.5.3.3 Critique du modèle électrogéométrique	24
I.5.3.4 Application du modèle électrogéométrique	25
I.5.3.4.1 Méthode de la sphère fictive	25
I.5.3.4.2 Zone de capture d'une tige verticale	26

Chapitre II *Influence de la nature du sol sur la rigidité diélectrique de l'air sous tension de choc de foudre*

<i>INTRODUCTION</i>	29
<i>II.1 INFLUENCE DES PROPRIETES ELECTROGEOLOGIQUES DU SOL SUR LA RIGIDITE DIELECTRIQUE DE L'AIR SOUS TENSION DE CHOC DE Foudre</i>	29
<i>II.1.1 CAS D'UN SOL HOMOGENE MAUVAIS CONDUCTEUR</i>	29
<i>II.1.2 CAS D'UN SOL HETEROGENE</i>	32
<i>II.1.3 CAS D'UN SOL DISCONTINU</i>	33
<i>II.2 CONCLUSION</i>	39

Chapitre III *Techniques expérimentales*

<i>INTRODUCTION</i>	40
<i>III.1 CIRCUIT D'ESSAI</i>	40
<i>III.1.1 GENERATEUR DE CHOC</i>	40
<i>III.1.2 TENSION DE CHOC DELIVREE</i>	42
<i>III.1.3 DETERMINATION DE LA TENSION U0%</i>	43
<i>III.1.4 CORRECTIONS ATMOSPHERIQUES</i>	43
III.1.4.1. Influence de la densité relative de l'air	44
III.1.4.2. Influence de l'Humidité	44
<i>III.2 MODELE EXPERIMENTAL</i>	45
<i>III.2.1 MODELE EXPERIMENTAL SANS PARATONNERRE</i>	45
<i>III.2.2 MODELE EXPERIMENTAL AVEC PARATONNERRE</i>	45
<i>III.3 MESURE DU CHAMP PAR LA METHODE DE LA SONDE A CAPACITE REPARTIE (S.C.R)</i>	48
<i>III.3.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT</i>	48
<i>III.3.2 CIRCUIT DE MESURE</i>	49
<i>III.3.3 EXPRESSION DU CHAMP MESURE</i>	49
<i>III.3.4 DETERMINATION DE LA CONSTANTE DE LA SONDE K_S</i>	52
<i>III.3.5 FORME DES SIGNAUX OBTENUS AVEC L'OSCILLOSCOPE</i>	53

Chapitre IV Résultats expérimentaux et interprétations

<i>INTRODUCTION</i>	54
<i>IV.1 SYSTEME TIGE-PLAN SANS PARATONNERRE</i>	54
<i>IV.1.1 DETERMINATION DE LA TENSION $U_0\%$</i>	54
<i>IV.1.2 DISTRIBUTION DU CHAMP EN FONCTION DE LA DISTANCE TIGE-AXE DE LA SONDE</i>	56
<i>IV.2 SYSTEME TIGE-PLAN AVEC PARATONNERRE</i>	58
<i>IV.2.1 INFLUENCE DE LA POSITION DU PARATONNERRE</i>	58
<i>IV.2.2 INFLUENCE DE LA HAUTEUR DU PARATONNERRE</i>	69
<i>IV.2.3 DISCUSSION SUR L'EFFET DU PARATONNERRE</i>	79
<i>CONCLUSION GENERALE</i>	86
<i>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</i>	88



INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'homme a été depuis toujours impressionné par le phénomène de décharge de foudre et a donné plusieurs interprétations. Ce n'est qu'à partir du début du vingtième siècle, avec l'évolution technique, que la connaissance sur le phénomène de la décharge atmosphérique a commencé à être de plus en plus approfondie [1].

A cours de son développement, la foudre explore les masses conductrices métalliques voisines pour trouver facilement un exutoire, et de ce fait, il vaudrait mieux l'y aider par des interconnexions appropriées que de lui opposer des obstacles qui risquent de présenter un point faible. L'idée essentielle de tout système de protection, est donc de véhiculer sans danger les grandes quantités de charges électriques transportées par la foudre vers la masse terrestre, moyennant des paratonnerres horizontaux ou verticaux [2].

Dans le but d'atteindre une meilleure protection contre la foudre, des travaux de recherche sont menés grâce au développement de nouvelles méthodes de détection et de localisation des coups de foudre à une connaissance améliorée du processus physique de la décharge, à une meilleure compréhension de l'interaction entre la foudre et une structure au sol et à des conditions d'essais plus valides. Ces travaux ont permis d'élaborer une nouvelle méthode de détermination de la zone de protection d'une tige verticale [3]. 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 [3].

Dans notre travail nous nous sommes intéressés à l'influence du paratonnerre sur la distribution du champ électrique dans un système tige-plan sous tension de choc de foudre négative.

Le premier chapitre de ce mémoire débute par un exposé sur la physique des orages et les caractéristiques électriques de la foudre. La compréhension de ces phénomènes nous aide à mieux concevoir le système de protection contre la foudre. Nous présentons ainsi, une brève description des mécanismes d'impacts, qui expliquent comment se décide le point de chute d'un coup de foudre. Ainsi nous décrivons la technique de protection par tige verticale qui fait appel au modèle électrogéométrique.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des différents paramètres qui influent sur la rigidité diélectrique des intervalles d'air tel que : les propriétés électrogéologiques du sol (conductivité, hétérogénéité, discontinuité).

Les techniques expérimentales utilisées dans notre étude sont présentées avec soin dans le troisième chapitre. Nous décrivons en détails la méthode de la sonde à capacité répartie, que nous avons utilisée. 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 [4].

Dans le quatrième chapitre nous présentons et discutons les différents résultats qui mettent en relief l'influence du paratonnerre sur la distribution du champ électrique dans le système tige-plan.

Enfin, nous terminons notre mémoire par une conclusion générale.

CHAPITRE : I

FOUDRE ET PROTECTION CONTRE LA FOUORE

INTRODUCTION

Dès le commencement du transport de l'énergie électrique, les ingénieurs ont été confrontés à la foudre et ses effets sur les ouvrages tels que les lignes ou les postes d'extrémités. Ils se sont rapidement aperçus que ce phénomène atmosphérique constituait l'une des contraintes majeures dont il fallait tenir compte. Malgré le grand nombre de travaux consacrés à la foudre par les chercheurs de nombreux pays, depuis plusieurs décennies, ce phénomène reste encore assez mal connu. Les connaissances acquises résument à des données macroscopiques essentiellement descriptives. Cette situation provient en grande partie de la nature insaisissable de la foudre qui frappe où elle veut et quand elle veut [3].

I.1 ELECTRICITE ATMOSPHERIQUE ET PHENOMENE PRECURSEUR

I.1.1 LE CONDENSATEUR TERRESTRE ET LE COURANT ATMOSPHERIQUE PERMANENT

La terre et l'électrosphère (couche de la haute atmosphère ionisée et située à environ 50km d'altitude) peuvent être considérées comme les armatures d'un gigantesque condensateur sphérique. Entre les deux, la troposphère et la stratosphère constituent le diélectrique [3].

On peut donc assimiler le système électrosphère – globe terrestre à un condensateur sphérique dont la capacité est donnée par la relation suivante [5] :

$$C = \frac{4\pi\epsilon_0}{\left(\frac{1}{R_t} - \frac{1}{R_e}\right)} \quad (I.1)$$

Avec $R_t = 6367\text{ km}$ Rayon de la terre

$R_e = 6467\text{ km}$ Rayon de l'électrosphère

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$$

A partir de ces données, nous obtenons une capacité qui vaut environ 46 mF [5].

Des mesures montrent qu'il existe par beau temps un champ électrique faible permanent, dirigé vers le bas (c'est à dire haute atmosphère positive, terre négative) dont l'amplitude est de l'ordre de 100 à 120 V/m. Le condensateur terrestre est donc chargé en permanence [3].

I.1.2 LE NUAGE ORAGEUX

I.1.2.1 Formation des nuages

Les nuages orageux sont d'énormes masses, généralement de type cumulo-nimbus, qui peuvent s'étendre sur plusieurs kilomètres carrés et qui se situent généralement entre des altitudes variant de 2 à 15 km.

Ils sont constitués par des gouttes d'eau à leur partie inférieure et des particules de glaces à leur partie supérieure. Leur formation est due à l'apparition des courants atmosphériques ascendants dont la vitesse peut dépasser 20 km/h. Si les conditions de température et d'humidité sont convenables, il se produit une détente de l'air humide au cours de son ascension avec refroidissement entraînant la condensation.

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

Une évaluation approximative [3] a permis d'obtenir une densité de courant de $3 \cdot 10^{-12} A/m^2$ ce qui correspond sensiblement à un courant permanent de 1500A pour le globe terrestre.

I.1.2.2 Formation des charges électriques

De très nombreuses théories ont été imaginées pour rendre compte des mécanismes de séparation puis de transfert de charges.

Parmi les théories les plus répandues [3], celles où le vent ascendant maintient en suspension des gouttelettes qui s'enrichissent et grossissent de plus en plus jusqu'à finir par se briser. Or, on constate que la pulvérisation de l'eau par un courant d'air a pour effet de l'électrifier : Les particules légères, chargées positivement sont entraînées par les courants ascendants vers le sommet du nuage et les particules lourdes chargées négativement, tombent sous l'action de leur poids.

Mais ni cette théorie ni les autres ne suffisent à expliquer les faits observés et aucune ne semble réellement satisfaisante, le phénomène reste encore assez mal connu.

Quoi qu'il en soit, à la fin du processus de séparation, le haut du nuage constitué de cristaux de glace est chargé positivement et le bas constitué de gouttelettes d'eau chargées négativement, avec parfois une petite région chargée positivement. [6][7]

La figure (I.1) montre la structure générale d'un nuage orageux qui constitue donc un véritable dipôle

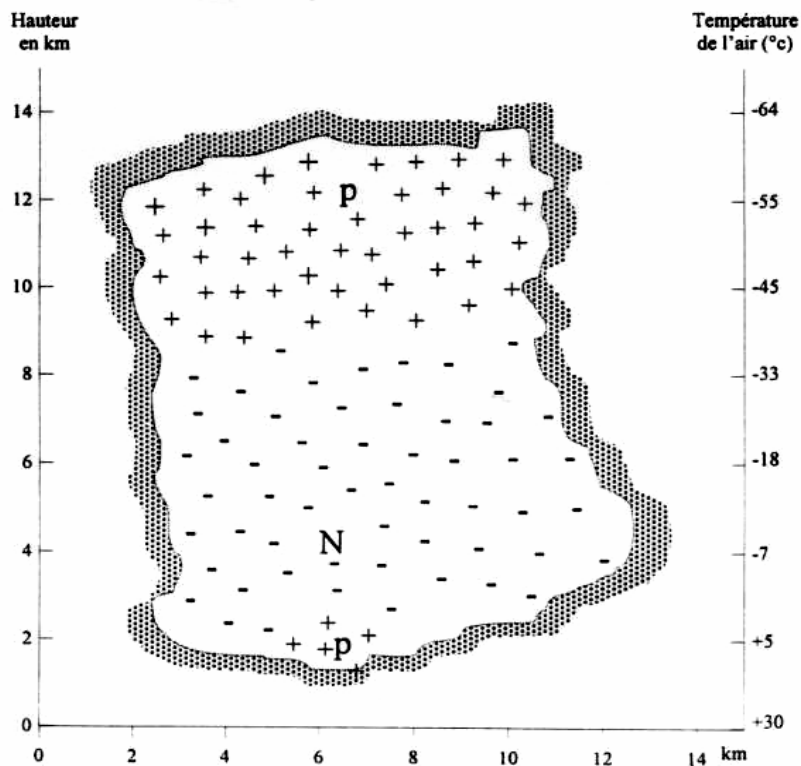


Figure I.1. Structure générale d'un nuage [3]

I.1.3 CHAMP ELECTRIQUE AU SOL

Nous avons vu qu'il existe par beau temps un champ électrique permanent dirigé vers la surface du sol dont l'amplitude est de l'ordre de 100 à 150 V/m. A l'approche du nuage orageux, le champ électrique commence à s'inverser puis croît considérablement. Lorsqu'il atteint une valeur de 15 à 20 kV/m, une décharge au sol devient imminente (Fig.I.2) [3] [8].

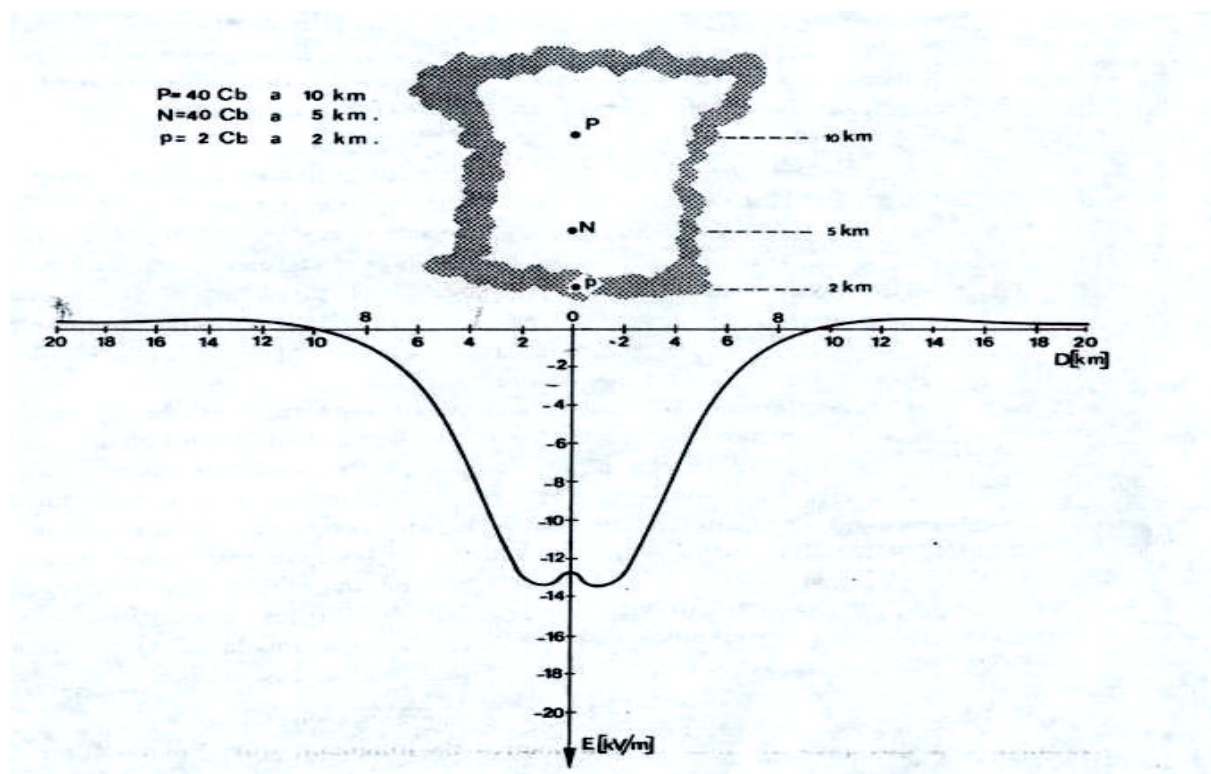


Figure I.2. Champ électrique au sol créé par un nuage orageux [3]

Les valeurs de champ électrique au sol indiquées ci dessus supposent un sol horizontal plat, mais la présence des aspérités, par effet de concentration de champ augmente considérablement le champ au sommet de l'aspérité.

A titre d'exemple, le champ au sommet d'une hémisphère est le triple du champ moyen. Pour un demi-ellipsoïde pointue cet effet s'accroît encore : ainsi pour un rapport de 30 entre grand axe et petit axe de l'ellipsoïde, le champ est renforcé par un rapport de 300 (Fig.I.3) [3].

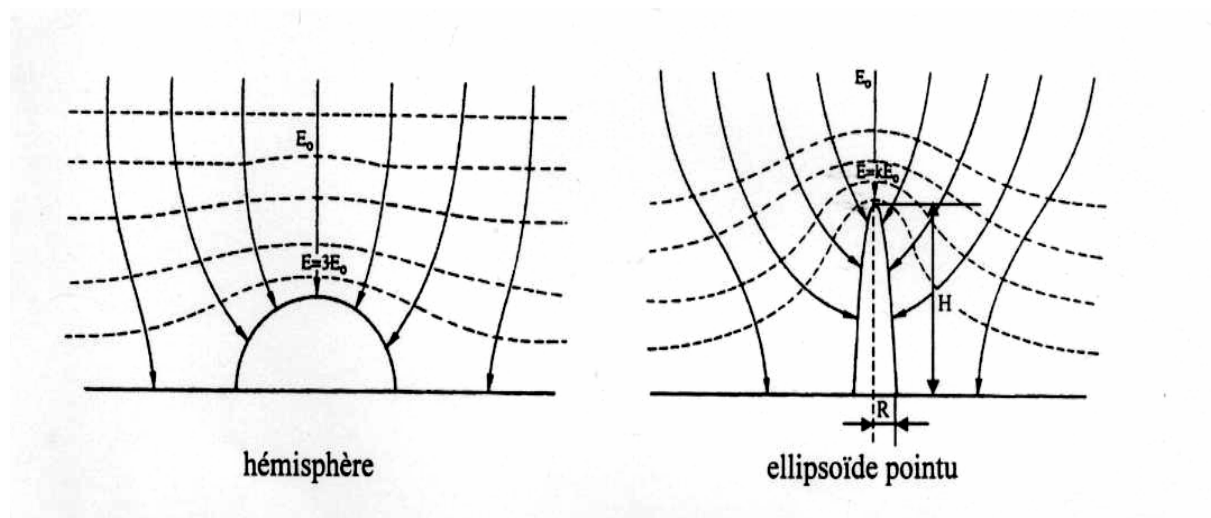


Figure I.3. Amplification du champ électrique au sommet d'une aspérité [3]

I.2 SEVERITE ORAGEUSE

I.2.1 NIVEAU KERAUNIQUE ET LA DENSITE DES COUPS DE Foudre AU SOL

Comme la sévérité orageuse diffère d'une région à l'autre, elle est caractérisée par un niveau kéraunique qui est par définition le nombre de jours par an où le tonnerre a été entendu (annual thunderstorm-day) [9]. En Algérie le niveau kéraunique est de l'ordre de 15 [10]. Dans d'autres régions du globe ce niveau peut être considérablement élevé : il est de l'ordre de 100 en Floride aux Etats Unis et dépasse 180 dans certaines régions d'Afrique tropicale et en Indonésie [3].

La notion de niveau kéraunique est insuffisante 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.

Parmi les définitions les plus rigoureuses de la sévérité orageuse, nous avons la densité de coup de foudre en nombre de coups par km² et par an. Elle peut être déterminée à partir des enregistrements des compteurs de foudre dans une région donnée, à condition que les caractéristiques de réponse du compteur soient bien connues.

L'une des formules proposées par les chercheurs, est la suivante [11]

$$N_g = \frac{Y_g \cdot k}{p \cdot R_g^2} \quad (I.2)$$

Avec :

N_g : Nombre de coups de foudre par km² et par an.

Y_g : Facteur de correction ; c'est le rapport entre le nombre de coups de foudre à la terre ayant actionné le compteur et le nombre total de coups de foudre enregistrés par le compteur.

k : Nombre total des coups de foudre enregistrés.

R_g : Rayon d'action de compteur.

En l'absence de données détaillées sur la densité de coups de foudre au sol, plusieurs chercheurs ont imaginé différentes relations entre ce paramètre et le niveau kéraunique observé, allant de relations linéaires à des équations de la forme [11] :

$$N_g = a \cdot N_k^b \quad (I.3)$$

Avec :

N_k : Niveau kéraunique moyen

a et b : étant des constantes obtenues en général empiriquement d'après des études de comportement à la foudre d'une région donnée.

Ainsi pour une région où le niveau kéraunique est un peu élevé, et selon Prentice [11]

$$N_g = 0,023 \cdot N_k^{1,25} \quad (\text{I.4})$$

D'autres expressions ont été aussi proposées, dont les principales sont : [3]

$$N_g = N_k \cdot (0.1 + 0.35 \sin a) \cdot (0.4 \pm 0.2) \quad (\text{I.5})$$

$$N_g = N_k^{(1.9 \pm 0.1)} \cdot (2.6 \pm 0.2) \cdot 10^{-3} \quad (\text{I.6})$$

a : Altitude de la région considérée

1.2.2 FACTEURS LOCAUX INFLUENCANT LE FOUDROIEMENT

La densité de coup de foudre au sol, n'est en réalité qu'une indication moyenne de la sévérité orageuse d'une région donnée. Il existe probablement des zones localisées particulièrement foudroyées ; on les appelle communément des << nids d'orage >>.

Des études ont permis de songer à 3 facteurs possibles [3].

a) Facteur topologique :

Des zones préférentielles peuvent exister du simple fait des conditions privilégiées de formation des nuages orageux, c'est le cas des orages de chaleur. D'autre part, des mouvements d'air canalisés par des vallées ou des fleuves, favorisent l'existence de 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.

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 la trajectoire du traceur.

Ce ne seraient donc que des facteurs locaux qui pourraient avoir une action sur la décision de l'impact. La présence de saillies, arbres, bâtiments, cheminées est 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.

Une étude à été faite par le groupe de travail 30.01 de CIGRE [9] et a montré que la topographie et le type de terrain peuvent modifier de façon considérable la distribution statistique des courants de crête de foudre.

c) Conductivité de l'air :

La concentration en ions dans l'air (ou la conductivité, celle-ci étant la conséquence de celle-là) a parfois été invoquée pour expliquer un nid d'orage. Mais il n'existe à l'heure actuelle pratiquement pas de données expérimentales à partir d'observations sur le terrain [3].

I.2.3 DISPOSITIF DE MESURE DE LA DENSITE DE FOUDROIEMENT

Plusieurs dispositifs ont été imaginés pour mesurer la densité de foudroiement d'une région, on peut citer trois types de dispositifs :

a) Compteur CIGRE :

L'un d'eux, le plus répandu et le plus connu, mesure la variation du champ électrique local produit par une décharge atmosphérique. Son principe s'apparente à celui d'un récepteur radioélectrique : L'appareil est accordé à une petite antenne.

L'expression suivante est utilisée pour déterminer la densité de coups de foudre au sol à l'aide d'enregistrement d'un compteur CIGRE [3]:

$$N_s = \frac{K}{P} \left[R_s^2 + \frac{N_n}{N_s} \cdot R_n^2 \right]^{-1} \quad (I.7)$$

Avec :

K : est le nombre annuel d'impulsions enregistrées par le compteur.

N_s et N_n : sont respectivement les densités de coups de foudre au sol et d'éclairs intra-nuage par km² et par an,

R_s et R_n : sont les rayons de détection, en km, relatifs à ces deux types de décharges.

Selon des observations directes, le rapport N_n/N_s serait de l'ordre de 7 à 9 pour les régions tropicales, et de 2 à 3 pour les régions tempérées [3].

b) Compteur optique

Cet appareil permet de photographier directement une portion du ciel orageux. Il est composé d'un miroir horizontal, au-dessus duquel est placé, dans son axe, un appareil photographique visant son sommet.

Après avoir exposé le film on peut compter, et localiser les décharges au sol et entre nuage.

c) Comptage et localisation par triangulation

Ce compteur est basé sur la triangulation radio goniométrique du champ électromagnétique. Ce type d'appareil est plus perfectionné et c'est le seul dispositif sérieux qui permettrait d'obtenir une carte précise de la densité de foudroiement [13].

I.3 CLASSIFICATION ET DESCRIPTION DES COUPS DE FOUDRE

I.3.2 CLASSIFICATION DES COUPS DE FOUDRE

Sous l'effet des charges électriques d'un nuage orageux et au cours de leur formation, le champ électrique au sol et à l'intérieur du nuage varie considérablement. Lorsqu'il atteint la valeur limite de claquage, il y a une décharge électrique, qui se répartit en trois types principaux [3] [12]:

- ❑ Les décharges entre nuage (Fig.I.4.a).
- ❑ Les décharges à l'intérieur du nuage (Fig.I.4. b).
- ❑ Les décharges entre nuage et terre, sont les coups de foudre (Fig.I.4.c).

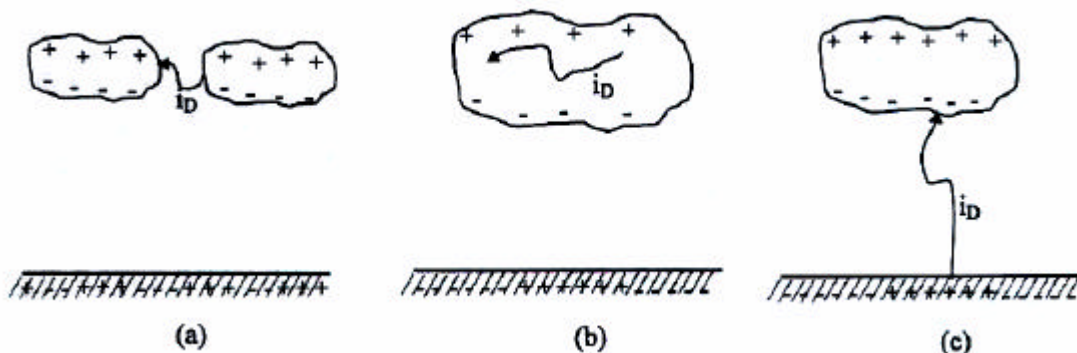
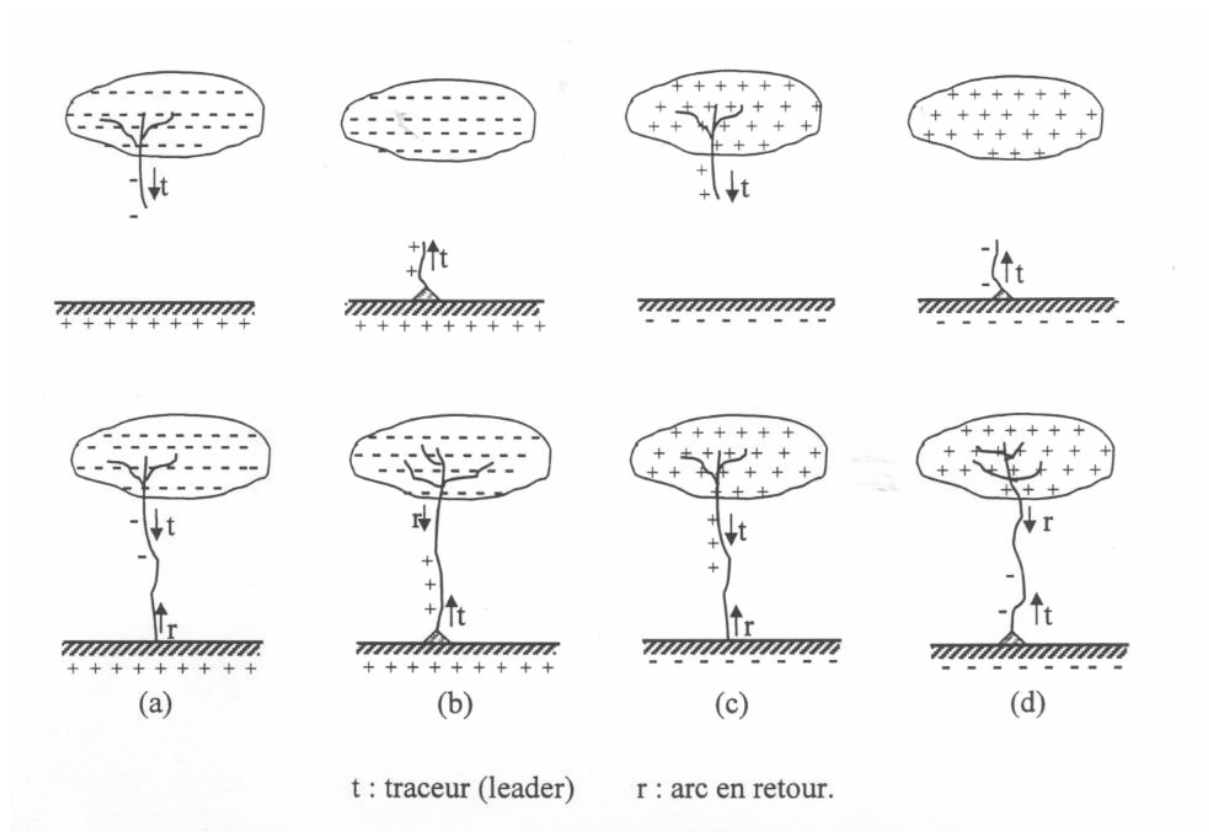


Figure I.4. Différents types de décharges

La première phase d'un coup de foudre commence par le développement d'une prédécharge peu lumineuse ou traceur soit à partir de la base du nuage ou à partir du sol. On assiste après à l'amorçage d'un arc empruntant le canal ionisé de la prédécharge.

On définit quatre grandes catégories de coup de foudre, en fonction de la polarité de la base de nuage déchargé, positive ou négative et en fonction du sens de propagation du traceur ascendant ou descendant (Fig I.5)



(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. Représentation schématique des différents coups de foudre

La configuration a et b sont les plus fréquentes, 80 à 90 % dans les régions tempérées. La configuration c présente 10 à 20 % des cas ; La configuration d est extrêmement rare [3] [12].

I.3.2 DEROULEMENT D'UN COUP DE Foudre

I.3.2.1 Coup de foudre ascendant

Les coups de foudres ascendants sont généralement produits dans des endroits d'importantes prééminences, où les effluves d'effet couronne apparaissent au sommet des aspérités. Ces effluves se développeraient d'autan 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. Ceci

est fréquemment observé à partir des tours dont la hauteur dépasse 300m, et à partir des grattes-ciel.

La chronologie des évènements pour le cas le plus fréquent (ascendant positif) est la suivante : aux premiers temps on observe l'apparition de filaments couronnés issus d'un tronçon ionisé commun, qui est l'amorce d'un traceur. A partir d'une certaine valeur du champ électrique, ce traceur se développe brusquement en direction du nuage avec une vitesse moyenne de 2 à $6 \cdot 10^4$ m/s [13]. A cours de cette progression, le traceur se ramifie plusieurs fois, et on assiste à la formation d'une arborescence. Au moment où ces ramifications lèchent la base de nuage, il s'établit une décharge, dont la durée peut atteindre la seconde, et qui écoule des courants de l'ordre du millier d'ampères [3].

I.3.2.2 Coup de foudre descendant

A l'inverse du traceur positif, le traceur d'un coup de foudre descendant négatif [3] [6] [12] se développe en progressant vers la terre par bonds successifs de 50 à 100m (Stepped leader). Entre les bonds, on observe des temps d'arrêt de l'ordre de 40 à 100 μs , avec une vitesse de progression moyenne de 0,15 à 0,20 $\text{m}/\mu\text{s}$ (deux fois plus grande que celle du traceur ascendant positif). Dès que la pointe du traceur se rapproche du sol, des prédécharges ascendantes se développent généralement depuis un arbre, une saïe, 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, neutralisant 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 la première décharge cesse de s'écouler, il peut se passer 100 ms avant qu'une seconde décharge n'apparaisse. Cette seconde décharge commence par l'apparition d'un traceur (dart leader) qui progresse d'une façon continue (contrairement au stepped leader) en suivant le même chemin établi par le stepped leader dont la vitesse de propagation est de l'ordre de 10^6 m/s et plusieurs décharges successives peuvent ainsi avoir lieu selon ce type de mécanisme.

La figure (I.6) montre l'évolution temporelle d'un coup de foudre descendant négatif.

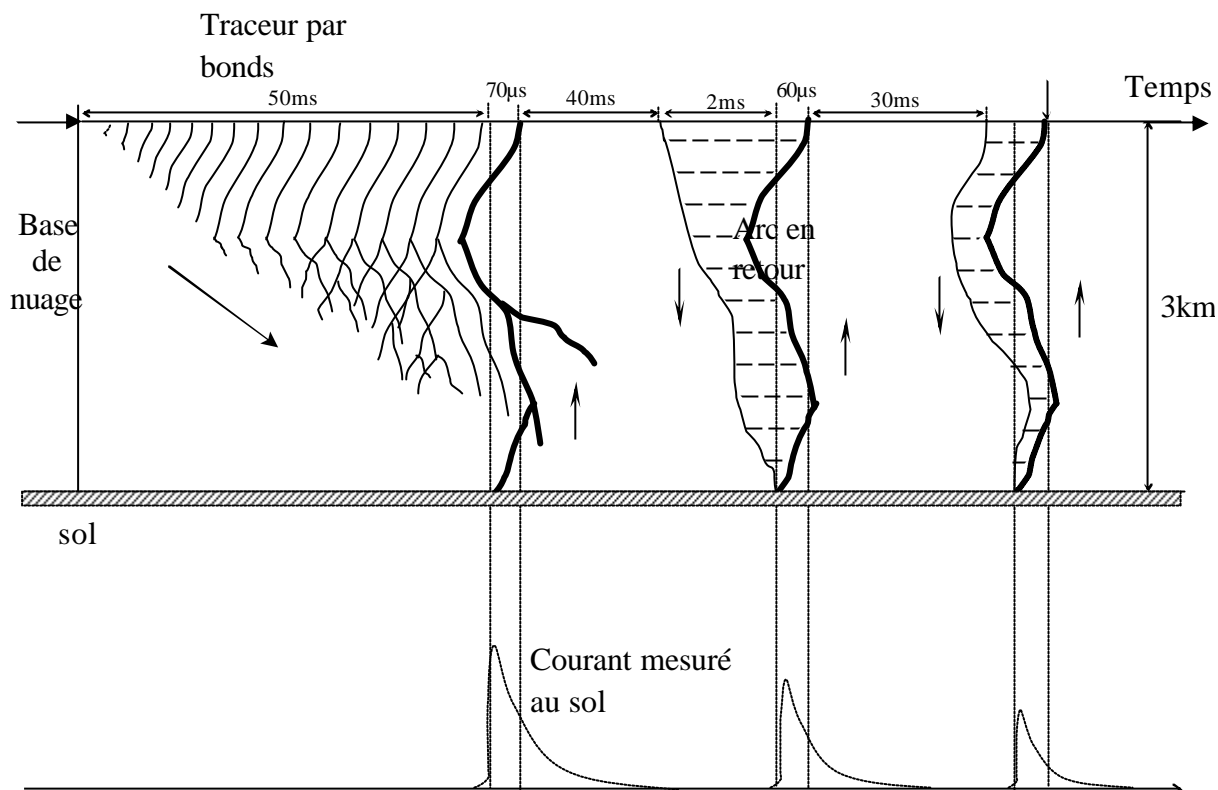


Figure I.6. Evolution spatio-temporelle d'un coup descendant et courants mesurés à la surface de la terre [6]

I.4 FORMES ET AMPLITUDES DES IMPULSIONS DES COUPS DE Foudre

Temps

I.4.1 FORMES DES DECHARGES NEGATIVES

Les courants des coups de foudre négatifs offrent une grande variété de combinaisons de courants impulsionnels et de courants persistants. Le courant d'un coup de foudre complet présente plusieurs impulsions, et on distingue le premier coup et les coups subséquents (Fig.I.6).

Le premier coup se caractérise par un temps de montée de zéro jusqu'à la valeur de crête de l'ordre de 10 à 20 μs , une durée de queue de l'ordre d'une centaine de microsecondes et une amplitude variant entre 3 et 200 kA [13].

Pour les coups subséquents la durée de front est très courte, inférieure à 1 μs , mais la queue de l'onde est bien plus régulière que dans la première décharge, leur amplitude est inférieure à celle de la première décharge, dépassant rarement 20kA (Fig.I.6) [3][13].

I.4.2 FORMES DES DECHARGES POSITIVES

Le coup de foudre positif (Fig.I.7) est constitué d'une seule impulsion qui dure de 0.1 à 0.2 s (très supérieure à celle du coup de foudre négatif), à durée du front qui varie entre 20 et 50 μ s, cependant ils sont plus violants ; l'amplitude du courant peut atteindre des très fortes valeurs supérieures à 100kA [3] [12].

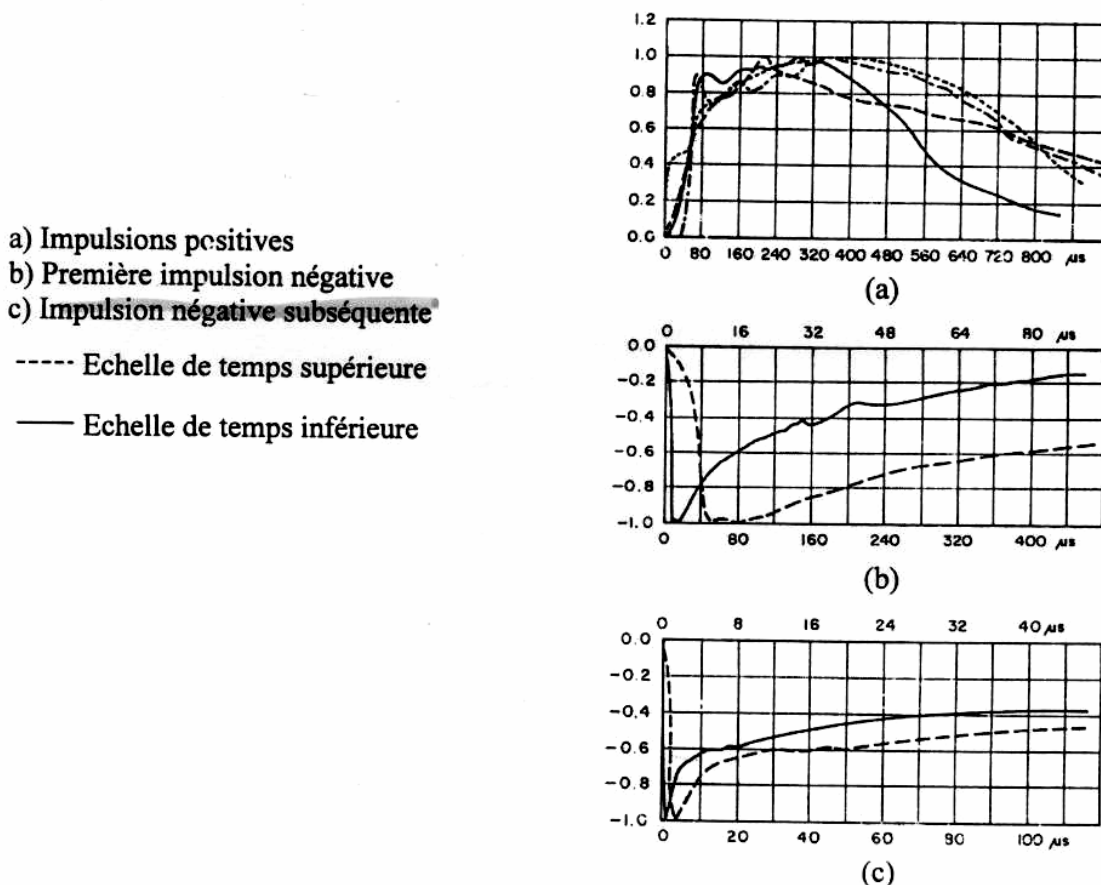


Figure I.7. Formes typiques des différents courants de foudre [3]

I.4.3 DISTRIBUTION DES AMPLITUDES

L'analyse des données mondiales obtenues à partir des mesures sur les courants des coups de foudre enregistrés, montre que la distribution des courants de foudre et des raideurs de front obéissent à une loi de probabilité de type log-normale [13].

La figure (I.8) représente la distribution globale des amplitudes des différents types de coups de foudre.

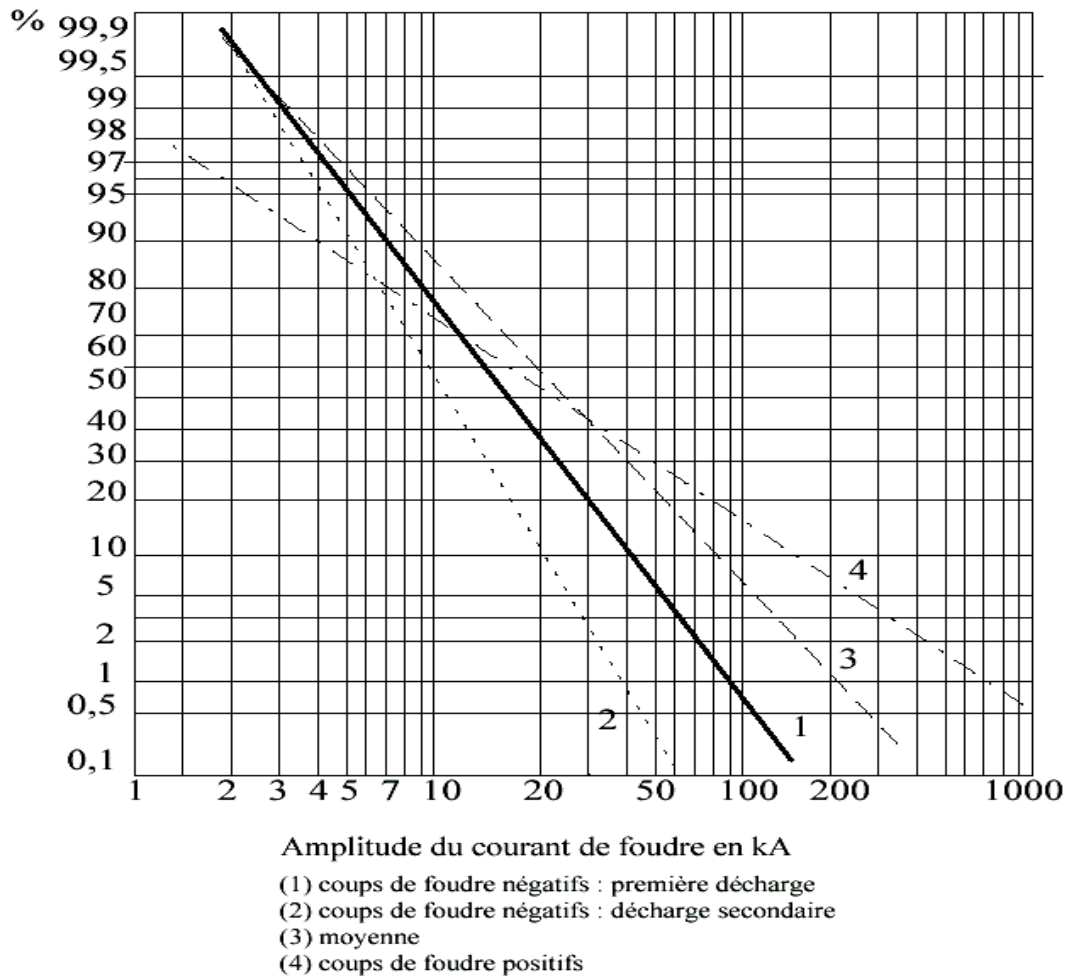


Figure I.8. Distribution statistique des coups de foudre

Pour exprimer la probabilité j_1 pour qu'un coup de foudre dépasse l'intensité I, la formule suivante a été proposée [3][13] :

$$\log j_1 = 2 - \frac{I}{60} \tag{I.8}$$

Avec

j_1 : Exprimé en % si I est exprimé en kA.

Les conséquences que l'on peut retenir sont :

- L'amplitude des courants de coups de foudres positifs peut atteindre des très grandes valeurs, supérieures à 150 kA dans 10 % des cas.
- L'amplitude des courants de foudre négatifs est, en général plus faible, la valeur à 10% des cas étant de l'ordre de 50 kA.

I.4.4 AUTRES PARAMETRES CARACTERISANT LA Foudre [5]

Outre les grandeurs déjà citées, il existe d'autres caractéristiques utiles à connaître :

- **$(di/dt)_{\max}$, vitesse de variation (raideur) maximale du courant :**

La raideur maximale a pratiquement toujours lieu sur le front montant du coup de foudre. Ce paramètre sert au calcul des tensions induites dans les circuits électriques voisins [14].

- **$\int i^2 dt$, intégrale d'action**

Ce paramètre exprime l'énergie spécifique ou l'énergie dissipée dans une résistance de 1 Ohm. C'est la caractéristique qui doit être prise en compte pour l'estimation des effets thermiques, par exemple pour le calcul de la section d'une descente de paratonnerre, en fonction de l'échauffement acceptable.

- **Q charge totale neutralisée au cours d'une décharge de foudre :**

Ce paramètre sert à l'évaluation de l'effet de fusion. La quantité de métal fondu au point d'impact, sur une tige de paratonnerre ou sur une toiture métallique, est proportionnelle à la charge écoulée.

- **T, durée totale d'une décharge :**

Cette durée peut atteindre 1 seconde pour les coups de foudre positifs et 0,2 à 2 secondes pour les coups de foudre négatifs.

- **N, nombre de réilluminations au cours d'une décharge :**

Le nombre de réilluminations est de l'ordre de 4 pour les coups de foudre descendant négatifs.

Tous ces paramètres se caractérisent par des valeurs présentant une très grande dispersion d'un coup à l'autre. De plus, leur distribution statistique obéit à une loi de probabilité log-normale.

I.4.5 TABLEAU RECAPITULATIF DES PARAMETRES TYPIQUES DE LA Foudre

Le tableau ci dessous résume quelques grandeurs importants concernant les caractéristiques électriques des différents types d'impulsions des coups de foudre, pour les trois niveaux de probabilité retenus par la comité technique de la CEI [13].

Paramètres	Unité	Probabilité		
		95%	50%	5%
Amplitude	kA	95%	50%	5%
premier coup		7	33	85
coup subséquent		4,6	12	30
coup positif		4,6	35	250
Raideur max.	kA/μs	95%	50%	5%
premier coup		9,1	24	65
coup subséquent		10	40	162
coup positif		0,2	2,4	32
Energie spécifique	A ² s	95%	50%	5%
premier coup		6,0 10 ³	5,5 10 ⁴	5,5 10 ⁵
coup subséquent		5,5 10 ²	6,0 10 ³	5,2 10 ⁴
coup positif		2,5 10 ⁴	6,5 10 ⁵	1,5 10 ⁷
Charge totale	C	95%	50%	5%
décharge négative		1,3	7,5	40
décharge positive		20	80	350
Durée totale	ms	95%	50%	5%
décharge négative		0,15	13	1100
décharge positive	14	85	500	

Tableau I.1. Paramètres caractéristiques de la décharge de foudre [30]

1.4.6 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:

- **Effet thermique [12]**

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

$$W = R \int_{t_i}^{t_f} i^2 dt \quad (I.9)$$

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

Des effets thermiques importants apparaissant donc surtout en des points de fortes résistances, comme dans les mauvais conducteurs, où beaucoup d'énergie est libérée sous forme de chaleur par le passage de courant.

- **Effet électrodynamique [12]**

Des effets mécaniques plus au moins importants peuvent se produire, là où des parties du chemin parcouru par la foudre se trouvent dans un champ magnétique d'une autre partie. Dans ce cas, plus l'écart entre ces parties est faible, plus les effets deviennent important.

- **Effets conduits ou rayonnés**

La mauvaise cohérence de raisonnement entre paratonnerre, descente et prise de terre fait que sur une infrastructure existant, en plus des perturbations rayonnées, des perturbations conduites sont captées par induction sur les circuits intérieures [6][33].

- **Effets chimiques [5]**

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



où :

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

ν : fréquence de l'onde lumineuse.

- **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) [6]. Il est à l'origine des ondes de choc, elle même à l'origine de l'onde sonore (tonnerre). Le niveau de pression acoustique peut atteindre 155 dB [14].

- **Effets électromagnétiques**

La foudre génère des ondes électromagnétiques à large spectre de fréquence qui atteint les fréquences de transmission radiophoniques provoquant ainsi des perturbations radiophoniques [15]

1.5 PROTECTION CONTRE LA Foudre

1.5.1 INTRODUCTION

Lorsqu'un ouvrage ou un objet quelconque risque d'être foudroyé, on est obligé de déterminer au préalable les points d'impact les plus probables de la foudre. La connaissance de ces points permettra d'apprécier l'ampleur des dommages et de prévoir une protection éventuelle.

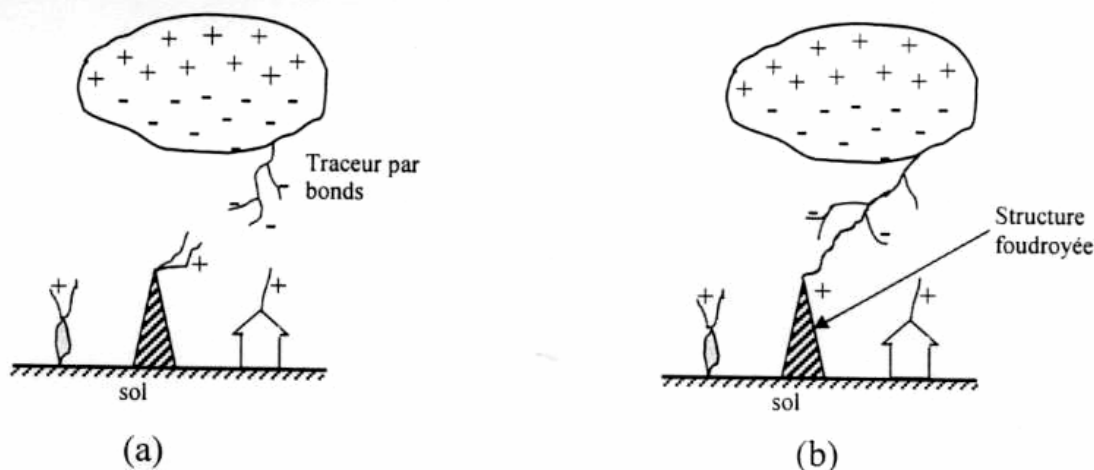
Les travaux de recherche ayant porté sur l'analyse d'un grand nombre de foudroiements des lignes, ont abouti à l'élaboration d'un modèle de mécanisme d'impact, appelé « modèle électrogéométrique » ; grâce auquel l'efficacité du câble de garde peut être optimisée [3].

Dans ce chapitre nous nous intéresserons à la physique de l'impact au sol, au modèle électrogéométrique de base, au modèle mis en œuvre par la méthode de la sphère fictive.

1.5.2 LE MECANISME D'IMPACT D'UN COUP DE Foudre

Le traceur par bonds est un canal ionisé comportant un excédant de charges négatives avec une forte concentration de charges à sa pointe. Lorsqu'il se rapproche du sol, le champ électrique au sol s'accroît considérablement pour atteindre des valeurs de l'ordre de 300 à 400 kV/m.

A ce moment, des décharges ascendantes positives se développent brusquement en direction du traceur descendant, alors qu'elles n'existaient auparavant que sous forme d'effluves d'effet couronne localisées. L'une des décharges la plus proche ou celle qui a progressé le plus rapidement, entre en contact avec le traceur descendant. Le point probable, qui sera frappé par la foudre et 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.(Fig.I.9) [8].



- (a) Propagation du traceur par bonds et formation des décharges ascendantes.
 (b) Rencontre entre le traceur par bonds et une décharge ascendante.

Figure I.9. Description des différentes étapes du coup de foudre

Il arrive parfois que deux ou plusieurs décharges ascendantes rejoignent le traceur par bonds et on assiste ainsi à un coup de foudre ramifié.

1.5.3 LE MODELE ELECTROGEOMETRIQUE

Le modèle électrogéométrique a pour objet la détermination des points d'impacts les plus probables de la foudre, afin de pouvoir apprécier l'ampleur des dégâts éventuels et de prévoir, si nécessaire, des dispositifs de protection appropriés tel que, paratonnerre, cage de Faraday, ou câbles de garde dans le cas des lignes aériennes [3] [13].

Ce modèle élaboré principalement par : Armstrong, Golde, Darvening et Whitehead [3] a été vérifié au cours d'une importante campagne d'investigation sur les lignes de transports de l'énergie électrique à haute tension [3].

1.5.3.1 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 au 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 du coup de foudre descendant correspond à la quasi-neutralisation de la charge du traceur. Ceci conduit souvent à la corrélation suivante [13] :

$$I = 15 Q \tag{I.12}$$

Avec : I en kA 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 :

$$Q = 0.1Q + l.q \Rightarrow 0.9Q = l.q \tag{I.13}$$

La figure (I.10) 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.

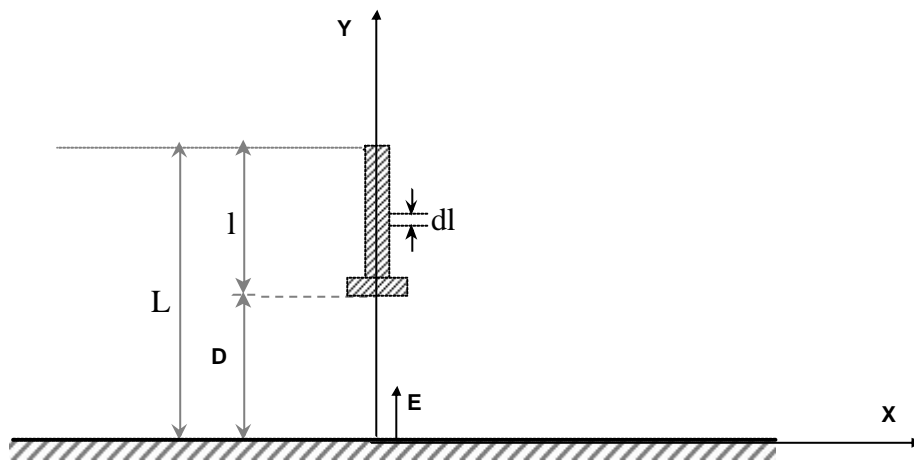


Figure I.10. Champ électrique au sol crée par un traceur descendant

A la base de ces données, le champ au sol à la verticale du traceur descendant est donné par [13] :

$$E = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \left[\frac{\int dl}{l^2} + \frac{L-D}{9} \right] \tag{I.14}$$

$$E = \frac{q}{2pe_0L}(1-K) \left[\frac{9K+1}{9K^2} \right] \tag{I.15}$$

Avec $K = D/L$ (I.16)

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

$$q = \frac{0.9Q}{L} \tag{I.17}$$

De (I.14) et (I.17) on déduit que :

$$q = \frac{0.9I}{15.L} \tag{I.18}$$

Avec : q en coulomb, I en kA et L en mètres.

Si on remplace la charge linéique q donnée par l'expression (I.15), et on prend le cas d'un nuage situé à 2 km au-dessus du sol ($L=2000m$), on obtient la relation $E=f(E.D)$ représentée sous forme de courbes de la figure (I.11).

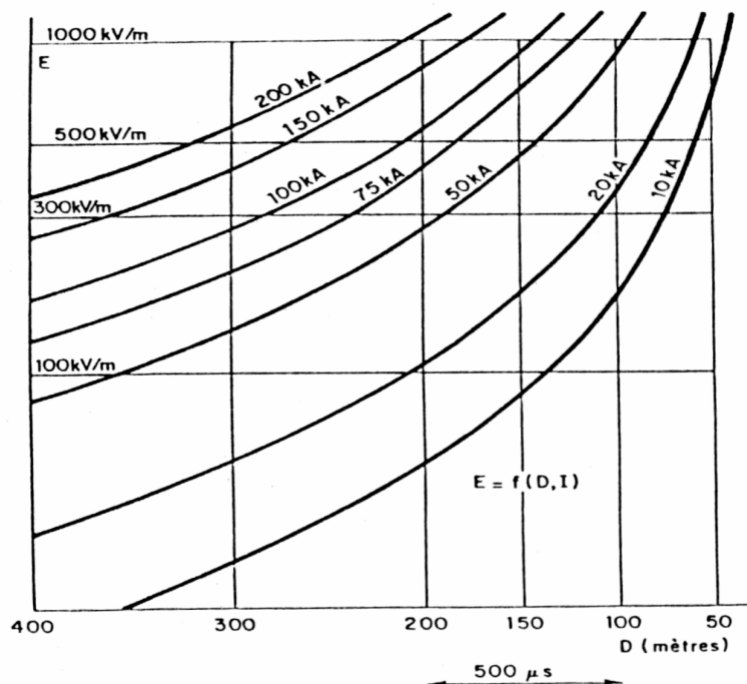


Figure I.11. Champ électrique au sol en fonction de l'altitude de la tête du traceur pour différents coups de foudre [13]

I.5.3.2 Distance d'amorçage du modèle de Whitehead [13]

En ce qui concerne l'estimation numérique de la distance d'amorçage, de nombreux auteurs ont proposé diverses méthodes d'évaluation.

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

$$d=10.I^{2/3} \quad (I.19)$$

Avec : d en mètres et I en kA

La figure (I.12) résume les estimations publiées par divers auteurs [3].

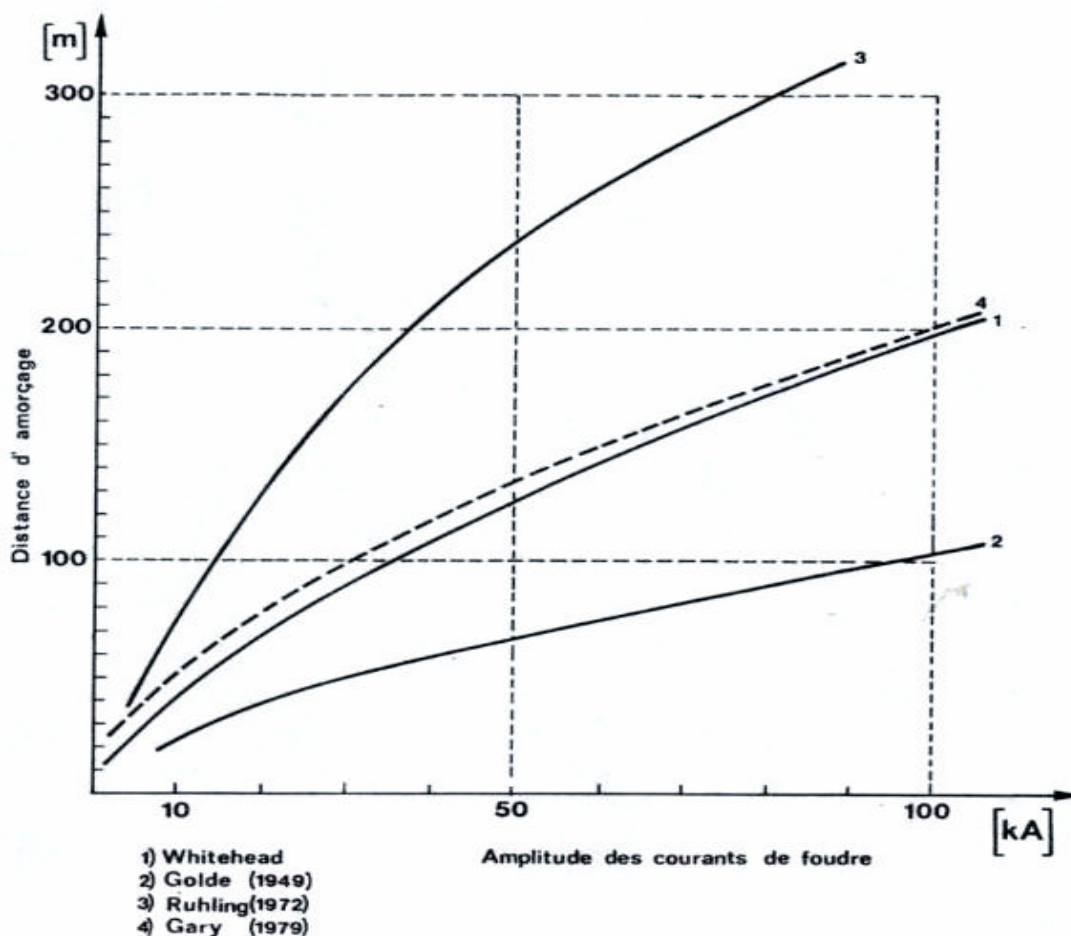


Figure I.12. Distance d'amorçage en fonction de l'amplitude du courant de foudre selon plusieurs auteurs [13]

En prenant une valeur du champ au sol qui provoque la jonction entre le traceur descendant et la décharge ascendante de l'ordre de 500kV/m [13], on peut, à partir des courbes de la figure (I.11), déduire les distances d'amorçage pour les différentes valeurs de crête du courant. Ces valeurs sont portées dans le tableau (I.2) avec les distances données par la formule de Whitehead [13].

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

Tableau I.2. 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 $f(E.D)$ pour un champ électrique de 500kV/m sont pratiquement égales; cette distance croit avec la valeur de crête du courant de foudre.

I.5.3.3 Critique du modèle électrogéométrique

Jusqu'à ce jour le modèle électrogéométrique est largement utilisé pour la prédétermination des points d'impact. 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, et quelle que soit la qualité de leur mise à la terre. Ainsi, il ne fait pas de distinction entre paratonnerre, bâtiment, arbre ou sol plat. Pourtant, il est plus probable qu'un paratonnerre soigneusement mis à la terre attire mieux la foudre que les autres structures. En effet l'existence des décharges ascendantes est bien prouvée tant par des observations photographiques que par les recherches en laboratoires [16] [17] [18]. Ces décharges se développent plus au moins bien suivant la hauteur et la résistance des structures au sol.

En ce qui concerne la forme et la taille des structures, le modèle électrogéométrique ignore l'effet de pointe qui est l'essence même de la tige de Franklin [17], et l'effet d'écran produit par les charges positives extraites de la pointe sous l'influence du champ électrique.

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 [17] 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 [1] [2] [10] [18] [19] à [27], dont quelque résultats sont présentées aux chapitre suivant.

Bien que ce modèle ne soit pas parfait, il constitue néanmoins l'approche la plus cohérente de la protection contre la foudre qui ait été élaborée à ce jour.

I.5.3.4 Application du modèle électrogéométrique

Le modèle électrogéométrique qui repose sur la notion de la distance d'amorçage, trouve son application dans la détermination de la zone de protection d'un dispositif de capture par l'utilisation de la méthode de la sphère fictive.

I.5.3.4.1 Méthode de la sphère fictive

Selon le modèle électrogéométrique, le point d'impact de la foudre est le premier point au sol qui se trouve à la distance d'amorçage d de la pointe du traceur, même si cet objet est le sol lui-même.

Ceci revient à considérer que la pointe du traceur était entourée d'une sphère fictive de rayon d centrée sur elle et accompagnant la pointe du traceur pendant sa trajectoire. A l'approche du sol, le premier objet qui touchera la sphère déterminera le point d'impact du coup de foudre [28].

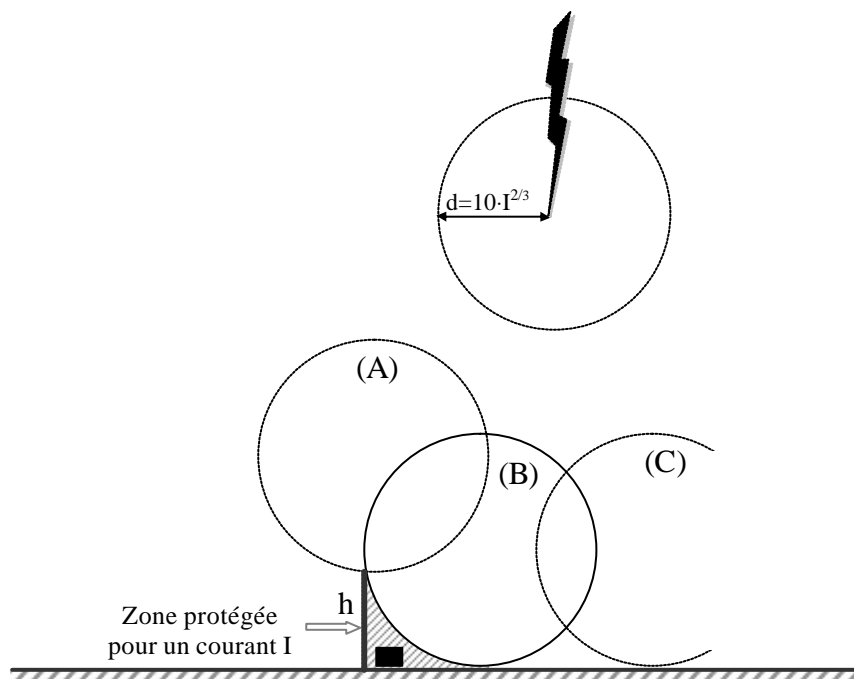


Figure I.13. Méthode de la sphère fictive appliquée à une tige verticale de hauteur h

D'où le procédé suivant (fig.I.13) : on imagine que la sphère fictive de rayon d est roule au sol dans toutes les directions, sans jamais perdre le contact avec le sol ou avec un objet proéminent. Si au cours de ce mouvement, la sphère entre en contact avec les dispositifs de protection sans pouvoir toucher l'un des objets à protéger, alors la protection de ceux-ci est

assurée ; dans la cas contraire, le dispositif de protection devra être ramené jusqu'à ce qu'aucun de ces contacts ne puisse plus se produire.

Dans la zone hachurée sur la figure (I.13) 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

I.5.3.4.2 Zone de capture d'une tige verticale

Pour déterminer la zone d'attraction de la tige, on considère l'ensemble des sphères qui touchent simultanément la tige et le sol. Le lieu des centres des sphères délimite la zone d'attraction de cette tige : (fig.I.14)

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

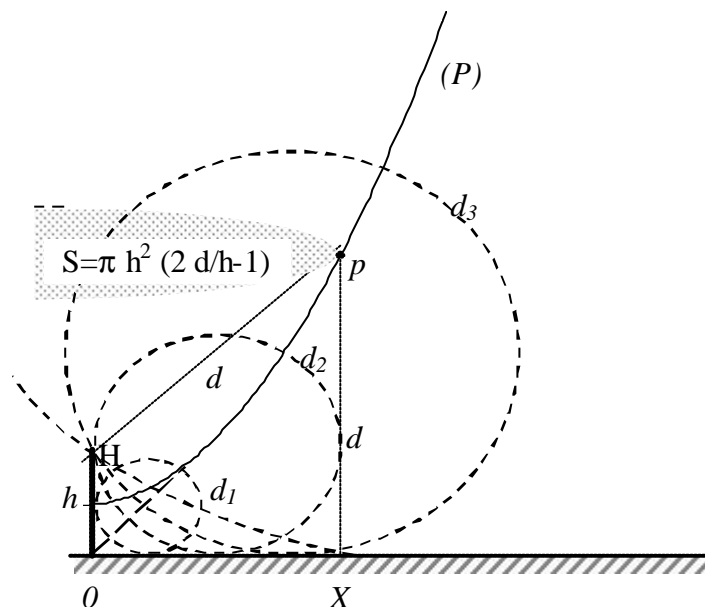


Figure I.14. Zone de capture et de protection d'une tige verticale

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 [16]. Dans un plan perpendiculaire à la terre qui contient l'axe du paratonnerre, la limite est une parabole qui a comme équation :

$$h^2 - 2hy + x^2 = 0 \tag{I.20}$$

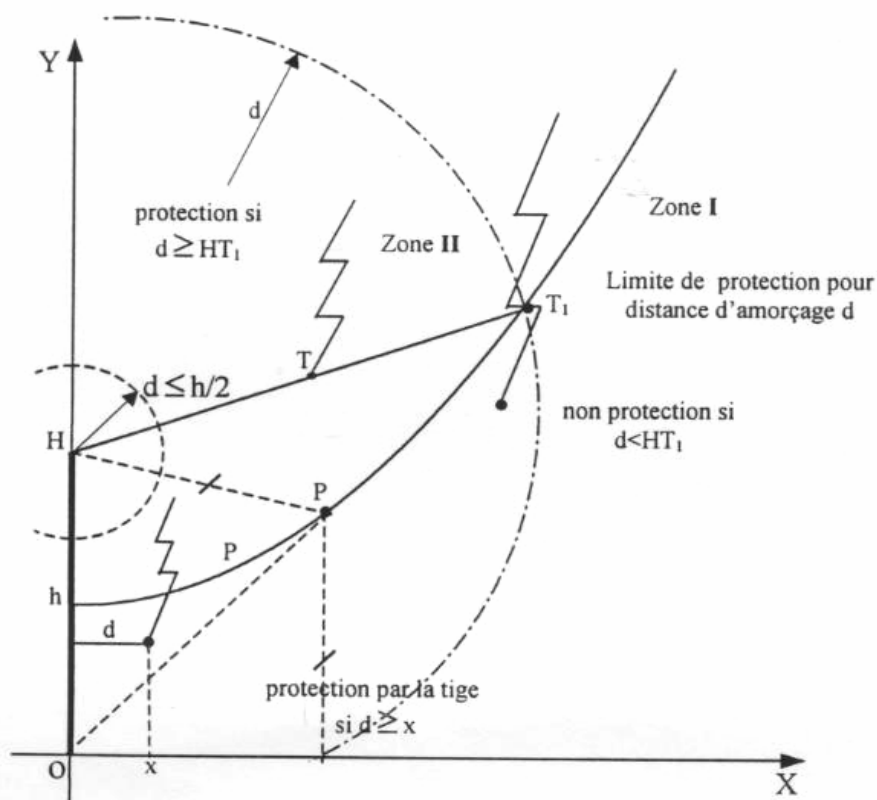


Figure I.15. Zone de capture d'une tige verticale

Selon le présentation de la figure (I.15), tout traceur qui se présente dans la zone (I) à droite de la parabole, ne sera jamais capté par la pointe H et touchera le sol. Si au contraire un traceur se présente dans la zone (II) compris entre (oy) et (P) sera capté par la pointe dès que la distance HT (T étant la tête du traceur) devient inférieure ou égale à la distance d'amorçage du coup de foudre considéré.

Si le traceur, arrivant par la zone (II) peut traverser la parabole (P) en T1 par exemple, sans qu'il soit capté, cela signifie que $HT_1 > d$

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 [13].

Or, $HT_1 = y$, ordonnée du point T1, par définition même de la parabole.

On remplace « y » par « d » dans l'expression (I.20), on aura :

$$h^2 - 2hd + x^2 = 0 \quad (\text{I.21})$$

A partir de cette expression, on peut tirer le rayon de capture de la tige, pour un coup de foudre caractérisé par une distance d'amorçage d donnée, ce rayon a comme expression :

$$x \leq h \cdot \sqrt{\frac{2d}{h} - 1} \quad (\text{I.22})$$

Pour les coups de foudre tels que $d < h/2$, l'expression (I.22) n'a pas de solution, ce qui signifie que la pointe ne capte pas les courants très faibles, dès lors que le traceur passe en dehors du cercle du rayon d centré en H.

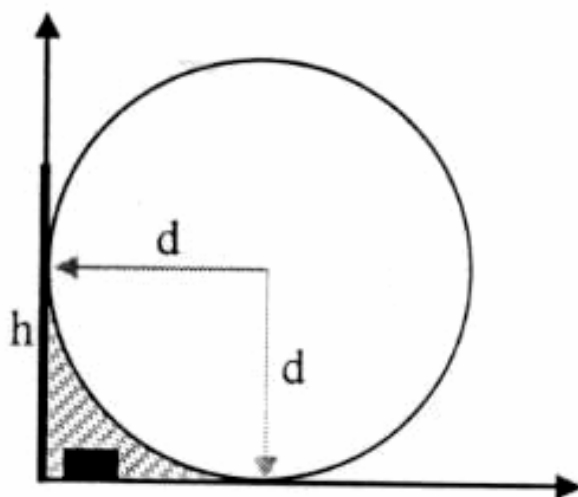


Figure I.16. Zone de capture d'une tige verticale ($d < h$)

Pour $d < h$, le rayon protégé au sol sera $x=d$, dans ce cas l'augmentation de h est sans aucun effet sur la zone de protection (fig I.16) [3].

CHAPITRE : II

***INFLUENCE DE LA NATURE
DU SOL SUR LA RIGIDITE
DIELECTRIQUE DE L'AIR***

INTRODUCTION

Les mécanismes de rupture diélectrique sont extrêmement complexes, ils dépendent de la forme de la tension appliquée (principalement la vitesse de croissance et de l'amplitude ainsi que la polarité). Mais les contraintes électriques ne sauraient à elles seules déterminer les caractéristiques constructives des isolations autorégénératrices, qui sont soumises à des contraintes climatiques variées. Lorsque l'isolant est un gaz, la température et la pression en modifiant la densité du gaz, influent sur les performances de l'isolation.

Il est utile de noter que les résultats des travaux effectués sur l'étude de la rigidité des intervalles d'air tige-plan à L'ENP ont montré que les propriétés électrologiques du sol ont une grande influence sur la valeur de la tension $U_{100\%}$.

II.1. INFLUENCE DES PROPRIETES ELECTROGEOLOGIQUES DU SOL SUR RIGIDITE DIELECTRIQUE DE L'AIR SOUS TENSION DE CHOC DE Foudre

II.1.1 CAS D'UN SOL HOMOGENE MAUVAIS CONDUCTEUR

Le modèle expérimental réduit utilisé est représenté à la figure (II.1), où la terre est constituée d'une couche d'eau distillée de conductivité et d'épaisseur variables, reposant sur un plan conducteur mis à la terre.

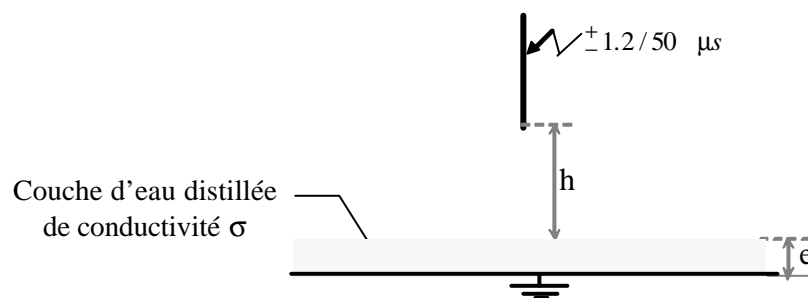
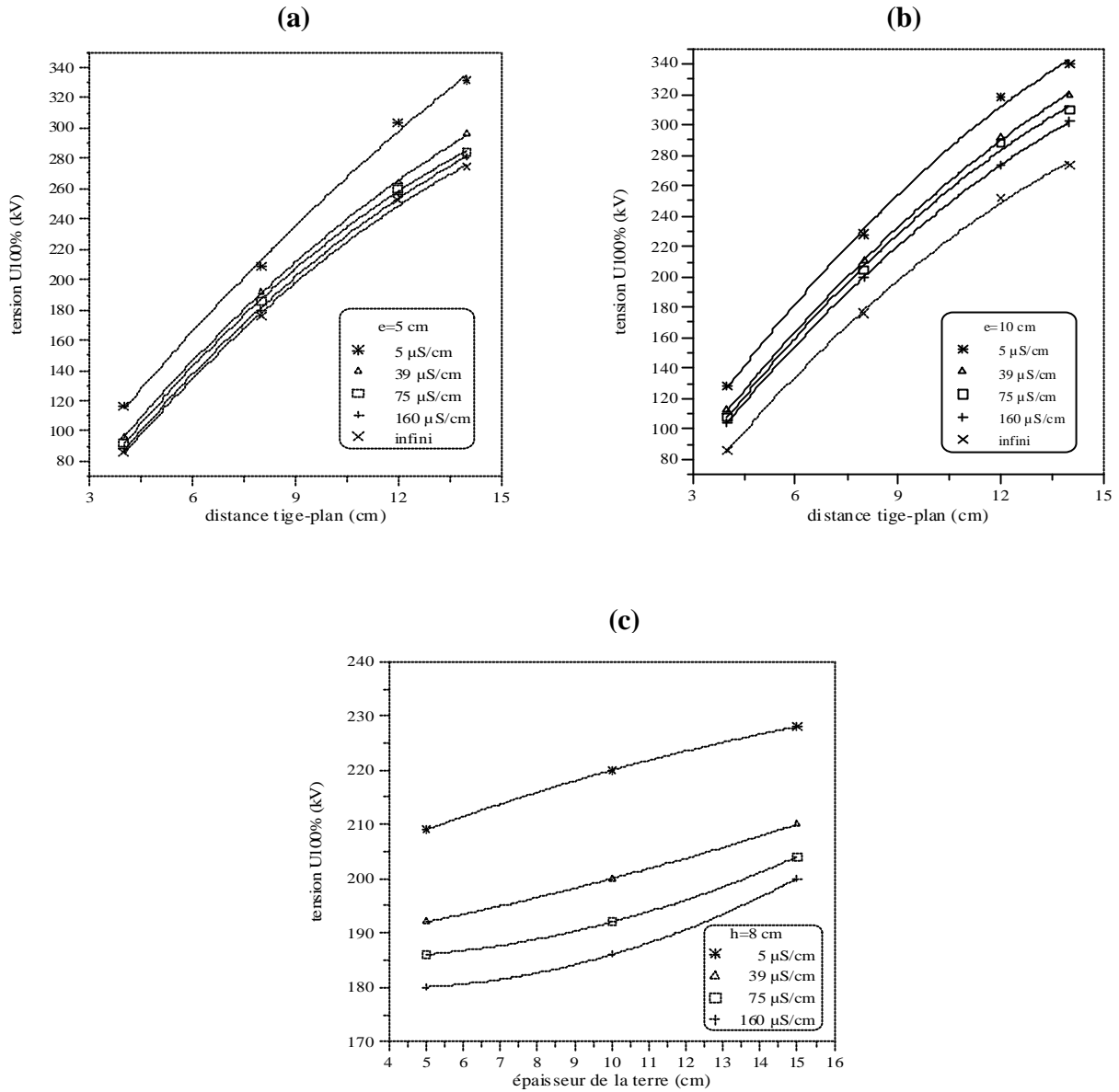


Figure II.1. Système tige-plan avec terre mauvaise conductrice.

D'après des essais effectués selon la configuration de la figure II.1, il a été constaté que la tension à 100% de décharge disruptive ($U_{100\%}$) dans le cas d'un intervalle pointe-plan avec sol faiblement conducteur est influencée par la conductivité (σ) et l'épaisseur (e) de la couche mauvaise conductrice. En effet, la tension $U_{100\%}$ augmente lorsque la conductivité du

sol diminue et de même pour une même conductivité lorsque l'épaisseur de la couche de la terre augmente (figure II.2) [16] [21] [23] [24] ceci est dû à la diminution de la présence d'ions ou d'électrons libres dans le volume d'eau. Ce fait diminue ainsi la valeur du champ électrique [19].



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

Figure II.2. Influence de la conductivité et de l'épaisseur de la couche mauvaise conductrice sur la tension à 100% de décharges disruptives ($U_{100\%}$) [16]

Une autre étude sur l'influence de la conductivité du sol mauvais conducteur sur la tensions à 50% de décharges disruptives ($U_{50\%}$) des petits intervalles d'air tige-plan aux ondes de choc de foudre positif et négatif, montre que la rigidité de l'intervalle tige-plan augmente lorsque la conductivité du sol diminue, de plus ces courbes démontrent que lorsque la conductivité devient très élevée, le système avec sol mauvais conducteur devient équivalent au système avec sol conducteur (Figure.II.3) [21] [28].

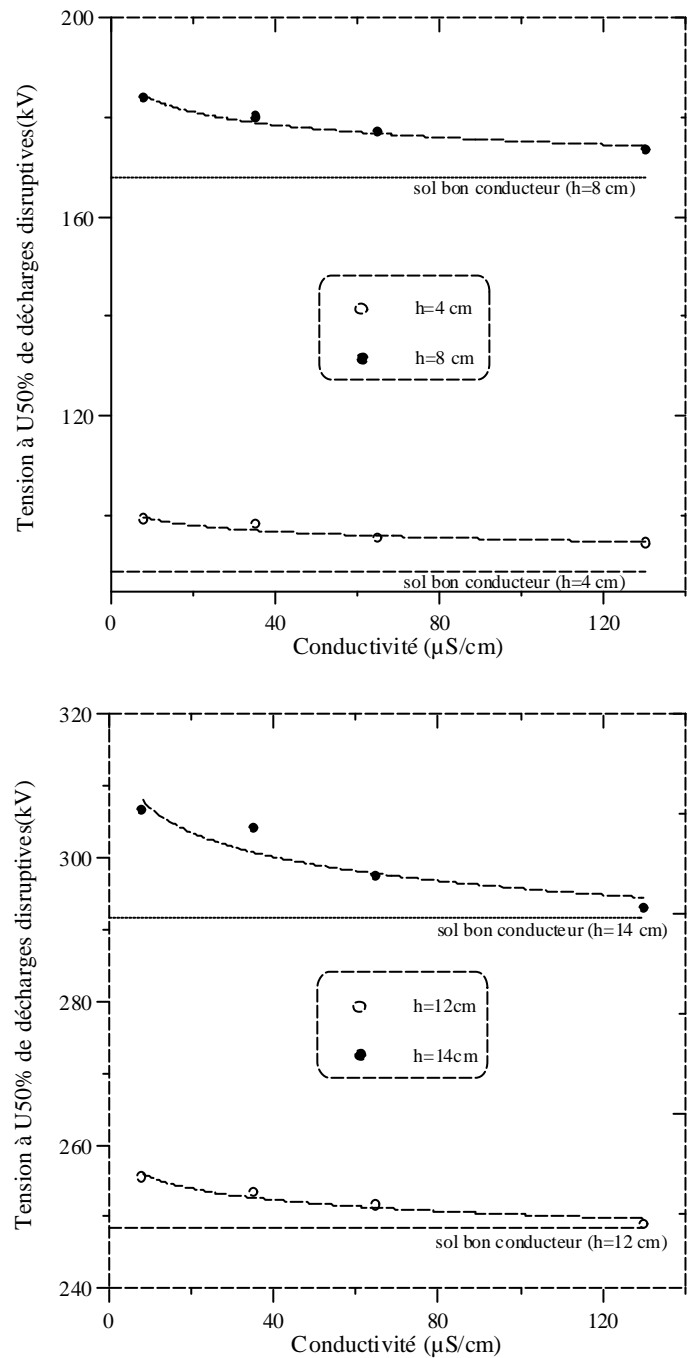


Figure II.3. La tension à 50% de décharges disruptives ($U_{50\%}$) en fonction de la conductivité du sol ($e=5\text{cm}$) [21].

II.1.2 CAS D'UN SOL HETEROGENE

Le modèle expérimental utilisé pour étudier la configuration tige-plan avec terre hétérogène est représenté à la figure (II.4), où le plan est constitué de deux parties, l'une très bonne conductrice (plaque d'aluminium) et l'autre mauvaise conductrice constituée d'une couche d'eau distillée de conductivité variable [21]. La position de la tige est déterminée par sa hauteur h par rapport au sol et par la distance d entre son axe et l'interface séparant les deux milieux qui constituent la terre. Cette distance est considérée positive lorsque la tige est située au-dessus de la partie mauvaise conductrice et négative dans l'autre cas.

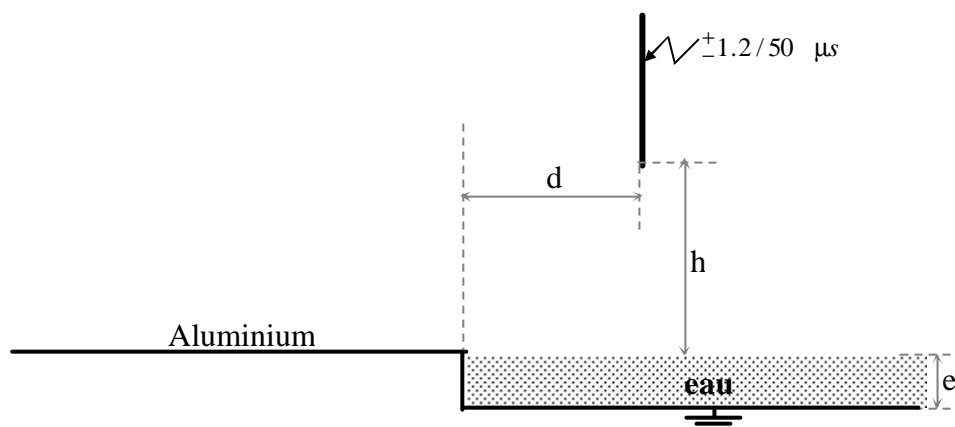


Figure II.4. Système tige-plan avec terre hétérogène [21].

D'après les résultats d'essais obtenus pour la polarité négative (figure II. 5 a et b), il a été constaté que, la rigidité de l'intervalle d'air tige-plan avec terre hétérogène dépend étroitement de la position de la tige par rapport à l'interface ; cette influence est plus importante lorsque la conductivité de la partie mauvaise conductrice est plus faible. Il est à noter que, pour les grandes distances d positives, la configuration tige-plan hétérogène tend vers le système tige-sol homogène de même longueur et de même conductivité de sol, tandis que, pour les grandes distances d négatives, la configuration tige-plan hétérogène tend vers le système tige-plan bon conducteur de même longueur.

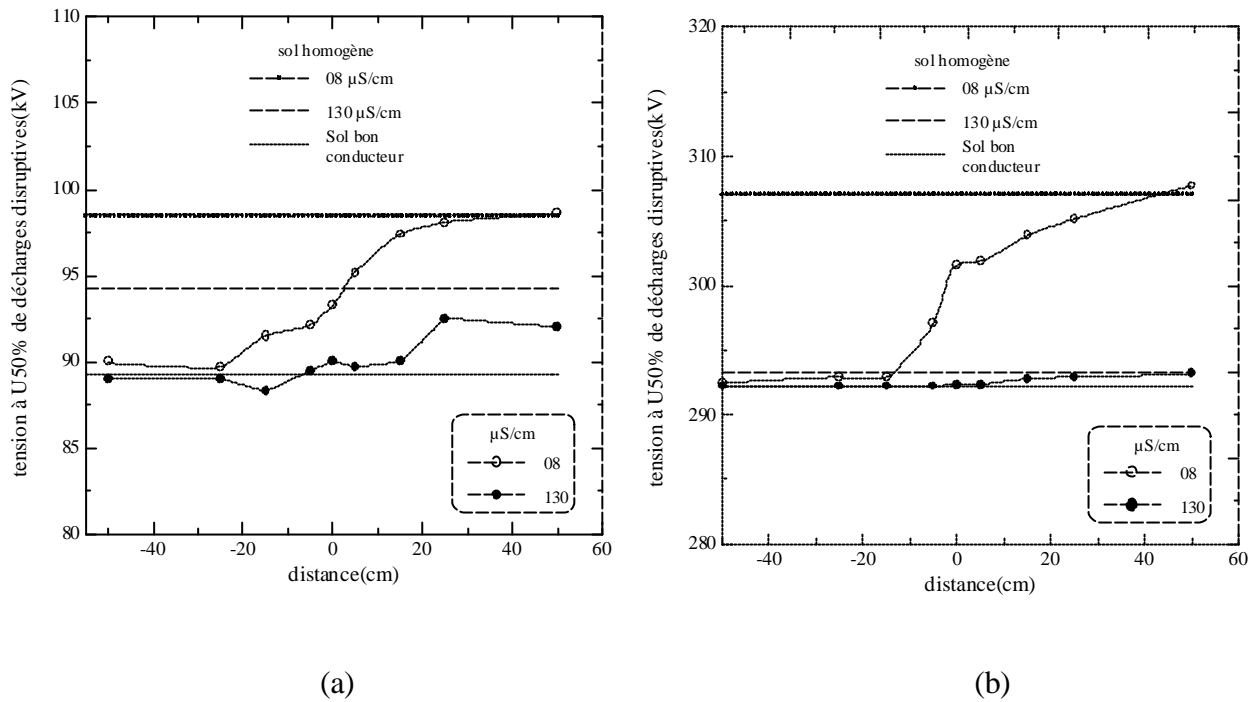


Figure II.5. Tension $U_{50\%}$ en fonction de la distance dans le cas de la tige négative [21].
 (a) $h = 4$ cm (b) $h = 14$ cm

II.1.3 CAS D'UN SOL DISCONTINU

Le modèle expérimental utilisé pour étudier la configuration tige-plan avec terre discontinue est représenté à la figure (II.6).

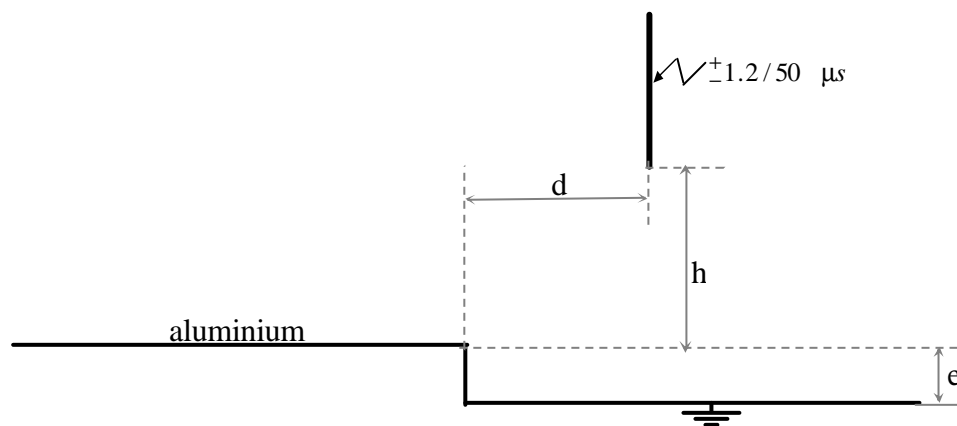


Figure II. 6. Configuration du système tige-plan avec sol discontinu.

Le système tige-plan avec sol discontinu est caractérisé, par la longueur de l'intervalle h ainsi que par la profondeur (e), la polarité de la tige et la distance d entre l'axe de cette

dernière et l'interface. Les résultats obtenus au laboratoire de l'ENP sont présentés à la figure (II.7) [21].

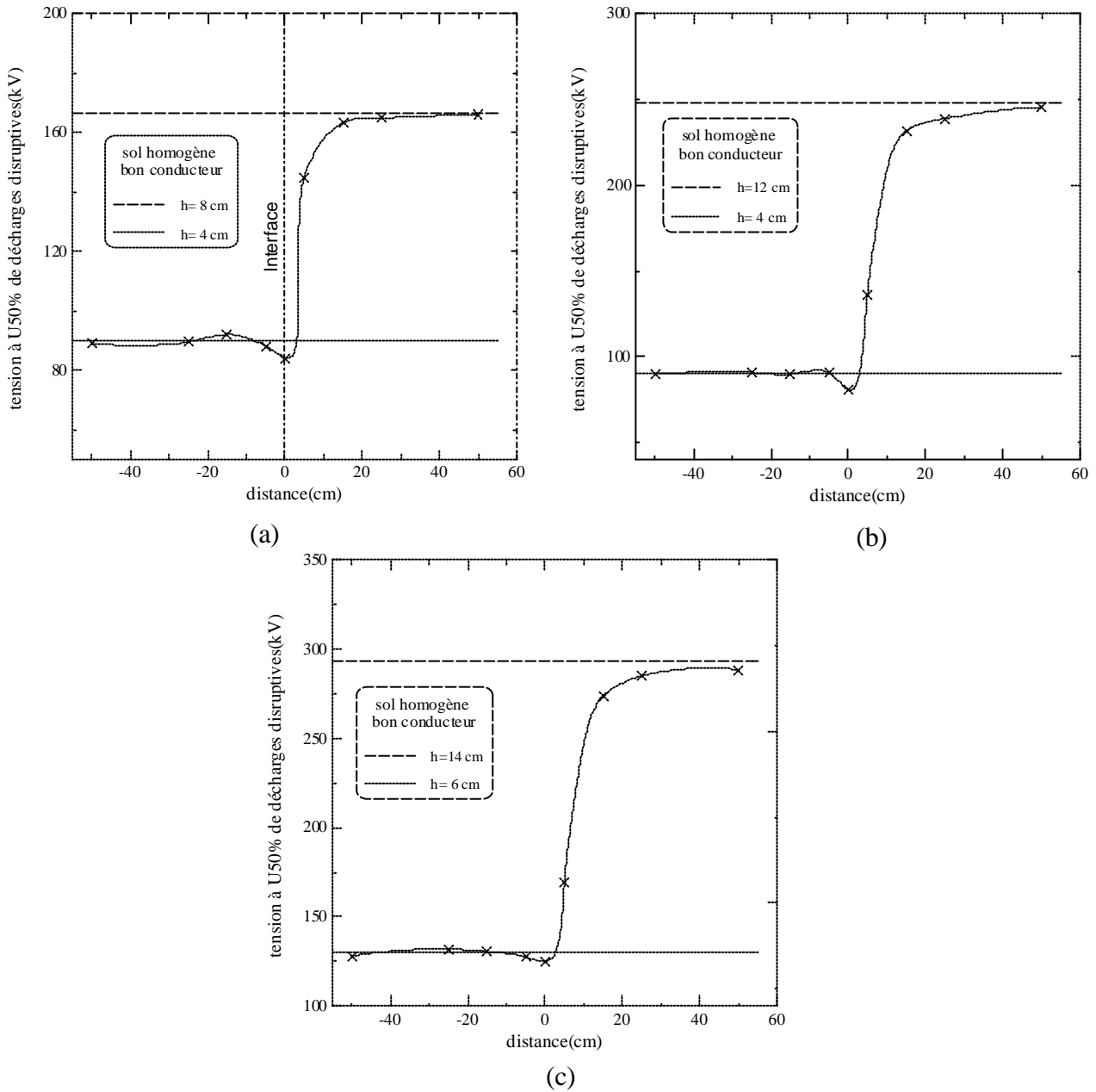


Figure II.7. Variation de $U_{50\%}$ en fonction de la distance d [21].

Polarité négative :
 a) $e = 4$ cm, $h = 4$ cm.
 b) $e = 8$ cm, $h = 4$ cm.
 c) $e = 8$ cm, $h = 6$ cm.

Dans le cas de la configuration avec terre discontinue des mesures de champ ont été effectuées utilisant la sonde à capacité répartie (figure II.8) [4].

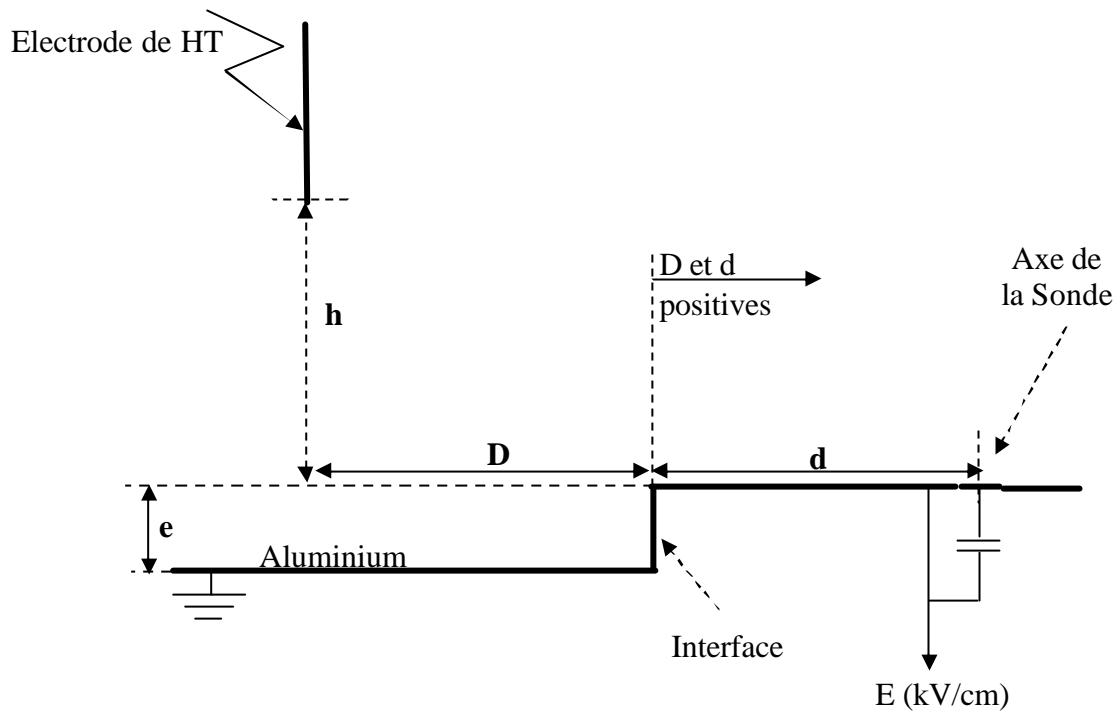


Figure II.8. Modèle expérimental de terre discontinue en présence de la sonde à capacité répartie [4]

Avec :

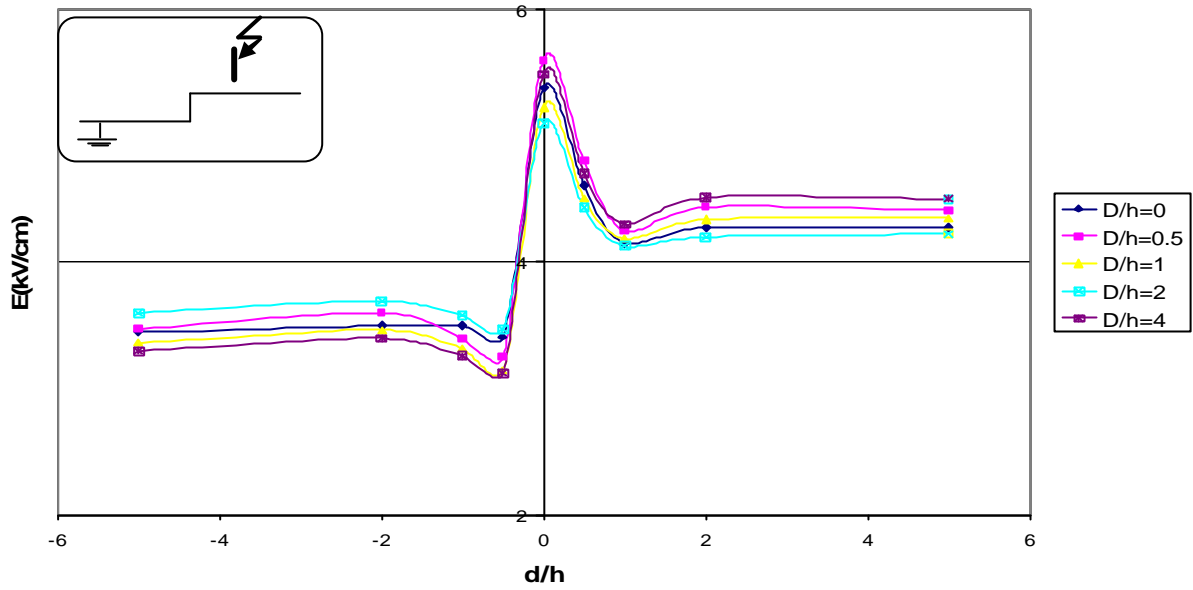
h : hauteur de l'électrode de haute tension au-dessus de la partie haute du plan discontinu.

e : profondeur de l'interface.

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

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

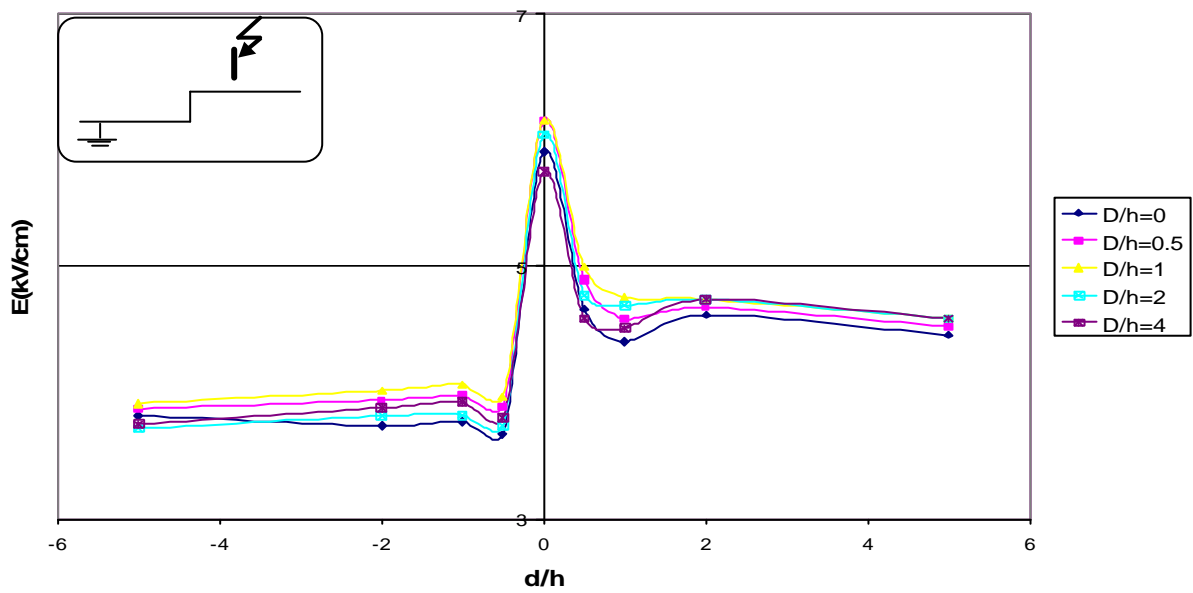
Les mesures du champ électrique le long du plan discontinu, ont permis d'aboutir aux résultats présentés à la figure (II.9 à II12) [4].



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

Figure II.9. Champ électrique au sol en fonction de la position (d/h) de la sonde.

$h=12\text{cm}$.



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

Figure II.10. Champ électrique au sol en fonction de la position (d/h) de la sonde.

$h=16\text{cm}$.

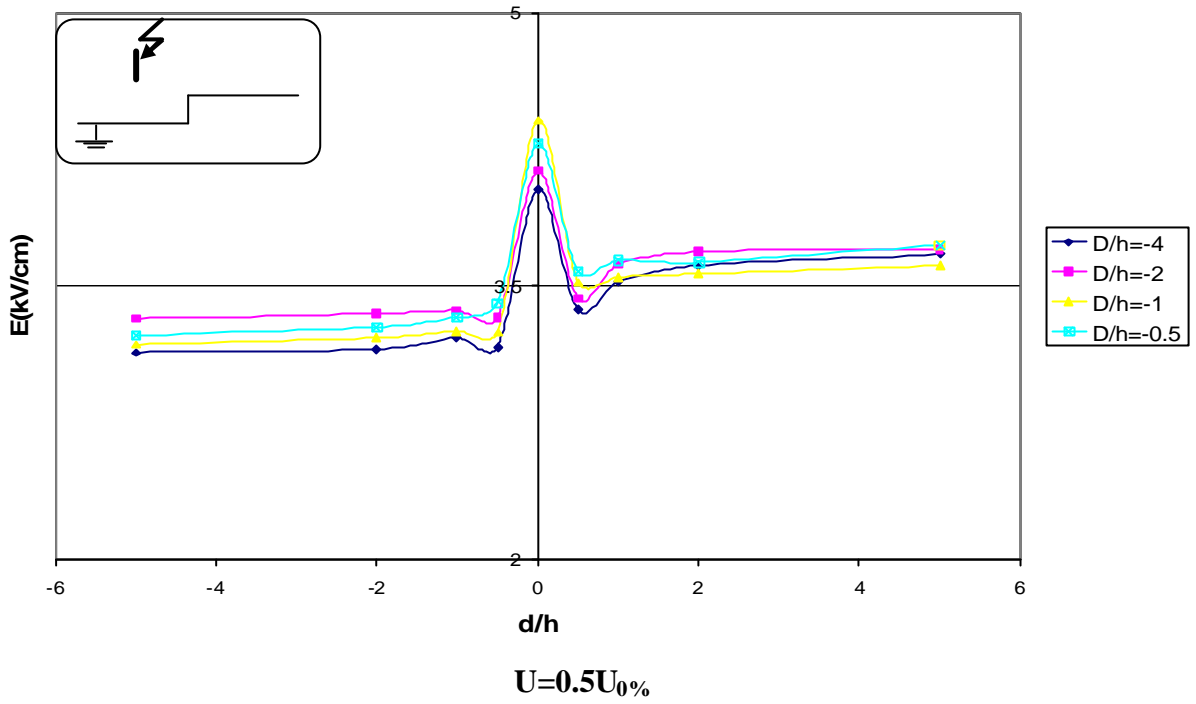


Figure II.11. Champ électrique mesuré au sol en fonction de la position (d/h) de la sonde
 $h = 12 \text{ cm}$

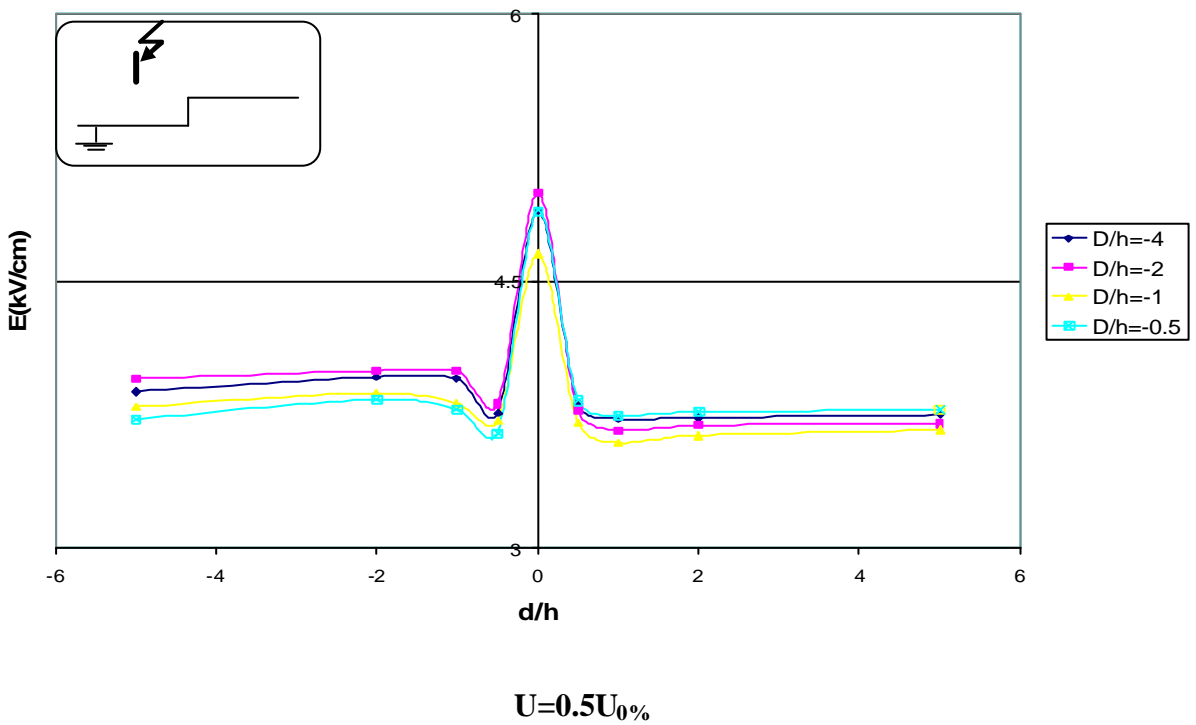


Figure II.12. Champ électrique mesuré au sol en fonction de la position (d/h) de la sonde
 $h = 16 \text{ cm}$

Ces résultats dépendent étroitement de la polarité de la tige et montrent que :

- Pour les grandes distances d , le comportement de l'intervalle sous tension négative est similaire à son comportement sous tension positive. Le système est équivalent au système tige-plan avec sol homogène bon conducteur de même longueur pour les distances négatives, et de longueur majorée avec la valeur de l'épaisseur e pour les distances positives. Au voisinage de l'interface, la tension à 50% de décharges disruptives à polarité négative est inférieure à celle obtenue dans le cas du sol bon conducteur de même longueur. Cette discontinuité dans l'évolution de la tension $U_{50\%}$ a disparu dans le cas de la tige positive (figure II.7). Ceci est dû au rôle de l'interface qui aurait le même effet qu'une pointe, transformant le système tige-plan en système tige-tige qui est moins rigide que le système tige négative-plan, est plus rigide que le système tige positive-plan.
- En polarité négative, l'influence de la discontinuité est plus importante lorsque la profondeur e augmente (h étant constante).
- La rigidité diélectrique du système pointe-pointe étant inférieure à celle du système pointe-plan, l'intensité du champ mesurée au niveau de l'interface, est beaucoup plus importante que celle en d'autres points du sol. Ceci est dû au fait que l'interface renforce localement le champ électrique, ce qui provoque l'élévation de celui-ci, et l'apparition parfois de décharges sur l'interface dans certains cas ($d/h=0$ et $D/h=0$), malgré le choix d'un niveau de tension d'essais relativement bas par rapport à la tension $U_{0\%}$ correspondant à 0% de décharge disruptive dans le cas du sol homogène.
- Au voisinage de l'interface, nous observons une sorte de discontinuité dans l'évolution de l'intensité du champ électrique. Celle-ci, en diminuant, devient inférieure à la valeur obtenue dans le cas du sol homogène bon conducteur de même longueur. Ceci met en valeur le rôle important de l'interface sur l'attraction des lignes de champ.

II.2. CONCLUSION

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

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

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

Dans le but, et avant d'entamer l'étude de l'influence de la présence de paratonnerre sur la distribution du champ dans les systèmes avec terre hétérogène, nous nous sommes consacrés à étudier la distribution du champ au sol dans le cas d'un système tige-plan homogène bon conducteur en présence d'une tige verticale mise à la terre simulant le paratonnerre.

CHAPITRE : III



***TECHNIQUES
EXPERIMENTALES***

INTRODUCTION

Dans le but d'étudier l'influence du paratonnerre sur la distribution du champ électrique sur le sol, nous avons effectué de nombreux essais et mesures sur un modèle expérimental réduit au Laboratoire de Haute Tension de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger (ENP).

Nous présentons dans ce chapitre, le circuit d'essai ainsi que la méthode utilisée pour déterminer la tension $U_{0\%}$ du système tige-plan. Nous présentons aussi la configuration du système expérimental réduit. Enfin, 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.1. CIRCUIT D'ESSAI

III.1.1 GENERATEUR DE CHOC

Les différents essais ont été effectués au Laboratoire de Haute Tension de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger. Les ondes négatives de choc de foudre normalisées 1.2/50 μ s, sont obtenues à l'aide du générateur de choc de type Marx, ayant les caractéristiques suivantes [29] :

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

Le générateur de choc est alimenté par une prise de courant simple 220V, 50Hz située à proximité du pupitre de commande du générateur.

Cette prise alimente le générateur de choc par l'intermédiaire d'un transformateur d'isolement (1.2 kVA, 220/220V, 50Hz) qui sert à isoler tous les circuits de commande de l'installation.

La figure (III.1) donne un schéma simplifié d'un générateur de choc.

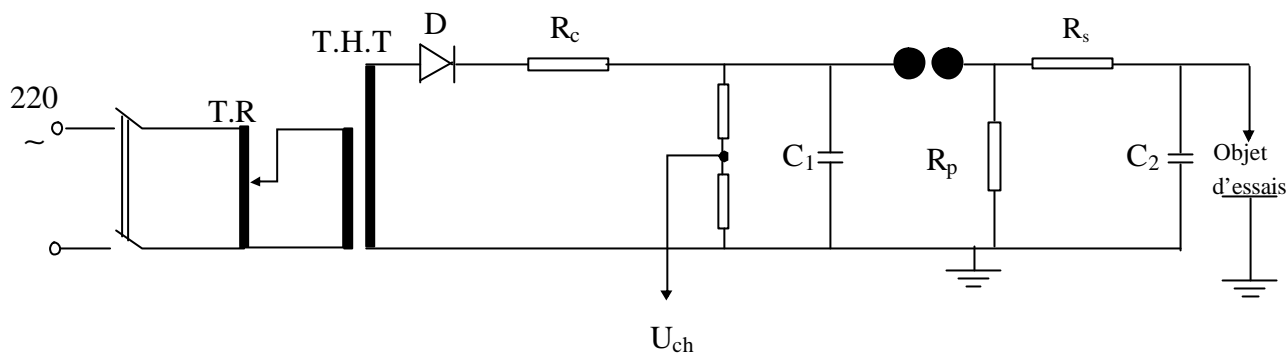


Figure III.1. Schéma simplifié d'un du générateur de choc

Avec :

T.R : transformateur de réglage

T.H.T : Transformateur de haute tension

D : Redresseur

Rc : Résistance de charge.

Rs : Résistance série équivalente $((8 \times 10) + 150) \Omega$

Rp : Résistance parallèle équivalente $8 \times 430 \Omega$

C1 : Condensateur de choc 22.5nF

C2 : Condensateur de charge 2nF

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 $t = R_c \cdot C_1$ est de l'ordre de 10 à 20 s. Lorsque la tension disruptive U_0 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.1.2 TENSION DE CHOC DELIVREE

La tension délivrée par le générateur de choc, simulant les surtensions d'origine atmosphérique, est une impulsion unipolaire bi-exponentielle dont la forme est normalisée conformément aux recommandations de la CEI 60[30]. L'onde délivrée est définie par les paramètres suivants:

- ❖ La constante de temps de front τ_f
- ❖ La constante de temps de mi-amplitude τ_q
- ❖ L'amplitude maximum U_m

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

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

La CEI donne l'onde de forme normalisée dite « choc 1,2/50 μs » comme l'onde la plus adoptée pour les essais en choc de foudre. La durée conventionnelle de front T_f' de cette onde est de 1.2 μs et la durée conventionnelle de mi-amplitude T_q' est de 50 μs .

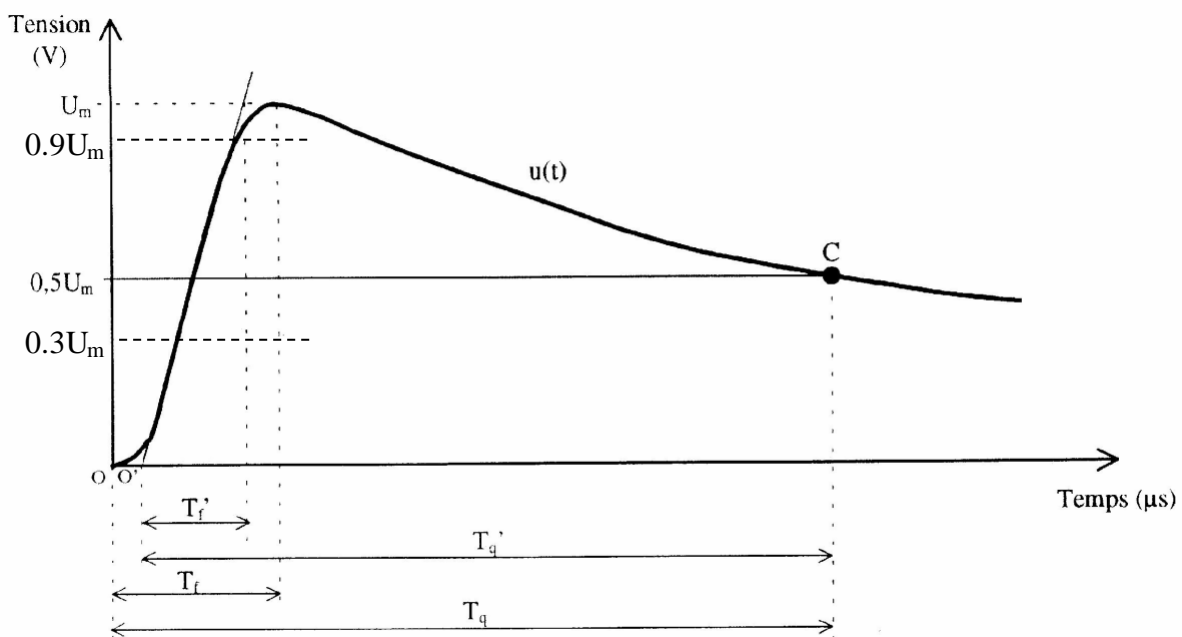


Figure III.2 Forme de l'onde de choc de foudre

O : Origine de la tension de choc

O' : origine conventionnelle de la tension de choc

T_f : durée de front

T_f' : durée conventionnelle de front

T_q : durée de mi-amplitude

T_q' : durée conventionnelle de mi-amplitude

III.1.3 DETERMINATION DE LA TENSION $U_{0\%}$

La tension $U_{0\%}$ est la tension la plus haute pour laquelle on est certain qu'il n'y a pas une disruption de l'intervalle d'air entre les deux électrodes du système à étudier.

Puisque l'amorçage d'un intervalle d'air n'est pas un phénomène instantané, en raison du temps de retard à l'amorçage, on introduit alors la probabilité d'amorçage P_A égale au rapport du nombre d'amorçage observé au nombre total d'essais effectués.

$$P_A = \int_{-\infty}^{U_m} \frac{1}{\sqrt{2ps}} \exp\left[-\frac{(U-U_{50\%})^2}{s^2}\right] dU \quad (\text{III.2})$$

$U_{50\%}$: est la valeur de U_m pour laquelle P_A est égale à 0,5

s : caractérise la pente de la droite de régression obtenue sur un papier gauss-arithmétique, c'est l'écart type de la loi normale (Gaussienne) associée, elle est égale à la différence des amplitudes des tensions qui provoquent respectivement 50% et 16% d'amorçage.

Pour déterminer la tension $U_{0\%}$ nous utilisons la méthode des paliers multiples constants : pour chaque niveau de tension d'essai correspondra une probabilité de décharge variant de 0% à 100%. Le temps entre deux chocs successifs est de l'ordre de 30 secondes. Nous reportons les valeurs de tension avec leur probabilité respective sur une échelle gauss-arithmétique. Plus le nombre de paliers appliqué est grand plus l'interpolation des points sera meilleure et donc une bonne précision lors de l'extrapolation pour déterminer $U_{0\%}$. En effet, cette dernière correspond à la fréquence de décharge de 0.1% sur une échelle gauss-arithmétique.

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 [21] [22] [31] [32] [33].

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

III.1.4 CORRECTIONS ATMOSPHERIQUES

La tension de décharge disruptive des intervalles d'air dépend des conditions atmosphériques du voisinage. La tension de claquage d'un parcours donné dans l'air est accrue par l'accroissement de la densité de l'air ou de l'humidité [30].

III.1.4.1. Influence de la densité relative de l'air

On sait que la température et la pression, en modifiant la densité du gaz, influent sur la rigidité diélectrique de l'air. Dans la CEI 60 [30], on trouve la notion de densité relative qui est définie comme étant le rapport de la densité de l'air dans les conditions de pressions P et de température T, à la densité de l'air dans les conditions atmosphériques de référence dites normales, c'est à dire:

- ❖ Température ambiante $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$
- ❖ Pression atmosphérique $P_0 = 1013 \text{ mbar (= 760 mmHg)}$

$$\partial = 0.289 \frac{P}{273 + T} \quad (\text{III.3})$$

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

Cette équation (III.3) est utilisée pour convertir la tension de décharge U mesurée dans les conditions atmosphériques d'essais (température T et pression P) à la valeur U_0 qui aurait été obtenue dans les conditions normales (T_0 et P_0) citées ci-dessus.

$$U_0 = \frac{U}{(\partial)^n} \quad n \leq 1 \quad (\text{III.4})$$

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

III.1.4.2. Influence de l'Humidité

La tension d'amorçage est particulièrement moins sensible à la variation de l'humidité dans le cas des ondes rapides ou très rapides. C'est le cas pour les chocs de foudre négatifs ($K_h=1$ selon CEI-60). Ainsi, nous ne tiendrons pas compte de ce facteur. Durant nos essais l'humidité relative variait entre 75% et 80%.

III.2 MODELE EXPERIMENTAL

III.2.1 MODELE EXPERIMENTAL SANS PARATONNERRE

Le système utilisé est constitué d'une tige en cuivre de 4.8 mm de diamètre mise sous tension de type choc de foudre négatif $-1.2/50 \text{ } \mu\text{s}$, et d'un plan en Aluminium de 4 mm d'épaisseur, ayant une surface de $1 \times 1 \text{ m}^2$. Différents niveaux de tension de choc de foudre négative ont été appliqués correspondant à différentes hauteurs de la tige mise sous tension de choc de foudre. 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 340A, 100MHz. La figure III.3 représente le modèle expérimental du système tige-plan sans paratonnerre.

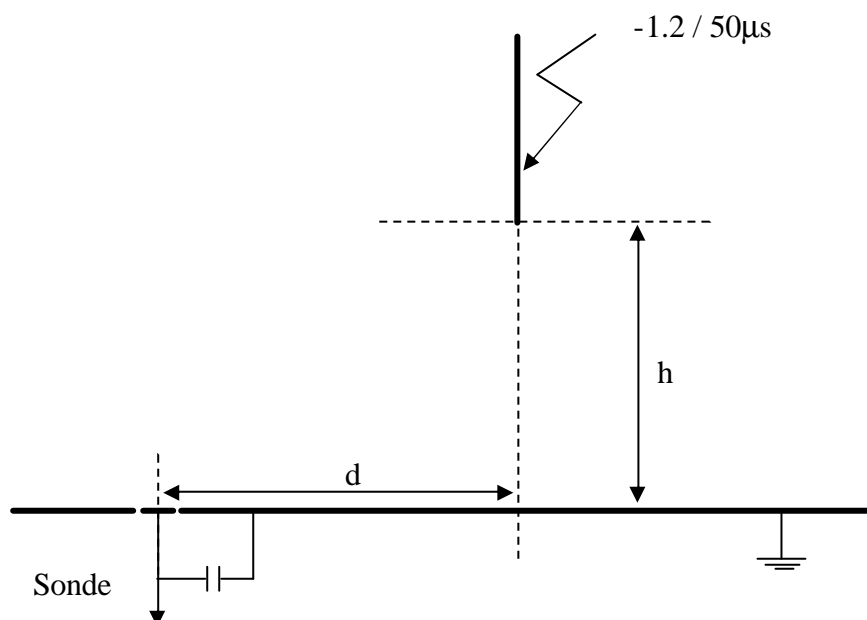


Figure : III.3 Modèle expérimental du système tige-plan sans paratonnerre.

III.2.2 MODELE EXPERIMENTAL AVEC PARATONNERRE

Le modèle expérimental utilisé pour étudier l'influence du paratonnerre sur la distribution du champ électrique est représenté par la figure (III.4). Le paratonnerre est simulé par une tige conductrice de 3.5 mm de diamètre. La décharge préliminaire d'un coup de foudre descendant négatif (traceur par bonds) est simulée par une tige conductrice en acier, de 4.8 mm de diamètre, mise sous tension de type choc de foudre négatif $-1.2/50 \text{ } \mu\text{s}$. La

terre est constituée d'une plaque métallique en aluminium de 4 mm d'épaisseur ayant une surface de $1 \times 1 \text{ m}^2$.

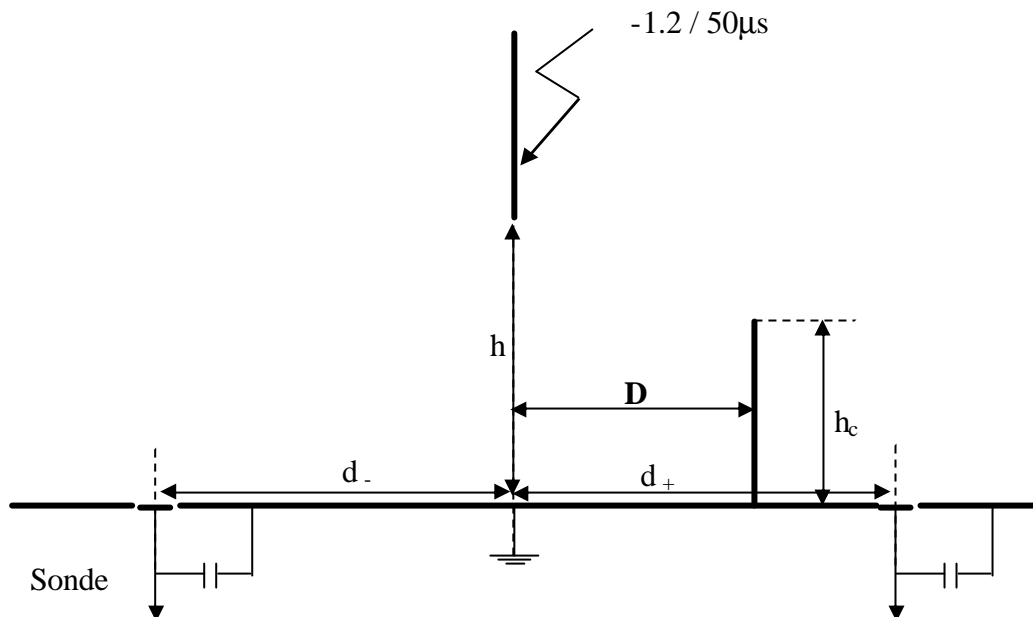


Figure III.4 - Modèle expérimental du système tige-plan avec paratonnerre.

Avec :

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

h_c : hauteur du paratonnerre.

d_+, d_- : 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 d 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 d et D sont choisies de telle sorte que les essais soient effectués pour des rapports d/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 de paratonnerre par rapport à la tige.

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

- On choisit la valeur de h_c , en respectant les rapports suivants :
 $h/h_c = 1, 1.5, 2, 4$
- Pour chaque valeur de h_c nous avons opté pour les rapports suivants :
 - Les rapports entre d et h sont :
 - $d_+ = 0h, 0.5h, 1h, 2h, 3h, 4h$ lorsque la sonde est située dans le demi-plan contenant le paratonnerre
 - $d_- = -1h, -2h, -3h, -4h$ lorsque la sonde est située dans l'autre demi-plan
- Les rapports entre D et h_c sont : $D = 0h_c, 0.5h_c, 1h_c, 2h_c, 4h_c$

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

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

h (cm)	8	8	8	8
h_c (cm)	8	6	4	2
d (cm)	0,4,8,16,24,32 -8,-12,-24,-32	0,4,8,16,24,32 -8,-12,-24,-32	0,4,8,16,24,32 -8,-12,-24,-32	0,4,8,16,24,32 -8,-12,-24,-32
D (cm)	4, 8, 16, 32	3, 6, 12, 24	0, 2, 4, 8, 16	0, 2, 4, 8

a) $h=8\text{cm}$

h (cm)	12	12	12	12
h_c (cm)	12	8	6	3
d (cm)	0,6,12, 24,36,48 -12,-24,-36,-48	0,6,12, 24,36,48 -12,-24,-36,-48	0,6,12, 24,36,48 -12,-24,-36,-48	0,6,12, 24,36,48 -12,-24,-36,-48
D (cm)	6,12,24,48	4, 8, 16, 32	0, 3, 6,12, 24	0, 1.5, 3, 6, 12

b) $h=12\text{cm}$

h (cm)	16	16	16	16
h_c (cm)	16	12	8	4
d (cm)	0,8,16, 32,48 -8,-16,-32,-48	0,8,16, 32,48 -8,-16,-32,-48	0,8,16, 32,48 -8,-16,-32,-48	0,8,16, 32,48 -8,-16,-32,-48
D (cm)	8,16,32,48	6, 12, 24, 36	0, 4, 8,16, 24	0, 2, 4, 8, 12

c) $h=16\text{cm}$

Tableau III.1 Configurations considérées pour les mesures

III.3 MESURE DU CHAMP PAR LA METHODE DE LA SONDE A CAPACITE REPARTIE (S.C.R)

III.3.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

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 que le plan, sur un système d'électrodes tige-plan.

La sonde à capacité répartie à une grande précision, avec une large bande passante, utilisée pour les méthodes de mesures très rapides 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. Ces mesures sont effectuées à l'aide d'un dispositif de mesures constitué par une résistance et un condensateur montés en filtre passe-bas, comme le montre la figure III.5.

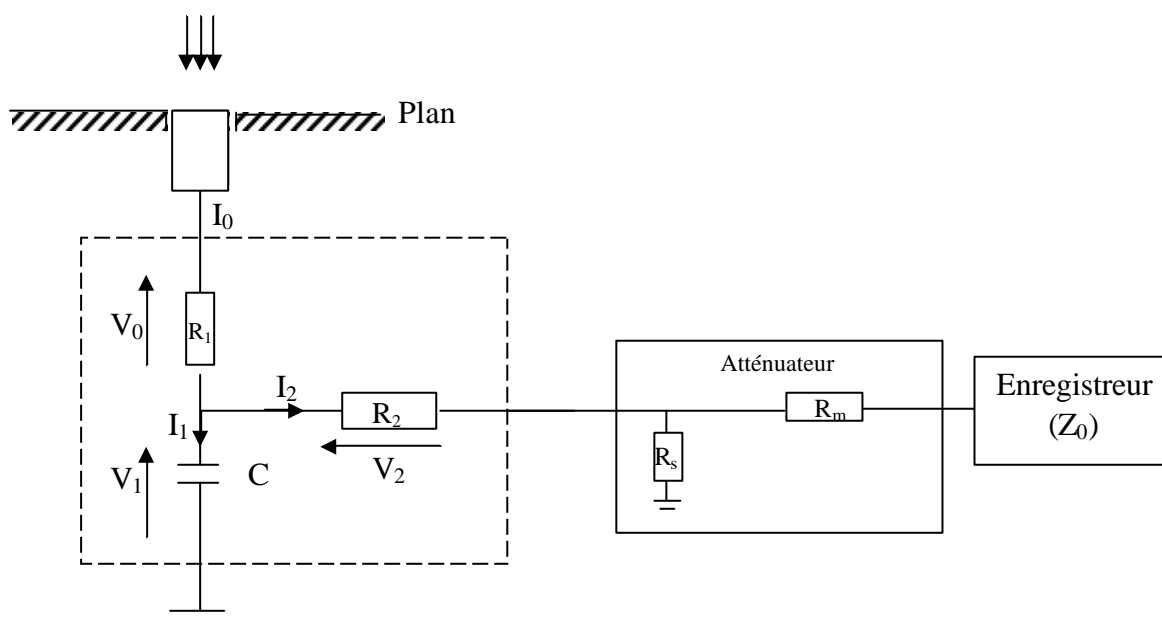


Figure III.5. Méthode de la sonde à capacité répartie (SCR)

L'antenne est constituée de deux résistances R_1 , R_2 et 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).

III.3.2 CIRCUIT DE MESURE

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

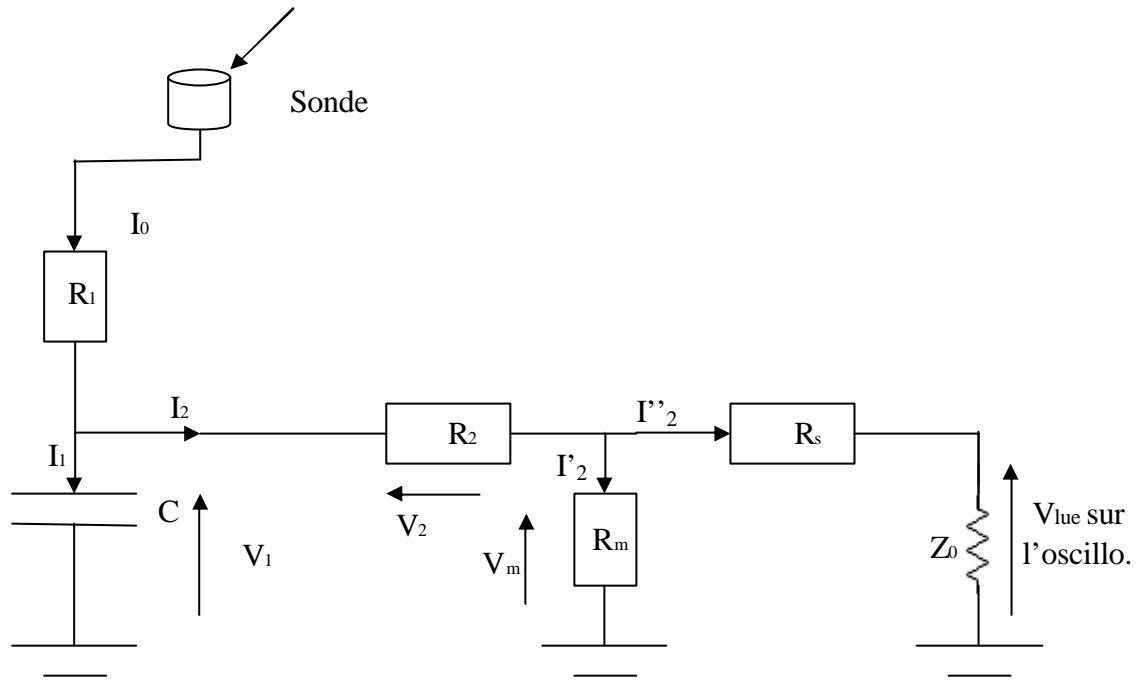


Figure III.6 Schéma du circuit de mesure

Avec :

R_m : résistance de l'atténuateur ou diviseur.

Z_0 : impédance d'entrée de l'oscilloscope.

R_s : résistance de protection.

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

R_2 : résistance d'adaptation du câble de mesure.

III.3.3 EXPRESSION DU CHAMP MESURE

$$Q = \int \mathbf{s} \, ds = \mathbf{e}_0 E S \quad (S \text{ surface de la sonde}) \tag{III.5}$$

$$I_0 = I_1 + I_2 = I_1 + I_2' + I_2'' \tag{III.6}$$

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

$$\Rightarrow \frac{dV_1}{dt} + \frac{V_m}{C} \left(\frac{1}{R_m} + \frac{1}{Z_e} \right) = \frac{\epsilon_0 S}{C} \frac{dE}{dt} \quad (\text{III.8})$$

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

$$\Rightarrow \frac{dV_1}{dt} = \frac{\epsilon_0 S}{C} \frac{dE}{dt}$$

$$\Rightarrow V_1(t) = \frac{\epsilon_0 S}{C} E(t) \quad (\text{III.9})$$

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

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

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

$$V_1(t) = R_m I_2$$

$$V_1(t) = V_m(t) \quad (\text{III.10})$$

$$\text{Donc : } V_1(t) = V_m(t) = \frac{\epsilon_0 S}{C} E(t) \quad (\text{III.11})$$

$$\boxed{\Rightarrow E(t) = \frac{C}{\epsilon_0 S} V_m(t)} \quad (\text{III.12})$$

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 :

$$R_1 = 47\Omega, \quad R_2 = 50\Omega, \quad R_m = 6.6k\Omega, \quad R_s = 4.5M\Omega, \quad C = 25 \cdot 10^{-12}F, \quad \phi_{\text{sonde}} = 6.12mm$$

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

Alors l'expression de E sera :

$$E(t) = \frac{25 \cdot 10^{-12}}{8,854 \cdot 10^{-12} \cdot \mathbf{p} \left(\frac{6,12}{2} \right)^2 10^{-6}} V_1(t) \quad (\text{III.13})$$

$$E(t) = 95,947 \cdot V_1(t) \quad [\text{kV/m}] \quad \text{ou} \quad 0,95947 \cdot V_1(t) \quad [\text{kV/cm}]$$

$$E(t) = 0,95947 \cdot V_1 \quad [\text{kV/cm}] \quad (\text{III.14})$$

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

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

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

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

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

Ces valeurs sont corrigées par les coefficients de correction atmosphérique.

III.3.4 DETERMINATION 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 le procédure suivante :

- Maintenir une distance plan-plan (h) aussi petite que possible et faire varier la tension sans présence de décharge 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 $h = 8$ cm nous obtenons :

U (kV)	E (théorique) = U/h (kV/cm)
40	5
48	6
60	7.5

U	V(expérimental)	E (expérimental)	K_S
40	3.2	16.88	0.296
48	3.7	19.52	0.307
60	5.3	27.97	0.269

Les valeurs de K_S sont obtenues en utilisant la relation :

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

D'où en moyenne :

$$K_S = \frac{0.296 + 0.307 + 0.269}{3} \Rightarrow K_S = 0.29$$

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

$$E(t) = 0.29 \times (0,95947 \times 5,5 \times V_{lue}(t)) \text{ [kV/cm]} \quad (III.18)$$

Alors

$E(t) = 1.53 \times V_{lue}(t) \text{ [kV/cm]}$

III.3.5 FORME DES SIGNAUX OBTENUS AVEC L'OSCILLOSCOPE

Pour les essais de mesure de champ, nous avons utilisé un oscilloscope numérique de la marque TEKTRONIX TDS 340A, 100MHz, et 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, pour chaque niveau de tension utilisé de $0.2U_0\%$, $0.4U_0\%$ (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.7).

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

L'axe des ordonnées représente la tension du signal reçu, les échelles sont données en bas du graphe.

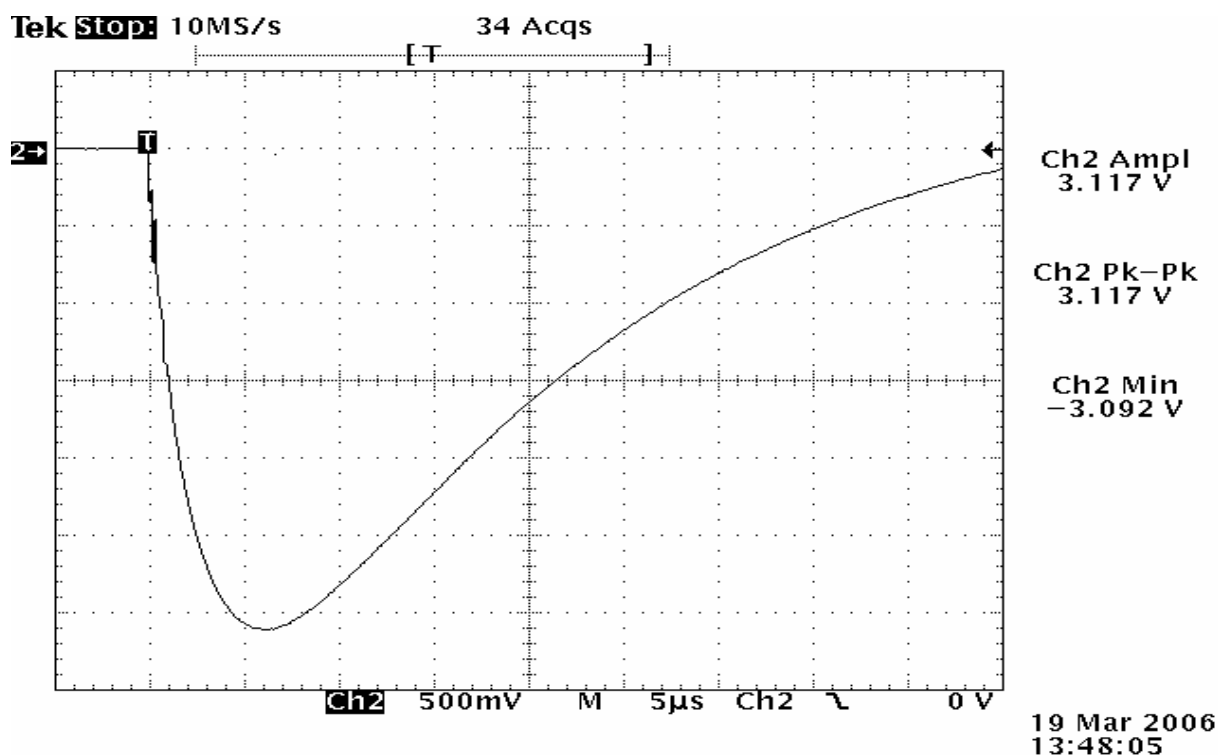


Figure III.7. Forme d'onde enregistrée par l'oscilloscope numérique

CHAPITRE : IV

***RESULTATS EXPERIMENTAUX
ET INTERPRETATIONS***

INTRODUCTION

Ce chapitre concerne l'étude de l'influence du paratonnerre 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, qui servira de référence pour la comparaison des résultats. Nous abordons ensuite l'étude de l'influence de la position et de la hauteur du paratonnerre sur la distribution du champ électrique à la surface du plan.

IV.1 SYSTEME TIGE-PLAN SANS PARATONNERRE

IV.1.1 DETERMINATION 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 $0.4U_{0\%}$. Ces niveaux de tension nous permettront d'éviter 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 la tension de tenue $U_{0\%}$ pour chaque hauteur (h) choisie, sont présentées à la figure (IV.1.a).

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

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

D'après les mesures, nous constatons que la tension $U_{0\%}$ croît linéairement avec l'augmentation de la longueur de l'intervalle d'air h (Fig.IV.1.b).

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.

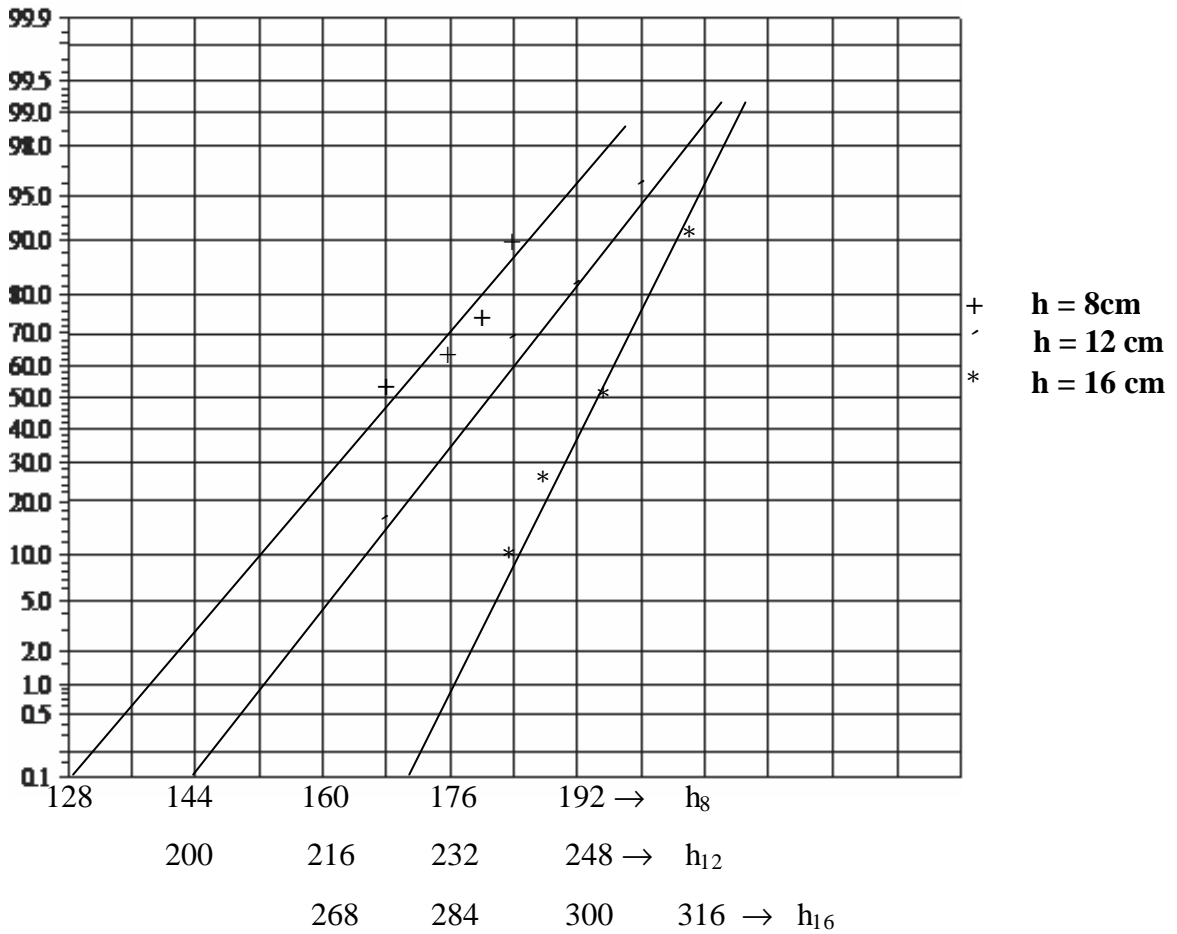


Figure IV.1.a. Détermination des tensions $U_{0\%}$ pour les différentes hauteurs de la tige haute tension

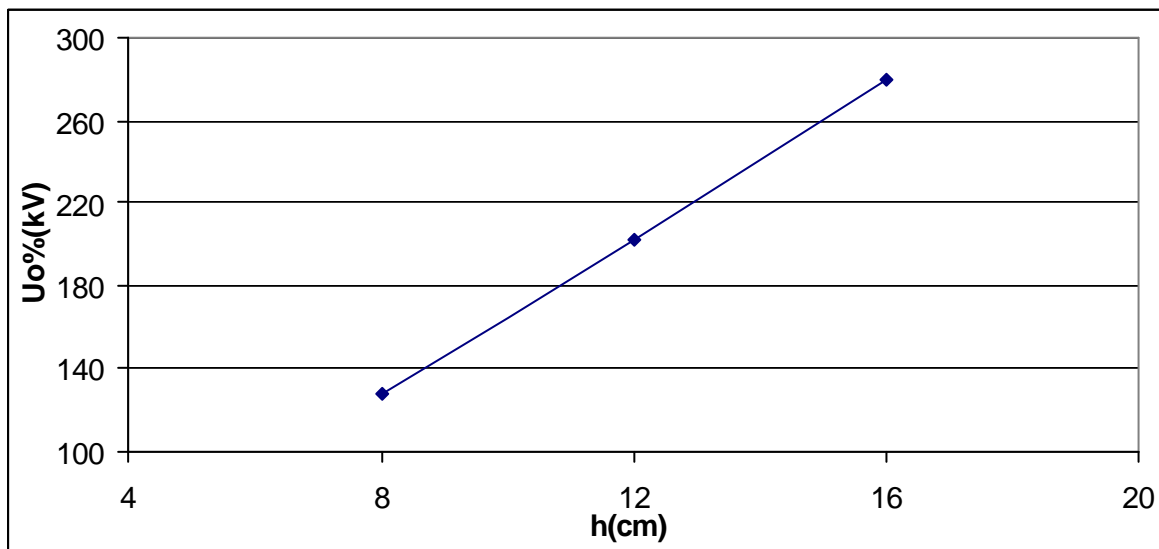


Figure IV.1.b. Evolution de la tension $U_{0\%}$ en fonction de l'intervalle d'air h .

IV.1.2 DISTRIBUTION DU CHAMP EN FONCTION DE LA DISTANCE TIGE-AXE DE LA SONDÉ

Afin d'obtenir une référence pour la comparaison des résultats du système tige-plan avec paratonnerre avec ceux du système tige-plan sans paratonnerre, nous déterminons d'abord la distribution du champ dans le cas du système tige-plan sans paratonnerre, en fonction de la position de l'axe de la sonde et de la hauteur h de la tige sous haute tension dans le cas des deux niveaux de tension choisis ($0.2U_{0\%}$ et $0.4U_{0\%}$).

D'après la figure IV.2, pour les deux niveaux de tension $0.2U_{0\%}$ et $0.4U_{0\%}$, nous constatons que l'intensité du champ électrique diminue au fur et à mesure qu'on éloigne la sonde de l'axe de la tige (d/h augmente) puis elle tend vers une valeur constante pour les hauteurs $h = 8\text{cm}$ et $h = 12\text{cm}$. La diminution est plus importante pour les grandes hauteurs de la tige ($h=16\text{cm}$).

Pour les différentes positions de la sonde (d/h) et pour les deux niveaux de tension appliqués, nous remarquons que la longueur de l'intervalle d'air (h) a une grande influence sur la valeur du champ au sol. 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 de champ électrique croit 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 [19] [34].

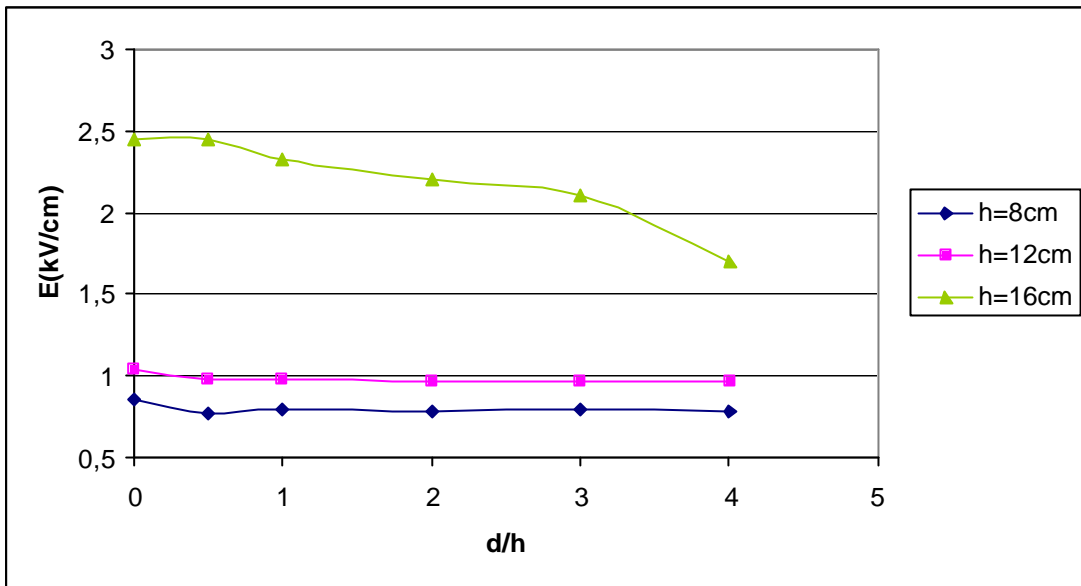


Figure IV.2.a. Champ électrique mesuré au sol en fonction de la position d/h de la sonde.
Niveau de tension $U = 0.2U_0\%$.

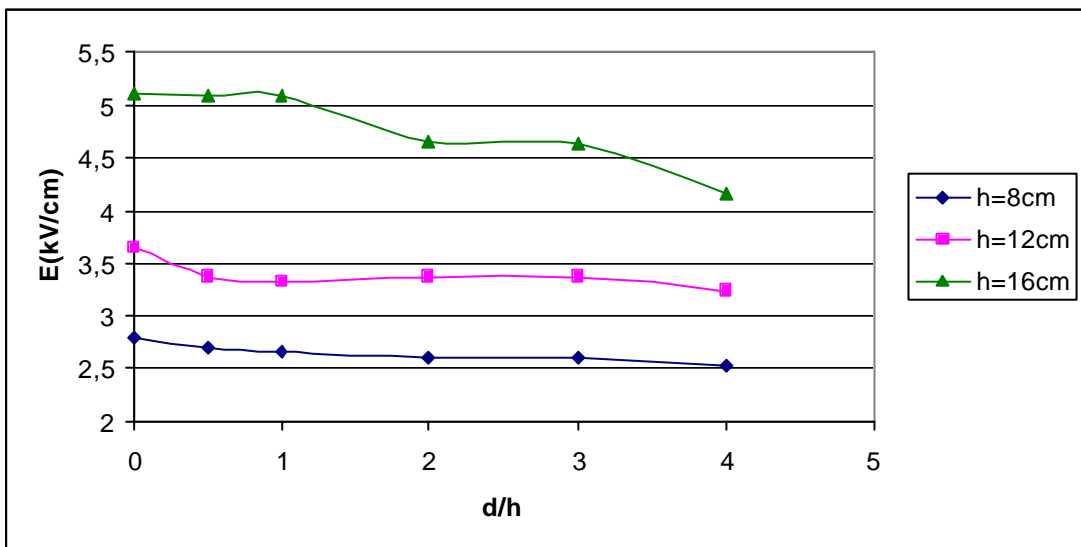


Figure IV.2.b. Champ électrique mesuré au sol en fonction de la position d/h de la sonde.
Niveau de tension $U = 0.4U_0\%$.

IV.2 SYSTEME TIGE-PLAN AVEC PARATONNERRE

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

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

IV.2.1 INFLUENCE DE LA POSITION DU PARATONNERRE

Dans un premier lieu, nous nous intéressons à l'influence de la position du paratonnerre pour les trois hauteurs de la tige ($h=8, 12, 16\text{cm}$), ainsi que les quatre hauteurs relatives du paratonnerre ($h/h_c = 1, 1.5, 2, 4$) et ceci pour les deux niveaux de tension $U=0.2U_{0\%}, 0.4U_{0\%}$.

La position du paratonnerre est définie par la distance D entre l'axe de la pointe et le paratonnerre. Ces différentes valeurs relatives de D sont les suivantes : $D/h_c=0, 0.5, 1, 2, 4$. Sur les figures IV.3 à IV.8 sont représentées les allures du champ électrique sur le plan pour différentes positions relatives de la sonde d/h variant de -4 à $+4$.

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

Nous constatons ainsi, que l'intervalle d'air tige-paratonnerre constitue un chemin préférable pour les lignes de champ électrique, surtout lorsque le paratonnerre est proche de la tige. En effet, le système pointe-plan avec paratonnerre se comporte comme un système pointe-pointe mais moins rigide que le système tige-plan. Ceci justifie la présence de décharges disruptives vers le paratonnerre pour les faibles valeurs de D/h_c (paratonnerre proche de la tige), malgré l'application de niveaux de tension relativement faibles, dans le cas de la configuration avec $h=16\text{cm}$, $D/h_c=1$ et $U=0.4U_{0\%}$.

Pour une position donnée du paratonnerre, le champ électrique au sol diminue au voisinage du paratonnerre. Cette tendance est expliquée par l'attraction des lignes de champ électrique par le paratonnerre, ce qui affaiblit le champ électrique au voisinage du paratonnerre et qui justifie aussi que le champ électrique dans le demi-plan qui contient le paratonnerre 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 obtenue par K.Necereddine dans le cas d'un paratonnerre horizontal par calcul numérique [19].

Les figures IV.3 à IV.8 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 de sol. Ceci justifie que les niveaux de tension appliqués n'engendreraient pas de décharges disruptives.

Pour les positions de la tige $d/h=0$, au-dessous de la tige on voit que le champ augmente lorsque le paratonnerre s'éloigne de l'axe de la tige, même avec la diminution de la hauteur du paratonnerre. (Figure IV.9 à IV.14).

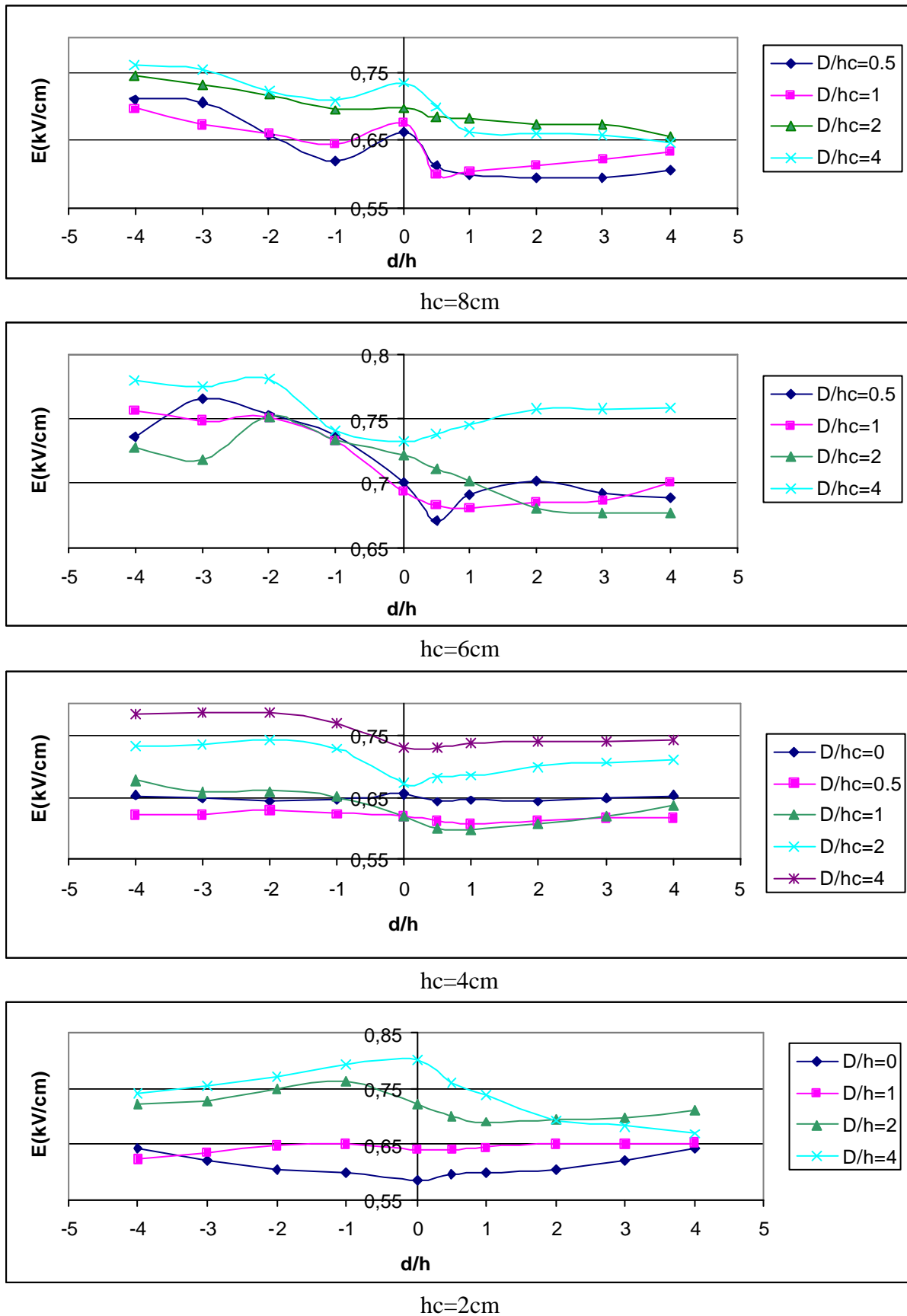
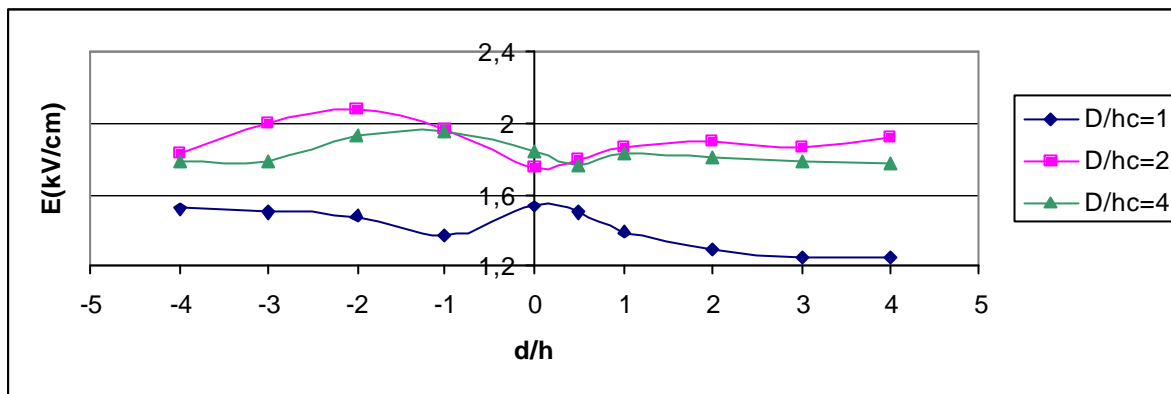
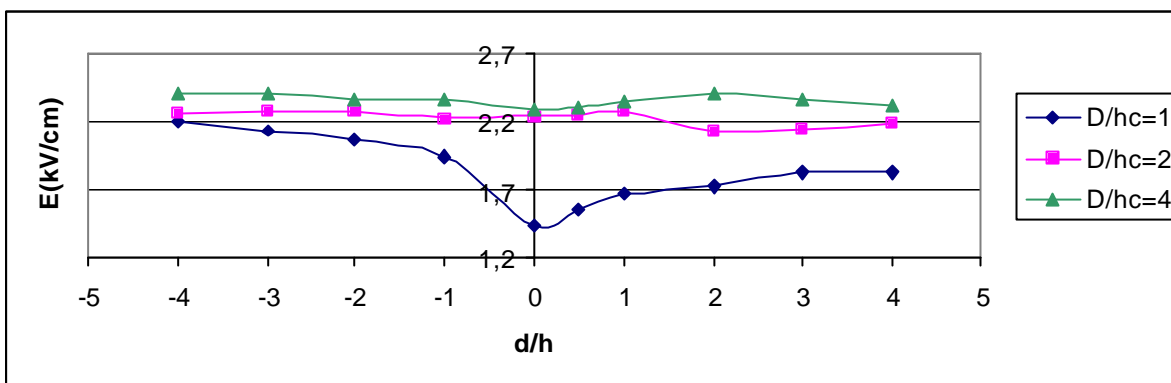


Figure IV.3. Champ électrique au sol en fonction de la position (d/h) de la sonde.

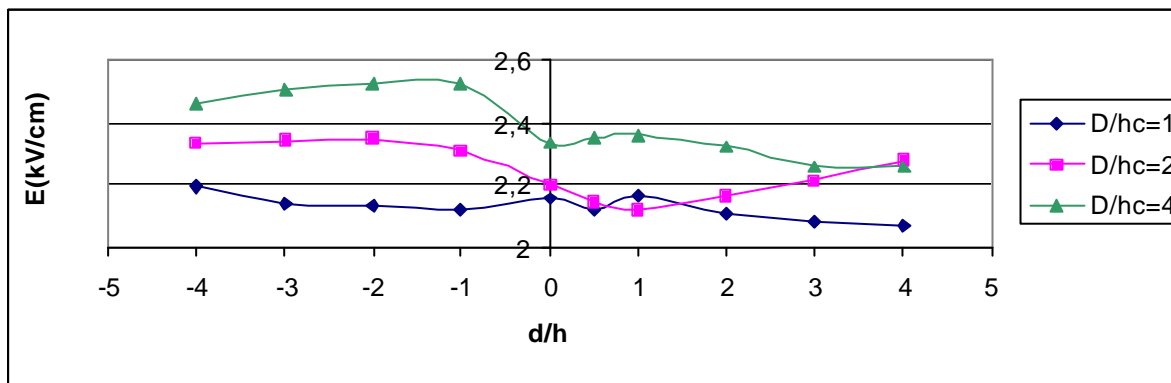
$h=8\text{cm}$, $U=0.2 U_{0\%}$.



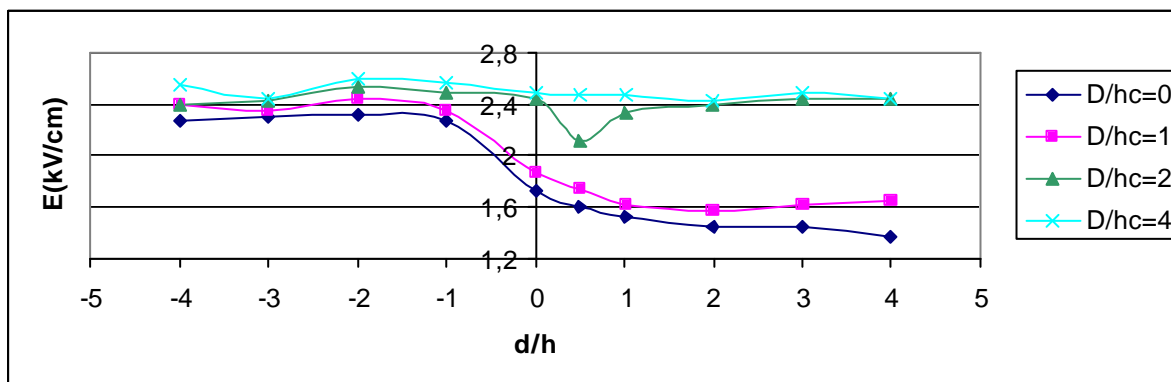
$hc=8\text{cm}$



$hc=6\text{cm}$



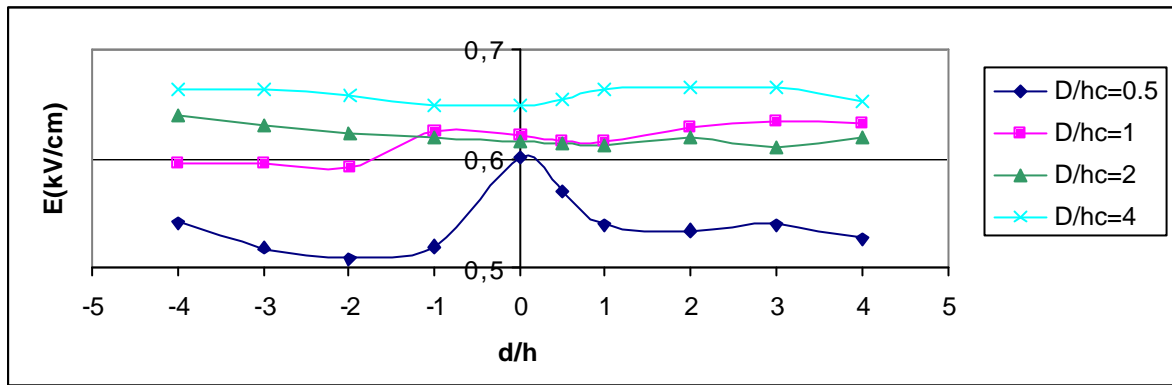
$hc=4\text{cm}$



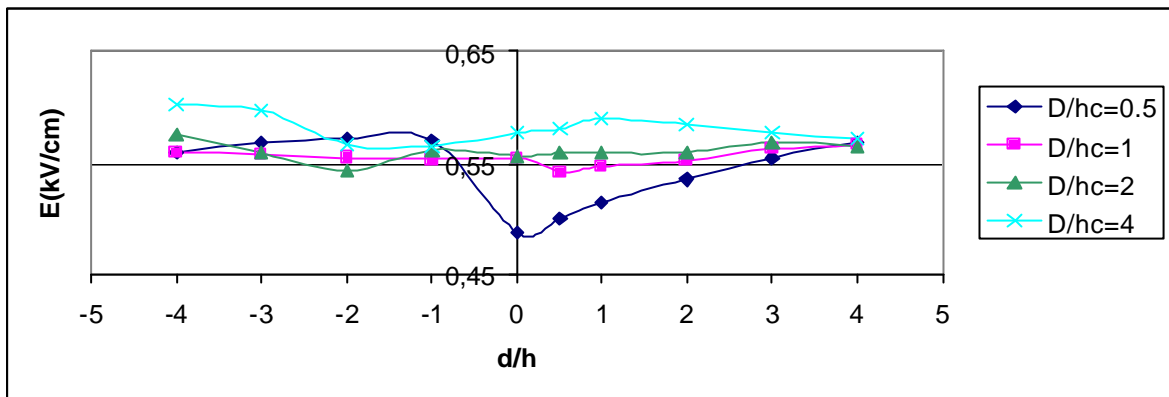
$hc=2\text{cm}$

Figure IV.4. Champ électrique au sol en fonction de la position (d/h) de la sonde.

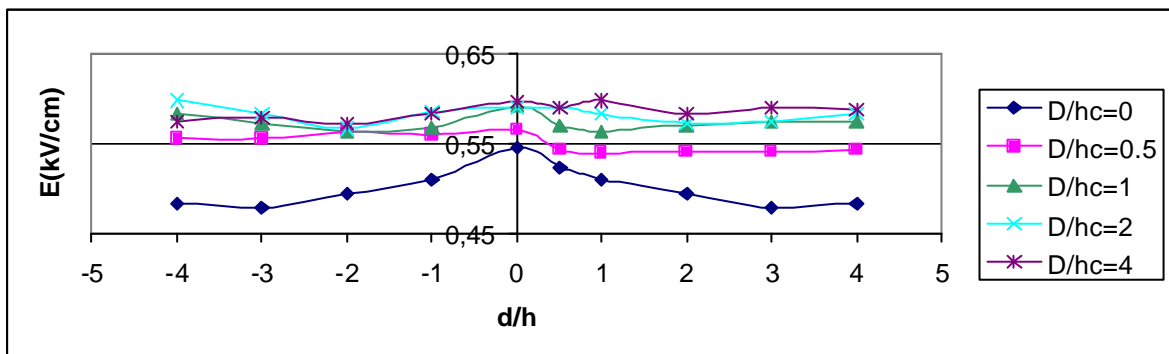
$h=8\text{cm}$, $U=0.4 U_{0\%}$.



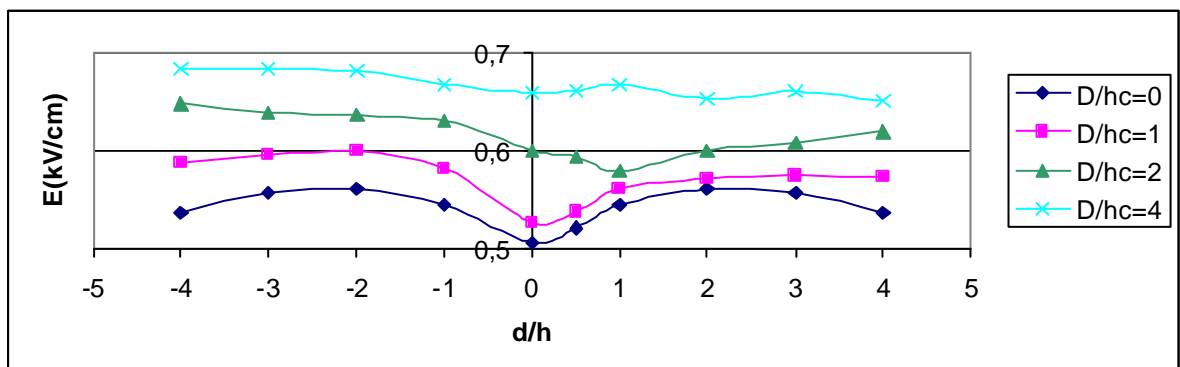
hc=12cm



hc=8cm



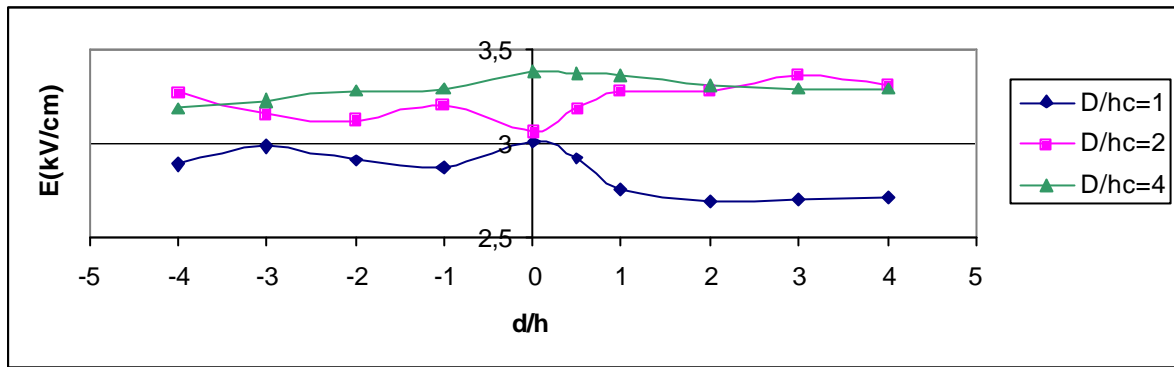
hc=6cm



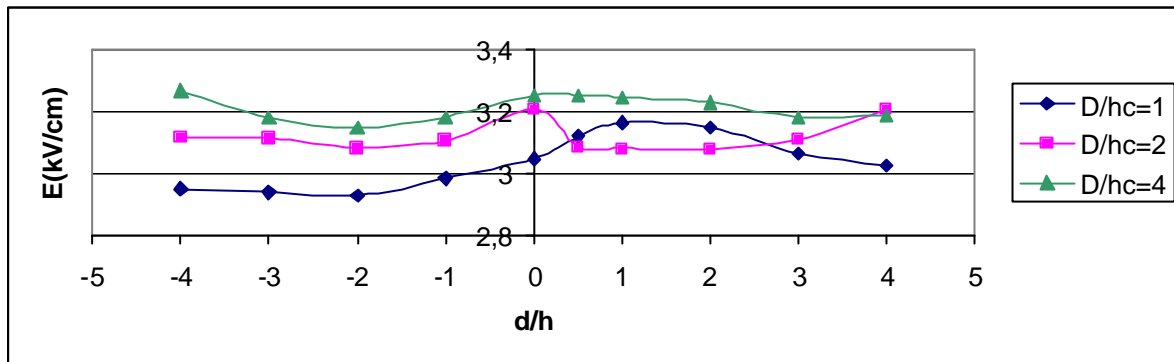
hc=3cm

Figure IV.5. Champ électrique au sol en fonction de la position (d/h) de la sonde.

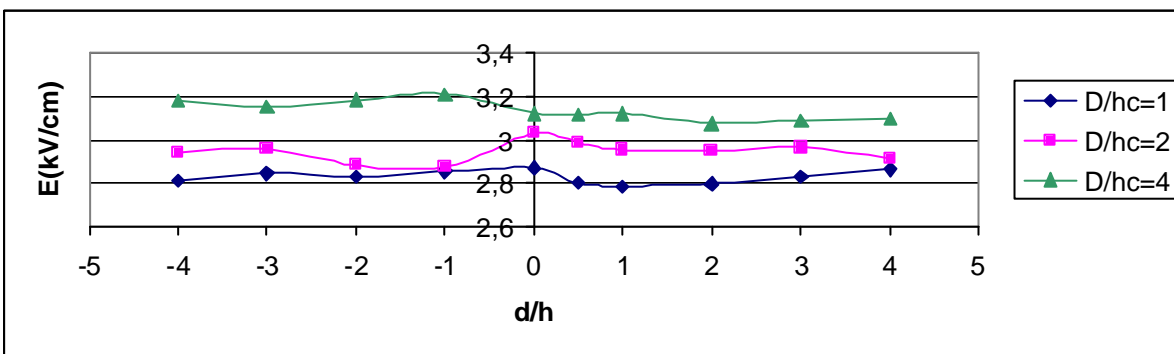
$h=12\text{cm}$, $U=0.2U_0\%$.



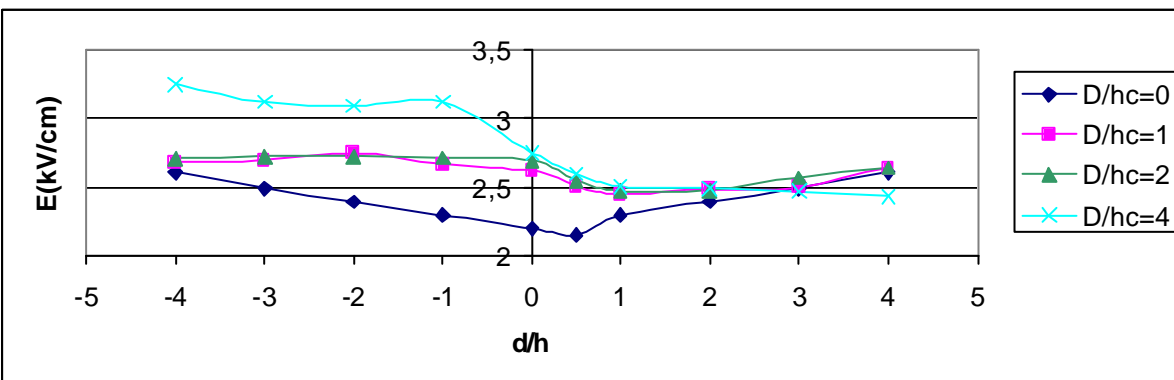
$hc=12\text{cm}$



$hc=8\text{cm}$



$hc=6\text{cm}$



$hc=3\text{cm}$

Figure IV.6. Champ électrique au sol en fonction de la position (d/h) de la sonde.

$h=12\text{cm}$, $U=0.4 U_{0\%}$.

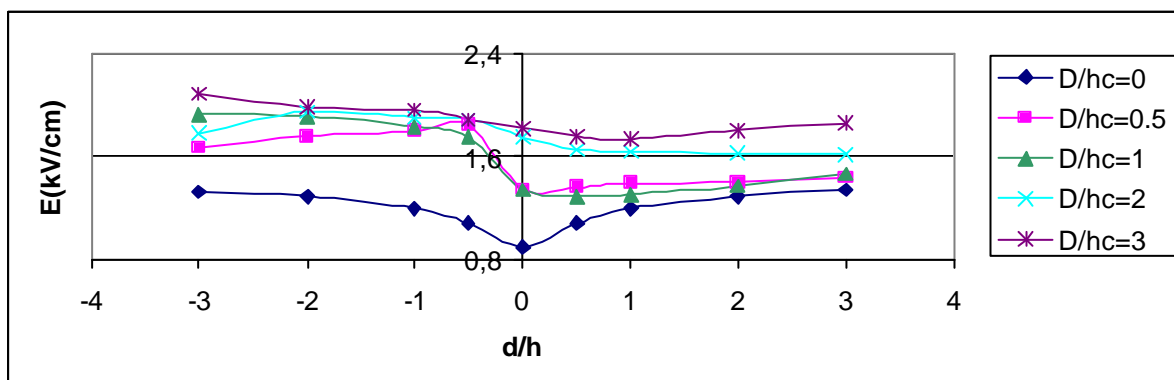
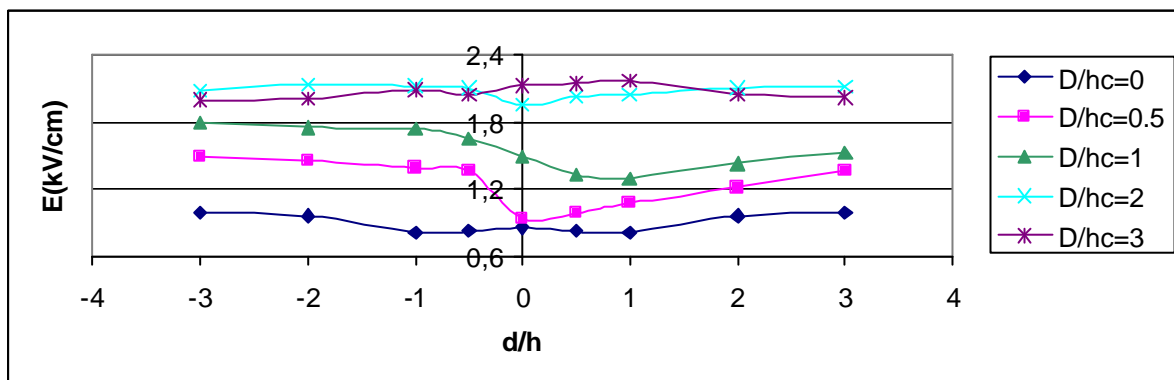
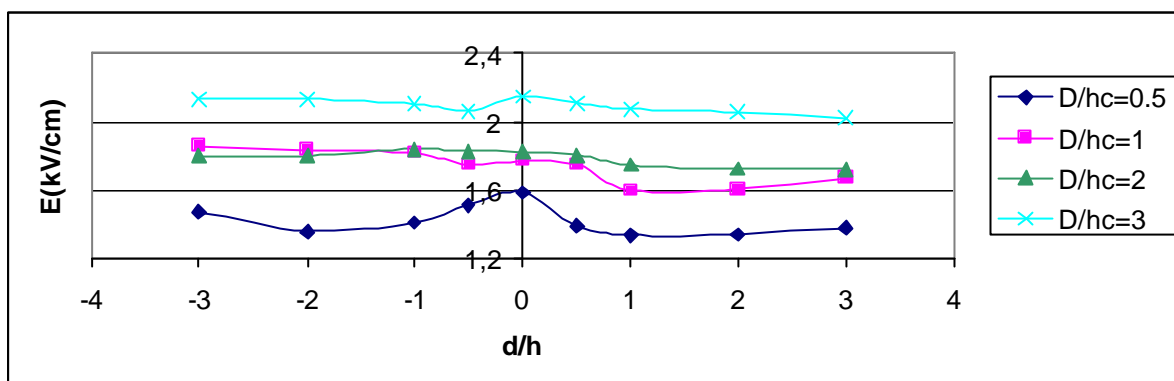
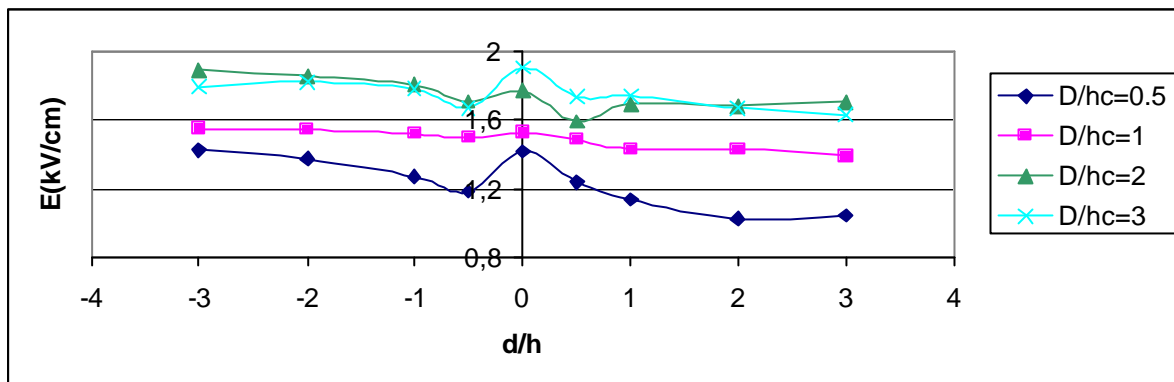


Figure IV.7. Champ électrique au sol en fonction de la position (d/h) de la sonde.

$h=16\text{cm}$, $U=0.2 U_{0\%}$.

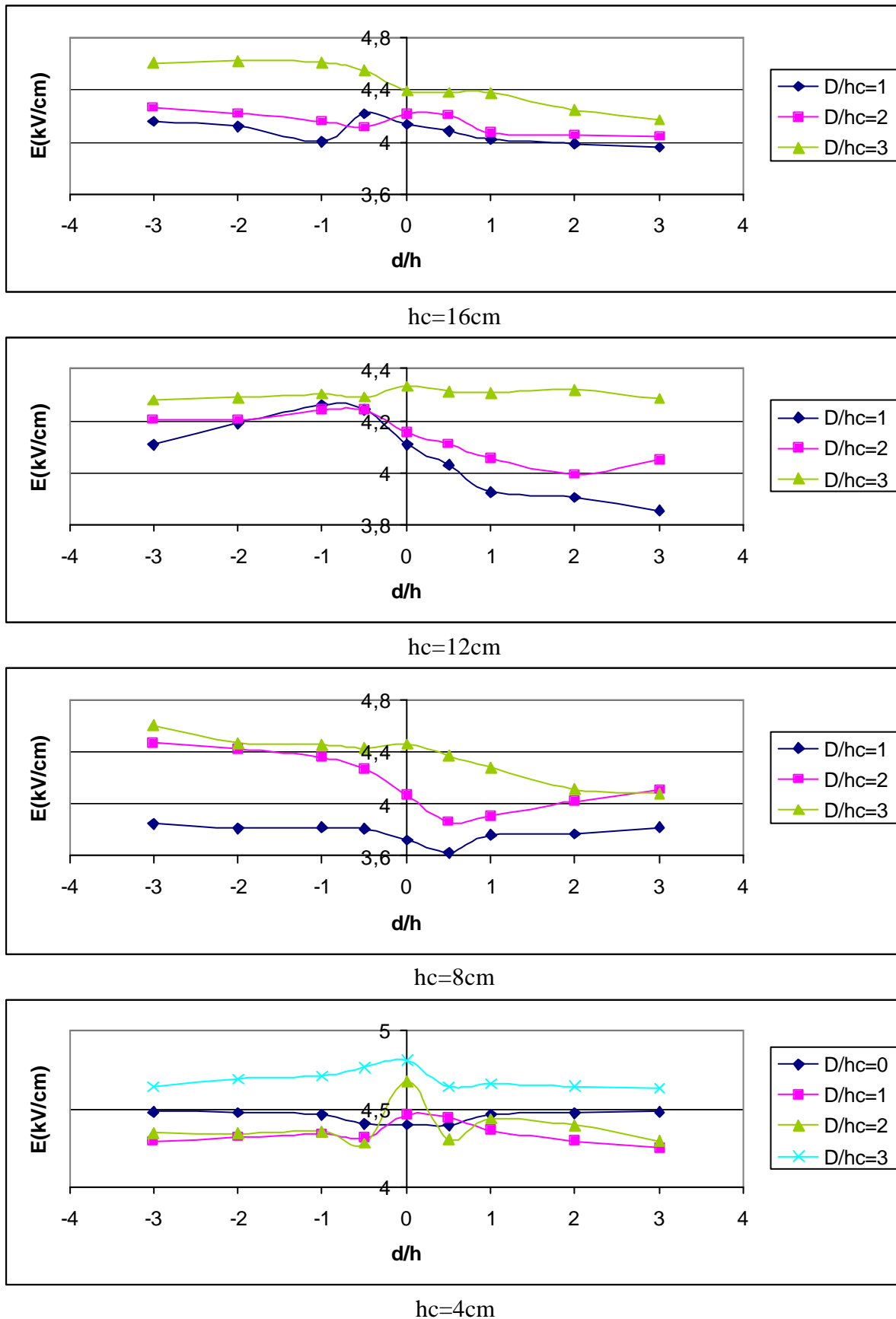


Figure IV.8. Champ électrique au sol en fonction de la position (d/h) de la sonde.

$h=16\text{cm}$, $U=0.4 U_0\%$.

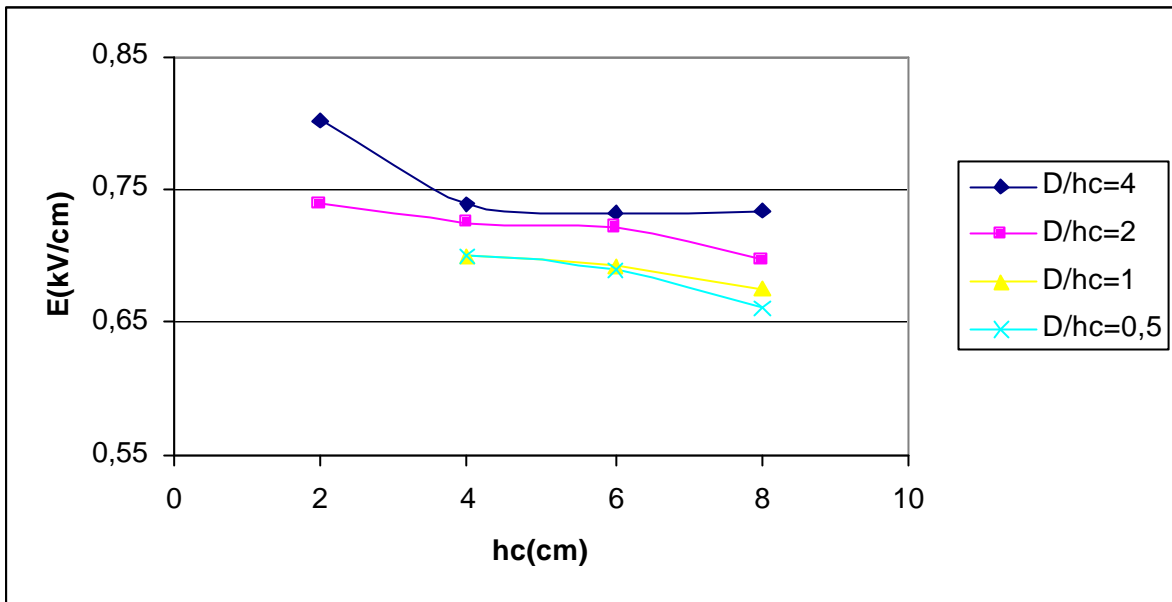


Figure IV.9. Variation du champ électrique à l'axe du plan.
 $h=8\text{cm}$, $U=0.2 U_0\%$.

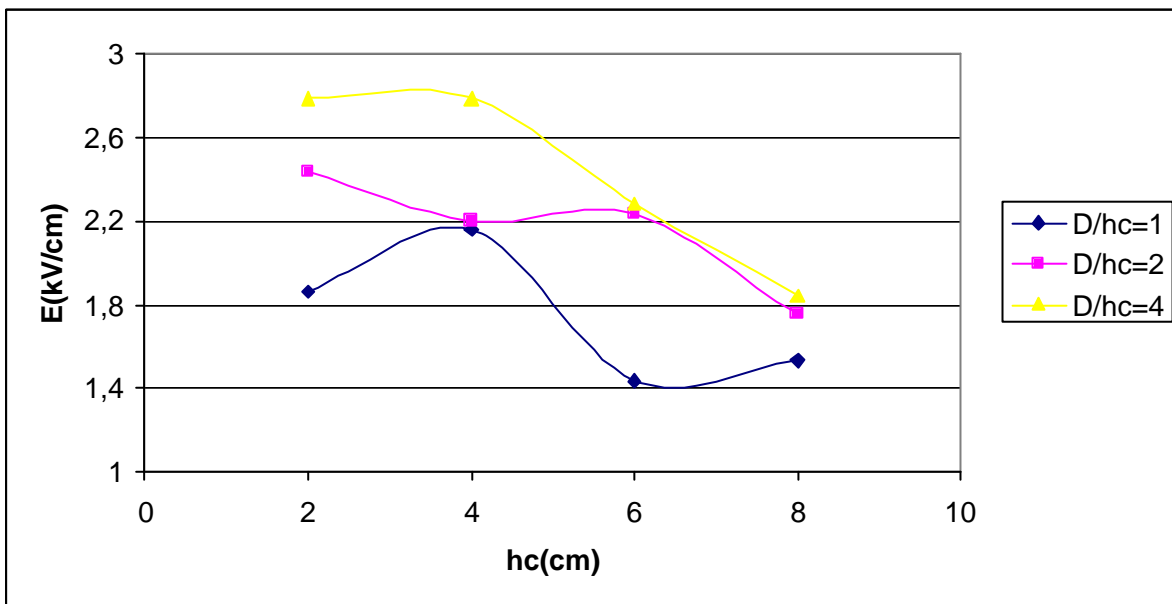


Figure IV.10. Variation du champ électrique à l'axe du plan.
 $h=8\text{cm}$, $U=0.4 U_0\%$.

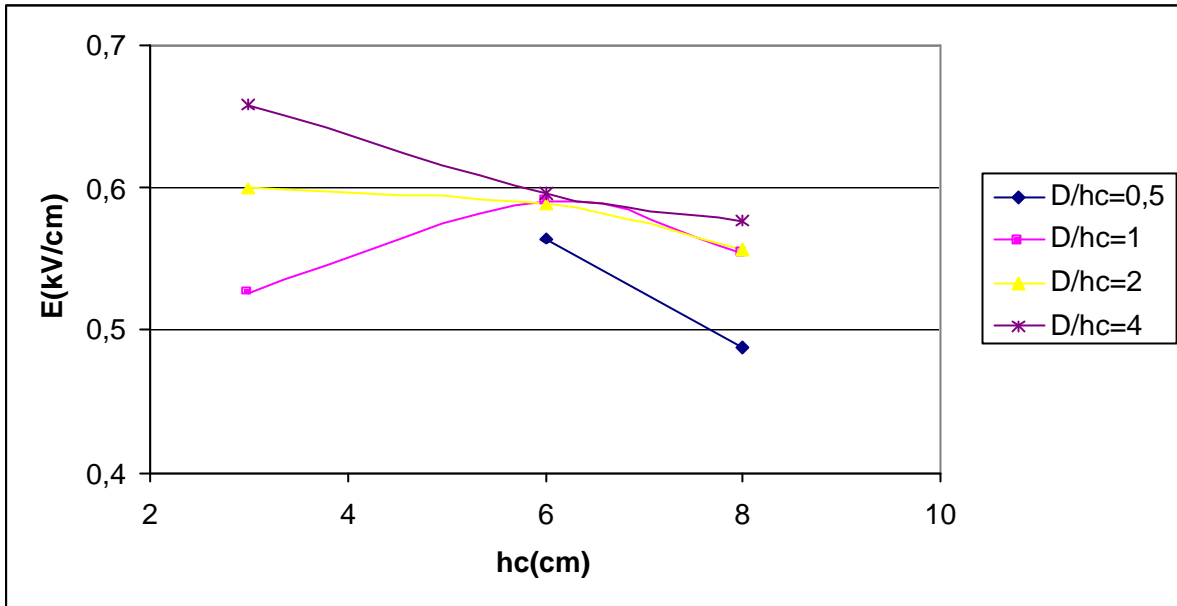


Figure IV.11. Variation du champ électrique à l'axe du plan.

$h=12\text{cm}, U=0.2 U_{0\%}$.

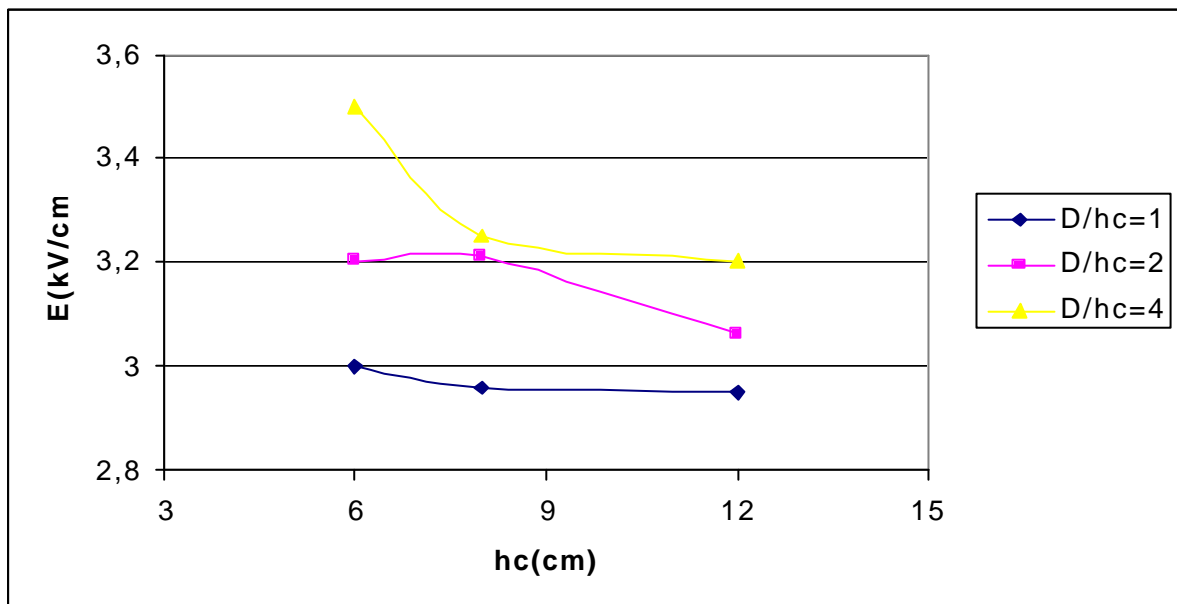


Figure IV.12. Variation du champ électrique à l'axe du plan.

$h=12\text{cm}, U=0.4 U_{0\%}$.

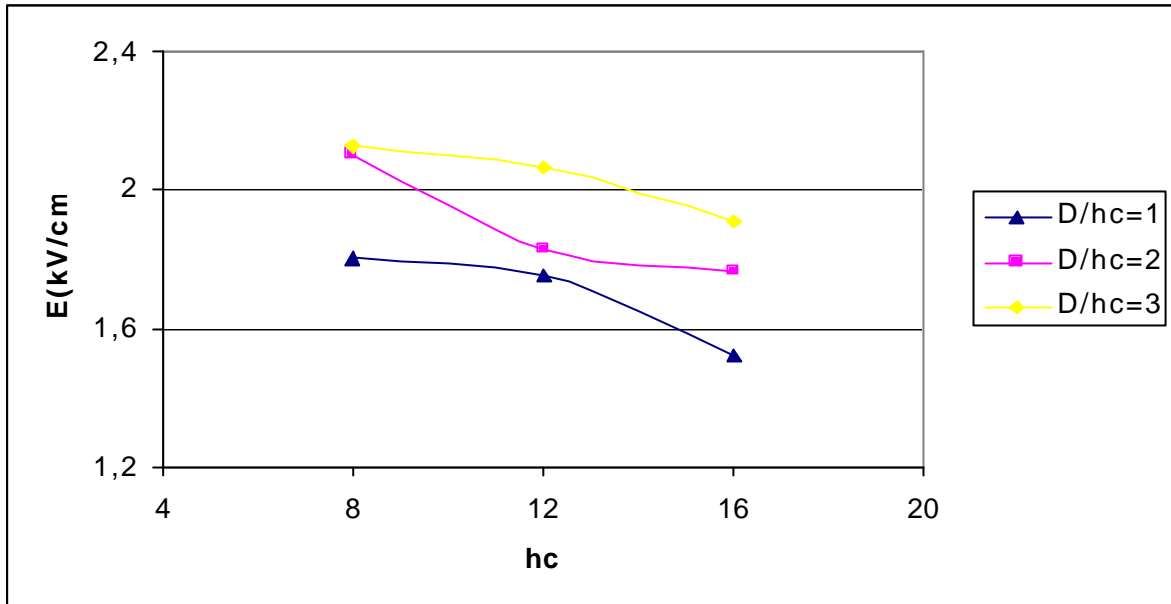


Figure IV.13. Variation du champ électrique à l'axe du plan.

$h=16\text{cm}$, $U=0.2 U_{0\%}$.

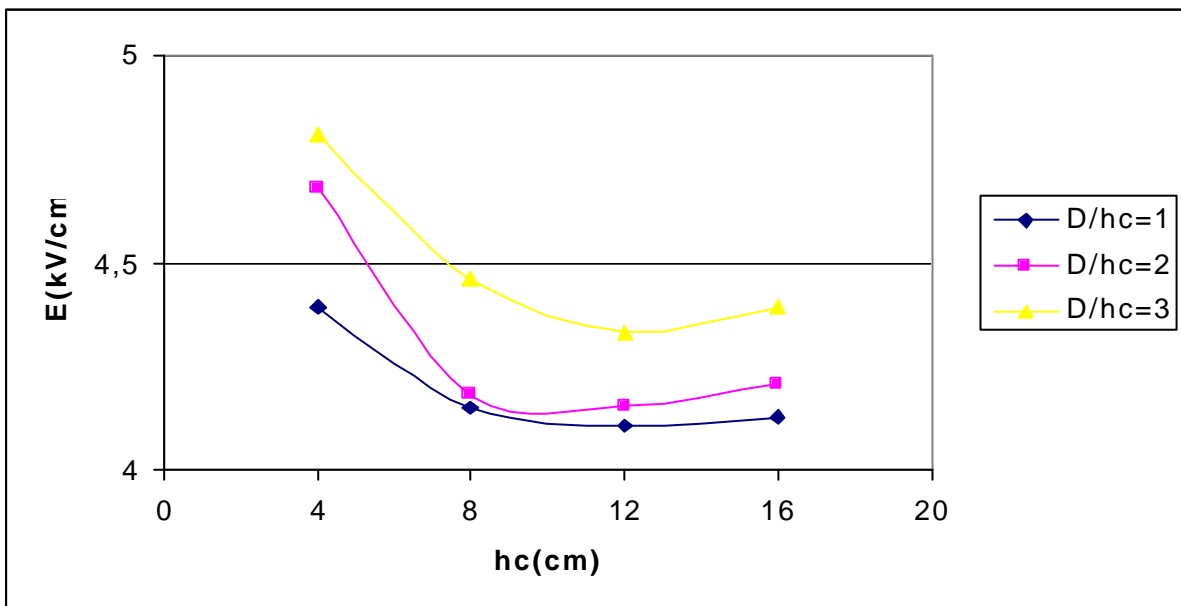


Figure IV.14. Variation du champ électrique à l'axe du plan.

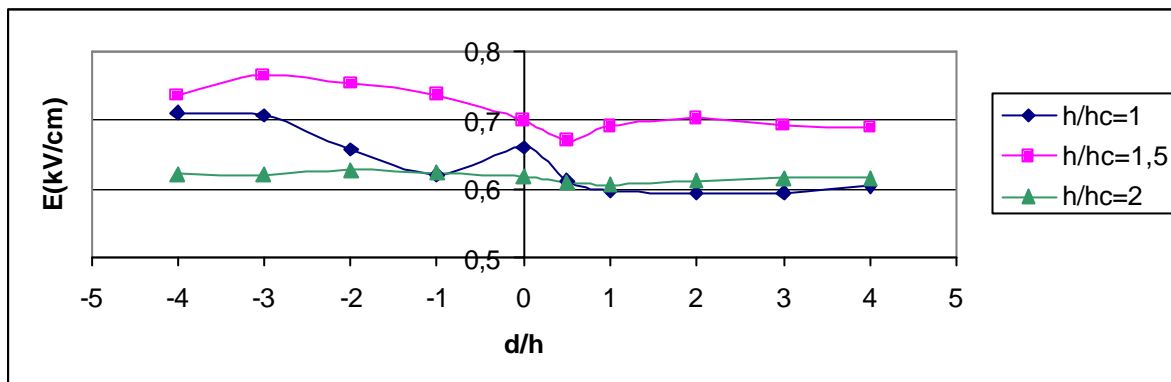
$h=16\text{cm}$, $U=0.4 U_{0\%}$.

IV.2.2 INFLUENCE DE LA HAUTEUR DU PARATONNERRE

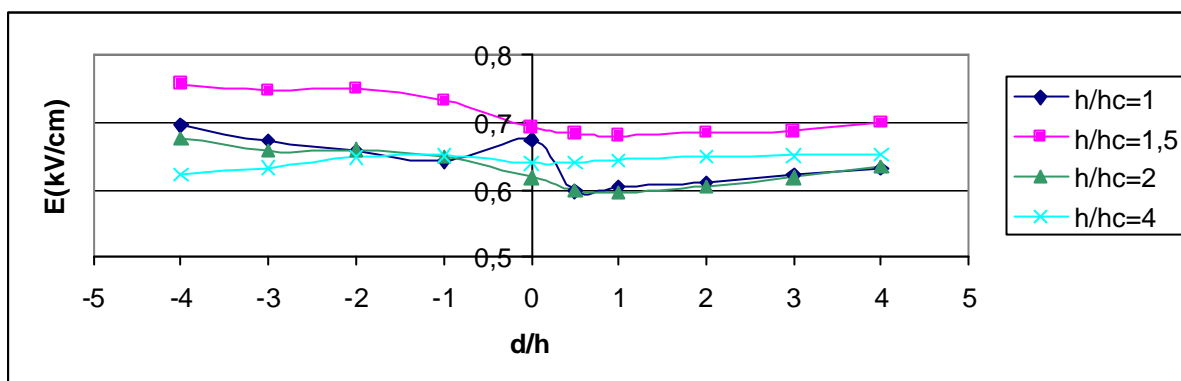
D'après les figures IV.15 à IV.20, nous constatons que pour les grandes hauteurs du paratonnerre (h/h_c est petit) la valeur du champ électrique est faible. Ceci peut être expliqué par le fait que plus le paratonnerre a une hauteur élevée plus il attire un plus grand nombre de lignes de champ. Par conséquent, le champ électrique au sol diminue et la probabilité de foudroiement du paratonnerre augmente. A fur et à mesure que la hauteur du paratonnerre diminue, on assiste à une augmentation du champ électrique au niveau du sol. Pour les petites hauteurs de h_c (h/h_c grand), la valeur de champ électrique augmente. On note aussi que le champ électrique dans le demi-plan qui contient le paratonnerre est inférieur à celui correspondant à l'autre demi-plan, à cause de la forte attraction des lignes de champ électrique par le paratonnerre, ce qui affaiblit le champ électrique au niveau du sol.

La diminution de la valeur du champ électrique pour des niveaux de tension appliquée élevés (dans notre cas 0.4U0%) est plus accentuée que pour des niveaux de tension plus faibles (dans notre cas 0.2U0%) et ceci quelles que soit les hauteurs considérées. Cela est dû au fait que pour la même hauteur de paratonnerre, plus la tension appliquée augmente plus le champ électrique au mât de ce dernier augmente ; et ainsi le champ au sol aura tendance à diminuer. Ceci confirme l'efficacité des paratonnerres pour les coups de foudre de forte intensité [3] [13] [35] [36] [37].

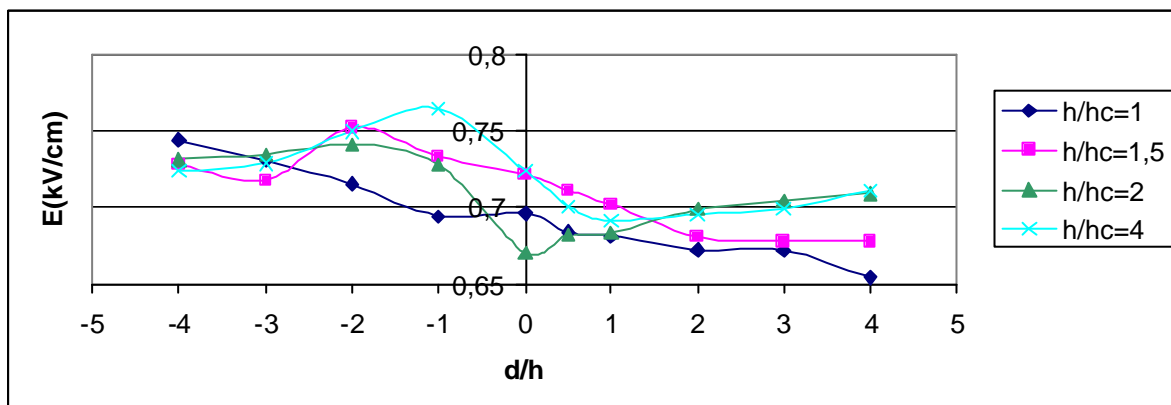
Pour les positions de la tige $d/h=0$, au-dessous de la tige, nous remarquons la forte augmentation du champ électrique sur le plan pour les niveaux de tension $U=0.4U0\%$ lorsque le paratonnerre s'éloigne de l'axe de la tige pour différentes hauteurs du paratonnerre. Ceci est valable lorsque la hauteur du paratonnerre diminue. Cette augmentation est beaucoup plus importante et plus remarquée que dans les cas des niveaux de tension plus faibles ($U=0.2U0\%$), (Figure IV.21 à IV.26).



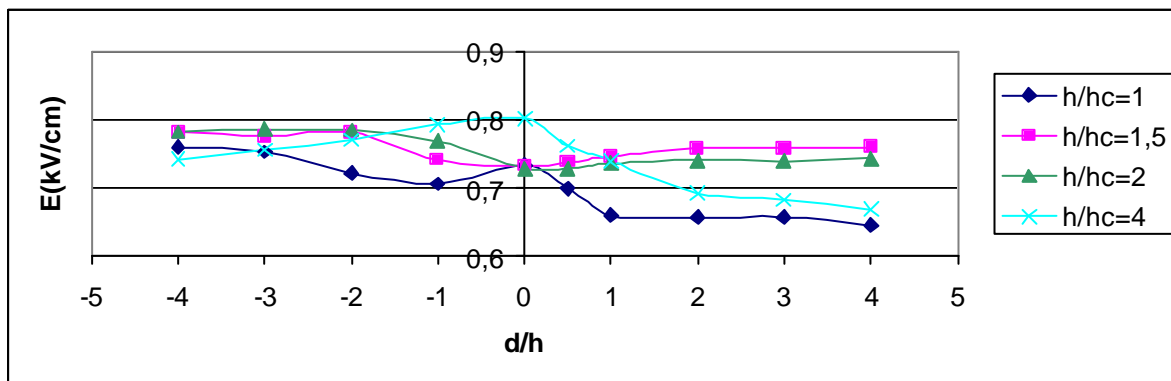
D/hc=0.5



D/hc=1



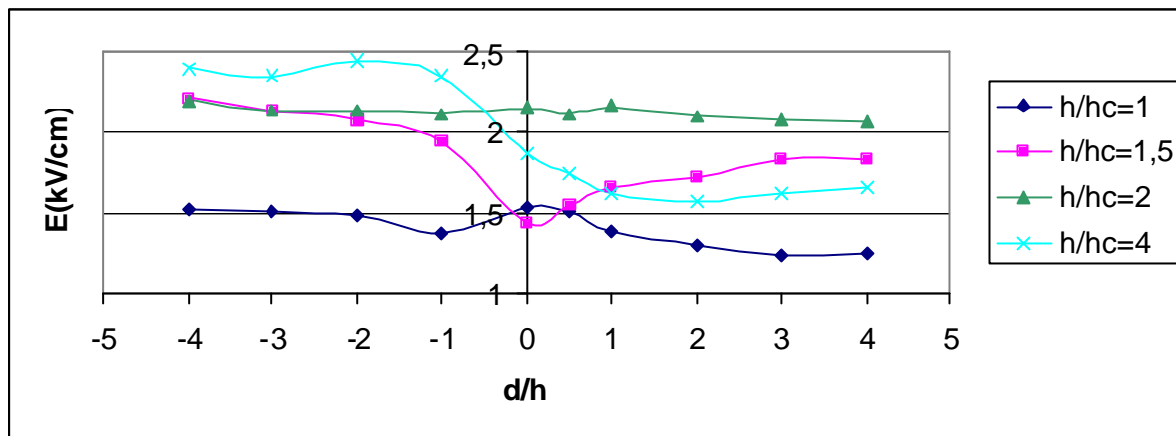
D/hc=2



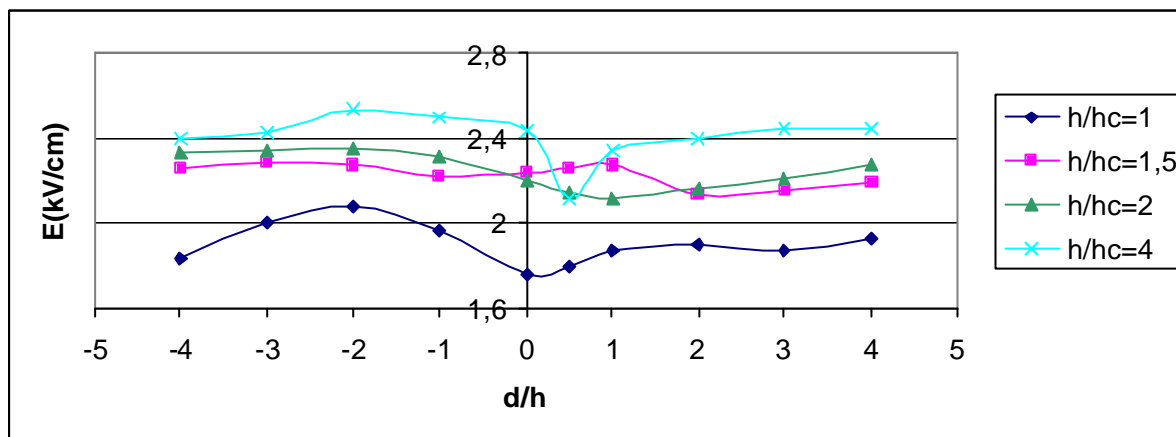
D/hc=4

Figure IV.15. Champ électrique au sol en fonction de la position (d/h) de la sonde.

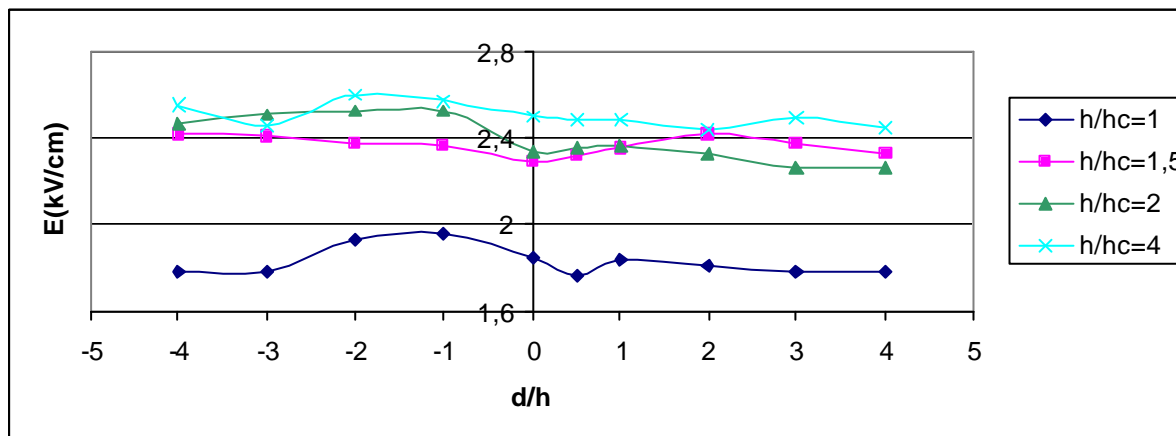
$h=8\text{cm}$, $U=0.2 U_{0\%}$.



D/hc=1



D/hc=2



D/hc=4

Figure IV.16. Champ électrique au sol en fonction de la position (d/h) de la sonde.

$h=8\text{cm}$, $U=0.4 U_{0\%}$.

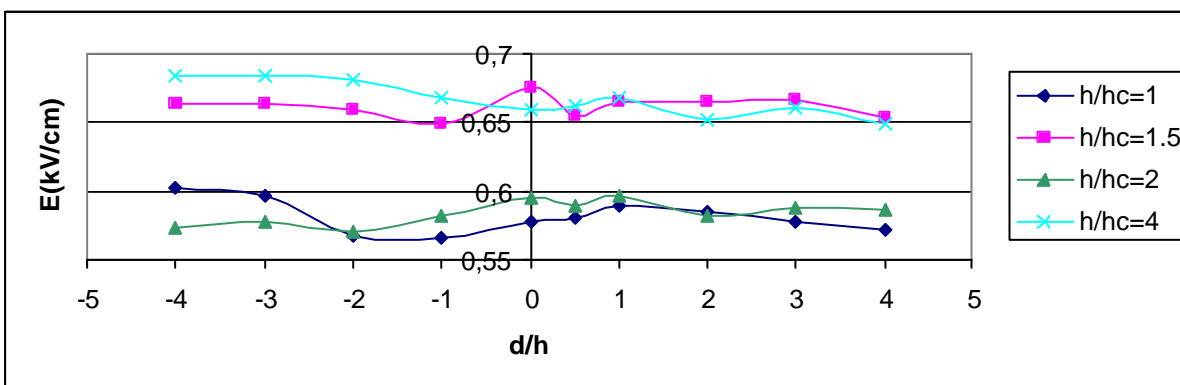
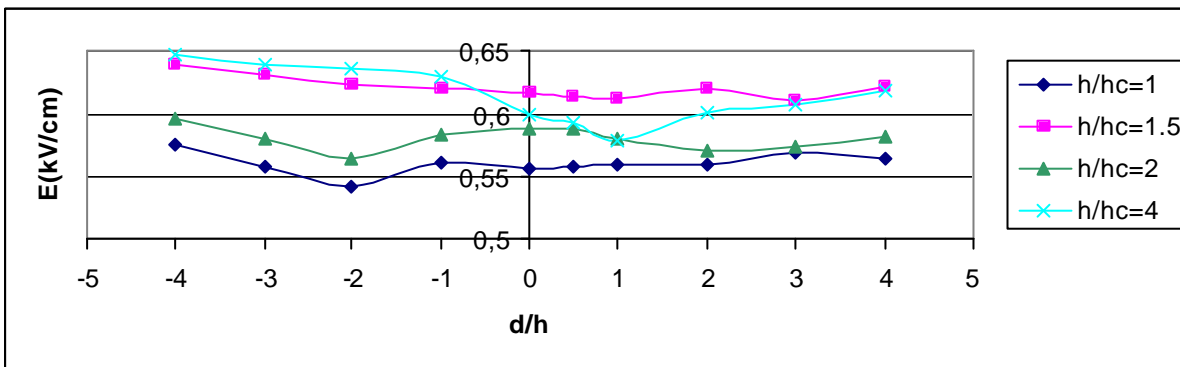
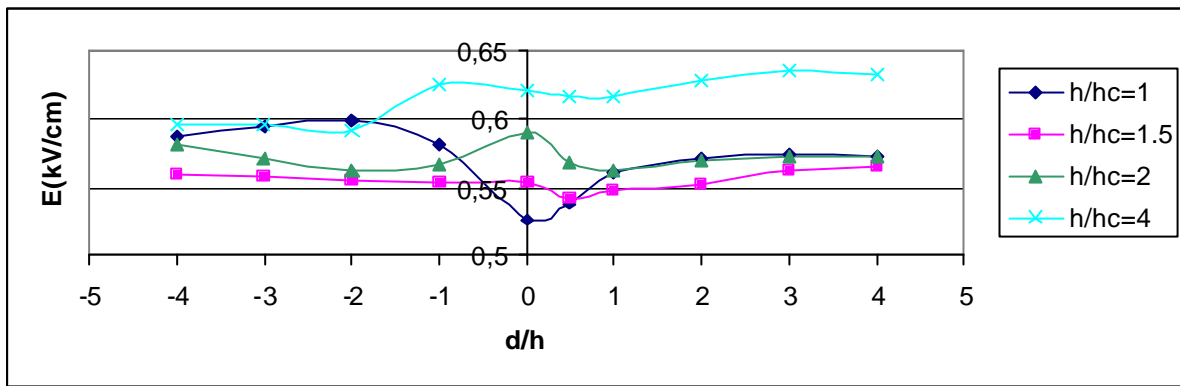
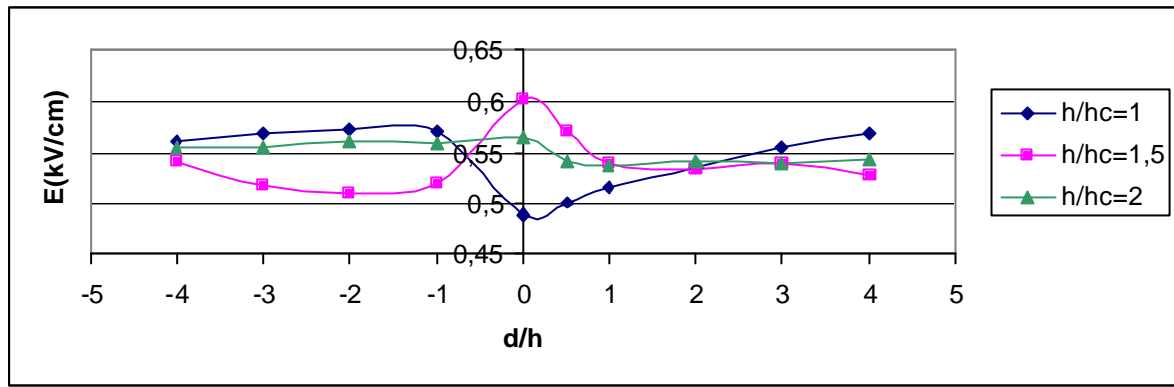
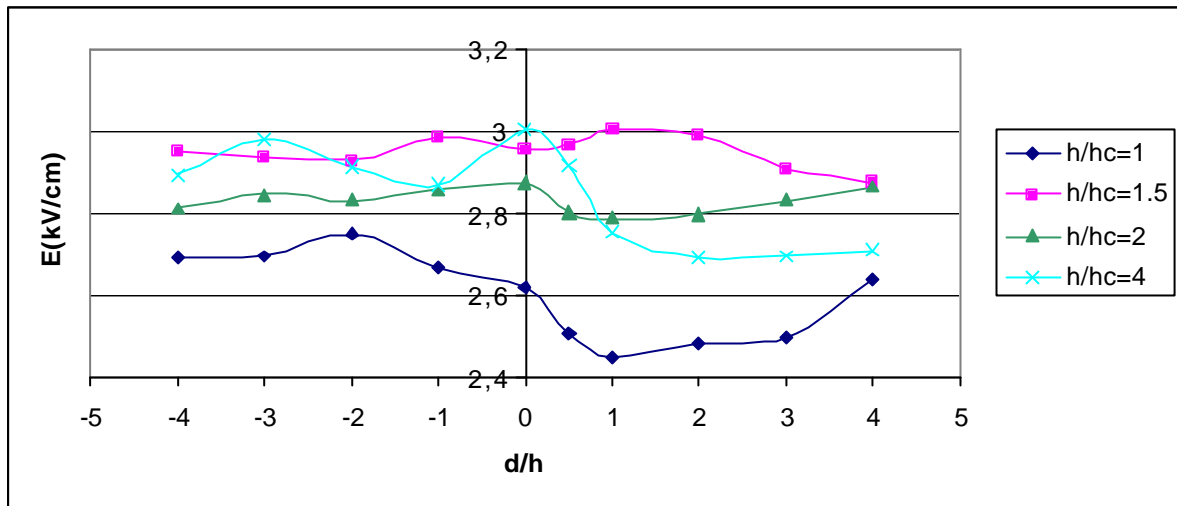
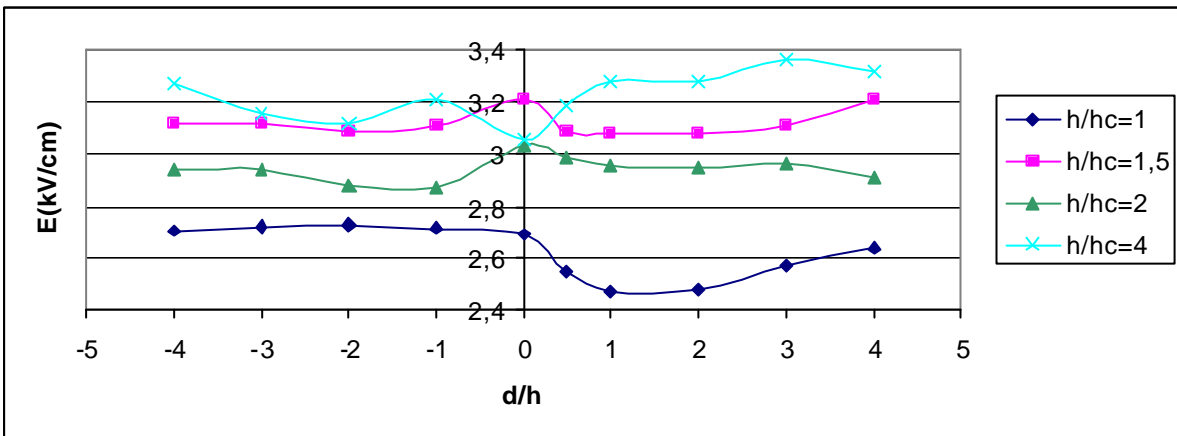


Figure IV.17. Champ électrique au sol en fonction de la position (d/h) de la sonde.

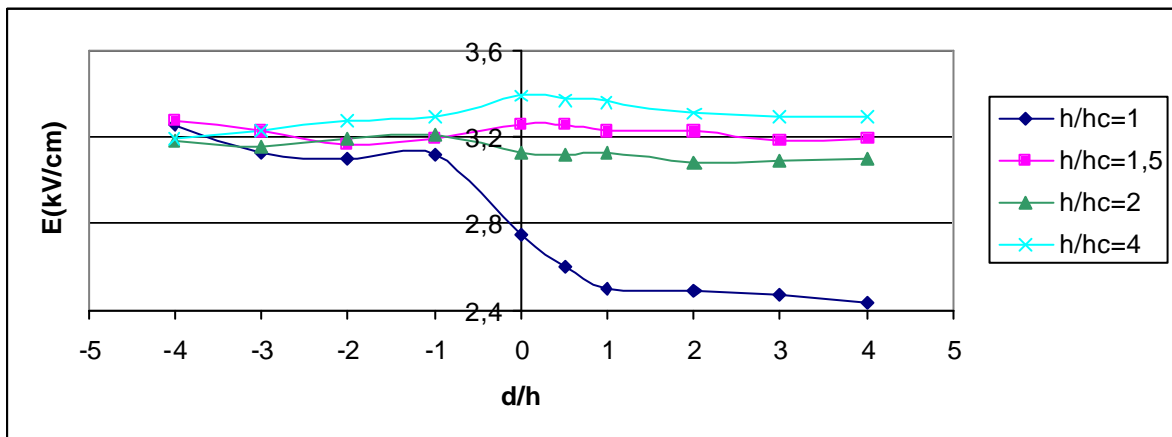
$h=12\text{cm}$, $U=0.2 U_{0\%}$.



D/hc=1



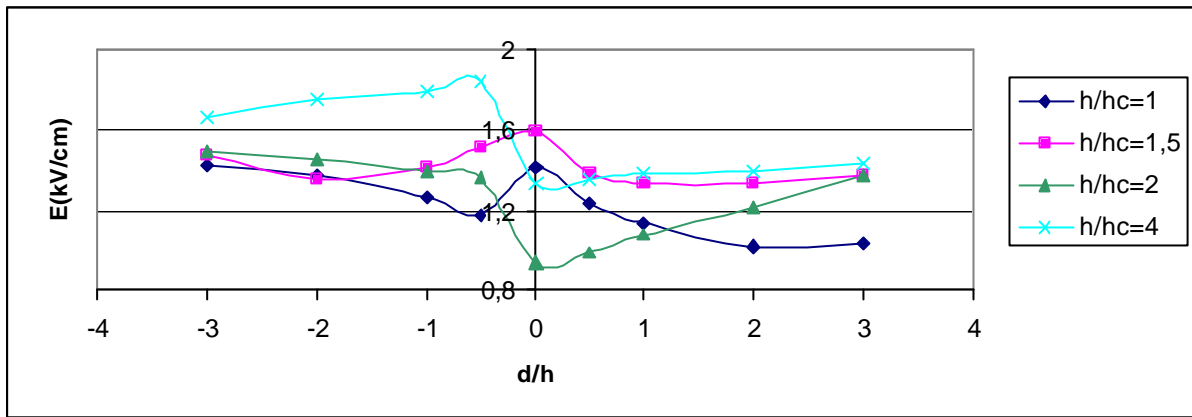
D/hc=2



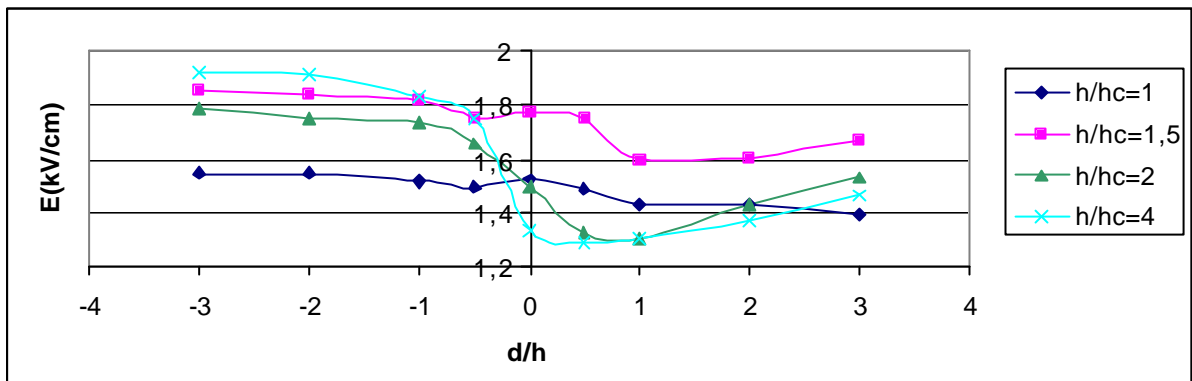
D/hc=4

Figure IV.18. Champ électrique au sol en fonction de la position (d/h) de la sonde.

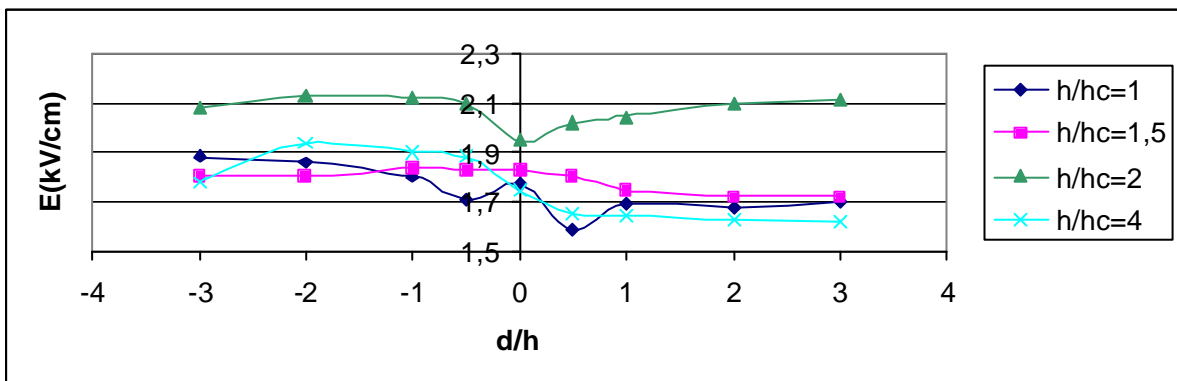
$h=12\text{cm}$, $U=0.4 U_{0\%}$.



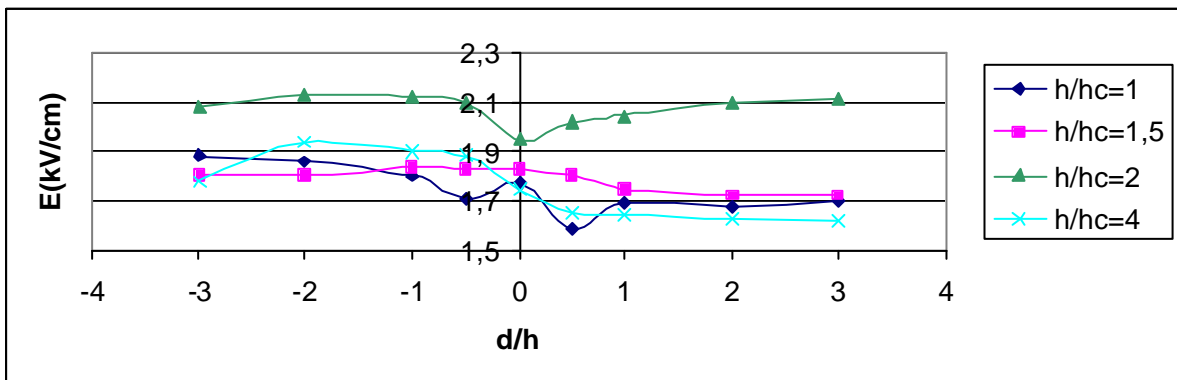
$D/hc=0.5$



$D/hc=1$



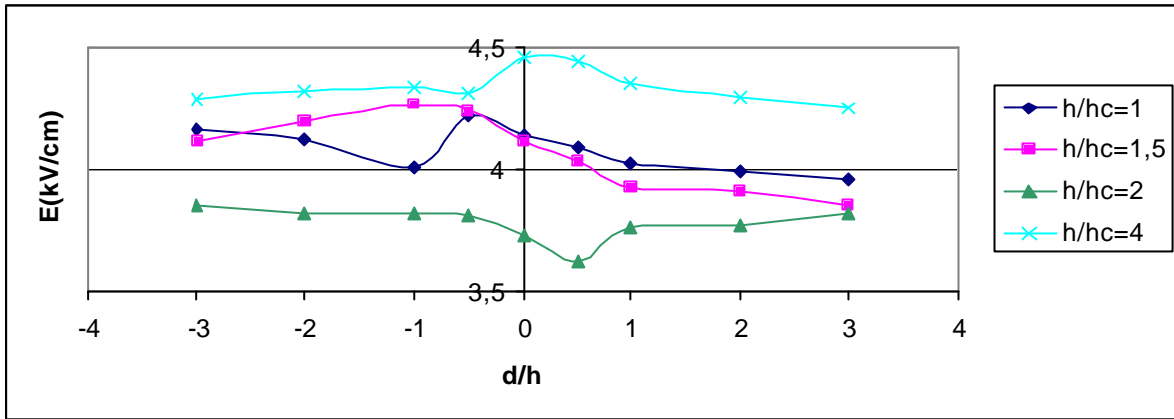
$D/hc=2$



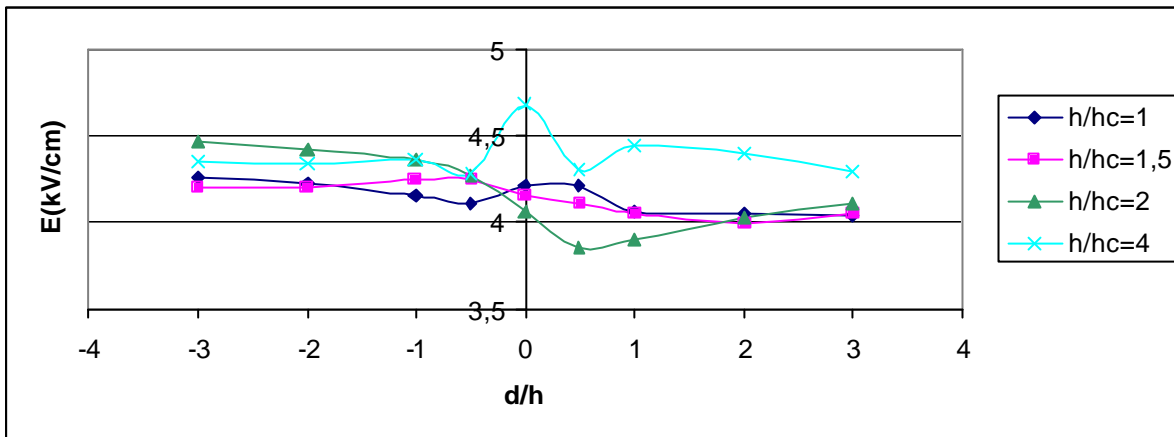
$D/hc=3$

Figure IV.19. Champ électrique au sol en fonction de la position (d/h) de la sonde.

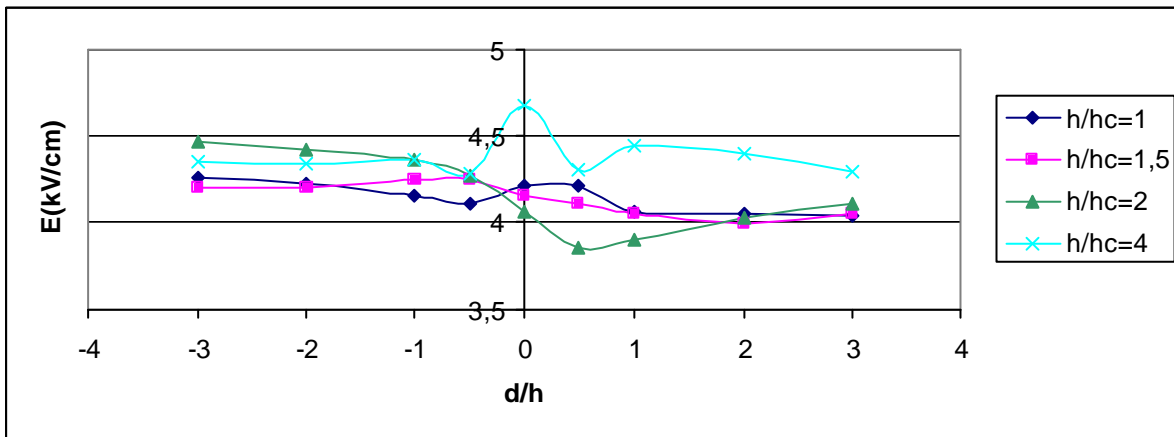
$h=16\text{cm}$, $U=0.2 U_{0\%}$.



D/hc=1



D/hc=2



D/hc=3

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

$h=16\text{cm}$, $U=0.4 U_{0\%}$.

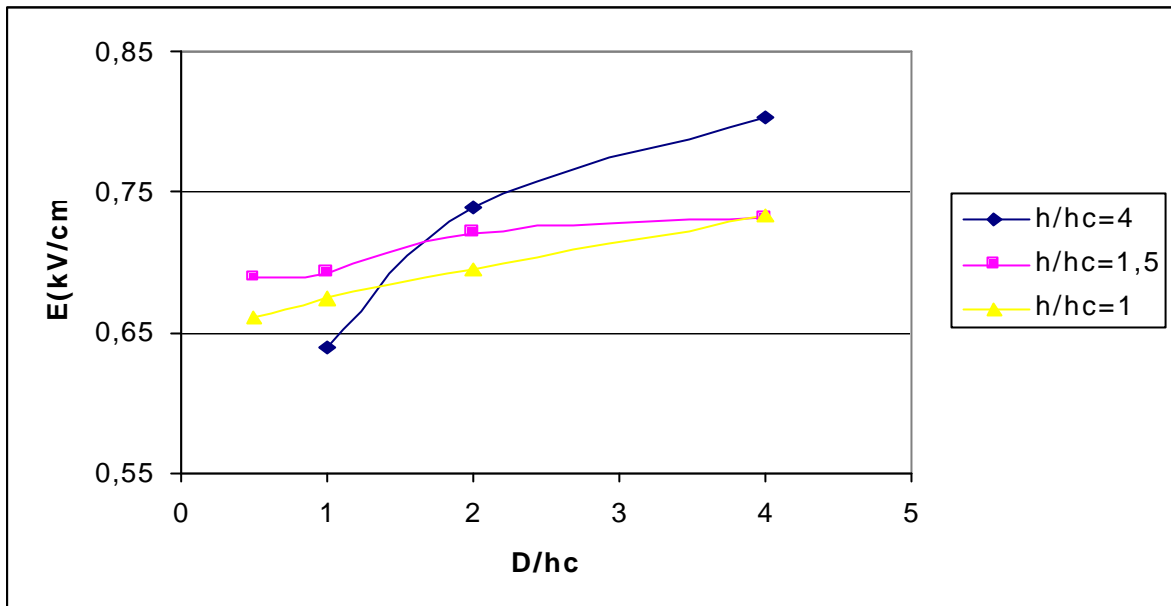


Figure IV.21. Variation du champ électrique à l'axe du plan.

$h=8\text{cm}$, $U=0.2 U_{0\%}$.

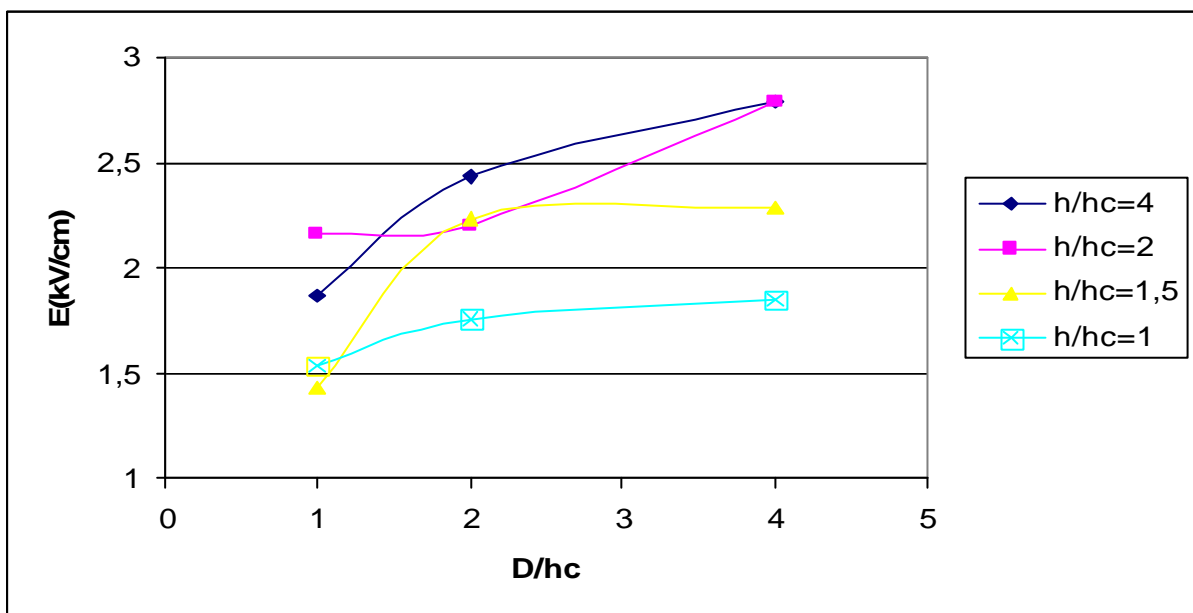


Figure IV.22. Variation du champ électrique à l'axe du plan.

$h=8\text{cm}$, $U=0.4 U_{0\%}$.

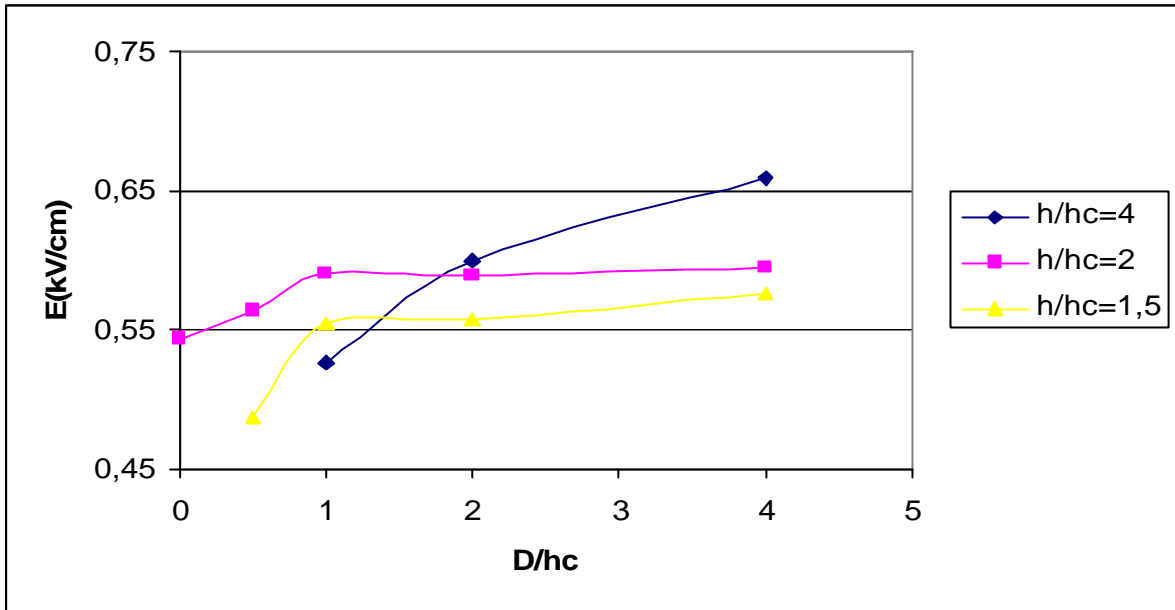


Figure IV.23. Variation du champ électrique à l'axe du plan.

$h=12\text{cm}$, $U=0.2 U_{0\%}$.

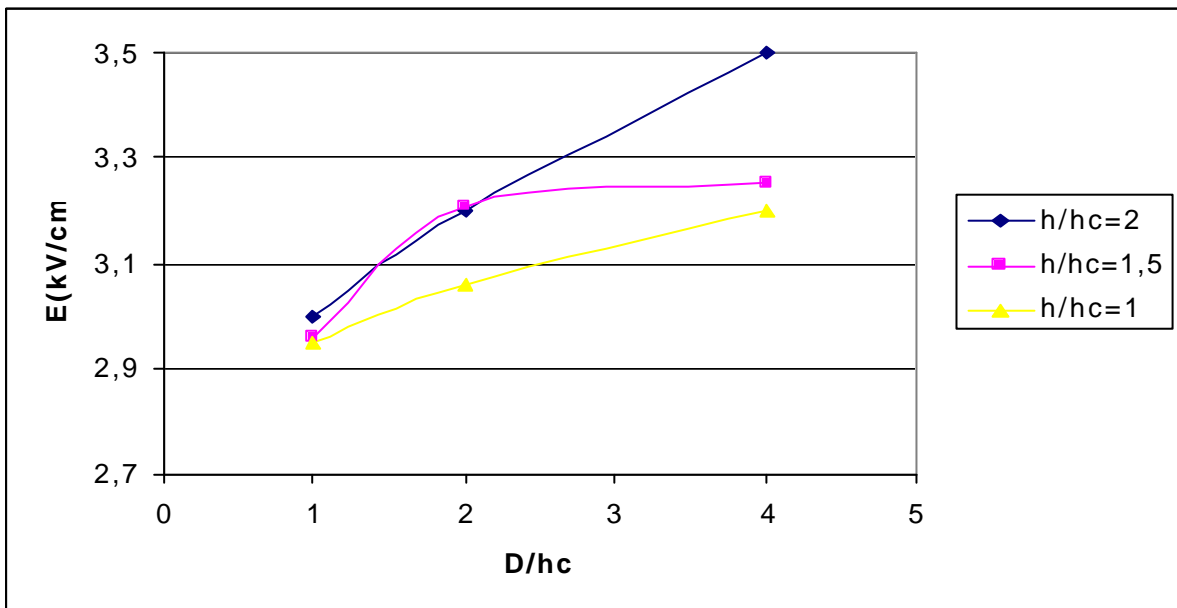


Figure IV.24. Variation du champ électrique à l'axe du plan.

$h=12\text{cm}$, $U=0.4 U_{0\%}$.

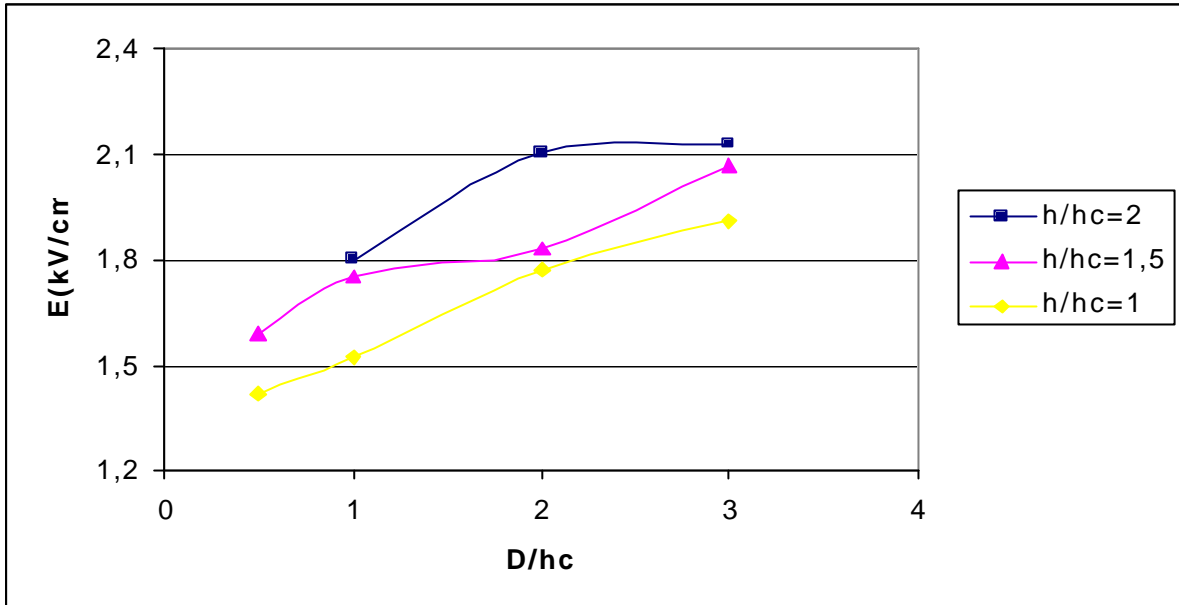


Figure IV.25. Variation du champ électrique à l'axe du plan.

$h=16\text{cm}$, $U=0.2 U_{0\%}$.

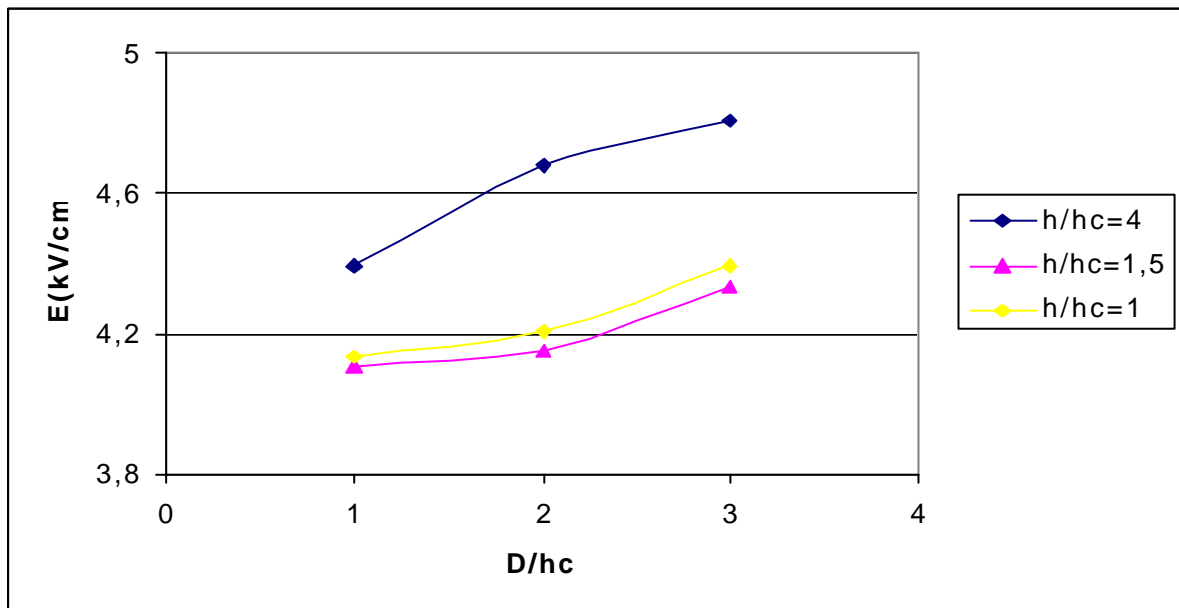


Figure IV.26. Variation du champ électrique à l'axe du plan.

$h=16\text{cm}$, $U=0.4 U_{0\%}$.

IV.2.3 DISCUSSION SUR L'EFFET DU PARATONNERRE

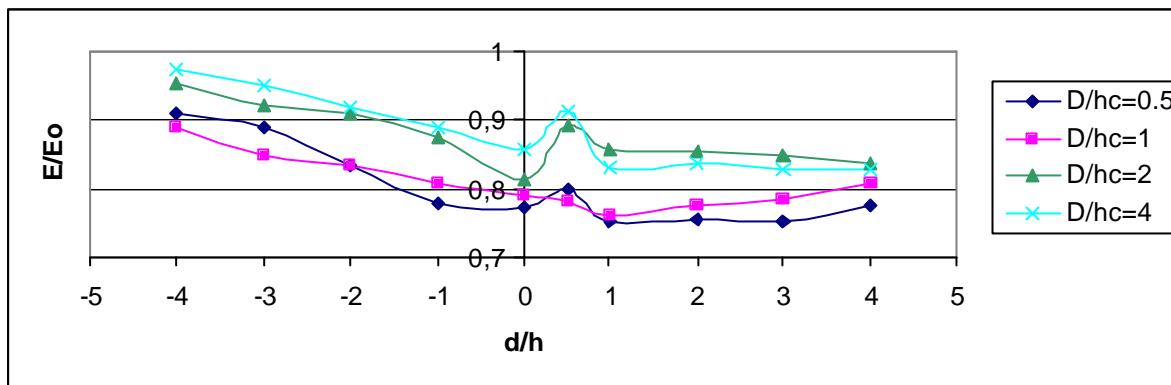
Afin d'illustrer l'influence du paratonnerre sur la distribution du champ électrique au sol pour notre système d'électrodes tige-plan en fonction de la position de la sonde d/h , on définit le rapport E/E_0 par le rapport entre le champ mesuré dans la configuration avec paratonnerre et le champ mesuré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

La remarque générale qu'on peut tirer des figures (IV.27) à (IV.32) est que le rapport E/E_0 prend la valeur la plus faible pour les positions du paratonnerre proche de la tige ($D/hc=0, 0.5, 1$) 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 la plan. On peut expliquer ce phénomène par l'effet de la zone de protection du paratonnerre de telle sorte que les objets situés directement au-dessous du paratonnerre sont pratiquement protégés et le champ sera très réduit par rapport aux autres régions loin du paratonnerre.

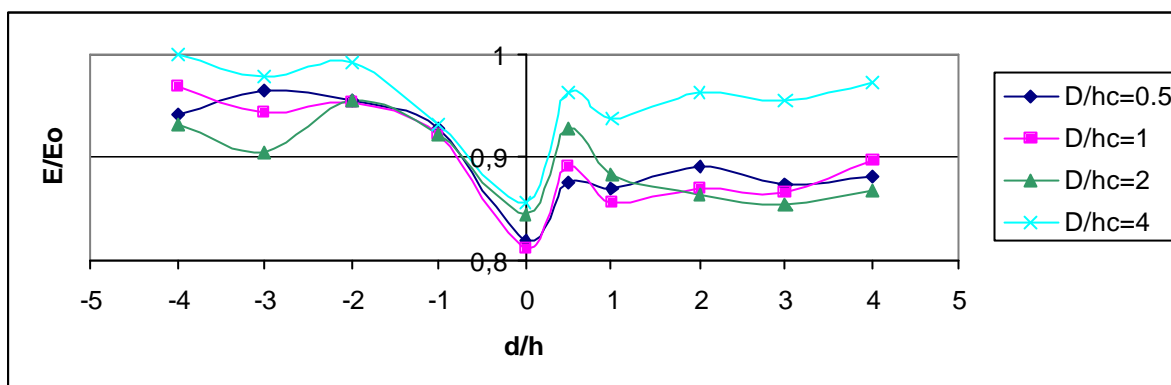
Au fur et à mesure que le paratonnerre s'éloigne de la tige HT (D/hc augmente), on remarque que le rapport E/E_0 augmente jusqu'à l'unité, cas où le paratonnerre n'a pratiquement aucune influence (valeur du champ égale à celle correspondant à la configuration sans paratonnerre).

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

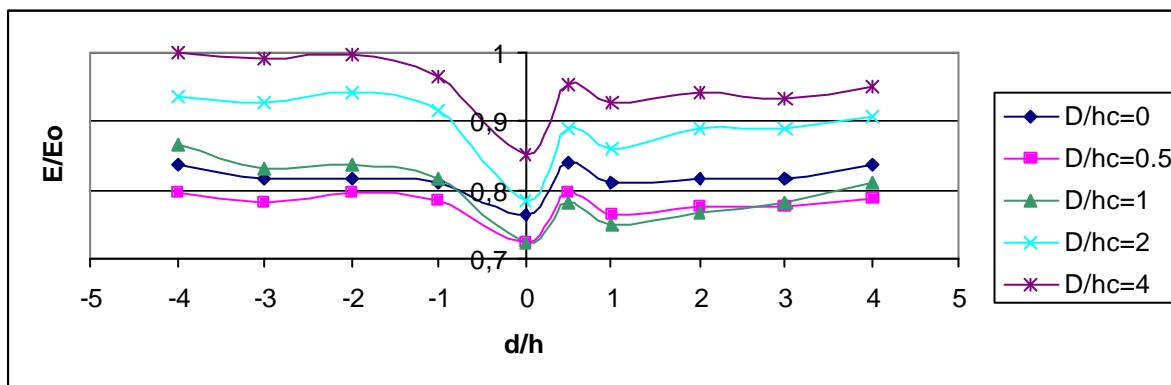
Ainsi le rapport E/E_0 dans le demi-plan qui contient le paratonnerre est inférieur à celui se trouvant dans l'autre.



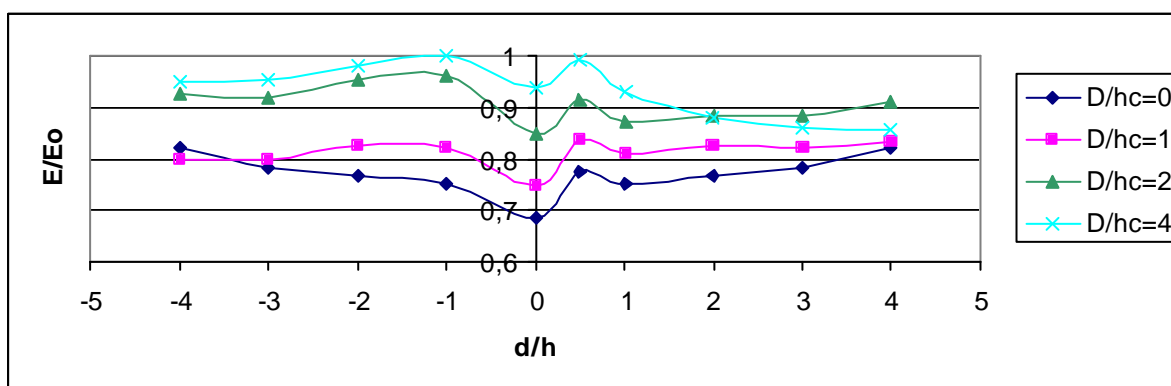
hc=8cm



hc=6cm



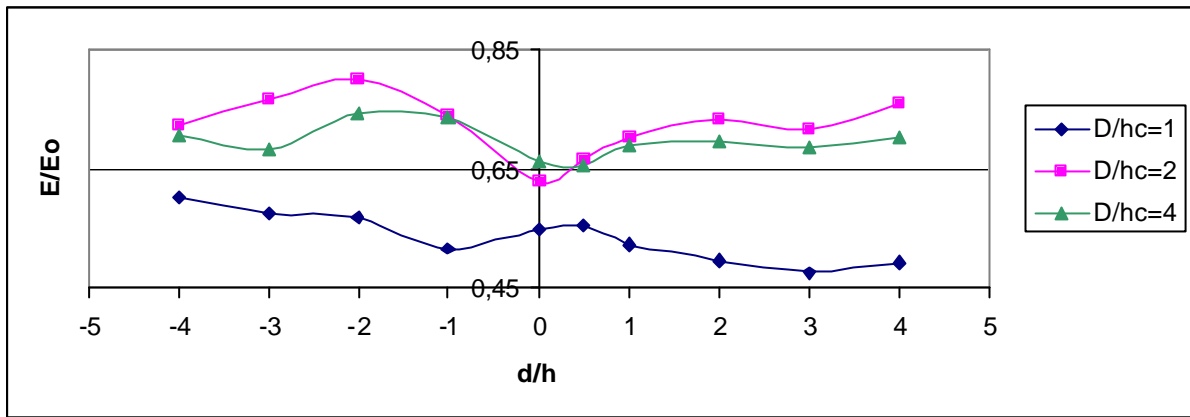
hc=4cm



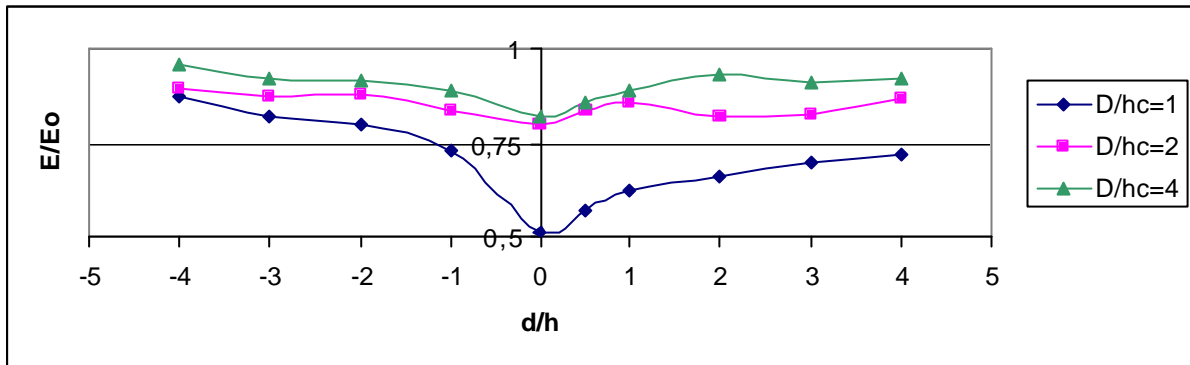
hc=2cm

Figure IV.27. Variation du rapport E/E_0 en fonction de position de la sonde (d/h).

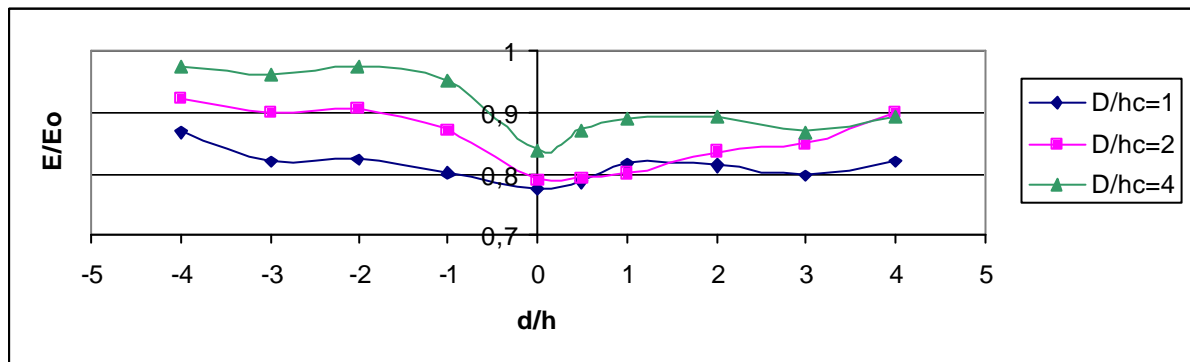
$h=8\text{cm}$, $U=0.2 U_{0\%}$.



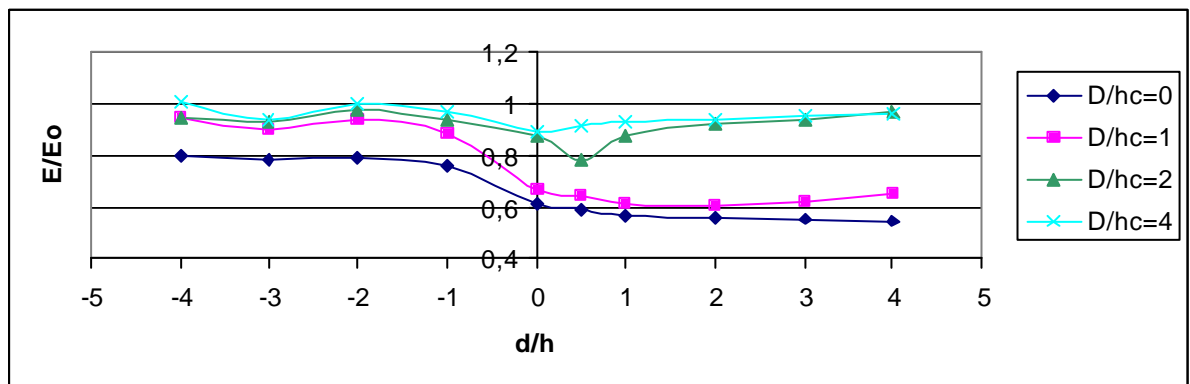
$hc=8\text{cm}$



$hc=6\text{cm}$



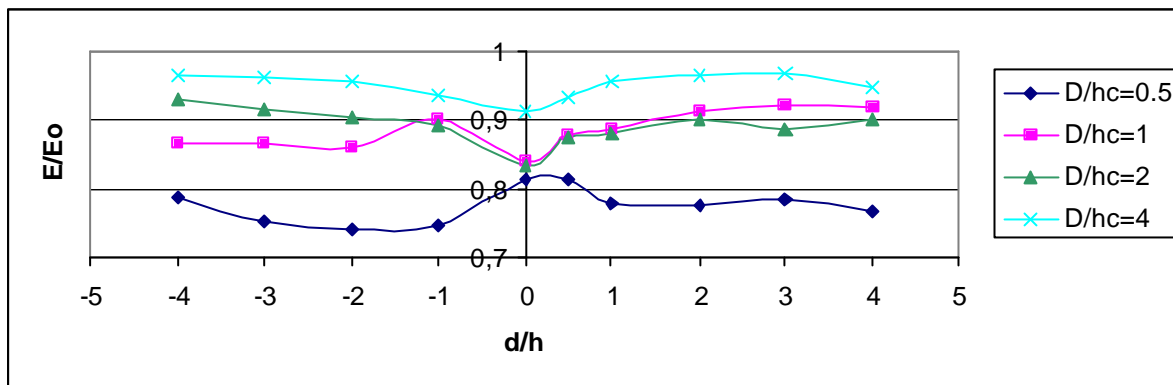
$hc=4\text{cm}$



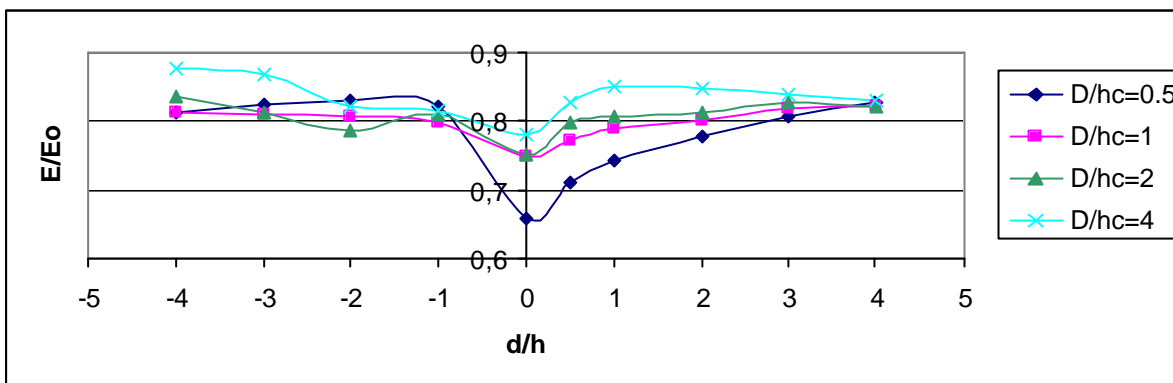
$hc=2\text{cm}$

Figure IV.28. Variation du rapport E/E_0 en fonction de position de la sonde (d/h).

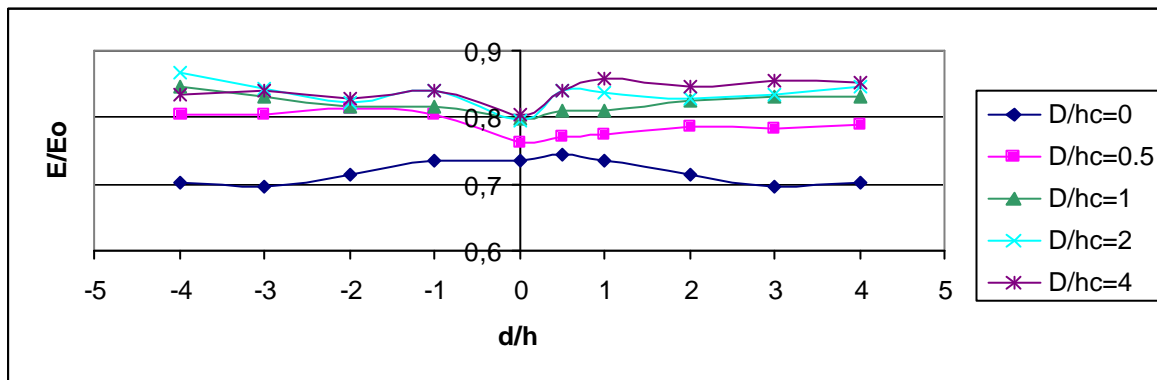
$h=8\text{cm}$, $U=0.4 U_0\%$.



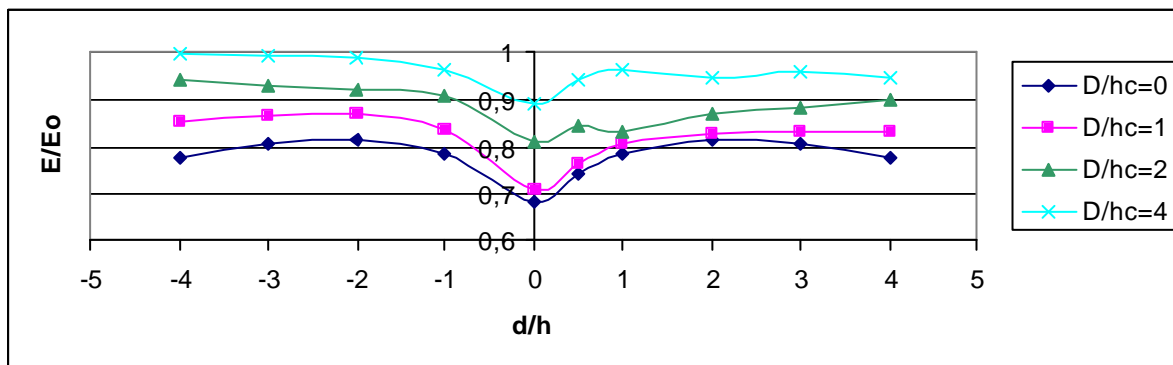
hc=12cm



hc=8cm



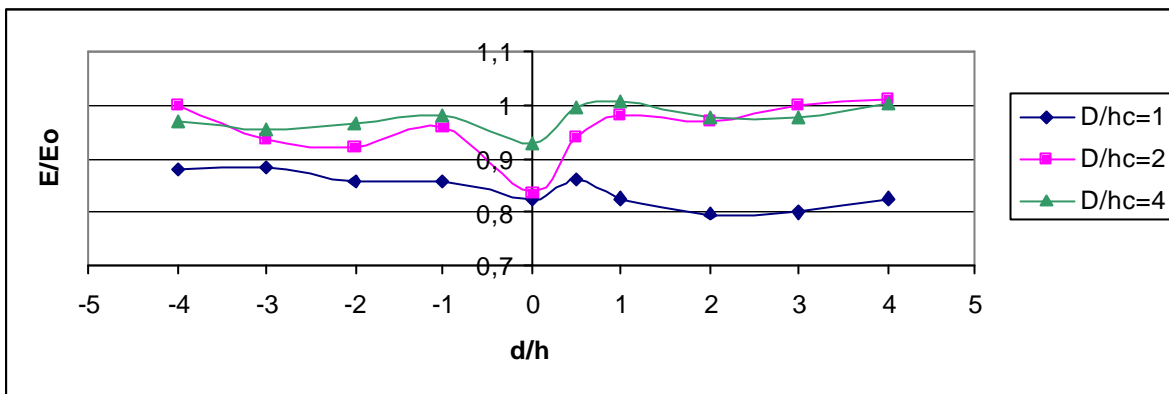
hc=6cm



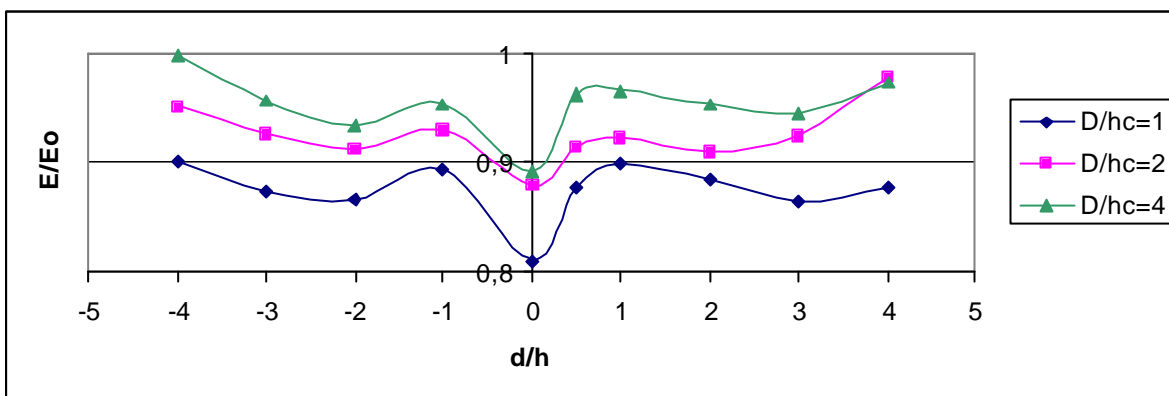
hc=3cm

Figure IV.29. Variation du rapport E/E_0 en fonction de position de la sonde (d/h)

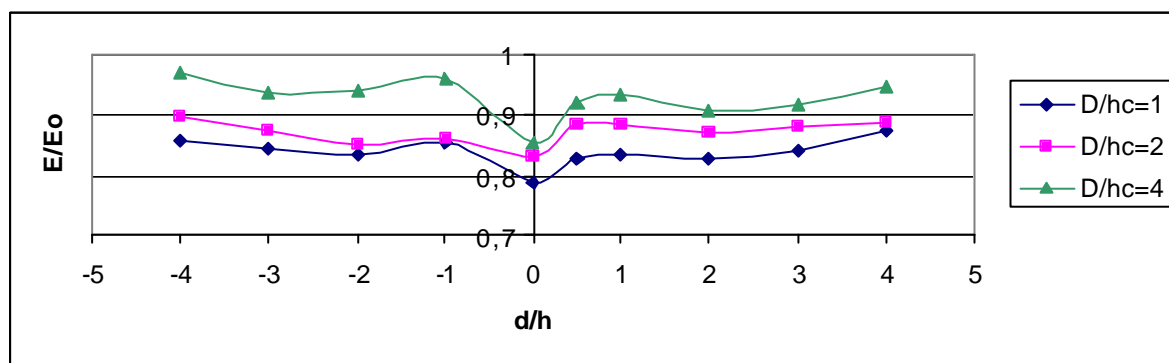
$h=12\text{cm}$, $U=0.2 U_{0\%}$.



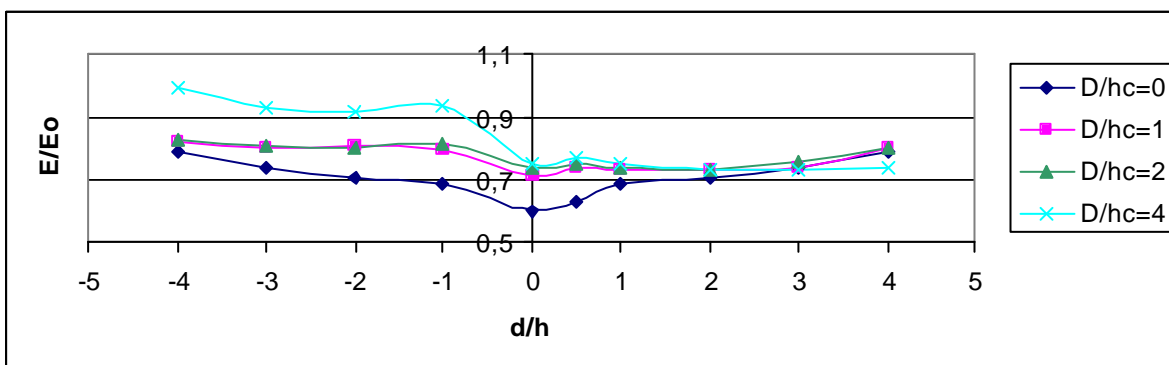
hc=12cm



hc=8cm



hc=6cm



hc=3cm

Figure IV.30. Variation du rapport E/E_0 en fonction de position de la sonde (d/h).

$h=12\text{cm}$, $U=0.4 U_0\%$.

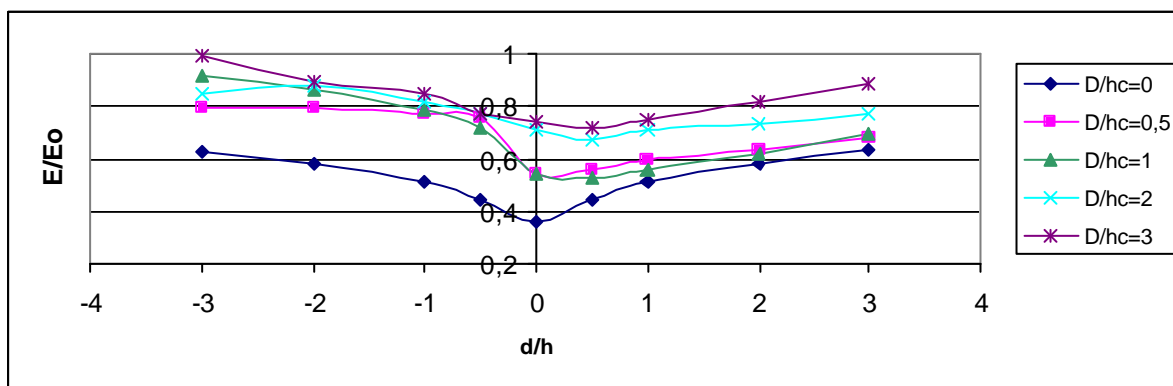
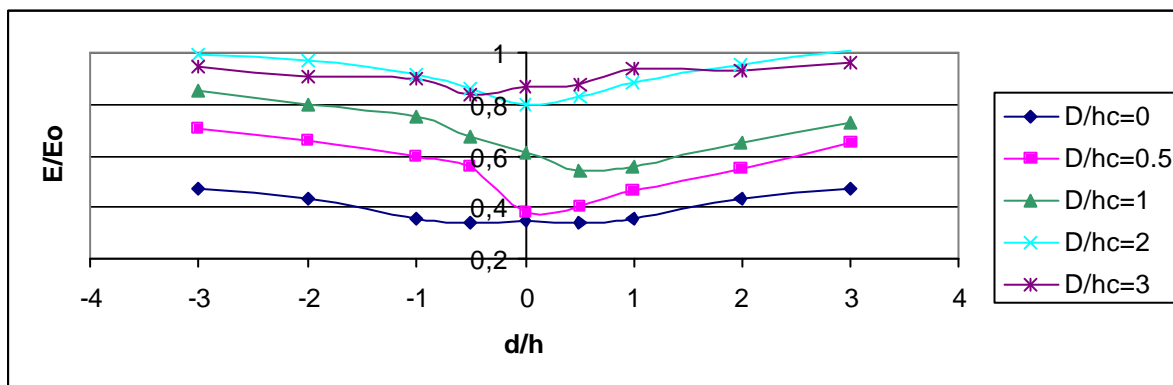
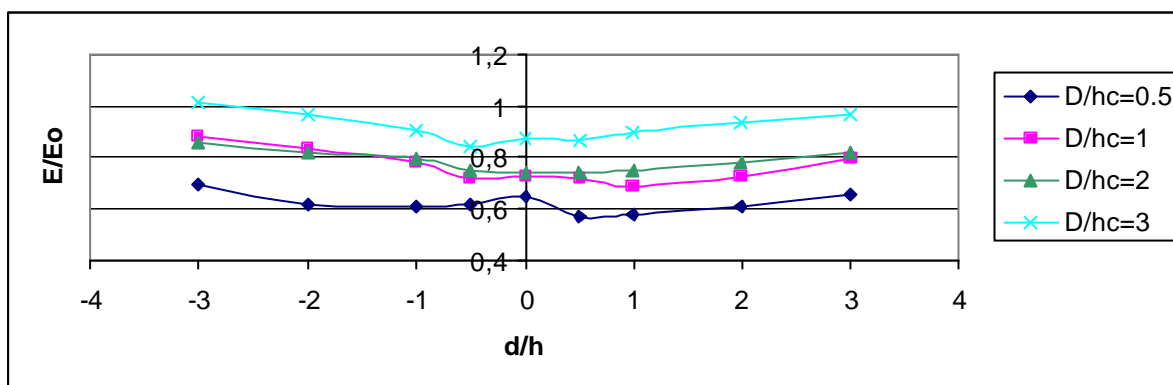
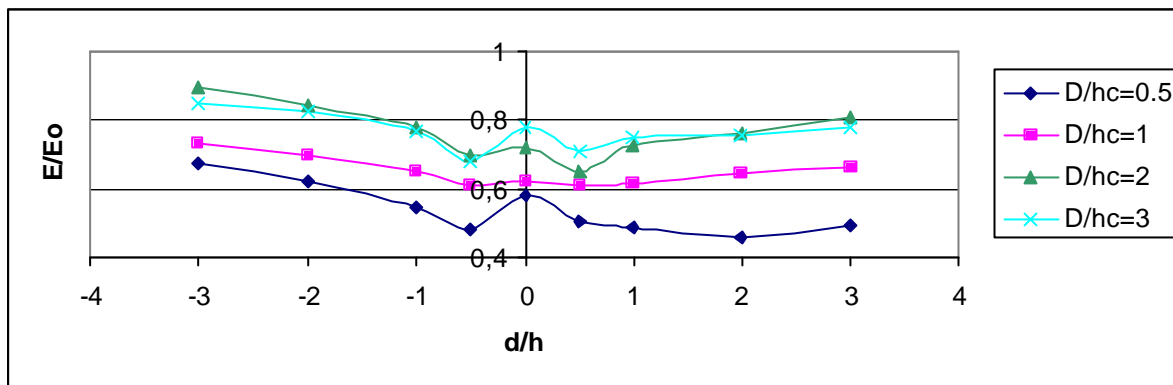
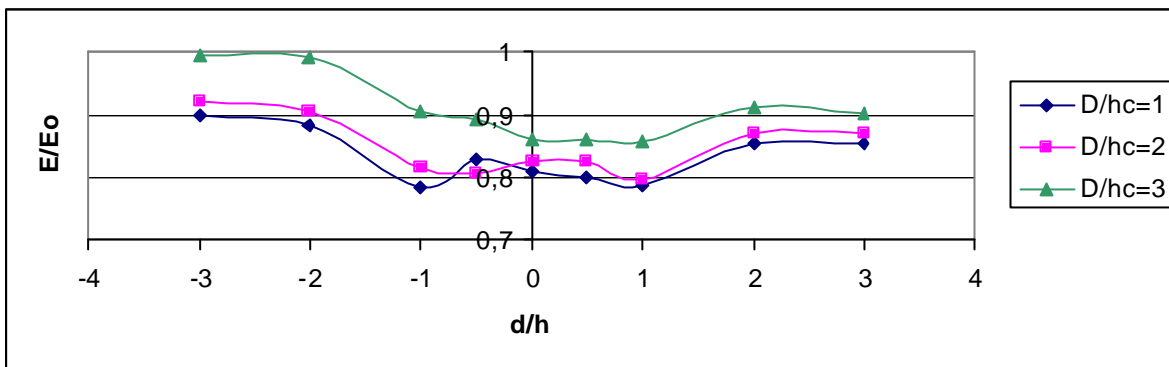
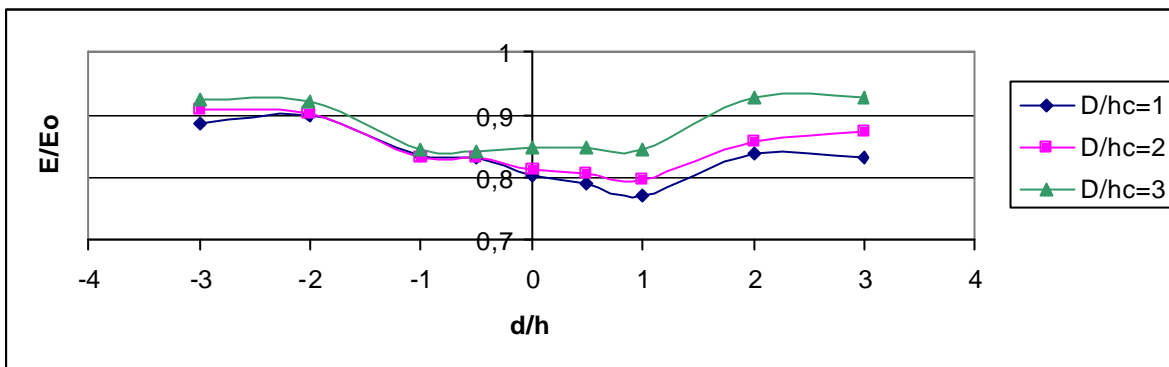


Figure IV.31. Variation du rapport E/E_0 en fonction de position de la sonde (d/h).

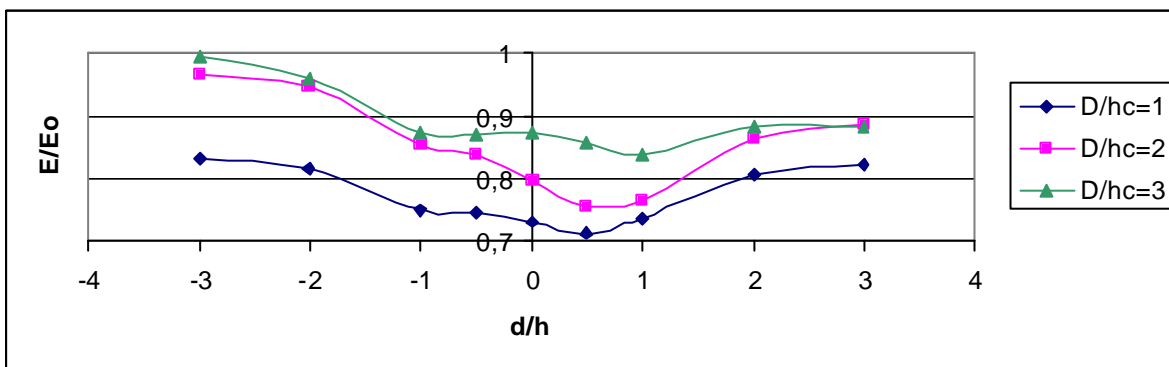
$h=16\text{cm}$, $U=0.2U_{0\%}$.



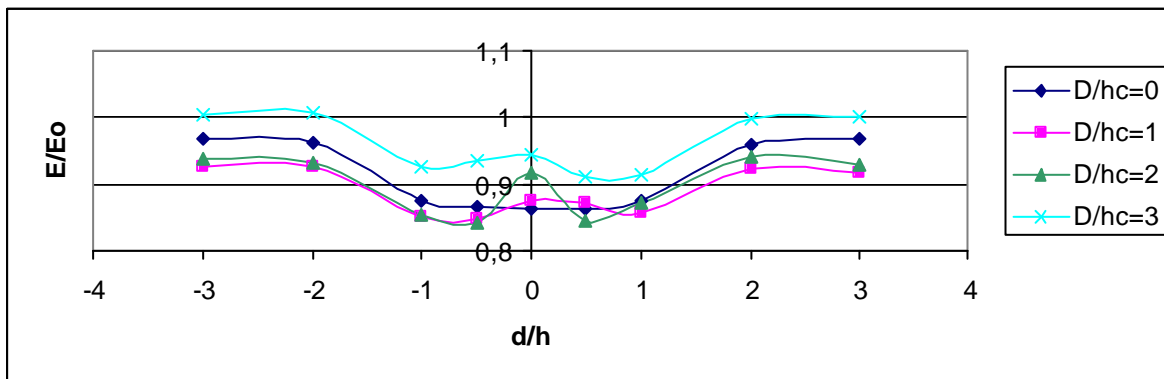
$hc=16\text{cm}$



$hc=12\text{cm}$



$hc=8\text{cm}$



$hc=4\text{cm}$

Figure IV.32. Variation du rapport E/E_0 en fonction de position de la sonde (d/h).

$h=16\text{cm}$, $U=0.4 U_{0\%}$.

A decorative rectangular frame with a double-line border and ornate, curved corners. The text is centered within this frame.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

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

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

L'étude développée dans notre mémoire a mis en évidence les performances de la sonde à capacité répartie (*SCR*) pour la mesure de l'intensité du champ électrique au sol.

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

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

Utilisant cette méthode de mesure (sonde à capacité répartie), nous avons déterminé la distribution du champ au sol, aussi bien dans le cas d'un plan sans paratonnerre que dans celui d'un plan avec paratonnerre.

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

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

Conclusion générale

En plus des résultats obtenus, ce travail nous a permis d'enrichir les connaissances permettant de comprendre la plupart des manifestations de la foudre, bien que plus qualitativement que quantitativement, de se familiariser avec les différents dispositifs d'essais et de mesure du Laboratoire de Haute Tension et d'observer les différentes forme d'ondes captées par l'oscilloscope numérique.

En perspectives à ce travail, nous proposons des travaux 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.
- En utilisant un modèle expérimental avec terre hétérogène (partie bonne conductrice et partie à conductivité variable).

Nous proposons aussi d'effectuer des calculs numériques de champ pour différentes configurations du sol en introduisant des structures mises à la terre (paratonnerre) dans les intervalles tige-plan.



BIBLIOGRAPHIE

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **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.
- [2] **R. Belaïcha** : « Zone d'attraction d'un paratonnerre vertical dans le cas d'une terre mauvaise conductrice », Thèse de Magister, Université de Bejaia, Algérie 1992.
- [3] **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.
- [4] **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.
- [5] **M. Aguet** : « Haute Tension », Vol. XXII, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1987.
- [6] **E. Kuffel, W. S. Zaengl**: « High voltage engineering », Pergamon Press, G.B; 1^{ère} Ed; 1984. pp: 463-488.
- [7] **R. Feynman**: Le cours de physique de Feynman. Electromagnétisme1, Chap 9 : L'électricité dans l'atmosphère. Inter-editions, Paris, 1979
- [8] **R. H. Golde** : « Lightning: T2 », Academic Press, 2nd edition, London, 1981.
- [9] **F. de la Rosa** : « Caractéristiques des coups de foudre pour application dans les réseaux électrique », Groupe de travail 33.01. Electra N° 193, December 2000
- [10] **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.
- [11] **R. B. Anderson, A. J. Eriksson** : « Les paramètres de la foudre en vue d'une application industrielle », Electra N° 96, 1980, pp. 65-101
- [12] **T. Horvath**: « Computation of lightning protection », Research studies press LTD, England; 1^{ère} Ed; 1991. pp: 1-76.
- [13] **C. Gary** : « La foudre : Des méthodologies antiques à la recherche moderne », Edition Masson, 1994, pp : 3-11.

- [14] **K. Mostefaoui** : « Perturbations électromagnétique dues à la foudre sur les lignes Haute-Tension », Thèse de Magister, ENP, Alger, Algérie, 2005.
- [15] **Z. Quan, S. Caixin, L. Lifeng, S. Wenxia, A. Wendu** : « Electromagnetic environment of the EHV transmission line and its effect », IEEE, P1-39, pp 229-232
- [16] **A. Boubakeur** : « Influence of earth electrogeological properties on lightning protection modelisation », Proceeding of the IEEEA, International Annual Conference, IEEEA'97, Vol.1, Batna, Dec 1997, pp.17-21.
- [17] **W. Janischewskyj, V. Shostak, A.M. Hussein**: «Lightning electric field characteristic of first and subsequent return strokes to a tall tower», IEEE, S6, pp1.270-1.274
- [18] **R. Boudissa, S.Djafri** : « Etude théorique et pratique de l'influence de la forme d'un paratonnerre sur la zone de protection contre la foudre », Conférence National de la Haute Tension, CNHT'1997, Actes de la deuxième conférence nationale sur la Haute-Tension, Tizi-Ouzou, Novembre 1997, pp. 143-147.
- [19] **K. Nacreddine** : « Zone Protection contre la foudre sur un sol hétérogène : Simulation numérique », Thèse de Magister, ENP, Alger, Algérie 1994.
- [20] **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.
- [21] **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.
- [22] **A. Rahmani** : «Détermination des zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal dans le cas d'une mauvaise conductrice », Thèse de Magister, ENP, Alger, Algérie, 1996.
- [23] **A. Boubakeur, R. Belaïcha** : « Modèle de protection contre la foudre dans le cas d'une terre mauvaise conductrice », Proceeding du 2^{ème} CEA, Vol. 1, Alger, 1995.
- [24] **A. Rahmani, A.Boubakeur, H.Brouri** : « Zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal dans le cas d'une terre discontinue», Conférence National sur la Haute Tension, CNHT'2002, Algerian Journal of Technology, Special Issue, Ghardaïa, Janvier 2002, pp. 144-147.
- [25] **A. Boubakeur, A.Chouchou, H.Bouri, A.Rahmani** : « Influence of earth discontinuity on the capture zones of lightning conductor », 26th International Conference on Lightning Protection, Poland ,September 2002.

- [26] **A. Boubakeur, A. Chouchou, S. A. A. Boumaza** : « Influence of earth discontinuity on the capture zones of a vertical lightning conductor », 25th International Conference on Lightning Protection, Rhodes, Greece, September 2000.
- [27] **A. Boubakeur, S. A. A. Boumaza, R. Belaicha, R. Boudissa** : « Influence of earth heterogeneity on negative lightning breakdown », 23rd International Conference of Lightning Protection (ICLP), Paper 4.12, Birmingham, 1998
- [28] **Rapport de l'ENERIS** : « Protection des installations industrielles contre les effets de la foudre », N°22, Juillet-Aout 1995
- [29] **M. Dobardic** : « Station d'essais au choc à haute tension », Rapport interne, Laboratoire de ENP Haute Tension, Alger, Algérie, 1972.
- [30] **C. E. I.60** ; « Techniques d'essais de haute tension », 1973, (60-01/02).
- [31] **N. Adjim** : « Identification et évolution de la population d'électrons initiaux dans l'air en champ électrique inhomogène », Thèse de Magister, USTO, Oran, Algérie, 1994.
- [32] **S. Ramaoun** : « Amorçage dans les grandes. Application à la protection contre la foudre », Thèse de Magister, USTO, Oran, Algérie, 1994.
- [33] **A. Boubakeur, R. Belaicha, R. Boudissa** : « Influence of earth conductivity on the capture zones of an horizontal lightning conductor », 23rd International Conference of Lightning Protection (ICLP), Paper 4.12, Firenze, Italy, September 1996.
- [34] **L. Mokhnache, A. Boubakeur, S. Boukhteché** : « Modèle de calcul de la rigidité diélectrique de l'air dans un arrangement pointe-barrière-plan en présence de la charge d'espace par la méthode des éléments finis », Conférence National de la Haute Tension, CNHT'1997, Actes de la deuxième conférence nationale sur la Haute-Tension, Tizi-Ouzou, Novembre 1997, pp. 24-29.
- [35] **L. E. Juhlin** : « Les mesures de protection des stations de base radio », Groupe de travail C.4.2.02. Electra N° 218, Février 2005
- [36] **Rapport de l'ENERIS-DRA** : « Le risque foudre et les Installations Classées pour la Protection de l'Environnement »-2001-25427.
- [37] **Cahier Technique Merlin Gerin**. N°151, pp 8-12