

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE D'ALGER



DEPARTEMENT de GENIE ELECTRIQUE

MEMOIRE

Présentée pour obtenir

LE GRADE DE MAGISTER EN ELECTROTECHNIQUE

Option : Réseaux et Haute Tension

par

KHECHEKHOUCHE Ali

Ingénieur d'Etat en Electrotechnique ENP- Alger

Mesure du Champ Electrique par la Méthode de la Sonde à Capacité Repartie dans un Système Tige-Terre Discontinue sous Tension de Choc de Foudre

Soutenue le : 16 / 12 / 2004 devant la commission d'examen :

Président :	M ^r : R. IBTIOUEN	Professeur, ENP
Rapporteurs:	M ^r : A.MEKHALDI M ^r : A.BOUBAKEUR	Maître de conférences, ENP Professeur, ENP
Examineurs :	M ^{me} : N.OUSSEDIK M ^r : H.MOULAI M ^r : R.TAHMI	Chargée de cours, ENP Maître de conférences, USTHB Chargé de cours, ENP

المخلص :

الهدف من هذا البحث هو إيجاد شدة الحقل الكهربائي على سطح مستوي غير مستمر لنظام قضيد . سطح وذلك بالطرق التجريبية، هذا النظام يماثل القفزة الأخيرة لرأس قناة صاعقة سالبة نازلة، وهذا تحديدا قبل الصدمة الأخير . لقد استخدمنا لهذا الغرض طريقة الملتقط ذو السدة الموزعة لقياس شدة الحقل في عدة نقاط من المستوي و بعدة أشكال لهذا النظا . النتائج المتحصل عليها في بحثنا قد تؤدي في مجملها إلى تحسين تفسير الأعمال السابقة في نفس المجال و التي أجريت من قبل مخبرنا للتوتر العالي في مجال صلادة المجال الهوائي لنظام قضيد ارض . ير مسطحة .
الكلمات المفتاحية : الحقل الكهربائي، صلادة المجال الهوائي ، ارض غير مسطح .

Résumé :

L'objectif de nos travaux de recherche est de déterminer expérimentalement l'intensité du champ électrique à la surface d'un plan discontinu d'un système tige-plan. Ce système simulerait l'étape finale d'un traceur de foudre descendant négatif juste avant l'impact final. 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 discontinu.

Mots clé : mesure de champ électrique, rigidité des intervalles d'air, terre discontinue.

Abstract :

The aim of our research investigations is to determine practically the electric field intensity on the surface of a discontinuous plane of a rod-plane arrangement. 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-discontinuous plane air gaps strength.

Key words : Electric field measurement, air gaps strength, discontinuous earth.

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION

Évaluée en terme de risque, la nécessité de la protection contre la foudre n'est plus à démontrer. En effet, elle réduit les risques et les dégâts matériels si elle fait l'objet d'un soin attentif [01].

Les principales études, dans le but d'atteindre une meilleure protection, avaient pour objet l'explication du phénomène physique de la décharge électrique. Ces investigations ont conduit à élaborer une méthode de détermination de la distribution du champ électrique au sol, basée sur la connaissance du mécanisme d'impact de la foudre et mise en œuvre au moyen du « modèle électrogéométrique ».

Bien que ce modèle constitue néanmoins, une approche cohérente de la protection contre la foudre dans le cas d'un sol homogène et parfaitement conducteur, hypothèse rarement rencontrée en réalité, il ne présente pas une perfection absolue. En effet, sa formulation simpliste actuelle néglige un grand nombre de paramètres essentiels à une bonne détermination des points d'impact de la foudre. Parmi ces paramètres, les propriétés électrogéologiques semblent avoir une influence importante sur ces points d'impact [02] à [04].

Vu le nombre limité des investigations effectuées dans ce domaine, le Laboratoire de Haute Tension de l'ENP contribue, depuis 1985, à l'étude de l'influence des propriétés électrogéologiques dans le domaine de la foudre et la protection contre la foudre [02] à [20]. Pour élargir ces études, le Laboratoire aborde une nouvelle vue, qui concerne la détermination expérimentale du champ électrique au niveau du sol. Dans le cas de notre étude le sol a été choisi discontinu représentant le cas limite d'hétérogénéité.

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 en général et tenant compte des propriétés électrogéologiques du sol en

particulier. Les principaux résultats d'investigations sur des terres homogènes, hétérogènes et discontinues sont analysés.

Le deuxième chapitre est consacré aux méthodes de mesure du champ électrique au sol. Nous décrivons avec 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 par R. Benaïcha en collaboration avec le Laboratoire de Haute Tension de l'ENP, et dont les références seraient disponibles dans un proche avenir.

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

Dans le quatrième chapitre nous présentons et discutons les différents résultats qui mettent en relief l'influence de plusieurs paramètres sur la distribution du champ électrique dans le cas de la terre discontinue.

Enfin, nous terminons notre mémoire par une conclusion générale.

CHAPITRE I
FOUDRE ET PROPRIETES
ELECTROGEOLOGIQUES DU SOL

I.1. Foudre et protection contre la foudre

I.1.1. Champ électrique au sol et effet de couronne

Par beau temps l'intensité du champ électrique, orienté vers la surface de la terre, est de l'ordre de 0,1 à 0,4 kV/m. La présence d'impuretés et de gouttelettes d'eau dans l'atmosphère, provoque des accentuations locales du champ. Ce dernier est, sous l'effet des charges électriques négatives de la base d'un nuage orageux, inversé puis augmenté considérablement. Lorsqu'il atteint -10 à -15 kV/m, une décharge au sol est imminente.

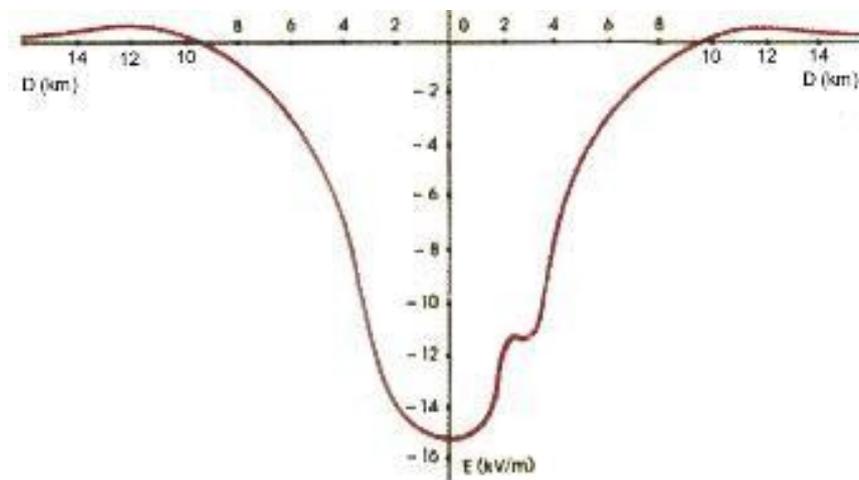


Figure I.1- schéma du champ électrique au sol.

Ces valeurs de champ électrique supposent un sol horizontal plat. Or, toute aspérité peut augmenter le champ local par un effet de concentration des lignes de champ électrique. En effet, le champ calculé au sommet d'une demi sphère posée sur un plan est le triple du champ moyen. Cet effet s'accroît lorsque la demi sphère se déforme en un demi ellipsoïde pointu. Ainsi, pour un rapport entre grand axe et petit axe de l'ellipsoïde égal à 30, le champ est multiplié par un rapport de 300. Comme le seuil d'ionisation est de l'ordre de 30 kV/cm, il suffit dans ces conditions particulières d'un champ ambiant d'une dizaine de kV/m pour provoquer un effet de couronne au sommet de l'ellipsoïde [21] [22].

I.1.2. CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES DE LA Foudre

I.1.2.1. Classification des coups de foudres

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

- du sens de développement du traceur principal (ascendant ou descendant)
- de la polarité du traceur principal (positive ou négative).

La figure I.2 résume ces catégories, selon [23].

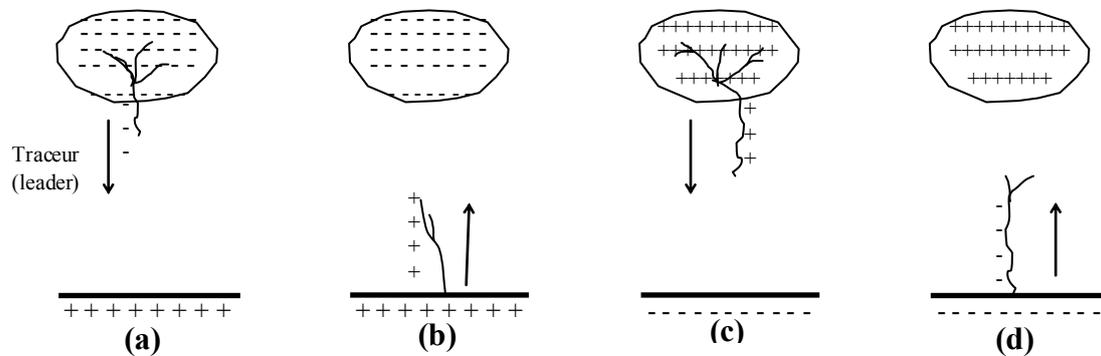


Figure.I.2 Représentation schématique des différents coups de foudre

- (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

Dans les régions à climat tempéré, 90% des coups de foudres sont descendants négatifs [21] [24] à [26].

I.1.2.2 Mécanisme du coup de foudre descendant négatif

A l'œil nu, le coup de foudre apparaît comme une seule décharge lumineuse, tandis que les équipements photographiques à grande vitesse, utilisés sur sites, ont montré que son développement est formé en plusieurs phases. La figure I.3 illustre ces différentes phases et les courants de foudre induits au sol.

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

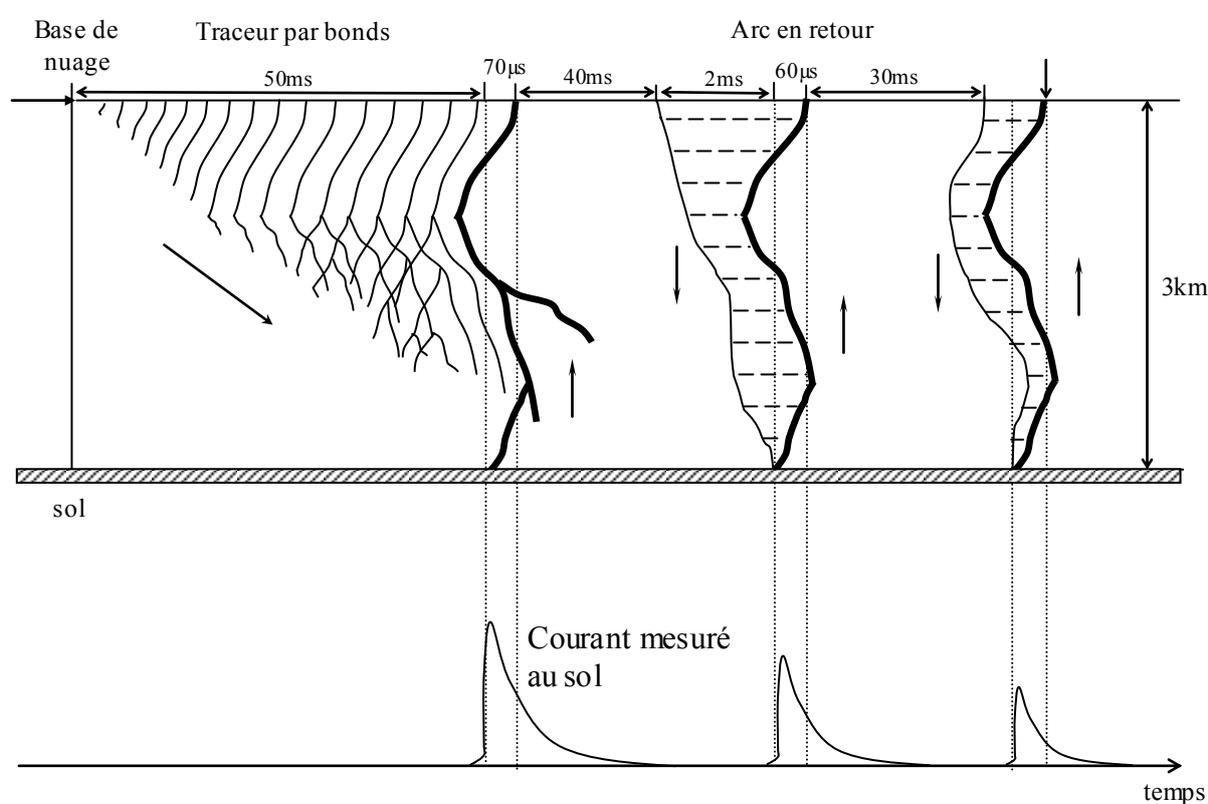


Figure I.3- Déroulement spatio-temporel d'un coup descendant et courants mesurés à la surface de la terre.

Durant la première étape, le traceur par bonds (en Anglais: stepped leader), se développe en zigzag par sauts de 50 m à 100 m séparés par des temps d'arrêts. La pointe du traceur « pilote streamer » se propage vers les zones d'air vierges avec une vitesse d'environ 0,1 m/ μ s. Le pilote streamer est suivi par le stepped leader qui a une vitesse d'environ 0,5 m/ μ s. et un courant de quelques centaines d'Ampères [21][24][27].

Dès que le traceur s'approche du sol, le champ électrique provoque une concentration de charges au niveau du sol, beaucoup plus accentuée au niveau de certains points de grandes hauteurs (généralement des tours, des pylônes ou des arbres...). Des prédécharges ascendantes positives, appelées décharges de connexion, prennent naissance à partir de ces points à la terre dès que l'intensité critique du champ électrique y est atteinte. Lorsque les deux traceurs se rejoignent, l'Arc principal ou l'arc en retour se propage depuis le sol, avec une grande vitesse (environ 50 m/ μ s) en traversant le canal ionisé établi auparavant. L'arc en retour génère un courant de forte intensité et de faible durée : quelques kiloampères à plusieurs dizaines de kiloampères pendant des dizaines à des centaines de microsecondes. Le passage de ce courant accroît brutalement, par chauffage, la luminosité du canal ionisé (l'éclaire) ainsi que la pression à l'intérieur du canal par rapport à la pression de l'extérieur. La température du canal est de 15.000°C à 20.000°C L'onde résultante provoque le coup de tonnerre.

Souvent, l'arc en retour est suivi de décharges subséquentes, dont le traceur de la deuxième décharge est appelé trait flèche ou « dart leader ». Le trait progresse d'une façon continue suivant le même trajet du traceur par bonds mais avec une vitesse 10 fois plus grande [21].

Il reste à signaler que les décharges nuages-terre représentent seulement 10% de l'ensemble des décharges atmosphériques. La majorité de ces dernières s'effectue entre nuages. On les appelle dans ce cas « sheet leader » en Anglais [24] [27].

I.2. INFLUENCE DES PROPRIETES ELECTROGEOLOGIQUES DU SOL.

INTRODUCTION

Dans le domaine de la protection contre la foudre, les modèles utilisés, plus particulièrement le modèle électrogeométrique, considère que la terre est homogène, plane et parfaitement conductrice. En réalité cela n'est pas généralement le cas, car la terre est plutôt hétérogène, contenant des irrégularités et sa conductivité est variable d'une couche à une autre du sol.

Plusieurs travaux sur la fréquence de foudroiement d'un lieu donné de la terre, ont confirmé que la nature du sol pourrait avoir une influence considérable sur la position finale du point d'impact de la foudre [28] [21]. Ceci a amené le Laboratoire de Haute Tension de

l'ENP à s'intéresser à l'influence des propriétés électrogeologiques du sol sur les phénomènes de décharge et sur la protection par paratonnerre [02] à [20].

1.2.1 PROPRIETES ELECTROGEOLOGIQUES DE LA TERRE ET

DISTRIBUTION DU CHAMP AU SOL

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

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

Soient σ la conductivité du sol, ε sa permittivité, et ρ sa densité volumique de charges. L'équation de continuité s'écrit [03] :

$$\frac{d\rho}{dt} + \frac{\sigma}{\varepsilon} \cdot \rho = 0 \quad (I.1)$$

La solution de cette équation différentielle est donnée par :

$$\rho(t) = \rho_0 \cdot e^{-(t-t_0)/T_c} \quad (I.2)$$

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

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

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

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

I.2.2. MODELE D'ETUDES UTILISEES PAR J.FERRAS.

Les premiers travaux concernant l'influence de l'hétérogénéité du sol sur le point d'impact de la décharge de foudre, ont été effectués au laboratoire de l'ENP par J.Ferras [02] [03][07]. Dans ces travaux, deux modèles ont été réalisés, l'un numérique et l'autre expérimental.

Le premier est un modèle mathématique qui tient compte des paramètres réels de la foudre naturelle, tandis que le deuxième est une simulation réduite du saut final de la foudre au laboratoire.

I.2.2.1. Modèle mathématique

Ce modèle a été établi dans le but de déterminer numériquement la variation de l'intensité du champ électrique à la surface du sol lors de l'avancement du traceur descendant, ce qui permet la détermination de l'impact probable. Ce modèle tient compte de la variation de la densité de charges dans le sol et considère chaque position du traceur comme un état statique, parce que le temps d'un saut est relativement court par rapport au temps d'attente entre deux sauts. L'utilisation des équations de Maxwell, permet la détermination de la répartition du champ électrique sur la surface du sol, le domaine d'étude a été choisi de telle façon qu'il présente une symétrie cylindrique. Il est constitué de deux zones différentes avec interface verticale [03].

Le calcul du champ électrique au niveau du sol a été effectué pour chaque position du traceur descendant, selon le schéma bloc de la figure I.4.

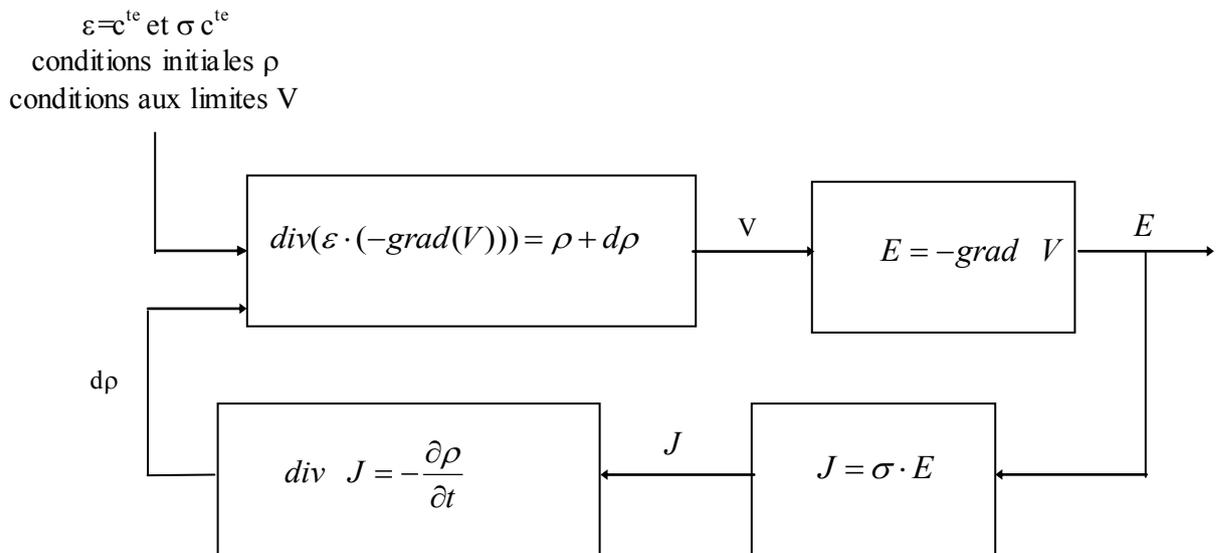


Figure I.4. Schéma-bloc des relations entre le potentiel, le champ électrique, la densité de courant et la variation de la densité des charges dans le sol [03].

Pour une position donnée du traceur caractérisée par les conditions aux limites V et les conditions initiales ρ , le potentiel V a été déterminé à l'aide de l'équation de Poisson, dont la résolution numérique a été faite par la méthode des éléments finis.

$$\operatorname{div}(-\operatorname{grad} V) = \frac{\rho}{\varepsilon} \quad (\text{I.3})$$

L'intensité du champ électrique est déterminée par l'équation suivante :

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

La variation de la densité de charge est donnée par :

$$\operatorname{div} J = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (\text{I.5})$$

avec :

$$J = \sigma \cdot E \quad (\text{I.6})$$

Pour la position suivante du traceur, on refait les mêmes étapes de calcul, en prenant comme conditions initiales, les conditions calculées dans la position précédente. Les résultats de calcul ont permis de tirer les remarques suivantes :

- ✓ Au niveau de l'interface des deux milieux du sol, le champ électrique peut avoir pour certaines configuration une forte composante tangentielle.
- ✓ Pour certaines configurations, le champ électrique est plus intense au niveau de l'interface de deux milieux constituant le sol qu'au-dessous du traceur.
- ✓ L'intensité du champ au niveau de l'interface, dépend du rapport des conductivités des deux matériaux constituant le sol hétérogène. Pour un rapport donné, cette intensité diminue au fur et à mesure que la distance qui sépare l'axe de la décharge de l'interface augmente.

I.2.2.2. Modèle expérimental

Afin d'examiner l'influence des propriétés électrogeologiques du sol sur le point d'impact d'une décharge de foudre, un modèle expérimental a été réalisé. Dans ce modèle, la terre hétérogène est simulée par deux matériaux ayant des conductivités différentes (acier + sable sec ou acier + sable humide), l'hétérogénéité du sol étant caractérisée par le rapport des conductivités des deux milieux. La position de la tige est déterminée par sa hauteur h par rapport au sol et la distance x entre son axe et l'interface (figure I.5).

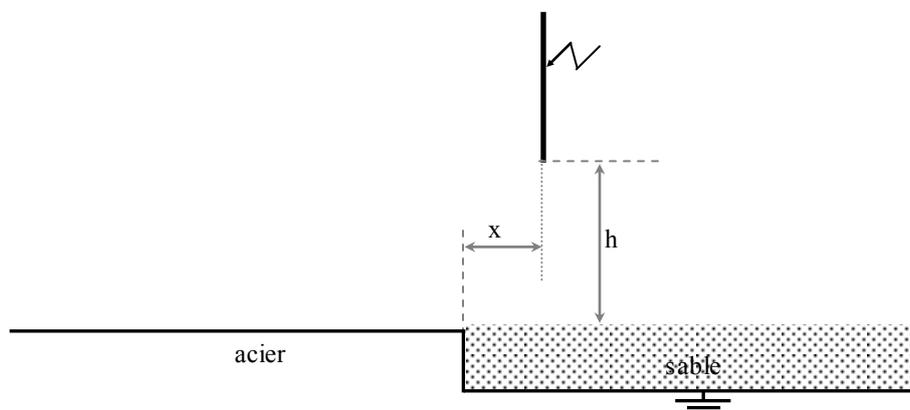


Figure I.5. Modèle expérimental réduit

Les résultats obtenus avec ce modèle (figure I.7), montrent que :

- ✓ Pour les deux cas (acier + sable sec et acier + sable humide), la fréquence de foudroiement de l'interface diminue avec l'augmentation de la distance (x/h).
- ✓ Pour une même distance (x/h), la probabilité de foudroiement de l'interface est plus élevée avec la configuration (acier + sable sec). L'attraction des décharges de foudre vers l'interface augmente avec l'augmentation de degré d'hétérogénéité du sol.

Les premiers travaux de J.Ferras ont conduit à l'ouverture d'un axe de recherche au Laboratoire de Haute Tension de l'ENP, sur l'influence des propriétés du sol sur la protection contre la foudre de manière générale [05][19][30][31].

Dans ce qui suit nous présentons les résultats de travaux de recherches qui ont un lien directe avec les notre, afin de nous permettre leur interprétation. Ces travaux concerne la rigidité diélectrique des intervalles d'air avec une terre qui n'est pas à la fois homogène et conductrice. Nous nous intéressons plus particulièrement au cas de la terre discontinue.

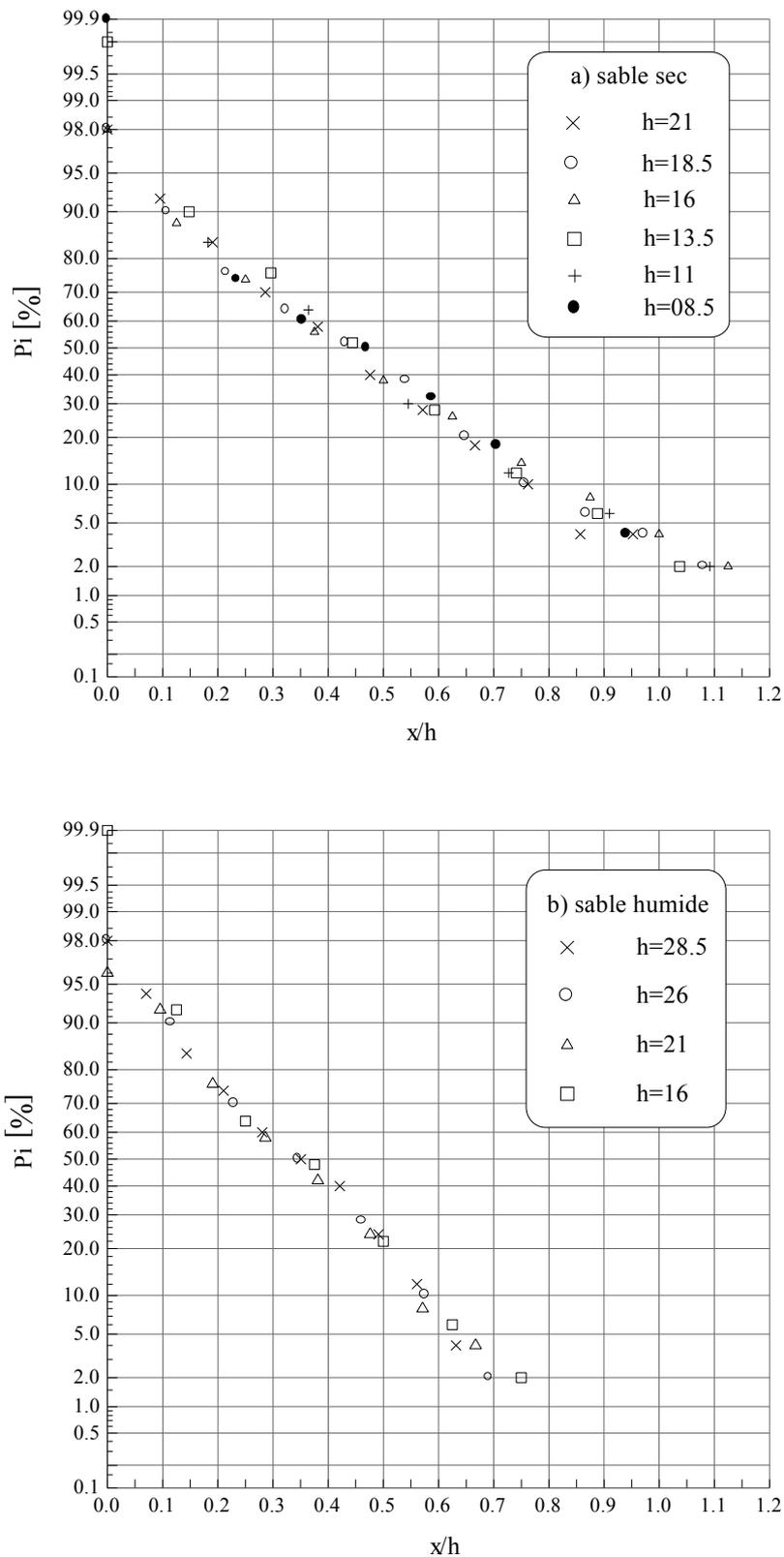


Figure I.7. Distribution des décharges de foudre négatives à l'interface d'un sol hétérogène [03].

I.3. PROPRIETES ELECTROGEOLOGIQUES DU SOL ET RIGIDITE DES INTERVALLES D'AIR POINTE- PLAN SOUS TENSION DE CHOC DE Foudre

La détermination des zones d'attraction d'un paratonnerre nécessite la connaissance de la tension à 100% de décharges disruptive ($U_{100\%}$) du système pointe-plan sans paratonnerre. Les résultats des travaux effectués sur l'étude de la rigidité des intervalles d'air tige-plan ont montré que les propriétés électrogeologiques du sol ont une grande influence sur la valeur de la tension $U_{100\%}$.

I.3.1 CAS D'UN SOL HOMOGENE MAUVAIS CONDUCTEUR

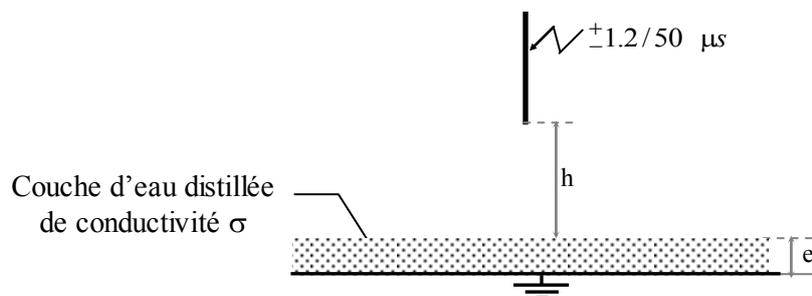
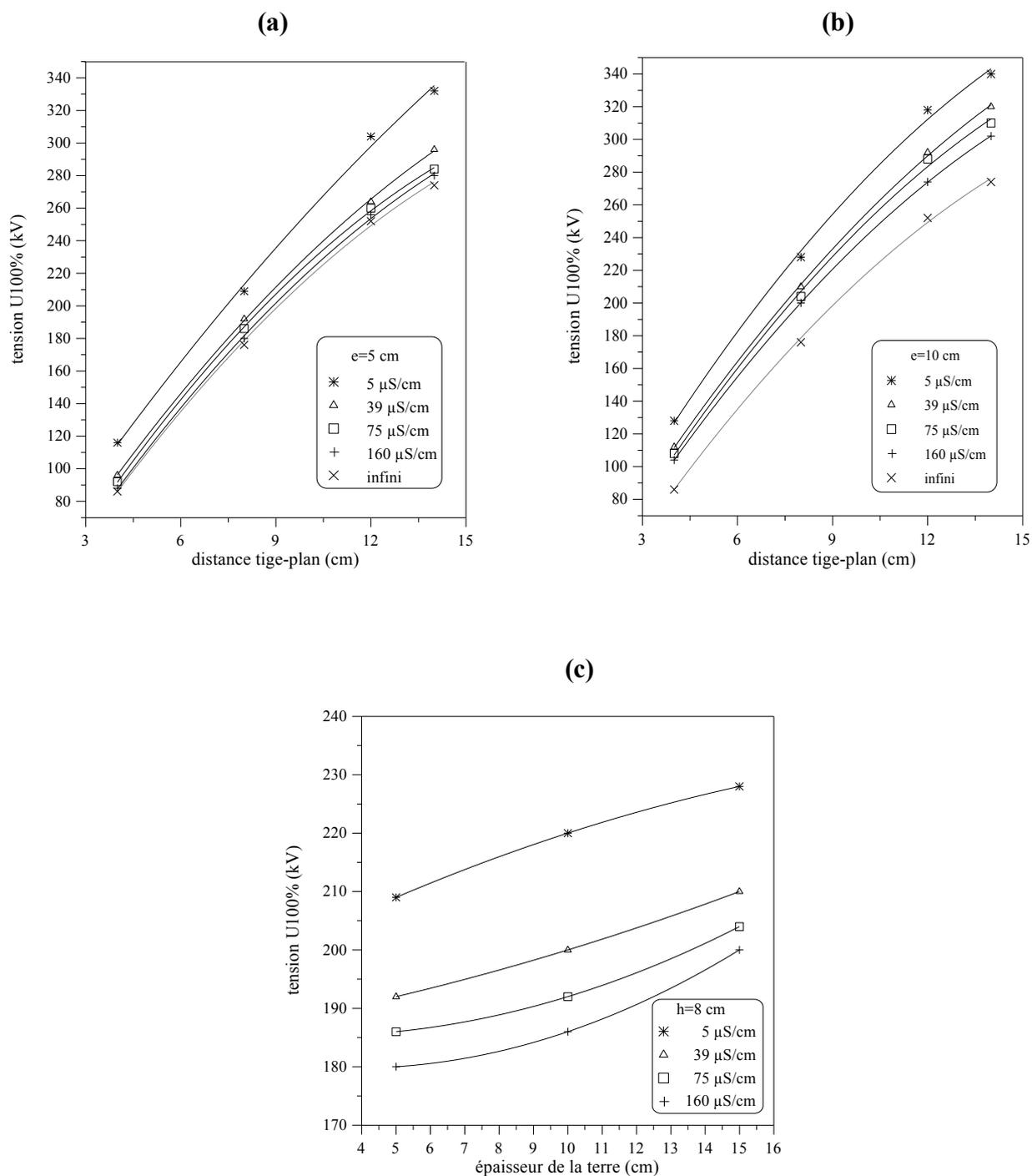


Figure I.8. Système tige-plan avec terre mauvaise conductrice.

D'après des essais effectués avec la configuration de la figure I.8, il a été constaté que la tension à 100% de décharges 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 lorsque l'épaisseur de la couche de terre augmente (figure I.9) [14] [17].



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

Figure I.9. Influence de la conductivité et de l'épaisseur de la couche mauvaise conductrice sur la tension à 100% de décharges disruptives ($U_{100\%}$)

Une autre étude sur l'influence de la conductivité du sol mauvais conducteur sur les 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. Ceci est vérifié pour les deux polarités positive et négative de la tension appliquée. Nous présentons à la figure I.10 les résultats obtenus par [04] dans le cas de la polarité négative.

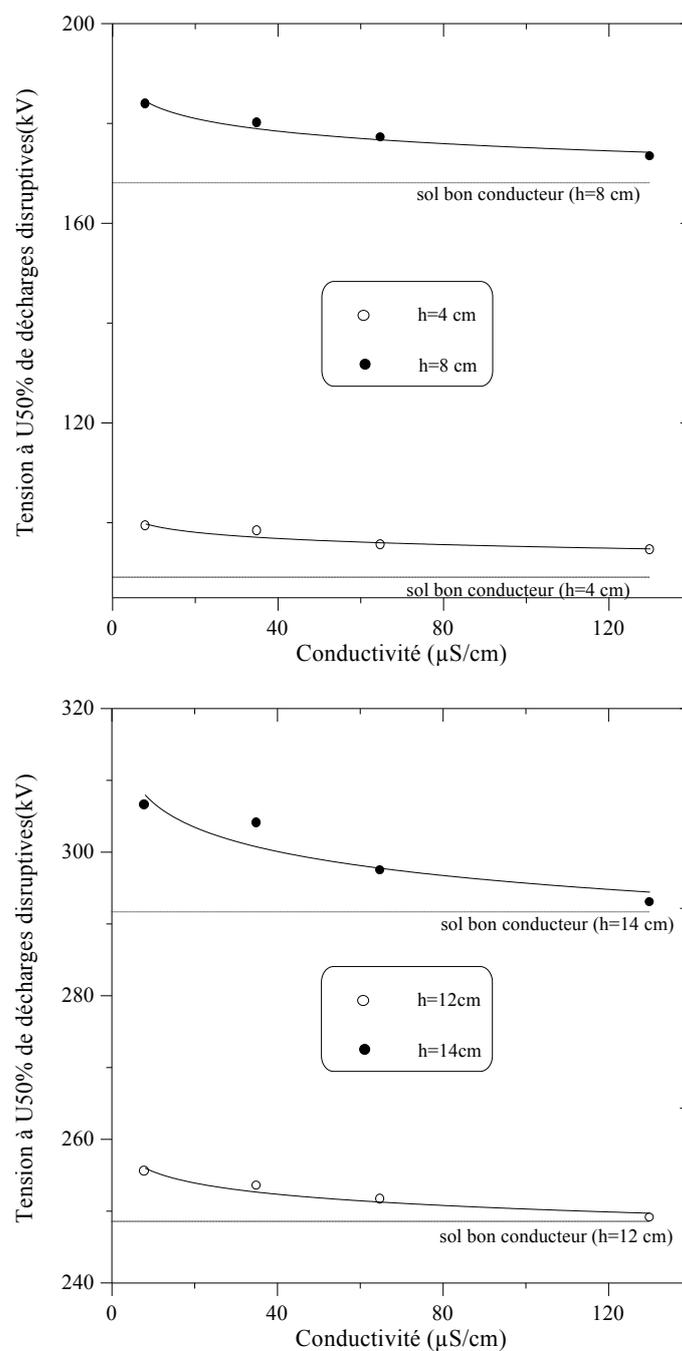


Figure I.10. La tension à 50% de décharges disruptives ($U_{50\%}$) en fonction de la conductivité du sol.

I.3.2 CAS D'UN SOL HETEROGENE

Le modèle expérimental utilisé pour étudier la configuration tige-plan avec terre hétérogène est représenté à la figure I.14, 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 [02] à [20]. 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. La distance d , la conductivité du matériau mauvais conducteur σ , la longueur h de l'intervalle tige-plan, l'épaisseur (e), et la polarité de la tension appliquée, caractérisent la configuration du système avec terre hétérogène.

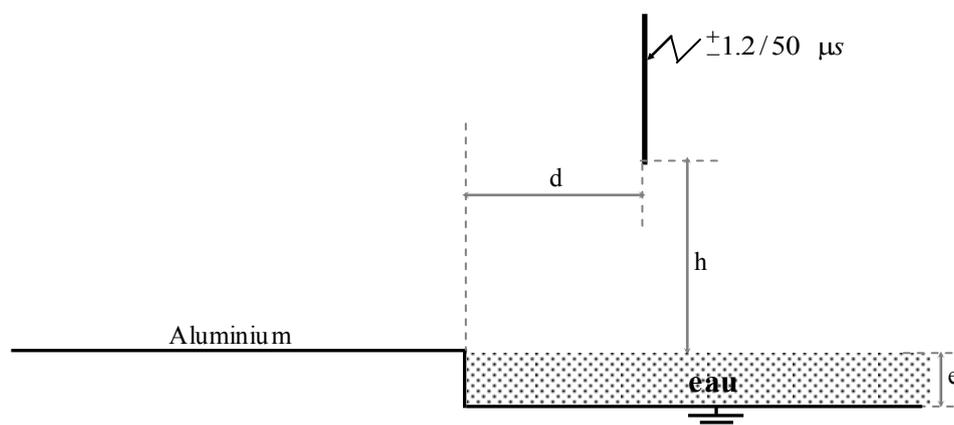


Figure I.14.— Système tige-plan avec terre hétérogène.

D'après les résultats d'essais obtenus pour la polarité négative (figure I.15 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, c'est-à-dire pour un degré d'hétérogénéité du sol plus élevé. Il est à noter que, lorsque la tige est située sur la partie mauvaise conductrice de la terre à une grande distance par rapport à l'interface (d positive), la configuration tige-plan hétérogène tend vers le système tige-sol homogène de même hauteur h et de même conductivité de sol. De même, lorsque la tige s'éloigne de l'interface vers les grandes distances négatives, on tend vers le système tige-plan

bon conducteur de même hauteur h . Les comportements de l'intervalle pour les deux polarités de la tige semblent être similaires [02] à [20].

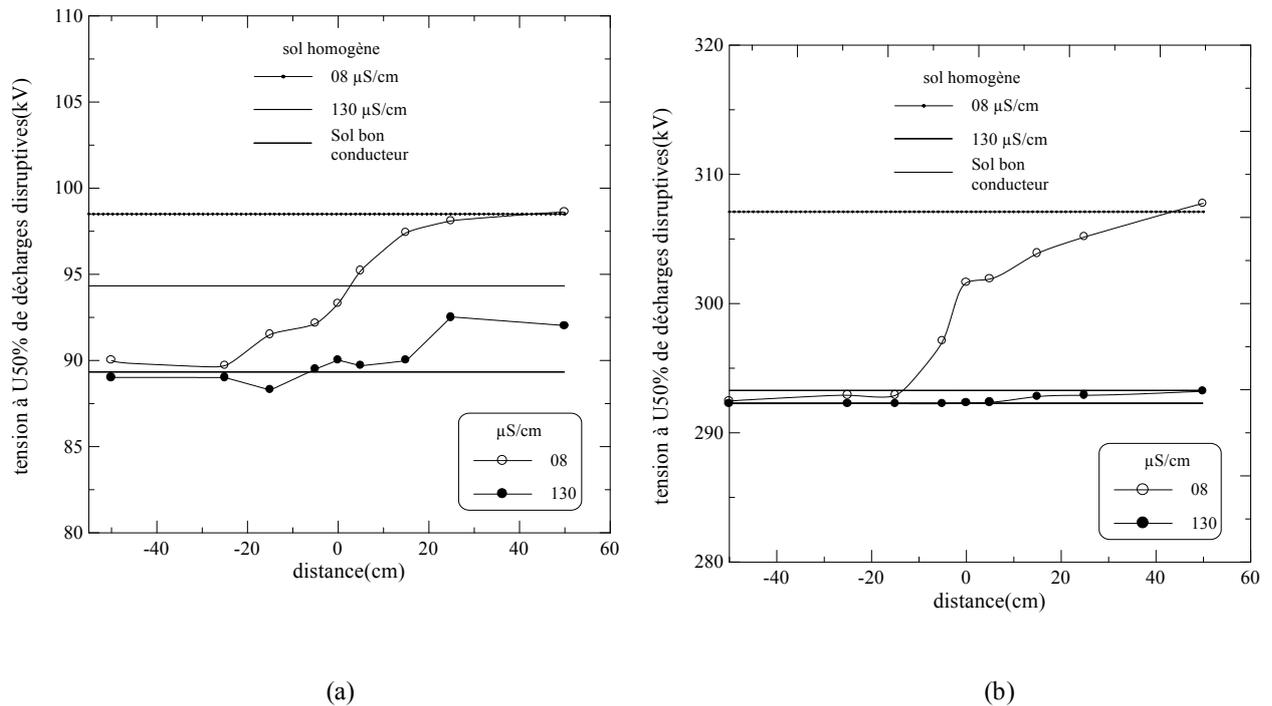


Figure I.15. Tension $U_{50\%}$ en fonction de la distance dans le cas de la tige négative.
 (a) $h = 4$ cm (b) $h = 14$ cm

1.3.3 CAS D'UN SOL DISCONTINU

Le modèle expérimental utilisé pour étudier la configuration tige-plan avec terre discontinue est représenté à la figure I.16.

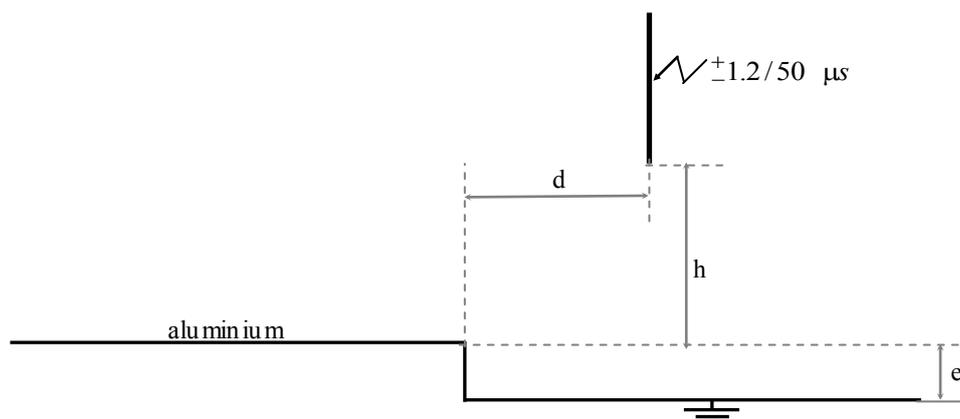


Figure I.16. Configuration du système tige-plan avec sol discontinu.

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 la cette dernière et l'interface. Les résultats obtenus au laboratoire de l'ENP sont présentés à la figure I.17 [02] à [20].

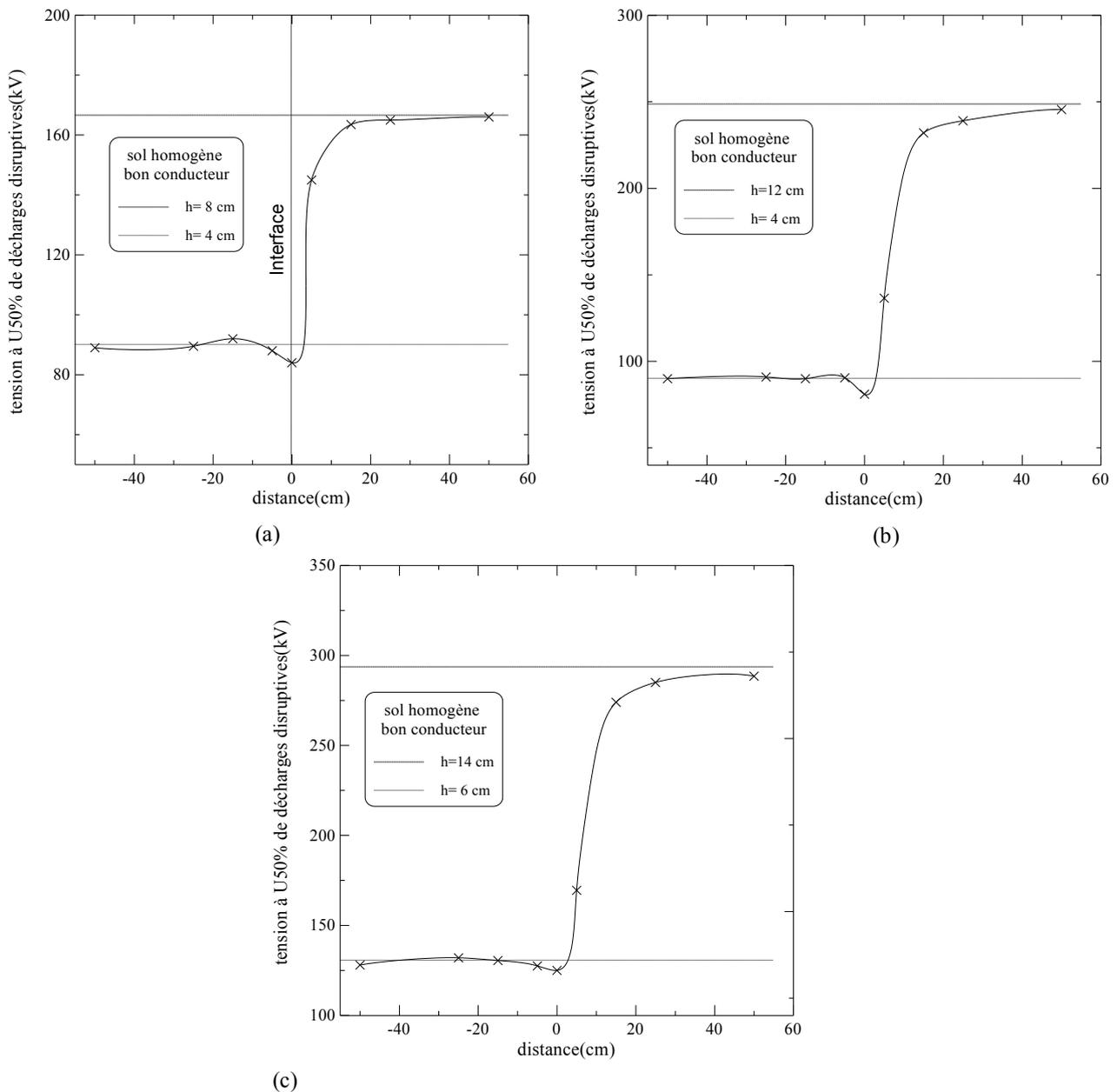


Figure I.17. Variation de $U_{50\%}$ en fonction de la distance d .

Polarité négative :
 a) $e = 4$ cm, $h = 4$ cm.
 b) $e = 8$ cm, $h = 4$ cm.
 c) $e = 8$ cm, $h = 6$ 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 disparue dans le cas de la tige positive (figure II.17). 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, et plus rigide que le système tige pointe-plan.
- ✓ En polarité négative, l'influence de la discontinuité est plus importante lorsque la profondeur e augmente (h étant constante).

I.4. CONCLUSION

A partir des résultats des travaux effectués précédemment par d'autres chercheurs, nous pouvons conclure que l'hétérogénéité du sol modifierait considérablement la distribution du champ électrique sur la surface de l'électrode mise à la terre. Cette modification serait 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 a pour effet d'augmenter la fréquence de foudroiement de l'interface.

Suite à ces travaux, notre étude s'inscrit dans le même axe de recherche et concerne la distribution du champ électrique sur un sol discontinue et l'influence de l'interface.

CHAPITRE II
MESURE DE CHAMP ELECTRIQUE

INTRODUCTION

La mesure de champ électrique joue un rôle très important dans la construction et la résolution des problèmes d'équipements utilisés sous haute tension.

La connaissance de la distribution du champ électrique autour d'un ouvrage donné dont une ou plusieurs parties sont directement ou indirectement soumises à un potentiel est indispensable quant au dimensionnement des éléments constituant cet ouvrage. Cette connaissance est également nécessaire pour l'estimation de l'influence que cet ouvrage peut engendrer sur les objets placés à sa proximité. Ainsi, un certain nombre de techniques de mesure est présenté dans ce chapitre.

Fondamentalement, un appareil de mesure de l'intensité du champ électrique présente deux parties, la sonde (sensible au champ) et le détecteur qui comprend le circuit de traitement du signal et un indicateur analogique ou numérique.

La dimension de la sonde sera telle que les distributions de charge sur les surfaces limites qui génèrent le champ (surfaces sous tension et mises à la terre) ne soient pas perturbées de manière significative lorsque la sonde y est introduite [26].

II.1 METHODE DIRECTE DU VOLTMETRE ELECTROSTATIQUE

Ce voltmètre est constitué de deux électrodes planes et parallèles A et B telles que le champ électrique E_h soit homogène entre elles [26]. La pression électrostatique subie par l'électrode de mesure b, placée au centre de l'électrode B, entraîne la déviation de l'aiguille i se déplaçant sur une échelle pouvant être étalonnée directement en kilovolts (Figure.II.1).

Les gammes de mesure de l'appareil se règlent en modifiant la distance d.

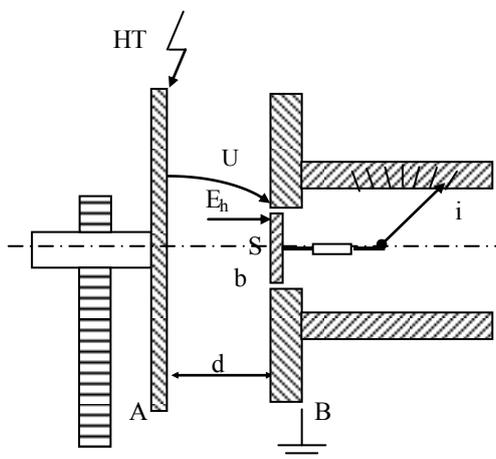


Figure.II.1 Voltmètre électrostatique

II.2 METHODE INDIRECTE DE WILSON

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

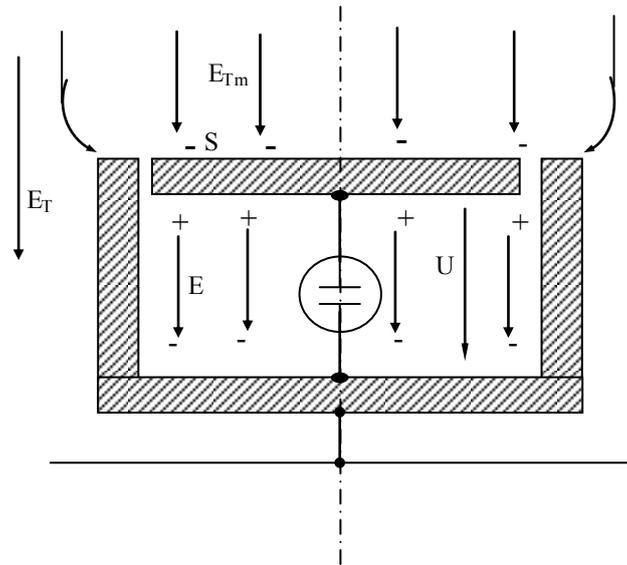


Figure.II.2 Méthode de Wilson

D'après le théorème de Gauss on a :

$$\epsilon_0 ES = CU \quad (\text{II.1})$$

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

$$E_{Tm} = \frac{CU}{\epsilon_0 S} \quad (\text{II.2})$$

Toute sonde placée dans un champ électrique provoque des perturbations à ce dernier.

Pour définir l'acuité maximale d'un champ régnant entre deux électrodes de forme géométrique quelconque, on peut comparer le champ électrique homogène équivalent

$E_T = U/d$ entre ces deux électrodes au champ électrique maximal E_{Tm} . C'est pour cette raison que l'on introduit un facteur de forme η .

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

Avec

E_{Tm} : le champ électrique mesuré.

E_T : le champ électrique à la surface du sol.

II.3 METHODE INDIRECTE DU VOLTMETRE ROTATIF (MOULIN A CHAMP ELECTRIQUE)

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

La valeur moyenne du courant mesuré $i(t)$ est :

$$I_m = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt = \frac{1}{T} Q(t) \quad (\text{II.3})$$

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

par la relation : $n = \frac{1}{T} \text{ (s}^{-1}\text{)}$

Alors : $Q(t) = I_m / n \text{ (C)}$ (II.4)

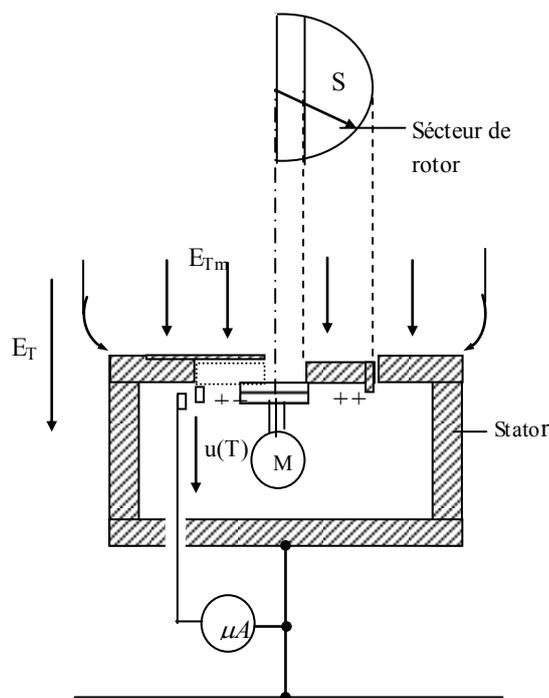


Figure II.3 Méthode du voltmètre rotatif.

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

$$\sigma_S = \varepsilon_0 \cdot E_{Tm} \quad \text{avec } E_{Tm} : \text{le champ mesuré} \quad (\text{II.5})$$

Avec $\sigma_s = \frac{Q}{S/2}$ avec S section de la sonde

Comme la valeur moyenne du courant mesuré $i(t)$ est :

$$I_m = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt = \frac{1}{T} Q(t) \quad (\text{II.6})$$

Et comme T est égale à l'inverse de la vitesse de rotation (n) du rotor :

$$T = \frac{1}{n}$$

On obtient :

$$E_{Tm} = \frac{\delta_s}{\varepsilon_0} = \frac{2 \cdot I_m}{\varepsilon_0 \cdot S \cdot n} = \frac{2 \cdot I_m}{\varepsilon_0 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot n} \quad V/m \quad (\text{II.7})$$

II.4 METHODE DE LA SONDE A CAPACITE REPARTIE (SCR)

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

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

Cette méthode consiste à déterminer le champ électrique E_T à la surface du sol, en mesurant la quantité des charges (Q) recueillie à la surface de la sonde. Les mesures sont effectuées à l'aide d'un dispositif de mesures constitué par une résistance et un condensateur montés en filtre passe-bas, comme le montre la figure II.4.

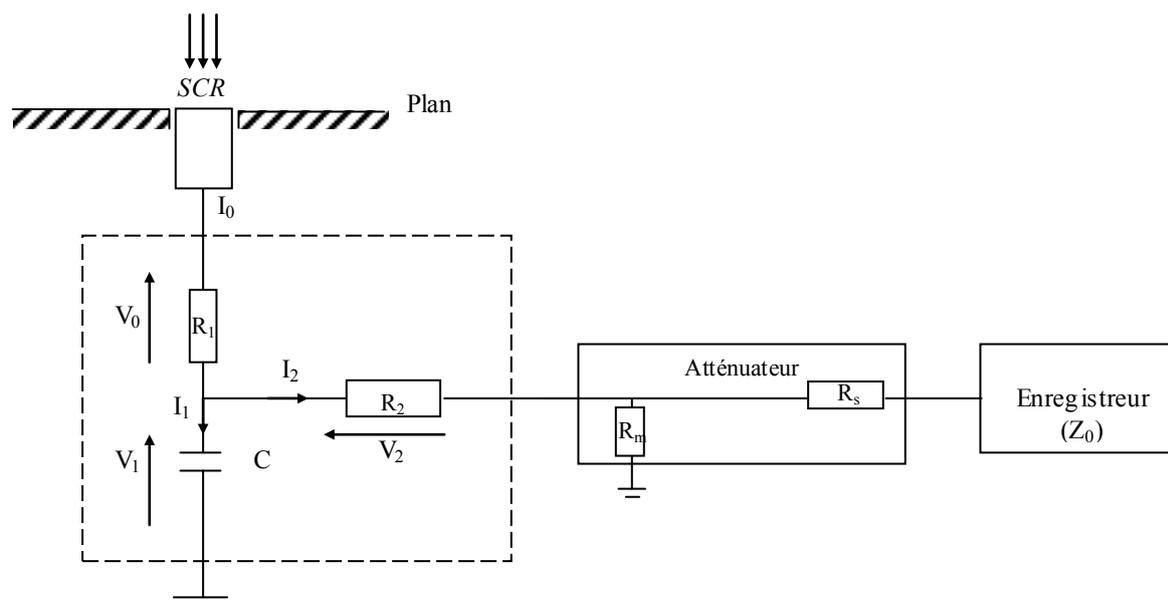


Figure II.4 : Méthode de la sonde à capacité répartie (SCR)

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).

II.5 CONCLUSION

Les diverses méthodes de mesure de champ électrique ont permis de donner les valeurs de l'intensité du champ électrique à la surface du plan en fonction de la distance inter électrodes (h). Ces résultats pourront servir à déterminer d'autres paramètres, tels que la conductivité de l'effet couronne et la densité de la charge d'espace, au voisinage immédiat du plan.

Dans notre travail, nous utilisons la méthode de la sonde à capacité répartie qui a été mise au point dans des travaux de recherche développés par M^r Belaïcha au laboratoire de Physique de la Décharge de l'Ecole Supérieure d'Electricité en France, en collaboration avec le Laboratoire de Haute Tension de l'ENP. Aucune référence n'est encore disponible sur ces travaux.

CHAPITRE III
TECHNIQUES EXPERIMENTALES

INTRODUCTION

Les essais et les mesures présentés dans notre travail ont été réalisés 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 avec terre homogène conductrice, qui sera appliquée par la suite au système avec terre discontinue. 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. GENERATION DES ONDES DE CHOC

III.1.1 GENERATEUR DE CHOCS

Le générateur de choc est de type Marx ayant les caractéristiques suivantes :

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

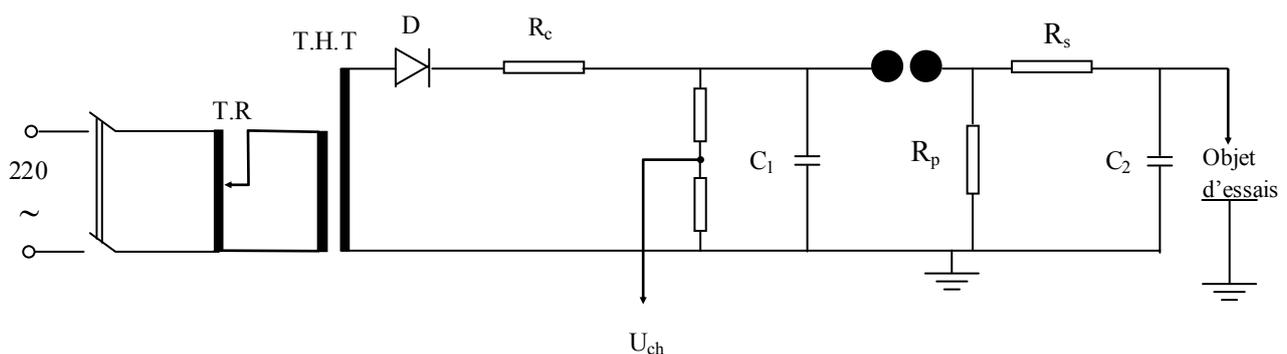


Figure III.1- Schéma simplifié du générateur de choc

Avec :

T.R : transformateur de réglage

T.H.T : Transformateur de haute tension

D : Redresseur

R_c : Résistance de charge.

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

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

C_1 : Condensateur de choc 22.5 nF

C_2 : Condensateur de charge 2 nF

La tension continue destinée à la charge du générateur de choc est fournie par un redresseur D de tension monophasé. Une résistance (R_c) destinée à limiter le courant de charge à une valeur admissible est placée en série avec le redresseur. Ce dernier est alimenté par un transformateur de haute tension (*T.H.T.*). La charge des condensateurs de choc s'effectue à travers des résistances R_c .

Au cours de la charge des condensateurs, la tension aux bornes des éclateurs à sphères augmente. Lorsque les éclateurs s'amorcent, chaque condensateur se décharge à travers les résistances R_s, R_p . 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. 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 . En effet le choc de 1.2/50 μs simule assez bien la forme de l'onde de tension de foudre [26].

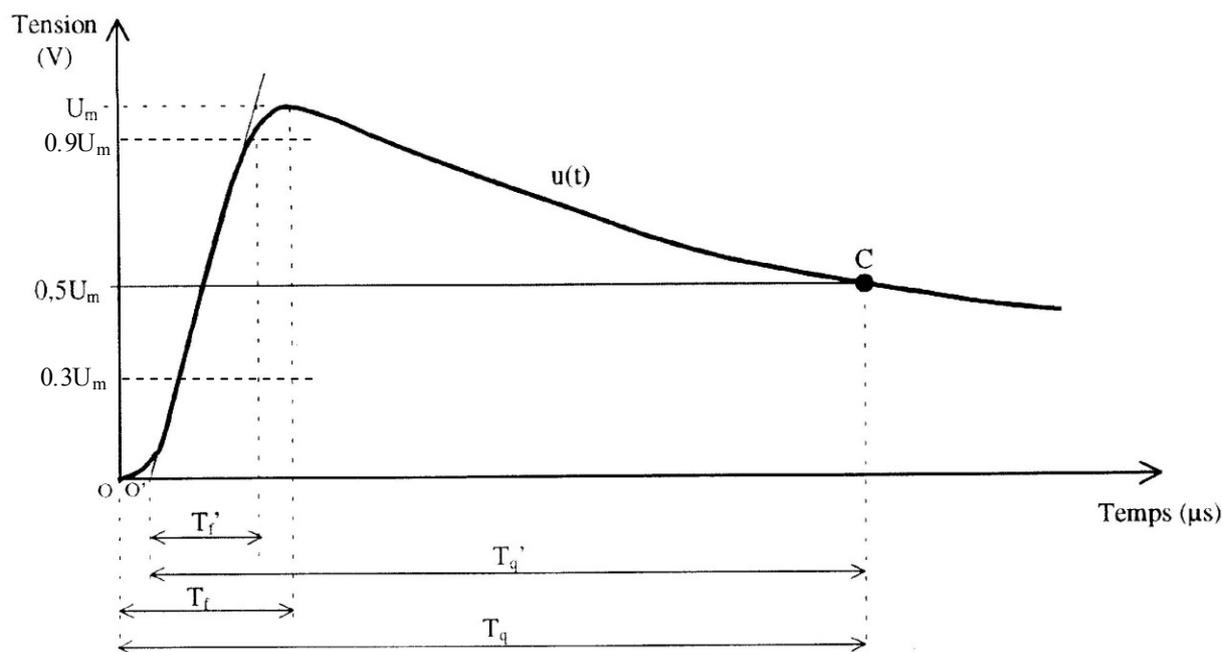


Figure III.2 Forme de l'onde de choc de foudre

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 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. Pour déterminer cette tension, la méthode des paliers multiples constants a été appliquée. Elle consiste à appliquer trois paliers de tension différents avec application de 20 chocs par palier. Le temps entre deux chocs successifs est de l'ordre de 30 secondes. Plus le nombre de paliers appliqué est grand plus l'interpolation des points sera meilleure et donc une bonne précision lors de l'extrapolation pour déterminer $U_{0\%}$. En effet, cette dernière correspond à la fréquence de décharge de 0.1% sur une échelle gausso-arithmétique.

Les fréquences de décharge en fonction des tensions d'essais trouvées sont généralement distribuées selon une régression linéaire sur une échelle gausso-arithmétique.

Ceci correspond à ce qu'ont obtenu d'autres auteurs [05] [19] [29] [32].

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

III.1.4 CORRECTIONS ATMOSPHERIQUES

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, 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 $P_0 = 1013 \text{ mbar (= 760 mmHg)}$

$$\delta = 0.289 \frac{P}{273 + T} \quad (\text{III.2})$$

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

Cette équation (III.2) est utilisée pour convertir la tension de décharge U mesurée dans les conditions atmosphériques d'essais (température T et pression P) à la valeur U_0 qui aurait été obtenue dans les conditions normales (T_0 et P_0) citées ci-dessus.

$$U_0 = \frac{U}{(\delta)^n} \quad n \leq 1 \quad (\text{III.3})$$

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

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 [33]. 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 AVEC TERRE HOMOGENE

Le système utilisé est constitué d'une tige en cuivre de 4.8 mm de diamètre, et d'un plan en Aluminium. Différents niveaux de tension de choc de foudre négative ont été appliqués. 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.

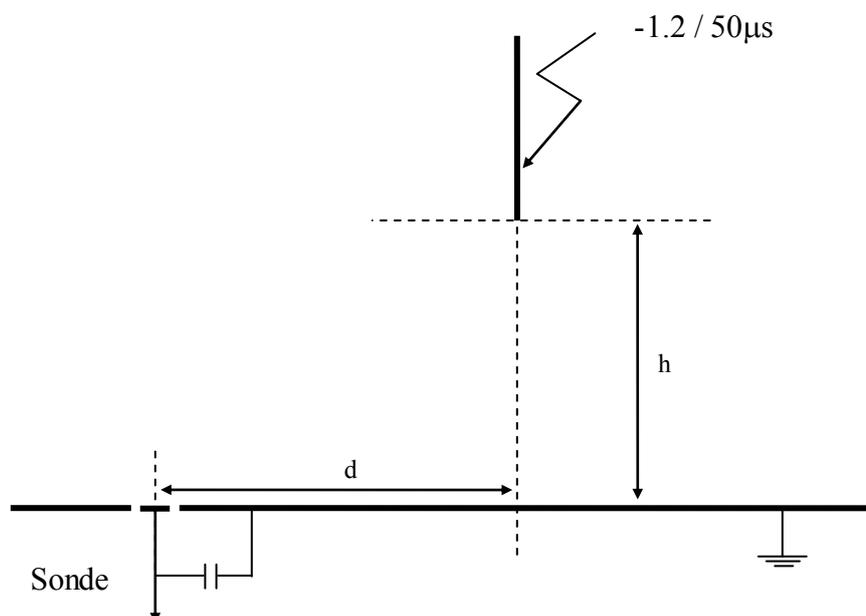


Figure : III.3 Modèle expérimental avec terre homogène.

III.2.2 MODELE EXPERIMENTAL AVEC TERRE DISCONTINUE

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

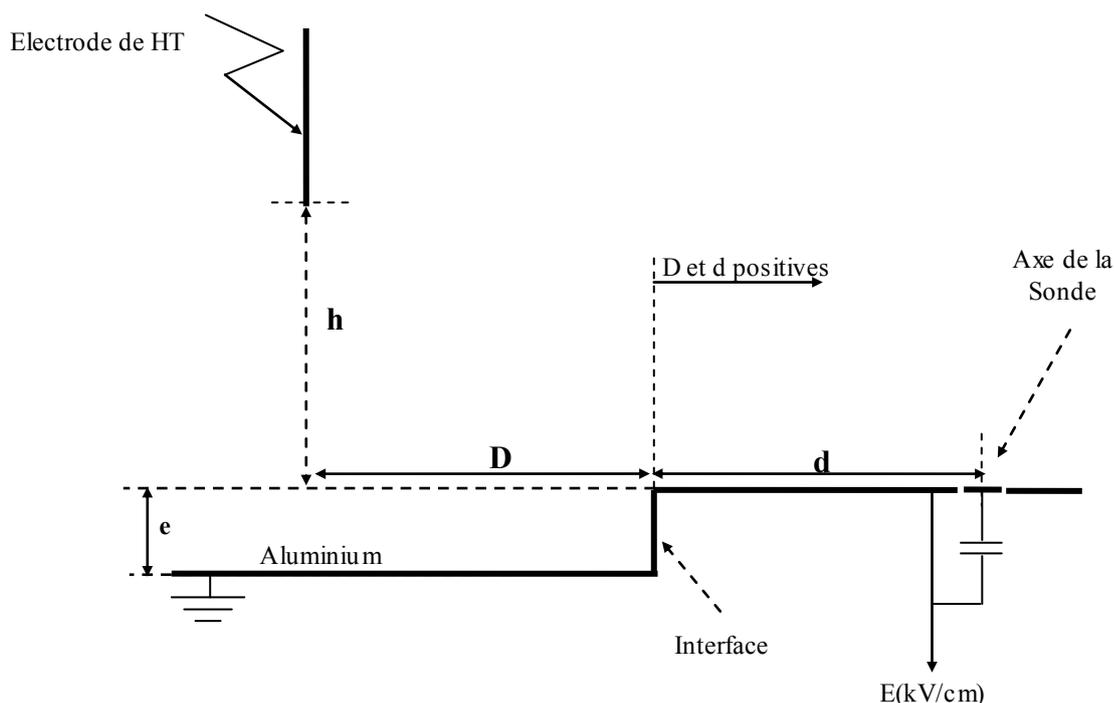


Figure III.4 - Modèle expérimental de terre discontinue en présence de la sonde à capacité répartie.

Avec :

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

e : profondeur de l'interface.

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

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

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. Cette distance est considérée positive lorsque la tige est située au-dessus de la partie haute et négative dans l'autre cas.

Les distances h sont les mêmes qu'en système homogène, mais les distances d , D sont choisies de telle sorte que les essais soient effectués pour des rapports d/h et D/h respectivement identiques pour différentes valeurs de h . La profondeur de l'interface a été maintenue constante et égale à 10 cm.

Les deux niveaux de tension utilisés sont $0.3U_{0\%}$ et $0.5U_{0\%}$ des systèmes tige-plan correspondants, à chaque distance h choisie. Pour une hauteur h donnée, nous appliquons le

même niveau de tension d'essais aussi bien pour la tige située au-dessus de la partie haute qu'au-dessus de la partie basse du plan discontinu.

Ainsi c'est le même niveau de tension $U_{0\%}$ qui est pris en considération pour une hauteur h donnée et la hauteur « $h+e$ » correspondante lorsque la tige est située au-dessus de la partie basse du plan discontinu.

Cela nous permettra d'observer l'influence de la présence de la discontinuité sur la chute de l'intensité du champ 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 ci-dessous:

h (cm)	8	12	16
d (cm)	0, 4, 8, 16, 40	0, 6, 12, 24, 60	0, 8, 16, 32, 80
D (cm)	0, 4, 8, 1.6, 32	0, 6, 12, 24, 48	0, 8, 16, 32, 64

Tableau III.1 : Les différents paramètres pris pour la mesure.

Dans le cas de la tige située au-dessus de la partie basse du plan discontinu les mêmes valeurs de d et D ont été prises pour la nouvelle distance tige-plan correspondant à « $h+e$ ».

III.2.3 CONFIGURATION DU MODELE EXPERIMENTAL

Après la détermination des tensions $U_{0\%}$ pour les différentes hauteurs h et la mesure du champ électrique du système avec terre homogène conductrice, nous procédons à l'étude des différentes configurations de terre discontinue (figure III.5). A cet effet, nous distinguons, quatre configurations, selon la position de la tige HT (D) et de la sonde (d) par rapport aux deux parties de la terre discontinue.

1^{er} cas : la tige HT située au-dessus de la partie haute de la terre discontinue.

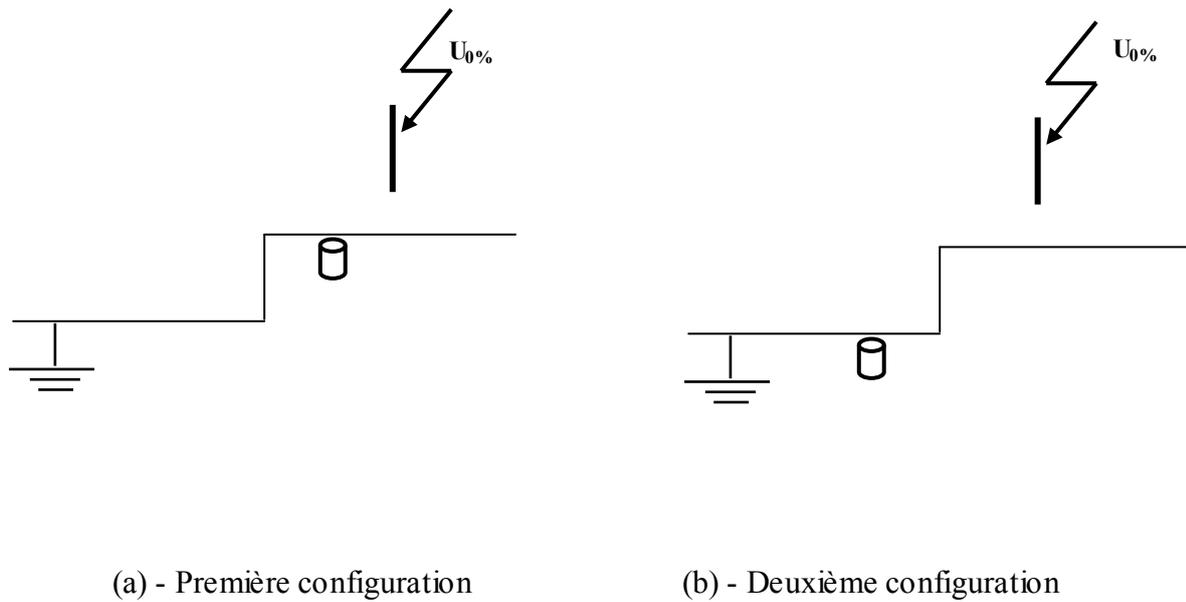
a - Première configuration : la sonde située sur la partie haute de la terre discontinue.

b - Deuxième configuration : la sonde située sur la partie basse de la terre discontinue.

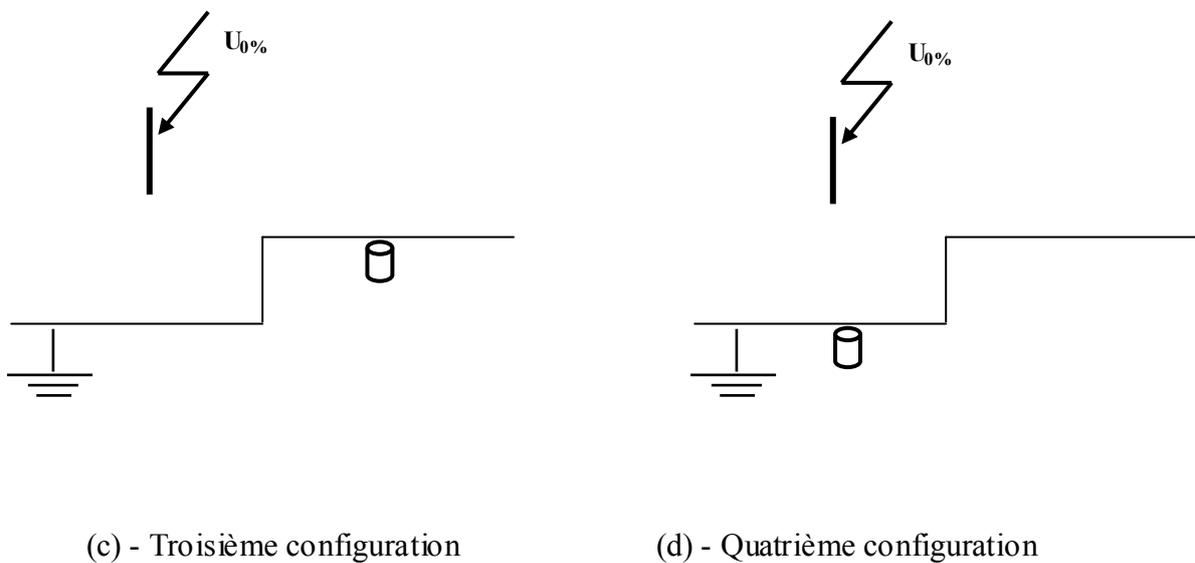
2^{ème} cas : la tige HT située au-dessus de la partie basse de la terre discontinue.

c - Troisième configuration : la sonde située sur la partie haute de la terre discontinue.

d - Quatrième configuration : la sonde située sur la partie basse de la terre discontinue.



(1) la tige HT située au-dessus de la partie haute de la terre discontinue



(2) la tige HT située au-dessus de la partie basse de la terre discontinue

Figure III.5 Configurations du modèle expérimental dans le cas de terre discontinue.

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

III.3.1 CIRCUIT DE MESURE :

La sonde de 6.12 mm de diamètre est reliée à travers une résistance R_1 à un condensateur de charge (C). Il est nécessaire d'utiliser un diviseur de tension (R_m, R_s) pour recueillir le signal de la tension V_1 aux bornes de la capacité C reliée en parallèle, au diviseur de tension.

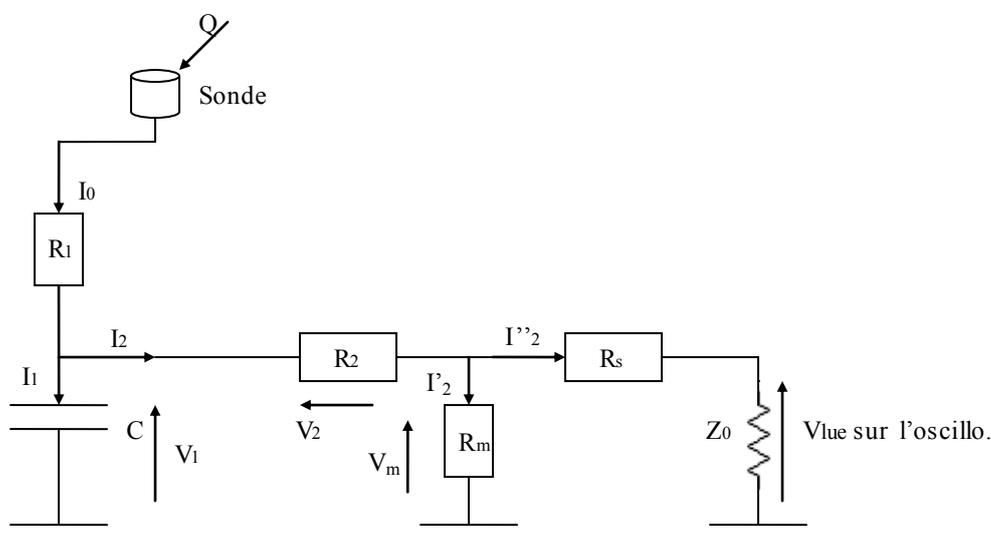


Figure III.6 Schéma montrant la méthode de mesure

Avec

R_m : résistance de l'atténuateur ou diviseur.

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

Z_0 : impédance d'entrée de l'oscilloscope.

R_s : résistance de protection.

R_2 : résistance d'adaptation du câble de mesure.

III.3.2 EXPRESSION DU CHAMP MESURE

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

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

$$\frac{dQ}{dt} = \varepsilon_0 S \frac{dE}{dt} = C \frac{dV_1}{dt} + \frac{V_m}{R_m} + \frac{V_m}{Z_e} = C \frac{dV_1}{dt} + V_m \left(\frac{1}{R_m} + \frac{1}{Z_e} \right) \quad (\text{III.6})$$

$$\Rightarrow \frac{dV_1}{dt} + \frac{V_m}{C} \left(\frac{1}{R_m} + \frac{1}{Z_e} \right) = \frac{\varepsilon_0 S}{C} \frac{dE}{dt} \quad (\text{III.7})$$

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

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

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

$$\begin{aligned} V_1(t) &= V_2(t) + V_m(t) = R_2 I_2 + R_m I_2' \\ &= R_2 I_2 + (R_m // Z_e) I_2 && R_m \ll Z_e \\ &= (R_2 + (R_m // Z_e)) I_2 && R_m \gg R_2 \\ &= R_m I_2 \\ &= V_m(t) \end{aligned} \quad (\text{III.9})$$

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

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

les valeur des composantes d'antenne (C , R_1) sont choisies, de façon que, la constante de temps d'antenne soit plus petite par apport 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 :

$R_1 = 47\Omega$, $R_2 = 50\Omega$, $R_m = 6.6k\Omega$, $R_s = 4.5M\Omega$, $C = 25.10^{-12}F$, $\phi_{\text{sonde}} = 6.12mm$
 $Z_0 = 1M\Omega$: impédance d'entrée de l'oscilloscope.

$$E(t) = \frac{25.10^{-12}}{8.854.10^{-12} \cdot \pi \left(\frac{6.12}{2}\right)^2} V_1(t) \quad (\text{III.12})$$

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

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

(III.13)

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

$$\frac{V_m}{R_s + Z_0} = \frac{V_{\text{lue}}}{Z_0} \Rightarrow V_m = \frac{R_s + Z_0}{Z_0} V_{\text{lue}} \quad (\text{III.14})$$

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

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

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

(III.15)

Ces valeurs sont corrigées par les coefficients de correction atmosphérique.

III.3.3 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 la procédure suivante :

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

En choisissant $h = 8$ cm nous obtenons :

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

U	V _{lue}	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 :

$$K_s = E_{th} / E_{exp} \quad (III.16)$$

$$\text{d'où : } K_s = \frac{0.296 + 0.307 + 0.269}{3} \Rightarrow K_s = 0.29$$

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

$$E(t) = 0.29 \times (0,95947 \times 5,5 \times V_{lue}(t)) \text{ [kV/cm]} \quad (III.17)$$

Alors

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

III.3.4 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 100MH, qui nous permet d'avoir la valeur de chaque points du signal plus particulièrement la valeur de crête du signal reçu.

La démarche de mesure est d'enregistrer pour chaque position de la sonde, cinq signaux, en appliquant deux niveaux égaux à $0.3U_0$, $0.5U_0$; ce qui assure une application de tension sans décharge.

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

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

La première valeur à droite du graphe donne la valeur de la crête du signal, et la deuxième nous donne la durée de mi-amplitude.

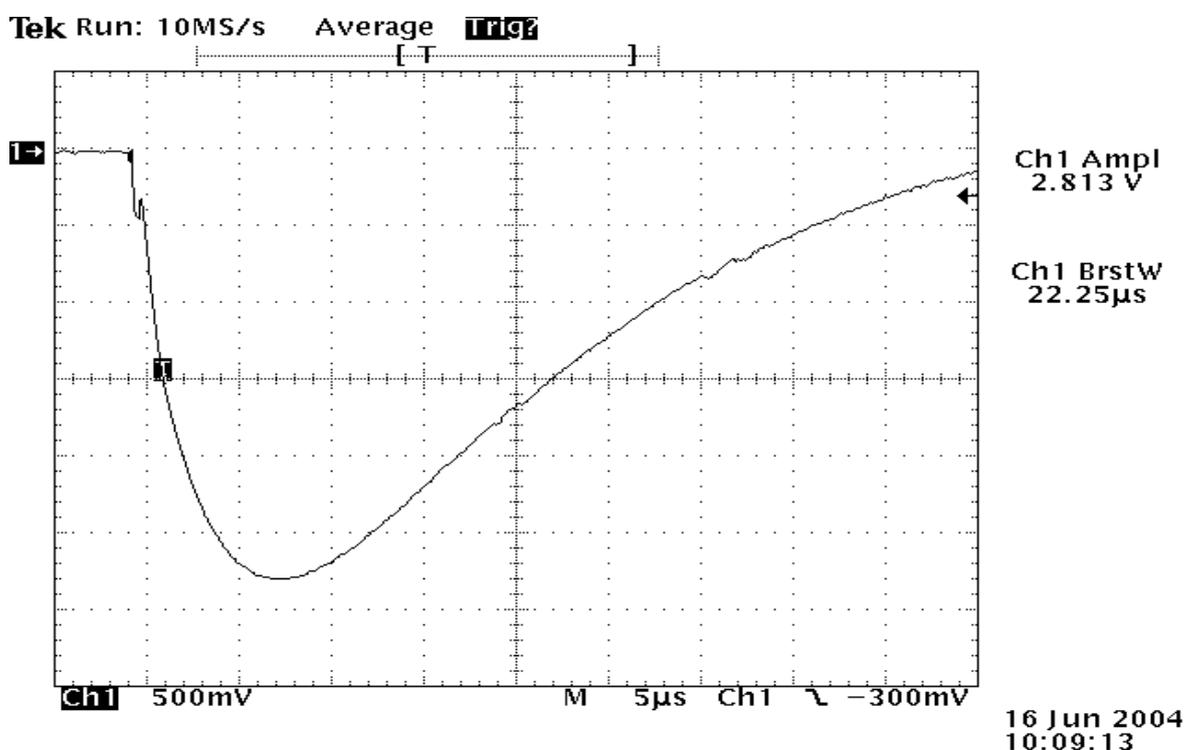


Figure III.7 forme d'onde donner par l'oscilloscope numérique

CHAPITRE IV
RESULTATS OBTENUS ET
INTERPRETATIONS

INTRODUCTION

Nous présentons dans ce chapitre l'étude réalisée sur la distribution du champ électrique à la surface d'une terre discontinue. Nous commençons d'abord par la présentation des résultats concernant le système tige-plan avec terre homogène bonne conductrice, qui servira de référence pour la comparaison des résultats. Nous abordons ensuite l'étude du système tige-plan avec terre discontinue.

IV.1 CAS DE LA TERRE HOMOGENE

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 $0.3U_{0\%}$ et $0.5U_{0\%}$. 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 en annexe. Nous avons considéré $U_{0\%}$ comme étant la tension ayant une probabilité de décharge égale à 0,1 % sur l'échelle gaussio-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).

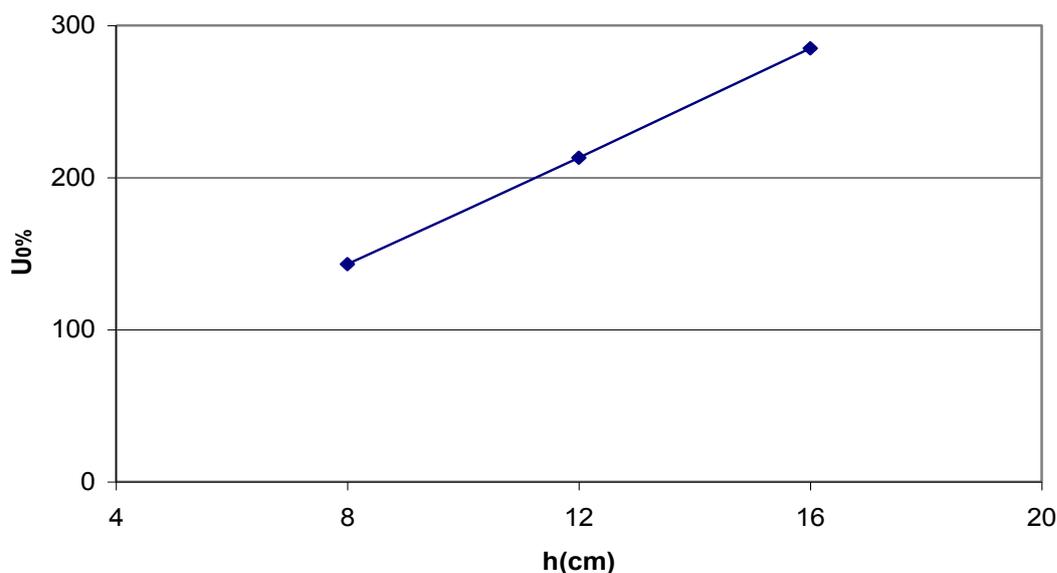


Figure IV.1- Evolution de la tension $U_{0\%}$ en fonction de l'intervalle d'air h.

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 pour les positions de la tige au dessus de la partie basse du plan discontinu; les distances correspondantes dans la mesure de champ seront respectivement 18, 22 et 26 cm ($h+e$).

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

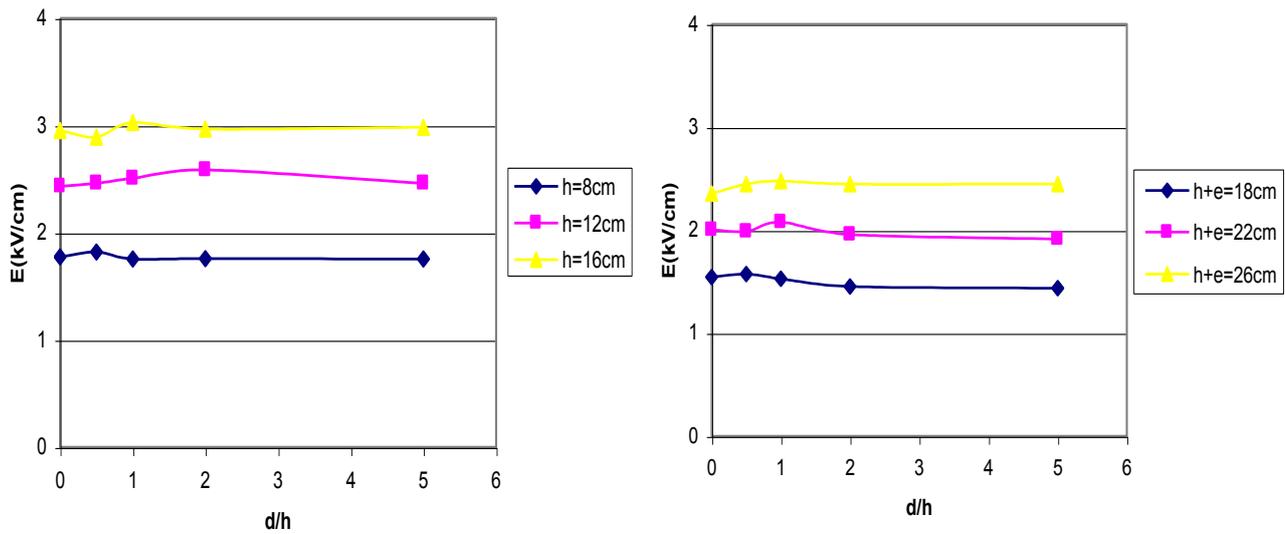
Afin d'obtenir une référence pour la comparaison des résultats du système discontinu avec ceux du système homogène, nous déterminons d'abord la distribution du champ dans le cas du système homogène, en fonction de la position de l'axe de la sonde et de la hauteur h de la tige sous haute tension dans le cas des deux niveaux de tension choisis ($0.3U_{0\%}$ et $0.5U_{0\%}$).

D'après la figure IV.2, avec le niveau de tension $0.3U_{0\%}$, nous constatons que l'intensité du champ électrique tend vers une valeur constante, au fur et à mesure que la sonde s'éloigne de la tige sous tension à partir d'une position relative d/h supérieure ou égale à 2.

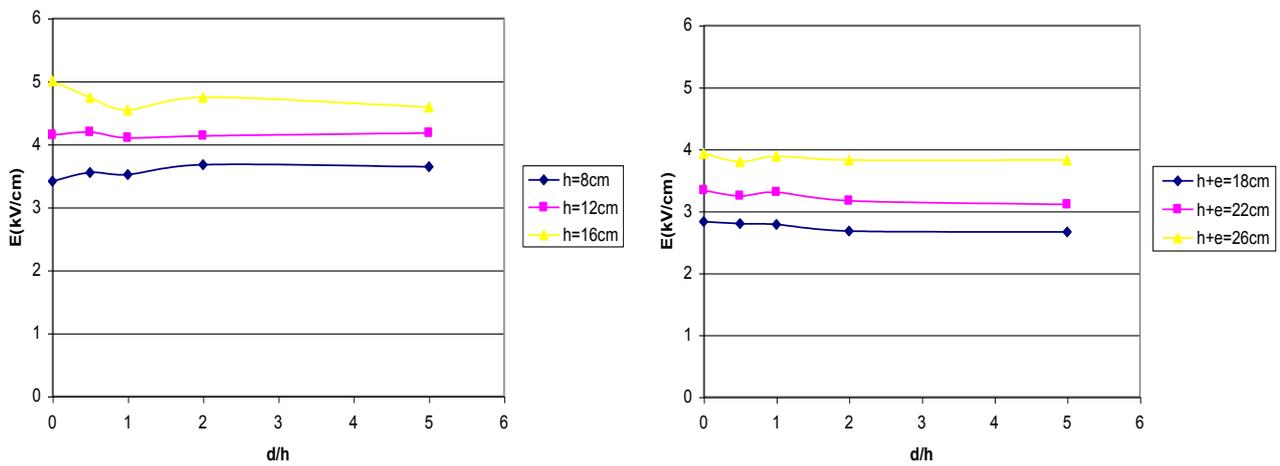
Lorsque la sonde se rapproche de l'axe de la tige pour, d/h inférieur à 2 l'intensité du champ augmente légèrement et prend une valeur maximale pour $d/h=1$, puis diminue au voisinage de la tige ($d/h \approx 0$). Cette dernière diminution serait due au phénomène de charge d'espace, dont l'évaluation par un modèle mathématique par exemple, reste encore non maîtrisée. Pour une tension appliquée de $0.5U_{0\%}$, nous constatons une élévation de l'intensité du champ au voisinage de la tige haute tension qui évolue par la suite, à des valeurs constantes lorsque le rapport d/h augmente ($d/h > 2$).

Pour les différentes positions de la sonde (d/h) 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. En effet, nous constatons que l'intensité du champ augmente avec la hauteur h . Cette augmentation serait due au niveau de tension appliqué à la tige, correspondant à 0,3 et 0,5 $U_{0\%}$ de l'intervalle. Pour les intervalles $h=18\text{cm}$, 22cm et 26cm , on a appliqué les mêmes tensions $U_{0\%}$ que les intervalles $h=8\text{cm}$, 12cm et 16cm respectivement, ce qui explique la diminution du champ pour ces grands intervalles.

L'augmentation du champ au sol pourrait être expliquée par la présence du champ créé par la charge d'espace au voisinage de la tige, lorsque le niveau de tension d'essais augmente. (Figures IV.3, IV.4).

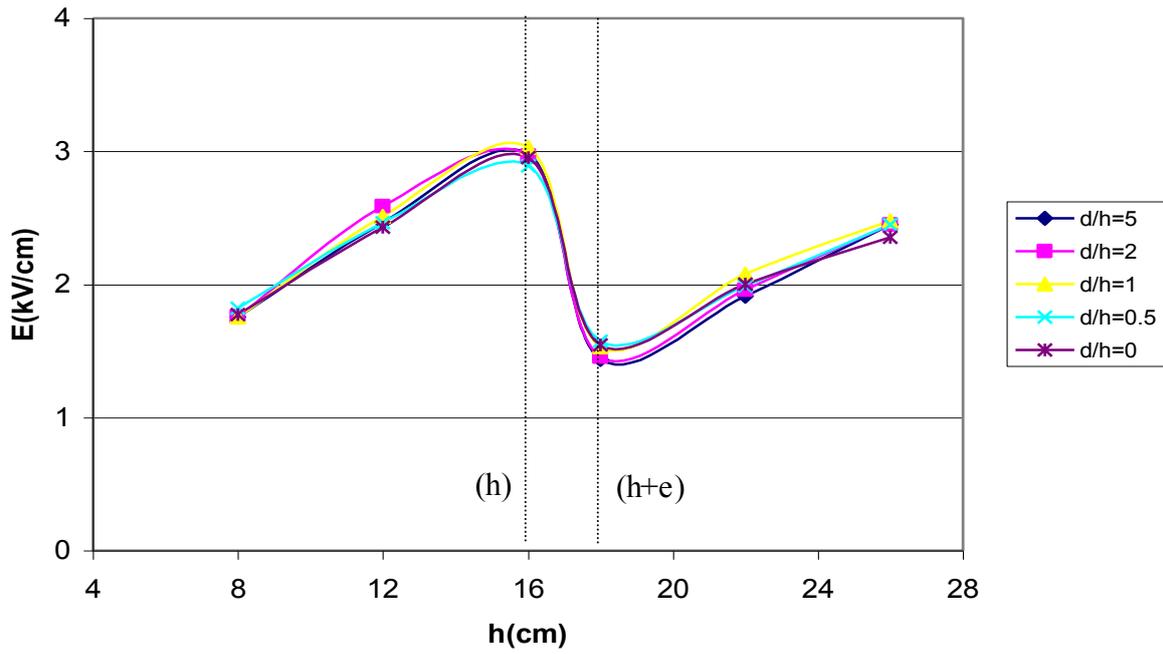


Niveau de tension $U = 0.3U_{0\%}$



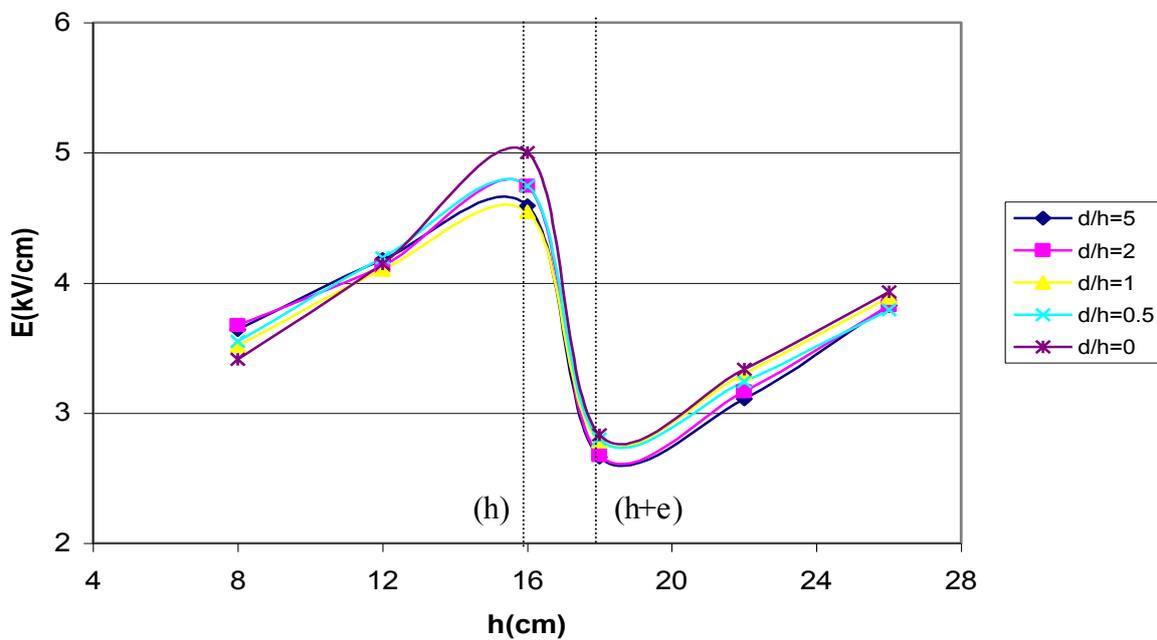
Niveau de tension $U = 0.5U_{0\%}$

Figure IV.2- champ électrique mesuré au sol en fonction de la position d/h de la sonde.



Niveau de tension $U = 0.3U_{0\%}$

Figure IV.3- Champ électrique au sol en fonction de la longueur d'intervalle d'air h .



Niveau de tension $U = 0.5U_{0\%}$

Figure IV.4- Champ électrique au sol en fonction de la longueur d'intervalle d'air h .

IV.2 CAS DE LA TERRE DISCONTINUE.

Dans cette partie, nous avons comme objectif l'étude de l'influence de la discontinuité de la terre sur la distribution du champ électrique en fonction des différents paramètres suivants :

- La distance (d) entre l'axe de la sonde et l'interface.
- La distance (D) entre la tige HT et l'interface.
- La longueur de l'intervalle d'air tige-plan (h).

Comme nous l'avons mentionné dans le troisième chapitre (III.3), quatre configurations du système tige-plan dans le cas de la terre discontinue ont été définies selon les positions respectives de la tige et de la sonde par rapport aux deux parties de la terre discontinue.

IV.2.1 CAS DE LA TIGE AU DESSUS DE LA PARTIE HAUTE DE LA TERRE DISCONTINUE

Dans ce cas, nous nous intéressons aux deux premières configurations possibles correspondant aux deux positions de la sonde. La première correspond au cas où la sonde est sur la partie haute et la seconde au cas où la sonde est sur la partie basse. Dans ces deux cas de figures, la tige est située uniquement au-dessus de la partie haute du plan. Les résultats de mesures sont présents aux figures IV.7 à IV.9 pour différentes positions relatives de la tige D/h maintenues constantes et des positions relatives de la sonde d/h variant de - 5 à +5.

a) Première configuration : la sonde située sur la partie haute de la terre discontinue.

Le modèle expérimental utilisé pour étudier la première configuration est illustré à la figure IV.5.

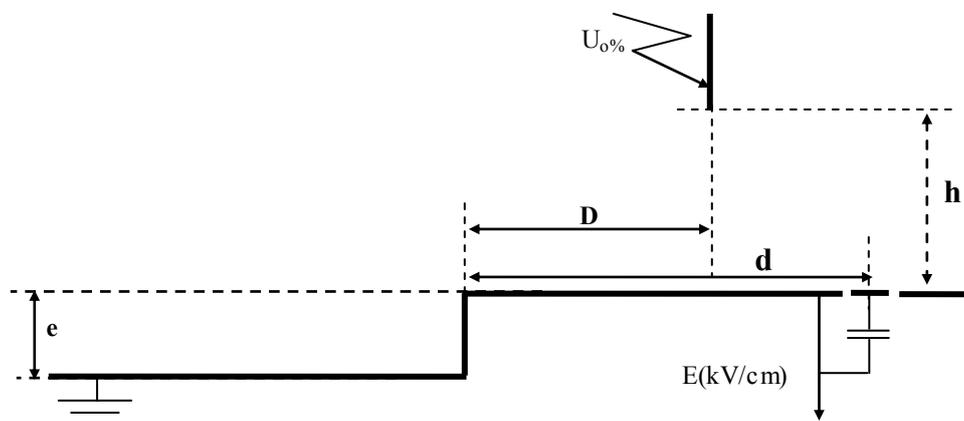


Figure IV.5- Première configuration

Pour le niveau de la tensions appliquée $0.3U_{0\%}$ et pour les positions de la sonde loin de l'interface ($d/h > 2$), nous remarquons que l'intensité du champ mesurée sur la partie haute de la terre discontinue est pratiquement égale à celle correspondant au cas du système avec sol homogène. Ainsi, lorsque la tige s'éloigne de l'interface vers les grandes distances, on tend vers le système tige-plan bon conducteur de même longueur.

A proximité de l'interface ($d/h < 2$), les résultats obtenus montrent une sorte de discontinuité dans l'évolution du champ électrique. Cette discontinuité est due au rôle de l'interface qui aurait le même effet qu'une pointe, transformant le système tige-plan en système tige-tige. Ceci explique l'augmentation brusque du champ juste au-dessus de l'interface et la diminution de la rigidité de l'intervalle tige-interface et les phénomènes de décharge observés dans des travaux de recherches précédents [03] [04]. En effet, même pour des distances D/h relativement grandes, des décharges électriques peuvent se produire entre la tige et l'interface [03] [04] et non entre la tige et le plan selon le chemin plus court correspondant à la hauteur h .

Nous constatons ainsi que l'intervalle d'air tige-interface constitue un chemin préférable pour les lignes de champ. En effet, le système tige-interface qui se comporte comme un système pointe-pointe est moins rigide que le système pointe (négative)-plan. Ceci justifie aussi dans notre cas l'obtention parfois de décharges disruptives sur l'interface, pour les faibles valeurs du rapport D/h , malgré l'application des niveaux de tension inférieur à $U_{0\%}$ qui garantit l'absence de décharge disruptive dans l'intervalle tige-plan. Nous avons observé ce phénomène pour les intervalles $h=12\text{cm}$ et $h=16\text{cm}$ sous tension $U=0.5U_{0\%}$ avec les rapport $D/h=0$ et 0.5 .

b) Deuxième configuration : la sonde située sur la partie basse de la terre discontinue.

Le modèle expérimental utilisé pour cette configuration est présenté à la figure IV.6.

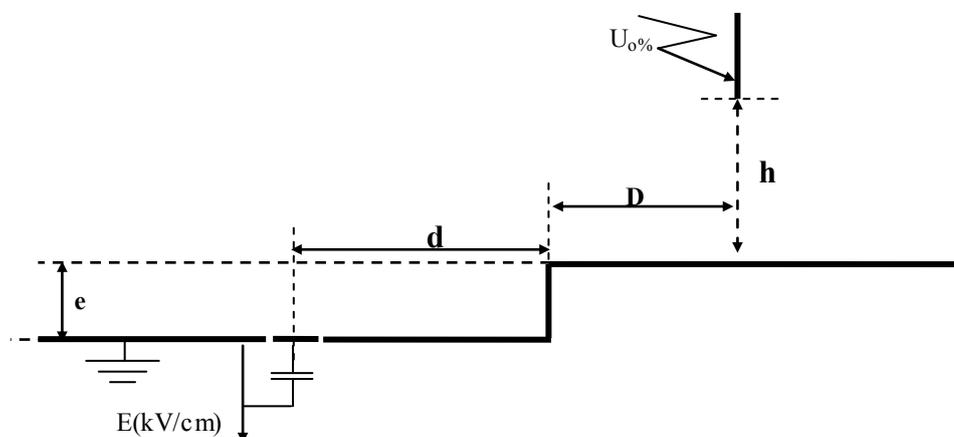


Figure IV.6- Deuxième configuration

En ce qui concerne le champ sur la partie basse de la terre discontinue, les résultats montrent que l'intensité du champ est inférieure à celle de la partie haute. Cela est lié à l'augmentation de la distance tige-axe de la sonde.

Au voisinage de l'interface, le champ prend la valeur la plus faible sur le plan. Nous constatons donc que l'interface joue un rôle attractif important sur la distribution des lignes du champ à la surface du sol discontinu.

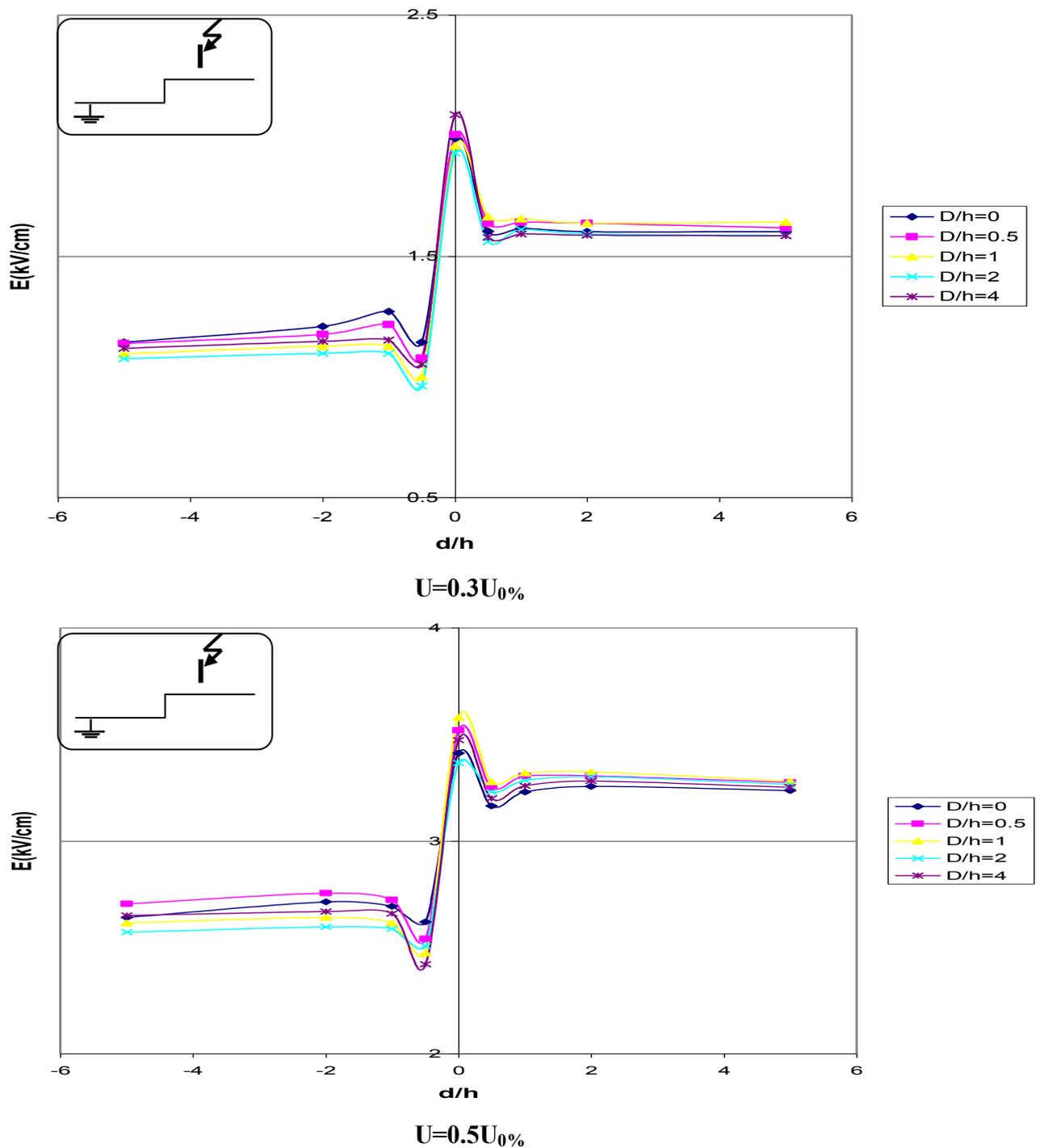


Figure IV.7– champ électrique au sol en fonction de la position (d/h) de la sonde. $h=8\text{cm}$.

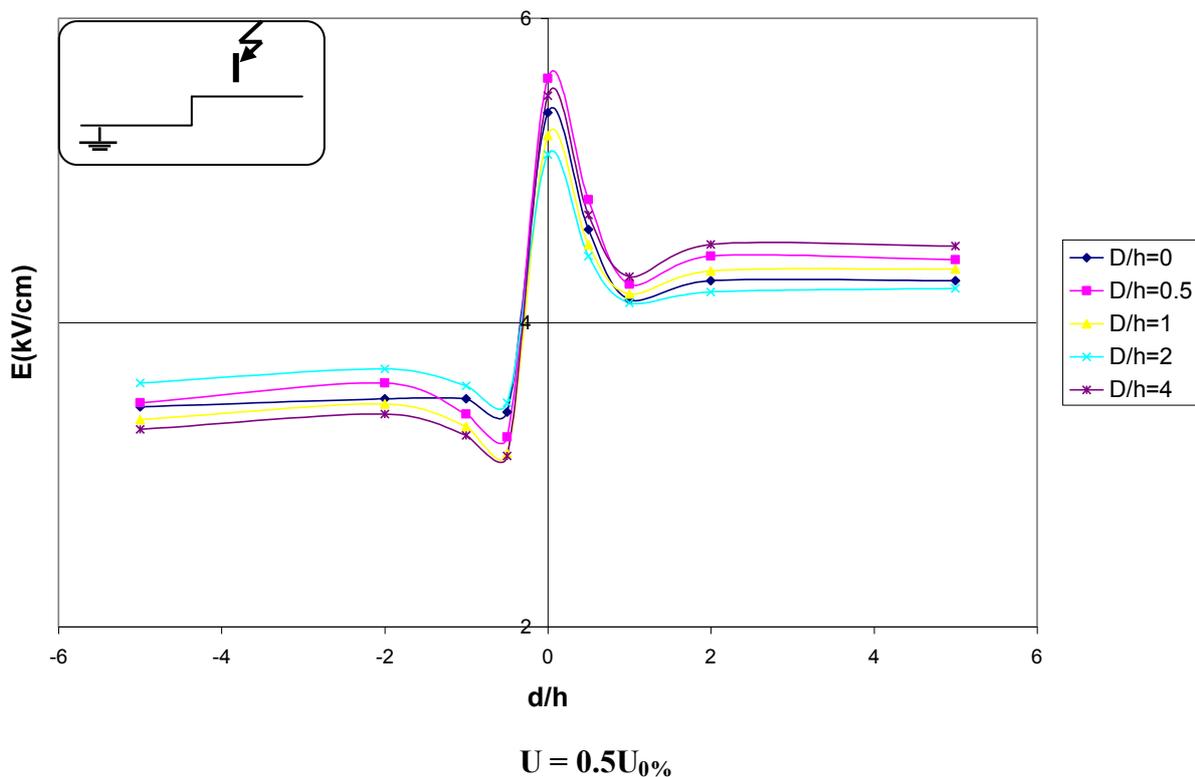
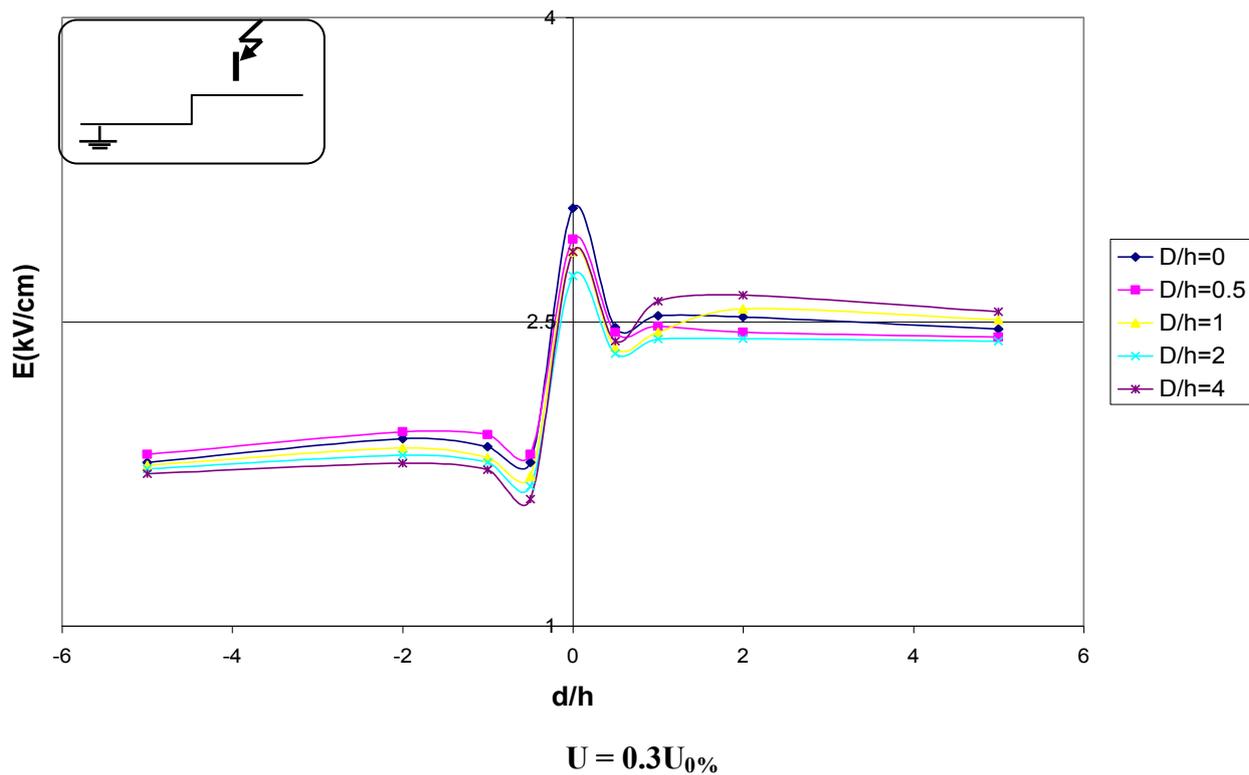
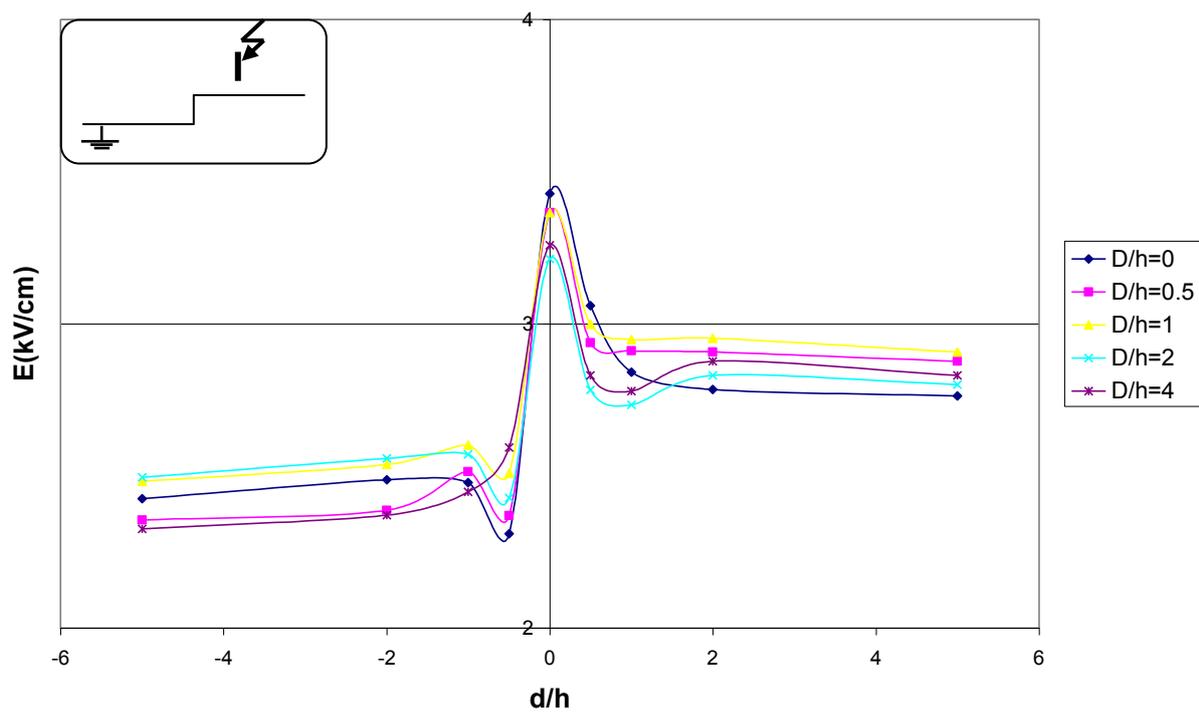
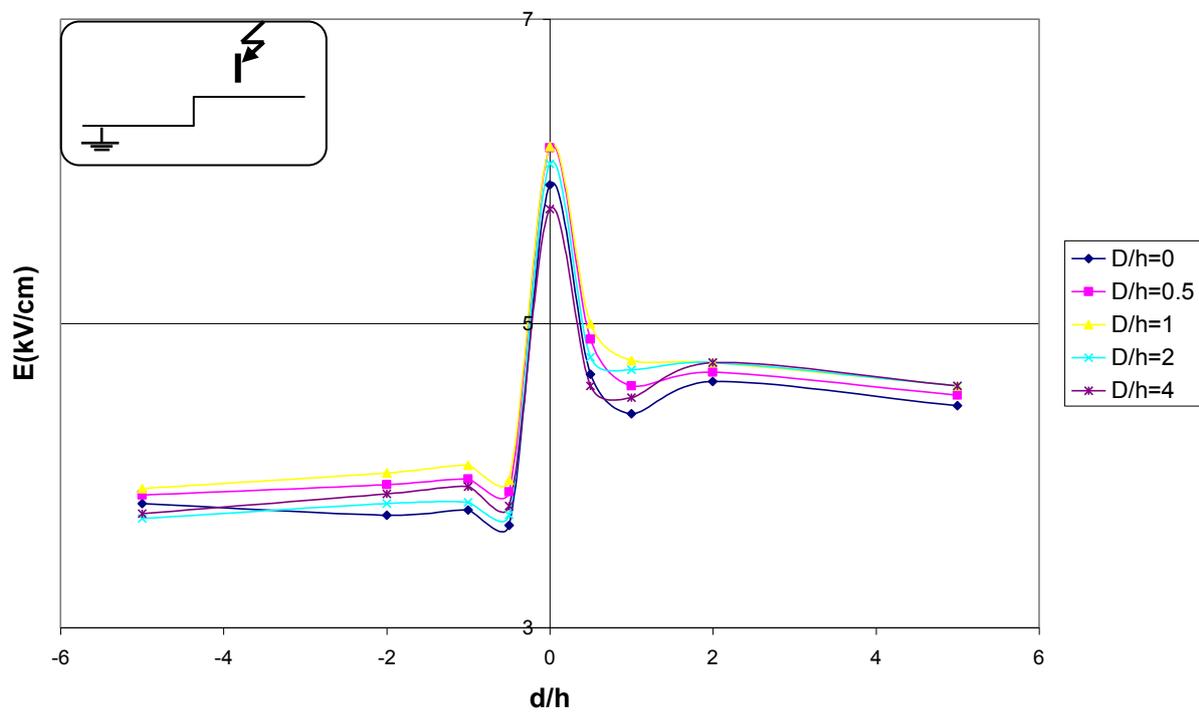


Figure IV.8 – champ électrique au sol en fonction de la position (d/h) de la sonde.

$h = 12\text{cm}$.



$U = 0.3U_0\%$



$U = 0.5U_0\%$

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

$h=16\text{cm}$.

IV.2.2 CAS DE LA TIGE AU DESSUS DE LA PARTIE BASSE DE LA TERRE DISCONTINUE

c) *Troisième configuration : la sonde située sur la partie haute de la terre discontinue.*

Le modèle expérimental utilisé pour cette configuration est présenté à la figure IV.10.

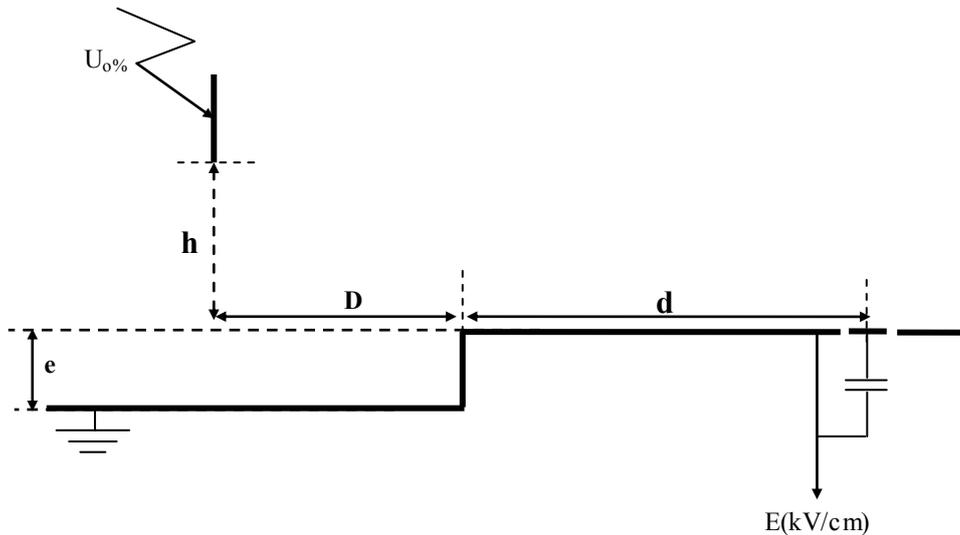


Figure IV.10- troisième configuration

Les figures IV.12- IV.14 montrent que plus la sonde s'approche de l'interface ($d/h < 1$), plus l'intensité du champ devient plus importante par rapport à celle obtenue pour un sol homogène bon conducteur.

Quand la sonde s'éloigne de l'interface ($d/h > 1$), la valeur du champ mesurée devient presque constante et confondue avec celle donnée par le système homogène. On constate dans ce cas que le comportement de l'intervalle tige-plan avec sol discontinu est similaire au comportement de l'intervalle tige-plan avec sol homogène bon conducteur.

Nous remarquons aussi que dès qu'on s'éloigne de l'interface, le champ sur la partie haute du plan diminue et devient presque similaire au champ sur la partie basse (quatrième configuration), sous l'effet d'attraction des lignes du champ par l'interface.

d) Quatrième configuration : la sonde située sur la partie basse de la terre discontinue.

Le modèle expérimental utilisé pour étudier la quatrième configuration est présenté à la figure IV.11.

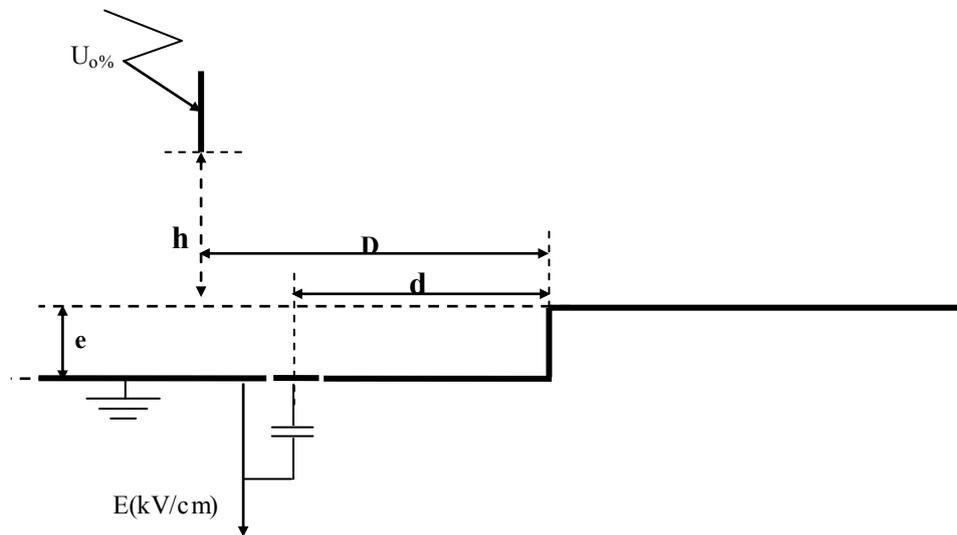


Figure IV.11- quatrième configuration

Au voisinage de l'interface, l'intensité du champ augmente à cause du comportement du système tige-interface, mais diminue en s'éloignant de l'interface. Ceci s'explique par l'augmentation de la longueur de l'intervalle d'air tige-plan par la superposition de la profondeur d'interface (e).

Pour cette configuration, nous remarquons que la distribution du champ est presque similaire à la configuration précédente, cela serait dû à l'élévation de l'intervalle d'air ($h+e$).

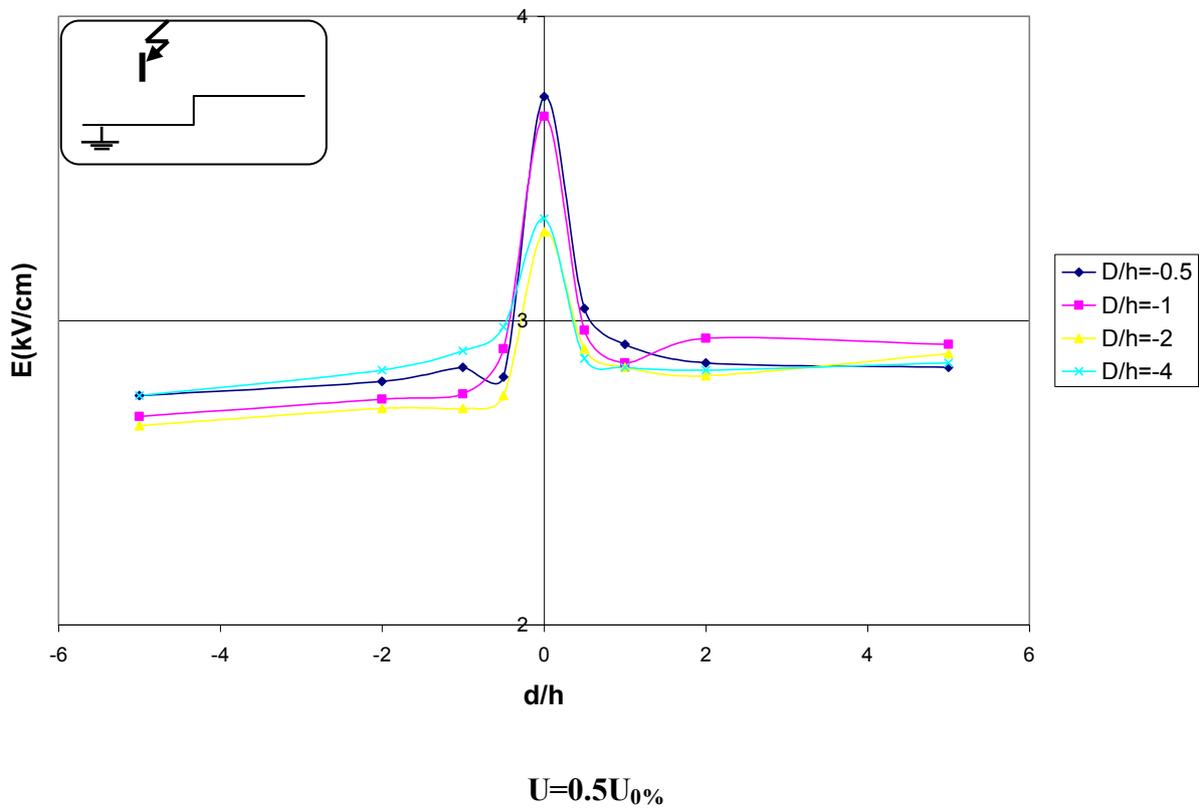
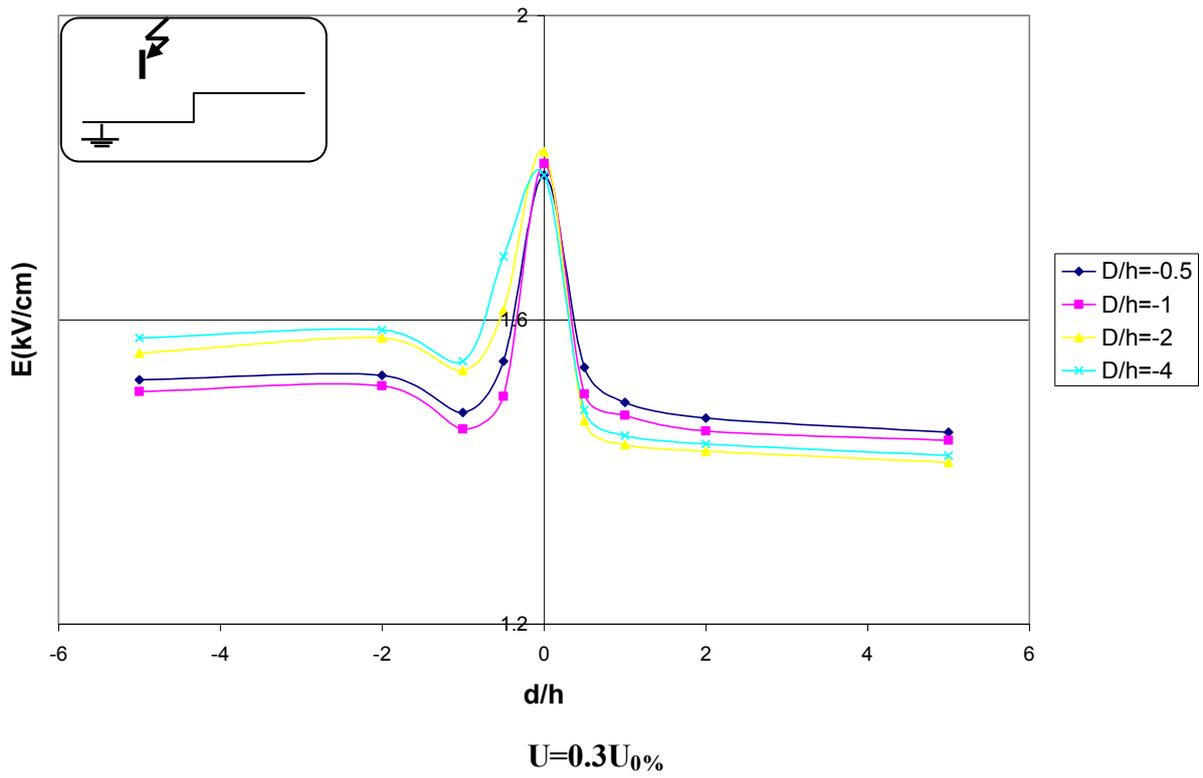


Figure IV.12 – Champ électrique mesuré au sol en fonction de la position (d/h) de la sonde
 $h = 8$ cm

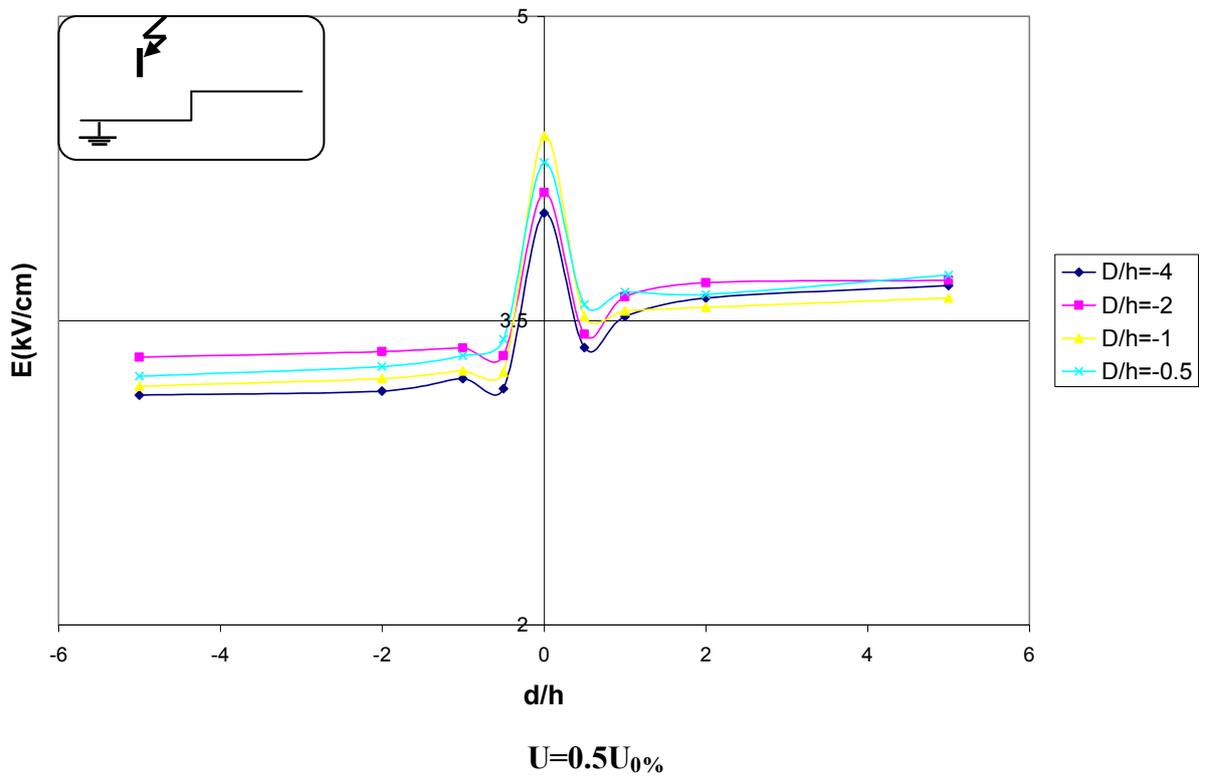
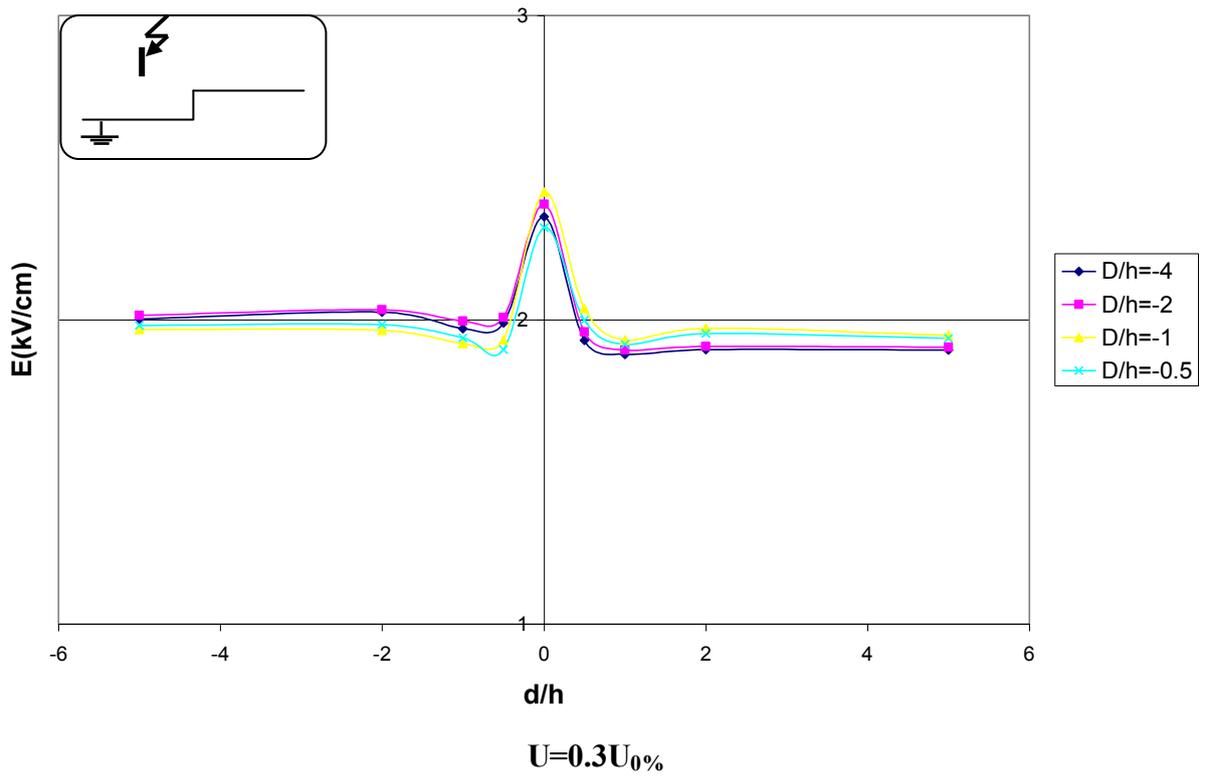


Figure IV.13 – Champ électrique mesuré au sol en fonction de la position (d/h) de la sonde $h = 12 \text{ cm}$

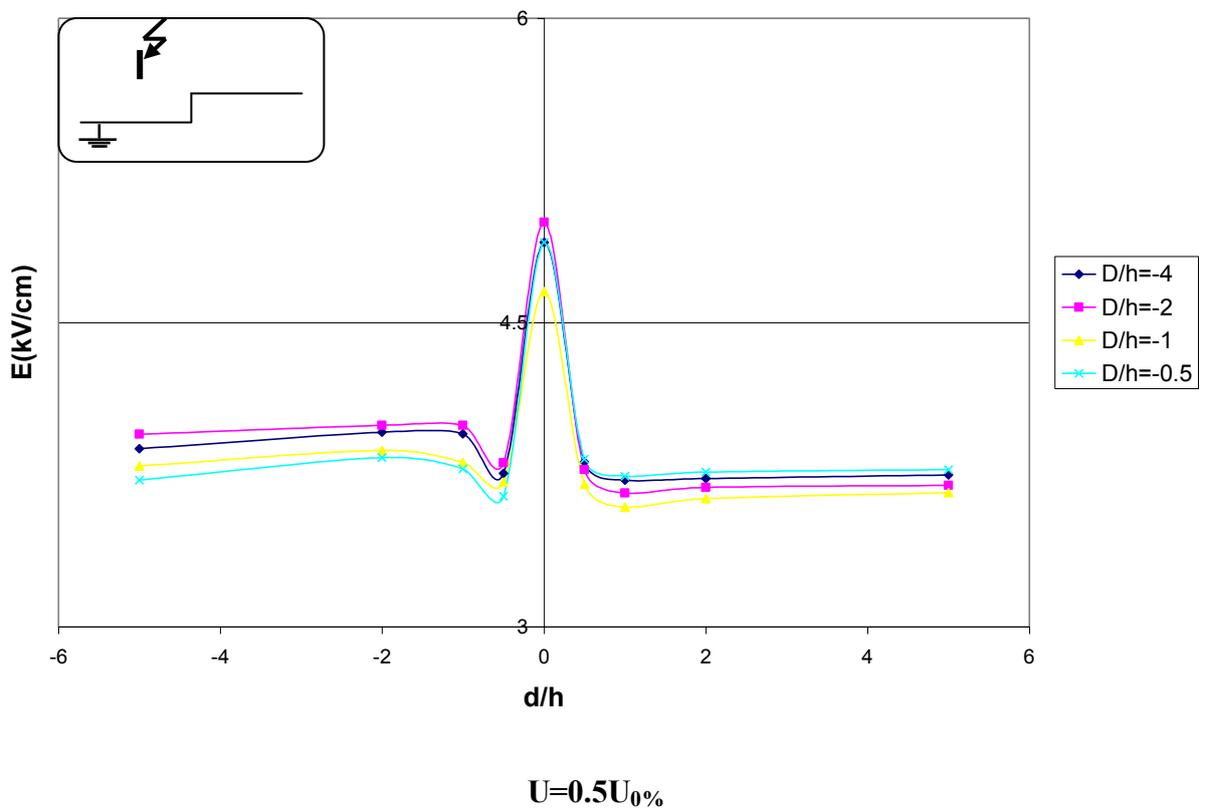
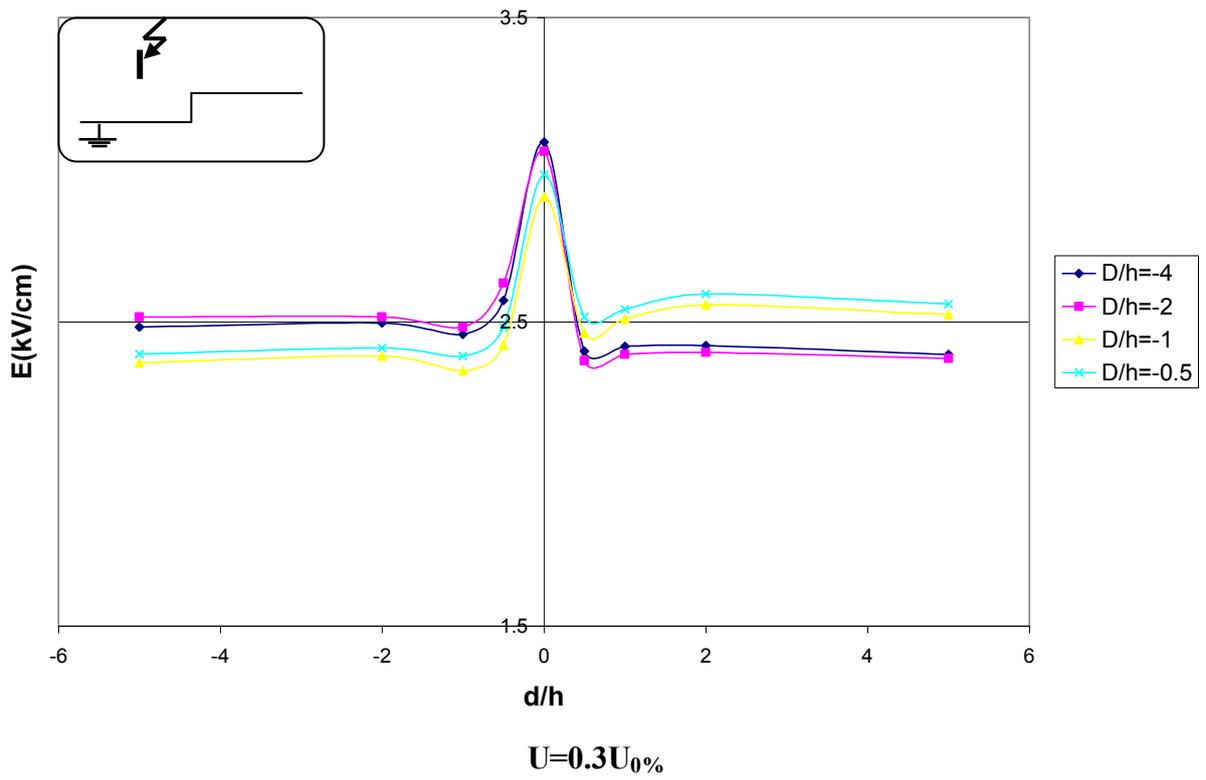


Figure IV.14 Champ électrique mesuré au sol en fonction de la position (d/h) de la sonde $h = 16$ cm

IV.3 DISCUSSIONS DES RESULTATS OBTENUS

L'influence de la discontinuité de la terre sur la distribution du champ électrique en fonction de la position de la sonde est déterminée à l'aide de la comparaison des deux systèmes avec plan homogène (E_0) et plan discontinu (E).

IV.3.1 TIGE SITUEE AU-DESSUS DE LA PARTIE HAUTE DU PLAN DISCONTINU

Pour le premier cas où la tige est située au-dessus de la partie haute du plan (fig IV.15-IV.17), nous remarquons que le rapport (E/E_0) est proche de l'unité, pour les positions de la sonde loin de l'interface ($d/h > 1$) sur la partie haute du plan.

Au niveau de l'interface, où le système tige-interface se comporte comme un système tige-tige qui est moins rigide que le système tige-plan, le rapport entre les deux systèmes prend la valeur maximal ($E/E_0 \approx 1.25$) qui correspond à la valeur où il y a une grande probabilité d'avoir des décharges disruptives directes sur l'interface, malgré l'application de niveaux de tension inférieurs à la tension $U_{0\%}$ correspondant à l'intervalle tige-plan.

En ce qui concerne le rapport E/E_0 du champ sur la partie basse du plan, les résultats montrent qu'il est inférieur à celui de la partie haute. Cela est lié à l'élévation de la distance tige-axe de la sonde. Au voisinage de l'interface, le rapport du champ prend la valeur la plus faible ($E/E_0 \approx 0.6$). Nous confirmons donc que l'interface joue un rôle attractif important sur la distribution des lignes du champ au sol discontinu.

IV.3.2 TIGE SITUEE AU-DESSUS DE LA PARTIE BASSE DU PLAN DISCONTINU

Dans le cas de la tige située au-dessus de la partie basse du plan (Fig IV.18-IV.20), nous remarquons que plus la sonde s'approche de l'interface ($d/h < 1$) plus le rapport des deux systèmes est supérieur à l'unité ($E/E_0 > 1$). Lorsque la sonde s'éloigne de l'interface ($d/h > 1$), le rapport devient presque égale à l'unité ($E/E_0 \approx 1$). La distribution du champ est relativement similaire dans les deux cas, où la sonde est située sur la partie haute ou basse du plan discontinu. D'après ces observations, nous constatons que lorsque le rapport du champ électrique est supérieur à 1.25, qui correspond à la valeur du champ au sol discontinu $E \geq 5 \text{ kV/cm}$, la probabilité d'avoir des décharges sur l'interface est grande. Cette valeur de champ est en effet suffisante pour que des streamers s'amorcent au sol.

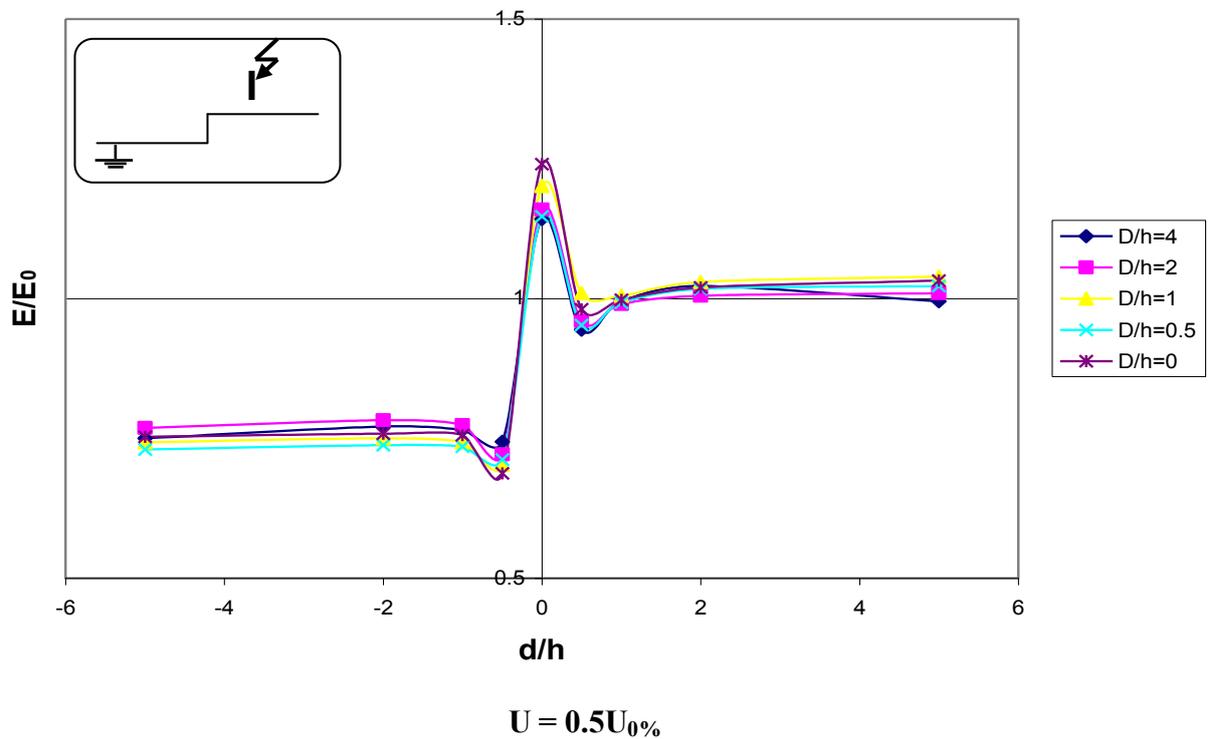
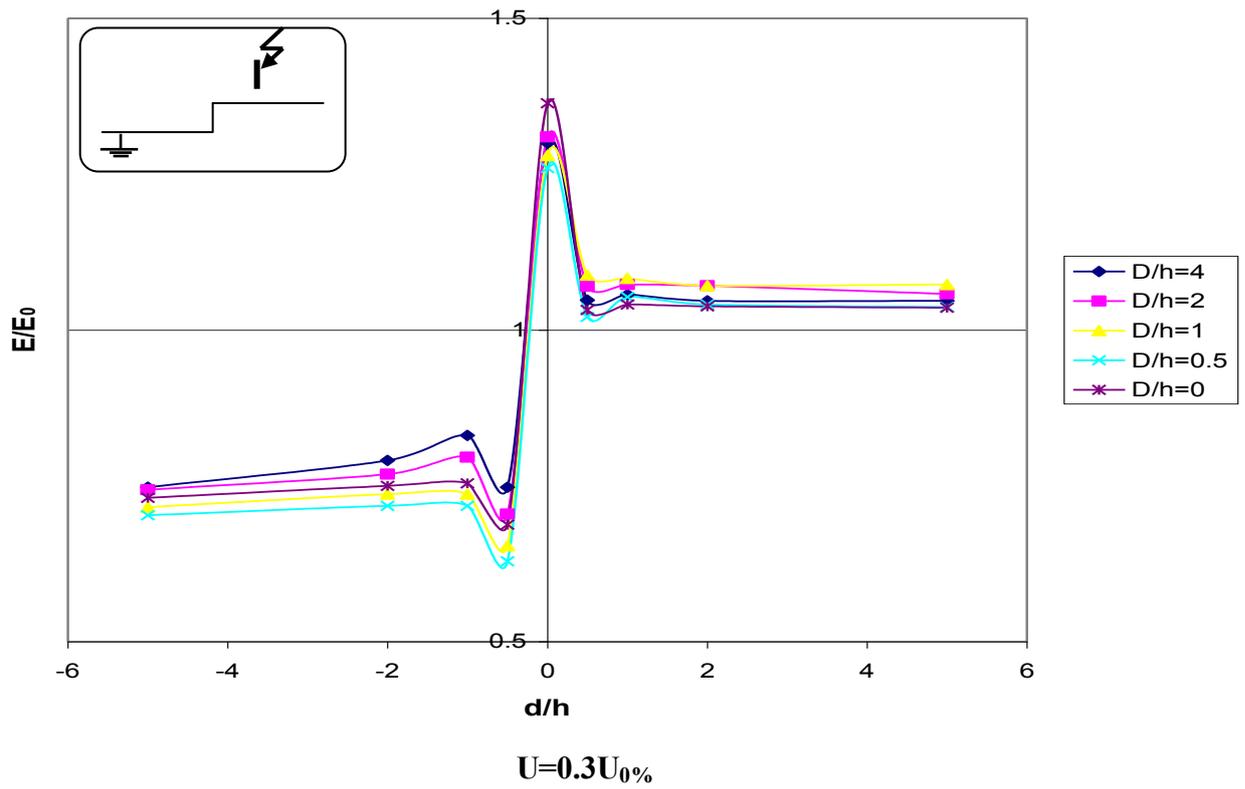
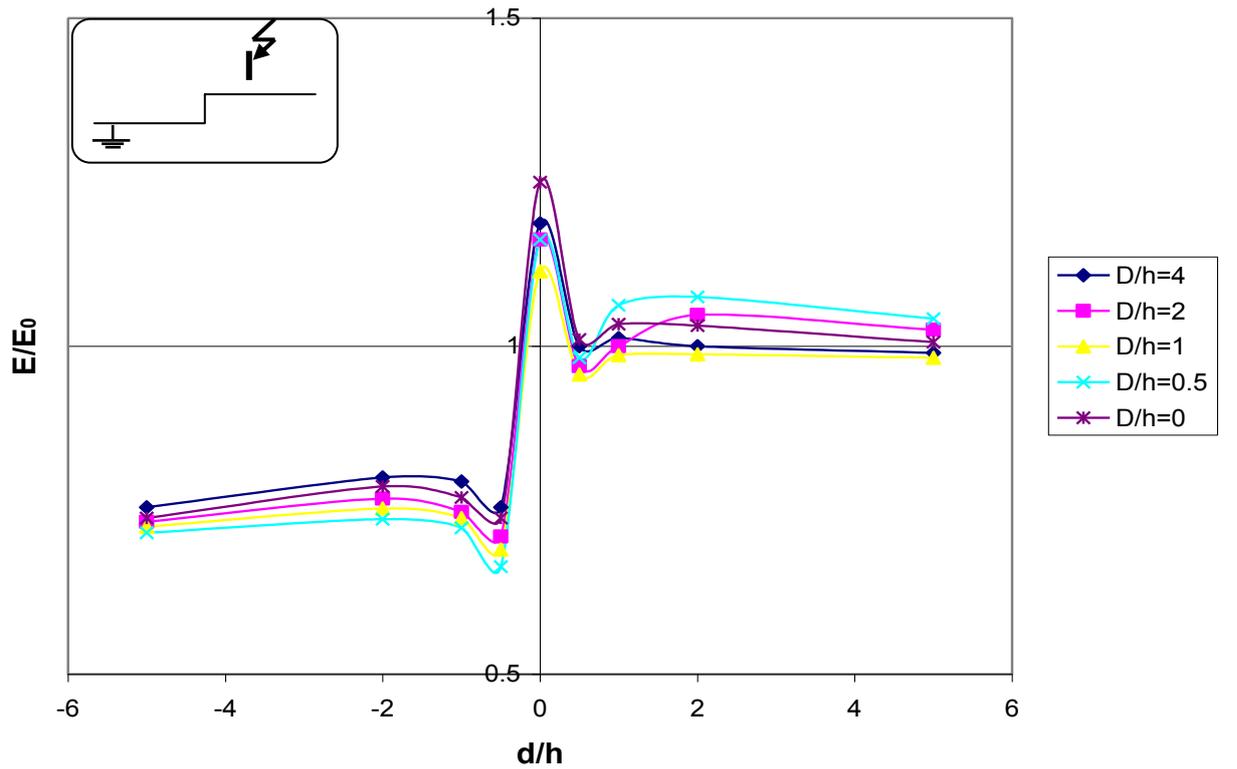
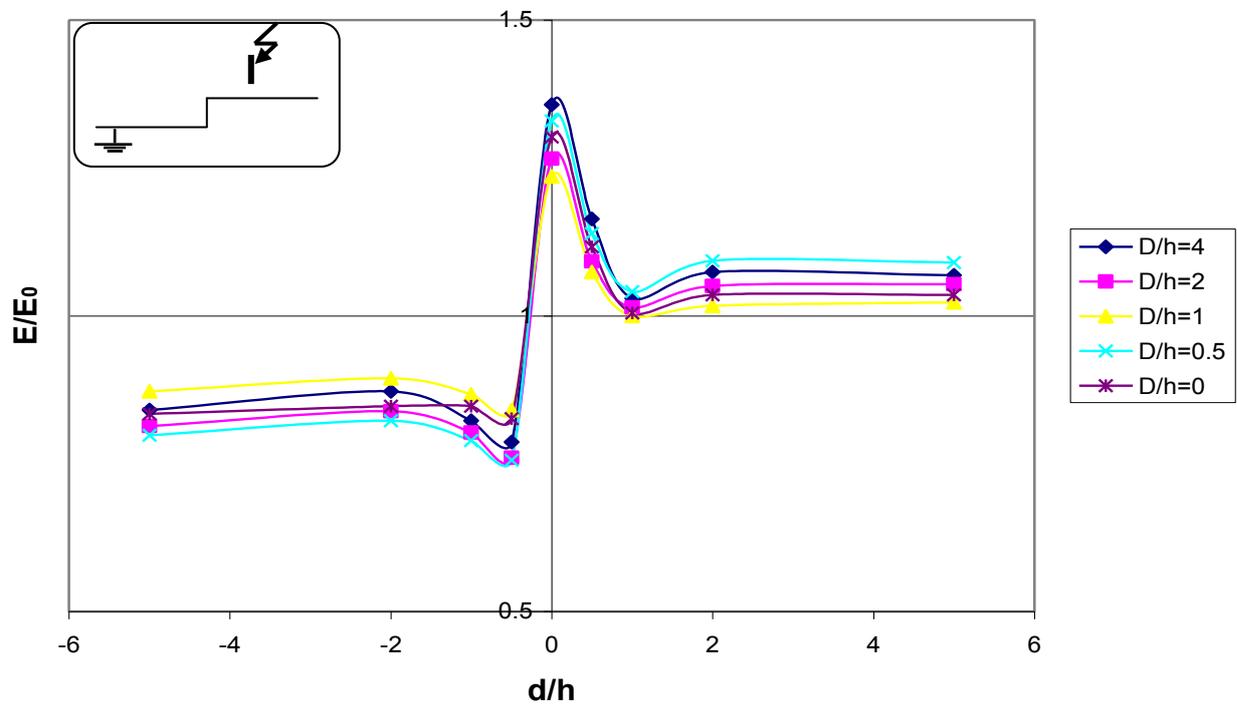


Figure IV.15 – Champ électrique en fonction de position de la sonde (d/h)
Avec $h=8\text{cm}$.



$U = 0.3U_0\%$



$U = 0.5U_0\%$

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

Avec $h = 12\text{cm}$.

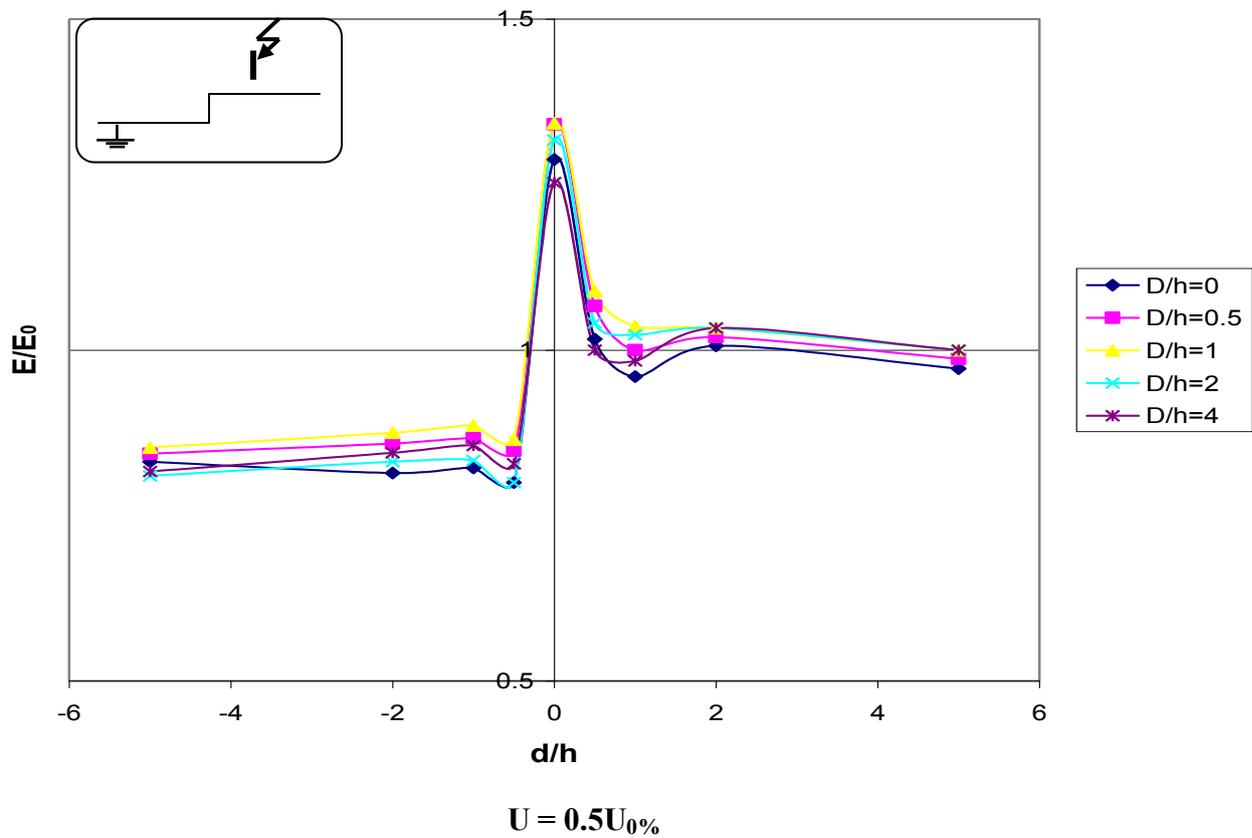
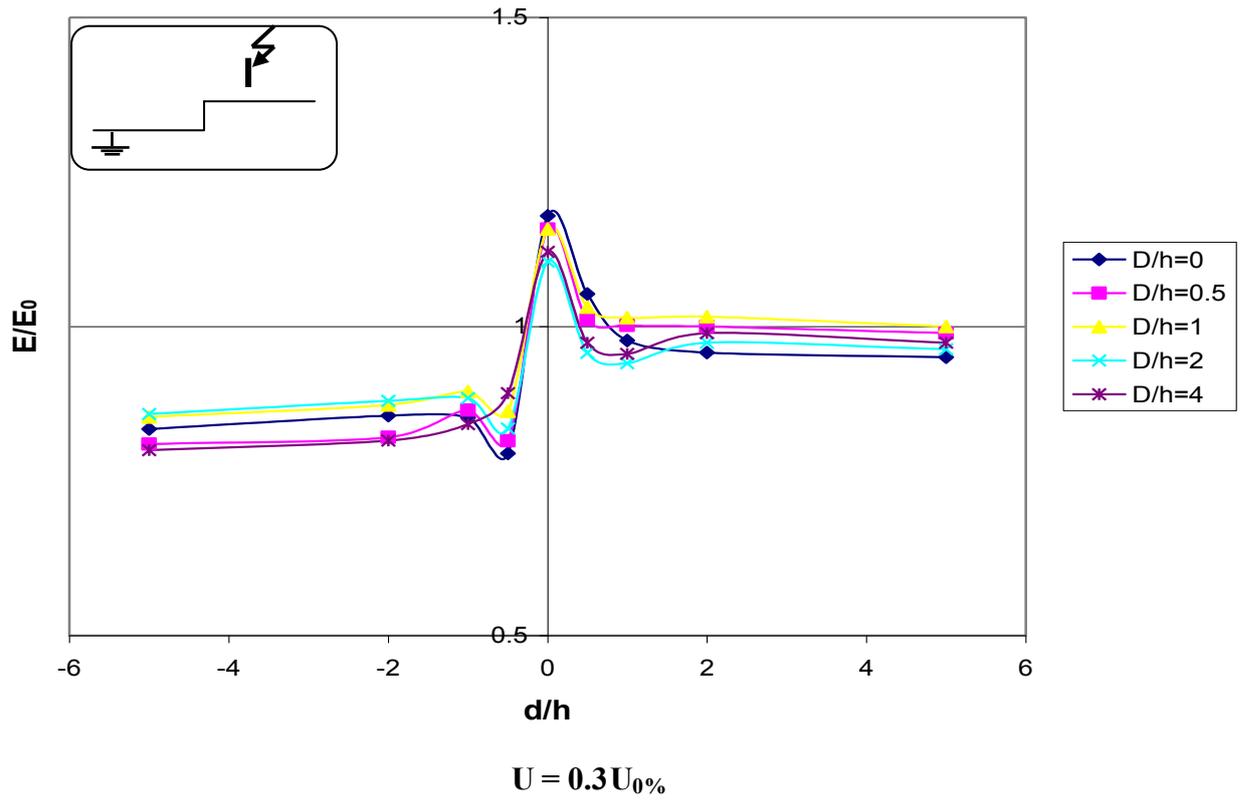


Figure IV.17– Champ électrique en fonction de position de la sonde (d/h)
Avec $h=16\text{cm}$.

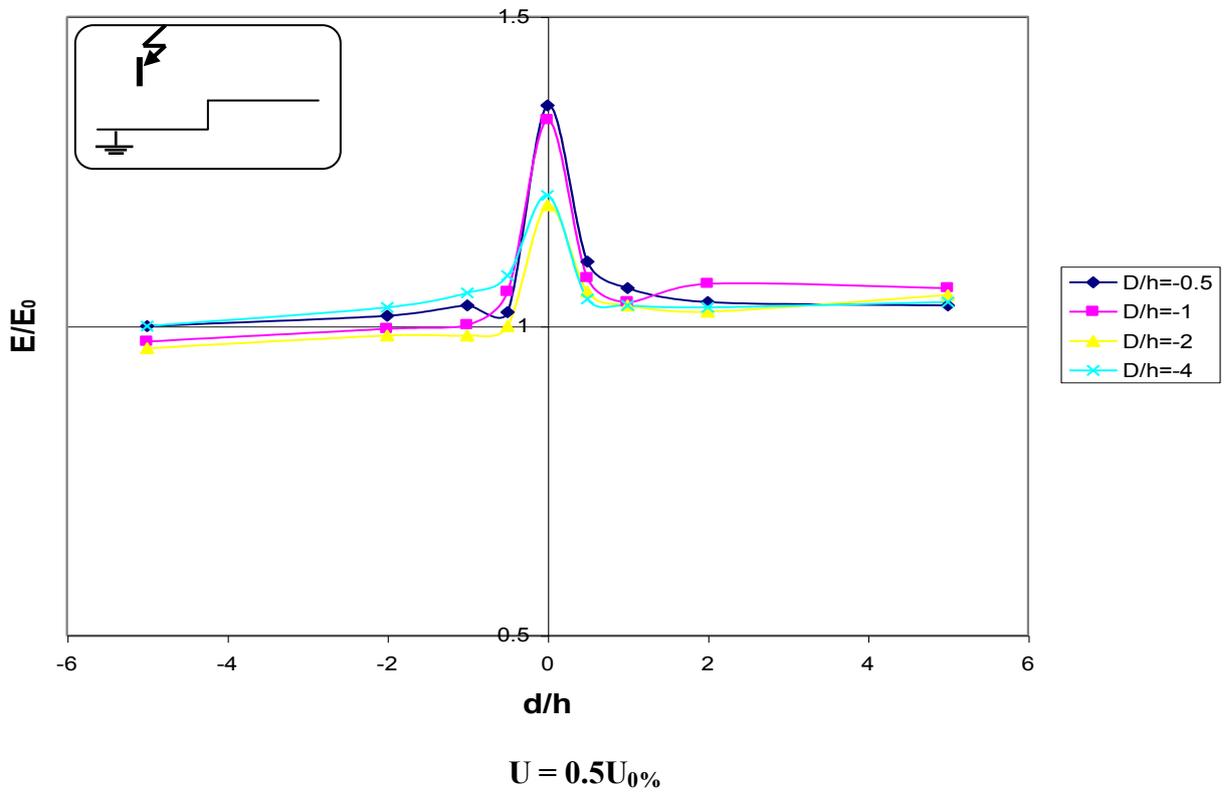
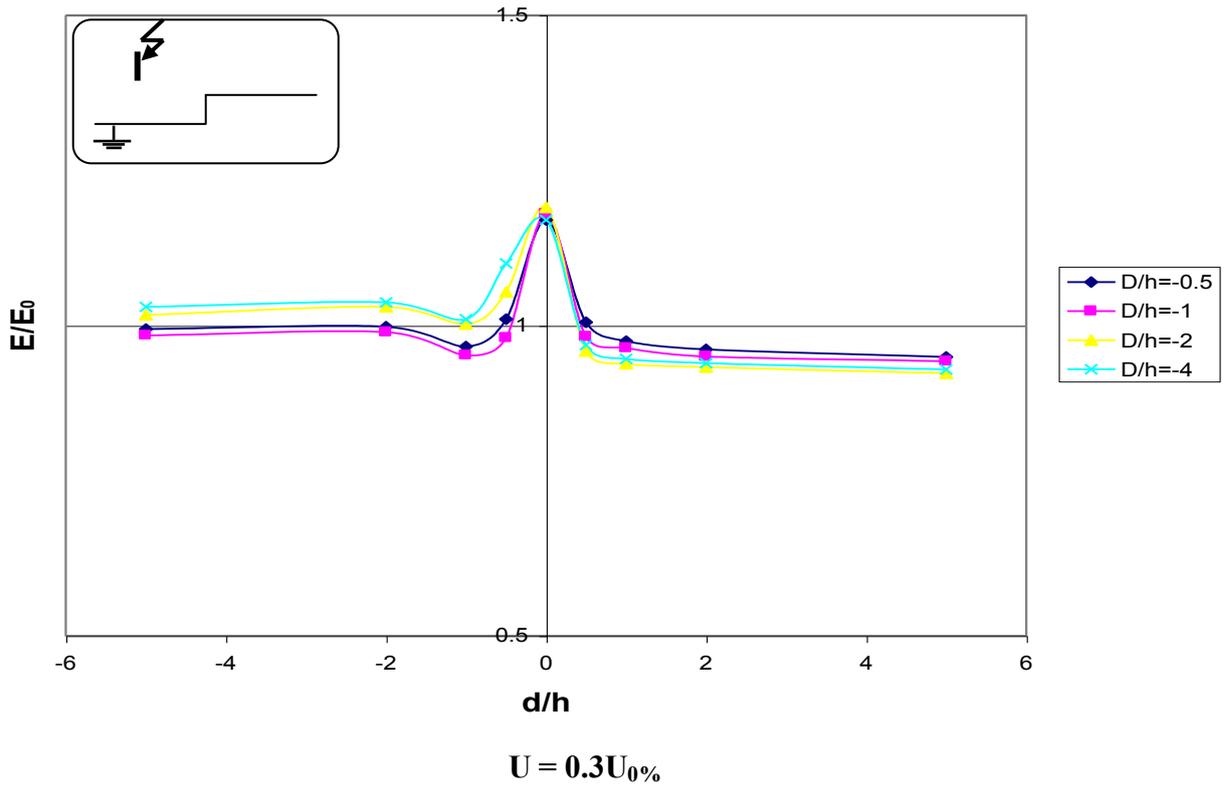
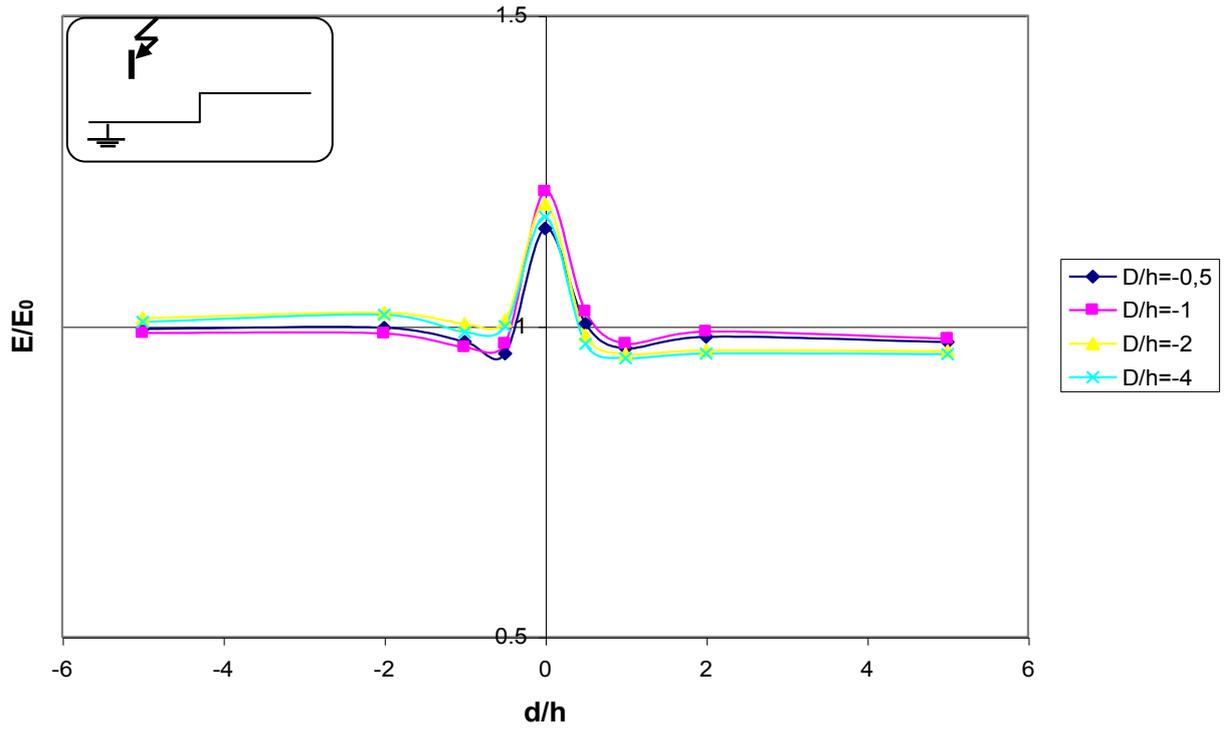
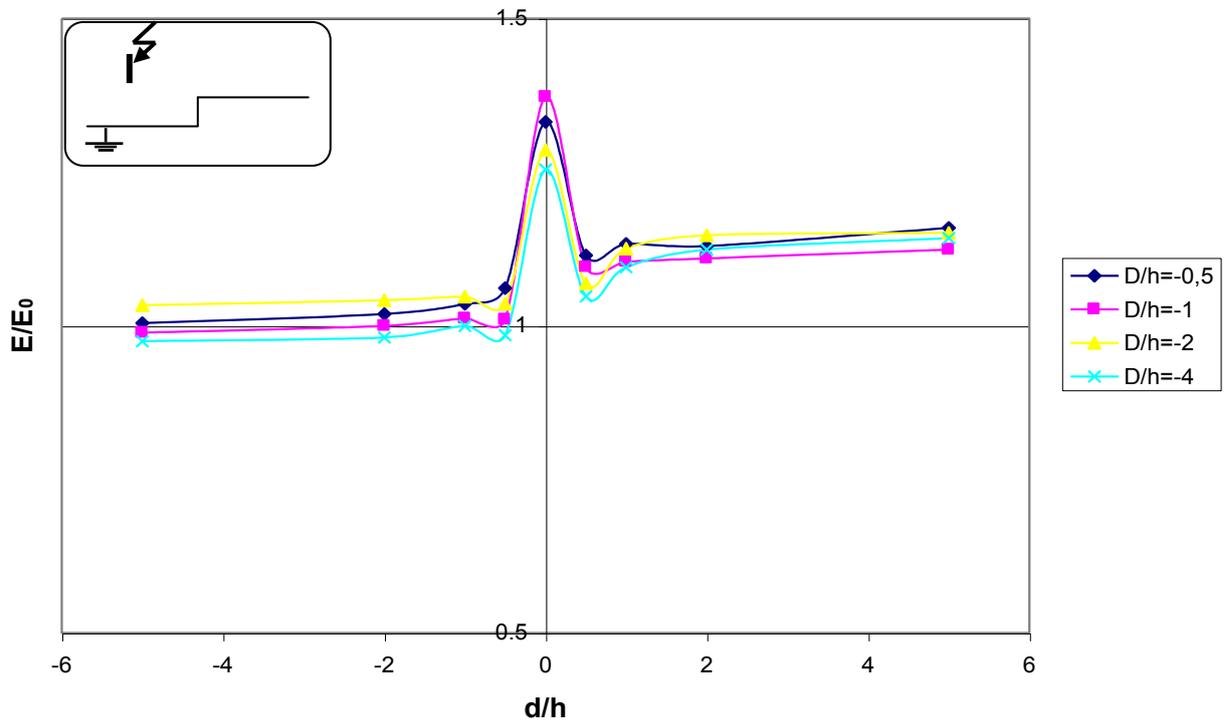


Figure IV.18– Champ électrique en fonction de position de la sonde (d/h)

Avec $h=8\text{cm}$.

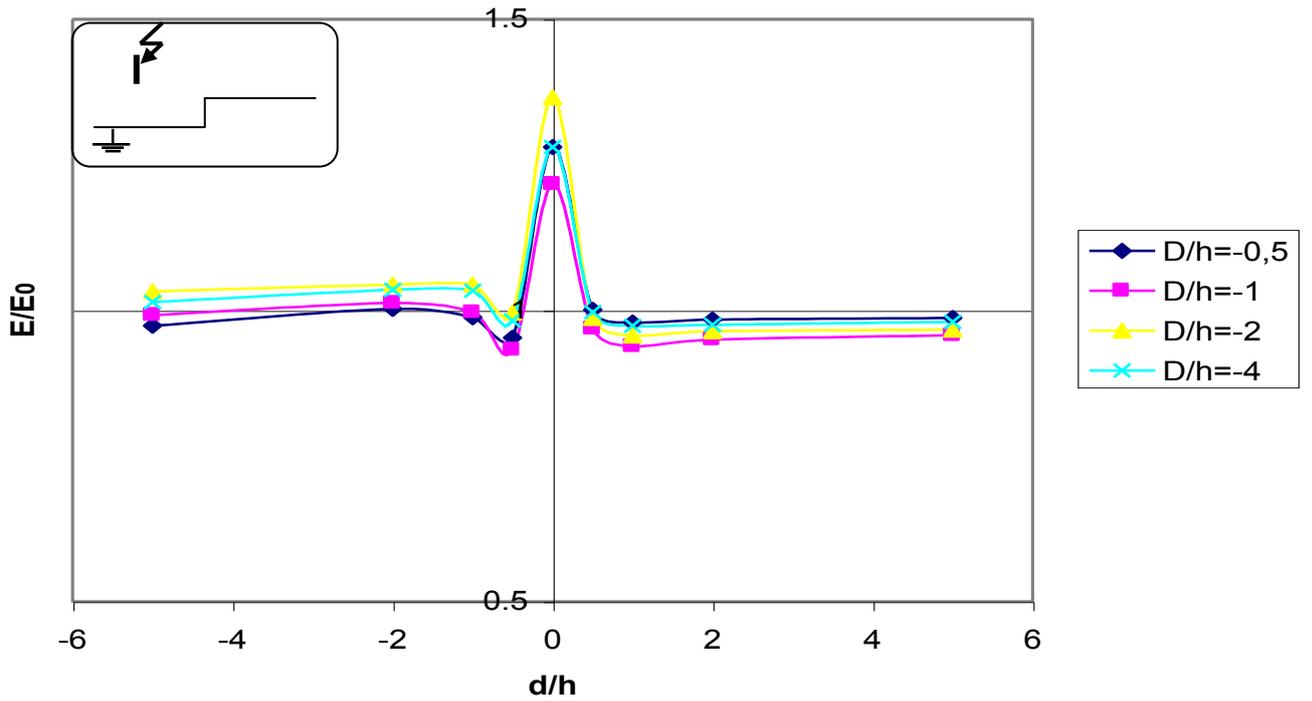


$U = 0.3U_0\%$

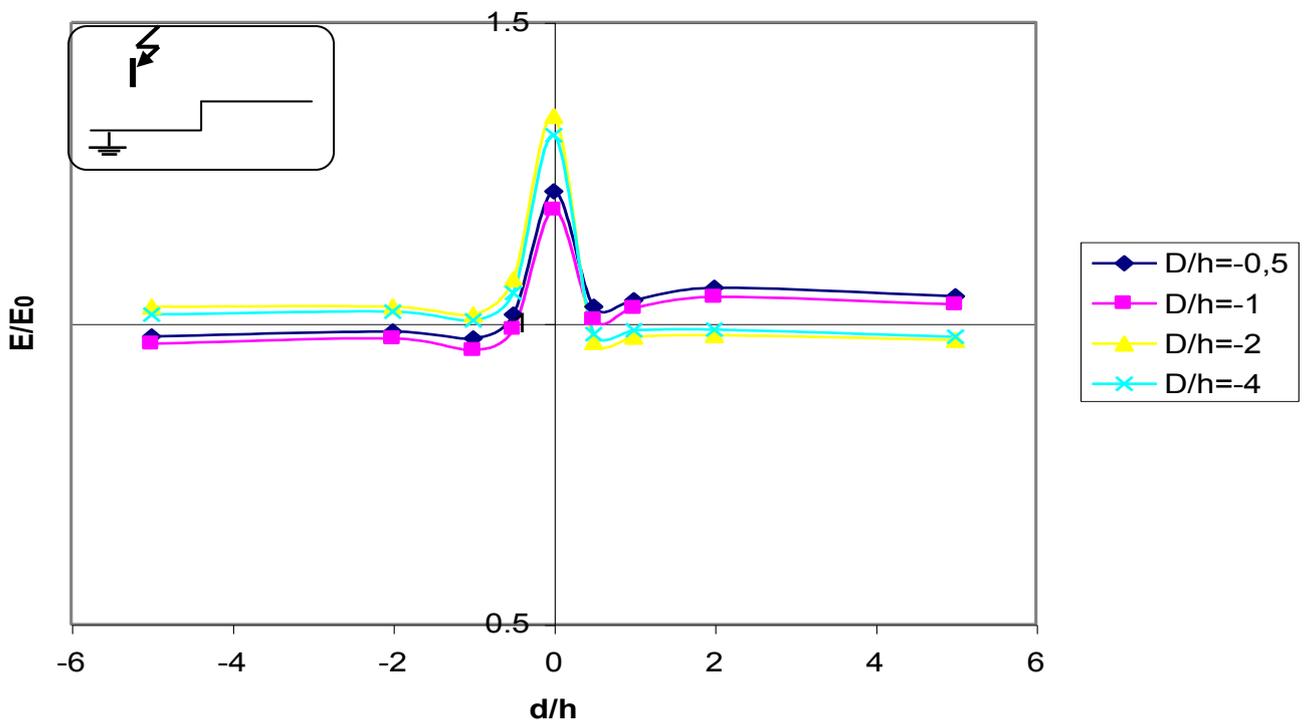


$U = 0.5U_0\%$

Figure IV.19– Champ électrique en fonction de position de la sonde (d/h)
Avec $h=12\text{cm}$.



$U = 0.3U_0\%$



$U = 0.5U_0\%$

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

Avec $h = 16\text{cm}$.

CONCLUSION

CONCLUSION GENERALE

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

Les chercheurs du Laboratoire de Haute Tension de l'ENP contribuent dans ces travaux en étudiant l'influence des propriétés électrogéologiques du sol sur la distribution du champ électrique.

En effet, ces propriétés sont considérées comme l'une des insuffisances du modèle électrogéométrique actuellement utilisé dans le dimensionnement de la protection contre la foudre.

Notre travail est orienté vers la détermination expérimentale de la distribution du champ sur un sol discontinu, afin de confirmer l'influence de l'interface.

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

La sonde que nous avons réalisée, est incorporée dans un système d'électrodes tige-plan, les divers essais effectués ont permis de donner l'intensité du champ électrique à la surface du sol discontinu, 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 l'interface.

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 homogène que dans celui d'un plan discontinu avec une interface de profondeur constante (e).

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

- 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 de 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.

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 formes 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 terre discontinue de différentes profondeurs de l'interface (e).
- 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.

BIBLIOGRAPHIQUE

BIBLIOGRAPHIE

- [01] **D. Le Jop** : « Protection contre la foudre : Cage maillée ou paratonnerre ? », Les cahiers Techniques du Bâtiment, N° 180, Mai 1997.
- [02] **A. Boubakeur, J. Ferras** : « Negative lightning breakdown of rod-plane air gaps with heterogeneous earth », 5^{ème} International Symposium on High Voltage Engineering, 5^{ème} ISH, paper 14-26, Braunschweig, RFA, 1987.
- [03] **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.
- [04] **A. Boubakeur, S. A. A. Boumaza, R. Belaïcha, R. Boudissa** : « Influence of earth heterogeneity on negative lightning breakdown of rod-plane air-gaps », 24th ICLP, Birmingham, 1998, pp : 473-477.
- [05] **R. Belaïcha** : « Zone d'attraction d'un paratonnerre vertical dans le cas d'une terre mauvaise conductrice », Thèse de Magister, ENP, Alger, Algérie 1994.
- [06] **A. Boubakeur, J. Ferras** : « Décharge de foudre dans les intervalles d'air tige-plan avec terre hétérogène », JTEA-87, Rapport N°7, Tunisie, MAI, 1987.
- [07] **A. Boubakeur, J. Ferras** : « Negative lightning breakdown of rod-conductor air gaps with heterogeneous earth », Middle East Power Systems Conference, MEPCOM'89, Paper EE05-025, Cairo-Assiut, Egypt, 1989.
- [08] **A. Boubakeur** : « Protection contre la foudre dans le cas d'une terre hétérogène », Séminaire sur la sécurité et la protection des installation et des équipement électriques, ENSEM-LPEE, Casablanca, Maroc, 1991.
- [09] **A. Boubakeur, A. Mekhaldi** : « Capture zones of a lighting conductor in the case of bad conducting earth », Middle East Power Systems Conference, MEPCOM'92, Assiut, Egypt, 1992, pp: 122-123.
- [10] **A. Boubakeur, R. Belaïcha** : « Contribution à l'étude d'un modèle électrogéométrique élargi », JTEA-93, Hammamet, Tunisie, Fev, 1993, pp.136-142.
- [11] **A. Boubakeur, R. Belaïcha** : « Modèle de protection en cas de terre mauvaise conductrice », Congrès International Foudre et Montagne, SEE, Chamonix, France, 1994, pp : 100-104.
- [12] **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.
- [13] **A. Boubakeur, R. Belaïcha** : « Influence of earth conductivity on the negative lightning breakdown of rod-plane air gaps », 9th International Symposium on High Voltage Engineering, 9th ISH, Graz, Austria, Aug-Sep. 1995, pp. 6711-1/2.
- [14] **A. Boubakeur, R. Belaïcha, A. Rahmani, R. Boudissa** : « Influence du rayon de courbure sur les zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal », CNHT'95, Béjaïa, Nov 1995, pp.36-40.

- [15] **R. Boudissa** : « Simulation des décharges d'interception du précurseur de foudre et influence de leur polarité sur la zone d'attraction d'un paratonnerre », CNHT, Béjaïa, Nov.1995, pp: 41-46
- [16] **A. Boubakeur, R. Belaïcha, 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.
- [17] **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.
- [18] **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.
- [19] **A. Rahmani, A.Boubakeur, H.Brouri** : « Model of an Horizontal Lightning Conductor in the Case of Earth Discontinuity », UPEC'2002, Stafford, UK, Sept. 2002, pp 832-835.
- [20] **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.
- [21] **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.
- [22] **C.Gary** : « La foudre et les phénomènes orageux », RGE, N°03, Mars 1989, pp : 3-11.
- [23] **K. Berger, R. B. Anderson et H. Kroninger** : « Paramètres des coups de foudre », Electra (F), N°41, 1975, pp : 23 - 37.
- [24] **R. H. Golde** : « Lightning: T2 », Academic Press, 2nd edition, London, 1981.
- [25] **M. Aguet** : « Haute Tension », Vol. XXII, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1987.
- [26] **C. Gary** : « La foudre : Des mythologies antiques à la recherche moderne », Masson, Paris, 1994.
- [27] **E. Kuffel, W. S. Zaengl** : « High voltage engineering », Pergamon Press, G.B; 1^{ère} Ed; 1984. pp: 463-488.
- [28] **Norme Française** : « Protection contre la foudre : Protection des structures et des zones ouvertes contre la foudre par paratonnerre à dispositif d'amorçage. », C17-102, Juillet 1995, pp : 1-48.
- [29] **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.

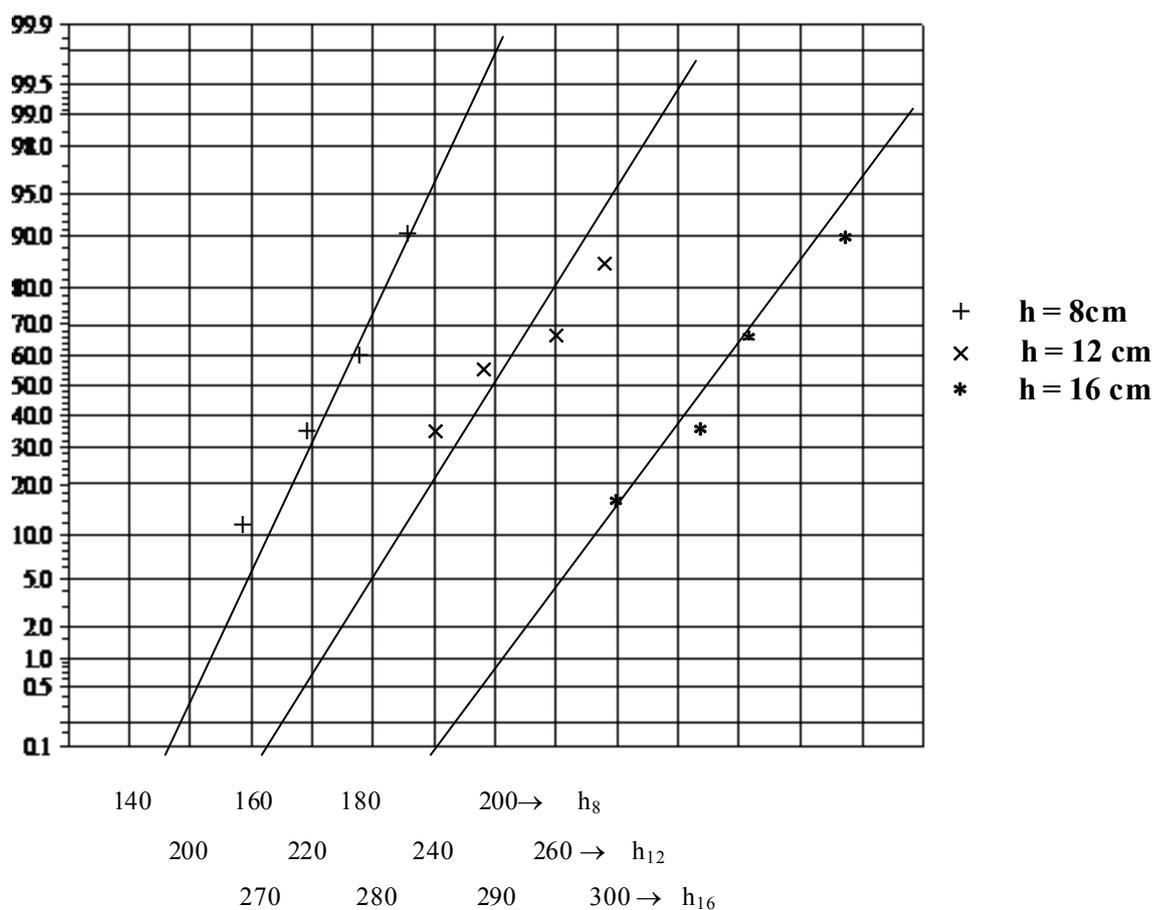
- [30] **A. Boubakeur, A. Chouchou, S. A. A. Boumaza** : «Influence of earth discontinuity on the capture zones of a vertical lightning conductor », 25th ICLP, Rhodes, Greece, 2000.
- [31] **C. E. I.60** ; « Techniques d'essais de haute tension », 1973, (60-01/02).
- [32] **S.Rataoin** : « contribution à la caractéristique du rayonnement électro magnétique de foudre et à sa modélisation en vue couplage sur les câble » N 93-41 1993, pp :94-115
- [33] **M. Dobardzie** : « Station d'essais au choc à haute tension », Rapport interne, Laboratoire de ENP Haute Tension, Alger, Algérie, 1972.

ANNEXE

DETERMINATION DE LA TENSIONS DE TENUE $U_{0\%}$ POUR L'INTERVALLE D'AIR TIGE-PLAN

h (cm)	8	12	16
$U_{50\%}$ (kV)	172	250	315
$U_{0\%}$ (kV)	143	213	285
$U_{0\%}/8$ (kV)	18	27	36

Tableau 1. Tension de tenue en polarité négative

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

Pour faciliter le réglage de la tension du générateur de choc, nous avons choisi les tensions suivantes :

h (cm)	8	12	16
0.3U_{0%} (kV)	43	64	85.5
0.5U_{0%} (kV)	71.5	106.5	142.5

Tableau 2. Tensions d'essais appliquées

Sommaire

<i>INTRODUCTION GENERALE</i>	1
<i>CHAPITRE I Foudre et Propriétés Electrogeologiques du Sol</i>	
I.1. Foudre et Protection contre la Foudre	3
<i>I.1.1. Champ électrique au sol et effet de couronne</i>	3
<i>I.1.2. Caractéristiques électriques de la foudre</i>	4
I.2. INFLUENCE DES PROPRIÉTÉS ELECTROGEOLOGIQUES DU SOL	6
<i>I.2.1 Propriétés électrogeologiques de la terre et distribution du champ au sol</i>	7
<i>I.2.2. modèle d'études utilisé par J.Ferras.</i>	8
I.3. PROPRIÉTÉS ELECTROGEOLOGIQUES DU SOL ET RIGIDITÉ DES INTERVALLES D'AIR POINTE- PLAN SOUS TENSION DE CHOC DE Foudre	13
<i>I.3.1 Cas d'un sol homogène mauvais conducteur</i>	13
<i>I.3.2 Cas d'un sol hétérogène</i>	16
<i>I.3.3 Cas d'un sol discontinu</i>	17
I.4. CONCLUSION	19
<i>CHAPITRE II MESURE DE CHAMP ELECTRIQUE.</i>	
INTRODUCTION	20
<i>II.1 Méthode directe du voltmètre électrostatique</i>	20
<i>II.2 Méthode indirecte de wilson</i>	21
<i>II.3 Méthode indirecte du voltmètre rotatif (moulin à champ électrique)</i>	22
<i>II.4 Méthode de la sonde à capacité répartie (scr)</i>	23
<i>II.5 CONCLUSION</i>	24
<i>CHAPITRE III TECHNIQUES EXPERIMENTALES</i>	
INTRODUCTION	25
III.1. GENERATION DES ONDES DE CHOC	25
<i>III.1.1 Générateur de choc</i>	25
<i>III.1.2 Tension de choc délivrée</i>	26
<i>III.1.3 Détermination de la tension $U_{0\%}$</i>	27
<i>III.1.4 Corrections atmosphériques</i>	28

III.2 MODELE EXPERIMENTAL	29
III.2.1 Modèle expérimental avec terre homogène	29
III.2.2 Modèle expérimental avec terre discontinue	29
III.2.3 Configurations du modèle expérimental	31
III.3 MESURE DU CHAMP PAR LA METHODE DE LA SONDE A CAPACITE REPARTIE (S.C.R)	33
III.3.1 Circuit de mesure :	33
III.3.2 Expression du champ mesuré	33
III.3.3 Détermination de la constante de la sonde K_s	36
III.3.4 Forme des signaux obtenus avec l'oscilloscope :	37
CHAPITRE IV RESULTATS OBTENUS ET INTERPRETATIONS .	
INTRODUCTION	38
IV.1 CAS DE LA TERRE HOMOGENE	38
IV.1.1 Détermination de la tension $U_{0\%}$	38
IV.1.2 Distribution du champ en fonction de la distance tige-axe de la sonde	39
IV.2 CAS DE LA TERRE DISCONTINUE	42
IV.2.1 Cas de la tige au dessus de la partie haute de la terre discontinue	42
IV.2.2 Cas de la tige au dessus de la partie basse de la terre discontinue	47
IV.3 DISCUSSIONS DES RESULTATS OBTENUS	56
IV.3.1 Tige située au-dessus de la partie haute du plan discontinu	56
IV.3.2 Tige située au-dessus de la partie basse du plan discontinu	56
 CONCLUSION GENERALE	 63
 BIBLIOGRAPHIE	 65
 ANNEXE	 68