

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique

Département de Génie Electrique

THESE
Présentée Par

المدسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

M^r CHOUCHOU Abdelmadjid

Ingénieur d'état en Electrotechnique à l'E.N.P

Pour l'obtention du grade de

MAGISTER EN ELECTROTECHNIQUE

Option : Réseaux Electriques et Haute Tension

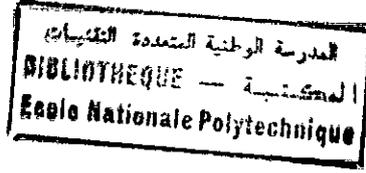
THEME

***DETERMINATION DES ZONES D'ATTRACTION
D'UN PARATONNERRE VERTICAL
DANS LE CAS D'UNE TERRE DISCONTINUE***

Soutenue publiquement le 20 Décembre 1999 devant la commission d'examen composé de :

M^r.

A. ZERGUERRAS	Professeur, ENP	Président
A. BOUBAKEUR	Maître de Conférences, ENP	Rapporteur
A. HELLAL	Maître de Conférences, ENP	Examineur
A. MEKHALDI	Docteur, ENP	Examineur
A. OUABDESSELAM	Chargé de cours, ENP	Examineur



DEDICACES

Je dédie ce modeste travail à :

Ma très chère mère ;

Mon très cher père ;

Ma petite sœur Asma ;

Toutes mes sœurs ;

Tous mes frères ;

Toute ma famille ;

Tous mes amis ;

.....et à vous.



REMERCIEMENTS

Ce travail a été effectué au sein du Laboratoire de Haute Tension de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger sous la direction de Monsieur A. BOUBAKEUR, Maître de conférences à l'E.N.P, qu'il trouve ici ma profonde gratitude et mes sincères remerciements pour l'aide efficace et les conseils précieux qu'il n'a cessé de me prodiguer, ainsi que le soutien et l'encouragement qu'il m'a apporté tout au long de ce travail.

Je tiens également à remercier très vivement Monsieur A. ZERGUERRAS, Professeur à l'ENP, pour avoir examiné ce travail et pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury.

J'exprime ma gratitude à Monsieur A. HELLAL, Maître de conférences à l'E.N.P pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de faire partie de ce jury.

Je remercie très vivement Monsieur A. MEKHALDI, Docteur à l'ENP, pour son aide et son soutien moral. Je le remercie également d'avoir accepté d'examiner ce travail et pour l'intérêt qu'il a porté à ce mémoire en me faisant l'honneur de participer à ce jury.

Mes vifs remerciements vont aussi à Monsieur A. OUABDESSELAM, Chargé de cours à l'E.N.P, dont je suis très honoré de sa présence dans le jury de cette thèse.

Mes remerciements vont également à Monsieur M. TEGUAR, Chargé de cours à l'ENP, pour ses conseils et son soutien moral.

Mes remerciements vont aussi à Monsieur S. A. A. BOUMAZA et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'achèvement de ce travail.

Que tout les enseignants qui ont contribué à ma formation, depuis la première classe de primaire jusqu'à aujourd'hui, reçoivent ma gratitude et en particulier ceux du département de Génie Electrique de l'ENP d'Alger.

Enfin, mes remerciements à tous mes amis chacun avec son nom.

Abdelmadjid CHOUCHOU

الهدف من هذا العمل هو دراسة مدى تأثير التباين في مستوى الأرض (أرض متقطعة) على منحنيات الجذب لصارف الصاعقة شاقولي. من أجل معرفة هذا التأثير قمنا بدراسة جميع الوضعيات الممكنة لصارف الصاعقة على الجهة العليا أو السفلى للأرض المدروسة. في هذه الوضعية الأخيرة، قمنا بدراسة البعد الأفقي لصارف الصاعقة عن الفاصل و أيضا القيمة النسبية لعمق الفاصل مقارنة بارتفاع صارف الصاعقة. كنتيجة لهذه الدراسة وجدنا أنه في مختلف الوضعيات المدروسة، مناطق الجذب لصارف الصاعقة لا تتوافق غالبا مع المنحنى المحدد بالنموذج الكهروهندسي في حالة أرض متجانسة جيدة الناقلية.

كلمات مفتاحية : الصواعق، النموذج الكهروهندسي، صارف صاعقة شاقولي، الحماية، أرض متقطعة، مناطق الجذب.

Résumé

Le but de ce travail est d'étudier l'influence de la discontinuité de la terre sur les zones d'attraction d'un paratonnerre vertical. Nous avons étudié toutes les configurations possibles suivant la position du paratonnerre sur la partie haute ou la partie basse de la terre discontinue. Dans ce dernier cas, en plus de la position horizontale du paratonnerre, nous avons étudié l'influence de la profondeur relative de la partie basse de la terre par rapport à la hauteur du paratonnerre. Pour les configurations étudiées, les zones d'attraction ne correspondent pas en général à celle définie par le modèle électrogéométrique pour un sol homogène bon conducteur.

Mots clés: Foudre, Protection, Modèle électrogéométrique, Paratonnerre vertical, Terre discontinue, Zones d'attraction.

Abstract

The aim of this work is to study the influence of earth discontinuity on the capture zones of a vertical lightning conductor. We have studied all possible configurations according to the lightning conductor position upon the high or the lower part of the discontinuous earth. In this last case, in addition to the lightning conductor horizontal position, we have studied the influence of the relative depth of the lower earth with regard to the lightning conductor height. For the different configurations, we found that the capture zones don't correspond, in general, to that defined by the classical electrogeometrical model.

Keywords: Lightning, Electrogeometrical model, Vertical lightning conductor, Protection, Discontinuous earth, Capture zones.

<i>Introduction générale</i>	1
Chapitre I– Foudre et protection contre la foudre	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Physique de la décharge.....	3
I.2.1 Electricité atmosphérique et phénomènes orageux.....	3
I.2.1.1 Electricité atmosphérique.....	3
I.2.1.2 Nuages orageux.....	4
I.2.1.3 Champ électrique au sol.....	5
I.2.2 Eléments de statistique de la foudre.....	6
I.2.2.1 Sévérité orageuse.....	6
I.2.2.2 Dispositifs de mesure de la densité de foudroiement.....	7
I.2.2.3 Facteurs influençant le foudroiement.....	8
I.2.3 Classification et description des coups de foudre.....	9
I.2.3.1 Classification des coups de foudre.....	9
I.2.3.2 Déroulement d'un coup de foudre.....	10
I.2.4 Paramètres des coups de foudre.....	12
I.2.4.1 Formes typiques des courants de foudre.....	12
I.2.4.2 Distributions des différents paramètres des coups de foudre.....	13
I.2.4.3 Autres paramètres caractérisant la foudre.....	14
I.2.4.4 Tableau récapitulatif des paramètres typiques de la foudre.....	15
I.2.5 Les effets de la foudre.....	15
I.3 Protection contre la foudre.....	17
I.3.1 Introduction.....	17
I.3.2 Mécanisme d'impact d'un coup de foudre descendant négatif.....	17
I.3.3 Modèle électrogéométrique.....	18
I.3.3.1 Champ généré au sol par un traceur descendant.....	18
I.3.3.2 Distance d'amorçage du modèle de Whitehead.....	20
I.3.3.3 Critique du modèle électrogéométrique.....	21
I.3.3.4 Application du modèle électrogéométrique.....	21
I.3.3.4.1 Méthode de la sphère fictive.....	21
I.3.3.4.2 Zone de capture d'une tige verticale.....	22
Chapitre II– Influence des propriétés électrogéologiques du sol sur la décharge de foudre	
II.1 Introduction.....	25
II.2 Influence des propriétés électrogéologiques du sol sur la décharge de foudre.....	25
II.3 Décharge de foudre en terre hétérogène.....	26
II.3.1 Modèle mathématique.....	26
II.3.2 Modèle expérimental.....	28
II.4 Détermination des zones d'attraction d'un paratonnerre avec terre hétérogène.....	30
II.4.1 Zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal.....	30
II.4.2 Zones d'attraction d'un paratonnerre vertical.....	33
II.5 Décharge de foudre sur une terre homogène mauvaise conductrice.....	34
II.5.1 Paratonnerre vertical.....	34
II.5.2 Paratonnerre horizontal.....	36

II.6 Influence des propriétés électrogéologiques du sol sur la rigidité des intervalles d'air pointe- plan sous tension de choc de foudre	37
II.6.1 Cas d'un sol homogène	37
II.6.2 Cas d'un sol hétérogène	40
II.6.3 Cas d'un sol discontinu	41
II.7 Conclusion	44
 Chapitre III– Techniques expérimentales	
III.1 Introduction	45
III.2 Circuits d'essai et de mesure	45
III.3 Modèle expérimental réduit	46
III.3.1 Paratonnerre sur la partie haute de la terre discontinue	47
III.3.2 Paratonnerre sur la partie basse de la terre discontinue	47
III.4 Méthode de détermination des zones d'attraction du paratonnerre	49
III.4.1 Détermination de la tension disruptive $U_{100\%}$	49
III.4.2 Détermination des zones d'attraction du paratonnerre	49
III.5 Vérification du modèle électrogéométrique	49
 Chapitre IV– Zones d'attraction d'un paratonnerre vertical avec une terre discontinue	
IV.1 Introduction	51
IV.2 Détermination de la tension disruptive $U_{100\%}$	51
IV.3 Vérification du modèle électrogéométrique	52
IV.4 Zones d'attraction d'un paratonnerre vertical dans le cas d'une terre discontinue	53
IV.4.1 Paratonnerre situé sur la partie haute de la terre discontinue entre l'interface et l'axe de la tige	54
IV.4.1.1 Etude des zones d'attraction du paratonnerre	54
IV.4.1.2 Influence de la discontinuité sur le niveau de terre fictive	55
IV.4.2 Paratonnerre sur la partie haute de la terre discontinue et l'axe de la tige situé entre l'interface et le paratonnerre	55
IV.4.3 Paratonnerre sur la partie basse de la terre discontinue et l'axe de la tige situé entre l'interface et le paratonnerre	56
IV.4.3.1 Détermination des zones d'attraction	56
IV.4.3.2 Influence de la profondeur de la discontinuité sur les zones d'attraction du paratonnerre	59
IV.4.4 Paratonnerre situé sur la partie basse de la terre discontinue entre l'interface et l'axe de la tige	61
IV.4.4.1 Détermination des zones d'attraction	61
IV.4.4.2 Influence de la profondeur de la discontinuité sur les zones d'attraction du paratonnerre	64
IV.4.4.3 Influence de la profondeur de la discontinuité sur le niveau de terre fictive ..	65
IV.5 Types de décharges observées	66
 Conclusion générale	67
 Références bibliographiques	69
 Annexe I	74
 Annexe II	79

INTRODUCTION GENERALE

Depuis les temps les plus reculés, la foudre a effrayé les hommes. Considérée le plus souvent comme une manifestation de la puissance divine, la foudre a fait et fait encore de nombreuses victimes et beaucoup de dégâts matériels (incendies, explosions de liquides ou gaz inflammables, destructions des équipements électriques et électroniques).

La protection des édifices contre les effets directs de la foudre, débuta au XVII^{ème} siècle avec le paratonnerre " tige de Franklin ". A l'heure actuelle, plusieurs types de protection sont utilisés (paratonnerre à cage, câble de garde...).

Dans le but d'atteindre une meilleure protection contre ce phénomène naturel, des travaux de recherche ont mené, 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 [GAR94]. Ces travaux ont permis d'élaborer une nouvelle méthode de détermination de la zone de protection d'une tige verticale. 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 " modèle électrogéométrique ".

Ce modèle quoique largement utilisé, ne tient pas compte des propriétés électrogéologiques du sol. Pour examiner l'influence de ces propriétés, un nombre important de travaux ont été effectués au Laboratoire de Haute Tension de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger [FER98b] [BEL94] [BOU90] [RAH96] [BOU98b]. Ces travaux ont été consacrés à l'étude des zones d'attraction des paratonnerres avec les terres hétérogènes et les terres mauvaises conductrices. Tenant compte des résultats de ces travaux il a été jugé nécessaire d'étudier l'influence de la discontinuité de la terre sur les zones d'attraction d'un paratonnerre vertical.

Dans le premier chapitre, nous étudions la physique de la décharge de foudre, le mécanisme d'impact et le modèle électrogéométrique et son application dans le domaine de la protection.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons l'influence des propriétés électrogéologiques du sol sur le point d'impact de la décharge de foudre, en se référant spécialement aux résultats des travaux effectués au Laboratoire Haute Tension de l'ENP d'Alger.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation des techniques expérimentales utilisées dans notre étude.

Dans le dernier chapitre, nous présentons les résultats obtenus et leurs interprétations.

Chapitre I

FOUDRE ET PROTECTION

CONTRE LA FOUORE

1.1 INTRODUCTION

L'étude théorique et expérimentale de la foudre naturelle a été menée depuis bien des années. Elle a mis en évidence l'existence de zones où l'activité orageuse est plus importante et a permis une analyse des conditions de développement des charges électriques dans les nuages orageux et des différents types de coups de foudre. Enfin le modèle électrogéométrique relatif au mécanisme d'impact permet la conception des systèmes de protection.

Dans la première partie de ce chapitre, nous présentons la phénoménologie de la décharge de foudre depuis la formation des nuages orageux jusqu'au coup de foudre proprement dit.

Dans la deuxième partie, nous nous intéressons à la physique de l'impact, au modèle électrogéométrique et enfin à la protection contre la foudre.

1.2 PHYSIQUE DE LA DECHARGE

1.2.1 Electricité atmosphérique et les phénomènes orageux

1.2.1.1 Electricité atmosphérique

Globalement et du point de vue électrique, l'ensemble terre-électrosphère (zone conductrice de l'atmosphère) se présente comme un condensateur, dont l'une des faces chargée négativement serait la surface terrestre et l'autre face serait en fait une distribution volumique de charge positive entre la terre et la partie de l'atmosphère située au-delà de 50 km. La densité de la charge positive y décroît avec l'altitude. Il existe alors dans la partie chargée de l'atmosphère un champ électrique dirigé vers le centre de la terre et qui décroît également avec l'altitude, sa valeur au niveau du sol est de l'ordre de 100 à 150 V/m.

La coexistence de ce champ et des charges positives conduit à un courant de conduction dont l'effet sur la charge de la terre est loin d'être négligeable. Mais la terre conserve sa charge grâce aux nombreux orages qui se manifestent en permanence et qui avec un courant moyen de l'ordre de 1 Ampère équilibrent le courant de conduction [GAR89].

1.2.1.2 Nuages orageux

Un orage commence par la formation d'un ou de plusieurs nuages fortement électrisés. Un nuage orageux est généralement un cimulo-nimbus qui peut s'étendre sur plusieurs kilomètres carrés ; sa base se trouve à environ 2 à 3 km au-dessus du sol et il se développe en hauteur jusqu'à des altitudes de 10 à 15 km.

La formation d'un nuage orageux est due aux mouvements verticaux de l'air dont la vitesse peut dépasser 20 m/s. Pour des conditions convenables de température et d'humidité, il se produit une détente de l'air humide au cours de son ascension, avec un refroidissement entraînant la condensation [LER84].

Malgré le grand nombre de travaux consacrés à l'explication du mécanisme de séparation des charges à l'intérieur du nuage orageux, ce phénomène reste encore assez mal connu. Plusieurs théories ont été proposées pour rendre compte de ce mécanisme, nous nous limitons à citer les deux suivantes [AGU82] :

- La théorie microscopique : elle est basée sur la création de dipôles et la dissociation locale des charges.
- La théorie macroscopique : qui se préoccupe des courants de convection dans un nuage et se base sur la théorie de diffusion.

Dans les deux théories, le nuage comporte des aérosols et de fines précipitations qui ont pour rôle la capture sélective d'ions de l'air.

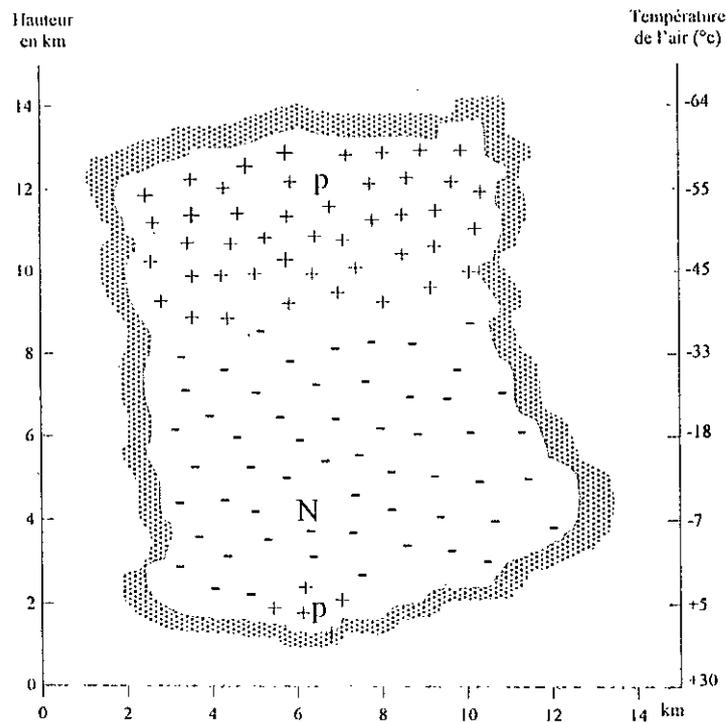


Figure 1.1.— Structure générale d'un nuage orageux.

Le transfert des charges séparées est relativement clair : les porteurs de charges positives sont assez légers pour être entraînés par les courants ascendants, tandis que, les porteurs de charges négatives sont assez lourds pour tomber malgré ces courants.

A la fin de ce processus, les gouttelettes d'eau chargée négativement viennent se déposer en bas du nuage, alors que les cristaux de glace chargée positivement finissent par se stabiliser au sommet. Il existe parfois une poche chargée positivement à la base du nuage, mais aucune explication satisfaisante de sa présence ou de son rôle n'a encore pu être donnée (figure 1.1) [GAR94].

1.2.1.3 Champ électrique au sol

Nous avons vu qu'il existe par beau temps, un champ électrique faible permanent dirigé vers la surface du sol, dont l'amplitude est de l'ordre de 100 à 150 V/m. A l'approche d'un nuage orageux, ce champ commence à s'inverser puis croît dans de fortes proportions. Lorsqu'il atteint une valeur de 15 à 20 kV/m, une décharge au sol est imminente (figure 1.2) [GAR94].

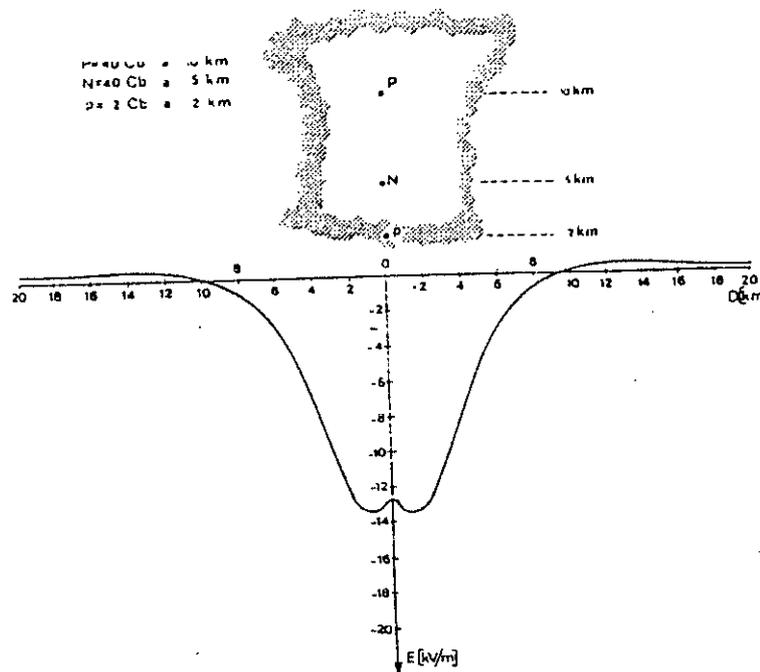


Figure 1.2.— Champ électrique au sol créée par un nuage orageux [LER84].

Le sol étant en générale pourvu d'un grand nombre d'irrégularités, l'influence d'une aspérité au sol sur le mécanisme de la foudre est déterminée par le taux d'accroissement du champ électrostatique suivant la forme et les dimensions de l'aspérité. En effet, la concentration des lignes de forces, peut considérablement renforcer le champ superficiel local au sommet de l'aspérité.

Dans ces conditions, la valeur du champ ambiant pour laquelle les phénomènes d'ionisation apparaissent au-dessus des objets au sol est faible. Le degré d'accroissement du champ (k) est alors déterminé en fonction du rapport (H/R) caractérisant l'effet de la pointe.

A titre d'exemple, le champ au sommet d'un hémisphère est le triple du champ moyen ($k=3$), alors que, pour un ellipsoïde pointu avec un rapport de $H/R=30$, le champ est multiplié par un facteur $k=300$ [LER84] [BER74] (figure I.3).

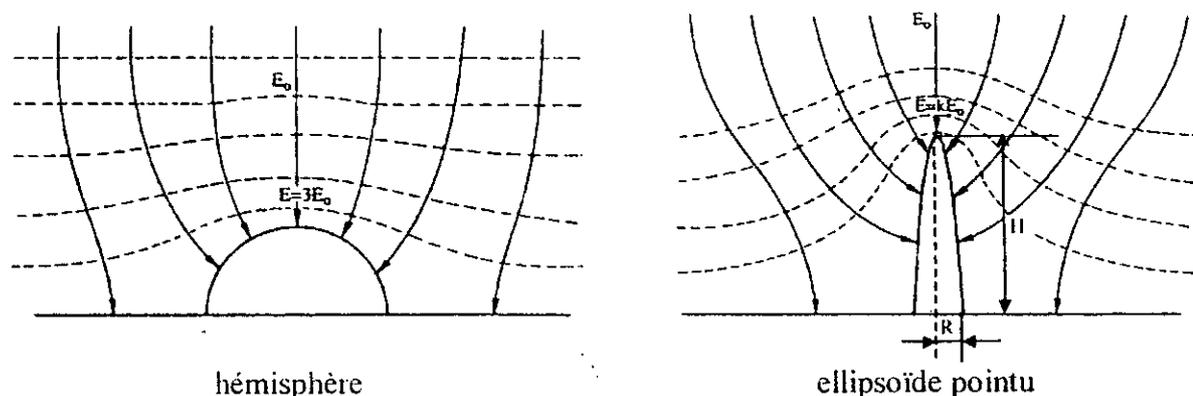


Figure I.3.– Amplification du champ électrique au sommet d'une aspérité.

I.2.2 Eléments de statistique de la foudre

I.2.2.1 Sévérité orageuse

On caractérise la sévérité orageuse d'une région donnée par son niveau kéraunique N_k , qui est par définition le nombre de jours par an où le tonnerre a été entendu. En Algérie, le niveau kéraunique moyen est de l'ordre de 15. Pour certaines régions d'Afrique équatoriale et en Indonésie, ce niveau est beaucoup plus élevé et dépasse 180 [LER84] [GAR94].

La notion de niveau kéraunique est insuffisante, pour pouvoir fournir des indications sur la fréquence de foudroiement et sur l'existence de zones locales particulièrement foudroyées. Ainsi, on a introduit la notion de densité régionale de coups de foudre au sol qui est un paramètre fondamental à la base de toute estimation de la fréquence des coups de foudre. Il exprime le nombre de coups de foudre par km^2 et par an, et peut être déterminé 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 [AND80] :

$$N_g = \frac{Y_g \cdot n}{\pi \cdot R_g^2}$$

où :

N_g : nombre de coups de foudre par km^2 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.

n : nombre total de coups de foudre enregistrés.

R_g : rayon d'action du 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 [ERI76] :

$$N_g = a \cdot N_k^b$$

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 [AND 80].

$$N_g = 0.023 \cdot N_k^{1.3}$$

Une autre relation de la même forme, a été recommandée par le groupe de travail "Foudre" de la CIGRE, elle est donnée par [GAR94] :

$$N_g = 0.04 \cdot N_k^{1.25}$$

D'autres expressions ont été aussi proposées, dont les principales sont [LER84] :

$$N_g = N_k \cdot (0.1 + 0.35 \sin \alpha) \cdot (0.4 \pm 0.2)$$

$$N_g = N_k^{(1.9 \pm 0.1)} \cdot (2.6 \pm 0.2) \cdot 10^{-3}$$

α : altitude de la région considérée.

1.2.2.2 Dispositifs de mesure de la densité de foudroiement

Afin de mesurer la densité de coups de foudre d'une région donnée, des dispositifs sont mis au point, dont les principaux sont :

a- le compteur CIGRE

Cet appareil mis au point par un groupe de travail de la CIGRE, mesure la variation du champ électrique local produite par une décharge atmosphérique. Cependant, ce compteur ne fait pas de distinction entre les éclairs intra-nuages et les coups de foudre au sol.

b- Compteur Optique

Cet appareil permet de photographier et d'enregistrer directement sur un film une portion du ciel orageux, après avoir exposé le film obtenu, on peut compter et localiser les décharges au sol et intra-nuages.

c- comptage par triangulation

Ce compteur est basé sur le principe de la triangulation radiogoniométrique du champ électromagnétique rayonné par les décharges. Ce type d'appareil est beaucoup plus précis que les autres et permet d'obtenir une localisation précise des coups de foudre.

1.2.2.3 Facteurs influençant le foudroiement

La densité de coups de foudre au sol est une indication moyenne qui caractérise la sévérité orageuse d'une région donnée, mais elle ne donne pas avec précision les zones locales particulièrement foudroyées appelées « Nids d'orages ».

Parmi les facteurs locaux influençant le foudroiement, nous en citons :

a- Facteurs topologiques

Certaines zones, caractérisées par des conditions atmosphériques qui favorisent la formation des nuages orageux, en général des orages de chaleur, sont considérées comme des zones préférentielles de la foudre. D'autre part, la canalisation des mouvements d'air par des vallées ou des fleuves, favorisent l'existence des couloirs orageux. Ainsi, en montagne, les versants des vallées sont souvent plus foudroyés que les sommets [ROU93].

b- Facteurs géologiques

Le point exact d'un coup de foudre n'est déterminé que dans la partie inférieure de la trajectoire du traceur, donc la présence des structures élevées a une grande influence sur la décision de l'impact [LER84]. D'autre part, la conductivité de ces structures ou du sol même est un facteur qui a une influence considérable sur la décision finale du point d'impact.

Les observations concernant le foudroiement des lignes haute-tension, ainsi que les résultats de travaux de recherches au laboratoire, ont montré qu'une bonne conductivité du sol favorise le développement de la décharge ascendante et l'attraction du coup de foudre. Ce résultat peut être appliqué aux failles humides, aux nappes d'eau et aux terrains marécageux [LER84].

I.2.3 Classification et description des coups de foudre

I.2.3.1 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 ou à l'intérieur d'un nuage varie considérablement. Lorsqu'il atteint la valeur limite de claquage, il y a une décharge électrique. Cette décharge se présente sous trois formes :

- Décharge entre nuages (figure I.4 a).
- Décharge à l'intérieur des nuages (figure I.4 b).
- Décharge entre nuage et terre, c'est la foudre (figure I.4 c).

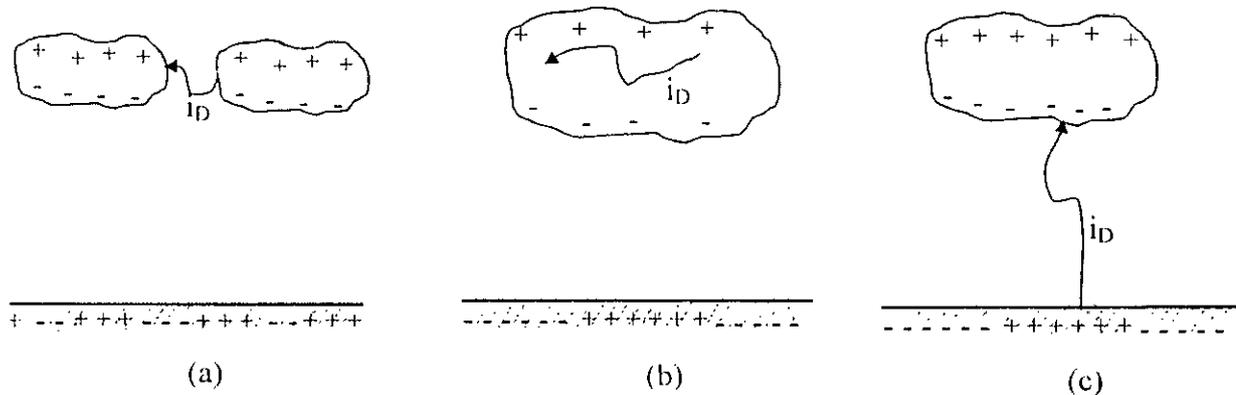
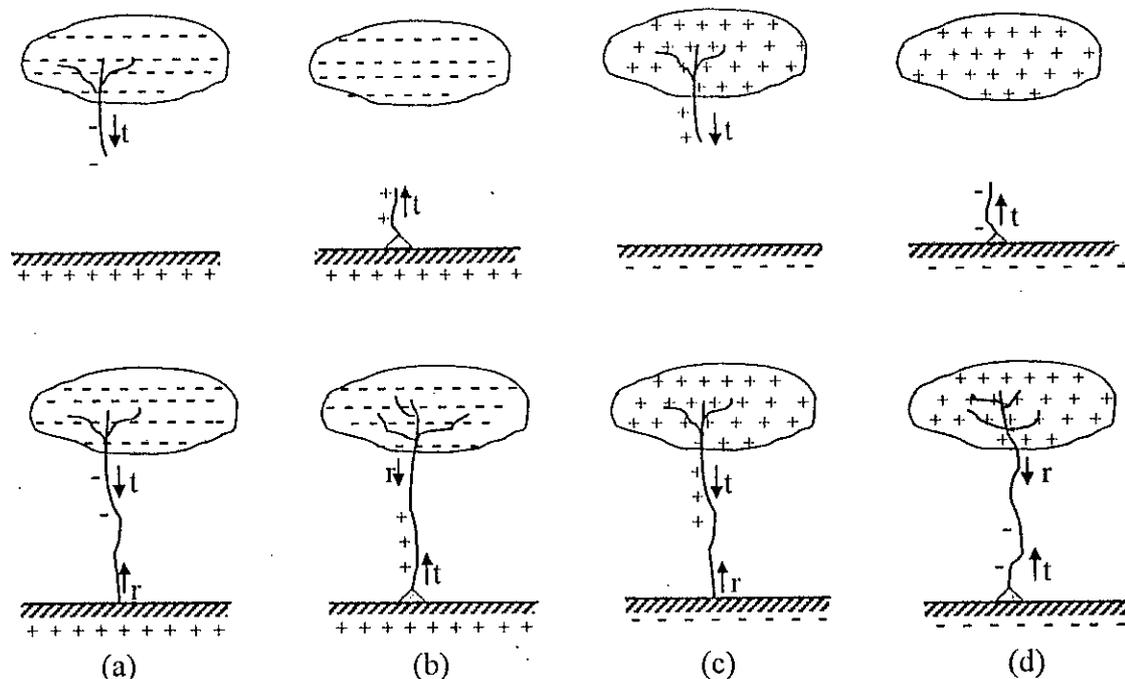


Figure I.4.- Différents types de décharges

On peut distinguer quatre types de coups de foudre, selon la polarité du nuage déchargé -positive ou négative- et selon le sens de propagation du traceur par bonds -descendant ou ascendant-. Une subdivision plus fine de ces quatre types, a été introduite par **K.Berger** [AND80], pour prendre en compte les cas où les prédécharges se développent sans être suivies par des courants de l'arc en retour [return stroke](figure I.5).

Dans les régions tempérées, le type le plus fréquent est le coup de foudre descendant négatif (80 à 90%) [GAR94].



t : traceur (leader) r : arc en retour.

- (a) coup de foudre descendant négatif (canal ionisé -, courant de foudre -).
- (b) coup de foudre ascendant positif (canal ionisé +, courant de foudre -).
- (c) coup de foudre descendant positif (canal ionisé +, courant de foudre +).
- (d) coup de foudre ascendant négatif (canal ionisé -, courant de foudre +).

Figure I.5.— Différents types de coups de foudre, selon K. Berger [AGU82].

1.2.3.2 Déroulement d'un coup de foudre

a) Coup de foudre descendant négatif

La première phase d'un coup de foudre consiste en une succession de décharges préliminaires à la base du nuage, qui ont pour effet de réorganiser les charges du nuage et de créer les conditions nécessaires au développement d'un précurseur.

A la suite de la décharge préliminaire, une série d'arcs électriques commence à progresser vers le sol par bonds successifs, avec une vitesse moyenne comprise entre 0.15 et 0.2 m/ μ s. Entre deux bonds successifs, on observe des temps d'arrêt de l'ordre de 40 à 100 μ s [LER84] [AGU82] [FOF96].

Lorsque cette prédécharge appelée "traceur par bonds" se rapproche du sol, 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. Lorsque l'une des décharges ascendantes entre en contact avec le traceur descendant par bonds, il s'établit un court-circuit entre le nuage et le sol, qui va permettre le passage d'un courant à

forte intensité. Cette première décharge appelée arc en retour (return stroke) correspond à la neutralisation des charges du traceur [LER84] [KRI94] [HUT89]. Plusieurs décharges successives peuvent ainsi avoir lieu.

La figure I.6 illustre la formation d'un coup de foudre descendant négatif.

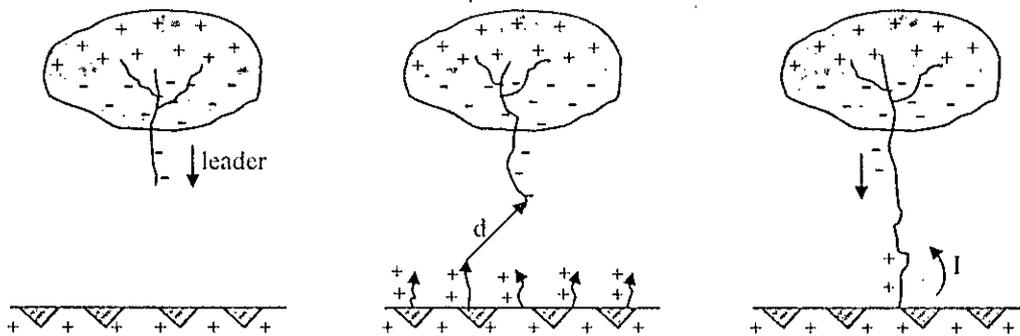


Figure I.6.– Coup de foudre descendant négatif en plaine.

En général, un coup de foudre dure de 0.2 à 1 seconde et comporte en moyenne quatre décharges partielles [LER84].

La figure I.7, montre l'évolution temporel d'un coup de foudre descendant négatif.

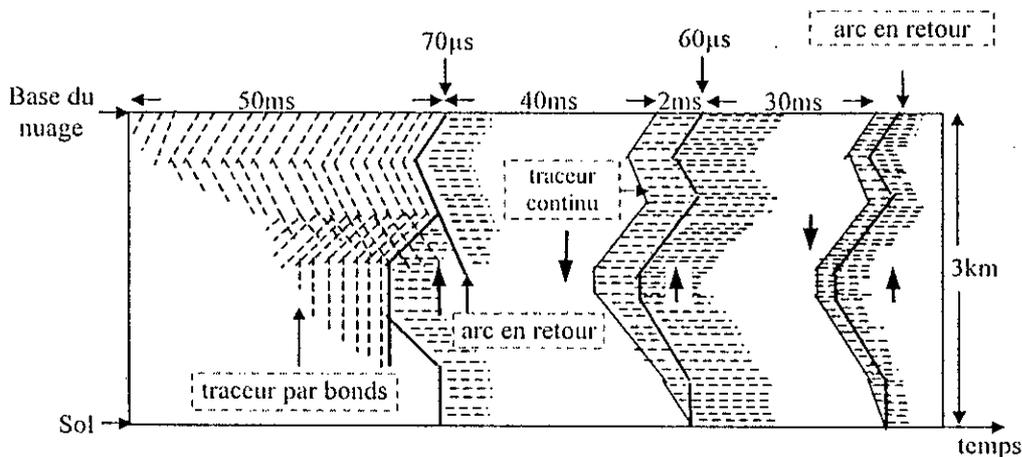


Figure I.7.– Evolution temporel d'un coup de foudre descendant négatif.

b) Coup de foudre ascendant positif

La présence de saillies et d'aspérités naturelles ou artificielles au niveau de la surface de la terre, favorise l'apparition des effluves d'effet couronne chargées positivement qui se développent d'autant plus loin et avec d'autant plus d'intensité, que les dimensions de l'aspérité

sont plus importantes. Ces effluves se transforment par la suite en un traceur ascendant qui progresse vers le nuage avec une vitesse moyenne de $2 \text{ à } 6 \cdot 10^4 \text{ m/s}$ [LER84]. Lorsque ce traceur ascendant touche la base du nuage il s'établit une décharge dont la durée peut atteindre la seconde, c'est le coup de foudre ascendant. Un tel coup de foudre est fréquemment observé à partir des structures de grande hauteur.

1.2.4 Paramètres électriques des coups de foudre

1.2.4.1 Formes typiques des courants de foudre

Les formes des impulsions positives, des premières impulsions négatives et des impulsions négatives suivantes sont nettement différentes (figure 1.8).

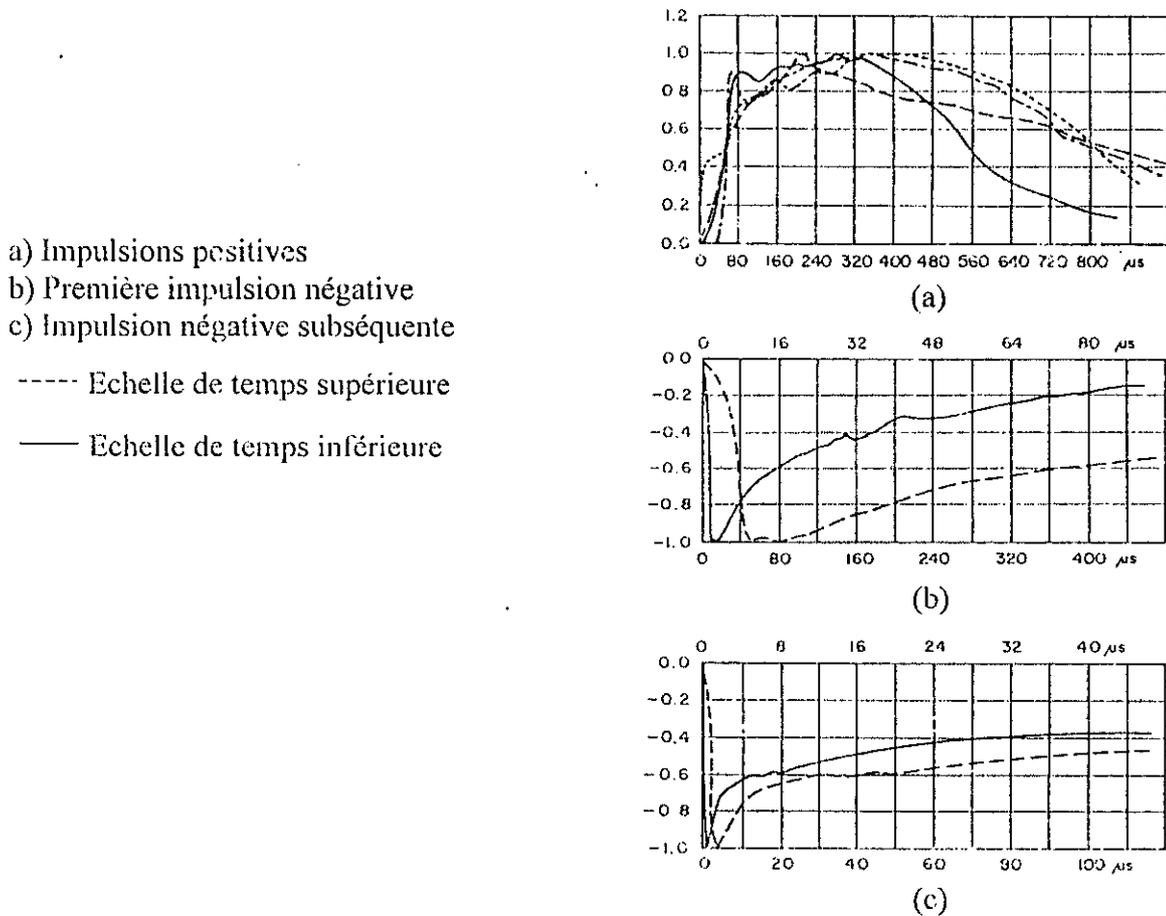


Figure 1.8.— Formes typiques des différents courants de foudre [BER75].

Le premier coup de foudre est caractérisé par un temps de montée jusqu'à la crête de 2 à 20 μs , une durée de queue de l'ordre d'une centaine de microsecondes et une amplitude variant entre 3 et 200 kA.

Pour les décharges secondaires négatives, la durée de front est très courte, inférieure à la microseconde, mais la queue de l'onde est bien plus régulière que dans la décharge principale [ALA93] [AND80] [BER75].

Le coup de foudre positif est constitué d'une seule impulsion qui dure de 0.1 à 0.2 s et la durée du front varie entre 20 et 200 μ s. L'amplitude est globalement supérieure à celle des coups négatifs et dépasse fréquemment 100 kA [GAR94].

1.2.4.2 Distributions des différents paramètres des coups de foudre

L'analyse des données mondiales obtenues à partir des mesures sur les courants des coups de foudre enregistrés, montre que les distributions des courants de foudre et des raideurs de front obéissent à une loi de probabilité de type log-normale [SZP74] [AND80].

La figure 1.9, représente la distribution globale des amplitudes des différents types des coups de foudre [GAR94]. Ces courbes montrent que, dans 10% des cas, l'amplitude des courants de foudre positifs peut atteindre de très fortes valeurs, supérieures à 150 kA, tandis que, l'amplitude des courants de foudre négatifs est nettement plus faible.

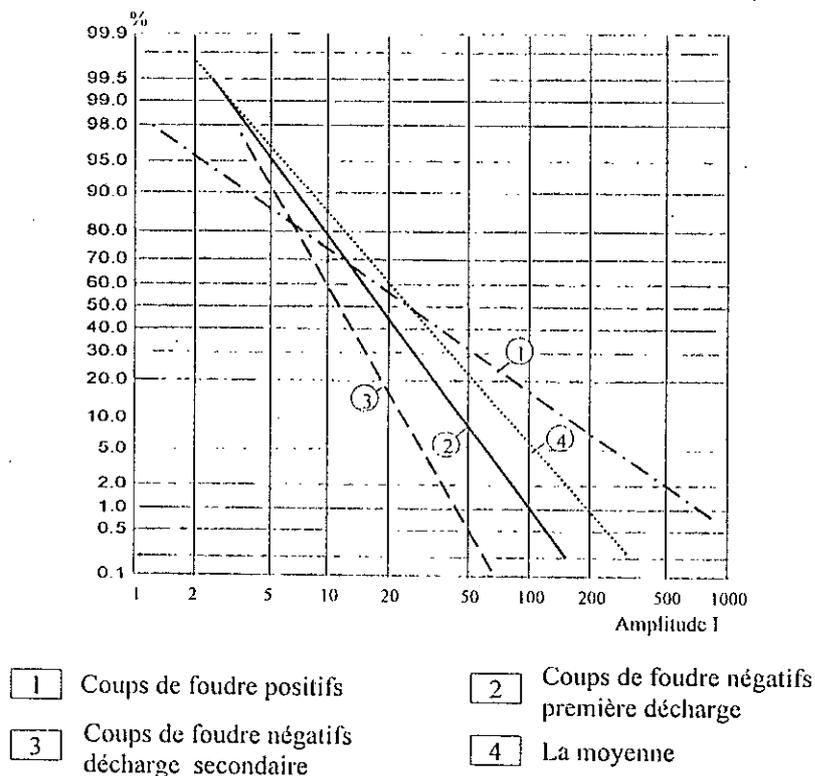


Figure 1.9.— Distributions statistiques des amplitudes des coups de foudre [ROU93].

La vitesse de montée maximale (raideur de front de courant), est un paramètre important pour les réseaux industriels. Les distributions statistiques des raideurs de front des courants obtenus au Mont San Salvatore, sont représentées à la figure 1.10 [AGU82].

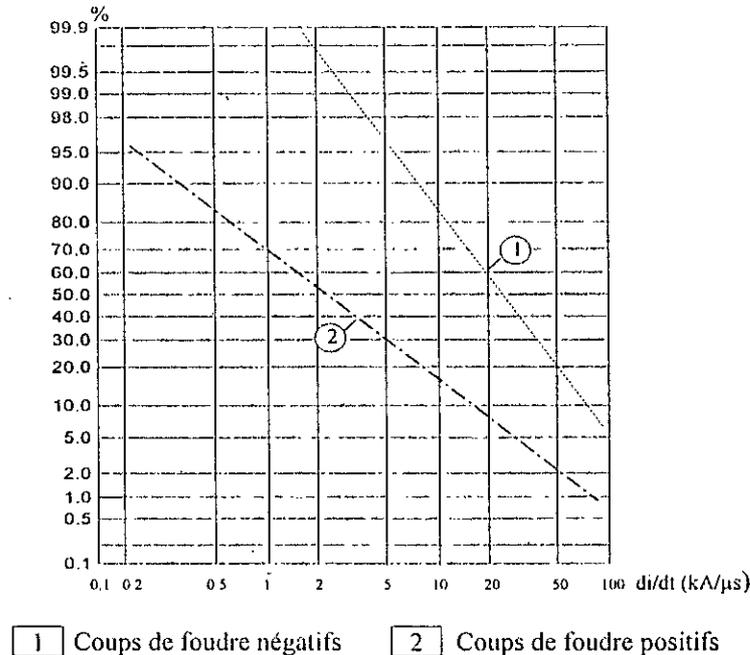


Figure 1.10.— Distributions des pentes des courants de foudre, résultats obtenus au Mont San Salvatore.

Ces distributions montrent que, les courants de foudre négatifs présentent une raideur de front beaucoup plus grande que celle des courants de foudre positifs.

1.2.4.3 Autres paramètres caractérisant la foudre

Parmi les autres paramètres, qui présentent également un intérêt principal dans l'étude d'un coup de foudre, nous citons les grandeurs suivantes :

- La charge du coup de foudre Q ; charge totale drainée vers le sol, elle varie entre 5 et 15 C [BER75]. Ce paramètre est très utile pour l'étude des problèmes de fusion de métal au point d'impact de la foudre.
- L'énergie spécifique $\int i^2 dt$; c'est la caractéristique qui doit être prise en compte pour l'estimation des effets thermiques de la foudre (échauffement et risque d'explosion de certaines matières).

I.2.4.4 Tableau récapitulatif des paramètres typiques de la foudre

Le tableau ci dessous, résume quelques ordres de grandeur importants concernant les caractéristiques électriques des différents types d'impulsions des coups de foudre, pour les trois niveaux de probabilité 95%, 50% et 5%, ces valeurs sont retenues par le comité technique 81 de la CEI [GAR94].

Paramètre	Type de coup de foudre	Probabilité		
		95%	50%	5%
Amplitude (kA) (minimum 2 kA)	▪ Première composante de coup de foudre négatif.	7	33	85
	▪ Coup subséquent.	4.6	12	30
	▪ Coup positif.	4.6	35	250
di/dt maximal (kA/μs)	▪ Première composante de coup de foudre négatif.	9.1	24	65
	▪ Coup subséquent.	10	40	162
	▪ Coup positif.	0.2	2.4	32
$\int i^2 dt$ (A ² .s)	▪ Première composante de coup de foudre négatif.	$6.0 \cdot 10^3$	$5.5 \cdot 10^4$	$5.5 \cdot 10^4$
	▪ Coup subséquent.	$5.5 \cdot 10^2$	$6.0 \cdot 10^3$	$5.2 \cdot 10^4$
	▪ Coup positif.	$2.5 \cdot 10^4$	$6.5 \cdot 10^5$	$1.5 \cdot 10^7$
Charge totale (C)	▪ Décharge négative	1.3	7.5	40
	▪ Décharge positive	20	80	350

Tableau I.1.– Paramètres caractéristiques de la décharge de foudre [GAR94].

I.2.5 Les effets de la foudre

En tant que phénomène électrique, la foudre peut avoir les mêmes conséquences que tout autre courant circulant dans un conducteur électrique ou que tout autre passage de courant à travers un mauvais conducteur ou un isolant. Par conséquent on peut s'attendre aux effets suivants cités ci-dessous.

Effets thermiques :

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

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

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

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

D'autres effets thermiques sont liés aux quantités de charges mises en jeu lors des coups de foudre, ces effets se traduisent par des points de fusion au niveau des points d'impact dans les matériaux conducteurs [MOR94].

Effets électrodynamiques :

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

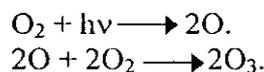
Effets conduits ou rayonnés :

La mauvaise cohérence de raisonnement entre paratonnerre, descente et prise de terre, fait que sur une infrastructure existante, en plus de la perturbation rayonnée, des perturbations conduites ou captées par induction sur les circuits intérieurs.

Lorsque la foudre tombe directement sur le sol ou lorsqu'elle est captée par un dispositif de capture, l'écoulement du courant qui s'ensuit va provoquer des montées en potentiel des terres locales, liées au fait que ces dernières ne sont pas parfaites.

Effets chimiques :

Parallèlement à la décharge de foudre il y a création d'ozone (O₃), suivant la réaction chimique :



Effets acoustiques :

Le déclenchement extrêmement rapide du premier arc en retour génère une chaleur considérable (30 000 K) et une pression très élevée du canal de foudre (2 atmosphères et plus). Il est à l'origine d'ondes de choc, elles-mêmes à l'origine de l'onde sonore (tonnerre). Le niveau de pression acoustique peut atteindre 155 décibels [PH194].

I.3 PROTECTION CONTRE LA Foudre

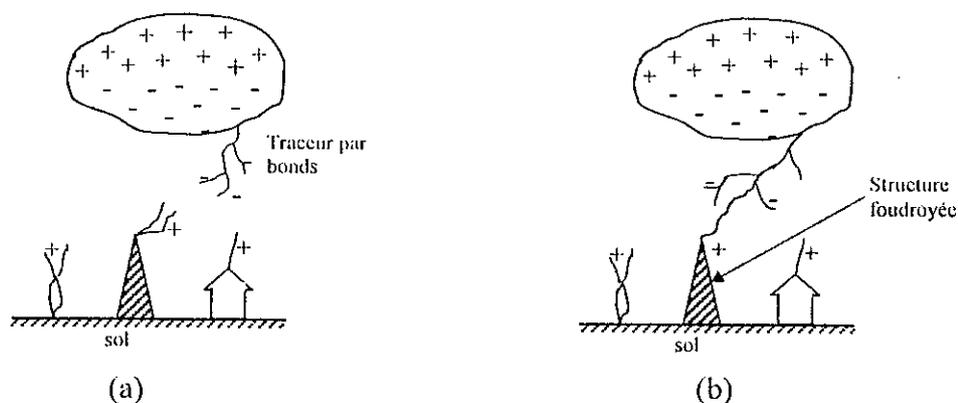
I.3.1 Introduction

La connaissance actuelle des phénomènes physiques mis en jeu par la foudre, a permis d'élaborer une nouvelle méthode de détermination de la zone de protection d'une tige verticale ou des fils tendus horizontalement ; elle permet également de définir la taille maximale des mailles d'une cage.

Cette méthode est basée sur une nouvelle connaissance du mécanisme d'impact de la foudre, et est mise en œuvre au moyen d'un modèle mathématique appelé "modèle électrogéométrique".

I.3.2 Mécanisme d'impact d'un coup de foudre descendant négatif

Le traceur par bonds est un canal ionisé qui porte un excédent de charges négatives, avec une forte concentration à sa pointe. En général, bien avant que la pointe de ce traceur n'atteigne le sol, des prédécharges ascendantes se développent, le plus souvent depuis une aspérité, dans la direction du traceur descendant. Le point probable qui sera frappé par la foudre appelé le point d'impact du coup de foudre, reste indéterminé jusqu'au moment où le traceur descendant atteint dans sa progression une certaine distance au-dessus du sol. Ensuite, de fait de l'intensification du champ électrique et de l'émission des traceurs ascendants à partir des structures au sol, le processus d'amorçage s'oriente dans une direction préférentielle et le point d'impact du coup de foudre est déterminé (figure I.11).



(a) propagation du traceur par bonds et formation des décharges ascendantes.

(b) rencontre entre le traceur par bonds et une décharge ascendante.

Figure I.11. – 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.

1.3.3 Modèle électrogéométrique

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

Cependant, ce modèle tel qu'il existe n'est valable que pour les coups descendants négatifs, mais ceux-ci sont, de loin les plus fréquents.

1.3.3.1 Champ généré au sol par un traceur descendant

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

- La charge injectée dans le traceur négatif.
- La distribution des charges 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 des charges du traceur, de sorte qu'il existe un rapport à peu près constant entre la quantité de ces charges et l'intensité crête du courant du foudre. La corrélation suivante est généralement admise [GAR89] :

$$I=15 \cdot Q \quad (1)$$

Avec I en kA et Q en coulomb.

Pour la distribution des charges le long du traceur, les auteurs des modèles ont pris diverses hypothèses : répartition uniforme, répartition uniforme plus charge ponctuelle en tête, répartition exponentielle. Le modèle proposé ici, suppose que 10% de la charge du traceur est concentrée à sa pointe et que les 90% restants sont réparties uniformément sur sa longueur [GAR89].

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

$$Q=0.1 \cdot Q+l \cdot q \quad (2)$$

La figure I.12 donne une représentation simplifiée d'un traceur descendant avec :

L : hauteur de formation du traceur.

D : hauteur instantanée de sa pointe, au cours de sa propagation vers le sol.

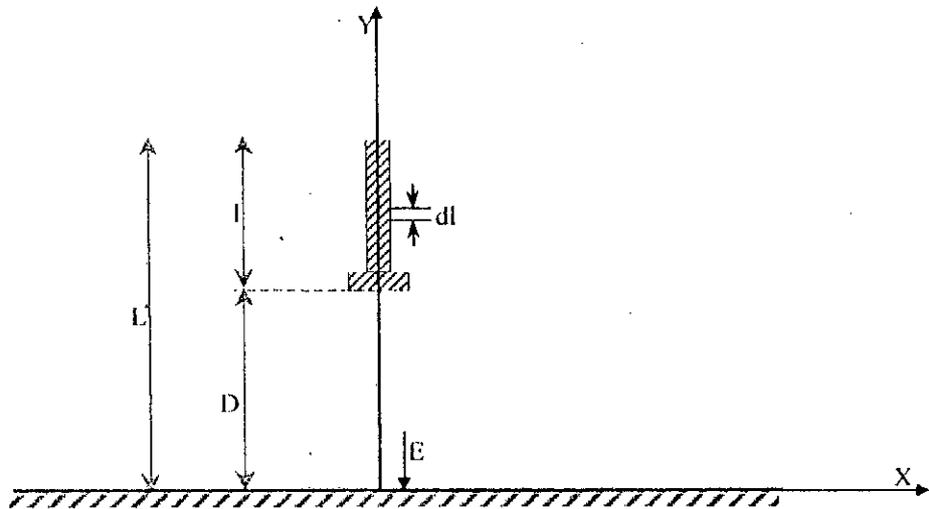


Figure I.12.- Champ au sol créé par un traceur descendant.

A partir de ces données, le champ au sol à la verticale du traceur descendant est donné par [GAR89].

$$E = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \cdot \left[\int_D^L \frac{dl}{l^2} + \frac{L-D}{9} \right] = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 \cdot L} \cdot (1-k) \frac{9k + D^2}{9k^2} \quad (3)$$

où : $k=D/L$.

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

$$q = \frac{0.9 \cdot Q}{L} \quad (4)$$

de (1) et (4) on déduit que :

$$q = \frac{0.9 \cdot I}{15 \cdot L} \quad (5)$$

avec ; q en coulomb, I en kA et L en mètres.

Si on remplace la charge linéique q donnée par l'expression (5) dans l'expression (3), et on prend le cas d'un nuage situé à 2 km au-dessus du sol ($L=2000$ m), on obtient la relation $E=f(D,I)$ représentée sous forme de courbes à la figure I.13 [GAR94].

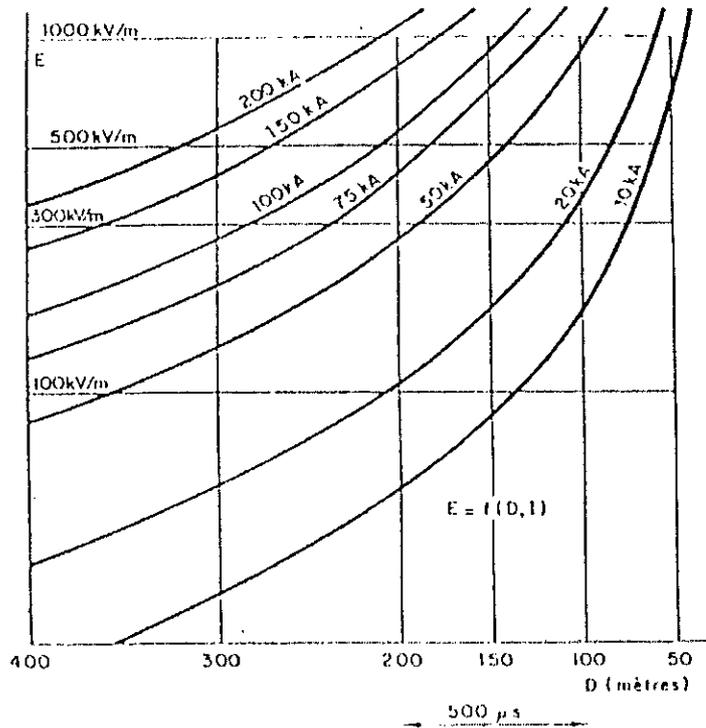


Figure I.13.- Champ électrique au sol en fonction de l’altitude de la tête du traceur pour différentes valeurs du courant de foudre [GAR94].

I.3.3.2 Distance d’amorçage du modèle de Whitehead

De nombreux modèles électro géométriques ont été déjà proposés, pour relier la distance d’amorçage à la valeur de crête du courant de foudre.

Whitehead en accord avec d’autres chercheurs [LER84] ont proposé la relation suivante :

$$d = 10 \cdot I^{2/3} \tag{6}$$

(d en mètres, I en kA)

D’autre part, connaissant le champ seuil au sol qui provoque la jonction entre le traceur descendant et les décharges ascendantes qui est de l’ordre de 500 kV/m [GAR94], on peut lire sur le réseau de courbes de la figure I.13, 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.

I(kA)	10	20	50	75	100	150
d(m)=10·I ^{2/3}	46	74	136	178	215	282
D(m) E=500 kV.	53	75	134	172	203	263

Tableau I.2. - Distance d’amorçage en fonction du courant de crête [GAR94].

Ce tableau montre que la distance d'amorçage déduite de la formule de Whitehead, et la distance obtenue par la règle de 500 kV/m sont pratiquement égales, cette distance croît avec la valeur de crête du courant de foudre. Mais, même pour les courants les plus forts, le point d'impact ne se décide que lorsque le traceur descendant est très proche du sol.

1.3.3.3 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 nature ou la forme des structures au sol, et quelle que soit la qualité de leur mise à la terre. Ainsi, il ne fait pas 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. Ces décharges se développent plus au moins bien suivant la hauteur et la valeur de 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, et l'effet d'écran produit par les charges positives extraites de la pointe sous l'influence du champ électrique.

Il est à noter aussi que le modèle électrogéométrique ne tient pas compte des propriétés électrogéologiques du sol ; or, d'après les travaux effectués dans notre laboratoire [FER87, BOU89, BOU90, BOU92, BEL94, RAH96, BOU98], il a été constaté que ces propriétés ont une grande influence sur le point d'impact et par la suite sur la distance d'amorçage.

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.

1.3.3.4 Application du modèle électrogéométrique

1.3.3.4.1 Méthode de la sphère fictive

Le modèle électrogéométrique qui repose sur la notion de la distance d'amorçage, trouve son application dans la détermination des zones de protection d'un dispositif de capture par l'utilisation de la technique de la sphère fictive. En effet, le point d'impact de la foudre est le premier point qui se trouve à la distance d'amorçage d de la pointe du traceur descendant, ce point pouvant être le sol lui-même. Ceci revient à considérer une sphère fictive de rayon d déplacée sur le sol dans toutes les directions sans jamais perdre le contact ni avec ce dernier, ni avec un objet proéminent.

Si au cours de ce mouvement, la sphère entre en contact avec les dispositifs de protection sans pouvoir toucher la structure à protéger, alors la protection de celle-ci est assurée. Mais, il est à noter que cette structure sera protégée contre un courant I (distance d'amorçage d), et aussi pour toute valeur de courant supérieur à I [NFC87] [GAR94].

1.3.3.4.2 Zone de capture d'une tige verticale

Nous allons appliquer la méthode de la sphère fictive pour déterminer la zone de protection d'une tige verticale, de hauteur h , placée sur un sol plat.

Pour cela, on suppose qu'un traceur descendant se dirige vers le sol, sa pointe est entourée d'une sphère fictive de rayon d , cette sphère peut atteindre le sol suivant trois possibilités (figure I.14) :

- Contact avec la tige seulement.
- Contact avec le sol seulement.
- Contact simultané, avec la tige et le sol, dans ce cas l'un des deux points représente le point d'impact du coup de foudre, par contre dans la zone hachurée de la figure I.14, l'impact ne pourra jamais se produire. Cette zone représente la zone de protection de la tige verticale.

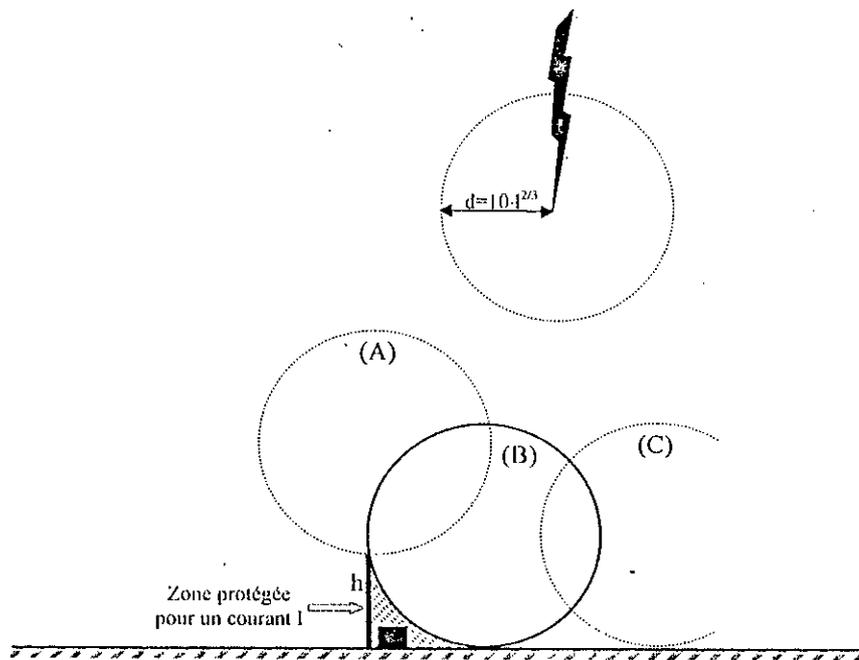


Figure I.14.- Méthode de la sphère fictive appliquée à une tige verticale de hauteur h .

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 de ces sphères délimite la zone d'attraction de cette tige (figure I.15) :

- 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).

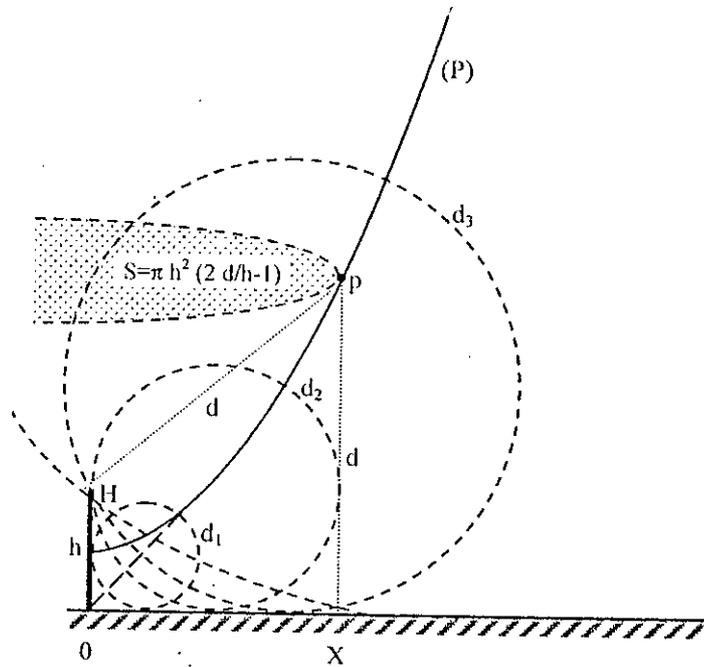


Figure I.15.- Zone de protection et de capture d'une tige verticale.

A la figure I.16, la parabole (P) définie par les points 'p' à égale distance du sol et de la pointe H de la tige, divise le plan perpendiculaire à la terre en deux zones (I et II). Cette parabole a pour équation :

$$X^2 + h^2 - 2hY = 0 \quad (8)$$

D'après l'hypothèse de la distance d'amorçage, tout traceur qui se présente dans la zone (I), ne sera jamais capté par la pointe H et touchera le sol. Par contre, tout traceur qui se présente dans la zone (II) comprise entre (OY) et (P) sera capté par la pointe dès que la distance (HT) (T étant la pointe du traceur) devient inférieur à la distance d'amorçage du coup de foudre considéré.

Donc $HT_1 \leq d$, représente la condition limite de capture de la pointe (H) tout au long de la parabole, d'autre part, on a $HT_1 = Y$.

On remplace « Y » par « d », dans l'expression (8), on aura :

$$X^2 + h^2 - 2hd = 0 \quad (9)$$

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

$$X \leq h \cdot \sqrt{\frac{2d}{h} - 1} \quad d \geq h \quad (10)$$

Ainsi, le volume de capture de la tige est un cône prolongé par un parabololoïde de révolution, la base de ce volume constitue la surface de capture de la tige (figure I.15), elle est donnée par:

$$S = \pi \cdot h^2 [2d/h - 1] \quad (11)$$

Notons que : pour ($d < h/2$), l'expression (10), n'a pas de solution, cela signifie que la pointe ne capte pas les courants très faibles.

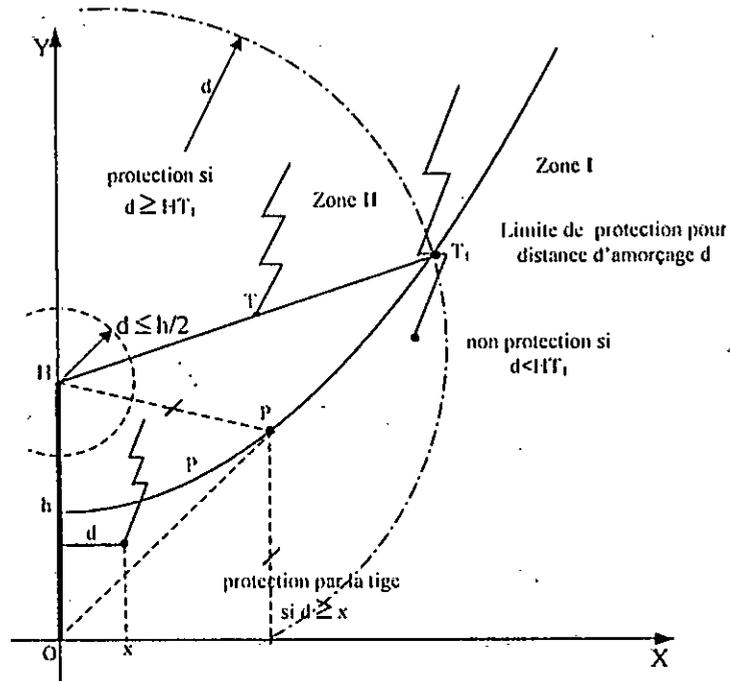


Figure I.16.- Zone de capture d'une tige verticale.

Pour $d < h$, le rayon protégé au sol sera : $X = d$, dans ce cas l'augmentation de h est sans effet sur la zone de protection (figure I.17).

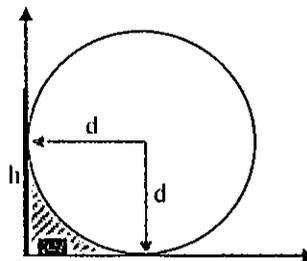


Figure I.17.- Zone de protection d'une tige verticale de hauteur $h < d$.

La solution de cette équation différentielle est donnée par :

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

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

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

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

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

II.3 Décharge de foudre en terre hétérogène

Les premiers travaux concernaient l'influence de l'hétérogénéité du sol sur le point d'impact de la décharge de foudre, ont été effectués dans notre laboratoire par **J.Ferras** [BOU87a] [FER87] [BOU89]. 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.

II.3.1 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 à étudier est choisi de telle façon qu'il présente une symétrie cylindrique.

Le calcul du champ électrique au niveau du sol se fait pour chaque position du traceur descendant, selon le schéma bloc de la figure II.1

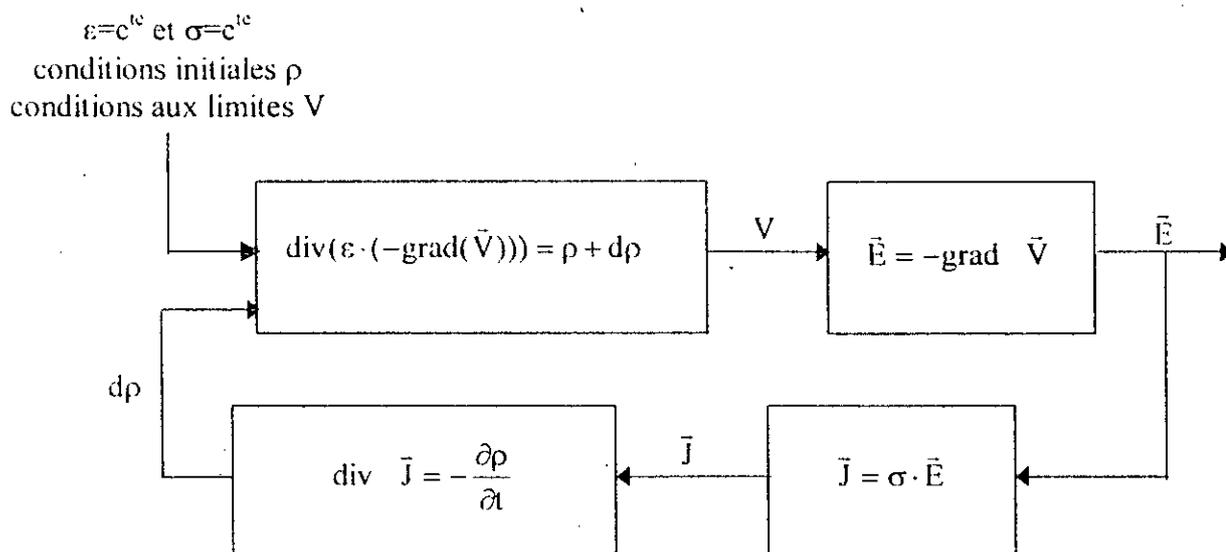


Figure II.1.— Schéma-bloc des relations entre le potentiel, le champ électrique, la densité de courant et la variation de la densité des charges dans le sol [FER87].

Pour une position donnée du traceur caractérisée par les conditions aux limites V et les conditions initiales ρ , on peut déterminer le potentiel V , à l'aide de l'équation de Poisson, et dont la résolution numérique a été fait par la méthode des éléments finis [FER87].

$$\text{Div}(-\text{grad } V) = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (3)$$

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

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

La variation de la densité de charge est donnée par :

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

avec :

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (6)$$

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, le champ électrique possède 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.

II.3.2 Modèle expérimental

Afin d'examiner l'influence des propriétés électrogéologiques du sol sur le point d'impact, 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 sera 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 II.2).

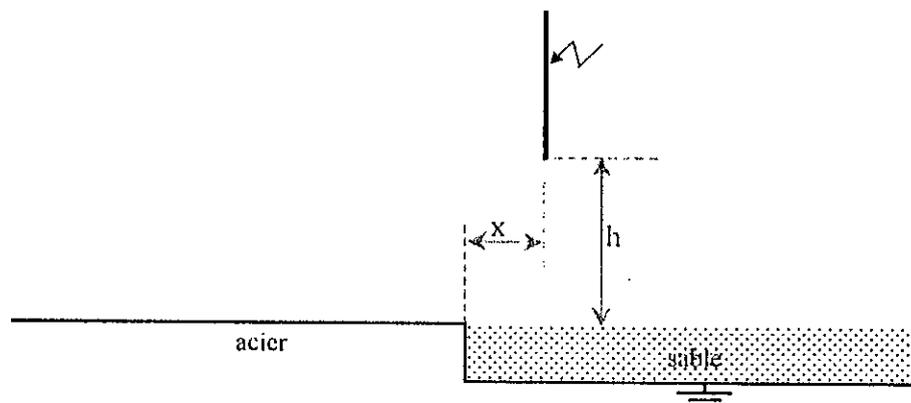


Figure II.2.– Modèle expérimental réduit

Les résultats obtenus avec ce modèle (figure II.3 a et b), 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 fréquence de foudroiement de l'interface est plus élevée avec la configuration (acier + sable sec). En effet, cette configuration présente un degré d'hétérogénéité plus grand que l'autre configuration. Donc, l'influence de l'interface sur

l'attraction des décharges de foudre augmente avec l'augmentation de degré d'hétérogénéité du sol.

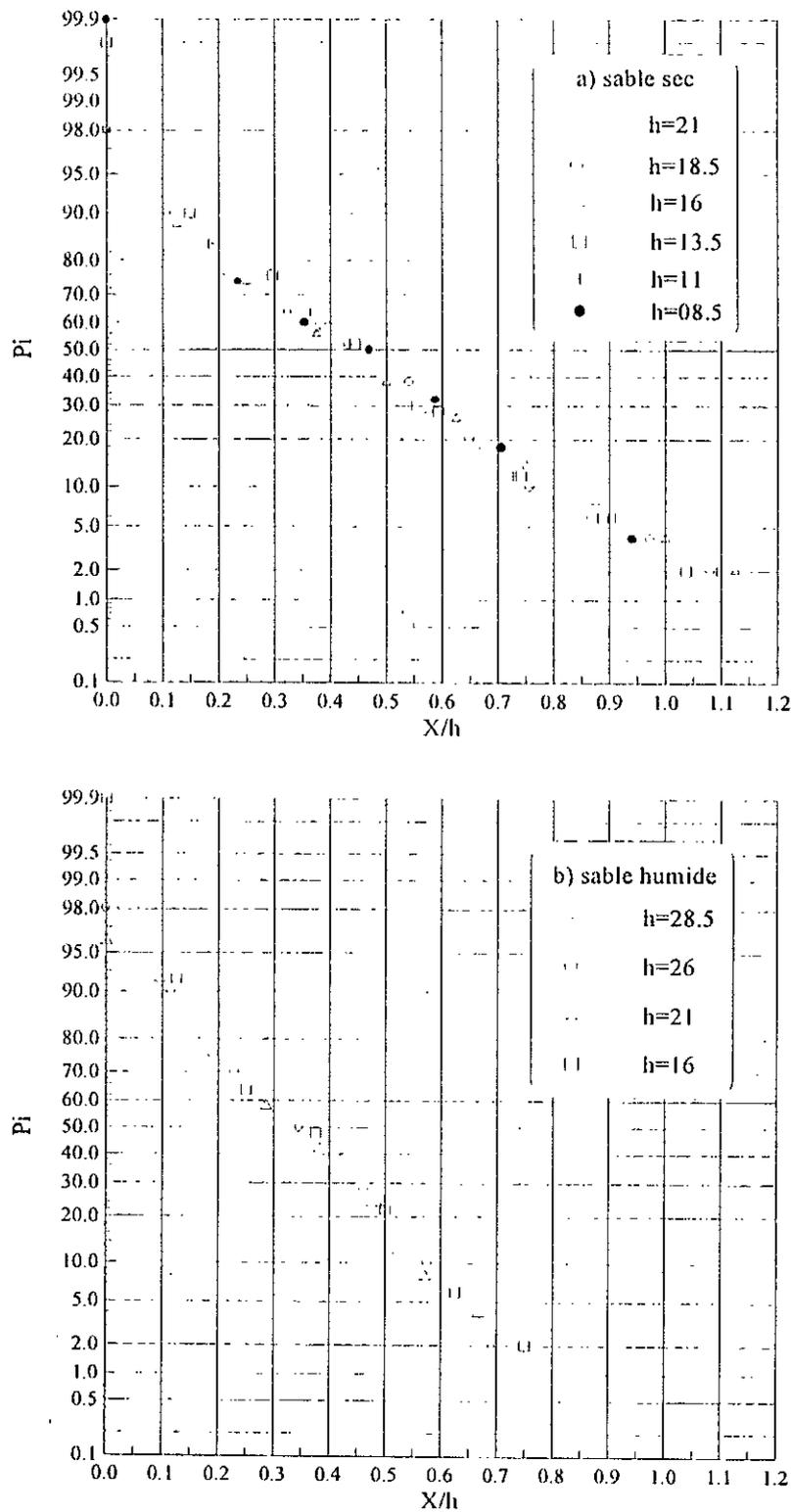
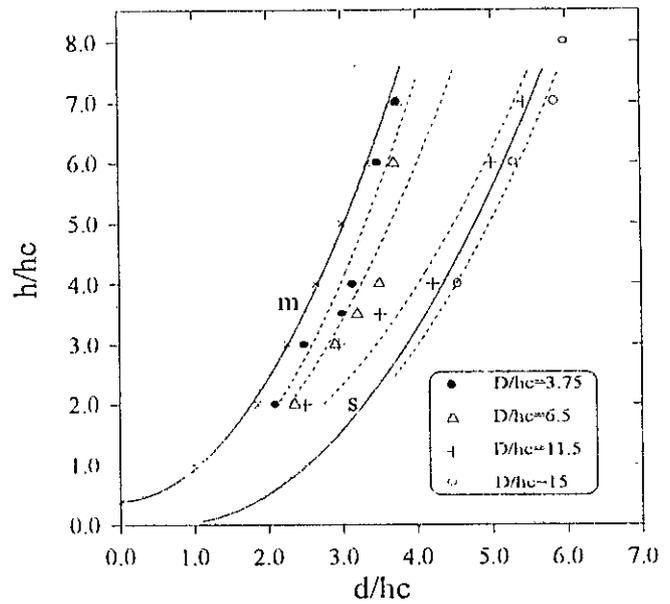
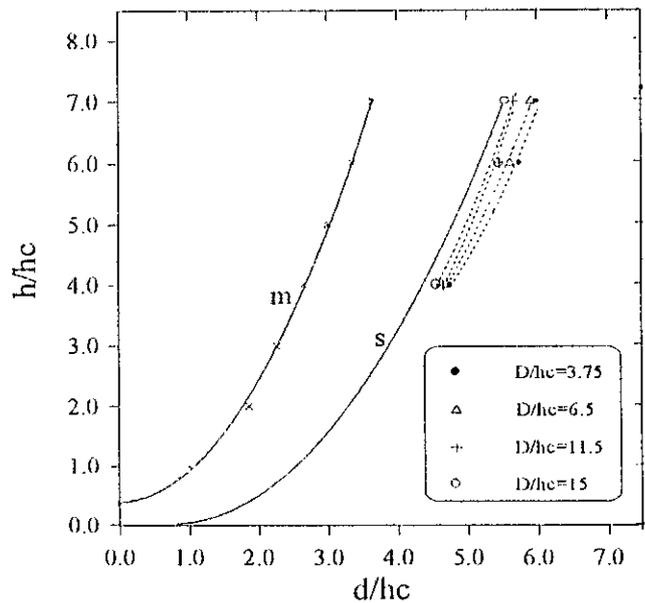


Figure II.3.— Distribution des décharges de foudre négatives à l'interface du sol hétérogène.

a) paratonnerre au-dessus du sable et l'axe de la tige situé entre l'interface et le paratonnerre.



b) paratonnerre au-dessus du sable et compris entre l'axe de la tige et l'interface.



m : Zone d'attraction au-dessus du sol homogène bon conducteur (plaque métallique).
 s : Zone d'attraction au-dessus du sol homogène mauvais conducteur (sable).

Figure II.5.- Zones d'attraction du paratonnerre horizontal au-dessus du sable [BOU90].

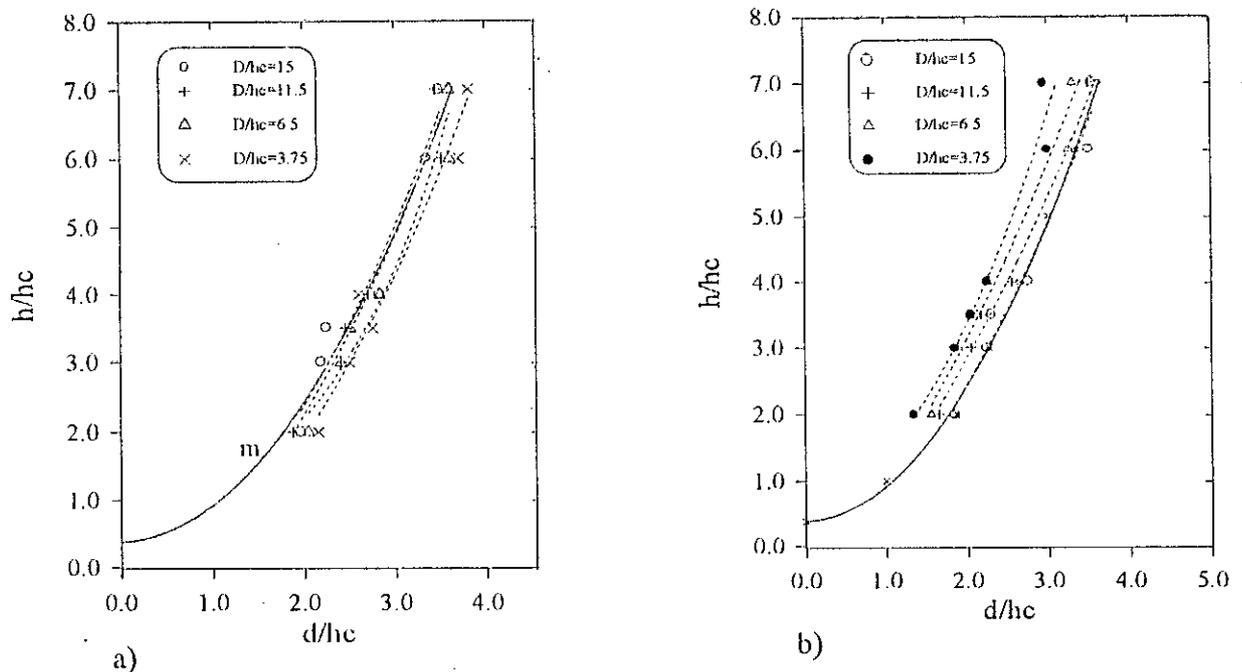
Dans le cas où la décharge est entre l'interface et le paratonnerre, les zones d'attraction seraient plus grandes que celle définie pour un sol homogène bon conducteur (acier), et plus petites que celle obtenue pour un sol homogène plus au moins conducteur (sable) (figure II.5 a).

Dans l'autre cas, les zones d'attraction sont aussi plus grandes que celle définie pour un sol parfaitement conducteur et même plus grandes que celle obtenue pour un sol homogène mauvais conducteur (figure II.5 b). Dans cette configuration, la présence de l'interface favoriserait l'attraction des décharges par le paratonnerre.

Dans les deux cas, lorsque le paratonnerre est suffisamment loin de l'interface ($D/hc \geq 15$), la zone d'attraction devient confondue avec celle obtenue pour un sol homogène constitué de sable seul.

b) Deuxième configuration : paratonnerre au-dessus de la partie bonne conductrice de la terre

Les résultats obtenus avec cette configuration montrent que dans le cas où la décharge est située entre le paratonnerre et l'interface, les zones d'attraction sont plus petites que celle donnée par le modèle électrogéométrique classique sur sol bon conducteur (figure II.6 b). En effet, la présence de l'interface où le champ électrique est très grand, amoindrit l'efficacité du paratonnerre. Dans ce cas de configuration, le modèle électrogéométrique classique ne serait plus valable. Dans l'autre cas où le paratonnerre est situé entre la décharge et l'interface, les zones d'attraction sont plus grandes que celle définie pour un sol homogène parfaitement conducteur (figure II.6 a).



m : Zone d'attraction au-dessus du sol homogène bon conducteur.

a) Paratonnerre au-dessus de l'acier et compris entre la tige l'interface.

b) paratonnerre au-dessus de l'acier et la tige entre l'interface et la paratonnerre.

Figure II.6.– Zones d'attraction du paratonnerre horizontal au-dessus de l'acier.

II.4.2 Zones d'attraction d'un paratonnerre vertical

Cette étude a été faite à l'aide du modèle expérimental réduit représenté à la figure II.7.

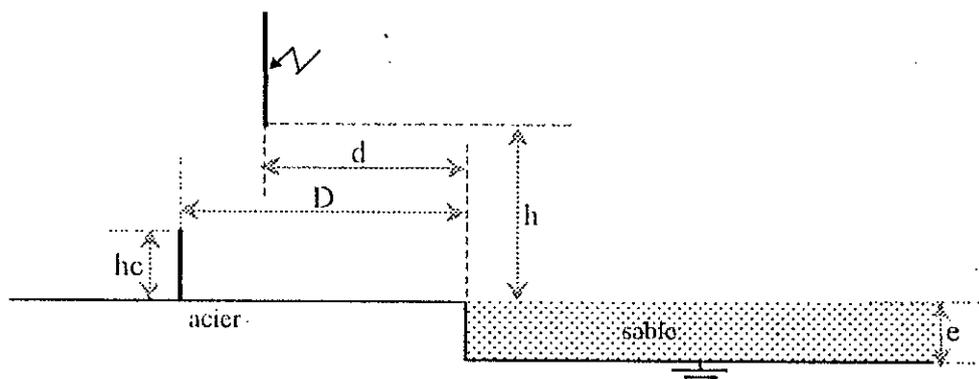
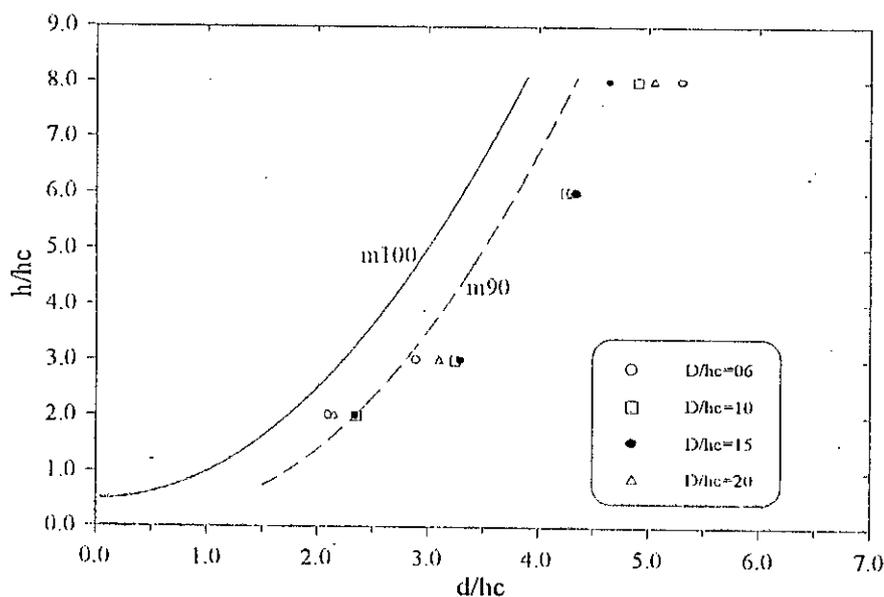


Figure II.7.– Modèle expérimental réduit d'un système terre hétérogène avec paratonnerre vertical.

D'après les résultats obtenus, il a été constaté que le modèle électrogéométrique reste valable pour toutes les positions possibles du paratonnerre vertical sur les deux parties de la terre hétérogène. En effet, dans le cas où le paratonnerre est situé sur la partie mauvaise conductrice de la terre (sable), les zones d'attraction sont plus larges que celles définies pour un sol homogène parfaitement conducteur. Dans le cas le plus défavorable, où la décharge est comprise entre le paratonnerre et l'interface, les zones d'attraction obtenues sont aussi plus grandes que celle donnée par le modèle électrogéométrique classique (figure II.8).



m90 : modèle électrogéométrique 90% sur sol bon conducteur.
 m100 : modèle électrogéométrique 100% sur sol bon conducteur.

Figure II.8.– Zones d'attraction d'un paratonnerre vertical.

A l'issue de cette étude, on peut conclure que suivant la position de l'axe de la décharge de foudre par rapport à l'interface et au paratonnerre, la décharge serait, soit favorablement soit défavorablement attirée par le paratonnerre. Les zones d'attraction sont en général plus larges que celles définies par le modèle électrogéométrique classique.

II.5 Décharge de foudre sur une terre homogène mauvaise conductrice

D'après l'étude faite sur la terre hétérogène, il a été constaté que la zone d'attraction d'un paratonnerre ne correspond pas, en général, à celle définie par le modèle électrogéométrique [BOU89] [BOU90] [BOU91]. En effet, ce modèle ne prend pas en considération la nature de la terre, ce qui le rend discutable dans le cas où la terre n'est pas homogène et parfaitement conductrice. L'élaboration d'un nouveau modèle de protection prenant en compte les propriétés électrogéologiques du sol s'avérerait donc très utile. Pour y aboutir, il a été jugé préférable de commencer avec l'étude détaillée d'une terre homogène mauvaise conductrice avec les deux types de protection verticale et horizontale.

II.5.1 Paratonnerre vertical [BOU92] [BOU93] [BOU94] [BEL94]

Le modèle expérimental réduit utilisé est représenté à la figure II.9, 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.

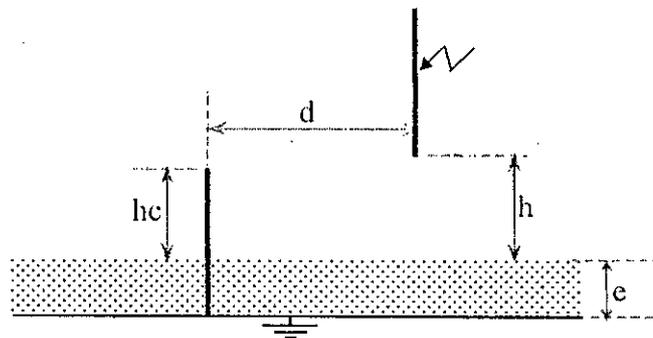
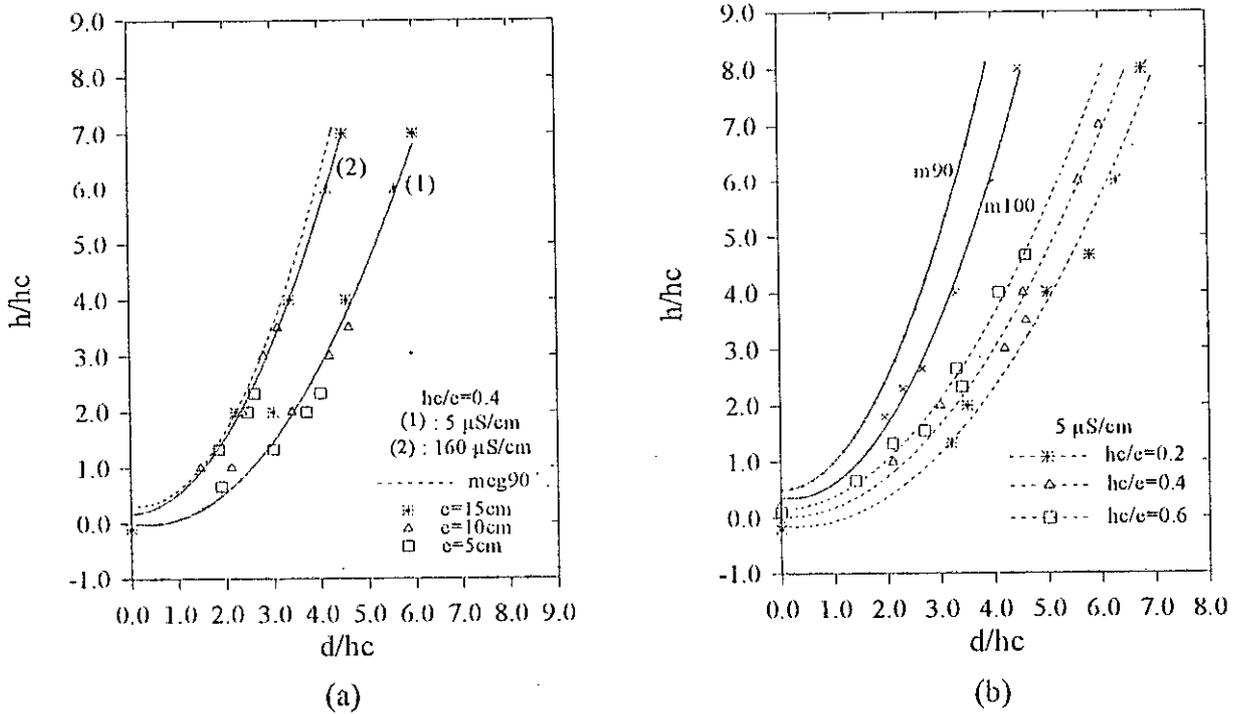


Figure II.9.— Modèle expérimental réduit- système avec terre mauvaise conductrice.

Afin d'examiner l'influence de l'épaisseur (e) et la conductivité (σ) de la terre mauvaise conductrice et la hauteur hc du paratonnerre, des essais ont été effectués à l'aide du modèle expérimental représenté à la figure II.9, pour des rapports hc/e égaux à 0.2, 0.4 et 0.6 et des conductivités de la couche mauvaise conductrice égales à 5 $\mu\text{S/cm}$, 39 $\mu\text{S/cm}$, 75 $\mu\text{S/cm}$ et 160 $\mu\text{S/cm}$, les résultats obtenus (figures II.10 a et b) montrent que les zones d'attraction sont plus larges que celle donnée par le modèle électrogéométrique classique. Cet élargissement dépend étroitement du rapport hc/e : plus ce rapport est petit plus la zone d'attraction devient large. Il en est de même lorsque la conductivité du sol diminue.

A la base de ces résultats, un modèle de protection élargi, prenant en compte les propriétés électrogéologiques du sol, a été défini. Selon ce modèle, le système avec terre mauvaise conductrice est équivalent à un système avec terre parfaitement conductrice où toutes

les distances verticales sont majorées d'une certaine valeur correspondant au niveau de terre fictive e' [BOU93] [BOU94a] [BOU95b]. Ce niveau compris entre 0 et $-e$ (e : épaisseur de la couche de terre mauvaise conductrice) dépend de la configuration du système et de la nature électrogéologique de la terre (figure II.11).



a) Influence de l'épaisseur de la terre sur les zones d'attraction.
 b) Influence du rapport hc/e sur les zones d'attraction.

Figure II.10.– Zones d'attraction d'un paratonnerre vertical dans le cas d'un sol homogène mauvais conducteur.

La zone d'attraction d'une terre mauvaise conductrice, pour une conductivité donnée est limitée par la parabole d'expression :

$$X^2 - 2Y(1 + e'/hc) + [1 - (e'/hc)^2] = 0 \quad (7)$$

Avec : $X = d/hc$ et $Y = h/hc$

l'équation (7) admet pour solution :

$$e'/hc = (X^2 - 2Y + 1 + Y^2)^{1/2} - Y \quad (8)$$

D'après l'expression précédente, lorsque le rapport (e'/hc) tend vers zéro, on tend vers la zone d'attraction définie par le modèle électrogéométrique sur sol parfaitement conducteur. Tandis que, lorsque ce rapport devient grand, on tend vers des zones plus larges.

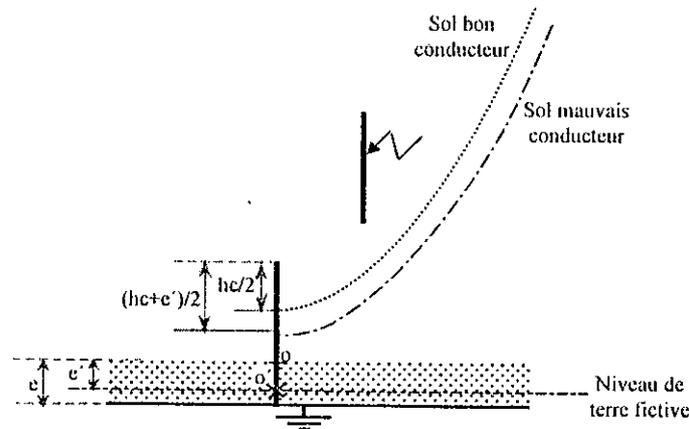


Figure II.11.– Niveau de terre fictive d'un système avec sol mauvais conducteur

II.5.2 Paratonnerre horizontal [BOU96] [RAH96]

Le modèle expérimental utilisé dans cette étude est le même que celui représenté à la figure II.9, le paratonnerre vertical est remplacé par un paratonnerre horizontal (figure II.12).

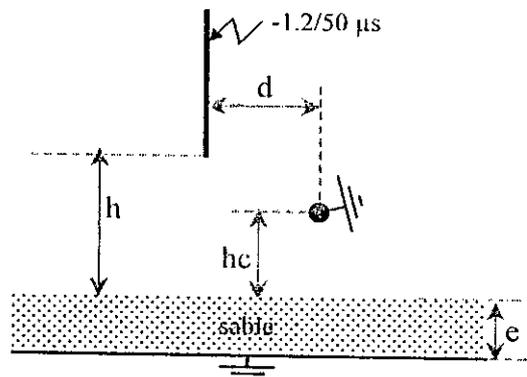
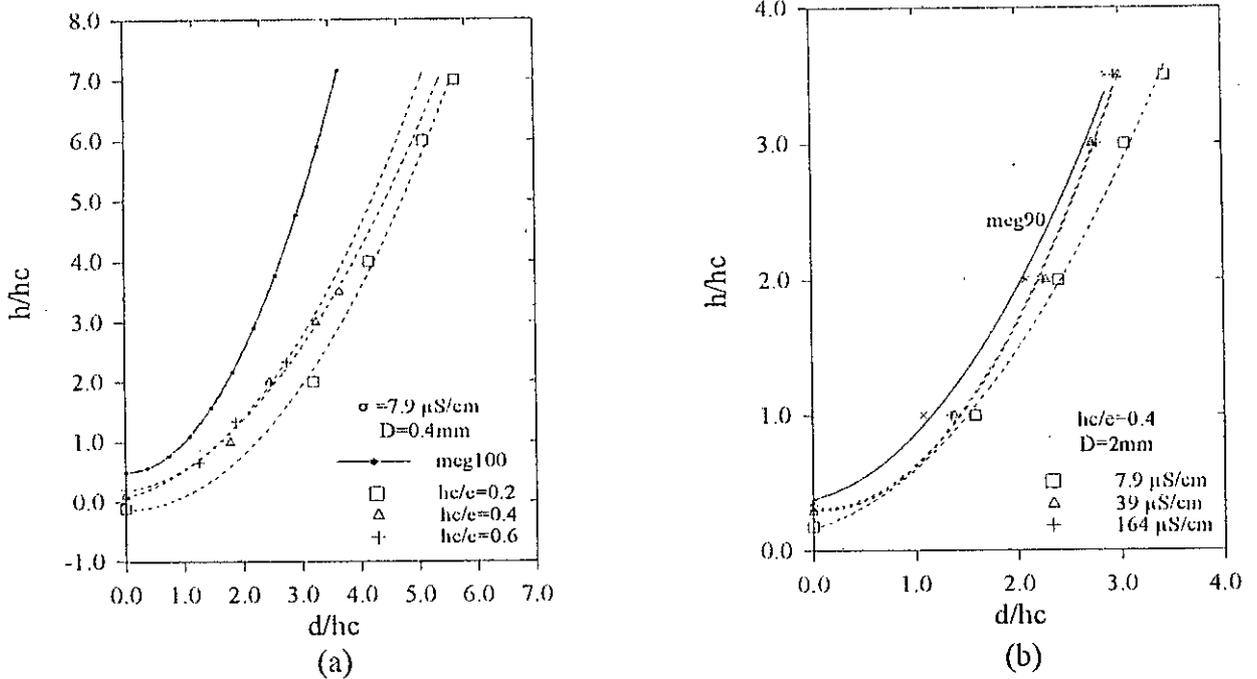


Figure II.12.– Modèle expérimental réduit d'un système tige-plan avec paratonnerre horizontal.

Les résultats des essais effectués sur ce modèle expérimental montrent que les zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal, dans le cas d'une terre homogène mauvaise conductrice, sont d'autant plus larges que la conductivité du sol diminue et/ou le rapport (h/e) diminue (figure II.13 a et b).



a) Influence de l'épaisseur de la couche mauvaise conductrice.
 b) Influence de la conductivité de la couche mauvaise conductrice.

Figure II.13.— Zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal dans le cas d'une terre mauvaise conductrice.

II.6 Influence des propriétés électrogéologiques du sol sur la rigidité 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 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 électrogéologiques du sol ont une grande influence sur la valeur de la tension $U_{100\%}$.

II.6.1 Cas d'un sol homogène

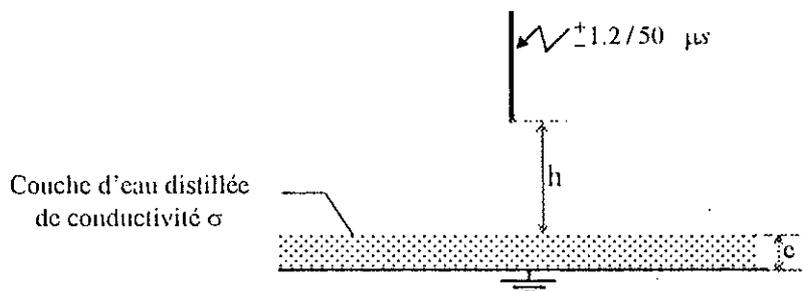
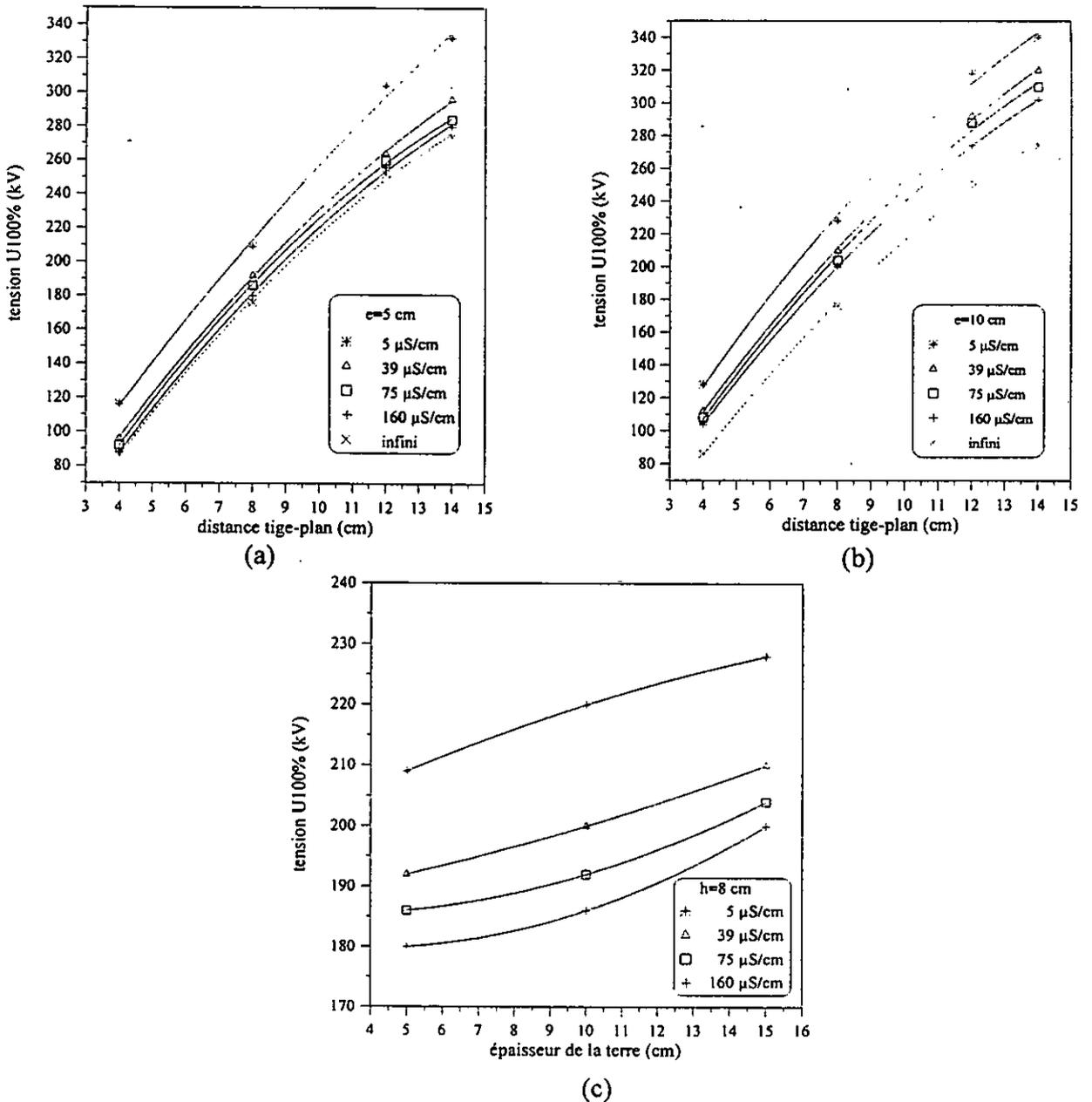


Figure II.14.— Système tige-plan avec terre mauvaise conductrice.

D'après des essais effectués avec la configuration de la figure II.14, il a été constaté que la tension 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 de terre 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 mauvaise conductrice augmente (figure II.15) [BOU95a] [BOU97].

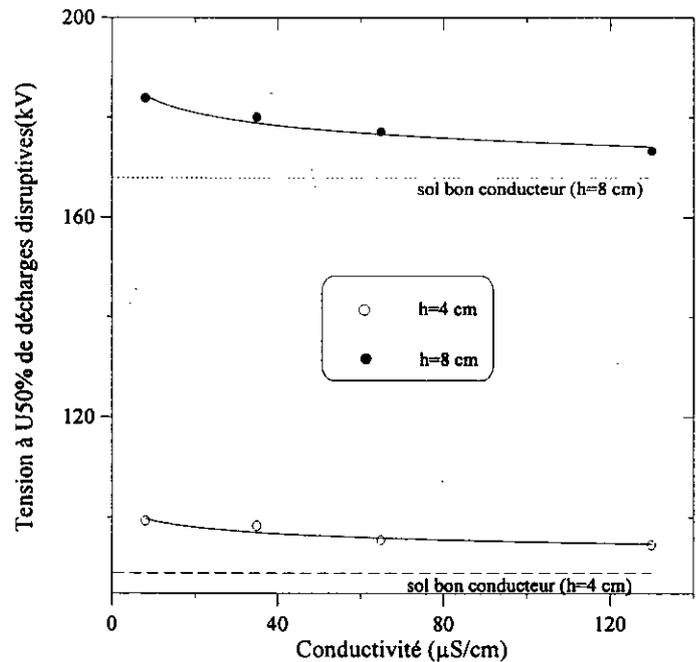


(a) Influence de la conductivité sur la tension $U_{100\%}$ pour $e=5$ cm.
 (b) Influence de la conductivité sur la tension $U_{100\%}$ pour $e=10$ cm.
 (c) Influence de l'épaisseur sur la tension $U_{100\%}$ pour $h=8$ cm.

Figure II.15.– Influence de la conductivité et de l'épaisseur de la couche mauvaise conductrice sur la tension $U_{100\%}$.

Une autre étude [BOU98a] sur l'influence de la conductivité du sol mauvais conducteur sur les tensions à 50% de décharges disruptives des petits intervalles d'air tige-plan sous les ondes de choc de foudre positif et négatif, montre que la rigidité de l'intervalle tige-plan dépend de la conductivité du sol (figures II.16 a et b). En effet, l'intervalle est plus rigide pour les faibles conductivités, ceci est vrai pour les deux types de polarité positive et négative.

a) Polarité positive



b) Polarité négative

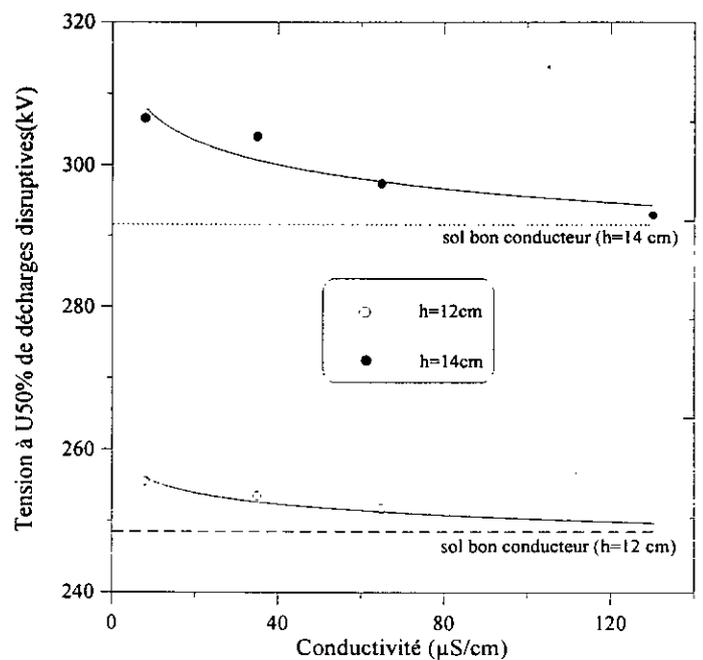


Figure II.16.– La tension à 50% de décharges disruptives en fonction de la conductivité du sol.

II.6.2 Cas d'un sol hétérogène

Le modèle expérimental utilisé pour étudier la configuration tige-plan avec terre hétérogène est représenté à la figure II.17, 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. 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 et la polarité de la tension appliquée, caractérisent la configuration du système avec terre hétérogène.

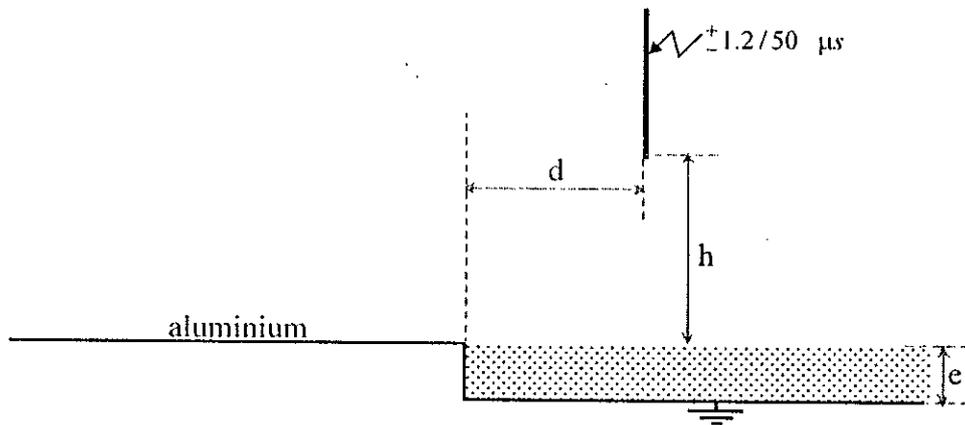


Figure II.17.— Système tige-plan avec terre hétérogène.

D'après les résultats d'essais obtenus (figure II.18 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 longueur et de même conductivité, tandis que lorsque la tige s'éloigne de l'interface vers les grandes distances négatives, on tend vers le système tige-plan bon conducteur de même longueur. Les comportements de l'intervalle sous les deux polarité semblent être similaires [BOU98].

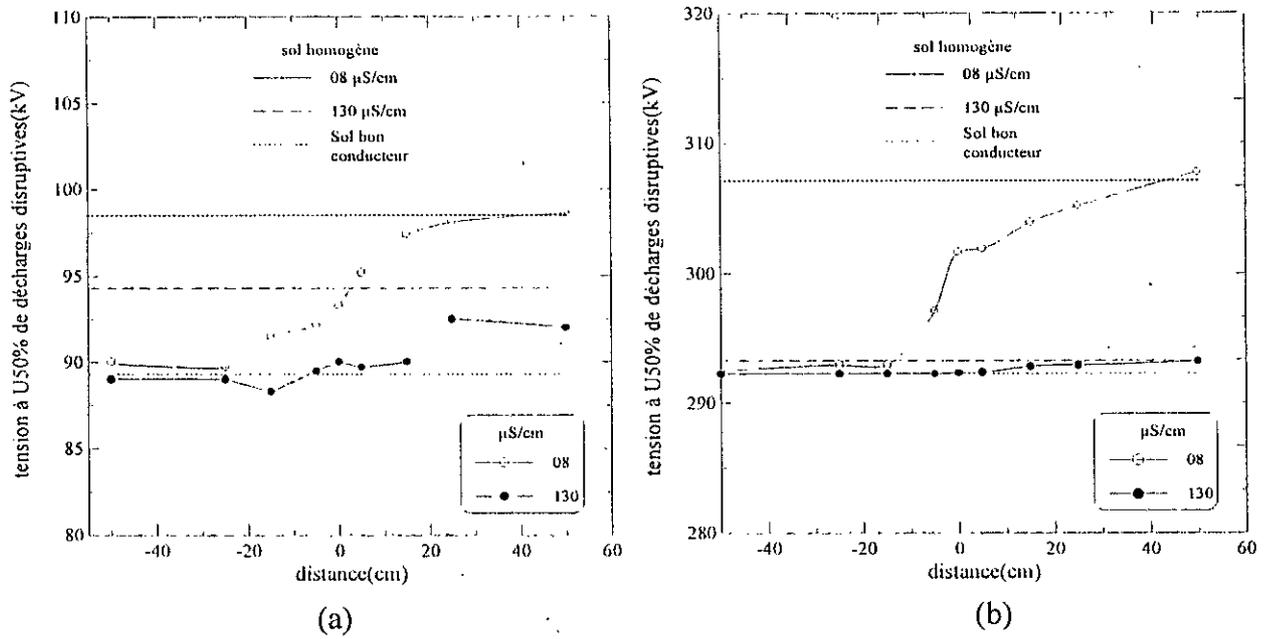


Figure II.18.— Tension $U_{50\%}$ en fonction de la distance dans le cas de la tige négative.
 (a) $h = 4$ cm (b) $h = 14$ cm

II.6.3 Cas d'un sol discontinu

Le modèle expérimental utilisé pour étudier la configuration tige-plan avec terre discontinue est représenté à la figure II.19.

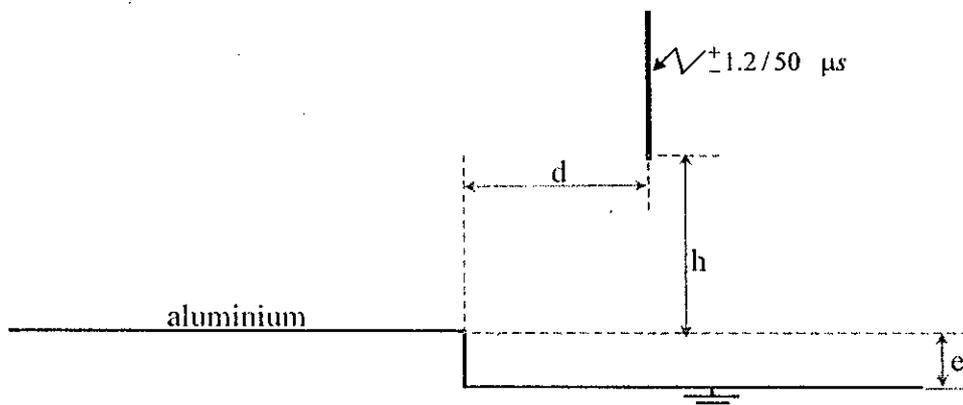


Figure II.19.— Configuration du système tige-plan avec sol discontinu.

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

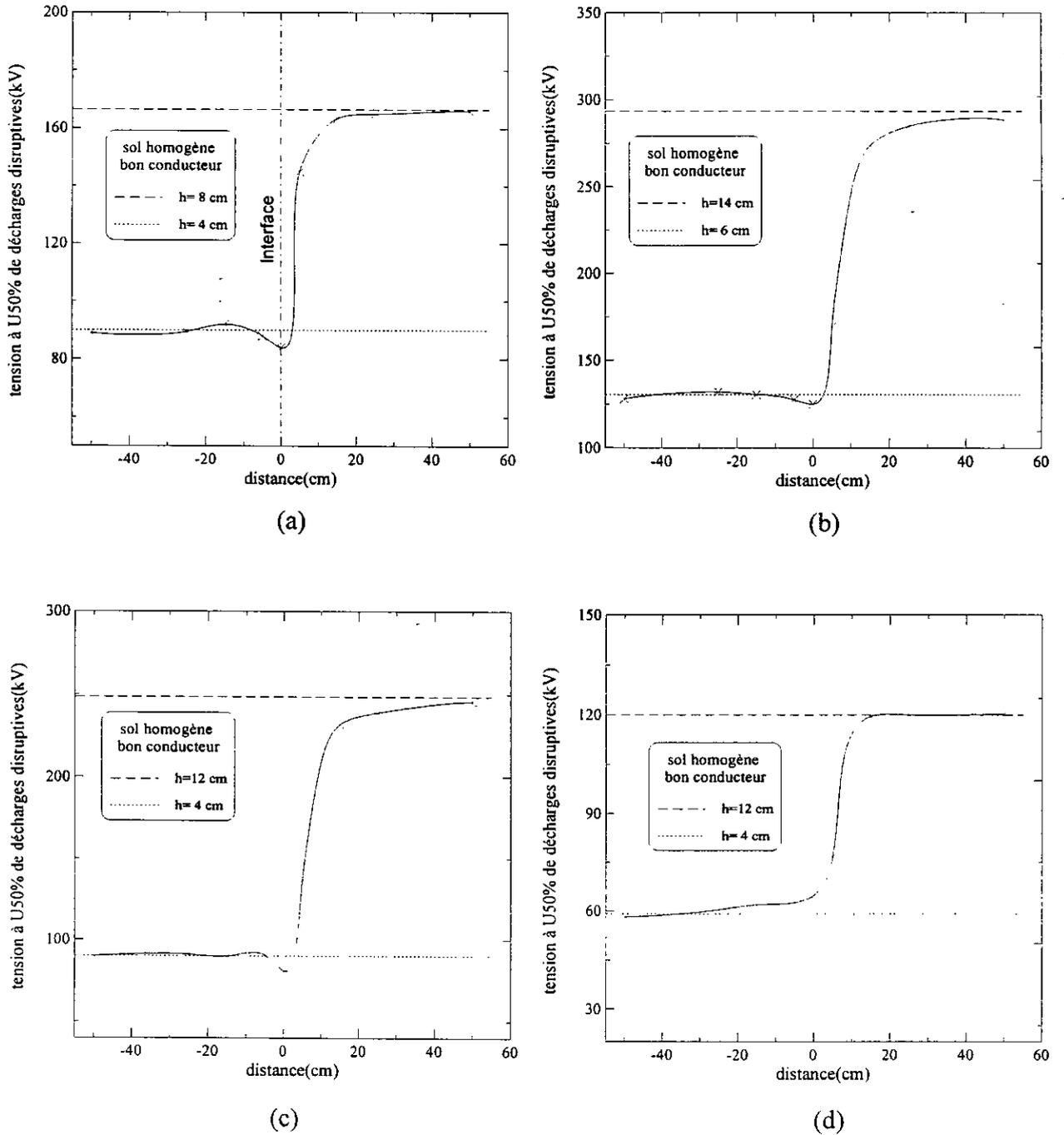


Figure II.20.– Variation de $U_{50\%}$ en fonction de la distance d .

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

Les résultats d'essais obtenus avec le sol discontinu 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 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.20).
- D'après les résultats obtenus, avec la même configuration, pour un intervalle d'air de 4 cm, avec les deux épaisseurs $e=4$ cm et $e=8$ cm, il a été constaté que [BOU98], pour les grandes distances positives, l'influence de la discontinuité est plus importante pour $e=8$ cm que pour $e=4$ cm. Au voisinage de l'interface, la diminution de la tension $U_{50\%}$ est plus sensible pour $e=4$ cm que pour $e=8$ cm (figure II.21).

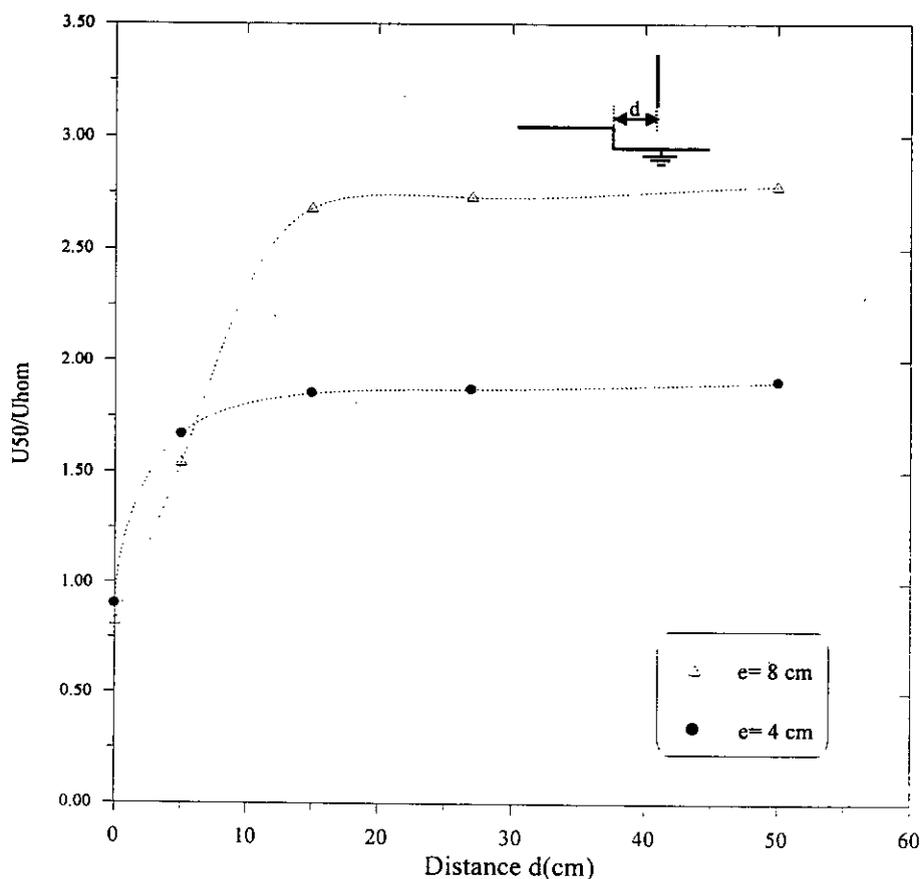


Figure II.21.— Influence de l'épaisseur e sur le rapport U_{50}/U_{hom} dans le cas de la polarité négative [BOU98b].

II.7 Conclusion

A partir des résultats des travaux effectués sur l'étude de l'influence de l'interface d'une terre hétérogène sur le point d'impact de la décharge de foudre, 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 composantes du 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.

L'étude de l'influence des propriétés électrogéologiques du sol sur l'attraction des décharges par un paratonnerre a montré que :

- Dans le cas d'une terre hétérogène, suivant la position de l'axe de la décharge de foudre, par rapport à l'interface et au paratonnerre, la décharge serait, soit favorablement, soit défavorablement attirée par le paratonnerre. Notons que, pour un paratonnerre horizontal placé au-dessus de la partie bonne conductrice de la terre, les zones d'attraction peuvent être plus petites que celle donnée par le modèle électrogéométrique classique. Cela veut dire que dans ce cas le modèle électrogéométrique ne serait plus valable. Dans les autres cas le modèle électrogéométrique reste valable.
- Dans le cas d'une terre homogène mauvaise conductrice, les zones d'attraction pourraient être plus larges que celle définie pour un sol homogène bon conducteur. Cet élargissement dépendrait de la conductivité du sol et du rapport entre la hauteur du paratonnerre et l'épaisseur de la couche mauvaise conductrice. Plus l'épaisseur de cette terre est grande par rapport à la hauteur du paratonnerre, plus la zone d'attraction de celui-ci serait large. Il en est de même lorsque la conductivité du sol diminue.

Suite à ces travaux, notre étude s'inscrit dans le même axe de recherche et concerne les zones d'attraction d'un paratonnerre vertical placé sur un sol discontinu.

Chapitre III

TECHNIQUES EXPERIMENTALES

III.1 INTRODUCTION

Dans le but d'étudier l'influence de la discontinuité du sol sur le point d'impact de la foudre, nous avons effectué de nombreux essais sur un modèle expérimental réduit.

Dans ce chapitre, nous présentons les techniques expérimentales utilisées dans la simulation pratique du saut final du traceur descendant sur un sol discontinu. En particulier, nous décrivons les différentes configurations du système tige-plan discontinu avec paratonnerre vertical. Nous expliquons aussi, les méthodes de détermination des tensions disruptives $U_{100\%}$ et des zones d'attraction du paratonnerre.

III.2 Circuits d'essai et de mesure

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 d'un générateur de choc de type Marx à huit étages dont la tension nominale est de 600 kV, et l'énergie est de 4 kJ.

La figure III.1 donne un schéma simplifié d'un générateur de choc. La tension indiquée par le diviseur de tension placé à la sortie du redresseur est multipliée par le nombre d'étages, pour obtenir la tension délivrée par le générateur de choc.

La forme de la tension délivrée par le générateur est une biexponentielle [AGU82] :

$$U(t) = \eta \cdot U \cdot (e^{-t/T_q} - e^{-t/T_f})$$

Où :

U : amplitude de l'onde de choc.

T_q et T_f ; sont respectivement les constantes de temps de queue et de front de la tension.

η : rendement du générateur ($\eta=85.7\%$).

L'onde de choc normalisée ($1.2/50 \mu\text{s}$) a un temps de front de $1.2 \mu\text{s}$ et un temps de queue de $50 \mu\text{s}$.

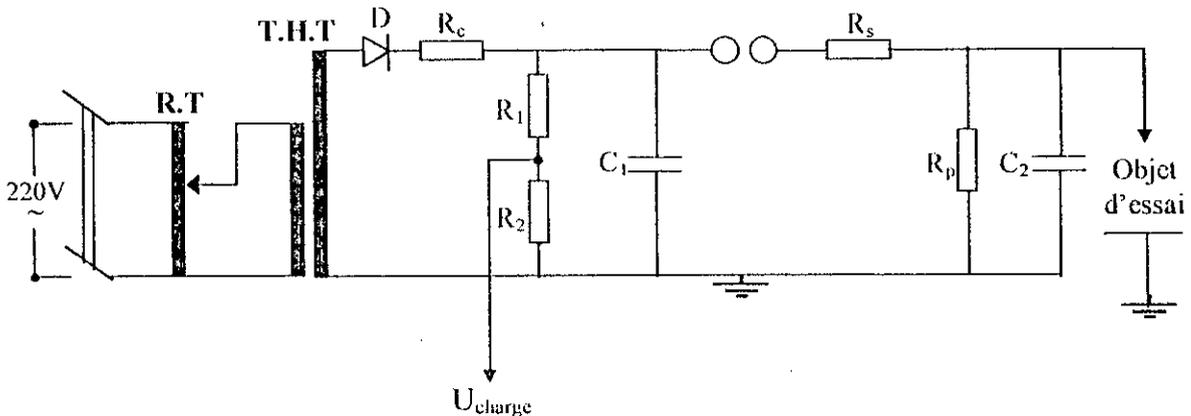


Figure III.1.- Schéma simplifié d'un étage du générateur de choc.

Avec :

R.T : régulateur de tension.

T.H.T : transformateur haute tension.

D : redresseur.

R_c : résistance de charge.

R_s : résistance série [$R_s=(10 \times 8)+150$] Ω .

R_p : résistance parallèle [$R_p=430 \times 8$] Ω .

C_1 : condensateur de choc $C_1=22.5 \text{ nF}$.

C_2 : condensateur de charge $C_2=2 \text{ nF}$.

III.3 Modèle expérimental

Le modèle expérimental utilisé, pour étudier les zones d'attraction d'un paratonnerre vertical avec terre discontinue est représenté à la figure III.2. La décharge de foudre, au moment du saut final, est simulée par une tige conductrice en acier, de 4.8 mm de diamètre, connectée au générateur de choc. La terre dite "discontinue" est constituée d'une plaque métallique de 4 mm d'épaisseur et ayant deux niveaux différents de surface respective de $1.2 \times 1.2 \text{ m}^2$. Le paratonnerre est simulé par une tige conductrice de 3.5 mm de diamètre, connectée au plan discontinu mis à la terre.

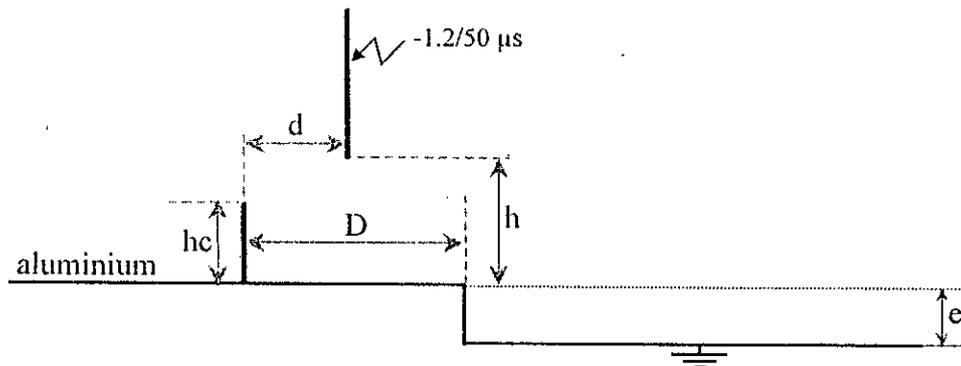


Figure III.2.– Modèle expérimental.

Dans notre étude, nous avons considéré toutes les positions possibles du paratonnerre sur le sol discontinu. Nous distinguons ainsi deux configurations principales suivant la position du paratonnerre sur la partie haute ou la partie basse de la terre discontinue.

III.3.1 Paratonnerre sur la partie haute de la terre discontinue

Dans ce cas, nous avons pris en considération les deux dispositions possibles du paratonnerre par rapport à l'interface et à l'axe de la tige :

- Paratonnerre sur la partie haute de la terre discontinue et situé entre l'interface et l'axe de la tige (figure III.3 a).
- Paratonnerre sur la partie haute de la terre discontinue, et l'axe de la tige situé entre l'interface et le paratonnerre (figure III.3 b).

Pour chacune des ces deux configurations, nous avons déterminé les zones d'attraction du paratonnerre vertical, pour différentes valeurs du rapport D/hc (D/hc égal à 2, 4, 6, 8 et 10).

III.3.2 Paratonnerre sur la partie basse de la terre discontinue

Comme dans le cas précédent, nous avons deux configurations possibles :

- Paratonnerre sur la partie basse de la terre discontinue et situé entre l'interface et l'axe de la tige (figure III.3 c).
- Paratonnerre sur la partie basse de la terre discontinue, et l'axe de la tige situé entre l'interface et le paratonnerre (figure III.3 d).

Dans nos essais sur ces deux configurations, l'influence de la profondeur (e) de la partie basse de la terre discontinue sur les zones d'attraction du paratonnerre vertical est obtenue, en faisant varier le rapport hc/e . Nous avons pris quatre rapports hc/e ; hc/e égal à 0.4, 0.8, 1.2 et 1.6. Pour chacun de ces rapports, nous avons fait varier la distance horizontale du paratonnerre par rapport à l'interface. Afin de mieux étudier l'influence de l'interface en fonction de cette distance, nous avons choisi trois rapports D/hc ; $D/hc= 2, 4$ et 10 pour la première configuration (figure III.3 c), et $D/hc= 4, 6$ et 10 pour la deuxième configuration (figure III.3 d).

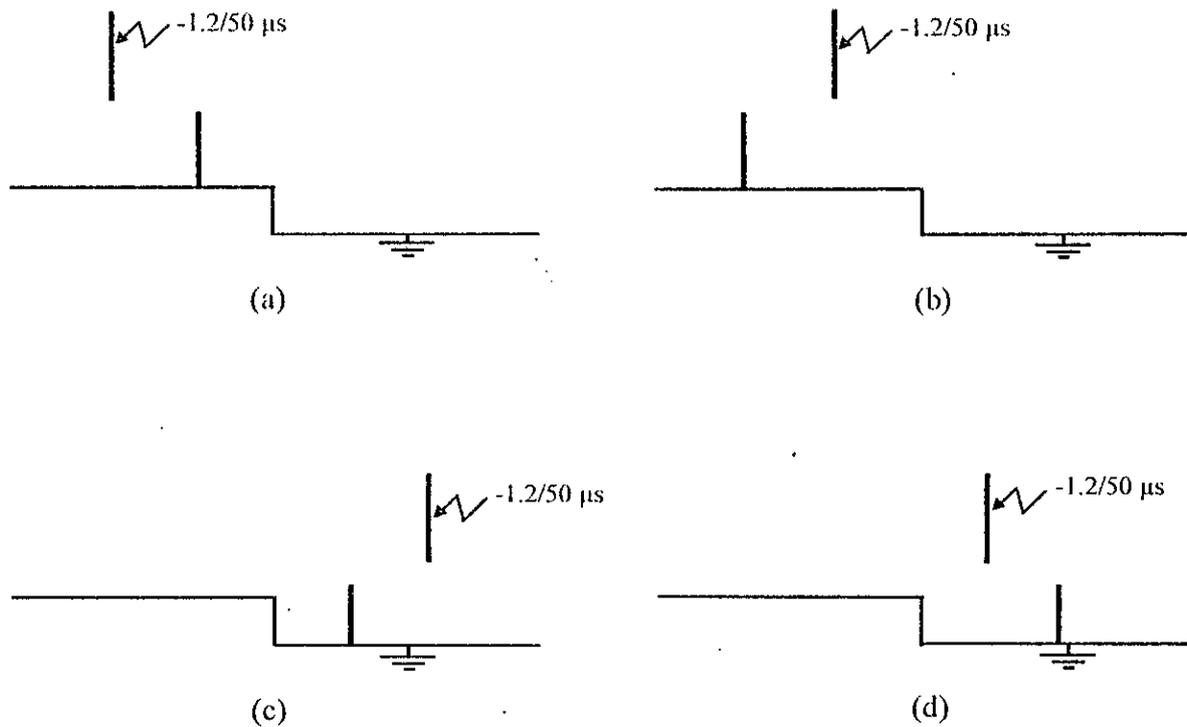


Figure III.3.– Différentes dispositions du paratonnerre sur une terre discontinue.

Les résultats obtenus avec les différentes configurations sont comparés à ceux obtenus avec un sol homogène bon conducteur.

III.4 Méthode de détermination des zones d'attraction du paratonnerre

Les zones d'attraction d'un paratonnerre sont déterminées en appliquant le niveau de tension qui devrait engendrer une décharge disruptive certaine $U_{100\%}$ dans le système sans paratonnerre. La première étape consiste alors à rechercher la valeur de cette tension pour chaque hauteur h de l'intervalle tige-plan.

III.4.1 Détermination de la tension disruptive $U_{100\%}$

Pour déterminer la tension disruptive $U_{100\%}$, nous avons utilisé la méthode des paliers multiples constants. Pour chaque hauteur h de l'intervalle, nous appliquons 20 chocs de même niveau de tension, le temps entre deux chocs successifs est de l'ordre de 30 secondes. Le rapport entre le nombre de chocs ayant engendré une décharge disruptive et le nombre total de chocs appliqué, donne la fréquence de foudroiement du plan relative au niveau de tension appliquée. Pour tracer la caractéristique $P = f(U)$, donnant la probabilité de décharge en fonction de la tension U , nous avons appliqué trois paliers de tensions différents. L'extrapolation des droites de régression tracées dans un papier à échelle gaussio-arithmétique donne les tensions disruptives $U_{100\%}$ (Annexe II).

Il est à noter que les corrections atmosphériques des valeurs mesurées de la tension disruptive $U_{100\%}$ ont été effectuées conformément aux recommandations de la CEI-60

III.4.2 Détermination des zones d'attraction du paratonnerre

Pour déterminer la fréquence de foudroiement du paratonnerre, nous avons appliqué, pour chaque configuration (D , h_c , h et d), 50 fois le niveau de tension disruptive $U_{100\%}$ correspondant à la longueur h de l'intervalle d'air tige-plan sans paratonnerre. Les chocs sont séparés par un intervalle de temps de l'ordre de 30 secondes. Si N_p est le nombre de chocs ayant atteint le paratonnerre, la fréquence de foudroiement relative à la distance d sera égale à $N_p/50$. Pour la même position du paratonnerre par rapport à l'interface (rapport D/h_c fixe), on fait varier la distance d entre l'axe de la tige et le paratonnerre. Pour chaque distance correspond une fréquence de foudroiement du paratonnerre. A partir des distances d et leurs probabilités respectives, la droite de régression donne directement la position pour laquelle la probabilité de décharge au paratonnerre est égale à 90% (Annexe II). Pour une hauteur h_c du paratonnerre, nous déterminons $d_{90\%}$ pour au moins trois longueurs de l'intervalle d'air tige-plan.

III.5 Vérification du modèle électrogéométrique

Dans le but de vérifier le modèle électrogéométrique classique et de comparer les résultats obtenus pour les différentes configurations à une même référence, nous avons déterminé les zones d'attraction du paratonnerre vertical sur un sol homogène parfaitement conducteur.

La configuration du modèle expérimental utilisé est représentée à la figure III.4. Dans ce modèle la terre est constituée d'une plaque métallique plate mise à la terre.

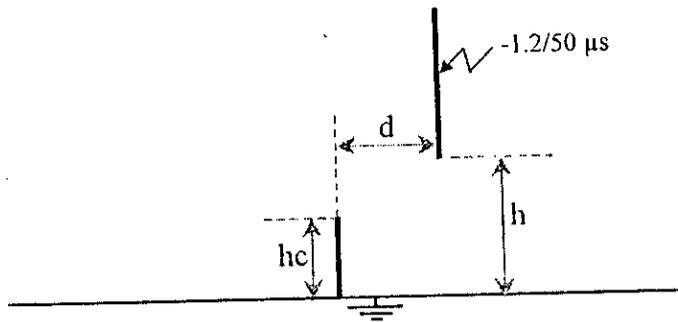


Figure III.4.— Paratonnerre vertical sur sol bon conducteur.

Chapitre IV

ZONES D'ATTRACTION D'UN PARATONNERRE VERTICAL AVEC UNE TERRE DISCONTINUE

IV.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats des essais effectués au laboratoire sur la détermination des zones d'attraction d'un paratonnerre vertical dans le cas d'une terre discontinue.

Nous commençons cette étude par la détermination des tensions disruptives $U_{100\%}$ relatives à la configuration tige-plan sans paratonnerre pour les différentes longueurs h de l'intervalle, puis nous étudions les zones d'attraction d'un paratonnerre vertical dans le cas d'un sol homogène parfaitement conducteur, afin de vérifier le modèle électrostatique classique.

Par la suite, nous présentons les résultats expérimentaux concernant les zones d'attraction d'un paratonnerre vertical placé sur un sol discontinu suivant les quatre configurations citées dans le chapitre précédent.

IV.2 Détermination de la tension $U_{100\%}$

Pour différentes valeurs de la longueur de l'intervalle d'air tige-plan, nous déterminons le niveau de tension qui engendre toujours une décharge disruptive ($U_{100\%}$) dans l'intervalle. Ce niveau de tension est utilisé pour la détermination des zones d'attraction du paratonnerre.

Le tableau ci-dessous donne les résultats des essais effectués pour la détermination des tensions $U_{100\%}$.

$h(\text{cm})$	4	6	8	10	12	14	15
$U_{100\%} (\text{kV})$	120	160	208	256	292	332	380

Tableau IV.1.– Tensions disruptives $U_{100\%}$.

La figure IV.1 montre les variations de la tension $U_{100\%}$ en fonction de la longueur h de l'intervalle. Cette tension est sensiblement proportionnelle à l'intervalle d'air.

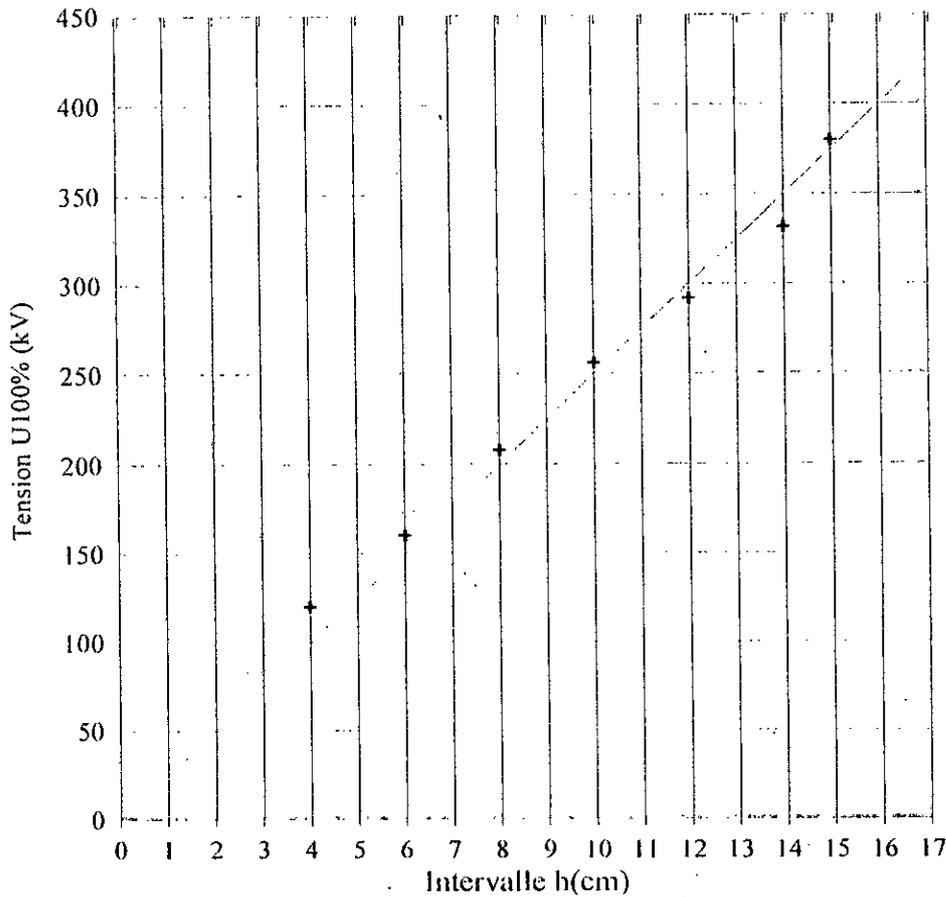


Figure IV.1.– La tension disruptive $U_{100\%}$ en fonction de l'intervalle h .

IV.3 Vérification du modèle électrogéométrique

Nous étudions les zones d'attraction d'un paratonnerre vertical situé sur un sol homogène parfaitement conducteur, afin de vérifier le modèle électrogéométrique classique et d'obtenir une bonne référence pour la comparaison des résultats.

Les résultats des essais effectués montrent que, la zone d'attraction déterminée par les distances d engendrant 100% de décharges au paratonnerre coïncide avec celle définie par le modèle électrogéométrique c'est-à-dire avec la parabole $X^2 - 2Y + 1 = 0$; $X = d/hc$ et $Y = h/hc$ où h et hc sont respectivement la longueur de l'intervalle d'air et la hauteur du paratonnerre. La zone d'attraction déterminée à partir des distances d engendrant 90% de décharges au paratonnerre est légèrement supérieure (figure IV.2).

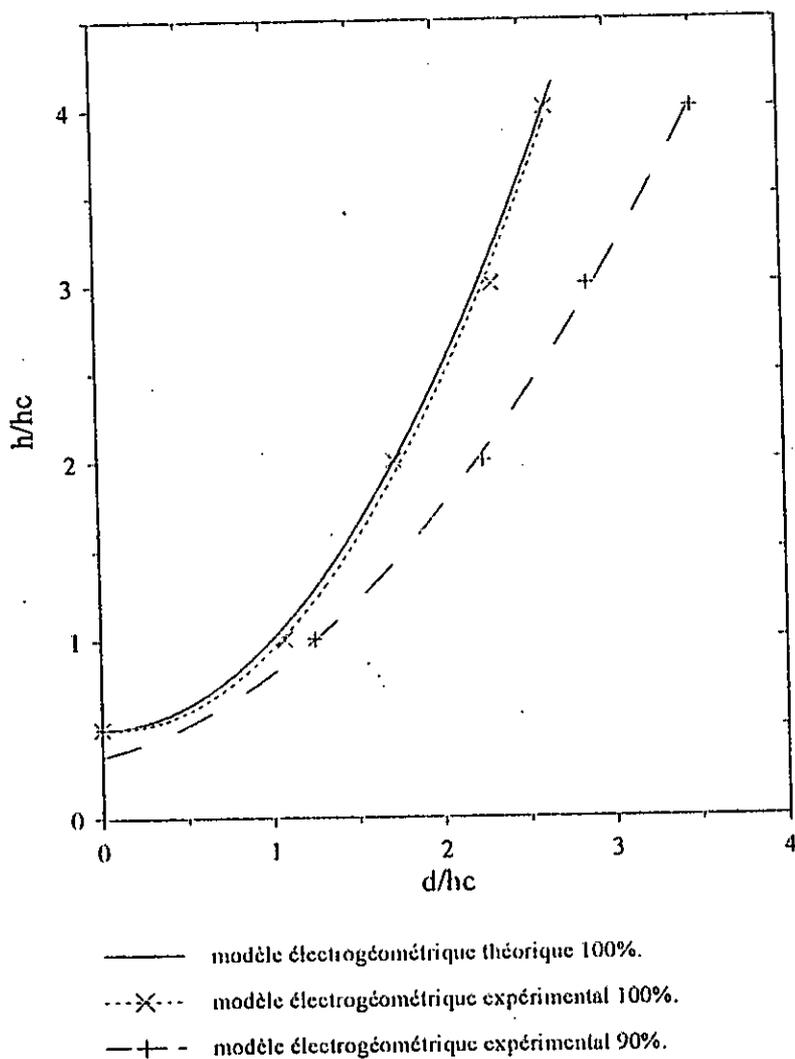


Figure IV.2.— Zone d'attraction d'un paratonnerre vertical dans le cas d'un sol homogène bon conducteur.

IV.4 Zones d'attraction d'un paratonnerre vertical dans le cas d'une terre discontinue

Dans cette partie, nous présentons les résultats obtenus suivant la position du paratonnerre sur la partie haute ou basse de la terre discontinue, puis nous comparons ces résultats à ceux obtenus avec le modèle électrogéométrique pour un sol homogène bon conducteur.

IV.4.1.2 Influence du rapport D/hc sur le niveau de terre fictive

Pour étudier cette influence, nous avons établi la relation réduite $e'/hc=f(D/hc)$ illustrée par la figure IV.4.

Il ressort de cette figure que le niveau fictif de la terre varie dans le sens inverse de la variation du rapport D/hc . Pour D/hc suffisamment grand ($D/hc=12$), le niveau relatif de la terre fictive e'/hc tend vers celui du sol bon conducteur.

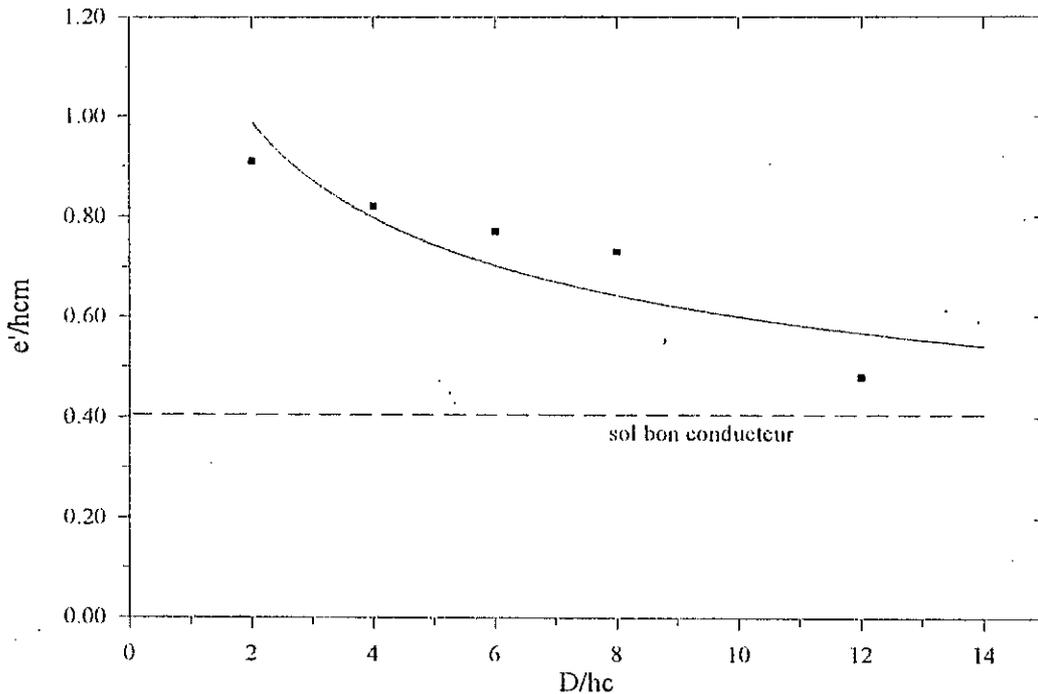


Figure IV.4.– Influence du rapport D/hc sur le niveau de terre fictive

IV.4.2 Paratonnerre sur la partie haute de la terre discontinue, et l'axe de la tige situé entre l'interface et le paratonnerre

Les résultats des essais obtenus avec cette configuration sont rapportés sur les tableaux IV.7 à IV.10 (annexe 1).

La figure IV.5 montre que lorsque le paratonnerre est relativement proche de l'interface ($D/hc=4$), la zone d'attraction est plus petite que celle définie pour un sol homogène bon conducteur. Cela nous conduit à conclure que dans ce cas la présence de l'interface où le champ électrique est relativement intense amoindrit l'efficacité du paratonnerre. En effet, les décharges de foudre sont attirées par le paratonnerre dans une zone plus petite que celle définie par le modèle électrogéométrique classique. Nous constatons aussi que l'interface n'a aucun effet sur les zones d'attraction qui sont confondues avec celle donnée par le modèle électrogéométrique classique dès que le rapport D/hc devient supérieur ou égal à 6 (figure IV.5).

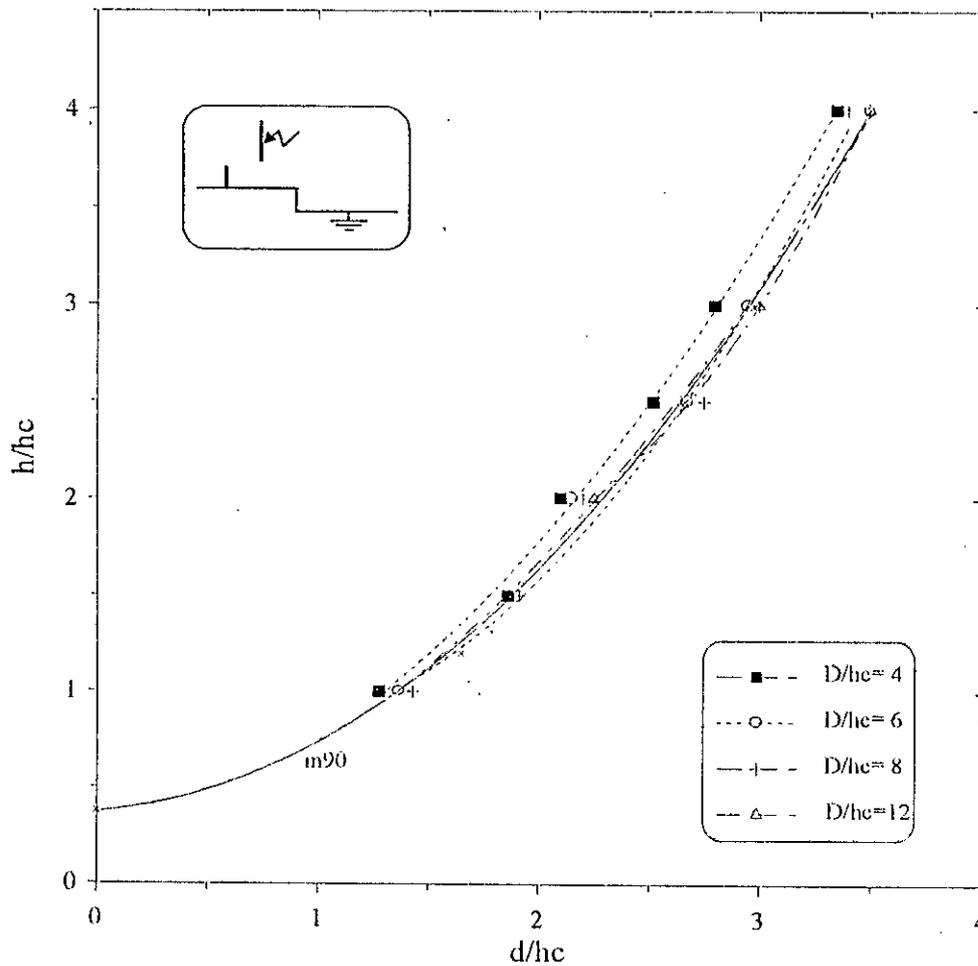


Figure IV.5.— Zones d'attraction d'un paratonnerre vertical situé sur de la partie haute de la terre discontinue et l'axe de la tige situé entre l'interface et le paratonnerre.

IV.4.3 Paratonnerre sur la partie basse de la terre discontinue et l'axe de la décharge situé entre l'interface et le paratonnerre

IV.4.3.1- Détermination des zones d'attraction

A partir des résultats des essais effectués avec cette configuration, nous avons tracé, pour chaque valeur du rapport hc/e , les zones d'attraction pour différentes positions du paratonnerre par rapport à l'interface.

Les figures IV.6, IV.7 et IV.8 montrent que, plus le paratonnerre s'approche de l'interface, plus sa zone d'attraction devient plus petite que celle définie pour un sol homogène parfaitement conducteur. Quand le paratonnerre s'éloigne de l'interface ($D/hc \geq 10$), la zone d'attraction devient confondue avec celle donnée par le modèle électrogéométrique classique. Cette constatation a été vérifiée pour un rapport hc/e égal à 0.4, 0.8 et 1.2. Pour $hc/e=1.6$, il n'y a pratiquement aucune influence de l'interface sur l'attraction des décharges par le paratonnerre. En effet, les zones d'attraction pour les différentes positions du paratonnerre par rapport à

l'interface sont confondues avec celle définie pour un sol homogène bon conducteur (figure IV.9).

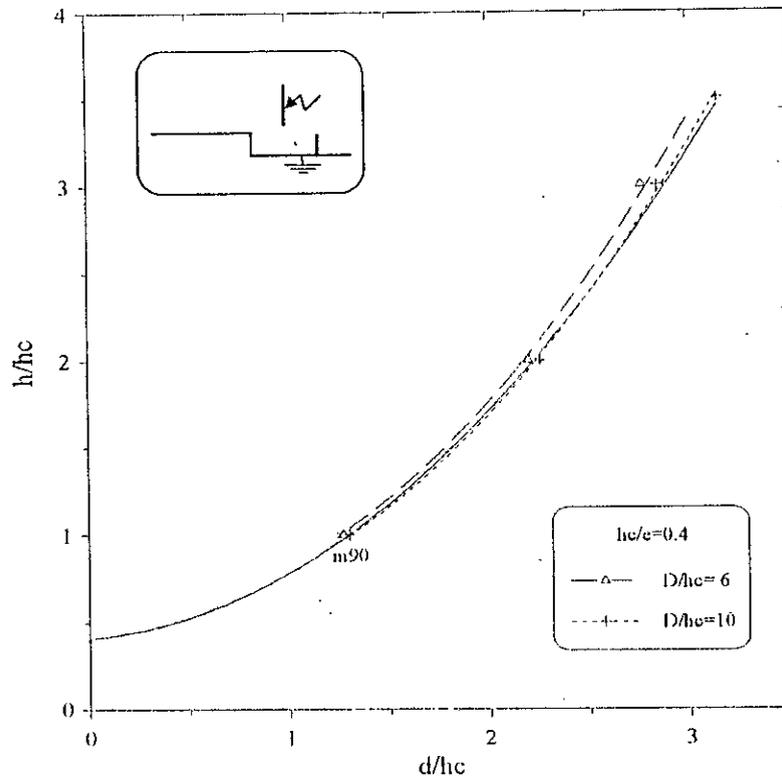


Figure IV.6.— Zones d'attraction d'un paratonnerre vertical pour un rapport $h_c/e=0.4$.

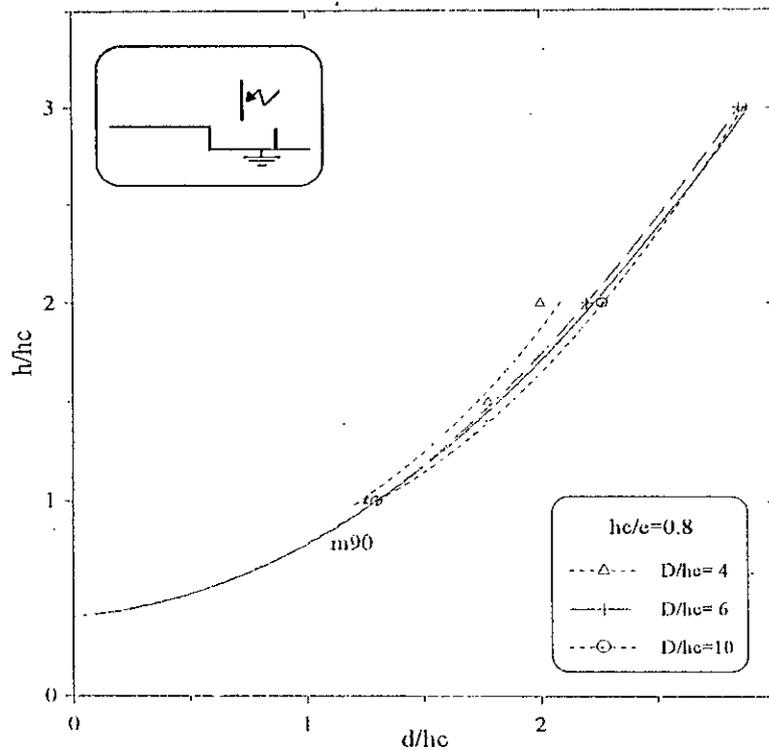


Figure IV.7.— Zones d'attraction d'un paratonnerre vertical pour un rapport $h_c/e=0.8$.

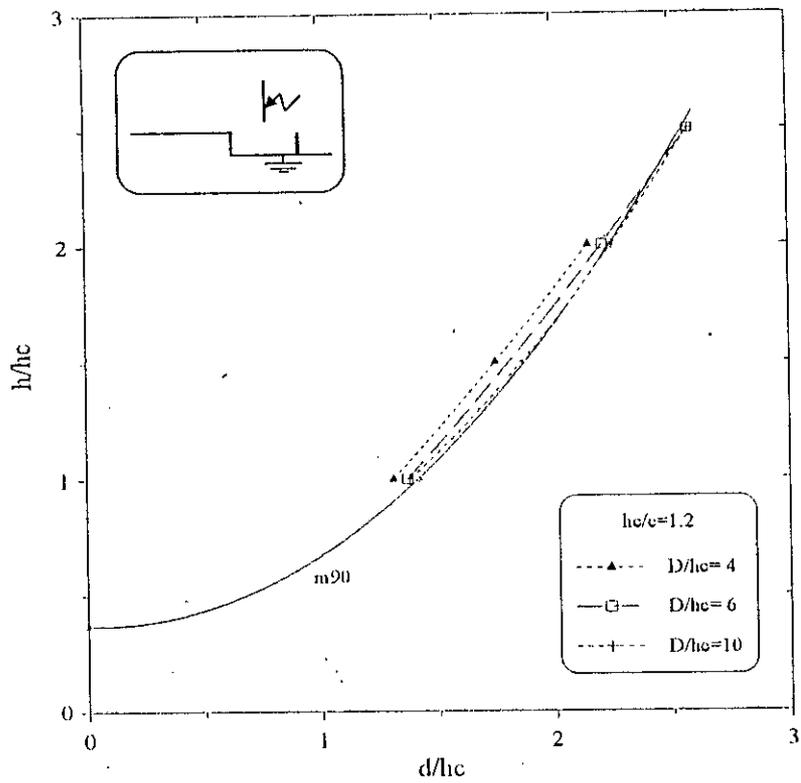


Figure IV.8.— Zones d'attraction d'un paratonnerre vertical pour un rapport $hc/e=1.2$.

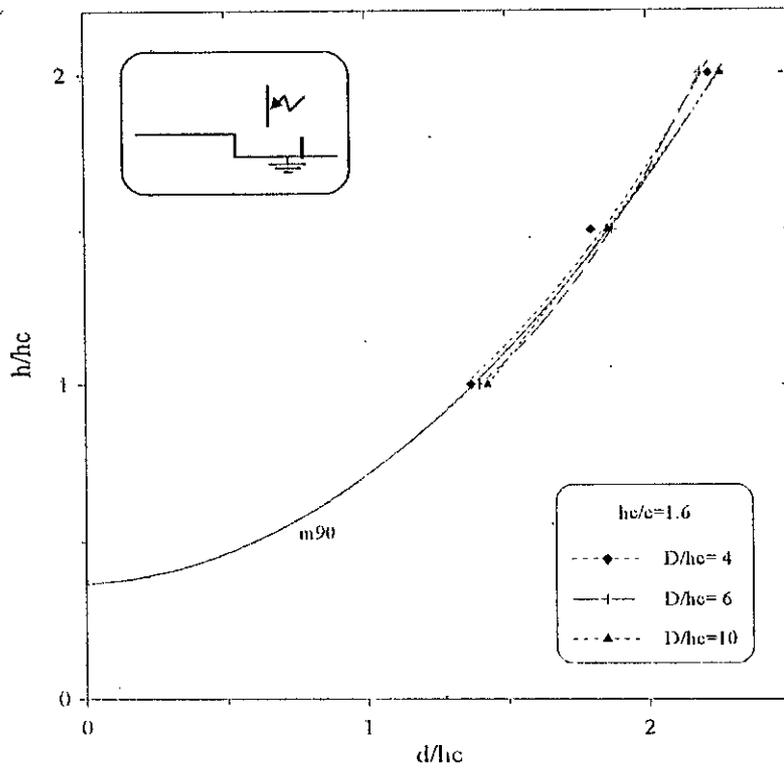


Figure IV.9.— Zones d'attraction d'un paratonnerre vertical pour un rapport $hc/e=1.6$.

IV.4.3.2- Influence du rapport hc/e sur les zones d'attraction du paratonnerre

Pour mieux étudier l'influence de l'interface sur l'attraction de décharges par le paratonnerre, nous avons tracé pour chaque position du paratonnerre (rapport D/hc), les zones d'attraction pour les différents rapports hc/e (hc/e égal à 0.4, 0.8, 1.2 et 1.6).

D'après les figures IV.10, IV.11 et IV.12, nous constatons que l'influence de l'interface sur les zones d'attraction est nettement établie lorsque le paratonnerre est situé très proche de l'interface ($D/hc=4$), où les zones d'attraction sont plus petites que celle donnée par le modèle électrogéométrique. Notons ici que pour hc/e égal à 0.4, la plupart des décharges sont attirées par l'interface selon les deux types représentés à la figure IV.21 c. Pour les autres rapports, nous remarquons que l'influence de l'interface est plus importante pour $hc/e=0.8$, où la zone d'attraction est la plus petite. Pour un rapport hc/e égal à 1.2, la zone d'attraction devient plus large que celle définie avec la structure précédente ($hc/e=0.8$), mais reste toujours plus petite que celle donnée par le modèle électrogéométrique classique. Quand la hauteur du paratonnerre devient relativement grande par rapport à la profondeur de la partie basse de la terre discontinue ($hc/e=1.6$), la zone d'attraction devient confondue avec celle définie pour un sol homogène bon conducteur.

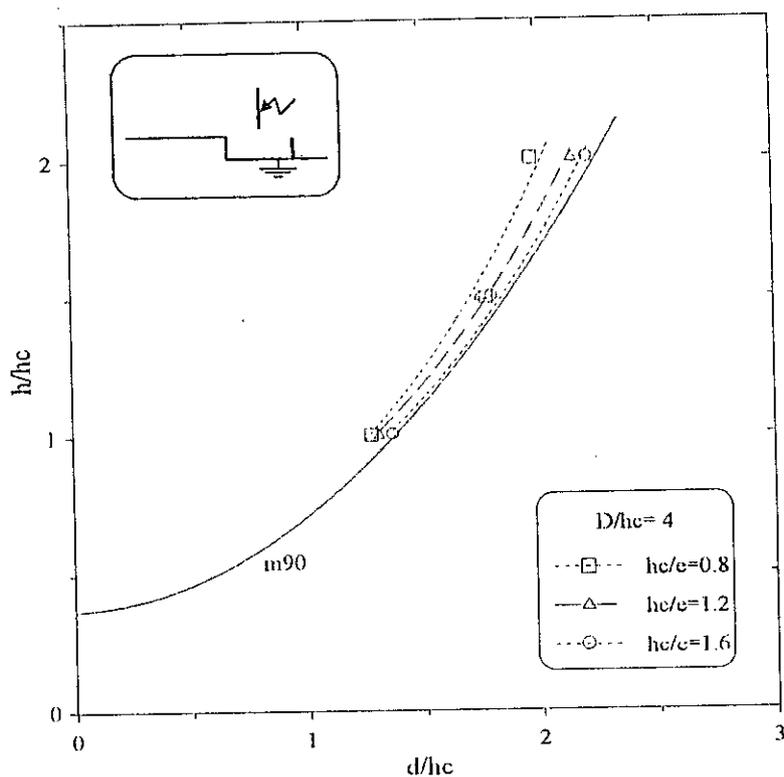


Figure IV.10.- Influence du rapport hc/e sur les zones d'attraction du paratonnerre ($D/hc=4$).

La figure IV.11 nous a permis d'examiner l'influence de l'interface sur les zones d'attraction pour tous les rapports hc/e y compris $hc/e=0.4$. Nous remarquons que pour ce dernier, la zone d'attraction est plus réduite que celles définies avec les autres rapports dont l'ordre des paraboles correspond à celui de la disposition $D/hc=4$. Cependant, elles sont très proches de la zone d'attraction définie pour un sol homogène bon conducteur.

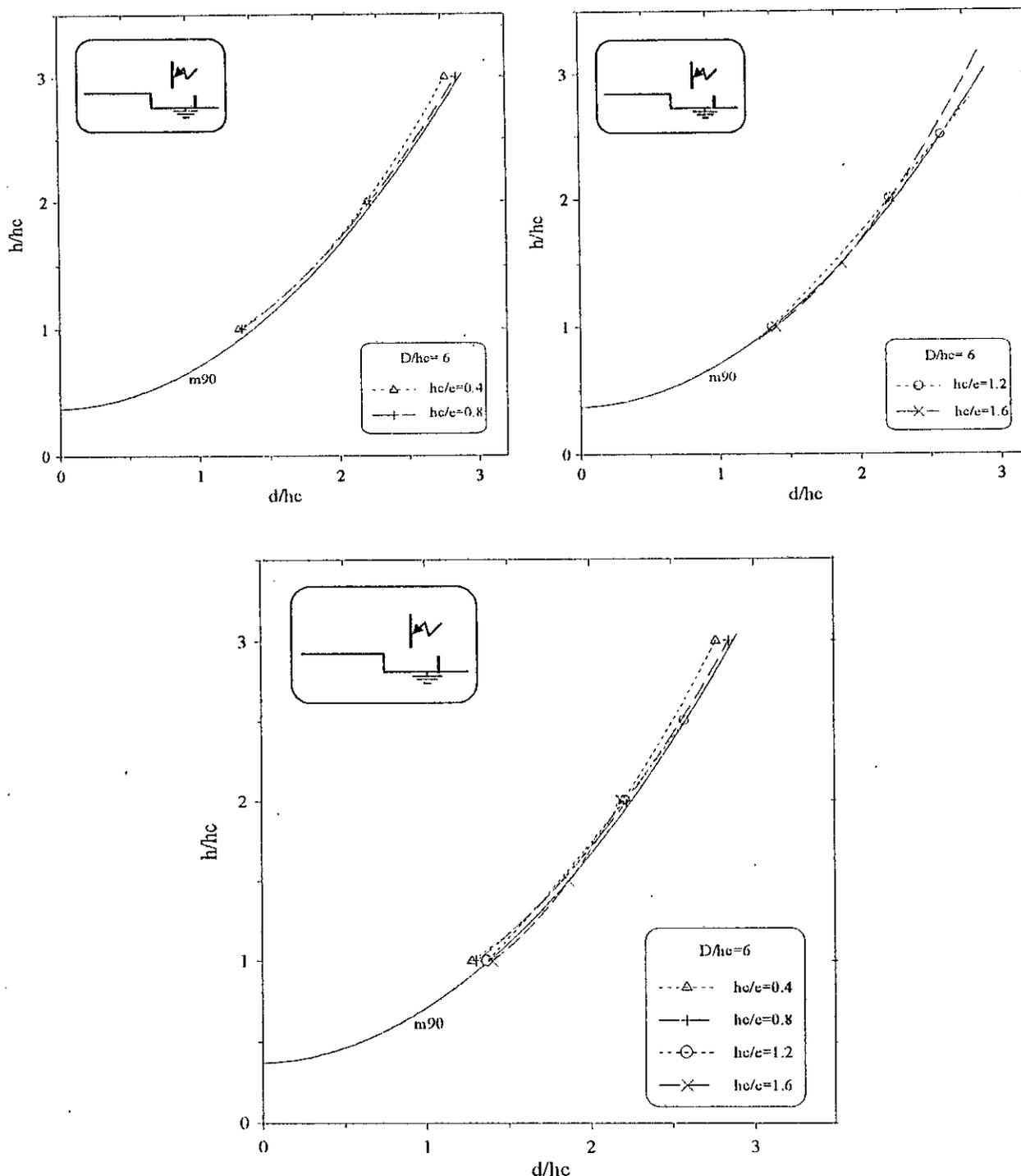


Figure IV.11.- Influence du rapport hc/e sur les zones d'attraction du paratonnerre ($D/hc=6$).

D'après les résultats obtenus pour les deux positions du paratonnerre par rapport à l'interface $D/hc=4$ et $D/hc=6$, nous constatons que l'influence de l'interface sur l'attraction des décharges par le paratonnerre est très importante lorsque la hauteur de ce dernier est relativement petite par rapport à la profondeur de la partie basse de la terre discontinue. Durant nos essais avec cette configuration, nous avons fréquemment observé des décharges vers la surface latérale et la partie supérieure de l'interface séparant les deux parties de la terre discontinue. Lorsque la hauteur du paratonnerre se rapproche de l'épaisseur de l'interface (hc/e égal à 0.8 et 1.2), l'influence de celui-ci diminue. Ce phénomène s'explique par la diminution du nombre de décharges attirées par la surface latérale de l'interface. Lorsque le rapport hc/e est suffisamment grand ($hc/e=1.6$), l'interface n'a aucun effet sur les zones d'attraction du paratonnerre.

Pour un rapport $D/hc=10$, aucune influence de l'interface n'a été constatée quelle que soit la valeur du rapport hc/e ; Les zones d'attraction sont alors confondues avec celle donnée par le modèle électrogéométrique classique (figure IV.12).

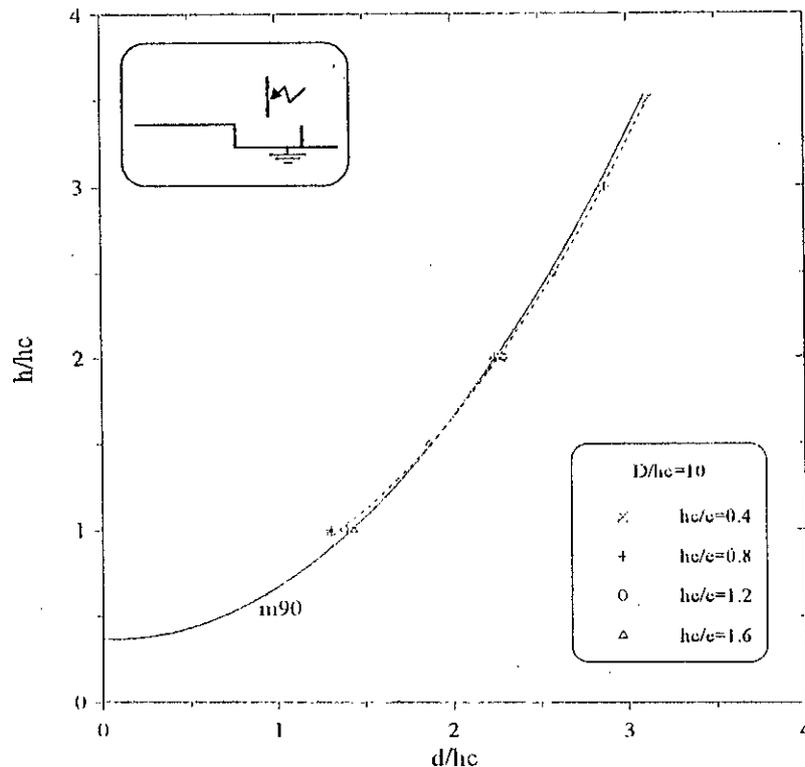


Figure IV.12.— Influence du rapport hc/e sur les zones d'attraction du paratonnerre ($D/hc=10$).

IV.4.4 Paratonnerre situé sur la partie basse de la terre discontinue entre l'axe de la décharge et l'interface

IV.4.4.1 Détermination des zones d'attraction du paratonnerre

Pour différents rapports hc/e , nous avons fait varier la distance du paratonnerre vertical par rapport à l'interface. Les résultats des essais sont rapportés dans les tableaux IV.15 à IV.18 (annexe I).

Les figures IV.13 et IV.14 montrent que les zones d'attraction du paratonnerre sont légèrement plus larges lorsque le rapport D/hc diminue. Cette constatation a été vérifiée pour un rapport hc/e égal à 0.4 et 0.8.

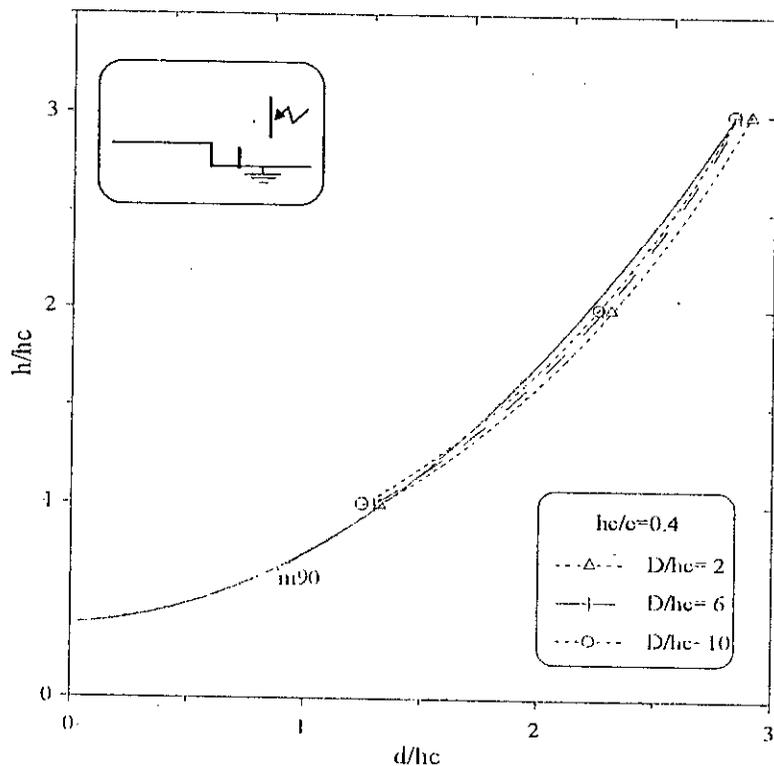


Figure IV.13.— Zones d'attraction d'un paratonnerre vertical pour un rapport $hc/e=0.4$.

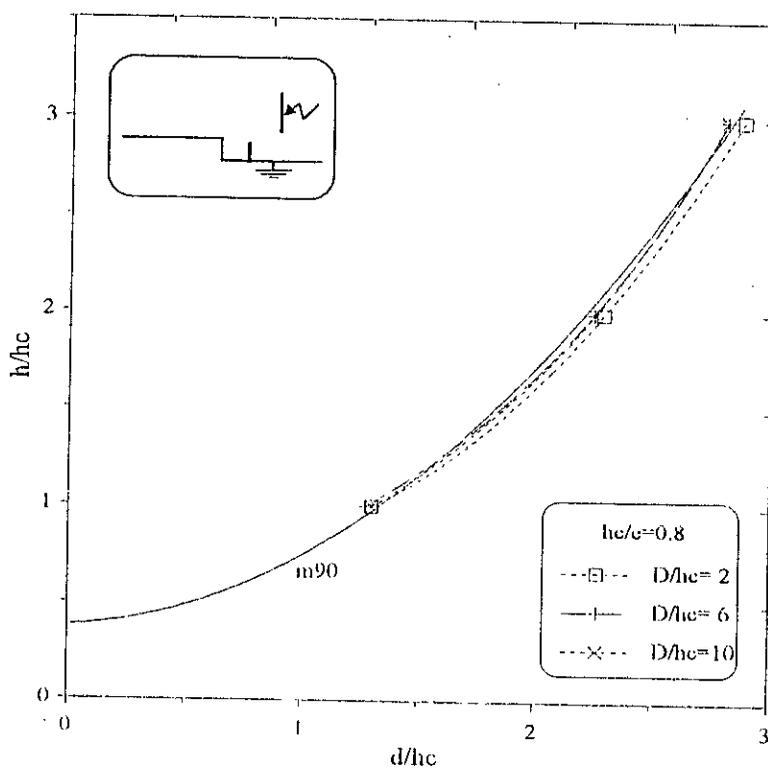


Figure IV.14.— Zones d'attraction d'un paratonnerre vertical pour un rapport $hc/e=0.8$.

La figure IV.15 montre que l'influence de l'interface sur les zones d'attraction est très faible lorsque la hauteur du paratonnerre est supérieure à la profondeur de la partie basse de la terre discontinue ($hc/e=1.2$). Pour un rapport hc/e égal à 1.6, les paraboles sont confondues avec celle donnée par le modèle électrogéométrique, indépendamment de la position du paratonnerre (figure IV.16).

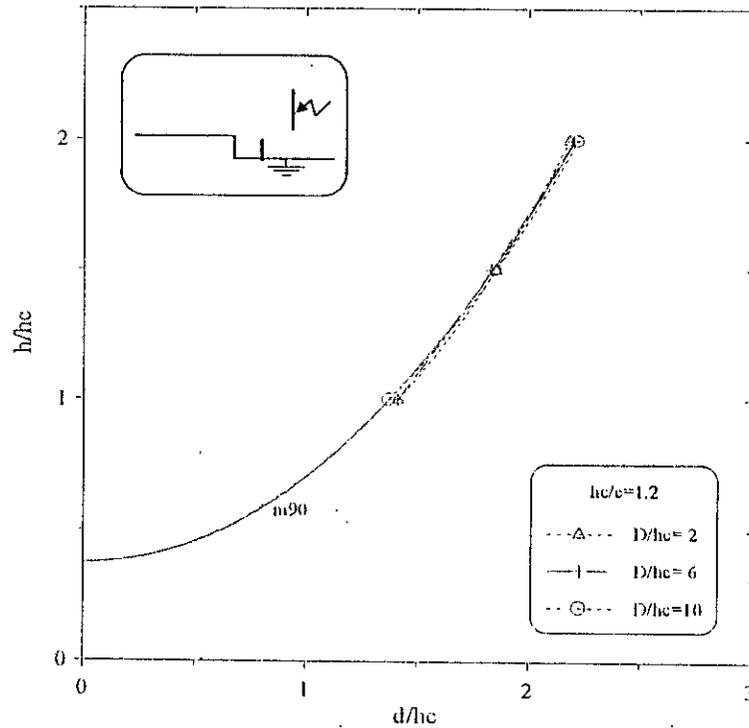


Figure IV.15.- Zones d'attraction d'un paratonnerre vertical pour un rapport $hc/e=1.2$.

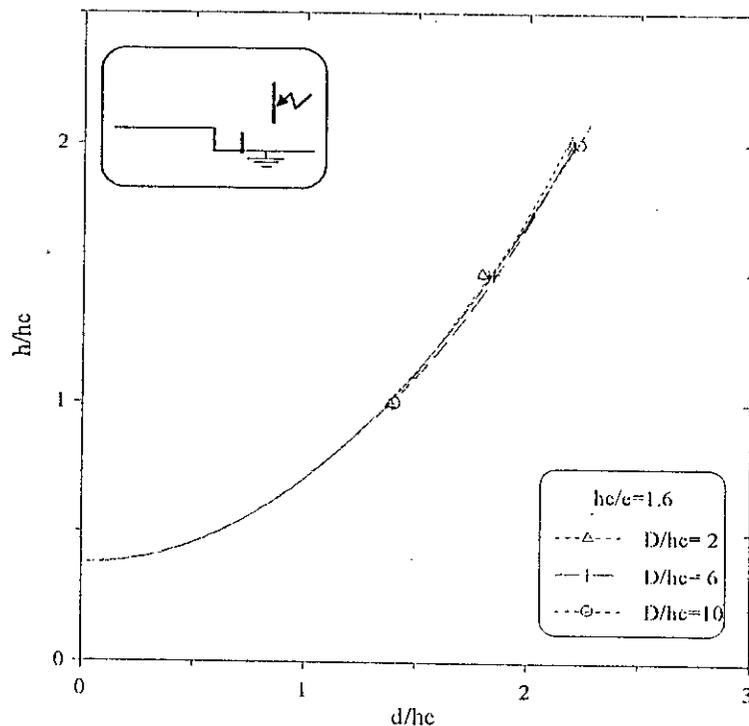


Figure IV.16.- Zones d'attraction d'un paratonnerre vertical pour un rapport $hc/e=1.6$.

IV.4.4.2 Influence du rapport hc/e sur les zones d'attraction

Les figures IV.17 et IV.18 montrent que pour un rapport de $hc/e < 1$, les zones d'attraction sont les plus larges, cependant la plus grande zone a été obtenue avec $hc/e=0.4$. Par contre, lorsque ce rapport devient supérieur à l'unité, il n'y a pratiquement pas d'influence de l'interface sur les zones d'attraction.

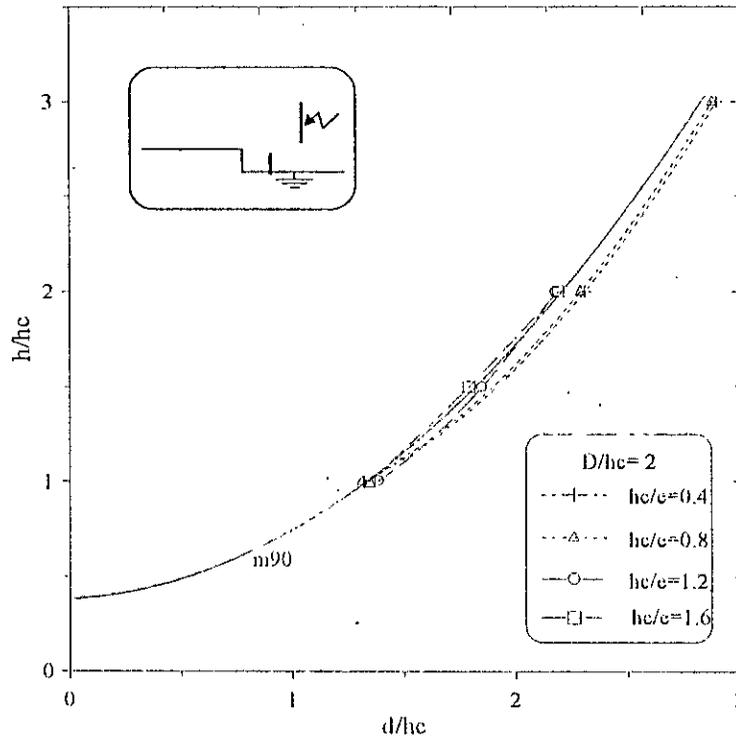


Figure IV.17.— Influence du rapport hc/e sur les zones d'attraction du paratonnerre ($D/hc=2$).

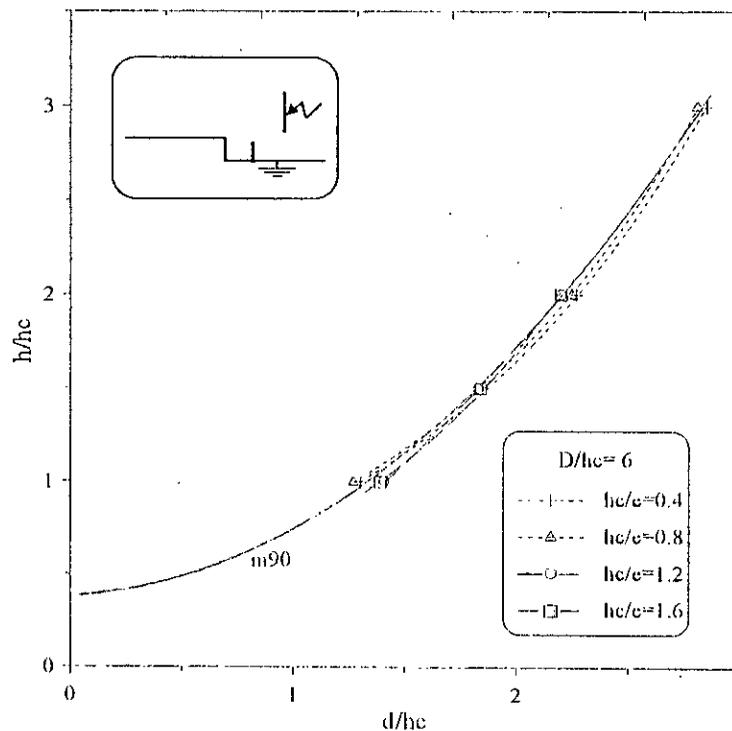


Figure IV.18.— Influence du rapport hc/e sur les zones d'attraction du paratonnerre ($D/hc=6$).

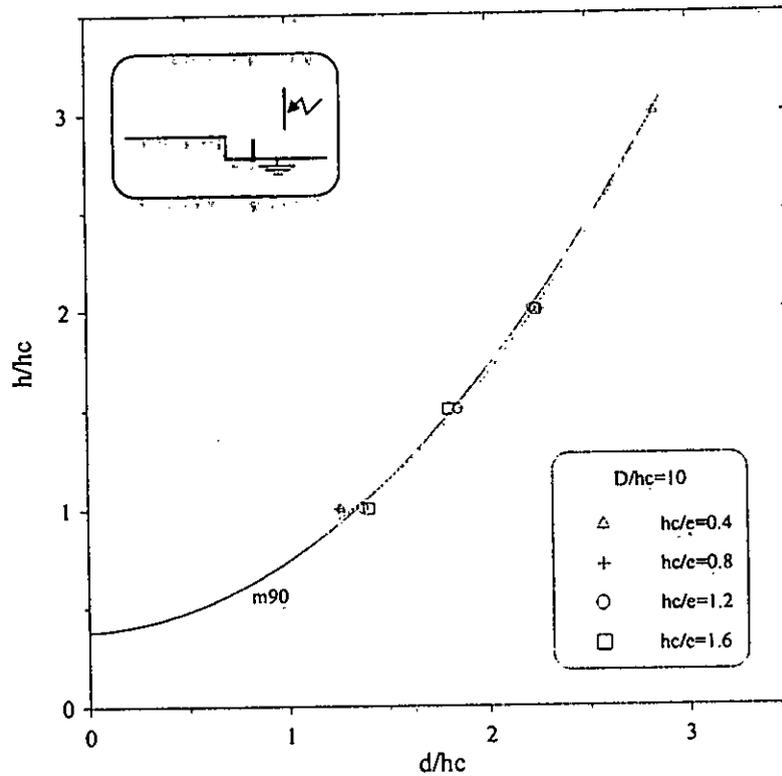


Figure IV.19.- Influence du rapport hc/e sur les zones d'attraction du paratonnerre ($D/hc=10$).

IV.4.4.3 Influence du rapport hc/e sur le niveau de terre fictive

Pour étudier cette influence, nous présentons à la figure IV.20, les caractéristiques $e'/hc=f(D/hc)$ pour tous les rapports hc/e utilisés ($hc/e=0.4, 0.8, 1.2$ et 1.6).

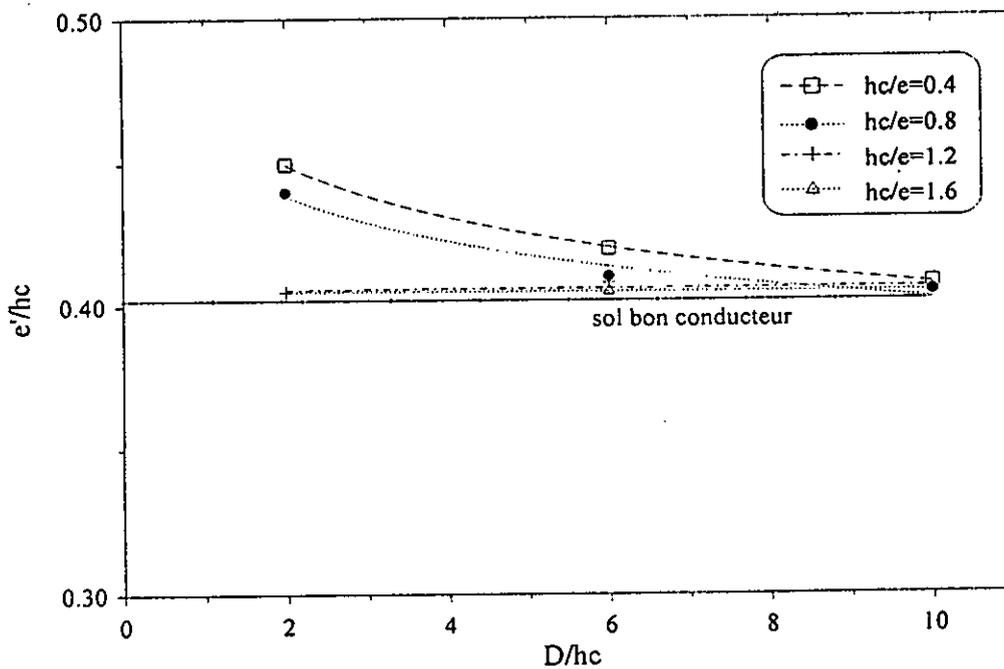
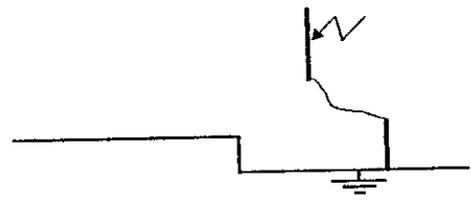
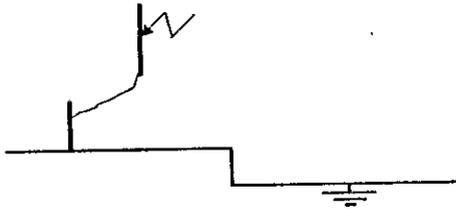


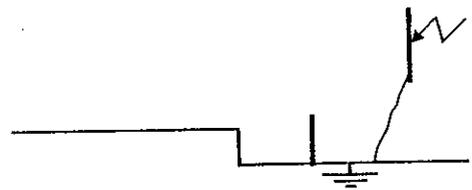
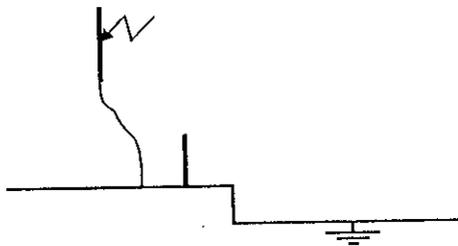
Figure IV.20.- Influence du rapport hc/e sur le niveau de terre fictive.

D'après cette figure, nous remarquons que le niveau relatif de la terre fictive est relativement élevé pour hc/e égal à 0.4 et 0.8. Nous constatons aussi que le rapport e'/hc tend vers celui du sol homogène bon conducteur lorsque le rapport hc/e augmente et/ou la distance relative D/hc du paratonnerre par rapport à l'interface augmente.

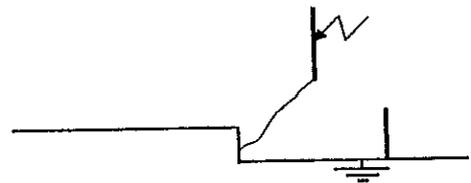
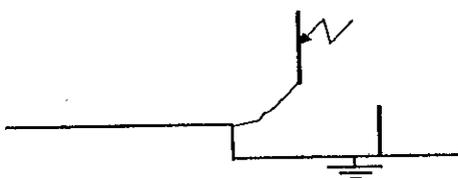
IV.5 Types de décharges observées



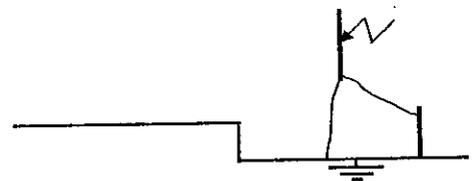
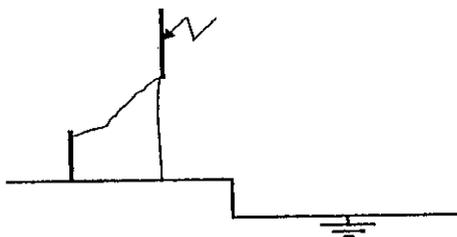
a) Décharges directes sur le paratonnerre.



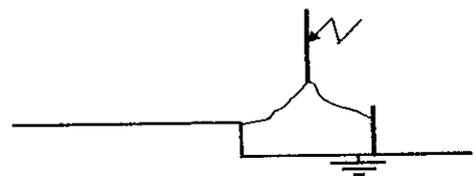
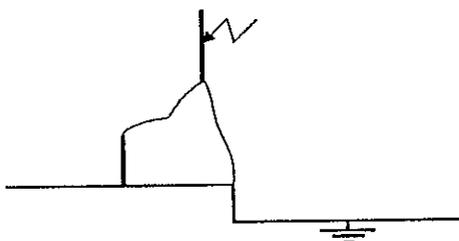
b) Décharges directes sur le sol.



c) Décharges directes sur l'interface.



d) Décharges paratonnerre-sol.



e) Décharges paratonnerre-interface.

Figure IV.21.— Types de décharges observées.

CONCLUSION GENERALE

Notre travail nous a permis d'examiner l'influence qu'aurait la discontinuité du sol sur l'attraction des décharges de foudre descendantes négatives, par un paratonnerre vertical. Dans ce travail, nous avons étudié toutes les configurations possibles suivant la position du paratonnerre sur la partie haute ou basse de la terre discontinue. Les résultats obtenus, nous ont permis d'aboutir aux conclusions suivantes :

- L'influence de la discontinuité de la terre sur les zones d'attraction d'un paratonnerre vertical, dépendrait en premier lieu de la position de l'axe de la décharge par rapport à l'interface et au paratonnerre. Ceci serait dû au champ électrique relativement intense au voisinage de l'interface.
- Pour toutes les configurations étudiées, l'influence de l'interface des deux parties de la terre discontinue sur les zones d'attraction est plus marquée, lorsque le paratonnerre est situé très proche de l'interface. Par contre, lorsque le paratonnerre est très loin, il n'y a pratiquement aucune influence de l'interface.
- Dans le cas où le paratonnerre est situé sur la partie haute de la terre discontinue entre l'axe de la décharge et l'interface, les zones d'attraction sont plus larges que celle définie pour un sol homogène bon conducteur. Cet élargissement dépend de la distance horizontale du paratonnerre par rapport à l'interface. Par contre, lorsque la décharge évolue sur la même partie de la terre dans une zone comprise entre l'interface et le paratonnerre, les zones d'attraction sont plus réduites lorsque ce dernier est très proche de l'interface.

- Dans le cas où le paratonnerre est situé sur la partie basse de la terre discontinue, l'influence de la discontinuité dépend étroitement du rapport h_c/e , h_c étant la hauteur du paratonnerre et e la profondeur de la partie basse de la terre discontinue. Plus ce rapport est petit, plus la zone d'attraction serait réduite, dans le cas où la décharge de foudre évoluerait entre l'interface et le paratonnerre. Dans les autres cas de configuration le modèle électrogéométrique est pratiquement vérifié.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [AGU82] **M. Aguet, M. Ianovici**, "Haute Tension", vol XXII, Edition Georgi, 1982.
- [AND80] **R. B. Anderson, A. J. Eriksson**, "Les paramètres de la foudre en vue des applications industrielles", *Electra* N°69, 1980, pp. 65-101.
- [BEL94] **R. Belaïcha**, "Zones d'attraction d'un paratonnerre vertical dans le cas d'une terre mauvaise conductrice", Thèse de Magister, U.T.O Tizi-Ouzou, 1994.
- [BER94] **G. Berger, C. Gary**, " Considérations sur le concept de distance d'amorçage ", Congrès International "Foudre et Montagne", SEE, Chamonix, France, 1994, pp.163-169.
- [BER74] **K. Berger**, "Champs électriques à proximité des coups de foudre" CIGRE, Rapport 33-20. 1974.
- [BER75] **K. Berger, R. b. Anderson, H. Kroninger**, "Paramètres des coups de foudre", *Electra* N°41, 1975, pp. 23-37.
- [BOU87a] **A. Boubakeur, J. Ferras**, "Décharge de foudre dans les intervalles d'air tige-plan avec terre hétérogène", 8^{ème} Journées Tunisiennes de l'Electrotechnique et de l'Automatique JTEA-87, Rap. N°7, Tunis, Tunisie, 1987.
- [BOU87b] **A. Boubakeur, J. Ferras**, "Negative lightning breakdown of rod-plane air gaps with heterogeneous earth", 5th International Symposium on High Voltage Engineering (5th-ISH), paper 14.26, Braunschweig, Germany, 1987.
- [BOU89] **A. Boubakeur, J. Ferras**, "Negative lightning breakdown of rod conductor air gaps with heterogeneous earth", Middle East Power Systems Conference, MEPCON-89, paper EE05-025, Assiut, Egypt, 1989.
- [BOU90] **A. Boubakeur, A. Atek, S. Chemlal**, "Zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal dans le cas d'une terre hétérogène", 1^{er} colloque sur l'Electrotechnique et l'Automatique, rapport I.6, Alger, 1990.
- [BOU91] **A. Boubakeur**, "Protection contre la foudre dans le cas d'une terre

- hétérogène”, Séminaire sur la Sécurité et la Protection des Installations et des Equipements Electriques, ENSEM-LPEE, Casablanca, Maroc, 1991.
- [BOU92] **A. Boubakeur, A. Mekhaldi**, “Capture zones of a lightning conductor in the case of bad conducting earth”, Middle East Power Systems Conference, MEPCON’92, Assiut, Egypt, 1992, pp. 136-142.
- [BOU93] **A. Boubakeur, R. Belaïcha**, “ Contribution à l’étude d’un modèle électrogéométrique élargi”, 13^{èmes} Journées Tunisiennes de l’Electrotechnique et de l’Automatique JTEA-93, Hammamet, Tunisie, 1993, pp. 136-142.
- [BOU94] **A. Boubakeur, R. Belaïcha**, « Modèle de protection en cas de terre mauvaise conductrice », Congrès International “Foudre et Montagne”, SEE, Chamonix, France, 1994, pp.100-103.
- [BOU95a] **A. Boubakeur, R. Belaïcha**, “Influence of the earth conductivity on negative lightning breakdown of rod-plane air gaps”, 9th Symposium on High Voltage Engineering (ISH95), Vol. S6, paper 6711, Graz, Austria, 1995.
- [BOU95b] **A. Boubakeur, R. Belaïcha**, “Modèle de protection contre la foudre dans le cas d’une terre mauvaise conductrice », AJOT, spéciale issue, Proceeding of 2nd CEA, 1995.
- [BOU95c] **A. Boubakeur, R. Belaïcha, A. Rahmani et R. Boudissa**, “Influence du rayon de courbure sur les zones d’attraction d’un paratonnerre horizontal”, Première Conférence Nationale sur la Haute Tension (CNHT95), Béjaïa, 1995.
- [BOU95d] **R. Boudissa**, “Simulation des décharges d’interception du précurseur de foudre et influence de leur polarité sur la zone d’attraction d’un paratonnerre”, Première Conférence Nationale sur la Haute Tension (CNHT95), Béjaïa, 1995.
- [BOU96] **A. Boubakeur, R. Belaïcha, A. Rahmani, R. Boudissa**, “Influence of earth conductivity on the capture zones of a horizontal lightning conductor”, 23rd International Conference on Lightning Protection (ICLP96), Vol. 1, Firenze, Italy, 1996, pp. 453-456.

- [BOU97] **A. Boubakeur**, "Influence of earth electrogeological properties on lightning protection modelisation », Proceeding of the IEEE'97, Vol.1, N°1- Electrical Engineering, Université de Batna, 1997, pp. 17-21.
- [BOU98a] **A. Boubakeur, S. A. A. Boumaza, R. Belaïcha, R. Boudissa**, "Influence of earth heterogeneity on negative lightning breakdown of rod-plane air gaps", International Conference on Lightning Protection (ICLP98), Birmingham, 1998, pp. 473-477.
- [BOU98b] **S. A. A. Boumaza**, "Amorçage aux choc de foudre des intervalles d'air tige-plan avec terre hétérogène", Thèse de Magister, ENP, Alger, 1998.
- [BOU98c] **R. Boudissa, A. Boubakeur, R. Belaïcha**, "Experimental and theoretical of the influence lightning conductor's from on it's zone of protection", International Conference on Lightning Protection (ICLP98), Birmingham, 1998, pp. 483-487.
- [BOW65] **A. H. Bowker, G. J. Lieberman**, *Méthodes statistiques de l'ingénieur*, Dunod, 1965.
- [CEI60] **C.E.I.60**, "Techniques des essais à haute tension", 1989.
- [DRA98] **G. Dragan, P. Postolache, V. Ramniceanu**, "Determination of lightning rod protection areas using a probabilistic model. Sensitivity of solutions", International Conference on Lightning Protection (ICLP98), Birmingham, 1998, pp. 388-393.
- [DIE96] **G. Diendorfer, W. Hadrian, F. Pigler**, "Discussion of some problems in the application of the rolling sphere method », 23rd International Conference on Lightning Protection (ICLP96), Vol. 1, Firenze, Italy, 1996, pp. 434-439
- [ERI76] **A. J. Eriksson**, "Surtensions de foudre sur les lignes de transport a haute tension : Recherche sur les caractéristiques de forme d'onde" *Electra* N°47, 1976, pp. 87-109.
- [FER87] **J. Ferras**, "Influence des propriétés électro géologiques du sol sur le point d'impact de la décharge de foudre", Thèse de Magister, ENP, Alger, 1987.

- [FOF96] **I. Fofana**, “Modélisation de la décharge positive dans les grandes intervalles d’air”, Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 1996.
- [JOH87] **P. Johannet**, “Modélisation opérationnelle du canal de foudre”, EDF Bull. D.E.R, série B, Réseaux Électriques, Matériels Electriques N°2, 1987, pp. 59-72.
- [GAR89a] **C. Gary**, “La foudre et les phénomènes orageux”, RGE N°03, Mars 1989, pp 3-9.
- [GAR89b] **C. Gary, B. Hutzler**, “Simulation en laboratoire de l’impact au sol”, RGE N°03, Mars 1989, pp 18-24.
- [GAR94] **C. Gary**, La foudre : Des méthodologies antiques à la recherche moderne, Masson, 1994.
- [GOL77] **R.H. Golde**, “Lightning” Vol. II. Academic Press, London, 1977.
- [HUT88] **B. Hutzler**, “Simulation de la foudre en laboratoire”, EDF Bull. D.E.R, série B, Réseaux Électriques, Matériels Electriques N°3, 1988, pp. 31-40.
- [HUT89] **B. Hutzler**, “L’étincelle de laboratoire un moyen d’étude de la foudre”, RGE N°03, Mars 1989, pp 12-17.
- [LER84] **G. LeRoy, C. Gary, B. Hutzler, J. Hamelin, J. Fontaine**, Les propriétés diélectriques de l’air et les très hautes tensions, Editions Eyrolles, 1984.
- [LOW98] **J. J. Lowke**, “A theory of the speed leader in lightning”, International Conference on Lightning Protection (ICLP98), Birmingham, 1998, pp. 72-77.
- [KIN78] **D. Kind**, High voltage experimental technique : Text book for Electrical Engineers, Friedr.Vieweg & Sohn, 1978.
- [KIN85] **D. Kind, H. Kärner**. High voltage insulation technology : Text book for Electrical Engineers, Friedr.Vieweg & Sohn, 1985.
- [KUF84] **E. Kuffel, W. S. Zaengl**, High-Voltage Engineering, Pergamon Press, 1984.
- [NAC91] **K. Naccreddine, A. Boubakeur**, “Simulation numérique de la foudre : le programme PROC.2D”, Colloque Maghrébin sur les Modèles Numériques de l’Ingénieur, Tunis, 1991.

- [NAC92] **K. Nacereddine**, "Protection contre la foudre sur un sol hétérogène : Simulation numérique", Thèse de Magister, ENP, Alger, 1992.
- [NAC93] **K. Nacereddine, A. Boubakeur**, "Influence de la permittivité relative du sol sur l'attraction des décharges de foudre", Colloque Maghrébin sur les Modèles Numériques de l'Ingénieur, Alger, 1993.
- [NAS71] **E. Nasser**, fundamentals of gaseous ionisation and plasma electronics, Wiley-Interscience, 1971.
- [NFC87] **NFC17-100**, "Protection contre la foudre, règles d'installation des paratonnerres", Paris, 1987.
- [PET94] **N. I. Petrov, R. T. Waters**, "Altitude et hauteur du conducteur : effets sur la distance d'amorçage", Congrès International "Foudre et Montagne", SEE, Chamonix, France, 1994, pp.52-57.
- [PHI94] **E. Philip Krider**, "Physics of lightning today", Congrès International "Foudre et Montagne", SEE, Chamonix, France, 1994, pp.127-130.
- [RAH96] **A. Rahmani**, "Détermination des zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal dans le cas d'une terre mauvaise conductrice », thèse de Magister, C.U. Béjaïa, 1996.
- [ROU93] **A. Rousseau, C. Gary, G. Berger**, "Foudre et protection contre le foudre", Techniques de l'ingénieur, Fascicule C. 3307, Janvier 1994.
- [XEM94] **Xemard, A. Sabot, P. Lalande, M. Nguyen**, "Modèles électro géométriques utilisés en électrotechnique : comparaison et utilisation par EDF", Congrès International "Foudre et Montagne", SEE, Chamonix, France 1994, pp.262-287.

ANNEXE I

I. Vérification du modèle électrogéométrique

h/hc	1	2	3	4
$(d/hc)_{mcg90\%}$	1.25	2.25	2.85	3.50
$(d/hc)_{mcg100\%}$	1.07	1.75	2.30	2.65

Tableau IV.1

II. Zones d'attraction d'un paratonnerre vertical dans le cas d'une terre discontinue

II.1 Paratonnerre situé sur la partie haute de la terre discontinue entre l'interface et l'axe de la tige

II.1.1 D/hc=12 :

h/hc	1	2	3	4
d/hc	1.27	2.35	3.00	3.45
e'/hc	0.27	0.55	0.60	0.57
$(e'/hc)_{moy}$	0.48			

Tableau IV.2

II.1.2 D/hc=8 :

h/hc	2	2.5	3	4
d/hc	2.6	2.75	3.15	3.75
e'/hc	0.78	0.63	0.73	0.80
$(e'/hc)_{moy}$	0.73			

Tableau IV.3

II.1.3 $D/hc=6$:

h/hc	1	2	2.5	3	4
d/hc	1.73	2.60	2.78	3.25	3.85
e'/hc	0.73	0.78	0.66	0.82	0.88
$(e'/hc)_{moy}$	0.77				

Tableau IV.4

II.1.4 $D/hc=4$:

h/hc	1	2	3	4
d/hc	1.72	2.70	3.25	3.80
e'/hc	0.72	0.88	0.82	0.84
$(e'/hc)_{moy}$	0.82			

Tableau IV.5

II.1.5 $D/hc=2$:

h/hc	1	1.5	2	3	4
d/hc	1.85	2.45	2.70	3.35	3.90
e'/hc	0.85	1.00	0.88	0.90	0.92
$(e'/hc)_{moy}$	0.91				

Tableau IV.6

II.2 Paratonnerre sur la partie haute de la terre discontinue, et l'axe de la tige situé entre l'interface et le paratonnerre

II.2.1 $D/hc=12$:

h/hc	2	3	4
d/hc	2.25	3.00	3.50

Tableau IV.7

II.2.2 $D/hc=8$:

h/hc	1	1.5	2	2.5	3	4
d/hc	1.43	1.92	2.20	2.75	3.00	3.40

Tableau IV.8

II.2.3 $D/hc=6$:

h/hc	1	1.5	2	2.5	3	4
d/hc	1.37	1.92	2.15	2.67	2.95	3.50

Tableau IV.9

II.2.4 $D/hc=4$:

h/hc	1	1.5	2	2.5	3	4
d/hc	1.28	1.86	2.10	2.50	2.80	3.35

Tableau IV.10

II.3 Paratonnerre sur la partie basse de la terre discontinue et l'axe de la décharge situé entre l'interface et le paratonnerre

II.3.1 $hc/e=0.4$:

	$D/hc=6$			$D/hc=10$			
h/hc	1.00	2.00	3.00	1.00	2.00	3.00	3.50
d/hc	1.27	2.20	2.77	1.30	2.27	2.85	3.15

Tableau IV.11

II.3.2 $hc/e=0.8$:

	$D/hc=4$			$D/hc=6$			$D/hc=10$		
h/hc	1.00	1.50	2.00	1.00	2.00	3.00	1.00	2.00	3.00
d/hc	1.27	1.77	1.97	1.30	2.22	2.85	1.30	2.27	2.87

Tableau IV.12

II.3.3 $hc/e=1.2$:

	D/hc=4			D/hc=6			D/hc=10		
h/hc	1.00	1.50	2.00	1.00	2.00	2.50	1.00	2.00	2.50
d/hc	1.30	1.75	2.15	1.37	2.20	2.58	1.38	2.25	2.58

Tableau IV.13

II.3.4 $hc/e=1.6$:

	D/hc=4			D/hc=6			D/hc=10		
h/hc	1.00	1.50	2.00	1.00	1.50	2.00	1.00	1.50	2.00
d/hc	1.37	1.80	2.22	1.40	1.87	2.19	1.43	1.86	2.25

Tableau IV.14

II.4 Paratonnerre situé sur la partie basse de la terre discontinue entre l'axe de la décharge et l'interface

II.4.1 $hc/e=0.4$:

	D/hc=2			D/hc=6			D/hc=10		
h/hc	1.00	2.00	3.00	1.00	2.00	3.00	1.00	2.00	3.00
d/hc	1.32	2.31	2.90	1.31	2.27	2.85	1.25	2.27	2.83
e'/hc	0.32	0.52	0.52	0.31	0.48	0.48	0.25	0.48	0.47
$(e'/hc)_{moy}$	0.45			0.42			0.41		

Tableau IV.15

II.4.2 $hc/e=0.8$:

	D/hc=2			D/hc=6			D/hc=10		
h/hc	1.00	2.00	3.00	1.00	2.00	3.00	1.00	2.00	3.00
d/hc	1.30	2.30	2.88	1.27	2.25	2.87	1.27	2.25	2.85
e'/hc	0.30	0.51	0.51	0.27	0.46	0.50	0.27	0.46	0.48
$(e'/hc)_{moy}$	0.44			0.41			0.40		

Tableau IV.16

II.4.3 $hc/e=1.2$:

	D/hc=2			D/hc=6			D/hc=10		
h/hc	1.00	1.50	2.00	1.00	1.50	2.00	1.00	1.50	2.00
d/hc	1.38	1.85	2.20	1.41	1.83	2.20	1.37	1.85	2.22
e'/hc	0.38	0.42	0.42	0.41	0.40	0.42	0.37	0.41	0.43
(e'/hc) _{moy}	0.406			0.409			0.406		

Tableau IV.17

II.4.4 $hc/e=1.6$:

	D/hc=2			D/hc=6			D/hc=10		
h/hc	1.00	1.50	2.00	1.00	1.50	2.00	1.00	1.50	2.00
d/hc	1.37	1.79	2.19	1.39	1.84	2.20	1.40	1.80	2.23
e'/hc	0.37	0.36	0.41	0.39	0.41	0.42	0.40	0.37	0.44
(e'/hc) _{moy}	0.379			0.407			0.405		

Tableau IV.18

ANNEXE II

A.1 Détermination des tensions disruptives $U_{100\%}$

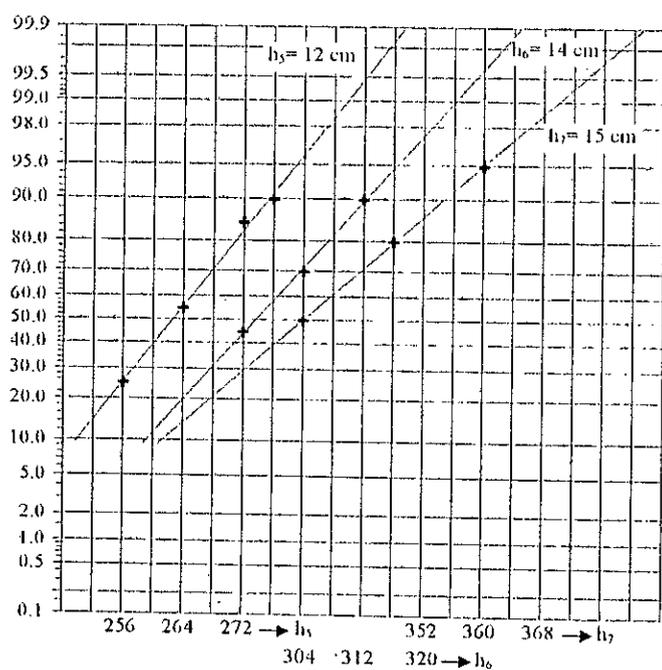
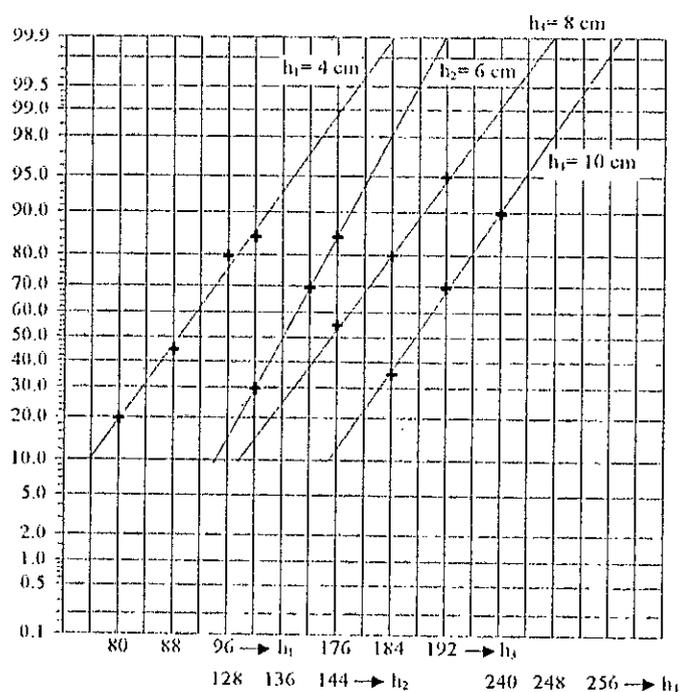
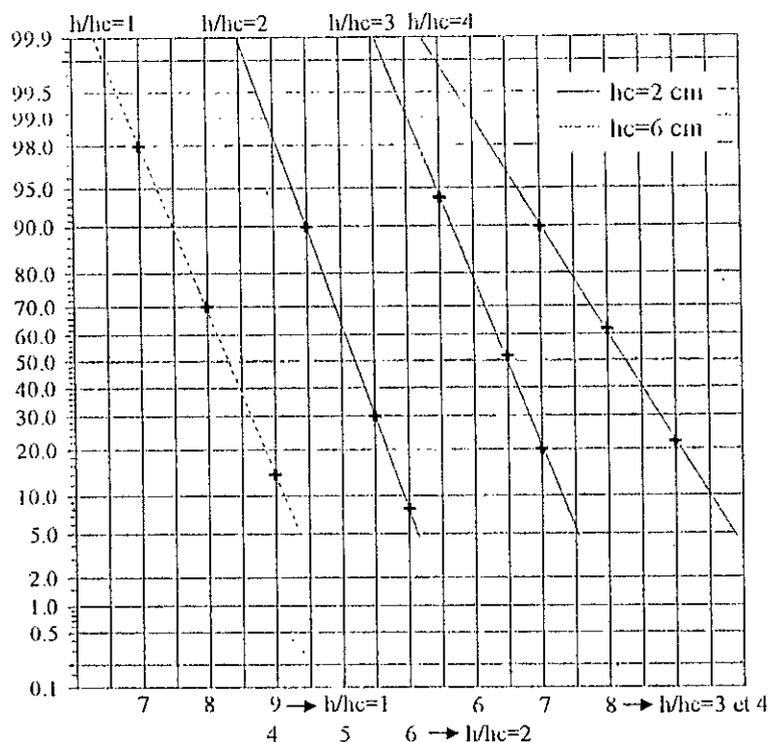
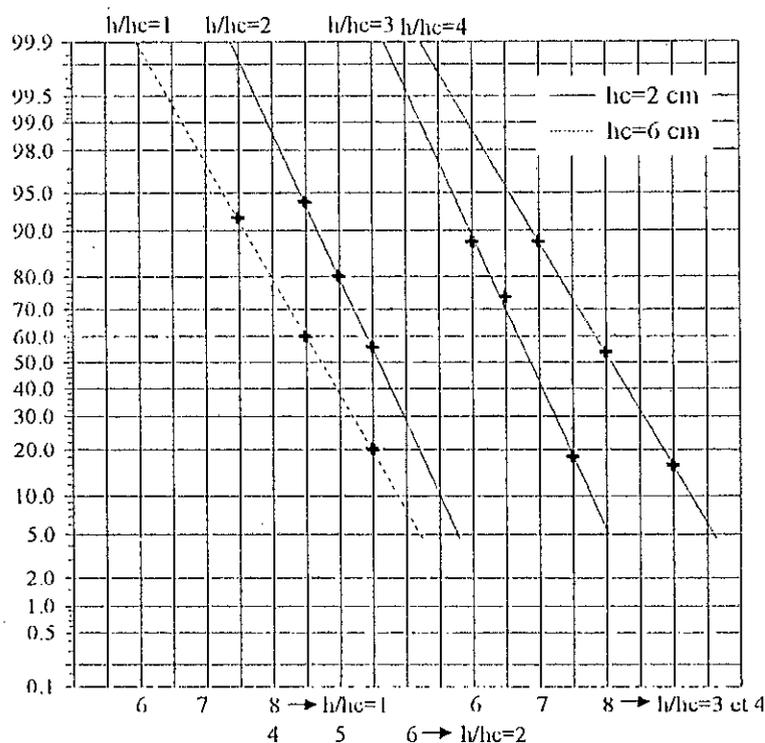


Figure A.1.— Détermination des tensions disruptives $U_{100\%}$ pour différentes longueurs de l'intervalle h .

A.II Vérification du Modèle électrogéométrique

Figure A.2.— Détermination de $d_{90\%}$ pour un sol homogène parfaitement conducteur.A.III Détermination de $d_{90\%}$ pour les différentes configurations étudiées

A.III.1 Paratonnerre situé sur la partie haute de la terre discontinuée entre l'interface et l'axe de la tige

Figure A.3.— Détermination de $d_{90\%}$ pour $D/hc=12$.

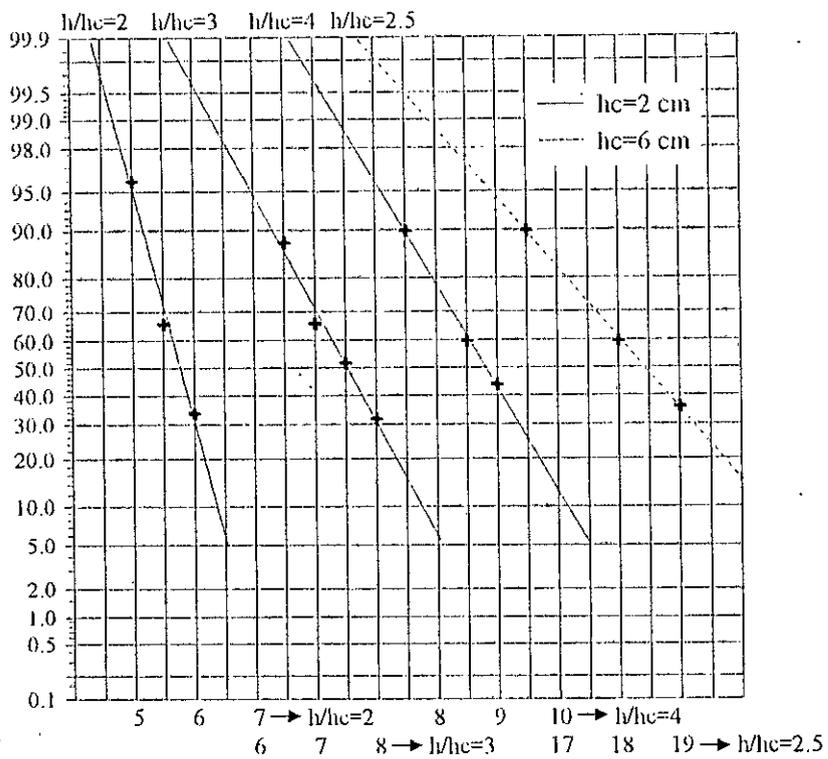


Figure A.4.- Détermination de $d_{90\%}$ pour $D/hc=8$.

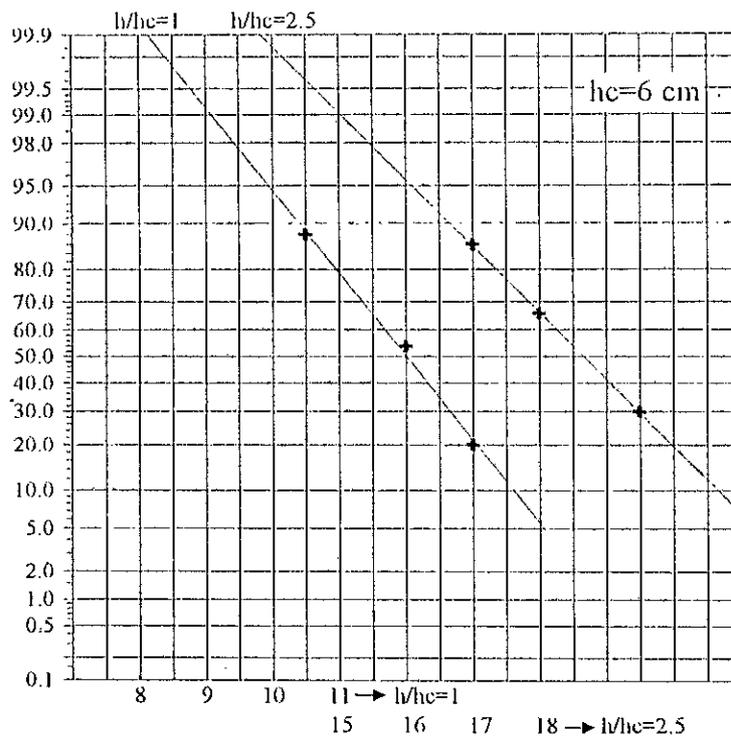
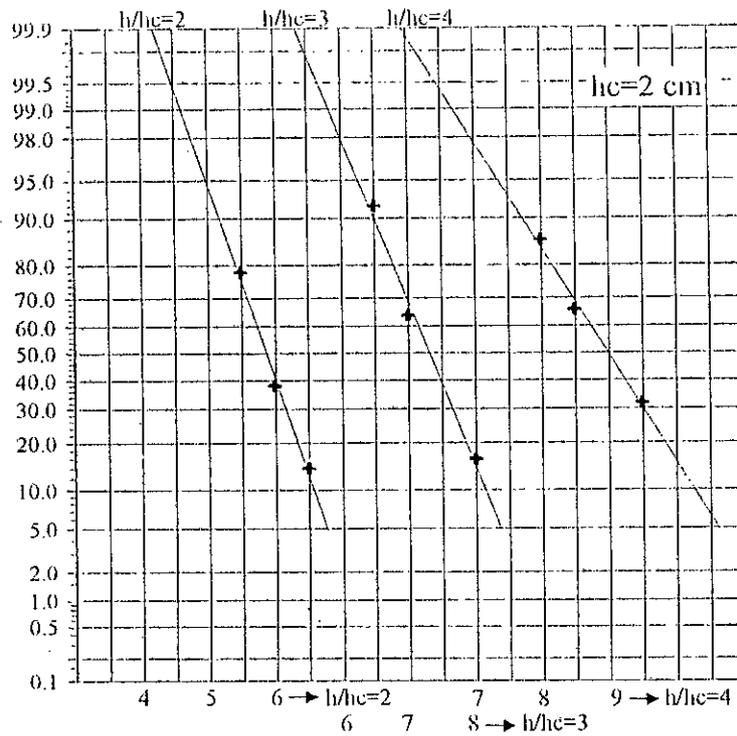


Figure A.5.- Détermination de $d_{90\%}$ pour $D/hc=6$.

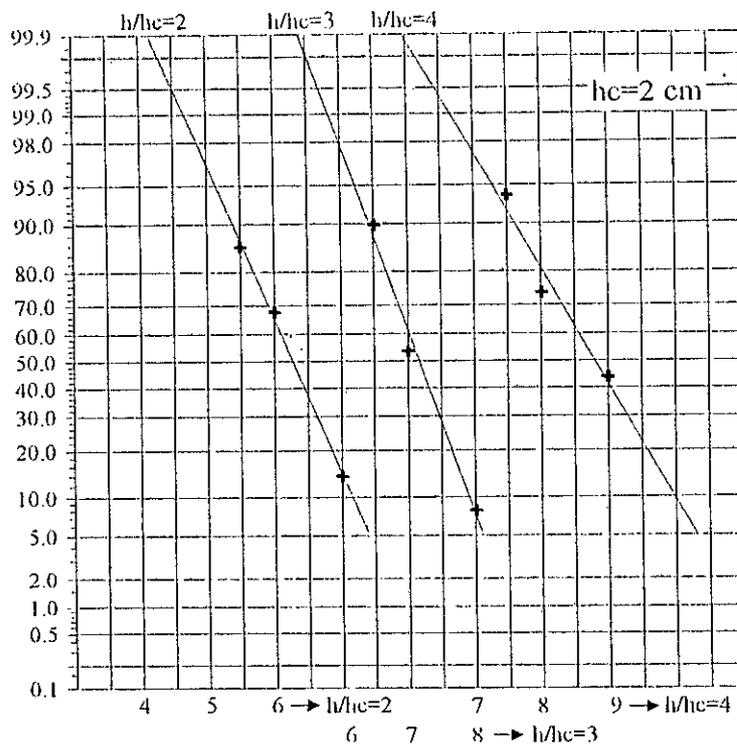


Figure A.6.-- Détermination de $d_{90\%}$ pour $D/hc=4$.

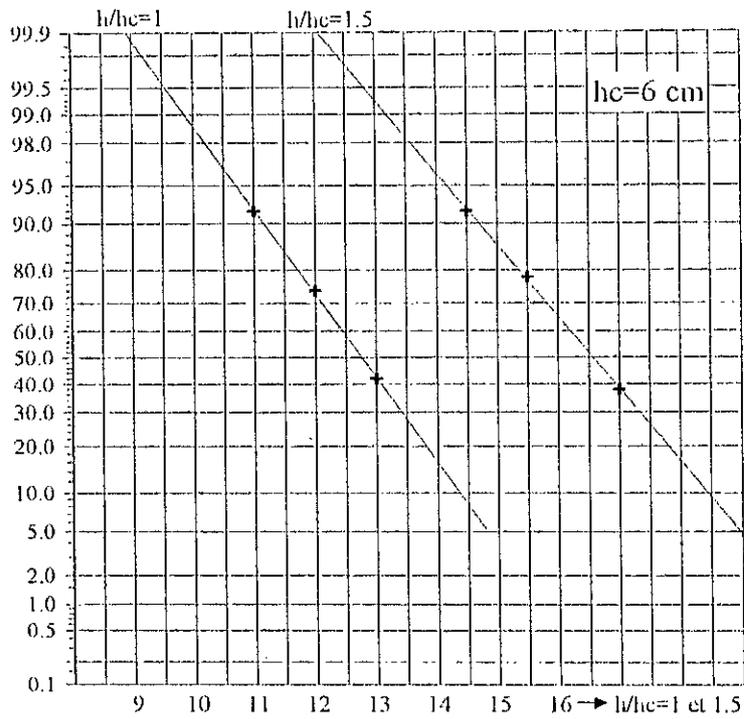
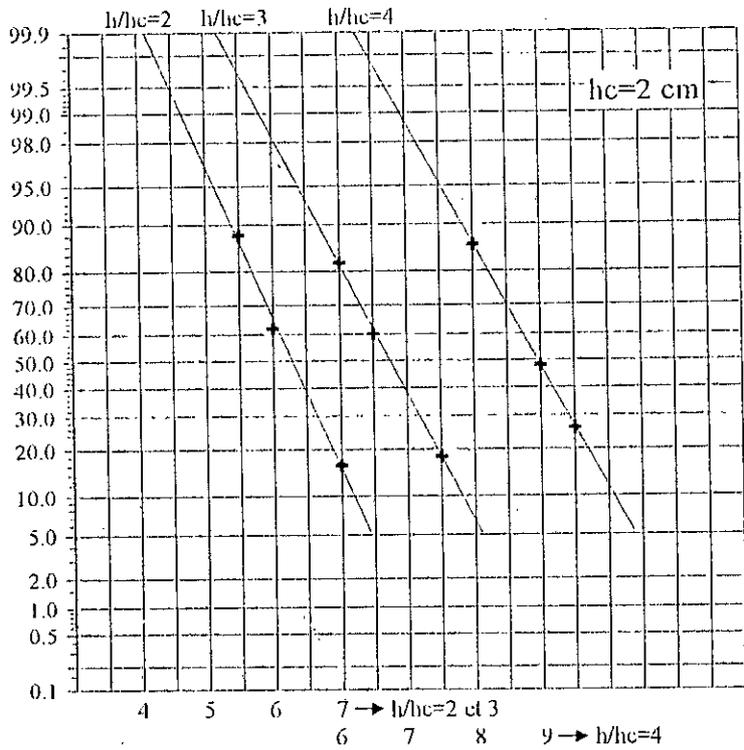


Figure A.7.- Détermination de $d_{90\%}$ pour $D/hc=2$.

A.III.2 Paratonnerre situé sur la partie haute de la terre discontinue, et l'axe de la tige situé entre l'interface et le paratonnerre

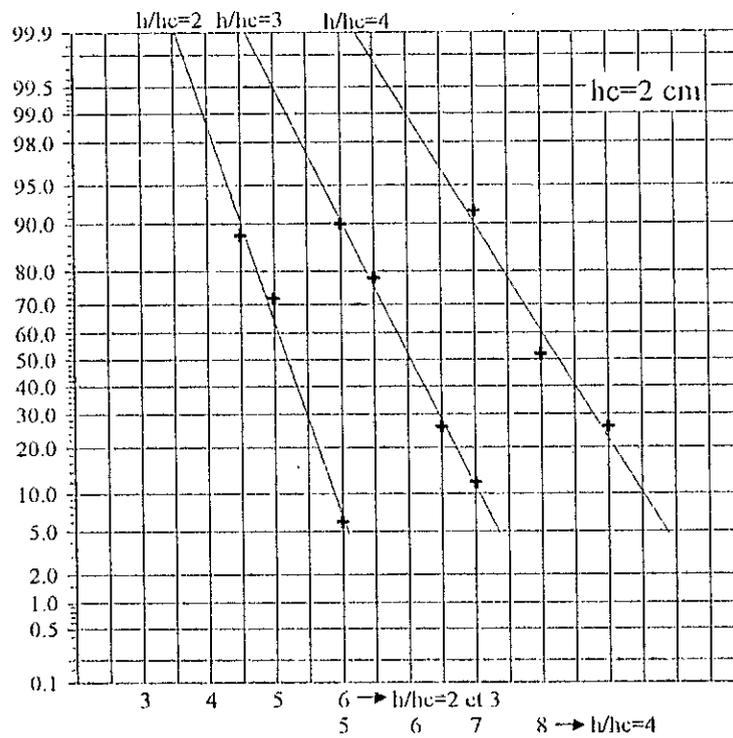


Figure A.8.— Détermination de $d_{90\%}$ pour $D/hc=12$.

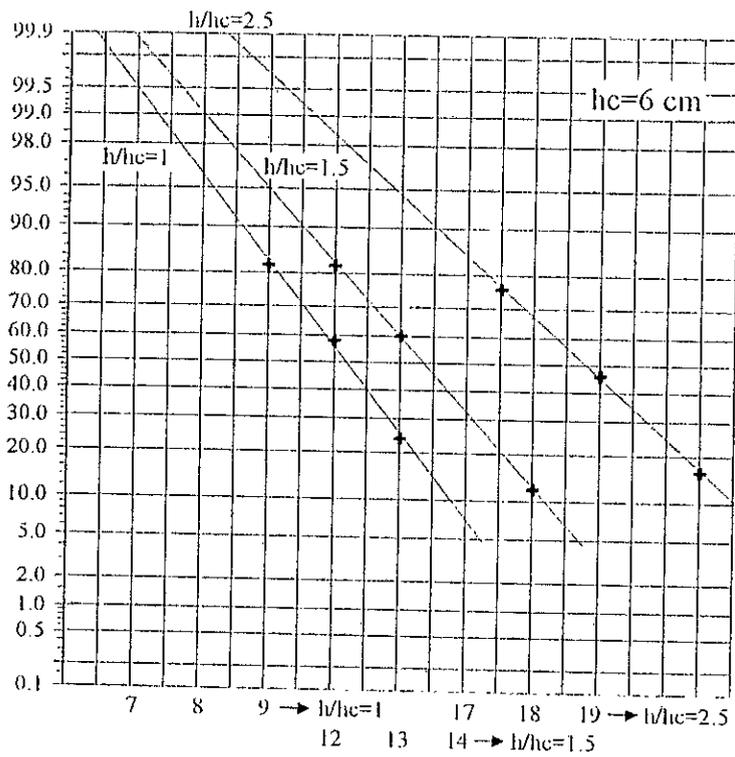
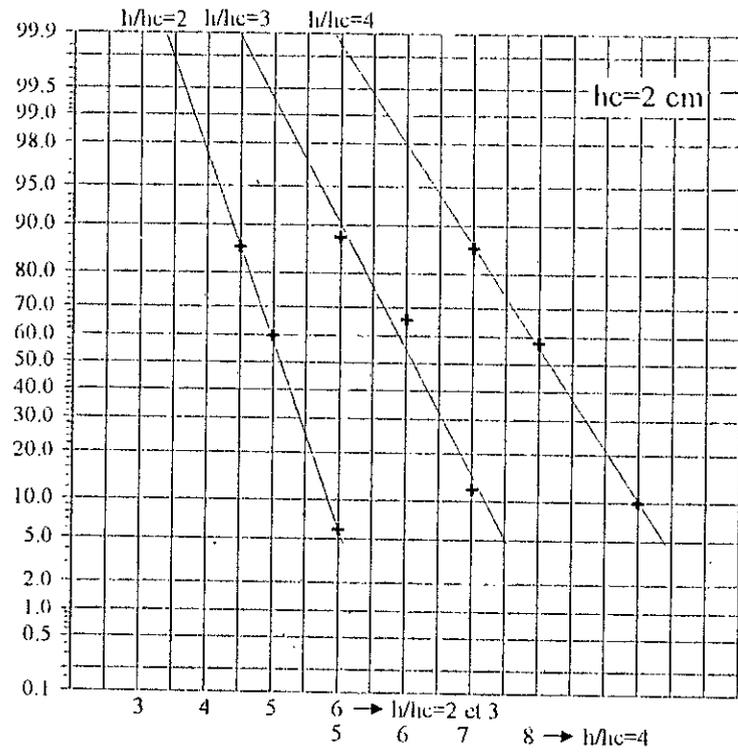
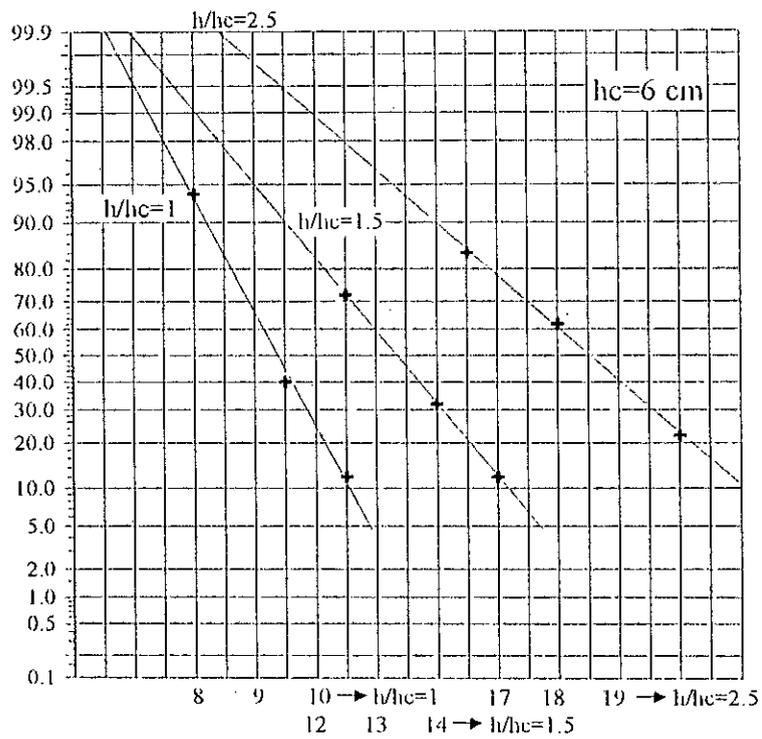
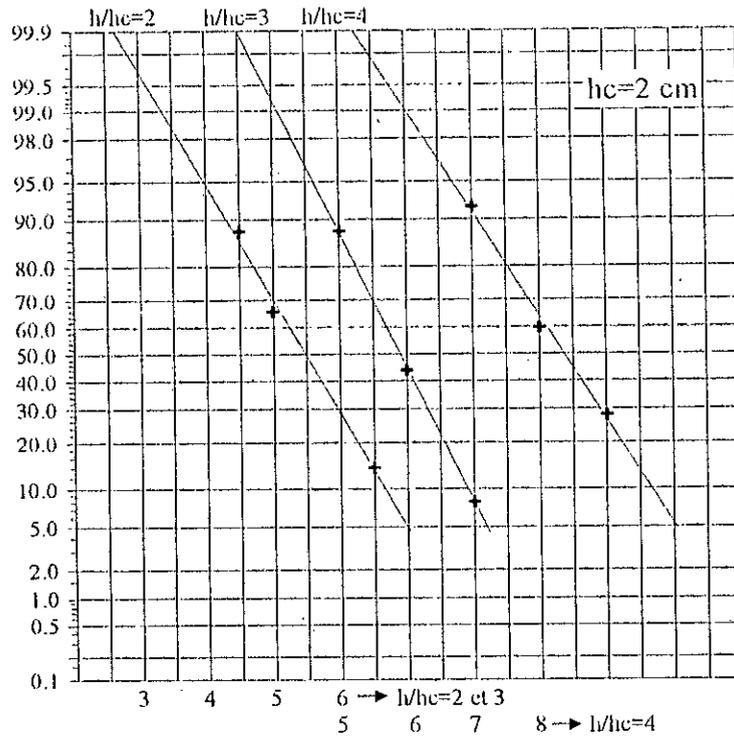
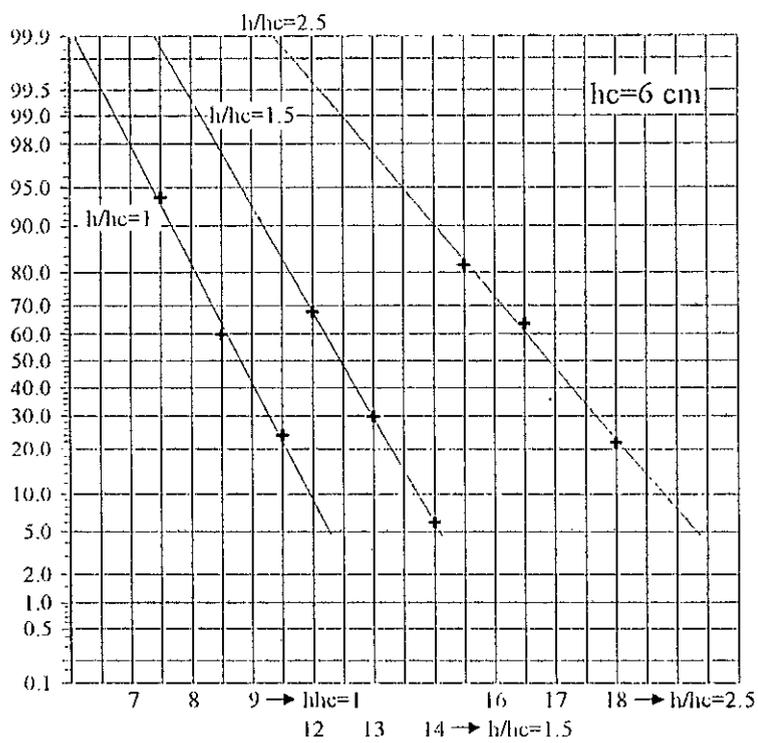
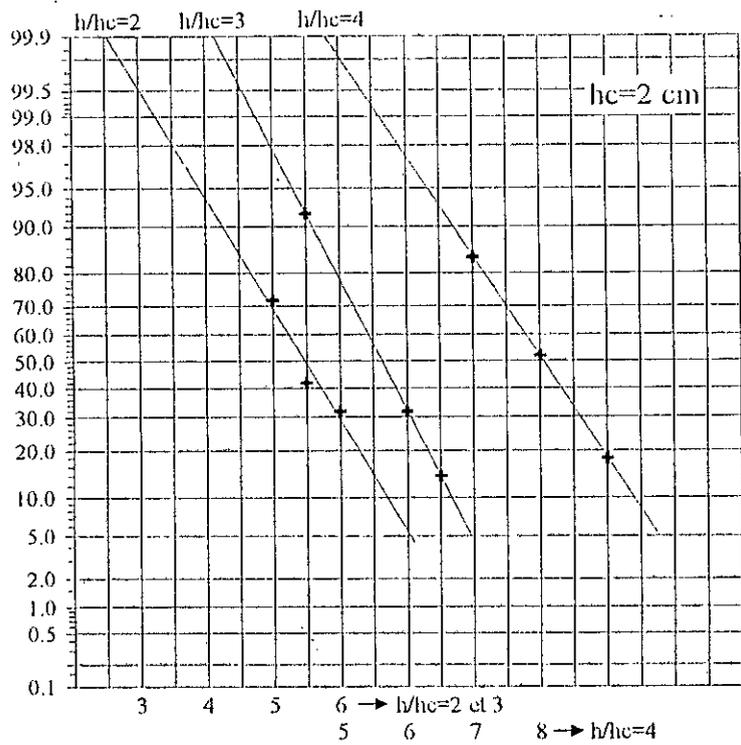


Figure A.9.—Détermination de $d_{90\%}$ pour $D/hc=8$.

Figure A.10.- Détermination de $d_{90\%}$ pour $D/hc=6$.

Figure A.11.— Détermination de $d_{90\%}$ pour $D/hc=4$.

A.III.3 Paratonnerre situé sur la partie basse de la terre discontinue, et l'axe de la décharge situé entre l'interface et le paratonnerre

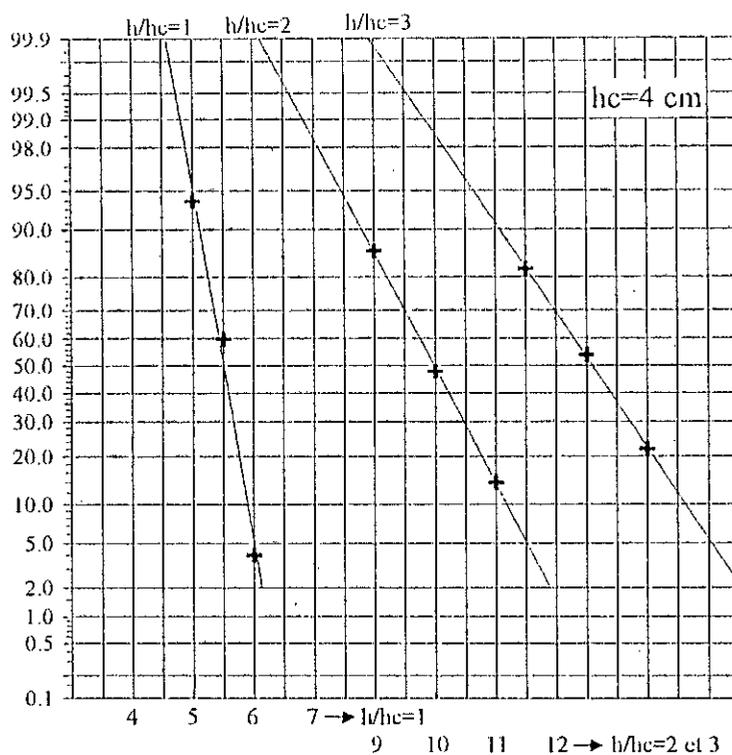


Figure A.12.- Détermination de $d_{90\%}$ pour $hc/e=0.4$ et $D/hc=6$.

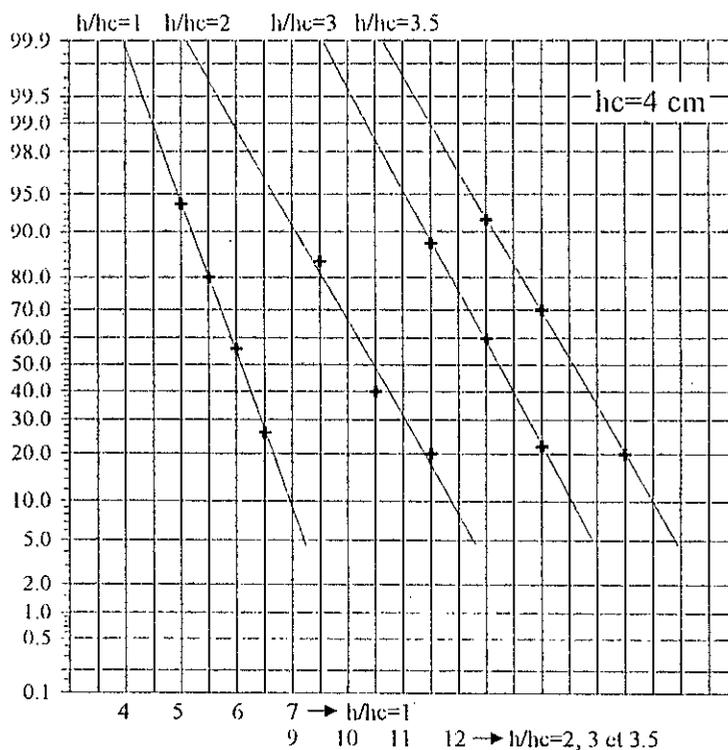


Figure A.13.- Détermination de $d_{90\%}$ pour $hc/e=0.4$ et $D/hc=10$.

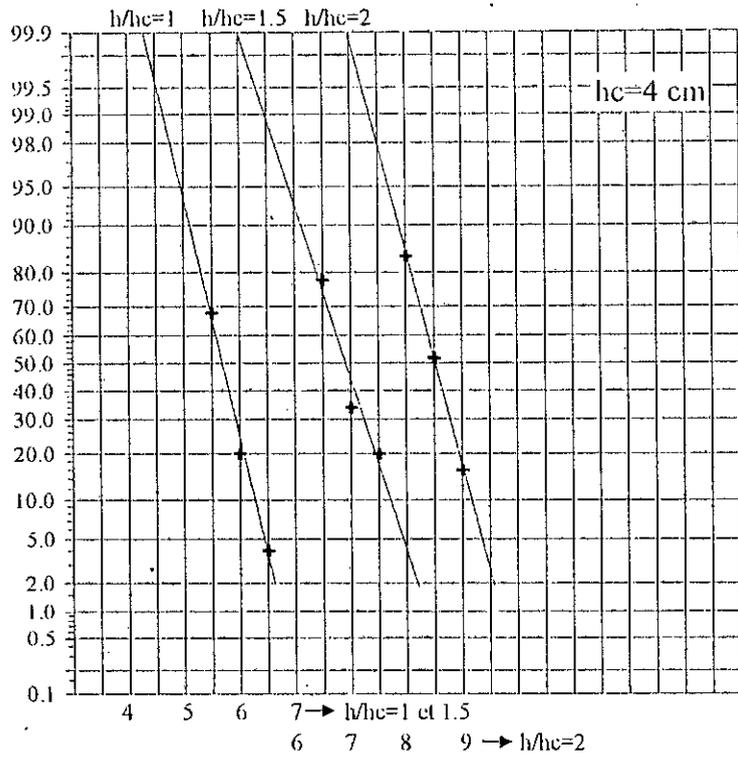


Figure A.14.- Détermination de $d_{90\%}$ pour $hc/e=0.8$ et $D/hc=4$.

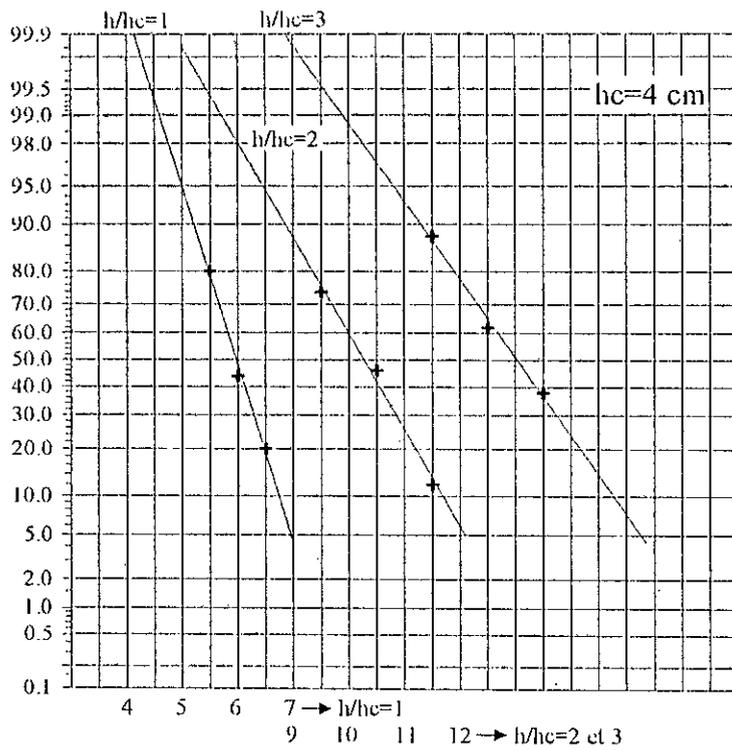


Figure A.15.- Détermination de $d_{90\%}$ pour $hc/e=0.8$ et $D/hc=6$.

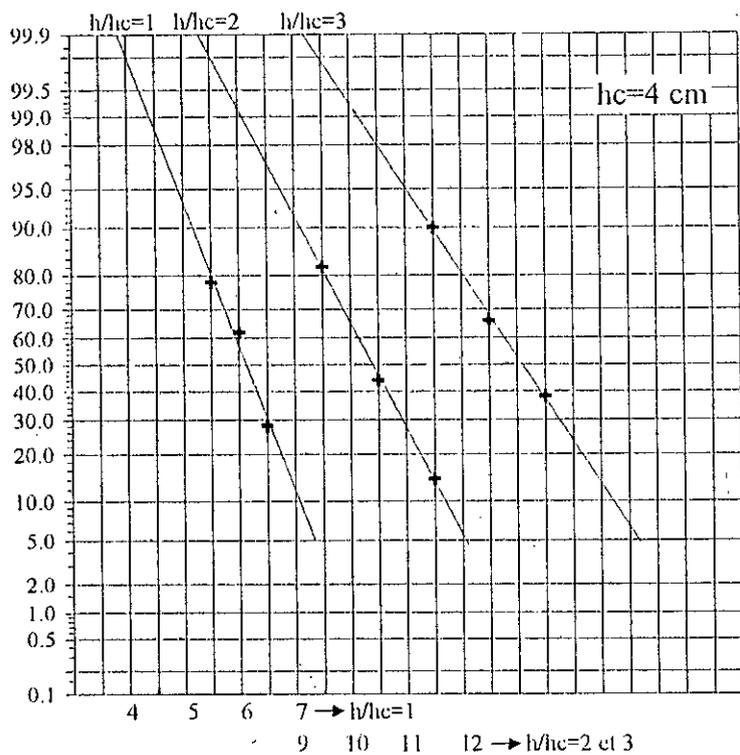


Figure A.16.-- Détermination de $d_{90\%}$ pour $hc/e=0.8$ et $D/hc=10$.

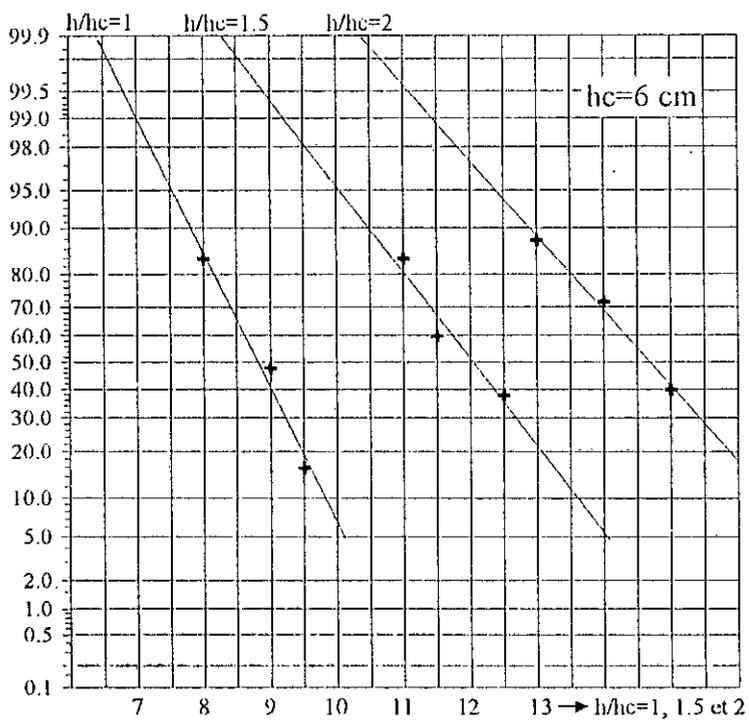


Figure A.17.-- Détermination de $d_{90\%}$ pour $hc/e=1.2$ et $D/hc=4$.

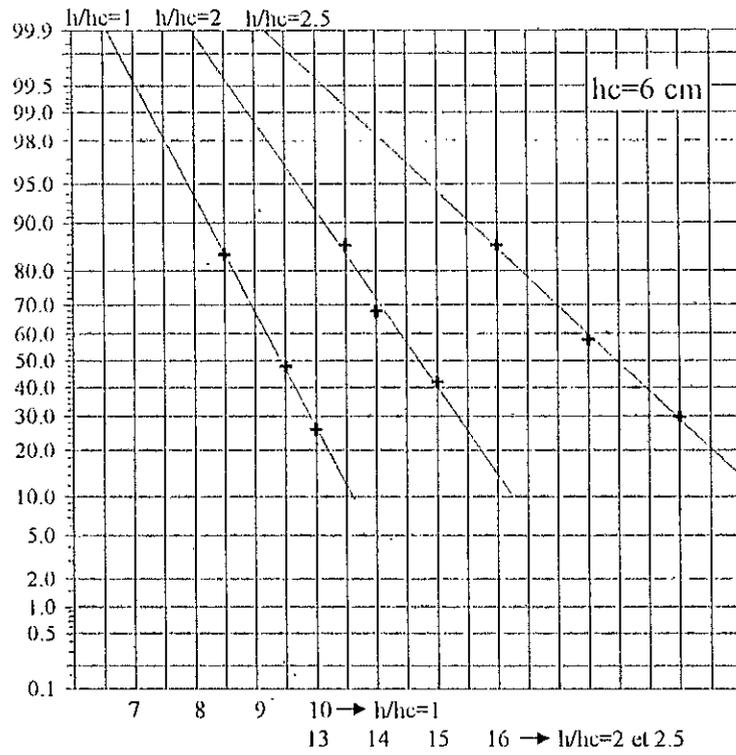


Figure A.18.— Détermination de $d_{90\%}$ pour $hc/e=1.2$ et $D/hc=6$.

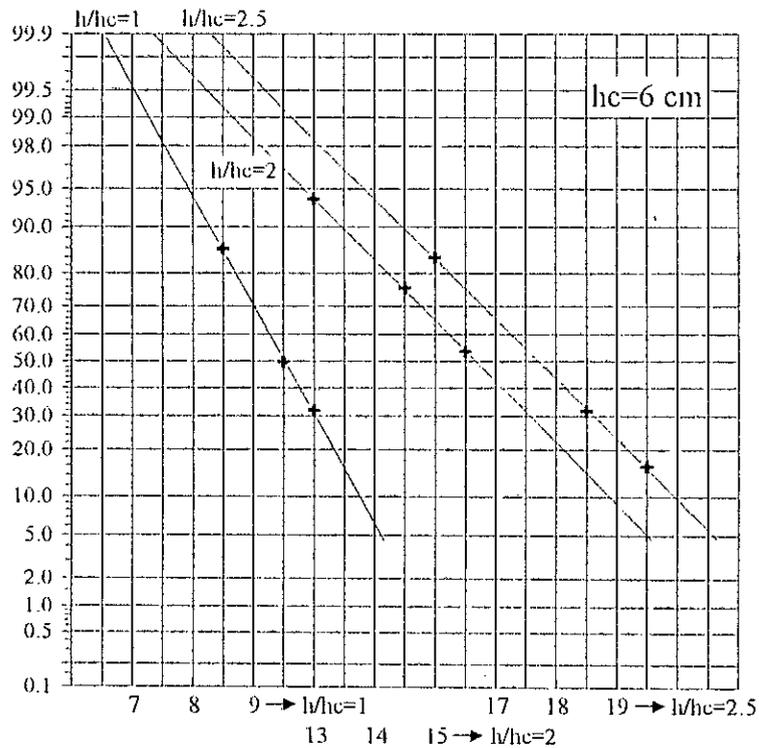


Figure A.19.— Détermination de $d_{90\%}$ pour $hc/e=1.2$ et $D/hc=10$.

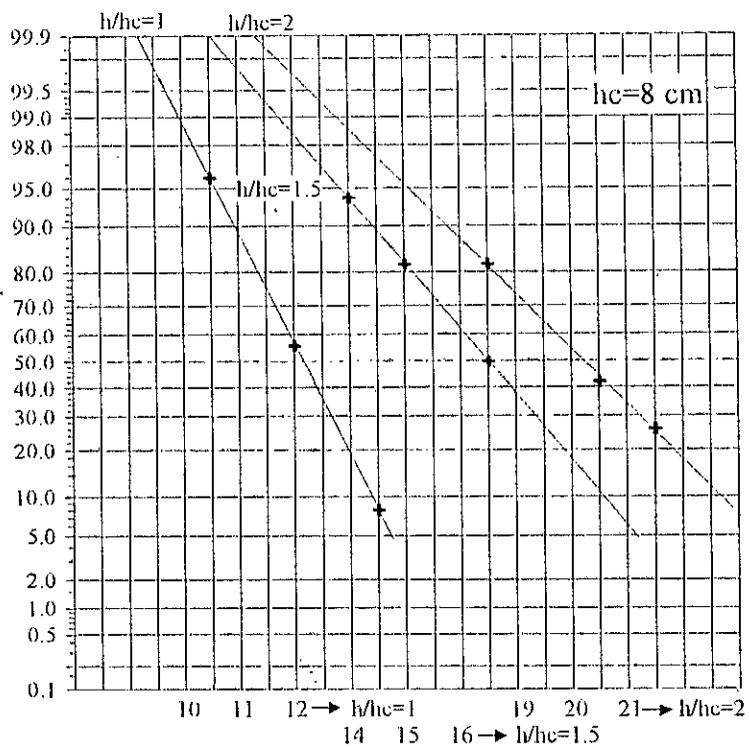


Figure A.20.- Détermination de $d_{90\%}$ pour $hc/e=1.6$ et $D/hc=4$.

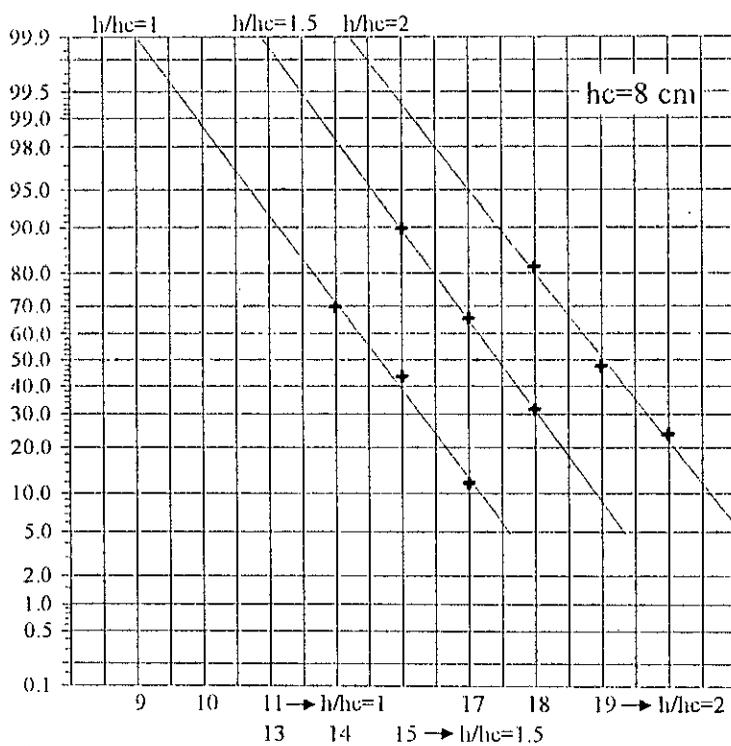


Figure A.21.- Détermination de $d_{90\%}$ pour $hc/e=1.6$ et $D/hc=6$.

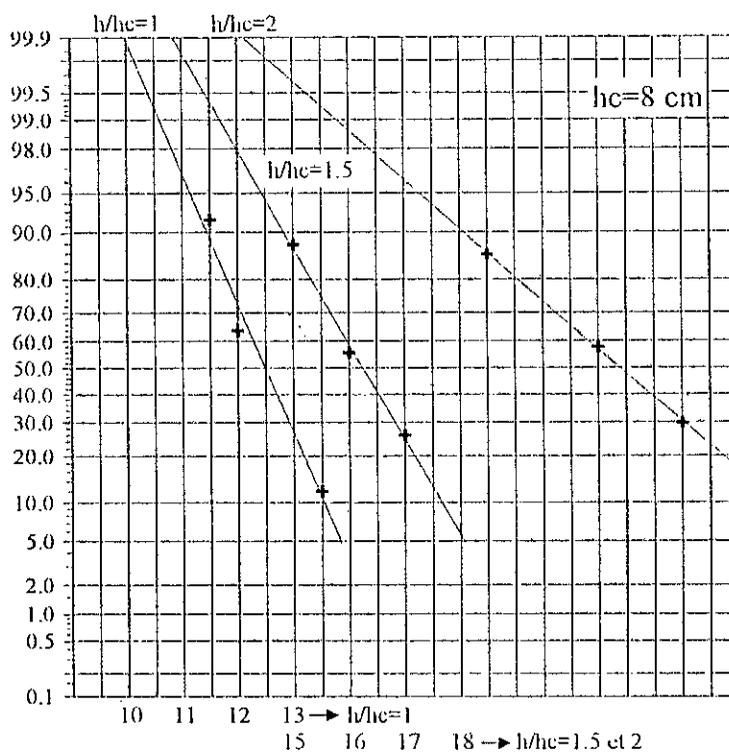


Figure A.22.— Détermination de $d_{90\%}$ pour $hc/e=1.6$ et $D/hc=10$.

A.III.4 Paratonnerre situé sur la partie basse de la terre discontinuée entre l'axe de la décharge et l'interface

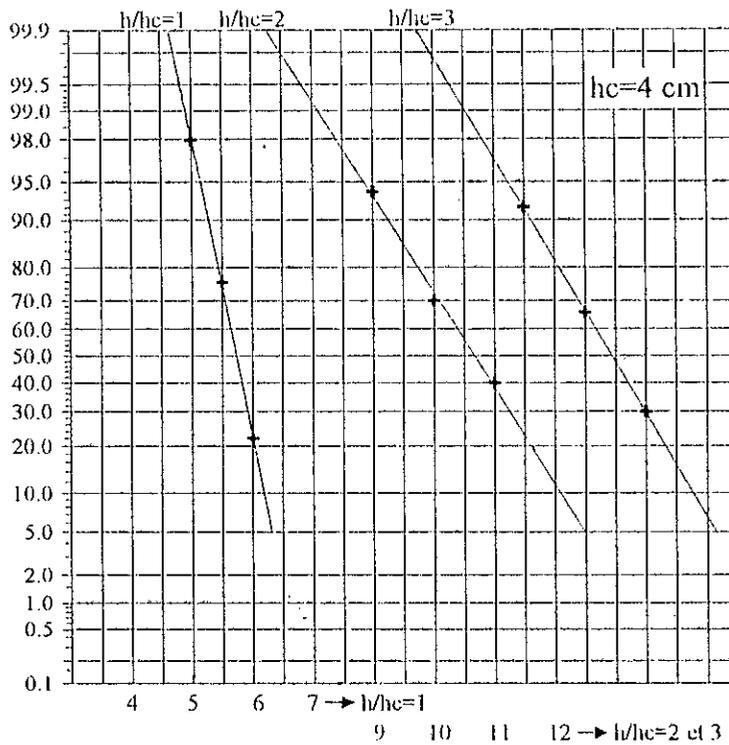


Figure A.23.- Détermination de $d_{90\%}$ pour $hc/e=0.4$ et $D/hc=2$.

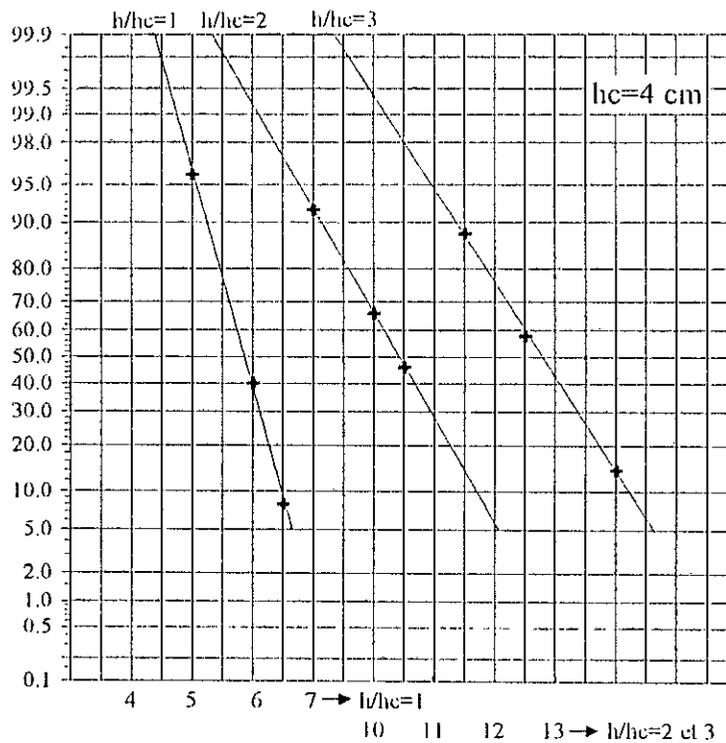


Figure A.24.- Détermination de $d_{90\%}$ pour $hc/e=0.4$ et $D/hc=6$.

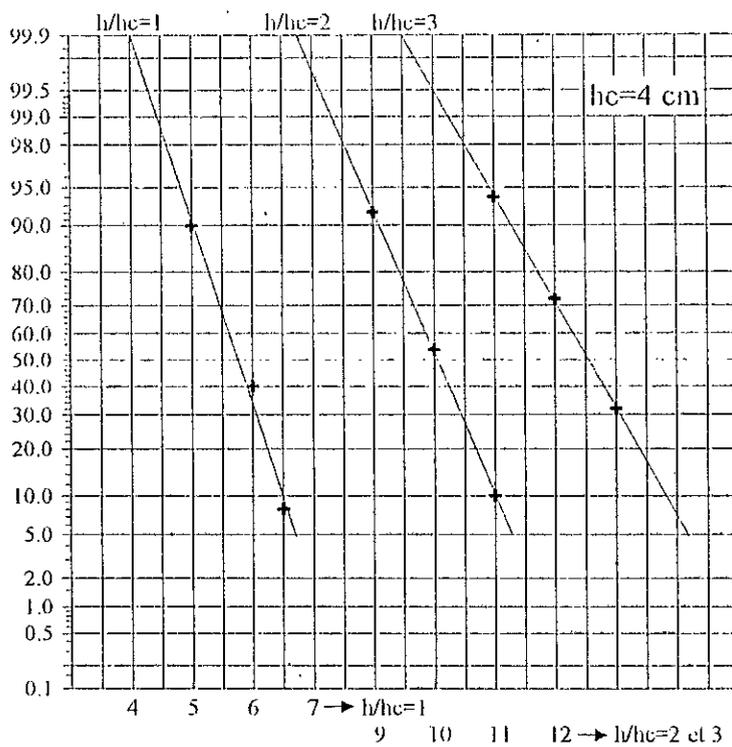


Figure A.25.— Détermination de $d_{90\%}$ pour $hc/e=0.4$ et $D/hc=10$.

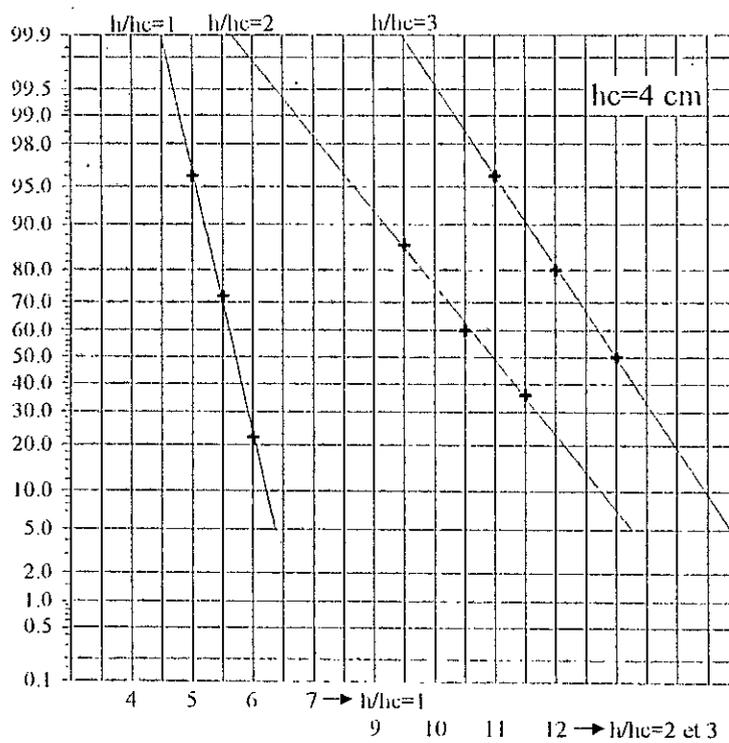


Figure A.26.— Détermination de $d_{90\%}$ pour $hc/e=0.8$ et $D/hc=2$.

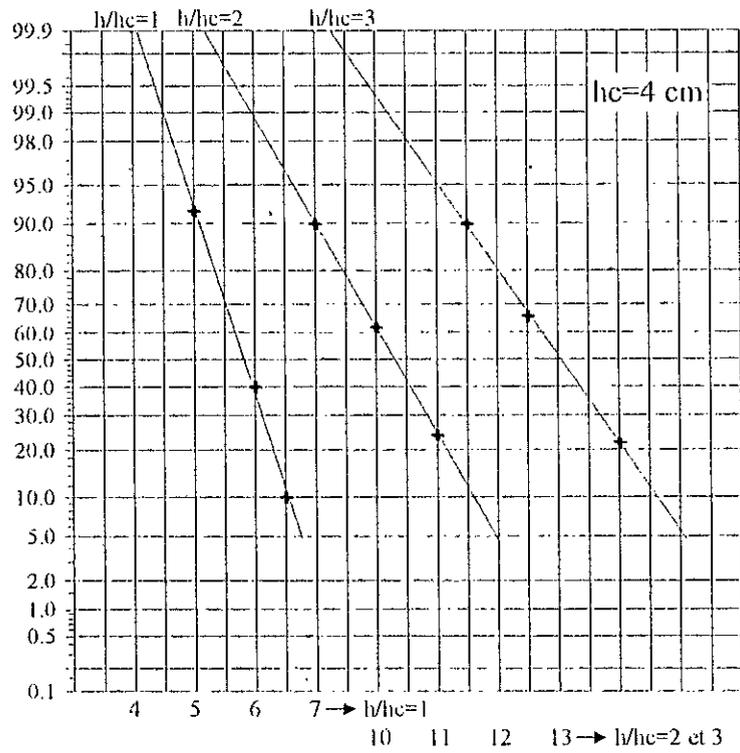


Figure A.27.- Détermination de $d_{90\%}$ pour $hc/e=0.8$ et $D/hc=6$.

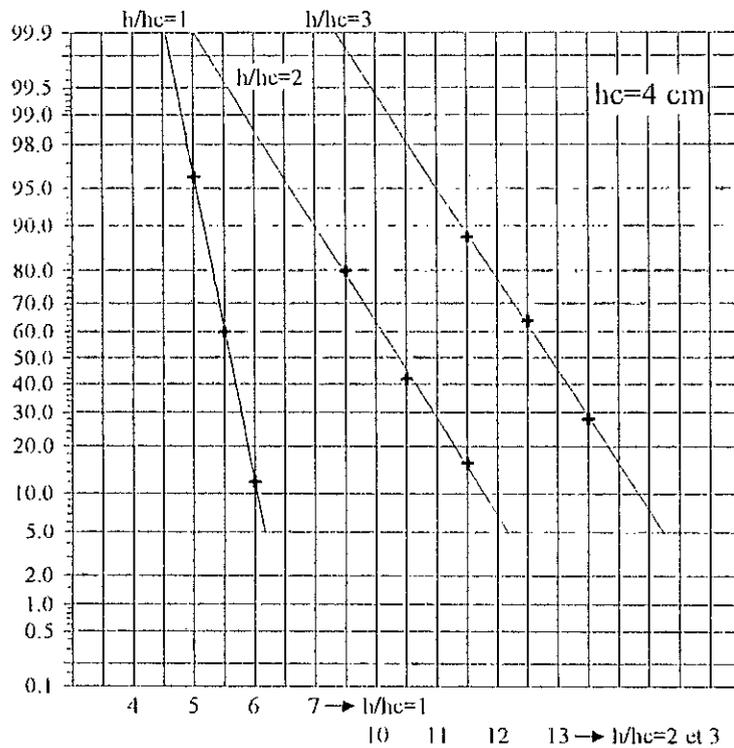


Figure A.28.- Détermination de $d_{90\%}$ pour $hc/e=0.8$ et $D/hc=10$.

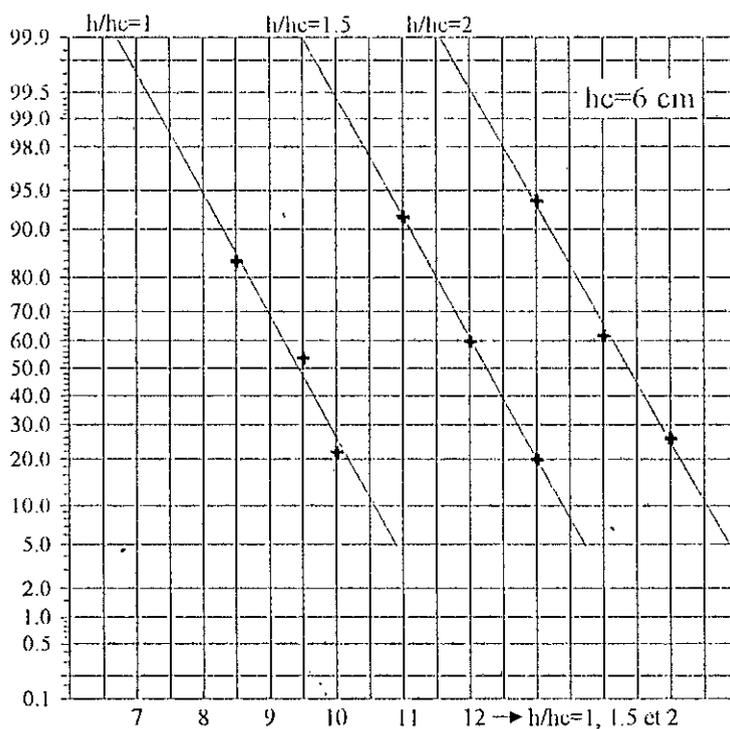


Figure A.29.- Détermination de $d_{90\%}$ pour $hc/e=1.2$ et $D/hc=2$.

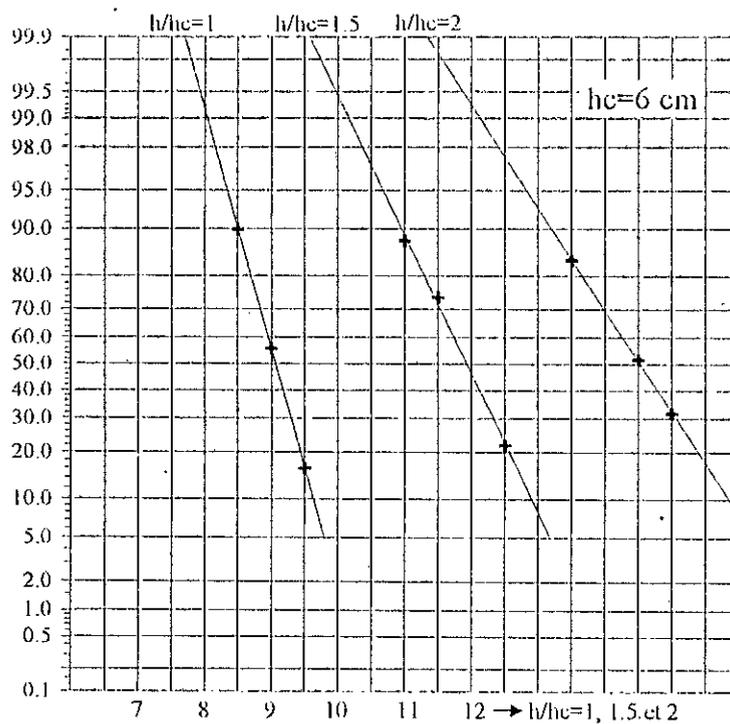


Figure A.30.- Détermination de $d_{90\%}$ pour $hc/e=1.2$ et $D/hc=6$.

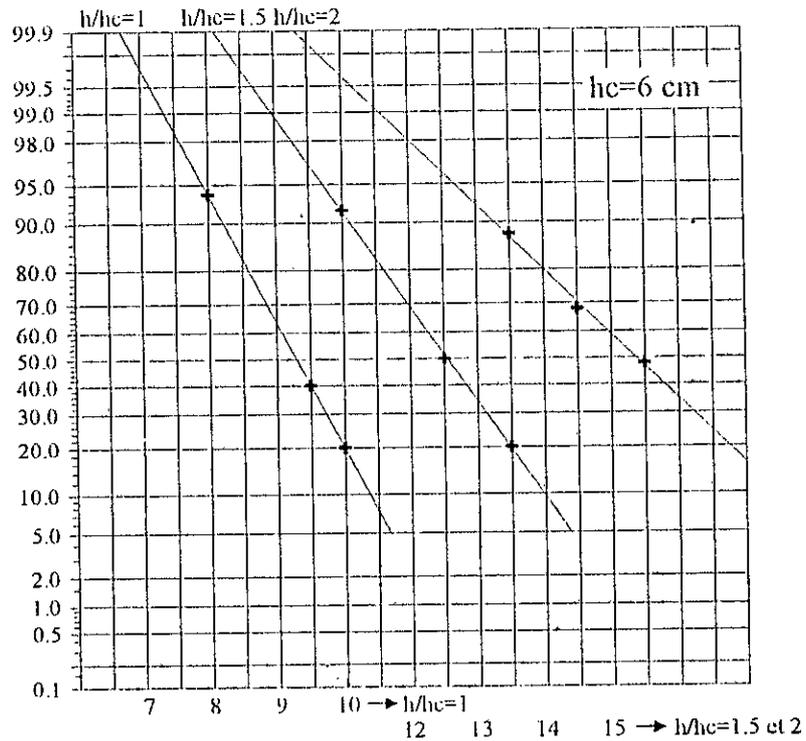


Figure A.31.— Détermination de $d_{90\%}$ pour $hc/e=1.2$ et $D/hc=10$.

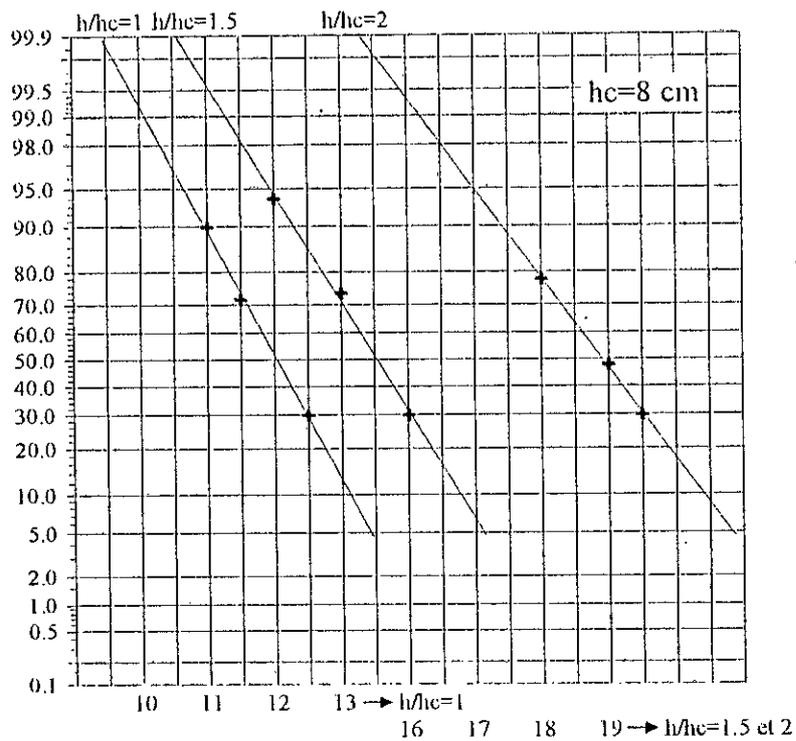


Figure A.32.— Détermination de $d_{90\%}$ pour $hc/e=1.6$ et $D/hc=2$.

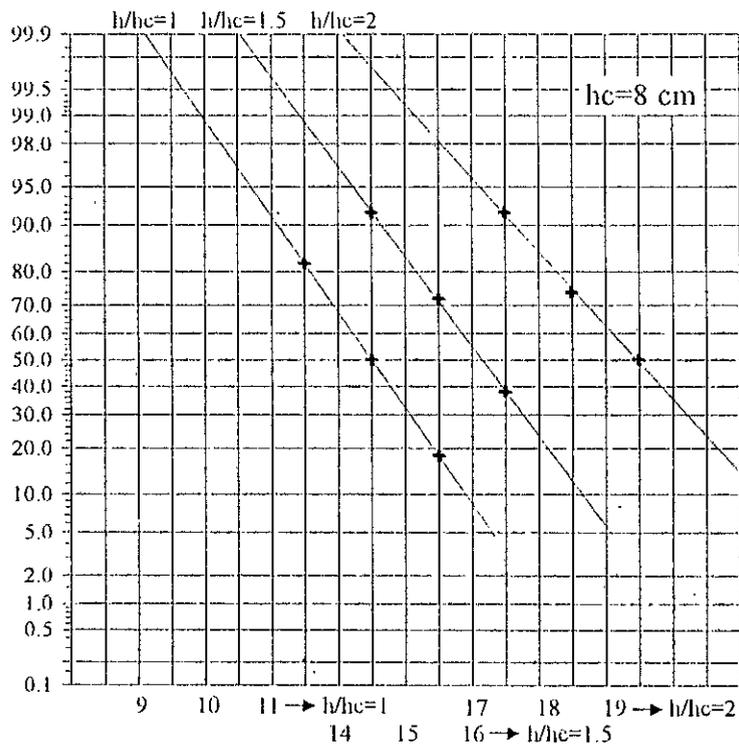


Figure A.33.— Détermination de $d_{90\%}$ pour $hc/e=1.6$ et $D/hc=6$.

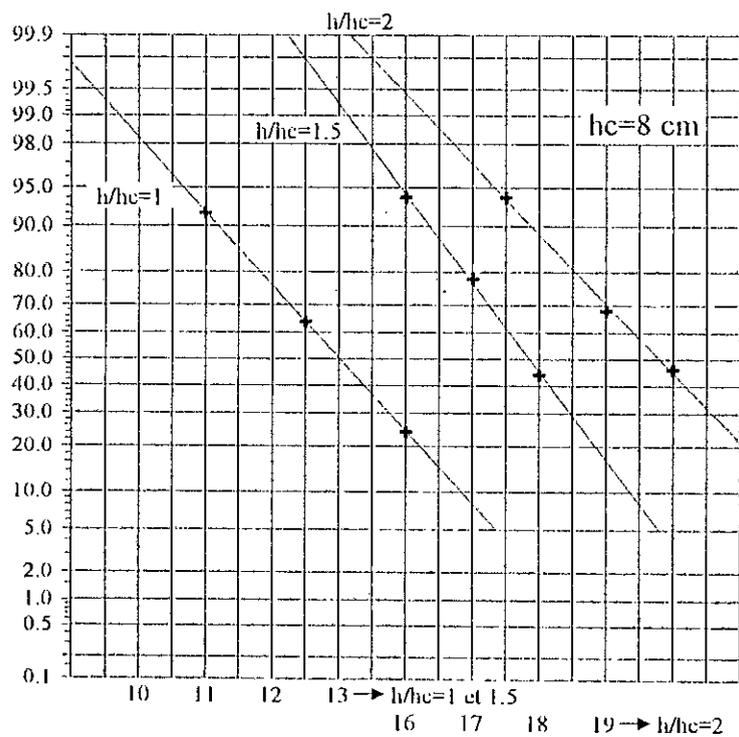


Figure A.34.— Détermination de $d_{90\%}$ pour $hc/e=1.6$ et $D/hc=10$.