

M0011/00B

**ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE D'ALGER**



**DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE**

**THESE**

présentée pour obtenir

**LE GRADE DE MAGISTER EN ELECTROTECHNIQUE**

Option : Réseaux et Haute Tension

*par*

**BROURI Hocine**

Ingénieur d'Etat en Electrotechnique ENP-Alger

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

Soutenue le : 02 / 07 / 2000 devant la commission d'Examen :

MM.

Président	<b>HELLAL Abdelhafid</b>	Maître de conférences, ENP
Rapporteur	<b>BOUBAKEUR Ahmed</b>	Professeur, ENP
Examineurs	<b>MEKHALDI Abdelouahab</b>	Maître de conférences, ENP
	<b>OUABDESSLAM Abdelaziz</b>	Chargé de cours, ENP
	<b>TEGUAR Madjid</b>	Chargé de cours, ENP

## ملخص

المهدف من هذا العمل هو دراسة مدى تأثير التباين في مستوى الأرض (أرض متقطعة) على منحنيات الجذب لصاراف صاعقة أفقي. من أجل معرفة هذا التأثير، قمنا بدراسة جميع وضعياته الممكنة على الجهة العليا أو السفلى للأرض المدروسة، في كل الحالات، قمنا بدراسة البعد الأفقي لصاراف الصاعقة عن الفاصل و قمنا أيضا بدراسة تأثير قطر الصاراف الأفقي على منحنيات الجذب. كنتيجة لهذه الدراسة وجدنا أنه في مختلف الوضعيات المدروسة، منحنيات الجذب لا تتوافق مع المنحنى المحدد بالنموذج الكهرهندسي في حالة أرض مستوية جيدة الناقلية.

كلمات مفتاحية: الصواعق، النموذج الكهرهندسي، صاراف صاعقة أفقي، 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 horizontal. Nous avons étudié toutes les configurations possibles suivant la position du paratonnerre sur la partie haute ou la partie basse de la terre discontinue. En plus de la position horizontale du paratonnerre, nous avons étudié l'influence du diamètre du paratonnerre horizontal sur les zones d'attraction. Pour les différentes configurations étudiées, les zones d'attraction ne correspondent pas en général à celle définie par le modèle électrogéométrique pour un sol homogène bon conducteur.

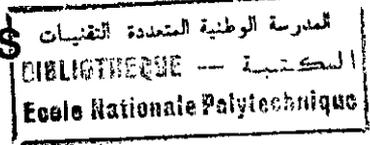
**Mots Clés :** Foudre, Modèle électrogéométrique, Paratonnerre horizontal, Terre discontinue, Zones d'attraction.

## Abstract

The aim of this work is to study the influence of earth discontinuity on the capture zones of an horizontal lightning conductor. We studied all possible configurations according to the lightning conductor position upon the upper or the lower part of the discontinuous earth. In addition to the lightning conductor horizontal position, we studied the influence of the lightning conductor diameter on the capture zones. For the different configurations, we found that the capture zones don't correspond, in general, to that defined by the classical electrogeometrical model.

**Key words :** Lightning, electrogeometrical model, Horizontal lightning conductor, Discontinuous earth, Capture zones.

# REMERCIEMENTS



Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé au Laboratoire de Haute Tension de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger.

Ce travail a été effectué sous la direction de Monsieur le Professeur A. BOUBAKEUR, Directeur de Recherche au Laboratoire de Haute Tension à l'ENP. Qu'il me soit permis de lui exprimer mes sentiments de gratitude pour le soutien qu'il m'a apporté dans ce travail et la bienveillance qu'il n'a cessé de manifester à mon égard.

Je remercie très vivement Monsieur A. HELLAL, Maître de conférences à l'ENP pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de juger ce travail et de présider le jury d'examen.

Que Monsieur O. MEKHALDI, Maître de conférences à l'ENP qui a aimablement accepté de juger ce travail, soit assuré de mes vifs remerciements.

Je tiens à remercier Monsieur A. OUABDESSLAM, Chargé de cours à l'ENP qui a bien voulu me faire l'honneur de participer à ce jury d'examen.

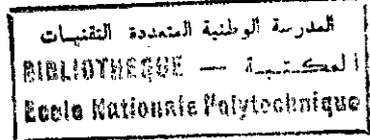
Je tiens également à remercier Monsieur M. TEGUAR, Chargé de cours à l'ENP d'avoir bien voulu accepter d'examiner notre travail.

Que les camarades de Laboratoire de Haute Tension trouvent ici l'expression de notre gratitude pour le soutien que nous a apporté leur sympathie et notamment Monsieur A. CHOUCOU avec qui nous avons eu tant de discussions enrichissantes et qui a contribué à l'aboutissement de cette étude.

Que Monsieur A. Rahmani, Chargé de cours à l'Université de Béjaia avec qui j'ai eu de nombreuses et fructueuses discussions, trouve ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

Nos remerciements vont également à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à l'aboutissement de cette étude.

# SOMMAIRE



<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>1</b>
<b><u>Chapitre I : Foudre et protection contre la foudre.....</u></b>	<b><u>3</u></b>
<b>I.1 ELECTRICITE ATMOSPHERIQUE ET PHENOMENES PRECURSEURS.....</b>	<b>3</b>
I.1.1 Formation des nuages orageux .....	3
I.1.2 Formation des charges électriques .....	3
I.1.3 Le champ électrique au sol et l'effet de couronne .....	3
<b>I.2 SEVERITE ORAGEUSE ET ELEMENTS DE STATISTIQUE .....</b>	<b>4</b>
I.2.1 Niveau céramique .....	4
I.2.2 Densité de coups de foudre .....	5
I.2.3 Facteurs locaux influençant le foudroiement .....	5
I.2.3.1 Facteurs topologiques.....	5
I.2.3.2 Facteurs géologiques .....	6
<b>I.3 LES CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES DE LA Foudre .....</b>	<b>6</b>
I.3.1 Classification des coups de foudre.....	6
I.3.2 Mécanisme du coup de foudre.....	7
<b>I.4 PROTECTION CONTRE LA Foudre .....</b>	<b>9</b>
I.4.1 Point d'impact .....	9
I.4.2 Modèle électrogéométrique .....	10
I.4.3 La zone de protection .....	10
I.4.3.1 Zone de capture d'un paratonnerre horizontal .....	11
I.4.3.2 Zone de capture d'une tige verticale .....	11
<b>I.5 PROTECTION DES LIGNES AERIENNES CONTRE LA Foudre .....</b>	<b>13</b>
I.5.1 Le foudroiement des réseaux .....	13
I.5.1.1 Coup de foudre sur un conducteur de phase .....	13
I.5.1.2 Coup de foudre sur un câble de garde ou un pylône .....	14
I.5.1.3 Coup de foudre sur le sol à proximité de la ligne .....	14
I.5.2 Câble de garde et défaut d'écran .....	15
I.5.2.1 Principe de protection .....	15
I.5.2.2 Nombre de défauts d'écrans .....	16
I.5.3 Positionnement pratique du câble de garde.....	17
I.5.3.1 Construction du modèle électrogéométrique .....	17
I.5.3.2 Angle de protection.....	18

**Chapitre II : INFLUENCE DES PROPRIETES LECTROGEOLOGIQUES  
DU SOL SUR LES ZONES D'ATTRACTION D'UN PARATONNERRE..... 19**

**INTRODUCTION..... 19**

**II.1 COMPOSITION, PERMITTIVITE ET CONDUCTIVITE DU SOL ..... 19**

**II.2 INFLUENCE DES PROPRIETES ELECTROGEOLOGIQUES DE LA TERRE SUR LA  
TENSION DE DECHARGE DISRUPTIVE DES INTERVALLES D'AIR TIGE-PLAN ..... 20**

II.2.1 Sol homogène ..... 20

II.2.2 Sol discontinue ..... 21

**II.3 ZONES D'ATTRACTION DU PARATONNERRE HORIZONTAL ..... 23**

II.3.1 Sol parfaitement conducteur ..... 23

    II.3.1.1 Modèle expérimental réduit ..... 23

    II.3.1.2 Influence de la hauteur de suspension du paratonnerre horizontal .... 23

    II.3.1.3 Influence du diamètre du paratonnerre horizontal ..... 25

II.3.2 Cas d'une terre hétérogène ..... 25

    II.3.2.1 Modèle expérimental ..... 25

    II.3.2.2 Zones d'attraction du paratonnerre ..... 26

II.3.3 Cas de terre mauvaise conductrice ..... 29

    II.3.3.1 Modèle expérimental ..... 29

    II.3.3.2 Zones d'attraction du paratonnerre ..... 29

**II.4 ELABORATION D'UN MODELE DE PROTECTION EQUIVALENT ..... 30**

**II.5 ZONE D'ATTRACTION D'UN PARATONNERRE VERTICAL DANS LE  
CAS D'UNE TERRE DISCONTINUE ..... 31**

II.5.1 Paratonnerre situé sur la partie haute de la terre discontinue,  
entre l'interface et l'axe de la décharge..... 31

II.5.2 Paratonnerre situé sur la partie haute de la terre discontinue et l'axe de la  
décharge situé entre l'interface et le paratonnerre ..... 33

II.5.3 Paratonnerre situé sur la partie basse de la terre discontinue et l'axe de la  
décharge situé entre l'interface et le paratonnerre ..... 33

    II.5.3.1 Influence du rapport h/c ..... 34

II.5.4 Paratonnerre situé sur la partie basse de la terre discontinue  
entre l'axe de la décharge et l'interface ..... 35

**CONCLUSION ..... 36**

**Chapitre III : TECHNIQUES EXPERIMENTALES ..... 37**

**III.1 GENERATION DES ONDES DE CHOCS ..... 37**

III.1.1 Générateur de chocs ..... 37

III.1.2 Tension de choc délivrée ..... 38

**III.2 DETERMINATION DES TENSIONS  $U_{100\%}$  ..... 40**

III.2.1 Modèle expérimental sans paratonnerre ..... 40

III.2.2 Corrections atmosphériques ..... 42

    II.2.2.1 Influence de la densité de l'air ..... 42

    II.2.2.2 Influence de l'humidité ..... 42

<b>III.3 CONFIGURATIONS DE LA TERRE DISCONTINUE</b> .....	<b>43</b>
III.3.1 Terre homogène conductrice .....	44
III.3.2 Terre discontinue .....	44
III.3.3 Configurations du modèle expérimental .....	45
<b>III.4 DETERMINATION DES ZONES D'ATTRACTION POUR UNE TERRE HOMOGENE CONDUCTRICE</b> .....	<b>47</b>
<b>III.5 DETERMINATION DES ZONES D'ATTRACTION DANS LE CAS DE TERRE DISCONTINUE</b> .....	<b>47</b>
III.5.1 Détermination des fréquences d'impact .....	47
III.5.2 Tracé des zones d'attraction .....	48
II.5.2.1 Influence de la distance relative du paratonnerre par rapport à l'interface .....	49
II.5.2.2 Influence du diamètre du paratonnerre horizontal sur les zones d'attraction.....	50

## Chapitre IV : ZONES D'ATTRACTION DU PARATONNERRE

### HORIZONTAL DANS LE CAS DE TERRE DISCONTINUE ..... **51**

<b>IV.1 INTRODUCTION</b> .....	<b>51</b>
<b>IV.2 TERRE HOMOGENE BONNE CONDUCTRICE</b> .....	<b>51</b>
IV.2.1 Influence de h sur les tensions $U_{100\%}$ .....	51
IV.2.2 Détermination des zones d'attraction du paratonnerre horizontal .....	52
IV.2.3 Calcul d'erreur .....	54
IV.2.4 Influence du diamètre du paratonnerre horizontal sur les zones d'attraction ...	55
IV.2.5 Influence du diamètre sur le niveau de terre fictive .....	56
IV.2.6 Influence du diamètre du paratonnerre horizontal sur les distances paratonnerre-axe de la décharge .....	57
<b>IV.3 TERRE DISCONTINUE</b> .....	<b>58</b>
IV.3.1.1 Première configuration : Paratonnerre horizontal situé entre l'axe de la décharge et l'interface .....	58
IV.3.1.2 Deuxième configuration : L'axe de la décharge situé entre l'interface et le paratonnerre .....	62
IV.3.2 Paratonnerre situé sur la partie basse de la terre discontinue .....	65
IV.3.1.3 Troisième configuration : L'axe de la décharge situé entre l'interface et le paratonnerre .....	65
IV.3.1.4 Quatrième configuration : Paratonnerre horizontal situé entre l'axe de la décharge et l'interface .....	68
<b>IV.4 TYPE DE DECHARGES OBSERVEES</b> .....	<b>70</b>
IV.4.1 Terre homogène conductrice .....	70
IV.4.2 Terre discontinue .....	70
<b>CONCLUSION GENERALE</b> .....	<b>72</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	<b>74</b>
<b>ANNEXES</b> .....	<b>79</b>

## INTRODUCTION

Évaluée en terme de risque, la nécessité de la protection contre la foudre n'est plus à démontrer. En effet, elle réduit les risques et les dégâts matériels si elle fait l'objet d'un soin attentif [LEJ97].

Les principales études, dans le but d'atteindre une meilleure protection, avaient pour objet l'explication du phénomène physique de la décharge électrique. Ces investigations ont permis d'élaborer une méthode de détermination de la zone de protection. 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 appelé « modèle électrogéométrique ». Bien que ce dernier constitue, néanmoins, une approche cohérente de la protection contre la foudre dans le cas d'un sol homogène et parfaitement conducteur, hypothèse rarement rencontrée en réalité, il ne présente pas une perfection absolue. En effet, sa formulation simplifiée actuelle néglige un grand nombre de paramètres essentiels à une bonne détermination des points d'impact de la foudre. Parmi ces paramètres, les propriétés électrogéologiques semblent avoir une influence importante sur les caractéristiques des décharges atmosphériques.

Vu le nombre limité des investigations effectuées dans le domaine, le Laboratoire de Haute Tension de l'ENP contribue, depuis 1985, à l'étude de l'influence des propriétés électrogéologiques sur l'impact de la décharge de foudre et les zones d'attraction des paratonnerres horizontaux ou verticaux [BOU95] à [CHO99].

Le premier chapitre de ce mémoire débute par un exposé sur la physique des orages et les caractéristiques électriques de la foudre. La compréhension de ces phénomènes nous aide à concevoir un tel système de protection contre la foudre. Nous présentons ainsi une brève description des mécanismes d'impacts, qui expliquent comment se décide le point de chute d'un coup de foudre. Nous analysons ensuite le foudroiement des lignes aériennes et les processus de formation des défauts. Ainsi, nous décrivons les techniques de protection par câble de garde qui font appel aux modèles électrogéométriques.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation de l'influence des propriétés électrogéologiques du sol sur le point d'impact de la foudre en présence d'un paratonnerre horizontal et vertical. Les principaux résultats d'investigations sur des terres homogènes, hétérogènes et discontinues sont analysés. En effet, notre étude accomplit celle faite récemment au Laboratoire de l'ENP [CHO99] sur les zones d'attraction d'un paratonnerre vertical dans le cas d'une terre discontinue.

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

Ensuite, nous présentons dans le quatrième chapitre les différents résultats qui mettent en relief l'influence de plusieurs paramètres sur les zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal dans le cas de terre discontinue.

Enfin, nous terminons ce travail par une conclusion générale.

# **Chapitre I**

## **FOUDRE ET PROTECTION CONTRE LA Foudre**

### **1.1. ELECTRICITE ATMOSPHERIQUE ET PHENOMENES PRECURSEURS**

#### **1.1.1. Formation des nuages orageux**

La formation des nuages orageux, généralement de type cumulo-nimbus, est due à l'instabilité de l'atmosphère. Les nuages se développent quand l'air chaud et humide près de la surface de la terre s'élève, sous l'influence d'un courant atmosphérique ascendant, et remplace l'air dense se trouvant au dessus [LER84][SCH97]. Ils s'étendent sur des surfaces de plusieurs km<sup>2</sup>, leur base se trouve à environ 2 à 3 km au dessus du sol et se développent en hauteur jusqu'à des altitudes de 10 à 15 km. L'activité thermodynamique est très intense et provoque des déplacements d'air ascendants très violents au centre de la masse nuageuse.

#### **1.1.2. Formation des charges électriques**

Les particules en mouvement, sous l'influence de l'activité thermodynamique, se chargent électriquement par frottement. Des charges positives s'accumulent au sommet du nuage constitué de cristaux de glace et des charges négatives se déposent en bas du nuage constitué de gouttelettes d'eau. Souvent un flot de charges positives est enserré dans la masse négative.

Cet immense dipôle électrique provoque, par influence, la charge électrique du sol (positive) et de l'ionosphère (négative). Un courant dit « de beau temps » s'écoule du ciel vers la terre hors de la zone nuageuse (figure 1.1).

#### **1.1.3. Le champ électrique au sol et l'effet de couronne**

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

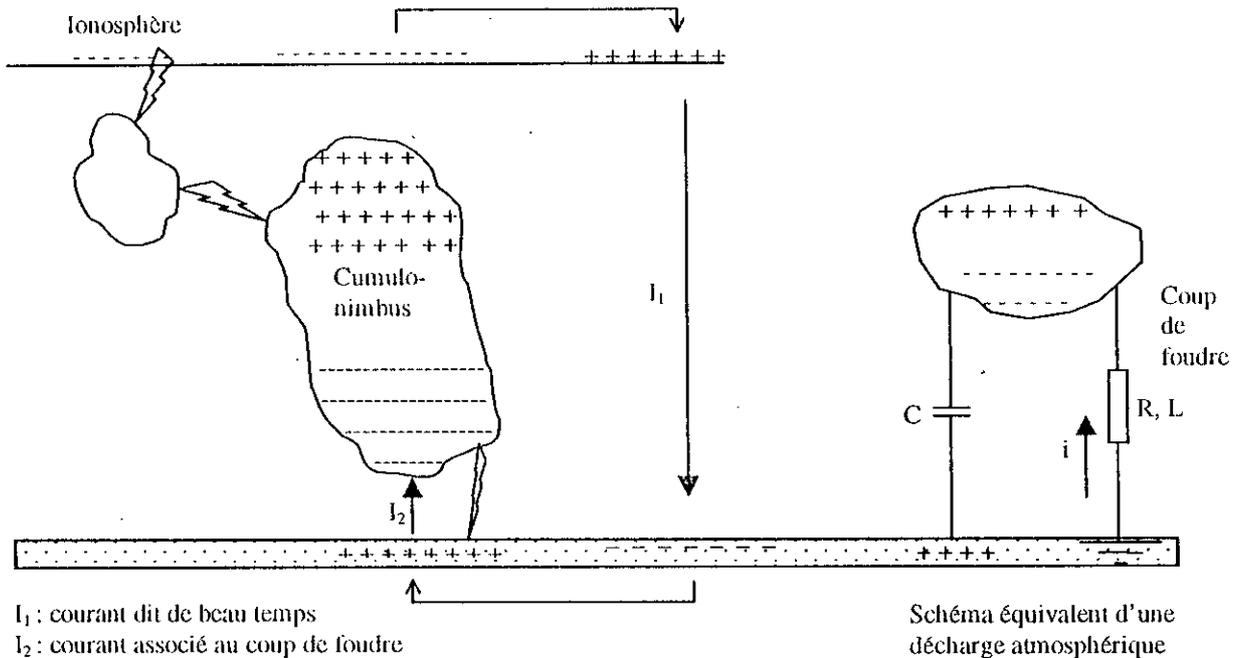


Figure 1.1- Origine de la foudre, courant de beau temps, circuit équivalent.

Ces valeurs de champ électrique supposent un sol horizontal plat. Or, toute aspérité peut augmenter le champ local par un effet de concentration des lignes de champ électrique. En effet, le champ calculé au sommet d'une demi-sphère posée sur un plan est le triple du champ moyen. Cet effet s'accroît lorsque la demi-sphère se déforme en un demi-ellipsoïde pointu. Ainsi, pour un rapport entre grand axe et petit axe de l'ellipsoïde égal à 30, le champ est multiplié par un rapport de 300.

Comme le seuil d'ionisation est de l'ordre de 30 kV/cm, il suffit dans ces conditions particulières d'un champ ambiant d'une dizaine de kV/m pour provoquer un effet de couronne au sommet de l'ellipsoïde [LER84][GAR89].

## 1.2 SEVERITE ORAGEUSE ET ELEMENTS DE STATISTIQUES

### 1.2.1 Niveau kéraunique :

La sévérité orageuse d'une région est caractérisée par son niveau kéraunique  $N_k$ . Ce dernier est par définition le nombre de jours par an où un coup de tonnerre au moins a été entendu. Le tableau 1.1 donne à titre d'exemple les niveaux kérauniques de certaines régions [AGU87].

Lieu d'observation	$N_k$
Cercle polaire	0,1
Europe centrale	11
Afrique du nord	10 à 30
Amérique du nord	10 à 50
Afrique centrale	150
Ouganda	242

**Tableau I.1-** Niveau kéraunique [AGU87]

## 1.2.2 Densité de coups de foudre

Puisque cette notion de niveau kéraunique ne donne aucune indication, ni sur l'existence de zones localisées particulièrement foudroyées, ni sur la fréquence de foudroiement, une définition bien plus rigoureuse de la sévérité orageuse peut être atteinte par la sévérité du foudroiement, exprimée en nombre de coups de foudre par  $\text{km}^2$  et par an.

Les concepteurs de réseaux électriques ont proposé des formules empiriques reliant la densité  $n_s$  de coups de foudre au niveau kéraunique  $N_k$ . On peut trouver dans la littérature [AGU87] la formule suivante :

$$n_s = \frac{N_k}{7} \quad (1.1)$$

La densité de coups de foudre comme le niveau kéraunique varie beaucoup mais de manière cyclique au cours des ans. Une analyse de la dispersion conduit à une loi normale dont l'écart type  $s_g$  (assez important) en fonction de la densité moyenne de coups de foudre au sol  $n_{sm}$  est donnée par la formule (1.2) [SAB99]:

$$s_g = 0,32 n_{sm} \quad (1.2)$$

## 1.2.3. Les facteurs locaux influençant le foudroiement

Parmi les facteurs influençant le foudroiement, on cite : les facteurs topologiques et les facteurs géologiques.

### 1.2.3.1 Facteurs topologiques

Des zones préférentielles peuvent exister du simple fait de conditions privilégiées de formation des nuages orageux, puis de mouvement d'air qui favorisent l'existence de couloirs orageux. Ainsi, ce ne sont pas toujours les points les plus élevés qui sont les plus frappés. En montagne, les versants des vallées sont souvent plus foudroyés que les sommets.

### I.2.3.2 Facteurs géologiques

Une influence possible est celle de la résistivité des sols et c'est par cet intermédiaire que les failles ou les nappes d'eau pourraient avoir une action attractive sur la foudre. Il semblerait en effet qu'en présence de sols de natures différentes, la foudre atteigne de préférence celui qui présente la plus faible résistivité [LER84].

## I.3 LES CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES DE LA FOUDRE

### I.3.1 Classification des coups de foudre

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

- du sens de développement du traceur principal (ascendant ou descendant)
- de la polarité du traceur principal (positive ou négative) qui est identique à celle de la charge du nuage et elle peut facilement être identifiée d'après la polarité des courants mesurés [BER75].

On obtient les combinaisons indiquées ci-dessous (figure I.2) :

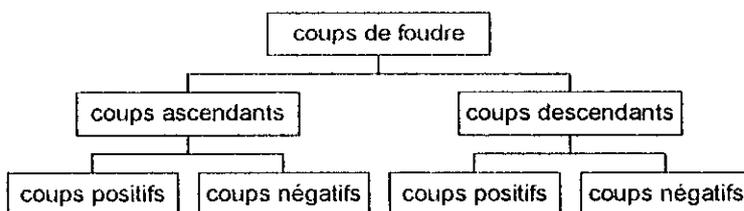


Figure I.2- Répartition des coups de foudre.

Dans les régions à climat tempéré, 90% des coups de foudres sont descendants négatifs (figure I.3) [GOL81][LER84][AGU87][GAR94].

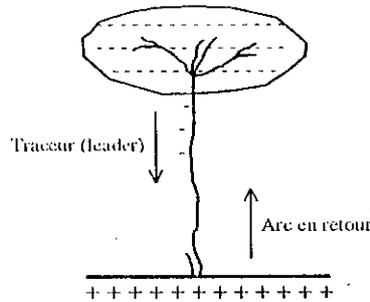


Figure 1.3- Coup de foudre du type descendant négatif

### I.3.2 Mécanisme du coup de foudre descendant négatif

A l'œil nu, le coup de foudre apparaît comme une seule décharge lumineuse, tandis que les équipements photographiques à grande vitesse, utilisés sur sites, ont montré que son développement est formé en plusieurs phases. La figure I.4 illustre ces différentes phases et les courants de foudre induits au sol.

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

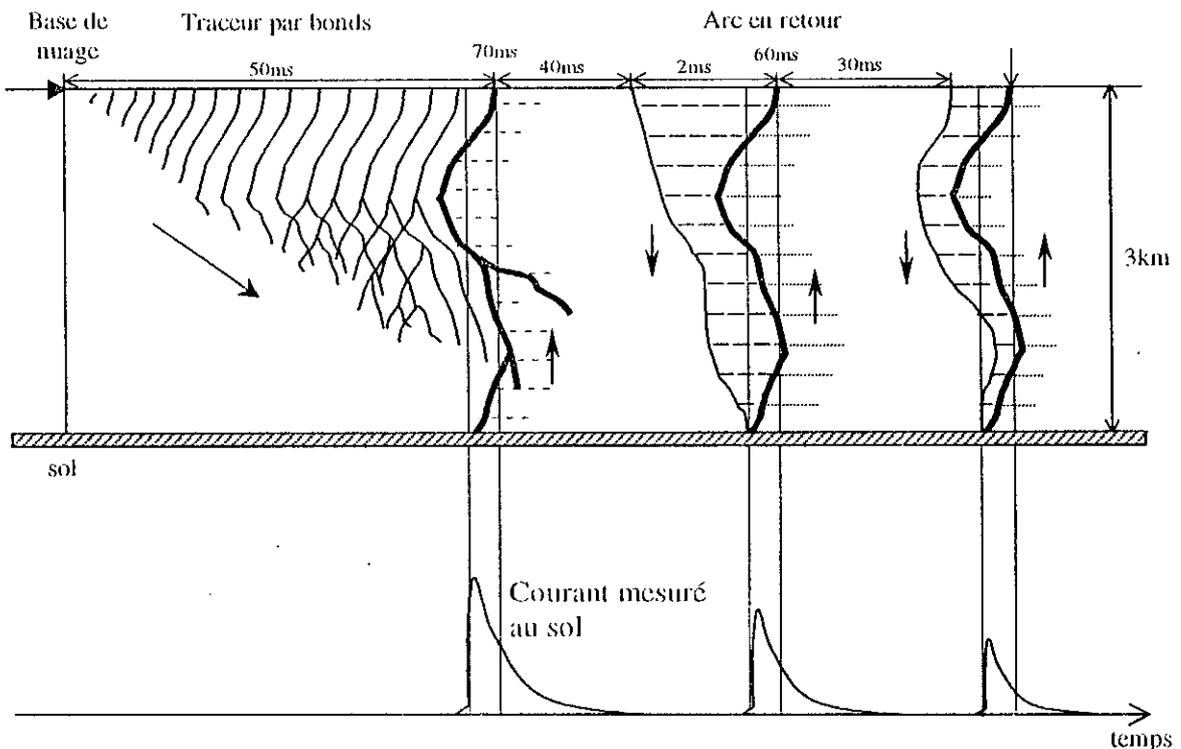


Figure I.4- Déroulement spatio-temporel d'un coup descendant et les courants mesurés à la surface de la terre.

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

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

Souvent, l'arc en retour est suivi de décharges subséquentes, dont le traceur de la deuxième décharge est appelé trait flèche ou « dart leader ». Le trait progresse d'une façon continue suivant le même trajet du traceur par bonds mais avec une vitesse 10 fois plus grande [LER84]. La figure I.4- donne une appréciation claire du mécanisme de coup de foudre

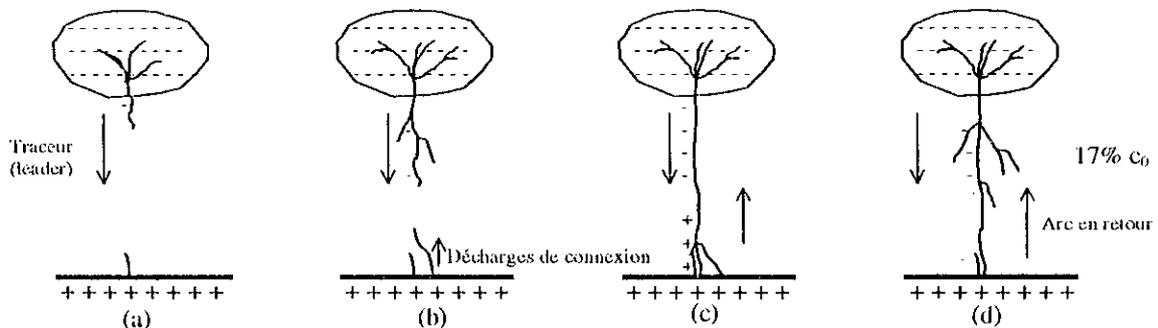


Figure.I.5- Représentation schématique des différentes étape d'un coup de foudre

Il reste à signaler que les décharges nuages-terre représentent seulement 10% de l'ensemble des décharges atmosphériques. La majorité de ces dernières s'effectuent entre nuages. On les appelle « sheet leader » en Anglais [GOL81][KUF84].

## I.4 PROTECTION CONTRE LA FOUDRE

### I.4.1 Point d'impact

On a vu dans les paragraphes précédents que l'impact serait le point à la terre où l'intensité du champ électrique est la plus élevée au moment du saut final. Sur un sol plan, ce sont les points culminants (tours, roches, arbres, etc..) qui facilitent le développement d'une telle décharge atmosphérique. Ainsi, entre ces points, il est probable que la décharge atteigne l'endroit de faible résistance.

La figure I.6 schématise les étapes intervenant dans le coup de foudre au sol. On remarquera que le point d'impact du coup de foudre est déterminé par l'endroit où s'amorce la contre-décharge de capture. Aussi, tous les modèles de prévision du point d'impact se basent sur la propagation des traceurs par bonds négatifs ainsi que sur les critères de formation des contre décharge de capture[XEM94][SAB99].

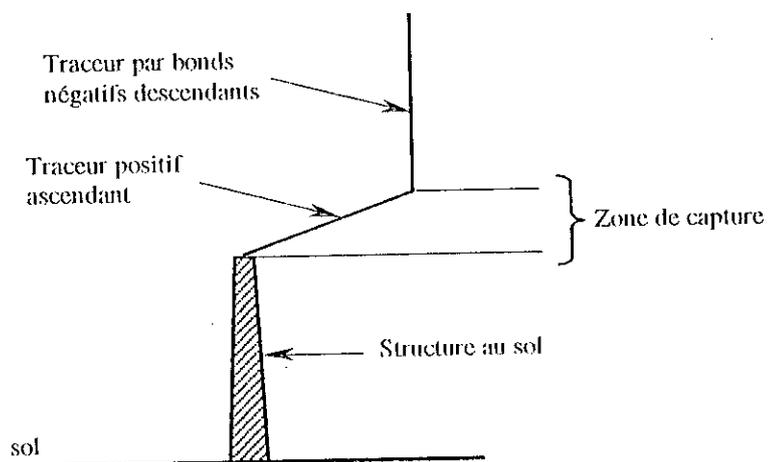


Figure I.6- Point d'impact sur une structure au sol

### 1.4.2 Modèle électrogéométrique

Afin de prédire les points d'impact de la foudre et de dimensionner ainsi des dispositifs susceptibles de la capter et d'éviter qu'elle ne frappe directement ce que l'on souhaite protéger des impacts directs, des modèles électrogéométriques ont été développés.

L'électricien a essayé de modéliser, dans une expression analytique simple, la distance entre l'extrémité du traceur par bonds descendant et un objet au sol pour laquelle une décharge ascendante peut se développer à partir de cet objet. Cette distance « D » appelée distance d'amorçage (striking distance) est donnée par l'expression suivantes:

$$D(I) = \alpha I^\beta \quad (1.3)$$

où I est l'amplitude de la crête du futur courant de foudre de l'arc en retour, dit aussi courant prospectif.

Il n'existe pas à l'heure actuelle de modèle universellement reconnu et les paramètres  $\alpha$  et  $\beta$  varient dans d'assez grande proportions:  $\beta$  varie entre 0,6 et 0,8 et  $\alpha$  entre 6 et 10, ce dernier étant fonction de la hauteur de la structure susceptible d'attirer la foudre. En accord avec d'autres chercheurs, Whitehead [ER175] a proposé l'expression suivante :

$$D(I) = 10 \cdot I^{2/3} \quad (1.4)$$

où D est la distance d'amorçage, exprimée en mètre.

I est la valeur crête du courant de foudre, exprimé en kA.

### 1.4.3 Zone de protection

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

La zone de protection est déterminée par la surface non touchée par le contour de la sphère fictive [NOR87][NOR95].

### I.4.3.1 Zone de capture d'un paratonnerre horizontal

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

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

où  $h$  est la hauteur du paratonnerre horizontal.

En réalité on obtient une surface de symétrie axiale autour du paratonnerre horizontal dont la hauteur maximale d'un objet protégé est :  $P = 2.D - h$  (figure I.7).

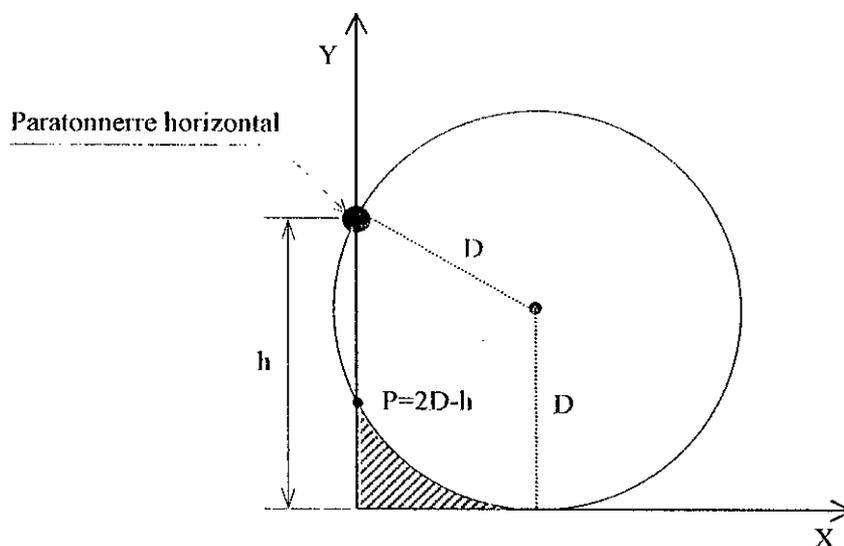


Figure I.7- Zone de protection d'un paratonnerre horizontal.

### I.4.3.2 Zone de capture d'une tige verticale

La construction géométrique d'une tige verticale (figure I.8) est la même que la précédente (I.4.3.1). Sauf que la zone de protection a une symétrie de révolution au lieu d'une symétrie axiale. Donc le volume de capture est constitué d'un cône et d'un parabolôïde (figure I.9), on a :

$$\begin{cases} \text{Si } D < h: & Y = X \\ \text{Si } D \geq h: & X^2 - 2Yh + h^2 = 0 \end{cases} \quad (I.6)$$

où h est la hauteur de la tige verticale.

La surface de capture, dans ce cas est définie par :  $S = \pi h^2 [(2D/h) - 1]$  (I.7)

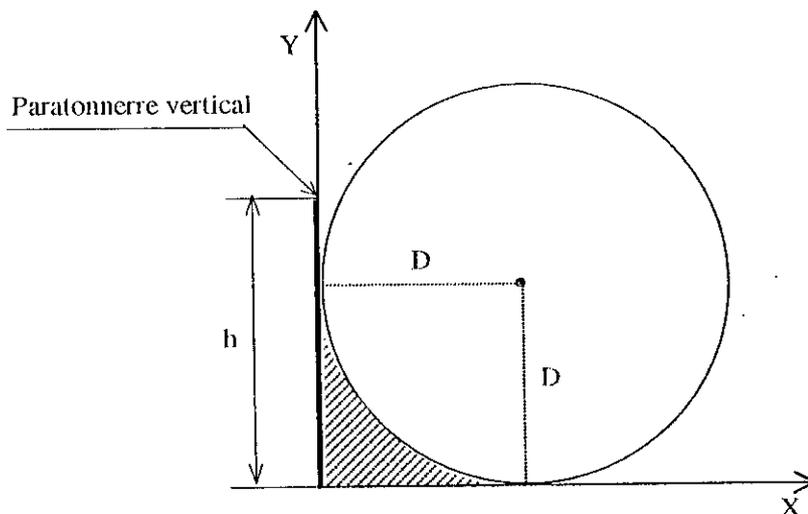


Figure I.8- Zone de protection d'un paratonnerre vertical.

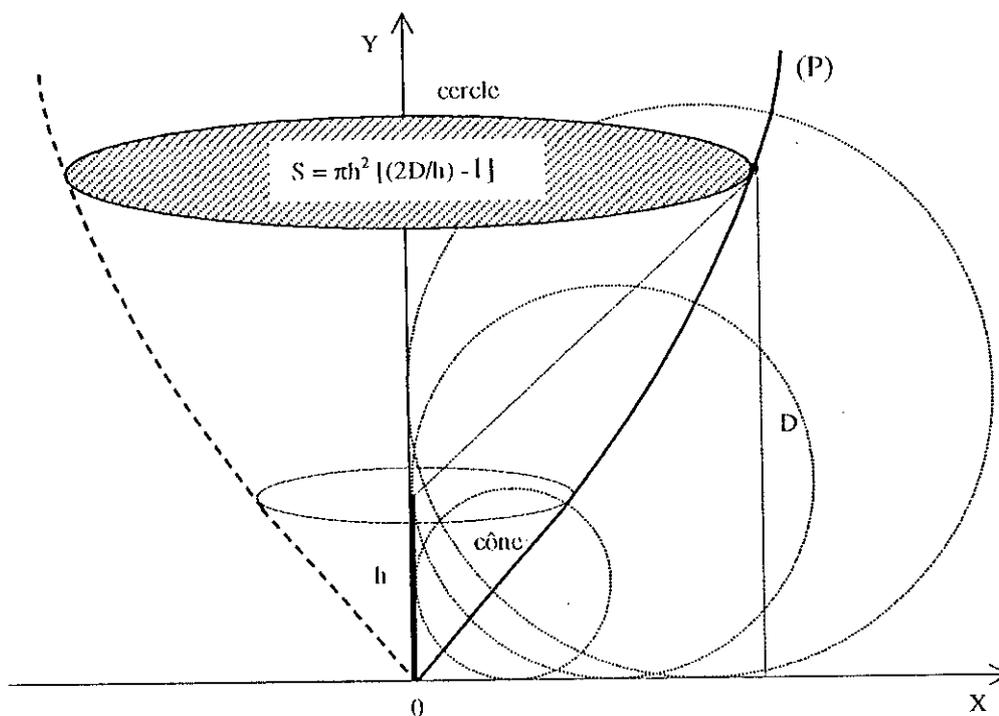


Figure I.9- Zone de protection d'un paratonnerre vertical de hauteur h.

## 1.5. PROTECTION DES LIGNES AERIENNES CONTRE LA Foudre

Les réseaux électriques modernes sont des ensembles complexes, fortement maillés, de lignes fonctionnant à des tensions diverses. Du fait de leur étendue, on peut s'attendre à ce qu'ils soient fréquemment foudroyés. En connaissant les processus de foudroiement et leurs conséquences, les ingénieurs des réseaux électriques ont pu concevoir des techniques de protection adéquates.

### 1.5.1 Le foudroiement des réseaux

La fréquence de foudroiement d'une ligne dépend du niveau kéraunique local et de sa surface de capture équivalente, qui dépend elle-même de la hauteur et de la largeur de la ligne considérée. On définit le foudroiement d'une ligne par le nombre d'impacts de foudre par cent kilomètres de ligne et par an. Lorsqu'un coup de foudre tombe sur ou à proximité d'une ligne d'un réseau électrique, il va provoquer une surtension transitoire à front rapide ou très rapide [SAB99] dont l'effet diffère suivant le point d'impact. Trois cas peuvent alors se produire [LER84][GAR94][SAB99].

#### 1.5.1.1 Coup de foudre sur un conducteur de phase

Pour déterminer l'ordre de grandeur des contraintes à prévoir, on raisonne généralement sur une injection de courant  $i(t)$  dû à la foudre. Le courant se répartit par moitié de part et d'autre du point d'impact et se propage le long des conducteurs (figure 1.10). Les surtensions qui se propagent immédiatement après l'impact s'expriment à partir de l'impédance caractéristique (impédance d'onde)  $Z_c$  du conducteur touché d'après la formulation suivante :

$$V(t) = Z_c/2 i(t) \quad (1.7)$$

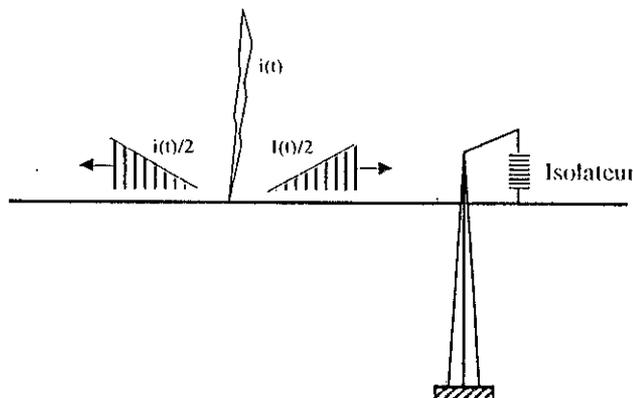


Figure 1.10- Coup de foudre sur un conducteur de phase

La surtension qui arrive au niveau d'un pylône où le conducteur est suspendu par une chaîne d'isolateurs sera donc :

- soit une onde pleine si  $(Z_c/2) i < \text{tension d'amorçage du pylône } U_f$ .
- soit une onde coupée si  $(Z_c/2) i > \text{tension d'amorçage du pylône } U_f$ .

Dans ce dernier cas, il y a défaut d'isolement de la ligne dont l'élimination nécessite l'ouverture des disjoncteurs.

Compte tenu des distances entre conducteurs de phase et ferrures des pylônes, il existe pour chaque échelon de tension un courant critique  $I_c$  qui est défini comme étant l'amplitude minimale du courant de foudre qui provoque l'amorçage des chaînes d'isolateurs. Ce courant est donné par :

$$I_c = 2 U_f / Z_c \quad (I.8)$$

Donc un coup de foudre touchant une ligne de distribution BT ou une ligne HT sans câble de garde provoque certainement un défaut [LER84][SAB99].

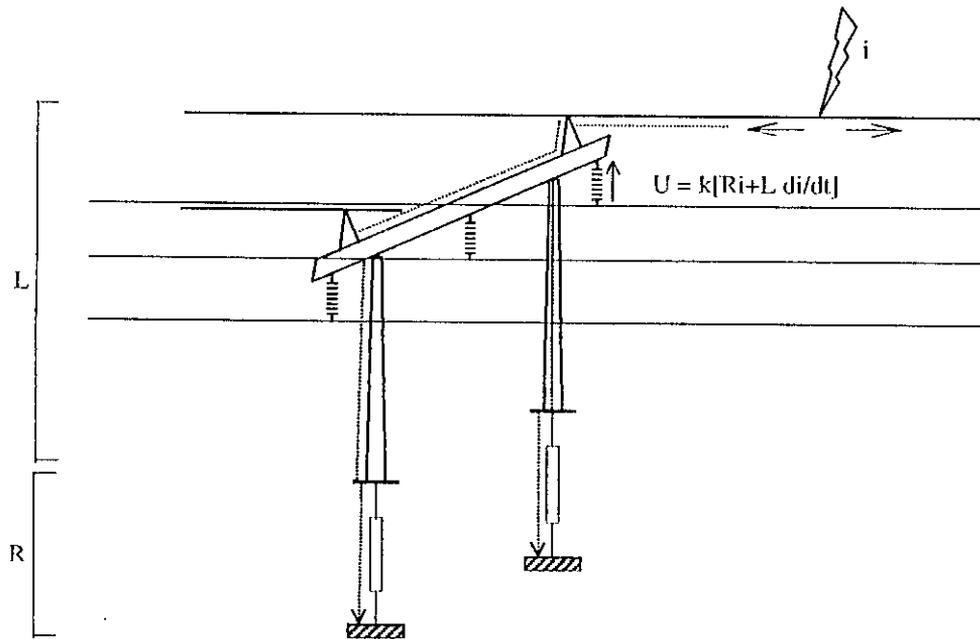
### 1.5.1.2 Coup de foudre sur un câble de garde ou un pylône

Afin de protéger une ligne des impacts directs de la foudre, on place au dessus des conducteurs actifs un ou plusieurs câbles de garde, reliés à la terre au niveau de chaque pylône. En effet, l'écoulement du courant vers la terre entraîne une élévation de potentiel des structures métalliques.

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

$$U(t) = R i(t) + L \frac{di}{dt} \quad (I.9)$$

Lorsque cette tension atteint la tension de décharge disruptive de l'isolement de la ligne, il se produit un amorçage dit « en retour ». Quoiqu'il en soit, l'effet du câble de garde sera globalement bénéfique, puisqu'il conduit à répartir l'écoulement du courant de foudre sur plusieurs pylônes, et par conséquent réduit les surtensions appliquées aux chaînes d'isolateurs [LER84] [SAB99]. La figure I.11 illustre le mécanisme d'amorçage en retour.



**Figure I.11-** Coup de foudre sur un câble de garde : amorçage en retour

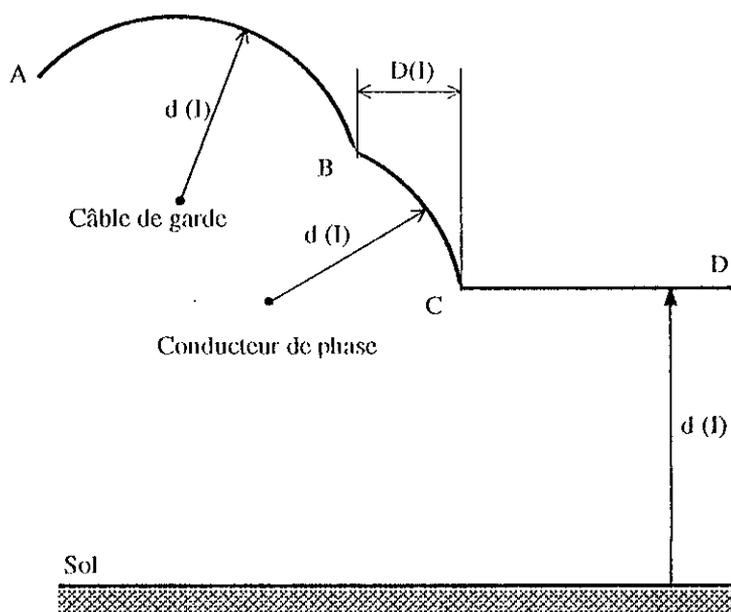
### 1.5.1.3 Coup de foudre sur le sol à proximité de la ligne

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

## 1.5.2 Câble de garde et défauts d'écran

### 1.5.2.1 Principe de protection

Considérons le traceur par bonds négatif descendant vers le sol au voisinage d'une ligne aérienne équipée d'un câble de garde. A une certaine distance du sol, il convient de connaître le point d'impact du traceur. Le modèle électrogéométrique modélise ce concept par la distance d'amorçage  $d(I)$ . Si toutes les distances d'amorçage sont égales (câble de garde, conducteur de phase, sol), le traceur terminera sa descente sur la structure la plus proche. La figure I.12 schématise cette situation pour une valeur donnée du courant de foudre prospectif.



$I$  : courant de foudre  
 $d$  : distance d'amorçage

**Figure I.12-** Ligne protégée par un câble de garde

Si le traceur par bonds descendant négatif touche :

- L'arc AB, le traceur terminera sa descente sur le câble de garde, ce qui est le but recherché.
- Le segment CD, il terminera sa descente sur le sol ;
- L'arc BC, il terminera sa descente sur le conducteur de phase, on dit qu'il y a défaut d'écran.

### 1.5.2.2 Nombre de défauts d'écran

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

$$dN_e = n_s L D(I) f_s(I) dI \quad (I.10)$$

tel que :

$n_s$  : densité de coups de foudre,

$L$  : longueur de la ligne,

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

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

$$N_e = n_s L \int_{3kA}^{I_{\max}} D(I) f_s(I) dI \quad (I.11)$$

Cependant, pour qu'un courant produise un défaut dans la ligne, il faut que ça valeur soit supérieure au courant critique  $I_c$ . le nombre de défauts d'écran devient :

$$N_e = n_s L \int_{I_c}^{I_{\max}} D(I) f_s(I) dI \quad (I.12)$$

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

### 1.5.3 Positionnement pratique du câble de garde

#### 1.5.3.1 Construction du modèle électrogéométrique

Le positionnement du câble de garde est basé principalement sur le principe du modèle électrogéométrique. Ce dernier se construit de la façon suivante :

On trace la parabole définie par les points à égale distance du conducteur  $S$ , le plus extérieur de la ligne, et du sol. D'après l'hypothèse du modèle électrogéométrique, la zone I est sans danger pour la ligne. On trace un arc de cercle  $s$  centré sur la phase  $S$  et de rayon  $d_c$ , la distance d'amorçage critique ayant été calculée sur la base du courant critique de foudre.

La zone II est caractérisée par le fait que tout traceur par bonds pénétrant dans celle-ci, touchera le conducteur  $S$  en absence du câble de garde. Cependant, comme cette zone est caractérisée par des distances d'amorçage inférieures à  $d_c$ , Le courant présumé correspondant sera inférieur au courant critique  $I_c$  (équation I.8) et l'impact de la foudre n'aura pas de conséquences.

Il reste donc la zone III dans laquelle le câble de garde devra jouer son rôle. Traçons l'arc  $m$  de rayon  $d_c$  et de centre le point  $M$ . La condition que doit remplir le point  $G$  (position du câble de garde) est :  $QG < QS$ , quelle que soit la position d'un point  $Q$  dans la zone III. En effet, tout point situé au dessus de la médiatrice  $MN$  remplit cette condition. L'arc de cercle  $m$  est le lieu d'efficacité optimale du câble de garde protégeant le conducteur  $S$  (figure 13) [AGU87] [LER84].

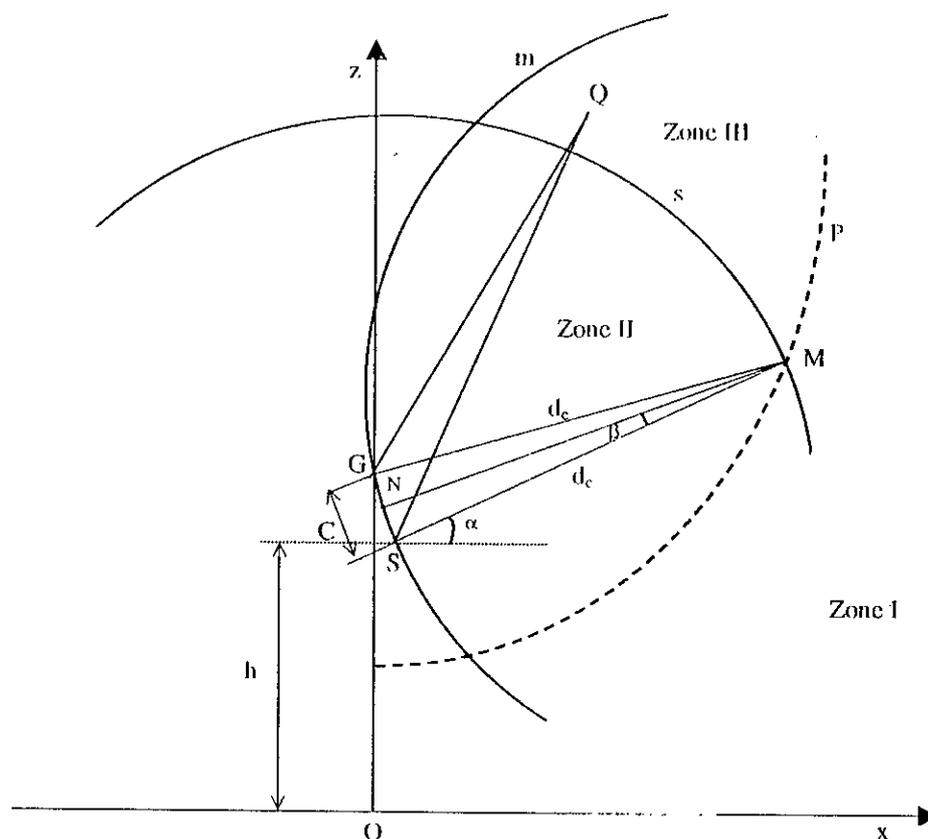


Figure 1.13- Construction du modèle électro géométrique dans le cas d'une ligne.

### I.5.3.2 Angle de protection

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

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

$$\text{avec } \alpha = \arcsin \left( 1 - \frac{h}{d_c} \right) \quad (\text{I.13})$$

et en désignant par C la distance  $\overline{GS}$ , il vient :

$$\theta_0 = \arcsin \left( 1 - \frac{h}{d} \right) - \arcsin \frac{C}{2d_c} \quad [\text{rad}] \quad (\text{I.14})$$

#### Remarques :

- Les angles de protection couramment adoptés sont de l'ordre de  $30^\circ$  [AGU87].
- Vu les contraintes mécaniques et le design du pylône, si aucune intersection n'est trouvée entre l'arc m et l'axe de symétrie du pylône z, on peut placer deux câbles de garde de part et d'autre de z.

## Chapitre II

# INFLUENCE DES PROPRIETES ELECTROGEOLOGIQUES DU SOL SUR LES ZONES D'ATTRACTION D'UN PARATONNERRE

### INTRODUCTION

Bien que le modèle électrogéométrique permette d'expliquer un grand nombre de phénomènes de foudroiement, et rend d'appréciables services pour concevoir une protection fiable contre les effets destructifs de la foudre, il présente certaines insuffisances. Ces dernières sont le résultat des hypothèses théoriques sur lesquelles le modèle électrogéométrique est basé. L'une de ces hypothèses est que le sol soit parfaitement conducteur. Cependant on trouve des difficultés pour justifier le mot « parfait » dans la réalité. En effet, la terre présente généralement des caractéristiques électrologiques spécifiques (conductivité, discontinuités...). C'est là qu'est centrée l'activité du Laboratoire de H.T. de l'E.N.P. depuis plusieurs années [FER87][BEL94][RAH96][BOU98][CHO99].

### II.1 COMPOSITION, PERMITTIVITE ET CONDUCTIVITE DU SOL

Dans un volume donné de sol, il est rare que les différents composants du sol soient répartis uniformément. Le plus souvent la structure du sol est stratifiée (composée de plusieurs matériaux).

La valeur de la constante diélectrique des minéraux varie de l'unité à la centaine. Elle est liée à la polarisation électrique des matériaux. La polarisation peut être électronique, ionique ou moléculaire.

Du point de vue de la conductivité, les roches et les minéraux sont classés en trois groupes.

- 1- les conducteurs : minéraux ayant une résistivité de  $10^{-8}$  à  $1\Omega.m$ .
- 2- les semi-conducteurs : minéraux et roches ayant une résistivité de 1 à  $10^7\Omega.m$ .
- 3- les isolants : minéraux et roches de résistivité supérieure à  $10^7\Omega.m$ .

Toutes ces particularités électrogéologiques du sol peuvent modifier les zones d'attraction d'un système de protection contre la foudre [FER87].

## II.2 INFLUENCE DES PROPRIETES ELECTROGEOLOGIQUES DE LA TERRE SUR LA TENSION DE DECHARGE DISRUPTIVE DES INTERVALLES D'AIR TIGE-PLAN

Nous avons jugé utile de présenter d'abord l'influence du type de terre sur les tensions de décharges  $U_{100\%}$ . Ces dernières seront appliquées au système à étudier pour déterminer les zones d'attraction. Nous présentons aussi certains résultats donnant les variations de la tension  $U_{50\%}$  pour différentes configurations de la terre. Nous ne présentons que les résultats ayant une relation avec notre étude.

### II.2.1 Sol homogène

Les résultats des travaux effectués ont montré que les propriétés électrogéologiques du sol ont une grande influence sur la valeur de la tension  $U_{100\%}$ . Le modèle expérimental utilisé est représenté à la figure II.1 [BOU98a].

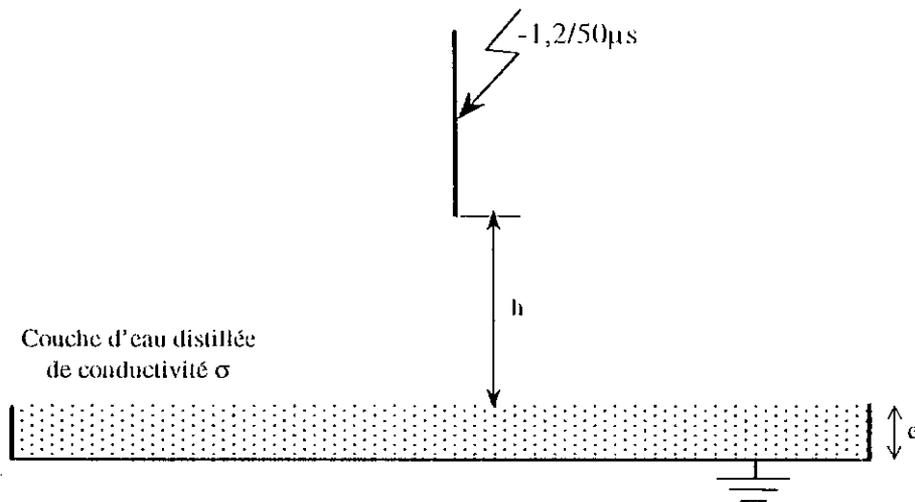


Figure II.1- Modèle expérimental dans le cas de la terre homogène mauvaise conductrice.

Les résultats présentés à la figure II.2 montrent clairement que, pour une même longueur d'intervalle tige-plan, la tension  $U_{100\%}$  augmente de plus en plus que la conductivité du sol s'affaiblit.

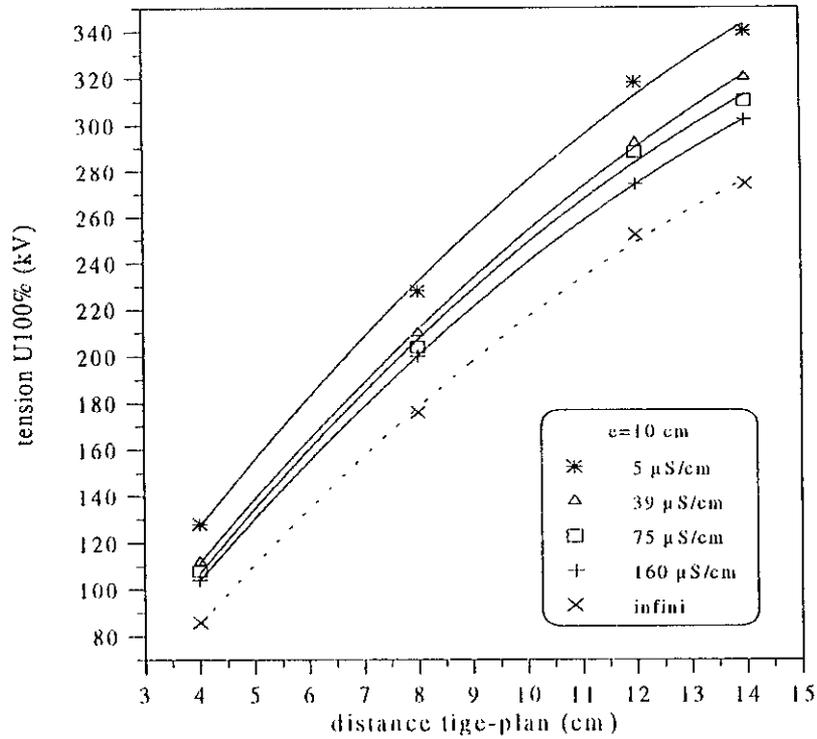


Figure II.2- Influence de la conductivité sur les tensions  $U_{100\%}$

### II.2.2 Sol discontinu

Le modèle expérimental est présenté à la figure II.3

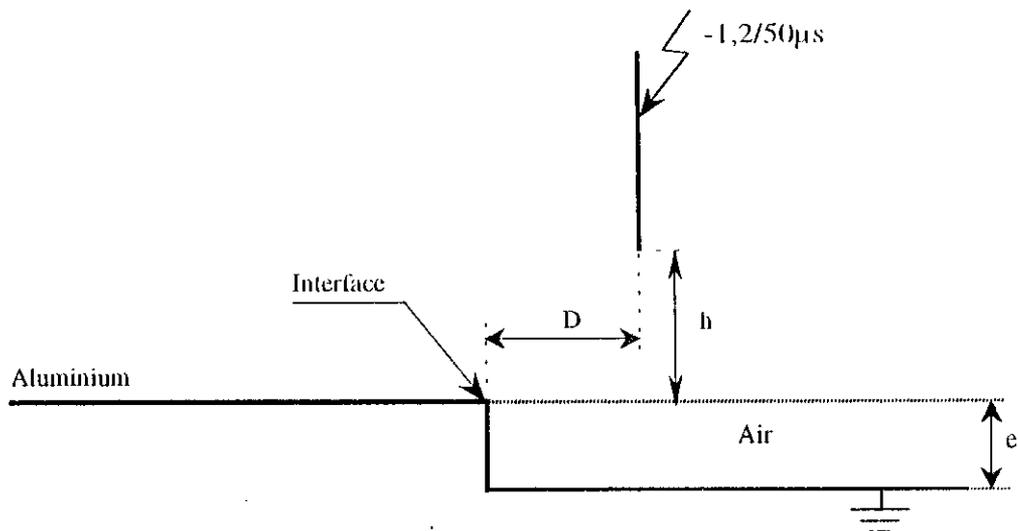
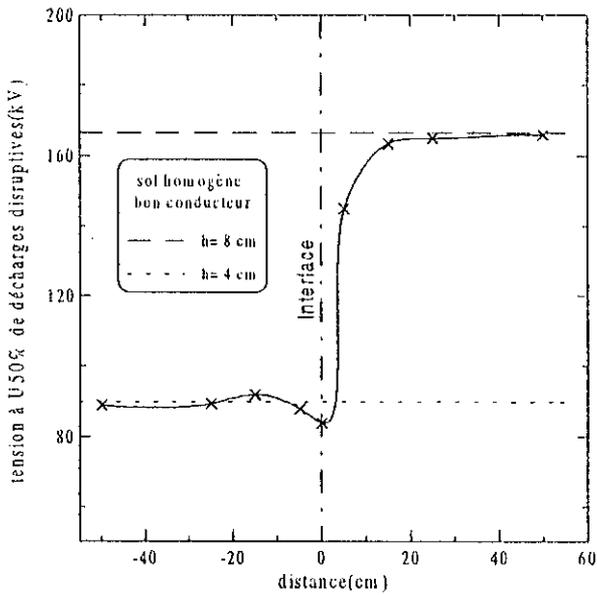
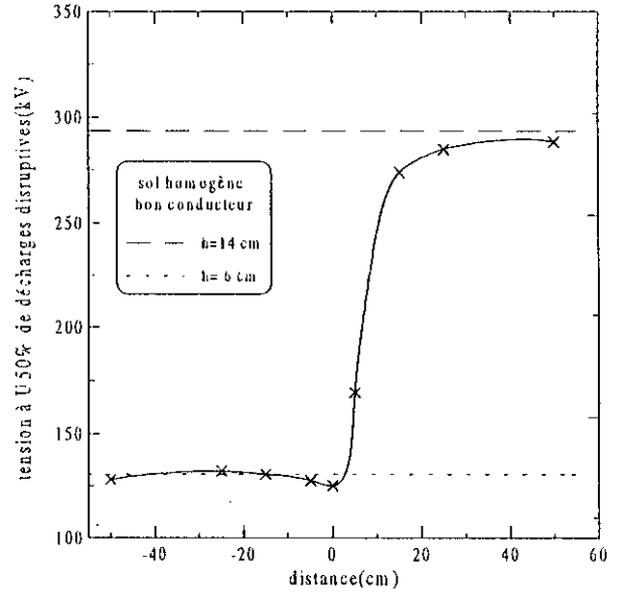


Figure II.3- Modèle expérimental du système tige plan avec sol discontinu.

Dans le cas de la tige négative, la configuration tige-plan avec sol discontinu est caractérisée par trois paramètres : la distance  $D$  entre l'interface et l'axe de la tige de haute tension, la longueur  $h$  de l'intervalle tige-plan et la profondeur  $e$  de l'interface.

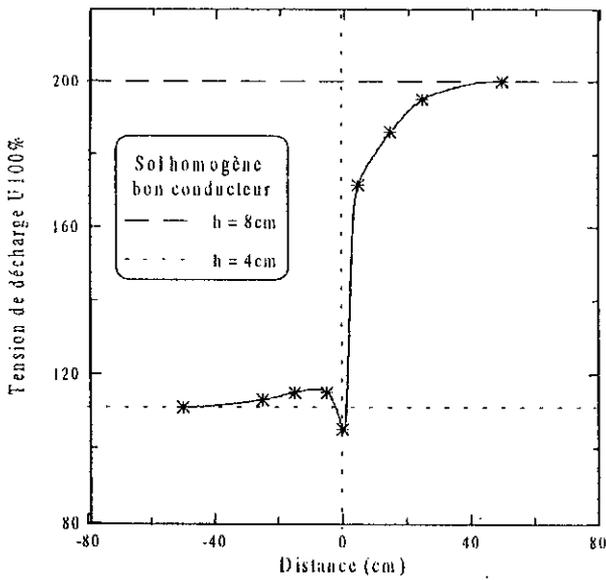


(a)  $e=4\text{cm}$ ,  $h=4\text{cm}$

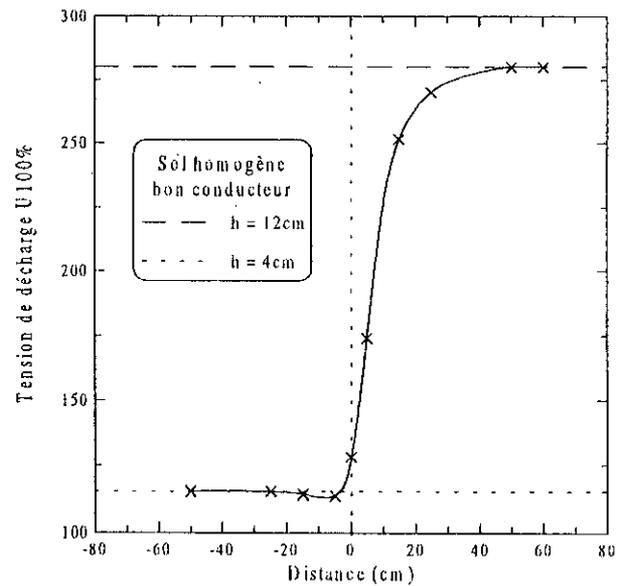


(b)  $e=8\text{cm}$ ,  $h=6\text{cm}$

Figure II.4- Evolution de  $U_{50\%}$  en fonction de la distance  $D$ .



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



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

Figure II.5- Evolution de  $U_{100\%}$  en fonction de la distance  $D$

On peut tirer les conclusions suivantes :

- Pour les grandes distances  $D$ , le comportement de l'intervalle tige-plan avec sol discontinu est similaire au comportement de l'intervalle tige-plan avec sol homogène bon conducteur.
- Au voisinage de l'interface, nous observons une sorte de discontinuité dans l'évolution de la tension  $U_{50}$ . Celle-ci, en diminuant, devient inférieure à la valeur obtenue dans le cas du sol bon conducteur de même longueur.
- L'évolution des tensions  $U_{100\%}$  est pratiquement similaire à celle des tensions  $U_{50\%}$ .
- Au niveau de l'interface, dans le cas de la tige négative, le système se comporte comme un système tige-tige. Or sous tension négative, celui-ci est moins rigide que le système tige-plan [BOU98b][LER 84].

### **II.3 ZONE D'ATTRACTION D'UN PARATONNERRE HORIZONTAL**

Nous présentons les principaux résultats de certains travaux de recherches entrepris dans le domaine des zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal situé au-dessus de différents types de sol [BOU95][BOU96][BOU90][BOU89][RAH96][BOU87].

#### **II.3.1 Sol parfaitement conducteur**

##### **II.3.1.1 Modèle expérimental réduit**

La tête du traceur par bands descendants juste avant le saut final, est simulée par une tige sous haute tension de type choc de foudre négatif  $-1,2/50\mu\text{s}$  et le sol parfaitement conducteur par une plaque d'aluminium mise à la terre [BOU95][BOU95d]. Le diamètre du paratonnerre horizontal varie de 0,4 à 12mm. La tension appliquée engendre toujours une décharge disruptive certaine dans le système sans paratonnerre ( $U_{100\%}$ ). La figure II.6 présente un schéma simplifié du modèle expérimental utilisé lors des essais sur le paratonnerre horizontal dans le cas de terre homogène conductrice.

##### **II.3.1.2 Influence de la hauteur de suspension $h_c$ du paratonnerre horizontal**

Pour un diamètre de paratonnerre constant, plus la hauteur du paratonnerre  $h_c$  diminue, plus la zone d'attraction devient large. Nous donnons à titre d'exemple les zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal de 0,4mm de diamètre obtenues dans le cas de différentes hauteurs de suspension  $h_c$  (figure II.7) [RAH96].

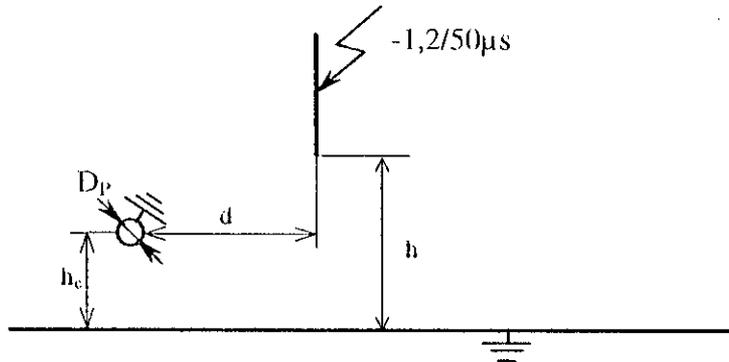


Figure II.6- Modèle expérimental d'un paratonnerre horizontal dans le cas de terre homogène conductrice.

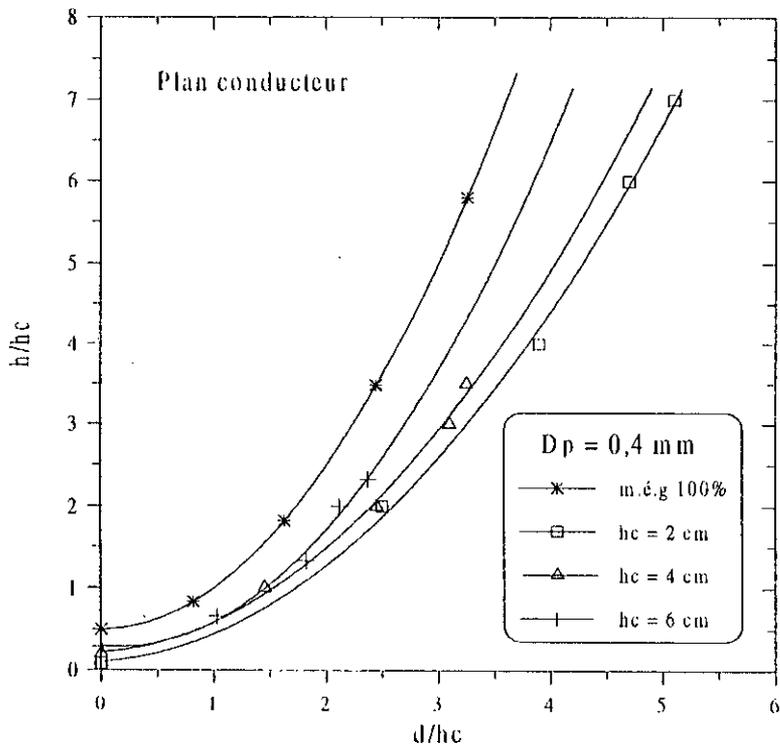


Figure II.7- Influence de la hauteur de suspension du paratonnerre horizontal  $h_c$  sur les zones d'attraction pour une terre homogène conductrice.

### II.3.1.3 Influence du diamètre du paratonnerre horizontal

La zone d'attraction d'un paratonnerre horizontal est influencée par le diamètre de ce dernier. En effet, elle s'élargit si le diamètre  $D_p$  diminue. Mais pour les diamètres  $D_p \geq 8\text{mm}$ , le modèle classique de protection n'est plus vérifié.

D'après les résultats obtenus (figure II.8), la distance relative  $d/h$  tend vers une constante lorsque le rapport  $D_p/h$  augmente. Cela veut dire que la distance  $d$  n'est pas influencée par le diamètre du paratonnerre à partir d'une certaine hauteur. Cette limite diminue lorsque le rapport  $h/h_c$  augmente [BOU95][BOU96].

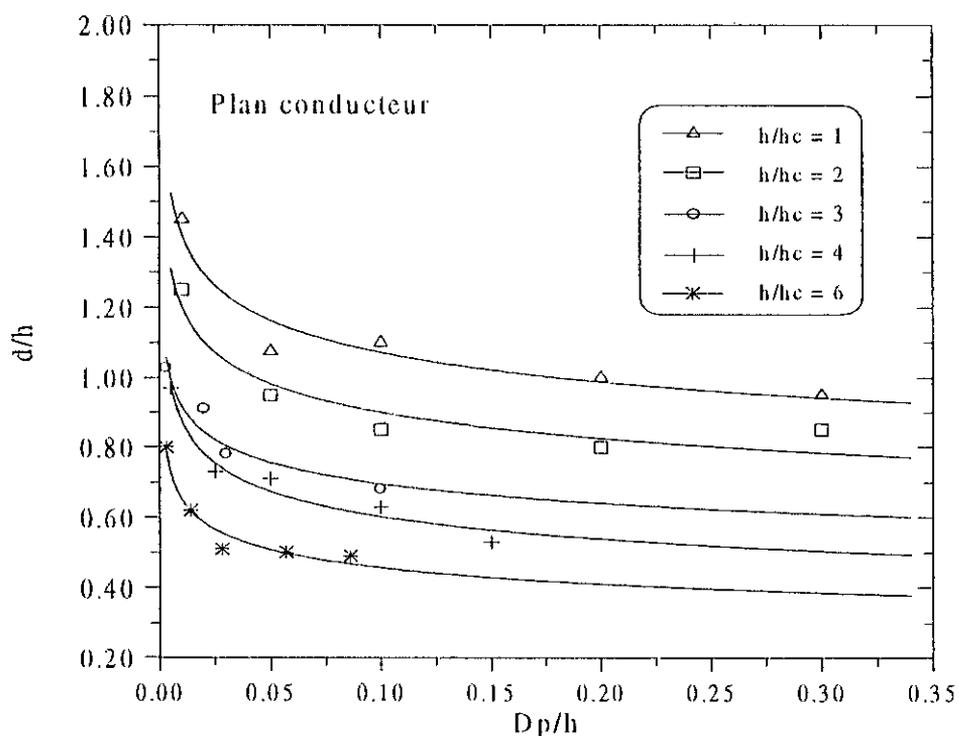


Figure II.8- Influence du diamètre du paratonnerre horizontal.

## II.3.2 Cas d'une terre hétérogène

### II.3.2.1 Modèle expérimental

Le modèle représentant la terre hétérogène (Figure II.9) est constitué de deux types de sol, l'un est bon conducteur (Aluminium) et l'autre est mauvais conducteur (sable) [BOU87][BOU90].

On distingue deux cas principaux, le premier relatif au paratonnerre au-dessus du sable et le second au paratonnerre au-dessus de l'acier.

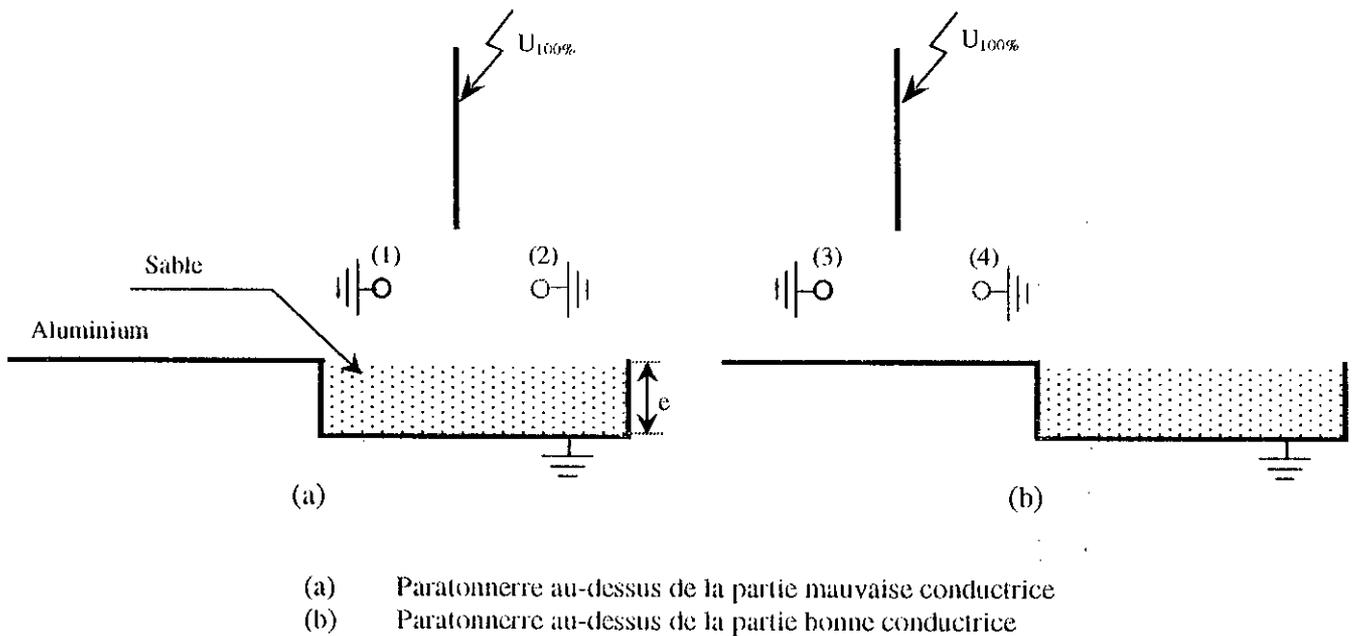


Figure II.9- Configurations d'une terre hétérogène.

### II.3.2.2 Zone d'attraction du paratonnerre

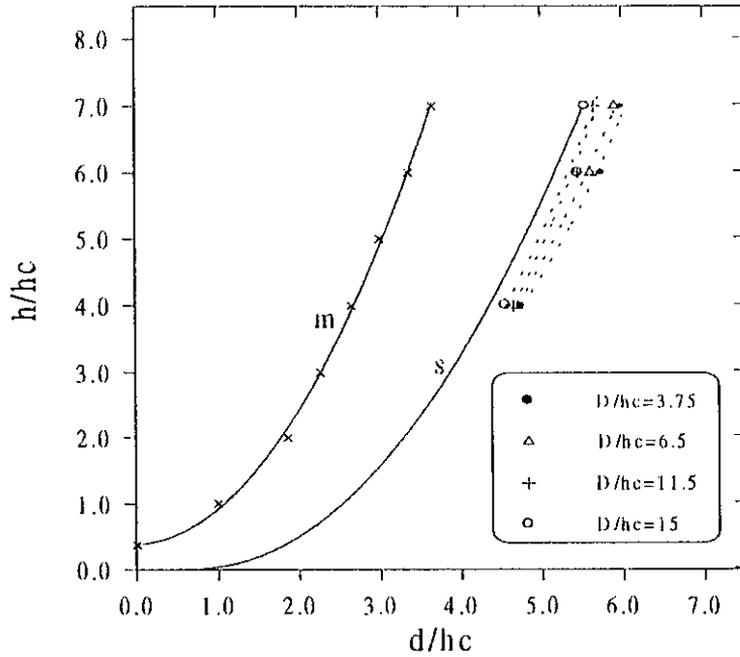
#### (a) Paratonnerre situé au-dessus du sable

Les résultats obtenus ont permis de constater que les zones d'attraction du paratonnerre horizontal dans la position 1 (figure II.9) sont plus étendues que celle du sol mauvais conducteur. De plus, les zones s'approchent de la zone définie par le modèle électrogéométrique (cas mauvais conducteur) avec l'augmentation de  $D/h_c$  (figure II.10).

Dans la position 2 (figure II.9), les zones d'attraction sont situées entre les deux zones définies par le modèle électrogéométrique dans le cas du sol homogène conducteur et mauvais conducteur (figure II.11) [BOU90][BOU89].

#### (b) Paratonnerre situé au-dessus du sol conducteur

Dans le cas où le paratonnerre est à la position (3) de la figure (II.9), les zones d'attraction sont plus réduites que celle définie par le modèle électrogéométrique dans le cas du sol homogène parfaitement conducteur et par conséquent le modèle électrogéométrique ne serait plus vérifié (figure II.12). Cependant, les zones d'attraction du paratonnerre horizontal dans la position (4) sont plus larges que celle définie pour une terre homogène conductrice (figure II.13).



m : Zone d'attraction au-dessus du sol homogène en acier.  
 s : Zone d'attraction au-dessus du sol homogène constitué du sable.

Figure II.10- Zones d'attraction du paratonnerre au-dessus du sable et compris entre l'axe de la tige et l'interface.

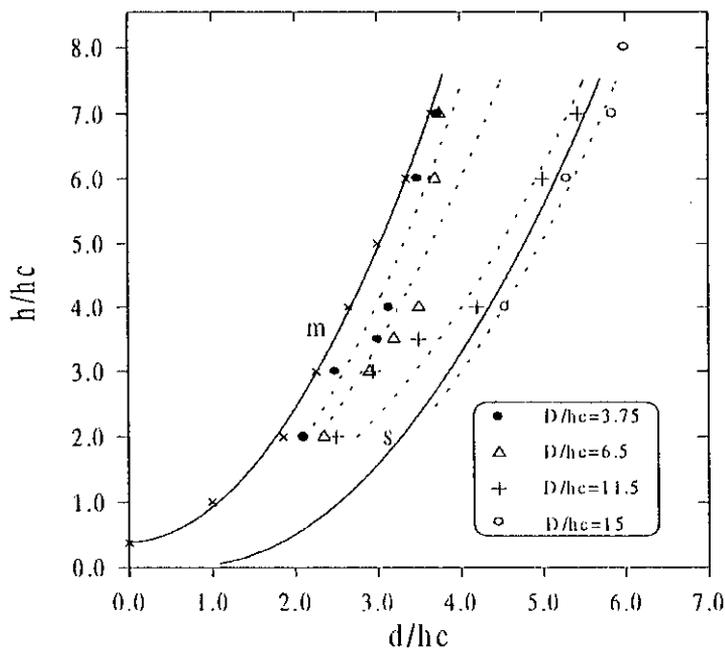
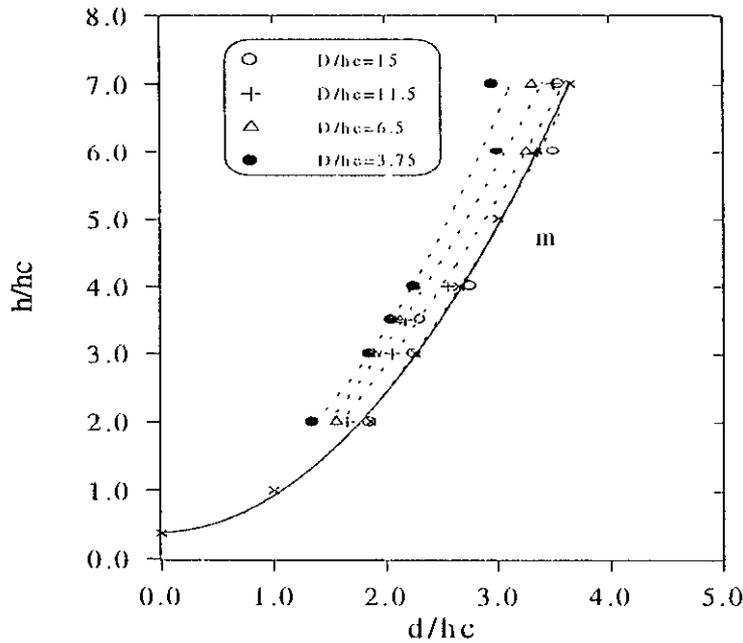
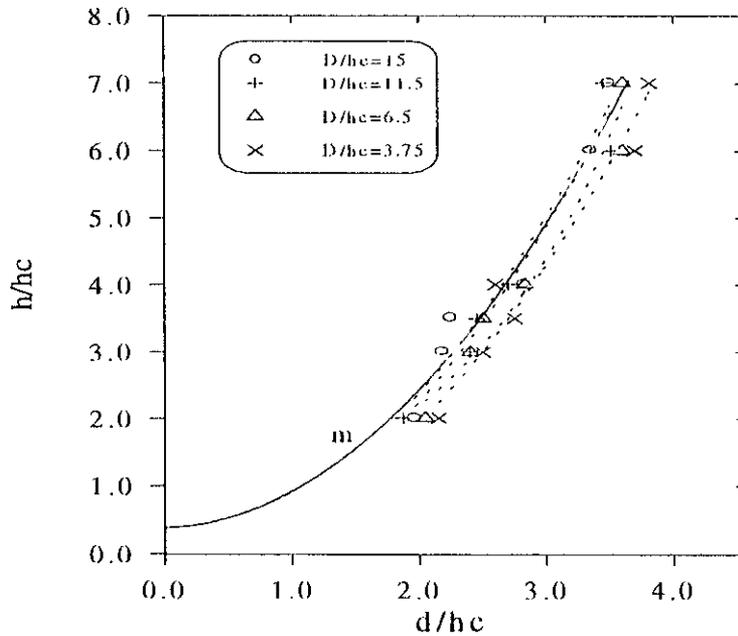


Figure II.11- Zones d'attraction du paratonnerre au-dessus du sable, et l'axe de la tige situé entre l'interface et le paratonnerre.



m : Zone d'attraction au-dessus du sol homogène en acier.

Figure II.12- Zones d'attraction du paratonnerre au-dessus de l'acier et la tige entre l'interface et le paratonnerre.



m : Zone d'attraction au-dessus du sol homogène en acier.

Figure II.13- Zones d'attraction du paratonnerre au-dessus de l'acier et compris entre la tige l'interface.

### II.3.3 Cas de terre homogène mauvaise conductrice

#### II.3.3.1 Modèle expérimental

La terre mauvaise conductrice est simulée par une couche de sable ou d'eau distillée, d'épaisseur (e). Au-dessous de cette couche, il y a une plaque métallique mise à la terre (Figure II.14)

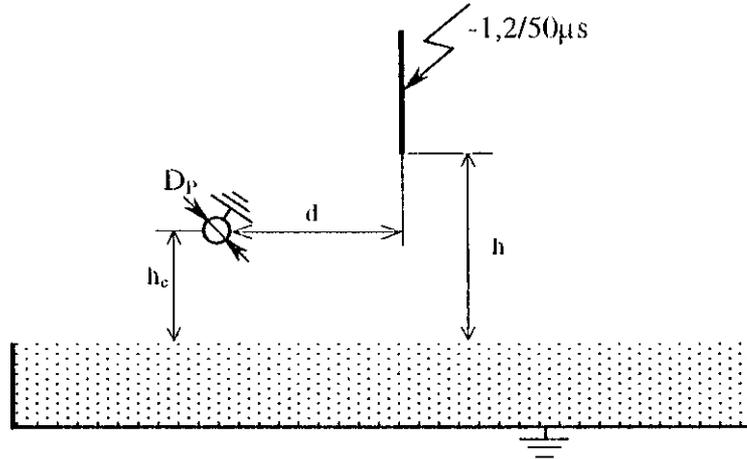


Figure II.14- Modèle expérimental d'un paratonnerre horizontal dans le cas d'une terre homogène mauvaise conductrice

#### II.3.3.2 Zone d'attraction du paratonnerre

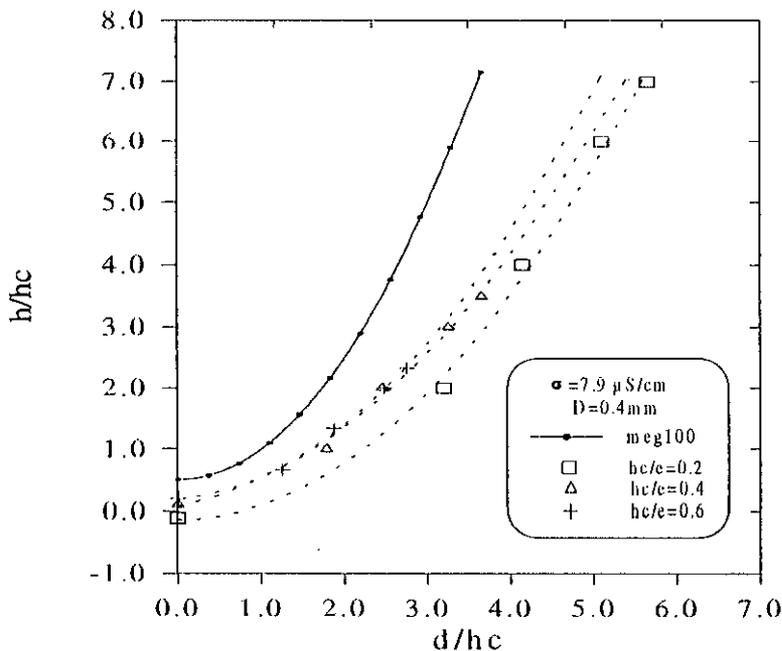


Figure II.15- Influence de l'épaisseur (e) sur les zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal

Certains travaux ont permis de vérifier que la zone d'attraction dépend particulièrement du rapport ( $h/e$ ). En effet, pour un diamètre constant du paratonnerre, la zone de capture s'élargit progressivement quand ( $h/e$ ) diminue (figure II.15) [BOU92] [BOU94] [BEL96].

#### II.4 ELABORATION D'UN MODELE DE PROTECTION EQUIVALENT

En respectant le principe du modèle électrogéométrique classique, un modèle équivalent a été élaboré. Ce dernier donne une expression reliant la terre bonne conductrice et la terre mauvaise conductrice. Dans ce but, on définit un niveau de terre fictive ( $e'$ ). Cette conception permet d'élargir la définition du modèle électrogéométrique. Ainsi, une équation de la parabole qui délimite la zone de protection pourrait être écrite (équation II.1) :

$$X^2 - 2Y \left( 1 + \frac{e'}{h_c} \right) + 1 - \left( \frac{e'}{h_c} \right)^2 = 0 \quad (II.1)$$

$$X = d/h_c, \quad Y = h/h_c$$

La résolution de cette équation donne le niveau de terre fictive :

$$\frac{e'}{h_c} = \sqrt{(Y-1)^2 + X^2} - Y \quad (II.2)$$

D'après ce résultat, quand le rapport ( $e'/h_c$ ) tend vers zéro, on retrouve la zone d'attraction définie par le modèle électrogéométrique classique. Ceci correspond aux cas des terres homogènes à conductivité élevée et/ou de faible épaisseur par rapport aux dimensions du paratonnerre. Cependant, quand ce rapport devient grand, on obtient des zones d'attraction plus larges [BOU92][BOU93][BOU94][BOU95][BOU96][BOU97].

La figure II.16 montre la variation du niveau de terre fictive  $e'/h_c$  en fonction de la conductivité pour un diamètre de 12mm. Nous constatons que plus la conductivité du sol augmente, plus le niveau relatif de terre fictive diminue et tend vers celui du sol parfaitement conducteur.

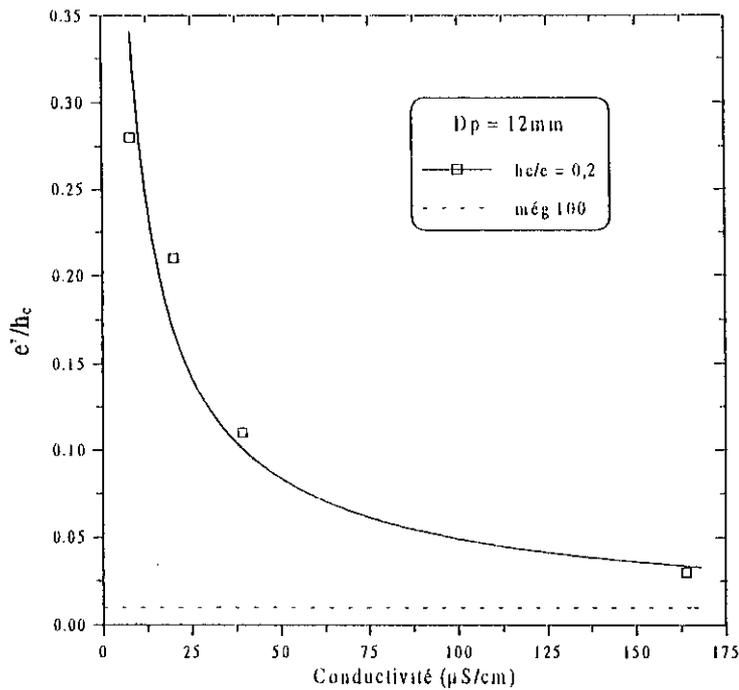


Figure II.16– Influence de la conductivité sur le niveau de terre fictive.

## II.5 ZONE D'ATTRACTION D'UN PARATONNERRE VERTICAL DANS LE CAS D'UNE TERRE DISCONTINUE

L'étude faite par A. Chouchou [CHO99][BOU00] a pour but d'étudier l'influence de la discontinuité de la terre sur les zones d'attraction d'un paratonnerre vertical. Nous présentons succinctement les principaux résultats obtenus dans les différentes configurations étudiées afin que nous puissions les comparer aux nôtres dans le cas du paratonnerre horizontal.

### II.5.1 Paratonnerre situé sur la partie haute de la terre discontinue, entre l'interface et l'axe de la décharge

Les zones d'attraction obtenues (figure II.17) sont plus larges que celle définie pour un sol homogène bon conducteur. Cet élargissement dépend étroitement du rapport  $D/h_c$ . En effet, pour un rapport  $D/h_c$  égal à 2, la zone d'attraction est la plus éloignée.

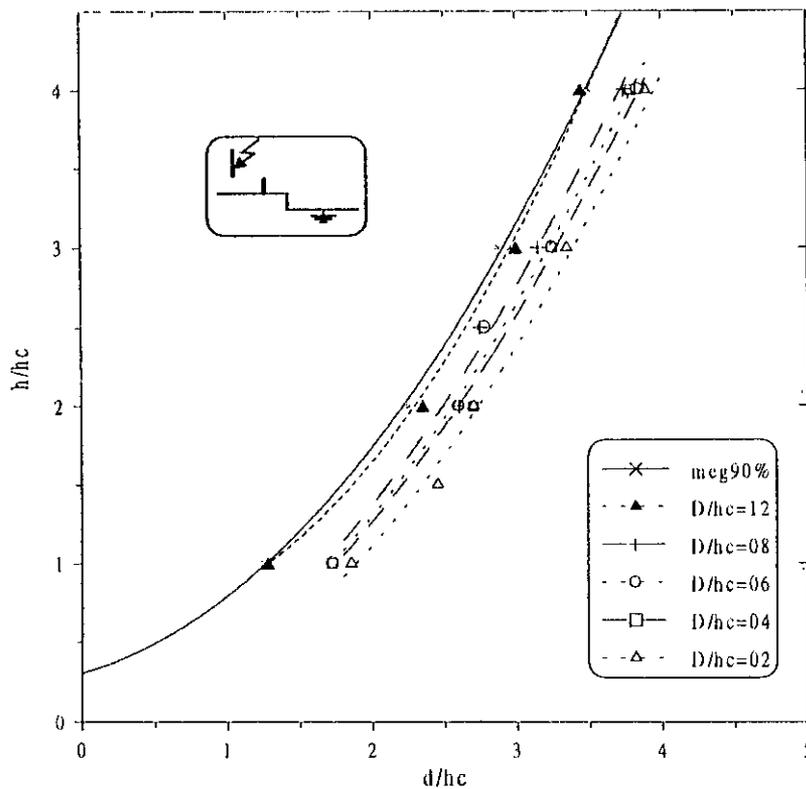


Figure II.17– Zones d'attraction d'un paratonnerre vertical situé sur la partie haute de la terre discontinue, entre l'interface et l'axe de la tige.

La zone d'attraction se rapproche vers celle donnée par le modèle électrogéométrique classique au fur et à mesure que le paratonnerre s'éloigne de l'interface.

Pour cette même configuration, l'étude faite sur l'influence des rapports  $D/h_c$  sur le niveau de terre fictive affirme que ce dernier varie dans le sens inverse de la variation du rapport  $D/h_c$ . Pour  $D/h_c$  suffisamment grand ( $D/h_c = 12$ ), le niveau relatif de la terre fictive  $e'/h_c$  tend vers celui du sol bon conducteur.

### II.5.2 Paratonnerre sur la partie haute de la terre discontinue, et l'axe de la tige situé entre l'interface et le paratonnerre.

Pour les différentes valeurs du rapport  $D/h_c$  utilisées ( $D/h_c$  égal à 4, 6, 8 et 12) (figure II.18), lorsque le paratonnerre est relativement proche de l'interface ( $D/h_c = 4$ ), la zone d'attraction est plus petite que celle définie pour un sol homogène bon conducteur. Dès que le rapport  $D/h_c$  devient supérieur ou égal à 6, l'interface n'a aucun effet sur les zones d'attraction qui deviennent confondues avec celle donnée par le modèle électrogéométrique.

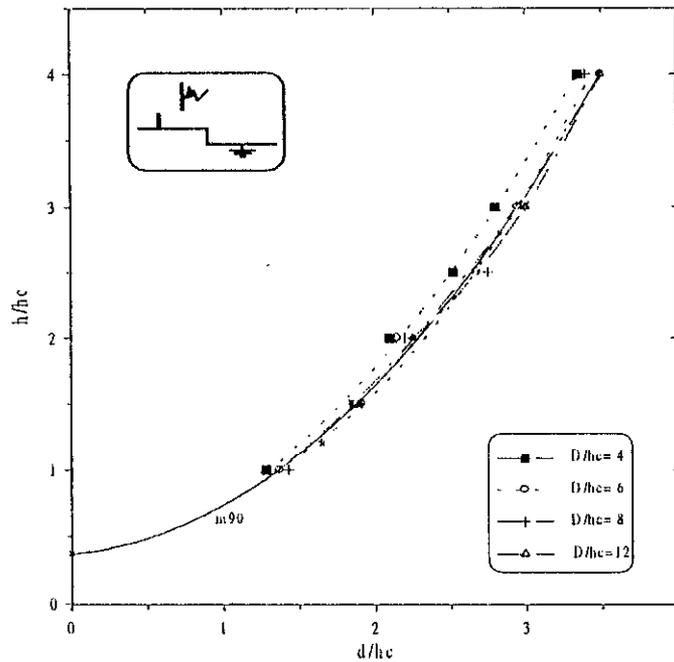


Figure II.18- Zones d'attraction d'un paratonnerre vertical situé sur la partie haute de la terre discontinue et l'axe de la tige situé entre l'interface et le paratonnerre.

### II.5.3 Paratonnerre sur la partie basse de la terre discontinue et l'axe de la tige situé entre l'interface et le paratonnerre.

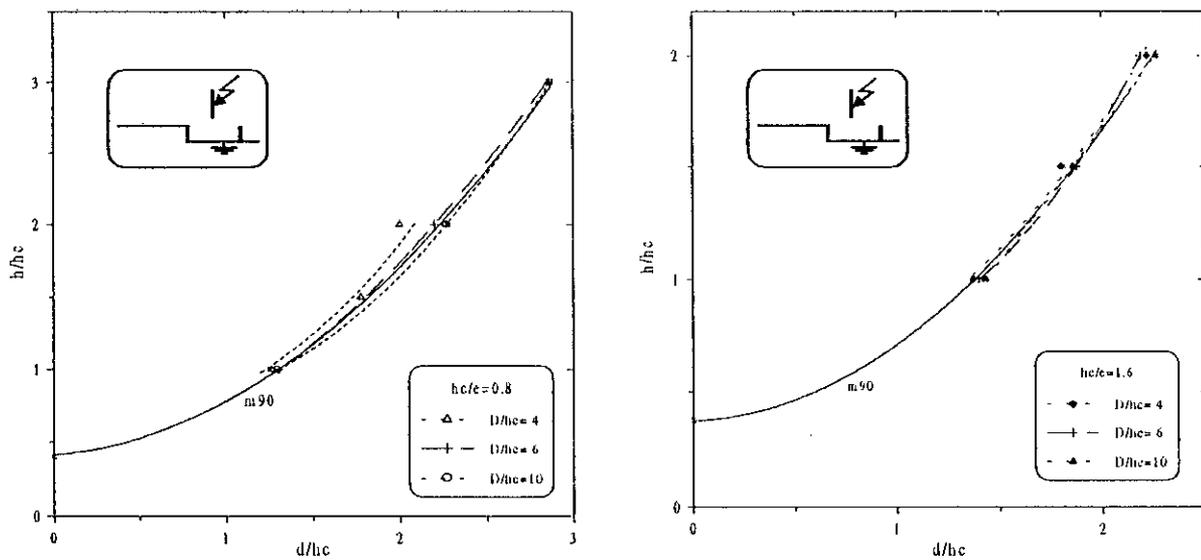


Figure II.19- Zones d'attraction d'un paratonnerre vertical pour les différents rapports  $h_c/\epsilon$

La figure II.19 montre que, plus le paratonnerre s'approche de l'interface, plus sa zone d'attraction devient petite par rapport à celle définie pour un sol homogène parfaitement conducteur. Quand le paratonnerre s'éloigne de l'interface ( $D/h_c \geq 10$ ), la zone d'attraction devient confondue avec celle donnée par le modèle électrogéométrique classique. Cette constatation a été vérifiée pour un rapport  $h_c/e$  égal à 0,4, 0,8 et 1,2. Pour  $h_c/e=1,6$ , il n'y a pratiquement aucune influence de l'interface sur l'attraction des décharges par le paratonnerre.

### II.5.3.1- Influence du rapport $h_c/e$ sur les zones d'attraction du paratonnerre

L'influence de l'interface sur les zones d'attraction est nettement établie lorsque le paratonnerre est situé très proche de l'interface ( $D/h_c=4$ ). En effet, les zones d'attraction sont plus petites que celle donnée par le modèle électrogéométrique. Pour ce cas, plus le rapport  $h_c/e$  diminue, plus la zone d'attraction est petite. Pour un rapport  $h_c/e$  égal à 1,6, la zone d'attraction est confondue avec celle définie pour un sol homogène conducteur. Pour un rapport  $D/h_c$  égal à 10, aucune influence de l'interface n'a été constatée quelle que soit la valeur de  $h_c/e$  (figure II.20).

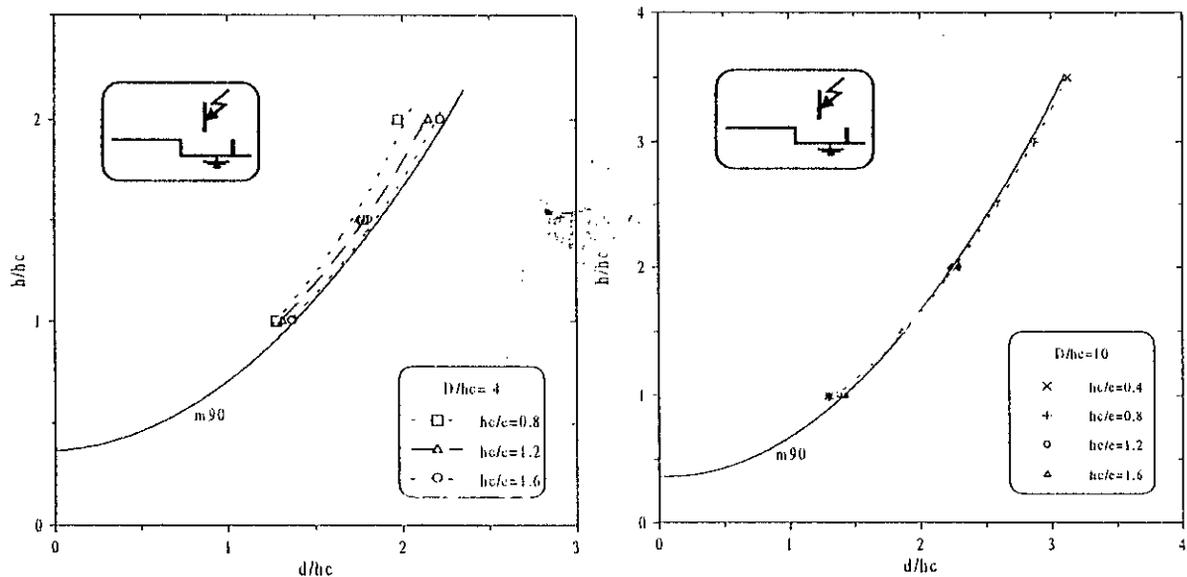


Figure II.20- Influence du rapport  $h_c/e$  sur les zones d'attraction du paratonnerre.

### II.5.4 Paratonnerre situé sur la partie basse de la terre discontinue entre l'axe de la décharge et l'interface

Pour un rapport  $h/e < 1$ , les zones d'attraction sont plus larges que celle définie par le modèle électrogéométrique. Cependant la plus grande zone a été obtenue avec  $h/e = 0,4$ . Lorsque ce rapport devient supérieur à l'unité, il n'y a pas d'influence de l'interface sur les zones d'attraction (figure II.21)[BOU00].

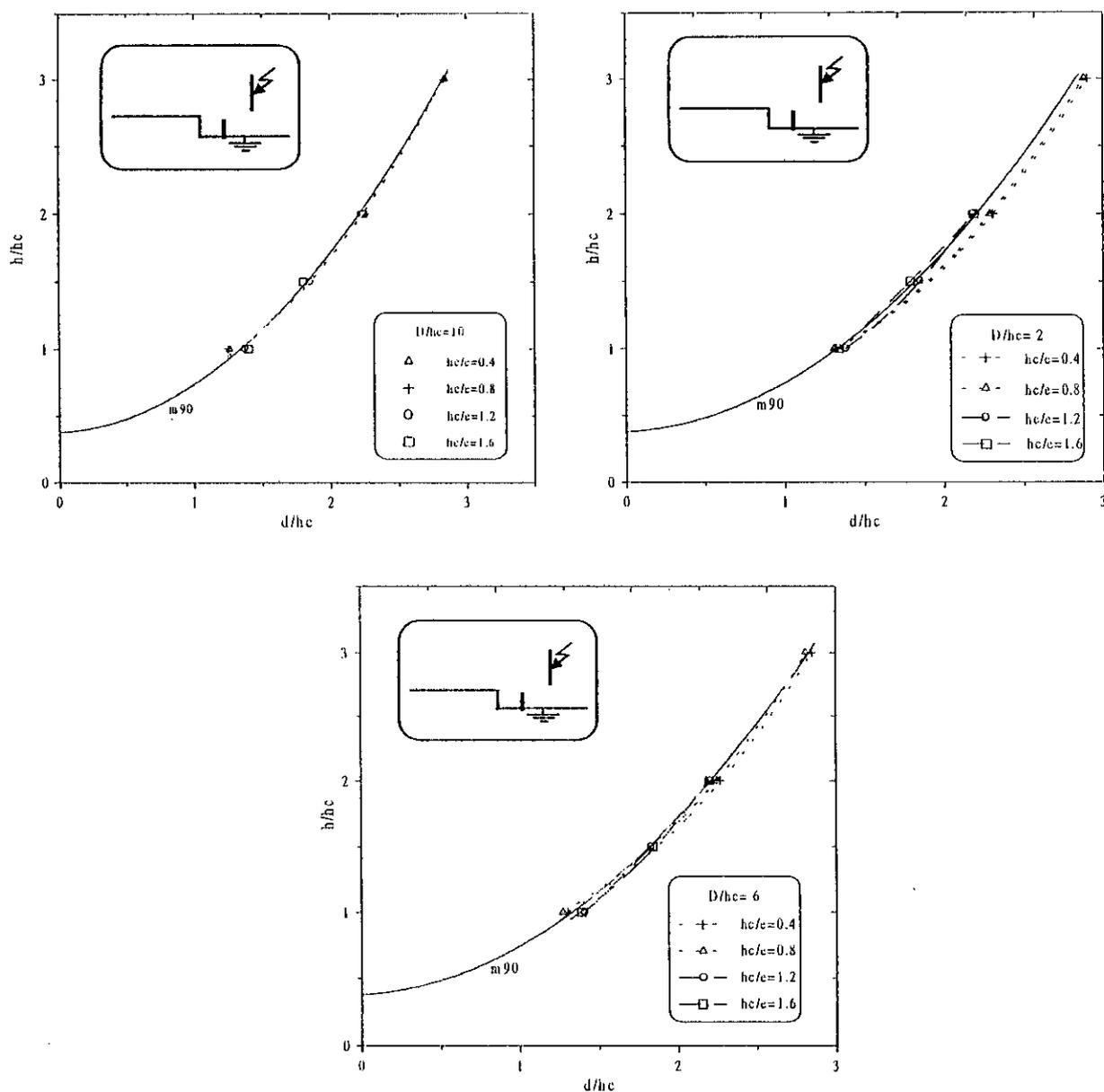


Figure II.21- Influence du rapport  $hc/e$  sur les zones d'attraction du paratonnerre.

## Conclusion

Arrivés au terme de cette synthèse bibliographique, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- Les zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal dans le cas d'un sol parfaitement conducteur dépendent beaucoup de la hauteur de suspension ( $h_c$ ) et du diamètre ( $D_p$ ) du paratonnerre. En effet, elles s'élargissent, par rapport à la zone définie par le modèle électrogéométrique, si  $h_c$  et  $D_p$  sont faibles.
- Dans le cas des terres hétérogènes, l'interface a une influence importante sur l'attraction des décharges de foudre. Si le paratonnerre horizontal est situé sur la partie bonne conductrice entre l'axe de la décharge et l'interface, les zones d'attraction sont plus réduites que celle définie pour une terre homogène conductrice.
- Dans le cas d'une terre homogène mauvaise conductrice, [BOU93][BEL94][BOU96], les zones d'attraction sont plus larges que celle définie par le modèle électrogéométrique. Cet élargissement dépend de la conductivité de la terre et du rapport entre la hauteur du paratonnerre et l'épaisseur de la couche mauvaise conductrice. Dans ce cas un modèle de protection élargi a été élaboré [BOU93][BOU94]. D'après ce modèle, la terre mauvaise conductrice est équivalente à une terre bonne conductrice où toutes les distances verticales sont majorées d'une certaine valeur correspondant au niveau de terre fictive « e' ».
- L'influence de la discontinuité de la terre sur les zones d'attraction d'un paratonnerre vertical, dépend en premier lieu de la position de l'axe de la décharge par rapport à l'interface et au paratonnerre.
- Outre la position du paratonnerre, l'influence de la discontinuité de la terre dépend de la grandeur relative de la hauteur du paratonnerre par rapport à la profondeur de la partie basse de la terre.

# Chapitre III

## TECHNIQUES EXPERIMENTALES

Les essais présentés dans ce mémoire ont été réalisés au Laboratoire de Haute Tension de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger. Nous présentons succinctement dans cette partie les différents dispositifs utilisés au cours des essais effectués.

### III.1 GENERATION DES ONDES DE CHOC

#### III.1.1 Générateur de chocs :

Le générateur de choc est de type Marx (figure III.1), ayant les caractéristiques suivantes :

- Nombre d'étages = 8
- Tension nominale = 600 kV
- Energie = 4 kJ

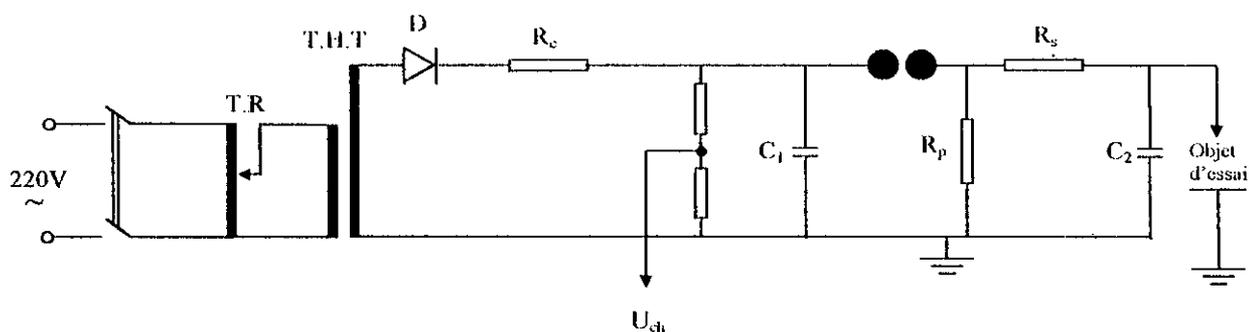


Figure III.1- Schéma simplifié d'un étage d'un générateur de choc [AGU87]

Avec :

T.R : Transformateur de réglage

T.H.T: Transformateur de haute tension

D : Redresseur

$R_c$  : Résistance de charge

$R_s$  : Résistance série équivalente

$R_p$  : Résistance parallèle équivalente

$C_1$  : Condensateur de choc

$C_2$  : Condensateur de charge

La tension continue destinée à la charge du générateur de choc est fournie par un redresseur D de tension monophasée. Une résistance destinée à limiter le courant de charge à une valeur admissible est placée en série avec le redresseur. Ce dernier est alimenté par un transformateur de haute tension (T.H.T).

La charge des condensateurs de choc s'effectue à travers des résistances  $R_c$ . Les éclateurs à sphère de tous les étages sont étalonnés à un écartement égal. Ce dernier est fixé en fonction du niveau de tension de charge appliquée.

Au cours de la charge des condensateurs, la tension aux bornes des éclateurs à sphères augmente. Lorsque les éclateurs sont amorcés, chaque condensateur se décharge à travers les résistances  $R_s, R_p$  [DOB72][AGU87]. La tension générée appliquée à l'objet d'essais est égale à la tension au borne d'un étage multipliée par le nombre d'étages qui est égale à 8 dans notre cas. Le rendement du générateur, donné par le constructeur, est de 0,98.

### III.1.2 Tension de choc délivrée

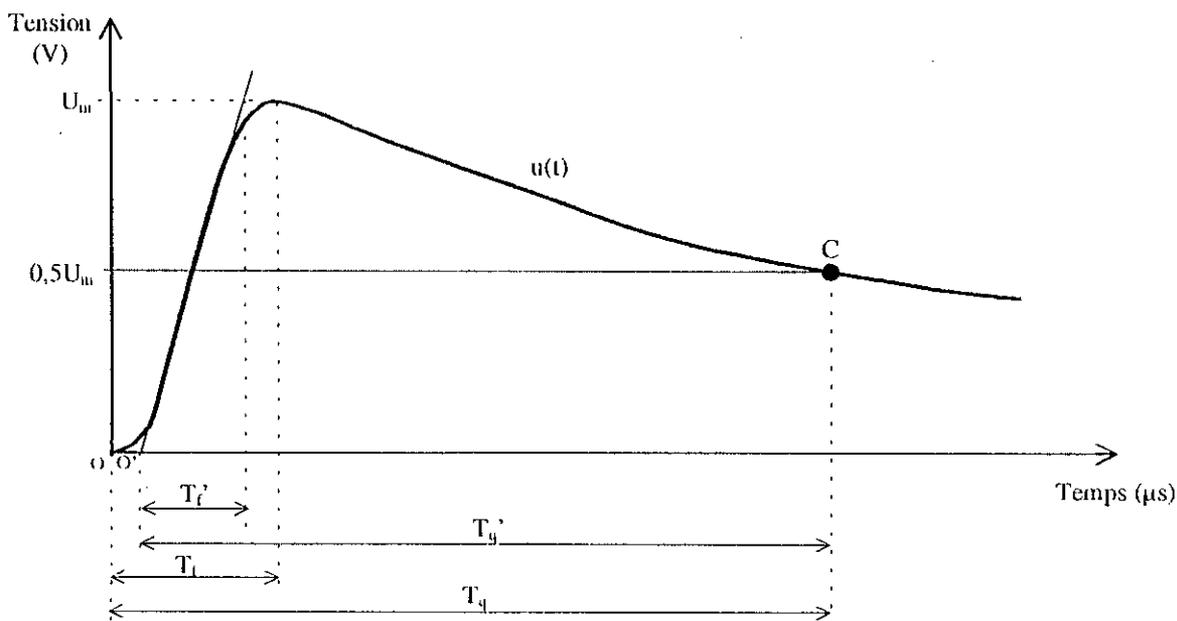
La tension délivrée par le générateur de choc, simulant les surtensions d'origine atmosphérique, est une impulsion unipolaire bi-exponentielle dont la forme est normalisée conformément aux recommandations de la CEI [CEI60]. Ces ondes se définissent par les paramètres suivants:

- La constante de temps de front  $T_f$
- La constante de temps de mi-amplitude  $T_q$
- L'amplitude maximum  $U_m$

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

$$U(t) = U_m [\exp(-t/T_q) - \exp(-t/T_f)] \quad (III.1)$$

La CEI donne l'onde de forme normalisée dite « choc 1,2/50 µs » comme l'onde la plus adoptée pour les essais en chocs de foudre. Le temps de front  $T_f$  de cette onde est de 1,2 µs et le temps de mi-amplitude  $T_q$  est de 50 µs. En effet, le choc 1,2/50 µs simule assez bien la forme d'un courant de foudre sévère [GAR94][SAB99].



- |                                     |  |
|-------------------------------------|--|
| $o$ : origine de la tension de choc | $o'$ : origine conventionnelle de la tension de choc |
| $T_f$ : durée du front              | $T_f'$ : durée du front                              |
| $T_q$ : durée de mi-amplitude       | $T_q'$ : durée conventionnelle de mi-amplitude       |

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

### III.2 DETERMINATION DE LA TENSION $U_{100\%}$

La tension  $U_{100\%}$  est la tension pour laquelle on a une disruption certaine de l'intervalle d'air entre les deux électrodes du système à étudier. Pour déterminer cette tension, la méthode des paliers multiples constants a été appliquée. Elle consiste à appliquer trois paliers de tension différents avec application de 20 chocs par palier. Le temps entre deux chocs successifs est de l'ordre de 30 secondes. Plus le nombre de paliers appliqué est grand plus l'interpolation des points sera meilleure et donc une bonne précision lors de l'extrapolation pour déterminer  $U_{100\%}$ . En effet, cette dernière correspond à la fréquence de décharge de 99,9% sur une échelle gausso-arithmétique.

Les fréquences de décharge en fonction des tensions d'essais correspondantes sont généralement distribuées selon une régression linéaire sur une échelle Gausso-arithmétique. Ceci correspond à ce qu'ont obtenu d'autres auteurs [BEL94][RAH96][BOU98][CHO99]. La distribution normale a été donc vérifiée et admise dans notre présente étude.

#### III.2.1 Modèle expérimental sans paratonnerre

Comme il a été mentionné plus haut, nous avons appliqué au système tige-plan, dont la tige est soumise à une onde de choc de polarité négative  $-1,2/50\mu\text{s}$  et le plan mis à la terre, des niveaux de tension différents. Pour chaque niveau, nous comptons le nombre de chocs engendrant une décharge disruptive  $N_d$  et ceux qui engendrent des tenues  $N_t$ .

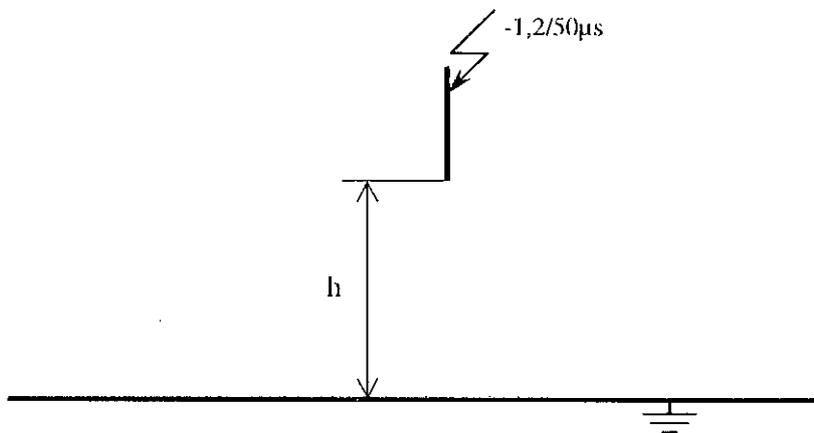


Figure III.3- Système tige-plan sans paratonnerre

Ainsi, à un palier constant  $U_k$  correspond une fréquence de décharge égale au nombre de décharges disruptives divisé par le nombre de chocs (20).

$$P_k = N_d / 20$$

Les niveaux de tension appliqués sont choisis de telle façon que la fréquence de décharge soit comprise dans l'intervalle  $]0, 1[$ . Ainsi, on a fait appel dans notre cas aux résultats obtenus dans les travaux antérieurs de notre laboratoire [BOU98][CHO99]. Si ce n'est pas le cas, des tensions peuvent être choisies par tâtonnement. Par la suite, les points obtenus sont rapportés sur un papier à échelle gauss-arithmétique et on trace la droite de régression. Par extrapolation de cette dernière, on aura la tension  $U_{100\%}$ .

Pour une hauteur de la tige de haute tension par rapport à la surface de la plaque  $h=14\text{cm}$ , on a obtenu :  $U_{100\%} \approx 344\text{kV}$  ( $U \approx 43\text{kV}$  par étage) (figure III.4).

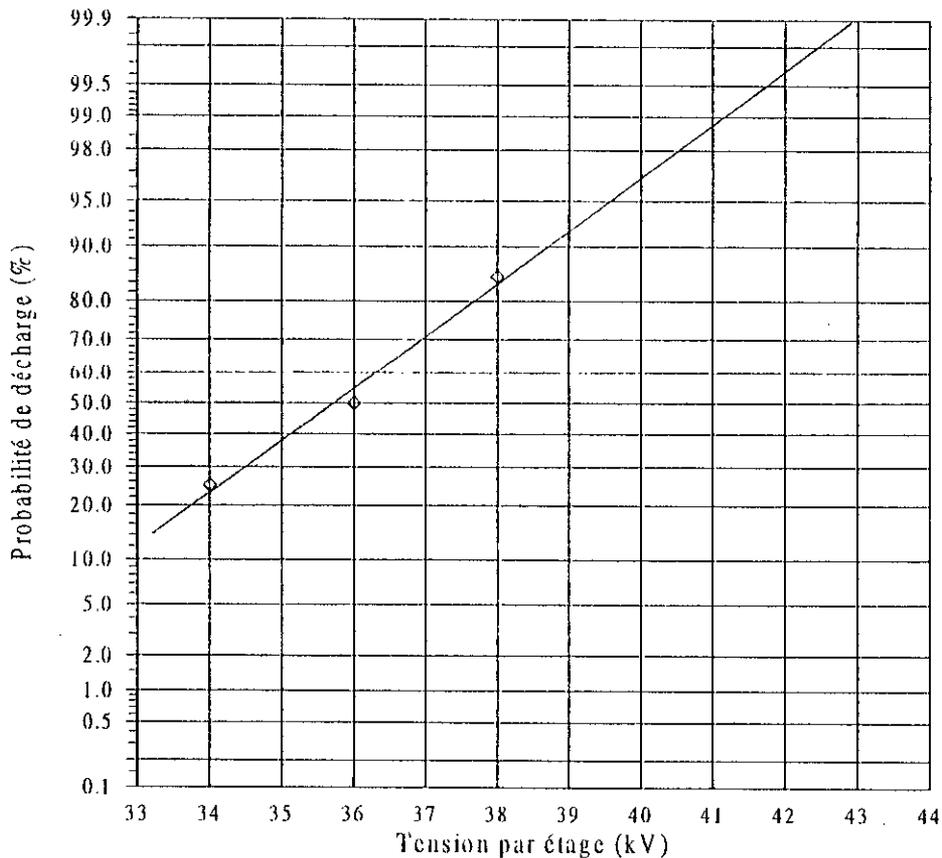


Figure III.4- Détermination de la tension  $U_{100\%}$ .

Le tableau 1 de l'annexe A présente les tensions obtenues pour toutes les hauteurs étudiées ( $h=4, 8, 12$  et  $14$ )

## III.2.2 Corrections atmosphériques

### III.2.2.1 Influence de la densité de l'air

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

- Température ambiante  $T_0 = 20$  °C
- Pression atmosphérique  $P_0 = 1013$  mbar (= 760 mmHg)

$$\delta = 0,289 \frac{P}{273 + T} \quad (\text{III.2})$$

La pression  $P$  est en mbar et la température  $T$  en °C.

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

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

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

### III.2.2.2 Influence de l'humidité

La tension d'amorçage est particulièrement moins sensible au variation de l'humidité dans le cas des ondes rapides ou très rapides, c'est le cas pour les chocs de foudre [BOU98].

**Remarques :**

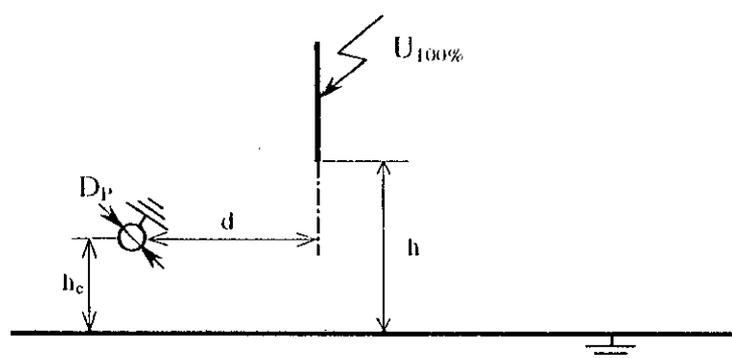
- Nos essais de laboratoire ont été effectués dans les gammes de conditions atmosphériques comprises entre les mesures min. et max. suivantes :

$$\begin{aligned} T_{\min} &= 15^{\circ}\text{C} & ; & \quad T_{\max} = 24^{\circ}\text{C} \\ P_{\min} &= 1000 \text{ mbar} & ; & \quad P_{\max} = 1003 \text{ mbar} \\ H_{\min} &= 55\% & ; & \quad H_{\max} = 58\% \end{aligned}$$

- Conformément à la CEI 60, la correction de la tension mesurée n'est faite que pour la densité relative de l'air ( $\delta$ ).

**III.3 CONFIGURATION EXPERIMENTALES AVEC PARATONNERRE****III.3.1 Terre homogène conductrice**

La terre homogène conductrice est simulée par une plaque en aluminium mise à la terre. La tige de haute tension du système est une tige métallique de 4,8 mm de diamètre. La tige est mise sous tension de choc de polarité négative  $-1,2/50\mu\text{s}$  à l'aide d'un conducteur connecté au générateur de choc. Le paratonnerre est un conducteur cylindrique horizontal de diamètre  $D_p$  égal à 0,5, 0,8, 4, 8, et 12mm.



**Figure III.5-** Modèle expérimental d'une terre homogène conductrice

Une configuration du modèle expérimental d'une terre homogène conductrice est définie par les paramètres suivants :  $D_p$ ,  $h_c$ ,  $h$  et  $d$  avec :

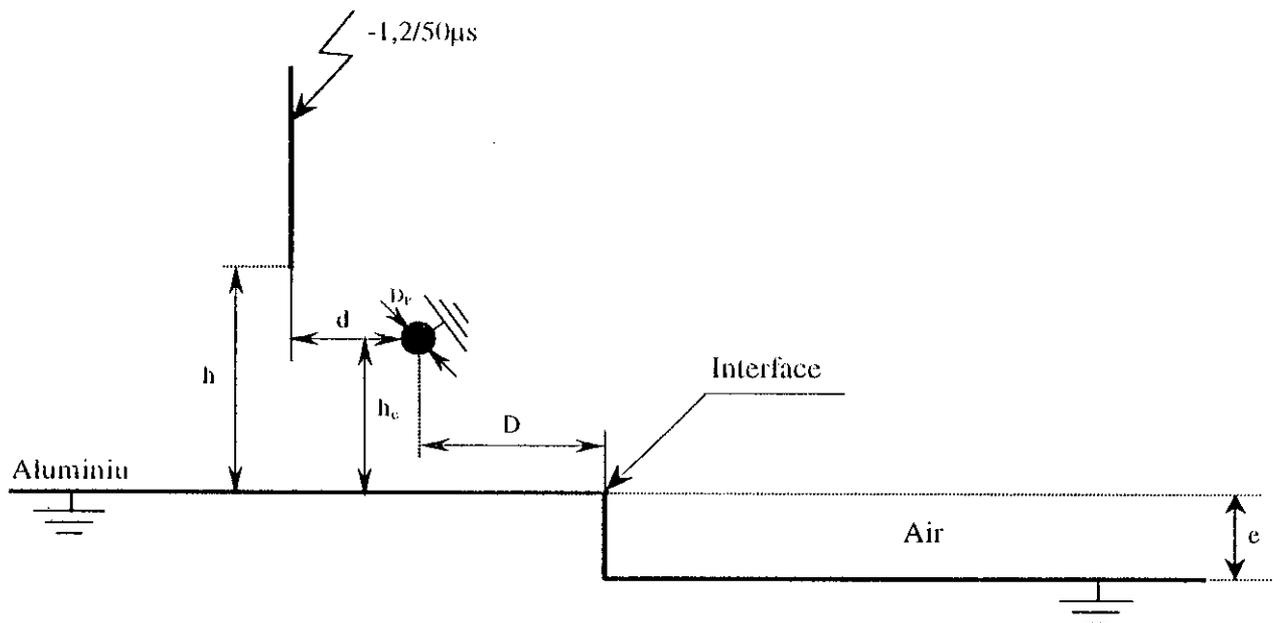
$D_p$  : diamètre du paratonnerre horizontal,

$h_c$  : la hauteur de suspension du paratonnerre horizontal,

**h** : la hauteur de l'électrode de haute tension par rapport à la plaque horizontale,  
**d** : La distance horizontale entre l'axe de la tige et le contour du paratonnerre.

### III.3.2 Terre discontinue

La terre discontinue est constituée de deux plaques en aluminium de 4 mm d'épaisseur ayant chacune une surface de  $1,2 \times 1,2 \text{ m}^2$ . La première (la partie haute) présente à l'une de ses extrémités un coude d'un angle de  $90^\circ$  qui simule l'interface. La deuxième (la partie basse) est une simple plaque horizontale. En joignant les deux parties, la terre de type discontinu aura une surface de  $2,4 \times 1,2 \text{ m}^2$  et une interface perpendiculaire de profondeur «e» (figure III.5). Le paratonnerre horizontal est simulé par un fil tendu parallèlement à l'interface et ayant un diamètre  $D_p$ . Il est relié à la terre à l'une de ses extrémités.



**Figure III.5-** Modèle expérimental de terre discontinue en présence de paratonnerre horizontal.

Comme présentée à la figure III.5, une configuration du modèle d'essais présentant la terre discontinue est définie par les paramètres suivants :  $D_p$ ,  $h_c$ ,  $h$ ,  $e$ ,  $d$  et  $D$  tel que :

**$D_p$**  : diamètre du paratonnerre horizontal,  
 **$h_c$**  : hauteur de suspension du paratonnerre horizontal,

**h** : hauteur de l'électrode de haute tension par rapport à la plaque du modèle d'essais,

**e** : profondeur de l'interface,

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

**D** : distance horizontale entre l'interface et le centre du paratonnerre.

### III.3.3 Configuration du modèle expérimental

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

**1<sup>er</sup> cas** : Paratonnerre situé sur la partie haute de la terre discontinue.

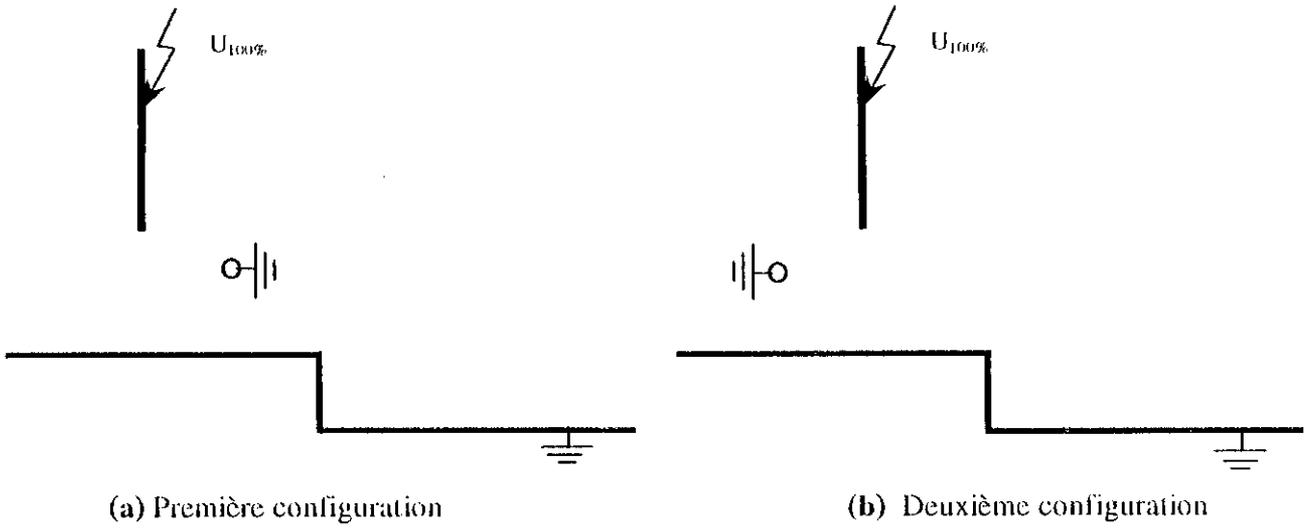
**a- Première configuration** : Paratonnerre horizontal situé entre l'axe de la décharge et l'interface.

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

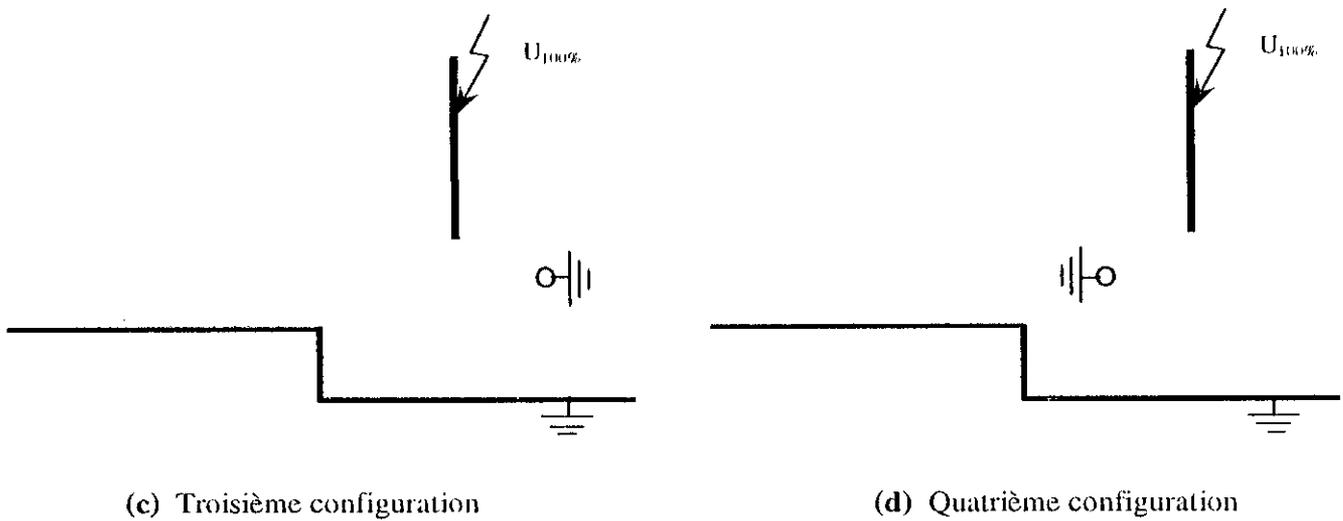
**2<sup>ème</sup> cas** : Paratonnerre situé sur la partie basse de la terre discontinue.

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

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



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



(2) Paratonnerre au dessus de la partie basse de la terre discontinue

Figure III.6- Configurations du modèle expérimental dans le cas de terre discontinue.

### III.4 DETERMINATION DES ZONES D'ATTRACTION POUR UNE TERRE HOMOGENE CONDUCTRICE

Les caractéristiques électriques et géométriques du paratonnerre vertical et horizontal diffèrent. En effet, ce dernier est caractérisé par son diamètre  $D_p$ . Cette caractérisation nous a conduit à déterminer la zone d'attraction dans le cas de terre homogène conductrice pour chaque diamètre. Le modèle expérimental utilisé est celui présenté précédemment (figure III.5).

Nous avons comparé les zones d'attraction obtenues pour une terre homogène conductrice par rapport à celle donnée par le modèle électrogéométrique théorique 100% défini par l'équation ( $X^2-2Y+1=0$ ).

### III.5 DETERMINATION DES ZONES D'ATTRACTION DANS LE CAS DE TERRE DISCONTINUE

#### III.5.1 Détermination des fréquences d'impact

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

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

Dans le but d'une comparaison éventuelle entre nos résultats et ceux obtenus par A. Chouchou [CHO99] nous avons pris dans la majorité des cas les mêmes rapports  $D/h_c$ . Ces derniers dépendent en premier lieu de la configuration de la terre discontinue étudiée.

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

$$f_c = N_c / 50$$

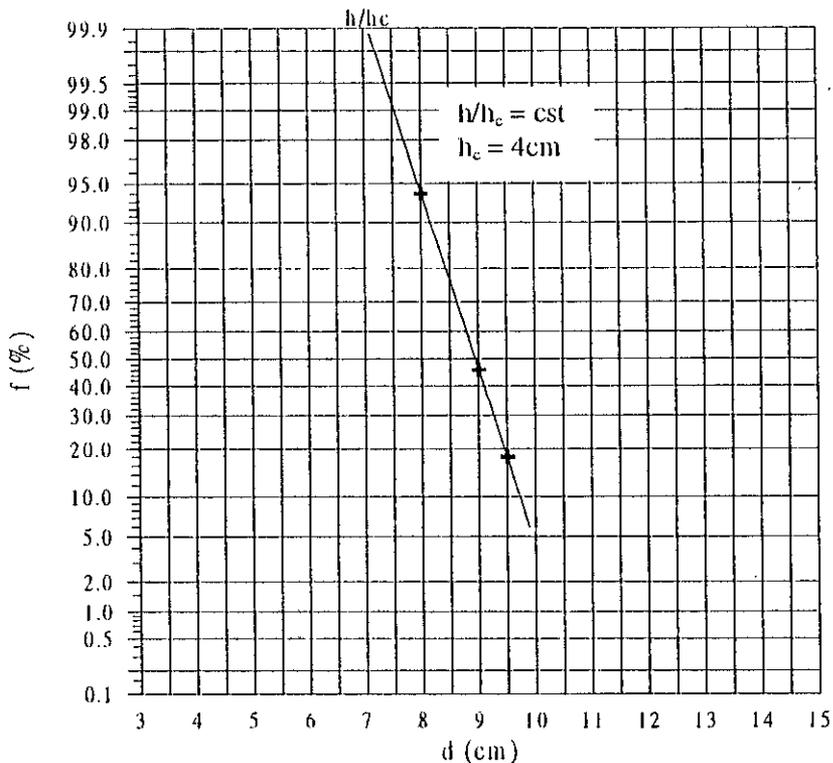
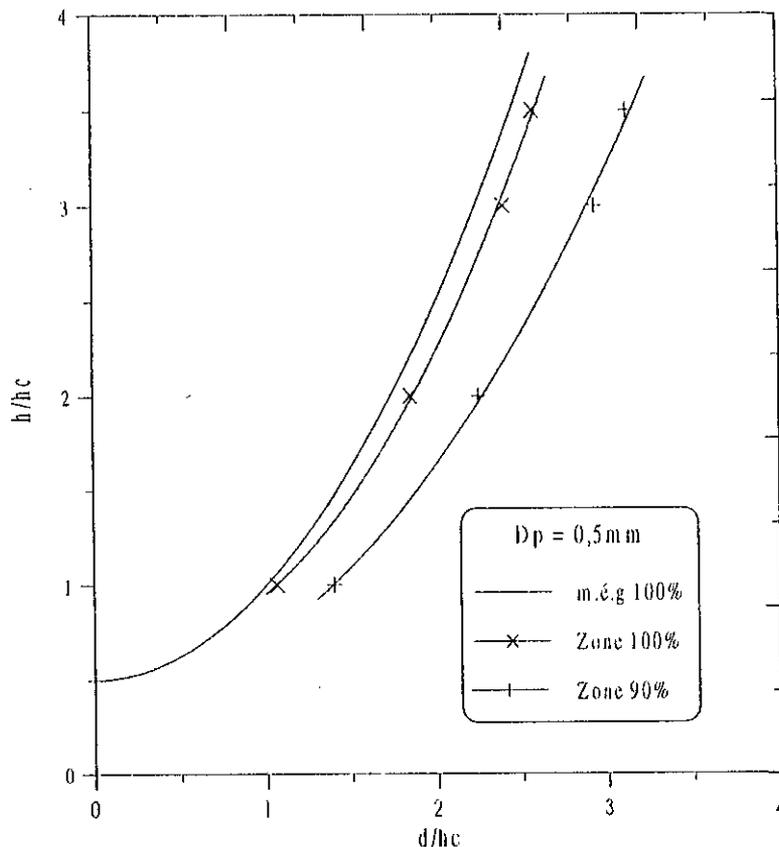


Figure III.7- Détermination des distances  $d_{90\%}$  et  $d_{100\%}$

Dans la majorité des cas, nous avons réalisé les essais pour trois distances  $d$  (distance horizontale entre l'axe de la tige et le paratonnerre horizontal) pour chaque rapport  $h/h_c$ . Ces points sont rapportés sur un papier à échelle Gausso-arithmétique  $f_c = f(d)$  (figure III.7).

### III.5.2 Tracé des zones d'attraction

Nous avons effectué les essais selon la même procédure pour quatre rapports  $h/h_c$ . Finalement, les points  $(d/h_c, h/h_c)$  correspondant à  $d_{90\%}$  et  $d_{100\%}$  permettent de définir la zone d'attraction du paratonnerre horizontal (figure III.8).



**Figure III.8-** Exemple des zones d'attraction obtenues avec des distances  $d_{90\%}$  et  $d_{100\%}$

### III.5.2.1 Influence de la distance relative du paratonnerre par rapport à l'interface

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

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

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

### III.5.2.2 Influence du diamètre du paratonnerre horizontal sur les zones d'attraction

Pour un rapport  $D/h_c$  fixe, nous avons déterminé les zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal de diamètre compris entre 0,5mm et 12mm (0.5mm, 0.8mm, 4mm, 8mm et 12mm). Nous avons comparé les zones d'attraction à celle du modèle électrogéométrique classique correspondant à 100% de décharge au paratonnerre car elle est la seule référence.

Ainsi, nous avons illustré l'influence du diamètre et les rapports  $D/h_c$  sur le niveau de terre fictive. Ce dernier est définie par l'équation (II.2).

# **Chapitre IV**

## **ZONES D'ATTRACTION DU PARATONNERRE HORIZONTAL DANS LE CAS DE TERRE DISCONTINUE**

### **IV.1- INTRODUCTION**

Pour mettre en relief l'influence de l'interface, nous avons déterminé les zones d'attraction du paratonnerre horizontal pour toutes les configurations de la terre discontinue.

Nous avons commencé par étudier la configuration où le sol est homogène. Nous déterminons les tensions de décharge  $U_{100\%}$  pour les différentes hauteurs de l'électrode de haute tension et nous vérifions le modèle électrogéométrique pour tous les diamètres du paratonnerre horizontal étudiés.

De plus, le modèle électrogéométrique théorique vérifié expérimentalement constitue une référence pour les zones d'attraction dans les différentes configurations de terre. Nous nous intéressons aux fréquences de foudroiement de paratonnerre  $f_c = 90\%$  et  $f_c = 100\%$ .

### **IV.2 TERRE HOMOGENE BONNE CONDUCTRICE**

#### **IV.2.1 Influence de h sur les tensions $U_{100\%}$**

Le tableau 1 en annexe A donnant les points expérimentaux obtenus et encore mieux la figure IV.1, présentent la variation des tensions  $U_{100\%}$  en fonction de la longueur d'intervalle d'air entre la tige et le sol homogène bon conducteur. Le système est bien entendu sans paratonnerre.

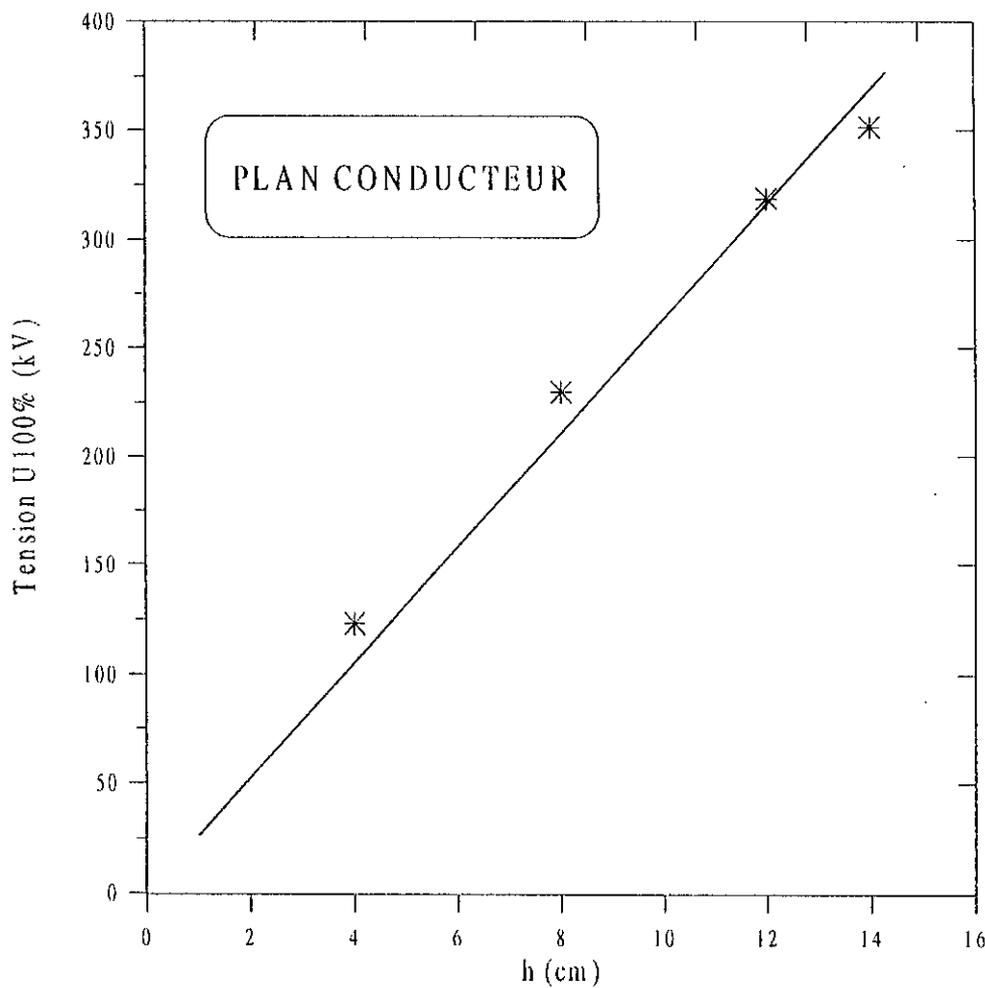


Figure IV.1- Influence de l'intervalle tige-plan (h) sur les tensions U<sub>100%</sub>

Nous remarquons, pour les intervalles étudiés, une augmentation linéaire de pente égale à 1,12 des tensions U<sub>100%</sub> en fonction de la hauteur de l'intervalle tige-plan, h.

La caractéristique de la figure IV.1 permet de déterminer la tension U<sub>100%</sub> pour des hauteurs h inférieures à 15cm (les tensions U<sub>100%</sub> déduites sont présentées au tableau 2 en annexe A). Les résultats obtenus sont pratiquement très proches de ceux déjà obtenus par d'autres auteurs [BEL94][RAH96][BOU98][CHO99].

#### IV.2.2 Détermination des Zones d'attraction du paratonnerre horizontal

Nous avons déterminé les zones d'attraction du paratonnerre horizontal, pour tous les diamètres utilisés, compris entre 0,5mm et 12mm (figure IV.2).

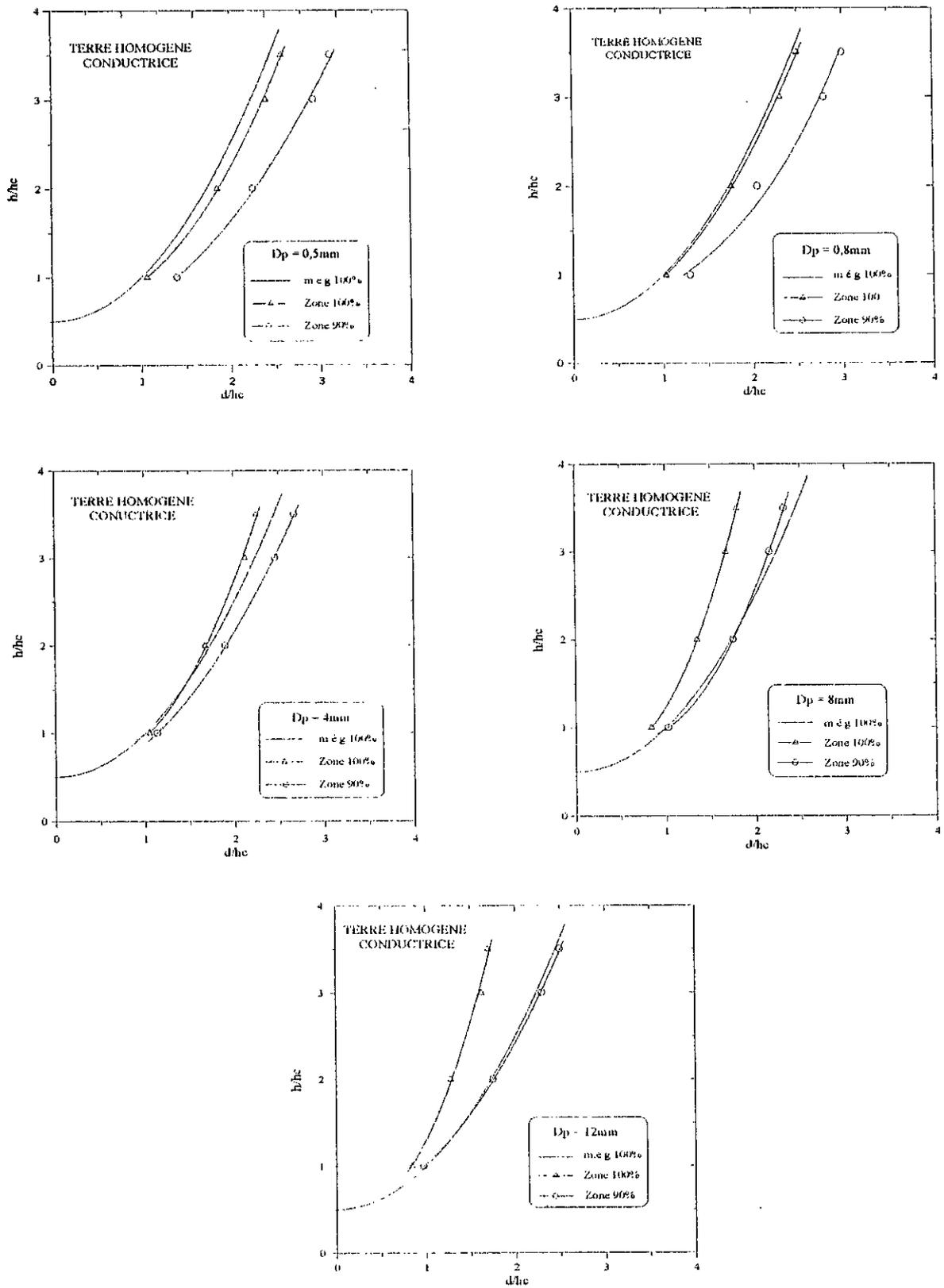


Figure IV.2- Zones d'attraction pour les différents diamètres du paratonnerre horizontal.

### IV.2.3 Calcul d'erreur

Pour toutes les hauteurs de l'intervalle tige-plan, nous avons établi la relation réduite suivante :

$$\frac{\Delta d}{h_c} = f\left(\frac{D_p}{h_c}\right); \quad \text{avec : } \Delta d = \left| (d_{100\%})_{\text{expérimentale}} - (d_{100\%})_{\text{théorique}} \right|$$

Pour les différents rapports  $h/h_c$ , nous observons que l'erreur admet un minimum compris entre les deux valeurs 0,02 et 0,1 des rapports  $D_p/h_c$ . Le paratonnerre horizontal de 2mm de diamètre semble avoir une zone d'attraction confondue avec celle du modèle électrogéométrique.

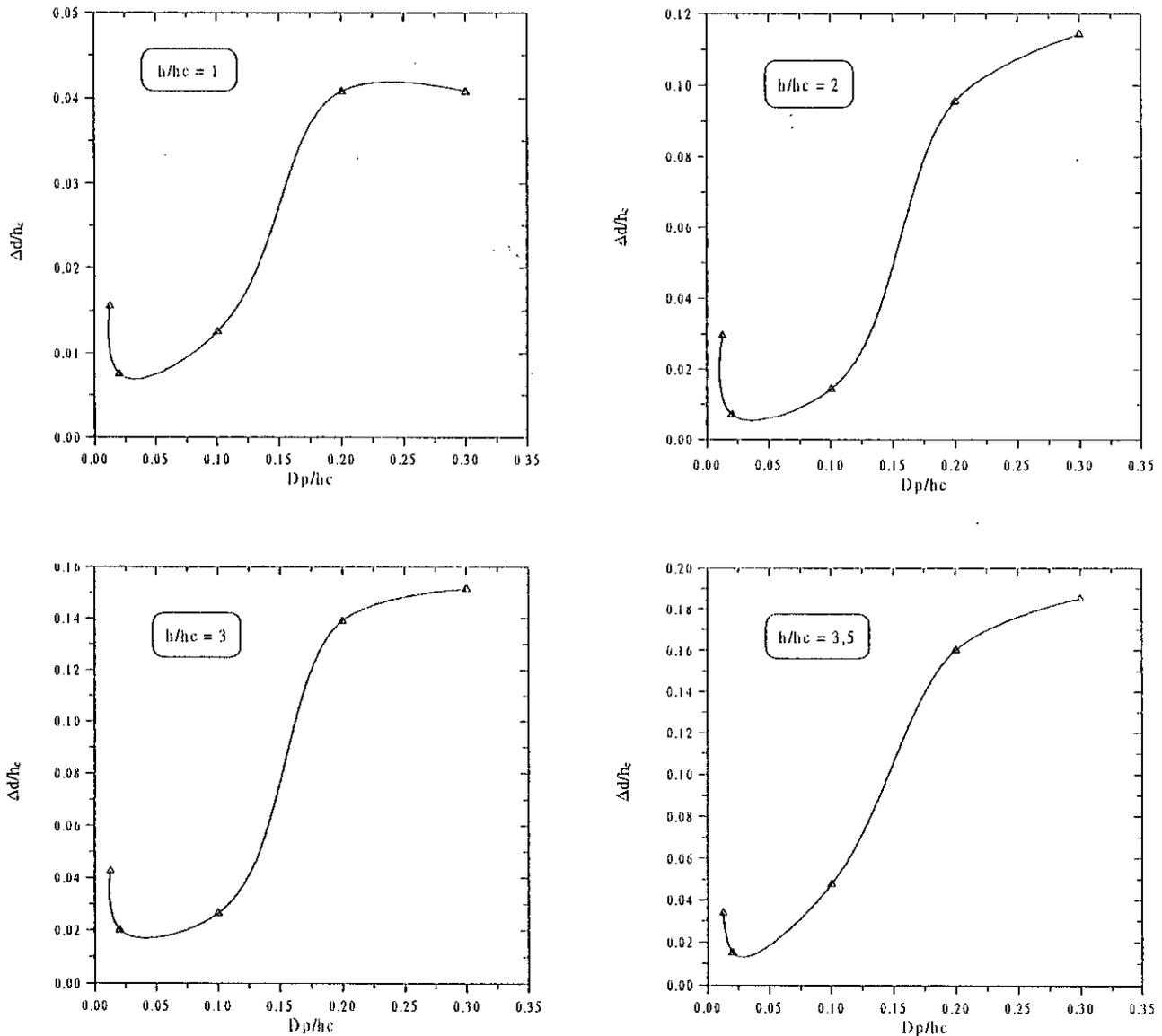


Figure IV.3- Calcul d'erreur pour les différents rapports  $h/h_c$ .

### IV.2.4 Influence du diamètre du paratonnerre horizontal sur les zones d'attraction

Afin d'illustrer l'influence du diamètre d'un paratonnerre horizontal sur les zones d'attraction obtenues dans le cas de la terre homogène parfaitement conductrice, nous avons regroupé les zones d'attraction pour les différents diamètres du paratonnerre horizontal en prenant la zone définie par le modèle électrogéométrique classique comme référence de comparaison (figure IV.4).

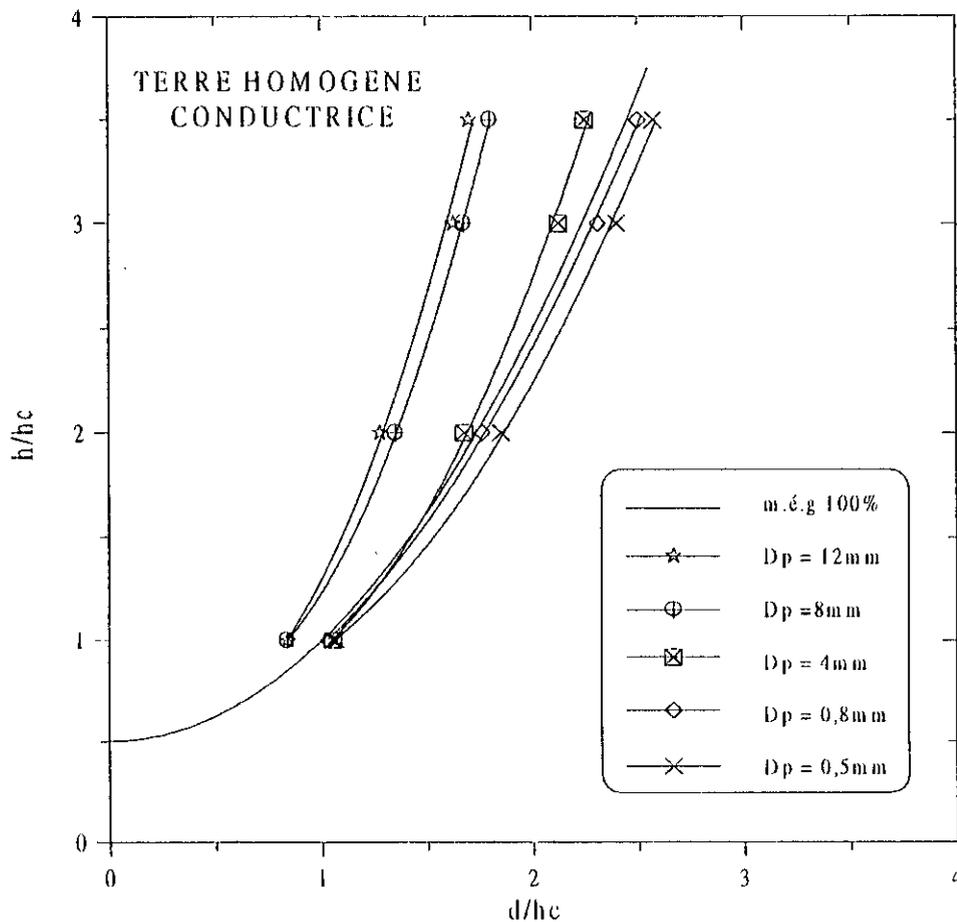


Figure IV.4- Influence du diamètre d'un paratonnerre horizontal dans le cas de terre bonne conductrice.

Nous constatons que le diamètre du paratonnerre horizontal a une grande influence sur les zones d'attraction. Lorsque le diamètre diminue, les zones d'attraction s'élargissent. En effet, pour les diamètres 0,5mm et 0,8mm les zones d'attraction sont plus larges que celle

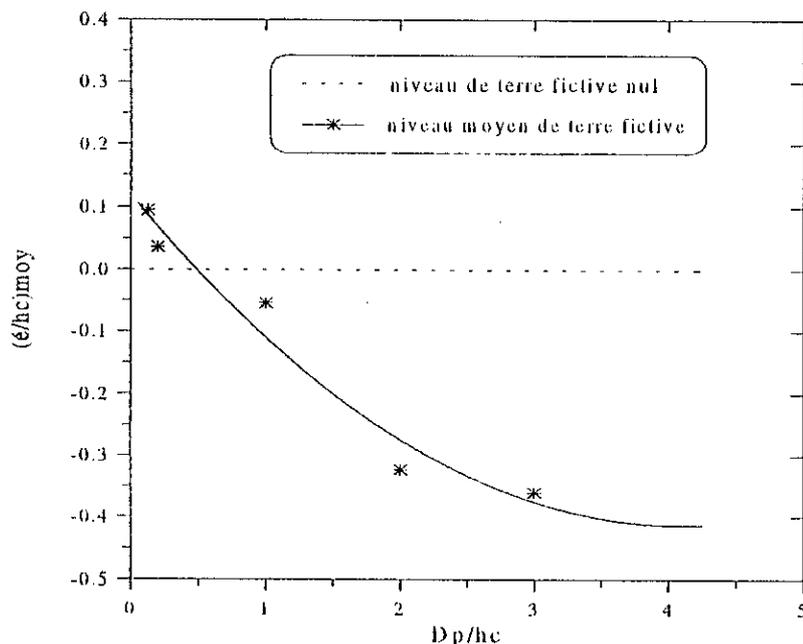
définie par le modèle électrogéométrique. Tandis que pour les diamètres du paratonnerre 4mm, 8mm et 12mm, les zones sont moins larges que celle du modèle électrogéométrique 100%. Cette tendance est peut être expliquée par le fait que le champ électrique au niveau du contour du paratonnerre de faible diamètre soit plus intense que pour un diamètre supérieur.

Nous pouvons conclure que le modèle électrogéométrique n'est pas vérifié pour un diamètre du paratonnerre horizontal supérieur ou égal à 4mm dans le cas des terres homogènes parfaitement conductrices.

Il serait très utile de faire une étude plus approfondie sur cette influence en envisageant des mesures de champ électrique aux niveaux des paratonnerres horizontaux.

#### IV.2.5 Niveau de terre fictive dans le cas de terre homogène conductrice

Dans le but de définir, de point de vue pratique, le système équivalent de la configuration de la terre discontinue ( $d/h_c$ ,  $h/h_c$ ,  $D_p/h_c$ ), nous avons utilisé la notion de terre fictive. Cette notion est définie dans des travaux antérieurs dans le cas de terre homogène mauvaise conductrice [BOU90][BEL94][BOU96][RAH96].



**Figure IV.5-** Niveau de terre fictive dans le cas de terre homogène conductrice.

Le niveau de terre fictive varie dans le sens inverse de la variation du rapport ( $D_p/h_c$ ) Lorsque le rapport  $D_p/h_c$  est compris entre 0,02 et 0,1, le niveau de terre fictive  $\epsilon/h_c$  tend vers

celui de terre bonne conductrice. Cependant, à partir de la valeur 0,1 du rapport ( $D_p/h_c$ ) le modèle électrogéométrique n'est pas vérifié (figure IV.5).

### IV. 2.6 Influence du diamètre du paratonnerre horizontal sur les distances paratonnerre-axe de la décharge

La figure IV.6 illustre les courbes présentant la relation réduite  $d/h = f(D_p/h)$  pour les différents rapports  $h/h_c$  (1, 2, 3 et 3,5).

Nous remarquons une décroissance des distances relatives ( $d/h$ ) avec l'augmentation des rapports  $D_p/h$  et des rapports ( $h/h_c$ ). Pour les grands rapports ( $D_p/h$ ) la pente de variation diminue. Cela veut dire qu'à partir d'un certain rapport  $D_p/h$ , les distances paratonnerre-axe de la décharge n'est pas influencée par le diamètre du paratonnerre horizontal. Dans notre cas, le rapport présentant la limite d'influence est égal à 0,2.

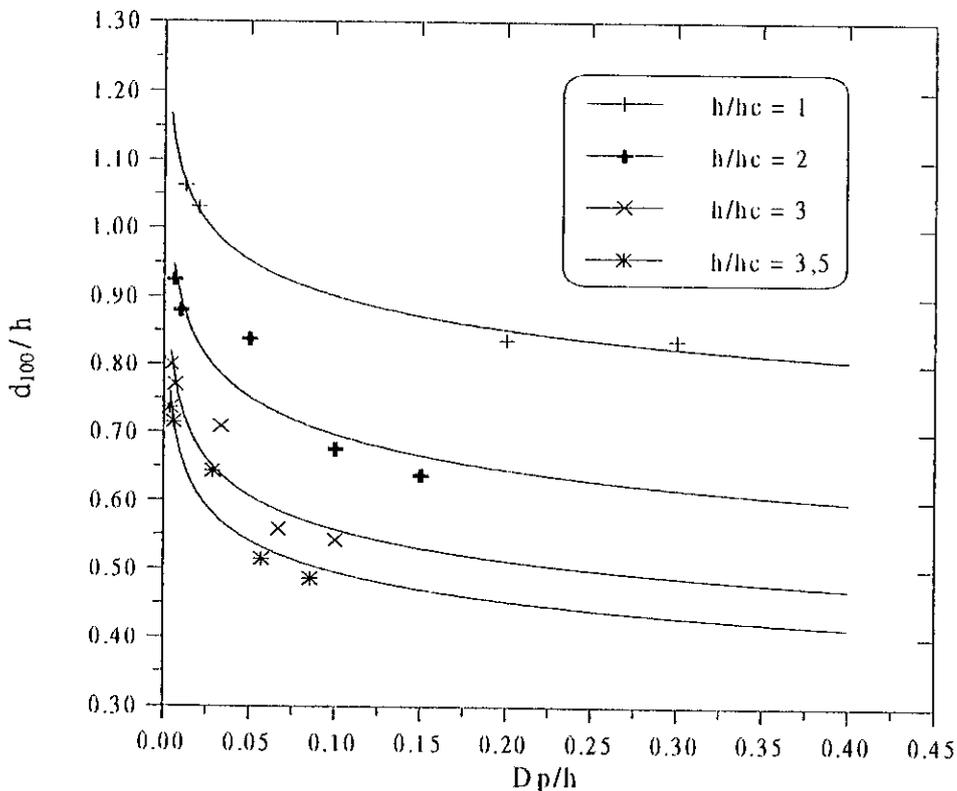


Figure IV.6- Influence du diamètre du paratonnerre horizontal sur les distances paratonnerre-axe de la décharge.

### **IV.3 TERRE DISCONTINUE**

Comme nous l'avons mentionné dans le troisième chapitre (III.3.3), quatre configurations du système tige-plan dans le cas de terre discontinue ont été définies selon la position du paratonnerre et de la tige par rapport à l'interface.

#### **IV.3.1 Paratonnerre situé sur la partie haute de la terre discontinue**

##### **IV.3.1.1 Première configuration: Paratonnerre horizontal situé entre l'axe de la décharge et l'interface**

Nous avons étudié dans la première configuration les zones d'attraction pour quatre diamètres du paratonnerre horizontal ( $D_p = 0.5, 4, 8$  et  $12\text{mm}$ ).

##### **a) Influence du rapport $D/h_c$**

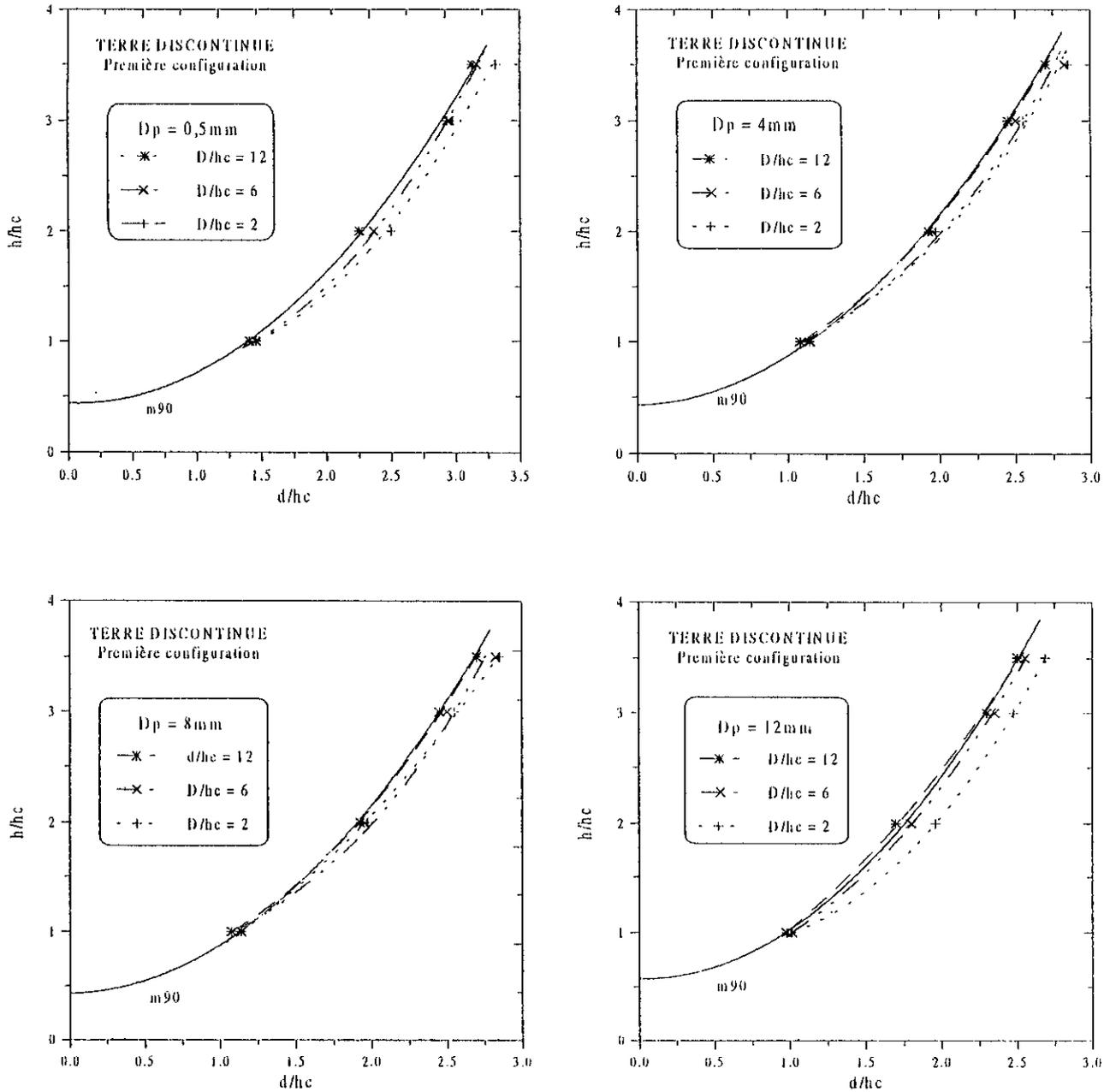
Pour un diamètre du paratonnerre fixe, nous avons déterminé les zones d'attraction en fonction de la distance horizontale relative du paratonnerre par rapport à l'interface ( $D/h_c$  égal à 2, 6 et 12).

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

Les zones d'attraction obtenues pour les différents diamètres (figure IV.7) sont plus larges que celle définie dans le cas de terre homogène conductrice. Ainsi, les zones s'élargissent au fur et à mesure que le rapport  $D/h_c$  diminue. Pour un rapport  $D/h_c$  égal ou supérieur à 12, les zones se confondent avec celle définie pour une terre homogène conductrice.

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

Le résultat obtenu est similaire à celui obtenu dans le cas du paratonnerre vertical [CHO99].

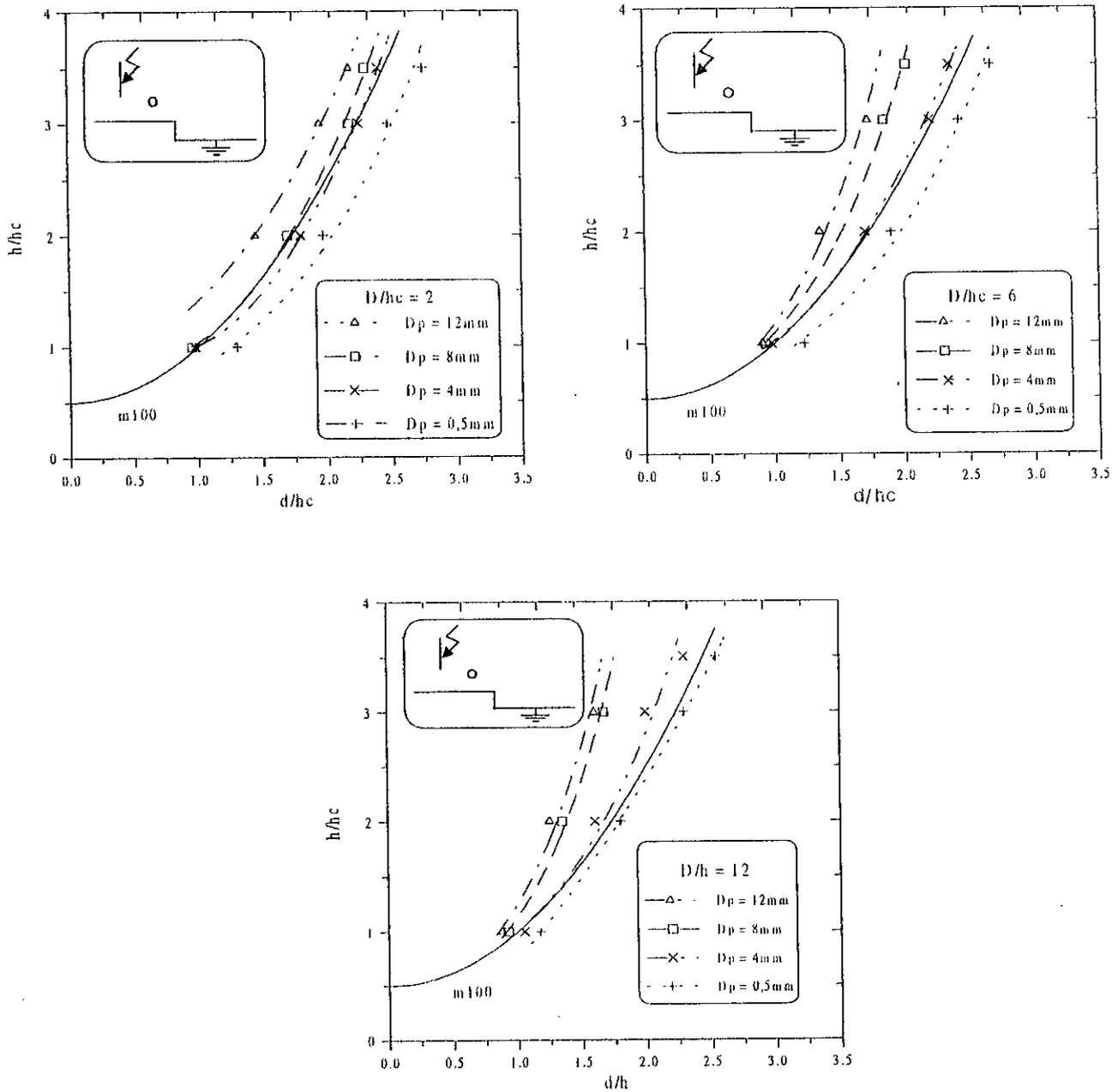


m90 : Zone d'attraction du paratonnerre horizontal pour une terre homogène conductrice.

Figure IV.7- Zones d'attraction pour la première configuration de la terre discontinue.

**b) Influence du diamètre  $D_p$**

Nous avons tracé, pour un rapport  $D/h_c$  constant, les zones d'attraction du paratonnerre horizontal de différents diamètres ( $D_p = 0,5, 4, 8$  et  $12\text{mm}$ ) (figure IV.8).

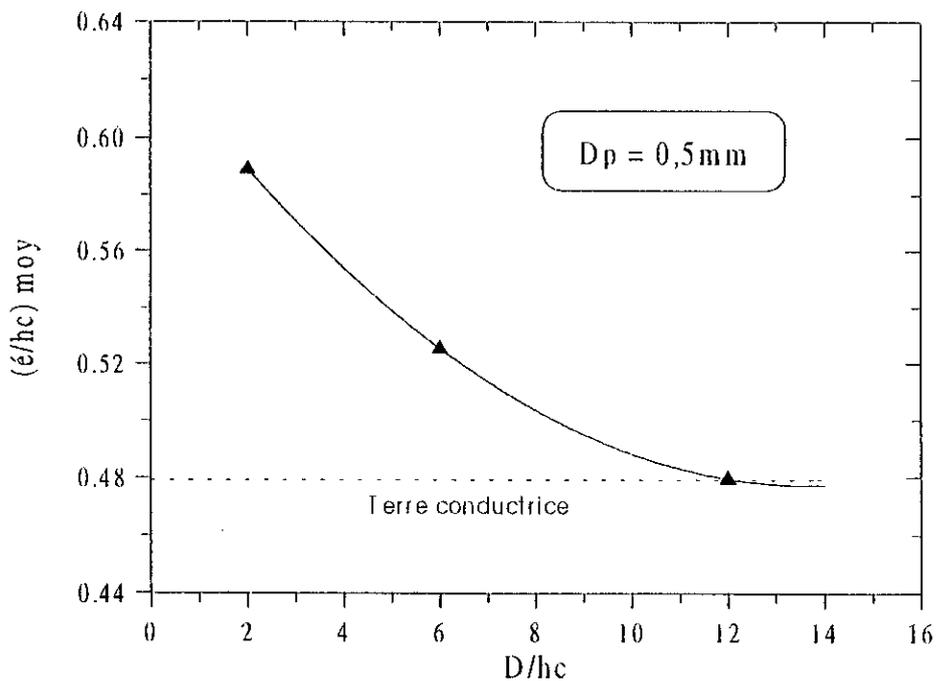


**Figure IV.8-** Influence du diamètre  $D_p$  pour la première configuration de la terre discontinue.

La présentation précédente (figure IV.8) permet de confirmer le type d'influence du diamètre du paratonnerre sur les zones d'attraction et de vérifier le modèle de protection des paratonnerres horizontaux pour des rapports  $D/h_c$  suffisamment faibles. L'exemple sur lequel est basée cette tendance est le paratonnerre de diamètre 4mm. Dans le cas de terre homogène parfaitement conductrice, le résultat obtenu (figure IV.2) affirme que sa zone d'attraction est moins large que celle du modèle électrogéométrique classique. Cependant, Dans le cas de la première configuration de la terre discontinue et pour un faible rapport  $D/h_c = 2$ , sa zone d'attraction est devenue plus large que celle du modèle électrogéométrique 100%.

**c) Niveau de terre fictive**

La figure IV.9 illustre, pour un diamètre  $D_p$  égal à 0,5mm, l'influence de la distance horizontale relative entre l'interface et le paratonnerre  $D/h_c$  sur le niveau de terre fictive relative  $(e'/h_c)_{moy}$ . Le niveau de terre fictive varie dans le sens inverse de la variation du rapport  $D/h_c$ . Lorsque le rapport  $D/h_c$  atteint une valeur suffisamment grande  $D/h_c = 12$ , le niveau de terre fictive tend vers celui du sol homogène bon conducteur dans le cas du même diamètre.



**Figure IV.9-** Niveau de terre fictive pour la première configuration de la terre discontinue.

### **I.3.1.2 Deuxième configuration: L'axe de la décharge situé entre l'interface et le paratonnerre horizontal**

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

Les résultats d'essais sont rapportés dans les tableaux 2 de l'annexe C pour cinq diamètres du paratonnerre horizontal ( $D_p = 0.5, 0.8, 4, 8$  et  $12\text{mm}$ ) et pour différents rapports  $D/h_c$  (4, 6 et 8). Le rapport  $D/h_c$  égal à 2 n'est réalisé que pour les diamètres 4, 8 et  $12\text{mm}$ .

#### **a) Influence du rapport $D/h_c$**

Les zones d'attraction sont plus petites que celle définie pour un sol homogène bon conducteur. Plus le paratonnerre est proche de l'interface ( $D/h_c$  relativement petit), plus la zone d'attraction est réduite. Nous expliquons ce résultat par la présence d'un champ électrique relativement fort au niveau de l'interface augmentant la probabilité de décharge au sol où le champ est plus intense. Lorsque le paratonnerre horizontal est éloigné de l'interface ( $D/h_c$  relativement grand), la zone d'attraction s'approche de celle définie pour une terre homogène conductrice. L'interface n'a aucun effet sur les zones lorsque  $D/h_c$  est supérieur ou égal à 8. (figure IV.10).

#### **b) Influence du diamètre du paratonnerre horizontal $D_p$**

Les zones d'attraction définies pour les cinq diamètres utilisés ( $D_{p1}$  à  $D_{p5}$ ) sont influencées par la présence de l'interface dans la deuxième configuration de la terre discontinue. Nous constatons que (figure IV.11) :

- Pour les valeurs 2 et 4 du rapport  $D/h_c$ , les zones d'attraction déterminées pour les différents diamètres du paratonnerre horizontal sont moins larges que celle du modèle électrogéométrique classique.
- Pour le rapport  $D/h_c$  égal à 6, la zone d'attraction obtenue pour le diamètre  $0,5\text{mm}$  du paratonnerre horizontal est pratiquement confondue avec celle définie par le modèle électrogéométrique.
- Pour le rapport  $D/h_c$  égal à 8, la zone d'attraction obtenue pour le diamètre  $0,5\text{mm}$  du paratonnerre horizontal est plus large que celle définie par le modèle électrogéométrique classique. Pour  $D_p$  égal à  $0,8\text{mm}$ , la zone est confondue avec celle donnée par le modèle électrogéométrique.

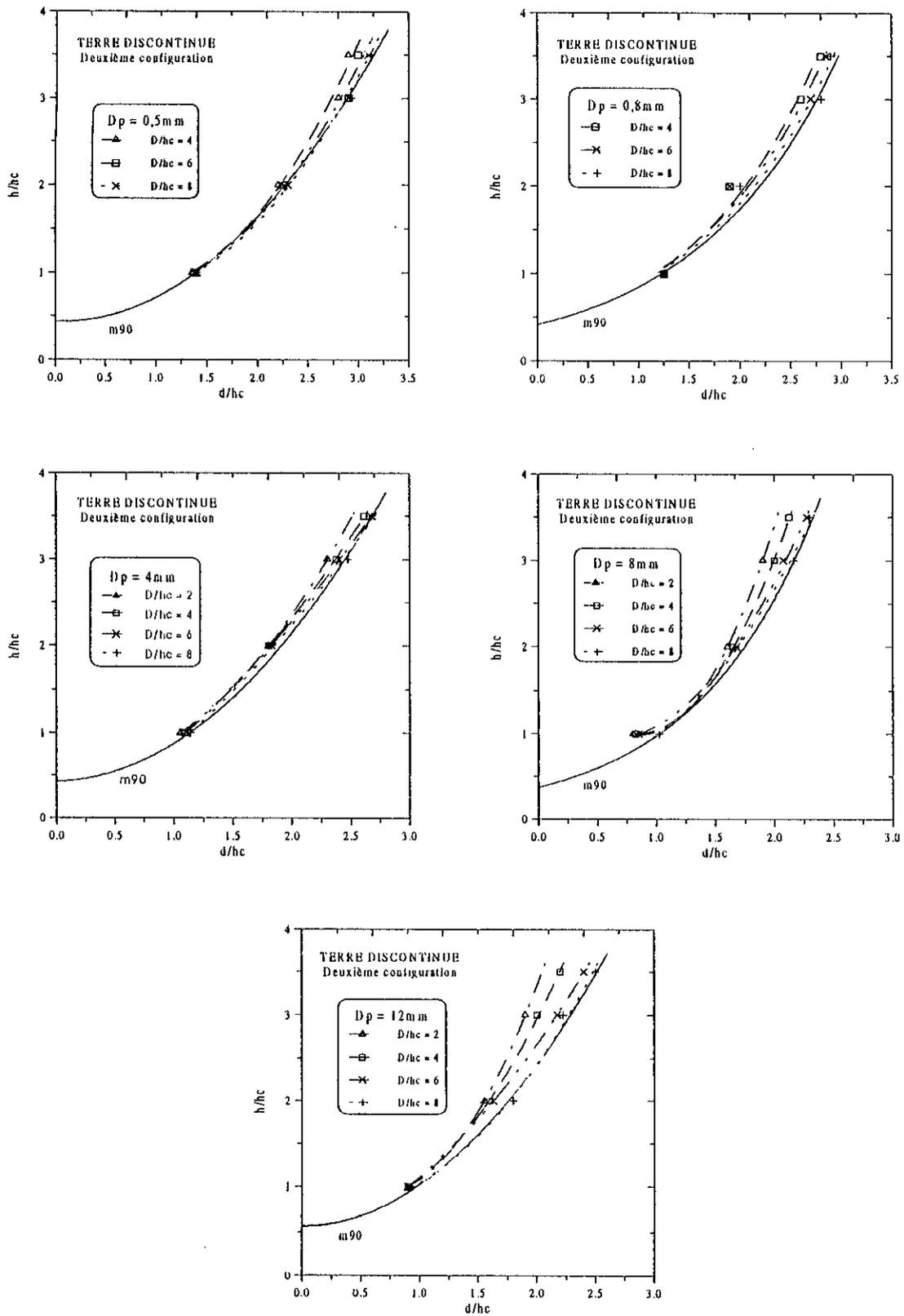


Figure IV.10- Zones d'attraction pour la deuxième configuration de la terre discontinue.

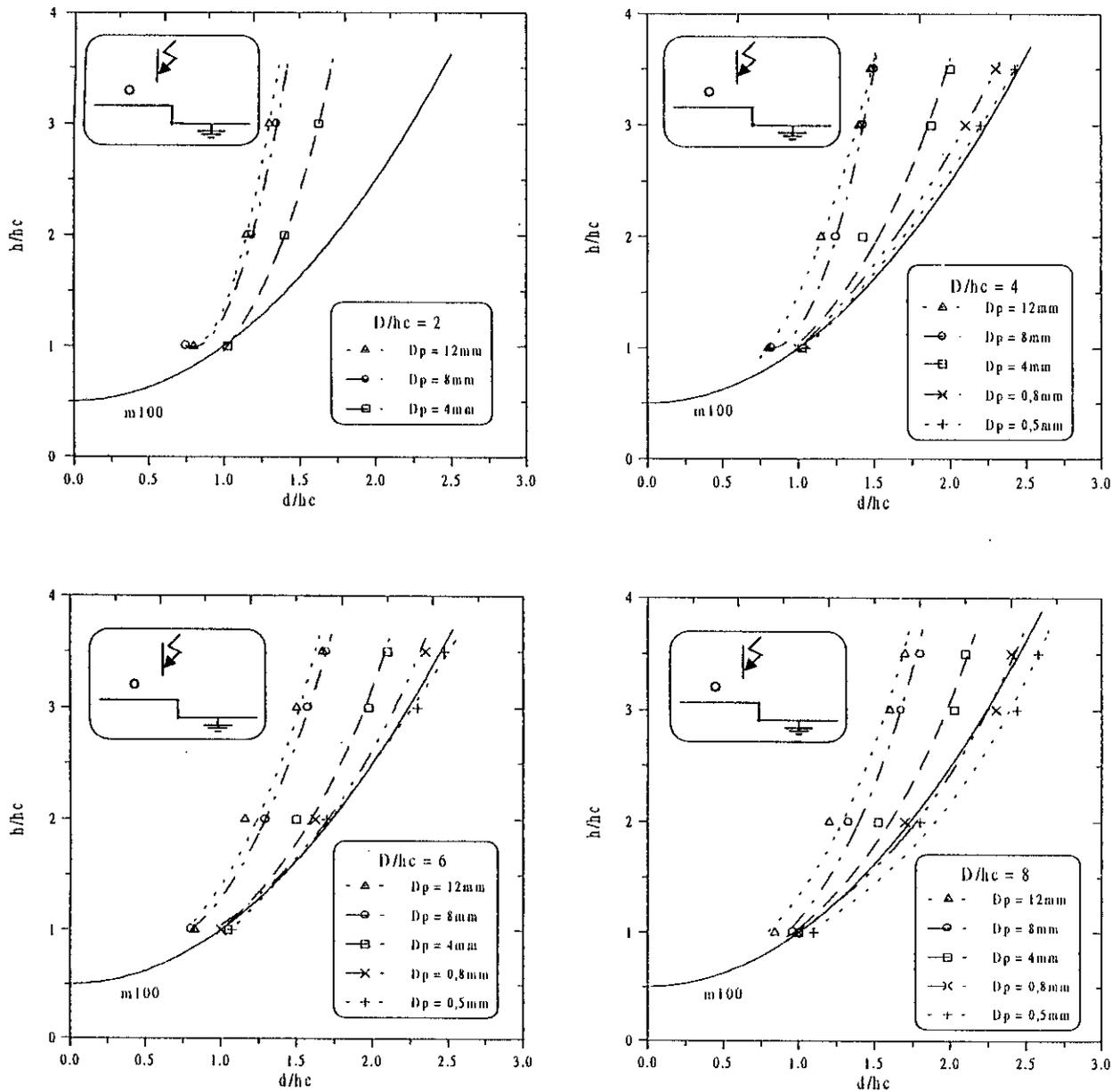


Figure IV.11- Influence du diamètre  $D_p$  pour la deuxième configuration de la terre discontinue.

**Remarque :** Les valeurs  $d/h_c$  obtenues pour  $h/h_c$  égal à 1 sont proches pour deux rapports  $D/h_c$  différents vu l'intervalle étroit de variation de la distance horizontale tige-contour du paratonnerre horizontal.

### **IV.3.2. Paratonnerre situé sur la partie basse de la terre discontinue**

#### **IV.3.2.1 : 3<sup>ème</sup> configuration : L'axe de la décharge situé entre l'interface et le paratonnerre horizontal**

##### **a) Influence des rapports $D/h_c$**

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

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

Les zones d'attraction diminuent au fur et à mesure que le paratonnerre s'éloigne de l'interface ( $D/h_c$  augmente) (figure IV.12). Cette tendance est expliquée par le rapprochement de la tige de haute tension par rapport à l'interface. L'intervalle d'air tige-interface constitue un chemin préférentiel pour les décharges électriques. En effet, le système tige-interface, qui est un système pointe-pointe, est moins rigide qu'un système pointe négative-plan [BOU98], c'est pourquoi nous n'avons pas remarqué, pour le rapport  $D/h_c$  égal à 4, des décharges vers le sol. Dès que le rapport  $D/h_c$  augmente ( $D/h_c$  supérieur à 4), les zones d'attraction s'élargissent à cause de la diminution de la fréquence d'impact sur l'interface. Lorsque le paratonnerre est situé suffisamment loin de l'interface ( $D/h_c$  supérieur ou égal à 10) la zone d'attraction tend à devenir confondue avec celle du modèle électrogéométrique. Dans ce dernier cas, l'influence de l'interface devient négligeable.

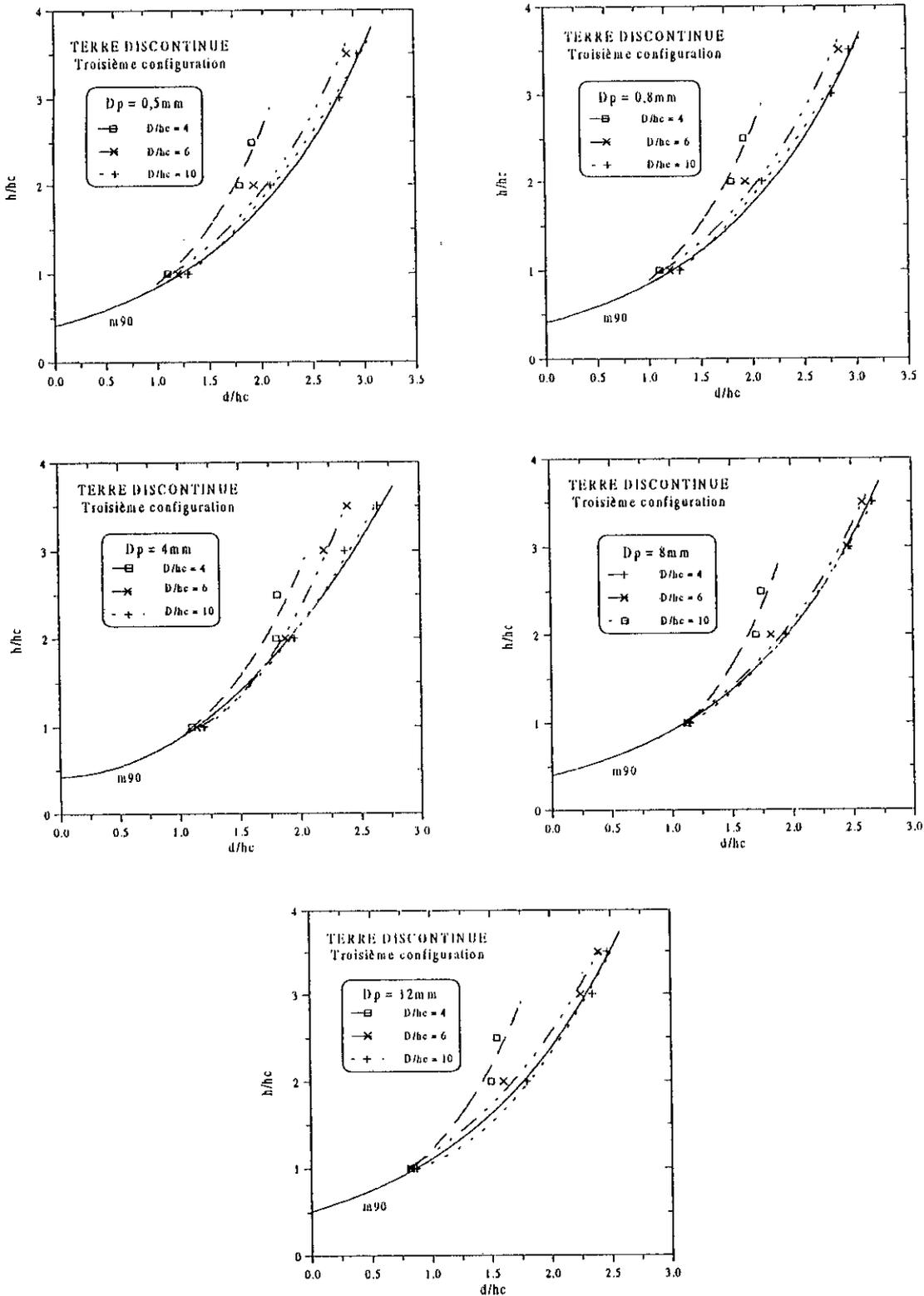
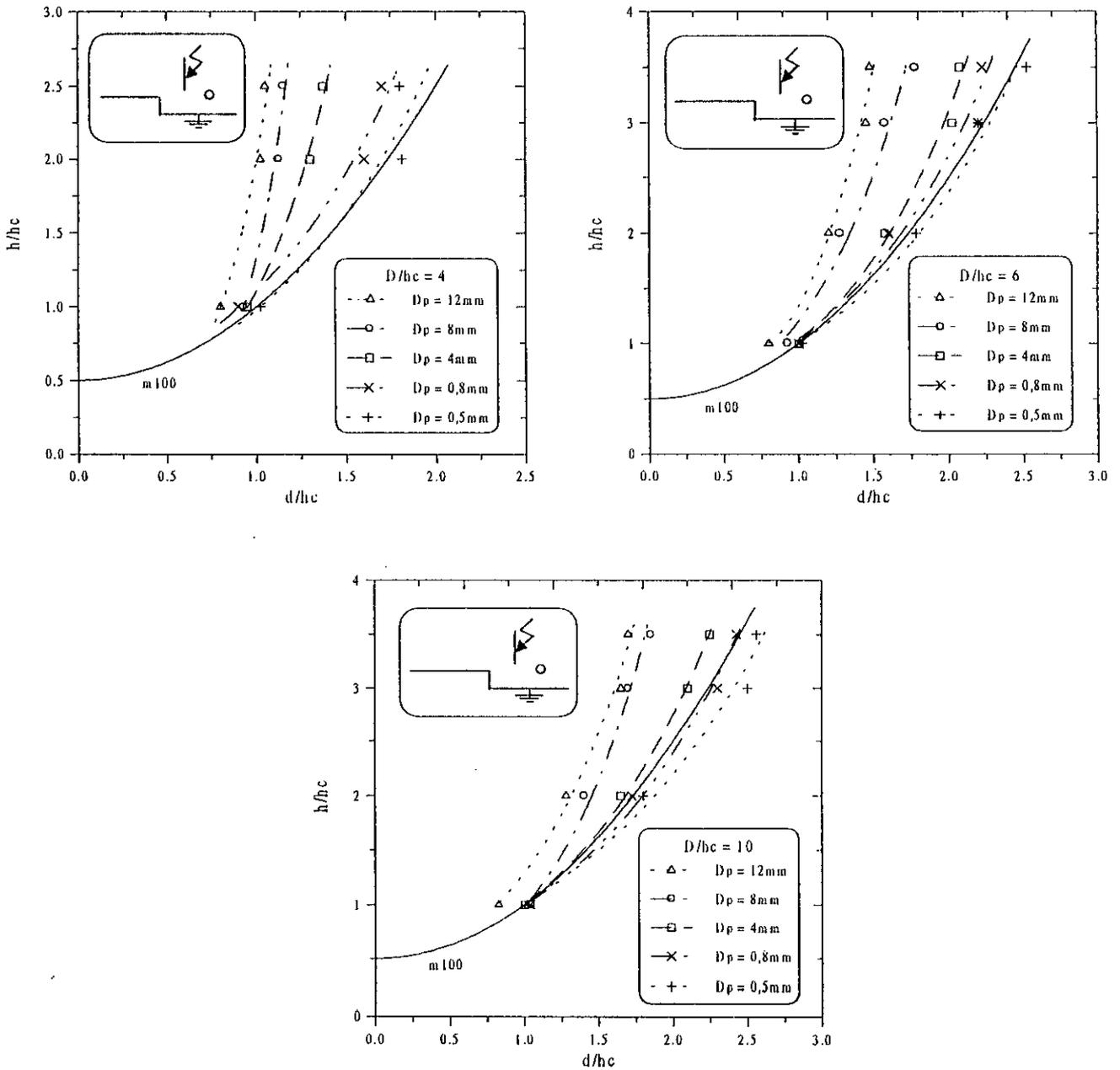


Figure IV.12- Zones d'attraction pour la troisième configuration de la terre discontinue.

**b) Influence du diamètre du paratonnerre horizontal  $D_p$**

Nous avons illustré à la figure IV.13 les caractéristiques présentant l'influence du diamètre  $D_p$  du paratonnerre horizontal sur les zones d'attraction pour les différents rapports  $D/h_c$ .



**Figure IV.13-** Influence du diamètre du paratonnerre horizontal pour la troisième configuration de la terre discontinue.

Nous constatons que (figure IV.13) :

- Pour  $D/h_c$  égal à 4, la zone d'attraction du paratonnerre horizontal pour tous les diamètres ( $D_{P1}$  à  $D_{P5}$ ) sont moins larges que celle du modèle électrogéométrique classique.
- Pour  $D/h_c$  égal à 6, la zone d'attraction du paratonnerre horizontal de 0,5mm de diamètre est légèrement plus large que celle du modèle électrogéométrique classique.
- Pour  $D/h_c$  égal à 10, la zone d'attraction du paratonnerre horizontal de 0,5mm et 0,8mm de diamètre est plus large que celle définie par le modèle électrogéométrique classique. Ce résultat est pratiquement similaire à celui obtenu dans le cas de la terre homogène conductrice.

Les résultats obtenus pour cette configuration sont similaires à ceux de la deuxième configuration. Cependant, pour cette dernière l'influence de l'interface sur les zones d'attraction est moins prononcée que l'influence constatée à la troisième configuration. Ceci est vérifié pour les mêmes paramètres :  $D_P$ ,  $D/h_c$  et  $h_c/e$ .

#### **IV.3.1.4 Quatrième configuration : Paratonnerre horizontal situé entre l'interface et l'axe de la décharge**

Cette configuration est symétrique à la première. Pour cette raison, nous nous sommes limité à l'étude de deux diamètres du paratonnerre horizontal. Le premier représente les paratonnerres à faibles diamètres ( $D_{P1}$  égal à 0,5mm) et le deuxième représente ceux de grands diamètres ( $D_{P2}$  égal à 12mm). Nous avons étudié quatre rapports  $D/h_c$  : 1, 2, 6 et 10.

##### **a) Influence du rapport $D/h_c$ sur les zones d'attraction du paratonnerre horizontal**

La figure IV.14 illustre les résultats obtenus (tableau 4.1, annexe C). Nous remarquons des zones d'attraction plus larges que celle définie dans le cas d'un sol homogène bon conducteur. L'élargissement des zones d'attraction est plus prononcé lorsque le paratonnerre est relativement proche de l'interface ( $D/h_c$  petit). Lorsque le paratonnerre horizontal est relativement éloigné de l'interface ( $D/h_c$  supérieur ou égal à 10). La zone d'attraction est confondue avec celle définie dans le cas de la terre homogène conductrice.

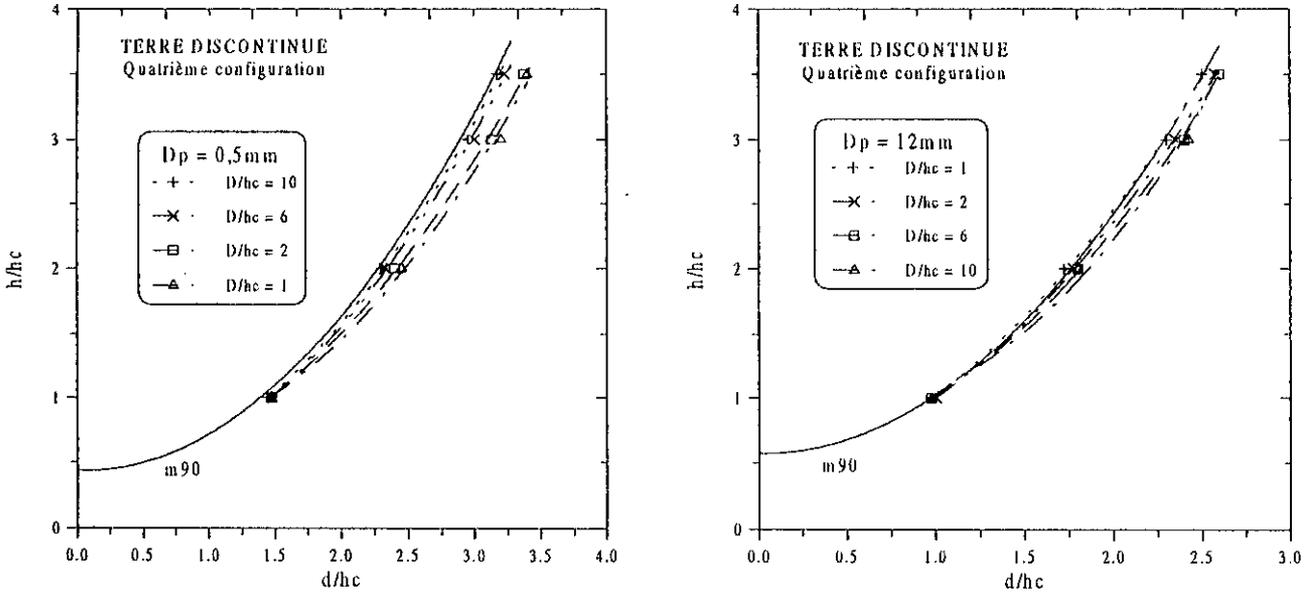


Figure IV.14- Zones d'attraction pour la quatrième configuration de la terre discontinue.

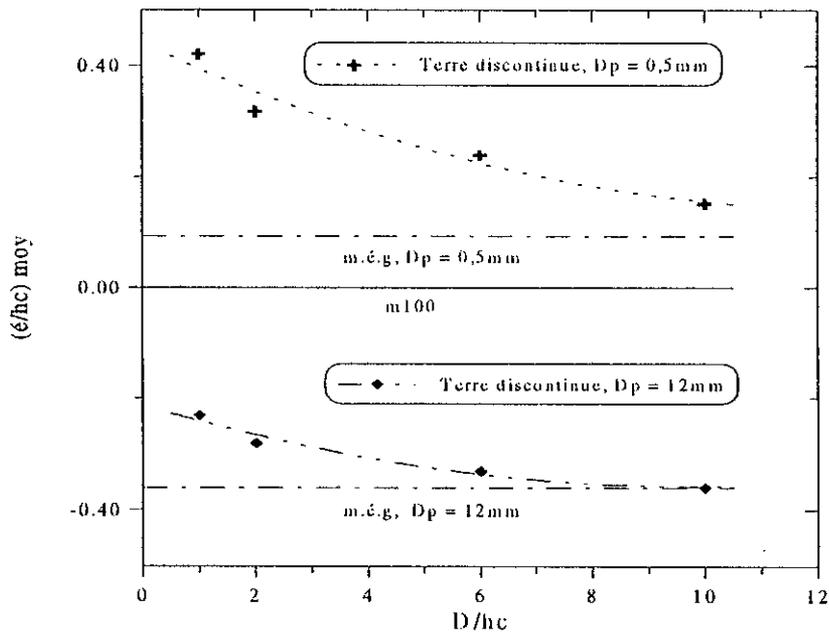


Figure IV.15- Niveau de terre fictive pour la quatrième configuration de la terre discontinue.

**b) Niveau de terre fictive**

Nous constatons que (figure IV.15):

- Pour  $D_p$  constant, le niveau relatif de terre fictive  $e'/h_c$  tend vers celui du sol homogène bon conducteur lorsque le rapport  $D/h_c$  augmente.
- Lorsque le diamètre du paratonnerre augmente, le niveau de terre fictive diminue. Il devient négatif pour le diamètre 12mm.

Le résultat obtenu est similaire à ce qu'a obtenu A. Rahmani [RAH96] dans le cas d'un sol homogène mauvais conducteur.

## **IV.4 TYPES DE DECHARGES OBSERVEES**

### **IV.4.1 Terre homogène conductrice**

Selon la position du paratonnerre horizontal et de la tige de haute tension, nous avons observé trois types de décharges disruptives.

- Décharges directes sur le paratonnerre horizontal.
- Décharges directes sur le sol
- Décharges ramifiées sur le paratonnerre et le sol.

### **IV.4.2 Terre discontinue**

Pendant nos essais, nous avons observé quatre types de décharges disruptives (figure IV.16) :

- (a) Décharges directes sur le paratonnerre horizontal (simple ou double canal).
- (b) Décharges directes sur le sol (simple ou double canal).
- (c) Décharges directes sur l'interface.
- (d) Décharges ramifiées sur le paratonnerre et le sol.
- (e) Décharges ramifiées sur le paratonnerre et l'interface.

### **Remarques**

- Les deux types de décharges (c) et (e) ne sont remarqués que pour la position où la tige est suffisamment proche de l'interface et  $D/h_c$  petit.
- En comparant les types de décharges dans le cas de terre homogène conductrice et dans le cas de terre discontinue, nous avons pu constaté que l'interface a modifié la trajectoire de la décharge de foudre.

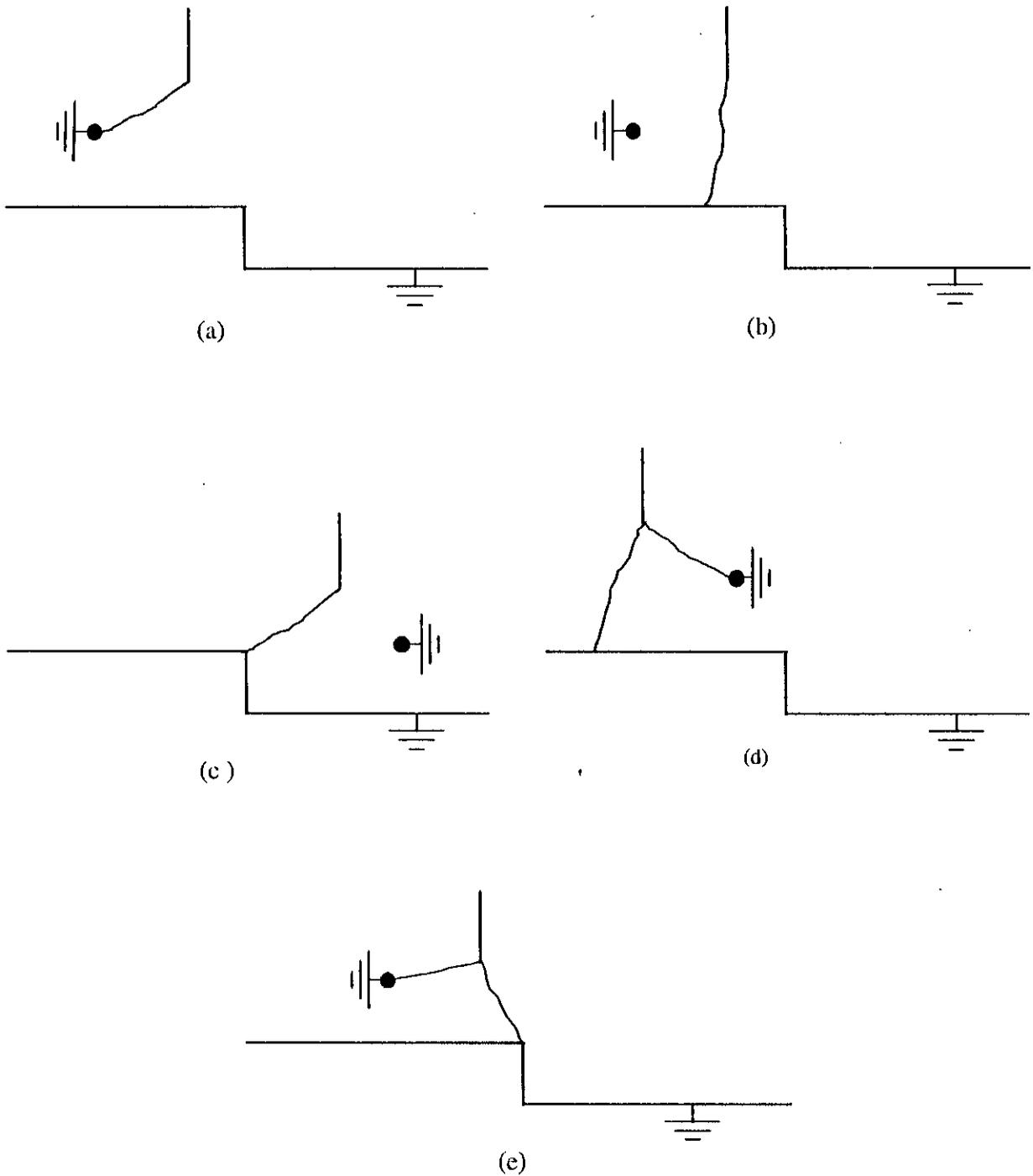


Figure IV.16- Types de décharges observées dans le cas de la terre discontinue.

## CONCLUSION GENERALE

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

Les chercheurs du Laboratoire de Haute Tension de l'ENP contribuent dans ces travaux en étudiant l'influence des propriétés électrogéologiques du sol sur les zones d'attraction du paratonnerre horizontal et vertical. En effet, ces propriétés sont considérées comme l'une des insuffisances du modèle électrogéométrique. Notre travail est orienté vers la détermination des zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal dans le cas de terre discontinue.

Arrivés au terme de ce travail, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- Indépendamment du type de terre, le diamètre du paratonnerre horizontal semble avoir un effet important sur les zones d'attraction. Plus le diamètre du paratonnerre diminue, plus la zone d'attraction s'élargit.
- Dans le cas du paratonnerre situé entre l'interface et la tige de haute tension, sur la partie haute ou basse de la terre discontinue, les zones d'attraction du paratonnerre horizontal sont plus larges que celle définie pour une terre homogène conductrice.
- Quel que soit le diamètre du paratonnerre horizontal, les zones d'attraction sont moins larges que celle définie pour une terre homogène conductrice lorsque la tige de haute tension est située entre le paratonnerre et l'interface.
- Lorsque le paratonnerre horizontal est relativement éloigné de l'interface, les zones d'attraction se confondent avec la zone définie dans le cas d'un sol homogène bon conducteur.
- Dans le cas où la tige de haute tension est située entre le paratonnerre et l'interface, l'écart par rapport à la zone définie par le modèle électrogéométrique est plus prononcé pour la partie basse de la terre discontinue que pour la partie haute de cette terre.

En plus des résultats obtenus, ce travail nous a permis :

- D'enrichir les connaissances permettant de comprendre la plupart des manifestations de la foudre, bien que plus qualitativement que quantitativement.
- De se familiariser avec les différents dispositifs du laboratoire de haute tension.
- D'observer les différents types de décharge qui peuvent avoir lieu dans les intervalles d'air tige-plan.

## BIBLIOGRAPHIE

- [AGU87] M. Aguet ; « Haute Tension », Vol. XXII, Presses Polytechniques Romandes, 1987.
- [BEL94] R. Belaïcha ; « Zone d'attraction d'un paratonnerre vertical dans le cas d'une terre mauvaise conductrice », Thèse de Magister, ENP, Alger, Algérie 1994.
- [BER75] K. Berger, R. B. Anderson et H. Kroninger ; « Paramètres des coups de foudre », Electra (F), 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 JTEA, Rapport n° 07, Tunis, 1987.
- [BOU87b] A. Boubakeur, J. Ferras ; « Negative lightning breakdown of rod-plane air gaps with heterogeneous earth », Proceeding of the 5<sup>th</sup> ISH, paper 14.26, Braunschweig, Germany, 1987.
- [BOU89] A. Boubakeur, J. Ferras ; « Negative lightning breakdown of rod-conductor air gaps with heterogeneous earth », MEPCOM'89, Paper EE05-025, Cairo-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<sup>er</sup> Colloque sur l'Electrotechnique et l'Automatique, 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 équipements électriques, 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, MEPCOM'92, Assiut, Egypt, 1992. pp :122-123.
- [BOU93] **A. Boubakeur, R. Belaïcha** ; « Contribution à l'étude d'un modèle électrogéométrique élargi », JTEA 93, Hammamet, Fev. 1993.
- [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** ; « Modèle de protection contre la foudre dans le cas d'une terre mauvaise conductrice », Proceeding du 2<sup>ème</sup> CEA, Vol. 1, Alger, 1995.
- [BOU95b] **A. Boubakeur, R. Belaïcha** ; « Influence of earth conductivity on the negative lightning breakdown of rod-plane air gaps », 9<sup>th</sup> ISH', Vol. 96, Paper 6711, Graz, Austria, 1995.
- [BOU95c] **A. Boubakeur, R. Belaïcha, A. Rahmani, R. Boudissa** ; « Influence du rayon de courbure sur les zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal », CNHT, Béjaïa, Nov. 95.
- [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 », CNHT, Béjaïa, Nov. 1995.
- [BOU96] **A. Boubakeur, R. Belaïcha, A. Rahmani, R. Boudissa** ; « Influence of earth conductivity on the capture zones of an horizontal lightning conductor, 23<sup>rd</sup> International Conference of Lightning Protection (ICLP'1996), Vol.1, Firenze, Italy, 1996. pp : 453-456.
- [BOU97] **A. Boubakeur** ; « Influence of earth electrogeological properties on lightning protection modelisation », Journal of the IEEEA, Vol.1, N°1, Dec. 1997.
- [BOU98] **S. A. A. Boumaza** ; « Amorçage au choc de foudre des intervalles d'air tige-plan avec terre hétérogène », Thèse de Magister, ENP, Alger, Algérie, 1998.
- [BOU98b] **A. Boubakeur, S. A. A. Boumaza, R. Belaïcha, R. Boudissa** ; « Influence of earth heterogeneity on negative lightning breakdown of rod-plane air-gaps », Proceeding of 24<sup>th</sup> ICLP, Birmingham, 1998. pp : 473-477.

- 
- [BOU00] **A. Boubakeur, A. Chouchou, S. A. A. Boumaza** ; « Influence of earth discontinuity on the capture zones of a vertical lightning conductor », 25<sup>th</sup> ICLP, Rhodes, Greece, 2000. (submitted).
- [BOW65] **A. H. Bowker, G. J. Lieberman** ; « Méthodes statistiques de l'ingénieur », Dunod, Paris, 1965.
- [CEI60] **C. E. I.** ; « Techniques d'essais de haute tension », 1973. (60-01/02).
- [CHO99] **A. Chouchou** ; « Détermination des zones d'attraction d'un paratonnerre vertical dans le cas d'une terre discontinue », Thèse de Magister, ENP, Alger, Algérie, 1999.
- [DOB72] **M. Dobardzic** ; « Station d'essais au choc à haute tension », PFE, ENP, Alger, Algérie, 1972.
- [ER175] **A.J. Eriksson** ; « Surtensions de foudre sur les lignes de transport à haute tension », *Electra*, N°47, 1975. pp : 87-110.
- [FER87] **J. Ferras** ; « Influence des propriétés électrogéologiques du sol sur le point d'impact de la décharge de foudre », Thèse de Magister, ENP, Alger, Algérie 1987.
- [GAR75] **C. Gary, A. Cimador, R. Fieux** ; « La foudre : Étude du phénomène - Application à la protection des lignes de transport », RGE, Tome 84, N°1, Janvier 1975. pp : 24-32
- [GAR89] **C. Gary** ; « La foudre et les phénomènes orageux », RGE, N°03, Mars 1989. pp : 3-11.
- [GAR94] **C. Gary** ; « La foudre : Des mythologies antiques à la recherche moderne », Masson, Paris, 1994.
- [GOL81] **R. H. Golde** ; « Lightning : T2 », Academic Press, 2<sup>ème</sup> édition, London, 1981.
- [KIN87] **D. Kind** ; « An introduction to high voltage experimental technique », Text book for Electrical Engineers, Friedr Vieweg & Sohn, 1978.
- [KIN85] **D. Kind, H. Karner** ; « High voltage insulation technology », Text book for Electrical Engineers, Friedr Vieweg & Sohn, 1985.
- [KUF84] **E. Kuffel, W. S. Zaengl** ; « High voltage engineering », Pergamon Press, G.B ; 1<sup>ère</sup> Ed ; 1984. pp : 463-488.
-

- 
- [LEJ97] **D. Le Jop** ; « Protection contre la foudre : Cage maillée ou paratonnerre ? », Les cahiers Techniques du Bâtiment, N° 180, Mai 1997.
- [LER84] **G. Le Roy, C. Gary, B. Hutzler, J. Lacot, C. Dubaton** ; « Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions (la foudre) », Ed Eyrolles, 1984, Paris. pp : 92-251.
- [MOR94] **P. W. Morin, J. M. Berges** ; « Ligne d'écoulement de la foudre sur les infrastructures et le sol », Foudre et Montagne, Chamonix, France, 1994.
- [NAC91] **K. Nacreddine, A. Boubakeur** ; « Simulation numérique de la foudre : Le programme PROC2D », Colloque Maghrébin sur les modèles numériques de l'ingénieur, Tunis, Oct. 91.
- [NAC92] **K. Nacreddine** ; « Protection contre la foudre sur un sol hétérogène ; simulation numérique », Thèse de Magister, ENP, Alger, Algérie, 1992.
- [NAC93] **K. Nacreddine, 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.
- [NOR87] **Norme Française**; « Protection contre la foudre : Installation de paratonnerres », C17-100, Février, 1987. pp : 1-19.
- [NOR95] **Norme Française** ; « Protection contre la foudre : Protection des structures et des zones ouvertes contre la foudre par paratonnerre à dispositif d'amorçage. », C17-102, Juillet 1995. pp : 1-48.
- [PHI94] **E. Philippe Krider** ; « Physics of lightning today », Foudre et Montagne, Chamonix, France, 1994.
- [RAH96] **A. Rahmani** ; « Détermination des zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal dans le cas d'une terre mauvaise conductrice », Thèse de Magister, Université de Béjaïa, Algérie, 1996.
- [ROU94] **A. Rousseau, C. Gary, G. Berger** ; « Foudre et protection des bâtiments », Techniques de l'Ingénieur, Fascicule C.3307, Janvier 1994.
- [SAB99] **A. Sabot, J. Michaud** ; « Lignes et postes. Choix et coordination des isolement », Techniques de l'ingénieur », D4750. 1999.
-

- [SCH97] **A. Schmitt, T. Deflandre** ; « Les surtensions et les transitoires rapides de tension, en milieu industriel et tertiaire », Ed. Eyrolles, Paris 1997.
- [SOU94] **S. Soula, S. Prieur** ; « Détection et observation des orages à l'observatoire du pic du midi », Foudre et Montagne, Chamonix, France, 1994.
- [XEM94] **A. Xemard, A. Sabot, P. Lalande, M. Nguyen** ; « Modèles électro-géométriques utilisés en électrotechnique : Comparaison et utilisation par EDF. », Foudre et Montagne, Chamonix, France, 1994.

# ANNEXES

## ANNEXE A

### 1. INFLUENCE DE LA HAUTEUR DE LA TIGE SUR LES TENSIONS $U_{100\%}$

h[cm]	4	8	12	14
$(U_{100\%})/8$ [kV]	15,37	28.70	39.83	43.90
$U_{100\%}$ [kV]	123	229.6	318.6	351,6

Tableau A.1

### 2. TENSIONS DISRUPTIVES $U_{100\%}$ DEDUITES

h[cm]	2	6	10
$U_{100\%}$ [kV]	58	162	276

Tableau A.2

## ANNEXE B

### 1. DETERMINATION DES ZONES D'ATTRACTION DANS LE CAS DE TERRE HOMOGENE CONDUCTRICE

#### 1.1 Influence du diamètre sur les zones d'attraction.

- $D_{P1} = 0,5\text{mm}$

$d_{90}/h_c$	1,4	2,25	2,937	3,125
$d_{100}/h_c$	1,062	1,85	2,4	2,575
$h/h_c$	1	2	3	3,5
$e'/h_c$	0,0620	0,1030	0,1240	0,0889

Tableau 1.1(a)

- $D_{P2} = 0,8\text{mm}$

$d_{90}/h_c$	1,30	2,05	2,8	3
$d_{100}/h_c$	1,03	1,76	2,31	2,5
$h/h_c$	1	2	3	3,5
$e'/h_c$	0,0300	0,0242	0,0555	0,0355

Tableau 1.1(b)

- $D_{P3} = 4\text{mm}$

$d_{90}/h_c$	1,137	1,9	2,462	2,675
$d_{100}/h_c$	1,05	1,675	2,125	2,250
$h/h_c$	1	2	3	3,5
$e'/h_c$	0,05	-0,0492	-0,0818	-0,1366

Tableau 1.1(c)

- $D_{P4} = 8\text{mm}$

$d_{90}/h_c$	1,025	1,75	2,162	2,325
$d_{100}/h_c$	0,837	1,35	1,675	1,8
$h/h_c$	1	2	3	3,5
$e'/h_c$	-0,163	-0,3200	-0,3912	-0,4194

Tableau 1.1(d)

- $D_{P5} = 12\text{mm}$

$d_{90}/h_c$	0,975	1,75	2,3	2,5
$d_{100}/h_c$	0,837	1,275	1,625	1,7
$h/h_c$	1	2	3	3,5
$e'/h_c$	-0,163	-0,3796	-0,423	-0,4767

Tableau 1.1(e)

## 1.2 Calcul d'erreur

$D_p/h_c$	0,0125	0,02	0,1	0,2	0,3
$\Delta d_1/h_c$	0,0155	0,0075	0,0125	0,0408	0,0408
$\Delta d_2/h_c$	0,0295	0,0070	0,0143	0,0955	0,1143
$\Delta d_3/h_c$	0,0425	0,0200	0,0263	0,1388	0,1513
$\Delta d_4/h_c$	0,0338	0,0150	0,0475	0,1600	0,1850

Tableau 1.2

## 1.3 Niveau de terre fictive

$D_p$	$D_{p1}$	$D_{p2}$	$D_{p3}$	$D_{p4}$	$D_{p5}$
$D_p/h_c$	0,0125	0,02	0,1	0,2	0,3
$e'/h_c$	0,0945	0,0363	-0,0544	-0,3234	-0,3606

Tableau 1.3

## 1.4 Influence du diamètre du paratonnerre horizontal sur la distance d.

### • $h/h_c=1$

$D_p$	$D_{p1}$	$D_{p2}$	$D_{p3}$	$D_{p4}$	$D_{p5}$
$D_p/h_c$	0,0125	0,02	0,1	0,2	0,3
$d/h$	1,062	1,03	1,05	0,837	0,837

Tableau 1.4 (a)

### • $h/h_c=2$

$D_p/h_c$	0,00625	0,01	0,05	0,1	0,15
$d/h$	0,925	0,88	0,838	0,675	0,6375

Tableau 1.4 (b)

### • $h/h_c=3$

$D_p/h_c$	0,00417	0,00667	0,03333	0,06667	0,1
$D/h$	0,8	0,77	0,7083	0,5583	0,5417

Tableau 1.4 (c)

### • $h/h_c=3,5$

$D_p/h_c$	0,00357	0,00571	0,02857	0,05714	0,08571
$d/h$	0,7357	0,7143	0,6429	0,5143	0,4857

Tableau 1.4 (d)

## ANNEXE C

### 1. ZONES D'ATTRACTION DU PARATONNERRE HORIZONTAL POUR LA PREMIERE CONFIGURATION DE TERRE DISCONTINUE

#### 1.1 Influence du rapport $D/h_c$

- $D_{P1}=0,5\text{mm}$

$h/h_c$	1	2	3	3,5	$\epsilon/h_c$
$D/h_c=2$	1,45	2,5	2,95	3,312	0,5891
$D/h_c=6$	1,45	2,362	2,94	3,162	0,5254
$D/h_c=12$	1,4	2,25	2,937	3,125	0,4794

Tableau 1.1 (a)

- $D_{P2}=4\text{mm}$

$h/h_c$	1	2	3	3,5	$\epsilon/h_c$
$D/h_c=2$	1,14	1,975	2,55	2,85	0,2214
$D/h_c=6$	1,14	1,95	2,50	2,825	0,2013
$D/h_c=12$	1,075	1,925	2,45	2,70	0,1466

Tableau 1.1 (b)

- $D_{P3}=8\text{mm}$

$h/h_c$	1	2	3	3,5	$\epsilon/h_c$
$D/h_c=2$	1,04	2,10	2,575	2,75	0,2107
$D/h_c=6$	1,025	1,975	2,40	2,575	0,1129
$D/h_c=12$	1,012	1,90	2,30	2,562	0,0717

Tableau 1.1 (c)

- $D_{P4}=12\text{mm}$

$h/h_c$	1	2	3	3,5	$\epsilon/h_c$
$D/h_c=2$	1,012	1,962	2,375	2,687	0,1223
$D/h_c=6$	1,012	1,80	2,35	2,55	0,0570
$D/h_c=12$	0,975	1,70	2,30	2,50	0,0077

Tableau 1.1 (d)

#### 1.2 Influence du diamètre $D_p$

- $D/h_c = 2$

$h/h_c$	1	2	3	3,5
$D_{P1}$	1,30	1,975	2,475	2,75
$D_{P2}$	0,975	1,80	2,25	2,40
$D_{P3}$	0,95	1,70	2,175	2,30
$D_{P4}$	0,925	1,40	1,90	2,175

Tableau 1.2 (a)

- $D/h_c = 6$

$h/h_c$	1	2	3	3,5
$D_{P1}$	1,225	1,90	2,425	2,675
$D_{P2}$	0,975	1,70	2,20	2,35
$D_{P3}$	0,925	1,612	1,85	2,025
$D_{P4}$	0,925	1,30	1,725	1,962

Tableau 1.2 (b)

- $D/h_c = 12$

$h/h_c$	1	2	3	3,5
$D_{P1}$	1,175	1,80	2,30	2,55
$D_{P2}$	1,05	1,60	2,00	2,30
$D_{P3}$	0,925	1,35	1,675	1,937
$D_{P4}$	0,875	1,25	1,60	1,90

Tableau 1.2 (c)

### 1.3 Influence du rapport $D/h_c$ sur le niveau de terre fictive

- $D_{P1} = 0,5\text{mm}$

$(\acute{e}/h_c)_0 = 0,4794$  : le niveau de terre fictive dans le cas de terre homogène conductrice

$D/h_c$	2	6	12
$(\acute{e}/h_c)_{\text{moy}}$	0,5891	0,5254	0,4794

Tableau 1.3 (a)

## 2 ZONES D'ATTRACTION DU PARATONNERRE HORIZONTAL POUR LA DEUXIEME CONFIGURATION

### 2.1 Influence du rapport $D/h_c$

- $D_{P2} = 0,5\text{mm}$

$h/h_c$		1	2	3	3,5
$D/h_c = 4$	$d_{90}/h_c$	1,35	2,20	2,80	2,80
$D/h_c = 6$	$d_{90}/h_c$	1,38	2,25	2,90	3,00
$D/h_c = 8$	$d_{90}/h_c$	1,40	2,30	2,90	3,10

Tableau 2.1 (a)

- $D_{P2} = 0,8\text{mm}$

$h/h_c$		1	2	3	3,5
$D/h_c = 4$	$d_{90}/h_c$	1,25	1,90	2,60	2,80
$D/h_c = 6$	$d_{90}/h_c$	1,25	1,90	2,70	2,85
$D/h_c = 8$	$d_{90}/h_c$	1,25	2,00	2,75	2,90

Tableau 2.1 (b)

•  $D_{P3} = 4\text{mm}$ 

$h/h_c$		1	2	3	3,5
$D/h_c = 2$	$d_{90}/h_c$	1,05	1,80	2,30	
$D/h_c = 4$	$d_{90}/h_c$	1,087	1,80	2,375	2,612
$D/h_c = 6$	$d_{90}/h_c$	1,10	1,825	2,40	2,675
$D/h_c = 8$	$d_{90}/h_c$	1,137	1,825	2,475	2,675

Tableau 2.1 (c)

•  $D_{P4} = 8\text{mm}$ 

$h/h_c$		1	2	3	3,5
$D/h_c = 2$	$d_{90}/h_c$	0,80	1,60	1,90	
$D/h_c = 4$	$d_{90}/h_c$	0,825	1,65	2,00	2,125
$D/h_c = 6$	$d_{90}/h_c$	0,85	1,68	2,07	2,275
$D/h_c = 8$	$d_{90}/h_c$	1,025	1,675	2,162	2,30

Tableau 2.1 (d)

•  $D_{P3} = 12\text{mm}$ 

$h/h_c$		1	2	3	3,5
$D/h_c = 2$	$d_{90}/h_c$	0,90	1,55	1,90	2,20
$D/h_c = 4$	$d_{90}/h_c$	0,9	1,60	2,00	2,20
$D/h_c = 6$	$d_{90}/h_c$	0,90	1,625	2,175	2,40
$D/h_c = 8$	$d_{90}/h_c$	0,937	1,70	2,225	2,50

Tableau 2.1 (e)

2.2 Influence du diamètre  $D_p$  sur les zones d'attraction•  $D/h_c = 2$ 

$h/h_c$	1	2	3	3,5
$D_{P3}$	1,025	1,4	1,625	
$D_{P4}$	0,75	1,1875	1,35	
$D_{P5}$	0,8	1,15	1,3	1,425

Tableau 2.2 (a)

•  $D/h_c = 4$ 

$h/h_c$	1	2	3	3,5
$D_{P1}$	1,05	1,325	2,2	2,425
$D_{P2}$	1	1,55	2,1	2,3
$D_{P3}$	1,025	1,425	1,875	2
$D_{P4}$	0,825	1,25	1,425	1,5
$D_{P5}$	0,8	1,15	1,4	1,425

Tableau 2.2 (b)

- $D/h_c = 6$

$h/h_c$	1	2	3	3,5
$D_{P1}$	1,075	1,7	2,3	2,425
$D_{P2}$	1	1,625	1,975	2,35
$D_{P3}$	1,05	1,5	1,975	2,1
$D_{P4}$	0,8	1,3	1,575	1,7
$D_{P5}$	0,825	1,162	1,5	1,675

Tableau 2.2 (c)

- $D/h_c = 8$

$h/h_c$	1	2	3	3,5
$D_{P1}$	1,1	1,8	2,437	2,58
$D_{P2}$	1	1,7	2,3	2,4
$D_{P3}$	1	1,525	2,025	2,1
$D_{P4}$	0,962	1,325	1,675	1,8
$D_{P5}$	0,84	1,2	1,6	1,7

Tableau 2.2 (d)

### 3 ZONES D'ATTRACTION DU PARATONNERRE HORIZONTAL POUR LA TROISIEME CONFIGURATION

#### 3.1 Influence du rapport $D/h_c$

- $D_{P2} = 0,5\text{mm}$

$h/h_c$		1	2	3	3,5
$D/h_c = 4$	$d_{90}/h_c$	1,4	1,9825	1,9	
$D/h_c = 6$	$d_{90}/h_c$	1,4875	2,25	2,625	2,725
$D/h_c = 10$	$d_{90}/h_c$	1,35	2,5	3,0125	3,125

Tableau 3.1 (a)

- $D_{P2} = 0,8\text{mm}$

$h/h_c$		1	2	3	3,5
$D/h_c = 4$	$d_{90}/h_c$	1,1	1,8	1,925	
$D/h_c = 6$	$d_{90}/h_c$	1,2	1,9375	2,8	2,85
$D/h_c = 10$	$d_{90}/h_c$	1,3	2,1	2,775	2,95

Tableau 3.1 (b)

- $D_{P3} = 4\text{mm}$

$h/h_c$		1	2	3	3,5
$D/h_c = 4$	$d_{90}/h_c$	1,1	1,8	1,8125	
$D/h_c = 6$	$d_{90}/h_c$	1,1375	1,875	2,2	2,4
$D/h_c = 10$	$d_{90}/h_c$	1,2	1,95	2,375	2,65

Tableau 3.1 (c)

- $D_{P4} = 8\text{mm}$

$h/h_c$		1	2	3	3,5
$D/h_c = 4$	$d_{90}/h_c$	1	1,7	1,75	
$D/h_c = 6$	$d_{90}/h_c$	1,125	1,825	2,463	2,588
$D/h_c = 10$	$d_{90}/h_c$	1,15	1,95	2,475	2,675

Tableau 3.1 (d)

- $D_{P3} = 12\text{mm}$

$h/h_c$		1	2	3	3,5
$D/h_c = 4$	$d_{90}/h_c$	0,825	1,5	1,55	
$D/h_c = 6$	$d_{90}/h_c$	0,825	1,6	2,25	2,4
$D/h_c = 10$	$d_{90}/h_c$	0,9	1,8	2,35	2,475

Tableau 3.1 (e)

### 3.2 Influence du diamètre $D_p$ sur les zones d'attraction

- $D/h_c = 4$

$h/h_c$	1	2	3
$D_{P1}$	1,025	1,8125	1,8
$D_{P2}$	0,9	1,6	1,7
$D_{P3}$	0,95	1,3	1,375
$D_{P4}$	0,925	1,125	1,15
$D_{P5}$	0,8	1,025	1,05

Tableau 3.2 (a)

- $D/h_c = 6$

$h/h_c$	1	2	3	3,5
$D_{P1}$	1,025	1,785	2,2	2,525
$D_{P2}$	1,0	1,6	2,2	2,225
$D_{P3}$	1,0	1,575	2,025	2,075
$D_{P4}$	0,925	1,275	1,575	1,775
$D_{P5}$	0,8	1,2	1,45	1,475

Tableau 3.2 (b)

- $D/h_c = 10$

$h/h_c$	1	2	3	3,5
$D_{P1}$	1,0	1,8	2,5	2,5625
$D_{P2}$	1,0375	1,725	2,3	2,425
$D_{P3}$	1,0	1,65	2,1	2,25
$D_{P4}$	1,0375	1,4	1,7	1,85
$D_{P5}$	0,825	1,28	1,65	1,7

Tableau 3.2 (c)

### 3. ZONES D'ATTRACTION DU PARATONNERRE HORIZONTAL POUR LA QUATRIEME CONFIGURATION DE TERRE DISCONTINUE

#### 4.1 Influence du rapport $D/h_c$ sur les zones d'attraction

- $D_{P3} = 0,5\text{mm}$

$h/h_c$		1	2	3	3,5
$D/h_c = 1$	$d_{90}/h_c$	1,475	2,45	3,2	
$D/h_c = 2$	$d_{90}/h_c$	1,475	2,4	3,125	3,375
$D/h_c = 6$	$d_{90}/h_c$	1,475	2,325	3	3,225
$D/h_c = 10$	$d_{90}/h_c$	1,45	2,3	2,95	3,175

Tableau 4.1 (a)

- $D_{P3} = 12\text{mm}$

$h/h_c$		1	2	3	3,5
$D/h_c = 1$	$d_{90}/h_c$	0,975	1,8	2,425	
$D/h_c = 2$	$d_{90}/h_c$	0,975	1,8	2,4	2,6
$D/h_c = 6$	$d_{90}/h_c$	1,0	1,775	2,35	2,575
$D/h_c = 10$	$d_{90}/h_c$	0,975	1,725	2,3	2,5

Tableau 4.1 (b)

#### 4.2 Influence du rapport $D/h_c$ et $D_P$ sur le niveau de terre fictive

- $D_P = 0,5\text{mm}$        $(e'/h_c)_{\text{moy}} = 0,0945$

$D/h_c$	1	2	6	10
$e'/h_c$	0,4203	0,3183	0,24	0,1532

Tableau 4.2 (a)

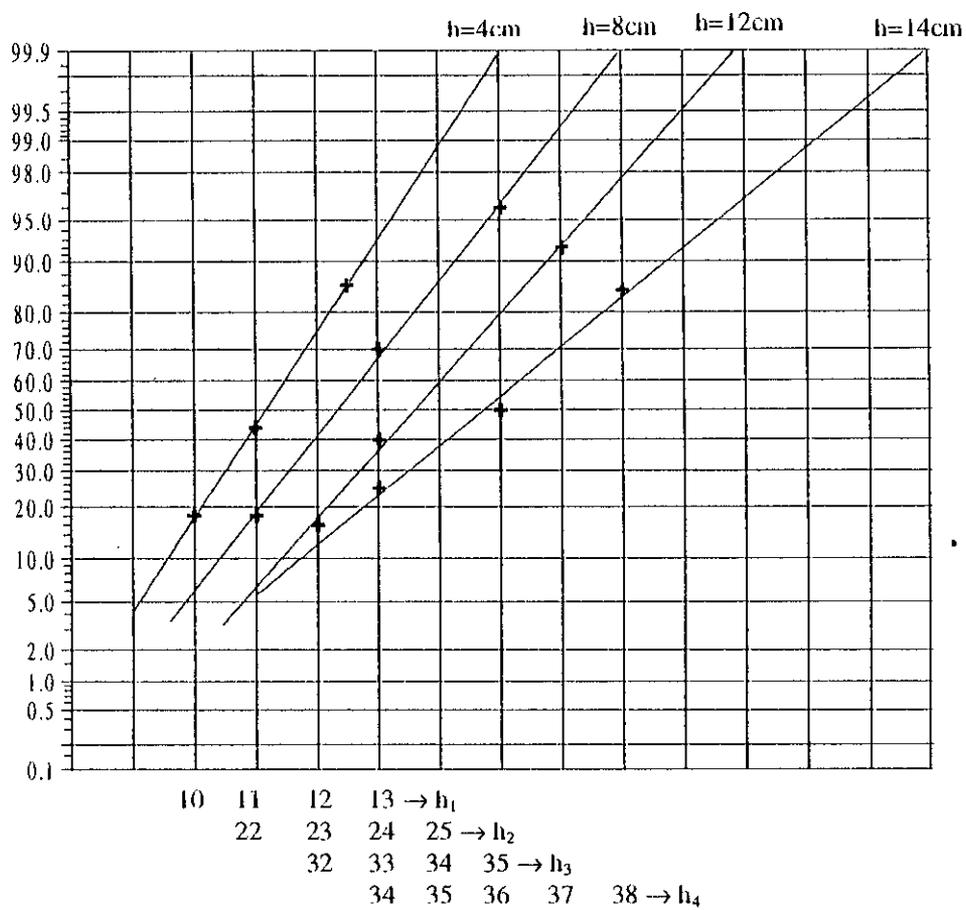
- $D_P = 12\text{mm}$        $(e'/h_c)_{\text{moy}} = -0,3606$

$D/h_c$	1	2	6	10
$e'/h_c$	-0,2309	-0,2308	-0,3302	-0,3595

Tableau 4.2 (b)

## ANNEXE D

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



**Figure 1.1-** Détermination des tensions  $U_{100\%}$  pour les différentes hauteurs de la tige de haute tension.

## 2. Détermination des zones d'attraction dans le cas de la terre homogène conductrice

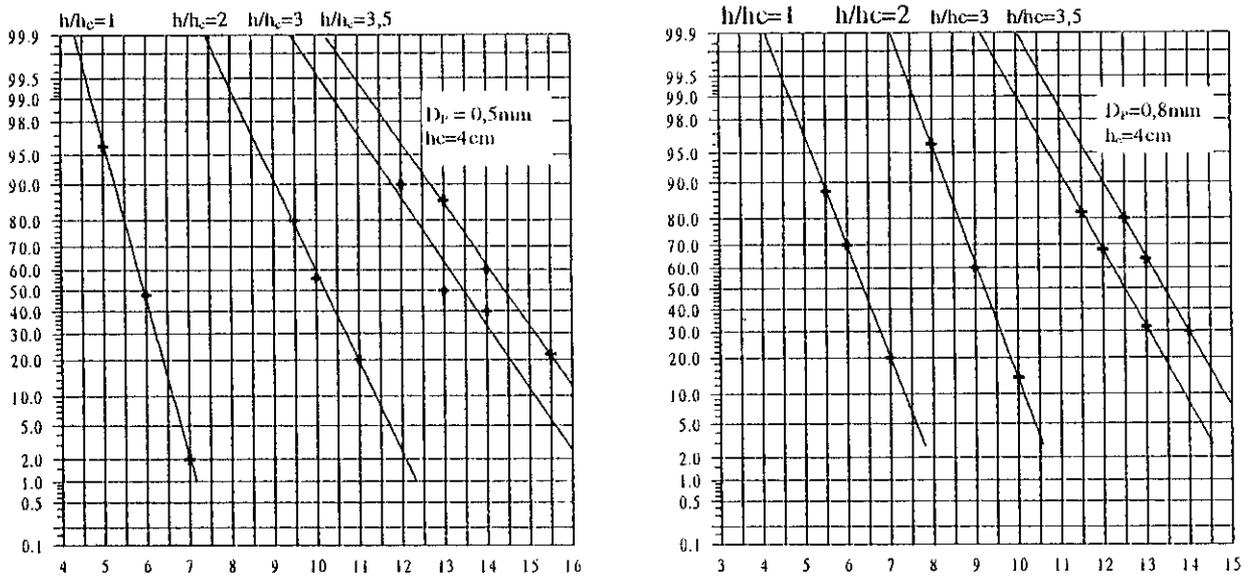


Figure 2.1- Détermination des distances  $d_{90\%}$  et  $d_{100\%}$  pour une terre homogène conductrice ( $D_p = 0,5\text{mm}$ ,  $D_p = 0,8\text{mm}$ ).

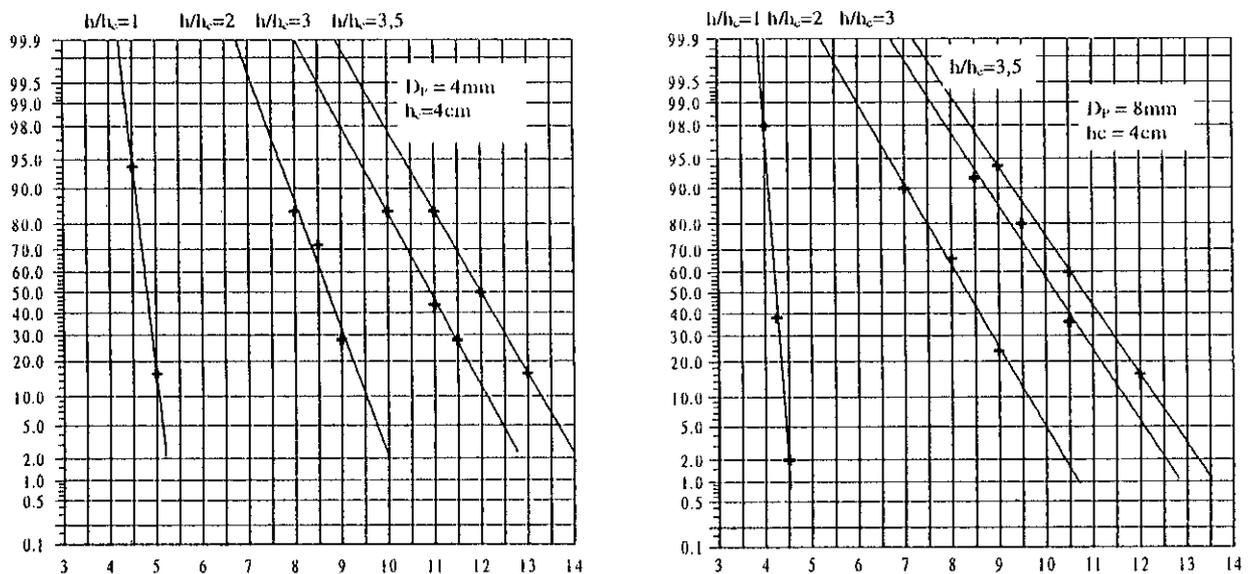


Figure 2.2- Détermination des distances  $d_{90\%}$  et  $d_{100\%}$  pour une terre homogène conductrice ( $D_p = 4\text{mm}$ ,  $D_p = 8\text{mm}$ ).

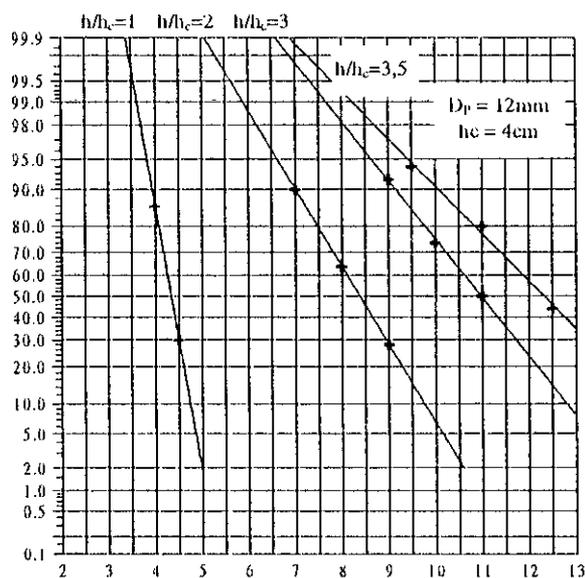


Figure 2.3- Détermination des distances  $d_{90\%}$  et  $d_{100\%}$  pour une terre homogène conductrice ( $D_p=12\text{mm}$ ).

### 3. Détermination des distances $d_{90\%}$ et $d_{100\%}$ pour les différentes configurations de la terre discontinue

#### 3.1 Première configuration : Paratonnerre situé sur la partie haute de la terre discontinue entre l'axe de la décharge et l'interface

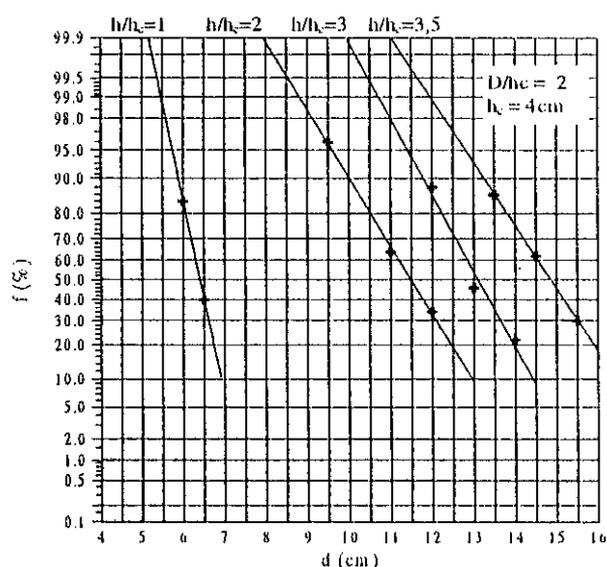


Figure 3.1-  $f = f(d)$  pour  $D_p = 0,5\text{mm}$ ,  
 $D/h_c = 6$

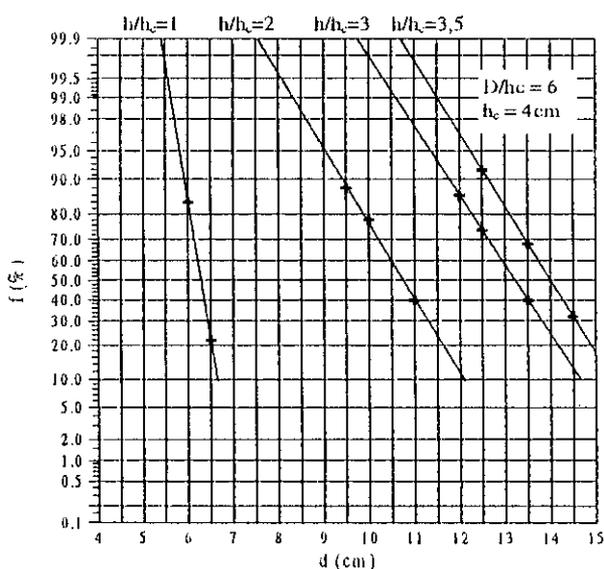


Figure 3.2-  $f = f(d)$  pour  $D_p = 0,5\text{mm}$ ,  
 $D/h_c = 6$

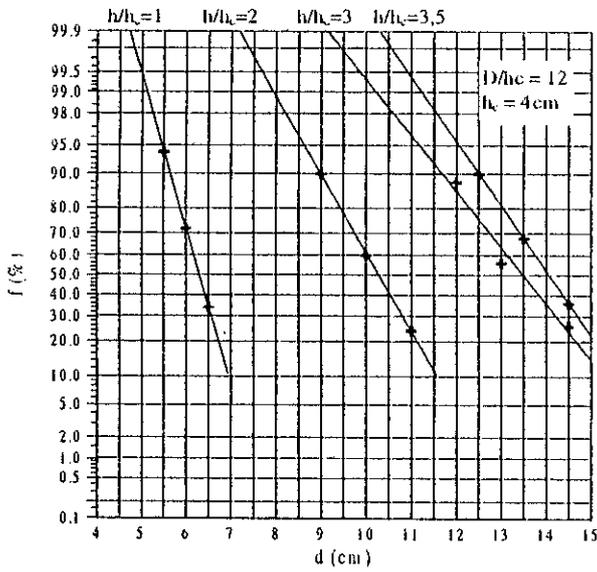


Figure 3.3-  $f = f(d)$  pour  $D_p = 0,5$ mm,  $D/h_c = 12$

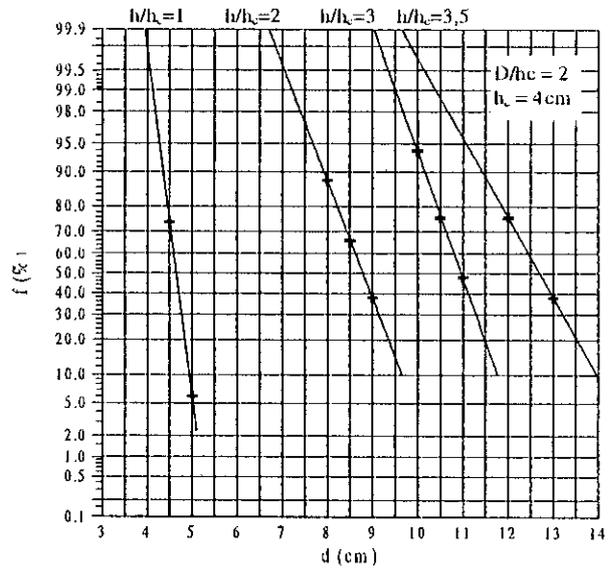


Figure 3.4-  $f = f(d)$  pour  $D_p = 4$ mm,  $D/h_c = 2$

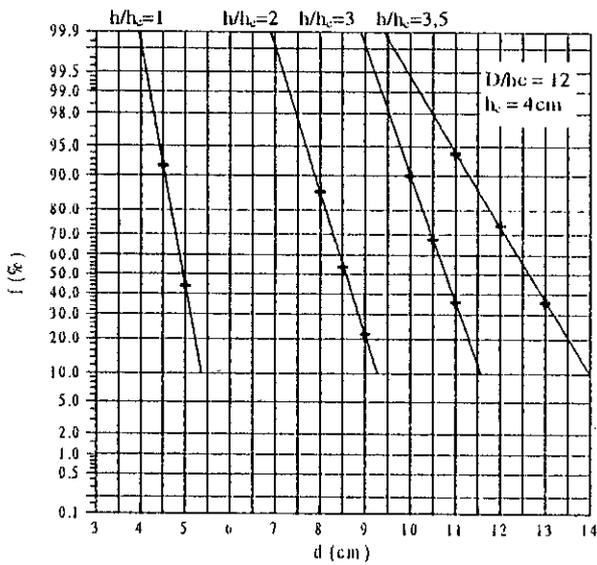


Figure 3.5-  $f = f(d)$  pour  $D_p = 4$ mm,  $D/h_c = 6$

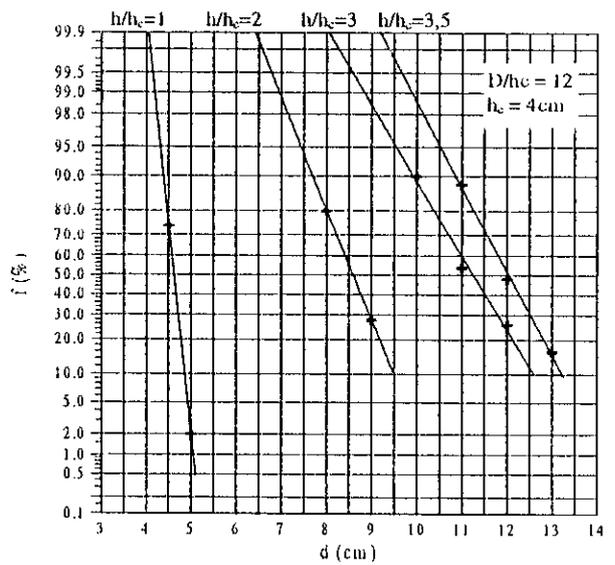


Figure 3.6-  $f = f(d)$  pour  $D_p = 4$ mm,  $D/h_c = 12$

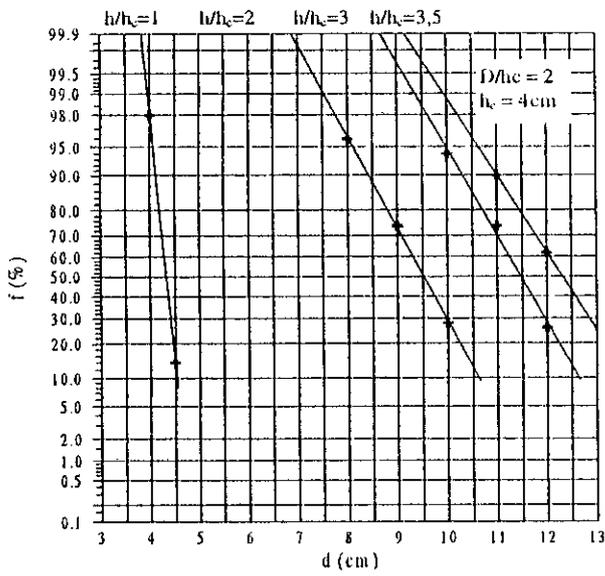


Figure 3.7-  $f = f(d)$  pour  $D_p = 8\text{mm}$ ,  
 $D/h_c = 2$

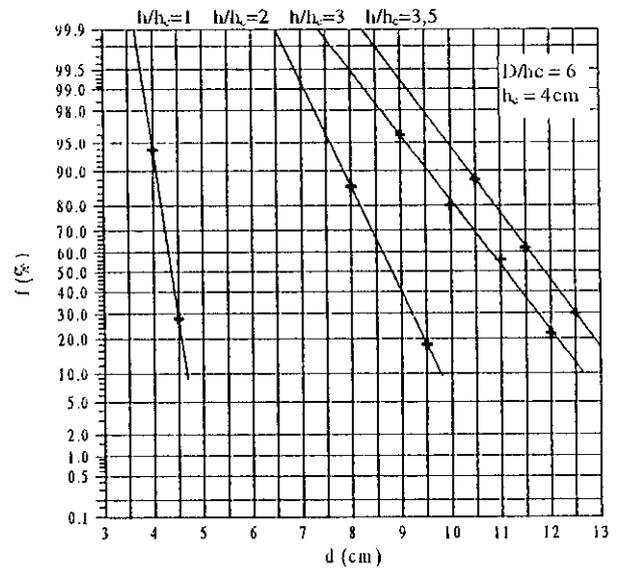


Figure 3.8-  $f = f(d)$  pour  $D_p = 8\text{mm}$ ,  
 $D/h_c = 6$

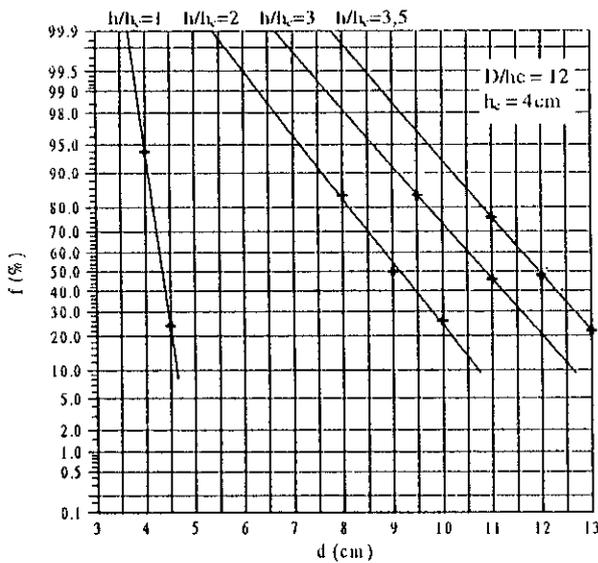


Figure 3.9-  $f = f(d)$  pour  $D_p = 8\text{mm}$ ,  
 $D/h_c = 12$

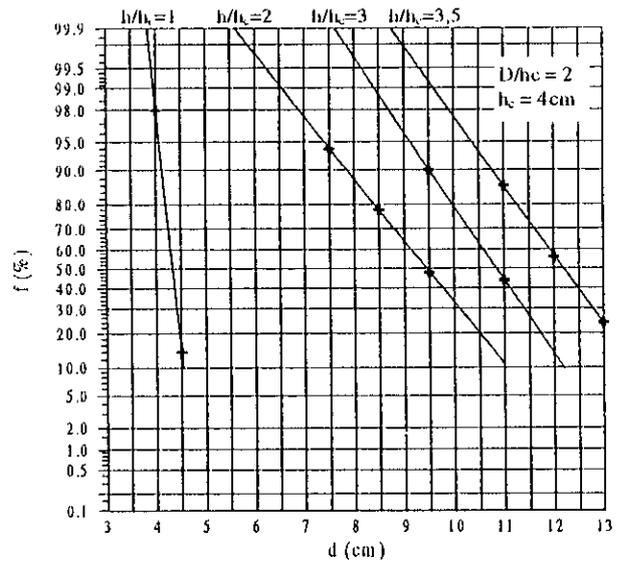


Figure 3.10-  $f = f(d)$  pour  $D_p = 12\text{mm}$ ,  
 $D/h_c = 2$

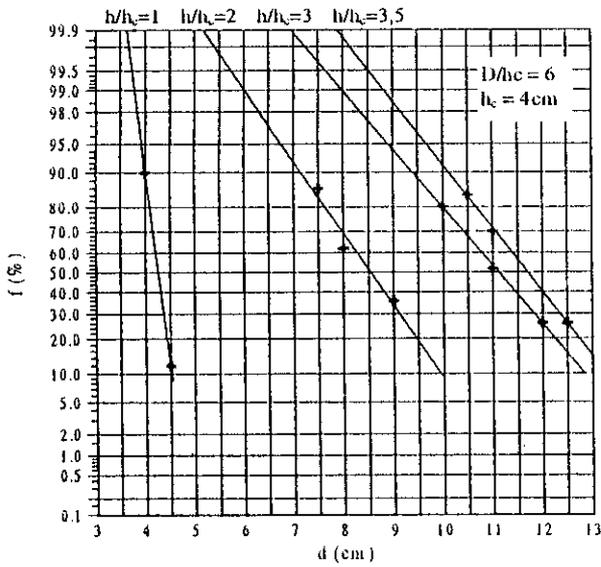


Figure 3.11-  $f = f(d)$  pour  $D_p = 12\text{mm}$ ,  $D/h_c = 6$

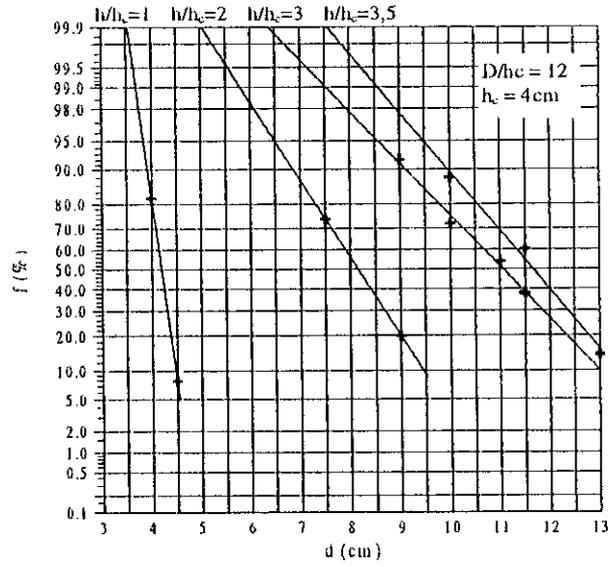


Figure 3.12-  $f = f(d)$  pour  $D_p = 12\text{mm}$ ,  $D/h_c = 12$

**3.2 Deuxième configuration : Axe de la décharge situé sur la partie haute de la terre discontinue entre le paratonnerre horizontal et l'interface**

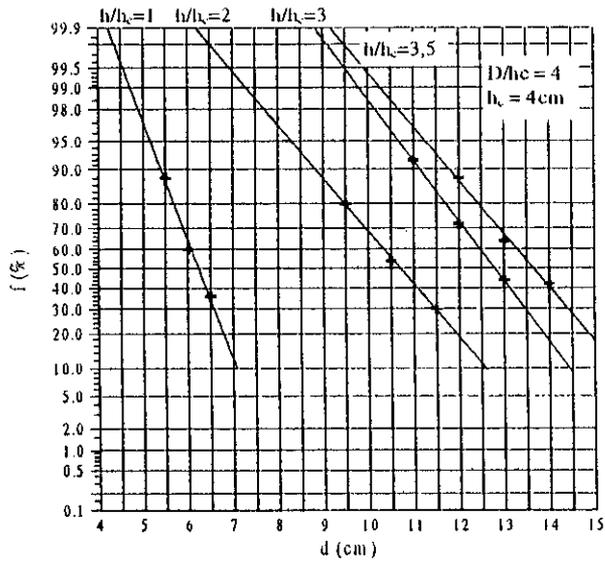


Figure 3.13-  $f = f(d)$  pour  $D_p = 0,5\text{mm}$ ,  $D/h_c = 4$

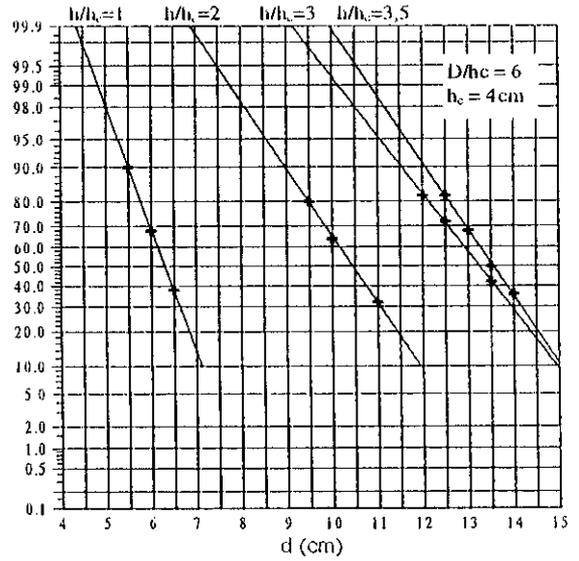


Figure 3.14-  $f = f(d)$  pour  $D_p = 0,5\text{mm}$ ,  $D/h_c = 6$

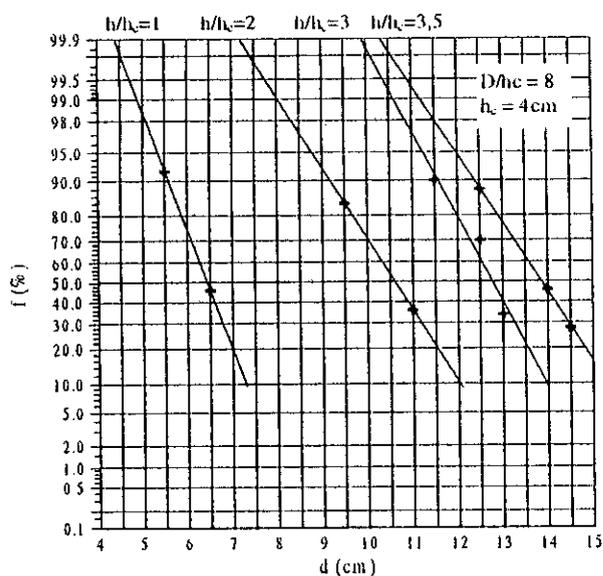


Figure 3.15-  $f = f(d)$  pour  $D_p = 0,5\text{mm}$ ,  
 $D/h_c = 8$

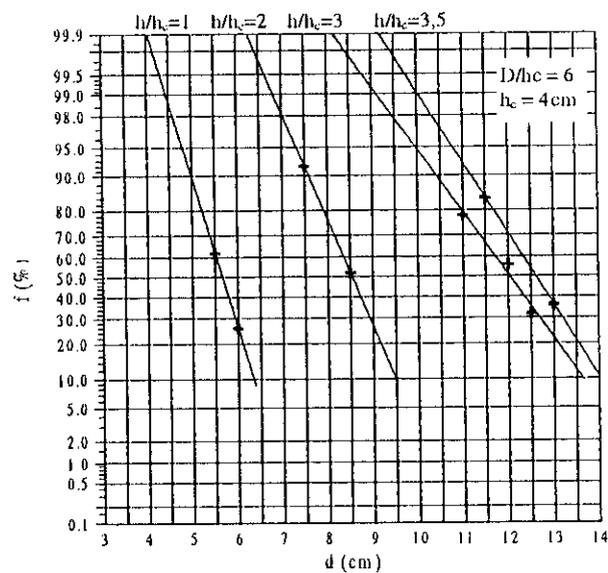


Figure 3.16-  $f = f(d)$  pour  $D_p = 0,8\text{mm}$ ,  
 $D/h_c = 6$

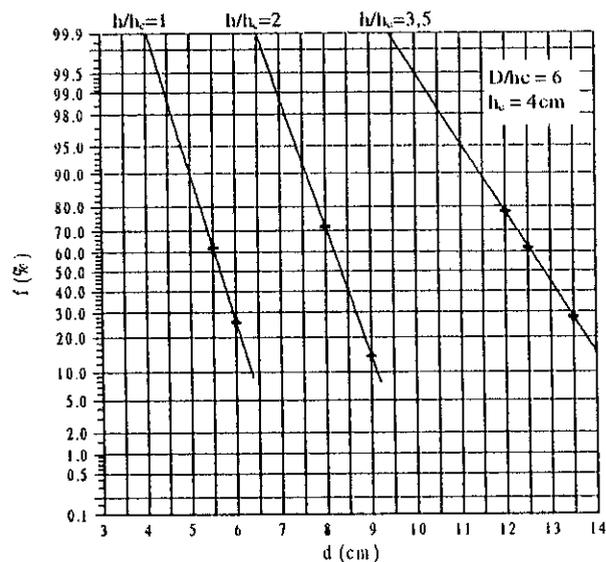


Figure 3.17-  $f = f(d)$  pour  $D_p = 0,8\text{mm}$ ,  
 $D/h_c = 6$

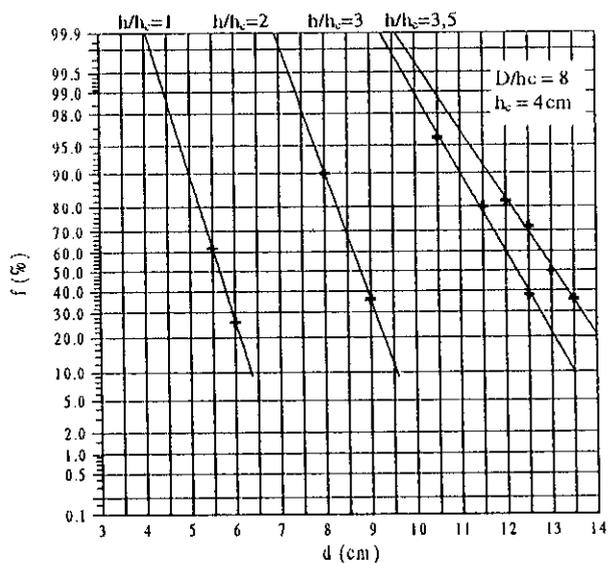


Figure 3.18-  $f = f(d)$  pour  $D_p = 0,8\text{mm}$ ,  
 $D/h_c = 8$

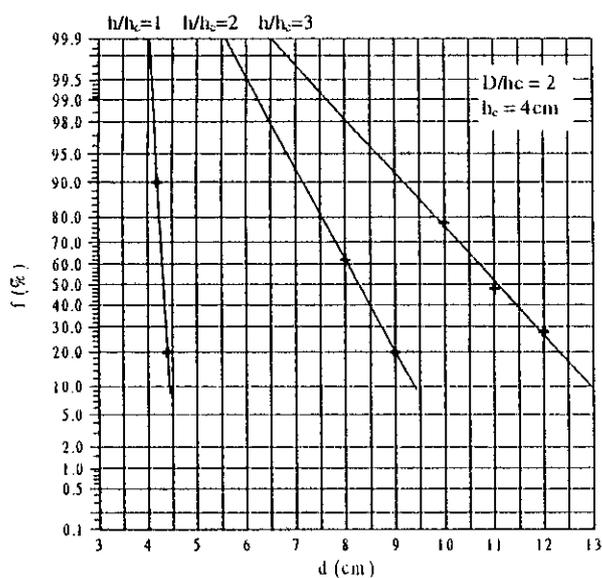


Figure 3.19-  $f = f(d)$  pour  $D_p = 4\text{mm}$ ,  $D/h_c = 2$

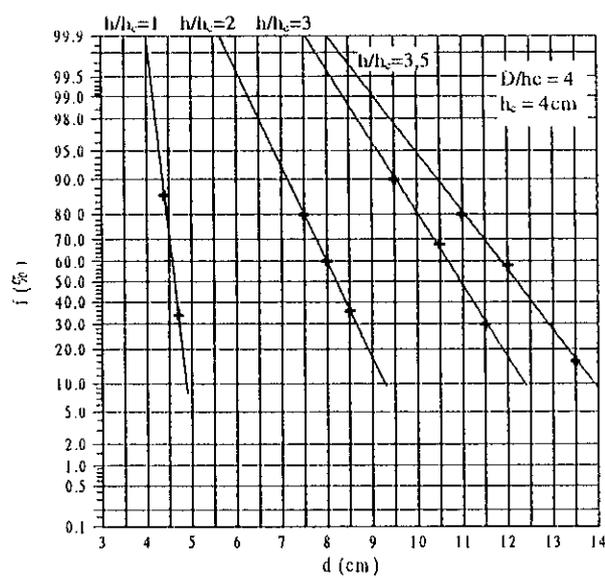


Figure 3.20-  $f = f(d)$  pour  $D_p = 4\text{mm}$ ,  $D/h_c = 4$

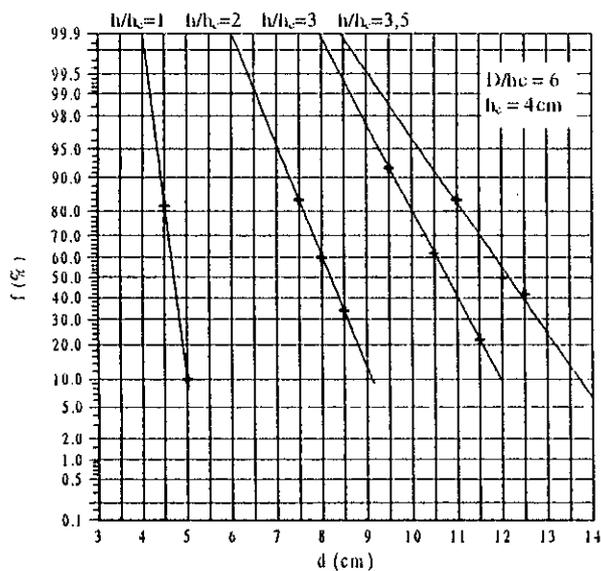


Figure 3.21-  $f = f(d)$  pour  $D_p = 4\text{mm}$ ,  $D/h_c = 6$

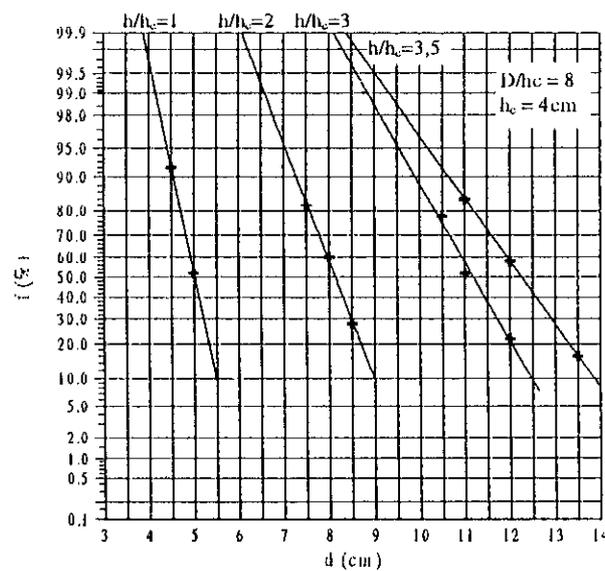


Figure 3.22-  $f = f(d)$  pour  $D_p = 4\text{mm}$ ,  $D/h_c = 8$

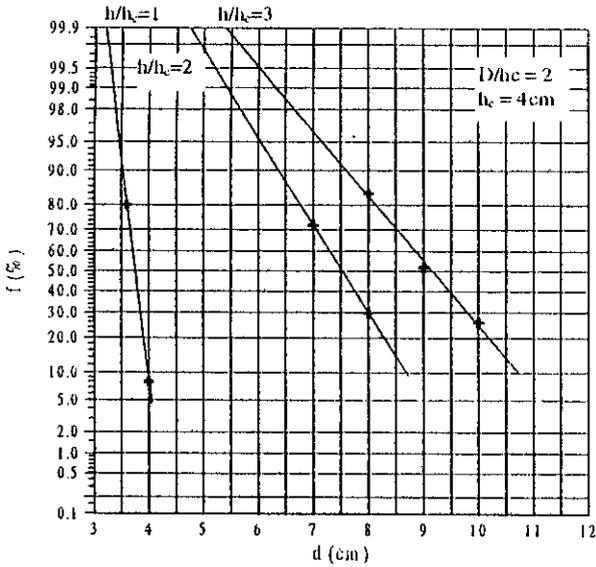


Figure 3.23-  $f = f(d)$  pour  $D_p = 8\text{mm}$ ,  $D/h_c = 2$

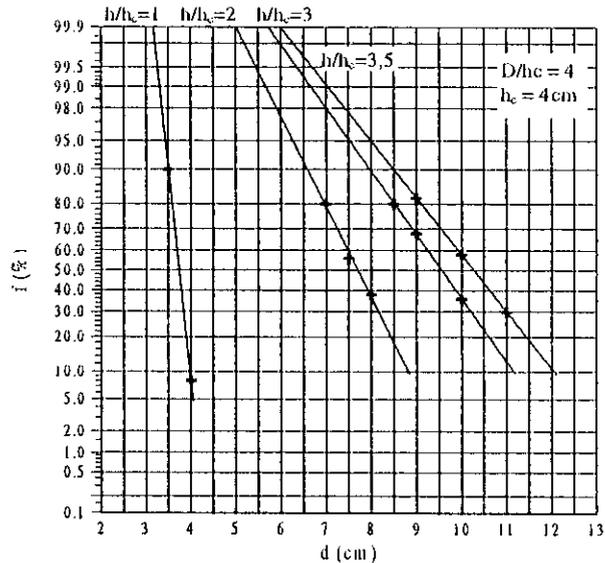


Figure 3.24-  $f = f(d)$  pour  $D_p = 8\text{mm}$ ,  $D/h_c = 4$

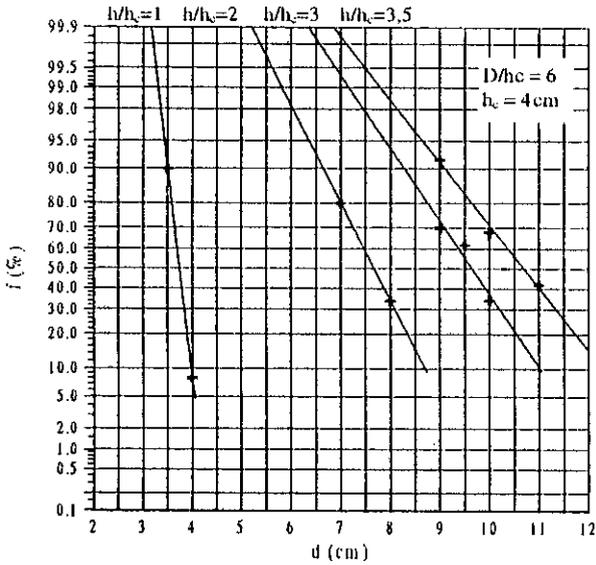


Figure 3.25-  $f = f(d)$  pour  $D_p = 8\text{mm}$ ,  $D/h_c = 6$

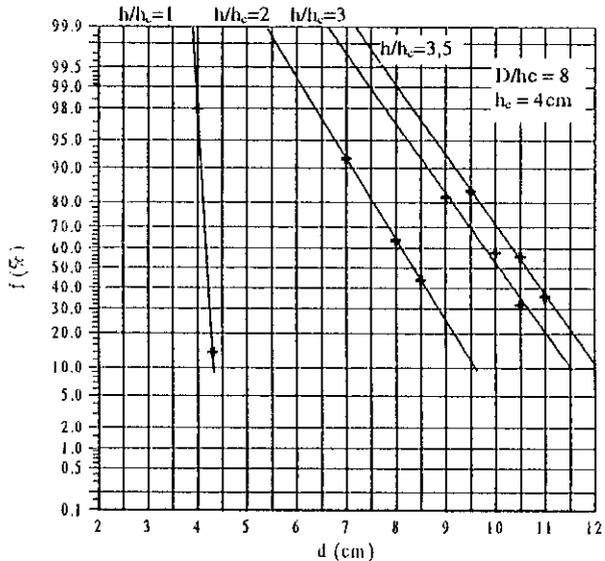


Figure 3.26-  $f = f(d)$  pour  $D_p = 8\text{mm}$ ,  $D/h_c = 8$

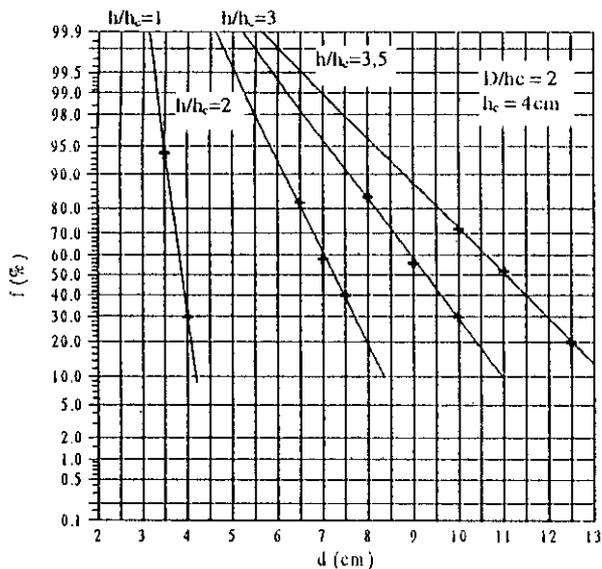


Figure 3.27-  $f = f(d)$  pour  $D_p = 12\text{mm}$ ,  $D/h_c = 2$

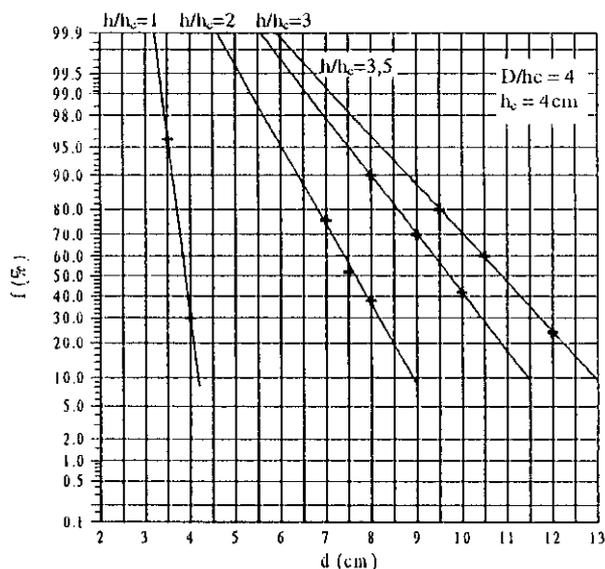


Figure 3.28-  $f = f(d)$  pour  $D_p = 12\text{mm}$ ,  $D/h_c = 4$

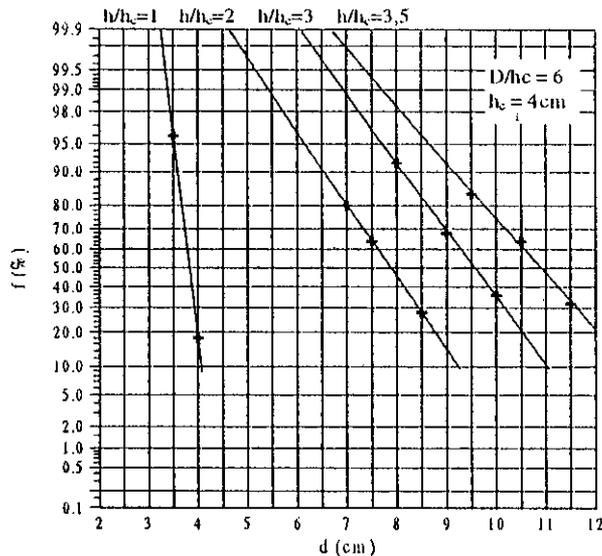


Figure 3.29-  $f = f(d)$  pour  $D_p = 12\text{mm}$ ,  $D/h_c = 6$

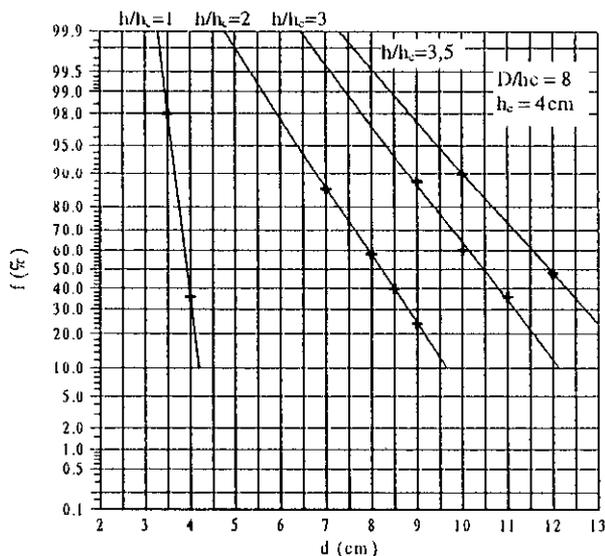


Figure 3.30-  $f = f(d)$  pour  $D_p = 12\text{mm}$ ,  $D/h_c = 8$

### 3.3 Troisième configuration : Paratonnerre situé sur la partie basse de la terre discontinue et l'axe de la décharge situé entre le paratonnerre et l'interface

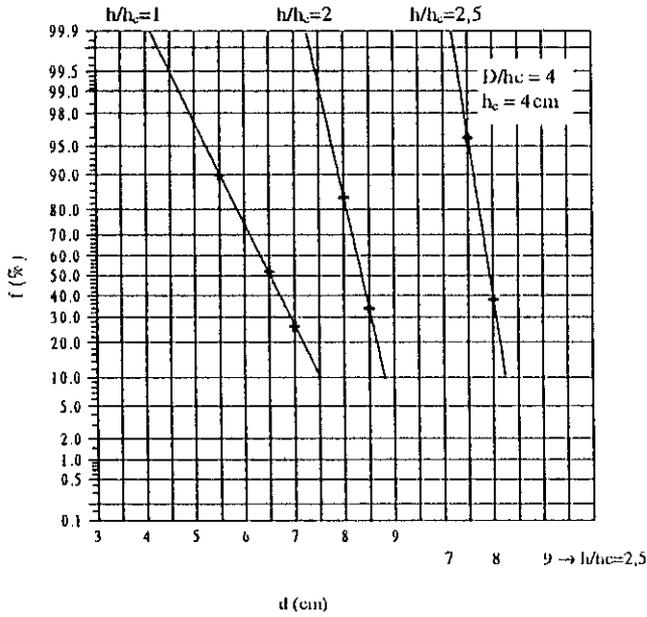


Figure 3.31-  $f = f(d)$  pour  $D_p = 0,5\text{mm}$ ,  
 $D/h_c = 4$

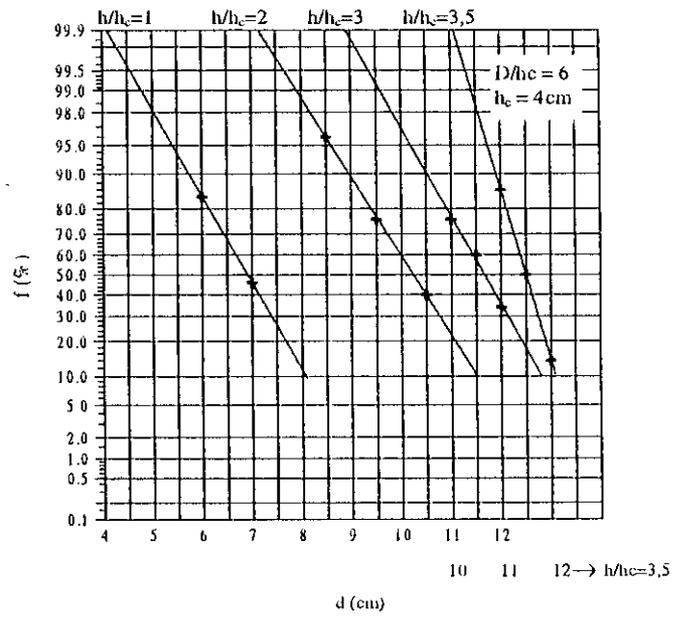


Figure 3.32-  $f = f(d)$  pour  $D_p = 0,5\text{mm}$ ,  
 $D/h_c = 6$

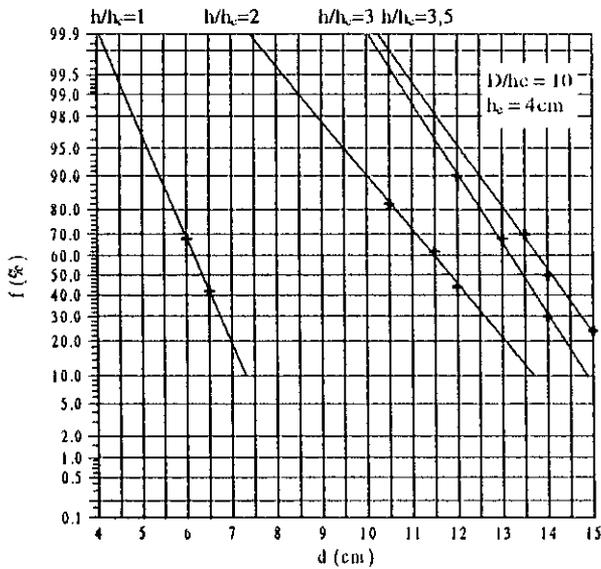


Figure 3.33-  $f = f(d)$  pour  $D_p = 0,5\text{mm}$ ,  
 $D/h_c = 10$

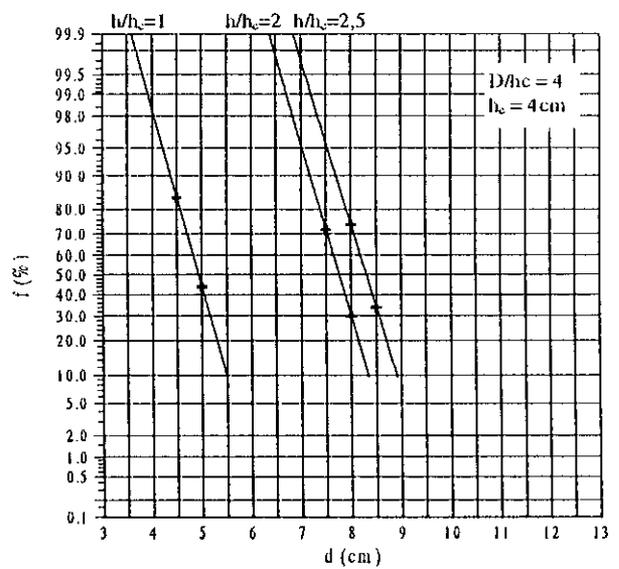


Figure 3.34-  $f = f(d)$  pour  $D_p = 0,8\text{mm}$ ,  
 $D/h_c = 4$

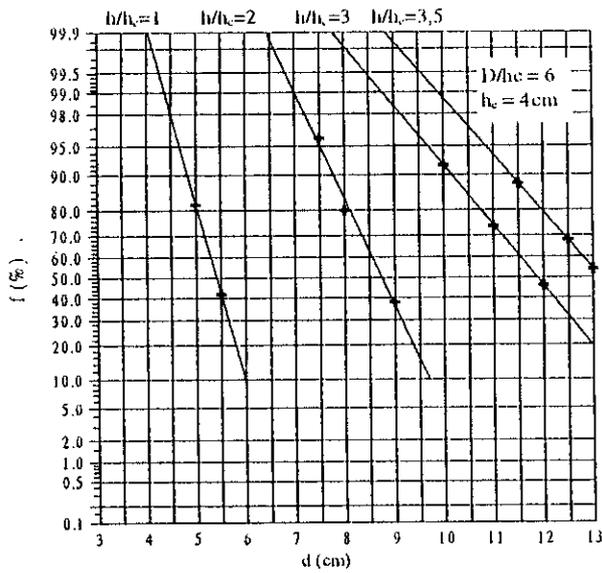


Figure 3.35-  $f = f(d)$  pour  $D_p = 0,8\text{mm}$ ,  
 $D/h_c = 6$

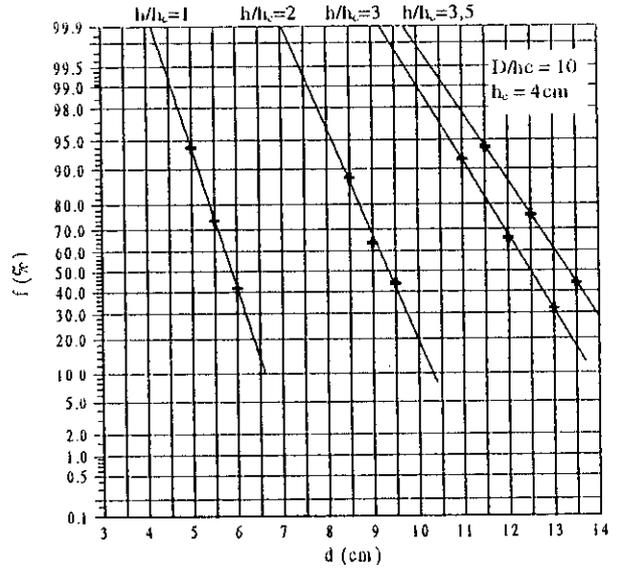


Figure 3.36-  $f = f(d)$  pour  $D_p = 0,8\text{mm}$ ,  
 $D/h_c = 10$

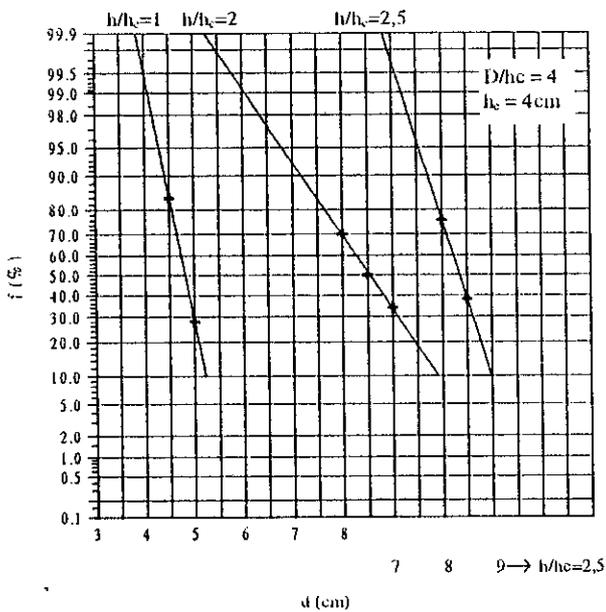


Figure 3.37-  $f = f(d)$  pour  $D_p = 4\text{mm}$ ,  
 $D/h_c = 4$

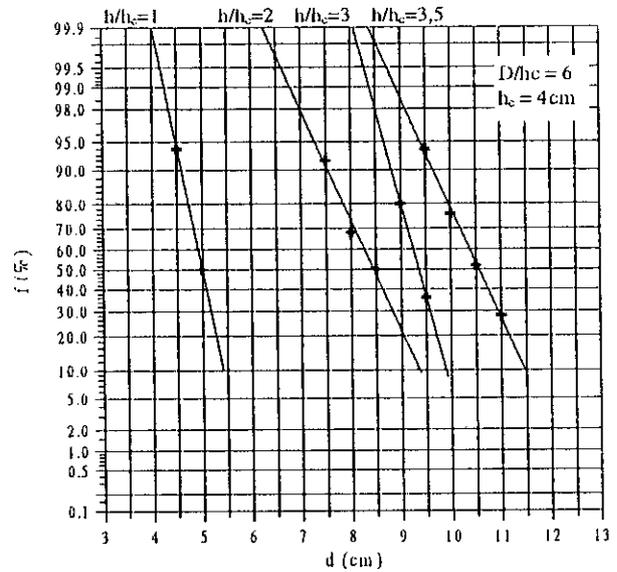


Figure 3.38-  $f = f(d)$  pour  $D_p = 4\text{mm}$ ,  
 $D/h_c = 6$

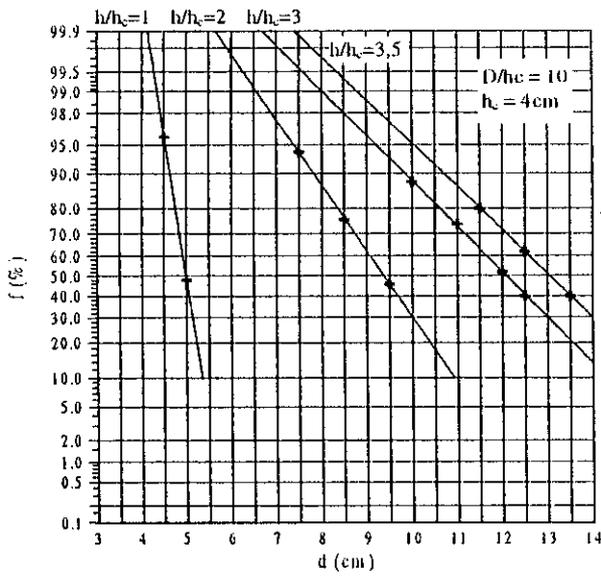


Figure 3.39-  $f = f(d)$  pour  $D_p = 4$  mm,  $D/h_c = 10$

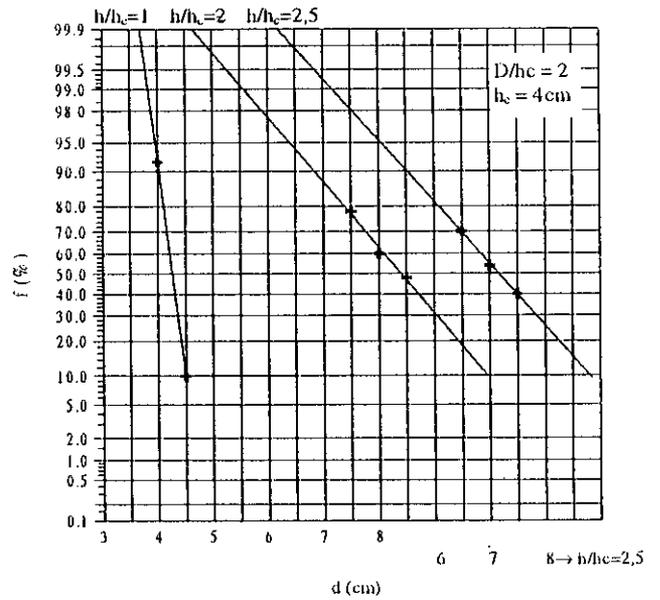


Figure 3.40-  $f = f(d)$  pour  $D_p = 8$  mm,  $D/h_c = 4$

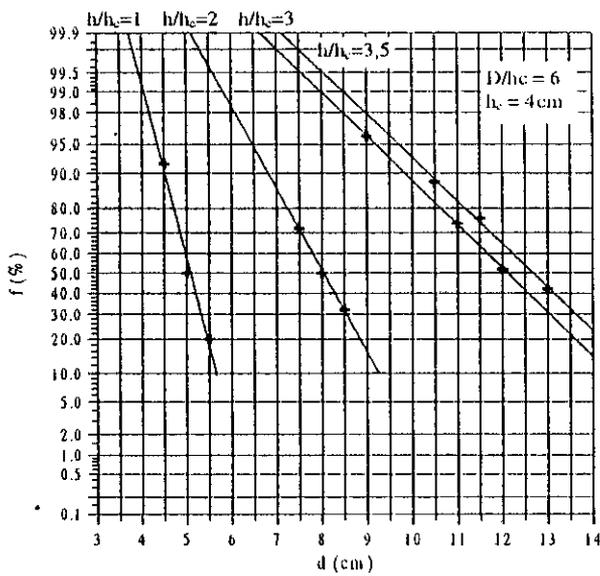


Figure 3.41-  $f = f(d)$  pour  $D_p = 8$  mm,  $D/h_c = 6$

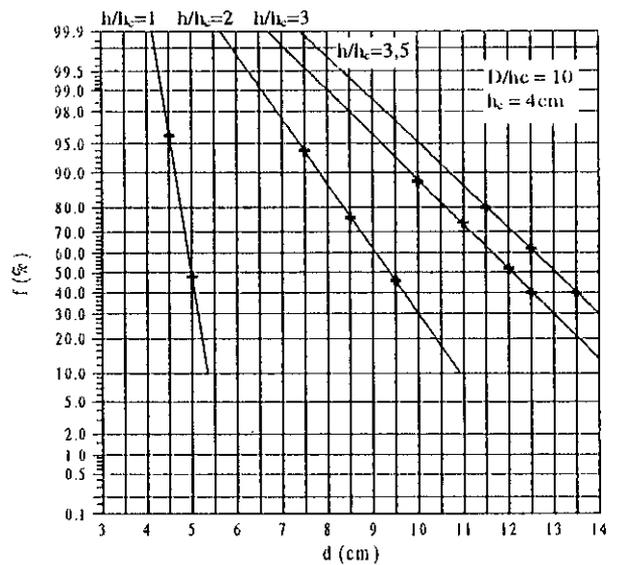


Figure 3.42-  $f = f(d)$  pour  $D_p = 8$  mm,  $D/h_c = 10$

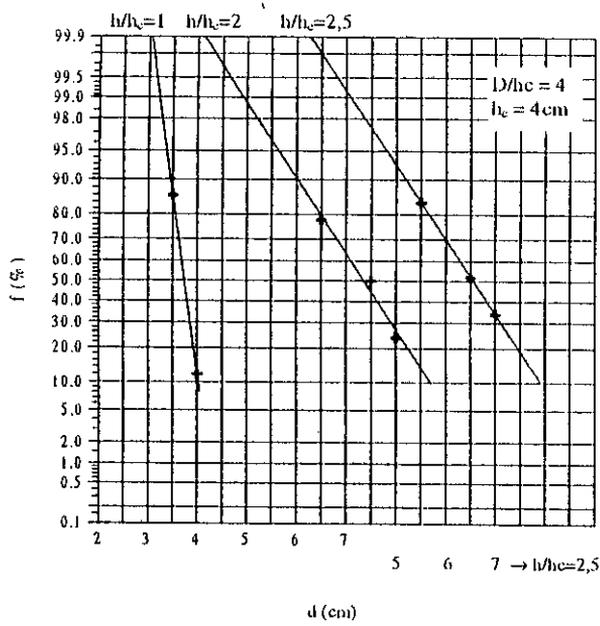


Figure 3.43-  $f = f(d)$  pour  $D_p = 12\text{mm}$ ,  
 $D/h_c = 4$

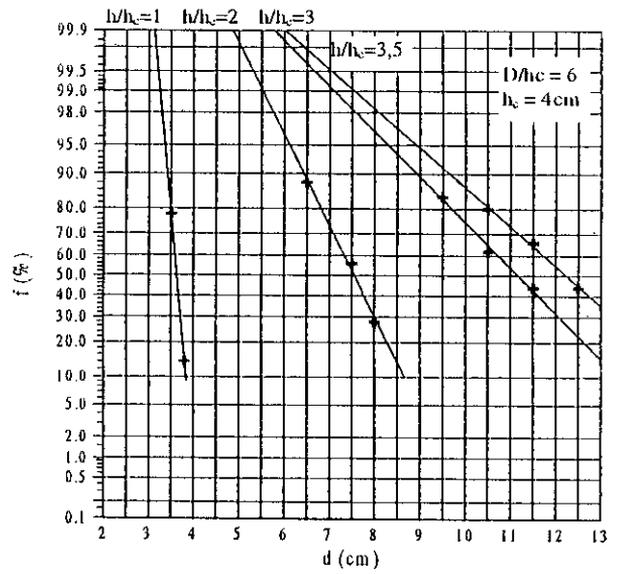


Figure 3.44-  $f = f(d)$  pour  $D_p = 12\text{mm}$ ,  
 $D/h_c = 6$

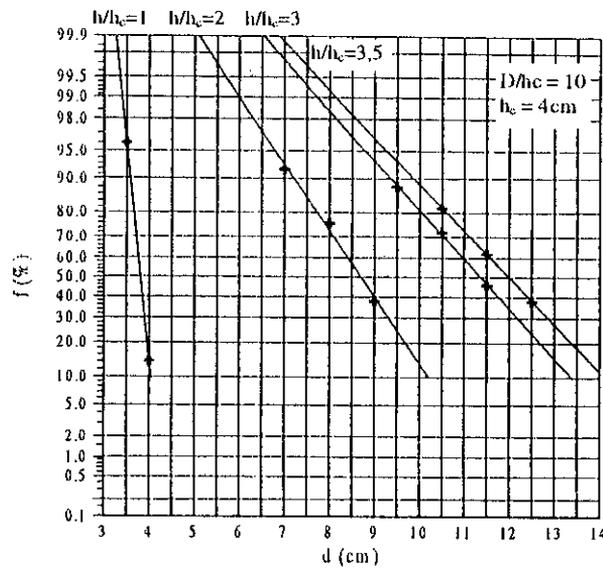


Figure 3.45-  $f = f(d)$  pour  $D_p = 12\text{mm}$ ,  
 $D/h_c = 10$

### 3.3 Quatrième configuration : Paratonnerre situé sur la partie basse de la terre discontinue, entre l'axe de la décharge et l'interface

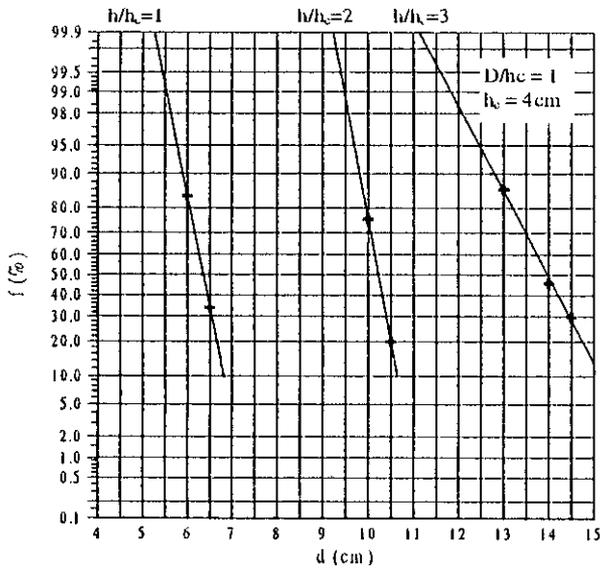


Figure 3.46-  $f = f(d)$  pour  $D_p = 0,5\text{mm}$ ,  
 $D/h_c = 1$

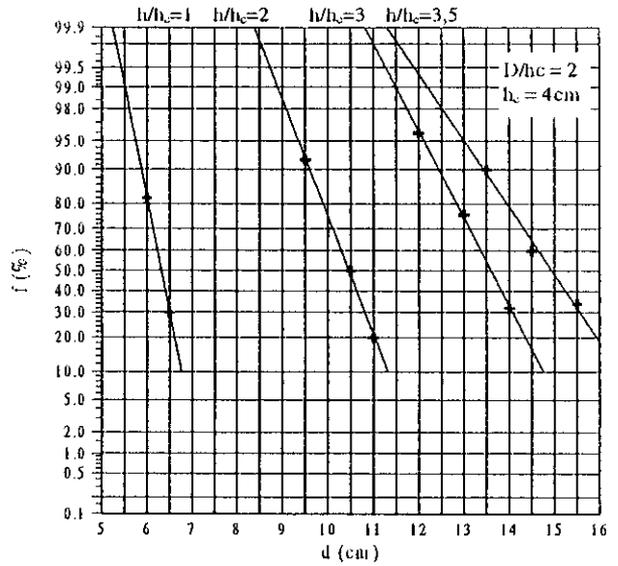


Figure 3.47-  $f = f(d)$  pour  $D_p = 0,5\text{mm}$ ,  
 $D/h_c = 2$

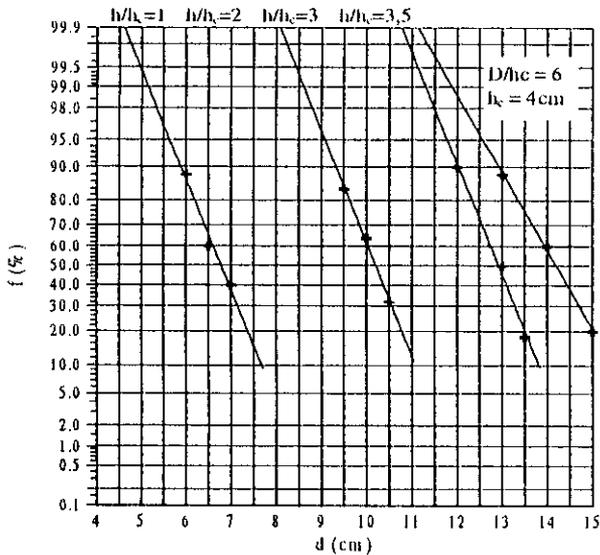


Figure 3.48-  $f = f(d)$  pour  $D_p = 0,5\text{mm}$ ,  
 $D/h_c = 6$

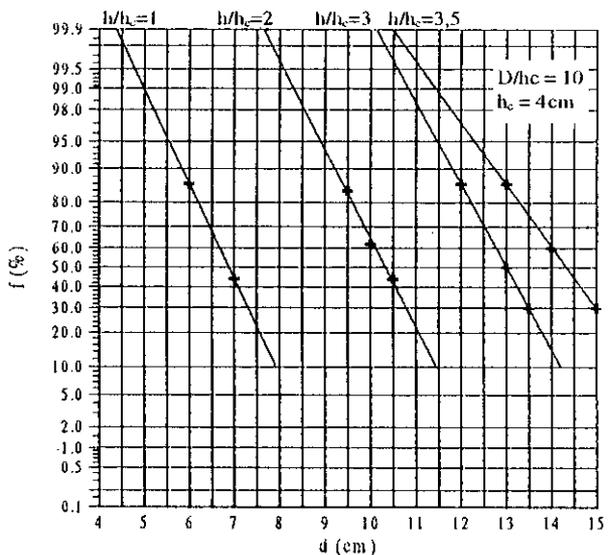


Figure 3.49-  $f = f(d)$  pour  $D_p = 0,5\text{mm}$ ,  
 $D/h_c = 10$

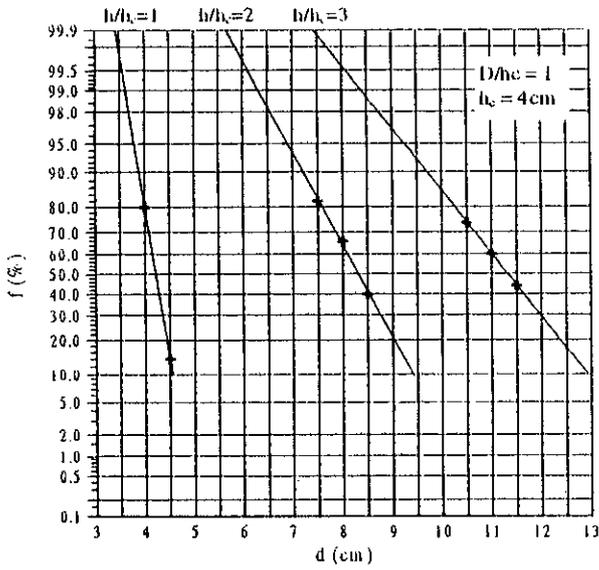


Figure 3.50-  $f = f(d)$  pour  $D_p = 12\text{mm}$ ,  $D/h_c = 1$

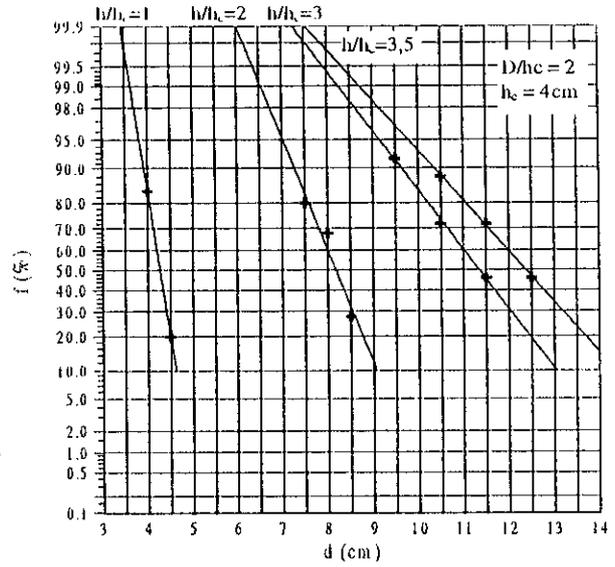


Figure 3.51-  $f = f(d)$  pour  $D_p = 12\text{mm}$ ,  $D/h_c = 2$

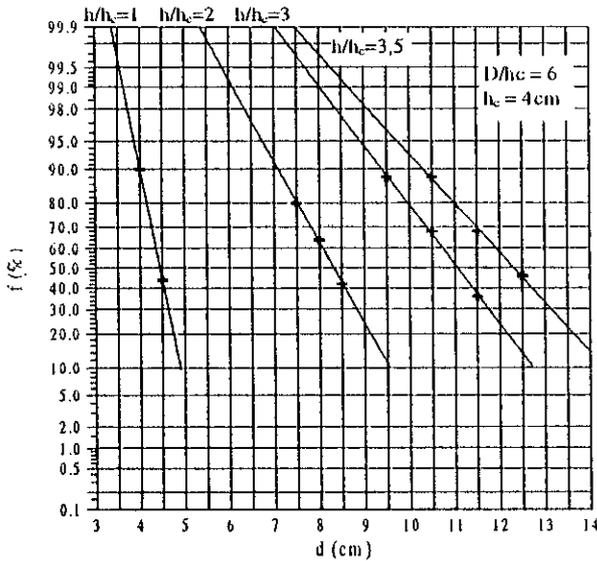


Figure 3.52-  $f = f(d)$  pour  $D_p = 12\text{mm}$ ,  $D/h_c = 6$

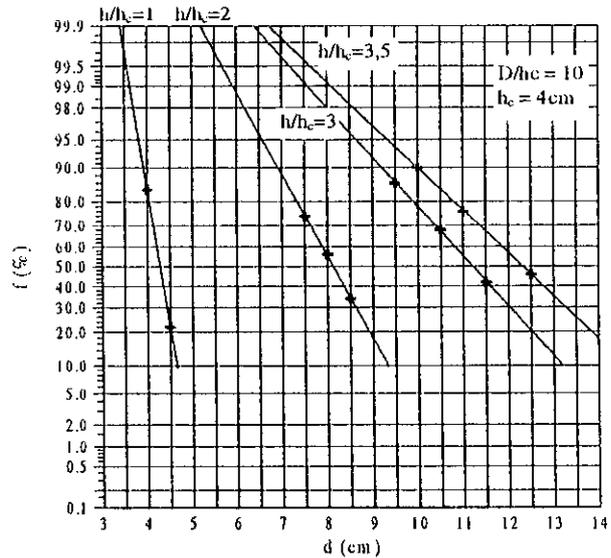


Figure 3.53-  $f = f(d)$  pour  $D_p = 12\text{mm}$ ,  $D/h_c = 10$