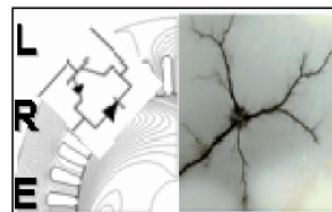


Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique
Département d'Electrotechnique
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique



THESE

Présentée par

Allaoua RAHMANI
Magister en Génie Electrique

en vue de l'obtention du titre de

Docteur en Sciences

en Electrotechnique

Thème

**Zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal
dans le cas d'une terre hétérogène**

Soutenue publiquement le 20 janvier 2011 devant le jury composé de :

Président:	TEGUAR Madjid	Professeur, ENP
Rapporteur:	BOUBAKEUR Ahmed	Professeur, ENP
Examineurs:	MEKHALDI Abdelouahab	Professeur, ENP
	MOKHNACHE Leïla	Professeur, UHL Batna
	BOUAZABIA Slimane	Maître de Conférences A, USTHB
	MOULAI Hocine	Maître de Conférences A, USTHB
Invité :	FERGANI Abdelaziz	PDG, GRTE-SONELGAZ

REMERCIEMENTS

*J'exprime ma profonde reconnaissance et mes sincères remerciements à mon Directeur de thèse, le Professeur **Ahmed BOUBAKEUR** de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, pour avoir cru en mes capacités pour mener à bien ce travail qu'il a toujours dirigé avec une très grande rigueur scientifique. Sa disponibilité, ses conseils, ses encouragements et sa bonne humeur durant toutes ces années m'ont été d'une grande utilité. Sur le plan humain aussi bien que scientifique, il a su répondre à mes nombreuses sollicitations avec efficacité.*

*Je tiens à remercier Monsieur **Madjid TEGUAR** Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de juger ce travail et de présider ce jury.*

*Je tiens à remercier très sincèrement le Professeur **Abdelouahab MEKHALDI** de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, pour avoir accepté d'être membre de mon jury. Je lui suis très reconnaissant et je lui manifeste ici ma profonde gratitude.*

*Que le Professeur **Leïla MOUKHNACHE** de l'Université de Batna qui a aimablement accepté de juger ce travail, soit assuré de mes vifs remerciements.*

*J'exprime mes remerciements à monsieur **Slimane BOUAZABIA** Maître de Conférences à l'Université des Sciences et Technologie Houari Boumediene (USTHB), pour avoir accepté de participer au jury de ma thèse et d'examiner mon travail.*

*Mes remerciements vont également à Monsieur **Hocine MOULAI** Maître de Conférences à l'Université des Sciences et Technologie Houari Boumediene (USTHB) pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de juger ce travail en tant qu'examinateur et d'avoir participé à ce jury.*

*Je remercie monsieur **FERGANI Abdelaziz** PDG, GRTE-SONELGAZ, pour avoir accepté de venir assister à ce jury, malgré son emploi du temps chargé.*

Mes sincères remerciements vont aussi à tout le personnel du Laboratoire de Haute Tension de l'Université de Béjaïa et du laboratoire de Haute Tension de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger. Je remercie également mes amis qui m'ont soutenue tout au long de la réalisation de ce travail.

Je n'oublie pas mes parents, ma femme, mes enfants, ma sœur, sans qui je n'aurais pas eu la force d'arriver à terminer mes études universitaires et à présenter ce travail.

RESUME

المخلص:

الهدف من هذه الأطروحة يتمثل في دراسة تأثير طبيعة الأرض على مجال التجاذب في حالة المضاد للصواعق الأفقي. وقد أخذنا بعين الاعتبار ثلاثة نماذج من سطح الأرض؛ الأول يخص سطح الأرض المتجانس، والثاني يخص سطح الأرض غير المتجانس وأما الثالث فيخص سطح الأرض المتقاطع. بصفة عامة مجال التجاذب للحالات المعروضة غير متناسب مع النموذج العادي للحماية؛ الذي يعتبر أن سطح الأرض متجانس و ذو ناقلية مثالية، واستنادا إلى هذه الدراسات، أنجزنا النموذج الموسع للحماية ضد الصواعق الذي يأخذ بعين الاعتبار عدة وسائط، كطبيعة الأرض وأبعاد المضاد للصواعق الأفقي. في المرحلة الأولية، قمنا أيضا بدراسة تأثير سطح الأرض غير المتجانس على التوترات ذات 50% من التفريغ المسبب للإنهيار في مجالات صغيرة للهواء، لنظام قضيب- مستوى، لصدّات الصواعق الموجبة والسالبة.

الكلمات المفتاحية:

مضاد للصواعق الأفقي، مجال التجاذب، سطح الأرض الغير المتجانس والمتقاطع، مجال الهواء، صدّات الصواعق

Résumé:

L'objectif de notre thèse est l'étude de l'influence de la nature électrologique du sol sur les zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal. Trois configurations du sol ont été considérées; la première concerne un sol homogène, la seconde un sol hétérogène et la troisième configuration une terre discontinue. Dans de telles configurations, les zones d'attraction ne correspondent pas en générale à celles définies par le modèle électrologique classique qui considère la terre homogène et parfaitement conductrice. Sur la base de ces travaux, un modèle élargi de protection contre la foudre a été élaboré tenant compte de la nature électrologique de la terre et des dimensions du paratonnerre horizontal.

Dans une phase préliminaire, nous avons aussi déterminé l'influence de l'hétérogénéité du sol sur les tensions à 50% de décharge disruptive des petits intervalles d'air tige-plan aux chocs de foudre positif et négatif.

Mots clés:

Paratonnerre horizontal, zone d'attraction, sol hétérogène et discontinu, intervalle d'air, choc de foudre.

Abstract:

The objective of this thesis is to study the influence of the electrogeological properties of the earth on the capture zones of a horizontal lightning conductor. Three earth configurations were considered; the first one is a homogeneous earth, the second one a heterogeneous earth and the third one a discontinuous earth. In the different studied configurations, the capture zones don't correspond, in general, to what is defined by the classical electrogeometrical model that considers earth homogeneous and perfectly conducting. Based on these studies, an expanded model of protection against lightning has been developed taking into account the nature of earth and the dimension of the lightning horizontal conductor.

In a preliminary phase, we have also determined the influence of the heterogeneous earth on the 50% disruptive discharge voltage of short rod-plane air gaps stressed by positive and negative lightning impulse.

Key words:

Horizontal lightning conductor, capture zone, discontinuous and heterogeneous earth, air gaps, lightning impulse.

SOMMAIRE

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	01
CHAPITRE I: PHYSIQUE DE LA DECHARGE.....	05
I.1. INTRODUCTION.....	05
I.2. LE CONDENSATEUR TERRESTRE.....	05
I.3. LES NUAGES ORAGEUX.....	06
I.4. EFFET COURONNE AU SOL ET IONISATION.....	08
I.5. SEVERITE ORAGEUSE.....	09
I.6. LES DIFFERENTS TYPES DE DECHARGES.....	10
I.6.1 Coup de foudre descendant.....	11
I.6.2 Coup de foudre ascendant.....	14
I.7. PARAMETRES ELECTRIQUES DE LA Foudre.....	15
I.8. LES EFFETS DE LA Foudre.....	15
I.9. LES TYPES DE Foudroiements de L'Homme.....	17
I.10. LES FORMES D'ONDE DES COURANTS DE Foudre.....	18
I.11. ANALOGIE AVEC LES GRANDES ETINCELLES.....	19
CHAPITRE II: IMPACT DE LA DECHARGE ET PROTECTION CONTRE LA Foudre.....	21
II.1. INTRODUCTION.....	21
II.2. PHYSIQUE DE L'IMPACT AU SOL ET MODELE ELECTROGEOMETRIQUE.....	21
II.2.1 Mécanisme de la décharge.....	21
II.2.2. Modèle électrogéométrique de base (méthode analytique).....	22
II.2.2.1 <i>Champ généré au sol par le traceur descendant.....</i>	<i>23</i>
II.2.3 Mise en œuvre du modèle électrogéométrique (méthode de la sphère fictive).....	26
II.2.4 Application du modèle électrogéométrique.....	26
II.2.4.1. <i>Zones de capture d'une tige verticale (tige de Franklin).....</i>	<i>26</i>
II.2.4.2. <i>Volume protégé par une tige de capture verticale.....</i>	<i>30</i>
II.2.4.3. <i>Volume protégé par un fil tendu.....</i>	<i>30</i>
II.2.5. Fréquence de foudroiement d'une tour ou d'un conducteur horizontal.....	31
II.2.6. Critique du modèle électrogéométrique.....	32
II.3. INFLUENCE DES PROPRIETES ELECTROGEOLOGIQUES DU SOL SUR LA DECHARGE DE Foudre.....	32
II.3.1. Décharge de foudre dans le cas de terre hétérogène.....	33
II.3.1.1. <i>Modèle mathématique.....</i>	<i>34</i>
II.3.1.2. <i>Modèle expérimental.....</i>	<i>35</i>
II.3.2. Zones d'attraction d'un paratonnerre vertical dans le cas d'une terre hétérogène.....	37
II.3.3. Zones d'attraction d'un paratonnerre vertical dans le cas d'une terre homogène mauvaise conductrice.....	38
II.3.4. Zone d'attraction d'un paratonnerre vertical dans le cas d'une terre discontinue.....	39
II.3.4.1. <i>Paratonnerre située sur la partie haute de la terre discontinue, entre l'interface et l'axe de la décharge.....</i>	<i>39</i>
II.3.4.2. <i>Paratonnerre sur la partie haute de la terre discontinue, et l'axe de la tige situé entre l'interface et le paratonnerre.....</i>	<i>40</i>
II.3.4.3. <i>Paratonnerre sur la partie basse de la terre discontinue et l'axe de la tige situé entre l'interface et le paratonnerre.....</i>	<i>41</i>
II.3.4.3.1. <i>Influence du rapport h/e sur les zones d'attraction du paratonnerre.....</i>	<i>41</i>
II.3.4.4 <i>Paratonnerre situé sur la partie basse de la terre discontinue entre l'axe de la décharge et l'interface.....</i>	<i>42</i>

II.4. CONCLUSION.....	43
CHAPITRE III : TECHNIQUES EXPERIMENTALES.....	44
III.1. GENERATION DES ONDES DE CHOC.....	44
III.1.1. Générateur de choc.....	44
III.2.2. Tension de choc délivrée.....	45
III.2. DETERMINATION DE LA TENSION DISRUPTIVE $U_{100\%}$ ET DE LA TENSION $U_{50\%}$ DU SYSTEME SANS PARATONNERRE.....	46
III.2.1. Corrections atmosphériques.....	47
III.2.1.1 Influence de la densité de l'air.....	47
III.2.1.2 Influence de l'humidité.....	48
III.3. MODELE EXPERIMENTAL SANS PARATONNERRE.....	48
III.3.1. Cas du sol homogène bon conducteur.....	48
III.3.2. Cas du sol homogène mauvais conducteur.....	49
III.3.3. Cas du sol hétérogène.....	49
III.3.4. Cas du sol discontinu.....	50
III.4. CONFIGURATIONS EXPERIMENTALES AVEC PARATONNERRE.....	50
III.4.1. Sol homogène conducteur.....	51
III.4.2. Cas du sol homogène mauvais conducteur.....	51
III.4.3. Cas du sol hétérogène.....	52
III.4.4. Cas du sol discontinu.....	54
III.5. DETERMINATION DES ZONES D'ATTRACTION.....	56
III.5.1. Détermination de la probabilité d'impact sur le paratonnerre.....	56
III.5.2. Procédés de détermination des droites de régression.....	57
III.5.2.1 Sol bon conducteur.....	57
III.5.2.2 Sol mauvais conducteur.....	58
III.5.2.3 Sol hétérogène.....	58
III.5.2.4 Sol discontinu.....	58
III.6. TRACE DES ZONES D'ATTRACTION.....	59
III.7. CONCLUSION.....	59
CHAPITRE IV : INFLUENCE DE LA NATURE DU SOL SUR LA RIGIDITE DIELECTRIQUE DE L'AIR SOUS TENSION DE CHOC DE Foudre.....	60
IV.1. INTRODUCTION.....	60
IV.2. DETERMINATION DE LA TENSION DISRUPTIVE $U_{100\%}$	60
IV.2.1. Cas du sol homogène bon conducteur.....	60
II.2.1.1. Influence de la longueur de l'intervalle tige-plan (h) sur les tensions $U_{100\%}$	61
IV.2.2. Cas du sol homogène mauvais conducteur.....	61
IV.3. DETERMINATION DE LA TENSION DISRUPTIVE $U_{50\%}$	62
IV.3.1. Cas du sol homogène.....	62
IV.3.1.1. Influence de la longueur de l'intervalle tige-plan " h ".....	62
IV.3.1.2. Influence de la conductivité du sol.....	64
IV.3.2. Cas du sol hétérogène.....	66
IV.3.2.1 Types de décharges observées.....	66
IV.3.2.2 Influence de la position de la tige haute tension.....	67
IV.3.2.2.1 Polarité positive.....	67
IV.3.2.2.2 Polarité négative.....	67
IV.3.3. Cas du sol discontinu.....	70
IV.3.3.1 Polarité positive.....	70
IV.3.3.2 Polarité négative.....	72
IV.4. CONCLUSION	74

CHAPITRE V : INFLUENCE DES PROPRIETES ELECTROGEOLOGIQUES DU SOL SUR LES ZONES D'ATTRACTION D'UN PARATONNERRE HORIZONTAL.....	75
V.1. INTRODUCTION.....	75
V.2. ZONE D'ATTRACTION D'UN PARATONNERRE HORIZONTAL DANS LE CAS DE TERRE HOMOGENE CONDUCTRICE.....	76
V.2.1 Vérification du modèle électrogéométrique classique.....	76
V.2.2. Influence de la hauteur de suspension h_c du paratonnerre horizontal.....	76
V.2.3. Influence du diamètre du paratonnerre horizontal.....	76
V.2.4 Influence du diamètre du paratonnerre horizontal sur les distances horizontales entre axe de la tige et la génératrice du paratonnerre.....	77
V.2.5 Elaboration d'un modèle électrogéométrique de protection élargi.....	80
V.2.6 Influence du rayon de courbure du paratonnerre horizontal sur le niveau de terre fictive.....	82
V.3. ZONE D'ATTRACTION D'UN PARATONNERRE HORIZONTAL DANS LE CAS DU SOL MAUVAIS CONDUCTEUR.....	83
V.3.1. Influence de la conductivité du sol sur les zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal..	83
V.3.2. Influence de la conductivité du sol sur le niveau de terre fictive.....	84
V.3.3. Influence du rayon de courbure du paratonnerre horizontal sur les zones d'attraction.....	85
V.3.4. Influence de la hauteur h_c/e du paratonnerre sur les zones d'attraction.....	86
V.3.5. Influence du rayon de courbure du paratonnerre horizontal sur le niveau de terre fictive.....	87
V.4. ZONE D'ATTRACTION D'UN PARATONNERRE HORIZONTAL DANS LE CAS DE TERRE HETEROGENE.....	88
V.4.1. Première configuration : Conducteur au-dessus (sable), et l'axe de la tige situé entre l'interface et le conducteur.....	88
V.4.2. Deuxième configuration : Conducteur au-dessus du sable et situé entre l'interface et l'axe de la tige.....	89
V.4.3. Troisième configuration : conducteur au-dessus de l'acier et situé entre l'interface et l'axe de la tige.....	90
V.4.4. Quatrième configuration : conducteur au-dessus de l'acier, et l'axe de la tige situé entre l'interface et le conducteur.....	90
V.5. ZONE D'ATTRACTION D'UN PARATONNERRE HORIZONTAL CAS DE TERRE DISCONTINUE.....	92
V.5.1. Première configuration : paratonnerre horizontale située sur la partie haute de la terre discontinue, entre l'axe de la décharge et l'interface.....	92
V.5.1.1. Influence du rapport D/h_c sur les zones d'attraction.....	92
V.5.1.2. Niveau de terre fictive.....	93
V.5.1.3. Influence du diamètre D_p du paratonnerre horizontal sur les zones d'attraction	94
V.5.2. Deuxième configuration : L'axe de la décharge situé sur la partie haute de la terre discontinue entre l'interface et le paratonnerre horizontal.....	95
V.5.2.1. Influence de la distance horizontale D/h_c entre l'interface et le paratonnerre horizontal.....	95
V.5.2.2 Influence du diamètre du paratonnerre horizontal D_p sur les zones d'attraction.....	96
V.5.3 Troisième configuration: Axe de la décharge situé sur la partie basse de la terre discontinue, entre l'interface et le paratonnerre horizontal	98
V.5.3.1. Influence des rapports D/h_c sur les zones d'attraction.....	98
V.5.3.2. Influence du diamètre du paratonnerre horizontal sur les zones d'attraction.....	98
V.5.4. Quatrième configuration : Paratonnerre horizontal situé sur la partie basse de la terre discontinu, entre l'interface et l'axe de la décharge.....	101
V.5.4.1. Influence du rapport D/h_c sur les zones d'attraction.....	101
V.5.4.2. Influence du niveau de terre fictif.....	102
V.6. CONCLUSION.....	103
CONCLUSION GENERALE.....	105
BIBLIOGRAPHIE.....	109

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Le phénomène de foudre a toujours été l'objet de plusieurs tentatives d'explications [GAR94]. Ces dernières ont évolué selon les époques et les lieux. Elles vont de la superstition à la science. En effet, les conséquences d'un tel phénomène peuvent être diverses tels les dégâts matériels voire la perte de vies humaines. La foudre est une menace pour l'environnement, pour un très grand nombre de systèmes et d'installations. Son point d'impact et son instant d'apparition sont imprévisibles [GAR94]. Le rayonnement émis est destructeur pour certains composants et la montée de potentiel occasionne des dommages importants sur les équipements et les systèmes tels que les réseaux électriques, les télécommunications, les aéroports etc.

Les problématiques de la protection des installations industrielles contre le phénomène de décharges atmosphériques ainsi que de leurs conséquences, restent parmi les sujets d'actualité dans le domaine de la haute tension [GAR84, AGU87, RAK08]. D'une part, les essais grandeur nature sont certes réalisables, mais nécessitent une logistique très lourde [RUB95, THO85, UMA97]. Et d'autre part, la simulation en laboratoire présente l'inconvénient du facteur d'échelle [GAR74, KLE74, GAR84, BAZ07, REN81]. L'idéal réside en fait dans des modèles physiques découlant d'études fondamentales réalisées in situ et/ou en laboratoire, permettant d'optimiser et de quantifier les dispositifs de protection contre les effets de la foudre [AIT08, HUT88, ORT94, BEN96].

L'existence de zones localisées particulièrement touchées par la foudre, tel que les failles humides, les nappes d'eau ou les terrains marécageux, est allouée aux facteurs géologiques et particulièrement à la conductivité des sols [GAR94]. Cette hypothèse repose sur un certain nombre d'observations concernant le foudroiement des lignes à haute tension où il a été constaté que le pylône dont la résistance de terre est la plus faible, était le plus souvent foudroyé. Une reproduction du phénomène à une plus petite échelle en laboratoire a permis de confirmer cette observation [LER84]. Cependant, malgré qu'elles puissent être très bénéfiques pour la protection contre la foudre, les recherches sur un éventuel effet de la conductivité du sol sont restées très restreintes [LER84] [SZU79] [LET80]. Constatant cet état de fait, le laboratoire de haute tension de l'ENP s'est intéressé depuis 1985, à l'effet des propriétés électrogéologiques du sol sur l'impact par la décharge de foudre et sur les zones d'attraction des paratonnerres vertical et horizontal [BOU97].

Les tous premiers travaux concernaient l'influence de l'hétérogénéité du sol sur le point d'impact de la décharge de foudre [FER87]. Deux modèles ont été établis : le premier mathématique et le second expérimental. Le modèle mathématique a permis d'étudier numériquement la variation de l'intensité du champ électrique à la surface d'un sol hétérogène en fonction de l'évolution de la décharge de foudre. A l'aide du modèle pratique, la répartition statistique des points d'impacts des décharges sur un tel sol a été étudiée. Pour les deux modèles, le sol hétérogène est constitué de deux composantes de conductivités différentes. Seul le coup de foudre négatif descendant, qui représente le cas le plus fréquent de décharge de foudre en zone tempérée [BER75] [AND79], a été pris en considération dans le modèle expérimental.

Les résultats obtenus sur le modèle expérimental ont montré que la présence d'un sol hétérogène fait apparaître un nouveau type de décharge et modifie la distribution de celle-ci sur la surface de l'électrode mise à la terre [FER87] [BOU87]. Cette modification est caractérisée par une attraction des décharges par l'interface de la terre hétérogène. L'influence de cette dernière et son espace d'attraction augmente avec le degré d'hétérogénéité du sol caractérisé par le rapport des conductivités des différentes composantes. Le modèle mathématique a mis en évidence la possession d'une forte composante tangentielle du champ électrique. Ceci peut expliquer l'attraction des décharges par l'interface. L'utilisation des caractéristiques électriques des composantes du sol du modèle expérimental dans le modèle mathématique, a permis de trouver une corrélation entre la probabilité d'impact en un point donné du sol et l'intensité du champ électrique en ce point. Une plus grande probabilité de décharge est obtenue aux points où l'intensité du champ électrique est la plus élevée au moment du saut final [FER87].

Les travaux de recherches ont été ensuite orientés vers l'étude de l'effet d'une terre hétérogène sur les zones d'attraction des paratonnerres. Deux cas ont été pris en considération: Le premier concernait une protection horizontale, le second une protection verticale.

Les résultats obtenus ont montré que, suivant la position de l'axe de la décharge de foudre par rapport à l'interface et le paratonnerre, la décharge serait, soit favorablement soit défavorablement, attirée par celui-ci [BOU89] [BOU90]. Particulièrement, les zones de capture du paratonnerre horizontal, lorsqu'il est situé au-dessus de la partie bonne conductrice du sol (acier), pourraient devenir inférieures à celles définies par le modèle électrogéométrique. Ce dernier, classiquement utilisé pour définir les zones de protection des paratonnerres, ne serait donc plus valable [BOU91]. Parallèlement à ces travaux

expérimentaux, un outil de calcul numérique du champ électrostatique a été développé afin de simuler numériquement les configurations étudiées au laboratoire [NAC91] [NAC93].

Par conséquent, les résultats des travaux effectués sur la terre hétérogène ont montré que le modèle électrogéométrique utilisé dans le cadre de la protection contre la foudre [GOL77], ne prenant pas en considération la nature de la terre, serait discutable et aurait certaines limites. La définition d'un nouveau modèle prenant en compte cet effet du sol s'avérait donc nécessaire. Cependant, confronté à plusieurs paramètres, il a été jugé préférable d'entamer cette tâche sur une configuration tige-plan avec un sol homogène [BEL94]. La configuration du modèle expérimental utilisé est constituée d'une couche d'eau, dite "mauvaise conductrice", de conductivité variable [BOU95][RAH96]. Les deux cas de protection verticale et horizontale ont été pris en considération [BEL94][RAH96].

Les résultats obtenus sur ce modèle expérimental montrent que les zones d'attraction des paratonnerres, dans le cas des terres mauvaises conductrices, seraient plus larges que celles définies par le modèle électrogéométrique [GOL77]. Cet élargissement dépendrait de la conductivité du sol et de la grandeur relative de la hauteur du paratonnerre par rapport à l'épaisseur de la couche mauvaise conductrice. Plus la profondeur de cette couche est grande par rapport à la hauteur du paratonnerre, plus la zone d'attraction de celui-ci serait large [BEL94][RAH96].

A la lumière de ces résultats un modèle de protection élargie, prenant en considération les propriétés électrogéologiques du sol, a été défini. Dans ce modèle élargi, le système avec terre mauvaise conductrice est considéré équivalent à un système avec terre conductrice où toutes les distances verticales sont majorées d'une certaine valeur comprise entre zéro et l'épaisseur de la couche mauvaise conductrice [BOU92] [BOU93] [BEL94] [BOU96].

Notre travail s'inscrit dans la suite des objectifs fixés par le laboratoire et consiste à déterminer les zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal dans le cas des terres hétérogènes. Notre thèse est structurée en cinq chapitres:

Dans le premier chapitre, nous étudions la physique de la décharge de foudre, le mécanisme d'impact et nous présentons le phénomène de décharge de foudre ainsi que ses effets directs et indirects sur l'environnement.

Dans le deuxième chapitre, nous exposons l'impact de la décharge, la protection contre la foudre, le modèle électrogéométrique et son application dans le domaine de la détermination des zones de capture d'un paratonnerre vertical. Par la suite, nous nous attachons à mettre en évidence l'influence des propriétés électrogéologiques du sol sur le

point d'impact de la décharge de foudre, en se référant spécialement aux résultats des travaux effectués au Laboratoire de Haute Tension de l'ENP d'Alger.

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

Le quatrième chapitre concerne l'influence de la nature du sol sur la rigidité diélectrique de l'air sous tension de choc de foudre.

Dans le cinquième chapitre, nous présentons les résultats obtenus sur les zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal dans le cas des terres homogène, hétérogène et discontinue.

Nous terminons par une conclusion générale sur les différents résultats que nous avons obtenus, et sur les perspectives qui pourront être développées.

CHAPITRE I

PHYSIQUE DE LA DECHARGE

CHAPITRE I

PHYSIQUE DE LA DECHARGE

I.1. INTRODUCTION

L'étude de la foudre in-situ est très délicate à mener vu l'aspect aléatoire qui caractérise ce phénomène et l'impossibilité de contrôler l'instant et le lieu où elle peut "frapper". Bien qu'il soit possible depuis quelques années de déclencher artificiellement la foudre, la physique du phénomène n'est pas encore maîtrisée et beaucoup de questions restent encore sans réponses. De plus, les essais en grandeur nature sont lourds à mettre en œuvre. C'est pourquoi, disposer d'un modèle de décharge de foudre négative permettant de prédire ses différentes caractéristiques serait très utile pour le dimensionnement des structures et la protection des biens et des personnes contre les effets directs et indirects de la foudre.

La grande similitude entre les phénomènes de décharge de foudre et la décharge d'étincelle de laboratoire nous permet d'étendre et d'appliquer le modèle moyennant l'adaptation de certains paramètres au cas des décharges de foudre réelle.

Avant de procéder à l'extension de l'étude de la décharge de foudre négative, nous rappelons d'abord l'état de l'art dans le domaine de la décharge de foudre dans les deux polarités, tant du point de vue des connaissances théoriques que des résultats expérimentaux. Une description des différents aspects phénoménologiques caractérisant les décharges atmosphériques est faite afin de comprendre les différentes phases de leur développement et d'en tenir compte dans le modèle de protection.

I.2. LE CONDENSATEUR TERRESTRE

La couche de la haute atmosphère ionisée, l'électrosphère, et la surface de la terre forment les armatures d'un condensateur sphérique (Figure I.1). Par beau temps, la tension entre ces deux armatures, distante d'environ 50 km, est estimée à 300 kV, ce qui génère un champ électrique au sol de 100 à 150 V/m. L'électrosphère étant chargée positivement, le vecteur représentatif de ce champ est dirigé vers la terre où la charge négative répartie sur la surface est égale à 10^6 C.

Un courant électrique (courant de fuite) de l'ordre de 1,8 kA sur la surface totale de la terre, s'écoule à travers l'atmosphère. Il se produit alors une neutralisation de la charge négative terrestre par apport de charges positives issues de l'électrosphère. Un déséquilibre électrostatique apparaît entre la terre et son environnement. Le rétablissement de cet équilibre

va s'effectuer par la formation de nuages orageux et par la foudre. Le rôle des orages est de compenser le courant de fuite en alimentant la surface de la terre en charges négatives. Ils agissent donc comme un générateur rétablissant la valeur de la différence de potentiel existant entre les armatures du condensateur sphérique qui décroît naturellement par beau temps.

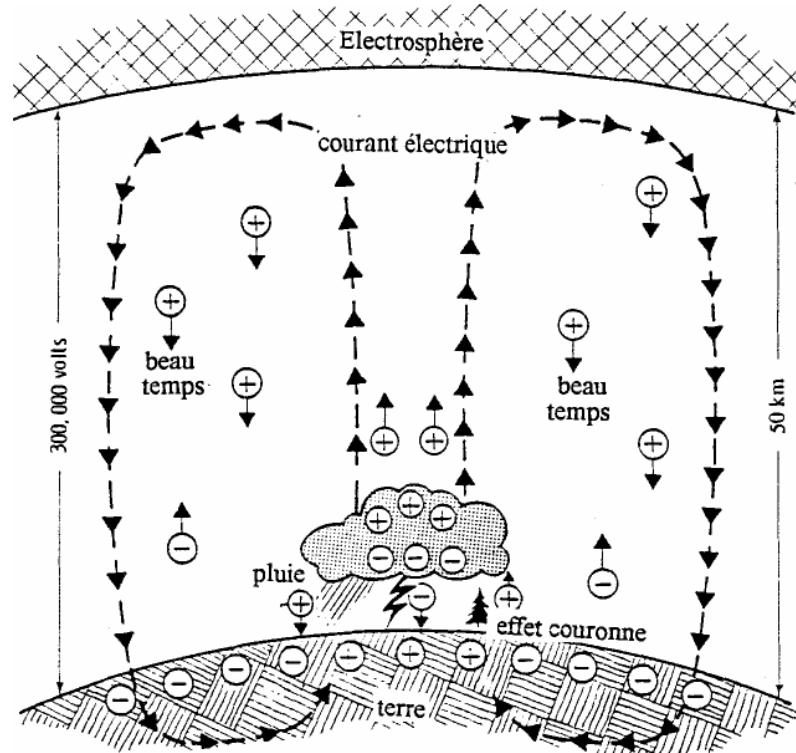


Figure I.1: Le condensateur sphérique formé par la terre et l'électrosphère [UMA87]

I.3. LES NUAGES ORAGEUX

Les nuages orageux sont d'énormes masses en forme d'enclume, les cumulo-nimbus, qui occupent une surface de plusieurs dizaines de kilomètres carrés. Leur épaisseur peut atteindre plusieurs kilomètres, l'extrémité inférieure étant située à une altitude d'environ 2 km [GAR75][UMA87].

Selon la nature des régions (conditions de température, de pression et d'humidité) où ils se forment, les nuages sont classés en deux catégories :

- Les nuages de chaleur qui se développent dans les régions tropicales. La combinaison d'une très forte humidité de l'atmosphère et de réchauffements locaux du sol engendre la formation d'une masse d'air à la fois chaude et humide pratiquement isolée thermiquement de l'air environnant laquelle, sous l'action de courants atmosphériques, prend un mouvement ascendant. La température diminuant en fonction de l'altitude par rapport au sol, cette masse d'air se condense lorsqu'elle atteint environ 2 km et forme le nuage orageux.

- Les nuages orageux qui résultent dans les régions à climat tempéré, de la rencontre entre deux masses d'air importantes ayant des températures et des pressions différentes. Cette rencontre produit également des courants ascendants accompagnés de condensation. Contrairement aux nuages de chaleur dont la durée n'excède pas une heure et demie, les nuages ainsi formés peuvent subsister plusieurs jours et se propager sur des milliers de kilomètres.

Parallèlement à ces phénomènes thermodynamiques, il se produit une séparation des charges électriques au sein du nuage. Il n'existe pas encore de théorie satisfaisante pour expliquer les faits observés : la partie supérieure du nuage, constituée de cristaux de glace, est chargée positivement, tandis que la partie inférieure, constituée de gouttelettes d'eau, est chargée négativement. Souvent, un îlot de charges positives est inclus dans cette masse négative. Le nuage constitue ainsi un véritable dipôle dont la charge totale, distribuée dans le volume de 50 km^3 , peut atteindre plusieurs dizaines de milliers de coulombs [GAR75].

Cette séparation de charge crée des contraintes électriques entre les différentes couches intérieures du nuage ainsi qu'entre sa partie inférieure et le sol (Figure I.2).

Lorsque la valeur limite de claquage dans l'air est atteinte, il se produit une décharge électrique à l'intérieur du nuage ou entre nuages (les éclairs), ou encore entre le nuage et le sol (la foudre).

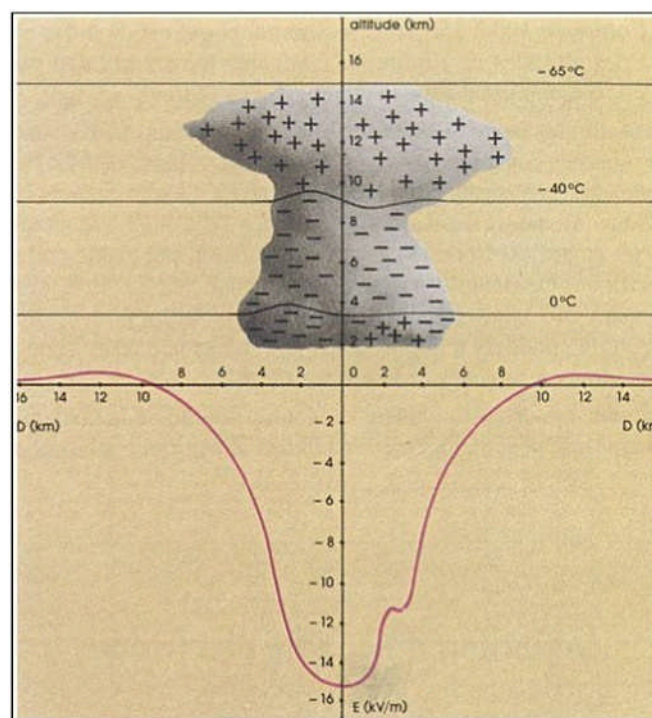


Figure I.2: Distribution des charges électriques et répartition du champ électrique dans un nuage orageux en fonction de la distance horizontale et de l'altitude [AGU87]

Au moment de la formation du nuage orageux et sous l'influence de la charge négative disposée à sa base, dont l'effet devient prépondérant, le champ électrique au sol commence à s'inverser. Lorsque son amplitude atteint 10 à 15 kV/m, une décharge au sol est imminente. Cette inversion du champ électrique, suivie d'une forte croissance de son module, est donc le signe annonciateur de la foudre [AGU87].

I.4. EFFET COURONNE AU SOL ET IONISATION

Les valeurs du champ électrique au sol cités ci-dessus, prises dans un sol horizontal plat, les reliefs et proéminences modifient fortement cette situation. On sait que toute aspérité par effet de concentration des lignes de force et de tassement des surfaces équipotentielles peut augmenter considérablement le champ superficiel local.

On peut calculer qu'au sommet d'une ellipsoïde le champ est multiplié par 700 par rapport à un champ moyen (Figure I.3).

Comme l'air atmosphérique s'ionise à partir d'un seuil de 30 kV/m, alors dans les conditions particulières, il suffit d'un champ ambiant de 4 à 5 kV par mètre pour provoquer un effet couronne au sommet de l'ellipsoïde [GAR94].

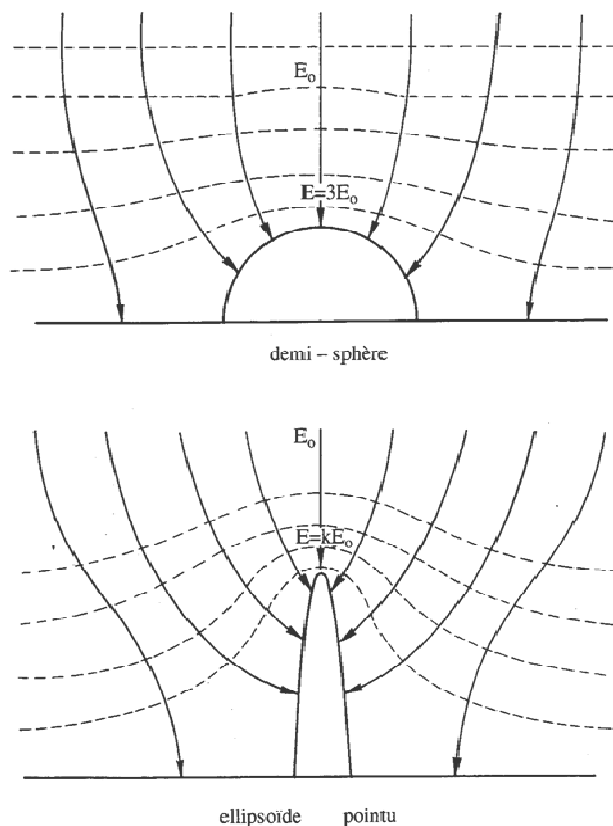


Figure I.3: Renforcement du champ électrique au sommet d'aspérités diverses [GAR94].

I.5. SEVERITE ORAGEUSE

Il est d'usage universel de caractériser la sévérité orageuse d'une région par son niveau Kéraunique, par définition, c'est le nombre de jours par an où le tonnerre a été entendu. Le niveau Kéraunique N_i moyen de 10 à 30 en Afrique du nord (environ 15 en Algérie) [ROY84] [GAR84], cependant la notion de niveau Kéraunique n'est pas complète, car elle ne donne aucune indication, ni sur la fréquence des foudroiements, ni sur l'existence de zones localisées particulièrement foudroyées.

Une définition bien plus rigoureuse peut être atteinte par la sévérité du foudroiement, c'est la densité de coups de foudre N_s au sol exprimée en nombre de coups par km^2 et par an.

A partir des résultats fournis par des dispositifs de mesure, des chercheurs ont tenté d'élaborer des formules pour exprimer la densité de coup de foudre en fonction du niveau kéraunique N_i [ROY84] :

$$N_s = N_i (0.1 + 0.35 \sin \alpha) (0.4 \pm 0.2) \quad (\text{I-1})$$

$$N_s = N_i^{(1.9 \pm 0.1)} (2.6 \pm 0.2) 10^{-3} \quad (\text{I-2})$$

α : altitude de la région considérée.

La figure I.4 montre les points obtenus à partir des données mondiales [GAR89]

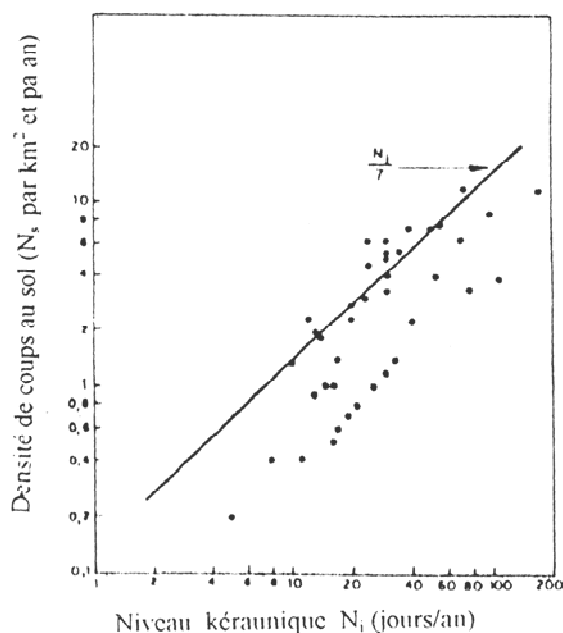


Figure I.4: corrélation entre niveau Kéraunique et densité de coups foudre au sol (données mondiales)

Le groupe de travail "foudre" de la CIGRE recommande la formule suivante [ROY84] :

$$N_s = 0.04(N_i)^{1.25} \quad (\text{I-3})$$

Des recherches montrent que la relation simple suivante peut être utilisée [AND80] :

$$N_s = N_i / 10 \quad (\text{I-4})$$

Une autre expression pour la densité de coups de foudre, d'après ces chercheurs et c'est la plus utilisée [AND80]:

$$N_s = 0.023 T_d^{1.3} \quad (\text{I-5})$$

I.6. LES DIFFERENTS TYPES DE DECHARGES

Les décharges atmosphériques peuvent avoir lieu à l'intérieur d'un même nuage, entre deux nuages ou entre un nuage et le sol. Les deux premières sont matérialisées par des éclairs et la troisième est appelé la foudre. Dans les régions tempérées, il y a en moyenne trois éclairs pour une décharge de foudre. Cette proportion peut atteindre voire excéder la valeur de six dans les régions tropicales [GAR94][GAR75].

Les nuages se formant à des altitudes différentes, deux ou plusieurs masses nuageuses peuvent interagir entre elles de manière à développer une décharge électrique (éclair) entre la partie inférieure de l'un et la partie supérieure de l'autre. Ces éclairs sont généralement des décharges qui peuvent se propager horizontalement ou verticalement sur plusieurs dizaines de kilomètres. Les courants qu'ils écoulent sont beaucoup plus faibles que ceux associés à la foudre. Néanmoins, les décharges atmosphériques peuvent frapper les avions et même si les accidents causés par le foudroiement d'un avion en vol sont rares. Ces problèmes restent d'actualité du fait de l'évolution des structures des avions (matériaux composites) et la sensibilité de l'électronique embarquée aux perturbations engendrées par ce genre de phénomène.

Sous l'effet de la charge négative, le sol se charge de la polarité opposée. Ce système forme un condensateur nuage-sol. Lorsque la différence de potentiel entre les deux armatures est suffisante, c'est-à-dire supérieure ou égale au seuil de tenue diélectrique de l'air, une décharge (leader ou traceur) se développe et réalise une liaison conductrice entre le nuage et le sol. Une certaine charge négative est ainsi restituée au sol, ce qui permet de rétablir l'équilibre naturel que l'on a mentionné précédemment.

On classe tout d'abord les coups de foudre selon le sens de développement du traceur (ou premier leader) :

- coups de foudre descendants (développement du traceur à partir du nuage) ;
- coups de foudre ascendants (développement du traceur à partir du sol).

En pays plat, le coup de foudre de loin le plus fréquent est descendant. Pour qu'un coup ascendant puisse se développer, il faut la présence d'une proéminence importante, telle qu'une

tour élevée; c'est aussi la raison pour laquelle le coup ascendant se produit plus fréquemment en montagne.

En second lieu, on classe les coups de foudre selon leur polarité:

- coups de foudre négatifs (décharge d'un nuage chargé négativement);
- coups de foudre positifs (décharge d'un nuage chargé positivement).

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

La figure I.5 résume cette classification selon K. Berger. Celle-ci est admise aujourd'hui par tous les spécialistes [GAR89].

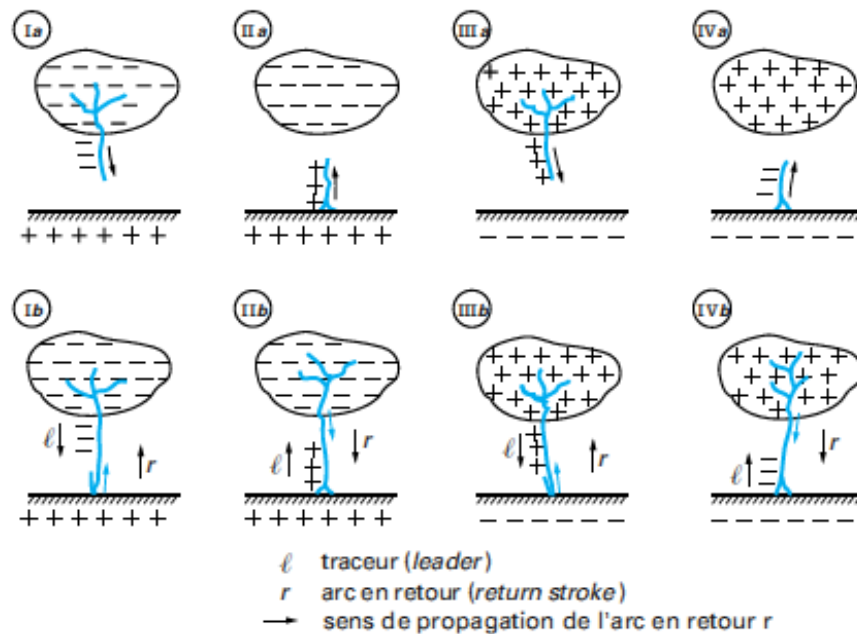


Figure I.5: Les différents types de coups de foudre d'après Berger et all 1975[BER75]

Les schémas de la figure I.5, Ia et Ib sont relatifs au coup de foudre descendant négatif, de loin le plus fréquent en plaine. Les schémas IIa et IIb sont relatifs au coup de foudre ascendant écoulant une charge négative du nuage.

Les schémas IIIa et IIIb sont relatifs au coup positif descendant, écoulant une charge positive du nuage. Enfin, les schémas IVa et IVb sont relatifs au coup ascendant, écoulant une charge positive du nuage ; ce type de coup est rare. Dans ce qui suit, nous allons décrire le déroulement des coups les plus fréquents, du type I, II et III.

I.6.1. Coup de foudre descendant

Dans le cadre du déroulement d'un coup de foudre descendant et négatif, le traceur (dans ce cas négatif) prend naissance au sein du nuage et progresse en direction du sol par bonds successifs (Figure I.6). Lors de la progression de ce traceur, on observe des ramifications vers le bas ainsi qu'un accroissement au niveau de sa luminosité. Lorsque le

traceur descendant se rapproche du sol, les décharges couronnes vont se transformer en traceurs ascendants et vont alors se diriger vers le traceur descendant. Lorsque la jonction est effectuée entre un traceur par bonds et un traceur ascendant, il s'établit un canal conducteur entre le nuage et le sol qui va permettre le passage d'un courant de forte intensité. On observe alors un trait d'une forte intensité lumineuse qui progresse depuis le sol jusqu'au nuage avec une vitesse de l'ordre de 10^8 m/s : c'est l'arc en retour (return stroke). En empruntant le canal formé par la rencontre des deux traceurs, les charges positives neutralisent, au cours de leur progression, les charges négatives emmenées par le traceur descendant. Le diamètre moyen du canal conducteur a été estimé à 2 ou 3 centimètres au maximum. Le courant véhiculé par cet arc en retour peut varier de quelques dizaines à plusieurs centaines de milliers d'ampères. La température atteinte est, elle, de l'ordre de 30000 K.

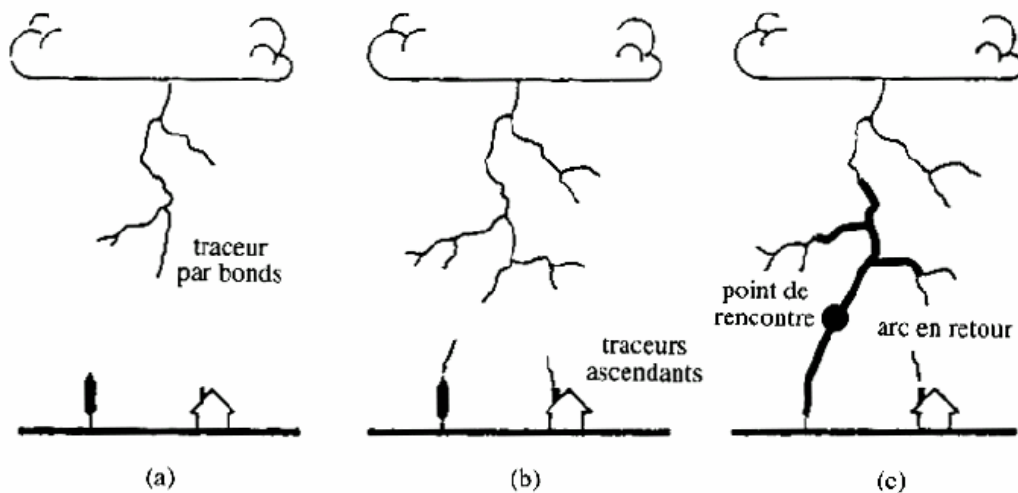


Figure I.6: Phases caractéristiques de l'évolution d'un coup de foudre négatif descendant : a) descente du traceur par bonds; b) initiation des traceurs ascendants; c) rencontre entre un traceur ascendant et le traceur descendant par bonds, puis écoulement du courant d'arc en retour.

Le réchauffement brutal et extrêmement élevé de l'air entraîne une formidable surpression de ce dernier. La pression du canal étant plus élevée que celle de l'air environnant, il s'ensuit une forte dilatation, une explosion du canal qui se propage sous forme d'onde de choc acoustique : c'est le tonnerre.

L'arc en retour dure près d'une dizaine de millisecondes. Dans le canal fortement ionisé, donc conducteur, formé par le premier arc en retour, plusieurs décharges peuvent alors se développer : ce sont les arcs subséquents. Alors que la première décharge est précédée du traceur par bonds, les décharges subséquentes sont précédées d'un traceur continu, beaucoup plus rapide (des vitesses de l'ordre de 10^6 m.s⁻¹) et qui est appelé trait pilote (Dart leader).

En général, un coup de foudre descendant négatif (nuage-sol) apporte une quantité de charges négatives de quelques dizaines de Coulomb à la terre. L'éclair représentant le phénomène le plus lumineux a une durée de l'ordre de 0.5 secondes et peut être constitué de plusieurs décharges appelées arcs en retour. Un arc en retour dure environ quelques millisecondes, et la séparation entre deux arcs en retour successifs est de l'ordre de plusieurs dizaines de millisecondes (Figure I.7) [KUF84][UMA87].

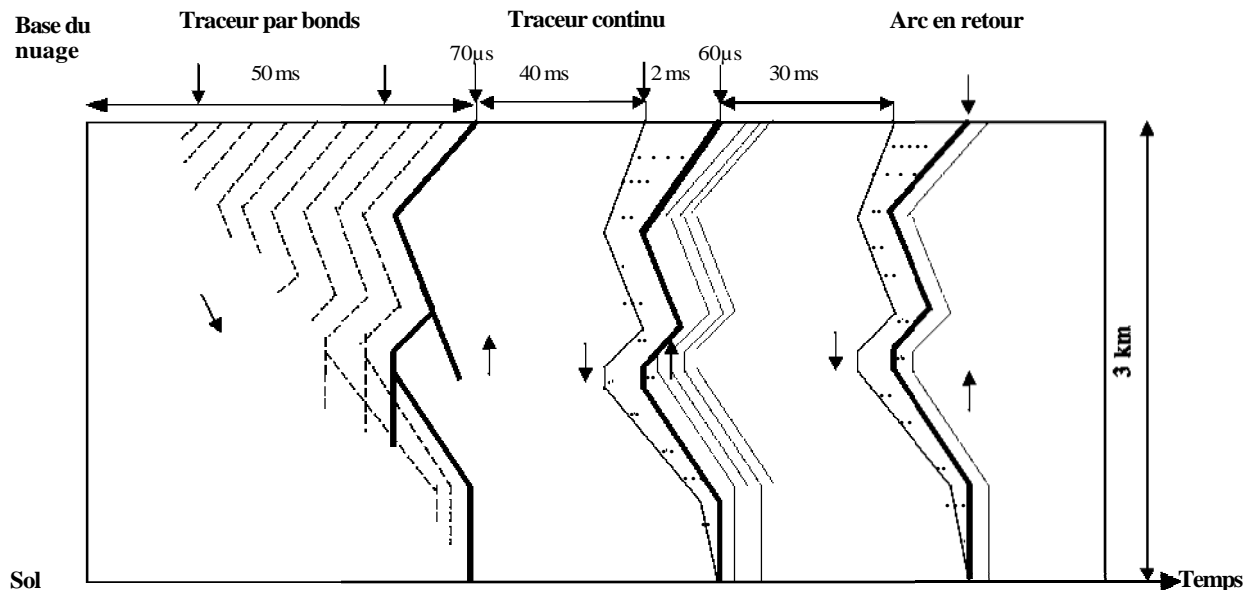


Figure I.7: Schématisation d'un coup de foudre descendant, d'après Uman [UMA87].

La Figure I.8, illustre le processus de déclenchement d'un coup de foudre descendant négatif.

De manière générale, ce processus peut être décomposé en 6 étapes :

- Une première décharge (preliminary breakdown) se produisant à l'intérieur du nuage, entraîne la création d'un canal chargé négativement vers le bas (étape 1) appelé traceur par bond. Le canal ionisé ainsi créé permet l'écoulement des charges contenues dans le nuage. Sa progression s'arrête au bout d'une dizaine de mètres parcourus.

Le canal contient de l'air fortement ionisé, et favorise l'écoulement de nouvelles charges négatives issues du nuage vers le sol. De nouveaux canaux ionisés sont alors créés (étapes 2 et 3).

- Ce processus se répète jusqu'à créer un champ suffisamment intense pour faire apparaître, par l'effet de pouvoir des pointes, une ou plusieurs décharges partant du sol, on parle alors d'effluve (étape 4).

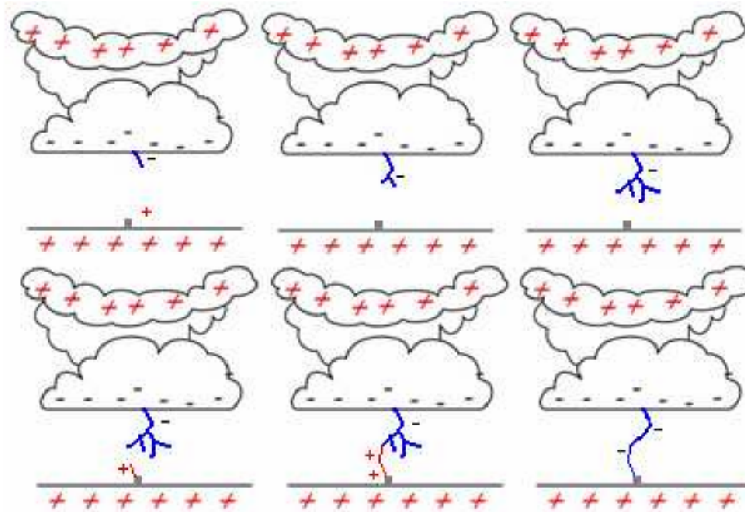


Figure I.8: Processus de déclenchement d'un coup de foudre descendant négatif.

– Dans l'étape 5, relative au processus d'attachement, la "connexion" entre le traceur par bond et l'effluve se crée à une dizaine de mètres au dessus du sol et permet la création d'un canal ionisé permettant l'échange de charges entre le sol et le nuage. On observe alors un éclair de forte luminosité et l'extinction des autres traceurs par bonds (étape 6).

– Durant la phase d'éclair, de nombreux échanges de charges ont lieu. Dans un premiers temps, le canal du traceur est déchargé par une onde de potentiel de sol constituant le premier arc en retour (first return stroke) qui se propage vers le nuage à une vitesse de l'ordre du tiers de la vitesse de la lumière en neutralisant le canal chargé par le traceur. Après la phase de l'arc en retour, l'éclair peut disparaître, mais une quantité résiduelle de charges encore présente au sommet du canal permet le développement d'un traceur obscur (dard leader) à une vitesse de l'ordre de 3.10^6 m/s. Le traceur obscur déclenche un arc en retour subséquent (subséquent return stroke). Ce mécanisme se reproduit tant que les charges sont encore présentes au sommet du canal et peut donc donner naissance à plusieurs arcs en retour subséquents. Le dernier arc en retour généré est souvent l'arc présentant la plus forte amplitude, car il draine les charges résiduelles de la cellule orageuse. De plus, il est intéressant de noter que les arcs en retour subséquents présentent un temps de montée plus rapide que celui du premier arc en retour [GAL79].

I.6.2. Coup de foudre ascendant

Si l'effet couronne reste faible et circonscrit au voisinage immédiat de la pointe d'un paratonnerre, la décharge peut, en revanche, se développer beaucoup plus loin lorsque les dimensions de l'objet sont importantes. Dans certains cas, tels que pylônes placés sur une crête,

tour élevée, elle peut se développer suffisamment loin pour atteindre le nuage. Il se produit alors un véritable coup de foudre, que l'on désigne par coup de foudre ascendant. De tels coups ascendants sont fréquemment observés à partir de tours de télévision modernes, dont la hauteur dépasse 300 m, à partir de gratte-ciel (observations à l'Empire State Building), et à partir de pics montagneux.

Notons cependant que ce mécanisme est plus probable en décharge positive, c'est-à-dire lorsqu'un nuage négatif induit des charges superficielles positives dans le sol.

I.7. PARAMETRES ELECTRIQUES DE LA Foudre

Les allures des courants associés au coup de foudre négatif sont variées aussi bien en amplitude qu'en durée. On peut cependant dire que pour le premier arc en retour, le temps de montée (ou le temps de front) de l'impulsion de courant est de l'ordre de 5 à 10 μs et que la durée de sa décroissance est d'environ 100 μs [GAL92]. L'ordre de grandeur de la valeur crête du courant est de quelques dizaines de kilo Ampère. Les décharges subséquentes présentent un temps de front inférieur à la microseconde, une décroissance plus régulière et une amplitude plus petite que celle de l'arc en retour [SCH56].

Les coups de foudre positifs ne sont quant à eux constitués que d'une seule décharge de durée totale variant de 0.1 à 0.2 s. La durée du front est relativement longue (20 à 50 μs) et l'amplitude du courant peut atteindre des valeurs supérieures à 100 kA.

Le tableau 1.1 résume quelques ordres de grandeurs importants concernant les caractéristiques électriques des différents types d'impulsions des coups de foudre, pour les trois niveaux de probabilité retenus par le comité technique de la CEI [GAR94].

I.8. LES EFFETS DE LA Foudre

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

- **Effet thermique** [HOR91]

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

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

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

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

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

Tableau I.1. Paramètres caractéristiques de la décharge de foudre [CEI60]

- **Effet électrodynamique**

Des effets mécaniques plus au moins importants peuvent se produire, là où des parties du chemin parcouru par la foudre se trouvent dans un champ magnétique d'une autre partie. Dans ce cas, plus l'écart entre ces parties est faible, plus les effets deviennent grands[HOR91].

- **Effets conduits ou rayonnés**

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

Lorsque la foudre tombe directement sur le sol ou lorsqu'elle est captée par un dispositif de capture, l'écoulement du courant qui s'ensuit va provoquer des montées de potentiel des terres locales, liées au fait que ces dernières ne sont pas parfaites [KUF84].

- **Effets chimiques**

La décharge électrique de l'éclair apporte une énergie suffisante pour que la réaction chimique suivante ait lieu à partir de l'oxygène de l'air O_2 [AGU87].



où : h : constante de Planck : $6.63 \cdot 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg /s}$
 ν : fréquence de l'onde lumineuse.

- **Effets acoustiques**

Le déclenchement extrêmement rapide du premier arc en retour génère une chaleur considérable (30000 K) et une pression très élevée du canal de foudre (2 atmosphère et plus). Il est à l'origine des ondes de choc, elle même à l'origine de l'onde sonore (tonnerre). Le niveau de pression acoustique peut atteindre 155 dB [GAR94].

- **Effets électromagnétiques**

La foudre génère des ondes électromagnétiques à large spectre de fréquence (kHz à MHz) qui atteint les fréquences de transmission radiophoniques provoquant ainsi des perturbations radiophoniques [GAR94]

I.9. LES TYPES DE FOUROIEMENTS DE L'HOMME

La foudre peut atteindre une personne de différentes manières [GAR94]:

I.9.1a Le coup de foudre "direct"(figure I.9a) : le courant de foudre "entre" par la partie supérieure d'une personne et s'écoule au sol en passant par les membres inférieurs ;

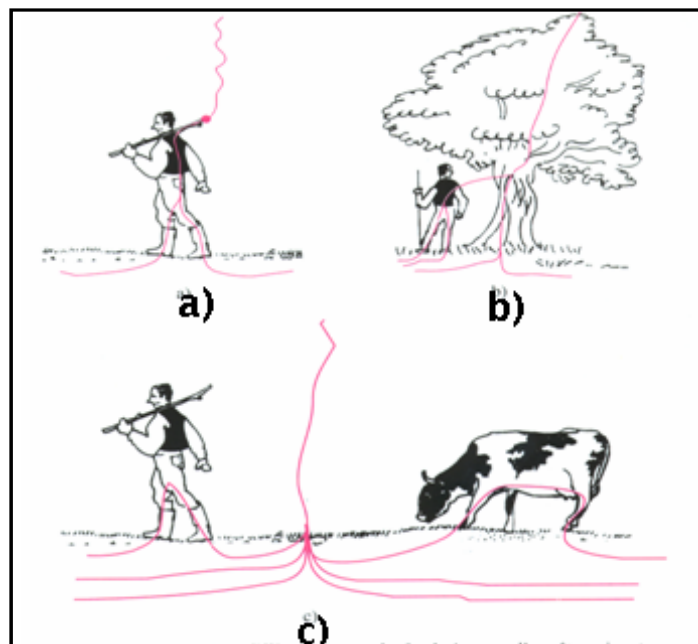


Figure I.9: Les types de foudroiements de l'homme [GAR94]

I.9.1.b Le foudroiement par éclair "latéral"(figure I.9b) : le courant de foudre descend par un élément faiblement conducteur avant de choisir un chemin de moindre résistance qui peut être une personne se situant à proximité ;

I.9.1.c Le foudroiement par "tension de pas"(figure I.9c) : lorsque la foudre frappe un point au sol, on a alors une différence de potentiel suffisante pour générer un courant passant par les membres inférieurs d'un individu ;

I.9.1.d Le foudroiement par "tension de toucher"(figure I.10d) : la tension de toucher intervient comme mécanisme de foudroiement lorsqu'une personne touche un objet conducteur lui-même parcouru par un courant de foudre ;

I.9.1.e Le foudroiement par "courant induit"(figure I.10e) : foudroiement par captage capacitif d'une des ramifications d'un coup de foudre descendant ;

I.9.1.f Le foudroiement par "différence d'impédance", avec le milieu ambiant. Par exemple une personne dans une piscine présente une impédance de plus faible valeur que le milieu ambiant et sera ainsi parcourue par un courant plus fort.

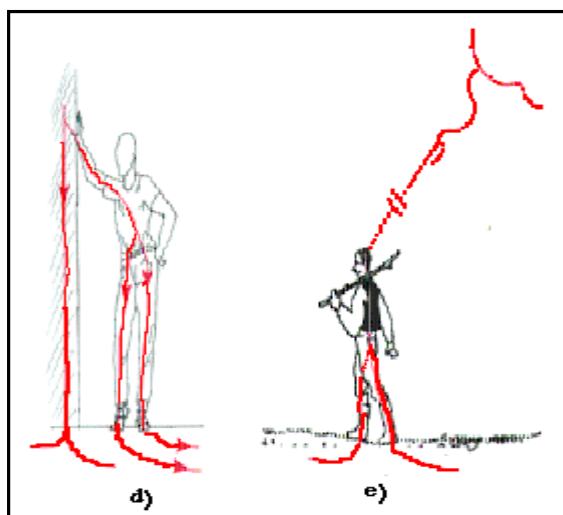


Figure I.10: Les types de foudroiement de l'homme [GAR94]

I.10. LES FORMES D'ONDE DES COURANTS DE Foudre

Comme dans le cas de la décharge de foudre positive, les coups de foudre négatifs présentent des décharges riches et variées en courants impulsionnels d'amplitude et de durée diverses lors de sa propagation. La première impulsion correspond à l'initiation de la première couronne de streamers. Elle est suivie par des impulsions d'amplitude de plus en plus importante correspondant essentiellement aux réilluminations du canal de décharge.

L'onde de courant peut être modélisée par une fonction bi-exponentielle (Figure I.11) pendant le saut final et de l'arc en retour. La durée de front (t_m) varie entre 10 et 15 μ s et la

durée de la queue à mi-amplitude (t_o) est de l'ordre de la centaine de microsecondes lors de cette phase finale de la décharge.

La CEI donne l'onde de forme normalisée dite "choc 1,2/50 μ s" comme l'onde la plus adoptée pour les essais en chocs de foudre. La durée de front T_f de cette onde est de 1,2 μ s et la durée de mi-amplitude T_q est de 50 μ s. En effet, le choc 1,2/50 μ s simule assez bien la forme d'une tension de foudre sévère [GAR94][SAB99].

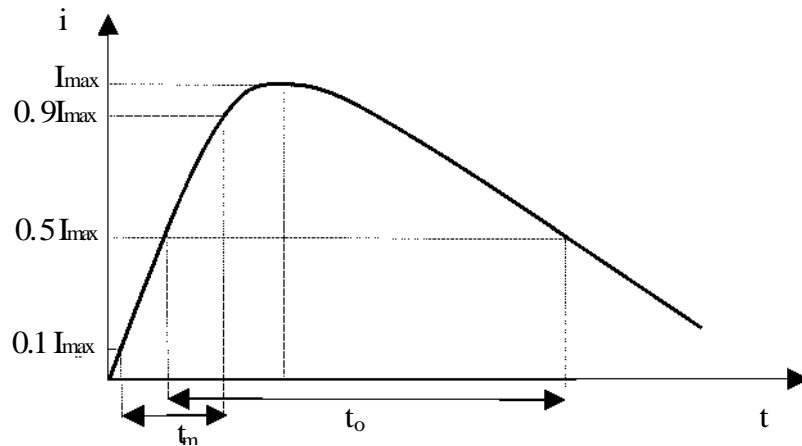


Figure I.11: Courant de l'onde de foudre pendant l'arc en retour

I.11. ANALOGIE AVEC LES GRANDES ETINCELLES

La structure de la décharge de foudre et celle des grandes étincelles sont identiques du point de vue des phénomènes physiques mis en jeu. Les critères d'avancement du canal de décharge sont similaires. La progression par bonds du leader en polarité positive est conditionnée par le critère de champ électrique. En polarité négative, cette progression se fait par réilluminations. Les ordres de grandeur des paramètres associés aux deux phénomènes sont différents du fait du facteur d'échelle d'une part et des conditions de décharges d'autre part (Tableau I.2). Aussi, la vitesse de propagation et le courant du précurseur (leader) par bonds sont plus faibles dans le cas des grandes étincelles.

		Foudre	Etincelle
Leader positif	Vitesse [cm/ μ s]	10 à 100	1,5 à 2
	Courant [A]	50 à 200	0,5 à 1
Leader négatif	Vitesse moyenne [cm/ μ s]	10 à 50	5 à 10
	Courant moyen [A]	-	5 à 10
	Intervalle entre bonds [μ s]	30 à 50	10 à 20
	Longueur des bonds [m]	5 à 20	0,5 à 1,5

Tableau I.2: Comparaison coup de foudre – étincelle de laboratoire [GAL92]

Il est évident que l'extension du modèle de la longue décharge négative à la foudre

doit prendre en compte les problèmes liés au facteur d'échelle. De plus, la simulation en laboratoire introduit d'autres paramètres dans le phénomène de décharge. En particulier, les parois du laboratoire haute tension ont une influence non négligeable sur le rayonnement électromagnétique de la décharge ; de multiples réflexions se produisent sauf si le laboratoire est équipé de cônes d'absorption (chambre anéchoïde,) qui transforment cet espace fermé en espace infini, du point de vue rayonnement électromagnétique, en absorbant celui-ci sans réflexion.

Malgré toutes ces limitations, l'analogie qui existe entre les grandes étincelles de laboratoire et la décharge de foudre naturelle offre un moyen satisfaisant d'étude et d'essais de la foudre ainsi que de ses effets sur les activités humaines.

CHAPITRE II

IMPACT DE LA DECHARGE
ET
PROTECTION CONTRE LA Foudre

CHAPITRE II

IMPACT DE LA DECHARGE ET PROTECTION CONTRE LA Foudre

II.1. INTRODUCTION

Tout ouvrage risque d'être foudroyé, pour cela nous sommes obligés de trouver tous les points d'impacts probables; ces derniers nous permettront de prévoir une meilleure protection éventuelle pour bien sécuriser au maximum nos biens et nos vies. A cet effet, nous citerons deux types de protection, la protection primaire qui est l'objet de notre étude et la protection secondaire.

Pour déterminer ces points d'impact, de nombreux modèles ont été proposés afin de définir une distance d'amorçage (distance d'attraction) pour un objet donné [ROY84][GAR89]. Toutefois, ces modèles restent encore imparfaits. Ils ne tiennent, en effet, pas compte de certaines caractéristiques des objets à protéger, parmi lesquelles leur résistance de mise à la terre et leur formes qui jouent un rôle important [GAR89]. A titre d'exemple, ils ne font pas la distinction entre la distance d'attraction d'un sapin et celle d'une tige conductrice bien mise à la terre, de même hauteur.

Dans ce chapitre nous nous intéresserons à la physique de l'impact au sol, au modèle électrogéométrique de base, au modèle mis en œuvre par la méthode de la sphère fictive ainsi qu'à la protection contre la foudre dans le cas des terres hétérogènes, des terres homogènes mauvaises conductrices et discontinues.

II.2. PHYSIQUE DE L'IMPACT AU SOL ET MODELE ELECTROGEOMETRIQUE

II.2.1 Mécanisme de décharges

L'origine de la foudre est en général un nuage orageux de type cumulo-nimbus. Ce nuage forme un véritable dipôle électrique dont la partie supérieure est chargée positivement et la partie inférieure est chargée négativement. Lorsque la charge du nuage devient suffisante pour provoquer la rupture diélectrique de l'air, une prédécharge s'amorce dans la partie négative du nuage et progresse au hasard par bonds [LER84], en direction du sol. La progression du traceur par bond issu d'un nuage orageux s'effectue de manière aléatoire. Mais, lorsqu'il arrive à deux ou trois cent mètres de la terre, que tout se précise, le traceur par bonds est un canal ionisé qui porte un ascendant de charges négatives, avec une forte concentration à sa pointe, à l'approche du sol, il génère au dessous de lui un champ électrique qui croit

jusqu'à atteindre des valeurs de l'ordre de la centaine de kilovolts par mètre, à ce moment, des traceurs ascendants positifs se développent brusquement en direction du traceur descendant, alors qu'auparavant, existent sous forme d'effluves d'effet couronne, le traceur qui a progressé plus va entrer en contact avec le traceur descendant, ainsi le canal ionisé est continu depuis le sol jusqu'au nuage et l'arc en retour peut avoir lieu et parfois le contact se fait par deux ou plusieurs traceurs ascendants, avec le traceur par bonds, ce qui multiplie les points d'impacts [GAR89] [HUT88] (Figure II.1).

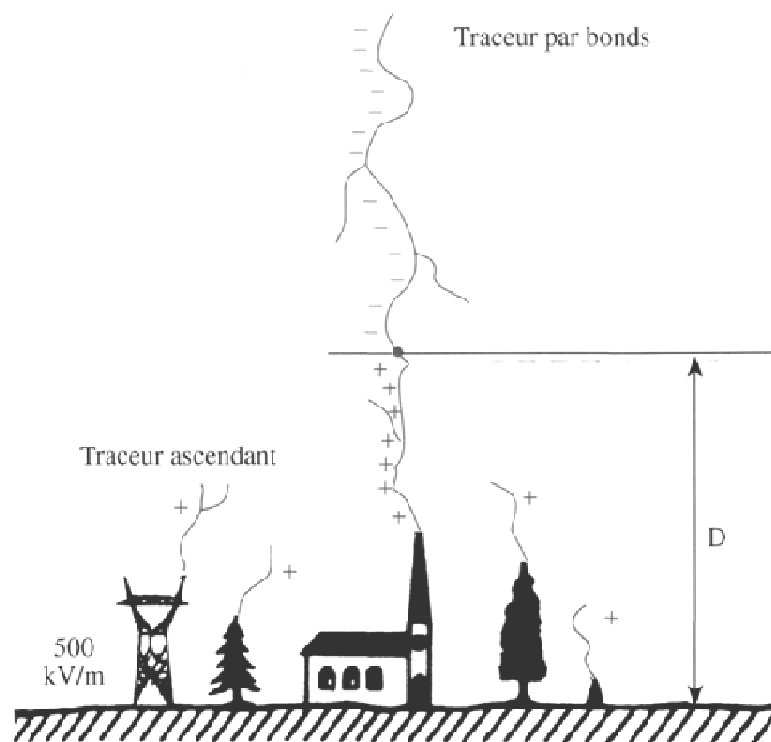


Figure II.1: Schémas montrant la phénoménologie de l'impact : rencontre entre le traceur descendant et un traceur ascendant [GAR94].

II.2.2. Modèle électrogéométrique de base (méthode analytique) :

Le modèle électrogéométrique est un modèle de prédiction physico-mathématique. Son but est de déterminer les points d'impact les plus probables de la foudre, afin de prévoir les dispositifs de protection les plus appropriés (paratonnerres, cages de Faraday, fils tendus) et de minimiser éventuellement les dégâts sur les équipements industriels ou le personnel. Ce modèle est appelé "modèle électrogéométrique" parce qu'il combine les paramètres électriques et géométriques. L'application de la méthode de la sphère fictive, a permis de définir la zone d'attraction d'un paratonnerre vertical [GAR94].

II.2.2.1 Champ généré au sol par le traceur descendant

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

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

En ce qui concerne la charge injectée dans le traceur descendant, il est admis que la première décharge du coup de foudre descendant correspond à la quasi-neutralisation de la charge du traceur. Ceci conduit souvent à la corrélation suivante [GAR94] :

$$I = 15 Q \quad (\text{II-1}) \quad \text{Avec: } I \text{ [kA] et } Q \text{ [Coulomb]}$$

Pour la distribution des charges le long du traceur, les auteurs des modèles ont pris plusieurs hypothèses. Une de ces hypothèses suppose que 10% de la charge du traceur est concentrée à sa pointe et que les 90% restants sont réparties uniformément sur sa longueur[REN77].

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

$$Q = 0.1Q + lq \quad (\text{II-2})$$

Avec :

l : la longueur du traceur
 Q : sa charge totale
 q : sa charge linéique

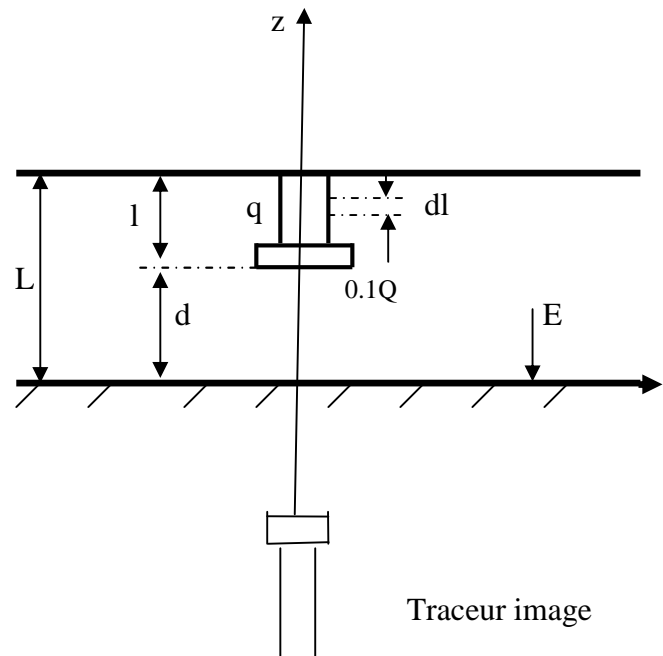


Figure II.2: Notation utilisée pour le calcul du champ au sol crée par un précurseur descendant [HUT89].

La difficulté que représente l'étude de la foudre, est la prédiction précise de l'instant et du point d'impact de la foudre au sol, qui est pour le moment pratiquement impossible.

Avec : L: hauteur de formation du traceur

d: distance instantanée entre la tête du traceur et le sol

$$l = L - d \quad (\text{II-3})$$

Il est plus pratique d'exprimer le champ E en fonction de la valeur crête du courant.

Il est évident que le champ électrique au sol sous le traceur descendant est une fonction à la fois de la quantité de charges réparties le long de ce canal ionisé, et la distance qui sépare sa pointe du sol on peut donc calculer ce champ, à partir d'hypothèses raisonnable sur la répartition réelle des charges, de sorte qu'il existe une corrélation entre l'intensité de crête du courant et la quantité de charge [GAR94].

Dans la littérature, on trouve souvent la corrélation :

$$I = 15Q \quad (\text{II-4}) \quad \text{Avec : } I \text{ en [KA] et } Q \text{ en [C]}$$

Où Q est la charge totale que porte le traceur à l'instant de l'impact, c'est-à-dire

$$\text{lorsque : } l = L \quad I = 15 \frac{Lq}{0,9} \quad (\text{II-5}) \quad \text{Avec: } I \text{ [kA] , } L \text{ [m], } q \text{ [C]}$$

Le tableau II.1, nous donne les charges linéiques pour quelques valeurs de courant de crête pour un nuage situé à 2000 mètres d'altitude [HUT89].

I(kA)	10	20	50	75	100	150	200
q (μC/m)	300	600	1500	2200	3000	4500	6000

Tableau II.1: charge linéique en fonction du courant de crête.

Alors, on peut établir une relation numérique entre le champ électrique au sol en fonction de la distance de la tête du traceur par rapport au sol et l'intensité de crête du courant de foudre résultant.

A partir de cet ensemble de données, nous obtenons $E=f(d, I)$ représentée sous forme de courbes (Figure II.3)[HUT89] [GAR94].

Ces dernières donnent la variation du champ électrique **E** au sol en fonction de la hauteur du traceur descendant, pour différentes amplitudes du courant d'arc en retour.

On peut alors considérer que, le contact entre les traceurs descendants et ascendants s'établit à l'instant où le champ atteint la valeur critique de 500kV/m [HUT89].

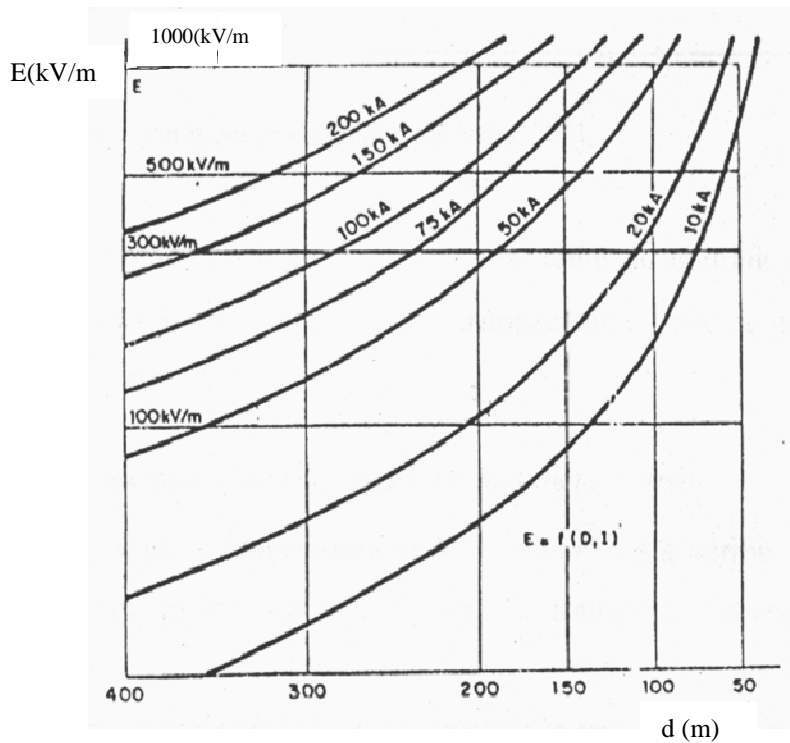


Figure II.3: champ au sol en fonction de l'altitude de la tête du précurseur descendant pour différentes valeurs du courant de foudre [HUT89].

La figure II.3 permet de lire immédiatement la distance entre le traceur par bonds et le sol à cet instant en fonction du courant de foudre, cette distance est appelée distance d'amorçage et E. R. Whitehead avait proposé une relation pour l'exprimer en fonction du courant de foudre [GAR94] :

$$d = 10 I^{2/3} \quad \text{(II-6) } d \text{ en [m] et } I \text{ en [kA]}$$

On constate que la distance d'amorçage déduite de cette relation et la distance obtenue par la courbe $f(d, I)$ pour un champ $E=500$ kV/m au sol, sont pratiquement égales bien que provenant de considérations complètement différentes.

	I (kA)	10	20	50	75	100	150
$d = 10 I^{2/3}$	d (m)	48	74	133	172	207	270
$E=300$ kV/m	d (m)	70	105	185	235	280	360
$E=500$ kV/m	d (m)	50	75	132	173	209	273

Tableau II.2: distance d'amorçage en fonction du courant de crête [HUT89].

La distance d'amorçage croît avec la valeur crête du courant de foudre, d'après le tableau II.2.

Toutefois, même pour les courants plus forts, le point d'impact ne se décide que lorsque le traceur descendant est très proche du sol.

II.2.3. Mise en œuvre du modèle électrogéométrique (méthode de la sphère fictive)

Le modèle électrogéométrique permet de déterminer la zone à protéger par la méthode de la sphère fictive [GAR94]. Cette zone est limitée par une parabole, définie par l'ensemble des points à égale distance de la pointe du paratonnerre et du sol.

Le point d'impact de la foudre est déterminé par l'objet au sol le plus proche de la distance d'amorçage d du traceur. Tout se passe comme si le traceur était entouré d'une sphère fictive de rayon d se déplaçant avec lui. Pour une bonne protection, il faut que la sphère fictive roulant sur le sol atteigne le paratonnerre sans toucher les objets à protéger [AGU87].

Ce modèle élaboré par Armstrong, Golde, Darvenizia et Whitehead a été vérifié au cours d'une importante campagne d'investigation sur des lignes de transport d'énergie électrique à haute tension [AGU87].

Ces auteurs ont défini une expression analytique de la distance entre le traceur par bonds et l'objet au sol (II-6), pour laquelle une décharge ascendante peut se développer à partir de cet objet [ROY84].

La rencontre réelle entre traceur descendant et décharge ascendante s'effectue approximativement à mi-chemin de la distance d'amorçage, d'après ce modèle, l'objet qui se trouvera en premier à la distance d'amorçage de la pointe du traceur constituera le point d'impact [GOL77].

L'application de ce modèle nécessite de le compléter par l'hypothèse que la distance d'amorçage définie auparavant reste applicable quelque soit la nature des objets au sol, que ces objets soient le sol plat lui-même, une pointe du paratonnerre, un fil conducteur tendu horizontalement, les parties externes métalliques d'un bâtiment, ou encore les arbres [HUT89].

II.2.4. Application du modèle électrogéométrique

II.2.4.1. Zones de capture d'une tige verticale (tige de Franklin)

Dans le cas d'une tige simple, selon le modèle électrogéométrique, le point d'impact de la foudre se détermine par l'objet au sol qui se trouvera le premier à la distance d du traceur descendant, même si cet objet est le sol plat lui-même. La distance d entre le point de jonction des traceurs descendant et ascendant est appelée "distance d'amorçage" : c'est aussi la longueur de développement du traceur ascendant.

Tout se passe donc comme si la pointe du traceur descendant était entourée d'une sphère fictive, de rayon d , centrée sur elle, et comme si cette sphère accompagnait rigidement la pointe du traceur descendant.

Dans le cas d'une tige simple de hauteur "h" par rapport à la surface de référence (toit du bâtiment, sol...) trois possibilités s'offrent (Figure II.4) :

- Si la sphère entre en contact uniquement avec la tige verticale, c'est celle-ci qui constituera le point d'impact du coup de foudre.
- Si la sphère entre en contact avec le sol sans toucher la pointe, le coup de foudre touchera le sol sans être capté par le paratonnerre.
- Si enfin la sphère entre en contact simultanément avec la tige et le sol (figure II.5), le coup de foudre pourra toucher soit la tige soit le sol, mais l'impact ne pourra jamais se produire dans la zone hachurée de la figure II.4, qui constitue la zone de protection de la tige verticale. On prenant que cette zone est obtenue pour une sphère de rayon (d) et pour un courant d'intensité I associé.

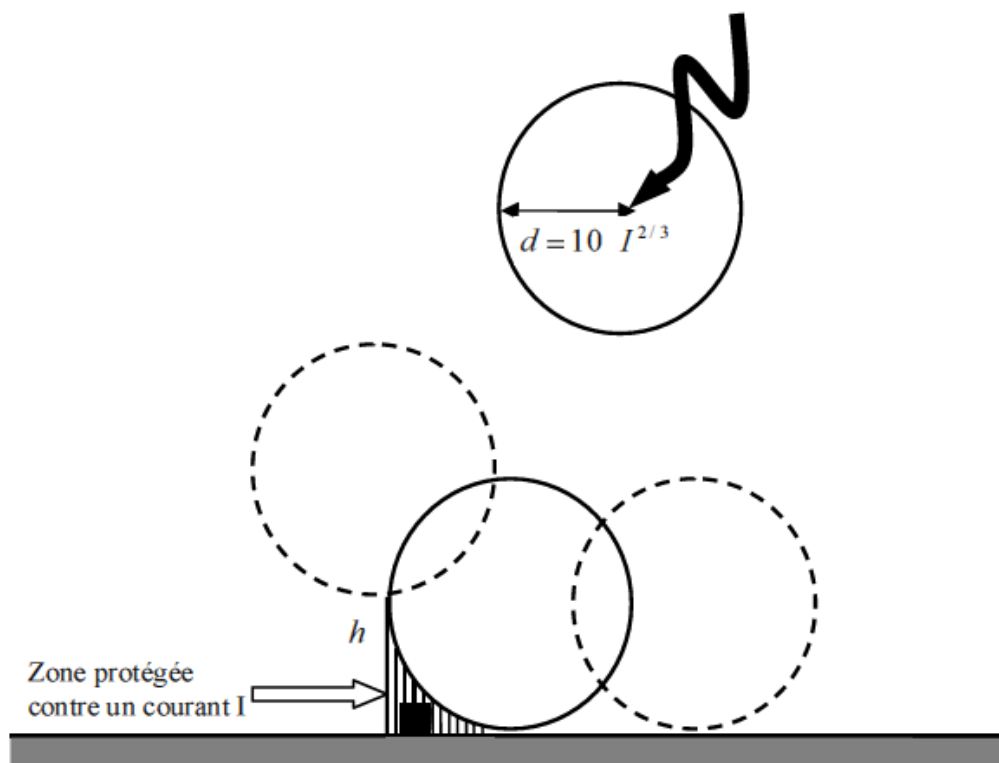


Figure II.4: Méthode de la sphère fictive appliquée à une tige verticale de hauteur h [NFC95][HAL95].

Comme le montre la figure II.4, la zone de protection d'une tige verticale de hauteur h va dépendre du rayon d de la sphère et de l'intensité du courant qui va en résulter [GAR89].

- Si en particulier $d < h$, la figure II.5 montre que le contact avec celle-ci peut avoir lieu au dessous de la pointe: ce qui explique que la foudre puisse frapper des tours élevées à mi-hauteur comme cela est fréquemment observé.

Considérons alors l'ensemble des sphères qui touchent simultanément la tige et le sol, le lieu des centres de ces sphères délimitera la zone d'attraction de la tige.

En examinant la figure II.5 on constate que lorsque d est inférieur à la hauteur h de la tige, le lieu est une droite qui passe par zéro est incliné de 45° . Toutefois lorsque d devient plus grande que h , cette dernière devient alors une parabole (P): en prenant un point p quelconque de cette parabole et en le projetant à la surface du sol qui correspond au point X , on définit une distance OX comme étant la distance de protection de la tige relative au coup de foudre d'intensité correspondant au rayon $d=Xp$.

D'où la distance de protection a pour expression [GAR89]:

$$OX = \sqrt{(2 \cdot d/h - 1)} h \quad (\text{II-7})$$

Chaque point p correspond à un cercle inscrit dans le volume du paraboloides de révolution autour de l'axe vertical de la tige. Ce cercle délimite la surface de capture de la tige relative à une distance d , due à une intensité de courant I donnée.

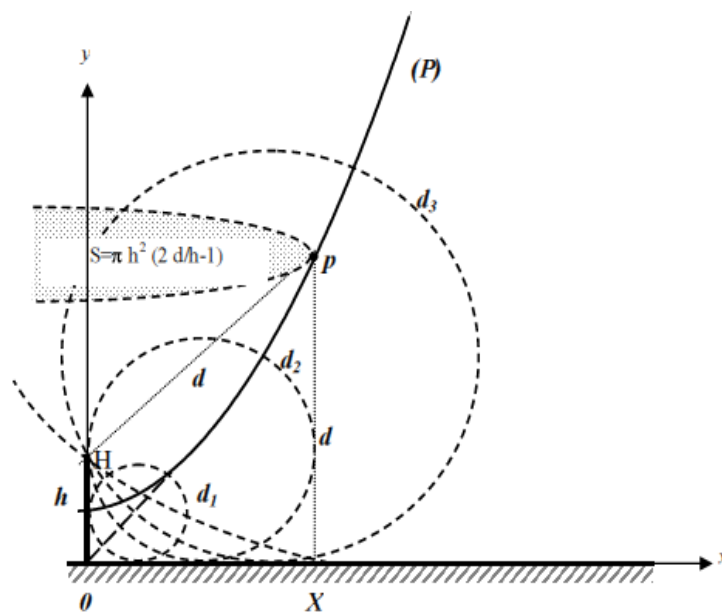


Figure II.5: zone de capture d'une tige verticale [BER75]

La surface s 'exprime par :

$$S = \pi h^2 (2 \cdot d/h - 1) \quad (\text{II-8})$$

Le tableau II.3 donne le rayon de protection R en fonction du courant de foudre [GAR89], pour une tige de 30m de hauteur.

I [kA]	3	7	10	30	80	150
d[m]	21	36	46	76	185	281
R[m]	19	43	43	70	101	126

Tableau II.3: Rayon de protection en fonction du courant de foudre [GAR89]

Vu les données du tableau II.3, la zone d'attraction est d'autant plus grande que le courant de foudre est plus intense. Cette propriété est, dans une certaine mesure, favorable à la fonction de protection que l'on assigne au paratonnerre.

Considérons maintenant la construction géométrique suivante (Figure II.6) :

L'axe OX représente le sol et OH la hauteur h de la tige verticale.

La parabole (p), définie par le lieu géométrique des points p à égale distance du sol et de la pointe h de la tige (p), ces paramètres délimitent une zone d'attraction du paratonnerre (Figure II.6).

Cette courbe parabololoïde a pour équation [GAR94] :

$$Y^2 = X^2 + (Y-h)^2 \iff X^2 + h^2 - 2hY = 0 \quad (\text{II-9})$$

Vu l'hypothèse de la distance d'amorçage, tout traceur qui se présente dans la zone (I) de la parabole ne sera pas captée par le point H, il touchera le sol. Tout traceur qui se présente dans la zone (II) comprise entre OY et (p) sera capté par la pointe dès que la distance HT (T étant la pointe du traceur) devient inférieure à la distance d'amorçage du coup de foudre considéré.

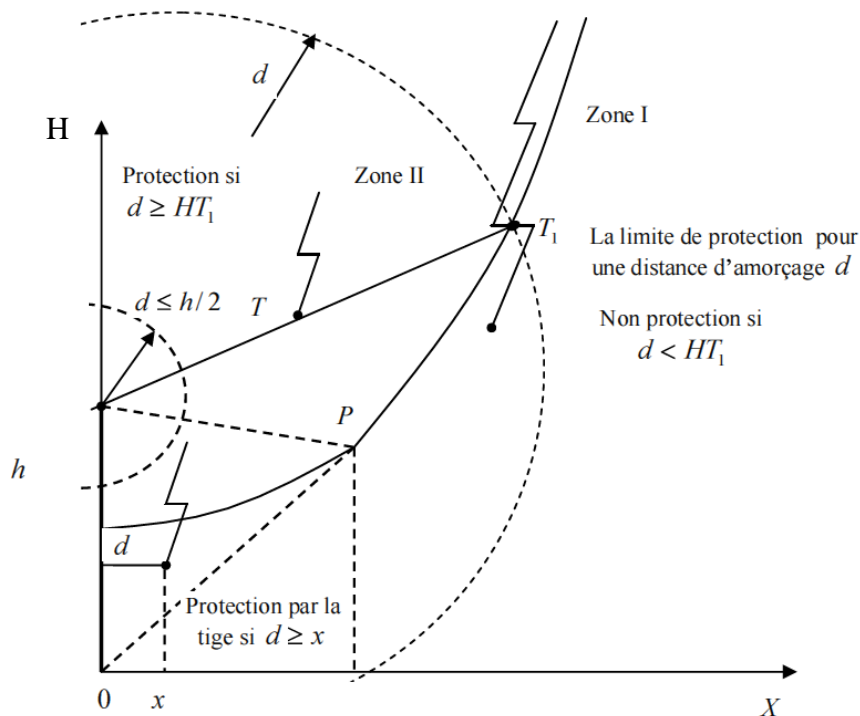


Figure II.6: zone de capture d'une tige verticale selon le modèle électro-géométrique [ROY84]

- Si le traceur arrive à la zone (II) et n'est pas capté par la pointe H, cela voudra dire que $HT > d$.

La condition limite de capture de la pointe tout au long de la parabole doit satisfaire la condition : $HT_1 \leq d$

Où, $HT_1 = Y$, ordonnée du point p (figure II.6)

En remplaçant Y par d dans l'équation (II-10),

On aura :

$$X^2 + h^2 - 2hd = 0 \quad (\text{II-10})$$

$$Y = (h^2 + X^2)/2h \leq d \quad \Longrightarrow \quad X^2 \leq 2hd - h^2$$

$$X^2 \leq (2d/h - 1) h^2 \quad \Longrightarrow \quad X \leq h (2d/h - 1)^{1/2} \quad (\text{II-11})$$

Où, X le rayon de capture de la tige pour le coup de foudre tel que :

$$2d/h - 1 \leq 0 \quad \Longrightarrow \quad d \leq h/2$$

Pour $d \leq h/2$, l'expression (II-11) n'a pas de solution, ce qui veut dire que la pointe ne capte plus les courants de très faible intensité.

II.2.4.2. Volume protégé par une tige de capture verticale

Le volume protégé par une tige de capture verticale est considéré comme ayant la forme d'un cône droit, d'axe la tige de capture et de demi-angle α . Un exemple de volume protégé est donné en Figure II.7 [NFC97]

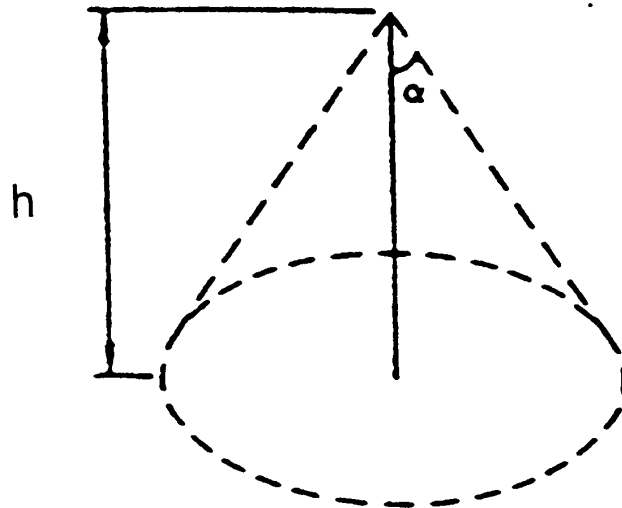


Figure II.7: Volume protégé par une tige de capture verticale [NFC97]

II.2.4.3. Volume protégé par un fil tendu

Le volume protégé par un fil tendu est défini par la composition des volumes protégés par des tiges verticales virtuelles dont les pointes sont sur le fil. Un exemple de volume protégé est donné en

figure II.8 [NFC97].

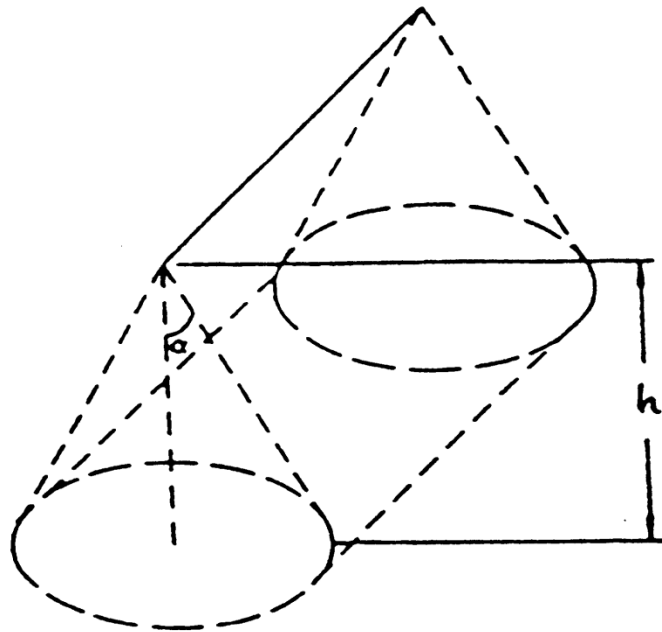


Figure II.8: Volume protégé par un fil tendu [NFC97]

II.2.5. Fréquence de foudroiement d'une tour ou d'un conducteur horizontal :

Pour montrer l'influence de la hauteur d'un objet quelconque sur la fréquence de foudroiement, on considère par exemple une tour et un conducteur horizontal.

Soit un site de niveau kéraunique 30 et de densité, de quatre coups de foudre au sol par km^2 et par an (Tableau II.4).

Hauteur de la tour	m	20	40	60	100	200
Fréquence de foudroiement	10^{-2} coups/an	1.8	2.9	3.5	4	4.5

Tableau II.4 : Fréquence de foudroiement en fonction de la hauteur de la tour

On procède de la même manière pour calculer le foudroiement d'un conducteur placé horizontalement à une hauteur h au dessus du sol, de longueur $L=100\text{km}$ et de densité $N_s=4$ coups / km^2 an (figure II.9).

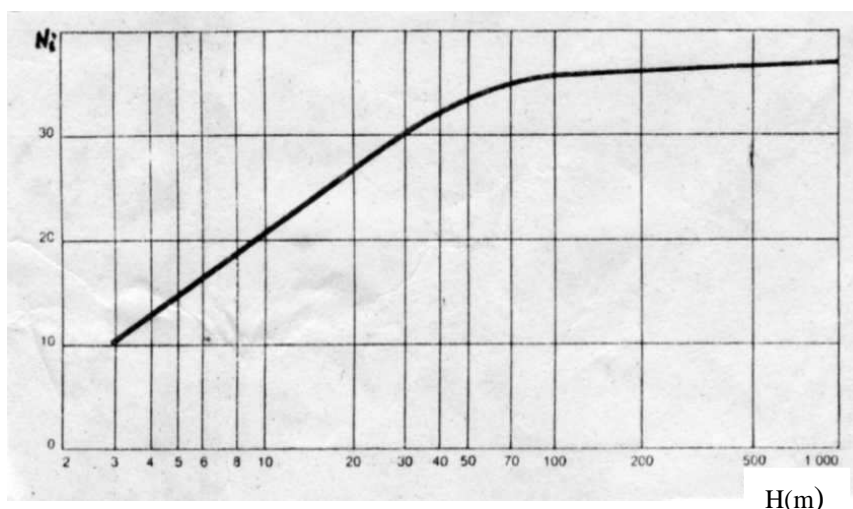


Figure II.9: fréquence de foudroiement d'un conducteur horizontal au dessus du sol [ROY84]

On voit que, dans les deux cas (tour et conducteur horizontal), le modèle électrostatique laisse prévoir une saturation de la fréquence de foudroiement, pour des hauteurs excédant 200m environ, ce fait peut être expliqué par plusieurs facteurs :

- la distorsion du champ au voisinage de la structure n'étant plus localisée, les conditions d'auto-progression du traceur ascendant sont satisfaites bien avant que le champ ambiant ait atteint la valeur de 300kV/m, ce qui a pour effet d'augmenter la distance d'amorçage.
- la distorsion du champ entraîne une courbure de la trajectoire du traceur descendant en direction de la pointe : il s'agirait là d'un véritable effet d'attraction.

II.2.6. Critique du modèle électrostatique

Le modèle électrostatique a été largement utilisé à ce jour pour la protection contre la foudre, soit pour les lignes de transport d'énergie électrique, soit pour la protection de structures. Ce modèle reste encore imparfait puisqu'il ne tient pas compte de certaines caractéristiques géologiques du sol (la résistance de la terre, l'hétérogénéité du sol, la forme des objets au sol). L'existence de traceurs ascendants est bien prouvée, tant par des observations photographiques que par les recherches de laboratoire, mais le calcul rigoureux des paramètres électriques et géométriques gouvernant leur développement se heurte à de nombreuses incertitudes.

Ainsi la forme et la taille des proéminences dans lesquelles se développent les traceurs ne sont pas prises en compte par le modèle utilisé actuellement. La distance d'amorçage depuis un sol plat est différente et très probablement plus petite que la distance définie par le modèle. Pour une proéminence de grande hauteur, elle doit certainement être grande.

Les expériences réalisées au laboratoire montrent que la tige dont la résistance de prise de terre est faible attire le traceur principal. On peut dire donc qu'une bonne conductivité du sol favoriserait le développement de la décharge ascendante.

On signalera aussi que le modèle ne tient pas compte des particularités électrostatiques du sol et c'est là qu'est centrée l'activité du laboratoire de l'ENP depuis plusieurs années.

II.3. INFLUENCE DES PROPRIETES ELECTROGEOLOGIQUES DU SOL SUR LA DECHARGE DE Foudre

Au-dessous d'un nuage orageux, le sol est constitué de plusieurs matériaux qui diffèrent par leurs propriétés électrostatiques, et présente généralement une structure

stratifiée. Du point de vue électrique, les différents matériaux qui le constituent, sont caractérisés par leur conductivité et leur permittivité relative. Les valeurs de ces deux paramètres déterminent la nature du sol.

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

Soient σ la conductivité du sol, ε sa permittivité, et ρ sa densité volumique de charges.

L'équation de conservation de charges $\text{div } \vec{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$ s'écrit :

$$\frac{d\rho}{dt} + \frac{\sigma}{\varepsilon} \rho = 0 \quad (\text{II-12})$$

La solution de cette équation différentielle est donnée par :

$$\rho(t) = \rho_0 \cdot e^{-(t-t_0)/T_c} \quad (\text{II-13})$$

avec: ρ_0 ; densité de charge initiale à l'instant $t = t_0$ et $T_c = \varepsilon/\sigma$; Constante de temps.

D'après l'expression (II-13), la densité volumique de charge diminue en exponentielle, ce qui traduit le déplacement des charges vers la surface du sol ; contribuant ainsi à l'augmentation de l'intensité du champ électrique à son niveau. La vitesse de déplacement de ces charges est liée aux valeurs des paramètres σ et ε et plus précisément à la constante de temps T_c . La valeur de ce paramètre pour les matériaux conducteurs est de l'ordre de $T_{c(\min)} = 1.4 \cdot 10^{-19}$ s, tandis que, pour les matériaux isolants $T_{c(\max)} = 9.3 \cdot 10^6$ s.

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

II.3.1. Décharge de foudre dans le cas de terre hétérogène

Sous la direction conjointe de T. Horvath de l' U.T.Budapest et de A. Boubakeur de l'E.N.P. Alger, J. Ferras a été la première à entamer des travaux de recherche sur l'influence de l'hétérogénéité du sol sur le point d'impact de la décharge de foudre au laboratoire de haute tension de l'ENP Alger [BOU87a] [FER87] [BOU89]. Elle s'est intéressée uniquement au cas le plus fréquent du coup de foudre descendant négatif. Dans ces travaux, deux modèles ont été réalisés ; le premier est un modèle mathématique qui tient compte des paramètres réels de la foudre naturelle, tandis que le deuxième est une simulation réduite du saut final de la foudre au laboratoire.

II.3.1.1. Modèle mathématique

Ce modèle a été établi dans le but de déterminer numériquement la variation de l'intensité du champ électrique à la surface du sol lors de l'avancement du traceur descendant, ce qui permet la détermination de l'impact probable. Ce modèle tient compte de la variation de la densité de charges dans le sol et considère chaque position du traceur comme un état statique, parce que le temps d'un saut est relativement court par rapport au temps d'attente entre deux sauts.

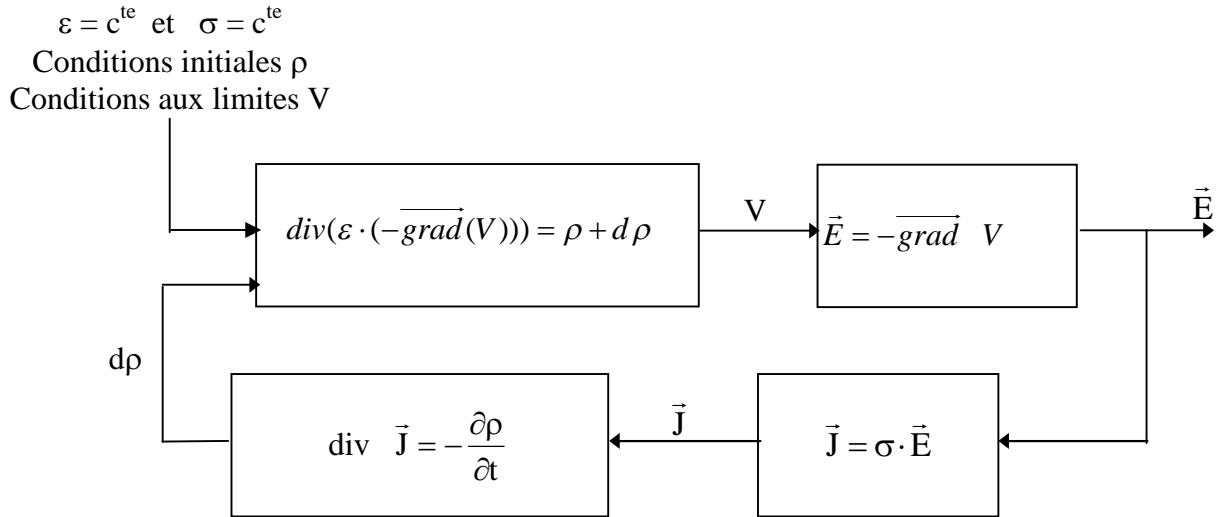


Figure II.10: Schéma-bloc des relations entre le potentiel, le champ électrique, la densité de courant et la variation de la densité des charges dans le sol [FER87].

L'utilisation des équations de Maxwell, permet la détermination de la répartition du champ électrique sur la surface du sol, le domaine à étudier est choisi de telle façon qu'il présente une symétrie cylindrique.

Le calcul du champ électrique au niveau du sol se fait pour chaque position du traceur descendant, selon le schéma bloc de la figure II.10

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

$$\text{Div}\left(-\overrightarrow{\text{grad}} V\right) = \frac{\rho}{\varepsilon} \quad (\text{II-14})$$

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

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}} V \quad (\text{II-15})$$

La variation de la densité de charge est donnée par :

$$\text{div } \vec{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (\text{II-16}) \quad \text{avec : } \vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (\text{II-17})$$

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

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

II.3.1.2. Le Modèle expérimental

Afin d'examiner l'influence des propriétés électrogéologiques du sol sur le point d'impact, un modèle expérimental a été réalisé [FER87].

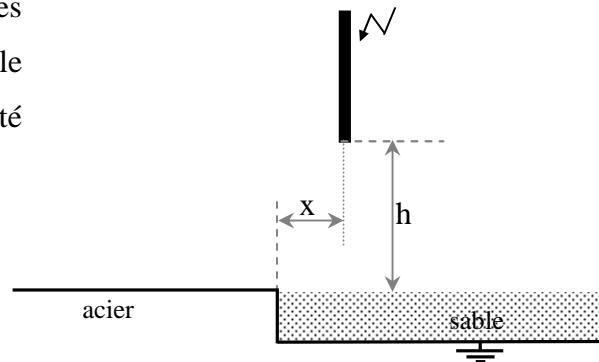


Figure II.11: Modèle expérimental réduit

Dans ce modèle, la terre hétérogène est simulée par deux matériaux ayant des conductivités différentes (acier + sable sec ou acier + sable humide), l'hétérogénéité du sol sera caractérisée par le rapport des conductivités des deux milieux.

Les résultats obtenus avec ce modèle (Figure II.12 a et b), montrent que :

La position de la tige est déterminée par sa hauteur h par rapport au sol et la distance x entre son axe et l'interface (Figure II.11).

- Pour les deux cas (acier + sable sec et acier + sable humide), la fréquence de foudroiement de l'interface diminue avec l'augmentation de la distance (X/h).
- Pour une même distance (X/h), la probabilité de foudroiement de l'interface est plus élevée avec la configuration (acier + sable sec). En effet, cette configuration présente un degré d'hétérogénéité plus grand que l'autre configuration. Donc, l'influence de l'interface sur l'attraction des décharges de foudre augmente avec l'augmentation de degré d'hétérogénéité du sol.

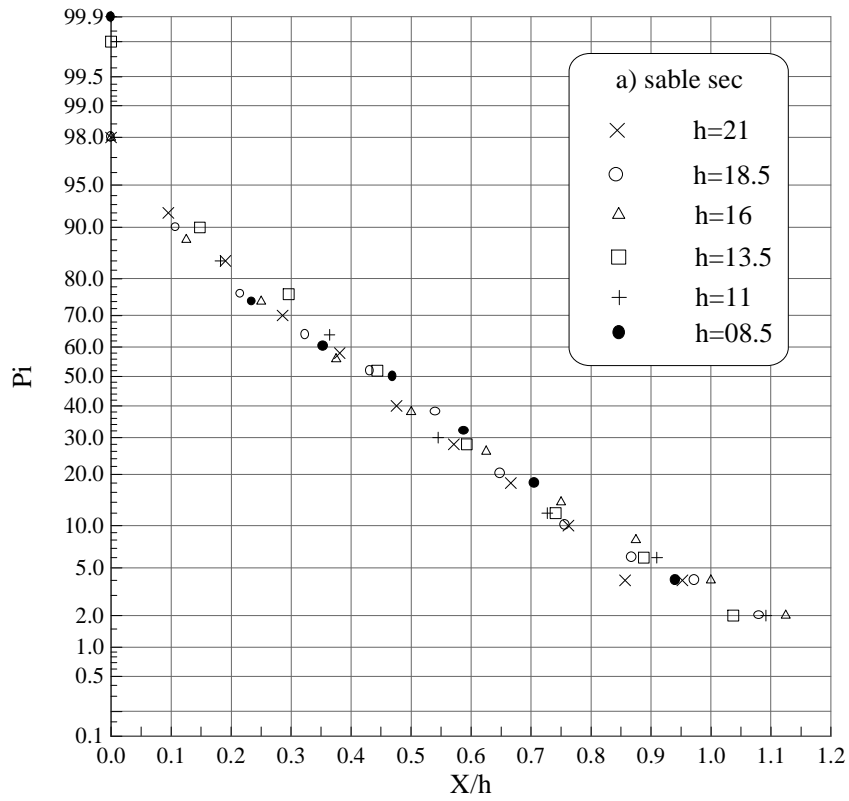


Figure II.12a: Distribution des décharges de foudre négatives à l'interface du sol hétérogène [FER87]

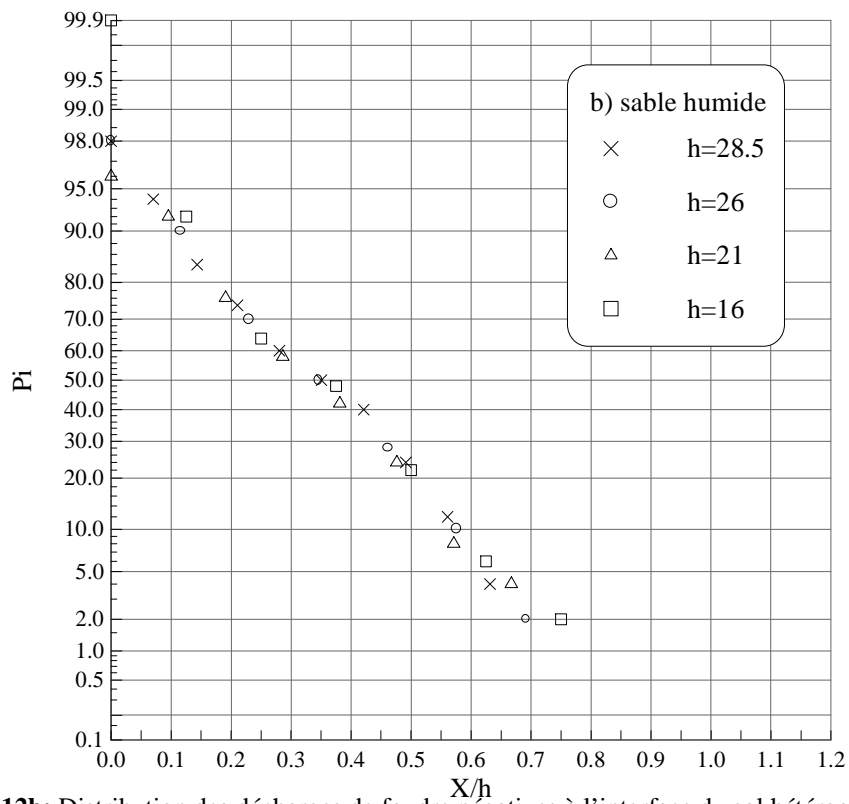


Figure II.12b: Distribution des décharges de foudre négatives à l'interface du sol hétérogène [FER87]

II.3.2. Zones d'attraction d'un paratonnerre vertical dans le cas d'une terre hétérogène

Suite aux résultats des travaux sur l'influence des propriétés électrogéologiques du sol hétérogène sur le point d'impact de la décharge de foudre [FER87] [BOU87], les travaux de recherche, ont été orientés vers l'étude des zones d'attraction d'un paratonnerre vertical, dans le cas d'une terre hétérogène [BOU97].

Cette étude a été faite à l'aide du modèle expérimental réduit représenté à la figure II.13.

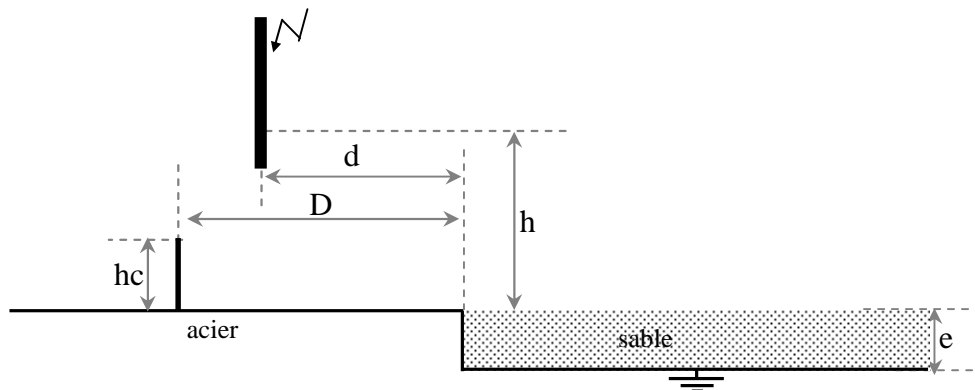


Figure II.13: Modèle expérimental réduit d'un système terre hétérogène avec paratonnerre vertical.

D'après les résultats obtenus, il a été constaté que le modèle électrogéométrique reste valable pour toutes les positions possibles du paratonnerre vertical sur les deux parties de la terre hétérogène.

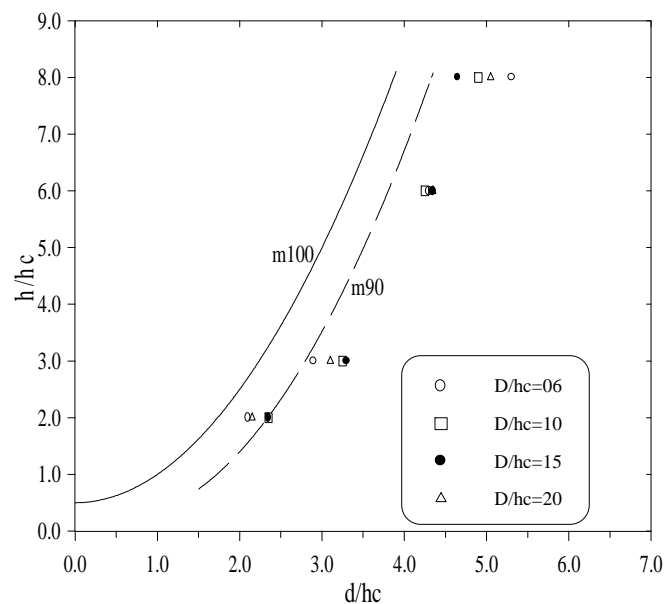


Figure II.14: Zones d'attraction d'un paratonnerre vertical.

m90 : modèle électrogéométrique 90% sur sol bon conducteur.

m100 : modèle électrogéométrique 100% sur sol bon conducteur.

En effet, dans le cas où le paratonnerre est situé sur la partie mauvaise conductrice de la terre (sable), les zones d'attraction sont plus larges que celles définies pour un sol homogène parfaitement conducteur.

Dans le cas le plus défavorable, où la décharge est comprise entre le paratonnerre et l'interface, les zones d'attraction obtenues sont aussi plus grandes que celle donnée par le modèle électrogéométrique classique (Figure II.14).

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

II.3.3. Zones d'attraction d'un paratonnerre vertical dans le cas d'une terre homogène mauvaise conductrice [BOU92] [BOU93] [BOU94] [BEL94]

D'après l'étude faite sur la terre hétérogène, il a été constaté que la zone d'attraction d'un paratonnerre ne correspond pas, en général, à celle définie par le modèle électrogéométrique [BOU89] [BOU90] [BOU91]. L'élaboration d'un nouveau modèle de protection prenant en compte les propriétés électrogéologiques du sol s'avérait donc très utile. Pour y aboutir, il a été jugé préférable de commencer avec l'étude détaillée d'une terre homogène mauvaise conductrice avec la protection verticale.

En effet, ce modèle ne prend pas en considération la nature de la terre, ce qui le rend discutable dans le cas où la terre n'est pas homogène et parfaitement conductrice. Le modèle expérimental réduit utilisé est représenté à la figure II.15, où la terre est constituée d'une couche d'eau distillée de conductivité et d'épaisseur variables, reposant sur un plan conducteur mis à la terre.

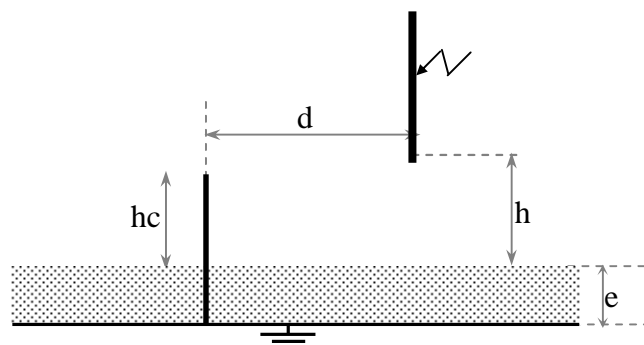


Figure II.15: Modèle expérimental réduit- système avec terre mauvaise conductrice

Afin d'examiner l'influence de l'épaisseur "e", de la conductivité " σ " de la terre mauvaise conductrice et de la hauteur h_c du paratonnerre, des essais ont été effectués à l'aide du modèle expérimental représenté à la figure II.15. Les résultats obtenus (Figures II.16a et b)

montrent que les zones d'attraction sont plus larges que celles du modèle électrogéométrique classique. Cet élargissement dépend étroitement du rapport hc/e : plus ce rapport est petit plus la zone d'attraction devient large. Il en est de même lorsque la conductivité du sol diminue.

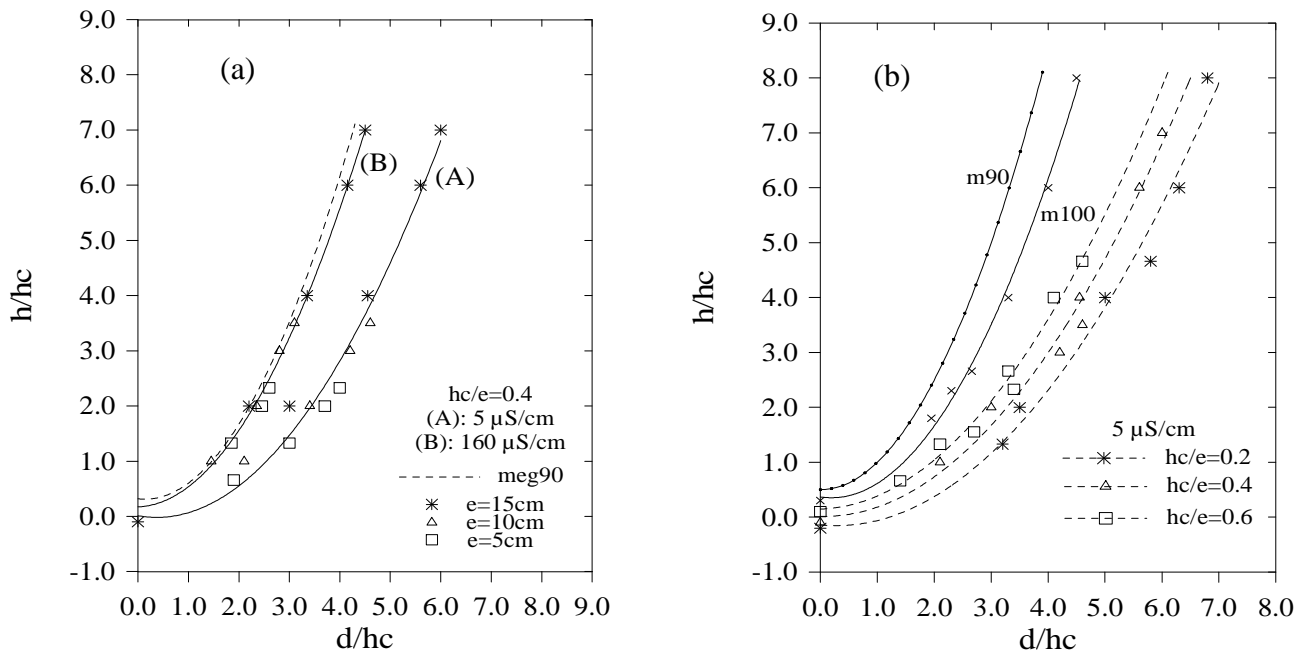


Figure II.16: Zones d'attraction d'un paratonnerre vertical dans le cas d'un sol homogène mauvais conducteur.

a) Influence de l'épaisseur de la terre sur les zones d'attraction.

b) Influence du rapport hc/e sur les zones d'attraction.

II.3.4. 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.

II.3.4.1. 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 grande.

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 .

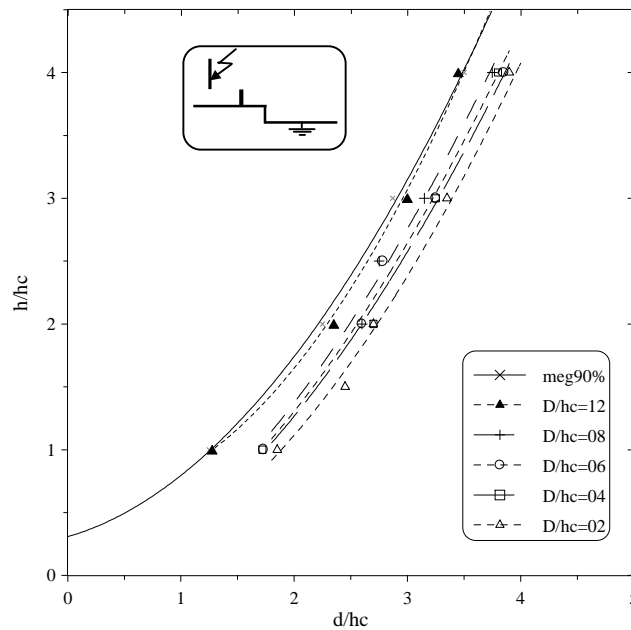


Figure II.17: Zones d'attraction d'un paratonnerre vertical situé sur la partie haute de la terre discontinue, entre l'interface et l'axe de la tige.

II.3.4.2. 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 (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.

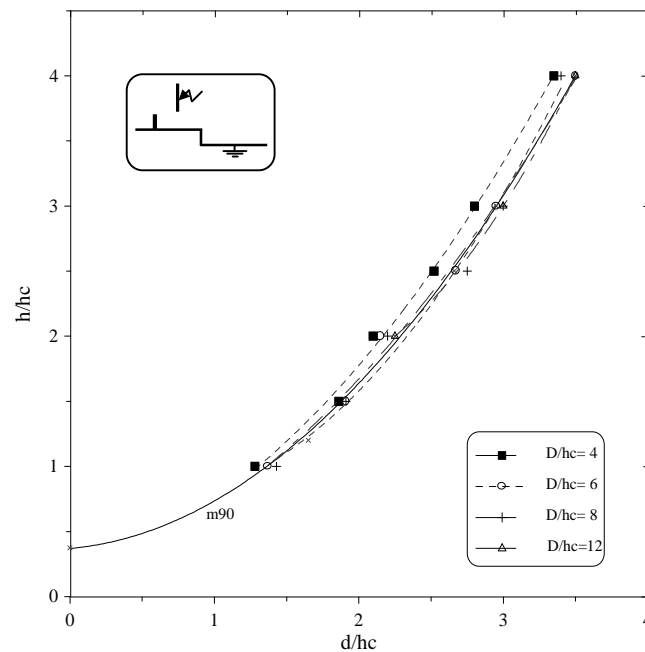


Figure II.18: Zones d'attraction d'un paratonnerre vertical situé sur la partie haute de la terre discontinue et l'axe de la tige situé entre l'interface et le paratonnerre.

II.3.4.3. Paratonnerre sur la partie basse de la terre discontinue et l'axe de la tige situé entre l'interface et le paratonnerre.

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.

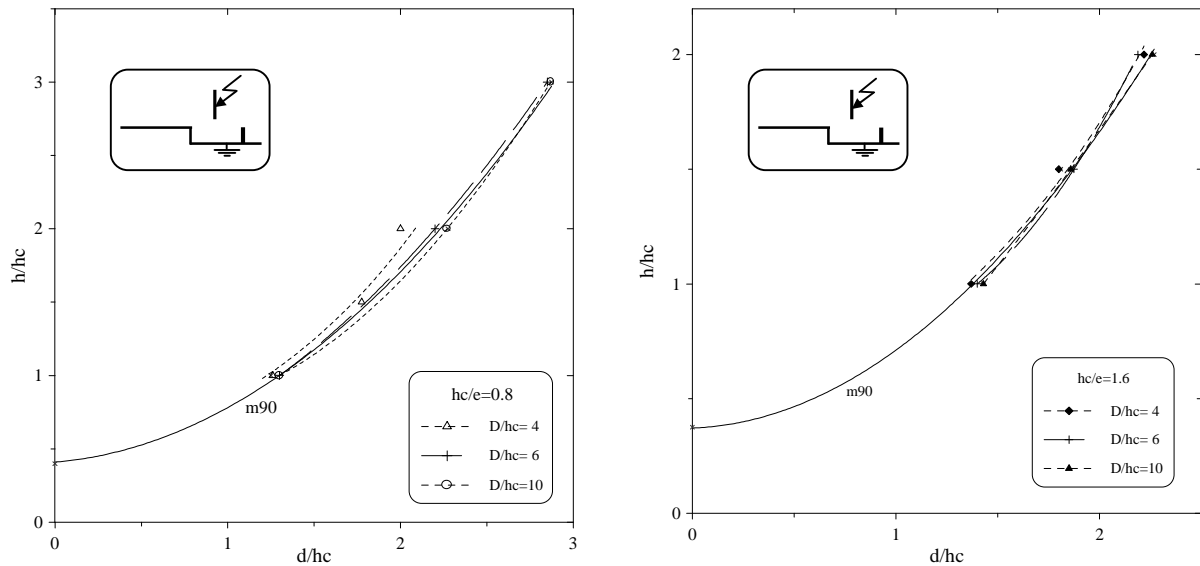


Figure II.19: Zones d'attraction d'un paratonnerre vertical pour les différents rapports h_c/e

II.3.4.3.1. 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 ($D/h_c=4$).

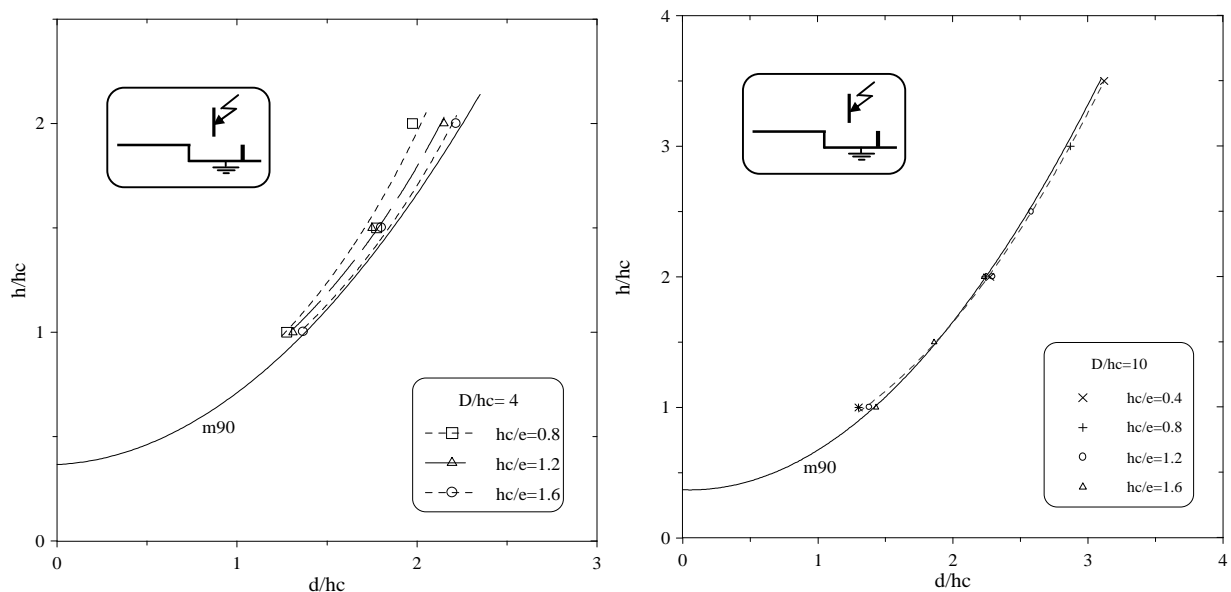


Figure II.20: Influence du rapport h_c/e sur les zones d'attraction du paratonnerre

En effet, les zones d'attraction sont plus petites que celle donnée par le modèle électrogéométrique. Dans 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).

II.3.4.4. Paratonnerre situé sur la partie basse de la terre discontinue entre l'axe de la décharge et l'interface

Pour un rapport $h_c/e < 1$, les zones d'attraction sont plus larges que celle définie par le modèle électrogéométrique. Cependant la plus grande zone a été obtenue avec $h_c/e = 0,4$. 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].

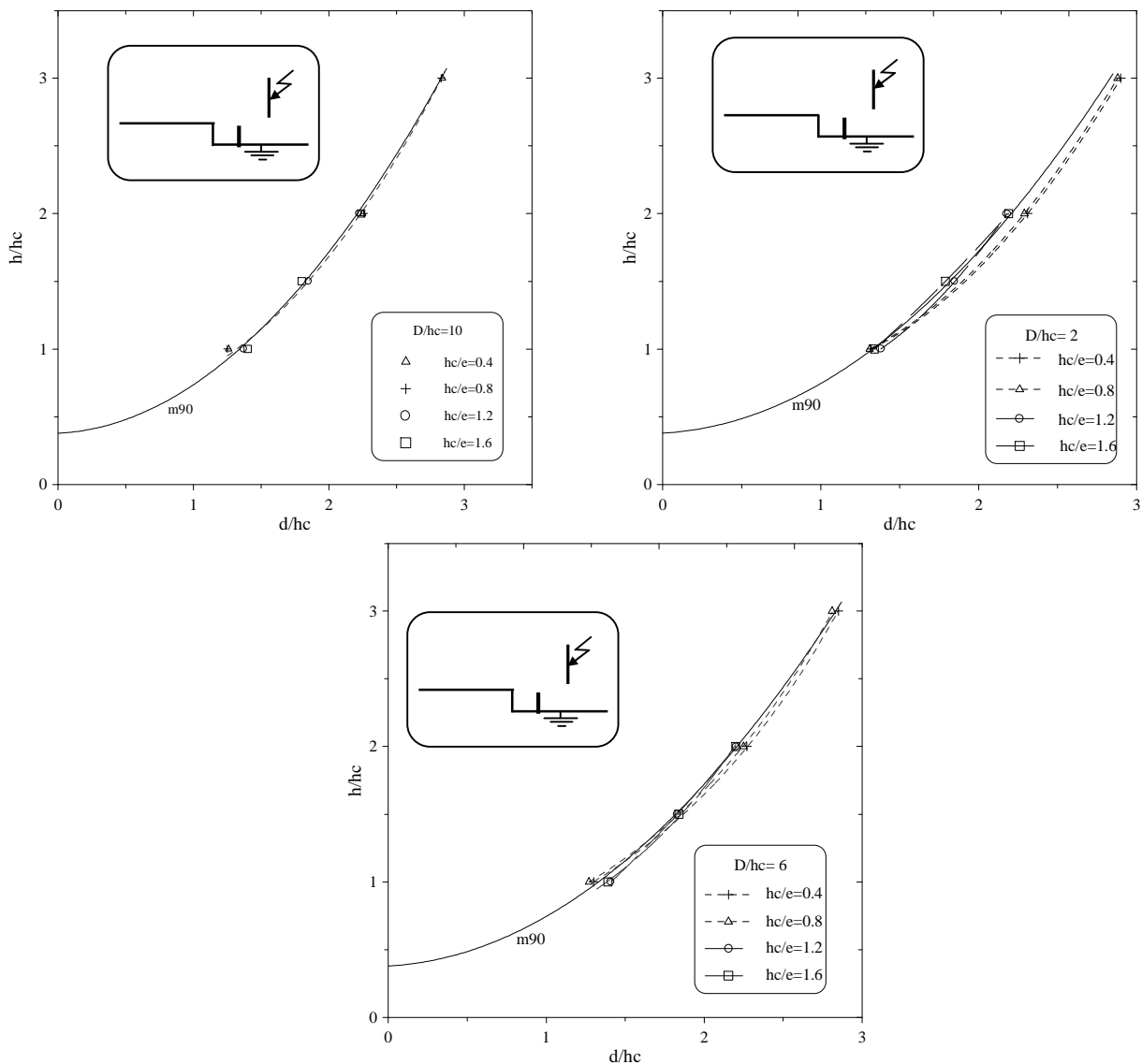


Figure II.21: Influence du rapport h_c/e sur les zones d'attraction du paratonnerre.

II.4. CONCLUSION

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

Dans le cas des terres hétérogènes, l'interface a une influence importante sur l'attraction des décharges de foudre. Si le paratonnerre vertical 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, 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.

L'influence de la discontinuité de la terre sur les zones d'attraction d'un paratonnerre vertical, dépendrait en premier lieu de la position de l'axe de la décharge par rapport à l'interface et au paratonnerre. Ceci serait dû au champ électrique relativement intense au voisinage de l'interface.

Pour toutes les configurations étudiées, l'influence de l'interface des deux parties de la terre discontinue sur les zones d'attraction est plus marquée, lorsque le paratonnerre est situé très proche de l'interface. Par contre, lorsque le paratonnerre est très loin de l'interface, il n'y a pratiquement aucune influence de l'interface.

Notre travail s'inscrit dans le même axe de recherche et consiste :

- à déterminer expérimentalement l'influence de l'hétérogénéité de l'électrode mise à la terre des petits intervalles d'air tige-plan, sur la tension à 50% de décharge disruptive (U_{50}), lorsqu'ils sont soumis à une onde de choc de foudre. Les deux cas de polarité sont considérés.
- à déterminer les zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal dans le cas des terres hétérogènes.

CHAPITRE III

TECHNIQUES EXPERIMENTALES

CHAPITRE III

TECHNIQUES EXPERIMENTALES

Les essais présentés dans cette thèse ont été réalisés au Laboratoire de Haute Tension de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger. Nous présentons succinctement dans cette partie les différents dispositifs et méthodes d'essais utilisés.

III.1. GENERATION DES ONDES DE CHOC

III.1.1. Générateur de choc

L'onde normalisée de choc de foudre 1.2/50 μ s est délivrée par un générateur de choc, de type Marx à huit étages dont la tension nominale est de 600kV (Tension de charge nominale par étage égale à 75 kV), et l'énergie de 4kJ (Figure III.1).

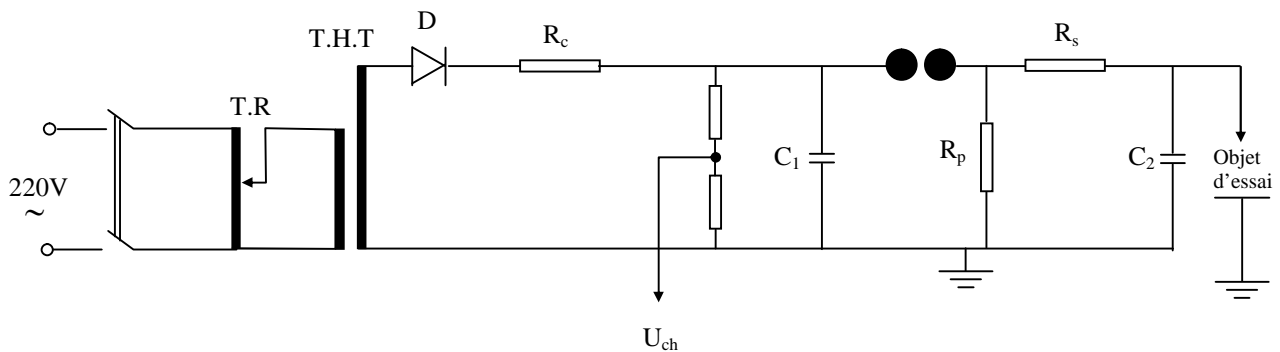


Figure III.1: Schéma simplifié d'un étage du générateur de choc

Avec :

T.R : Transformateur de réglage

T.H.T: Transformateur de haute tension

D : Redresseur

Rc : Résistance de charge.

Rs : Résistance série équivalente ((8 x 10) + 150) Ω

Rp : Résistance parallèle équivalente 8 x 430 Ω

C1 : Condensateur de choc 22.5 nF

C2 : Condensateur de charge 2 nF

La tension continue destinée à la charge du générateur de choc est fournie par un redresseur **D** de tension monophasée. 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 aux bornes 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 (Figure III.2):

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

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

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

La CEI donne l'onde de forme normalisée dite "choc 1,2/50 μs " comme l'onde la plus adoptée pour les essais en chocs de foudre. La durée de front T_f de cette onde est de 1.2 μs et la durée de mi-amplitude T_q est de 50 μs . En effet, le choc 1,2/50 μs simule assez bien la forme d'une tension de foudre sévère [GAR94][SAB99].

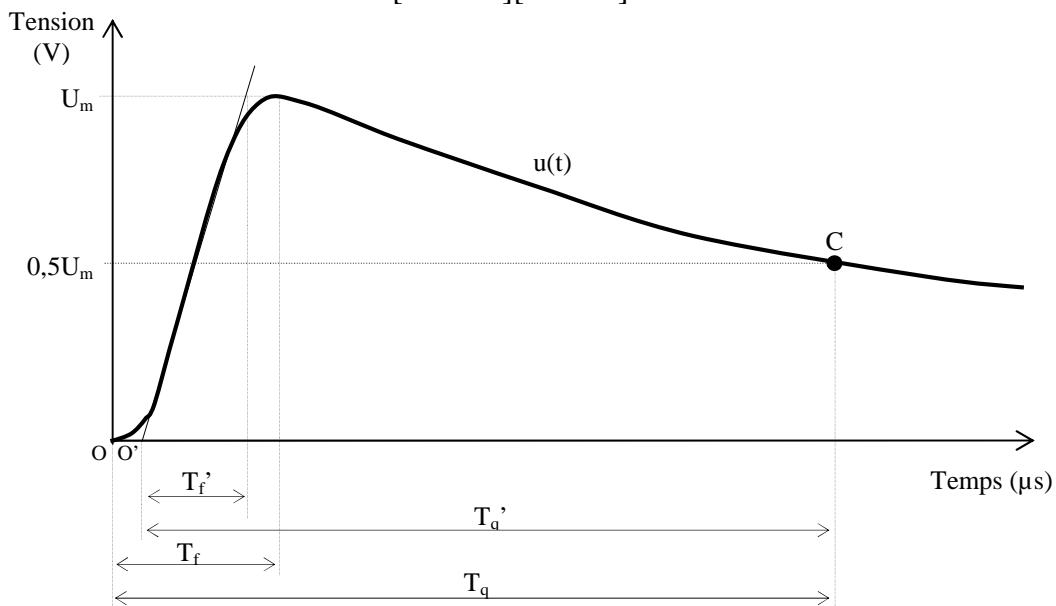


Figure III.2: Forme de l'onde de choc de foudre.

o : origine de la tension de choc

o' : origine conventionnelle de la tension de choc

T_f : durée de front

T_f' : durée conventionnelle de front

T_q : durée de mi-amplitude

T_q' : durée conventionnelle de mi-amplitude

III.2. DETERMINATION DE LA TENSION DISRUPTIVE $U_{100\%}$ ET DE LA TENSION $U_{50\%}$ DU SYSTEME SANS PARATONNERRE

La tension $U_{100\%}$ est la tension minimale pour laquelle on a une disruption certaine de l'intervalle d'air de la configuration tige-plan. La tension notée $U_{50\%}$ représente la valeur de la tension U_{cr} provoquant 50% de claquage (*breakdown*) et 50% de tenue (*withstand*). Les tensions $U_{100\%}$ et $U_{50\%}$ sont déterminées par la méthode des paliers multiples constants [DAV88]. Elle consiste à appliquer au système tige-plan 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. A un palier constant U_k correspond une fréquence de décharge (P_k) égale au nombre de chocs appliqués ayant engendré une décharge disruptive divisé (N_d) par le nombre total de chocs appliqués (N).

$$P_k = N_d/N$$

Puis nous avons effectué le même travail pour deux autres niveaux de tension de telle façon que les probabilités soient éloignées les unes des autres.

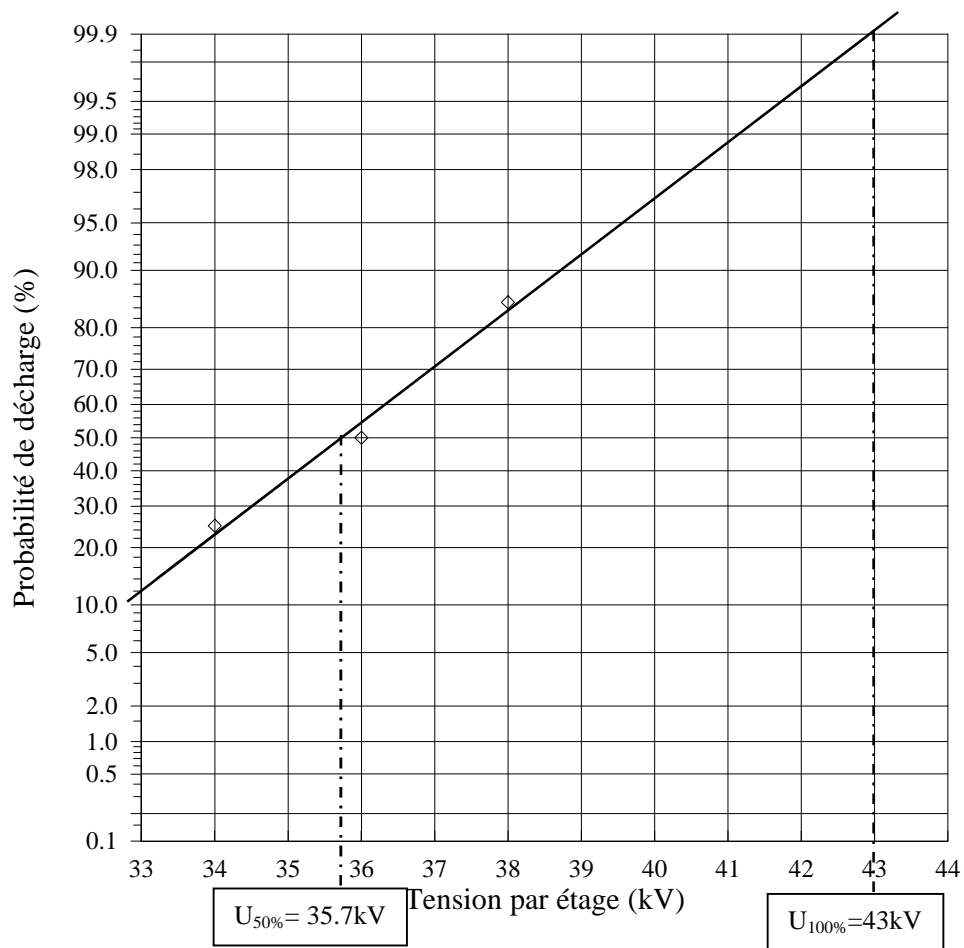


Figure III.3: $P = f(U)$ pour un sol parfaitement conducteur ($h=12\text{cm}$)

(Tensions : $U_{100\%}=43\text{kV}$ et $U_{50\%}=35.7\text{kV}$)

Par la suite, nous avons rapporté les trois points obtenus 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. La répartition normale a été généralement obtenue [OUY67] et les travaux antérieurs du laboratoire de haute tension de l'ENP Alger [BEL94][RAH96] [BOU98] [CHO99] ont montré que la courbe des fréquences cumulées sur une échelle Gaussienne s'apparente suffisamment avec les données dont on dispose (tracé rectiligne). La distribution normale a été donc vérifiée et admise dans notre présente étude. En extrapolant la droite de régression, nous avons obtenu alors la tension $U_{100\%}$ (tension qui correspond à la probabilité de décharge de 99.9%) et la tension $U_{50\%}$ (tension qui correspond à la probabilité de décharge de 50%). La figure III.3 illustre la procédure utilisée.

III.2.1. Corrections atmosphériques

III.2.1.1. 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, la densité relative est définie comme étant le rapport de la densité de l'air dans les conditions de pressions P et de température T , à la densité de l'air dans les conditions atmosphériques de référence dites normales, c'est à dire :

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

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

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

Le facteur de correction utilisé pour ramener aux conditions normales les valeurs mesurées au laboratoire est donnée par: $k_d = (\delta)^n$, $n \leq 1$ (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.

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

$$U_0 = \frac{U}{k_d} \quad (\text{III-4})$$

III.2.1.2. Influence de l'humidité

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

- Conformément à la norme CEI 60, il n'y a pas de correction à faire concernant l'humidité.

Remarques :

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

$$T_{\min} = 15^{\circ}\text{C} \quad ; \quad T_{\max} = 24^{\circ}\text{C}$$

$$P_{\min} = 1000 \text{ mbar} \quad ; \quad P_{\max} = 1003 \text{ mbar}$$

$$H_{\min} = 55\% \quad ; \quad H_{\max} = 58\%$$

Les conditions atmosphériques peuvent influencer les valeurs des tensions mesurées. En effet, l'humidité de l'air, la température et la pression ambiante ont pour effet de modifier la densité de l'air. Pour comparer les résultats d'essais effectués dans des conditions atmosphériques différentes, il est nécessaire de ramener les résultats de mesures aux conditions normales de pression, de température et de l'humidité.

III.3. MODELE EXPERIMENTAL SANS PARATONNERRE

Les limites de la recherche, à savoir la longueur de l'intervalle et les dimensions du modèle expérimental, sont imposées par la hauteur des tensions délivrées par le générateur utilisé. Ainsi, notre étude est limitée aux petits intervalles d'air ne dépassant pas 14 cm.

De ce fait, nous avons réalisé nos essais sur quatre dispositifs de mesure :

- la terre homogène conductrice (figure III.4)
- la terre homogène mauvaise conductrice (figure III.5)
- la terre hétérogène (figure III.6)
- la terre discontinue (figure III.7)

III.3.1. Cas du sol homogène bon conducteur

Dans ce cas, le sol est constitué seulement d'une plaque métallique de surface $1.2 \times 1.2 \text{ m}^2$, mise à la terre. L'électrode haute tension du système est une tige métallique de 4.8mm de diamètre, présentant une extrémité hémisphérique de même diamètre (Figure III.4). Les mesures sont effectuées dans le cas du sol bon conducteur en respectant les mêmes longueurs d'intervalle utilisées dans le cas du sol mauvais conducteur ($h=4\text{cm}$, 8cm , 12cm et 14cm).

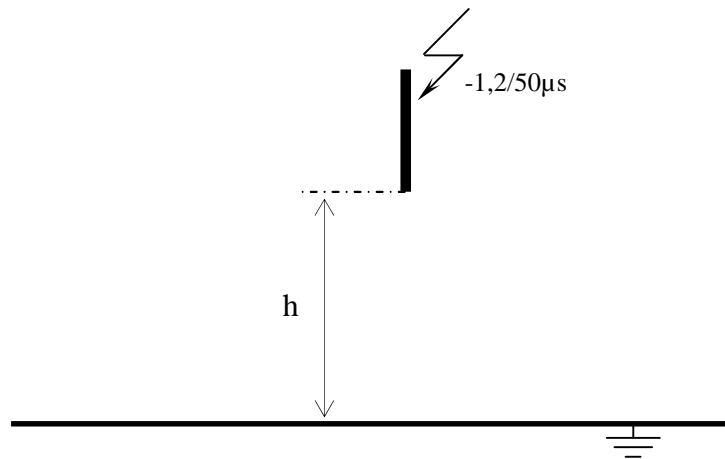


Figure III.4: Système tige-plan sans paratonnerre

III.3.2. Cas du sol homogène mauvais conducteur

La configuration tige-plan utilisée, dans le cas du sol homogène mauvais conducteur est représentée à la figure III.5. La terre du système est constituée d'une couche d'eau distillée de 10cm d'épaisseur ($e = 10$ cm). Elle a une surface de 1.2×1.2 m² et une conductivité γ variable. Cette couche d'eau repose sur un plan conducteur (Plaque en Aluminium) mis à la terre.

Nous avons déterminé la tension disruptive $U_{100\%}$ pour les conductivités et les hauteurs suivantes respectivement: $\gamma_1 = 7.9$ $\mu\text{S/cm}$, $\gamma_2 = 20$ $\mu\text{S/cm}$, $\gamma_3 = 39$ $\mu\text{S/cm}$, $\gamma_4 = 84$ $\mu\text{S/cm}$, $\gamma_5 = 164$ $\mu\text{S/cm}$, et $h = 4, 8, 12, 14$ cm.

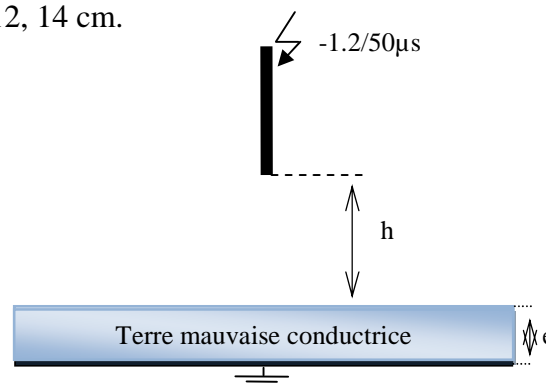


Figure III.5: Système tige-plan avec terre mauvaise conductrice.

III.3.3. Cas du sol hétérogène

Le modèle expérimental utilisé pour étudier la configuration tige-plan avec terre hétérogène est représenté à la figure III.6, où le plan est constitué de deux parties, l'une très bonne conductrice (plaque d'aluminium) et l'autre mauvaise conductrice constituée d'une couche d'eau distillée de conductivité variable [BOU00]. La position de la tige est déterminée par sa hauteur h (4, 8, 12 et 14cm) par rapport au sol et par la distance x entre son axe et l'interface séparant les deux milieux qui constituent la terre. Cette distance est

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

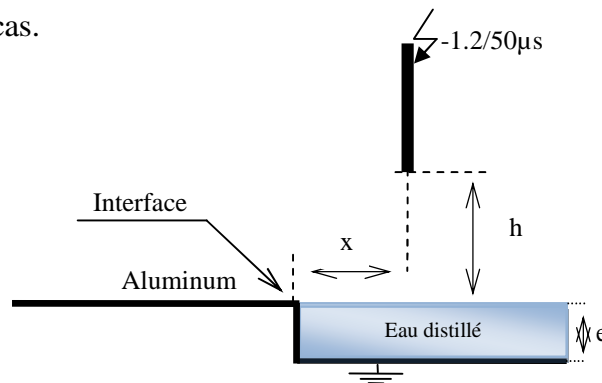


Figure III.6: Système tige-plan avec terre hétérogène

III.3.4 Cas du sol discontinu

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° 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 " $e=8\text{cm}$ " (Figure III.7).

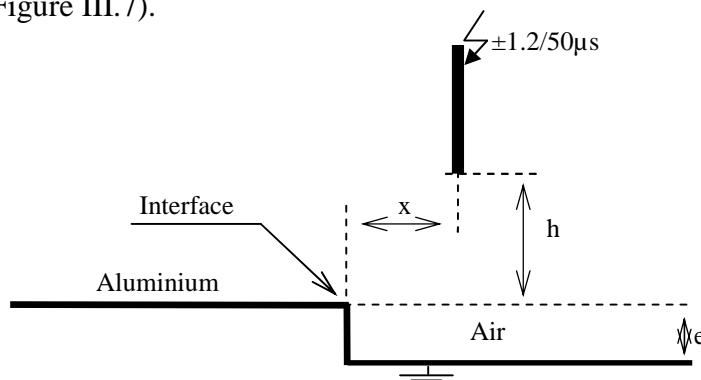


Figure III.7: Configuration du système tige-plan avec sol discontinu.

III.4. CONFIGURATIONS EXPERIMENTALES AVEC PARATONNERRE

Pour vérifier la fiabilité d'un modèle de protection contre la foudre, une simulation pratique des systèmes à protéger s'avère nécessaire par des arrangements au laboratoire. De ce fait, nous avons réalisé nos essais sur quatre dispositifs de mesure :

- la terre homogène conductrice (figure III.8).
- la terre homogène mauvaise conductrice (figure III.9)
- la terre hétérogène (figure III.10)
- la terre discontinue (figure III.11)

Le paratonnerre horizontal est simulé par un conducteur cylindrique de diamètre variable.

La décharge préliminaire d'un coup de foudre descendant négatif (traceur par bonds), juste avant le saut final, est simulée par une tige conductrice, mise sous une haute tension du type choc de foudre négatif (-1,2/50 μ s).

III.4.1. Sol homogène conducteur

La terre homogène conductrice est constituée d'une plaque métallique en aluminium de surface 1.2x1.2 m², mise à la terre (Figure III.8). Le paratonnerre est un conducteur cylindrique horizontal de diamètre D_p égal à 0.4, 4, 8 et 12mm.

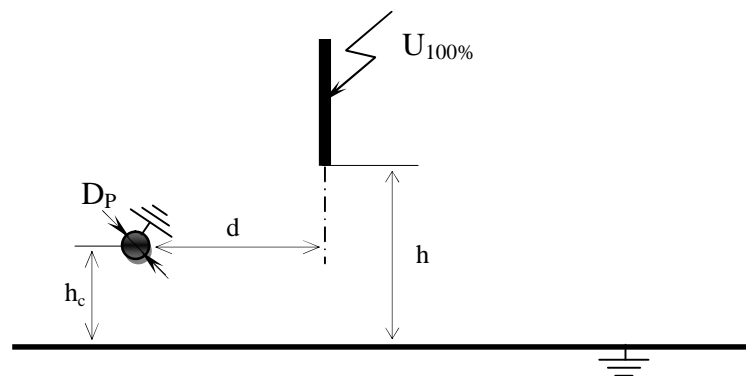


Figure III.8: Modèle expérimental d'une terre homogène conductrice

La configuration du modèle expérimental avec 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,

Les zones d'attraction sont obtenues par les configurations pour lesquelles la probabilité d'impact sur le paratonnerre est égale à 90% ($d_{90\%}$).

III.4.2. Cas du sol homogène mauvais conducteur

La configuration tige-plan utilisée, dans le cas du sol homogène mauvais conducteur est représentée à la figure III.9. La terre du système est constituée d'une couche d'eau distillée de 10 cm d'épaisseur. Cette couche d'eau repose sur un plan conducteur (plaque en Aluminium) mis à la terre. Elle a une surface de 1.2x1.2 m² et une conductivité γ variable ($\gamma_1=7.9\mu$ S/cm, $\gamma_2 = 20 \mu$ S/cm, $\gamma_3 = 39 \mu$ S/cm, $\gamma_4 = 84 \mu$ S/cm, $\gamma_5 = 164 \mu$ S/cm), et les hauteurs h suivantes ($h = 4, 8, 12$ et 14 cm). Le paratonnerre est un conducteur cylindrique horizontal de diamètre D_p égal à 0.4, 0.8, 4, 8, et 12mm.

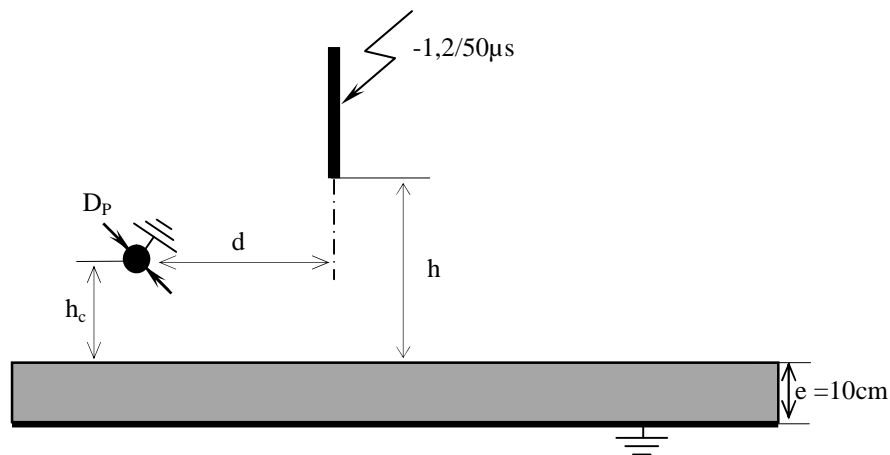


Figure III.9: Modèle expérimental d'une terre homogène mauvaise conductrice

III.4.3. Cas du sol hétérogène

Dans le modèle expérimental utilisé, la terre est constituée de deux parties, l'une très bonne conductrice (acier galvanisé) de surface $0.5 \times 1 \text{ m}^2$ et une épaisseur de 2 mm, l'autre mauvaise conductrice (sable) de surface $1 \times 1 \text{ m}^2$ et de 8 cm d'épaisseur, reposant sur la plaque en acier. La surface de l'électrode plate du système constituant la terre hétérogène est alors de $1.5 \times 1 \text{ m}^2$. Cette plaque est mise au potentiel de la terre (Figure III.10)

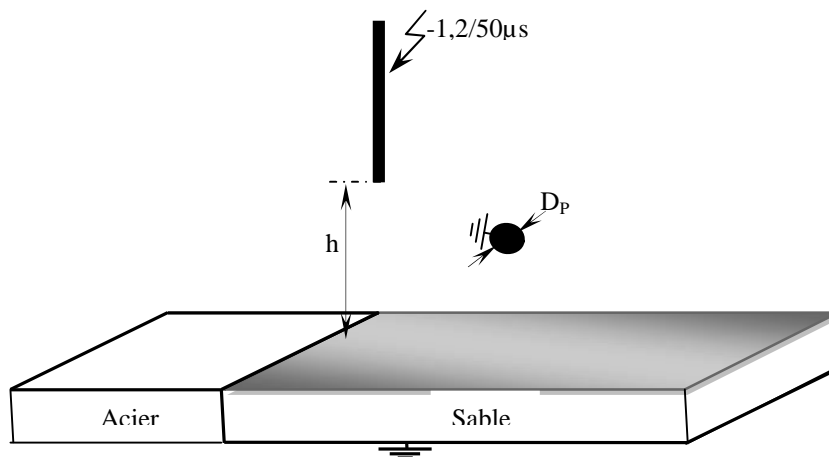


Figure III.10: Modèle expérimental de terre hétérogène de la première configuration.

La décharge de foudre, au moment du saut, final, est simulée par une électrode en forme de tige, de 6mm de diamètre et à extrémité hémisphérique. Le paratonnerre est constitué d'un conducteur cylindrique, placé horizontalement au-dessus du sol et ayant son axe parallèle à l'interface des deux milieux composants la terre.

Dans cette étude, nous avons considéré toutes les positions possibles du paratonnerre au-dessus du sol hétérogène. Les principales positions distinguées sont :

- paratonnerre au-dessus de la terre mauvaise conductrice (sable) ;
- paratonnerre au-dessus de la terre bonne conductrice (acier).

Les résultats obtenus sont alors comparés à ceux dans le cas du modèle

électrogéométrique avec terre homogène constituée de sable seul ou acier seul.

Les configurations du modèle expérimental sont définies par les paramètres suivants : D_p , D , h_c , h et d avec :

- D : la distance horizontale entre l'axe du paratonnerre et l'interface ($D/h_c=0, 3.75, 6.5, 11.25$ et 15),
- h_c : la hauteur de suspension du paratonnerre horizontal ($h_c = 2$ et 4cm),
- h : la hauteur de l'électrode de haute tension par rapport à la plaque horizontale ($h = 4, 8, 12$ et 14cm),
- d : la distance horizontale entre l'axe de la tige et le contour du paratonnerre.

Suivant la position de la tige de haute tension et du paratonnerre horizontal, nous avons étudié quatre configurations de la terre hétérogène possibles suivantes:

Première configuration : conducteur au-dessus de la terre mauvaise conductrice (sable), et l'axe de la tige situé entre l'interface et le conducteur (figure III.10a).

Deuxième configuration : conducteur au-dessus du sable et situé entre l'interface et l'axe de la tige (figure III.10b).

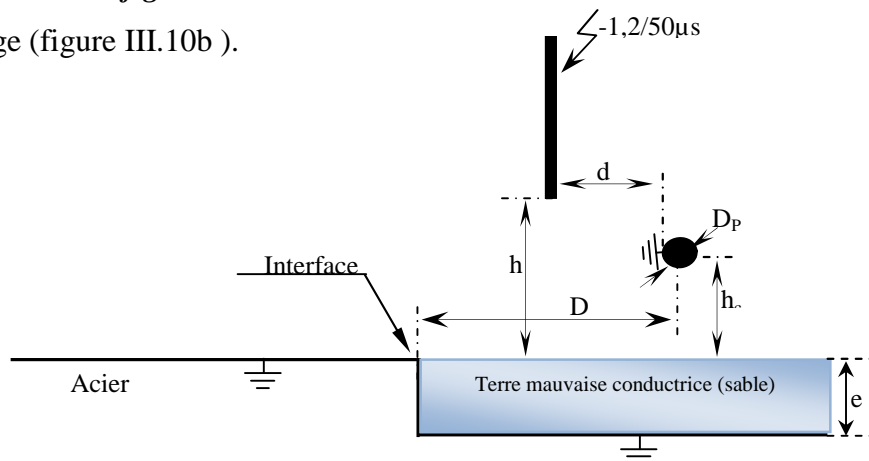


Figure III.10a: Modèle expérimental de terre hétérogène de la première configuration.

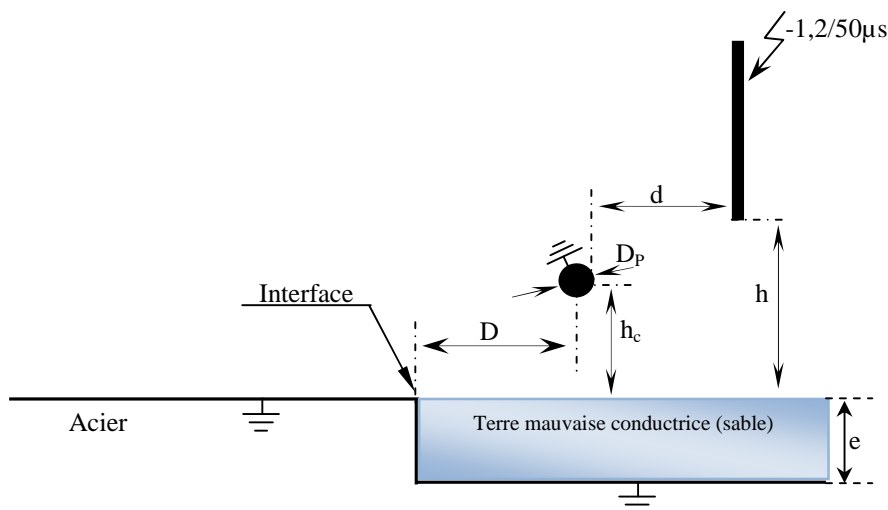


Figure III.10b: Modèle expérimental de terre hétérogène de la deuxième configuration.

- **Troisième configuration** : conducteur au-dessus de l'acier et situé entre l'interface et l'axe de la tige (figure III.10c)

- **Quatrième configuration** : conducteur au-dessus de l'acier, et l'axe de la tige situé entre l'interface et le conducteur (figure III.10d).

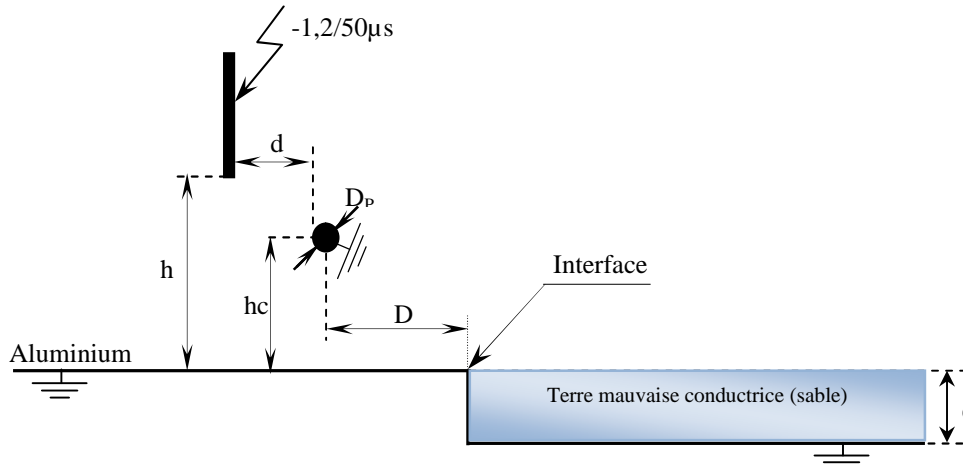


Figure III.10c: Modèle expérimental de terre hétérogène de la troisième configuration.

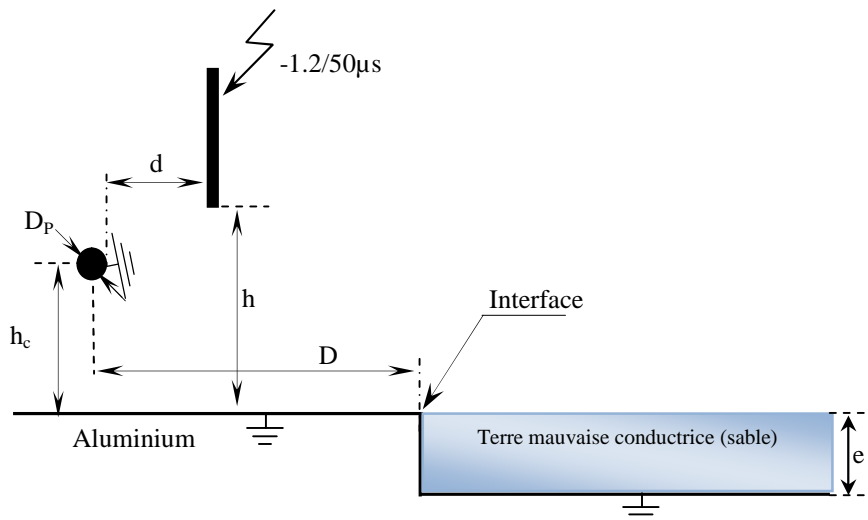


Figure III.10d: Modèle expérimental de terre hétérogène de la quatrième configuration.

III.4.4. Cas du sol discontinu

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° 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 constante de 10cm (Figure III.11a). Le paratonnerre horizontal est un fil tendu parallèlement à l'interface et ayant un diamètre D_p égal à 0.5, 0.8, 4, 8, et 12mm. Il est relié à la terre à l'une de ses extrémités par un fil conducteur.

Suivant la position de la tige de haute tension et du paratonnerre horizontal, nous avons étudié quatre configurations de la terre discontinue.

Première configuration : Paratonnerre horizontal situé sur la partie haute de la terre discontinue, entre l'axe de la tige de haute tension et l'interface (Figure III.11a).

Deuxième configuration : Axe de la tige de haute tension situé sur la partie haute de la terre discontinue, entre l'interface et le paratonnerre horizontal (Figure III.11b).

Troisième configuration : Axe de la tige de haute tension situé sur la partie basse de la terre discontinue, entre l'interface et le paratonnerre horizontal (Figure III.11c).

Quatrième configuration : Paratonnerre horizontal situé sur la partie basse de la terre discontinue, entre l'axe la tige de haute tension et l'interface (Figure III.11d).

Les configurations du modèle expérimental sont définies par les paramètres suivants : D_p , D , h_c , h et d avec :

-D: la distance horizontale entre l'axe du paratonnerre et l'interface ($D/h_c=2, 4, 6, 8$ et 12),

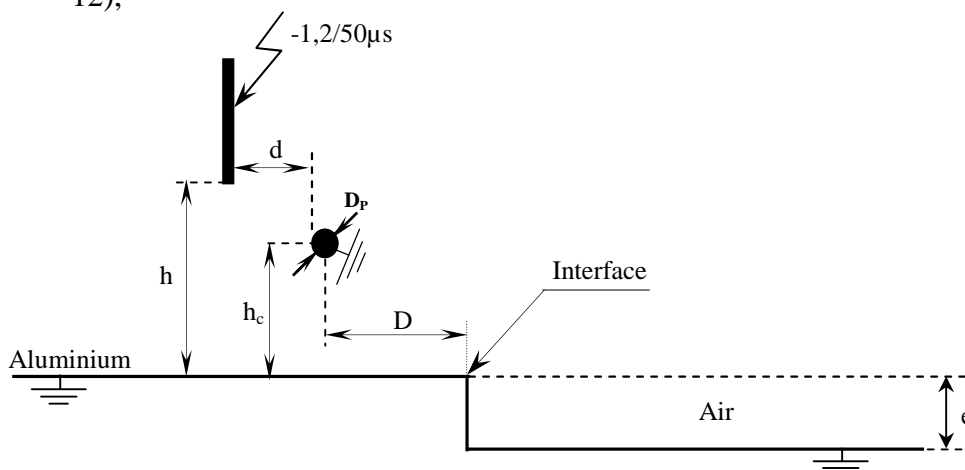


Figure III.11a: Modèle expérimental de terre discontinue de la première configuration.

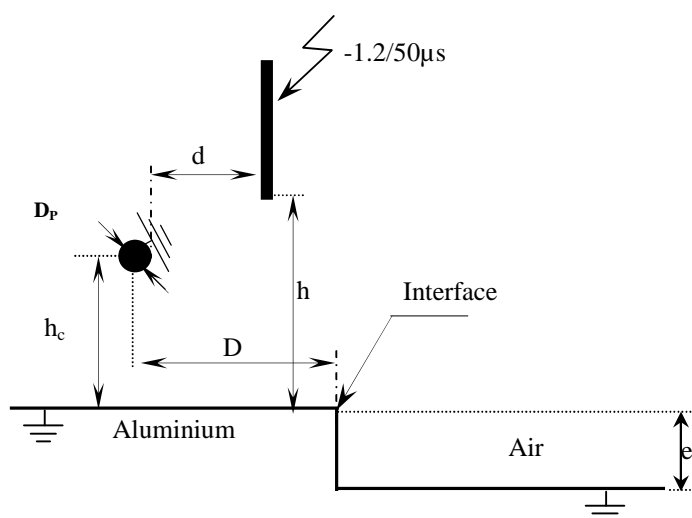


Figure III.11b: Modèle expérimental de terre discontinue de la deuxième configuration.

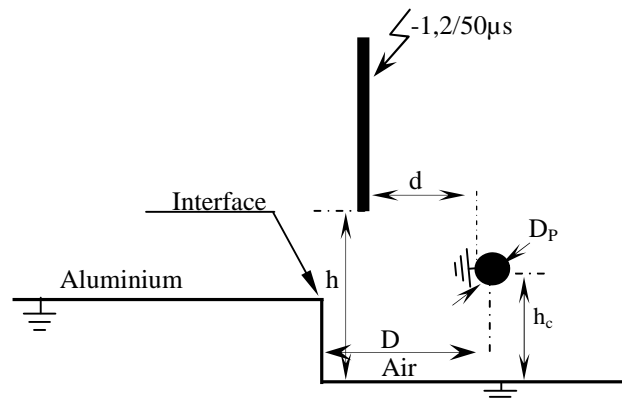


Figure III.11c: Modèle expérimental de terre discontinue de la troisième configuration.

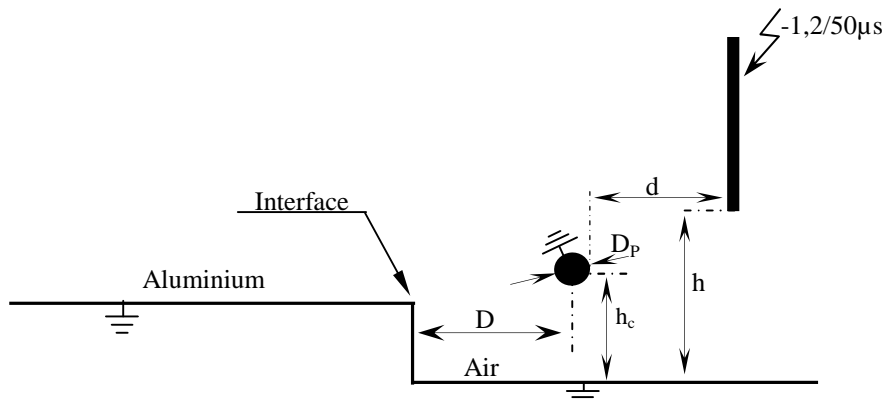


Figure III.11d: Modèle expérimental de terre discontinue de la quatrième configuration.

- D_p : le diamètre du paratonnerre horizontal ($D_p=0.5, 4, 8, \text{ et } 12\text{mm}$),
- h_c : la hauteur de suspension du paratonnerre horizontal ($h_c =2, 4 \text{ et } 6\text{cm}$),
- h : la hauteur de l'électrode de haute tension par rapport à la plaque horizontale ($h = 4, 8, 12 \text{ et } 14\text{cm}$),
- d : la distance horizontale entre l'axe de la tige et le contour du paratonnerre.
- e : la profondeur de la couche du sol ($e = 8\text{cm}$)

III.5. DETERMINATION DES ZONES D'ATTRACTION

III.5.1. Détermination de la probabilité d'impact sur le paratonnerre

Pour déterminer expérimentalement la probabilité de foudroiement du paratonnerre, nous avons appliqué, pour chaque configuration (D, h_c, h, d et D_p), 50 fois le niveau de tension disruptive $U_{100\%}$ correspondant à la longueur h de l'intervalle d'air tige-plan sans paratonnerre. Les chocs sont séparés par un intervalle de temps de l'ordre de 30 secondes. Si N_c est le nombre de chocs ayant atteint le paratonnerre, la probabilité de foudroiement relative à la distance d sera égale à $f=N_c/50$. Pour la même position du paratonnerre par rapport à l'interface (rapport D/h_c fixe), on fait varier la distance d entre l'axe de la tige et le

paratonnerre de hauteur h_c et de diamètre D_p . On reporte ensuite les fréquences pour différentes configurations " h , h_c , D_p , d " sur une échelle Gausso-arithmétique et on trace la droite de régression avec en abscisse la distance d . On en tire les valeurs de d correspondant à une fréquence pratiquement égale à 90% ($d_{90\%}$) et à 100% (99,9 ou plus sur l'échelle) ($d_{100\%}$).

Pour une hauteur h_c du paratonnerre, nous déterminons $d_{90\%}$ pour au moins trois longueurs de l'intervalle d'air tige-plan.

La figure III.12 illustre la procédure utilisée pour déterminer $d_{90\%}$ et $d_{100\%}$.

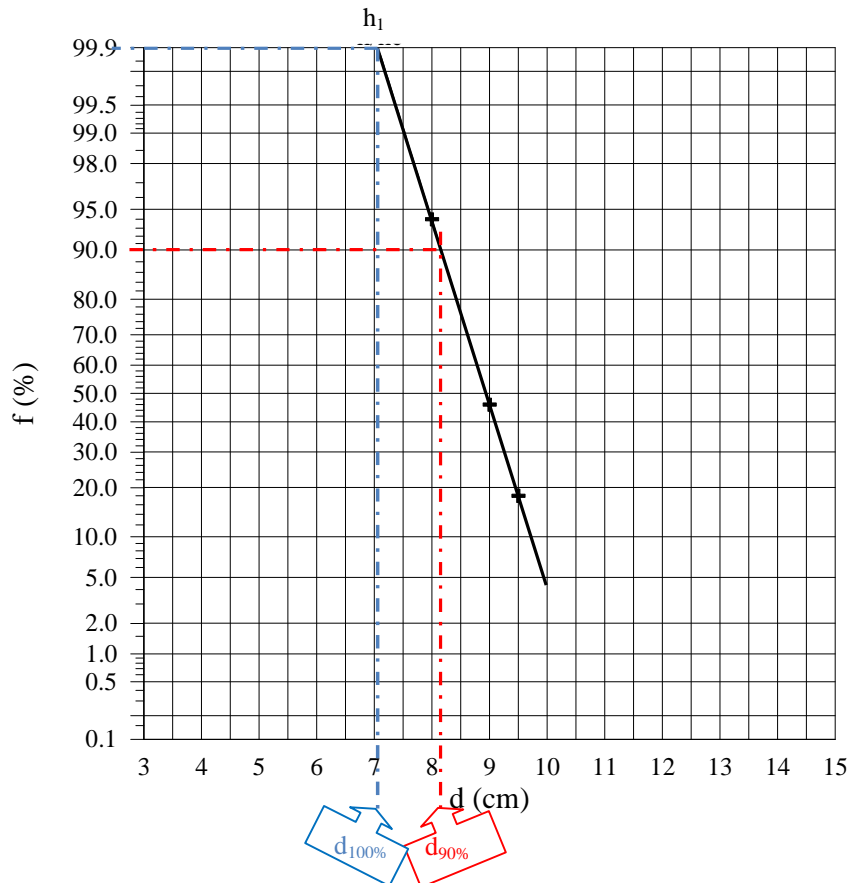


Figure III.12: $f = f(d)$ et la détermination des distances $d_{90\%}$ et $d_{100\%}$

Les points (h , $d_{90\%}$) permettent de définir la parabole de la zone d'attraction du paratonnerre horizontal pour une configuration donnée (h_c et D_p).

III.5.2 Procédés de détermination des droites de régression

III.5.2.1 Sol bon conducteur ($\gamma \rightarrow \infty \mu S/cm$)

Dans ces essais, l'influence du rayon de courbure sur la zone d'attraction d'un paratonnerre horizontal est obtenue en faisant varier le diamètre du conducteur.

Pour chacun des diamètres suivants: $D_p = 0.4$ mm, $D_p = 2$ mm, $D_p = 4$ mm, $D_p = 8$ mm, $D_p = 12$ mm, en faisant varier la hauteur $h_c = 2, 4$ et 6 cm du paratonnerre, nous déterminons $d_{90\%}$.

III.5.2.2. Sol mauvais conducteur

Dans ces essais, nous considérons l'influence de la conductivité γ ainsi que le diamètre D_p du paratonnerre horizontal sur la zone d'attraction.

Pour une conductivité constante γ donnée, nous déterminons $d_{90\%}$ pour chaque valeur du diamètre du paratonnerre ($D_p = 0.4$ mm, $D_p = 2$ mm, $D_p = 4$ mm, $D_p = 8$ mm, $D_p = 12$ mm) en faisant varier la hauteur h_c du paratonnerre ($h_c = 2, 4$ ou 6 cm).

Nous avons réalisé également ces mêmes essais pour chacune des conductivités suivantes: $\gamma_1 = 7.9$ $\mu\text{S/cm}$, $\gamma_2 = 20$ $\mu\text{S/cm}$, $\gamma_3 = 39$ $\mu\text{S/cm}$, $\gamma_4 = 84$ $\mu\text{S/cm}$, $\gamma_5 = 164$ $\mu\text{S/cm}$.

III.5.2.3 Sol hétérogène

La méthode d'essais utilisée a consisté à fixer la distance horizontale D entre l'axe du paratonnerre et l'interface ($D/h_c = 0, 3.75, 6.5, 11.25$ et 15), et h_c ($h_c = 2$ et 4 cm), et à faire varier la position (d, h) de la tige par rapport au conducteur horizontal. Nous déterminons ainsi les positions de la tige, pour lesquelles la probabilité de décharge au conducteur est égale à 90% (Meg90%). Ces positions constituent la zone d'attraction du paratonnerre pour une hauteur h donnée et une distance D de l'interface des deux milieux fixée.

III.5.2.4 Sol discontinu

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 de la manière suivante:

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). Les diamètres des paratonnerres varient entre 0.5 et 12 mm.

Pour chacune des quatre (04) configurations considérées, nous déterminons $d_{90\%}$ pour chaque valeur du diamètre du paratonnerre ($D_p = 0.4$ mm, $D_p = 2$ mm, $D_p = 4$ mm, $D_p = 8$ mm, $D_p = 12$ mm) en faisant varier la hauteur h_c du paratonnerre ($h_c = 2, 4$ ou 6 cm).

Nous avons réalisé également ces mêmes essais pour chaque rapport D/h_c suivant: $D/h_c = 2, 4, 6, 8, 10, 12$.

III.6. 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 les zones d'attraction du paratonnerre horizontal aux probabilités de foudroiement de 90% et 100% que nous comparons à la zone donnée par le modèle électrogéométrique classique (Meg) tel que représenté à la figure III.13.

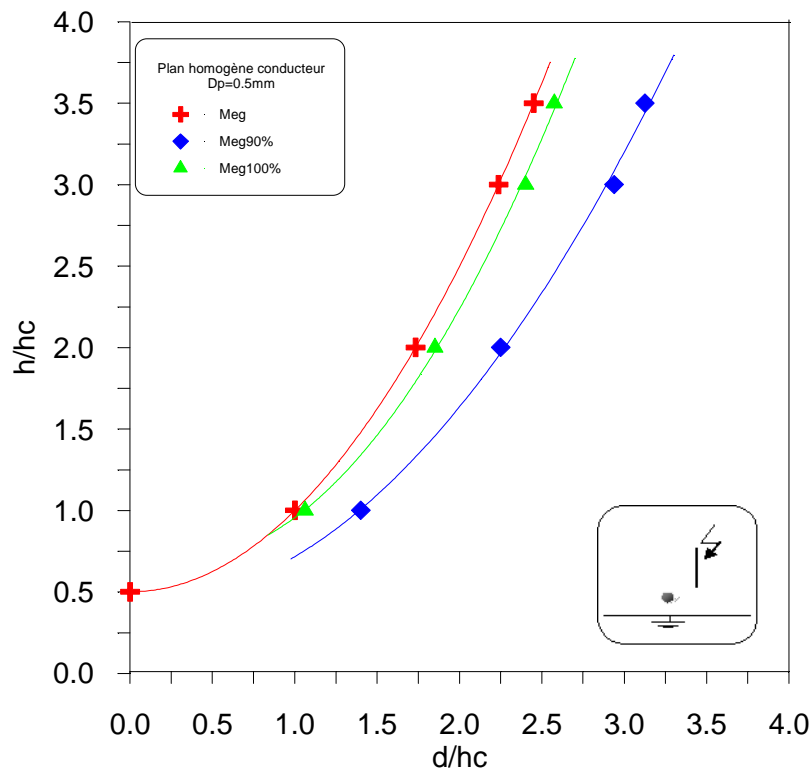


Figure III.13: Zones d'attraction obtenues avec des distances $d_{90\%}$ et $d_{100\%}$

III.7. Conclusion

Nous avons réalisé nos essais au laboratoire de haute tension de l'ENP Alger, où nous y avons exploité les sources et appareils utiles pour nos mesures.

Nous avons ainsi effectué nos essais sur les dispositifs expérimentaux de mesure pour la détermination:

- de la tension disruptive $U_{100\%}$ et la tension $U_{50\%}$;
- des zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal.

Les divers résultats obtenus et leurs discussions font l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE IV

INFLUENCE DE LA NATURE DU SOL SUR LA RIGIDITE DIELECTRIQUE DE L'AIR SOUS TENSION DE CHOC DE Foudre

CHAPITRE IV

INFLUENCE DE LA NATURE DU SOL SUR LA RIGIDITE DIELECTRIQUE DE L'AIR SOUS TENSION DE CHOC DE Foudre

VI.1. INTRODUCTION

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

Il est utile de noter que les résultats des travaux effectués sur l'étude de la rigidité des intervalles d'air tige-plan à L'ENP ont montré que les propriétés électrogéologiques du sol ont une grande influence sur la valeur de la tension $U_{100\%}$ et $U_{50\%}$.

VI.2. DETERMINATION DE LA TENSION DISRUPTIVE $U_{100\%}$

La tension $U_{100\%}$ est la tension minimale pour laquelle on a une disruption certaine de l'intervalle d'air de la configuration tige-plan. Les fréquences de décharge en fonction des tensions d'essais correspondantes sont généralement distribuées selon une régression linéaire sur une échelle Gausso-arithmétiques. Dans le passé, la répartition normale a été généralement acceptée [OUY67] et les travaux antérieurs de notre laboratoire [BEL94][RAH96][BOU98][CHO99] ont montré que la courbe des fréquences cumulées sur une échelle Gaussienne s'apparente suffisamment avec les données dont on dispose à un tracé rectiligne. La distribution normale a été donc vérifiée et admise dans notre présente étude. Les corrections atmosphériques sont appliquées conformément aux recommandations de la C.E.I. [CEI 60].

IV.2.1. Cas du sol homogène bon conducteur

Dans le but de comparer tous les résultats à une même référence, nous avons étudié la configuration tige-plan avec sol homogène bon conducteur.

IV.2.1.1. Influence de la longueur de l'intervalle tige-plan (h) sur les tensions $U_{100\%}$

Nous remarquons, pour les intervalles étudiés, une augmentation linéaire de pente égale à 18.18 kV/cm des tensions $U_{100\%}$ en fonction de la hauteur de l'intervalle "h" tige-plan, (Figure IV.1) [RAH01b].

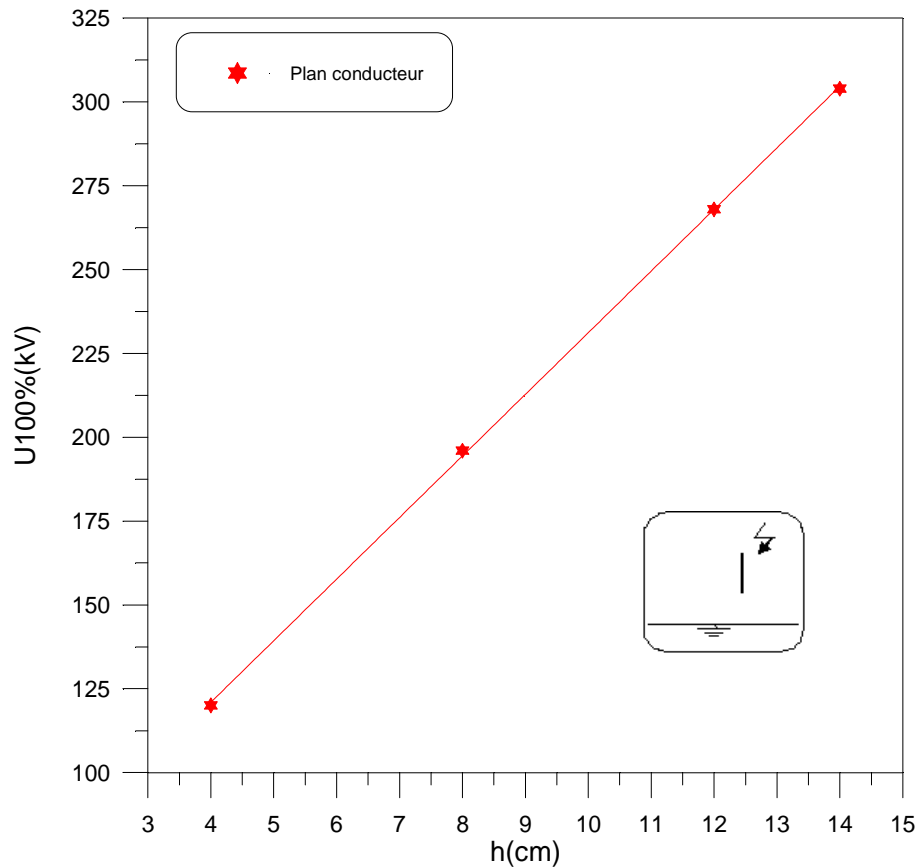


Figure IV.1: Influence de la hauteur h sur les tensions $U_{100\%}$ des intervalles d'air tige négative-plan.

IV.2.2. Cas du sol homogène mauvais conducteur

Lorsque la conductivité du sol est relativement faible, la tension de décharge disruptive $U_{100\%}$ est plus grande que dans le cas de la terre parfaitement conductrice, et elle augmente de manière inversement proportionnelle à la conductivité (Figure IV.2). Ceci est dû à la diminution de la présence d'ions ou d'électrons libres dans le volume d'eau. Cependant lorsque la conductivité de l'eau croît, la tension de décharge disruptive tend vers celle d'un sol conducteur. Ce fait diminue ainsi la valeur du champ électrique. Pour avoir le claquage, il faudrait augmenter la valeur de la tension source [NAC94][RAH02].

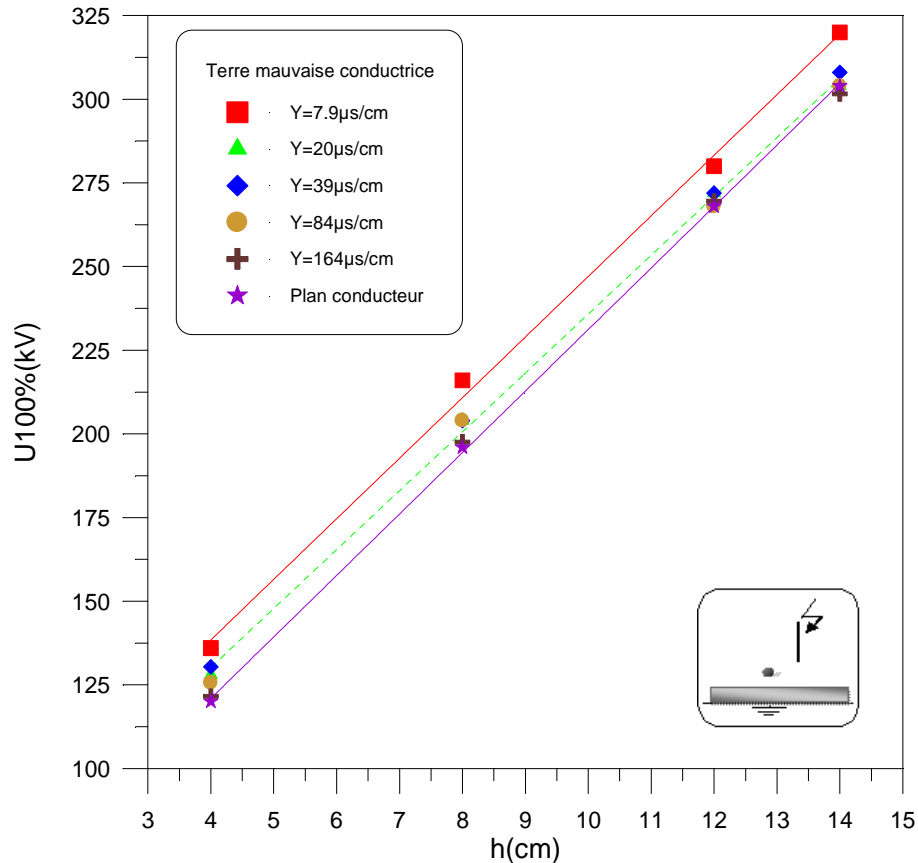


Figure IV.2: Influence de la conductivité de la terre sur la rigidité des intervalles d'air tige négative-plan

IV.3. DETERMINATION DE LA TENSION DISRUPTIVE $U_{50\%}$

La valeur de la tension $U_{50\%}$ permet de quantifier le niveau de rigidité diélectrique d'un gaz (ici l'air) pour un intervalle et une configuration donnés.

IV.3.1. Cas du sol homogène

Les résultats obtenus sur le modèle expérimental de la configuration tige-plan avec sol homogène (Figure IV.3), montrent l'influence de l'intervalle h et de la conductivité du sol γ sur la rigidité diélectrique.

IV.3.1.1. Influence de la longueur de l'intervalle tige-plan " h "

Pour les différentes valeurs de la conductivité du sol homogène, la courbe représentant les variations de la tension $U_{50\%}$, lorsque la longueur d'intervalle h varie, conserve son caractère linéaire (Figure IV.3 et IV.4). On peut déduire à partir des courbes que toutes les pentes sont pratiquement les mêmes pour une polarité donnée, et sont de l'ordre de 7kV/cm pour la polarité positive et de 20kV/cm pour la polarité négative [RAH08].

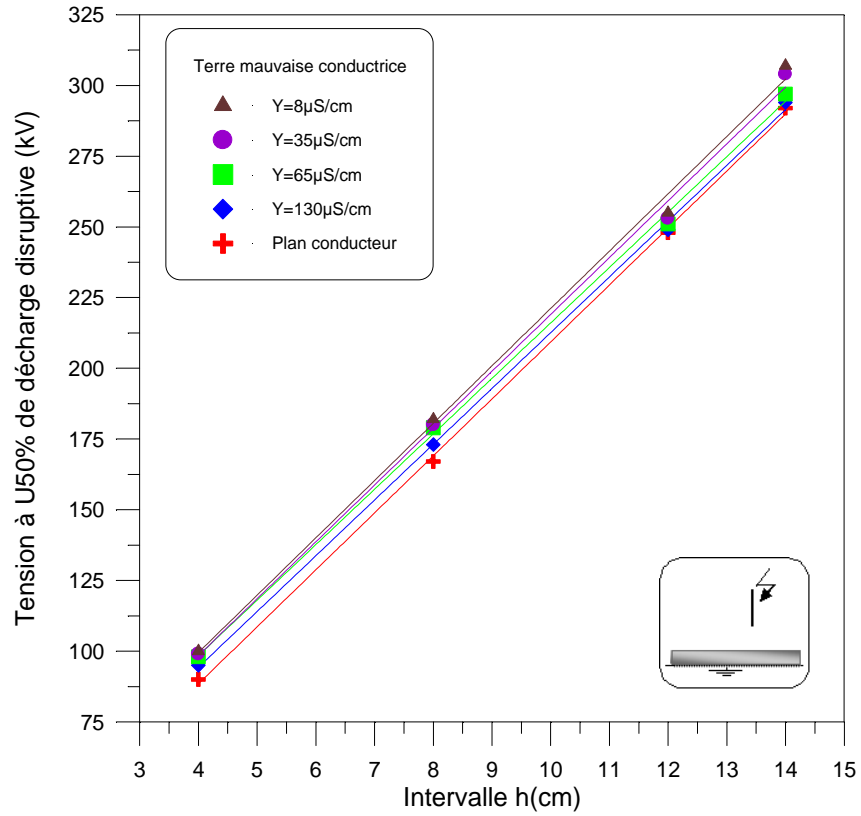


Figure IV.3: $U_{50\%}$ en fonction de h. Intervalle tige négative-plan. Sol homogène

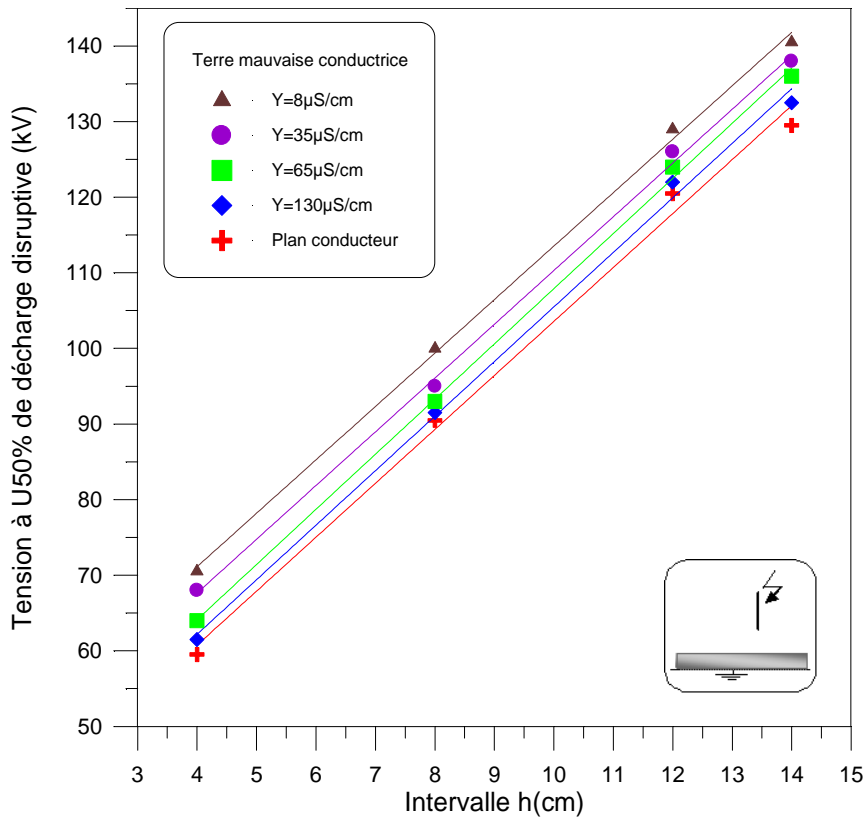


Figure IV.4: $U_{50\%}$ en fonction de h. Intervalle tige positive-plan. Sol homogène

IV.3.1.2. Influence de la conductivité du sol

Les courbes (Figures IV.5 et IV.6) montrent que lorsque la conductivité devient très élevée, le système avec sol mauvais conducteur devient équivalent au système avec sol conducteur dont la longueur est majorée d'une certaine valeur constante qui n'est autre que la constante de translation (Figure IV.7). Cette valeur, notée $\Delta h = h' - h$ (Figure IV.7), dépend évidemment de la conductivité γ . La figure IV.8 qui représente les variations de $\Delta h = h' - h$ en fonction de la conductivité γ , montre que " ϵ " tend vers zéro lorsque γ devient très grand. Nous remarquons aussi que, pour les faibles conductivités, le Δh obtenu dans le cas de la tige positive est nettement supérieur à celui obtenu avec la tige négative.

On peut donc, élaborer un modèle équivalent entre la terre bonne conductrice et la terre mauvaise conductrice. Dans ce sens, on peut définir un niveau de terre fictive " ϵ ". Ce niveau dépend de la configuration du système et de la nature de la terre. Du point de vue pratique, le système avec terre mauvaise conductrice de conductivité donnée, pourrait être équivalent à celui avec terre bonne conductrice, où la hauteur h remplacée par $h + \epsilon$ (figure IV.7).

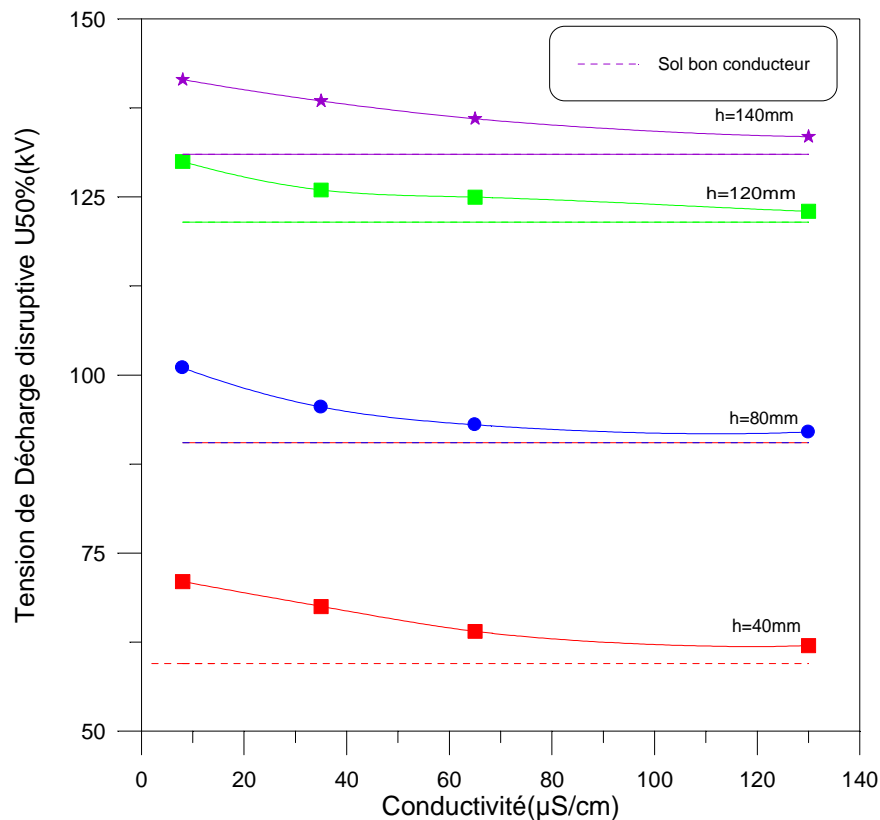


Figure IV.5: La tension $U_{50\%}$ en fonction de la conductivité du sol dans le cas d'une tige positive

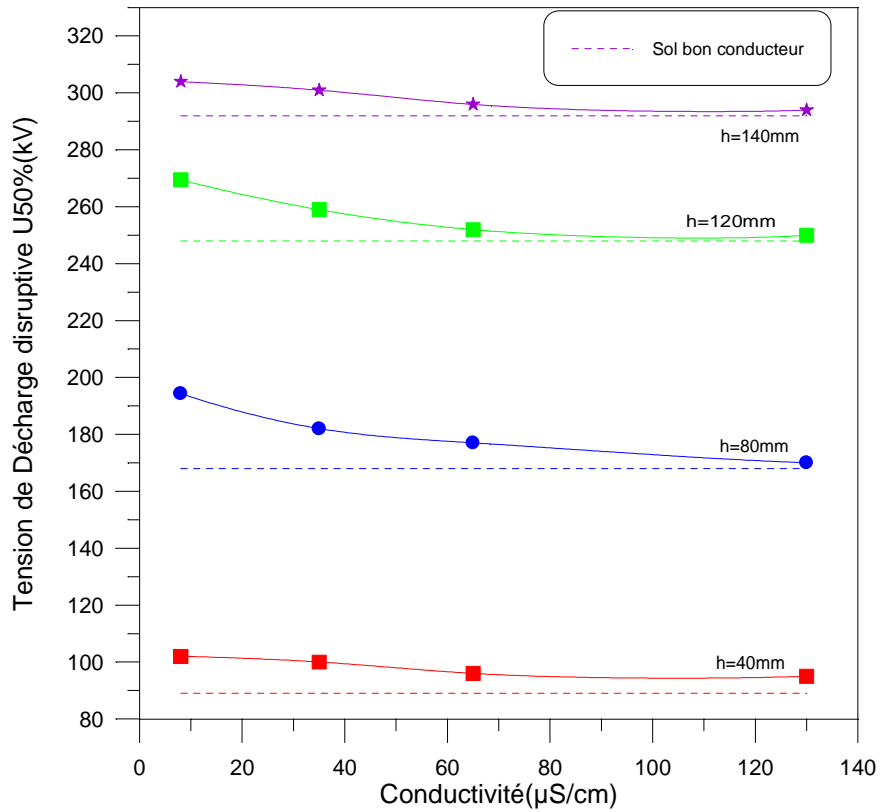


Figure IV.6: La tension $U_{50\%}$ en fonction de la conductivité du sol dans le cas d'une tige négative ($e=5\text{cm}$)

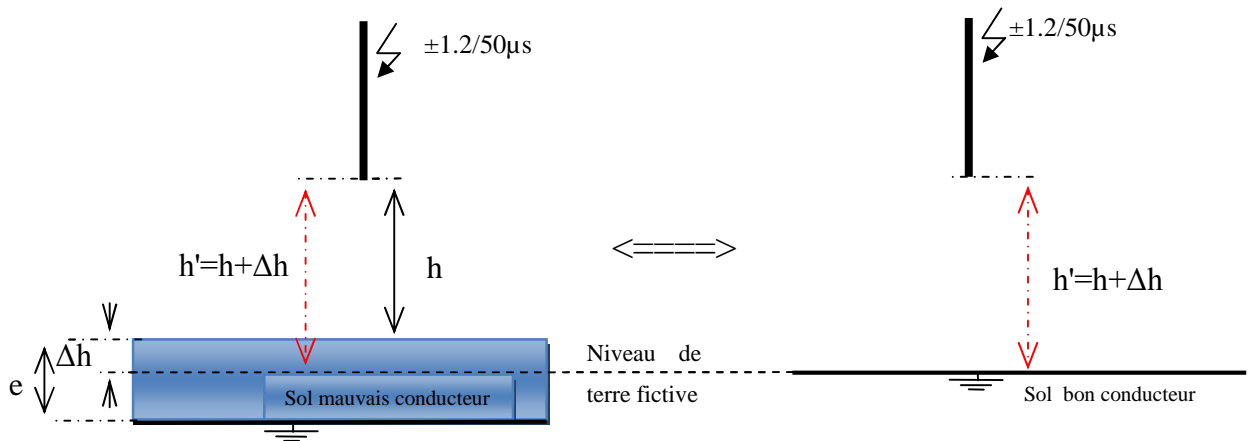


Figure IV.7: Système tige-plan avec sol conducteur équivalent au système avec sol mauvais conducteur

Les figures IV.3 et IV.4 montrent aussi que, pour une même longueur d'intervalle, la tension $U_{50\%}$ s'éloigne de la valeur obtenue pour le sol bon conducteur de plus en plus que la conductivité du sol s'affaiblit. Autrement dit, l'étude de l'influence de la conductivité du sol mauvais conducteur sur la tension à 50% de décharges disruptives ($U_{50\%}$) des petits intervalles d'air tige-plan aux ondes de choc de foudre positif et négatif, montre que la rigidité de l'intervalle tige-plan augmente lorsque la conductivité du sol diminue.

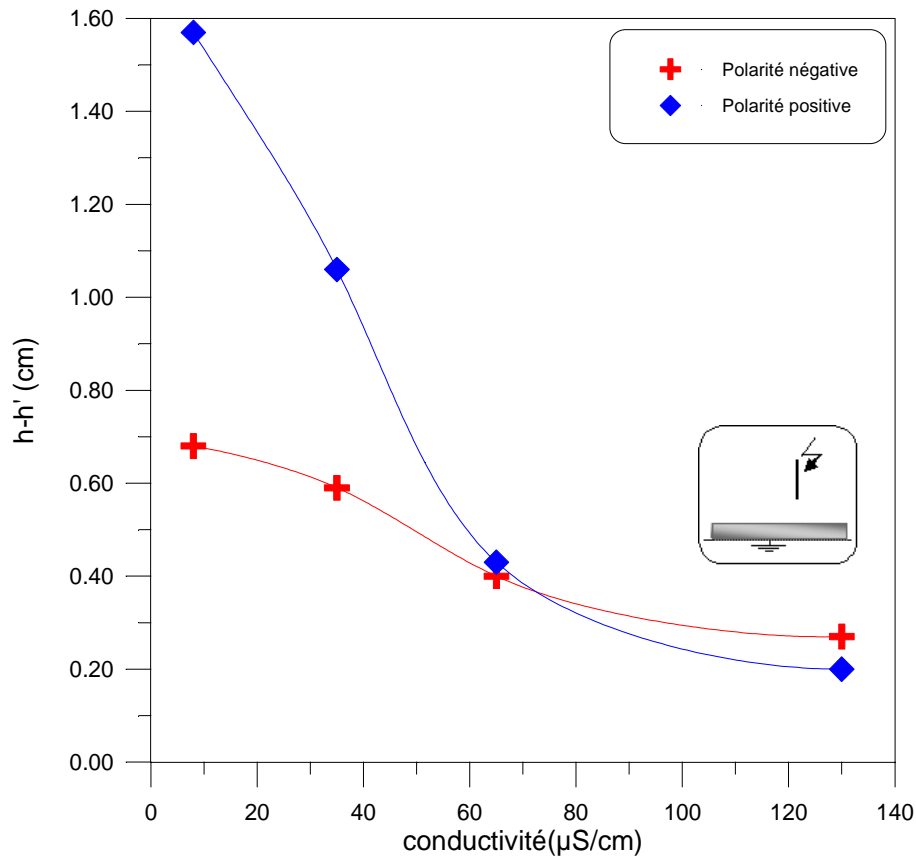


Figure IV.8: Variation de la différence Δh en fonction de la conductivité

IV.3.2. Cas du sol hétérogène

IV.3.2.1. Types de décharges observées

Lors des essais avec la configuration tige - sol hétérogène, cinq types de décharge ont été observés :

- Décharge directe ayant lieu entre la tige et la surface de la couche d'eau distillée.
- Décharge complexe ayant lieu entre la tige et la surface de l'eau puis glissant sur celle-ci vers l'interface. Ce type a caractérisé les petites distances ($d \approx 10\text{cm}$).
- Pour les grandes distances ($d \approx 25\text{cm}$), ce type de décharge a été quelques fois observé, dans le cas de la polarité négative, pour $h=14\text{ cm}$ et pour $h = 12\text{ cm}$ [BOU90].
- Décharge directe, ayant lieu entre la tige et l'interface, observée lorsque la tige est au voisinage de l'interface ($x = 5\text{ cm}$, $x = 0\text{ cm}$).
- Décharge atteignant deux points simultanément à l'interface et à la surface de l'eau. Ce cas est particulier et il correspond à une certaine position de la tige haute tension.

f) Décharge directe ayant lieu entre la tige et la plaque d'aluminium. Ce type de décharges peut se faire vers l'interface et dépend de la position de la tige haute tension.

IV.3.2.2. Influence de la position de la tige haute tension

VI.3.2.2.1 Polarité positive

La présence de la couche mauvaise conductrice, comparativement au cas du sol discontinu, n'a pas modifié le comportement de l'intervalle. Pour les grandes distances positives, la configuration tige-sol hétérogène tend vers le système tige-sol homogène de même longueur et de même conductivité.

Pour les grandes distances négatives elle tend vers le système tige-plan bon conducteur de même longueur. Pour les distances intermédiaires elle se situe entre ces deux systèmes (Figures IV.9 et IV.10).

IV.3.2.2.2. Polarité négative

Contrairement au cas du sol discontinu, le comportement du système tige-sol hétérogène sous tension négative est similaire à son comportement sous tension positive. On note particulièrement, la disparition de la diminution de la tenue de l'intervalle au niveau de l'interface observée dans le cas du sol discontinu (Figures IV.11 et IV.12).

D'après les résultats d'essais obtenus pour la polarité négative (Figures IV.11 et IV.12), nous constatons que, la rigidité de l'intervalle d'air tige-plan avec terre hétérogène dépend étroitement de la position de la tige par rapport à l'interface; cette influence est plus importante lorsque la conductivité de la partie mauvaise conductrice est plus faible. Il est à noter que, pour les grandes distances x positives, la configuration tige-plan hétérogène tend vers le système tige-sol homogène de même longueur et de même conductivité de sol, tandis que, pour les grandes distances x négatives, la configuration tige-plan hétérogène tend vers le système tige-plan bon conducteur de même longueur.

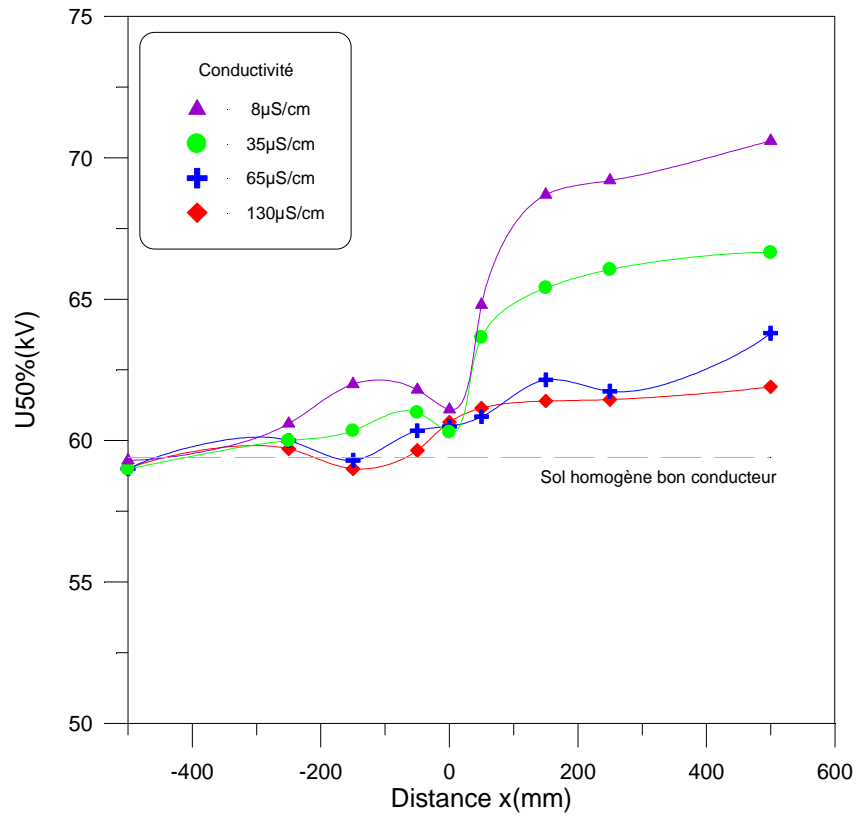


Figure IV.9: $U_{50\%}$ en fonction de la distance "x" dans le cas de la tige de polarité positive (Terre hétérogène)
a) $h=4\text{cm}$

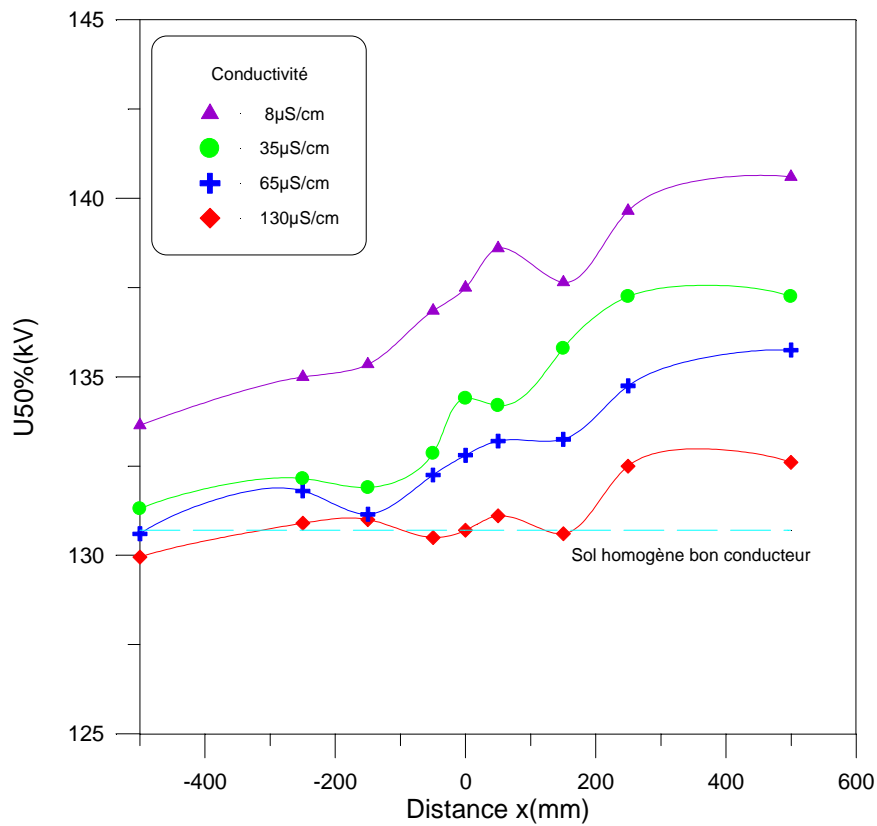


Figure IV.10: $U_{50\%}$ en fonction de la distance "x" dans le cas de la tige de polarité positive (Terre hétérogène)
b) $h=14\text{cm}$

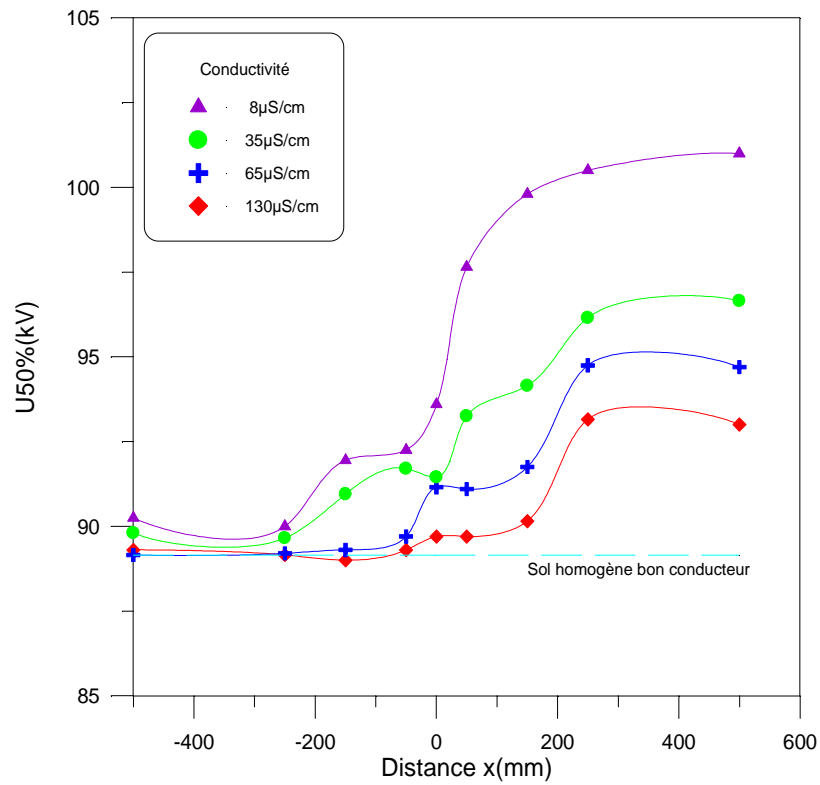


Figure IV.11: $U_{50\%}$ en fonction de la distance "x" dans le cas de la tige de polarité négative (Terre hétérogène)
a) $h=4\text{cm}$

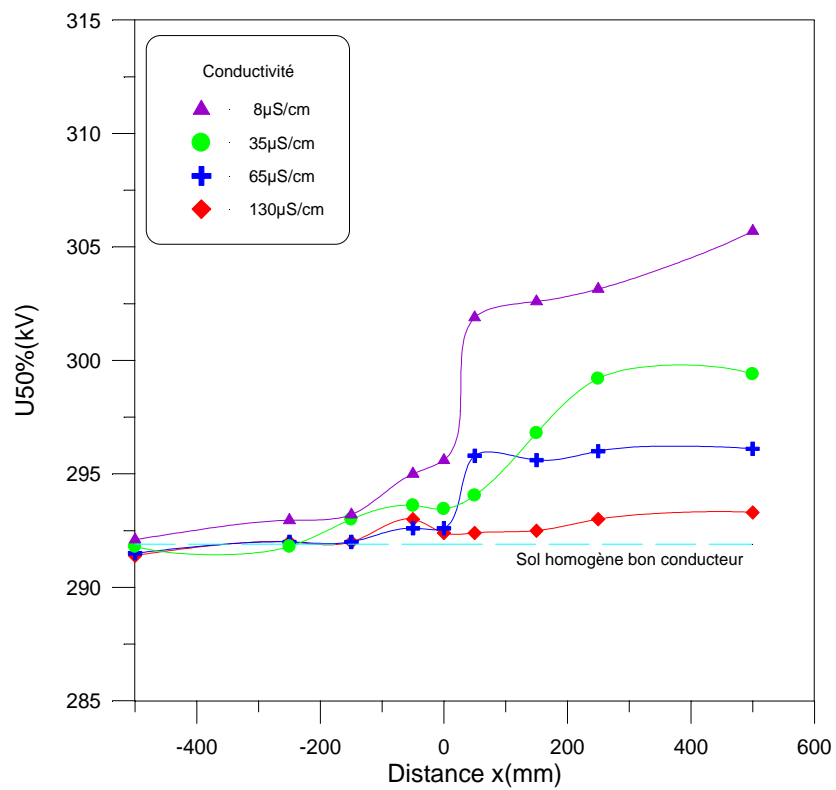


Figure IV.12: $U_{50\%}$ en fonction de la distance "x" dans le cas de la tige de polarité négative (Terre hétérogène)
 $h=14\text{cm}$

IV.3.3. Cas du sol discontinu

Les résultats obtenus, dépendent étroitement de la polarité de la tige. Ainsi nous préférons présenter chaque cas séparément.

IV.3.3.1 Polarité positive

Les figures IV.13 a, b et c donnent, pour les différentes valeurs de la longueur d'intervalle h , les variations de $U_{50\%}$ en fonction de la distance x . Les valeurs de x correspondantes au cas où la tige se trouve au-dessus de la partie bonne conductrice (côté gauche de l'interface sur la figure III.7) sont affectées d'un signe moins. Les distances sont considérées positives dans l'autre cas. Ces figures montrent clairement que la rigidité de l'intervalle est considérablement influencée par la position de la tige par rapport à l'interface au dessus du sol. En effet :

-Pour une longueur h donnée, la tension $U_{50\%}$ s'affaiblit lorsque la tige s'éloigne de l'interface vers le côté des distances négatives, pour tendre vers la valeur obtenue dans le cas du sol homogène bon conducteur de l'intervalle de même longueur.

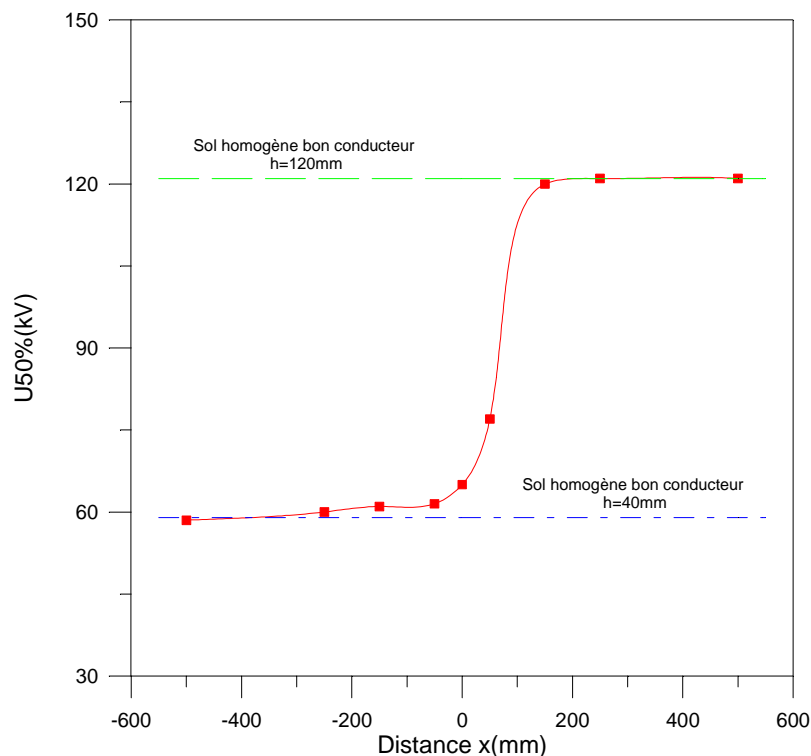


Figure IV.13a: Variation de $U_{50\%}$ en fonction de la distance x en polarité positive $e= 80$ mm, $h= 40$ mm.

Lorsque la tige s'éloigne de l'interface de l'autre côté (x positive), le système est plus rigide. Il devient équivalent au système avec sol homogène dont la longueur est égale à celle de l'intervalle étudié majorée de la valeur de la profondeur " e " de la partie creuse du sol.

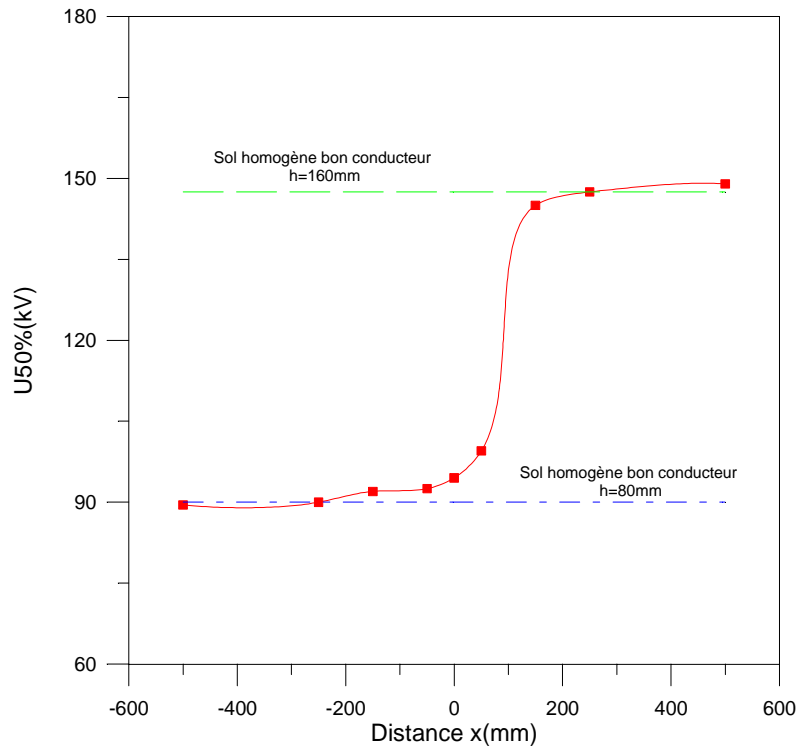


Figure IV.13b: Variation de $U_{50\%}$ en fonction de la distance x en polarité positive $e=80$ mm, $h=80$ mm.

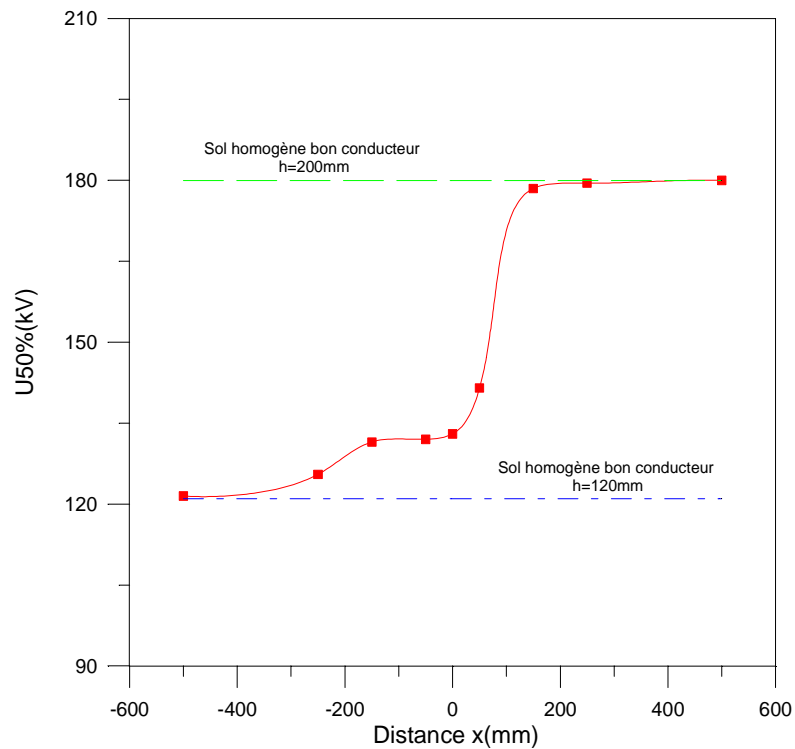


Figure IV.13c: Variation de $U_{50\%}$ en fonction de la distance x en polarité positive $e=80$ mm, $h=120$ mm.

-Au voisinage de l'interface ($x= \pm 10$ cm), la tension $U_{50\%}$ passe brusquement d'une valeur limite à l'autre. A $x=0$, la distance tige-interface a une rigidité comprise entre celle du système tige-tige et celle du système tige-plan [RAH08].

III.3.3.2. Polarité négative

L'influence de la position de la tige par rapport à l'interface dans le cas de la tige négative est illustrée par les figures IV.14a, b et c.

-Pour les grandes distances x , le comportement de l'intervalle sous tension négative est similaire à son comportement sous tension positive. Le système est équivalent au système tige-plan avec sol homogène bon conducteur: de même longueur pour les distances négatives et de longueur majorée avec la valeur de la profondeur " e " pour les distances positives.

-Au voisinage de l'interface nous observons, différemment au cas de la polarité positive, une sorte de discontinuité dans l'évolution de la tension $U_{50\%}$. Celle ci, en diminuant, devient inférieur à la valeur obtenue dans le cas du sol bon conducteur de même longueur.

Cette différence dans les comportements de la tension d'amorçage entre les deux cas de polarité, peut être expliquée par le fait qu'au niveau de l'interface notre système se comporte comme un système tige-tige. Or sous tension négative celui-ci est moins rigide que le système tige-plan alors qu'il ne l'est pas sous tension positive [LER84]. Ceci peut expliquer l'observation, dans le cas de notre configuration, d'une décroissance dans la tension U_{50} au niveau de l'interface sous la polarité négative et son non observation dans l'autre cas de polarité.

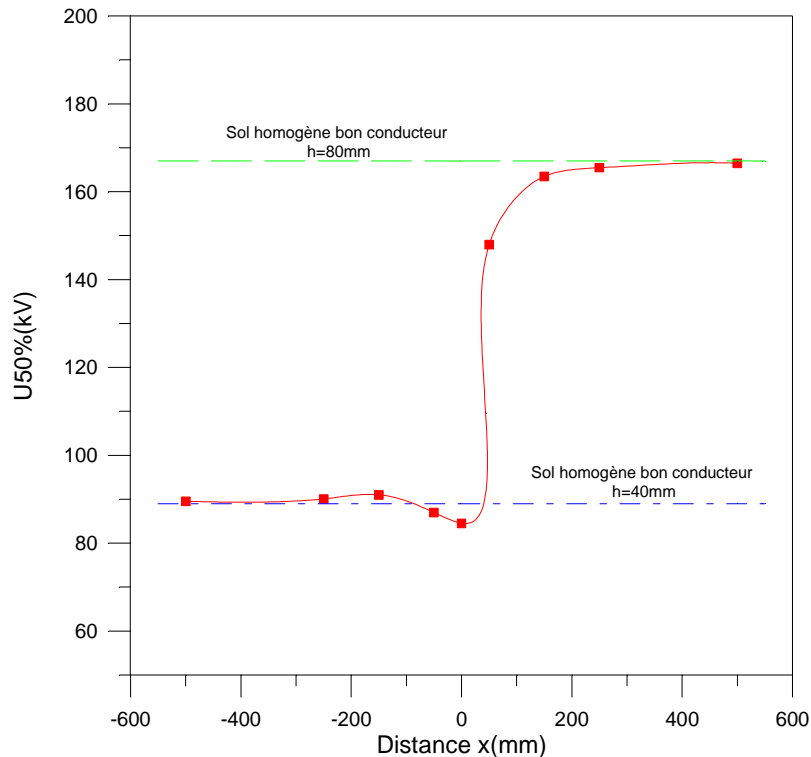


Figure IV.14a: Variation de $U_{50\%}$ en fonction de la distance x en polarité négative, $e = 40$ mm, $h = 40$ mm

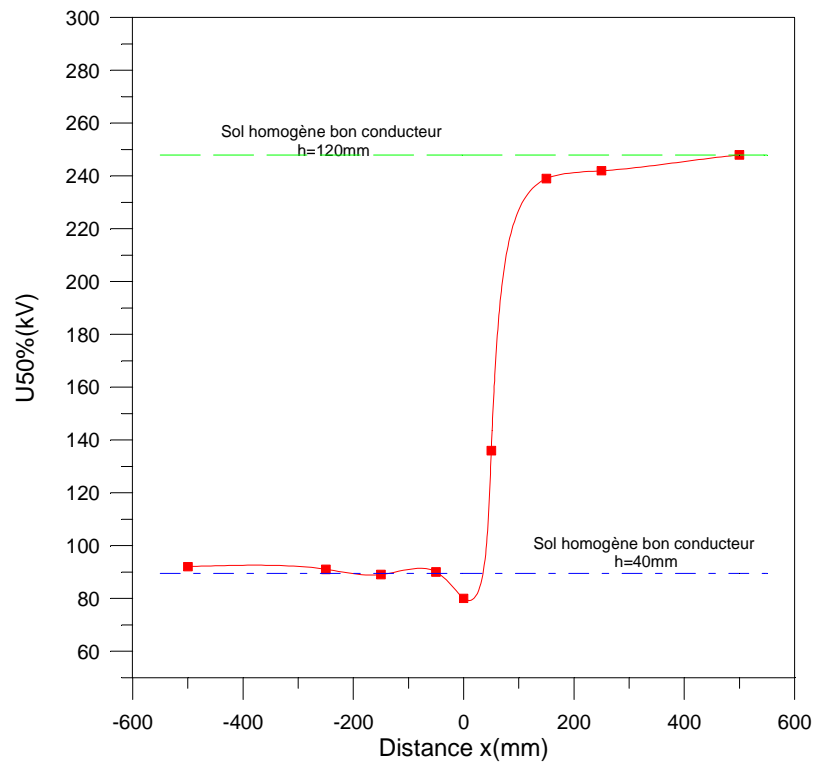


Figure IV.14b: Variation de $U_{50\%}$ en fonction de la distance x en polarité négative, $e=80\text{ mm}$, $h=40\text{mm}$,

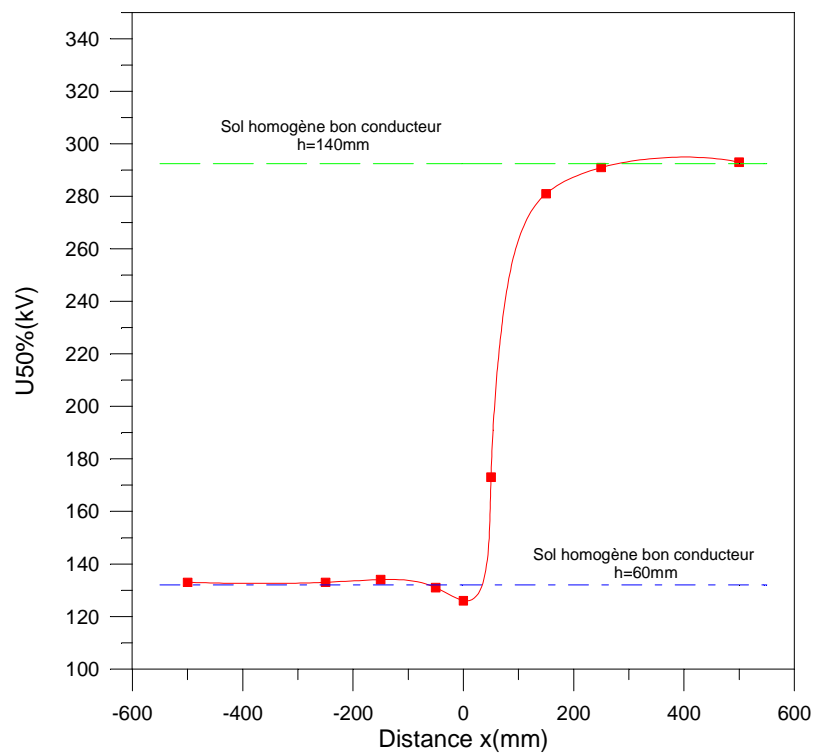


Figure V.14c: Variation de $U_{50\%}$ en fonction de la distance x en polarité négative, $e=80\text{ mm}$, $h=60\text{mm}$

IV.4. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats des essais de claquage d'un intervalle d'air tige-plan sous les ondes de choc de foudre positif et négatif. Trois configurations du sol ont été envisagées; la première concerne un sol homogène de conductivité variable, la seconde un sol hétérogène et la troisième un sol discontinu.

Dans le cas de la terre homogène, la rigidité diélectrique de l'intervalle dépend de la conductivité du sol. L'intervalle est plus rigide pour les plus faibles conductivités.

Dans le cas de la terre hétérogène, la tenue de l'intervalle d'air pointe-plan dépend aussi étroitement de la position de la tige par rapport à l'interface. Cette influence de la position est plus marquée lorsque la conductivité de la partie mauvaise conductrice est plus faible. Elle dépend donc du degré d'hétérogénéité du sol défini par le rapport des conductivités des deux composantes constituant la terre. Le comportement de l'intervalle pour les deux polarités semble être similaire.

Les résultats des essais obtenus dans le cas de la terre discontinue, ont montré que la rigidité de l'intervalle dépend essentiellement de la position, au-dessus du sol, de l'électrode sous tension. Une nette différence est apparue au voisinage de la discontinuité entre le comportement de l'intervalle sous tension positive et son comportement sous tension négative. L'influence de la conductivité semble dépendre de la valeur relative de la longueur de l'intervalle par rapport à la profondeur de la discontinuité.

CHAPITRE V

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

CHAPITRE V

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

V.1. INTRODUCTION

Dans le modèle de protection contre la foudre, le modèle électrogéométrique est largement utilisé [GOL77]. Cependant, la zone de capture d'un paratonnerre est définie en considérant la terre homogène, plane et parfaitement conductrice [AGU87]. Cette hypothèse est rarement rencontrée en pratique car, en réalité, la terre pourrait être hétérogène, homogène et mauvaise conductrice à cause de ses propriétés électrogéologiques qui diffèrent d'un site à l'autre.

Dans le cas d'une terre hétérogène [FER87][BOU89], suivant la position de l'axe de la décharge de foudre par rapport à l'interface et au paratonnerre, la décharge serait, soit favorablement, soit défavorablement attirée par le paratonnerre. Ceci nous a permis de constater que les zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal ne correspondent pas, en général, à celle définie par le modèle électrogéométrique [BOU90][BOU91].

Dans le cas d'une terre homogène mauvaise conductrice [BEL94] [RAH96], les zones d'attraction sont plus larges que celles définies par le modèle électrogéométrique classique. 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 [BOU94] [BOU96]. 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' compris entre 0 et e . Ce niveau dépendra de la configuration du système et de la nature de la terre.

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. Ainsi, cette influence dépend de la grandeur relative de la hauteur du paratonnerre par rapport à la profondeur de la partie basse de la terre [RAH02].

Se basant sur ces premiers travaux, nous avons jugé nécessaire de définir un modèle de protection qui prendrait en considération les propriétés électrogéologiques du sol.

V.2. ZONE D'ATTRACTION D'UN PARATONNERRE HORIZONTAL DANS LE CAS DE TERRE HOMOGENE CONDUCTRICE

V.2.1. Vérification du modèle électrogéométrique classique

L'étude des zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal situé sur un sol homogène bon conducteur, nous a permis de vérifier le modèle électrogéométrique classique et d'obtenir une bonne référence pour la comparaison des résultats.

Les résultats des essais effectués montrent que, la zone d'attraction déterminée par les distances d engendrant 100%(Meg100) de décharges au paratonnerre coïncide avec celle définie par le modèle électrogéométrique (Meg) c'est-à-dire avec la parabole $x^2-2y+1=0$; $x=d/hc$ et $y=h/hc$ où h et hc sont respectivement la longueur de l'intervalle d'air et la hauteur du paratonnerre. La zone d'attraction déterminée à partir des distances d engendrant 90% (Meg90%) de décharges au paratonnerre est légèrement supérieure (Figure V.1).

Ces résultats seront utilisés comme référence pour la comparaison avec les résultats dans le cas des terres mauvaise conductrice, hétérogène et discontinues.

V.2.2. Influence de la hauteur de suspension hc du paratonnerre horizontal

Les résultats obtenus montrent que, pour un diamètre du paratonnerre constant, plus ce dernier se rapproche du sol bon conducteur (hc diminue), plus la zone d'attraction devient large (Figure V.2).

Ceci s'explique par l'accroissement du champ électrique, au niveau du paratonnerre, dû à la proximité du sol bon conducteur. En effet, l'apport progressif des charges électriques, au fur et à mesure que le paratonnerre se rapproche du sol, favorise l'attraction de la décharge de foudre.

V.2.3. Influence du diamètre du paratonnerre horizontal.

Dans le cas d'un sol parfaitement conducteur, la zone d'attraction d'un paratonnerre est très influencée par le rayon de courbure (diamètres) de ce dernier [BOU95a] [BOU96] [RAH96]. Cette constatation a été vérifiée pour tous les diamètres utilisés ($D_p = 0.4 ; 2 ; 4 ; 8$ et 12 mm) et pour toutes les hauteurs de suspension $hc = 2$ cm ,4cm et 6cm.

La zone d'attraction s'élargit au fur et à mesure que le diamètre du paratonnerre diminue (Figure V.3). Mais pour des diamètres supérieurs ou égaux à 8mm, le modèle classique de protection n'est plus vérifié car la zone d'attraction est plus petite que celle définie par le modèle électrogéométrique.

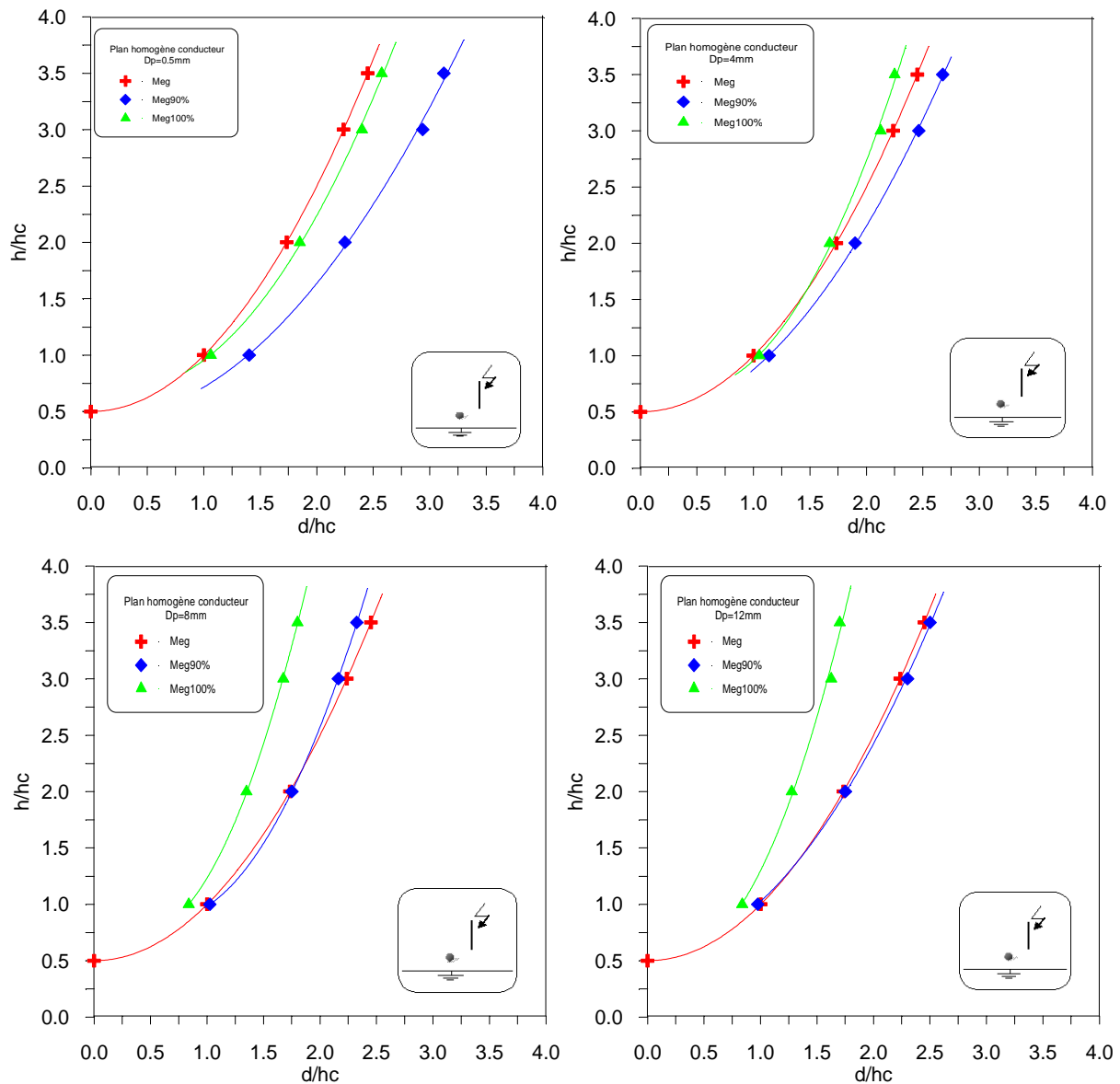


Figure V.1: Zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal

V.2.4. Influence du diamètre du paratonnerre horizontal sur les distances horizontales entre axe de la tige et la génératrice du paratonnerre

Les courbes de la figure V.4, présentant la relation réduite $d/h = f(D_p/h)$ pour différents rapports h/hc , illustrent clairement l'influence du rayon de courbure (diamètre) du paratonnerre et sa hauteur de suspension sur la zone d'attraction [BOU95a][BOU96][RAH96].

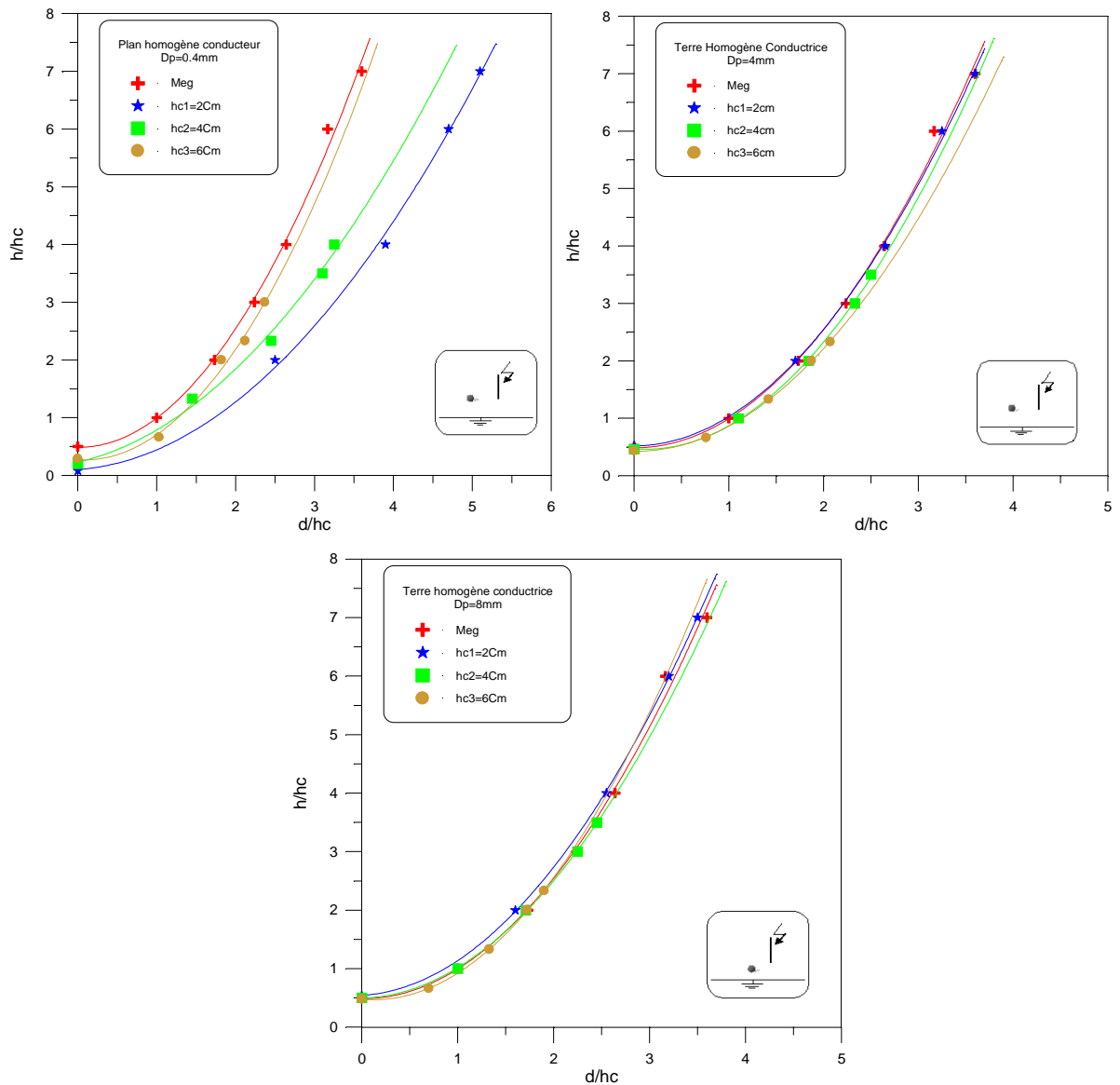


Figure V.2: Influence de la hauteur de suspension du paratonnerre

D'après les résultats obtenus (Figure V.4), plus le rapport D_p/h diminue, et/ou le rapport h/hc décroît, plus la zone d'attraction du paratonnerre horizontal augmente.

Nous constatons en outre que, pour tous les rapports constants h/hc , la zone d'attraction diminue au fur et à mesure que le rayon de courbure du paratonnerre augmente. Mais à partir d'une valeur assez grande de ce dernier, la zone d'attraction reste pratiquement constante. Cela veut dire qu'à partir d'un certain rapport D_p/h , la distance 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 pratiquement égal à 0.2.

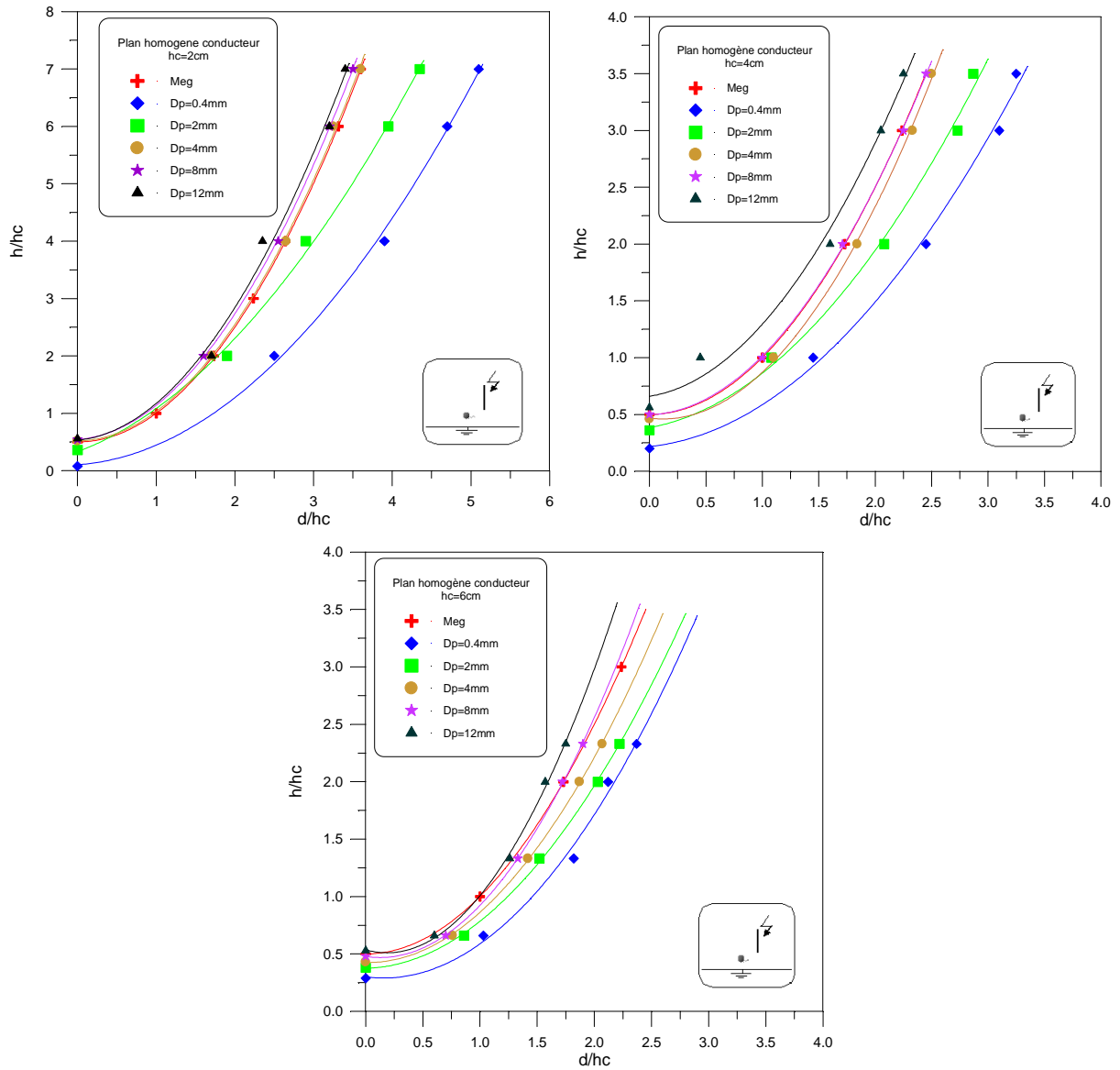


Figure V.3: Zones d'attraction pour différents diamètres Dp du paratonnerre.

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.

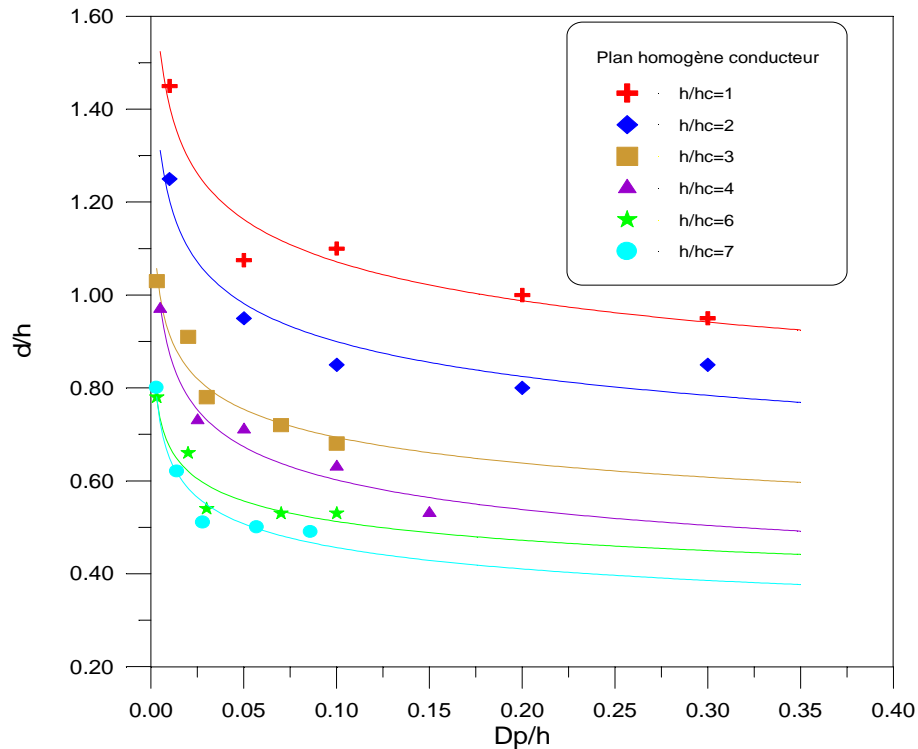


Figure V.4: Influence du rayon de courbure du paratonnerre

V.2.5. Elaboration d'un modèle électrogéométrique de protection élargi

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 \acute{e} . Cette conception permet d'élargir la définition du modèle électrogéométrique. Ce niveau dépend de la configuration du système et de la nature de la terre. Du point de vue pratique, le système avec terre mauvaise conductrice de conductivité donnée, pourrait être assimilé à une terre bonne conductrice, où la hauteur h_c du paratonnerre est remplacée par $h_c + e'$ et la distance h remplacée par $h + e'$ (Figure V.5).

Le paramètre essentiel qui caractérisera la nature du sol sera sa conductivité. Si on considère un sol de conductivité γ et d'épaisseur e , relié au potentiel zéro, au-dessus duquel se trouve un conducteur de hauteur h_c ; deux cas sont à envisager :

-Si le matériau a une conductivité infinie (cas de l'acier), la zone d'attraction du paratonnerre horizontal situé au-dessus de ce sol, serait celle définie par le modèle électrogéométrique (sol parfaitement conducteur) (Figure V.6).

-Si par contre le matériau est de conductivité nulle (matériau parfaitement isolant) la zone d'attraction dépendra de la nature du matériau et de son épaisseur.

Dans le cas où le matériau n'est pas parfaitement isolant, nous pouvons considérer que la

zone d'attraction serait comprise entre les configurations du sol parfaitement conducteur pour lequel la hauteur du paratonnerre est égale à (hc) et celle de l'air de hauteur $(hc+e)$ (Figure V.6).

Cette zone est limitée alors par l'équation(V-1) :

$$(h + e)^2 = d^2 + [(h + e) - (hc + e)]^2$$

$$(hc + e)^2 - 2(h + e)(hc + e) + d^2 = 0 \quad (V-1)$$

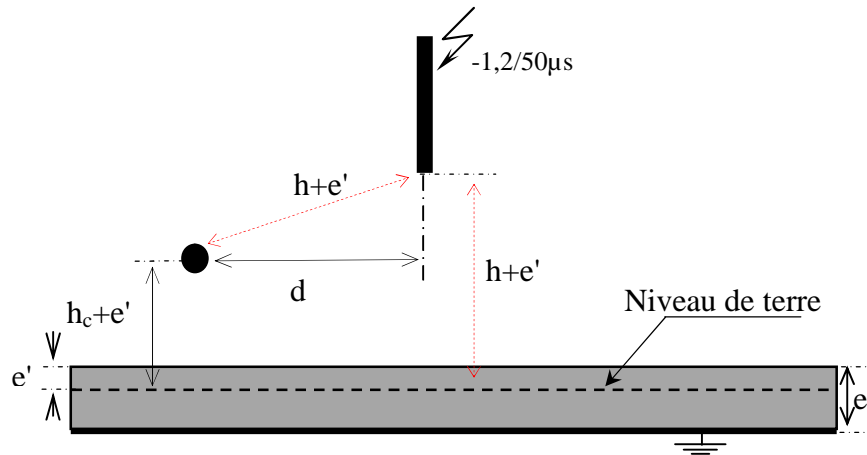


Figure V.5: Model avec terre mauvaise conductrice

Nous pensons donc que pour tout matériau de conductivité comprise entre celle de l'air et celle de l'acier, la zone d'attraction d'un conducteur situé au-dessus de ce matériau relié au potentiel zéro, serait, comprise entre les deux paraboles décrites précédemment, Son équation serait de la forme :

$$(h + e)^2 = d^2 + [(h + e) - (hc + e)]^2$$

e' : niveau de terre fictive $(0 < e' < e)$

$$(hc + e)^2 - 2(h + e)(hc + e) + d^2 = 0 \quad (V-2)$$

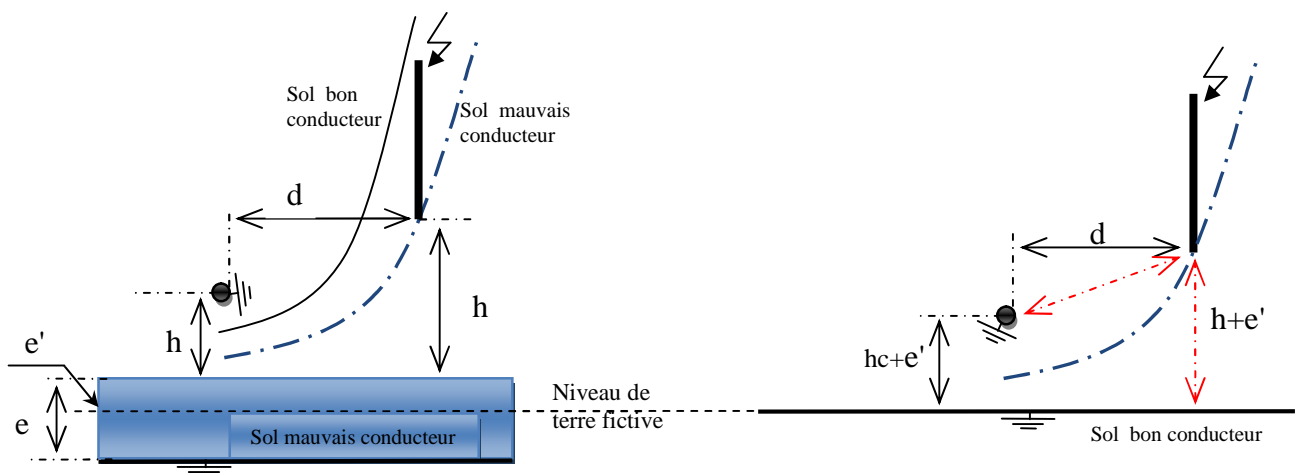


Figure V.6: Equivalence électro géométrique entre le système avec terre bonne conductrice et le système avec terre mauvaise conductrice.

Donc d'après cette équation (V-2), la zone d'attraction d'un conducteur horizontal situé au-dessus d'un matériau de conductivité γ est équivalente à celle du modèle électrogéométrique sur sol conducteur, mais en mesurant la hauteur hc du conducteur au sol, non plus à partir de la surface du sol, mais à un niveau plus bas appelé "niveau de terre fictive", situé à une distance e' au-dessous de la surface du sol (Figure V.6).

Donc la zone d'attraction pour un matériau de conductivité donnée serait le lieu géométrique de l'ensemble des points de la pointe du traceur équidistants du conducteur et de cette terre fictive.

Le lieu géométrique de ces points est une parabole dont l'équation s'écrit en posant :

$$x = \frac{d}{hc} \quad \text{et} \quad y = \frac{h}{hc},$$

$$\left(\frac{e'}{hc}\right)^2 + 2y\left(\frac{e'}{hc}\right) - (x^2 - 2y + 1) = 0 \quad (\text{V-3})$$

Pour tracer les paraboles dont les équations ont été déterminées précédemment (V-3), il est nécessaire de connaître le paramètre e'/hc , qui dépend de la hauteur du conducteur au sol, et du e' "niveau de terre fictive".

La résolution de l'équation du second degré (V-3), où l'inconnue est e' , donne en retenant uniquement la solution positive (V-4):

$$\frac{e'}{hc} = \sqrt{x^2 - 2y + 1 + y^2} - y \quad (\text{V-4})$$

Nous constatons que les zones d'attraction dépendent de la hauteur hc du conducteur au sol.

V.2.6. Influence du rayon de courbure du paratonnerre horizontal sur le niveau de terre fictive

Pour étudier cette influence, nous avons établi une relation réduite $e'/hc=f(Dp/hc)$. Nous avons illustré cette caractéristique à la figure V.7, pour toutes les hauteurs $hc=2, 4$ ou 6cm .

Nous remarquons (Figure V.7) que le niveau relatif de terre fictive varie dans le sens inverse de la variation du rayon de courbure du paratonnerre horizontal. Nous constatons aussi que le niveau relatif de la terre fictive " e'/hc " tend vers celui du sol bon conducteur lorsque le diamètre relatif à " hc " est compris entre 0.2 et 0.5, mais au-delà de 0.5, le rapport e'/hc diminue. Cela veut dire qu'à partir d'un certain diamètre $Dp=8\text{mm}$, le modèle électrogéométrique classique ne serait plus vérifié.

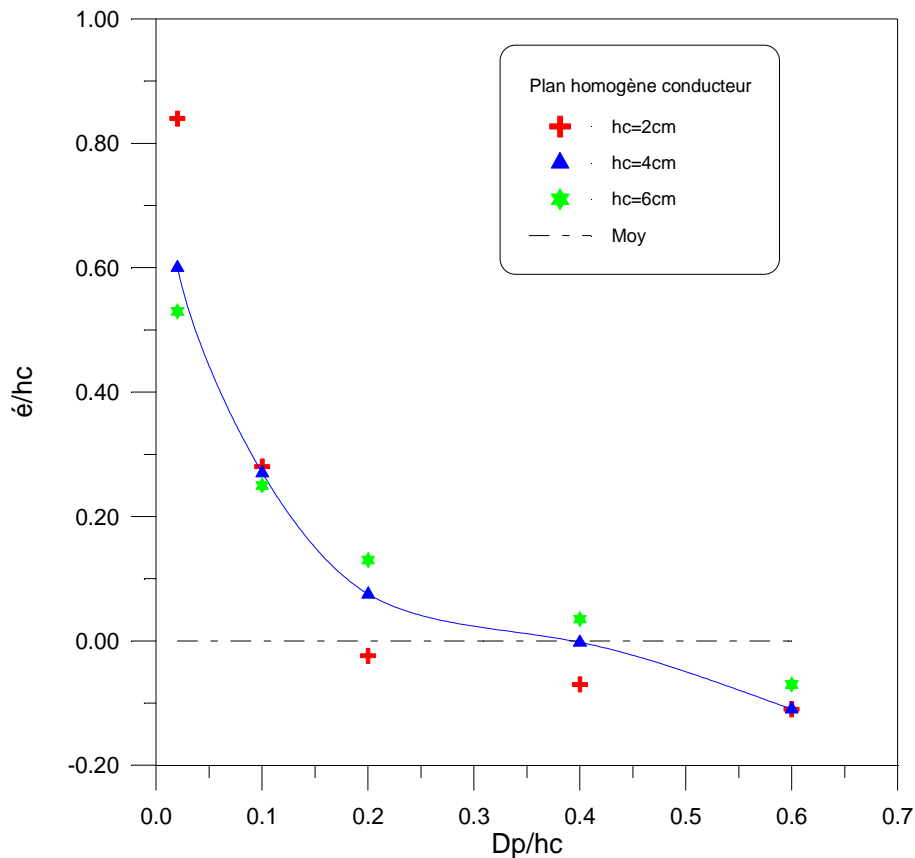


Figure V.7: Influence du rayon de courbure sur le niveau de la terre fictive

V.3. ZONE D'ATTRACTION D'UN PARATONNERRE HORIZONTAL CAS DU SOL MAUVAIS CONDUCTEUR

Nous avons étudié les zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal situé au-dessus d'une terre homogène mauvaise conductrice.

Les zones d'attraction sont définies par les configurations pour lesquelles la probabilité d'impact sur le paratonnerre est égale à 90%. Dans le cas de l'influence du diamètre du paratonnerre horizontal, nous comparons les zones d'attraction à celle du modèle électrogéométrique classique correspondant à 100% de décharge au paratonnerre car elle est la seule référence.

V.3.1. Influence de la conductivité du sol sur les zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal

Dans le cas de la terre mauvaise conductrice, il a été constaté, que les zones d'attraction sont d'autant plus grandes que la conductivité diminue (Figure V.8).

Cette constatation a été vérifiée pour le rapport (hc/e) égale à 0.2, 0.4, 0.6, et pour la valeur

du diamètres D_p égale à 2mm (Figure V.8), et une épaisseur d'eau distillée constante ($e=10\text{cm}$).

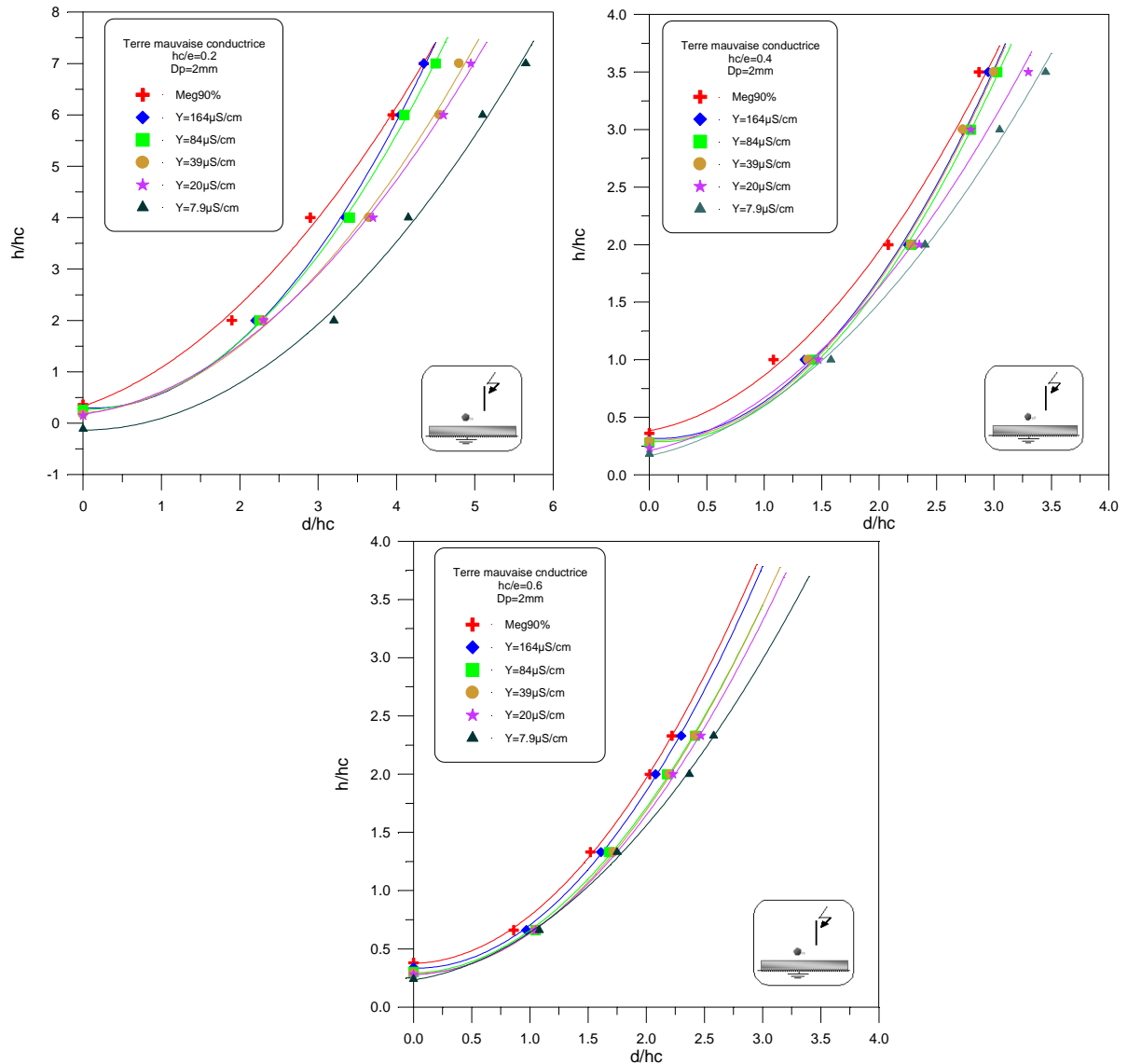


Figure V.8: Zones d'attraction pour différentes conductivités du sol ($D_p=2\text{mm}$)

V.3.2. Influence de la conductivité du sol sur le niveau de terre fictive

Les résultats expérimentaux donnés à la figure V.9, montrent que plus la conductivité γ du sol augmente et/ou le rapport " hc/e " augmente, le niveau relatif de la terre fictive diminue et tend ainsi vers celui du sol parfaitement conducteur.

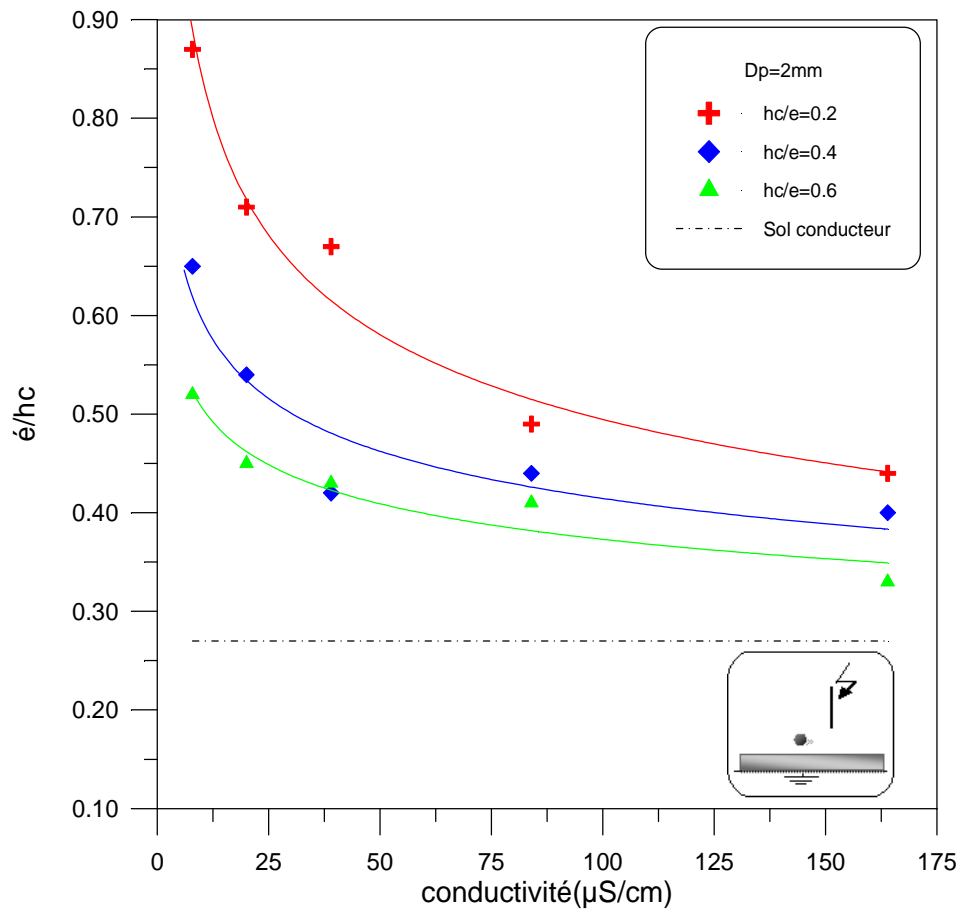


Figure V.9: Influence de la conductivité du sol sur le niveau de terre fictive pour $D_p=2mm$

V.3.3. Influence du rayon de courbure du paratonnerre horizontal sur les zones d'attraction

La figure V.10 montre que les zones d'attraction s'élargissent au fur et à mesure que le rayon de courbure du paratonnerre horizontal diminue. Ceci peut être expliqué par le fait que le champ électrique au niveau du conducteur de faible rayon soit plus intense que pour un rayon supérieur.

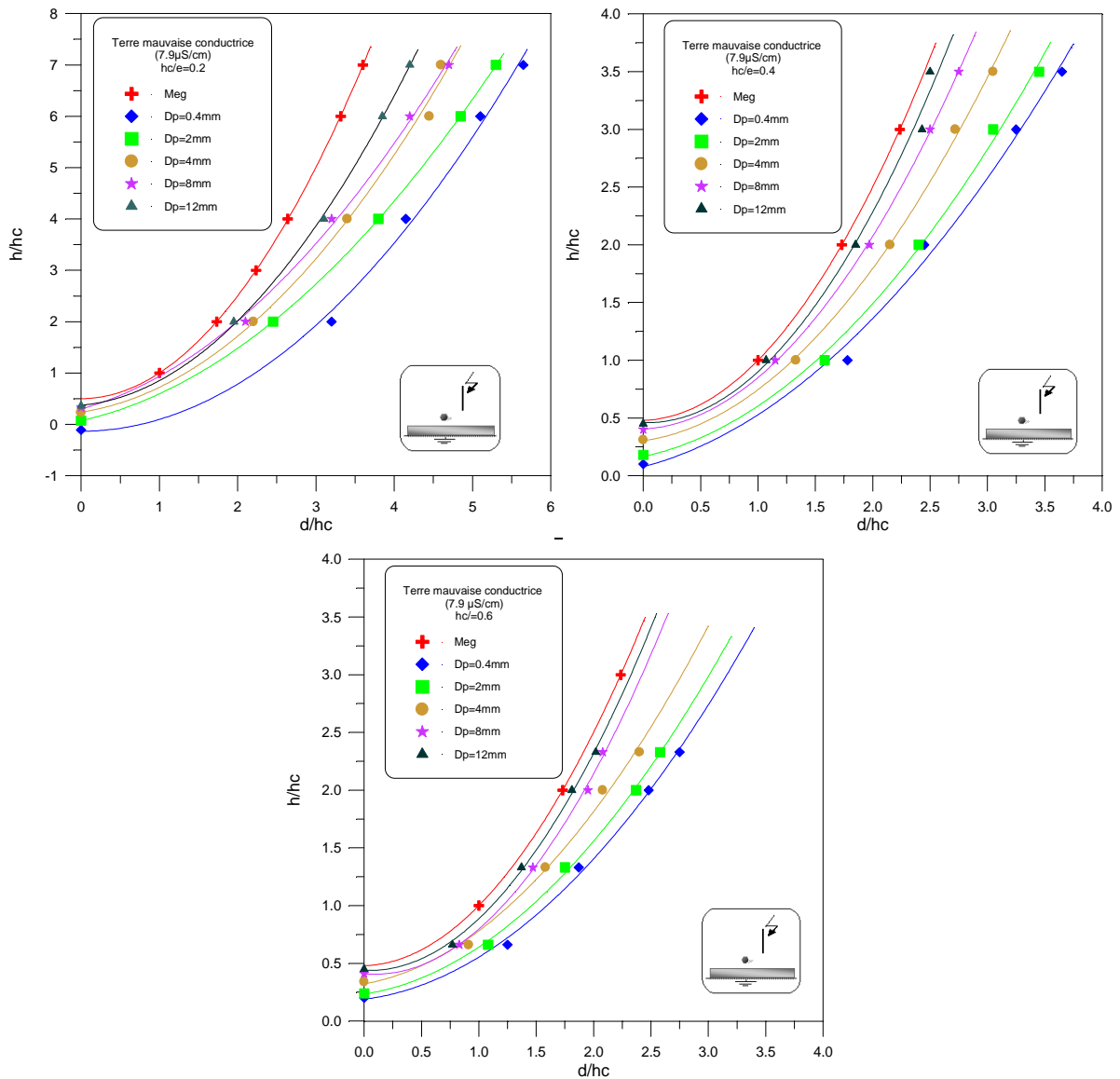


Figure V.10: Zones d'attractions pour différents rayons de courbure ($\gamma=7.9\mu\text{S/cm}$)

V.3.4. Influence de la hauteur hc/e du paratonnerre sur les zones d'attraction

La figure V.11 montre que les zones d'attraction s'élargissent au fur et à mesure que la hauteur hc/e du paratonnerre diminue. Ceci est vérifié pour tous les diamètres des conducteurs utilisés dans notre étude ($D_p=0.4, 2, 4, 8$ et 12mm) et les différentes conductivités utilisées ($\gamma=7.9, 20, 39, 84$ et $164 \mu\text{S/cm}$).

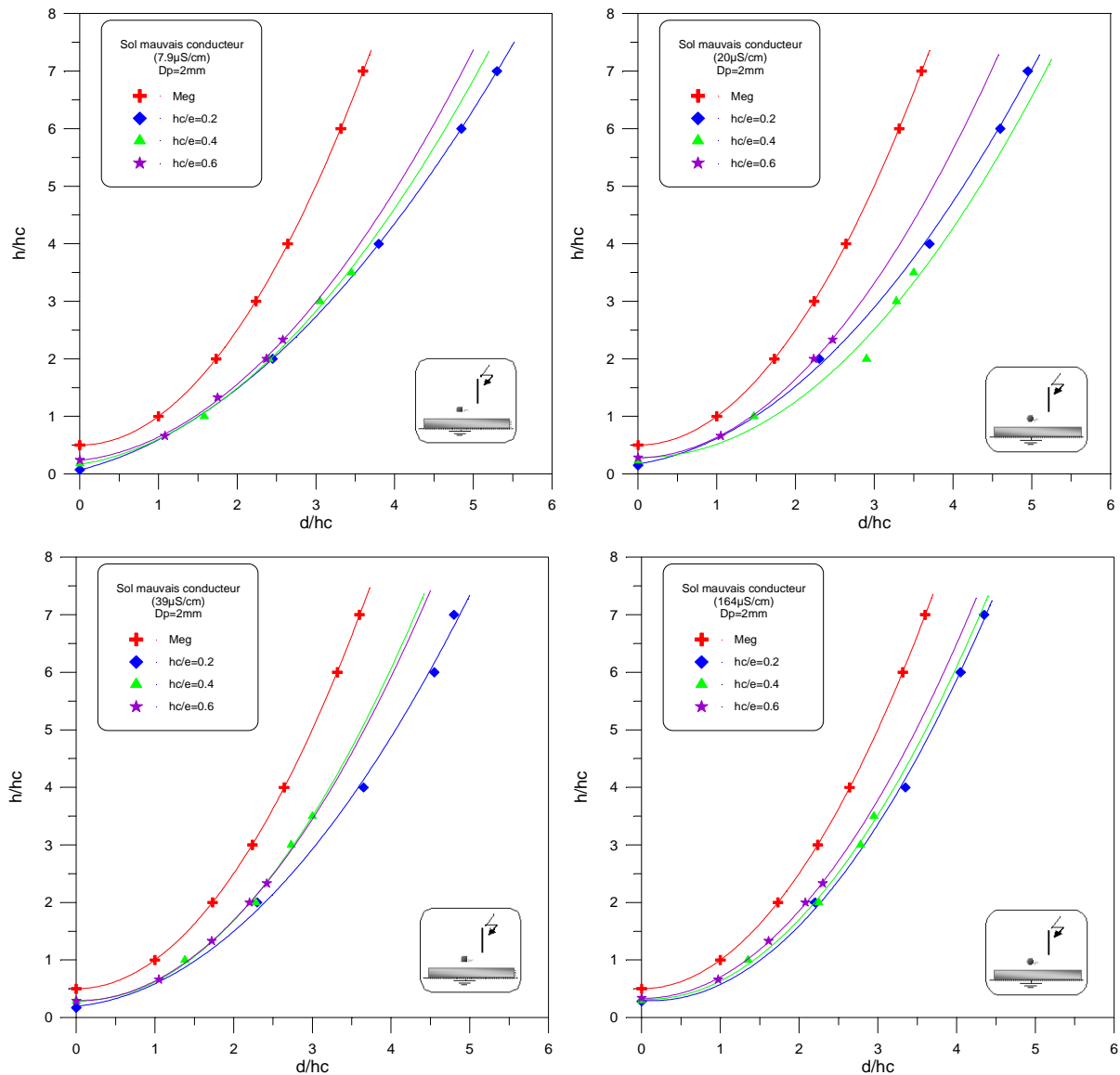


Figure V.11: Zones d'attraction pour différents rapports hc/e ($\gamma = 7.9 \mu S/cm$)

V.3.5. Influence du rayon de courbure du paratonnerre horizontal sur le niveau de terre fictive

Afin d'étudier cette influence, nous avons établi une relation réduite $e'/hc=f(Dp/hc)$. Nous avons illustré cette caractéristique à la figure V.12, pour un diamètre du paratonnerre $Dp=2mm$ et les rapports $hc/e=0.2, 0.4$ et 0.6 .

Pour les différentes valeurs du rapport hc/e et de la conductivité de l'eau choisies dans cette étude ($\gamma = 7.9 \mu S/cm$), le niveau relatif de terre fictive e'/hc tend vers celui de la terre bonne conductrice, lorsque le rayon de courbure relatif Dp/hc ou le rapport hc/e augmente, pour une conductivité donnée (Figure V.12).

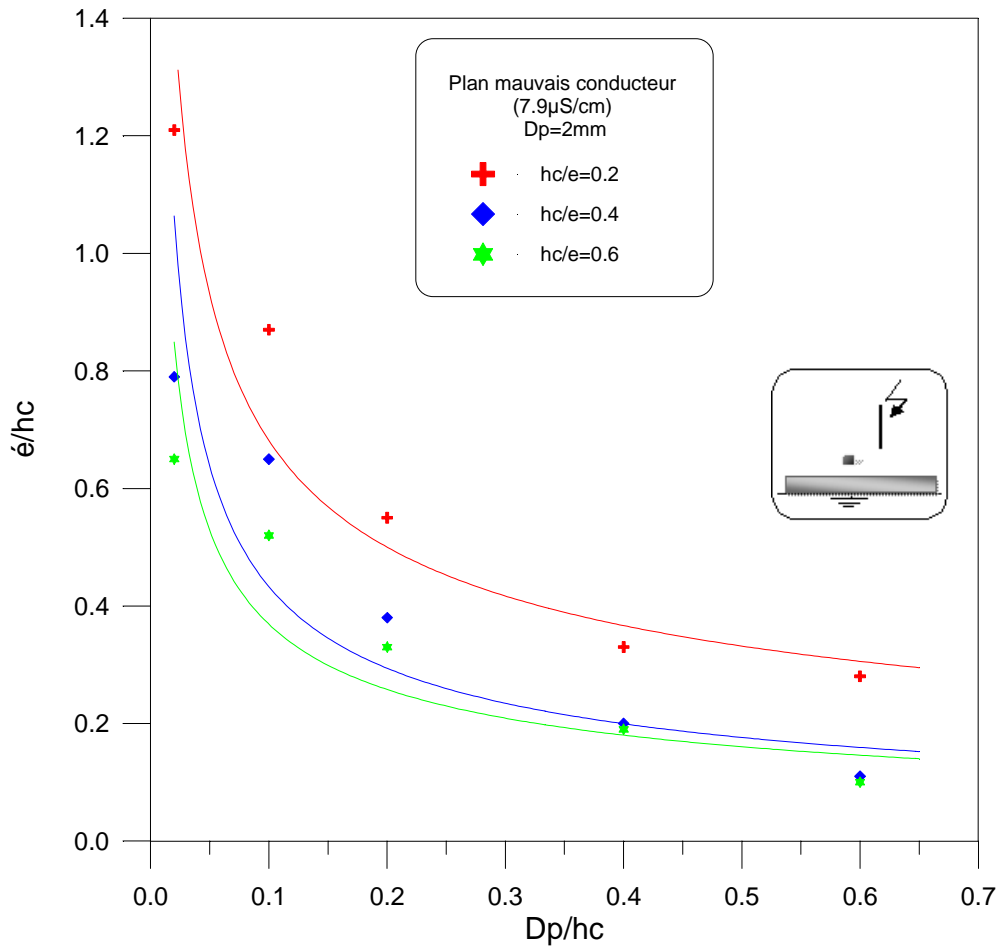


Figure V.12: Influence du rayon de courbure sur le niveau de terre fictive pour différents rapports hc/e et $\gamma=7.9\mu\text{S/cm}$

V.4. ZONE D'ATTRACTION D'UN PARATONNERRE HORIZONTAL CAS DE TERRE HETEROGENE

Dans le cas de l'influence des rapports D/hc , nous comparons les zones d'attraction obtenues pour les différentes configurations à celle définie pour une terre homogène conductrice (Acier) correspondant à 90% (Meg90%) de décharge.

Suivant la position de la tige de haute tension et du paratonnerre horizontal, nous avons étudié quatre (4) configurations de la terre hétérogène possibles suivantes.

V.4.1. Première configuration : Conducteur au-dessus (sable), et l'axe de la tige situé entre l'interface et le conducteur

Les résultats préliminaires, obtenus dans ce cas (Figure III.10a), et ont permis de constater que les zones d'attraction du paratonnerre horizontal, sont plus étendues que celles définies par le modèle électrogéométrique dans le cas d'une terre homogène parfaitement

conductrice (Figure V.13).

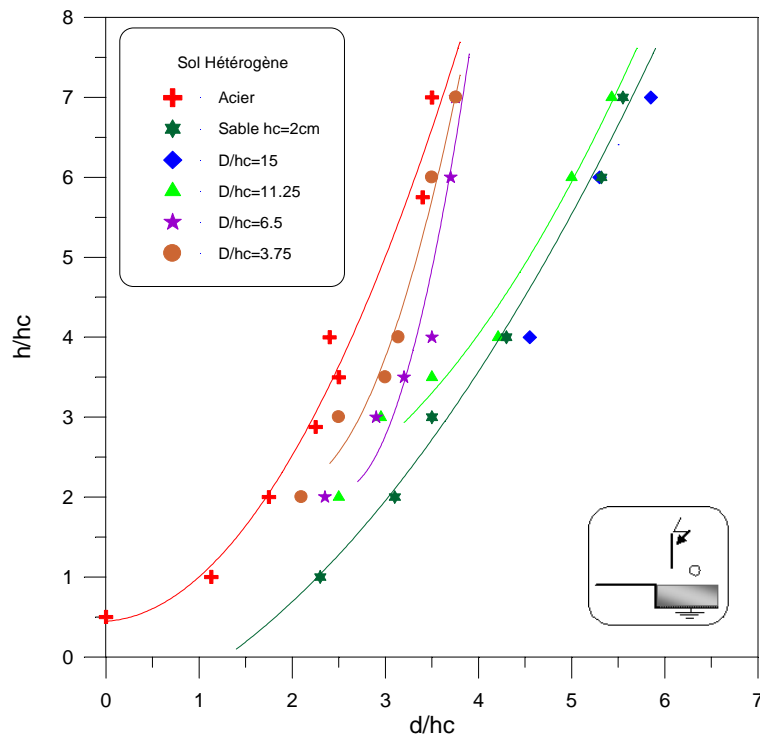


Figure V.13: Zones d'attraction pour la première configuration de la terre hétérogène.

Les résultats présentés à la figure V.13, montrent que les zones d'attraction sont situées entre celles obtenues pour un sol homogène conducteur (acier) et celles obtenues pour un sol homogène mauvais conducteur (sable).

V.4.2. Deuxième configuration : Conducteur au-dessus du sable et situé entre l'interface et l'axe de la tige

Dans ce cas (Figure III.10b), nous constatons que les zones d'attraction sont aussi plus grandes que celles définies pour un sol conducteur homogène (Figure V.14). Elles sont aussi plus grandes que celles obtenues pour le sol homogène constitué de sable. Dans ce cas, la présence de l'interface favoriserait l'attraction des décharges par le paratonnerre. Lorsque le conducteur est situé très loin de l'interface ($D/hc \geq 15$), la zone d'attraction est confondue avec celle obtenue dans le cas du sol homogène constitué de sable.

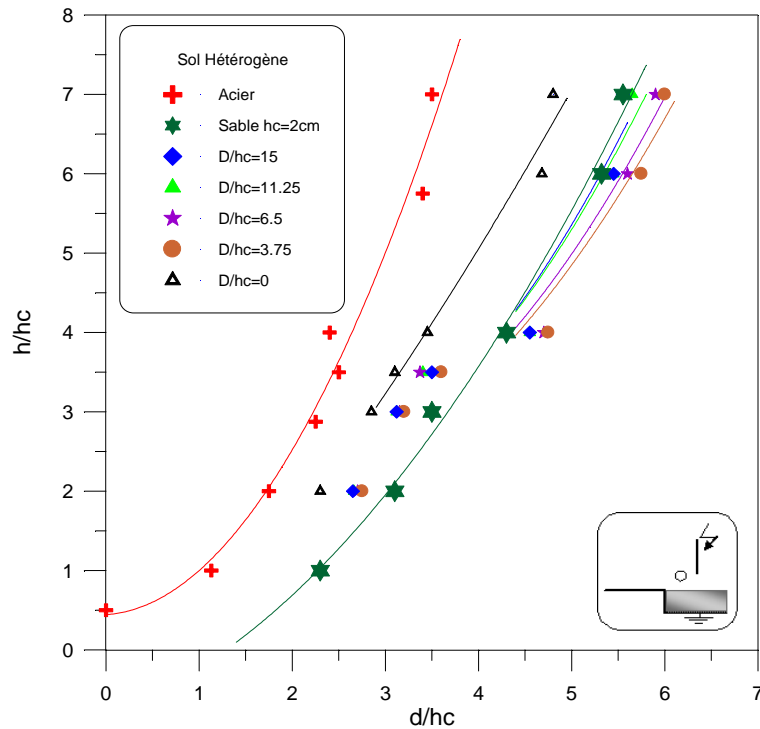


Figure V.14 : Zones d'attraction pour la deuxième configuration de la terre hétérogène.

V.4.3. Troisième configuration : conducteur au-dessus de l'acier et situé entre l'interface et l'axe de la tige

Dans ce cas de configuration (Figure III.10c), les résultats nous ont permis de constater que plus le paratonnerre s'approche de l'interface, plus sa zone d'attraction devient grande (Figure V.15). Ceci serait dû à l'influence de l'interface où le champ électrique est relativement intense. Ainsi les décharges de foudre seraient attirées par le paratonnerre dans des zones plus vastes que celle définie par le modèle électrogéométrique classique.

En pratique, cela pourrait se traduire aussi par l'attraction des décharges de faible courant (faibles distances d'amorçage).

Quand le conducteur horizontal s'éloigne de l'interface ($D/hc \geq 15$), la zone d'attraction devient confondue avec celle définie par le modèle électrogéométrique.

V.4.4. Quatrième configuration : conducteur au-dessus de l'acier, et l'axe de la tige situé entre l'interface et le conducteur

Dans cette configuration (Figure III.10d), lorsque la décharge évolue dans une zone comprise entre l'interface et le paratonnerre, la présence de l'interface où le champ est intense, amoindrit l'efficacité du paratonnerre. En effet, les zones d'attraction sont plus petites que celle définie pour un sol conducteur homogène (Figure V.16).

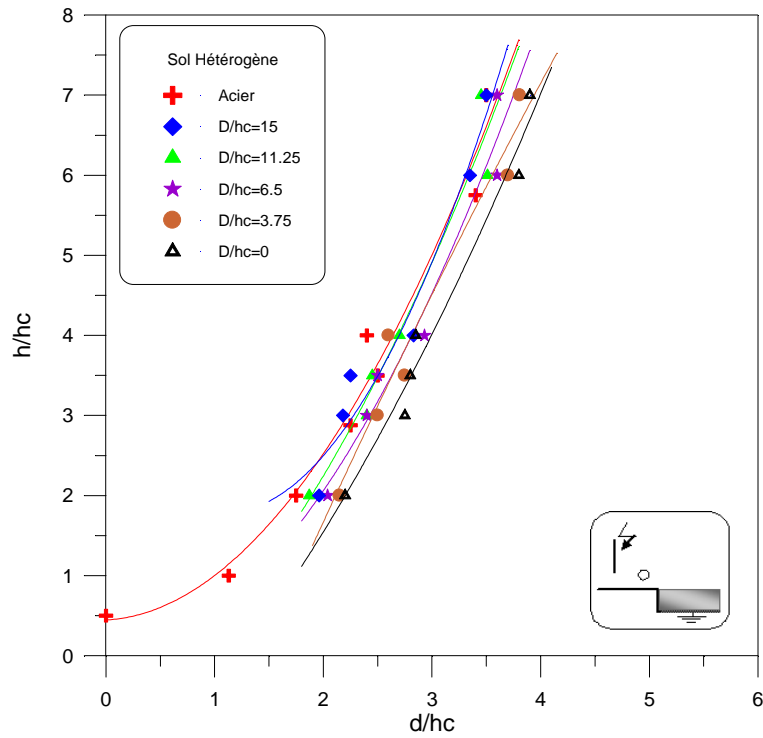


Figure V.15 : Zones d'attraction pour la troisième configuration de la terre hétérogène.

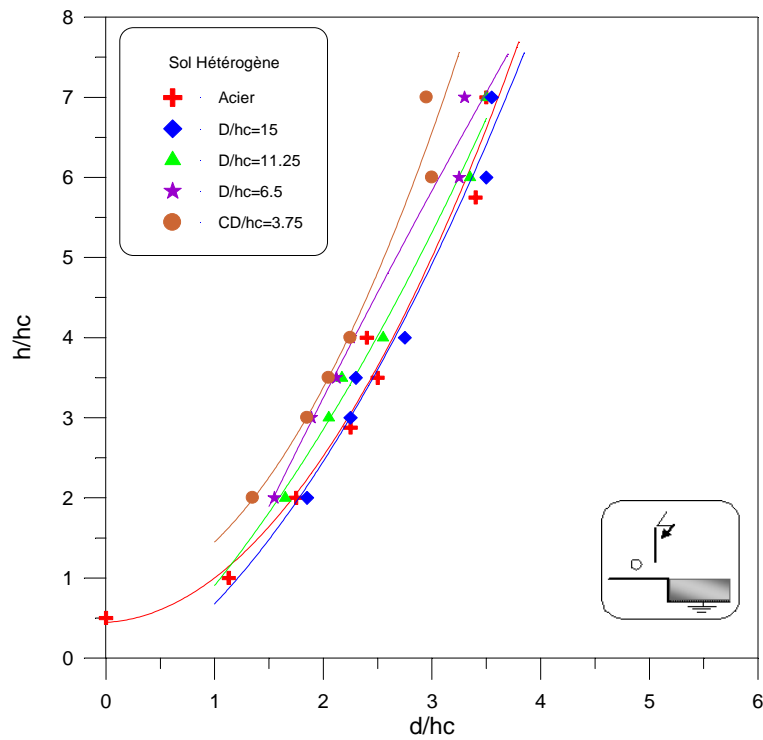


Figure V.16 : Zones d'attraction pour la quatrième configuration de la terre hétérogène.

V.5. ZONE D'ATTRACTION D'UN PARATONNERRE HORIZONTAL DANS LE CAS DE TERRE DISCONTINUE

Suivant la position de la tige de haute tension et du paratonnerre horizontal, nous avons étudié quatre configurations de la terre discontinue.

Première configuration : Paratonnerre horizontal situé sur la partie haute de la terre discontinue, entre l'axe de la tige haute tension et l'interface (Figure III.11a).

Deuxième configuration : Axe de la tige haute tension situé sur la partie haute de la terre discontinue, entre l'interface et le paratonnerre horizontal (Figure III.11b).

Troisième configuration : Axe de la tige haute tension situé sur la partie basse de la terre discontinue, entre l'interface et le paratonnerre horizontal (Figure III.11c).

Quatrième configuration : Paratonnerre horizontal situé sur la partie basse de la terre discontinue, entre l'axe de la tige haute tension et l'interface (Figure III.11d).

Dans le cas de l'influence des rapports D/hc , nous comparons les zones d'attraction obtenues pour les différentes configurations à celle définie pour une terre homogène conductrice correspondant à 90% (Meg90%) de décharge. Dans le cas de l'influence du diamètre du paratonnerre horizontal, nous comparons les zones d'attraction à celle du modèle électrogéométrique classique correspondant à 100% (Meg) de décharge au paratonnerre car elle est la seule référence.

V.5.1. Première configuration : paratonnerre horizontal située sur la partie haute de la terre discontinue, entre l'axe de la décharge et l'interface

V.5.1.1. Influence du rapport D/hc sur les zones d'attraction

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/hc égal à 2, 6 et 12). Les zones d'attraction obtenues ont été comparées à celle du même paratonnerre horizontal dans le cas d'une terre homogène conductrice correspondant à 90% de décharge.

Les zones d'attraction obtenues pour les différents diamètres (Figure V.17) sont plus larges que celles définies dans le cas de la terre homogène conductrice. Ainsi, les zones s'élargissent au fur et à mesure que le rapport D/hc est petit. Pour un rapport D/hc égal ou supérieur à 12, les zones se confondent avec celle définie pour une terre homogène conductrice.

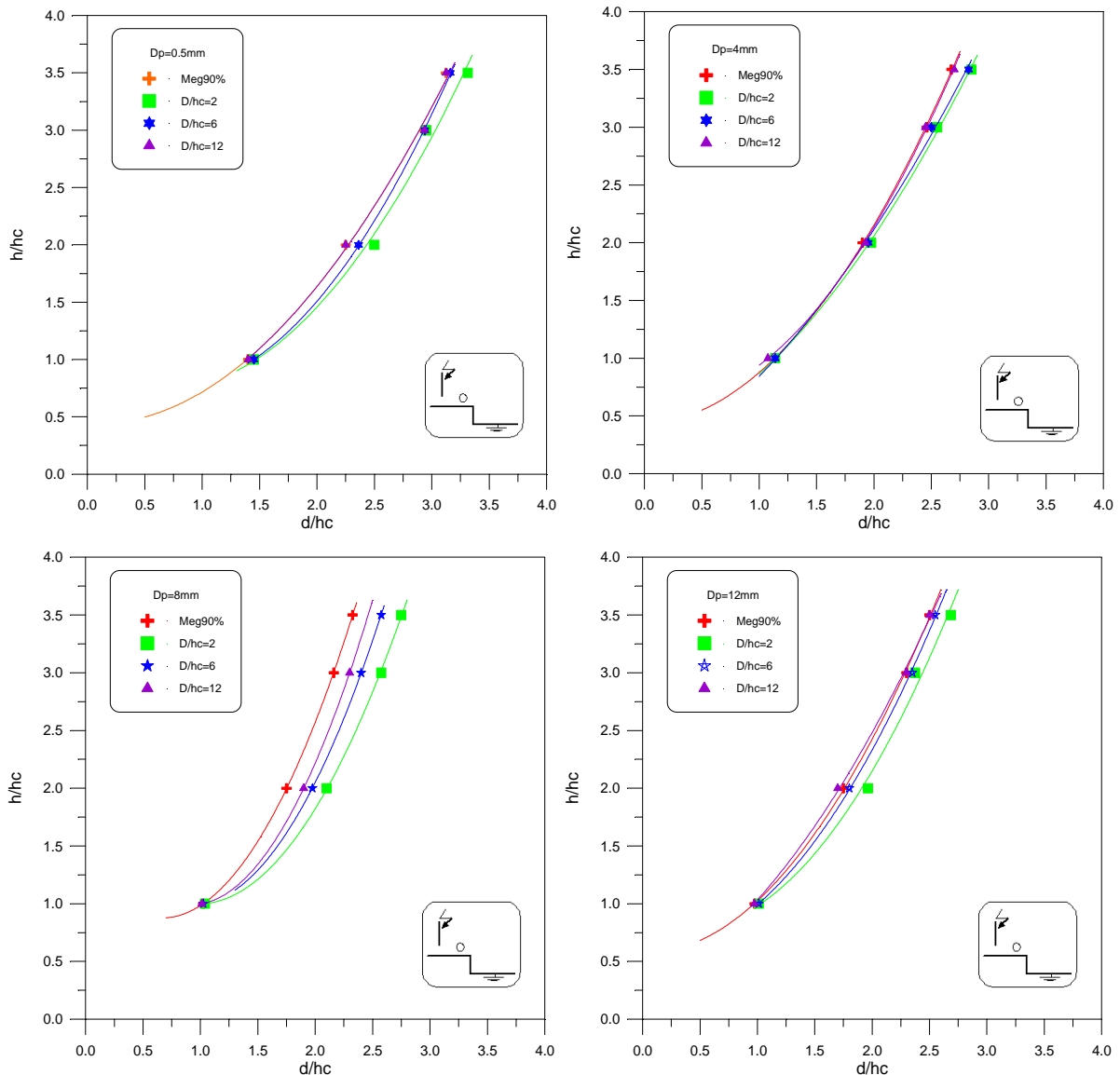


Figure V.17: Zones d'attraction pour la terre discontinue.

V.5.1.2. Niveau de terre fictive

Pour les diamètres des paratonnerres horizontaux D_p égal à 0.5mm, 8mm et 12 mm, nous pouvons prendre ainsi, en considération dans ce cas la notion de terre fictive déjà définie, dans le cas de la terre mauvaise conductrice [RAH96][BEL94]. En effet ce niveau de terre fictive $é/hc$ varie dans le sens inverse de la variation du rapport D/hc . Lorsque ce rapport atteint une valeur suffisamment grande D/hc égal à 12, le niveau de terre fictive tend vers celui du sol homogène bon conducteur (Figure V.18) [RAH02].

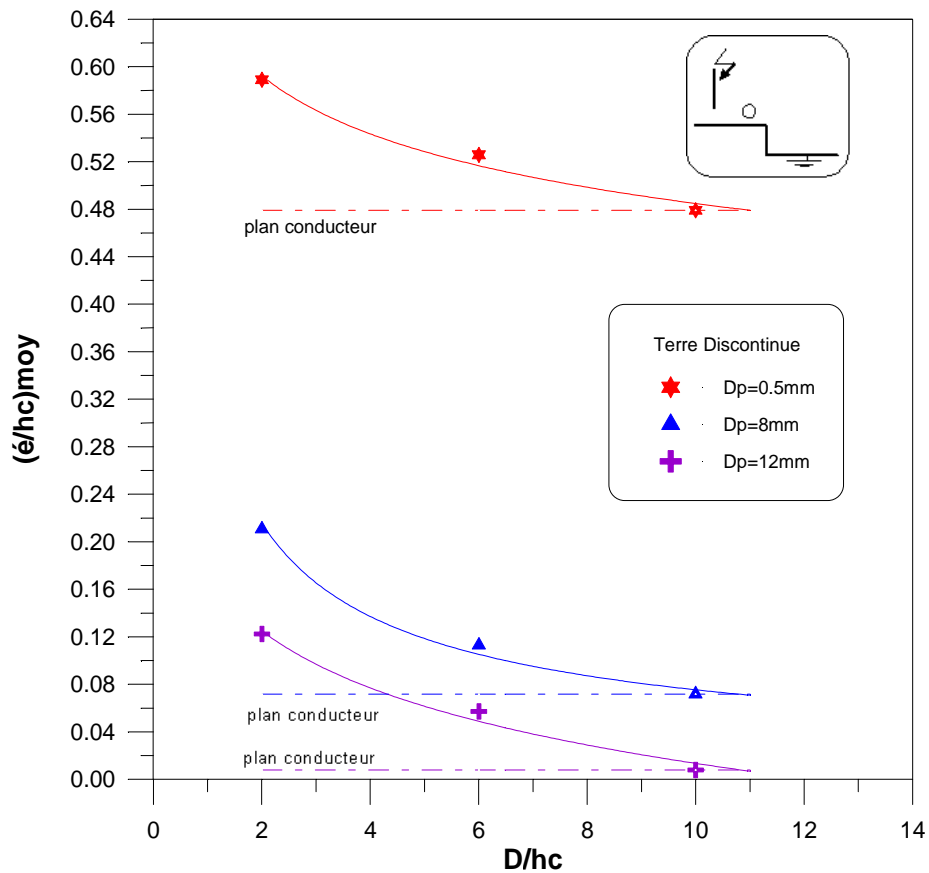


Figure V.18: Influence des rapports D/h_c sur le niveau de terre fictive.

V.5.1.3. Influence du diamètre D_p du paratonnerre horizontal sur les zones d'attraction

Nous avons tracé, pour un rapport D/h_c constant, les zones d'attraction du paratonnerre horizontal pour différents diamètres ($D_p = 0.5, 4, 8$ et 12mm) (Figure V.19).

Les courbes de la figure V.19, 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 4 mm . Dans le cas de terre homogène parfaitement conductrice, le résultat obtenu (Figure V.19) affirme que sa zone d'attraction est moins large que celle du modèle électrogéométrique classique. Cependant, Dans le cas de notre 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 classique [RAH02].

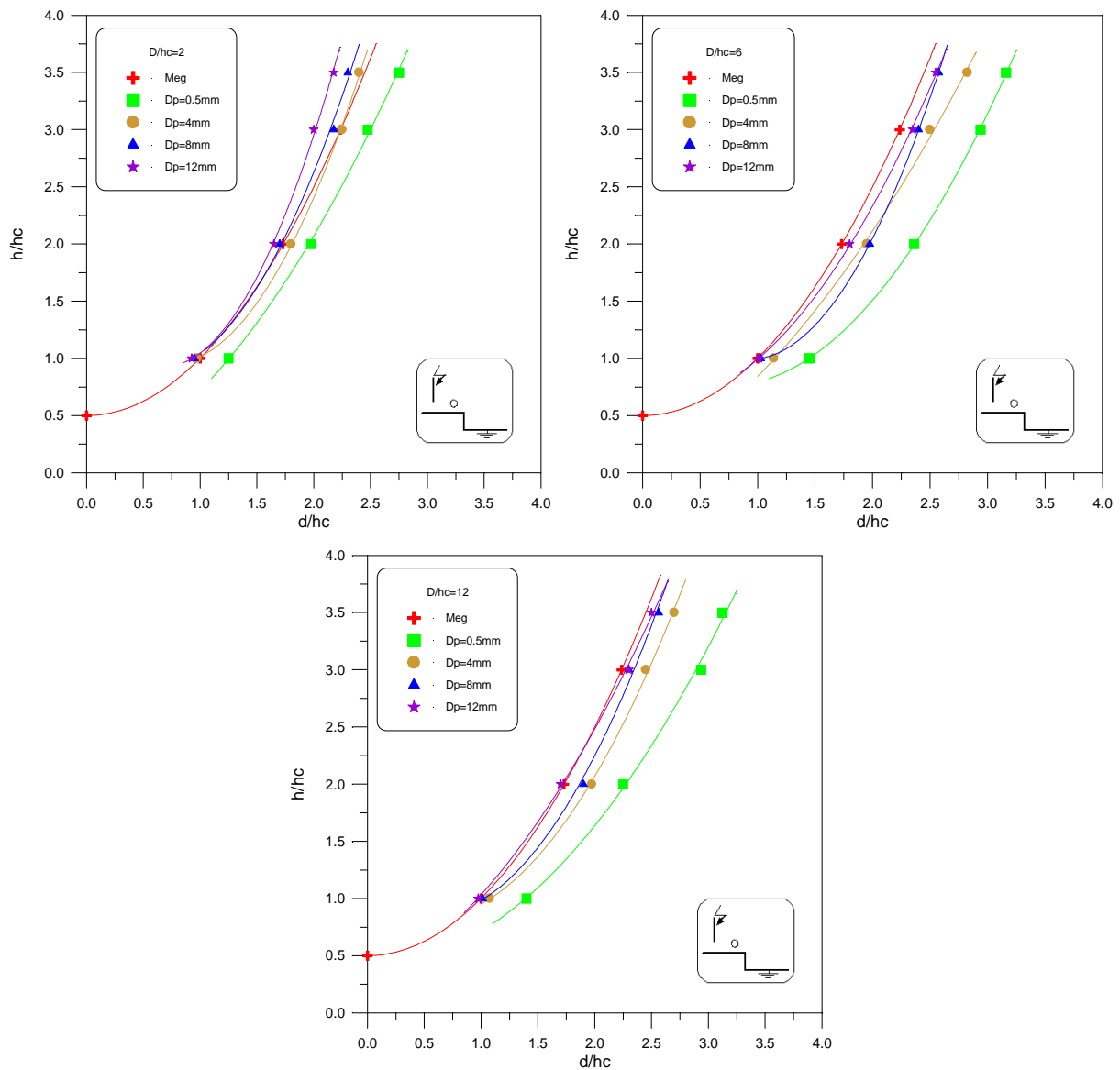


Figure V.19 : Influence du diamètre du paratonnerre horizontal pour la première configuration.

V.5.2. Deuxième configuration : L'axe de la décharge situé sur la partie haute de la terre discontinue entre l'interface et le paratonnerre horizontal

V.5.2.1. Influence de la distance horizontale D/h_c entre l'interface et le paratonnerre horizontal

Les zones d'attraction sont plus petites que celles définies 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 (Figure V.20). 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.

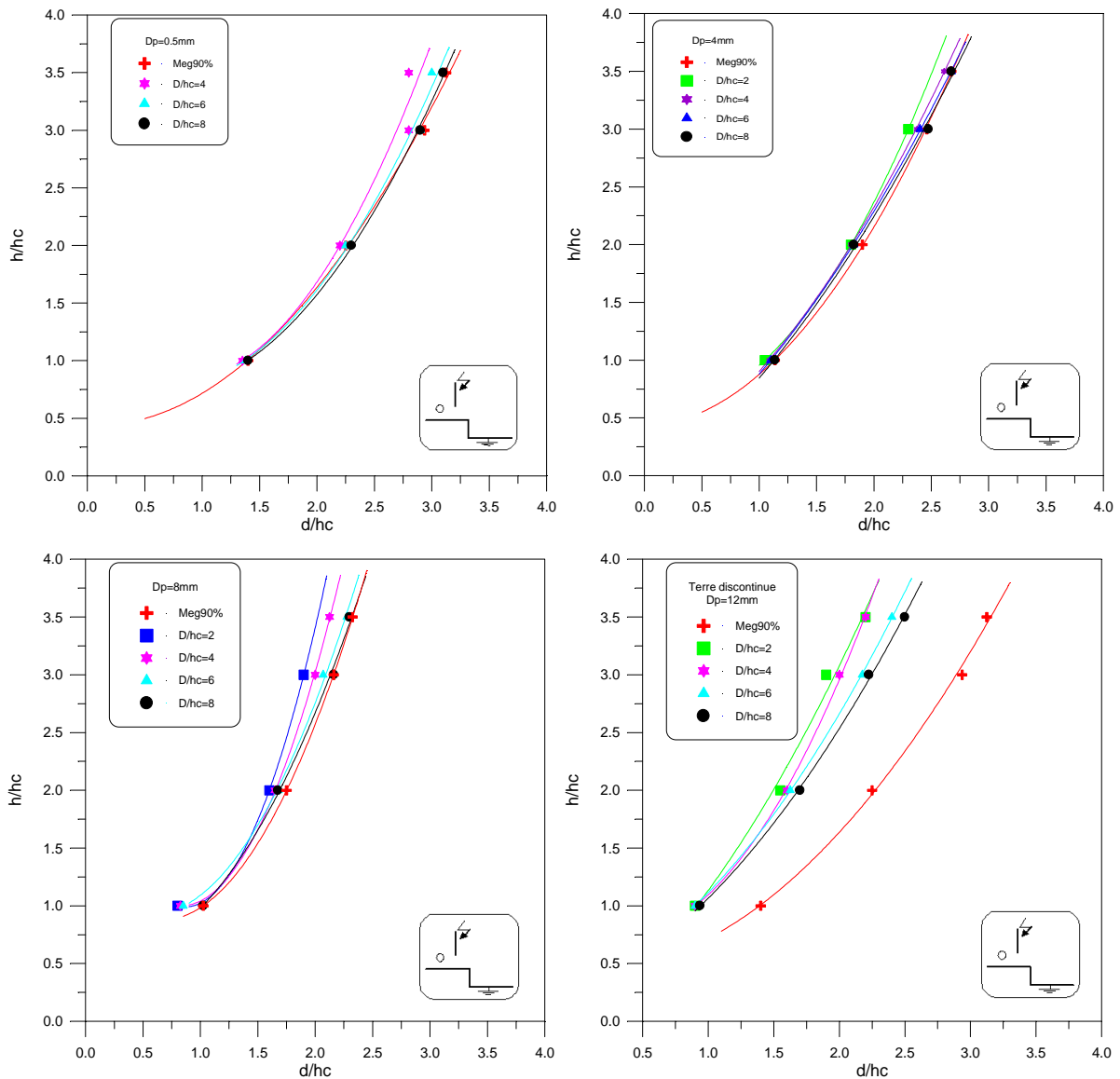


Figure V.20: Zones d'attraction pour la deuxième configuration de la terre discontinue.

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 bonne conductrice (Figure V.20) [RAH01a].

V.5.2.2. Influence du diamètre du paratonnerre horizontal D_P sur les zones d'attraction

Les zones d'attraction définies pour les différents diamètres utilisés (0.5mm; 4mm; 8mm; 12mm) sont influencées par la présence de l'interface de la terre discontinue. En effet les résultats obtenus montrent que (Figure V.21) [RAH01a]:

-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.

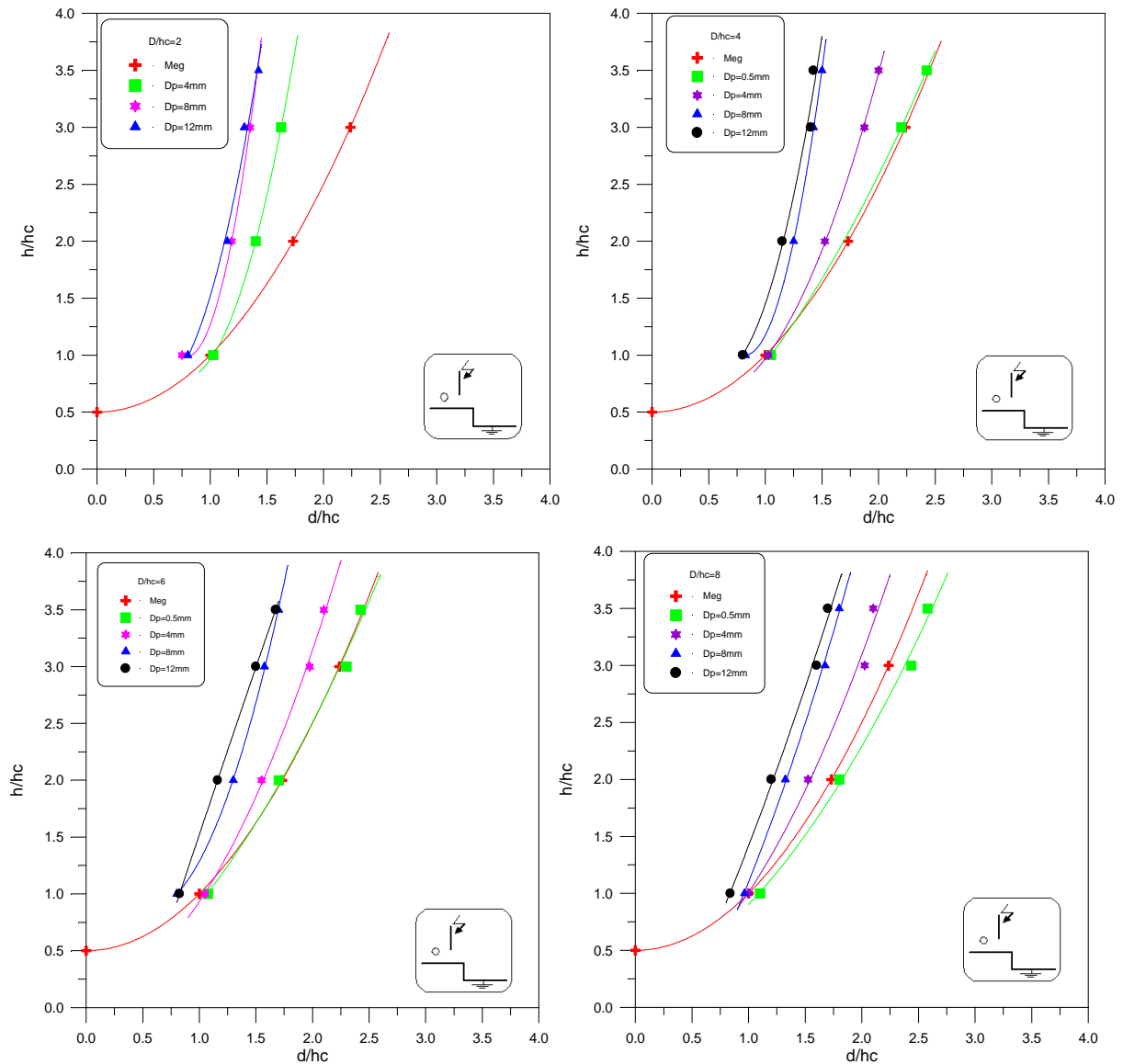


Figure V.21: Influence du diamètre du paratonnerre horizontal D_p dans le cas d'une terre discontinue.

-Pour le rapport D/hc égal à 6, la zone d'attraction obtenue pour le diamètre 0,5mm du paratonnerre horizontal est pratiquement confondue avec celle définie par le modèle électrogéométrique.

-Pour le rapport D/hc égal à 8, la zone d'attraction obtenue pour le diamètre 0,5mm du paratonnerre horizontal est plus large que celle définie par le modèle électrogéométrique classique.

V.5.3. Troisième configuration : Axe de la décharge situé sur la partie basse de la terre discontinue, entre l'interface et le paratonnerre horizontal

V.5.3.1. Influence des rapports D/h_c sur les zones d'attraction

Les zones d'attraction augmentent au fur et à mesure que le paratonnerre s'éloigne de l'interface (D/h_c augmente) (Figure V.22). 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, 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 [RAH05].

V.5.3.2 Influence du diamètre du paratonnerre horizontal sur les zones d'attraction

Les résultats obtenus pour les zones d'attraction définies pour les différents diamètres utilisés (0.5mm; 4mm; 8mm; 12mm) montrent que (Figure V.23):

- 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 de diamètre est plus large que celle du modèle électrogéométrique classique. Ce résultat est pratiquement similaire à celui obtenu dans le cas de terre homogène conductrice.

Les résultats obtenus pour la troisième 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 [RAH05].

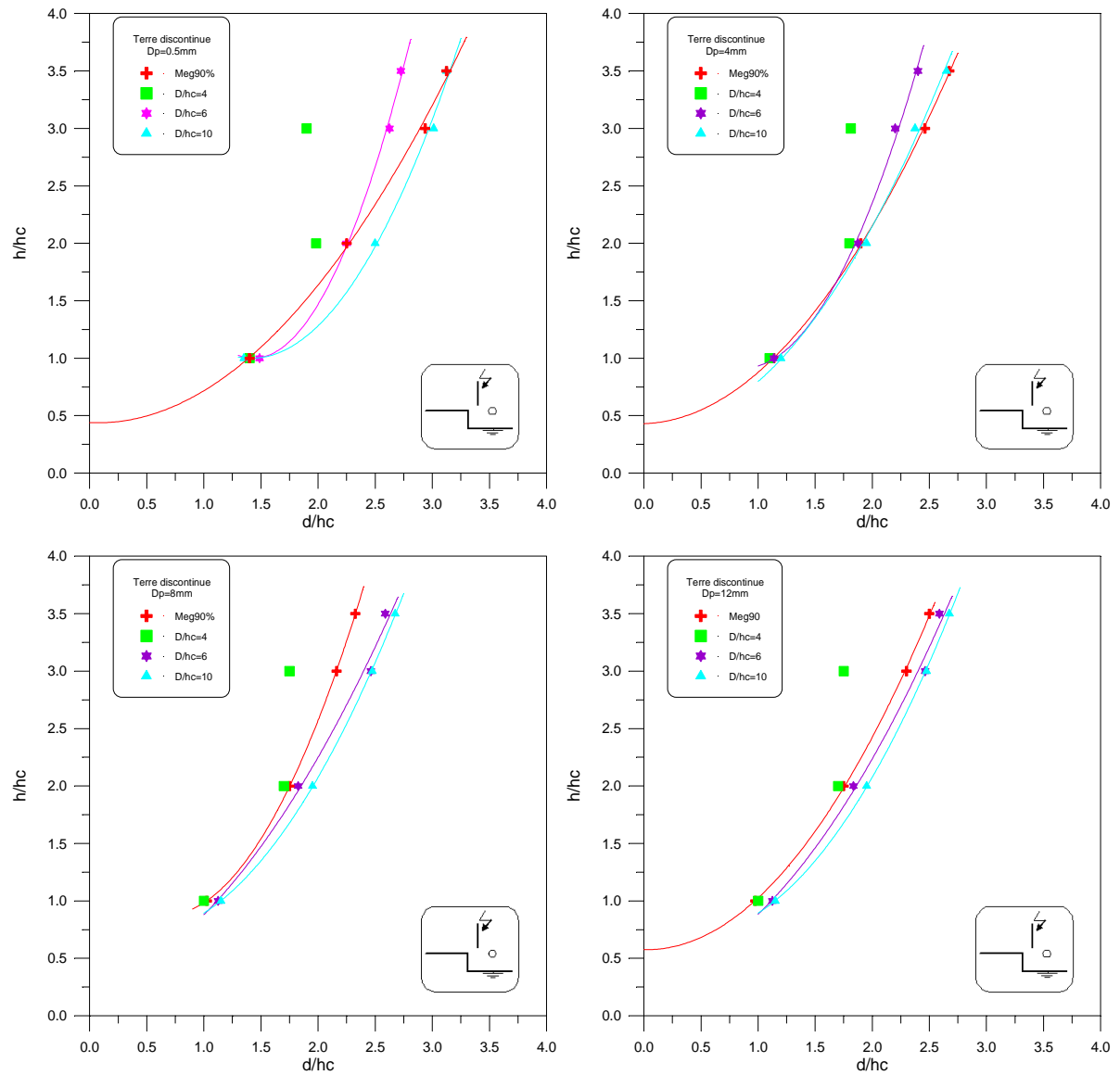


Figure V.22: Zones d'attraction pour la troisième configuration de la terre discontinue.

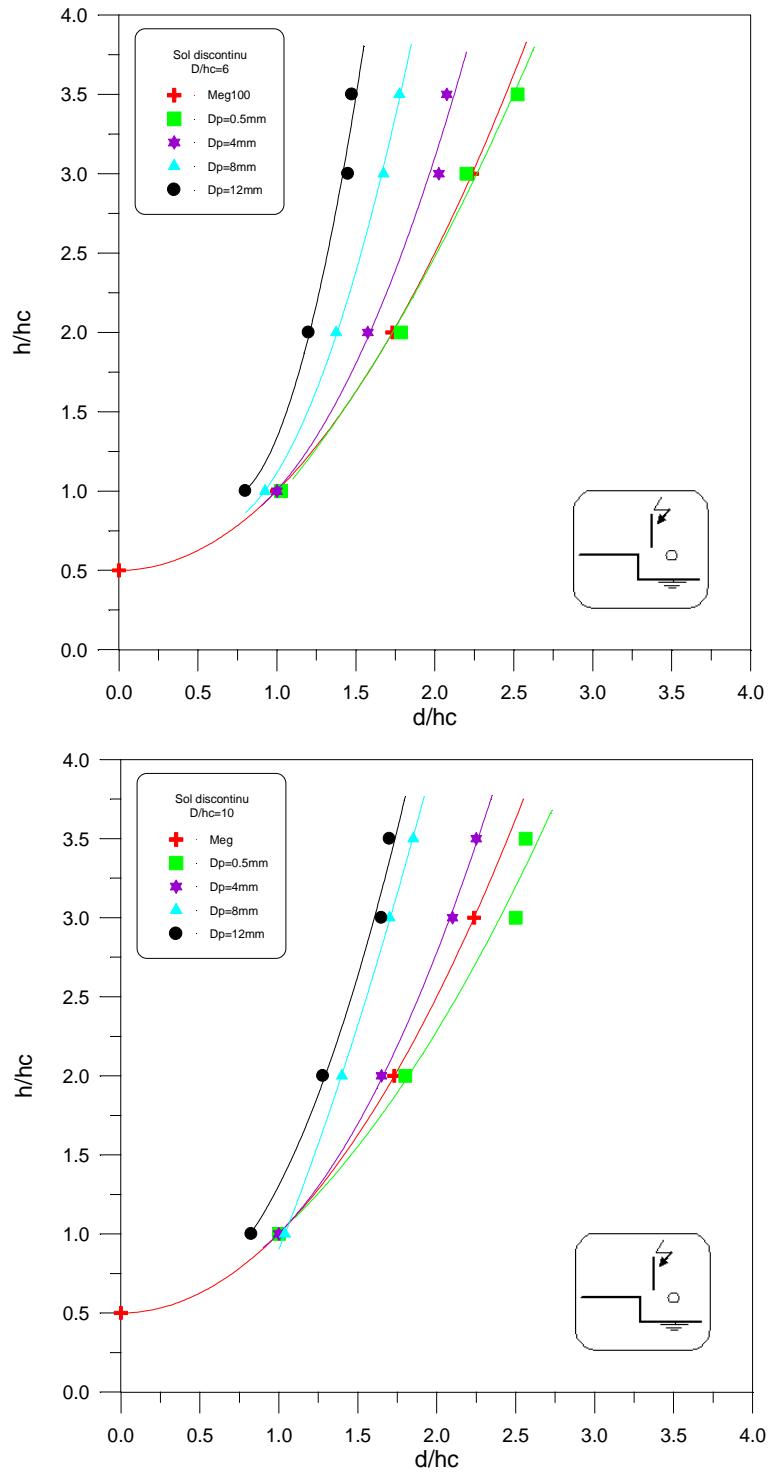


Figure V.23: Influence du diamètre du paratonnerre horizontal pour la troisième configuration.

V.5.4. Quatrième configuration : Paratonnerre horizontal situé sur la partie basse de la terre discontinue, entre l'interface et l'axe de la décharge

V.5.4.1. Influence du rapport D/hc sur les zones d'attraction

Nous remarquons que les zones d'attraction sont plus larges que celles définies dans le cas d'un sol homogène bon conducteur.

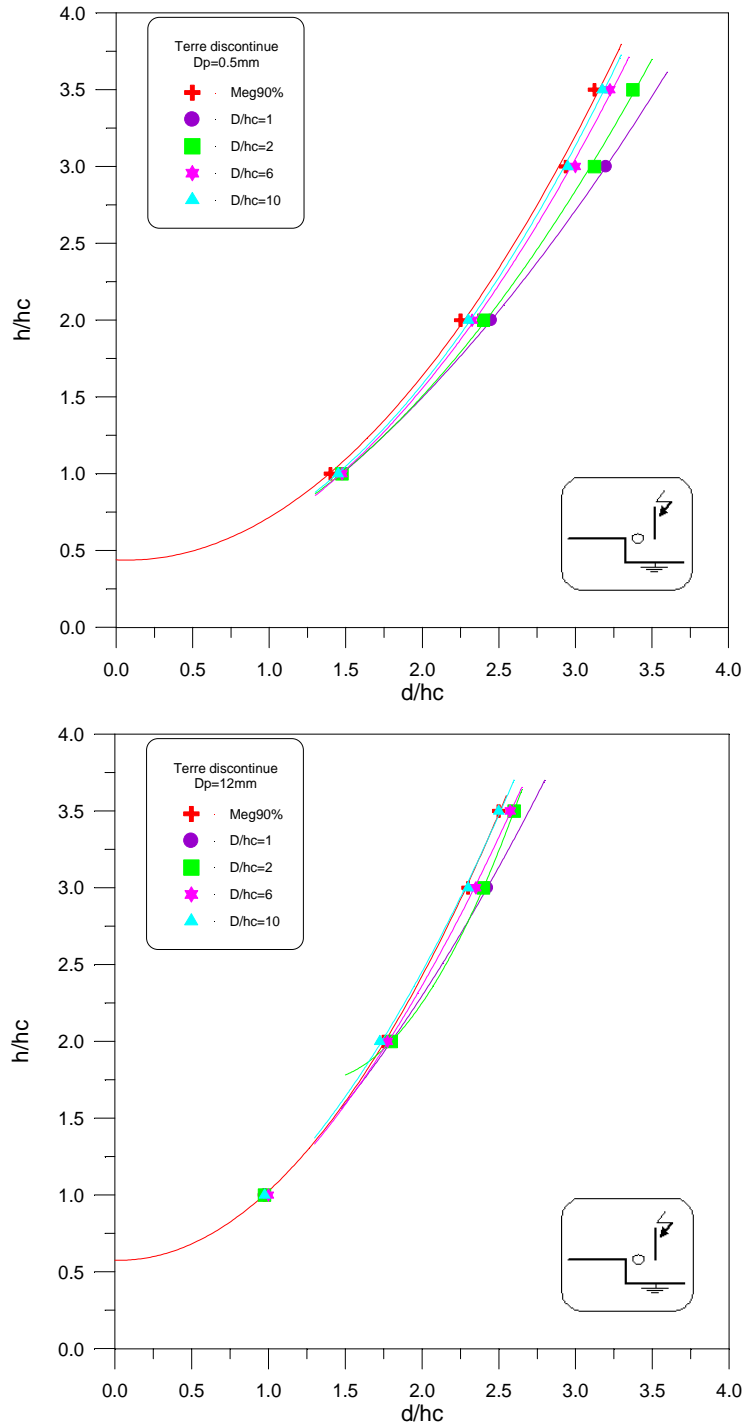


Figure V.24: Zones d'attraction pour la quatrième configuration de la terre discontinue.

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 V.24).

V.5.4.2. Influence du niveau de terre fictif

L'étude de l'influence des rapports D/h_c sur le niveau de terre fictive permet de tirer les conclusions suivantes (Figure V.25) :

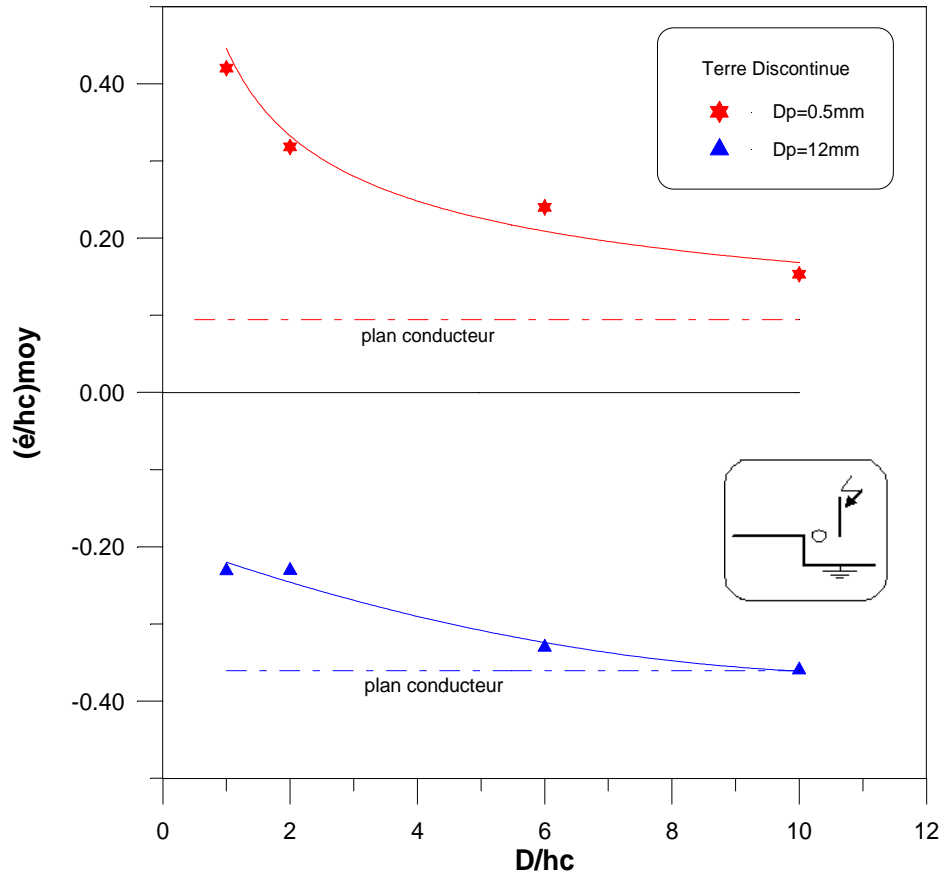


Figure V.25 : Influence des rapports D/h_c sur le niveau de terre fictive.

- Pour un diamètre du paratonnerre horizontal constant, le niveau relatif de terre fictive ϵ/h_c tend vers celui du sol homogène bon conducteur lorsque le paratonnerre s'éloigne de l'interface (D/h_c relativement grand).

- Lorsque le diamètre du paratonnerre horizontal augmente, le niveau de terre fictive diminue. Il devient négatif pour les grands diamètres ($D_P = 12mm$)[RAH05].

V.6. CONCLUSION

Notre travail consiste à déterminer les zones d'attraction d'un système de protection contre la foudre en tenant compte de la nature électrogéologique de la terre et de la forme du paratonnerre. Cette contribution aura un impact scientifique très important dans le domaine des travaux de recherche sur les décharges dans l'air et sur la foudre.

Vue la complexité de l'étude des sols hétérogènes, notre contribution pourra servir à l'élaboration d'un modèle électrogéométrique élargi dans le cas d'une terre homogène de conductivité variable. Dans ce modèle nous avons considéré un système avec terre parfaitement conductrice où toutes les longueurs verticales sont majorées d'une certaine distance appelée "niveau de terre fictive".

Nous avons d'abord confirmé dans une étude préliminaire, le modèle électrogéométrique élargi, en utilisant une terre constituée d'eau distillé de conductivité variable. Les principales conclusions de cette étude sont :

- plus le rayon de courbure du paratonnerre horizontal diminue, plus les zones d'attraction augmentent,

- les zones d'attraction sont d'autant plus petites que la conductivité du sol augmente. Elles tendent alors vers celles définies par le modèle électrogéométrique classique (sol parfaitement conducteur) et confirment ainsi les résultats présentés dans le cas du paratonnerre vertical,

- pour la détermination des zones d'attraction, le modèle électrogéométrique reste valable par rapport au niveau de terre fictive du type de sols considérés.

Par la suite nous avons considéré le cas de terre hétérogène, et il ressort de cette étude, que l'hétérogénéité du sol aurait une influence considérable sur l'attraction des décharges de foudre descendantes négatives, par un paratonnerre horizontal.

Dans le cas où la décharge évolue au-dessus de la partie conductrice du sol hétérogène, dans une zone comprise entre le paratonnerre et l'interface, le modèle électrogéométrique classique ne serait plus valable. En effet les zones d'attraction définies par ce modèle seraient plus grandes que les zones réelles.

Dans les autres cas de configurations, ce modèle reste valable, dans la mesure où les zones qu'il définit, sont plus petites que les zones réelles.

Notre travail est orienté par la suite, vers la détermination des zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal dans le cas de la terre discontinue afin de voir l'influence de la hauteur et de la position du paratonnerre par rapport à la tige haute tension.

Lorsque le paratonnerre est 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.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Notre travail a permis en premier lieu de confirmer et de compléter le modèle de protection contre la foudre élaboré à l'E.N.P concernant les terres homogènes mauvaises conductrices d'un paratonnerre vertical. Il a été ainsi orienté vers la détermination des zones d'attraction d'un système de protection contre la foudre tenant compte de la nature électrogéologique de la terre et de la forme du paratonnerre horizontal.

Du point de vue technologique et économique, ce modèle élargi est orienté vers une protection plus efficace contre la foudre que celle définie par le modèle électrogéométrique classique qui est largement utilisé actuellement.

L'objectif de notre travail a été l'étude de l'influence de la conductivité du sol sur les tensions à 50% de décharge disruptive des petits intervalles d'air tige-plan aux chocs de foudre positif et négatif. Trois configurations du sol ont été envisagées; la première concerne un sol homogène de conductivité variable, la seconde un sol hétérogène et la troisième configuration un sol discontinu.

- ✓ Dans le cas de la terre homogène, la tenue de l'intervalle dépend de la conductivité du sol. L'intervalle est plus rigide pour les plus faibles conductivités. Cette influence est du même ordre pour les deux types de polarité.
- ✓ Dans le cas de la terre hétérogène la tenue de l'intervalle d'air tige-plan dépend étroitement de la position de la tige par rapport à l'interface. Cette influence de la position est plus marquée lorsque la conductivité de la partie mauvaise conductrice est plus faible. Elle dépend donc du degré d'hétérogénéité du sol défini par le rapport des conductivités des deux composantes constituant la terre. Les comportements de l'intervalle sous les deux polarités semblent être similaires. Là aussi la question est à approfondir en utilisant, essentiellement, des modèles ayant de plus grandes épaisseurs de la couche de terre mauvaise conductrice.
- ✓ Dans le cas de la terre discontinue, la rigidité de l'intervalle dépend essentiellement de la position de la tige sous haute tension, au-dessus du sol. Une nette différence est apparue au voisinage de la discontinuité entre le comportement de l'intervalle sous tension positive et son comportement sous tension négative. L'influence de la conductivité semble dépendre de la grandeur

relative de la longueur de l'intervalle par rapport à la profondeur de la discontinuité. Les résultats sont cependant trop peu nombreux pour que cette tendance puisse être affirmée sans réserve. Il serait très intéressant de faire une étude plus approfondie de ce cas en envisageant plusieurs profondeurs et des intervalles plus longs.

Les résultats obtenus permettent aussi de faire les conclusions suivantes:

- ✓ La caractéristique linéaire de la relation liant la tension à 50% de décharge disruptive et l'intervalle est conservée pour les trois structures étudiées.
- ✓ Le système tige négative-plan reste toujours plus rigide que le système tige positive-plan pour les trois configurations.
- ✓ Le système tige-plan homogène mauvais conducteur est équivalent à un système tige-plan parfaitement conducteur dont la longueur est majorée d'une certaine valeur dépendant de la conductivité du sol mauvais conducteur.

Ce travail nous a permis d'examiner et de voir l'influence de la nature électrogéologique du sol sur les zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal. Trois configurations du sol ont été étudiées; la première concerne un sol homogène, la seconde un sol hétérogène et la troisième configuration une terre discontinue.

Les résultats obtenus, nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- ✓ Dans le cas de la terre homogène, les zones d'attraction des paratonnerres pourraient être plus larges que celles définies par le modèle électrogéométrique. Cet élargissement dépendrait surtout du rayon de courbure du paratonnerre et de la nature de la terre mauvaise conductrice, ainsi que de la hauteur du paratonnerre. Plus le rayon de courbure du paratonnerre horizontal diminue, plus la zone d'attraction de ce dernier serait large. Il en est de même lorsque la conductivité du sol diminue. Elles tendent alors vers celles définies par le modèle électrogéométrique classique (sol parfaitement conducteur) et confirment ainsi les résultats présentés dans le cas du paratonnerre vertical.
- ✓ Dans le cas de la terre hétérogène, il ressort que l'hétérogénéité du sol aurait une influence considérable sur l'attraction des décharges de foudre descendantes négatives, par un paratonnerre horizontal.

Dans le cas où la décharge évolue au-dessus de la partie conductrice du sol hétérogène, dans une zone comprise entre le paratonnerre et l'interface, le

modèle électrogéométrique classique ne serait plus valable. En effet les zones d'attraction définies par ce modèle seraient plus grandes que les zones réelles. Dans les autres cas de configurations, ce modèle reste valable, dans la mesure où les zones qu'il définit, sont plus petites que les zones réelles.

- ✓ Dans le cas de la terre discontinue, les zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal, dépendrait en premier lieu de la position de l'axe de la décharge par rapport à l'interface et au paratonnerre. Ceci serait dû au champ électrique relativement intense au voisinage de l'interface.

Pour toutes les configurations étudiées, l'influence de l'interface des deux parties de la terre discontinue sur les zones d'attraction est plus marquée, lorsque le paratonnerre est situé très proche de l'interface. Par contre, lorsque le paratonnerre 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 le paratonnerre est 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. Cet élargissement dépend de la distance horizontale du paratonnerre par rapport à l'interface. Par contre, lorsque la décharge évolue sur la même partie de la terre dans une zone comprise entre l'interface et le paratonnerre, les zones d'attraction sont plus réduites lorsque ce dernier est très proche de l'interface.

Dans le cas où le paratonnerre est situé sur la partie basse de la terre discontinue, en plus de la position du paratonnerre, l'influence de la discontinuité de la terre dépend étroitement de la grandeur relative de la hauteur du paratonnerre par rapport à la profondeur de la partie basse de la terre. Plus cette grandeur relative est petite, plus la zone d'attraction du paratonnerre serait réduite.

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.

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

En perspectives à ce travail, nous proposons des travaux sur la mesure du champ électrique dans un système tige-plan avec la méthode de la sonde sous tension de choc de foudre:

- En utilisant un modèle expérimental avec terre discontinue de différentes profondeurs de l'interface.
- En utilisant des modèles de paratonnerre vertical ou horizontal avec différents diamètres.
- En utilisant un modèle expérimental avec terre hétérogène (partie bonne conductrice et partie à conductivité variable).

Nous proposons aussi d'effectuer des calculs numériques de champ pour différentes configurations du sol en introduisant des structures mises à la terre (paratonnerre) dans les intervalles tige-plan. En effet, la prédiction des tensions disruptives de ces intervalles d'air permettra de prévoir une meilleure protection contre la foudre.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [AGU87] M. Aguet ; " Haute Tension " , Vol. XXII, Presses Polytechniques Romandes, 1987.
- [AIT08] S. Ait-Amar and G. Berger ;" Lightning Protection Modeling " , 6^{ème} Conférence de la Société Française d'Electrostatique, SFE2008, july 7-9, 2008, Paris (France).
- [AND79] R. B. Anderson, A. J. Eriksson; " Lightning parameters for engineering application " , CIGRE Study Committee 33, Juin 1979, pp. 25-29.
- [AND80] R. B. Anderson, A. J. Eriksson ; " Les paramètres de la foudre en vue d'une application industrielle " , Electra N° 96, 1980, pp. 65-101
- [BAZ07] Bazelyan E. M., Raizer Yu. P. and Aleksandrov N. L; " The effect of reduced air density on streamer-to-leader transition and on properties of long positive leader " , J. Phys. D: Appl. Phys., vol. 40, pp. 4133–4144, 2007.
- [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.
- [BEN96] Ben Rhouma A ; " Caractérisation et modélisation des champs électromagnétiques rayonnés par les décharges de foudre en vue de l'élaboration d'un simulateur expérimental " , Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon (France), 1996.
- [BER75] K. Berger, R. B. Anderson, H. Kroninger ; " Paramètres des coups de foudre" , Electra (F), N°41, 1975. pp : 23 - 37.
- [BOU87] A. Boubakeur, J. Ferras ; " Négative lightning breakdown of rod-plane air gaps with heterogeneous earth " , Proceeding of the 5th 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^{er} 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 : 100-1035.
- [BOU95a] 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. 1995.
- [BOU95b] A. Boubakeur, R. Belaïcha ; " Influence of earth conductivity on the negative lightning breakdown of rod-plane air gaps " , 9th ISH', Vol. 96, Paper 6711, Graz, Austria, 1995.

- [BOU96] A. Boubakeur R. Belaicha, **A. Rahmani**, R. Boudissa ; " Influence of earth conductivity on the capture zones of an horizontal lightning conductor ", 23rd 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 IEEA, Vol.1, N°1, Dec. 1997.
- [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).
- [DAV88] Davies A.J., Rowlands A.R., Turri R., and Waters R.T.: "Statistical analysis of flashover data using a generalised likelihood method". Proc IEE, 135, 1988, pp. 79-87
- [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.
- [FOF96] I. Fofana ; "Modélisation de la décharge positive dans les grands intervalles d'air", Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon (France), 1996.
- [GAL79] I. Gallimberti ; "The mechanism of long spark formation", J. Phys., N°7, tome 40, pp. 193-250, 1979.
- [GAL92] I. Gallimberti, A. Bondiou, "Modélisation des décharges précurseurs des éclairs", Rapport interne ONERA, 1992.
- [GAR74] H. Garcia and B. Hutzler; "Electrical breakdown in long air gaps. The final jump", IEE Conf. on Gas Discharges, pp 206-10, London (GB), 1974.
- [GAR75] C. Gary, Cimador A., et Fieux R ; "La foudre : étude du phénomène – application à la protection des lignes de transport", RGE, tome 84, N° 1, pp 24-35, 1975
- [GAR 84] C. Gary, G. Le Roy, B. Hutzler, J. Lalot and C. Dubanton; " Les propriétés diélectriques de l'air et les très haute tensions ", Collection de la DER d'EDF, N° 51, Eyrolles, 1984.
- [GAR94] C. Gary ; " La foudre : Des mythologies antiques à la recherche moderne ", Masson, Paris, 1994.
- [GAR89] C. Gary ; " La foudre et les phénomènes orageux ", RGE, N°03, Mars 1989.
- [GOL77] R. H. Golde ; " Physics of lightning ", Volume 1, Academic Press, 1977.
- [GOL81] R. H. Golde ; " Lightning :T2 ", Academic Press, 2^{ème} édition, London, 1981.
- [HAL95] S. Hallama : " Protection des installations industrielles contre les effets de la foudre ", INERIS, N°22, Juillet-Aout 1995
- [HOR91] T. Horvath; " Computation of Lightning Protection ", Research Studies Press LTD, England 1991
- [HUT88] B. Hutzler ; " Simulation de la foudre en laboratoire ", EDF bulletin de la direction des études et recherche- série B, Réseau électrique et matériels électriques, N°3, pp. 31-40, 1988.
- [HUT89] Hutzler B. and C. Gary ; " Simulation en laboratoire de l'impact au sol ", RGE, N°03, Mars 1989.
- [HUT92] Hutzler B. and Hutzler D., " Modélisation de l'amorçage des grands intervalles d'air ", Bulletin de la DER d'EDF, N° 4, pp. 11-34, 1992.

- [KLE74] Klewe R. C., Waters R.T. and Jones B;" Breakdown phenomena in long air gaps under switching impulse conditions ", ch. 4, Review of models of breakdown IEEE Summer Meeting, paper 74-CH 0910 PWR, 1974.
- [KRU79] Z. Krulk, " Nouvelles prospections géologiques et géoélectriques du danger d'atteinte par la foudre", 15 Conf. Int. Protec. Contre la Foudre, R-3.10, 1979.
- [KUF84] E. Kuffel, W. S. Zaengl: " High voltage engineering ", Pergamon Press, G.B; 1^{ère} Ed; 1984. pp: 463-488.
- [LAL96] P. Lalande ; " Etude des conditions de foudroiement d'une structure au sol ", Thèse de Doctorat, Université de Paris-sud (France), 1996.
- [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.
- [LET80] C. Leteinturier, B. Djebbari, J. Hamelin, J. Fontaine, " Electromagnetic field emitted by lightning stroke. Theoretical model taking into account the ground conductivity. Comparison with experimental measurements made at Saint-Privat d'Allier ", 5^{ème} Symp. Int. EMC Wroclaw, Pologne 1980, pp 663-671.
- [NAC91] K. Nacereddine, A. Boubakeur ; " Simulation numérique de la foudre : Le programme PROC2D ", Colloque Maghrébin sur les modèles numériques de l'ingénieur, Tunis, Oct. 1991.
- [NAC92] K. Nacereddine ; " Protection contre la foudre sur un sol hétérogène ; simulation numérique ", Thèse de Magister, ENP, Alger, Algérie, 1992.
- [NAC93] K. Nacereddine, A. Boubakeur ; " Influence de la permittivité relative du sol sur l'attraction des décharges de foudre ", Colloque Maghrébin sur les modèles numériques de l'ingénieur, Alger, 1993.
- [ORT94] P. Ortega, Domens, A. Gibert, B. Hutzler, G. Riquel; " Performance of 16. 7 m air rod – plane gap under a negative switching impulse ", J. Phys.: D, vol. 27, pp. 2379-2387, 1994.
- [OUY67] M. Ouyang ; " interception of impulse tests " Electri Times, Vol 151, 167, p165-167
- [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.
- [RAH01a] **A. Rahmani**, A. Boubakeur, H. Brouri; "Influence of earth discontinuity on the capture zones of an horizontal lightning conductor" International Conference on Advances in Processing, Testing and Application of Dielectric Materials, APTADM'2001 Wroclaw (Poland) 2001.
- [RAH01b] **A. Rahmani**, A. Boubakeur, H. Brouri ; "Zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal dans le cas d'une terre discontinue", 4^{ème} internationale conférence on Electric Charges in non-Conductive Materials Tours (France) CSC'4 :La revue Vide : science, technique et applications Numéro spécial actes et colloque 2001
- [RAH02] **A. Rahmani**, A. Boubakeur, H. Brouri; " model of an horizontal lightning conductor protection in the case of earth discontinuity ", EMC Europe 2002, pp 267-270, Sorrento, Italy , 2002.

- [RAH04] **A. Rahmani**, O. Rahmani, A. Boubakeur; " Influence of the Position of an Horizontal Lightning Conductor in the Case of Earth Discontinuity ", SFE2004, pp. 353-357, Poitiers (France) 2004
- [RAH05] **A. Rahmani** , A. Boubakeur, H. Brouri; " Protection Model of an Horizontal Lightning Conductor in the Case of Earth Discontinuity", IEEE-PES , paper N° 633 ; ISBN: 5-93208-034-0, St-Petersburg, Russie , Juin 2005.
- [RAH08] **A. Rahmani**, A.Boubakeur, S. A. A. Boumaza; " The effect of earth conductivity, homogeneity and heterogeneity on lightning breakdown of short air gaps ". 6^{ème} Conférence de la Société Française d'Electrostatique, SFE2008, july 7-9, 2008, Paris (France) pp. 291-296.
- [RAH09] **A. Rahmani**, A. Boubakeur, S. A. A. Boumaza, A. Mekhaldi, M. Matallah; " Effect of earth conductivity, heterogeneity and discontinuity on the lightning breakdown of short air gaps " , Archives of Elect Eng. Vol. LVIII. N° 3-4, pp. 97-105, 2009.
- [RAK08] J. H. Rakotonandrasana ; " Modélisation de la décharge négative dans les grands intervalles d'air - Application à la foudre ", Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon (France), 2008.
- [REN77] Groupe des Renardières, " L'amorçage en polarité positive des grands intervalles d'air aux Renardières ", Electra, N° 53, 1977.
- [REN81] Groupe des Renardières, " L'amorçage en polarité négative des grands intervalles d'air aux Renardières ", Electra, N° 74, 1981.
- [ROU94] A. Rousseau, C. Gary, G. Berger ; " Foudre et protection des bâtiments ", Techniques de l'Ingénieur, Fascicule C.3307, Janvier1994.
- [RUB95] Rubinstein M., Rachidi F., Uman M. A., Thottapillil R., Rakov V. A. and Nucci A; " Characterization of vertical electric fields 500 m and 30 m from triggered lightning ", J. Geophys. Res., vol. 100, No D5, pp. 8863-72, 1995.
- [SCH56] B. F. J. Schonland, " The lightning discharge ", Handb. Phys., 22, 576-628, 1956.
- [SCU88] V. Scuka, S. Lunquist, S. Sangkassad ; " Effect of earthing resistance of lightning interception" 19eme conférence internationale sur la protection contre la foudre, Autriche, 1988 pp.69 - 74.
- [SZU79] G. Szunyogh, " Solution et explication mathématique de fulminabilité géologique ", 15^{ème} Conf. Int. Protec. Contre la Foudre, R-3.5, 1979.
- [THO85] E. M. Thomson, M. A. Uman and W. H. Beasley; " Speed and current for lightning stepped leader near ground as determined from electric field records ", J. Geophys. Res., vol. 90, pp. 8136-8142, 1985
- [UMA87] M. A. Uman; " The lightning discharge ", Int. Geophys. series, N. Y. Academic press, vol. 39, 1987
- [UMA97] M. A. Uman, V. A. Rakov, K. J. Rambo, T. W. Vaught, M. I. Fernandez, D. J. Cordier, R. M. Chandler, R. Bernstein and C. Golden; " Triggering-lightning experiments at Camp Blanding, Florida ", Trans. IEE Japan, 117-B, pp. 446-52, 1997.