

---

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



**UNIVERSITE DE M'SILA**  
**FACULTE DE TECHNOLOGIE**  
**DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE**

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME**  
**D'INGENIEUR D'ETAT EN GENIE ELECTROTECHNIQUE**

**OPTION : COMMANDE ELECTRIQUE**

**THEME**

**ETUDE DE L'INFLUENCE DE LA NATURE DU SOL**  
**SUR LES ZONES D'ATTRACTION D'UN**  
**PARATONNERRE VERTICAL**

**Proposé et dirigé par:**

**Mr. CHOUCOU A/Madjid**

**Présenté par :**

**AMARI DJAMAL EDDINE**

**SMATI OMAR**

**MOHAMED YAHYA OULD MED**

**Année Universitaire : 2010 / 2011**

---

## Remerciements

*Avant tout on remercie ALLAH tout puissant pour sa générosité de nous donner la santé, la volonté et la patience tout au long de la vie universitaire.*

*Ensuite, nous adressons nos sincères remerciements à nos enseignants notamment à notre promoteur CHOUCOU A bd el Madjid. Qui franchement nous a donné son maximum en vue d'élaborer un très bon mémoire ; sans oublier aussi ses conseils permanents, ses orientations efficaces et sa grande patience.*

*On tient à exprimer notre profonde gratitude aux membres de jury.*

*Nous remercions avec sincérité toutes les personnes qui ont nous contribué de près ou de loin à réussir ce travail.*

*Nos vives salutations.*

---

# Sommaire

---

<b>INTRODUCTION GENERAL.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Physique décharge et protection contre foudre</b>	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Le condensateur terrestre.....	3
I.3 Nuage orageux.....	4
I.4. EFFET COURONNE AU SOL.....	6
I-5 Différents types de décharges.....	7
I.5.1 Décharges Nuage – Sol.....	7
I.5.2 Décharges intra – nuages.....	8
I.5.3 Décharges entre nuages.....	8
I.6 Déroulement d’un coup de foudre .....	8
I.6.1 Descriptions d’un coup de foudre.....	8
I.6.2 Classification des coups foudre.....	9
I.6.2.1 Coup de foudre ascendant.....	9
I.6.2.2 Coup de foudre descendant positif.....	10
I.6.2.3 Coups de foudre descendants négatif.....	10
I.7 LE LEADER NEGATIF .....	12
I.7.1 Caractéristiques physiques du leader.....	12
I.7.2 Modèles de représentation du leader.....	13
I.7.2.1 Modèle d’Aleksandrov.....	13
I.7.2.2 Modèle de Gallimberti.....	13
I.8 Protection contre la foudre.....	13
I.8.1 Mécanisme d’impact d’un coup de foudre descendant négatif.....	13
I.8.1.1 Distance d’amorçage .....	15
I.8.1.2 Structure du champ généré au sol par un traceur descendant .....	15
I.8.2 Modèle électro-géométrique de base.....	17
I-9 Méthode graphique de détermination de la zone de protection.....	18
I -9-1 Méthodes de la sphère fictive.....	18
I.9.2 Application pour le cas de protection d’une tige verticale.....	19

I.9.3 Zone de capture d'une tige verticale.....	20
I.10 CONCLUSION.....	22
<b>Chapitre II : Influence de la nature du sol sur les zones d'attraction d'un paratonnerre vertical</b>	
II.1 Introduction.....	23
II.2 MODELES EXPERIMENTAUX REDUITS.....	23
II.2.1 Sol homogène bon conducteur .....	23
II.2.2 Sol homogène mauvais conducteur.....	24
II.2.3 Sol discontinu.....	24
II.3. CONFIGURATIONS ETUDIEES.....	24
II.4 PRESENTATIONS DES RESULTATS OBTENUS.....	26
II.4.1 Modèle électro-géométrique sur un sol homogène bon conducteur.....	26
II.4.2 Terre mauvaise conductrice.....	27
❖ Influence de la conductivité et de l'épaisseur "e" du sol sur les zones d'attraction...28	
II.4.3 Terre discontinue.....	30
❖ Paratonnerre situé sur la partie haute de la terre discontinue entre l'interface et l'axe de la tige.....	30
❖ Paratonnerre sur la partie haute de la terre discontinue, et l'axe de la tige situé entre l'interface et le paratonnerre.....	31
❖ Paratonnerre sur la partie basse de la terre discontinue et l'axe de la décharge situé entre l'interface et le paratonnerre.....	32
❖ Influence du rapport $hc/e$ sur les zones d'attraction du paratonnerre.....	34
❖ Paratonnerre situé sur la partie basse de la terre discontinue entre l'axe de la décharge et l'interface.....	35
❖ Influence du rapport $hc/e$ sur les zones d'attraction.....	36
II.5 CONCLUSION.....	38
 Chapitre III : Modèles de protection avec prise en charge de la nature électro-géologique du sol	
III.1 INTRODUCTION.....	40
III.2 CRITIQUE DU MODÈLE ÉLECTRO-GÉOMÉTRIQUE.....	40

---

### III.3 MODELES PROPOSES A LA PLACE DU MODELE

ELECTRO-GEOMETRIQUE.....	42
III.3.1 Modèle équivalent avec niveau de terre fictive.....	42
III.3.1.1 Application du modèle sur les zones d'attraction d'un paratonnerre vertical avec une terre mauvaise conductrice .....	42
III.3.1.2 Cas d'un sol discontinu.....	44
❖ Influence du rapport $hc/e$ sur le niveau de terre fictive.....	44
❖ Influence du rapport $D/hc$ sur le niveau de terre fictive.....	45
III.3.2 Distance d'amorçage.....	46
III.3.3 Modèle électro-géométrique révisé (REGM).....	47
III.3.3.1 Description de MEG révisé.....	47
❖ Protection Contre le Courant du Coup Id.....	49
❖ Protection contre les coups de foudre avec des courants plus grands que $I_d$ .....	52
❖ Protection Contre les coups de foudre avec des courants inférieurs à $I_d$ .....	53

### III.4 APPLICATION DU MODELE ELECTRO-GEOMETRIQUE

REVISE DANS LE CAS D'UNE TERRE HETEROGENE.....	55
III.4.1 Modèle électro-géométrique révisé REGM90%.....	55
III.4.2 Application de REGM pour le cas d'une terre homogène mauvaise conductrice.....	56
III.4.2.1 Influence de la conductivité et de l'épaisseur "e" du sol sur les zones d'attraction paratonnerre vertical.....	57
III.4.3 Application de REGM pour le cas d'une terre discontinue.....	61
III.4.3.1 Influencer du rapport $hc/e$ sur les zones d'attraction du paratonnerre.....	61
III.4.3.2 Influencer du rapport $hc/e$ sur les zones d'attraction du paratonnerre.....	62
III.4.3.3 paratonnerre sur la partie haute de la terre discontinue, et l'axe de la tige situe	

---

entre l'interface et le paratonnerre.....	63
III.4 paratonnerre sur la partie basse de la terre discontinue et l'axe de la décharge situé entre l'interface et le paratonnerre.....	64
III.5 CONCLUSION.....	65
Chapitre IV : Modélisation de charge négative	
IV.1 INTRODUCTION.....	66
IV.2 STRUCTURE GENERALE DE LA DECHARGE.....	66
IV.3 PARAMETRES CARACTERISTIQUES DE LA DECHARGE.....	68
IV.3.1 Nature du gaz.....	68
IV.3.2 Géométrie de l'intervalle.....	69
IV.3.3 Contraintes de tension.....	69
IV.4 ETUDE DU GENERATEUR D'IMPULSIONS.....	70
IV.4.1 Principe de fonctionnement d'un générateur de choc.....	70
IV.4.2 Représentation du générateur d'impulsions par circuits électriques équivalents.....	72
IV.4.2.1 Analyse du premier circuit équivalent.....	73
IV.4.2.2 Analyse de deuxième circuit équivalent.....	75
IV.5 ETUDE DU GENERATEUR DE CHOC (TYPE MARX).....	75
IV. 6 APPLICATIONS SUR LES TENSIONS REELLES.....	80
IV.6.1 Ondes de type (500/10000) $\mu$ s.....	80
IV.6.2 Ondes de type (1.2/50) $\mu$ s.....	81
VI.7 CONCLUSION.....	82
CONCLUSION GENERALE.....	83



---

## **INTRODUCTION GENERALE**

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

En effet, la foudre cause d'importants dégâts, sans compter les victimes entre êtres humains et animaux, des incendies, des explosions de liquides ou gaz inflammables. Régulièrement, la foudre met en feu des fermes, provoque de nombreuses destructions d'équipements électriques et électroniques, industriels et domestiques. Les réseaux de transport et de distribution d'énergie électrique sont frappés par un nombre très important de coups de foudre, des compteurs électriques sont détruits...et nous pouvons ainsi continuer sur des pages entières la liste des dégâts et accidents causés par la foudre. Les dommages se chiffrent chaque année en termes de milliards.

Dans le but d'atteindre une meilleure protection contre la foudre, des travaux de recherche sont menés grâce au développement de nouvelles méthodes de détection et de localisation des coups de foudre à une connaissance améliorée du processus physique de la décharge, à une meilleure compréhension de l'interaction entre la foudre et une structure au sol et à des conditions d'essais plus valides. Ces travaux ont permis d'élaborer une nouvelle méthode de détermination de la zone de protection d'une tige verticale. Cette méthode est basée sur la connaissance du mécanisme d'impact de la foudre et est mise en œuvre au moyen d'un modèle mathématique appelé le modèle électro-géométrique.

Dans le domaine de la protection contre la foudre, le modèle électro-géométrique classique est le plus utilisé ; néanmoins, ce modèle s'applique dans le cas d'un sol homogène et parfaitement conducteur, hypothèse rarement rencontrée en pratique, vues les différentes propriétés électro-géométrique que présente le sol au dessous d'un nuage orageux.

---

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

Dans le deuxième chapitre ; nous présentons une synthèse de travaux sur l'influence des propriétés électro-géologiques du sol sur les zones d'attraction d'une tige de Franklin en utilisant des modèles réduits et stations d'essais en laboratoire avec une reproduction artificielle des coups de foudre

Le troisième chapitre ; sur la base de ces résultats, toutes les équations déjà élaborées par les chercheurs, concernant les hauteurs de paratonnerre ainsi que les distances protégées au sol, prendront en considération cette notion de niveau de terre fictive en fonction de la conductivité du sol. Le modèle électro-géométrique fut alors élargi dans le cas de terre mauvaise conductrice et terre discontinue. Une alternative sera proposée pour ce modèle concernant le modèle électro-géométrique révisé.

Dans le quatrième chapitre, nous essayons de s'approcher vers un modèle numérique de la décharge de foudre, un modèle qui va permettre de faciliter relativement l'étude de la foudre en passant vers une simulation numérique du phénomène par l'intermédiaire d'une modélisation globale de la décharge qui tient compte simultanément des quatre principales phases : streamers, leader, saut final et arc en retour. Pour cela, nous commençons par l'étude numérique du générateur de choc et de l'onde de foudre générée afin de l'utiliser par la suite dans le modèle global de la décharge négative.

---

# CHAPITRE I

## PHYSIQUE DECHARGE DE Foudre ET PROTECTION CONTRE Foudre

### 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 encornes.

Dans ce chapitre, nous décrivons les différents aspects phénoménologiques caractérisant les décharges atmosphériques. Nous parlerons de l'origine de la foudre et de la nécessité de son existence dans la nature, pour maintenir un équilibre électrostatique entre la terre et son environnement (RAK08).

## I.2 LE CONDENSATEUR TERRESTRE

On peut considérer la terre comme un gigantesque condensateur sphérique, dont les armatures seraient constituées par le globe lui-même et par l'électro-sphère ; zone conductrice de l'atmosphère. Entre les deux, la troposphère et la stratosphère constituent le diélectrique dont l'épaisseur est de l'ordre de cinquante kilomètres. Des mesures montrent qu'il existe par beau temps, un champ électrique faible permanent dirigé vers le bas (c'est à dire la haute atmosphère chargée positivement et la terre chargée négativement), dont l'amplitude est de l'ordre de 100 à 150 V/m (DJA08).

À un champ de 100 V/m correspond une densité de charge superficielle moyenne à la surface Du sol de :

$$\sigma = E \times \epsilon_0 \quad (I.1)$$

Avec :

$\sigma$  : densité de charge superficielle en coulombs par mètre carré (C/m<sup>2</sup>)

E : champ électrique en volts par mètre (V/m)

$\epsilon_0$  : diélectrique du vide =  $8.854 \times 10^{-12}$  (pF/m)

L'air étant légèrement conducteur, des charges positives peuvent être apportées à la terre.

La densité égale a :

$$J = \gamma \times E \quad (I.2)$$

Avec :

J : densité de courant en ampères par mètre carré (A/m<sup>2</sup>)

$\gamma$  : conductivité de l'air ( $3 \times 10^{-14}$  s/m)

---

On en déduit que la densité superficielle de la charge à la surface de la terre est d'environ  $8.85 \times 10^{-10}$  (C/m) et que la densité de courant qui circule est de  $3 \times 10^{-12}$  (A/m). La surface de la terre étant d'environ  $5 \times 10^{14}$  m<sup>2</sup>. Un courant permanent de 1500 A circule et le condensateur devrait donc se décharger en 300s. Or le champ électrique terrestre est permanent. Seules quelques légères variations sont observables en cours de journée.

Un bilan global permet de comprendre ce paradoxe apparent. Un nuage orageux est chargé positivement en partie haute et négativement en partie basse. Les échanges électriques sous le nuage s'effectuent suivant deux mécanismes :

- Environ 90% des éclairs apportent une charge négative à la terre.
- La pluie.

Le bilan global est de l'ordre de 1A par orage. Le nombre d'orages simultanément présents autour du globe est compris entre 1500 et 2000, ce qui correspond au courant de beau temps calculé ci-dessus. Le schéma électrique global peut être représenté de cette manière :

- Les charges positives d'un orage sont transférées vers l'électro-sphère et sont redistribuées pour fournir le courant de beau temps.
- Les charges négatives sont apportées au niveau du sol par les éclairs et le phénomène orageux.

La foudre participe à l'équilibre électrique de notre planète. (Dja08)

### **I.3 NUAGE ORAGEUX**

Un nuage orageux est généralement un cumulo-nimbus. Un tel nuage peut s'étendre sur plusieurs kilomètres carrés ; sa base se trouve à environ 2 à 3 km au-dessus du sol et il se développe en hauteur jusqu'à des altitudes de 10 à 15 km.

Les orages de convection ou orages isolés, naissent de l'effet combiné de l'humidité et du réchauffement local du sol : il se forme alors une « bulle » d'air chaude et humide, qui s'élève pratiquement isolée thermiquement de l'air environnant. Cette bulle formera un nuage orageux aux altitudes où la condensation commencera. C'est l'orage de chaleur, souvent très localisé, dont la durée n'excède pas une heure et demi environ.

En revanche, les orages frontaux naissent de la rencontre de masses d'air importantes, de température et d'humidité différente. Cette rencontre produit également des courants

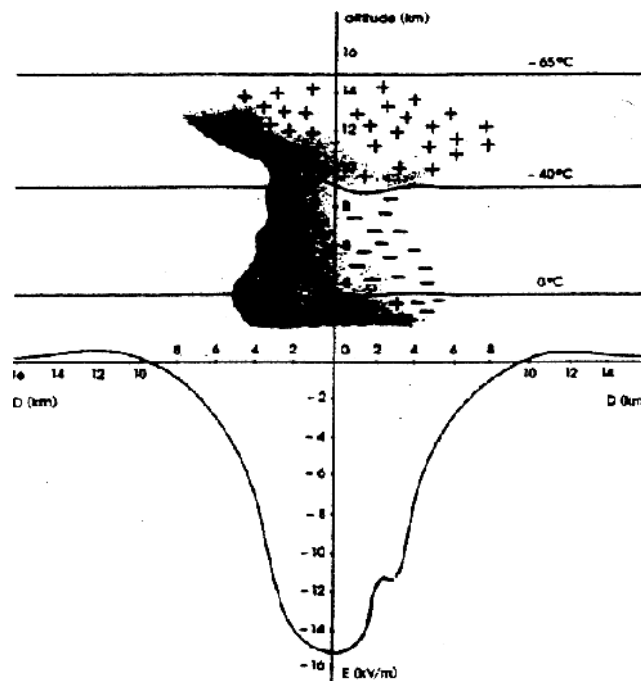
---

ascendants accompagnés de condensation. Les fronts orageux ainsi formés peuvent durer plusieurs jours et se propager sur des milliers de kilomètres.

On distingue deux sortes de structure orageuses, les orages frontaux, qui peuvent se déplacer sur des centaines de kilomètres. Lorsque ces structures se forment, entrent toujours en jeu des conflits entre masses d'air chaudes et humides et masses d'air froides.

Parallèlement à ces phénomènes thermodynamiques, il se produit une séparation et un transfert de charges électriques au sein du nuage. Sans entrer dans le détail de ces processus d'électrisation, extrêmement complexes, il est à retenir seulement que le résultat net est que la partie supérieure des nuages orageux, constituée de cristaux de glace, se charge positivement, tandis que leur base se charge négativement. Il est souvent observé un îlot de charges positives enserré dans la masse négative.

Lorsque le nuage est mûr pour éclater en orage, il constitue ainsi un vaste dipôle électrique, créant des champs électriques intenses entre les différentes couches intérieures, de même qu'entre sa base et la surface de la terre. Ces champs sont la source nécessaire à la formation de décharges électriques, qui peuvent être soit des décharges : intra nuages, inter nuage ou la foudre proprement dite, qui jaillit entre le nuage et la terre. La figure (I.1) schématise la structure électrique d'un cumulo-nimbus orageux.



**Figure-I.1:** Développement d'un nuage orageux en fonction de la distance horizontale et de l'altitude.

Au moment de la formation ou de l'approche d'un nuage chargé, sous l'influence des charges négatives qui sont disposées à sa base, et dont l'effet devient prépondérant, le champ électrique au sol commence à s'inverser, puis croît dans de fortes proportions. Lorsque son intensité atteint -10 à -15 kV/m, une décharge au sol est imminente. Cette inversion, puis cette forte croissance du champ électrique, est donc le premier signe annonçant la chute probable de la foudre.

Le signe négatif qui affecte la valeur du champ résulte de la convention des sens choisis : le champ est négatif lorsque les charges électriques atmosphériques sont négatives (Dja08).

#### **I.4. EFFET COURONNE AU SOL**

Les valeurs de champ électrique au sol indiquées précédemment supposent un sol horizontal plat. Or, on sait que toute aspérité, par un effet de concentration des lignes de champ électrique, peut considérablement augmenter le champ local. On peut calculer qu'au sommet d'une demie sphère posée sur un plan le champ est le triple du champ moyen.

---

Lorsque la demi-sphère se déforme pour devenir un demi-ellipsoïde pointu, cet effet s'accroît encore.

Ainsi, pour un rapport entre grand axe et petit axe de l'ellipsoïde égal à 30, le champ est multiplié par un facteur de 300. Comme le seuil d'ionisation de l'air atmosphérique est de l'ordre de 25 kV/cm, dans ces conditions particulières, il suffit d'un champ ambiant d'une dizaine de kilovolts par mètre pour provoquer un effet de couronne au sommet de l'ellipsoïde. Ce phénomène a été observé dès l'antiquité sur des extrémités de lances et autres objets pointus et était également connu des marins sous le nom de feu de Saint-Elme, alors qu'il se produisait au bout des mâts des bateaux.

Il est aussi connu des alpinistes, qui savent que son apparition signifie danger immédiat et qu'il convient alors de s'éloigner rapidement des cimes. (Daj08)

## **I-5 DIFFÉRENTS TYPES DE DÉCHARGES**

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 le troisième est ce qu'on appelle la foudre. Dans les régions tempérées, il y a en moyenne trois éclairs pour une décharge de foudre. 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 (Rak08).

La foudre est un ensemble de phénomènes physiques et électriques complexes qui se présente dans la nature sous différentes formes (Fof96) :

### **I.5.1 Décharges Nuage - Sol**

Parmi toutes les formes de décharges atmosphériques, la décharge nuage - sol est la moins fréquente mais certainement la plus contraignante et la mieux étudiée. Elle représente à peu près le tiers de la totalité des décharges atmosphériques que connaît le globe terrestre. Ce pourcentage est fonction des conditions météorologiques et physiques (Humidité, température, localisation des charges dans le nuage,...), de l'altitude du nuage et enfin de la latitude. Elle se présente sous la forme d'une succession de décharges "nuage - sol - nuage" appelées coups de foudre.

---

### **I.5.2 Décharges intra - nuages**

Contrairement aux décharges nuage - sol, la décharge intra - nuage est de loin la plus fréquente mais la moins étudiée. Elle se présente sous la forme d'une succession d'arcs électriques qui se tendent entre une ou plusieurs poches de charges opposées contenues dans un même nuage. En règle générale, ces arcs sont fortement ramifiés et se produisent à l'intérieur du nuage. Mais il arrive parfois qu'ils sortent du nuage pour y revenir en passant par l'extérieur, formant ainsi une espèce de pont très lumineux et visible de la terre.

### **I.5.3 Décharges entre nuages**

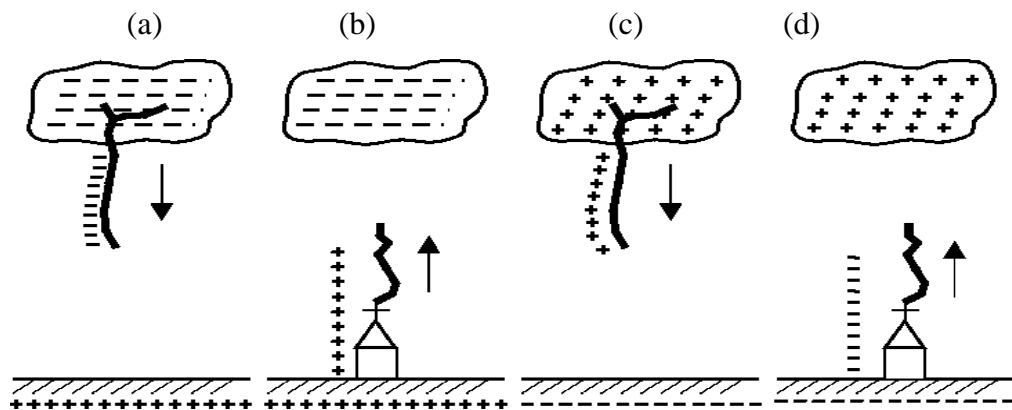
Comme leur nom l'indique, ces décharges se développent entre deux ou plusieurs nuages orageux différemment chargés se trouvant à une distance telle que l'ionisation de l'air qui les sépare devient possible. Elles se produisent généralement à de très grandes altitudes, entelles sont d'autant plus fréquentes que la densité de l'air est faible. Ces décharges inquiètent surtout les engins aéronautiques et les systèmes de transmissions par satellite.

## **I.6 DÉROULEMENT D'UN COUP DE Foudre**

### **I.6.1 Descriptions d'un coup de foudre**

La première phase d'un coup de foudre est toujours la formation d'une pré-décharge peu lumineuse appelée « Leader ». Il prend son origine soit au niveau d'un nuage et se propage en direction du sol, soit au niveau du sol et progresse vers le nuage. Dans les deux cas, le leader réalise une connexion suffisamment conductrice entre le nuage et le sol pour permettre le passage ultérieur d'un courant intense : le coup de foudre.

Ces deux paramètres (polarité et sens de propagation du leader) permettent de distinguer quatre types de coup de foudre (Rak08).



- a) leader négatif descendant ;
- b) leader positif ascendant à partir d'une structure de grande hauteur ;
- c) leader positif descendant ;
- d) leader négatif ascendant à partir d'une structure de grande hauteur

**Figure I.2 :** Les différents types de coups de foudre (Rak08).

## I.6.2 Classification des coups foudre

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

- Les coups de foudre descendants (développement du traceur à partir du nuage).
- Les 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 Toure élevé.

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

- Les coups de foudre négatifs (décharge d'un nuage chargé négativement).
- Les coups de foudre positifs (décharge d'un nuage chargé positivement). (Gar94)

### I.6.2.1 Coup de foudre ascendant

Dans un champ négatif, les effluves d'effet aspérités du sol sont des effluves de type positif, puisque par effet d'induction le sol charges positive. Ces effluves se développent d'autant plus loin et avec d'autant plus d'intensité, que les dimensions de l'aspérité sont plus

---

importante taille de l'aspérité, entraînant une certaine intensité d'effluve, le phénomène se modifie brusquement et l'effluve se transforme en une décharge ascendante, qui se développe

Suffisamment loin pour atteindre le nuage De tels coups ascendants sont fréquemment observés à partir de tours de télévision modernes, dont la hauteur dépasse les 300m, à partir de gratte montagneux.

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

### **I.6.2.2 Coup de foudre descendant positif**

Tout comme le coup négatif, ce coup de foudre commence toujours par un traceur descendant. Dans le cas du traceur positif, le processus de bonds n'existe pas systématiquement, et la progression se fait le plus généralement de façon continue, avec une vitesse moyenne d'ordre de grandeur de 0.2 à 1 m/ $\mu$ s. un coup de foudre descendant positif n'est constitué que d'un seul arc en retour, toutefois de durée beaucoup plus longue, et est de ce fait responsable en général de dégât plus important.

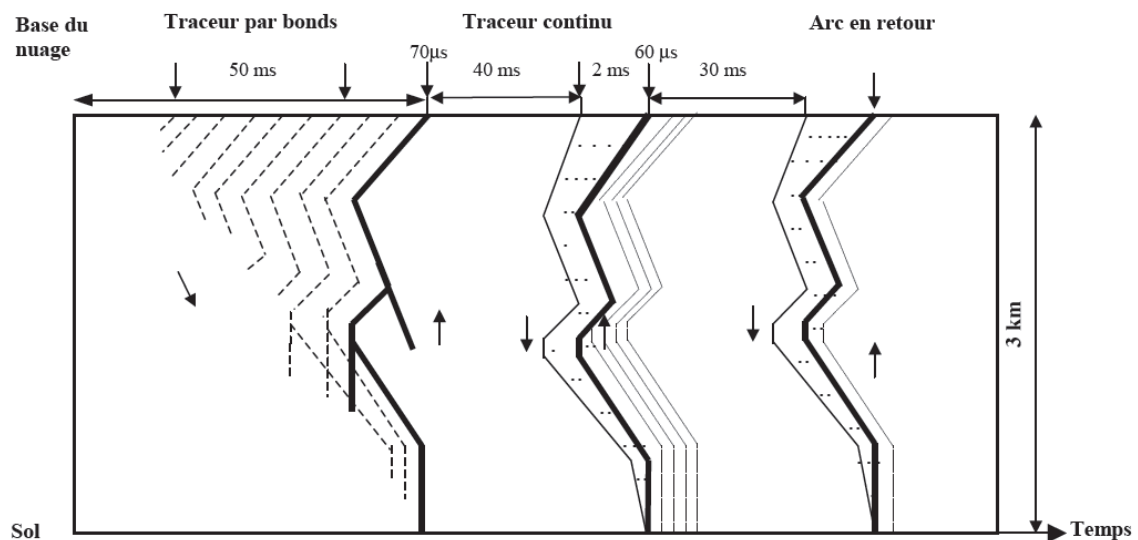
### **I.6.2.3 Coups de foudre descendants négatif**

Ils représentent, si l'on néglige le coup de foudre ascendant de polarité négative, 90% des cas de foudroiement enregistrés dans les régions tempérées. C'est pourquoi, les recherches s'orientent vers ce type de coup de foudre.

Le leader négatif progresse depuis le nuage en direction du sol, par bonds successifs de quelques dizaines de mètres. Le temps d'arrêt entre deux bonds, appelé période sombre, est compris entre 40 et 100 ns. Ce type de propagation par bonds, spécifique à la décharge négative, est appelé propagation par « stepped leader ». La vitesse moyenne du leader négatif est du même ordre que celle du leader positif dans les coups de foudre ascendants. Dès que le leader négatif s'approche suffisamment du sol, le champ augmente et un leader positif se développe à son tour, généralement depuis une saillie. Lorsque les deux leaders se rejoignent, un canal s'établit entre le nuage et le sol, et un fort courant peut alors s'écouler. Les charges positives situées au sol et induites par le nuage, remontent le canal ionisé et neutralisent les charges de ce dernier. Cette phase est caractérisée optiquement par un trait lumineux qui progresse depuis le sol en direction du nuage avec une vitesse estimée au tiers de la vitesse de la lumière : c'est l'arc en retour ou « return stroke ».

---

Plusieurs décharges se développent ensuite dans ce canal conducteur ; on les appelle «décharges subséquentes ». Un coup de foudre complet comprend en moyenne, 4 arcs en retour et dure entre 0.2 et 2 secondes.



**Figure I.3:** Schématisation d'un coup de foudre descendant, d'après Uman (Rak08).

La décharge de foudre se décompose en deux phases successives :

- une phase de pré-décharge faiblement lumineuse ;
- l'amorçage d'un arc dans le canal de pré-décharge.

Pendant environ 100 ms, l'activité électrique intra-nuage s'intensifie et se manifeste par des décharges préliminaires de durée typique 10 ms, à l'intérieur du nuage, qui organisent les charges et créent les conditions de développement d'une pré-décharge. La pré-décharge (précurseur, traceur ou leader) se propage alors du nuage vers le sol par bonds de quelques dizaines de mètres, séparées par des temps d'arrêt de l'ordre de 20 à 100 ms : c'est le précurseur par bond. Au fur et à mesure que ce traceur progresse, il se ramifie et la luminosité du chemin ionisé s'accroît. Au cours de cette phase, un important rayonnement électromagnétique, haute fréquence mais d'amplitude moyenne, est émis. Dès que le précurseur arrive à l'extrémité du sol, des pré-décharges ascendantes se développent à partir d'une saillie dans sa direction. Lorsque le leader et la pré-décharge se rejoignent, il y a court-circuit entre le nuage et le sol, ce qui permet le passage d'un courant de forte intensité résultant des charges superficielles du sol. Elles remontent le canal ionisé formé par le leader en neutralisent les charges superficielles du sol. On observe ainsi un trait fortement lumineux qui progresse depuis le sol jusqu'au nuage à une vitesse estimée à 108 m/s : c'est l'arc en retour (Rak08).

## **I.7 LE LEADER NEGATIF**

Au cours de la phase du saut final qui mène à l'arc, le canal de leader se présente sous trois formes selon les observations de Gorin et Shkilev:

- Un canal, appelé « leader négatif » qui se développe à partir de la cathode.
- Un canal appelé « leader spatial », qui se développe à partir d'un point de l'intervalle en direction des deux électrodes, et qui peut entraîner l'allongement du leader négatif avec une ré-illumination.
- Un canal appelé « leader positif » qui se développe lors du saut final, à partir d'un point du plan vers la cathode.

La phase qui intègre le leader négatif et un ou plusieurs leaders spatiaux, est appelée "phase leader" par analogie avec la polarité positive.

### **I.7.1 Caractéristiques physiques du leader**

Sa vitesse de propagation dépend de la géométrie de l'espace et de la tension appliquée. La luminosité du leader reste observable tant que le taux d'augmentation de la tension appliquée n'est pas trop faible. Sous certaines conditions telles que la ré-illumination provoquant une élongation soudaine du canal de décharge, la brillance de celui-ci est aussi visible. De tels phénomènes sont connus comme des ré illuminations. Ce sont des accroissements discontinus à grande vitesse de la longueur du leader accompagnés par une large impulsion de couronnes et une brève augmentation de la luminosité du leader et du courant de décharge.

A la tête du canal de leader, une couronne de streamers se présente comme une décharge volumineuse de structure filamentaire qui ionise l'air au front du canal. C'est le mécanisme selon lequel le courant circulant dans la décharge qui se développe, entretient ou modifie la distribution du champ électrique dans l'espace.

Les filaments de couronnes ont une origine commune au niveau de l'électrode à partir de laquelle sont émis tous les streamers. Ce point de rencontre des streamers est appelé « stem cathodique ». Son évolution en leader négatif s'explique de la même manière que pour le leader positif dans le cas d'une pointe de polarité négative.

Les enregistrements strioscopiques n'ont pas mis en évidence des différences fondamentales entre ces deux types de leader. Du point de vue des caractéristiques

macroscopiques, on peut admettre certaines hypothèses. En effet, le calcul du champ en tête du leader négatif peut s'effectuer par extension de la formule de Peek. Et les modèles de leaders établis dans les cas des intervalles du type pointe positive - plan peuvent être appliqués en polarité négative dans les phases où la décharge est composée uniquement d'un leader négatif précédé par une couronne de streamers.

### **I.7.2 Modèles de représentation du leader**

Les principaux modèles de leaders, établis en polarité positive et transposables sous certaines conditions en polarité négative sont présentés ci-dessous.

#### **I.7.2.1 Modèle d'Aleksandrov**

A la base de la couronne, les électrons ne fournissent que de l'énergie cinétique aux molécules de gaz. Il a été montré que dans ce cas, l'élévation de la température du gaz peut être supérieure à 5000K. L'augmentation de la conductivité du gaz s'explique alors par la création de charges par ionisation thermique.

#### **I.7.2.2 Modèle de Gallimberti**

Même si dans la couronne la densité d'électrons est faible devant celle des ions, en raison de la très grande mobilité des électrons, la seule action sur le nombre d'électrons ne suffit à expliquer l'accroissement de la conductivité du canal du leader. Ainsi, le seul processus de détachement des ions négatifs suffit à expliquer l'accroissement de la conductivité. Ce mécanisme a l'avantage de se produire à partir d'une température de 1500 K à 2500 K compatible avec les observations spectroscopiques (Rak08).

## **I.8 PROTECTION CONTRE LA Foudre**

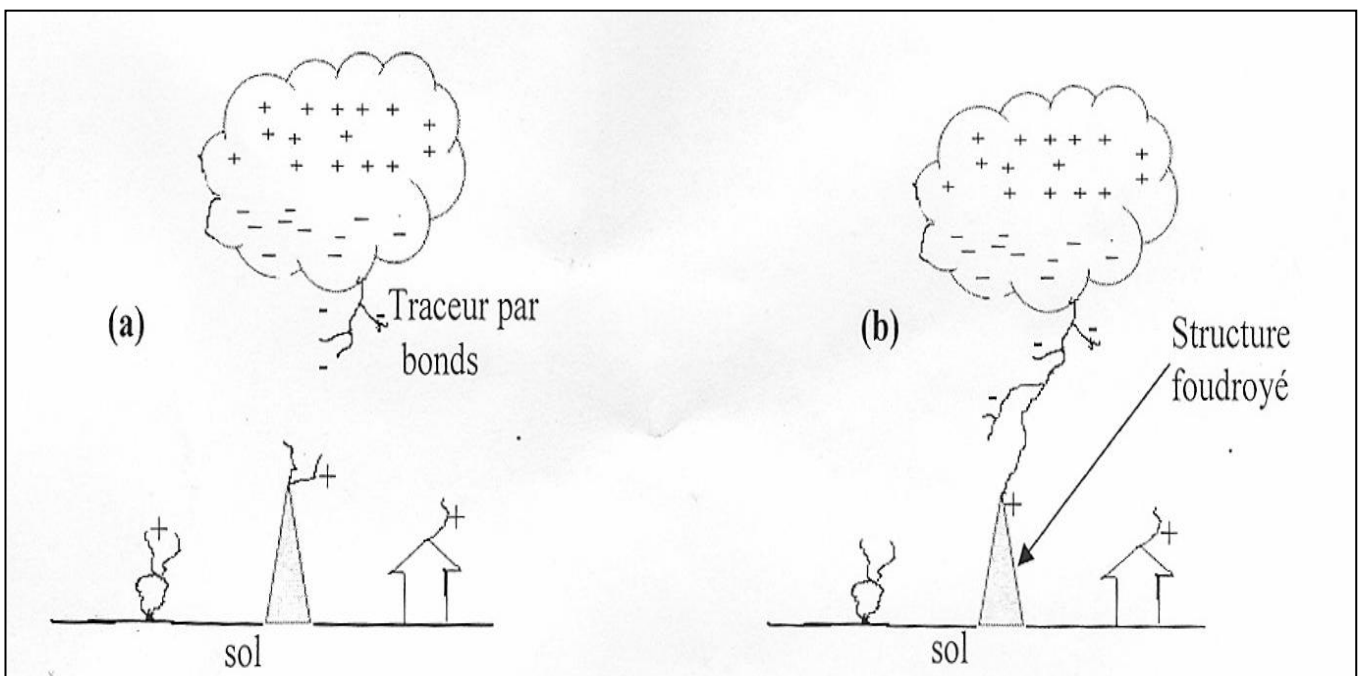
La connaissance actuelle des phénomènes physique mis en jeu par la foudre, permis d'élaborer une nouvelle méthode de la détermination de la zone de protection d'une tige verticale ou des fils tendus horizontalement, elle permet également de définir la taille des mailles d'une cage (Cho99).

### **I.8.1 Mécanisme d'impact d'un coup de foudre descendant négatif**

Le traceur par bonds issu du nuage orageux est myope, et progresse au hasard en se frayant son chemin dans l'air sur la plus grande partie de sa trajectoire. Ce n'est qu'au dernier

moment, lorsqu'il est arrivé a deux ou trois cent mètres de la terre, que tout se joue, et nous allons insister sur le rôle essentiel des décharges ascendantes.

Le traceur par bonds est un canal ionisé qui porte un excédent de charges négatives, avec une forte concentration à sa pointe. Lorsque ce traceur se rapproche du sol, il génère au-dessous de lui un champ électrique, qui croît jusqu'atteindre des valeurs de l'ordre de la centaine de kilovolts par mètre. A ce moment, des traceurs ascendants positifs se développent brusquement en direction du traceur descendant. Alors qu'ils n'existaient auparavant qu'au plus sous forme d'effluve d'effet de couronne .l'un des traceur, le plus proche, ou celui qui a démarré le plus tôt, ou celui qui a progressé le plus rapidement, entre en contact avec le traceur descendant : le canal ionisé est dès lors continu depuis le sol jusqu' au nuage, et l'arc en retour peut avoir lieu. Il arrive parfois que deux ou plusieurs traceurs ascendants rejoignent le traceur par bonds : on assiste alors a un coup de foudre a deux ou plusieurs impacts il en est de même lorsque plusieurs ramifications du traceur par bonds sont rejointes par des traceur ascendants différents (Hut88).



**Figure I.4** : Schéma montrant la phénoménologie de l'impact : rencontre entre le traceur descendant et un traceur ascendant.

### **I.8.1.1 Distance d'amorçage**

Une expression analytique de la distance entre traceur et l'objet au sol, pour laquelle une décharge ascendant rencontre le traceur descendant, a pu être établie. Pourvu que la mise à la terre de cet objet soit suffisamment conductrice, cette expression analytique d'amorçage.

$$D = 10 \times I^{2/3} \quad (I.3)$$

Avec :

D : en mètre et I en kilo-Ampères.

Tout élément placé à une distance D pourra déclencher l'arc en retour. Le modèle électro-géométrique est le seul modèle reconnu aujourd'hui par la communauté scientifique.

Il a pour mérite de montrer que pour un courant donné, la distance d'amorçage ne dépend ni de la nature du sol, ni des paramètres plus ou moins magiques des paratonnerres.

La principale limitation de ce modèle est qu'il n'est valide que pour les coups négatifs.

Pour les chocs positifs, les traceurs ascendants se développent très peu. L'expérience montre toute fois qu'il peut être utilisé avec une bonne confiance. (Dja08)

### **I.8.1.2 Structure du champ généré au sol par un traceur descendant**

Le champ électrique au sol est fonction de la quantité de charges contenues dans le traceur, notamment à sa pointe, et la distance séparent celle-ci du sol. Généralement 10% de la charge du traceur est concentrée a sa pointe, et 90%restants sont répartis uniformément sur sa longueur. (Gar89)

Un traceur descendant est généralement négatif, il progresse du nuage orageux en direction du sol, ce qui correspond au cas de foudroiement le plus fréquent.

Dans ces conditions, en désignant par 'l', la longueur de traceur, par 'Q' charge totale, 'q' charge linéaire, la formule à été proposé :

$$Q=0,1Q+lq \quad (I.4)$$

Il existe un rapport à peu près constant entre la quantité des ces charges et l'intensité crête du courant du foudre.

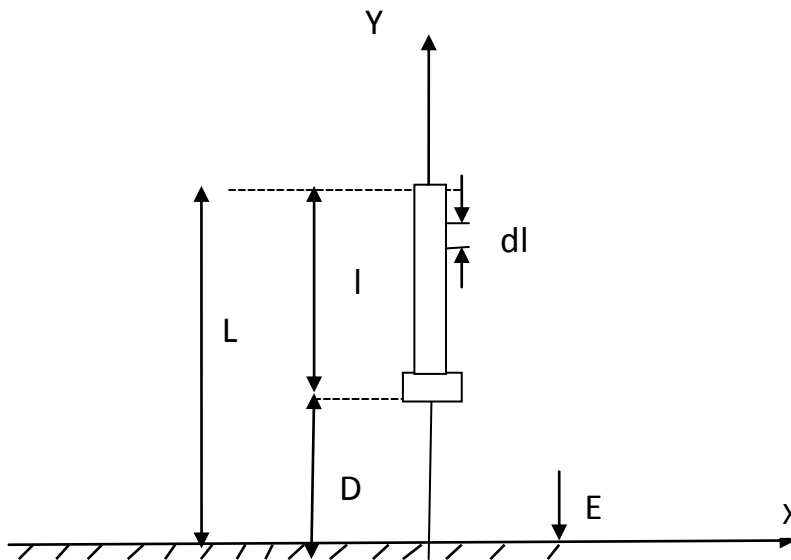
$$I=15Q \quad (I.5)$$

Avec : I en KA et Q en coulomb

La figure (5) donne une représentation simplifiée d'un traceur descendant avec :

L : hauteur de formation du traceur

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



**Figure I.5** : champ au sol crée par un traceur descendant.

A partir de ces données, le champ au sol à la verticale du traceur descendant est données par

$$E = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \left[ \int_D^L \frac{dl}{l^2} + \frac{L-D}{9} \right] = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} (1-K) \frac{9k+D^2}{2k} \quad (I.6)$$

$$\text{Avec : } k = \frac{D}{L} \quad (I.7)$$

A l'instant de l'impact (I=L) a partir de l'expression on a

$$q = \frac{0,9Q}{L} \quad (I.8)$$

A partir de (I.6) et (I.8) on déduit que

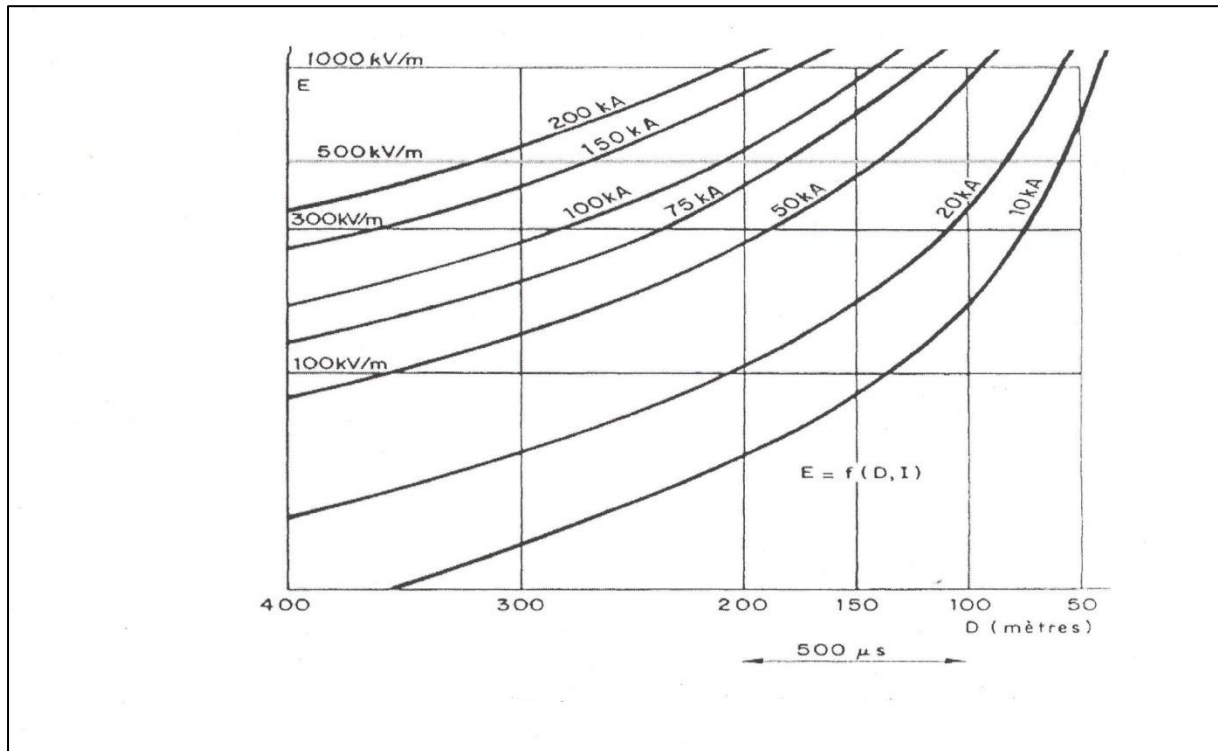
$$q = \frac{0,9I}{15L} \quad (I.9)$$

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

### **I.8.2 Modèle électro-géométrique de base**

Le modèle électro géométrique a pour objet la prédétermination des points d'impacts les plus probables de la foudre, et si nécessaire, prévoyais des dispositifs de protection appropriés tels que, paratonnerres, cage de faraday ou câbles de garde dans le cas des lignes aériennes (Cho99).

Comme nous l'avons déjà souligné, il est évident que le champ électrique au sol sous le traceur descendant est une fonction à la fois de quantité de charges réparties le long de se canal ionisé, et de la distance qui sépare sa pointe du sol. On peut donc calculer ce champ, à partir d'hypothèses raisonnables sur la répartition réelle des charges, hypothèses étayées par des mesures sur les traceurs produits en laboratoire. Par ailleurs, on a admet que le premier arc en retour d'un coup négatif neutralise ces charges, de sorte qu'il existe une corrélation entre l'intensité de crête du courant et la quantité de charge : cette corrélation indique environ 15KA (crête) par coulomb. On peut alors, par cette intermédiaire, établir une relation numérique entre le champ électrique au sol, la distance par rapport au sol de la pointe du traceur, et l'intensité de crête du courant de foudre qui va suivre. Les courbes de la figure I.6 ont été tracées à partir de cet ensemble de données.



**Figure I.6 :** Variation du champ électrique au sol en fonction de la hauteur du traceur descendant.

Tout un ensemble de présomptions et d'observations conduisent alors à considérer que la jonction entre les traceurs descendant et ascendant se fait à l'instant où le champ au sol atteint la valeur critique de 500kV/m, Cette distance est appelée distance d'amarçage (Hut88).

## I-9 MÉTHODE GRAPHIQUE DE DÉTERMINATION DE LA ZONE DE PROTECTION

### I-9-1 Méthodes de la sphère fictive

Selon le modèle électro-géométrique, le point d'impact de la foudre se détermine par l'objet au sol qui se trouvera, le premier à la distance d'amarçage  $D$  du traceur descendant, même si cet objet est le sol plat lui-même.

Tout se passe donc comme si la pointe du traceur était entourée d'une sphère fictive, de rayon  $D$ , centrée sur elle, et comme si cette sphère accompagnait rigidement la pointe au cours de la trajectoire a priori aléatoire du traceur. A l'approche du sol, le premier objet que touche la sphère détermine le point d'impact du coup de foudre.

D'où le procédé : on imagine que la sphère fictive de rayon  $D$  est roulée au sol, dans toutes les directions sans jamais perdre le contact soit avec le sol, soit avec un objet prééminent.

Si, au cours de ce mouvement, la sphère entre en contact avec les dispositifs de protection (tige verticale, fil horizontal, nappe de fils, cage de faraday) sans jamais pouvoir toucher l'un des objets à protéger, alors la protection de ceux-ci est assurée.

Si, au cours de ce mouvement, la sphère entre en contact avec l'un des objets à protéger, le dispositif de protection devra être remanié jusqu'à ce qu'aucun de ces contacts ne puisse plus se produire. (Rou94)

### I.9.2 Application pour le cas de protection d'une tige verticale

Prenons le cas d'une zone de protection d'une tige verticale de hauteur  $h$  au-dessus d'un sol plat.

Soit un traceur portant des charges négatives en quantité telle que le rayon de la sphère associée soit  $D1$ . Au cours de sa trajectoire de descente, la sphère pourra atteindre le sol suivant trois possibilités :

Si la sphère entre en contact uniquement avec la tige verticale (cas A), c'est celle-ci qui constituera le point d'impact du coup de foudre.

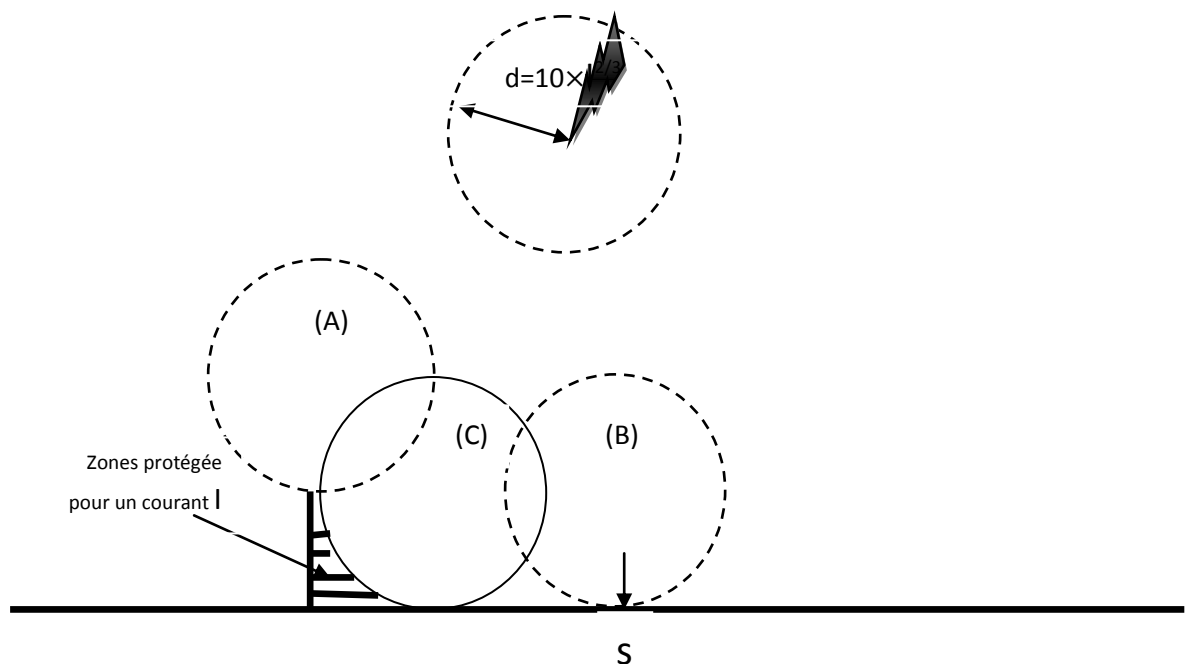


Figure I.7 : Méthode de la sphère fictive.

Si la sphère entre en contact avec le sol, sans toucher la pointe (cas B), le coup de foudre touchera le sol au point S.

Si la sphère entre en contact simultanément avec la tige et avec le sol, le coup de foudre pourra toucher soit l'une soit l'autre, qui constitue la zone de protection de la tige verticale. Mais notons que cette zone est obtenue avec la sphère de rayon  $d_1$  et qu'elle est donc relative à un courant de foudre d'intensité de crête  $I_1$  (Mez06).

### I.9.3 Zone de capture d'une tige verticale

Pour déterminer la zone d'attraction de la tige, on considère l'ensemble des sphères qui touchent simultanément la tige et le sol. Le lieu des centres des sphères délimite la zone d'attraction de cette tige : (fig I.7)

Pour  $d < h$ , le lieu est une droite issue du pied de la tige et inclinée à  $45^\circ$ .

Pour  $d \geq h$ , ce lieu devient une parabole (P).

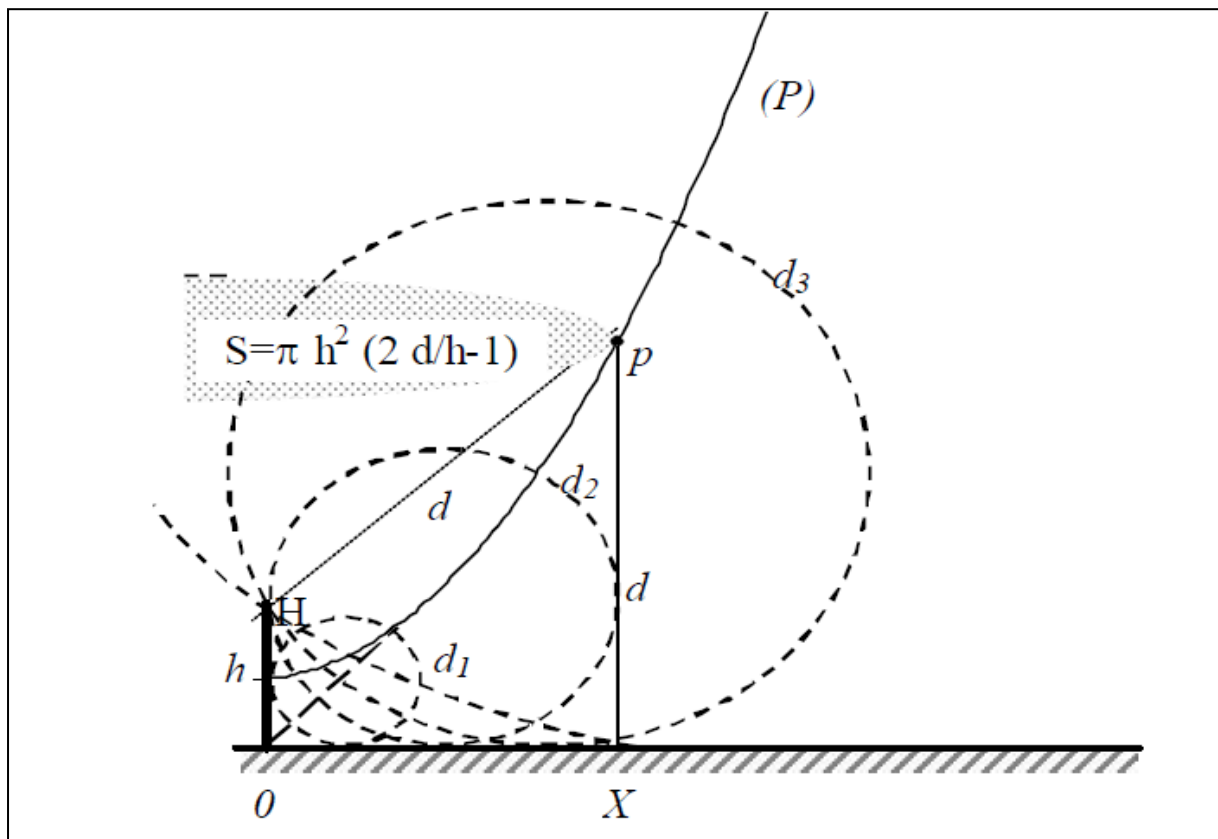
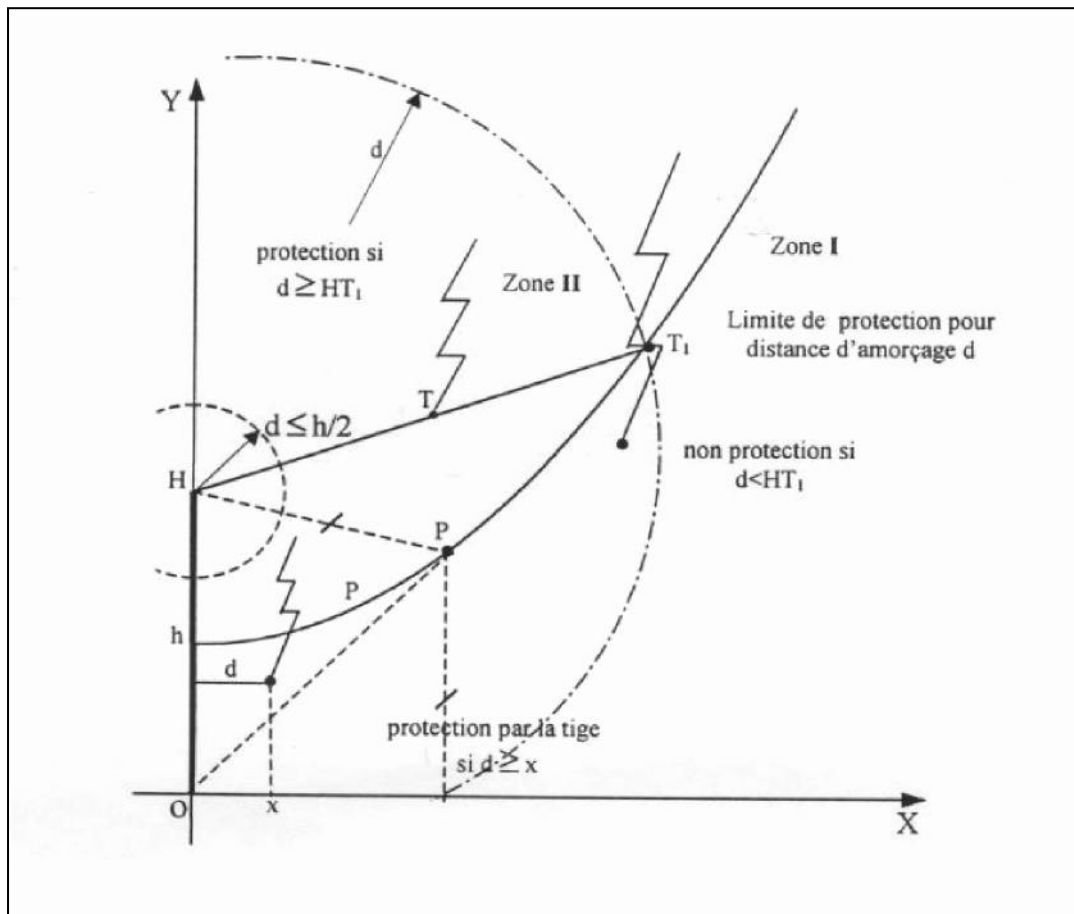


Figure I.8. Zone de capture et de protection d'une tige verticale.

Considérons une tige verticale de hauteur  $h$ , placée sur un terrain parfaitement plat. Dans un système de coordonnées  $xoy$ , l'axe  $ox$  représentera le sol, et  $OH=h$  placé sur  $oy$ , représentera la tige verticale.

La zone de capture d'un paratonnerre est constituée par l'ensemble des points équidistants de la terre et le paratonnerre. Dans un plan perpendiculaire à la terre qui contient l'axe du paratonnerre, la limite est une parabole qui a comme équation :

$$h^2 - 2hy + x^2 = 0 \tag{I.10}$$



**Figure I.9.** Zone de capture d'une tige verticale

Selon le présentation de la figure (I.8), tout traceur qui se présente dans la zone (I) à droite de la parabole, ne sera jamais capté par la pointe H et touchera le sol. Si au contraire un traceur se présente dans la zone (II) compris entre  $(oy)$  et  $(P)$  sera capté par la pointe dès que la distance  $HT$  ( $T$  étant la tête du traceur) devient inférieure ou égale à la distance d'amorçage du coup de foudre considéré.

Si le traceur, arrivant par la zone (II) peut traverser la parabole (P) en T1 par exemple, sans qu'il soit capté, cela signifie que  $HT1 > d$

La condition de limite de capture de la pointe (H) est donc que, tout au long de la parabole, la relation  $HT1 \leq d$  soit satisfaite.

Or,  $HT1=y$ , ordonnée du point T1, par définition même de la parabole.

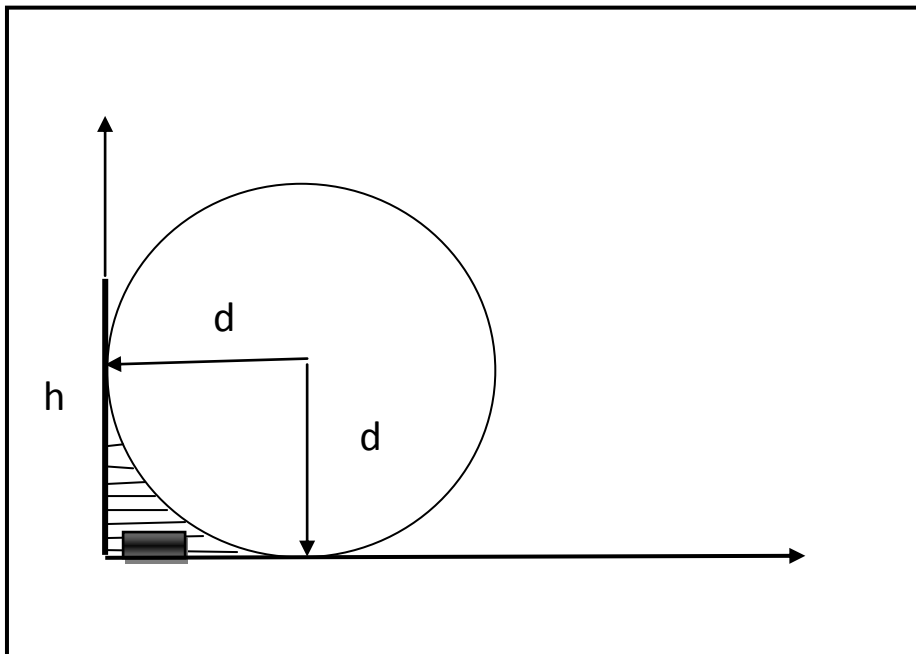
On remplace « y » par « d » dans l'expression (I.10), on aura :

$$h^2 - 2hd + x^2 = 0 \quad (I.11)$$

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

$$x \leq h \cdot \sqrt{\frac{2d}{h} - 1} \quad (I.12)$$

Pour les coups de foudre tels que  $d < h/2$ , l'expression (I.12) n'a pas de solution, ce qui signifie que la pointe ne capte pas les courants très faibles, dès lors que le traceur passe en dehors du cercle du rayon d centré en H.



**Figure I.10.** Zone de capture d'une tige verticale ( $d < h$ )

Pour  $d < h$ , le rayon protégé au sol sera  $x=d$ , dans ce cas l'augmentation de h est sans aucun effet sur la zone de protection (Figure I.9) (Bou94).

## **I.10 Conclusion**

L'étude théorique de la foudre naturelle, et de son développement nous a permis de prendre une idée sur ce phénomène naturel et de mieux comprendre les différentes étapes de son développement, ainsi que les caractéristiques électriques de la décharge. Ces connaissances sont importantes dans la maîtrise et l'étude de ce phénomène.

La protection contre la décharge de foudre constitue un axe de recherche qui reste jusqu'à nos jours non maîtrisable. D'où l'investissement dans l'étude de ce domaine.

**CHAPITRE II**

**INFLUENCE DE LA NATURE DU SOL SUR**

**LES ZONES D'ATTRACTION D'UN**

**PARATONNERRE VERTICAL**

## **II.1 INTRODUCTION**

Dans le domaine de la protection contre la foudre, le modèle de détermination de la zone de protection d'une tige verticale appelé modèle électro-géométrique classique est largement utilisé.

Cependant, ce modèle de protection considère que la terre est homogène et parfaitement conductrice, hypothèse très rarement rencontrée en pratique. En effet, les propriétés électro géométriques sont variables d'un site à l'autre, et très souvent la terre est hétérogène au-dessous d'un nuage orageux.

Dans le cas où la terre est hétérogène ou mauvaise conductrice, les zones d'attraction sont généralement plus grandes que celle définie par le modèle électro-géométrique, mais risque d'être plus petites dans certains cas de configuration.

Dans ce chapitre, nous présentons une synthèse des résultats obtenus suite aux travaux de recherche sur les zones d'attraction d'un paratonnerre verticale avec terre mauvaise conductrice et terre discontinue effectués au niveau du laboratoire Haute Tension d'E.N.P-Alger (Bel94, Cho99).

## **II.2 MODELES EXPERIMENTAUX REDUITS**

La simulation de la décharge de foudre en laboratoire permet d'entamer des recherches sur l'influence de nature de la terre sur les zones d'attraction d'un paratonnerre aussi bien vertical qu'horizontal. Dans ce contexte, on a fréquemment recours à des arrangements de laboratoire permettant une simulation expérimentale des situations ou configurations pratiques à étudiées.

Les résultats qui seront présenté par la suite, concernent deux études, la première est celle d'une terre homogène mauvaise conductrice alors que la deuxième étude la discontinuité au niveau du sol.

### **II.2.1 Sol homogène bon conducteur**

Dans le cas de la terre bonne conductrice, la terre homogène bonne conductrice est simulée dans le modèle réduit par une plaque métallique en acier mise à la terre figure (II.1.a).

### **II.2.2 Sol homogène mauvais conducteur**

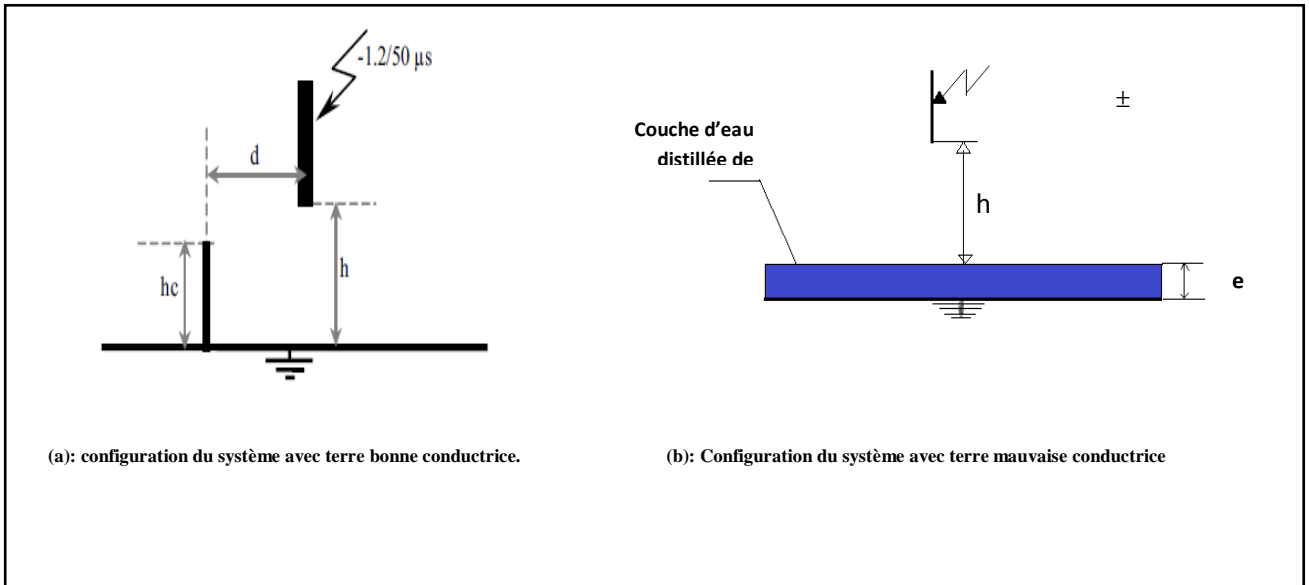
Dans le cas d'une terre mauvaise conductrice, la terre est constituée d'une couche de sable ayant une épaisseur variant de 5 à 15 cm et une surface de 1 m<sup>2</sup>, déposée sur un plan conducteur en aluminium, mis à la terre. La hauteur du paratonnerre, comptée à partir de la surface du sol mauvais conducteur est variable, la décharge préliminaire de foudre (traceur par bonds), juste avant le saut final, est simulée par une tige conductrice en cuivre, mise sous une haute tension du type choc de foudre négatif  $-1,2/50 \mu s$ . Pour chaque essai, le niveau de tension appliqué devait engendrer une décharge disruptive certaine dans le système sans paratonnerre (U100%). Ce niveau dépendant de la hauteur  $h$  de l'électrode de haute tension, est appliqué 50 fois pour chaque configuration ' $h, h_c, d$ ',  $d$  étant la distance entre le paratonnerre et l'axe de la tige (Bel94).

### **II.2.3 Sol discontinu**

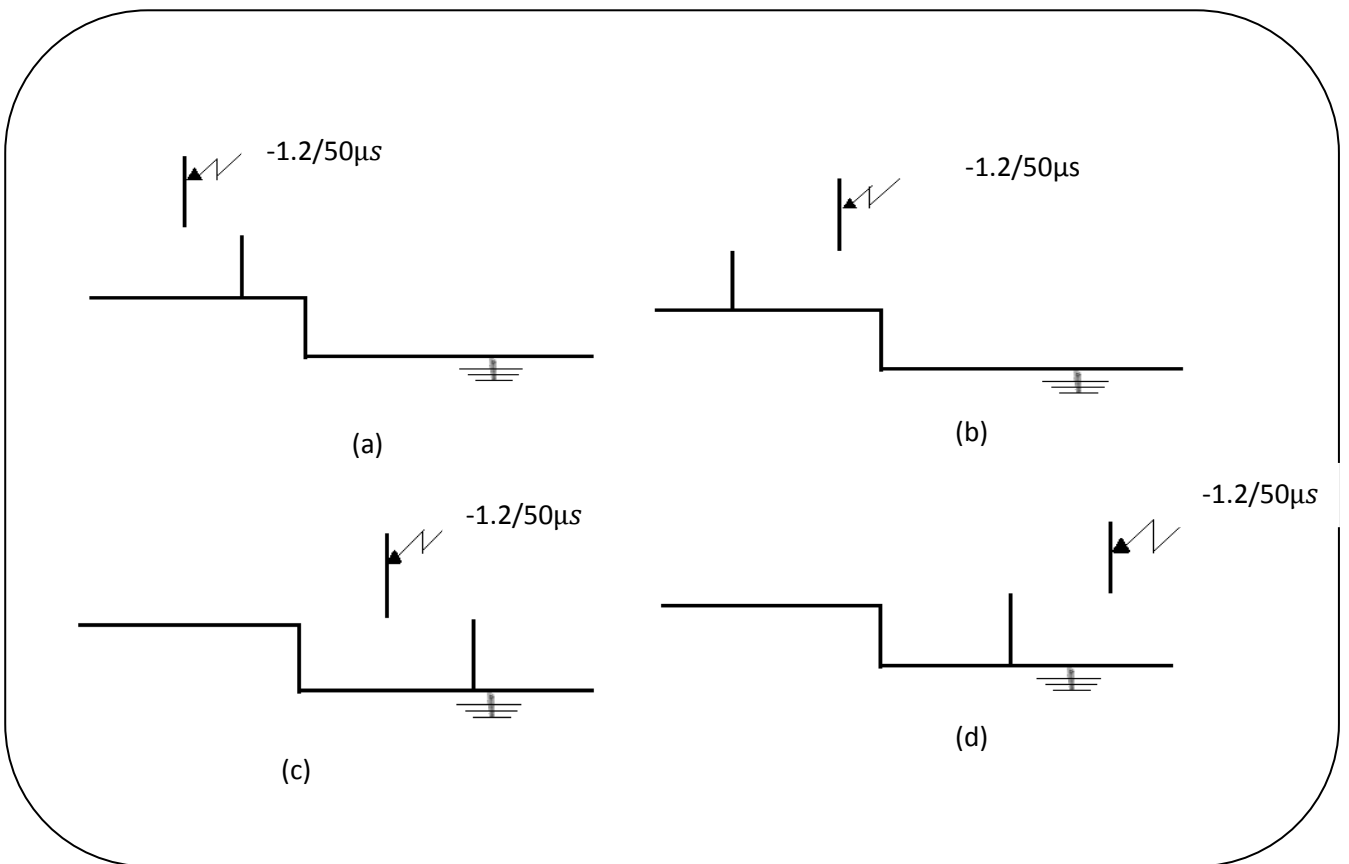
Dans le cas d'une terre discontinue, la décharge de foudre au moment du saut final, est simulée par une tige conductrice en acier, de 4.8mm de diamètre, connectée au générateur de choc. La terre discontinue est constituée d'une plaque métallique de 4 mm d'épaisseur et ayant deux niveaux différents de surface respective de 1.2×1.2 m<sup>2</sup>. Le paratonnerre est simulé par une tige conductrice de 3.5mm de diamètre connectée au plan discontinu mis à la terre (Cho99).

## **II.3. CONFIGURATIONS ETUDIÉES**

La figure (II.1), donne les configurations utilisées dans l'étude de l'influence de la nature de la terre mauvaise conductrice sur les zones d'attraction d'un paratonnerre vertical. Tandis que, la figure (II.2), donne les dispositions possibles avec une terre discontinue, suivant que le paratonnerre sera sur la partie haute ou sur la partie basse de la terre, on distingue quatre configurations possibles.



**Figure (II.1) :** Différentes configuration étudiées avec une terre homogène.



**Figure II.2** Différentes dispositions du paratonnerre sur une terre discontinue (Cho99).

## **II.4 PRESENTATIONS DES RESULTATS OBTENUS**

### **II.4.1 Modèle électro-géométrique sur un sol homogène bon conducteur**

La réalisation de la figure II.1.a donne les zones d'attraction d'un paratonnerre verticale situé sur un sol homogène parfaitement conducteur. Cela, permet de vérifier le modèle électro-géométrique classique et d'obtenir une bonne référence pour la comparaison des autres résultats.

Les résultats obtenus montrent que, la zone d'attraction déterminée par les distances d'engendrant 100% de décharge au paratonnerre (figure II.3) coïncide avec celle définie par le modèle électro-géométrique théorique c'est-à-dire avec la parabole

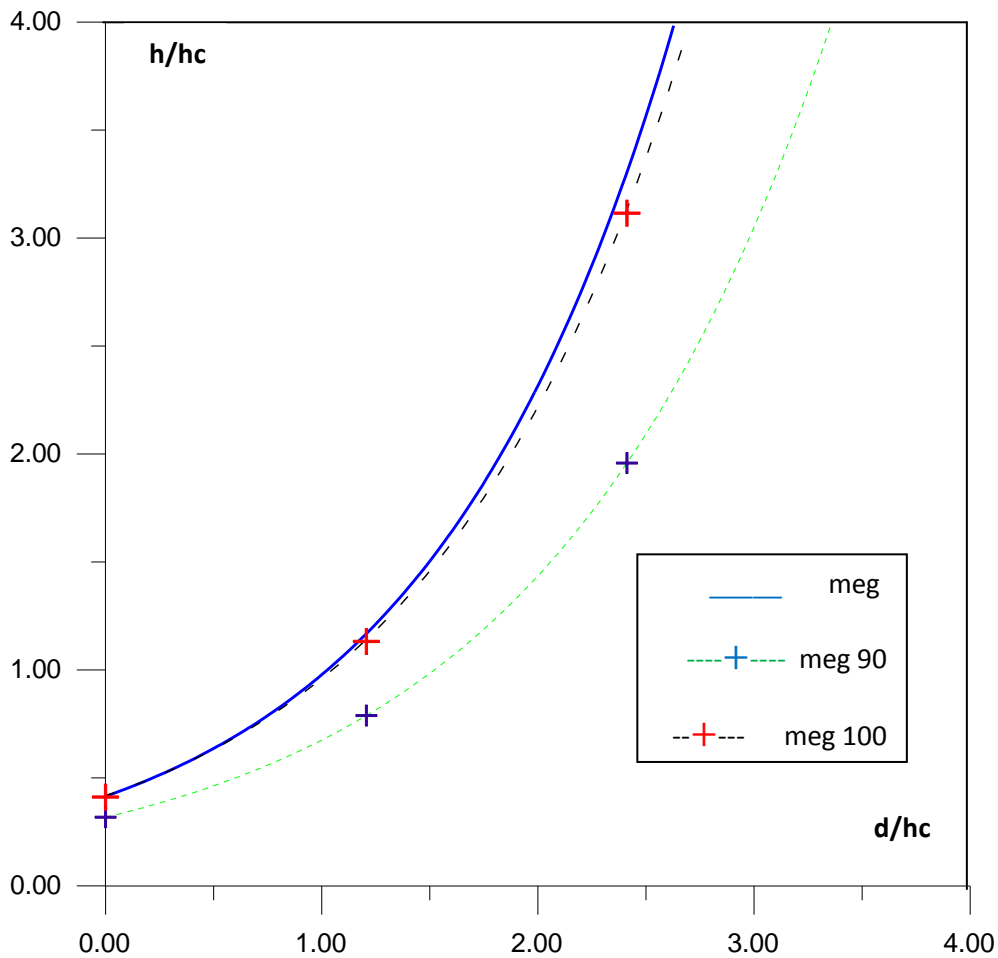
$$X^2 - 2Y + 1 = 0 \quad (\text{II.1})$$

$$X = d/hc \quad (\text{II.2})$$

et

$$Y = h/hc \quad (\text{II.3})$$

Où  $h$  et  $hc$  sont respectivement la longueur de l'intervalle d'air et la hauteur du paratonnerre. La zone d'attraction déterminée à partir des distances d'engendrant 90% de décharge au paratonnerre est légèrement supérieure (figure II.3).



**Figure(II.3)** : zones d'attraction dans le cas d'une terre bon conducteur. (Cho99)

Meg 100 : 100% d'impact sur le paratonnerre

Meg 90 : 90% d'impact sur le paratonnerre

#### II.4.2 Terre mauvaise conductrice

D'après les zones d'attraction obtenues, on constate que la zone d'attraction d'un paratonnerre ne correspond pas, en général, à celle définie par le modèle électro- géométrique. En effet, ce modèle ne prend pas en considération la nature de la terre, ce qui le rend discutable dans le cas où la terre n'est pas homogène et parfaitement conductrice. L'élaboration d'un nouveau modèle de protection prenant en compte les propriétés électro géologiques du sol s'avérerait donc très utile.

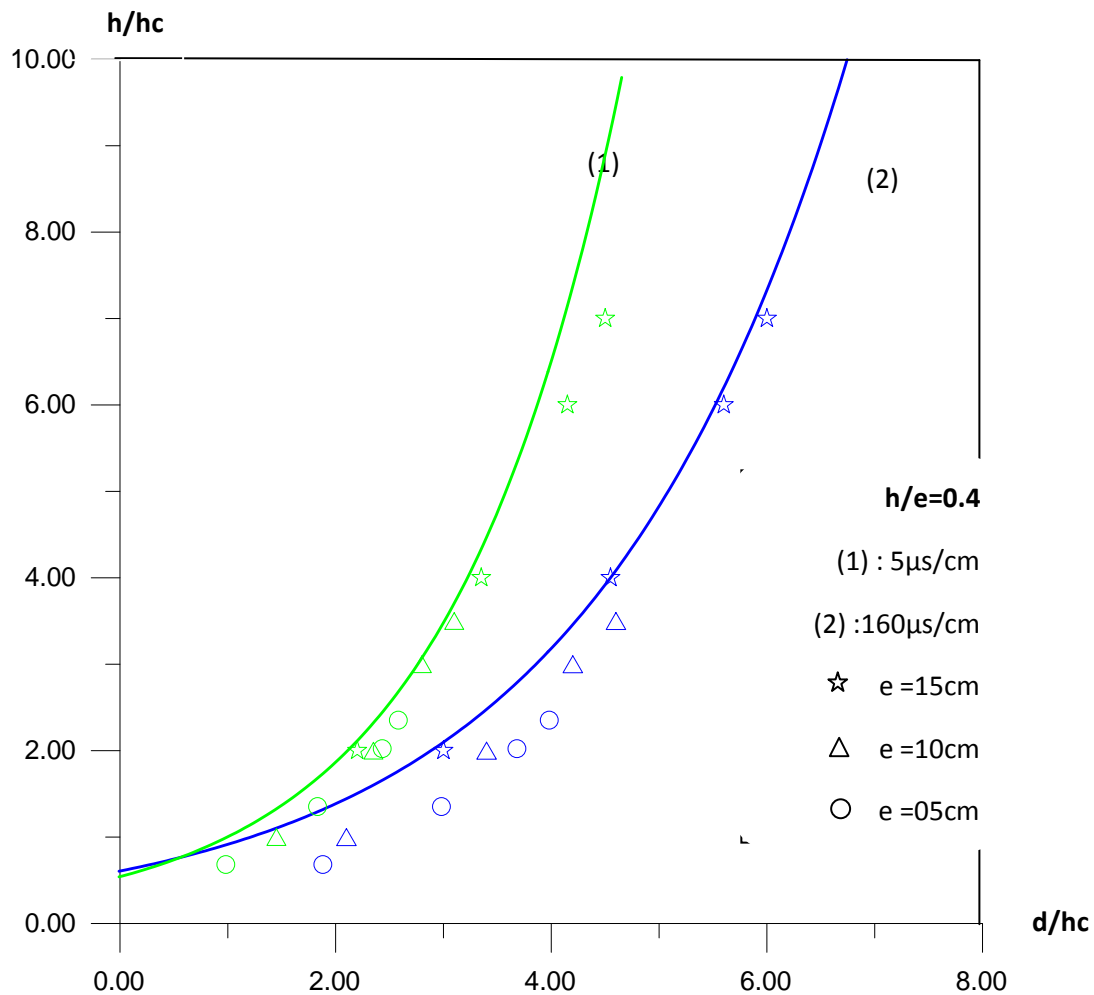
Le modèle expérimental réduit utilisé est représenté à la figure (II.1.b), où la terre est constitué d'une couche d'eau distillée de conductivité et d'épaisseur variables, reposant sur un plan conducteur mis à la terre.

Afin d'examiner l'influence de l'épaisseur ( $e$ ) et la conductivité ( $\sigma$ ) de la terre mauvaise conductrice et la hauteur  $hc$  du paratonnerre, des essais ont été effectués à l'aide du modèle réduit, pour des rapports  $hc/e$  égaux à 0.2, 0.4 et 0.6 et des conductivités de la couche mauvaise conductrice égales à  $5\mu\text{s/cm}$ ,  $39\mu\text{s/cm}$ ,  $75\mu\text{s/cm}$  et  $160\mu\text{s/cm}$  (Bel94).

❖ **Influence de la conductivité et de l'épaisseur "e" du sol sur les zones d'attraction d'un paratonnerre vertical**

Sur la figure (II.4), on remarque que pour un rapport  $hc/e=0.4$  constant, les zones d'attraction s'élargissent au fur et à mesure que la conductivité du sol diminuait.

Un traceur descendant, arrivant à la pointe de paratonnerre sera capté pour la même épaisseur, pour la courbe (2) à la conductivité  $160\mu\text{s/cm}$ , mais ne le sera pas pour la courbe (1) à la conductivité  $5\mu\text{s/cm}$ .



**Figure (II.4) :** Zones d'attraction pour deux conductivités et différentes épaisseurs de la terre (Bel94)

Dans le cas d'un sol bon conducteur, la pointe du traceur descendant, portant une charge électrique  $Q$ , peut être attirée par le paratonnerre, ou s'abattre sur le sol où persiste encore une densité superficielle de charges positives.

Dans le cas d'un sol mauvais conducteur, la quasi-totalité des charges positives est concentrée sur la pointe du paratonnerre qui présente ainsi un meilleur point d'impact pour la charge électrique  $Q$ . La force coulombienne qui guide cette dernière vers la pointe du paratonnerre est plus intense dans le cas d'un sol mauvais conducteur. De ce fait, la zone d'attraction d'un paratonnerre vertical sera plus large au dessus d'un sol ayant une faible conductivité.

Pour l'épaisseur, d'après la figure (II.4), on constate que l'augmentation de l'épaisseur «  $e$  » fait élargir de plus en plus les zones d'attraction pour une conductivité constante ( $5\mu\text{s/cm}$ ,  $160\mu\text{s/cm}$ ). Ce phénomène s'explique par la tendance de la densité volumique de charge vers la densité superficielle. Plus l'épaisseur «  $e$  » diminue, plus les charges électriques contenues dans le liquide vont se localiser à la surface ; on se rapproche ainsi d'un système pointe négative-plan parfaitement conducteur.

La figure (II.5) donne l'influence de la hauteur du paratonnerre sur la zone d'attraction. On remarque que plus le rapport  $h/e$  augmente plus les paraboles tendent vers celle définie par le modèle électro géométrique.

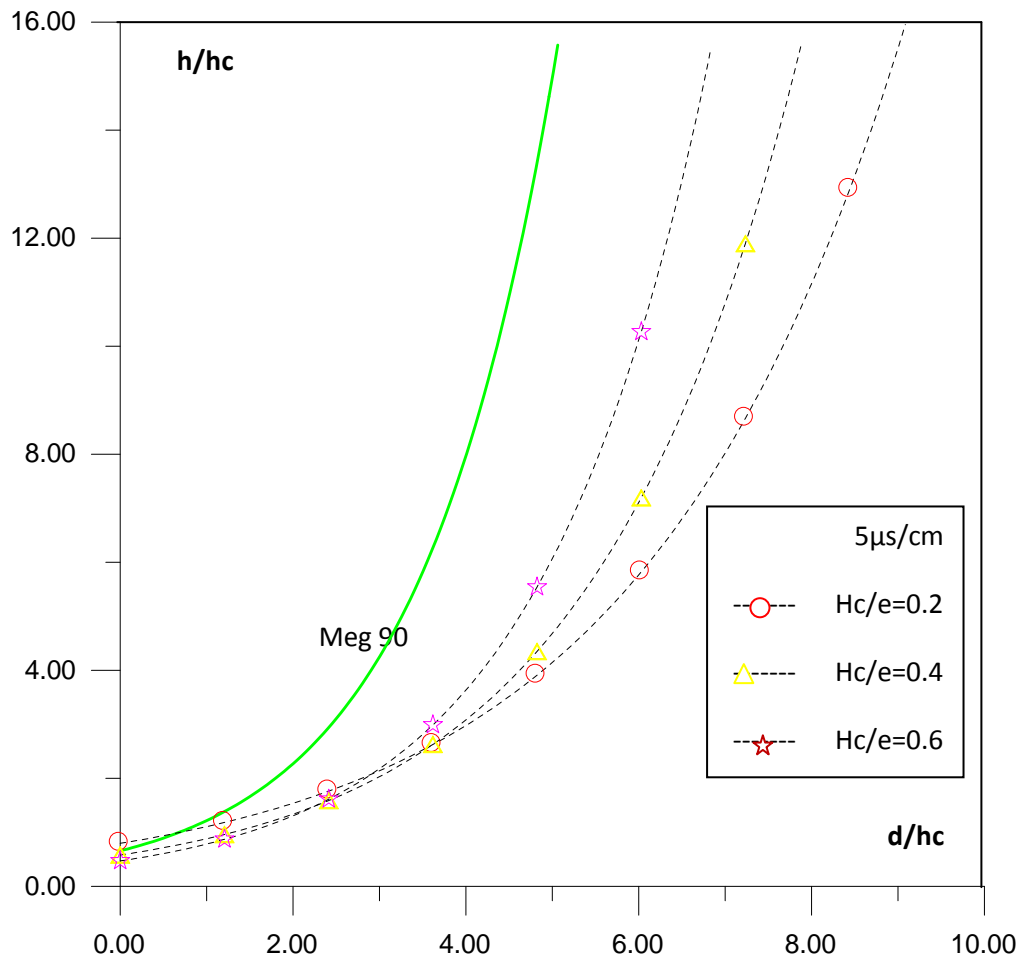


Figure (II.5) : Zones d'attraction pour différents rapports  $hc/e$  (Bel94).

### II.4.3 Terre discontinue

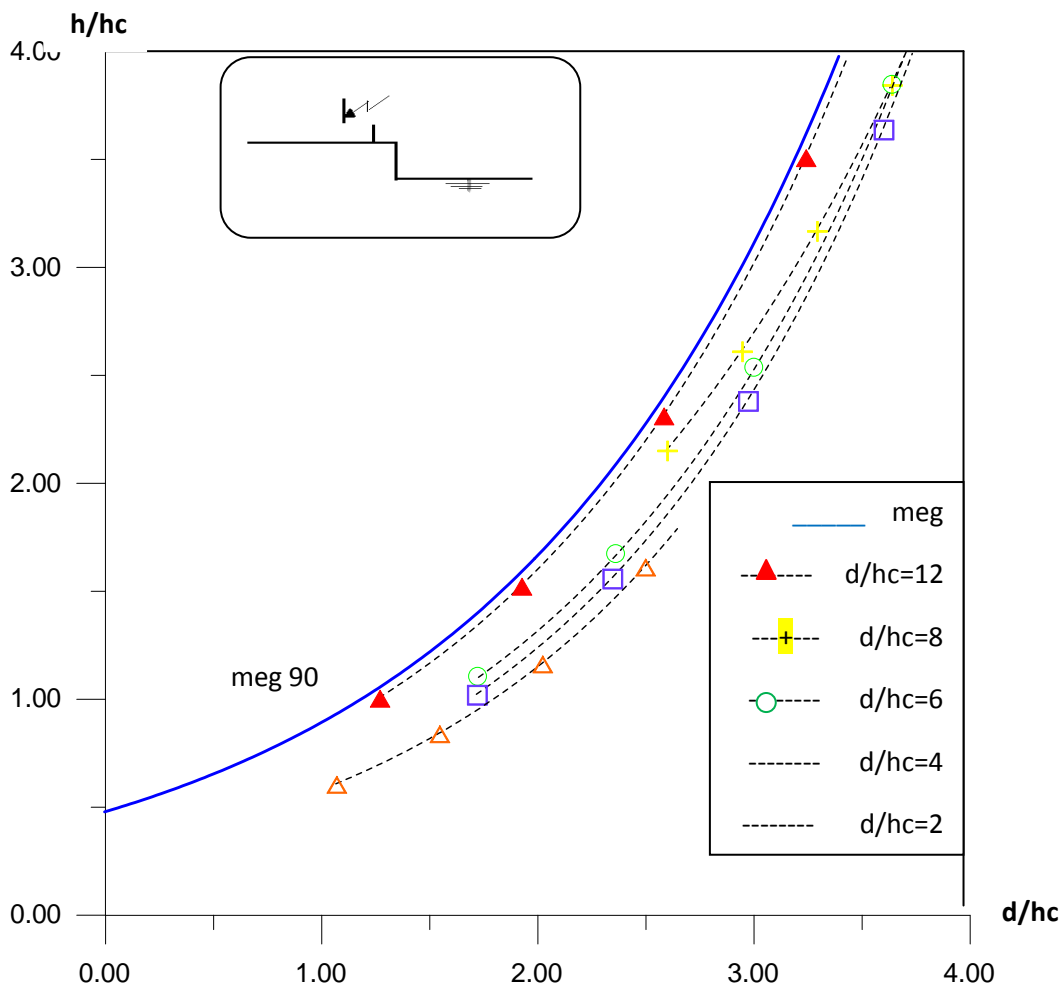
Dans le cas d'un sol discontinu, deux configurations ont été étudiées suivant la position du paratonnerre sur la partie haute ou basse de la terre discontinue (Cho99).

Le modèle expérimental utilisé pour étudier la configuration tige-plan avec terre discontinue est représenté à la figure (II.2).

Le système tige-plan avec sol discontinu est caractérisé, par la longueur de l'intervalle  $h$  ainsi que par la profondeur ( $e$ ), la polarité de la tige et la distance  $d$  entre l'axe de cette dernière et l'interface (Cho99).

❖ **Paratonnerre situé sur la partie haute de la terre discontinue entre l'interface et l'axe de la tige**

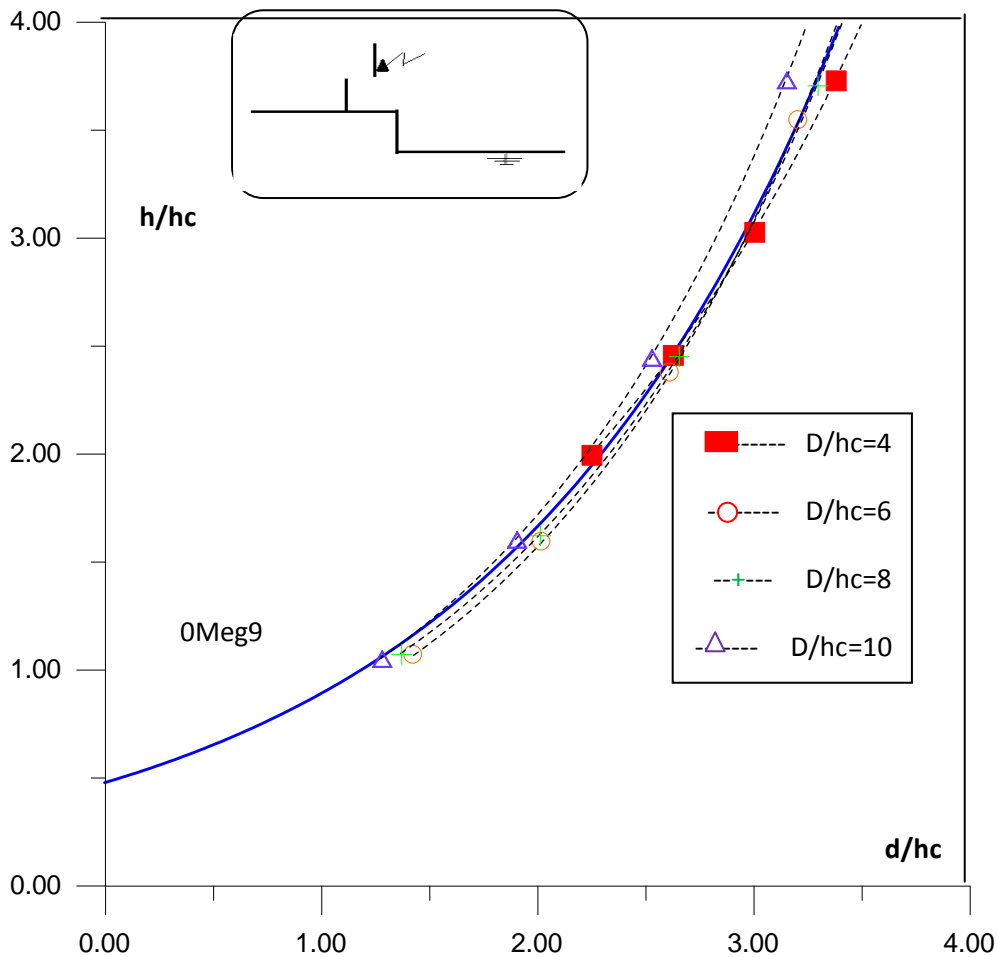
La figure (II.6) donne les zones d'attraction en fonction de la distance du paratonnerre par rapport à l'interface (rapport  $D/h_c$ ), on constate que lorsque le paratonnerre est très proche de l'interface ( $D/h_c=2$ ), la zone d'attraction est plus éloignée. Cette dernière se rapproche vers celle définie par le modèle électro-géométrique classique. En effet, pour cette disposition du paratonnerre, l'interface n'a aucun effet, sur les zones d'attraction.



**Figure (II.6) :** Zones d'attraction verticale située sur de partie haute de la terre discontinue entre l'interface et l'axe de la tige (Cho99).

❖ **Paratonnerre sur la partie haute de la terre discontinue, et l'axe de la tige situé entre l'interface et le paratonnerre**

Les résultats présentés sur la figure(II.7) montrent que 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. Cela nous conduit à conclure que dans ce cas la présence de l'interface où le champ électrique est relativement intense amoindrit l'efficacité du paratonnerre. En effet, les décharges de foudre sont attirées par le paratonnerre dans une zone plus petite que celle définie par le modèle électro-géométrique classique. Nous citons aussi que l'interface n'a aucun effet sur les zones d'attraction qui sont confondues avec celle donnée par le modèle électro géométrique classique des que le rapport  $D/h_c$  devient supérieur ou égal à 6.

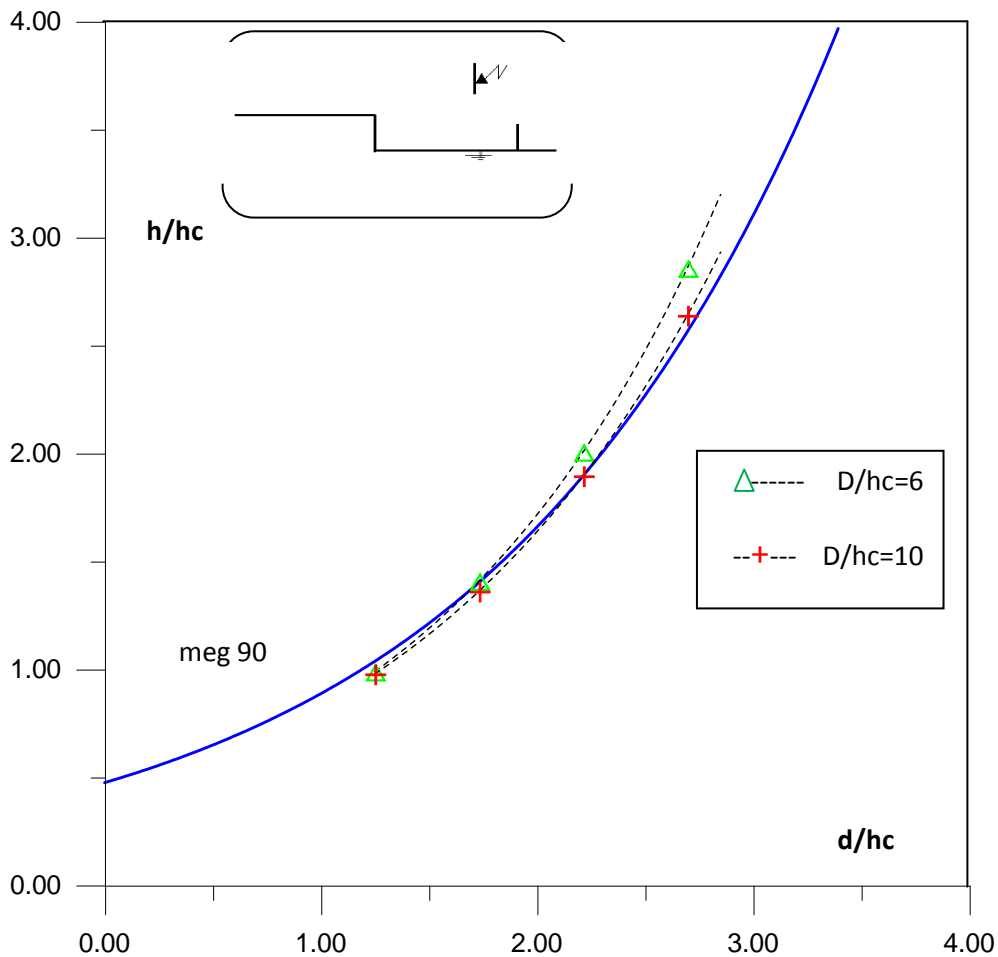


**Figure (II.7) :** zones d'attraction d'un paratonnerre vertical situé sur de partie haute de la terre discontinue et l'axe de la tige situé entre l'interface et le paratonnerre (Cho99).

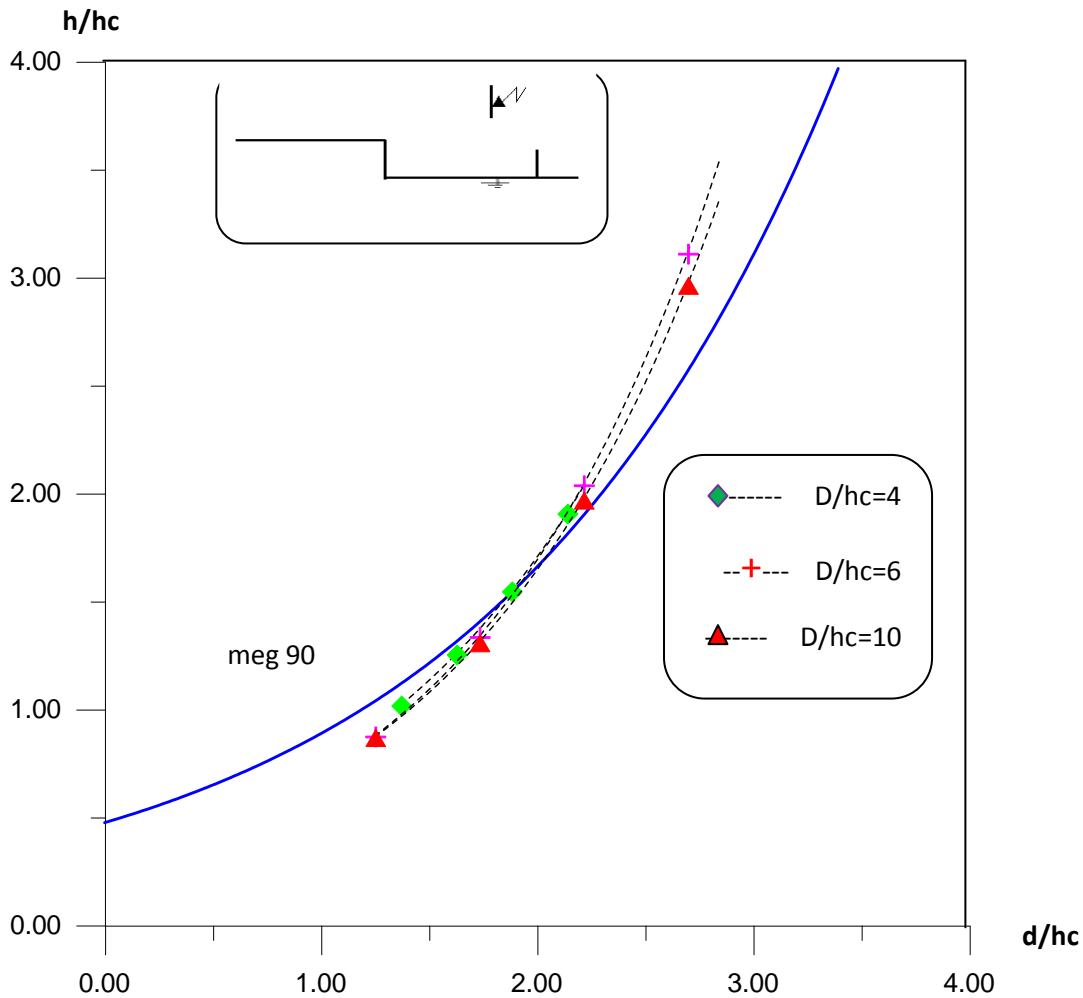
❖ **Paratonnerre sur la partie basse de la terre discontinue et l'axe de la décharge situé entre l'interface et le paratonnerre**

Le paratonnerre s'approche de l'interface, plus sa zone d'attraction ne devient plus petite que 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 électro géométrique classique.

Cette constatations a été vérifiée pour un rapport  $h_c/e$  à 0.4, 0.8 et 1.2 pour  $h_c/e = 1.6$ , il n'y a pratiquement aucune influence de l'interface sur l'attraction des décharges par le paratonnerre. En effet, les zones d'attraction pour les différentes positions du paratonnerre par rapport à l'interface sont confondues avec celle définie pour un sol homogène bon conducteur (figure II.8 et II.9).



**Figure (II.8) :** Zones d'attraction d'un paratonnerre verticale pour un rapporte  $hc/e = 0.4$  (Cho99).



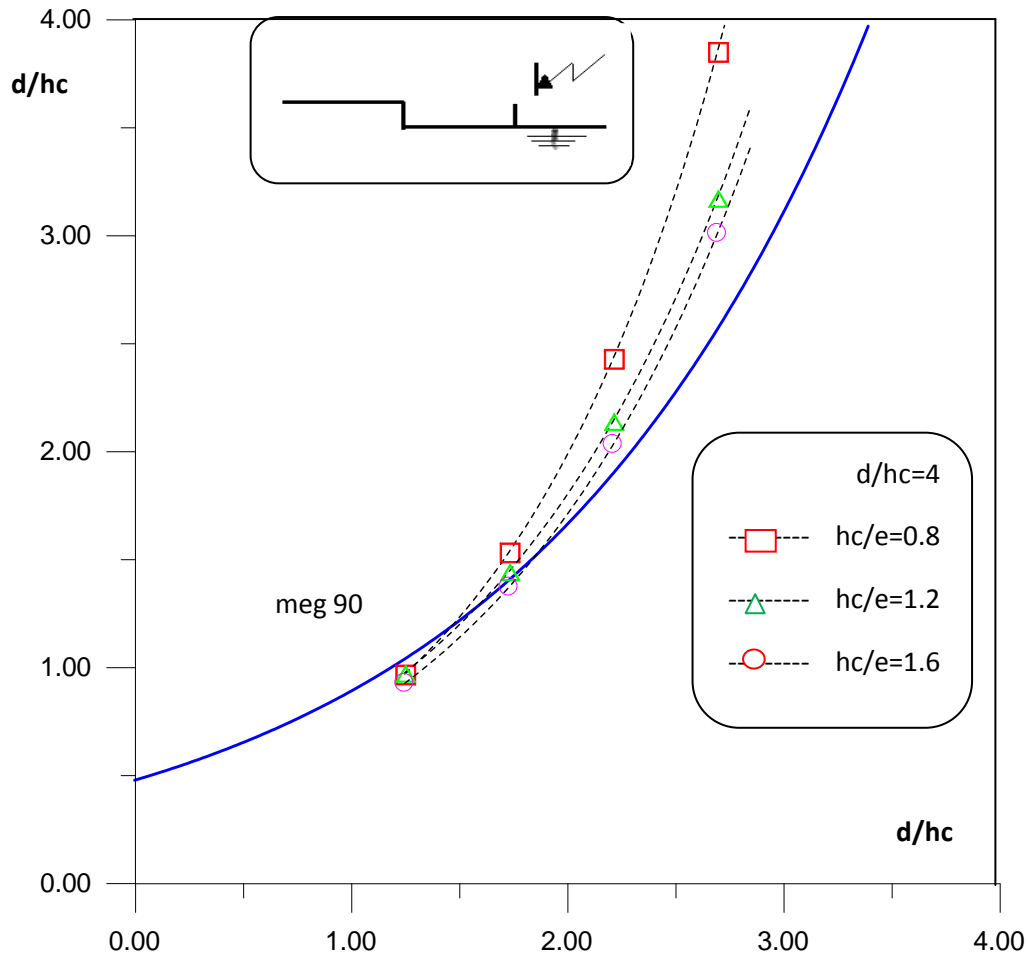
**Figure (II.9) :** Zone d'attraction d'un paratonnerre verticale pour un rapport  $hc/e = 1.6$  (Cho99)

❖ **Influence du rapport  $hc/e$  sur les zones d'attraction du paratonnerre**

D'après les figure (II.10) les zones d'attraction est nettement établie lorsque le paratonnerre est situe très proche de l'interface ( $D/h_c=4$ ), ou les zones d'attraction sont plus petites que celle donnée par le modèle électro géométrique.

Pour les autres rapports, nous remarquons que l'influence de l'interface est plus importante pour  $hc/e = 0.8$ , ou la zone d'attraction est la plus petite. Pour un rapport  $h_c/e$  égale à 1.2, la zone d'attraction devient plus large que celle définie avec la structure précédente ( $h_c/e$

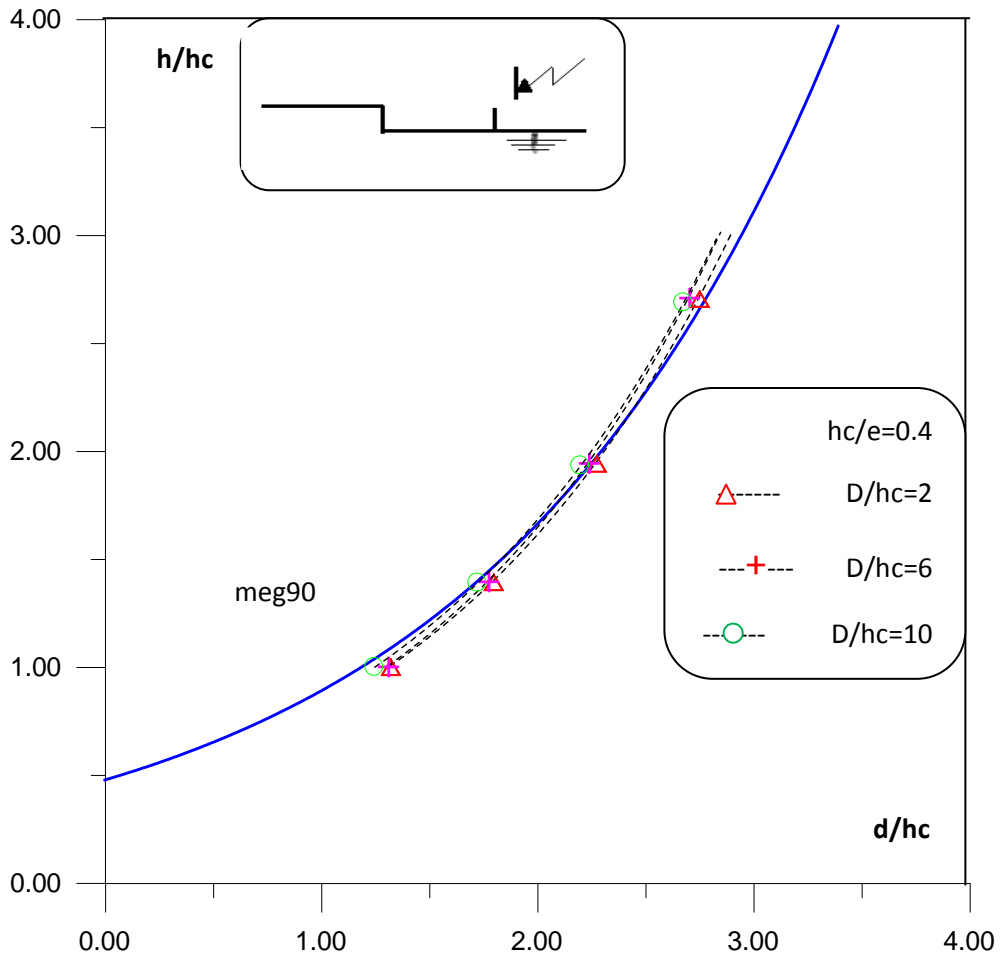
=0.8), mais reste toujours plus petite que celle donnée par le modèle électro géométrique classique. Quand la hauteur du paratonnerre devient relativement grande par rapport à la profondeur de la partie basse de la terre discontinue ( $h_c/e$ ), la zone d'attraction devient confondue avec celle définie pour un sol homogène bon conducteur.



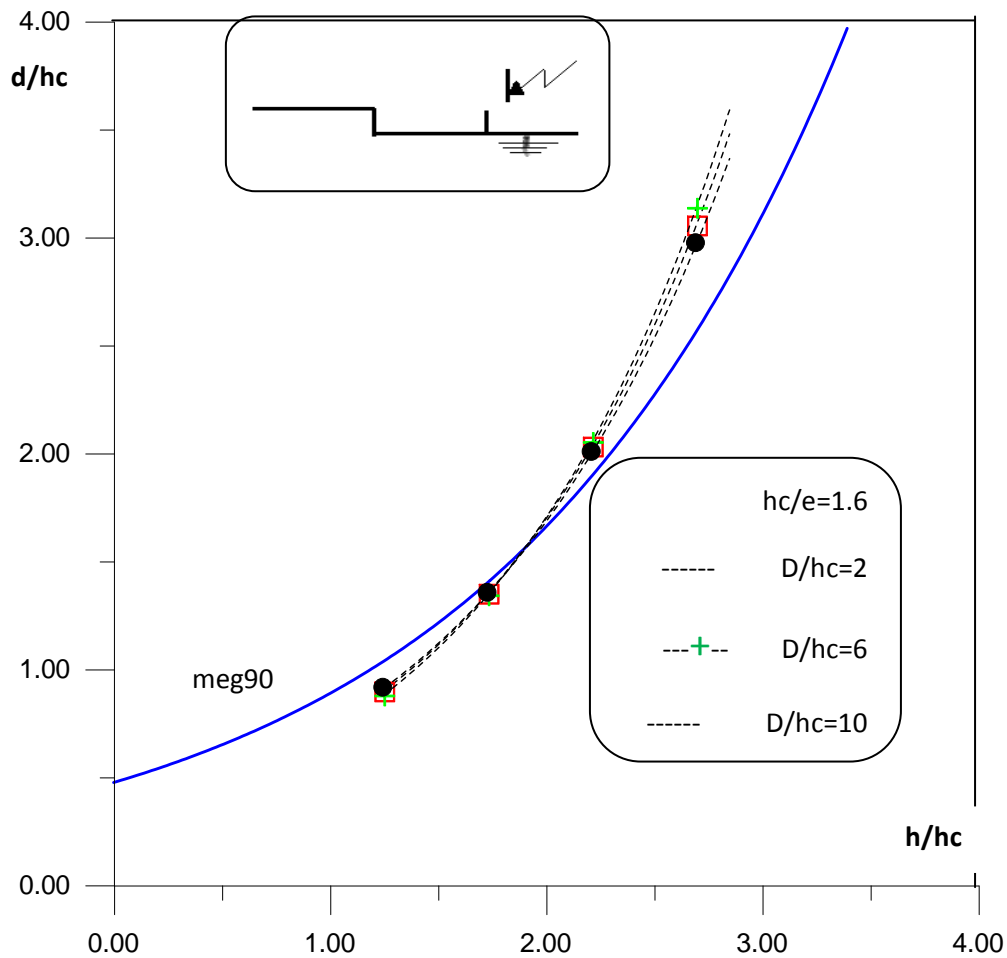
**Figure (II.10)** : Influence du rapport  $h_c/e$  sur les zones d'attraction du paratonnerre (Cho99)

❖ **Paratonnerre situé sur la partie basse de la terre discontinue entre l'axe de la décharge et l'interface**

Les résultats obtenus avec cette configuration sont présentés par la figure (II.11) et II.12). Nous constatons que les zones d'attraction du paratonnerre pour  $h_c/e = 0.4$  sont légèrement plus larges lorsque le rapport  $D/h_c$  diminue. Tandis que pour  $h_c/e = 0.6$ , les paraboles sont confondues avec celle donnée par le modèle électro géométrique, indépendamment de la position du paratonnerre.



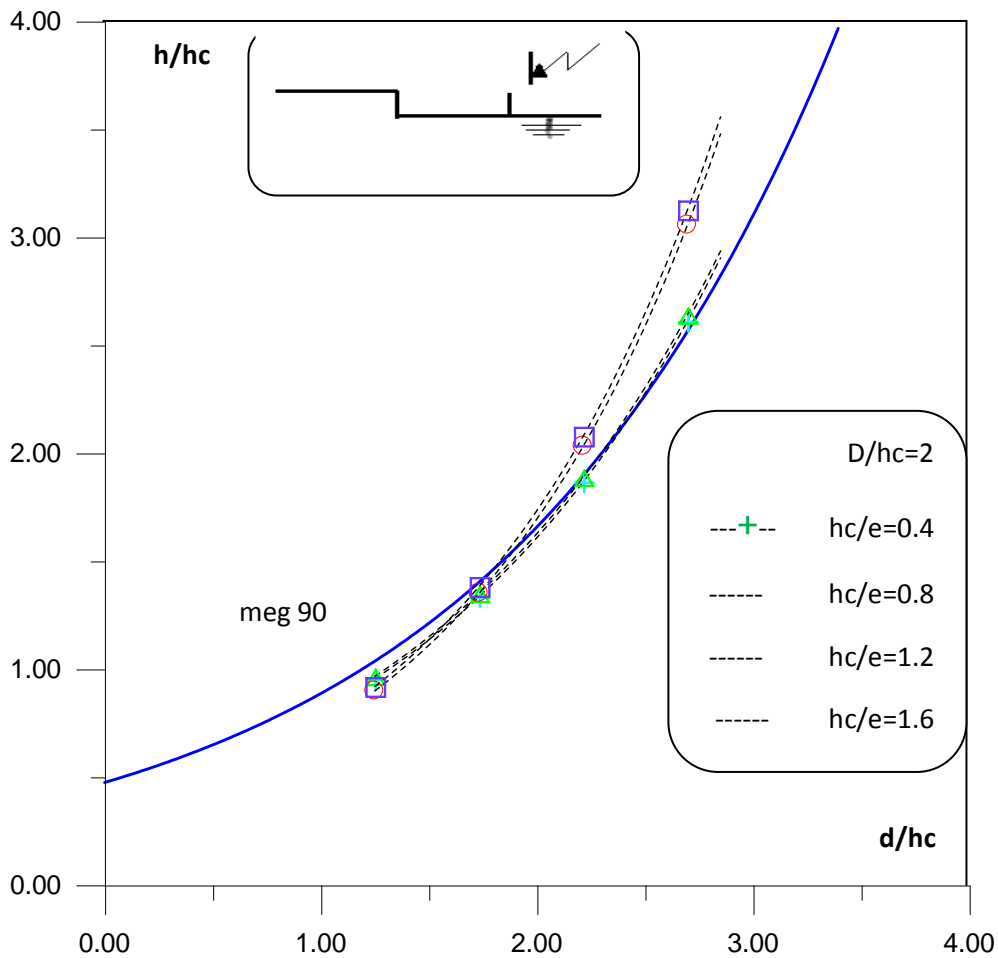
**Figure (II.11)** : Zones d'attraction d'un paratonnerre verticale pour un rapport  $hc/e = 0.4$  (Cho99)



**Figure (II.12) :** Zones d'attraction d'un paratonnerre verticale pour un rapport  $hc/e = 1.6$  (Cho99)

❖ **Influence du rapport  $h_c/e$  sur les zones d'attraction**

La figure (II.13) montre que pour un rapport de  $h_c/e < 1$ , les zones d'attraction sont les plus larges, cependant la plus grande zone a été obtenue avec  $hc/e = 0.4$ . Par contre, lorsque ce rapport devient supérieur à l'unité, il n'y a pratiquement pas d'influence de l'interface sur les zones d'attraction.



**Figure (II.13)** : Influence du rapport  $hc/e$  sur les zones d'attraction du paratonnerre  $D/hc = 2$  (Cho99)

## II.5 CONCLUSION

A l'issue des résultats présentés ; on peut conclure que la nature de la terre, son homogénéité et hétérogénéité ainsi que sa conductivité influe considérablement sur les zones d'attraction d'un paratonnerre vertical.

Dans le cas des terres mauvaises conductrices, ces zones d'attraction pourraient être plus larges que celle définie par le modèle électro-géométrique classique. Cet élargissement dépendrait surtout de la profondeur et de la nature de la terre mauvaise conductrice, ainsi que de la hauteur du paratonnerre.

Plus la profondeur (l'épaisseur) de cette terre est grande par rapport à la hauteur du paratonnerre, plus la zone d'attraction de ce dernier serait large. Il en est de même lorsque la conductivité du sol diminue.

Pour un sol discontinu, l'influence de la discontinuité sur les zones d'attraction d'un paratonnerre vertical, dépendait 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.

## CHAPITRE III

# Modèles de protection avec prise en charge de la nature électro-géologique du sol

### **III.1 INTRODUCTION**

Jusqu'à ce jour le modèle électro-géométrique est largement utilisé, pour la prédétermination des points d'impact. Mais ce modèle reste imparfait, l'une de ces imperfections réside dans le fait qu'il suppose que l'expression de la distance d'amorçage reste applicable quelle que soit la nature ou la forme des structures au sol, et quelle que soit la qualité de leurs mises à la terre. Ainsi, il ne fait pas distinction entre paratonnerre, bâtiment, arbre ou sol plat.

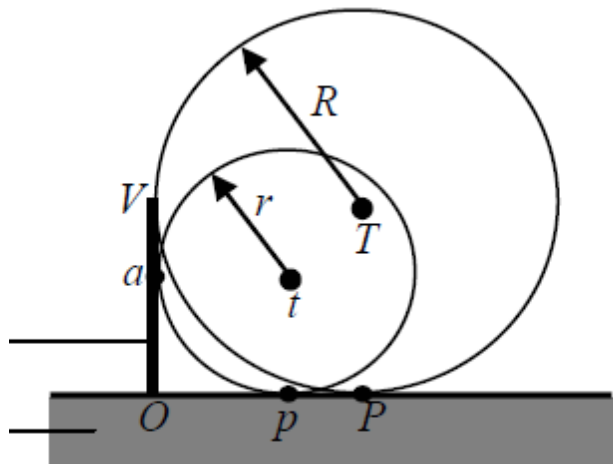
Pourtant, il est plus probable qu'un paratonnerre soigneusement mis à la terre attire mieux la foudre que les autres structures. En effet, l'existence des décharges ascendantes est bien prouvée, tant par observations photographiques que par les recherches en laboratoires. Ces décharges se développent plus au moins bien suivant la hauteur et la valeur de la résistance de la structure au sol.

Il est à noter aussi que le modèle électro-géométrique ne tient pas compte des propriétés électro-géologiques du sol ; or, d'après les travaux déjà effectués (sur terre mauvaise conductrice et terre discontinue), il a été constaté que ces propriétés ont une grande influence sur le point d'impact et par la suite sur la distance d'amorçage (6).

### **III.2 CRITIQUE DU MODÈLE ÉLECTRO-GÉOMÉTRIQUE**

Malgré ces dernières considérations, sérieuses objections peut-on porter au modèle électro géométrique, ainsi qu'à la méthode de la sphère fictive aussi. Les unes de ces objections sont présentées dans la littérature de spécialité. Par exemple, Gary observe (Gar95):

- a)* – Qu'il est invraisemblable que la grandeur et la forme des proéminences qui se trouvent à la surface de la terre n'influencent pas la formation des traceurs ascendants;
- b)* – Le modèle électro- géométrique, dont la théorie s'appuie sur les propriétés des foudres négatives, est appliqué, sans justification pertinente, aux foudres positives aussi.



**Figure. III.1** Détermination des zones de protection de deux coups avec des courants de deux intensités différentes.

La méthode de la sphère fictive, conduit à des conclusions qui contredisent la réalité et le bon sens technique. Ainsi, comme on peut observer de la Figure (III.1), la surface de la zone de protection qui correspond à un courant de foudre plus petit (la surface du triangle  $Oap$ ) est plus petite que la zone qui correspond à un courant plus grand (la surface du triangle  $OVP$ ). Il résulte la conclusion étonnante que les foudres sont d'autant plus dangereuses, que l'intensité du courant transporté est plus petite. Les foudres d'intensité plus petite « se pénètrent dans la zone de protection », offerte par le courant pris en considération lors de la conception de l'installation de parafoudre, en produisant des dégâts matériels ou même des accidents.

D'autre part, on constate que la théorie électro-géométrique fait totalement abstraction du rôle actif de la terre dans le déroulement des phénomènes. Dans le modèle de monsieur Horvath, les surfaces équipotentiellles qui se forment autour de la charge transportée par la foudre sont, toutes, des sphères concentriques, dont les centres se trouvent dans le point où se trouve le sommet du traceur. Une telle géométrie peut exister seulement quand le champ électrique se développe dans un espace infini, loin des surfaces de frontières constituées, par exemple, par la surface de la terre (y compris les surfaces de tous les incidents de terrain, comme sont les constructions aussi). Les charges électriques induites sur la surface conductrice de la terre perturbent cette géométrie, les sphères équipotentiellles cessent d'être concentriques (Oui07).

### III.3 MODÈLES PROPOSÉS À LA PLACE DU MODÈLE ÉLECTRO-GÉOMÉTRIQUE :

#### III.3.1 Modèle équivalent avec niveau de terre fictive :

Dans le cas où les zones d'attraction obtenues seront plus larges que celle définie par le modèle électro-géométrique classique, nous définissons un 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.

Le système avec terre mauvaise conductrice pourrait être assimilé comme équivalent à celui avec terre conductrice, où la hauteur  $h_c$  du paratonnerre est remplacée par  $h_c + e'$  et la distance  $h$  remplacée par  $h + e'$ .

Pour une disposition ' $h, h_c, e'$ ' donnée, la zone d'attraction serait limitée par la parabole d'expression :

$$X^2 - 2Y(1 + e'/h_c) + 1 - (e'/h_c)^2 = 0 \quad (\text{III.1})$$

$$(X = d/h_c \text{ et } Y = h/h_c) \quad (\text{III.2})$$

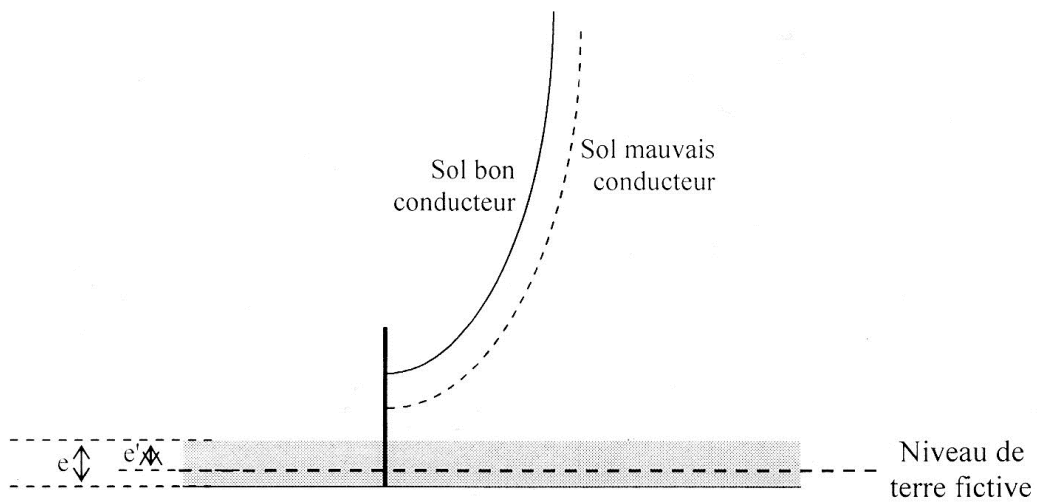
En résolvant l'équation (III.1), le niveau de terre fictive serait :

$$e'/h_c = (X^2 - 2Y + 1 + Y^2)^{1/2} - Y \quad (\text{III.3})$$

D'après ce résultat, quand le rapport  $e'/h_c$  tend vers zéro, nous retrouvons la zone d'attraction définie par le modèle électro-géométrique classique, et quand ce rapport devient grand, nous obtenons des zones d'attraction plus larges (Cho99, Bel94).

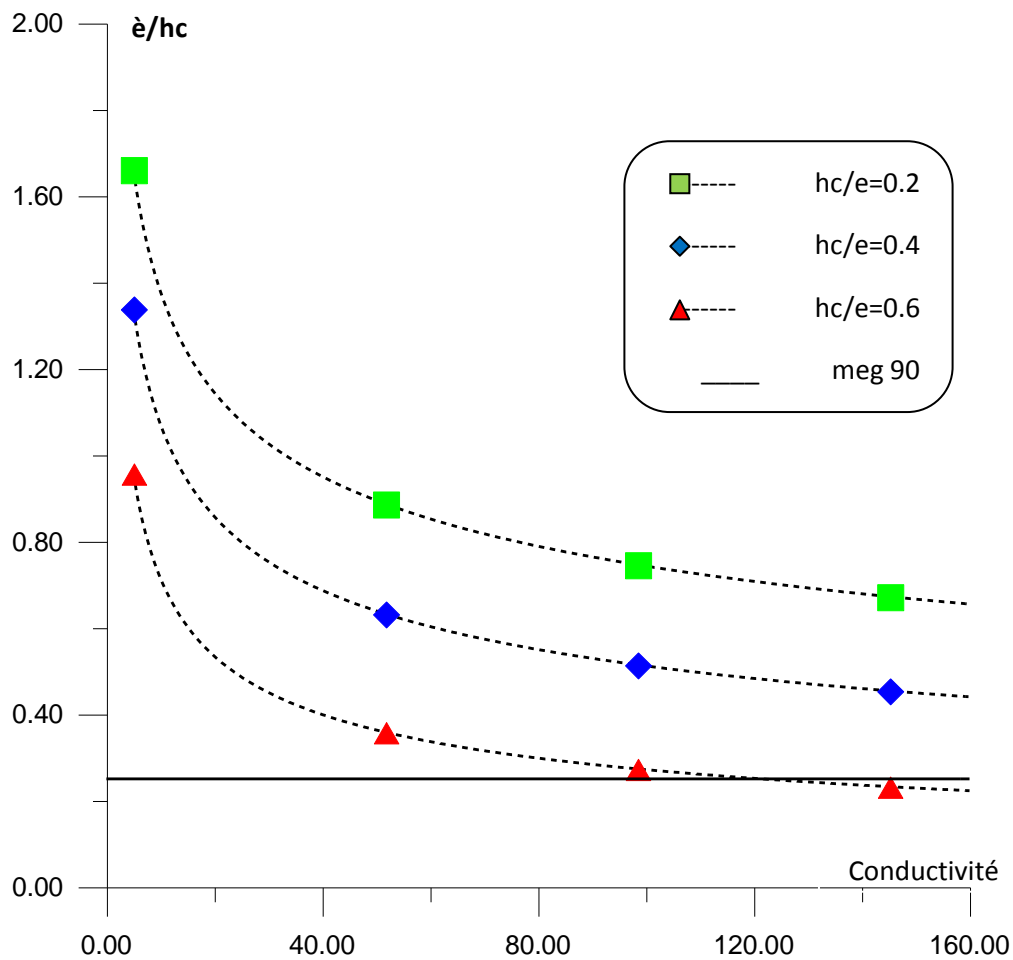
### III.3.1.1 Application du modèle sur les zones d'attraction d'un paratonnerre vertical avec une terre mauvaise conductrice :

Pour illustrer l'influence de la conductivité du sol sur le niveau de terre fictive, la relation réduite  $e'/h_c=f(\sigma)$  peut donner la variation de ce niveau pour des rapports  $(h_c/e)$  constants.



**Figure (III.2)** : Niveau de terre fictive d'un système avec sol mauvais conducteur.

Pour les différentes valeurs du rapport  $h_c/e$  et de la conductivité de l'eau choisies lors de cette étude, le niveau relative de terre fictive  $e'/h_c$  tend vers celui de la terre bon conductrice lorsque la conductivité du sol et ou le rapport  $h_c/e$  augmente (Cho99, Bou93).



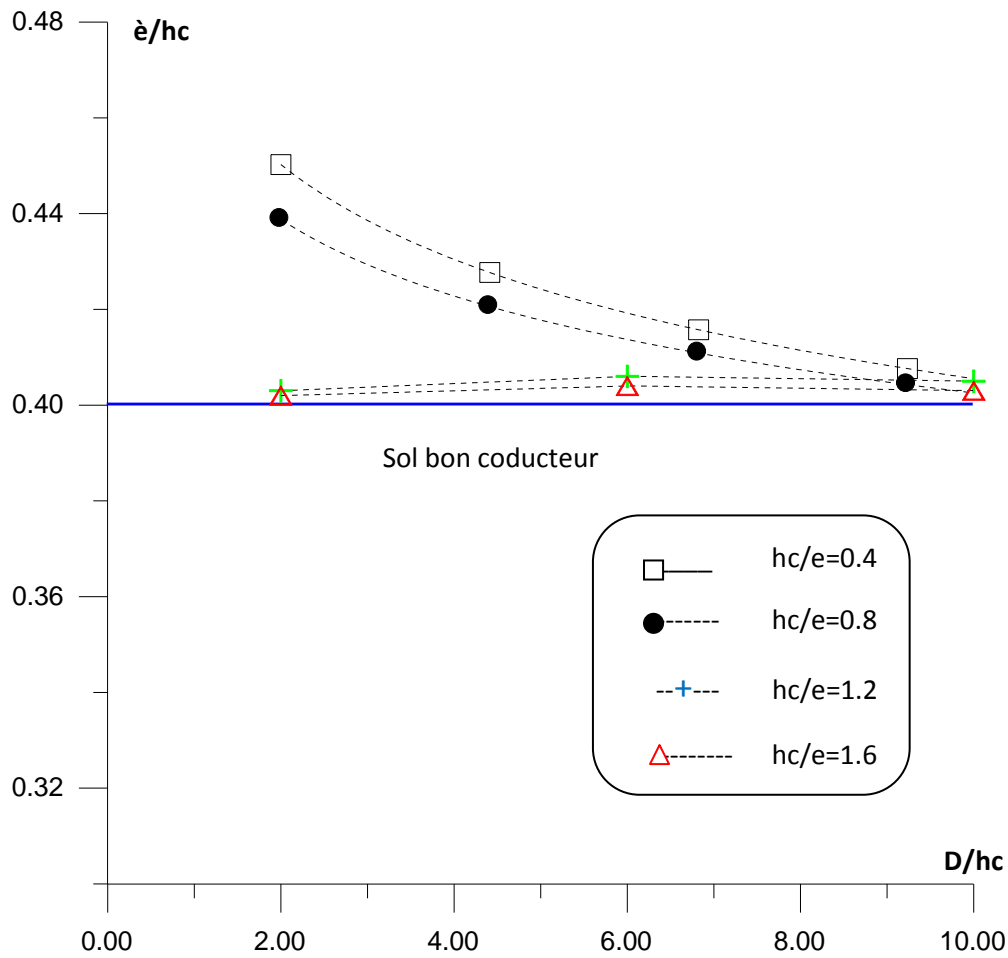
**Figure (III.3) :** Influence de la conductivité sur le niveau de terre fictive (Bel94).

### III.3.1.2 Cas d'un sol discontinu

#### ❖ Influence du rapport $hc/e$ sur le niveau de terre fictive

Pour étudier cette influence, nous présentons à la figure (III.4), les caractéristiques  $e'/h_c = f(D/h_c)$  pour des rapports  $h_c/e$  qui portent les valeurs 0.4, 0.8, 1.2 et 1.6.

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

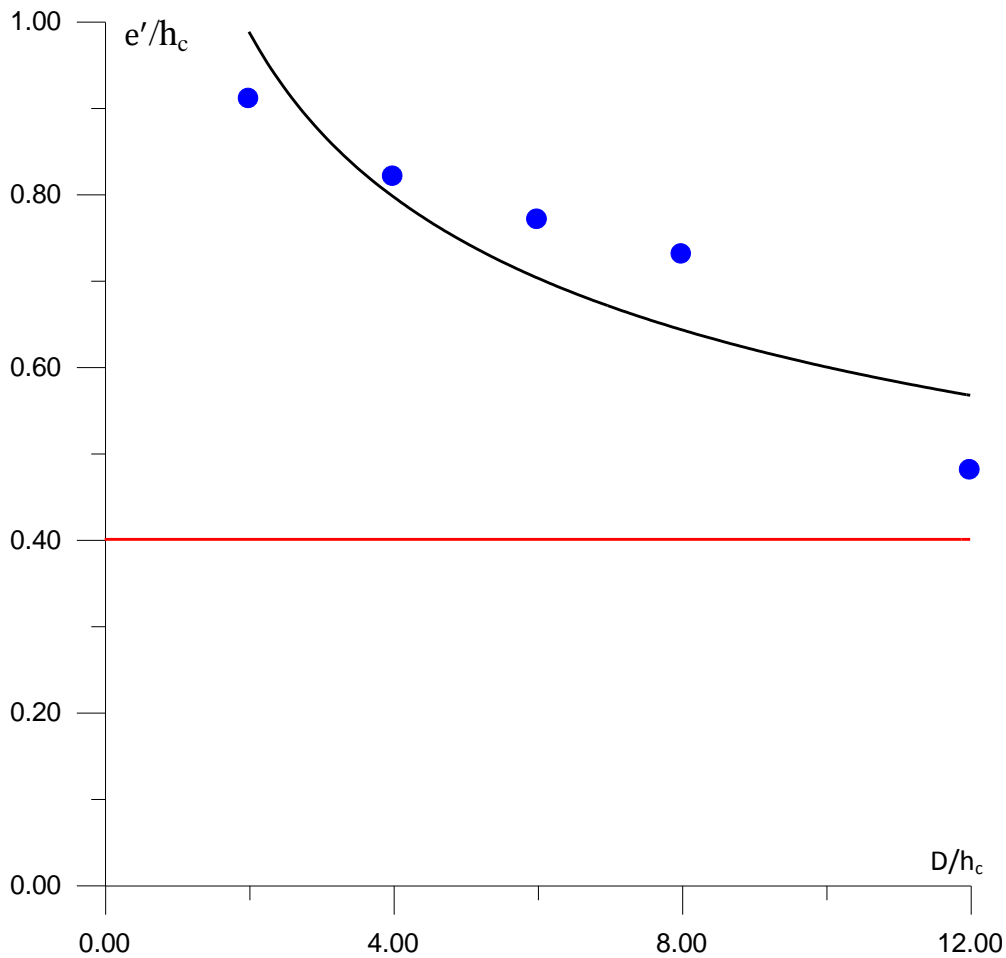


**Figure (III.4) :** Influence du rapport  $hc/e$  sur le niveau de terre fictive.

❖ **Influence du rapport  $D/h_c$  sur le niveau de terre fictive**

La relation réduite  $e'/h_c = f(D/h_c)$  illustrée à la figure (III.5) donne l'influence du rapport ( $D/h_c$ ) sur le niveau de terre fictive.

Il ressort de cette figure que le niveau fictif de la terre varie dans le sens inverse de la variation du rapport  $D/h_c$ . Pour  $D/h_c$  suffisamment grand ( $D/h_c=12$ ), le niveau relatif de la terre fictive  $e'/h_c$  tend vers celui du sol bon conducteur (Cho99).



**Figure (III.5) :** Influence du rapport D/hc sur le niveau de terre fictive.

### III.3.2 Distance d'amorçage :

L'amplitude du courant de foudre et la distance d'amorçage (longueur du dernier leader) sont liées. Différentes équations sont proposées pour la détermination de la distance d'amorçage, dont les plus importantes sont :

$$D = 2I + 30(1 - e^{-\frac{I}{6.8}}) \quad \text{Darveniza (1975)} \quad \text{(III.4)}$$

$$D = 10 \times I^{0.65} \quad \text{Love (1993)} \quad \text{(III.5)}$$

$$D = 9.4 \times I^{2/3} \quad \text{Whitehead (1974)} \quad \text{(III.6)}$$

$$D = 8 \times I^{0.65} \quad \text{IEEE (1985)} \quad \text{(III.7)}$$

$$D = 3.3 \times I^{0.78} \quad \text{Suzuki (1981)} \quad \text{(III.8)}$$

D : distance d'amorçage en mètres

I : intensité de courant de foudre en kiloampers (Joh03)

### III.3.3 Modèle électro-géométrique révisé (REGM)

Le modèle de électro-géométrique révisé a été développé par Moussa et Srivastava (1986; 1988). Par la suite, deux méthodes d'application sont proposées, la version modifiée de la méthode de la sphère fictive (Lee 1979, Lee 1978, Orwell 1988), et la méthode donnée par Moussa et Srivastava (1988; 1991) elle diffère du modèle de Whitehead dans les points suivants:

- On suppose que le coup arrive à une direction verticale. (Il a été constaté que l'hypothèse du modèle de Whitehead qui suppose que le coup arrive à un angle au hasard constitue une complication et n'est pas nécessaire [Moussa et Srivastava 1988]).
- Une valeur de 24 kA est utilisée comme une valeur moyenne du courant de la décharge (Moussa et Srivastava 1989.) Ce choix est basé sur la distribution de la fréquence de la première décharge négative à la terre. Cette valeur mieux Réconcilie l'EGM avec les observations pratiques des zones.
- Le modèle n'est pas attaché à une forme spécifique de la distance d'amorçage [Equations (III.4) jusqu'à (III.8)]. Il est probable que les recherches modernes peuvent modifier la forme de cette équation. En effet, La meilleure estimation disponible peut être utilisée. (Joh03)

#### III.3.3.1 Description de MEG révisé

Auparavant, on introduit le concept que la distance de la décharge finale est liée à l'amplitude du courant de la décharge, et L'équation (III.7) a été sélectionnée comme la meilleure approximation de cette relation. Dans le MEG révisé, on introduit, un coefficient k qui prend compte des différentes distances d'amorçages suivant la nature de l'objet, tel que le paratonnerre, un fil de protection et la terre.

On reprend l'équation (III.7) avec cette modification:

$$D_m = 8kI^{0.65} \quad (III.9)$$

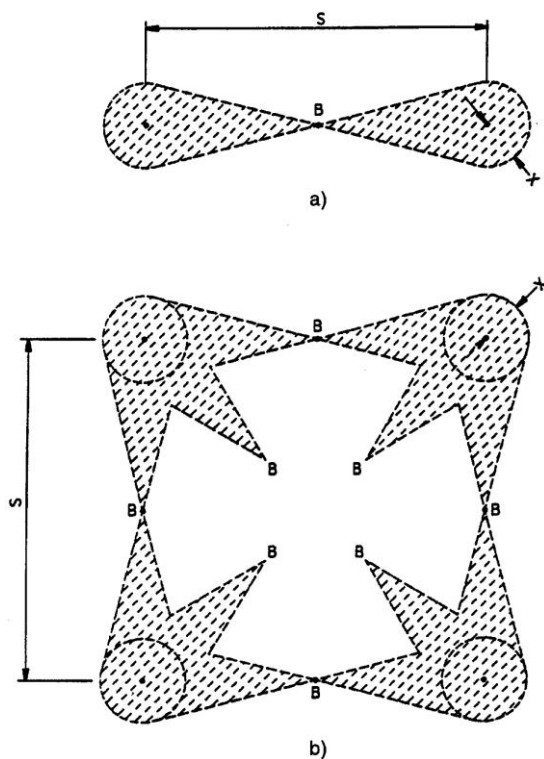
Où

$D_m$  : distance d'amorçage en mètres

$I$  : Courant du l'arc en retour en kiloampères

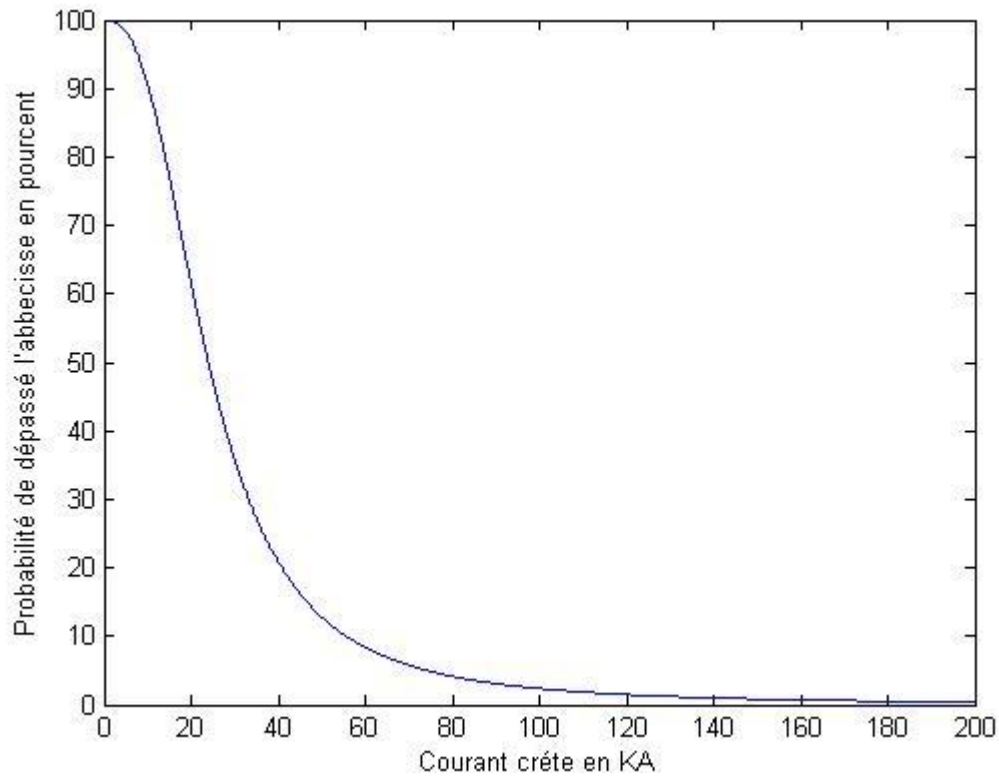
$k$  : coefficient qui tient compte de la nature de l'objet foudroyé.

Mousa (1988) donne une valeur de  $k = 1$  pour les coups aux fils et au niveau de la terre et une valeur de  $k = 1.2$  pour les coups à un paratonnerre.



**FIGURE III.6** Zones protégées par des multiples paratonnerres

- a) Cas de deux paratonnerres.
- b) Cas de quatre paratonnerres.



**Figure III.7:** Probabilité du courant du coup dépassant l'abscisse pour les coups au niveau de la terre. (Std d'IEEE. 998-1996).

Les coups en retour ont une large distribution suivant les amplitudes, comme montré dans la figure III.7.

On a déjà vu qu'il n'est pas nécessaire de protéger les matériels contre tous les courants de la décharge plus grands que  $I_d$ . Les courants moins que  $I_d$  est permis d'entrer dans la zone protégée si le matériel peut résister aux tensions au-dessous de son BIL. Ceci Sera illustré en considérant trois niveaux du courant de la décharge: les courants de même ordre que  $I_d$ , les courants plus grands que  $I_d$ , et les courants moins que  $I_d$ . En premier laissez-nous considérer le courant du coup  $I_d$  :

#### ❖ Protection Contre le Courant du Coup $I_d$

On peut déterminer  $I_d$  à partir de L'équation (III.10) ou l'équation (III.11), on peut le définir comme le courant qui produisant une tension disruptive, au delà d'elle l'isolation ne

résiste plus. En substituant ce courant dans l'équation (III.12) ou l'équation (III.13) cela donne la distance de la décharge  $D$ .

$$I_d = BIL \times 1.1 / (Z_d/2) = 2.2(BIL)/Z_d \quad (\text{III.10})$$

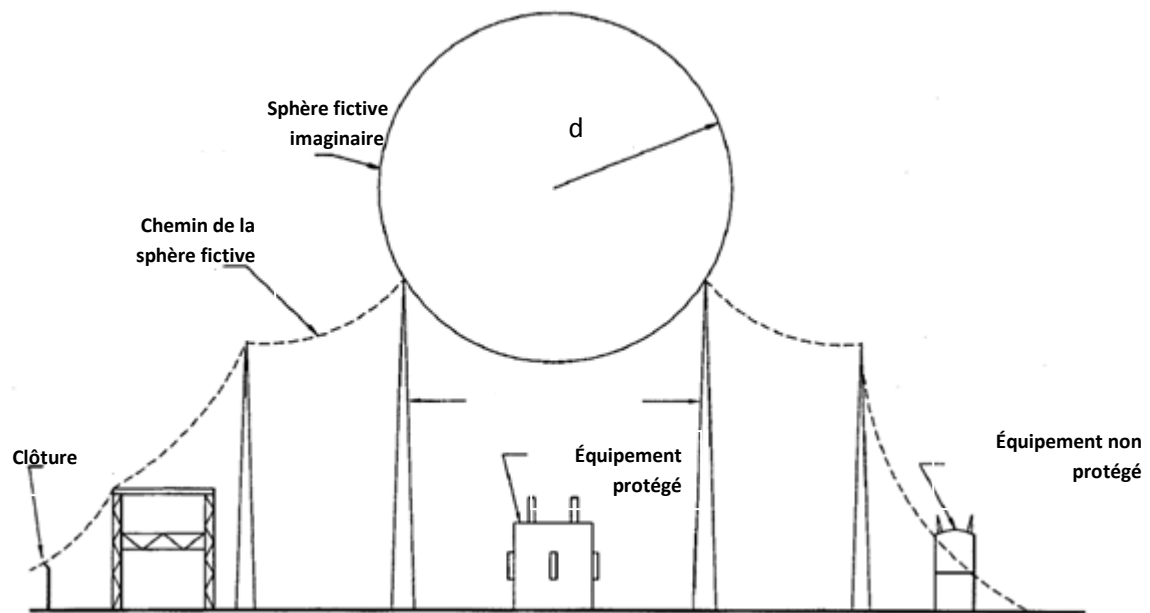
$$I_d = 0.94 \times C.F.O. \times 1.1 / (Z_d/2) = 2.068(C.F.O.)/Z_d \quad (\text{III.11})$$

$$S_m = 8 k I^{0.65} \quad (\text{III.12})$$

$$Sf = 26.25 k I^{0.65} \quad (\text{III.13})$$

En 1977, Lee a développé une technique simplifiée pour appliquer la théorie électro géométrique au système de protection des immeubles et équipements industriels (1982; 1979; 1978.) Orwell a élargi cette technique pour couvrir spécifiquement la protection des sous-stations électriques (1988). La technique développée par Lee est connue comme la méthode de la sphère fictive. Cette méthode emploie l'hypothèse simplifiant que la distance de la décharge à la terre, à mât ou à un fil est la même. Avec cette exception, la méthode de sphère fictive est en accord avec le MEG révisé.

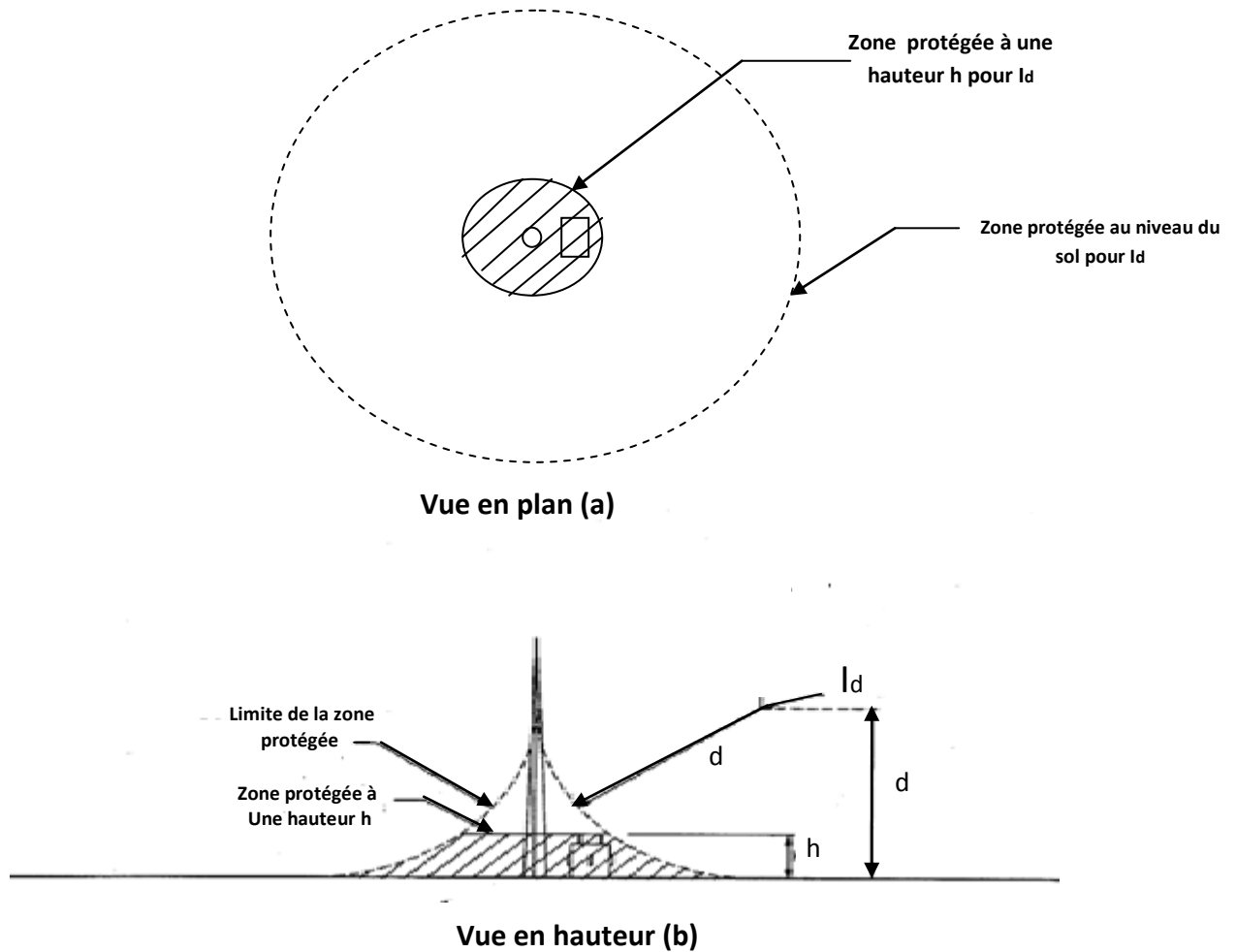
L'utilisation de la méthode de la sphère fictive implique de rouler une sphère imaginaire du rayon  $d$  au-dessus la surface de la sous-station. La sphère roule vers le haut et le bas et elle est soutenue par les paratonnerres, les fils de la protection, la sous-station, les barrières et les autres objets métalliques qui peuvent être touchés par une décharge. Une partie de matériel est dite protégée d'un coup direct s'il reste au-dessous de la surface courbée de la sphère. Le matériel qui touche la sphère ou pénètre sa surface n'est pas protégé. Le concept de base est illustré dans la Figure (III.8). (Joh03)



**Figure III.8 :** Principe de la sphère fictive. (Std d'IEEE. 998-1996).

En continuant la discussion de la protection contre le courant de la décharge  $I_d$ , considérant en premier temps un seul paratonnerre. La figure (III.9) illustre Le modèle géométrique de la protection d'une sous-station avec une seule tige. Tous les points au-dessous d'un arc, de rayon  $d$  qui touche la tige, sont protégés contre le courant du coup  $I_d$ , c'est la zone protégée.

Les arcs sont construits comme suit [voyez la Figure (III.9)], une ligne discontinue est dessinée parallèlement à la terre à une distance  $d$  au-dessus de la terre. Un arc du rayon  $d$  avec le centre positionné sur la ligne discontinue est dessiné ainsi le rayon de cet arc doit toucher le paratonnerre. Les précurseurs qui résultent du courant du coup  $I_d$  et qui tombent en extérieur du point où se situe l'arc tangent à la terre se décharge vers la terre. Les précurseurs qui résultent du courant  $I_d$  qui descendent en intérieur du point où l'arc est tangent à la terre frappent la tige de protection. La hauteur de la tige qui donne une zone de protection maximale égale à  $d$ . Si La hauteur du paratonnerre est plus petite que  $d$ , la zone réservée à la protection sera réduite. De même, les paratonnerres de hauteur supérieure à  $d$  donnent une protection supplémentaire par rapport au cas d'un seul paratonnerre. Ceci n'est pas nécessairement vrai dans le cas de plusieurs paratonnerres et le cas de fils de la protection. La zone de la protection peut être représentée comme la surface d'une sphère de rayon  $d$  qui est roulé vers le mât jusqu'à ce qu'elle le touche. Comme la sphère se déplace autour du paratonnerre, la surface tridimensionnelle de la protection sera définie.



**Figure III.9** Zone de protection d'un paratonnerre selon le REGM (Std d'IEEE. 998-1996.)

❖ **Protection contre les coups de foudre avec des courants plus grands que  $I_d$**

Considérant un courant du coup  $I_{d1}$  avec une amplitude plus grande que  $I_d$ , dont la distance d'amorçage déterminée à partir de l'équation (III.6) ou l'équation (III.7) est  $d_1$ . Le modèle géométrique pour cette condition est illustré à la figure (III.10). Les arcs limites de la zone de protection pour le courant de décharge  $I_{d1}$  et ceux discutés auparavant relativement à  $I_d$  sont montrés à la fois. la zone protégée par le paratonnerre relativement au courant  $I_{d1}$  est plus grande que la zone réservée à la protection fournie par le paratonnerre relativement au courant  $I_d$ .

De nouveau, on peut représenter comme la surface d'une sphère la zone protégée touchant le paratonnerre, dans cet argument, cette sphère présente un rayon  $d_1$ .

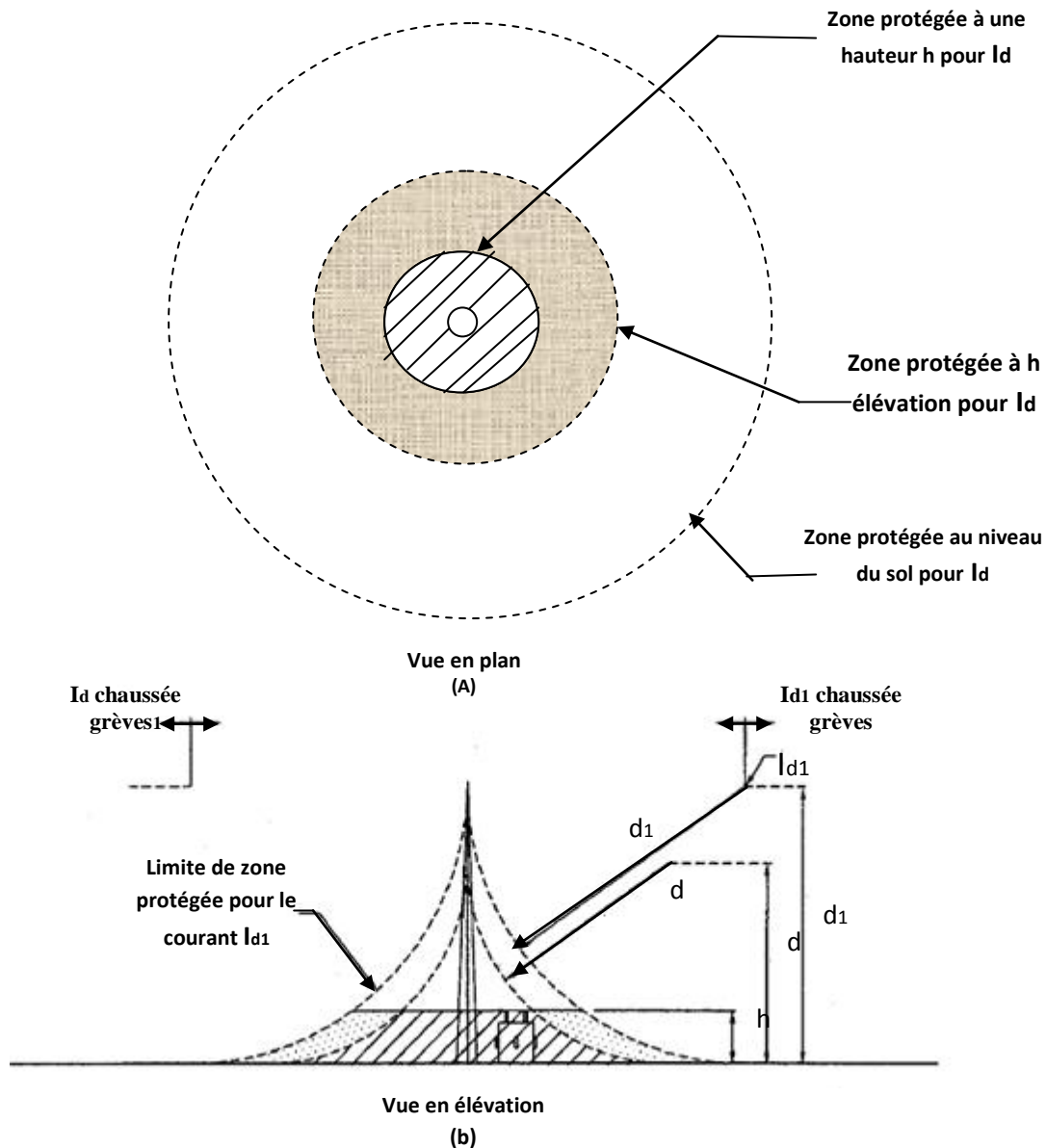
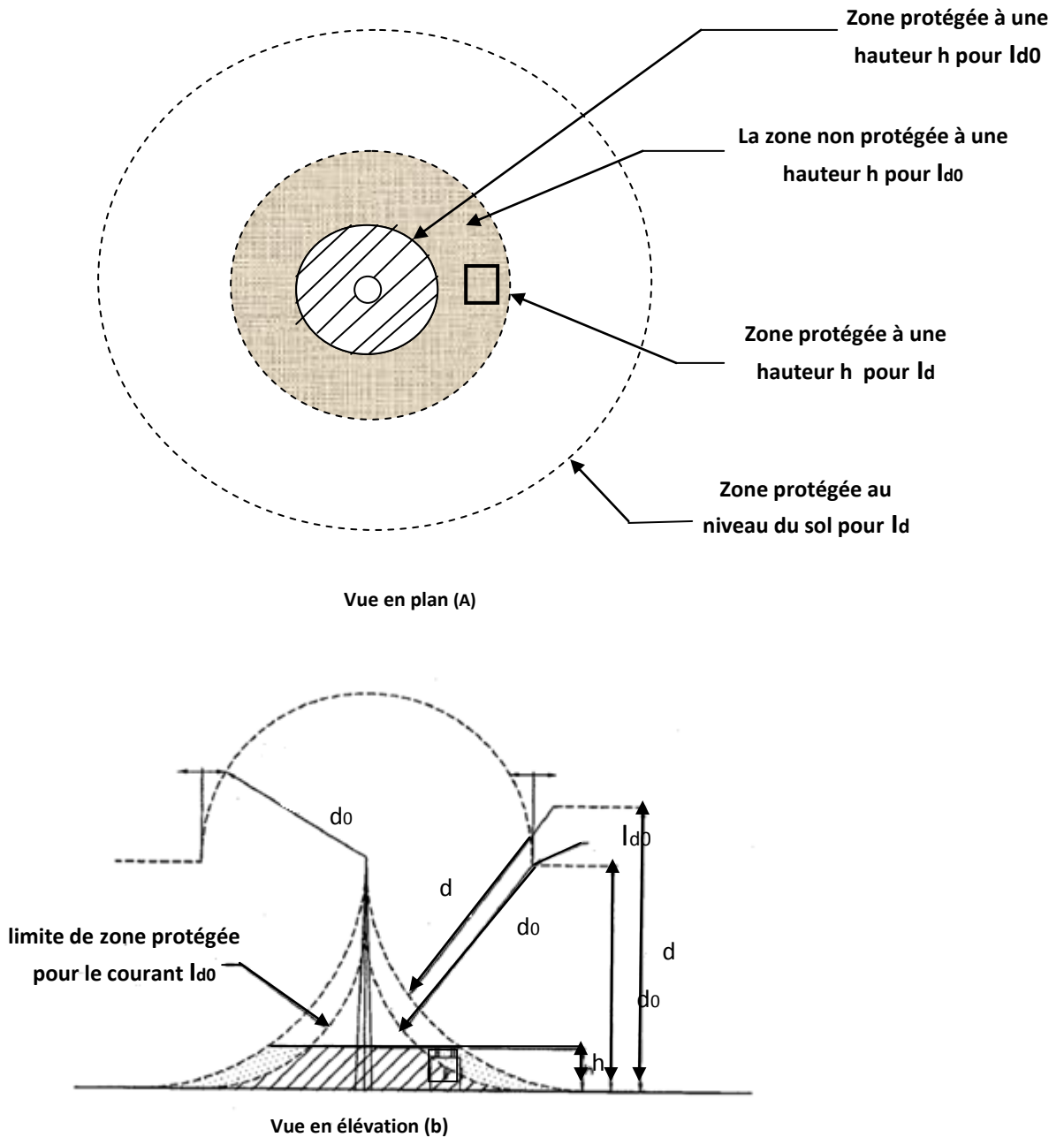


FIGURE III.10 Zones de protection d'un paratonnerre pour les courants  $I_d$  et  $I_{d1}$ .

❖ **Protection Contre les coups de foudre avec des courants inférieurs à  $I_d$**

Le problème qui reste à examiner est ce que la protection reste valable lorsque les courants seront moins que  $I_d$ . Pour cela, considérant un courant du coup  $I_{d0}$  avec une

amplitude inférieure à  $I_d$ , la distance d'amorçage déterminée à partir de l'équation (III.6) ou l'équation (III.7) est  $d_0$ . La figure (III.11) montre les zones de protection des deux courants  $I_{d0}$  et  $I_d$ . La zone protégée fournie par la tige relativement au courant  $I_{d0}$  est plus petite que celle définie à partir du courant de décharge  $I_d$ . (Joh03)



**FIGURE III.9** Zones de protection d'un paratonnerre pour les courants  $I_d$  et  $I_{d0}$ .

### III.4 APPLICATION DU MODÈLE ÉLECTRO-GÉOMÉTRIQUE RÉVISÉ DANS LE CAS D'UNE TERRE HÉTÉROGÈNE :

#### III.4.1 Modèle électro-géométrique révisé REGM90%

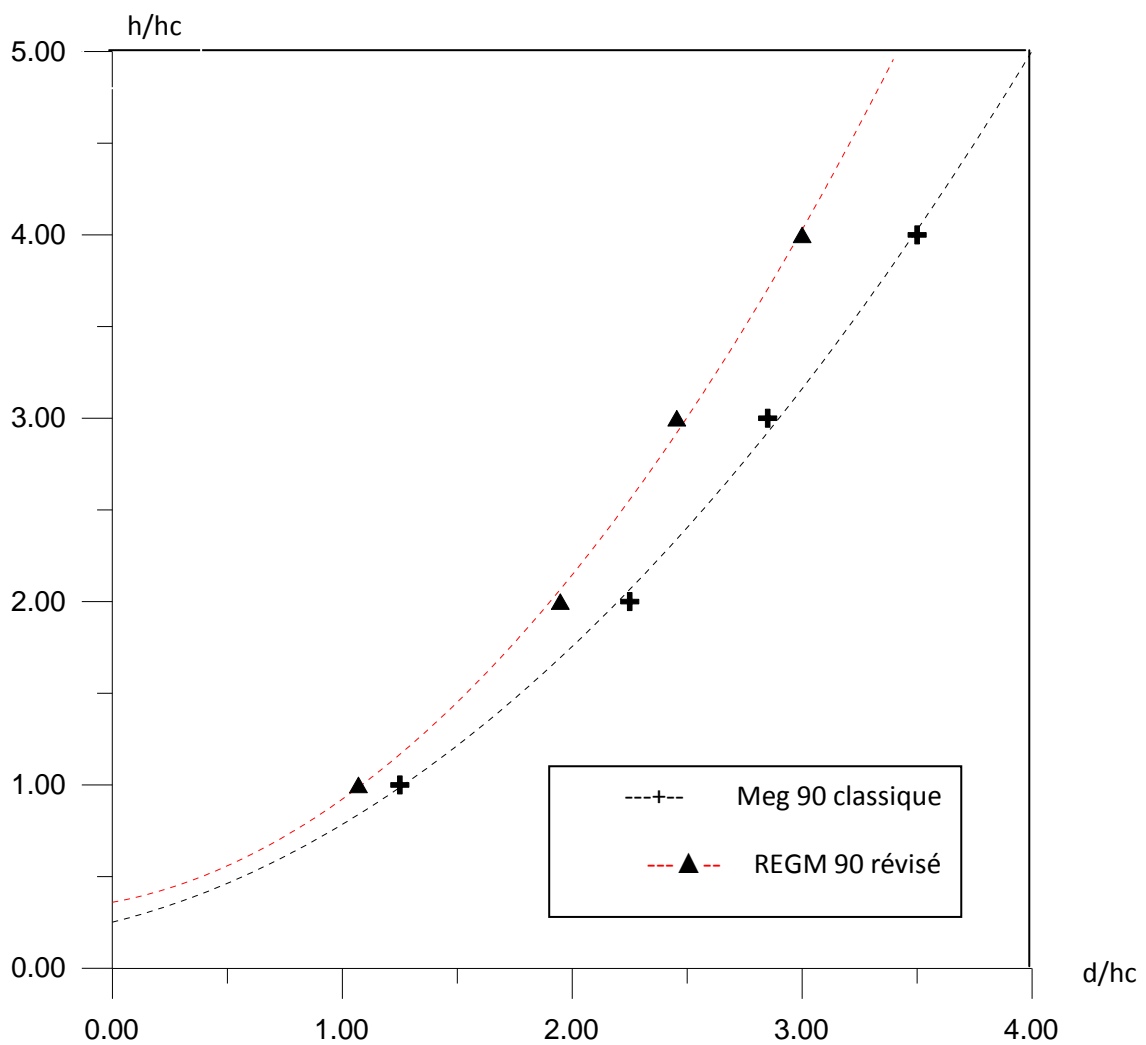
Dans le but de trouver un nouveau modèle de référence pour la comparaison des zones d'attraction déjà tracés dans les deux cas de terres mauvaise conductrice et discontinue , et beaucoup plus dans le cas critique ou ces zones sont plus petites que celle définie par le modèle électro-géométrique classique qui peut constituer un danger sur les installations à protégées.

En utilisant la meilleure estimation de la distance d'amorçage (équation III.7) et en gardant les mêmes valeurs des rapports ( $h/h_c$ ).

Le tableau ci-dessous donne les valeurs de la distance d'amorçage calculé par le REGM et comparées au modèle classique.

$h/h_c$	1	2	3	4
$d/h_c$ (meg90%)	1.25	2.25	2.85	3.50
$d/h_c$ (REGM90%)	1.07	1.95	2.45	3.00

**Tableau III.1** Distances d'amorçages des deux modèles électro-géométriques classique et révisé.



**Figure III.10** : Zones d'attraction d'un paratonnerre vertical dans le cas d'un sol homogène bon conducteur.

Nous constatons sur la figure III.10 que les zones d'attraction tracés à partir du modèle révisé sont plus petites que celles définies par le modèle de Whitehead cela est du au fait que la distance d'amorçage donné par le REGM est plus petite que celle définie par Whitehead.

### III.4.2 Application de REGM pour le cas d'une terre homogène mauvaise conductrice :

D'après les résultats présentés au chapitre précédent concernant les zones d'attraction d'un paratonnerre vertical avec une terre discontinue. Pour certaines configurations, les zones d'attraction sont plus petites que le modèle électro-géométrique classique. Afin de corriger ce problème on a comparé ces zones avec la zone déterminée à partir de modèle révisé REGM.

#### III.4.2.1 Influence de la conductivité et de l'épaisseur "e" du sol sur les zones d'attraction paratonnerre vertical

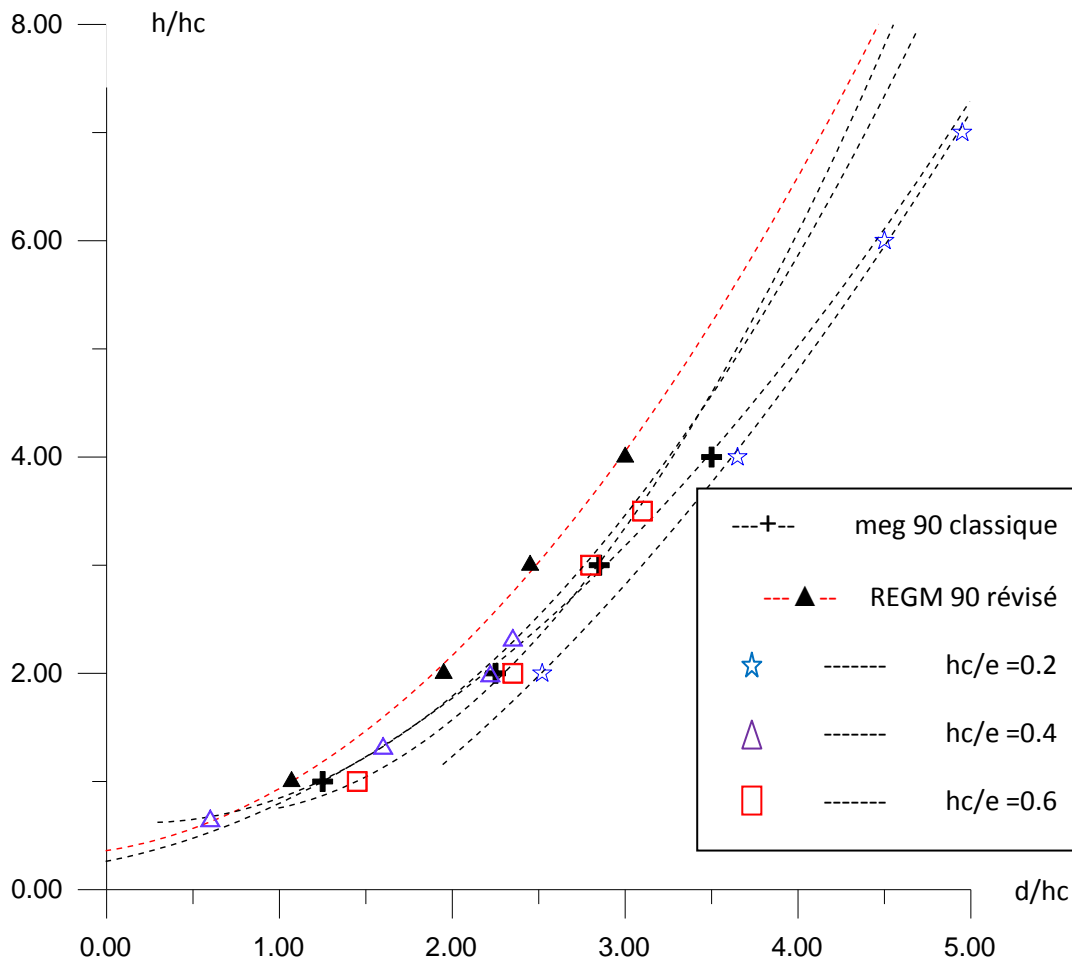


Figure (III.11) : Zone d'attraction pour différents rapports  $hc/e$  ( $\gamma=160\mu\text{s/cm}$ ,  $e=10\text{cm}$ )

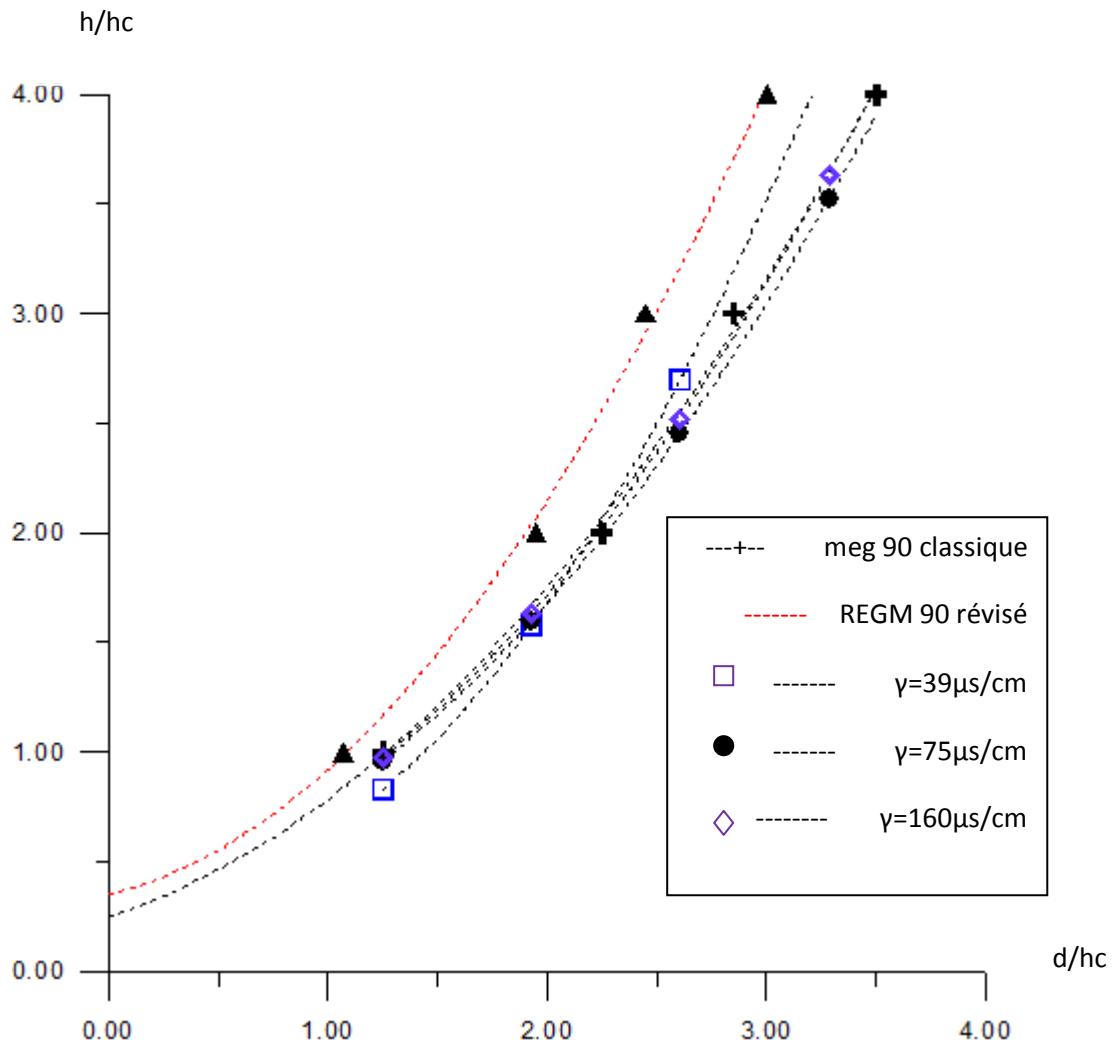
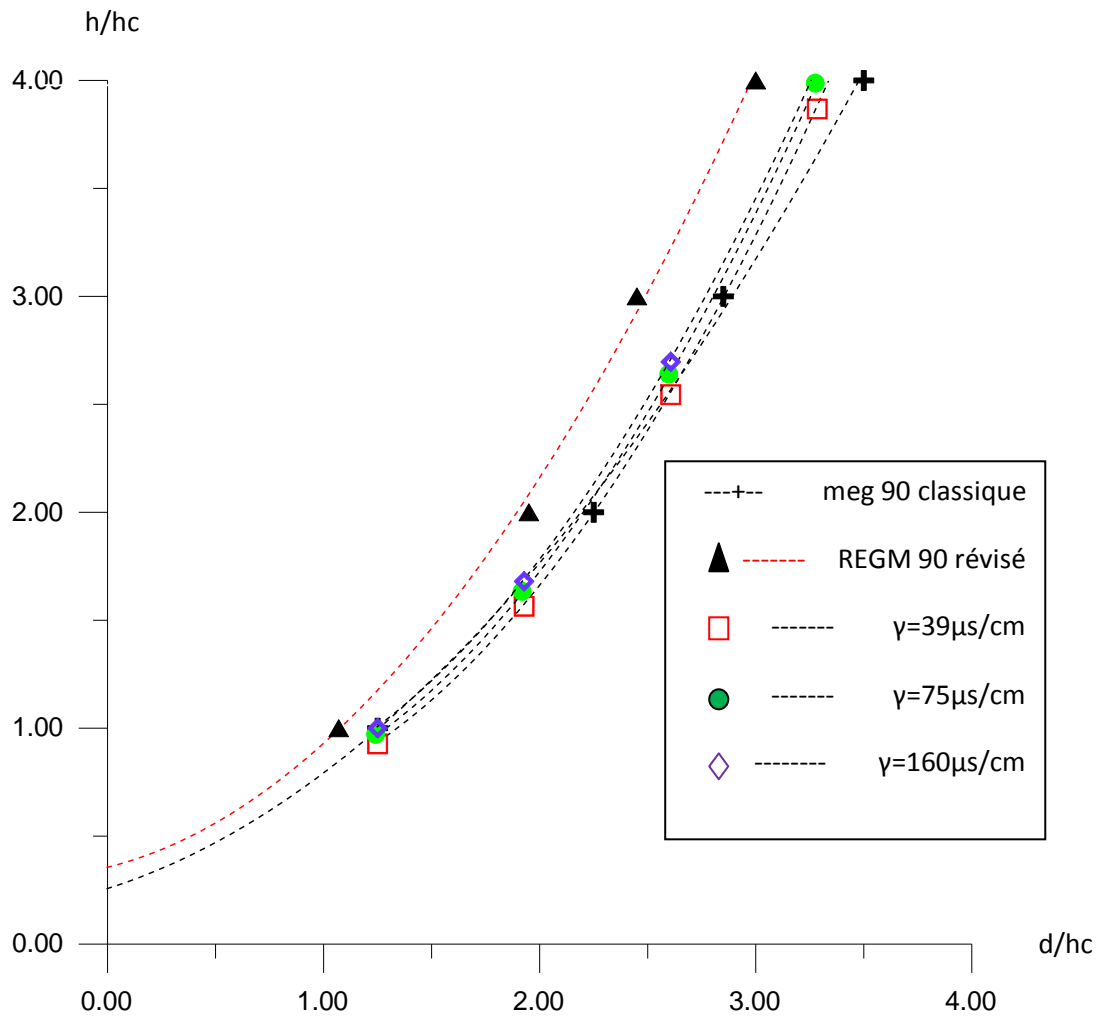


Figure (III.12) : Influence de conductivité sur les zones d'attraction  $e=9\text{cm}$  ( $e=15\text{cm}$ )



**Figure (III.13) :** Influence de conductivité sur les zones d'attraction  $e=6\text{cm}$  ( $e=10\text{cm}$ )

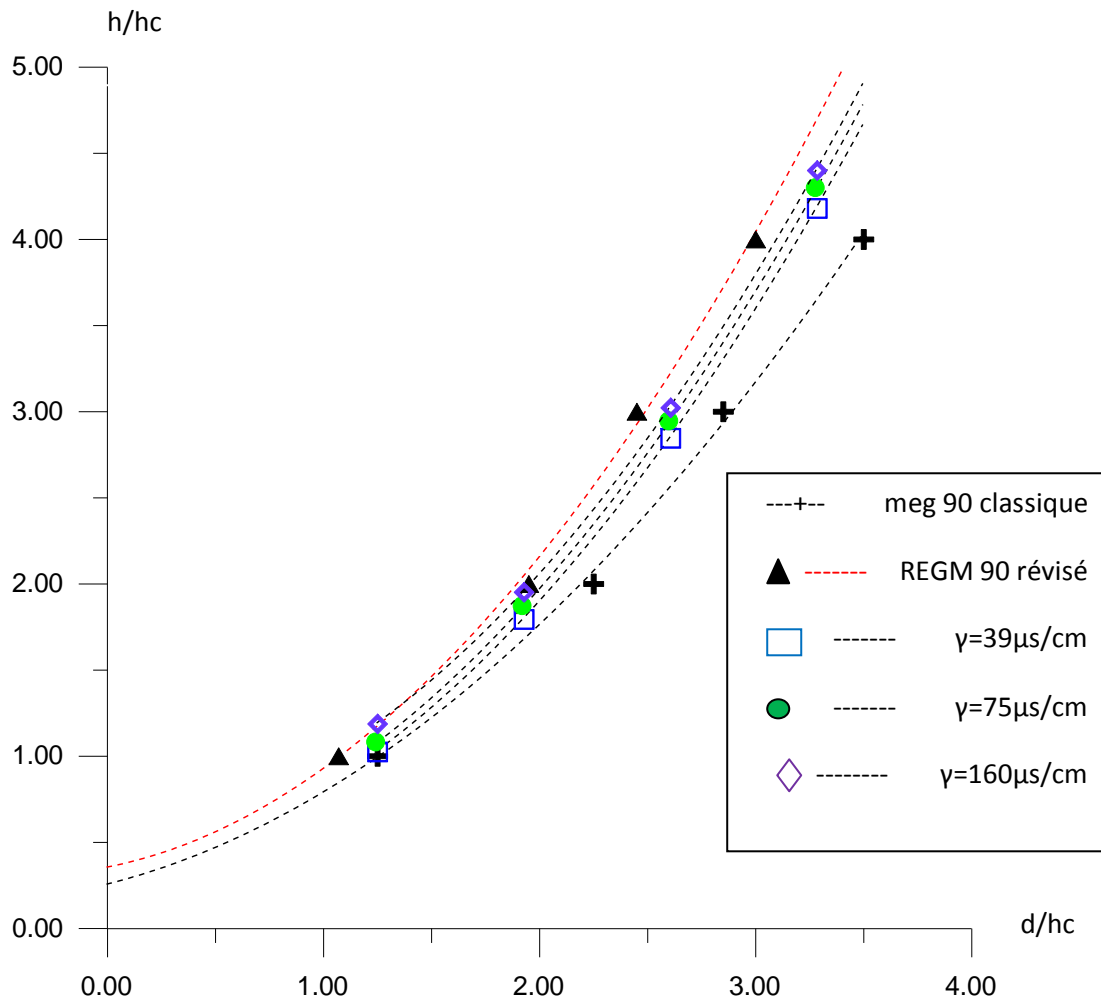


Figure (III.14) : Influence de conductivité sur les zones d'attraction  $e=3\text{cm}$  ( $e=5\text{cm}$ )

### III.4.3 Application de REGM pour le cas d'une terre discontinue

#### III.4.3.1 Influence du rapport $hc/e$ sur les zones d'attraction du paratonnerre

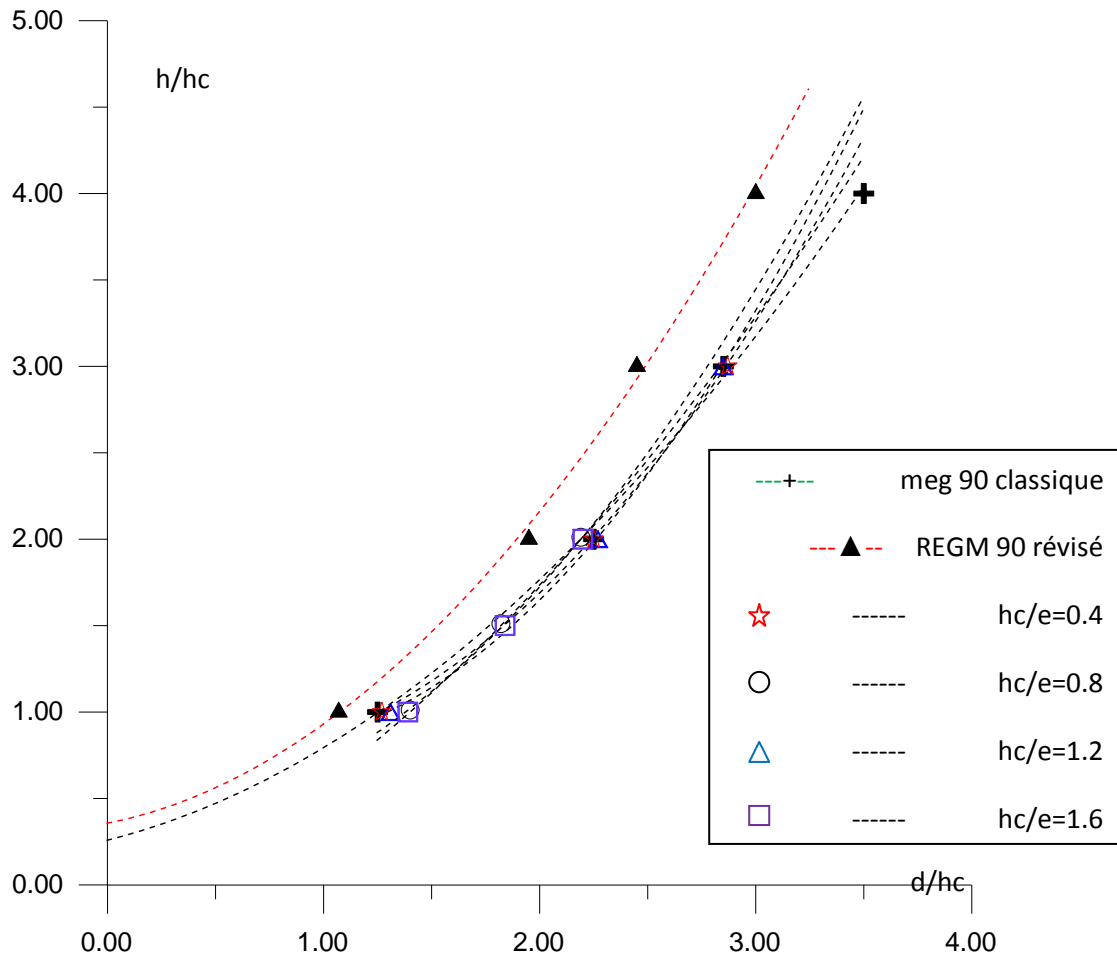
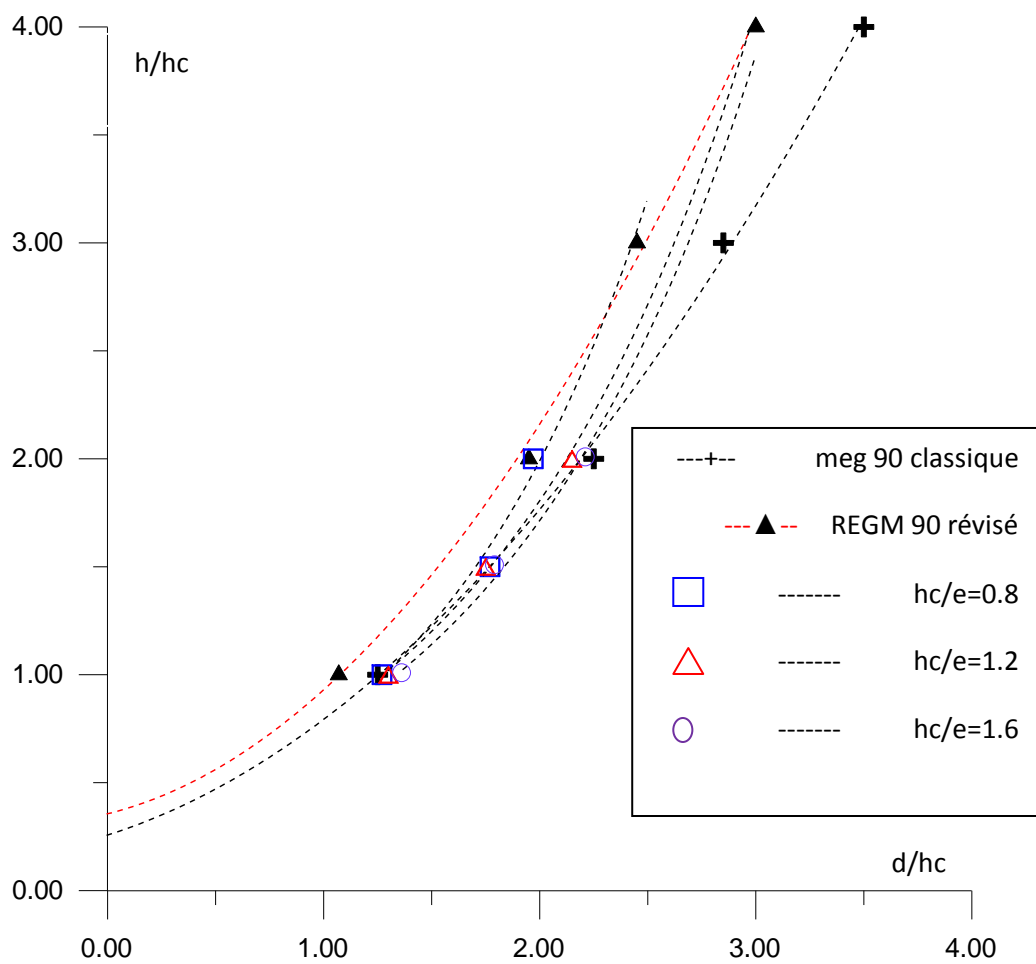


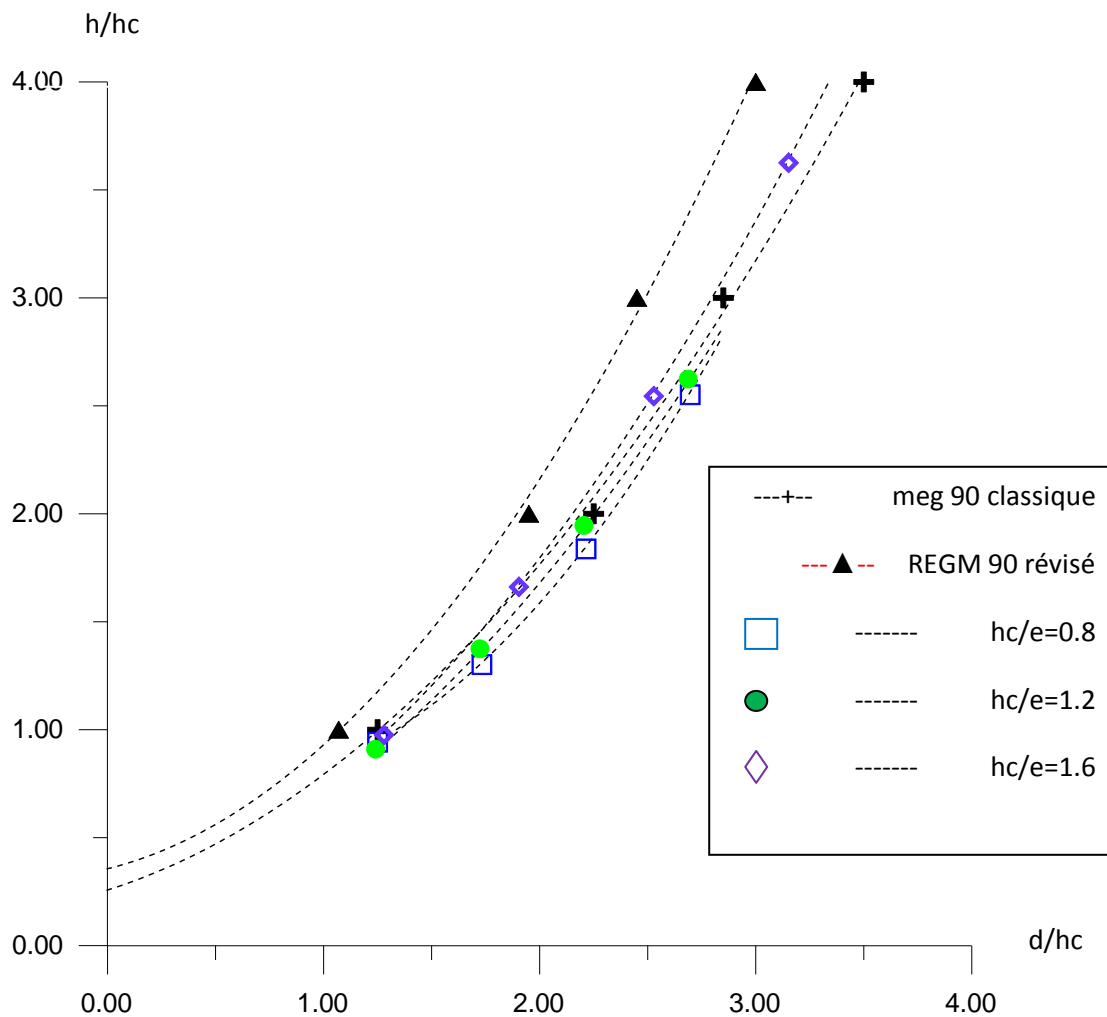
Figure (III.15) : Influence du rapport  $hc/e$  sur les zones d'attractions du paratonnerre ( $D/hc= 6$ ).

### III.4.3.2 Influence du rapport $hc/e$ sur les zones d'attraction du paratonnerre



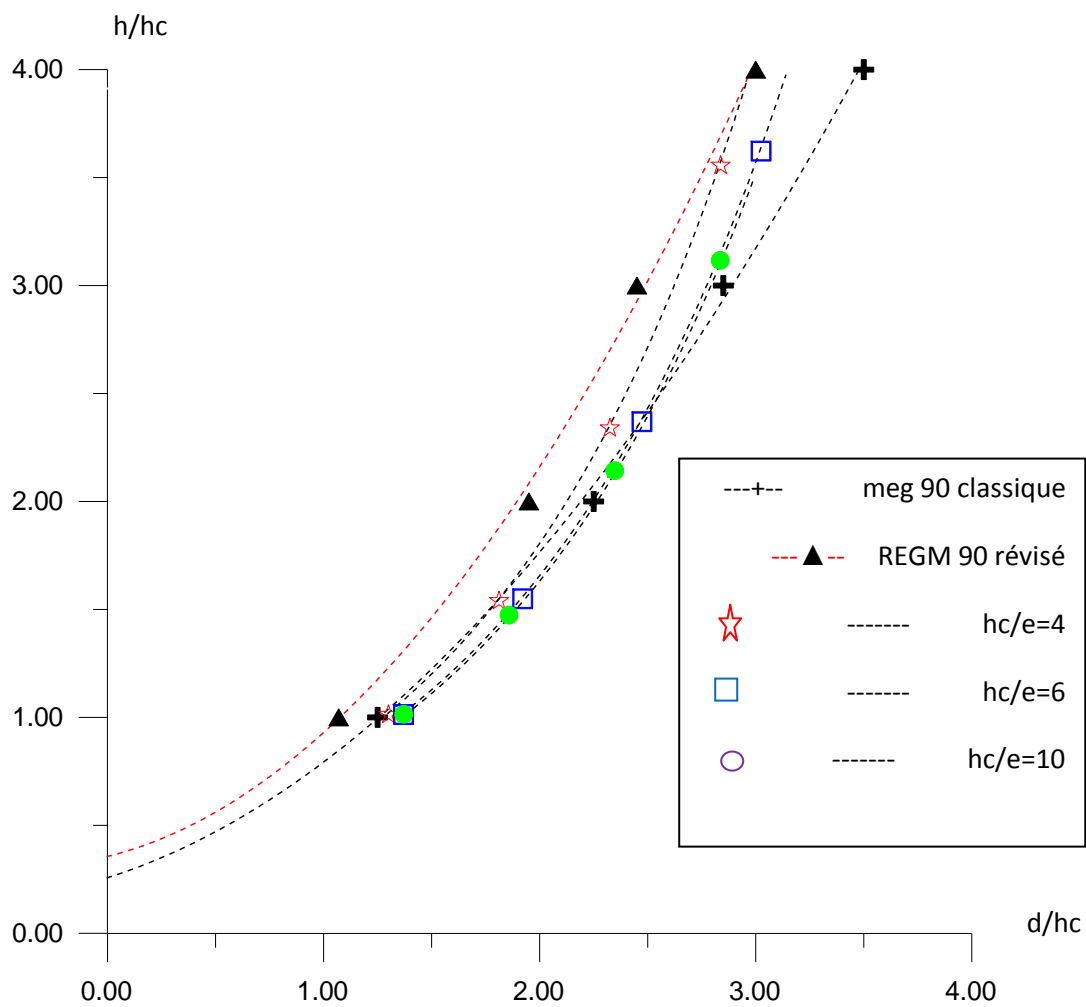
**Figure (III.16) :** Influence du rapport  $hc/e$  sur les zones d'attraction du paratonnerre ( $D/hc=4$ )

**III.4.3.3 paratonnerre sur la partie haute de la terre discontinue, et l'axe de la tige situe entre l'interface et le paratonnerre.**



**Figure (III.17) :** Zone d'attraction d'un paratonnerre vertical situé sur de la partie haute de la terre discontinue et l'axe de la tige situé entre l'interface et paratonnerre)

**III.4 paratonnerre sur la partie basse de la terre discontinue et l'axe de la décharge situé entre l'interface et le paratonnerre**



**Figure (III.18) :** Zones d'attraction d'un paratonnerre vertical pour un rapport ( $hc/e=1.2$ )

Les figures (III.11) à (III.14) mettent en évidence l'influence de la conductivité et de l'épaisseur de la terre mauvaise conductrice sur les zones d'attraction d'un paratonnerre vertical, tandis que les figures (III.15) à (III.18) illustrent l'influence de la discontinuité au niveau de la terre sur le niveau de protection d'une tige verticale. Ces figures sont comparées cette fois à la zone obtenue par le modèle électro-géométrique révisé (REGM), mais en se basant sur les cas où les zones d'attraction sont plus petites que celle définie par le modèle électro-géométrique classique. Nous constatons que ces zones deviennent comparables au modèle révisé et dans certains cas plus larges. Cela nous permet de corriger le dimensionnement de la protection et de contourner le problème des limites du modèle électro-géométrique classique.

### **III.5 CONCLUSION**

Le modèle électro-géométrique classique constitue jusqu'à nos jours le seul moyen utilisé pour la détermination de la zone de protection d'un paratonnerre et par la suite le dimensionnement de ce dernier. Néanmoins, ce modèle présente plusieurs imperfections par le fait qu'il ne tient pas en considération la nature du sol au-dessus des systèmes à protéger et ne fait pas de différence entre les différentes structures de la terre.

L'étude de l'influence de la nature du sol de point de vue homogénéité, hétérogénéité et conductivité a permis de détecter des cas où les zones d'attraction sont plus petites ou plus larges que celle du modèle électro-géométrique classique.

Dans le cas où les zones seront plus larges, la présentation d'un modèle équivalent avec un niveau de terre fictive permet de corriger la zone de protection. Ce modèle permet d'assimiler la terre mauvaise conductrice ou discontinue à une terre homogène bonne conductrice située à une certaine profondeur du sol réel, ce niveau augmente au fur et à mesure que la zone devient plus large.

Dans le cas inverse où les zones d'attraction sont plus petites que celle du modèle électro-géométrique classique, un modèle révisé a été proposé, ce modèle prend en considération la nature du sol dans le dimensionnement du paratonnerre.

## CHAPITRE IV

### Modélisation de charge négative

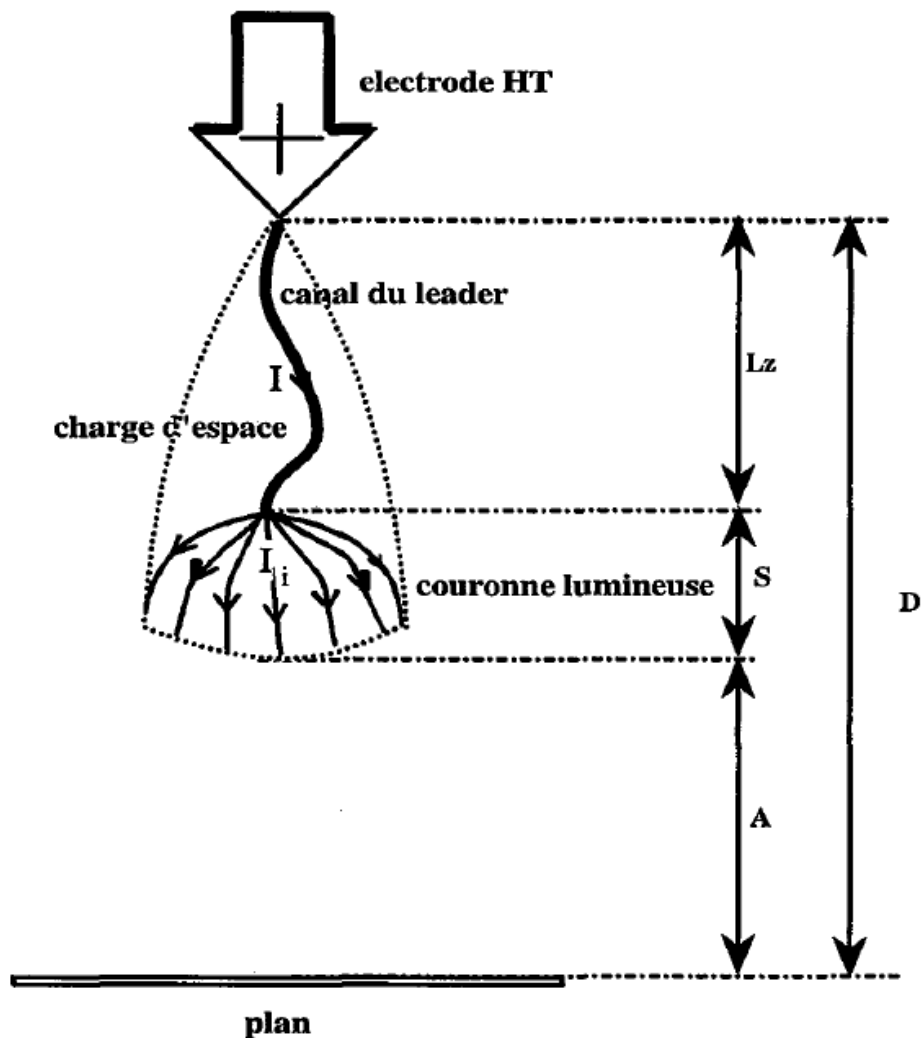
## **IV.1 INTRODUCTION**

Plusieurs études ont été menées sur les décharges dans les grands intervalles d'air. Les principaux objectifs consistaient d'une part, à contribuer à l'acquisition et à l'amélioration des connaissances de base dans le domaine afin de mieux comprendre les mécanismes impliqués et d'autre part, à estimer les paramètres caractérisant les différents phénomènes de décharges nécessaires pour résoudre une multitude de problèmes d'ingénierie tels que la protection et le dimensionnement des structures. L'air constitue un des paramètres importants pour la conception et le dimensionnement des systèmes diélectriques. Il représente le meilleur compromis pour plusieurs applications telles que le transport d'énergie et leurs composants (condensateurs et transformateurs de puissance, câbles, convertisseurs, dispositifs de protection ...). Cependant, ces systèmes d'ingénierie sont souvent exposés aux décharges atmosphériques ou aux surtensions de manœuvre. Il peut en résulter la destruction des équipements suite aux claquages des intervalles d'isolement entre phases ou entre une phase et la terre. Ainsi, le comportement diélectrique des intervalles d'air soumis à des distributions homogènes et non homogènes de champ en polarités négative et positive, est d'un grand intérêt du point de vue de l'ingénierie (Rak08).

Ce chapitre constitue une contribution à la modélisation de la décharge négative. En commençant par la modélisation de l'onde de choc ainsi que

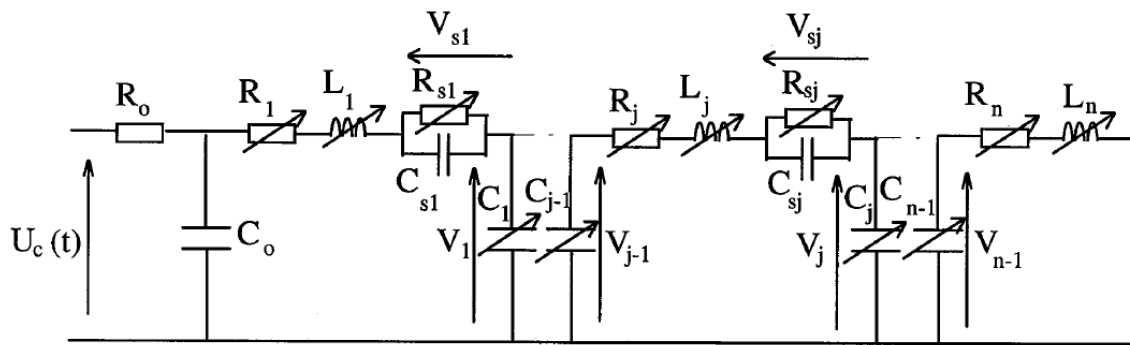
## **IV.2 Structure Générale de La Décharge :**

De façon générale, une décharge positive se présente comme un leader se propageant dans l'intervalle avec à sa tête une couronne lumineuse (Figure IV.1)



**Figure IV.1:** Représentation schématique du système leader – streamer (Fof96).

L'idée générale consiste à assimiler la décharge à un conducteur cylindrique et à la représenter par un schéma électrique équivalent comme indiqué à la figure(IV.2)  $R_i$ ,  $L_i$ , et  $C_i$  étant respectivement la résistance, l'inductance et la capacité caractérisant la décharge, déterminés par des lois physiques, la théorie des gaz et par calcul de champs électromagnétiques. Le critère de propagation utilisé est celui d Hitler, la tête du leader positif est remplacée par une électrode équivalente. Si le champ électrique est suffisant supérieur à un champ électrique  $E_c$ , et pour entretenir un effet de couronne, le canal du leader est alimenté par le courant d'effet couronne et peut donc s'allonger dans l'intervalle. Dans le cas contraire, le canal du leader se refroidit et disparaît finalement, sauf si les caractéristiques de l'onde de tension sont telles qu'une réactivation du canal puisse se produire.



**Figure. IV.2** Schéma électrique équivalent à la propagation de la décharge.(Fof96) (Rak08)

### IV.3 PARAMETRES CARACTERISTIQUES DE LA DECHARGE :

Les essais industriels réalisés dans des laboratoires très spécifiques, montrent que L'évolution des propriétés diélectriques du gaz est influencée par les principaux paramètres suivants :

- la nature du gaz
- la géométrie de l'intervalle étudié
- la contrainte de tension appliquée, voire des conditions initiales.

Dans la pratique, la répartition des potentiels est également influencée par la proximité du générateur, du diviseur de tension, des parois du laboratoire, ...

Ceci rend délicat le calcul du champ électrique réel.

#### IV.3.1 Nature du gaz

Le présent travail porte sur les intervalles d'air ; les conditions atmosphériques sont de ce fait à prendre en compte car les variations de pression, de température et du taux d'hygrométrie influencent considérablement le comportement de la décharge.

L'influence des conditions d'ambiance (humidité, température, pression, ...) est très complexe et se prête mal à des formulations empiriques d'usage limité. On introduit la densité relative de l'air  $\delta$ , par le rapport de sa densité dans les Conditions de pression  $P_1$  ou  $P_2$  et de température  $T_e$ , à sa densité dans des conditions de référence  $P_0=1013$  mbars et  $T_e=20^\circ\text{C}$  :

$$\delta = \frac{0.392.P_1}{273+T_e} = \frac{2.92.P_2}{273+T_e} \quad (\text{IV.1})$$

Où  $P_1$  est la pression barométrique en mm Hg et  $P_2$  la pression barométrique en kPa

D'autre part, pour tenir compte des fluctuations naturelles du taux d'hygrométrie lors de l'étude des paramètres d'amorçage, on introduit un facteur multiplicatif  $K_H$ , sur le niveau de tension, facteur qui peut se mettre sous la forme :

$$K_H = 1 + \alpha(H_0 - H) \quad (\text{VI.2})$$

Où  $\alpha$  est un coefficient empirique qui dépend de la géométrie des électrodes, de la polarité et de la forme de l'onde appliquée. L'humidité absolue (H) présente dans l'air est exprimée en  $\text{g}/\text{m}^3$  et est référencée à la valeur  $H_0 = 11 \text{ g}/\text{m}^3$ .

Ce facteur permet de corriger la tension d'amorçage quand H diffère de  $H_0$ .

#### IV.3.2 Géométrie de l'intervalle

La géométrie de l'intervalle étudié joue un rôle prépondérant dans la mesure où c'est elle qui détermine, compte tenu d'une différence de potentiel donnée appliquée entre les deux électrodes, l'amplitude, l'orientation et la variation spatiale du champ électrique.

Comme les problèmes industriels relatifs aux hautes tensions sont généralement des problèmes de tenue diélectrique, nous nous intéresserons au type de géométrie présentant les plus faibles performances de tenue diélectrique c'est à dire menant le plus facilement au claquage de l'intervalle : la géométrie pointe – plan.

Ce type de géométrie présente certains avantages :

- Sa symétrie de révolution autour de l'axe de l'intervalle
- La simplicité de sa caractérisation qui ne nécessite que deux paramètres : le rayon de courbure de la pointe  $R_p$  et la distance pointe - plan D.
- La facilité de son étude, car la décharge ne concerne qu'une seule électrode durant la plupart du développement du leader. En effet, la cathode plane permet d'éviter des décharges issues d'anode qui viendraient masquer le processus étudié.

#### IV.3.3 Contraintes de tension

Il est impossible de reproduire en laboratoire les formes complexes de surtensions observées ou attendues en réseau ; c'est pourquoi, la plupart des résultats ont été obtenus avec une onde de forme simple, en double exponentielle produite par les générateurs de choc.

Si l'on veut étudier les problèmes de claquage d grandes intervalles, il faut générer des tensions d'amplitude d'autant plus élevées que D est grand. Le principe des générateurs

utilisés (générateur de MARX) est basé sur la charge condensateurs en parallèle, puis de leur décharge en série à travers des résistances. La tension délivrée est caractérisée par deux paramètres :

- la durée conventionnelle de front  $T_1 = 1.67 (T_{90} - T_{30})$
- la durée de queue à mi - amplitude  $T_2$

Où  $T_{90}$  est le temps au bout duquel l'impulsion atteint 90% de sa valeur crête  $U_{cr}$  et  $T_{30}$  celui correspondant à 30%  $U_{cr}$ . Chaque forme d'onde est notée  $T_1 / T_2$ , Les deux temps étant exprimés en  $\mu s$ . (Fof96)

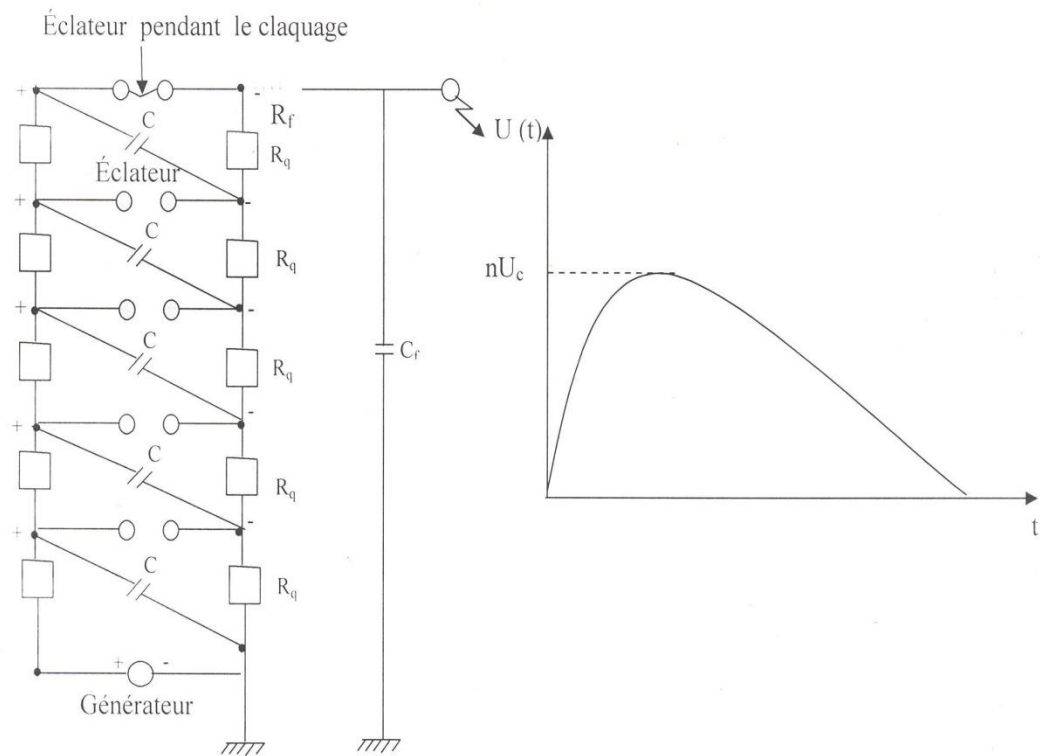
## IV.4 ETUDE DU GENERATEUR D'IMPULSIONS

### IV.4.1 Principe de fonctionnement d'un générateur de choc :

Dans le but d'obtenir une grande tension de crête, le générateur d'impulsions en un seul étage présente plusieurs inconvénients à savoir :

- La taille des éléments de circuit devient très grande.
- Nécessite de grande tension continue de charge.
- La suppression de décharges de couronne autour des éléments et des conducteurs devient très difficile.
- La fermeture des circuits par les éclateurs à sphère devient très complexe.

Le principale appareil d'un laboratoire à très haute tension est le générateur d'impulsions (on dit plus couramment « générateur de choc » ou « générateur de Marx », du nom de son inventeur). Cet appareil comporte en premier lieu une série de condensateur, montés en colonne verticale, qui peuvent être chargés en parallèle par une source à tension continue. Ces condensateurs sont reliés les uns aux autres par des résistances dites de charge (à gauche sur le schéma), de sorte que toutes les bornes de gauche vont être connectées à la sortie de la source, de la polarité positive dans l'exemple choisi ; les bornes de droite seront bien évidemment connectées à la sortie négative, par l'intermédiaire des résistances  $R_q$  du schéma (figure IV.3).



**Figure. IV.3 :** Schéma électrique d'un générateur de choc.

Entre le + de l'un des condensateurs et le - du condensateur suivant se trouvent des petites éclateurs à sphère, qui sont réglés pour amorcer une étincelle, à partir d'une certaine valeur, que l'on peut faire varier, de la tension de charge. Lorsque la charge des condensateurs a atteint cette valeur tous les condensateurs en série, de sorte qu'au sommet du générateur, on va trouver la somme des tensions de charge individuelles. Ainsi, si chaque condensateur est chargé à la tension  $U$  et s'il y a  $n$  étages de condensateur, on obtiendra au sommet de la colonne une tension égale à  $nU$ .

A cet instant, chaque condensateur va se décharger à travers sa résistance associée  $R_q$ , et il en résulte une décroissance à loi exponentielle de la tension, avec une constante de temps fixée par le produit  $R_q C$ . pour cette raison, on appelle ces résistances les « résistances de queue ».

La forme de tension que fournit le générateur dans les conditions décrites ci-dessus est dite « bi-exponentielle », et répond à l'équation :

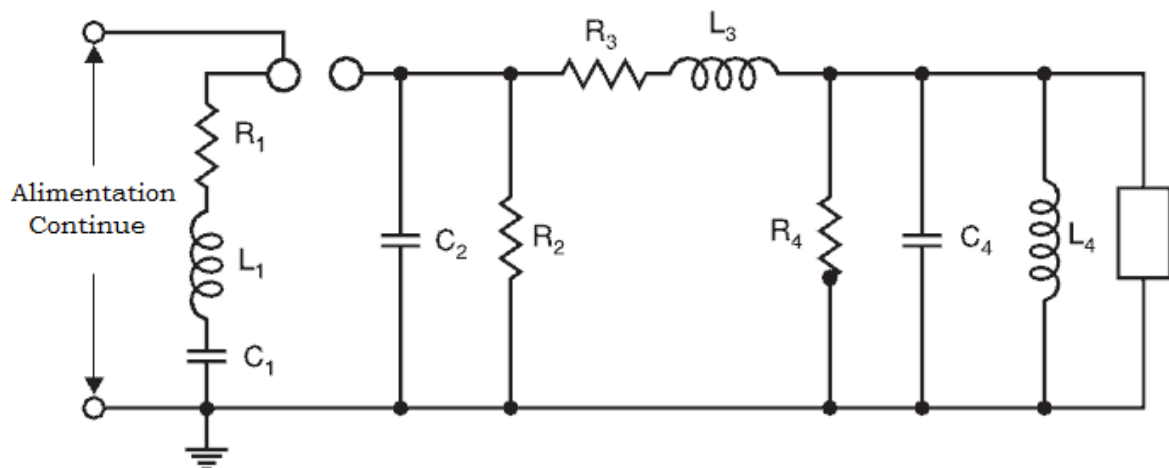
$$U(t) = nU (e^{-t/T_q} - e^{-t/T_f}) \quad (IV.3)$$

Ou  $T_q$  et  $T_f$  sont respectivement les constantes de temps de queue et de front du choc de tension généré.

En réglant convenablement la valeur des différentes résistances et du condensateur de front, on peut faire varier les formes des tensions produites par ces générateurs, et les ajuster en fonction des besoins des recherches. Précisons que le générateur avec lequel sont effectués les essais dont les résultats sont déjà présentés au deuxième chapitre est de 600kV et constitué de 6 étages.

#### IV.4.2 Représentation du générateur d'impulsions par circuits électriques équivalents

La figure (IV.4) représente un circuit équivalent d'un générateur d'impulsion en un seul étage.



**Fig. IV.4** Circuit équivalent d'un générateur d'impulsion en un seul étage (Wad07).

$C_1$  : Condensateur du générateur chargé par une source de tension continue avec la tension désirée.

$L_1$  : Inductance du générateur et les conducteurs connectés au circuit de décharge, en général, prends de faibles valeurs.

$R_1$  : Résistance insérée pour contrôler la forme d'onde.

$L_3, R_3$  : Éléments externes qui peuvent être reliés au générateur pour contrôler la forme d'onde.

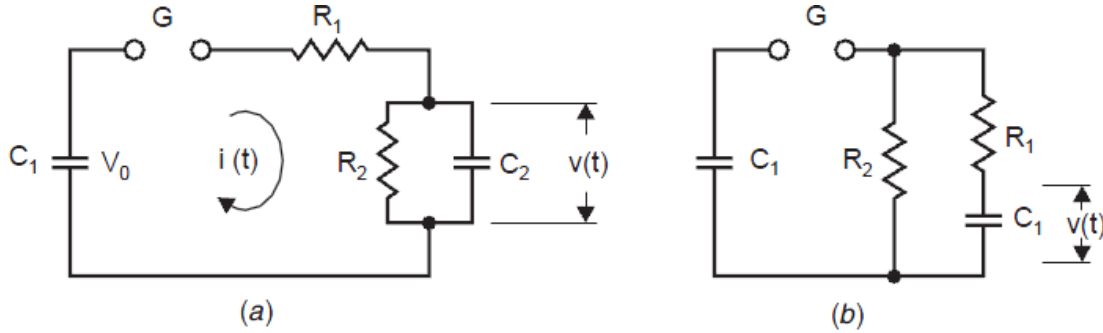
$C_4$  et  $C_2$  : condensateur pour compenser la tension.

$R_4$  et  $R_2$  : résistances pour contrôler la durée d'onde.

$L_4$  : représenté l'inductance de l'élément en test et peut affecter sensiblement la forme d'onde.

Pour des raisons pratiques, le générateur doit être mise à la terre ; la polarité de la tension de sortie peut changée par l'inversion de la tension continue de charge.

Pour l'évaluation des éléments de circuit électrique précédent, l'analyse du circuit de la figure (IV.3) est compliquée. Pour cela, on peut représenter le générateur d'impulsions par deux schémas simplifiés et qui présentent des formes plus pratiques figure (IV.4).



**Fig. IV.5** Circuit équivalent simplifié d'un générateur à impulsions (Wad07).

#### IV.4.2.1 Analyse du premier circuit équivalent

On se réfère à la figure(IV.5.a) et après l'éclatement des éclateurs à sphère qui permet la circulation du courant dans le circuit, et en utilisant la transformé de Laplace ; l'impédance du circuit :

$$Z(s) = R_1 + \frac{1}{c_1 s} + \frac{R_2}{R_2 C_2 s + 1} \quad (IV.4)$$

$$I(s) = \frac{V_0}{sZ(s)} \quad (IV.5)$$

Avec:

$$V(s) = I(s) \frac{R_2}{R_2 C_2 s + 1} \quad (IV.6)$$

Si on impose la forme de la tension désirée sous la forme :

$$V(t) = V_n (\exp(-(\alpha - \beta)t) - \exp(-(\alpha + \beta)t)) \quad (IV.7)$$

Avec

$$V_n = \frac{V_0}{2\beta R_1 C_2}$$

$$\gamma = \frac{C_1}{C_2}$$

Après calcul, on obtient :

$$V(t) = V_0 R_2 C_1 \frac{\alpha^2 - \beta^2}{2\beta} (\exp(-(\alpha - \beta)t) - \exp(-(\alpha + \beta)t)) \quad (IV.8)$$

Avec :

$$\alpha = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_2 C_2} + \frac{1}{R_1 C_2} \right)$$

$$\alpha^2 - \beta^2 = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}$$

On obtient :

$$\alpha = \frac{1}{2} ((\alpha^2 - \beta^2) C_2 R_2 + \frac{1}{C_2 R_2} + C_1 R_2 (\alpha^2 - \beta^2))$$

$$\alpha = \frac{1}{2} ((\alpha^2 - \beta^2) \frac{C_1 R_2}{\gamma} + \frac{\gamma}{C_1 R_2} + C_1 R_2 (\alpha^2 - \beta^2))$$

$$= \frac{1}{2} \left( \left( \frac{\gamma+1}{\gamma} \right) (\alpha^2 - \beta^2) C_1 R_2 + \frac{\gamma}{C_1 R_2} \right)$$

D'où on peut calculer les valeurs des résistances  $R_1$  et  $R_2$ :

$$R_1 = \frac{1}{C_1} \left( \frac{\gamma+1}{\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - (\gamma+1)(\alpha^2 - \beta^2)}} \right)$$

$$R_1 = \frac{1}{C_1} \left( \frac{\gamma+1}{\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - (\gamma+1)(\alpha^2 - \beta^2)}} \right)$$

#### IV.4.2.2 Analyse de deuxième circuit équivalent

En utilisant le même raisonnement pour le circuit de la figure(IV.5.b), et après fermeture des éclateurs à sphères, on aura :

$$Z(s) = \frac{1}{c_1 s} + \frac{R_2(\frac{1}{C_2 s} + R_1)}{R_1 + R_2 + \frac{1}{C_2 s}}$$

$$R_2 = \frac{1}{C_1(\alpha + \beta)} + \frac{\gamma}{C_1(\alpha + \beta)}$$

$$R_1 = 2\sqrt{L/c}$$

La forme de  $\beta$  et  $\alpha$  est

$$\alpha = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1}{R_1 C_2} + \frac{1}{R_1 C_1} \right)$$

$$\beta = \frac{1}{2} \left( \left( \frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_1 C_1} \right)^2 - \frac{4}{R_1 R_2 C_1 C_2} \right)^{1/2}$$

### IV.5 ETUDE DU GENERATEUR DE CHOC (TYPE MARX)

Dans le but d'obtenir une grande tension de crête, le générateur d'impulsions en un seul étage présente plusieurs inconvénients à savoir :

- La taille des éléments de circuit devient très grande.
- Nécessité de grande tension continue de charge.
- La suppression de décharges de couronne autour des éléments et des conducteurs devient très difficile .
- La fermeture des circuits par les éclateurs à sphères devient très complexe.

En 1923, **E. Marx** à inventé un générateur à plusieurs étages ou Générateur de Marx qui devient par la suite le principal appareil d'un laboratoire à très haute tension.

Ce générateur délivre une onde de tension impulsion elle dont l'équation est :

$$U_c(t) = \frac{U_{cr}}{R_c C_c} \frac{T_a T_b}{T_a - T_b} \left[ \exp\left(-\frac{t}{T_a}\right) - \exp\left(-\frac{t}{T_b}\right) \right] \quad (IV.9)$$

$T_a$ ,  $T_b$  et  $U_{cr}$  Sont respectivement le temps de descente, le temps de montée et le facteur d'amplitude.

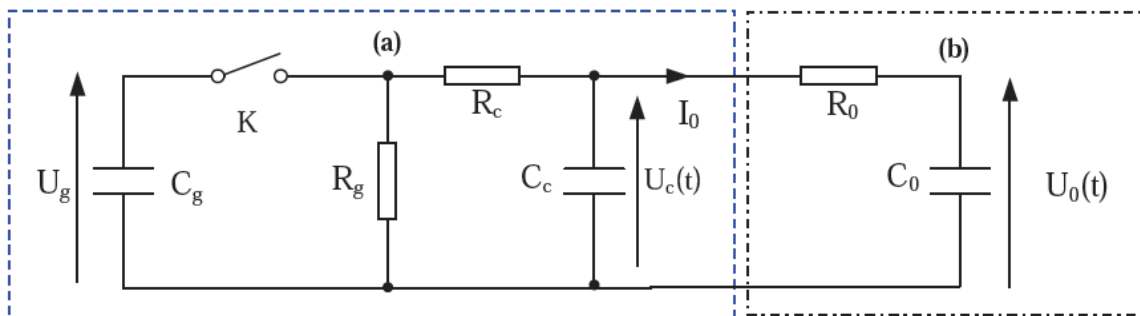
$R_c$  et  $C_c$  Sont la résistance et la capacité du circuit de générateur d'impulsion qui contrôle le front de l'onde de tension.

La tension est une onde bi-exponentielle caractérisée par deux paramètres :

- la durée de la queue à mi-amplitude  $T_2$
- la durée conventionnelle du front  $T_1 = 1,67(T_{90} - T_{30})$

Où  $T_{90}$  est le temps au bout duquel l'impulsion atteint 90% de sa valeur crête  $U_{cr}$  et  $T_{30}$  celui correspondant à 30% de  $U_{cr}$ .

Chaque forme d'onde de tension est caractérisée par le rapport  $T_1/T_2$ , où  $T_1$  et  $T_2$  sont exprimés en  $\mu s$  [18] (1,2/50  $\mu s$  pour un choc de foudre et 250/2500  $\mu s$  pour un choc de manœuvre). L'expression d'une onde bi-exponentielle peut être obtenue en utilisant un schéma équivalent du générateur de Marx. Le circuit de base de ce générateur est donné par la figure IV.6.



**Figure IV.6 :** Schéma équivalent du générateur de Marx (Wad07)

Les éléments  $R_c$  et  $C_c$  contrôlent le front de l'onde, et  $R_g$  et  $C_g$  la queue de celle-ci. L'expression de la tension  $U_c(t)$  est obtenue en utilisant les propriétés de la transformée de Laplace.  $R_0$  représente la résistance de l'électrode pointe et  $C_0$  est la capacité entre l'électrode pointe et l'électrode plane

$$U_c(t) = U_t \left[ \exp\left(-\frac{t}{T_a}\right) - \exp\left(-\frac{t}{T_b}\right) \right] \quad (\text{IV.10})$$

Et :

$$T_a = \frac{T_2 - T_{cr}}{0.7}$$

Et :

$$T_b = \frac{T_a}{\exp\left(1.35 + 1.21 \ln\left(\frac{T_2}{T_{cr}}\right)\right)}$$

La valeur maximale appelée  $U_{cr}$  de l'onde de tension  $U_c(t)$  est atteinte à l'instant  $T_{cr}$  dit temps de crête:

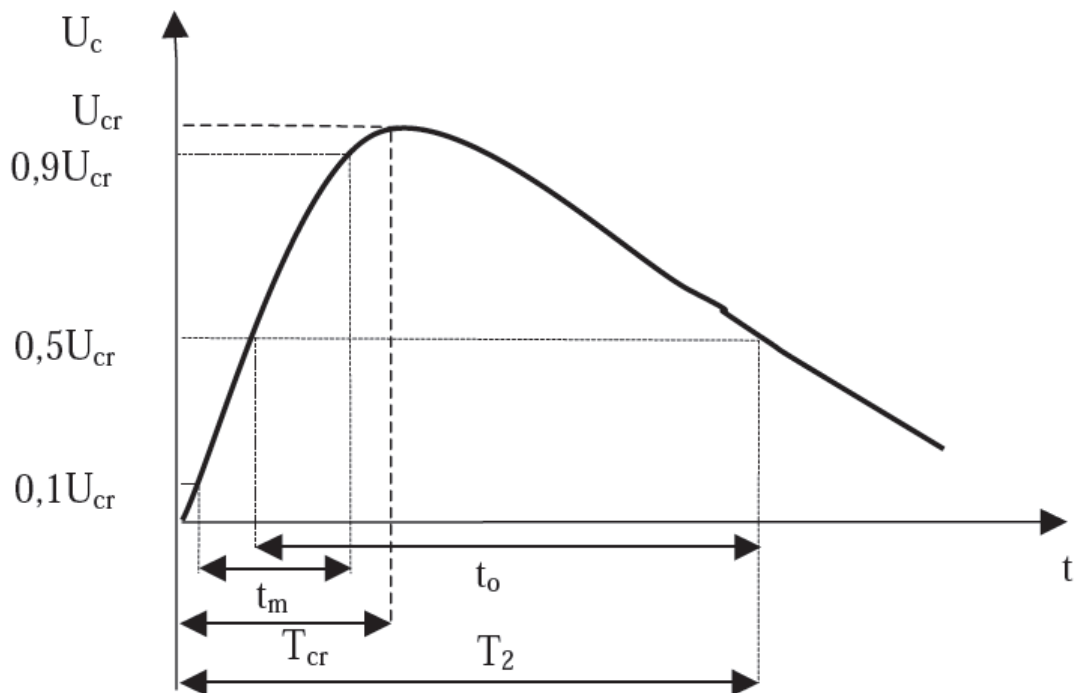
$$T_{cr} = \frac{T_a T_b}{T_a - T_b} \ln\left(\frac{T_a}{T_b}\right)$$

$t_m$ ,  $T_2$ ,  $T_{cr}$  et  $U_t$  sont respectivement le temps de montée, le temps à mi-amplitude, le temps de crête et le facteur d'amplitude.

$$U_t = \frac{U_{cr}}{\delta^{\frac{1}{1-\delta}} - \delta^{\frac{\delta}{1-\delta}}}$$

Ou :

$$\delta = \frac{T_a}{T_b}$$



**Figure IV.6 :** Choc de courant normalisé du générateur de Marx

L'onde fournie par le générateur de Marx, est intégrée dans le modèle puis implémenté dans le programme de simulation.

Cette représentation sous forme de circuit électrique de l'onde de tension appliquée permet de tenir compte des chutes de tension lors des différentes étapes de développement de la décharge. En effet, le générateur n'est pas une source de tension idéale telle que le décrit l'équation (IV.9).

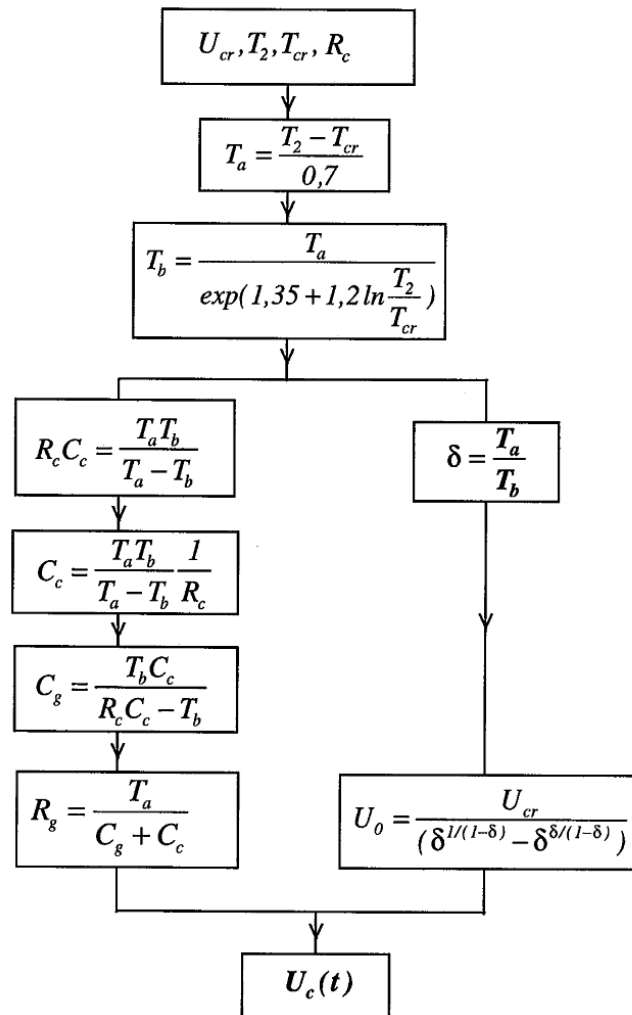
Finalement,  $U_c(t)$  sera obtenu à partir du bloc diagramme de la figure (IV.7).

Dans la pratique, les systèmes d'isolation, ou de protection, liés au transport d'énergie électrique ne sont soumis que rarement à des contraintes de formes purement bi-exponentielles telles que les chocs dits de manœuvre. Les opérations d'ouverture et de fermeture des disjoncteurs, ou des sectionneurs, sont responsables d'oscillations apparaissant sur le front d'onde des perturbations (tension) en raison de l'existence d'inductances parasites ou de réflexions de ces ondes. Il est donc intéressant d'analyser le comportement d'une décharge pilotée par de telles ondes oscillantes. En laboratoire, il est possible de superposer une oscillation sur l'onde de tension bi-

exponentielle en introduisant, dans le c circuit de charge, des inductances de différentes valeurs .

Le schéma proposé pour cette étude est la totalité de la figure (VI.7).

La fréquence des oscillations de l'onde de tension est :

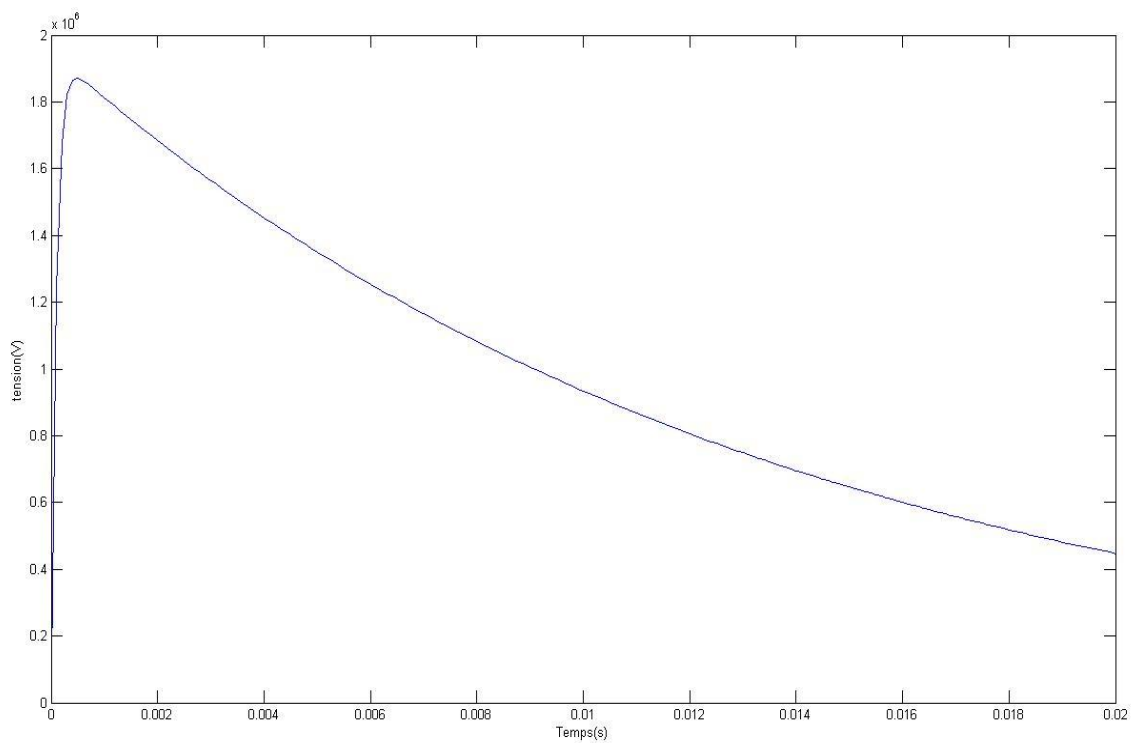


**Figure IV.7** : Block diagramme permettant le calcul des paramètres du schéma équivalent de générateur de Marx. (Fof96)

## IV. 6 APPLICATIONS SUR LES TENSIONS REELLES :

Nous appliquons le schéma bloc cité précédemment en utilisant Matlab, sur deux types d'ondes :

### IV.6.1 Ondes de type (500/10000) $\mu\text{s}$ :



**Figure IV.8** : Onde de type (500/10000) $\mu\text{s}$  avec tension de crête 1870kV.

Les résultats obtenus concernant les paramètres du circuits équivalent, pour une onde de type (500/10000) $\mu\text{s}$  sont :

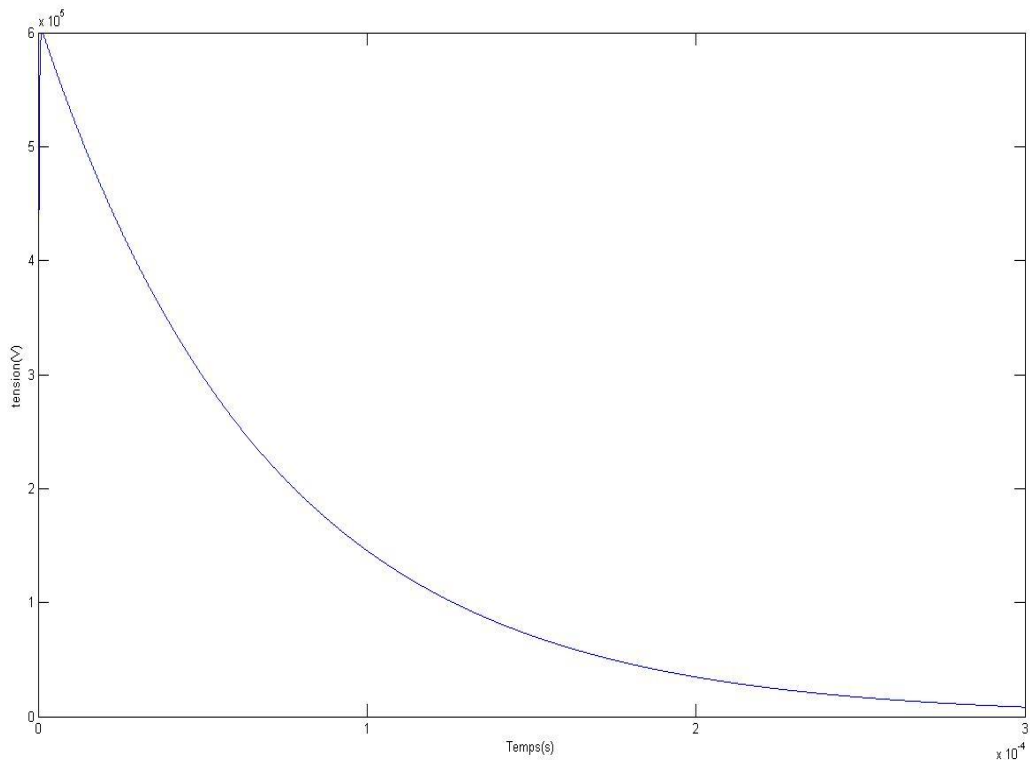
$$R_g = 48.65 \Omega$$

$$C_g = 276 \mu F$$

$$C_c = 1.98\mu F$$

#### IV.6.2 Ondes de type (1.2/50) $\mu s$

Nous avons appliqué également l'onde de choc qui simule la foudre réelle, à savoir l'onde de type (1.2/50) $\mu s$  :



**Figure IV.9:** Onde de tension de générateur de choc pour une onde (1.2/50) $\mu s$  avec tension de crête 600kV.

Les résultats obtenus concernant les paramètres du circuits équivalent, pour une onde de type (1.2/50) $\mu s$  sont :

$$R_g = 159.527 \Omega$$

$$C_g = 0.435\mu F$$

$$C_c = 1.28nF$$

## **VI.7 CONCLUSION:**

Dans ce chapitre, nous avons essayé de passer vers la simulation numérique de la décharge de foudre négative dans les grands intervalles d'air en passant par l'étape de la modélisation en utilisant les circuits équivalents. Comme première étape, nous avons commencé par l'étude du générateur de choc et l'onde générée en assimilant le générateur à un circuit équivalent. L'étude est valable quelle que soit la forme de la tension même si nous n'avons considéré dans cette étude que des ondes de tensions bi-exponentielles (ondes de foudre et de manœuvre). Ainsi le calcul des paramètres du générateur permet de contrôler le temps de queue et de front de la tension générée. Cette tension sera appliquée à l'intervalle d'air pointe-plan en remplaçant ainsi la simulation pratique en laboratoire.

## Conclusion

## **CONCLUSION GENERALE**

La foudre est un phénomène naturel aléatoire dont le champ joue un rôle important lors de sa propagation. Les dangers et dégâts que peut causer la décharge de foudre, nécessitent l'emplacement de dispositifs de protection tel que le paratonnerre, la maîtrise de ce phénomène passe obligatoirement par l'étude théorique de la physique de la décharge et ses différentes étapes ; comme l'ionisation, les prédécharges, leader et le saut final.

La méthode de la sphère fictive et le modèle électro-géométrique permettent de déterminer la zone de protection d'un paratonnerre vertical en fonction de sa hauteur, un modèle très utile dans le domaine de la protection contre la foudre. Néanmoins, ce modèle présente certaines imperfections, en effet, et d'après les résultats présentés dans ce travail trouvés avec modèles réduits avec deux types de terre, homogène mauvaise conductrice et discontinue. Il était clair que la nature électro-géologique du sol peut influencer sur les zones d'attraction d'un paratonnerre vertical.

Dans le cas des terres mauvaises conductrices, les zones d'attraction des paratonnerres pourraient être plus larges que celle définie par le modèle électro-géométrique. Cet élargissement dépendrait surtout de la profondeur et de la nature de la terre mauvaise conductrice, ainsi que de la hauteur du paratonnerre. Plus la profondeur (l'épaisseur) de cette terre est grande par rapport à la hauteur du paratonnerre, plus la zone d'attraction de ce dernier serait large. Il en est de même lorsque la conductivité du sol diminue.

Dans le cas des terres discontinues, 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.

Dans certains cas de configurations, les zones d'attraction sont plus petites que celle définie par le modèle électro-géométrique classique, ce qui présente une situation critique pour la protection et les systèmes protégés.

Notre contribution a concerné l'élaboration d'un modèle électro-géométrique élargi dans le cas d'un sol homogène de conductivité variable. Dans ce modèle nous considérons le système avec terre mauvaise conductrice équivalent à un système avec terre parfaitement

conductrice où toutes les longueurs verticales sont majorées d'une certaine distance appelée niveau de terre fictive.

Afin de contourner le problème du modèle électro-géométrique classique et surtout pour la situation critique où les zones d'attraction seront plu petites, une deuxième solution a été proposée, concernant un modèle électro-géométrique révisé REGM.

Dans le but de passer de l'étude de la foudre par sa reproduction au laboratoire et qui demande des investissements généralement très couteux, vers la simulation numérique de la décharge. Dans la quatrième partie de ce mémoire, et comme première étape de la modélisation, nous avons présenté un circuit équivalent du générateur de choc de type Marx à plusieurs étages utilisé pour reproduire l'onde de choc de foudre. Ainsi, nous avons étudié l'onde de choc de foudre générée par le générateur de choc, qui peut alimenter le circuit équivalent de la décharge négative qui peut être utilisé pour simuler numériquement la foudre.

## Bibliographie

## BIBLIOGRAPHIQUE

- (Rak08) **J. H. RAKOTONANDRASANA**, ‘‘ Modélisation de la décharge négative dans les grandes d’air application a la foudre ‘’, Ecole Doctorale Génée électrique de Lyon, 2008.
- (Dja08) **KHELIL DJAZIA**, ‘‘Modélisation de la décharge de foudre en présence d’un paratonnerre et détermination de sa dimension fractale’’, Département du Génie électrique, Mémoire de Magistère d’Ecole nationale Polytechnique, 2008.
- (Fof96) **I. FOFANA**, ‘‘Modélisation des grandes intervalles d’air’’, Thèse Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 1996.
- (Gar94) **C. GARY**, ‘‘La Foudre : des méthodologies antique à la recherche moderne’’, Masson, 1994.
- (Cho99) **A. CHOUCHEU**, ‘‘ Détermination des zones d’attraction d’un paratonnerre vertical dans le cas d’une terre discontinue’’, Département du Génie Electrique, Mémoire de Magister, Ecole Nationale polytechnique, 1999.
- (Hut88) **B. HUTZLER**, ‘‘Simulation de la foudre en laboratoire’’, EDF Bull. D.E.R, série B, Réseaux Electriques, matériels N<sup>o</sup>3, 1988, pp.31-142.
- (Gar89) **C. GARY**, ‘‘ La Foudre et les phénomènes orageux’’, RGE N<sup>o</sup> 03 ; Mars 1989.
- (Rou94) **A. ROUSSEAU, C. GARY, Gérard Berger**, ‘‘Foudre et protection des bâtiments ‘’, Technique de l’Ingénieur, C3307 ,1994.
- (Mez06) **MEZAI DJAMEL**, ‘‘Mesure du champ électrique par la méthode de la sonde à capacité répartie dans un système Tige-Plan avec paratonnerre verticale sous tension de choc de foudre’’, Mémoire de Magister, Ecole National polytechnique, 2006.
- (Bou94) **A. BOUBAKEUR, R. BELAICHA**, ‘‘Modèle de protection en cas de la terre mauvais conductrice ‘’, Congrès Internationale ‘‘Foudre et Montagne’’, SEE, Chamonix, France, 1994, pp.100-103.

(Bel94) **R. BELAICHA**, ‘‘ Zones d’attractions d’un paratonnerre vertical dans le cas d’une terre mauvaise conductrice’, Mémoire de Magister, U.T.O Tizi-Ouzou, 1994.

(Oui07) **OUIDIU CENTEA**, ‘‘ Sur l’invalidité du Modèle électro-géométrique de la Foudre’’, Revue Science Technique, Électrotechnique et Énergétique, pp. 291–300, Bucarest, 2007.

(Bou93) **A. BOUBAKEUR, R. BELAICHA**, ‘‘ contribution à l’étude d’un modèle électro-géométrique élargie’’, 13<sup>ème</sup> Journées Tunisiennes de l’électrotechnique et de l’automatique JTEA- 93, Hammamet, Tunisie, pp.136-142.

(Wad07) **C.L. WADHWA** ‘‘high voltage engineering ‘’, New Age International Ltd., 2007.

(Joh03) **John D. Mc Donald**, ‘‘ Electric Power Substations Engineering ‘’, CRC press. London 2003.

(Gar95) **C. Gary**, *La foudre*, MASSON Paris Milan Barcelone, 1995.