

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



UNIVERSITE DE M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME

D'INGENIEUR D'ETAT EN GENIE ELECTROTECHNIQUE

OPTION : COMMANDE ELECTRIQUE

## THEME

---

**Etude des zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal en  
présence d'une terre hétérogène**

---

Proposé et dirigé par :

-Mr.CHOUCHOU Abdelmadjid

Présenté par :

-BENZOUAOUI Mohamed El yamine

-ELBAH Walid

-KERRIOU Ahmed A Raouf

Année universitaire: 2011/2012

## Remerciement

*Toute notre gratitude, grâce et remerciement vont à dieu le tout puissant qui nous a donné la force, la patience, le courage et la volonté pour élaborer ce travail.*

*C'est avec une profonde reconnaissance et considération particulière que nous remercions notre promoteur :*

***Mr CHOUCHOU** pour la sollicitude avec laquelle il a suivi et guidé ce travail.*

*Nous remercions les membres de jury qui nous font l'honneur de présider et d'examiner ce modeste travail.*

*Toute notre gratitude va à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.*

*Nous remercions aussi tous nos amis pour leur aide, leur patience.*

# SOMMAIRE

## INTRODUCTION GENERALE

### CHPITRE I : PHYSIQUE DE LA DECHARGE DE Foudre

I.1- INTRODUCTION .....	1
I.2 –HISTORIQUE.....	1
I.2.1-L'époque des croyances .....	1
I.2.2-les premières recherches.....	1
I.3-ELECTRICITE ATMOSPHERIQUE ET PHENOMENE PRECURSEUR.....	3
I.3.1-Le condensateur terrestre.....	3
I.3.2-Différents types de décharges.....	3
I.3.2.1-Décharges intra – nuages.....	3
I.3.2.2-Décharges entre nuages.....	4
I.3.2.3-Décharges nuage –sol.....	4
I.4-PHYSIQUE DES PHENOMENES ORAGEUX .....	4
I.4.1-Distribution statistique des orages.....	4
I.4.1.1-Niveau kéraunique.....	4
I.4.1.2-Définition du foudroiement.....	5
I.4.1.3-Densité réelle de coups de foudre.....	5
I.4.1.4-Facteurs locaux influant sur le foudroiement.....	5
I.4.2-Phénomènes précurseurs.....	6
I.4.2.1-Nuage orageux.....	6
I.4.2.2-Effet couronne au sol.....	8
I.5-CLASSIFICATION ET DESCRIPTION DES COUPS DE Foudre.....	9
I.5.1-Classification des coups de foudre .....	9
I.5.2-Déroulement d'un coup de foudre.....	11

I.5.2.1-Coup de foudre ascendant.....	11
I.5.2.2-Coup de foudre descendant.....	11
I.6 -LES EFFETS DE LA Foudre.....	13
I.7-FORMES ET AMPLITUDES DES IMPULSIONS DES COUPS DE Foudre.....	14
I.7.1-FORMES DES DECHARGES NEGATIVES.....	14
I.7.2-FORMES DES DECHARGES POSITIVES.....	14
I.8-CONCLUSION.....	15

**CHAPITRE 2 : PROTECTION CONTRE LA Foudre ET MODELE  
ELECTROGEOMETRIQUE**

II .1-INTRODUCTION :.....	16
II.2-PHYSIQUE DE L'IMPACT AU SOL.....	16
II.2.1-Mécanisme de décharges.....	16
II.2.2 -Point d'impact.....	17
II.2.3-Distance d'amorçage.....	18
II.2.4-Champ généré au sol par le traceur descendant.....	19
II.3-Modèle électrogéométrique de base.....	23
II.4- Mise en œuvre du modèle électrogéométrique.....	24
II.5-Application du modèle électrogéométrique.....	24
II.5.1-Méthode de la sphère fictive.....	26
II.5.2-Zone de capture d'un paratonnerre horizontal.....	26
II.5.3-Zone de capture d'une tige verticale.....	26
II.6-CRITIQUE DU MODÈLE ÉLECTROGÉOMÉTRIQUE.....	28
II.7-CONCLUSION .....	30

**CHAPITRE III : ZONES D'ATTRACTION D'UN PARATONNERRE HORIZONTAL  
AVEC DIFFERENTS TYPES DE TERRE**

III.1-INTRODUCTION	31
III.2-GENERATEUR DE CHOC	31
III.2.1-Principe de fonctionnement	31
III.2.2-Schéma de principe d'un Générateur de choc :	33
III.2.3-Forme de l'onde de choc	35
III.3-CONFIGURATIONS ETUDIEES ET MODELES REDUITS.....	36
III.4 -ZONES D'ATTRACTION DU PARATONNERRE HORIZONTAL AVEC DIFFERENTS TYPES DU SOL .....	38
III.4.1-Modelé électrogéométrique (terre homogène bonne conductrice).....	39
III.4.2-Cas de terre mauvaise conductrice.....	40
III.4.2.1-Influence de la conductivité du sol sur les zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal.....	40
III.4.2.2-Influence du rayon de courbure du paratonnerre horizontal sur les zones d'attraction.....	41
III.4.2.3-Influence de la hauteur $h_c/e$ du paratonnerre sur les zones d'attraction.....	42
III.4.3-Terre discontinue.....	45
III.4.3.1-1 <sup>ère</sup> configuration: Paratonnerre horizontal situé entre l'axe de la décharge et l'interface.....	45
III.4.3.2-2 <sup>ème</sup> configuration: l'axe de la décharge situé entre l'interface et le paratonnerre horizontal.....	48
III.4.3.3-3 <sup>ème</sup> configuration : l'axe de la décharge situé entre l'interface et le paratonnerre horizontal.....	51
III.4.3.4-4 <sup>ème</sup> configuration : Paratonnerre horizontal situé entre l'interface et l'axe de la décharge.....	54
III.4-CONCLUSION.....	55

## CHAPITRE IV: MODELES DE PROTECTION POUR UNE TERRE HETEROGENE

IV.1-INTRODUCTION.....	57
IV.2-MODELE EQUIVALENT AVEC NIVEAU DE TERRE FICTIVE	57
IV.3-MODÈLES ELECTROGEOMETRIQUE REVISE.....	58
IV.3.1-Distance d’amorçage.....	58
IV.3.2 -Mise en œuvre du MEG révisé.....	59
IV.5-APPLICATION DU MODELE EGM REVISE PAR LA METHODE DE LA SPHERE FICTIVE.....	60
IV.6-APPLICATION DU MODELE EQUIVALENT AVEC NIVEAU DE TERRE FICTIVE.....	66
IV.6.1-cas de terre mauvaise conductrice.....	66
IV.6.1.1-Influence de la conductivité du sol sur le niveau de terre fictive.....	66
IV.6.1.2-Influence de la conductivité du sol sur le niveau de terre fictive.....	67
IV.6.2-Cas de terre discontinue.....	68
IV.7-APPLICATION DU MODELE EGM REVISE DANS LE CAS DE TERRE HETEROGENE.....	69
IV.7.1-Modèle électrogéométrique révisé REGM90% .....	69
IV.7.2-Application de REGM pour le cas d’une terre discontinue.....	70
IV.8-CONCLUSION.....	73
CONCLUSION GENERALE.....	74
ANNEXES.....	76
Annexe-A.....	76
Annexe-B.....	77
Annexe-C.....	81
BIBLIOGRAPHIE	

## INTRODUCTION GENERALE

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

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

Le premier chapitre de ce mémoire débute par une recherche sur la physique de la décharge, les caractéristiques électriques de la foudre et le mécanisme d'impact. Nous présentons le phénomène de décharge de foudre ainsi que ses effets directs et indirects sur l'environnement.

Dans le deuxième chapitre, nous exposons l'impact de la décharge, la protection contre la foudre, le modèle électrogéométrique et son application dans le domaine de la détermination des zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation des différents résultats tirés d'une synthèse de travaux, qui mettent en relief l'influence de plusieurs paramètres sur les zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal dans les deux cas de type de terre (discontinue et mauvaise conductrice).

Ensuite, nous présentons dans le dernier chapitre; en se basant sur les résultats du chapitre précédent, les équations déjà élaborées par les chercheurs, concernant les hauteurs de paratonnerre ainsi que les distances protégées au sol, prendront en considération la notion de niveau de terre fictive en fonction de la conductivité du sol; le modèle électro-géométrique fut alors élargi dans le cas d'une terre homogène et mauvaise conductrice. Une alternative sera proposée pour ce modèle concernant le modèle électro-géométrique révisé.

Enfin, nous terminons ce travail par une conclusion générale sur les différents résultats que nous avons obtenus.

## I.1 INTRODUCTION

Il est évident que l'ampleur des dégâts provoqués par la foudre dépend de la position du point où celle-ci tombe. En connaissant les facteurs qui influencent cette position, on peut construire et installer des dispositifs de protection – des paratonnerres – qui offriront une voie plus tentante à la foudre: de cette manière la foudre évitera les bâtisses et en général les objectifs qui doivent être protégés.

## I.2 HISTORIQUE

### I.2.1 L'époque des croyances

Les traces laissées à travers les siècles par les différentes civilisations comportent pratiquement toutes des représentations plus ou moins évidentes de la foudre.

Bien que des peintures rupestres comportent des symboles pouvant être attachés au phénomène de foudre, les historiens situent la première représentation de la foudre durant la première époque de Babylone.

Pour les Grecs, la foudre était la manifestation de la colère de Zeus (Roi des dieux dans la mythologie grecque). Il en était de même pour les romains avec leur Dieu Jupiter.

D'autres croyances sont beaucoup plus poétiques. Ainsi le peuple Basutos en Afrique pense que la foudre est un oiseau magique, nommé Umpudolo qui plonge des nuages vers le sol **[Phi.03]**.

Plus tard, au Moyen Age, l'église et son idéologie vont s'emparer de ce phénomène naturel : être victime de la foudre était alors considéré comme un châtiment. De nombreux saints sont invoqués pour se protéger contre cette punition divine.

### I.2.2 les premières recherches

L'histoire de la foudre et celle de l'électricité se rejoignent au XVIII<sup>e</sup> siècle. En 1745 **[Phi.03]**, l'invention de la bouteille de Leyde va faire progresser les études théoriques sur l'électricité. Cet ancêtre du condensateur permet en effet de provoquer des étincelles beaucoup plus violentes que les machines électrostatiques utilisées jusque-là. Ces décharges électriques, s'accompagnent également de détonations relativement intenses. Le rapprochement avec le

phénomène foudre est alors très vite envisagé par un bon nombre de scientifique. En 1748 [Phi.03], l'abbé Nallet dresse une liste de similitudes entre la foudre et les décharges électriques. D'autres études du même type sont publiées à la même époque. Le 07 novembre 1749 [Phi.03], une étude comparative et très complète a été publiée par un scientifique américain dont le nom restera lié à la foudre : Benjamin Franklin. Ses travaux vont se poursuivre et il décrira, dans un mémoire datant de l'été 1750, une expérience permettant de démontrer la nature électrique du nuage orageux. L'idée de l'expérience de cerf-volant était née.

C'est en 1752 que Benjamin Franklin réalise sa fameuse expérience. Son objectif était de déterminer si les éclairs étaient un phénomène électrique. Franklin et son fils de 21 ans, William, construisent un cerf-volant, formé de deux bandes légères de cèdre, en croix, attachées à un mouchoir en soie. Ils attachent un long fil métallique en haut du cerf-volant pour attirer l'électricité. Ils fixent également une ficelle au cerf-volant afin de le tenir, et Franklin père noue un ruban de soie sur la ficelle, près de la région qu'il tient à la main. Une clé, en fin, est rattachée au ruban, ainsi qu'une bouteille de Leyde. Benjamin Franklin réalise son expérience sous le pas d'une porte, de façon à ce que le ruban de soie attaché à la clé et à la bouteille de Leyde ne soit pas mouillé par la pluie.

Une fois le protocole de l'expérience élaboré, les deux hommes attendent l'arrivée d'un orage. Comme Franklin l'avait prédit lorsque des nuages passent au-dessus du cerf-volant, des charges négatives traversent le fil métallique du cerf-volant et parviennent jusqu'à la clé. La charge rentre dans la bouteille de Leyde, ce qui démontre clairement la présence d'électricité.

Franklin tenait le cerf-volant par le tissu de soie isolant : il était ainsi protégé de l'électricité.

Mais quand il tend son doigt pour toucher la clé, il reçoit un choc dû aux charges négatives de la clé ; elles sont assez fortes pour qu'une étincelle saute de la clé à sa main. Par miracle, cette charge n'était pas assez forte pour être mortelle. Dans d'autres circonstances, le coup d'éclair aurait pu tuer instantanément les deux individus.

L'expérience Franklin a montré avec succès que les éclairs étaient en fait de l'électricité statique.

## I.3 ELECTRICITE ATMOSPHERIQUE ET PHENOMENE PRECURSEUR

### I.3.1 Le condensateur terrestre

La terre et l'électro-sphère (couche de la haute atmosphère ionisée et située à environ 50km d'altitude) peuvent être considérées comme les armatures d'un gigantesque condensateur sphérique. Entre les deux, la troposphère et la stratosphère constituent le diélectrique [Ler.84].

On peut donc assimiler le système électro sphère – globe terrestre à un condensateur sphérique dont la capacité est donnée par la relation suivante [Agu.88] :

$$C = \frac{4\pi\epsilon_0}{\left(\frac{1}{R_t} - \frac{1}{R_e}\right)} \dots\dots\dots(I.1)$$

Avec:  $R_t = 6367\text{km}$  Rayon de la terre

$R_e = 6467\text{km}$  Rayon de l'électro sphère

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$$

A partir de ces données, nous obtenons une capacité qui vaut environ 46 mF [Agu.88].

Des mesures montrent, qu'il existe par beau temps un champ électrique faible permanent, dirigé vers le bas (c'est à dire haute atmosphère positive, terre négative) dont l'amplitude est de l'ordre de 100 à 120 V/m. Le condensateur terrestre est donc chargé en permanence [Ler.84].

### I.3.2 Différents types de décharges

La foudre est un ensemble de phénomènes physiques et électriques complexes qui se présentent dans la nature sous différentes formes.

#### I.3.2.1 Décharges intra - nuages

Contrairement aux décharges nuage - sol, la décharge intra - nuages 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. La durée de ces décharges est de l'ordre de plusieurs centaines de millisecondes et leurs effets sont plutôt minimes [Gar.94].

### **I.3.2.2 Décharges entre nuages**

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, et elles sont d'autant plus fréquentes que la densité de l'air est faible. Ces décharges inquiètent surtout les engins aéronautiques et les systèmes de transmission par satellite.

### **I.3.2.3 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,...), et enfin de l'altitude. Elle se présente sous la forme d'une succession de décharges "nuage - sol - nuage" appelées coups de foudre [Gar.04].

## **I.4 PHYSIQUE DES PHENOMENES ORAGEUX**

### **I.4.1 Distribution statistique des orages**

#### **I.4.1.1 Niveau kéraunique**

Il est d'usage universel de caractériser la sévérité orageuse d'une région par son niveau Kéraunique (keraunos est la foudre en grec).

La simplicité même de cette définition a permis l'établissement de statistique, à partir de renseignements fournis par les bonnes volontés locales, qui rendent d'appréciables services, cependant cette donnée est peu précise [Gar.94].

### **I.4.1.2 Définition du foudroiemment**

Une mesure utilisable de la sévérité orageuse, car elle ne donne aucune indication sur l'existence des zones localisées particulièrement foudroyées, et encore moins sur l'intensité des coups de foudre.

Une définition bien plus rigoureuse de la sévérité orageuse peut être atteinte par la sévérité du foudroiemment, par exemple la densité de coups de foudre au sol, exprimée en nombre de coups par kilomètre carré et par an [Rou.94].

### **I.4.1.3 Densité réelle de coups de foudre**

Aujourd'hui, des systèmes de détection d'orages plus précis peuvent donner des informations intéressantes, la densité du coup de foudre au sol est aussi déterminée avec plus de précision et des informations sur l'amplitude de ces coups de foudre sont aussi disponibles, bien que ces systèmes soient une évolution (moyens matériels, nombre de capteurs, durée totale de fonctionnement).

Les valeurs fournies par ces systèmes sont nettement plus précises, que n'importe quelle carte de niveau kéraunique [Rou.94].

### **I.4.1.4 Facteurs locaux influant sur le foudroiemment**

On peut se demander s'il existe des zones localisées particulièrement foudroyées communément appelées nids d'orages. L'existence de ces zones est souvent rapportée par la population locale, par les on-dit, mais n'a jamais fait l'objet de statistiques sérieuses.

A la lumière des connaissances acquises, il pourrait être raisonnable de penser à trois facteurs locaux possibles [Gar.04].

#### **a) Facteurs topologiques**

Des zones préférentielles peuvent exister du simple fait de conditions privilégiées de formation des nuages orageux, sous l'effet combiné du sol et d'un réchauffement local ; il y a alors formation puis ascension d'une masse d'air chaude et humide. Comme l'air transmet très mal la chaleur, cette bulle chaude s'élève, pratiquement isolée thermiquement de l'air environnant, et forme un nuage orageux aux altitudes où la condensation commence.

Par ailleurs, des mouvements d'air, canalisés par des vallées ou des fleuves, et qui entraînent les nuages orageux, favorisent l'existence de couloirs orageux. Ainsi, ce ne sont pas toujours les points les plus élevés qui sont les plus frappés par la foudre.

En montagne, les versants des vallées sont souvent plus foudroyés que les sommets.

### **b) Facteurs géologiques**

Le point d'impact exact d'un coup de foudre ne semble se déterminer que dans la partie la plus inférieure de sa trajectoire ; la partie supérieure, au-delà d'une centaine de mètres au-dessus du sol, se développe de façon totalement indépendante de la structure géométrique ou géologique de ce dernier. Ce ne sont donc que des facteurs tout à fait locaux qui peuvent avoir une action sur la décision de l'impact. La présence de saillies, arbres, bâtiments, cheminées est bien connue comme étant l'un de ces facteurs. Mais la conductivité des sols pourrait être un autre facteur important [Rou.94] [Gar.94].

### **c) Concentration ionique de l'air (conductivité de l'air)**

La concentration en ions de l'air (ou sa conductivité) a parfois été invoquée pour expliquer un nid d'orages. Mais, même aujourd'hui, il n'existe pratiquement pas de données expérimentales à partir d'observations sur le terrain.

Les études de laboratoire sur les mécanismes de décharges de l'air n'ont pas mis en évidence, jusqu'à présent, un effet de cette conductivité, par exemple en favorisant le trajet de la décharge. Les théories actuellement disponibles montrent d'ailleurs que le taux d'ions dans l'air devrait être considérablement plus élevé que sa mesure dans les conditions naturelles.

## **I.4.2 Phénomènes précurseurs**

### **I.4.2.1 Nuage orageux**

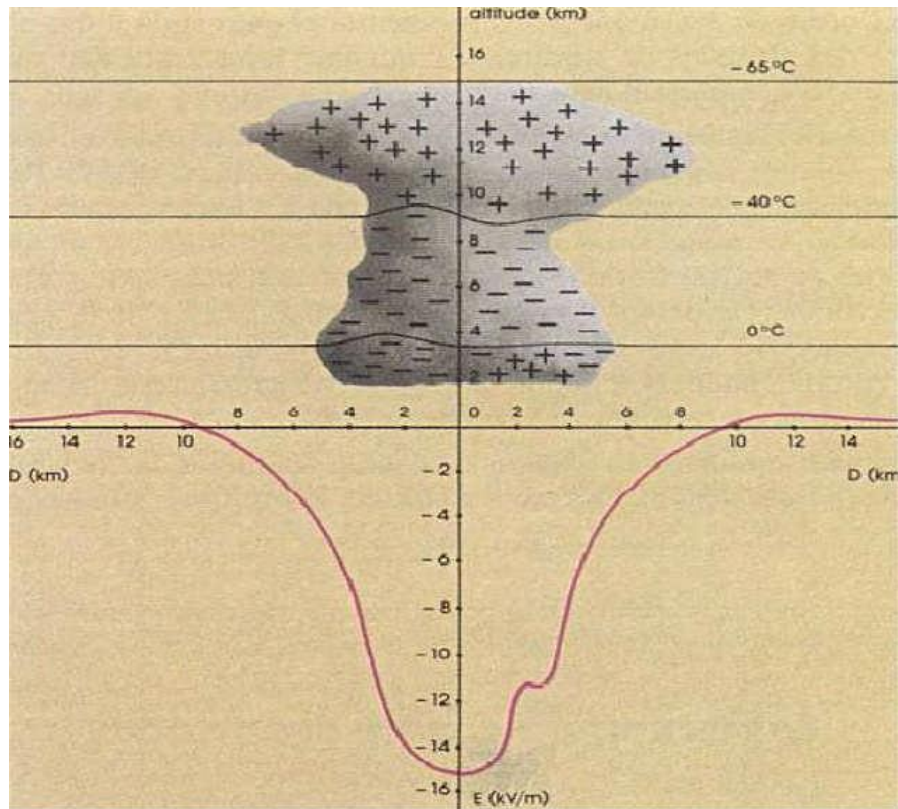
Les nuages orageux sont d'énormes masses généralement du type cumulo-nimbus, occupant une surface de quelques dizaines de kilomètres carrés, ayant une épaisseur de plusieurs kilomètres. Leur masse est de l'ordre de centaines de milliers de tonnes d'eau. Ils sont constitués de gouttes d'eau à leur partie inférieure et de particules de glace à leur partie supérieure [Gar.89]. Leur base se trouve à environ 2 à 3 km au-dessus du sol, et ils se développent, en hauteur, jusqu'à des altitudes de 10 à 15 km.

En revanche, les orages frontaux [Gar.04] naissent de la rencontre de masses d'air importantes, de température et d'humidité différentes. 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 [Gar.94].



**Fig. (I.1) :** Schéma montrant la distribution des charges électriques dans la masse d'un nuage orageux et la répartition du champ électrique au sol [Gar.04]

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 [Gar.04].

#### I.4.2.2 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 demi-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 [Sab.99], 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 [Gar.04].

## I.5 CLASSIFICATION ET DESCRIPTION DES COUPS DE Foudre

### I.5.1 Classification des coups de foudre

Sous l'effet des charges électriques d'un nuage orageux et au cours de leur formation, le champ électrique au sol et à l'intérieur du nuage varie considérablement. Lorsqu'il atteint la valeur limite de claquage, il y a une décharge électrique, qui se répartit en trois types principaux [Ler.84] [Hor.91].

- Les décharges entre nuage (Fig.I.2.a).
- Les décharges à l'intérieur du nuage (Fig.I.2. b).
- Les décharges entre nuage et terre, sont les coups de foudre (Fig.I.2.c).

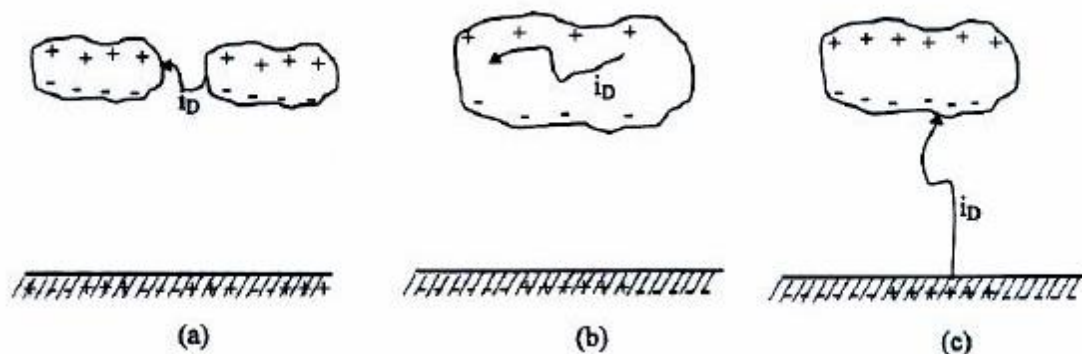
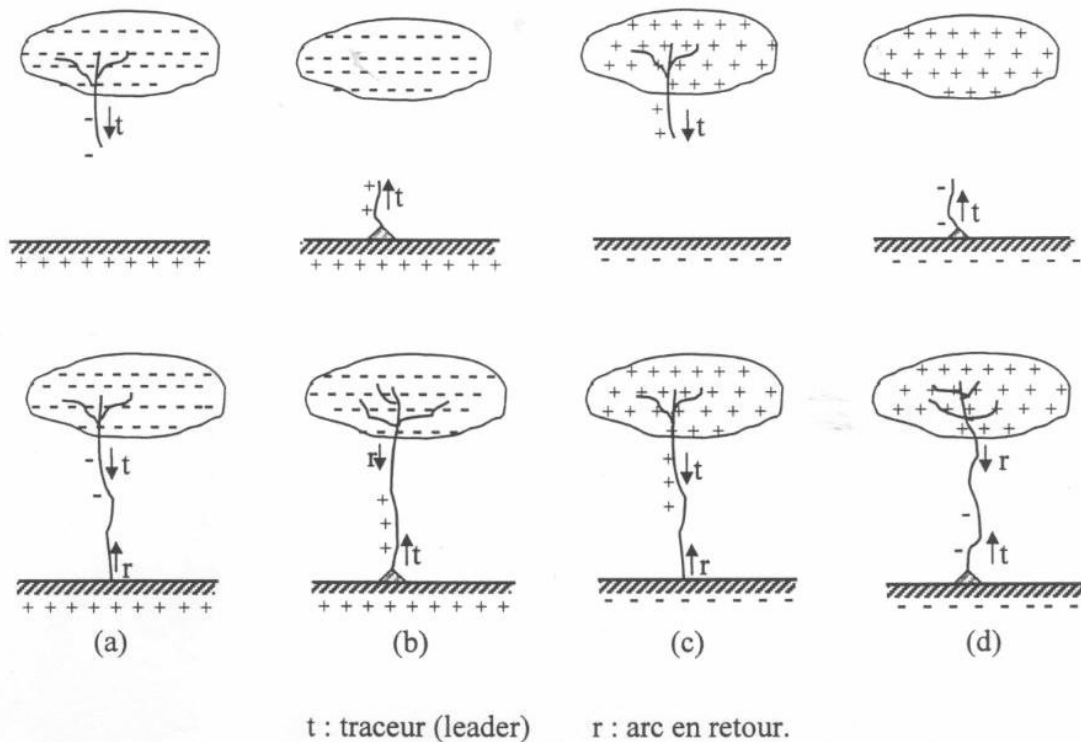


Fig. (I.2) : Différents types de décharges

La première phase d'un coup de foudre commence par le développement d'une pré-décharge peu lumineuse ou traceur soit à partir de la base du nuage ou à partir du sol. On assiste après à l'amorçage d'un arc empruntant le canal ionisé du pré-décharge.

On définit quatre grandes catégories de coup de foudre, en fonction de la polarité de la base de nuage déchargé, positive ou négative et en fonction du sens de propagation du traceur ascendant ou descendant (Fig. I. 3)



- (a) - Coup de foudre du type descendant négatif
- (b) - Coup de foudre du type ascendant positif
- (c) - Coup de foudre du type descendant positif
- (d) - Coup de foudre du type ascendant négatif

**Fig. (I.3) :** Représentation schématique des différents coups de foudre

- Les configurations (a) et (b) sont les plus fréquentes, 80 à 90 % dans les régions tempérées.
- La configuration (c) présente 10 à 20 % des cas.
- La configuration (d) est extrêmement rare [Ler.84][Hor.91].

## I.5.2 Déroulement d'un coup de foudre

### I.5.2.1 Coup de foudre ascendant

Les coups de foudres ascendants sont généralement produits dans des endroits d'importantes prééminences, où les effluves d'effet couronne apparaissent au sommet des aspérités. Ces effluves se développeraient d'autant plus loin et avec plus d'intensité que la dimension de la prééminence est importante.

A partir d'une certaine intensité d'effluves, le phénomène se modifie brusquement et peut se développer plus loin pour atteindre le nuage, c'est le coup de foudre ascendant. Ceci est fréquemment observé à partir des tours dont la hauteur dépasse 300m, et à partir des gratte-ciels.

La chronologie des évènements pour le cas le plus fréquent (ascendant positif) est la suivante: aux premiers temps on observe l'apparition de filaments couronnes issus d'un tronç ionisé commun, qui est l'amorce d'un traceur. A partir d'une certaine valeur du champ électrique, ce traceur se développe brusquement en direction du nuage avec une vitesse moyenne de 2 à  $6 \cdot 10^4$  m/s [Gar.94].

Au cours de cette progression, le traceur se ramifie plusieurs fois, et on assiste à la formation d'une arborescence. Au moment où ces ramifications lèchent la base de nuage, il s'établit une décharge, dont la durée peut atteindre la seconde, et qui écoule des courants de l'ordre du millier d'ampères [Ler.84].

### I.5.2.2 Coup de foudre descendant

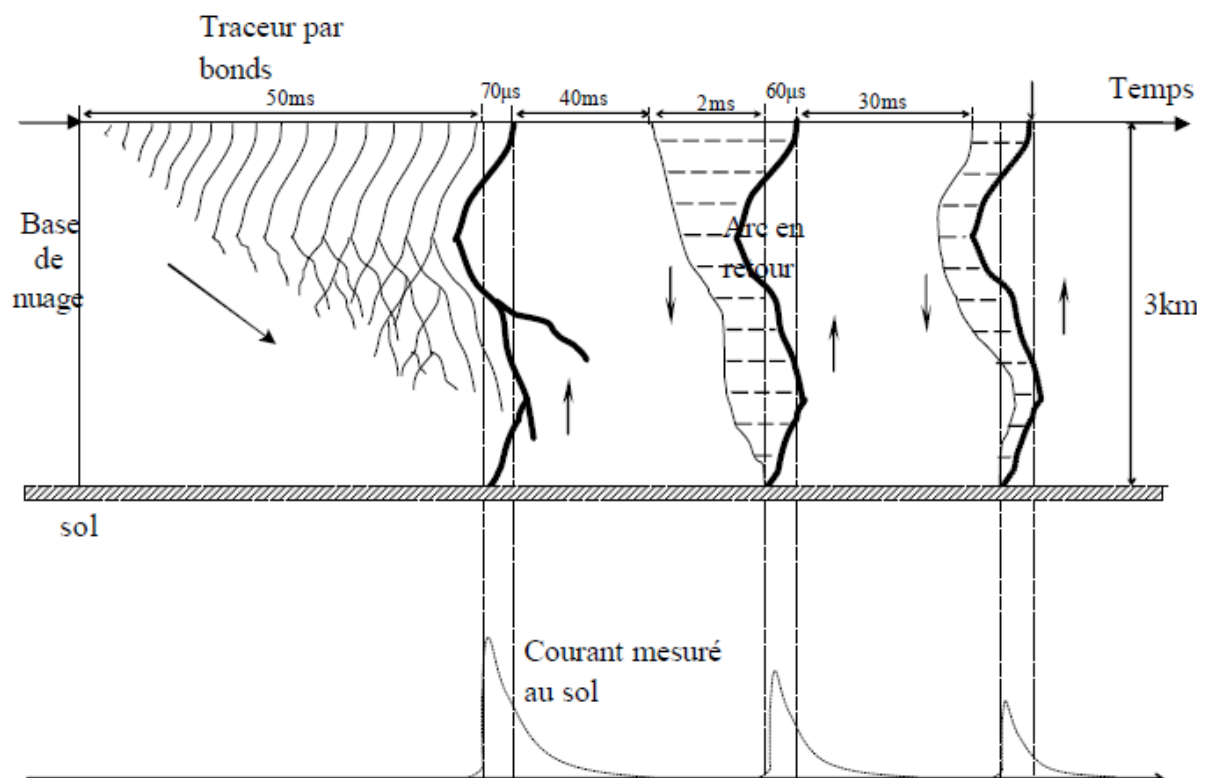
A l'inverse du traceur positif, le traceur d'un coup de foudre descendant négatif [Ler.84] [Kuf.84] [Hor.91] se développe en progressant vers la terre par bonds successifs de 50 à 100m (Stepped leader). Entre les bonds, on observe des temps d'arrêt de l'ordre de 40 à 100 ms, avec une vitesse de progression moyenne de 0,15 à 0,20 m/ms (deux fois plus grande que celle du traceur ascendant positif). Dès que la pointe du traceur se rapproche du sol, des prés décharges ascendantes se développent généralement depuis un arbre, une salie, en direction du traceur descendant, alors qu'elles n'existaient auparavant que sous forme d'effluves d'effet couronne localisées.

Lorsque l'une de ces pré décharges et le traceur par bonds se rejoignent, il s'établit un court-circuit entre le nuage et le sol, qui va permettre le passage d'un courant de forte intensité,

neutralisant les charges de ce dernier ; on observe alors un trait fortement lumineux qui progresse depuis le sol jusqu'au nuage avec une vitesse estimée à 108 m/s. C'est l'arc de retour ou « return stroke ».

Lorsque la première décharge cesse de s'écouler, il peut se passer 100 ms avant qu'une seconde décharge n'apparaisse. Cette seconde décharge commence par l'apparition d'un traceur (dart leader) qui progresse d'une façon continue (contrairement au stepped leader) en suivant le même chemin établi par le stepped leader dont la vitesse de propagation est de l'ordre de 106 m/s et plusieurs décharges successives peuvent ainsi avoir lieu selon ce type de mécanisme.

La figure (I.4) montre l'évolution temporelle d'un coup de foudre descendant négatif.



**Fig. (I.4) :** Evolution spatio-temporelle d'un coup descendant et courant mesurés à la surface de la terre [Kuf.84]

## I.6 LES EFFETS DE LA Foudre

Ce sont ceux d'un courant impulsionnel de forte intensité se propageant d'abord dans un milieu gazeux (l'atmosphère), puis dans un milieu solide plus ou moins conducteur (le sol).

- a) **Effets visuels (éclairs):** dus au mécanisme de Townsend.
- b) **Effets acoustiques:** dus à la propagation d'une onde de choc (élévation de pression) dont l'origine est le canal de décharge ; la perception de cet effet est limitée à une dizaine de kilomètres.
- c) **Effets thermiques :** dégagements de chaleur par effet Joule dans le canal ionisé.
- d) **Effet électrodynamiques :** ce sont les forces mécaniques dont sont l'objet les conducteurs placés dans le champ magnétique, créé par cette circulation de courant intense. Ils peuvent avoir pour résultats des déformations.
- e) **Effets électrochimiques :** relativement mineurs, ces effets se traduisent par une décomposition électrolytique.
- f) **Effets d'induction :** dans un champ électromagnétique variable, tout conducteur est le siège de courants induits.
- g) **Effets sur un être vivant (humain ou animal) :** le passage d'un courant d'une certaine intensité, pendant une courte durée suffit à provoquer des risques d'électrocution par arrêt cardiaque ou arrêt respiratoire. A cela s'ajoutent les dangers de brûlures.

## **I.7 FORMES ET AMPLITUDES DES IMPULSIONS DES COUPS DE Foudre**

### **I.7.1 FORMES DES DECHARGES NEGATIVES**

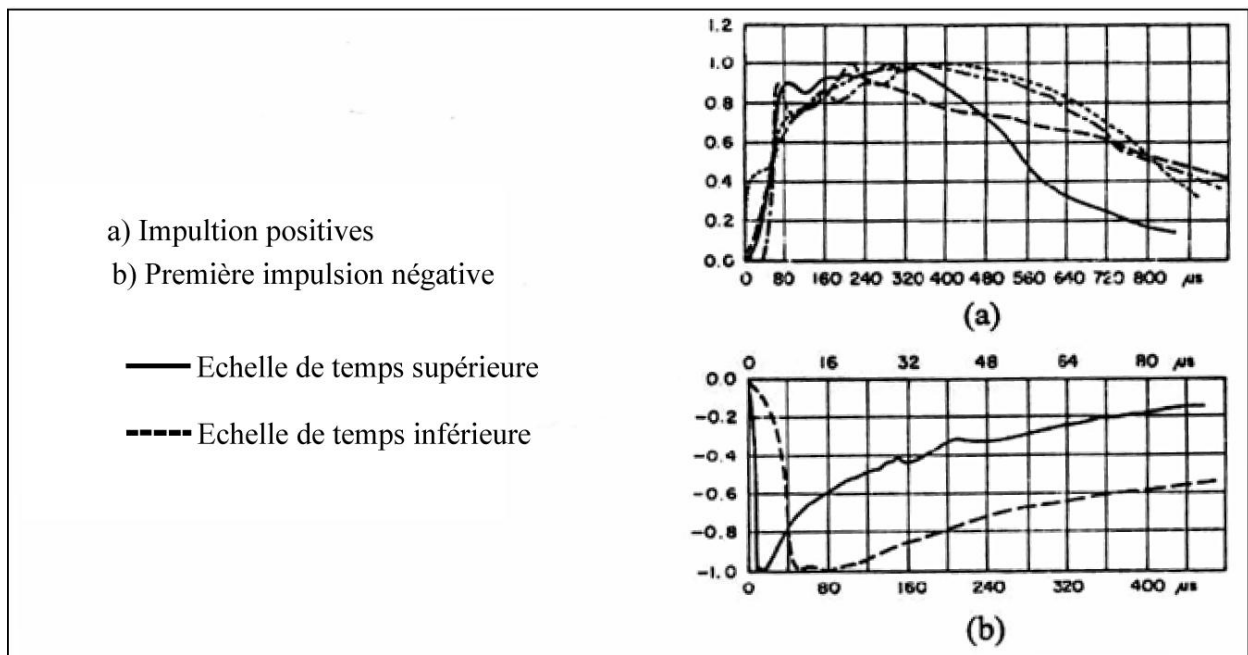
Les courants des coups de foudre négatifs offrent une grande variété de combinaisons de courants impulsionnels et de courants persistants. Le courant d'un coup de foudre complet présente plusieurs impulsions, et on distingue le premier coup et les coups subséquents (Fig.I.4).

Le premier coup se caractérise par un temps de montée de zéro jusqu'à la valeur de crête de l'ordre de 10 à 20 ms, une durée de queue de l'ordre d'une centaine de microsecondes et une amplitude variant entre 3 et 200 kA [**Gar.94**].

Pour les coups subséquents la durée de front est très courte, inférieure à 1 ms, mais la queue de l'onde est bien plus régulière que dans la première décharge, leur amplitude est inférieure à celle de la première décharge, dépassant rarement 20kA (Fig.I.4) [**Ler.84**] [**Gar.94**].

### **I.7.2 FORMES DES DECHARGES POSITIVES**

Le coup de foudre positif (Fig.I.5) est constitué d'une seule impulsion qui dure de 0.1 à 0.2s (très supérieure à celle du coup de foudre négatif), à durée du front qui varie entre 20 et 50 $\mu$ s, cependant ils sont plus violents ; l'amplitude du courant peut atteindre des très fortes valeurs supérieures à 100kA [**Ler.84**] [**Hor.91**].



**Fig. (I.5)** Formes typiques des différents courants de foudre [Ler.84]

## I.8 CONCLUSION

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, objet de notre étude. Les travaux effectués au sein du laboratoire de Haute Tension de l'ENP ainsi que d'autres études, remettent en cause la validité du modèle électrogéométrique pour un sol hétérogène, discontinu et mauvais conducteur.

## II.1 INTRODUCTION :

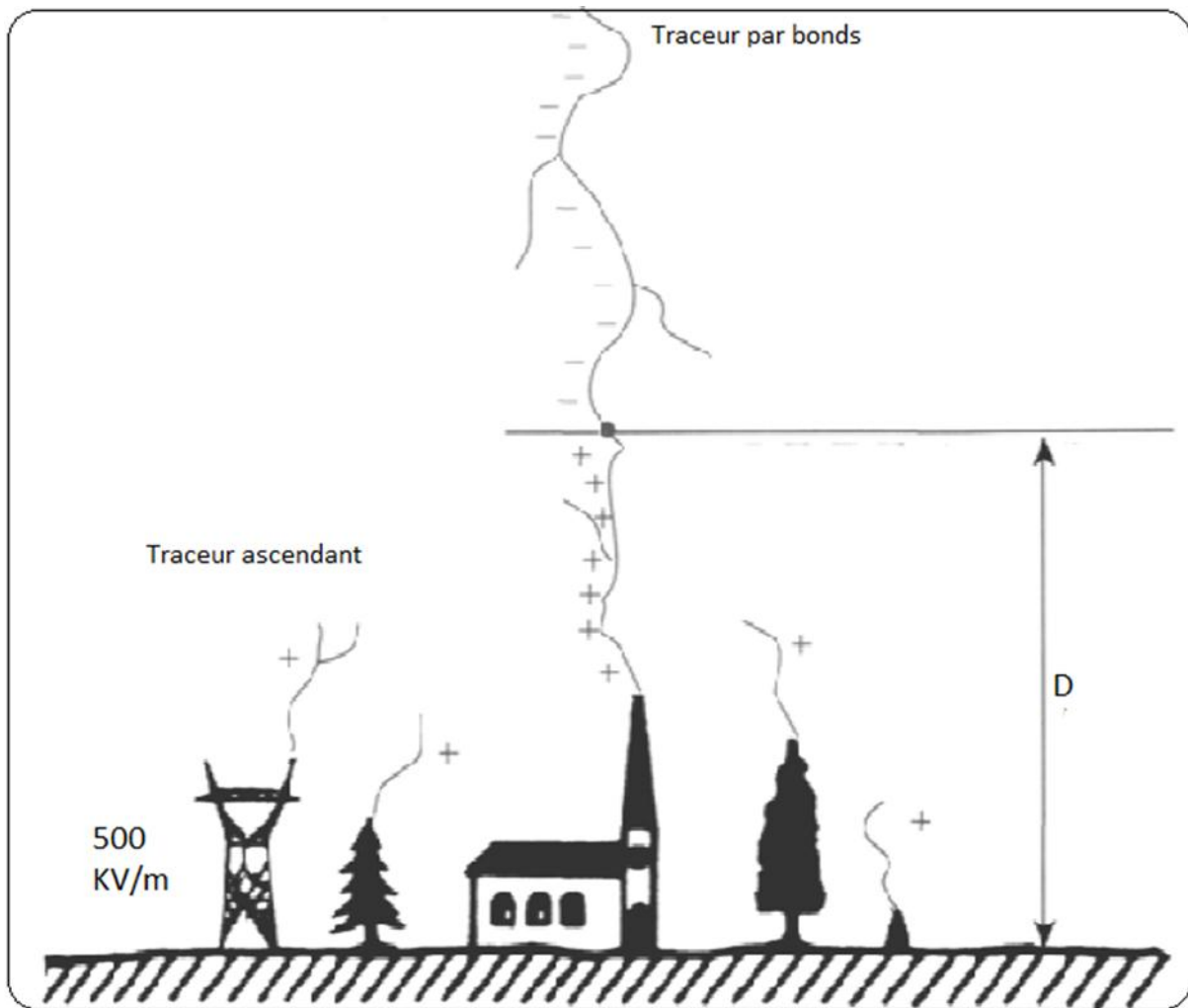
Tout ouvrage risque d'être foudroyé, pour cela nous sommes obligé de trouver tous les points d'impacts probables; ces derniers nous permettront de prévoir une meilleure protection éventuelle pour bien sécuriser au maximum nos biens et nos vies.

Dans ce chapitre, nous nous intéresserons à la physique de l'impact au sol, au modèle électrostatique de base, au modèle mis en œuvre par la méthode de la sphère fictive ainsi qu'à la protection contre la foudre.

## II.2 PHYSIQUE DE L'IMPACT AU SOL

### II.2.1 Mécanisme de décharges

L'origine de la foudre est en général un nuage orageux de type cumulo-nimbus. Ce nuage forme un véritable dipôle électrique dont la partie supérieure est chargée positivement et la partie inférieure est chargée négativement. Lorsque la charge du nuage devient suffisante pour provoquer la rupture diélectrique de l'air, une pré-décharge s'amorce dans la partie négative du nuage et progresse au hasard par bonds **[Ler.84]**, en direction du sol. La progression du traceur par bond issu d'un nuage orageux s'effectue de manière aléatoire. Mais, lorsqu'il arrive à deux ou trois cent mètres de la terre, que tout se précise, le traceur par bonds est un canal ionisé qui porte un ascendant de charges négatives, avec une forte concentration à sa pointe, à l'approche du sol, il génère au-dessous de lui un champ électrique qui croit jusqu'à atteindre des valeurs de l'ordre de la centaine de kilovolts par mètre, à ce moment, des traceurs ascendants positifs se développent brusquement en direction du traceur descendant, alors qu'auparavant, existent sous forme d'effluves d'effet couronne, le traceur qui a progressé plus va entrer en contact avec le traceur descendant, ainsi le canal ionisé est continu depuis le sol jusqu'au nuage et l'arc en retour peut avoir lieu et parfois le contact se fait par deux ou plusieurs traceurs ascendants, avec le traceur par bonds, ce qui multiplie les points d'impacts **[Gar.89] [Hut.88]**.



**Fig. (II.1):** Schéma montrant la phénoménologie de l'impact : rencontre entre le traceur descendant et un traceur ascendant [Gar.94].

## II.2.2 Point d'impact

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

La figure (II.2) schématise les étapes intervenant dans le coup de foudre au sol. On remarquera que le point d'impact du coup de foudre est déterminé par l'endroit où s'amorce la contre-décharge de capture. Aussi, tous les modèles de prévision du point d'impact se basent sur

la propagation des traceurs par bonds négatifs ainsi que sur les critères de formation des contre décharge de capture [Xem.94] [Sab.99].

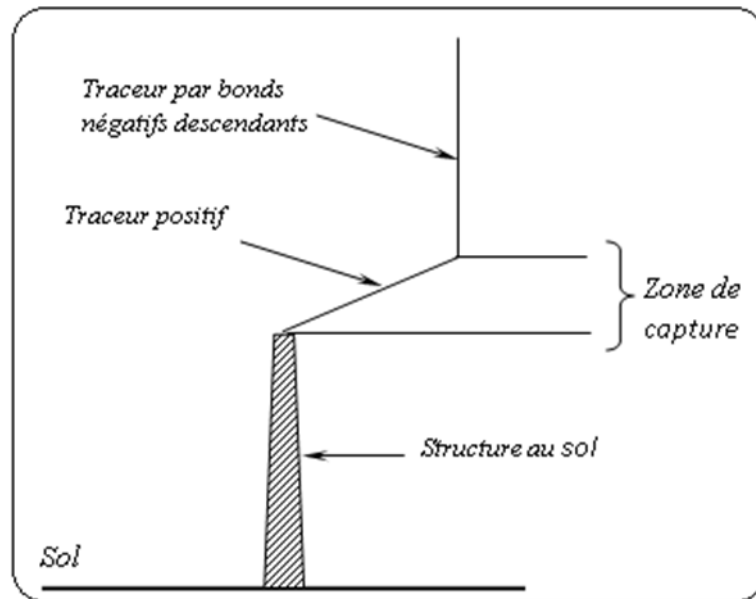


Fig. (II.2). Point d'impact sur une structure au sol

### II.2.3 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.

$$D = 10 \times I^{2/3} \dots \dots \dots (II.1)$$

**Avec :** D : en mètre et I en kilo-Ampères.

Tout élément placé à une distance D pourra déclencher l'arc en retour. Le modèle électrogéométrique 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 toutefois qu'il peut être utilisé avec une bonne confiance. [Dja.08]

## II.2.4 Champ généré au sol par le traceur descendant

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

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

En ce qui concerne la charge injectée dans le traceur descendant, il est admis que la première décharge du coup de foudre descendant correspond à la quasi-neutralisation de la charge du traceur. Ceci conduit souvent à la corrélation suivante [Gar.94] :

$$I = 15 \cdot Q \dots\dots\dots(\text{II-2})$$

**Avec:** I [kA] et Q [Coulomb]

Pour la distribution des charges le long du traceur, les auteurs des modèles ont pris plusieurs hypothèses. Une de ces hypothèses suppose que 10% de la charge du traceur est concentrée à sa pointe et que les 90% restants sont réparties uniformément sur sa longueur [Ren.77].

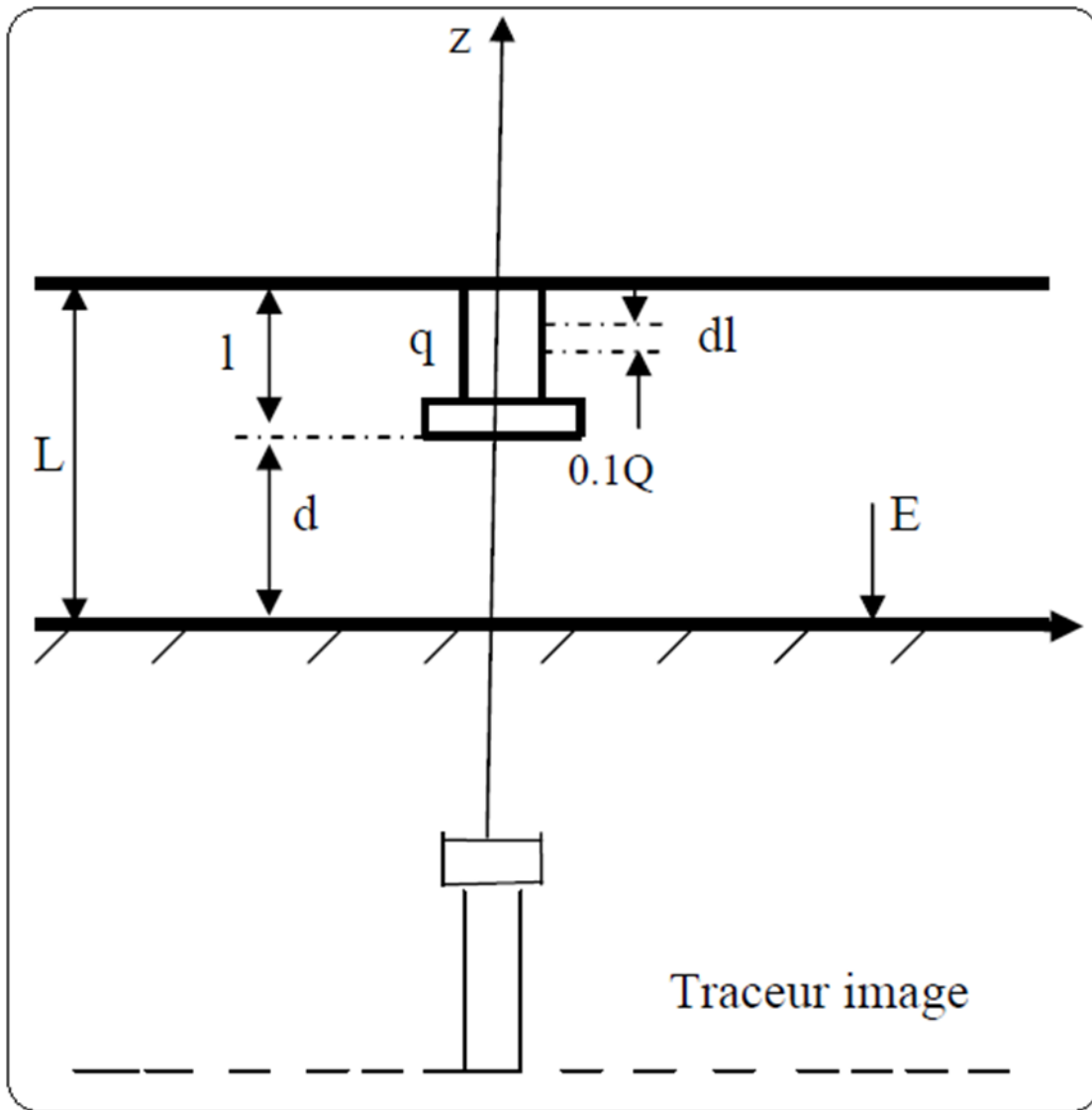
Si l'on désigne par l la longueur instantanée du traceur, par Q la charge totale et par q sa charge linéique, on aura à tout instant :

$$Q = 0.1Q + l \cdot q \dots\dots\dots(\text{II-3})$$

**Avec :** l : la longueur du traceur

Q : sa charge totale

q : sa charge linéique



**Fig. (II. 3):** Notation utilisée pour le calcul du champ au sol crée par un précurseur descendant [Hut.89].

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

**Avec :** L: hauteur de formation du traceur

d: distance instantanée entre la tête du traceur et le sol (distance d'amorçage)

$$l = L - d \dots\dots\dots(II-3)$$

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

Il est évident que le champ électrique au sol sous le traceur descendant est une fonction à la fois de la quantité de charges réparties le long de ce canal ionisé, et la distance qui sépare sa pointe du sol on peut donc calculer ce champ, à partir d'hypothèses raisonnables sur la répartition réelle des charges, de sorte qu'il existe une corrélation entre l'intensité de crête du courant et la quantité de charge [Gar.94].

Le tableau II.1, nous donne les charges linéiques pour quelques valeurs de courant de crête pour un nuage situé à 2000 mètres d'altitude [Hut.89].

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

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

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

A partir de ces données, le champ au sol à la verticale du traceur descendant est donnée par [GAR94] :

$$E = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \cdot \left[ \int_d^L \frac{dl}{l^2} + \frac{L-d}{9} \right] = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 \cdot L} \cdot (l - k) \frac{9k+d^2}{9k^2} \quad (\text{II.4})$$

Avec :  $k=d/L$ .

A l'instant de l'impact c'est-à-dire lorsque  $l=L$ , la charge linéique du traceur devient :

$$q = \frac{0.9 \cdot Q}{L} \quad (\text{II.5})$$

De (II.1) et (II.5) on déduit :

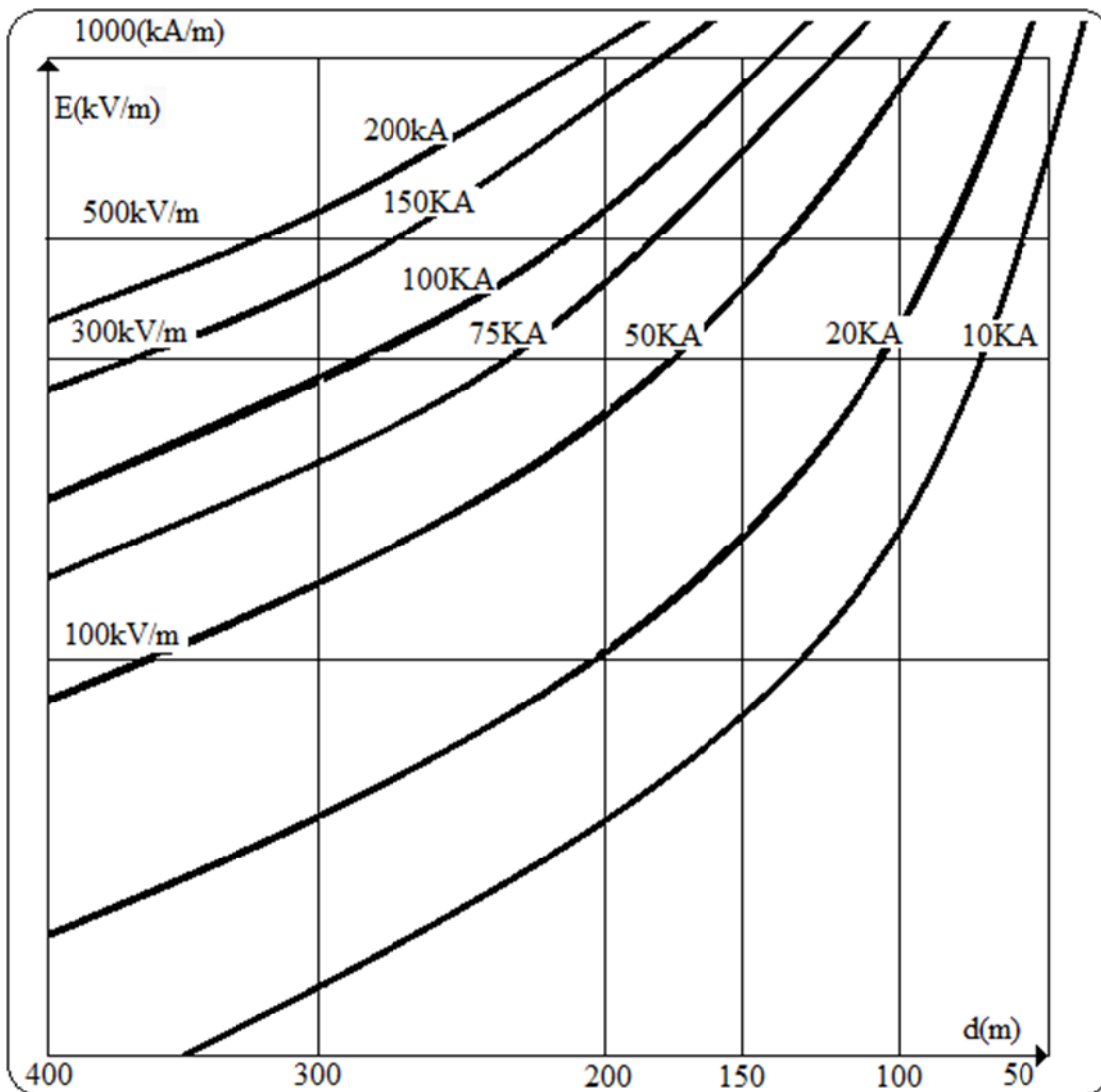
$$q = \frac{0.9 \cdot I}{15 \cdot L} \quad (\text{II.6})$$

Avec ;  $q$  en coulomb,  $I$  en kA et  $L$  en mètres.

En remplaçant (II.6) dans (II.4), et prenant le cas d'un nuage situé à 2km du sol ( $L=2000m$ ), nous obtenons  $E=f(d, I)$  représentée sous forme de courbes (Figure II.4) [Hut.89] [Gar.94].

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

On peut alors considérer que, le contact entre les traceurs descendants et ascendants s'établit à l'instant où le champ atteint la valeur critique de  $500kV/m$  [Hut.89].



**Fig (II.4):** champ au sol en fonction de l'altitude de la tête du précurseur descendant pour différentes valeurs du courant de foudre [Hut.89].

La figure II.3 permet de lire immédiatement la distance entre le traceur par bonds et le sol à cet instant en fonction du courant de foudre, cette distance est appelée distance d'amorçage et E. R. Whitehead avait proposé une relation pour l'exprimer en fonction du courant de foudre [Gar.94] :  $d = 10 \cdot I^{2/3}$

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

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

**Tableau II.2:** distance d'amorçage en fonction du courant de crête [HUT.89].

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

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

### II.3. Modèle électro géométrique de base

Le modèle électro géométrique est un modèle de prédiction physico-mathématique. Son but est de déterminer les points d'impact les plus probables de la foudre, afin de prévoir les dispositifs de protection les plus appropriés (paratonnerres, cages de Faraday, fils tendus) et de minimiser éventuellement les dégâts sur les équipements industriels ou le personnel. Ce modèle est appelé "modèle électro géométrique" parce qu'il combine les paramètres électriques et géométriques. L'application de la méthode de la sphère fictive, a permis de définir la zone d'attraction d'un paratonnerre horizontal [Gar.94].

L'électricien a essayé de modéliser, dans une expression analytique simple, la distance entre l'extrémité du traceur par bonds descendant et un objet au sol pour laquelle une décharge

ascendante peut se développer à partir de cet objet. Cette distance « D » appelée distance d'amorçage (striking distance) est donnée par l'expression suivantes :

$$D(I)=\alpha I^\beta \dots\dots\dots (II.7)$$

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

Il n'existe pas à l'heure actuelle de modèle universellement reconnu et les paramètres  $\alpha$  et  $\beta$  varient dans d'assez grande proportions:  $\beta$  varie entre 0,6 et 0,8 et  $\alpha$  entre 6 et 10, ce dernier étant fonction de la hauteur de la structure susceptible d'attirer la foudre. En accord avec d'autres chercheurs, Whitehead [Eri.75] a proposé l'expression donnée par relation (II.1).

## II.4. Mise en œuvre du modèle électrogeométrique

### II.4.1 Méthode de la sphère fictive

Le modèle électrogeométrique permet de déterminer la zone à protéger par la méthode de la sphère fictive [Gar.94]. Pour mettre en relief la notion de zone de protection ou de capture, une méthode graphique simple, appelée méthode de la sphère fictive a été mise au point. Son principe consiste à considérer une sphère de rayon D (distance d'amorçage) et qui a pour centre la tête du traceur par bonds. La sphère se met en mouvement dans toutes les directions, sans jamais perdre le contact soit avec le sol, soit avec un objet proéminent.

La zone de protection est limitée par une parabole, définie par l'ensemble des points à égale distance de la pointe du paratonnerre et du sol. [Nof.87][Nof.95].

Le point d'impact de la foudre est déterminé par l'objet au sol le plus proche de la distance d'amorçage d du traceur. Tout se passe comme si le traceur était entouré d'une sphère fictive de rayon D se déplaçant avec lui. Pour une bonne protection, il faut que la sphère fictive roulant sur le sol atteigne le paratonnerre sans toucher les objets à protéger [Agu.87].

Ce modèle (élaboré par Armstrong, Golde, Darvenizia et Whitehead) a été vérifié au cours d'une importante campagne d'investigation sur des lignes de transport d'énergie électrique à haute tension [Agu.87].

Ces auteurs ont défini une expression analytique de la distance entre le traceur par bonds et l'objet au sol (II-6), pour laquelle une décharge ascendante peut se développer à partir de cet objet [Ler.84].

La rencontre réelle entre traceur descendant et décharge ascendante s'effectue approximativement à mi-chemin de la distance d'amorçage, d'après ce modèle, l'objet qui se trouvera en premier à la distance d'amorçage de la pointe du traceur constituera le point d'impact [Gol .77].

L'application de ce modèle nécessite de le compléter par l'hypothèse que la distance d'amorçage définie auparavant reste applicable quel que soit la nature des objets au sol, que ces objets soient le sol plat lui-même, une pointe du paratonnerre, un fil conducteur tendu horizontalement, les parties externes métalliques d'un bâtiment, ou encore les arbres [Hut.89].

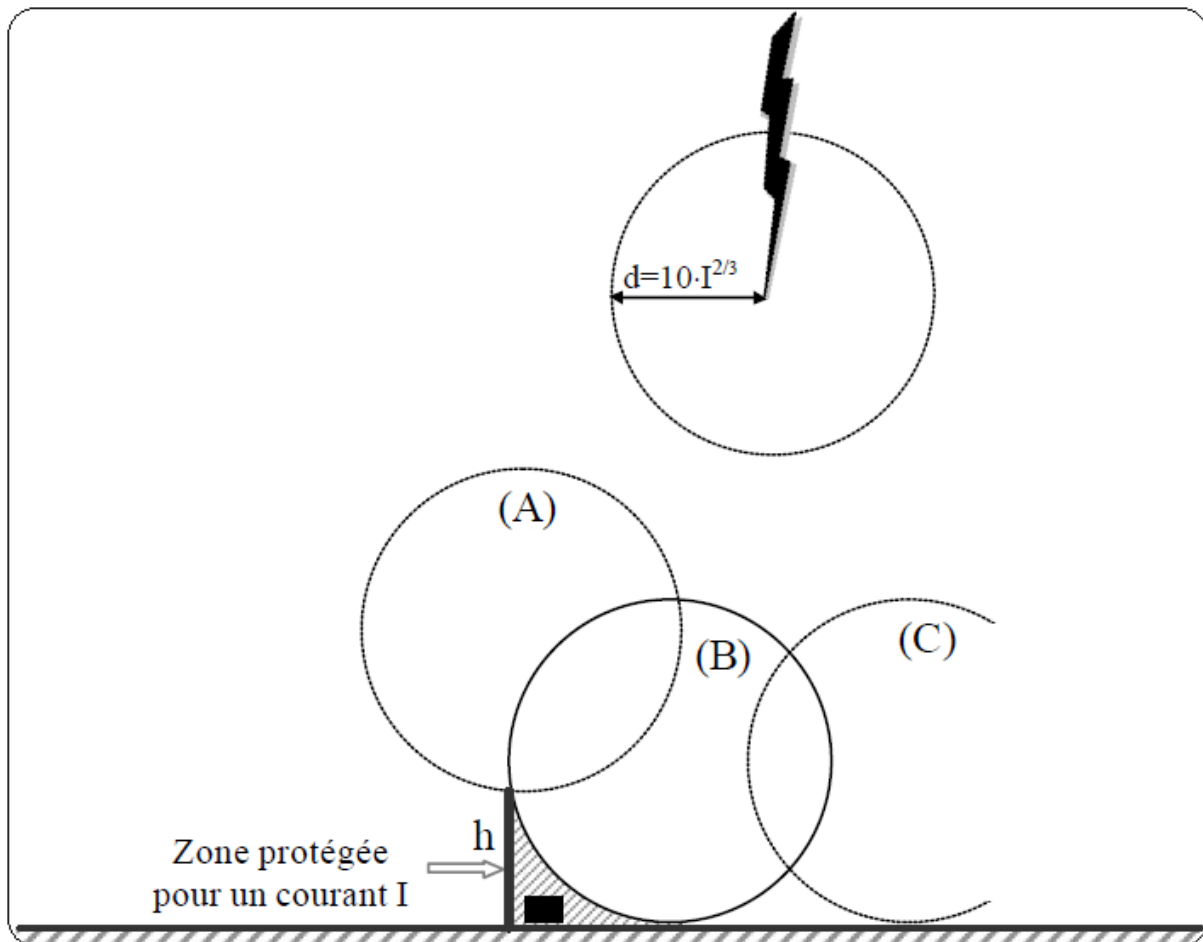


Fig (II.5): Méthode de la sphère fictive

## II.5 Application du modèle électro géométrique

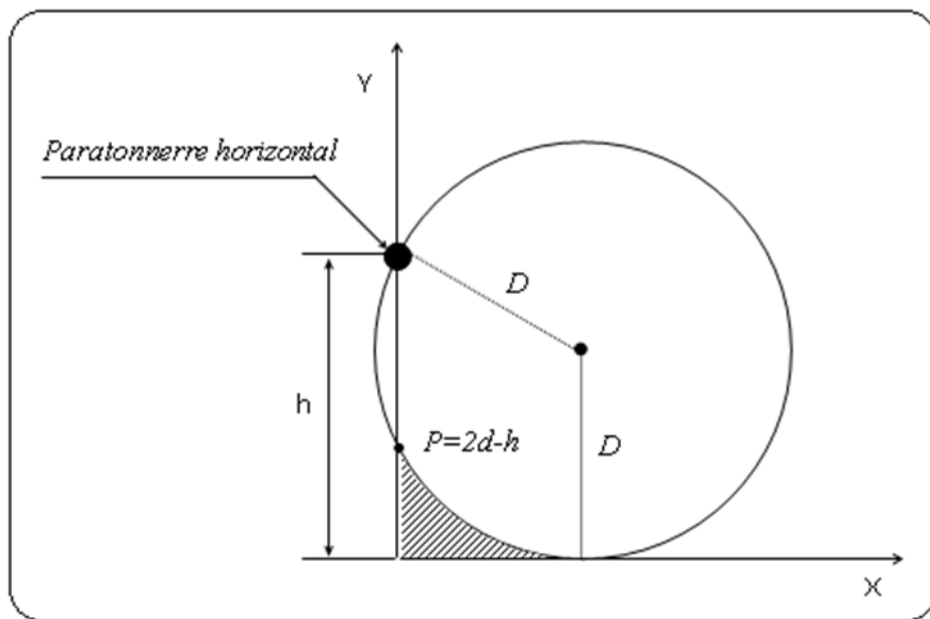
### II.5.1 Zone de capture d'un paratonnerre horizontal

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

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

Où  $h$  est la hauteur du paratonnerre horizontal.

En réalité on obtient une surface de symétrie axiale autour du paratonnerre horizontal dont la hauteur maximale d'un objet protégé est :  $P=2D-h$  (figure II.5)



Fig(II.5) : Zone de protection d'un paratonnerre horizontal

### II.5.2 Zone de capture d'une tige verticale

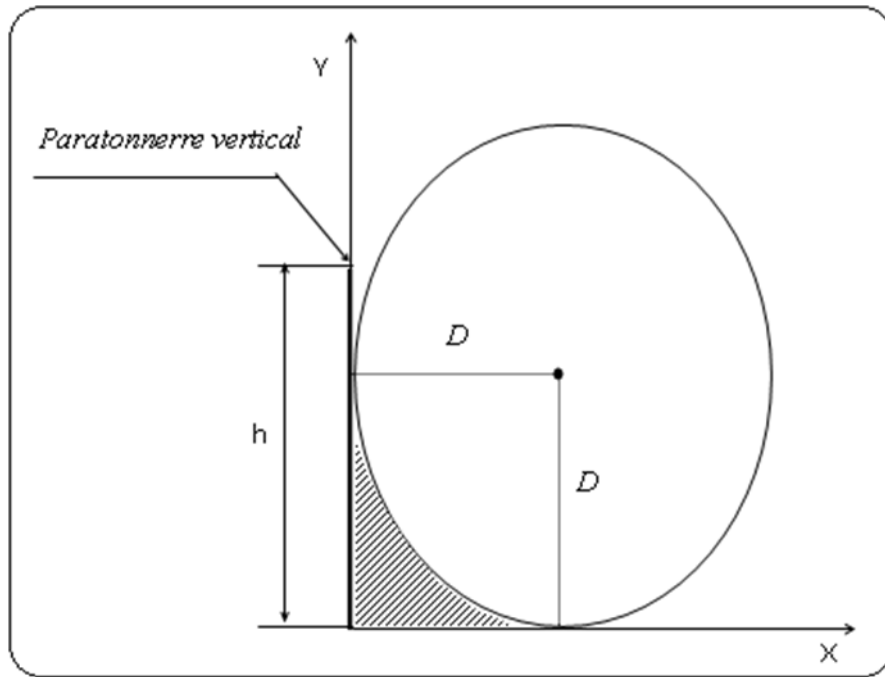
La construction géométrique d'une tige verticale (figure II.6) est la même que la précédente (II.5). Sauf que la zone de protection a une symétrie de révolution au lieu d'une symétrie axiale. Donc le volume de capture est constitué d'un cône est d'un parabolôïde, on a :

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

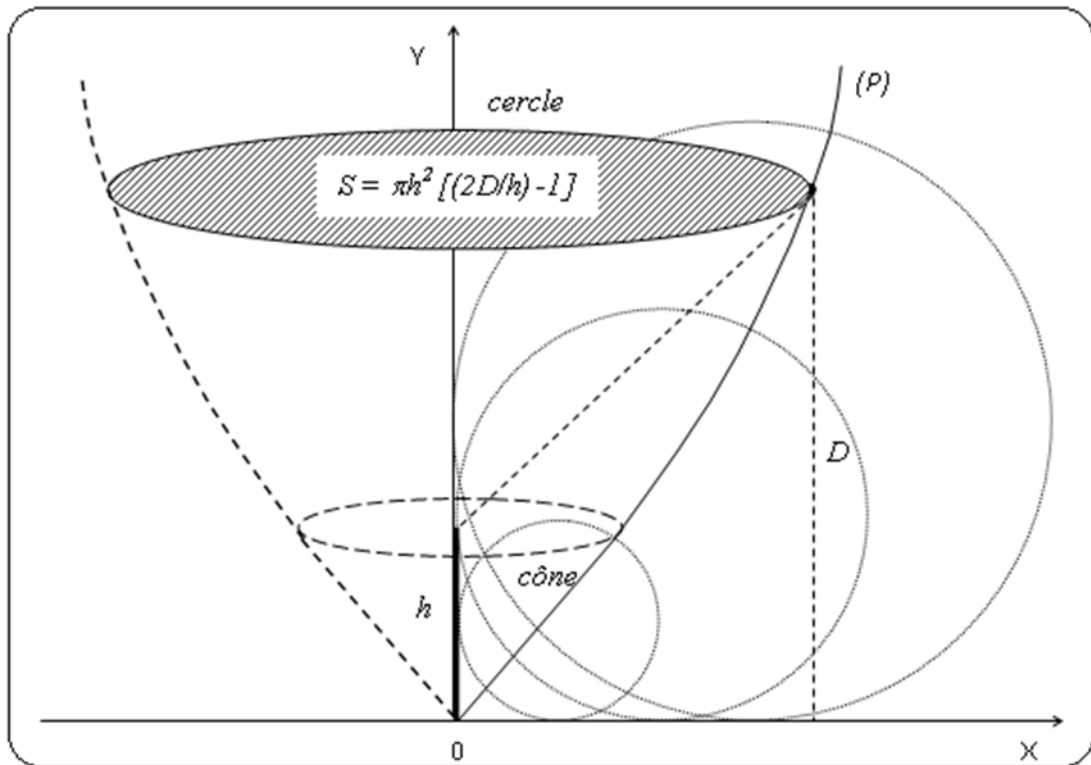
Où h est la hauteur de la tige verticale.

La surface de capture, dans ce cas est définie par :

$$S = \pi h^2 [(2D/h) - 1] \dots\dots\dots(\text{II.8})$$



**Fig (II.6) :** zone de protection d'un paratonnerre vertical

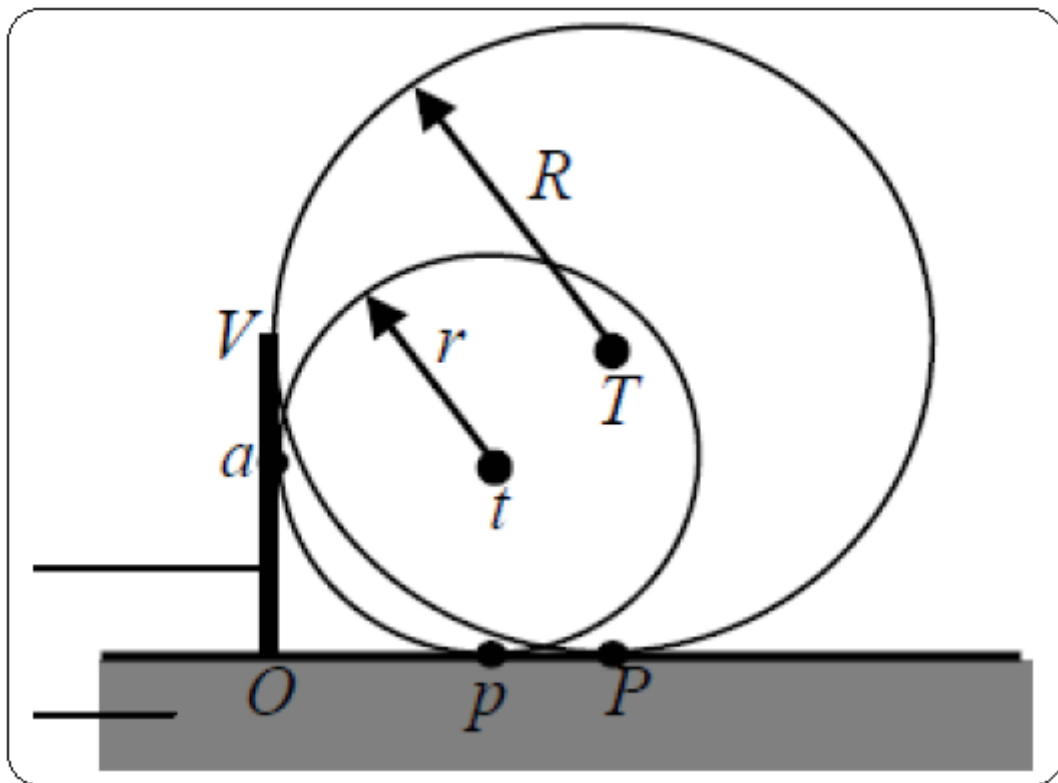


**Fig (II.7) :** zone de protection d'un paratonnerre vertical de hauteur h

## II.6 CRITIQUE DU MODÈLE ÉLECTROGÉOMÉTRIQUE

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 [GAR.95]:

- 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;
- Le modèle électro géométrique, dont la théorie s'appuie sur les propriétés des foudres négatives, est appliqué, sans justification pertinente, aux foudres positives aussi. 'est centrée l'activité du laboratoire de l'ENP depuis plusieurs années.



**Fig (II.8) :** 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 (II.8), 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 électrogéométrique fait totalement abstraction du rôle actif de la terre dans le déroulement des phénomènes. Dans le modèle de monsieur Horvath, les surfaces équipotentielles 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 équipotentielles cessent d'être concentriques [**Oui.07**].

## **II.7 CONCLUSION :**

Le modèle électrogéométrique est largement utilisé, dans le domaine de la protection contre la foudre. Ce modèle qui est basé sur la distance d'amorçage en fonction de l'intensité du courant de l'arc en retour, permet de déterminer la zone de protection d'un paratonnerre. Ce modèle est utilisé pour la protection des lignes de transport d'énergie électrique et pour la protection de structures et des installations. Ce modèle reste encore imparfait puisqu'il ne tient pas compte de certaines caractéristiques géologiques du sol (la résistance de la terre, l'hétérogénéité du sol et la forme des objets au sol).

### **III.1 INTRODUCTION**

Dans le but de mettre en évidence les limitations du modèle électrogéométrique vis-à-vis des propriétés électrogéologiques du sol, Les travaux effectués au sein du laboratoire de Haute Tension de l'ENP ainsi que d'autres études, remettent en cause la validité du modèle électrogéométrique pour un sol hétérogène, discontinu et mauvais conducteur.

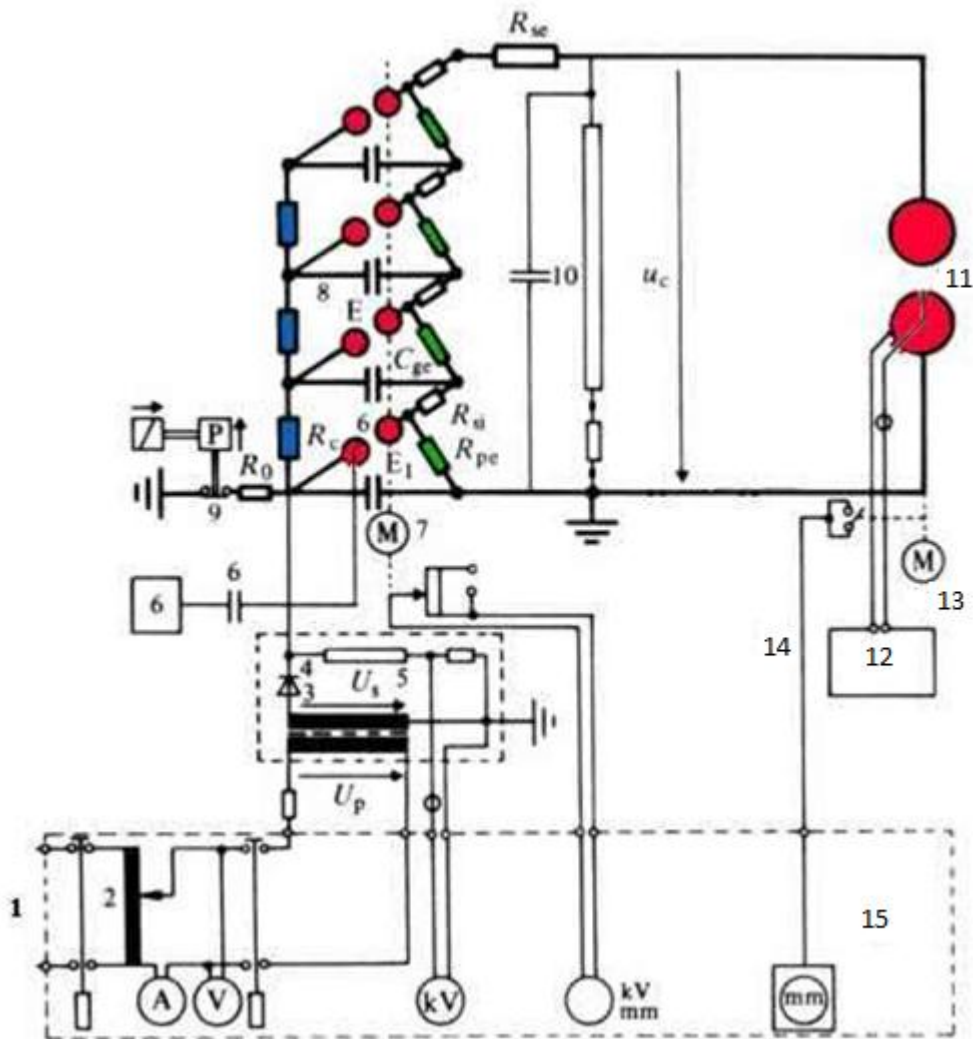
Dans ce chapitre nous présenterons les zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal dans les deux cas, terre mauvaise conductrice ainsi que la terre discontinue. Ces résultats seront comparés au cas de la terre homogène et bonne conductrice après la vérification du modèle électrogéométrique classique.

### **III.2 GENERATEUR DE CHOC**

Le générateur de choc de type Marx est un dispositif qui permet de simuler la foudre naturelle au niveau du laboratoire, ce qui permet d'étudier ce phénomène par la réalisation des essais.

#### **III.2.1 Principe de fonctionnement**

Le générateur de choc multi-étages de Marx, du nom de son inventeur Erwin Marx (1893-1980), fonctionne selon le principe d'un système de condensateurs haute tension chargés en parallèle par une tension continue et déchargés en série à travers des éclateurs à sphères (Fig.III.1). La multiplication du voltage est directement liée au nombre d'étages. La superstructure forme un échafaudage, une sorte d'échelle, ou les condensateurs seraient les barreaux et les résistances de charge les montants.



Fig(III.1) : générateur de choc de MARX

1. Secteur industriel.
2. Transformateur de réglage.
3. Transformateur de redresseur.
4. Redresseur.
5. Résistance de mesure de la tension de charge.
6. Bloc d'allumage, condensateur de couplage et sphère d'amorçage pour le déclenchement électronique du générateur.
7. Moteur pour le réglage de l'écartement des éclateurs (ou réglage de la pression).
8. Générateur de choc.

RC=résistance de charge.

RD=résistance de décharge.

Rsi=résistance sérié interne d'un étage.

Rse=résistance externe.

Rpe=résistance de queue (parallèles) d'un étage.

Cge=condensateur de choc.

E=éclateur de couplage à écartement variable.

9. Court-circuiteur de mise a terre avec ressort fermeture en cas de manque de tension.
10. Diviseur de tension ohmique protégé capacitivement.
11. Spintermètre.
12. Bloc d'allumage et éclateur de coupure.
13. Moteur pour le réglage de l'écartement du spintermètre.
14. Enregistrement de l'oscillation au secondaire du transformateur.
15. Pupitre de commande.

La figure (Fig. III.2) illustre Les deux étapes de la charge et la décharge des condensateurs

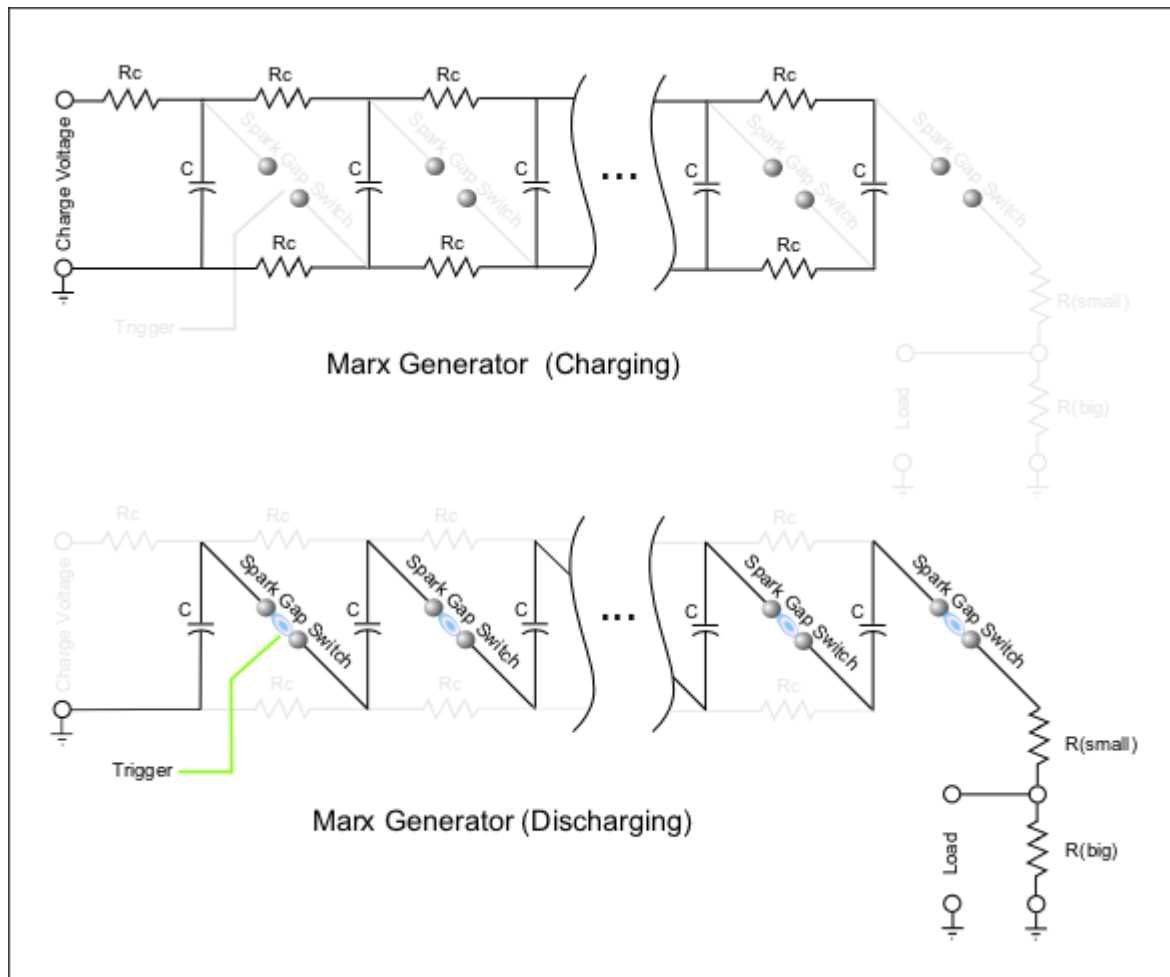


Fig (III.2) : étapes de charge et décharge des condensateurs

### III.2.2 Schéma de principe d'un Générateur de choc :

Le schéma de la figure III.3 présente un générateur de choc de type Marx, avec des dispositifs de charge et de commande installés sur un châssis unique et mobile. [Bou.09]

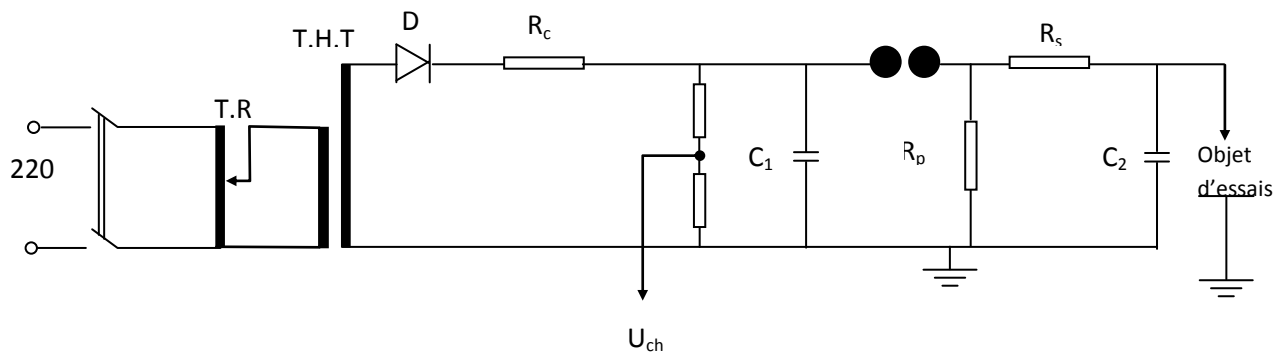


Fig (III.3): Générateur de choc [Bou.09]

- T.R : transformateur de réglage
- T.H.T : Transformateur de haute tension
- D : Redresseur
- Rc : Résistance de charge.
- Rs : Résistance série équivalente  $((8 \times 10) + 150) \Omega$
- Rp : Résistance parallèle équivalente  $8 \times 430 \Omega$
- C1 : Condensateur de choc 22,5 nF (180 nF par étage).
- C2 : Condensateur de charge 2nF

La tension continue destinée à la charge du générateur de choc est fournie par un redresseur D de tension monophasée. Une résistance ( $R_c$ ) destinée à limiter le courant de charge à une valeur admissible est placée en série avec le redresseur. Ce dernier est alimenté par un transformateur de haute tension. La charge des condensateurs de choc s'effectue à travers des résistances  $R_c$ .

A chaque condensateur de choc (180 nF) correspond une résistance de charge  $R_c$  (7000  $\Omega$ ), une résistance de queue parallèle  $R_p$  (430  $\Omega$ ), une résistance de front série  $R_s$  (10  $\Omega$ ) et un éclateur de couplage à deux sphères de même diamètre (150 mm). Ces cinq éléments forment un étage.

Dans une première étape, on charge en parallèle les condensateurs de choc de chaque étage par l'intermédiaire de la source de tension continue à travers les résistances de charge  $R_c$ , les résistances série  $R_s$  et parallèles  $R_p$  à la tension d'amorçage prévue (la tension d'éclatement des éclateurs à sphères étant ajustée légèrement au-dessus de cette valeur).

Dans une deuxième étape, on décharge en série les condensateurs de choc, par l'intermédiaire des éclateurs de couplage, à la suite de l'impulsion de trigger provenant du bloc

d'allumage et ionisant le premier éclateur. Ce phénomène déclenché par déséquilibre des tensions et par effet de champ électromagnétique amorce les sept autres éclateurs de couplage du générateur.

### **III.2.3 Forme de l'onde de choc**

La tension délivrée par le générateur de choc, simulant les surtensions d'origine atmosphérique, est une impulsion unipolaire bi-exponentielle dont la forme est normalisée conformément aux recommandations de la CEI 60. L'onde délivrée est définie par les paramètres suivants:

- La constante de temps de front  $\tau_f$
- La constante de temps de mi-amplitude  $\tau_q$
- L'amplitude maximum  $U_m$

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

$$U(t) = U_m[\exp(-t/\tau_q) - \exp(-t/\tau_f)]$$

La CEI donne l'onde de forme normalisée dite choc 1,2/50  $\mu s$  comme l'onde la plus adoptée pour les essais de choc de foudre. La durée conventionnelle de front  $T_f'$  de cette onde est de 1.2  $\mu s$  et la durée conventionnelle de mi-amplitude  $T_q'$  est de 50  $\mu s$ . En effet le choc de 1.2/50  $\mu s$  simule assez bien la forme de l'onde de tension de foudre.

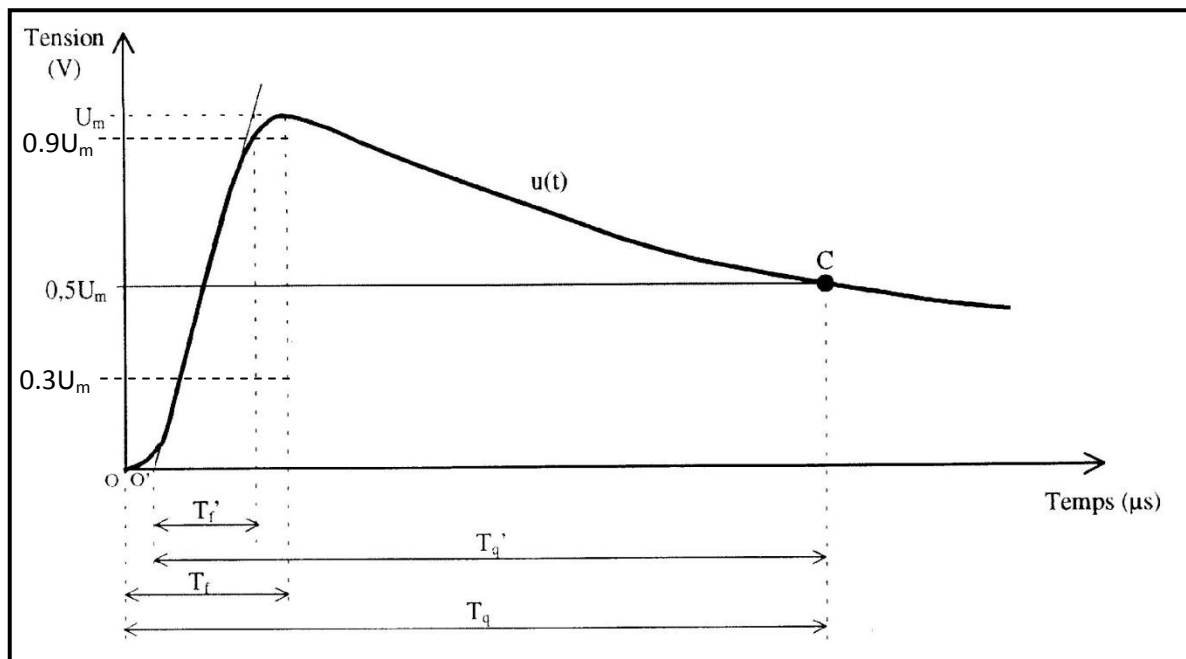


Fig (III.4) : Forme de l'onde de choc de foudre [Bou.09]

O : Origine de la tension de choc

O' : origine conventionnelle de la tension de choc

$T_f$  : durée de front  $T_f'$  : durée conventionnelle de front

$T_q$  : durée de mi-amplitude  $T_q'$  : durée conventionnelle de mi-amplitude

### III.3 CONFIGURATIONS ETUDIÉES ET MODELES REDUITS

La figure (Fig. III.5) donne les différents modèles réduits utilisés pour étudier l'influence de la nature de la terre sur les zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal. La configuration (III.5.a) concerne la vérification du modèle électrogéométrique où la terre homogène conductrice est simulée par une plaque conductrice mise à la terre. Le canal de foudre lors du saut final est simulé par une tige métallique mise sous tension de choc de polarité négative  $-1,2/50\mu s$  à l'aide d'un conducteur connecté au générateur de choc. Le paratonnerre est un conducteur cylindrique horizontal de diamètre  $D_p$  égal à 0.5, 0.8, 4, 8, et 12mm. [Bro.00].

Dans la terre mauvaise conductrice (Fig. III.5.b), on ajoute sur la plaque une couche d'eau de différentes conductivités ( $\gamma_1=7.9S/cm, \gamma_2 = 20 S/cm, \gamma_3 = 39 S/cm, \gamma_4 = 84 S/cm, \gamma_5 = 164 S/cm$ ), et ayant 10 cm d'épaisseur. Les hauteurs  $h$  de la tige HT au sol prends les valeurs suivantes ( $h = 4, 8, 12$  et  $14$  cm) [Rah.96].

Enfin la terre discontinue est constituée de deux plaques conductrices mises à deux niveaux différents une partie haute et une partie basse (Fig. III.5.c). La différence de niveau

entre les deux terres constitue une profondeur  $e$ . Dans ce type de terre, suivant les dispositions du paratonnerre et de la tige HT, on distingue les configurations données par la figure (Fig. III.6) [Bro.00]

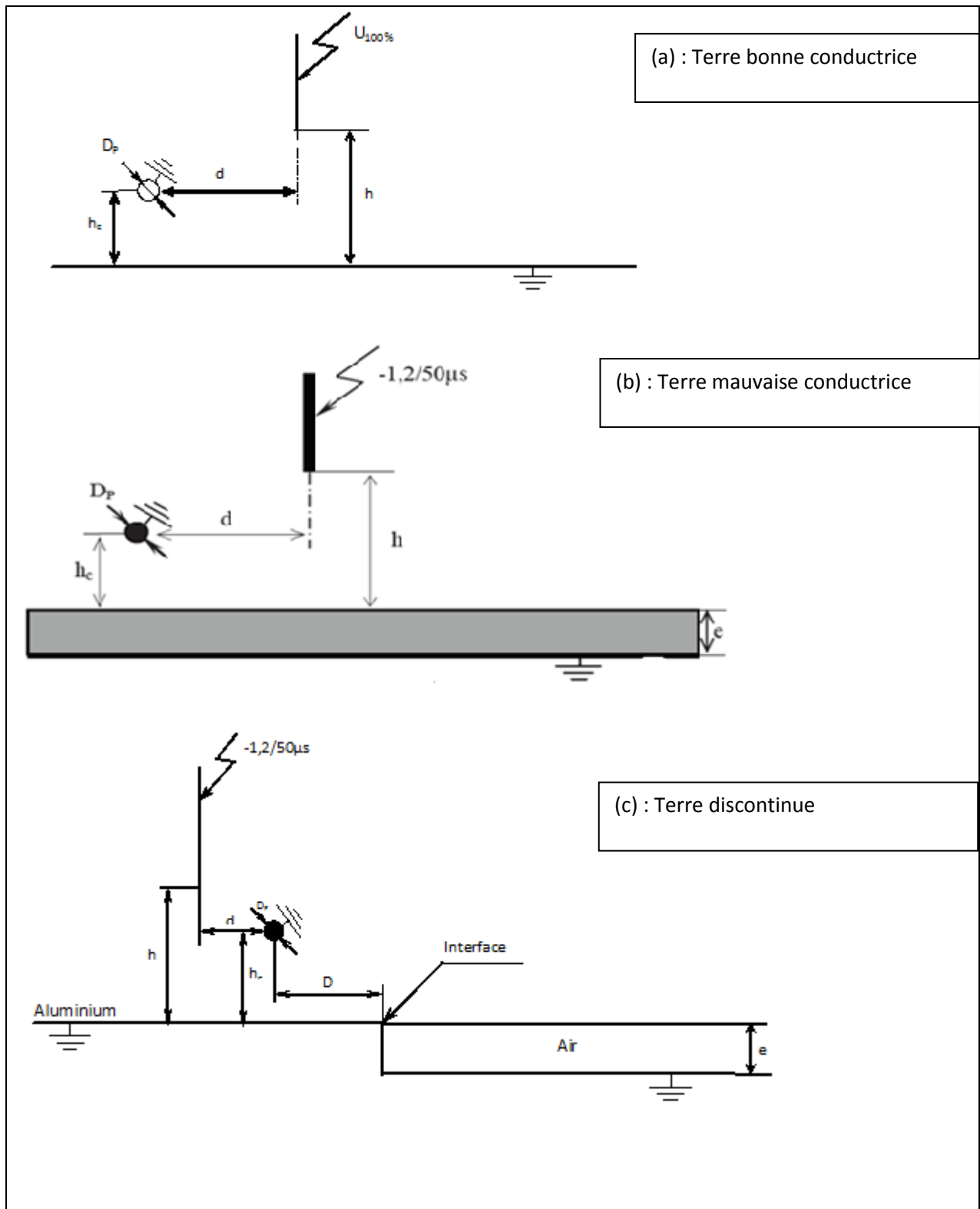


Fig (III.5) modèles expérimentaux réduits

**Remarque :** Les configurations des modèles expérimentaux sont définies par les paramètres suivants :  $D_p$ ,  $h_c$ ,  $h$ ,  $e$ ,  $d$  et  $D$  tel que :

$D_p$  : diamètre du paratonnerre horizontal,

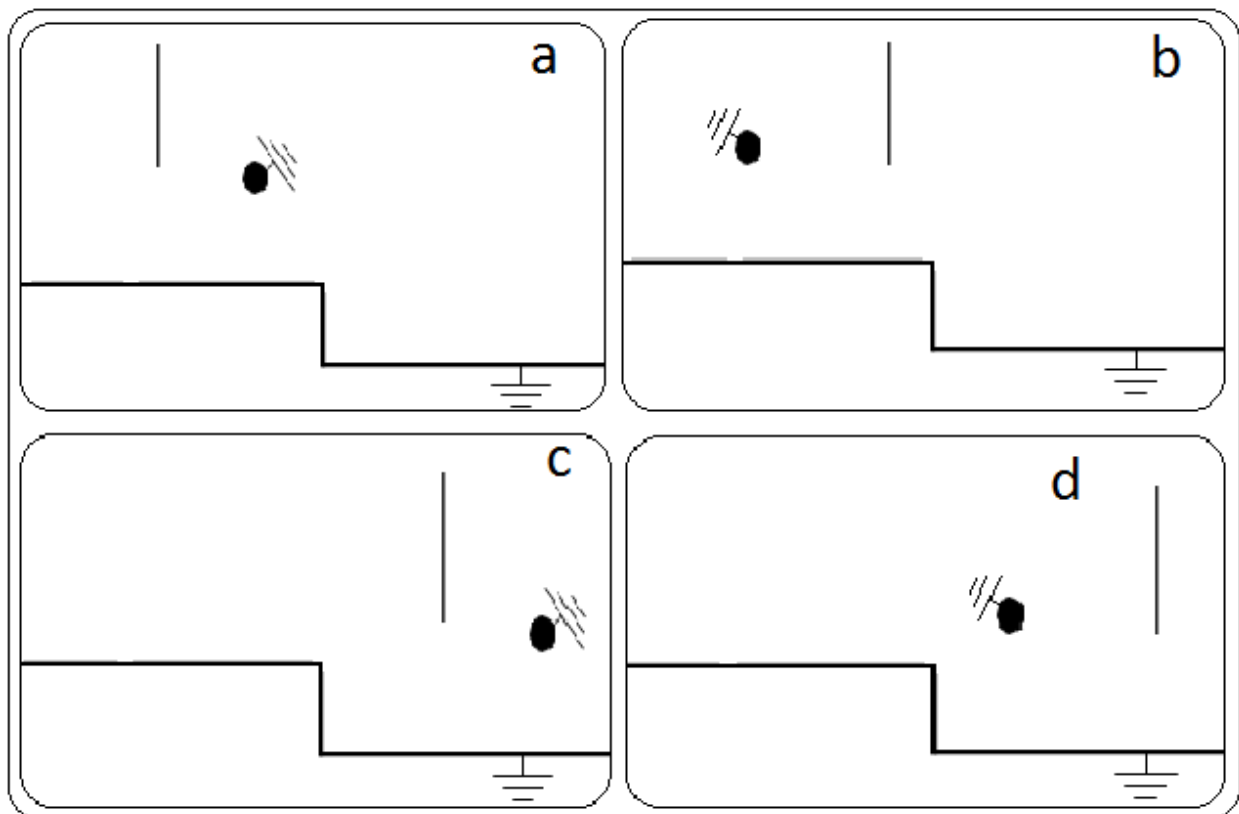
$h_c$  : la hauteur de suspension du paratonnerre horizontal,

$h$  : la hauteur de l'électrode de haute tension par rapport à la plaque horizontale,

$e$  : profondeur de l'interface,

$d$  : La distance horizontale entre l'axe de la tige et le contour du paratonnerre.

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



**Fig (III.6)** Différentes dispositions du paratonnerre sur une terre discontinue

### III.4 ZONES D'ATTRACTION DU PARATONNERRE HORIZONTAL AVEC DIFFERENTS TYPES DU SOL

Suite aux travaux de recherche sur les l'influence de la nature du sol sur les zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal réalisés au Laboratoire Haute Tension de l'ENP

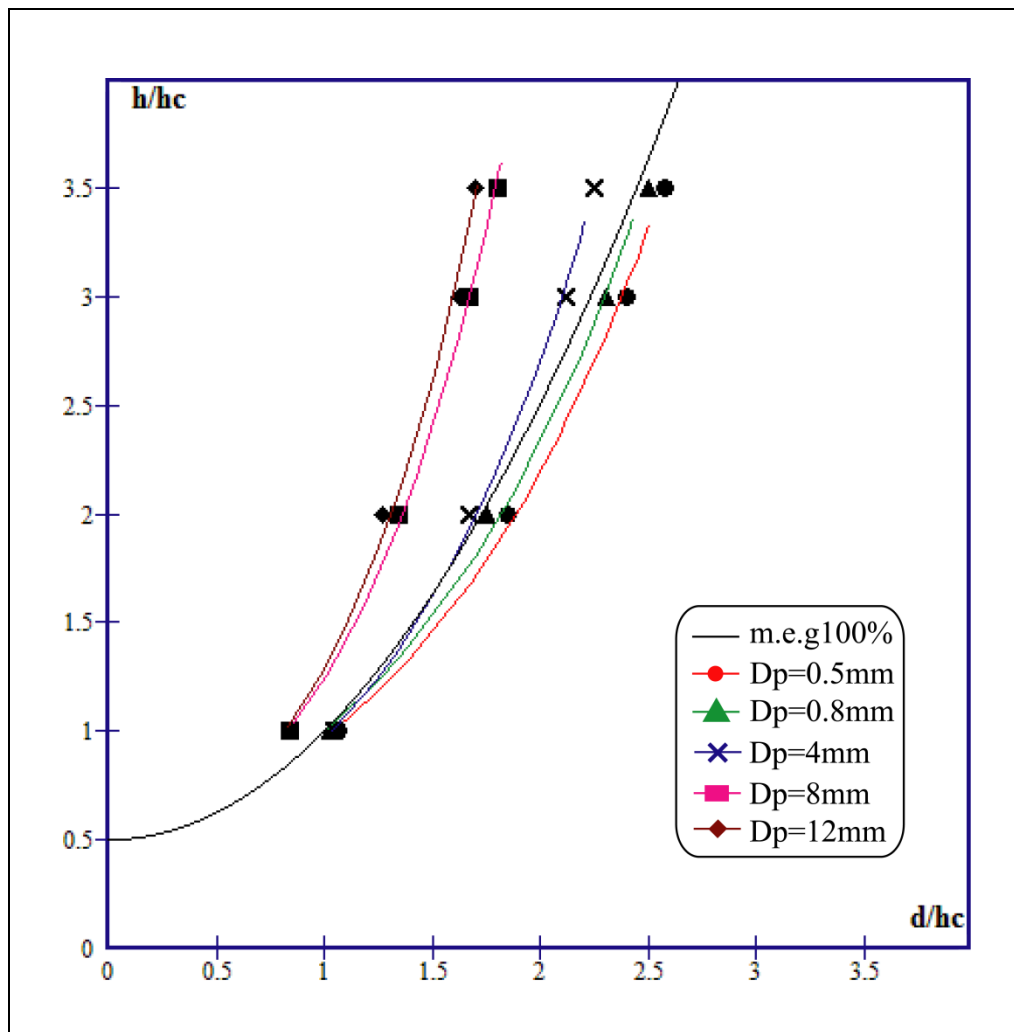
d'Alger. Nous présentons les résultats obtenus avec les deux types de terres ; mauvaise conductrice et terre discontinue [Rah.96] [Bro.00].

### **III.4.1 Modelé électrogéométrique (terre homogène bonne conductrice)**

Dans ce cas; les zones d'attraction sont représenté pour les différents diamètres du paratonnerre horizontal en prenant la zone définie par le modèle électrogéométrique classique comme référence de comparaison, Afin d'illustrer l'influence du diamètre du paratonnerre horizontal sur les zones d'attraction obtenues dans le cas de la terre homogène parfaitement conductrice (Fig.III.7).

A partir des ces courbes, on constate que le diamètre du paratonnerre horizontal à une grande influence sur les zones d'attraction. Lorsque le diamètre diminue, les zones d'attraction s'élargissent par rapport à celle définie par le modèle électrogéométrique, ceci est vérifié pour les diamètres 0,5mm et 0,8mm .par contre pour les diamètres de 4mm, 8mm et 12mm, les zones sont moins larges que celle du modèle électrogéométrique 100%. Cette tendance est peut être expliquée par le fait que le champ électrique au niveau du contour du paratonnerre de faible diamètre soit plus intense que pour un diamètre supérieur.

Nous pouvons conclure que le modèle électrogéométrique n'est pas vérifié pour un diamètre du paratonnerre horizontal supérieur ou égal à 4mm dans le cas de terre homogène parfaitement conductrice.



**Fig (III.7)** Influence du diamètre d'un paratonnerre horizontal dans le cas de terre bonne conductrice. [Bro.00]

### III.4.2 Cas de terre mauvaise conductrice

Pour le cas de la terre homogène mauvaise conductrice, l'étude des zones de capture du paratonnerre, à été réalisé en se basant sur l'influence de certains paramètres comme la conductivité de la terre ainsi que le rayon de courbure du paratonnerre.

#### III.4.2.1 Influence de la conductivité du sol sur les zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal

La figure (III.8) présente l'influence de la conductivité du sol sur les zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal pour différentes conductivités  $\gamma$  (7, 9, 20, 39,84 et 164  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) et pour deux rayons de courbure D (2 et 12mm).

Nous constatons que les zones d'attraction sont d'autant plus grandes que la conductivité diminue. Ceci peut être expliqué par le fait que pour un sol conducteur les charges positives sont réparties sur le sol du paratonnerre, par contre pour un sol mauvais conducteur, les charges positives sont presque concentrées sur le paratonnerre, renforçant ainsi le champ électrique au niveau de ce dernier.

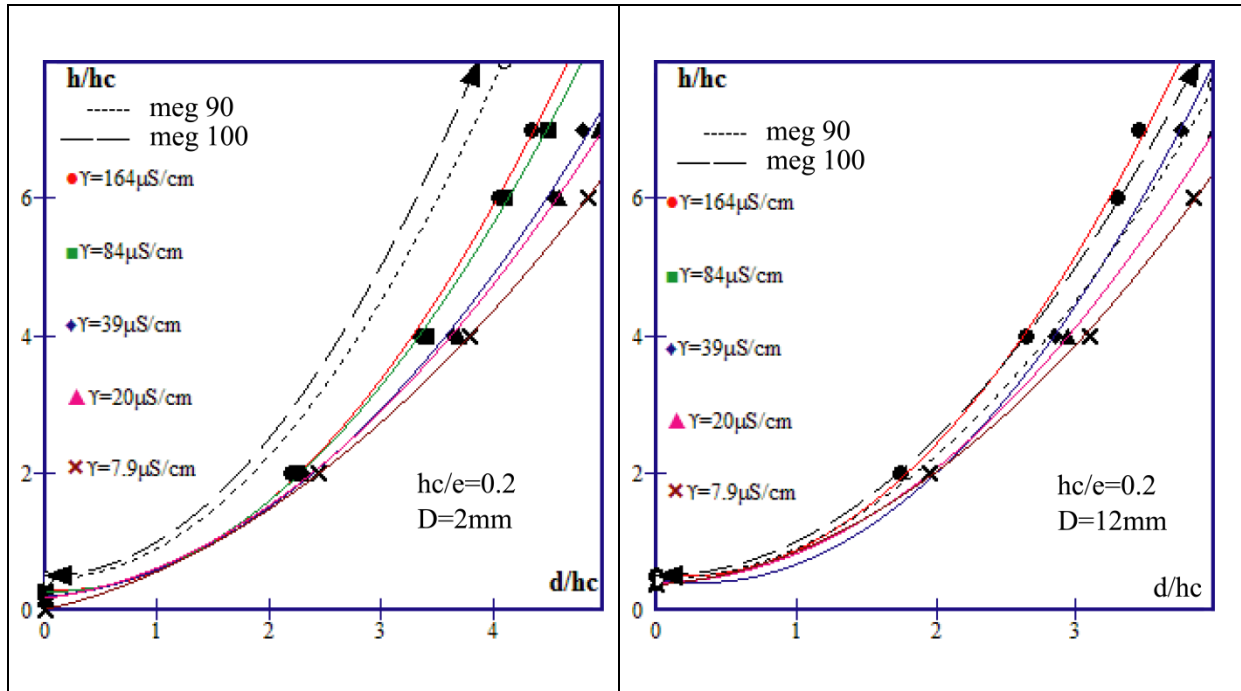


Fig (III.8): Influence de la conductivité du sol sur les zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal [Rah.96]

### III.4.2.2 Influence du rayon de courbure du paratonnerre horizontal sur les zones d'attraction

Pour représenter cette caractéristique il faut maintenir la conductivité à une valeur constante ( $\gamma=7.9\mu\text{S/cm}$ ) car elle nous donne les zones les plus larges et nous permet ainsi de mieux observer l'influence du diamètre du paratonnerre. [Rah.96]

Les courbes de la figure (Fig. III .9) montrent que la diminution du rayon de courbure  $D$  fait élargir les zones d'attraction, ceci est due à l'intensité du champ électrique au niveau du paratonnerre de faible rayon.

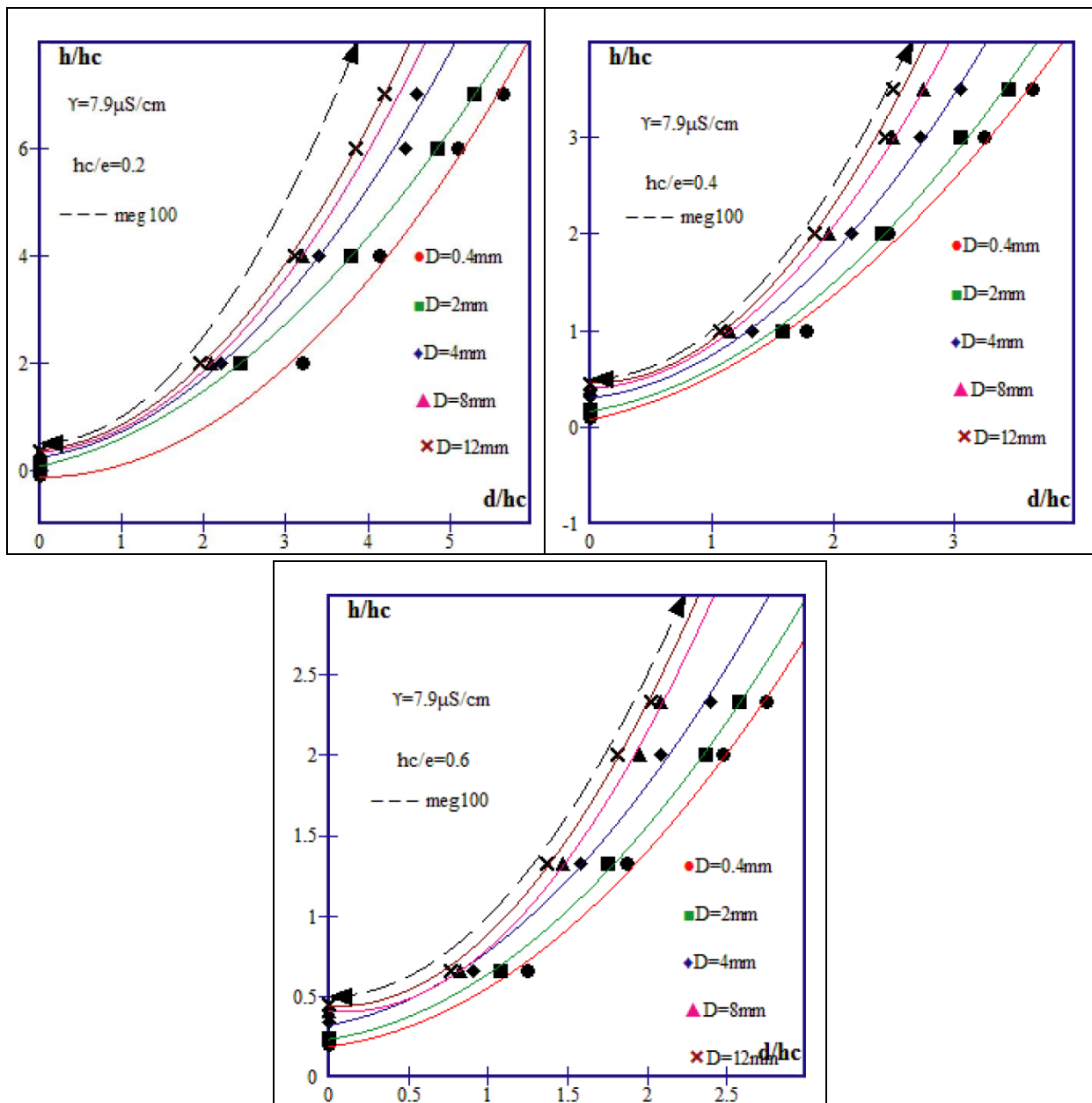


Fig (III.9) : Influence du rayon de courbure du paratonnerre horizontal sur les zones d'attraction [Rah.96]

### III.4.2.3 Influence de la hauteur $h_c/e$ du paratonnerre sur les zones d'attraction

Cette caractéristique est représentée pour différents rayons de courbure  $D$  et pour différentes conductivités  $\gamma$ .

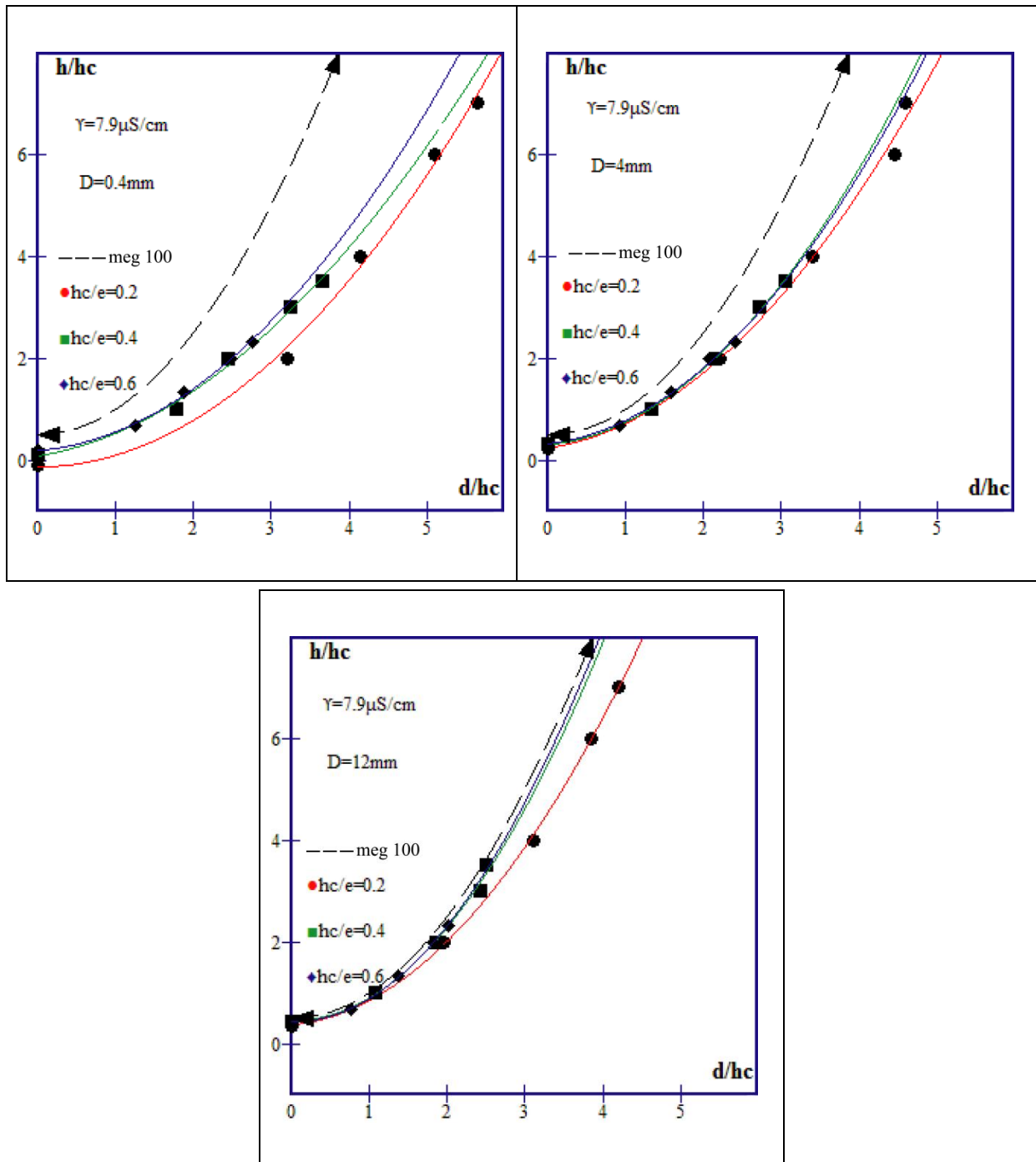


Fig (III.10) : Zones d'attraction pour différent rapports  $h_c/e$

( $\gamma = 7.9 \mu\text{S/cm}$ ) [Rah.96]

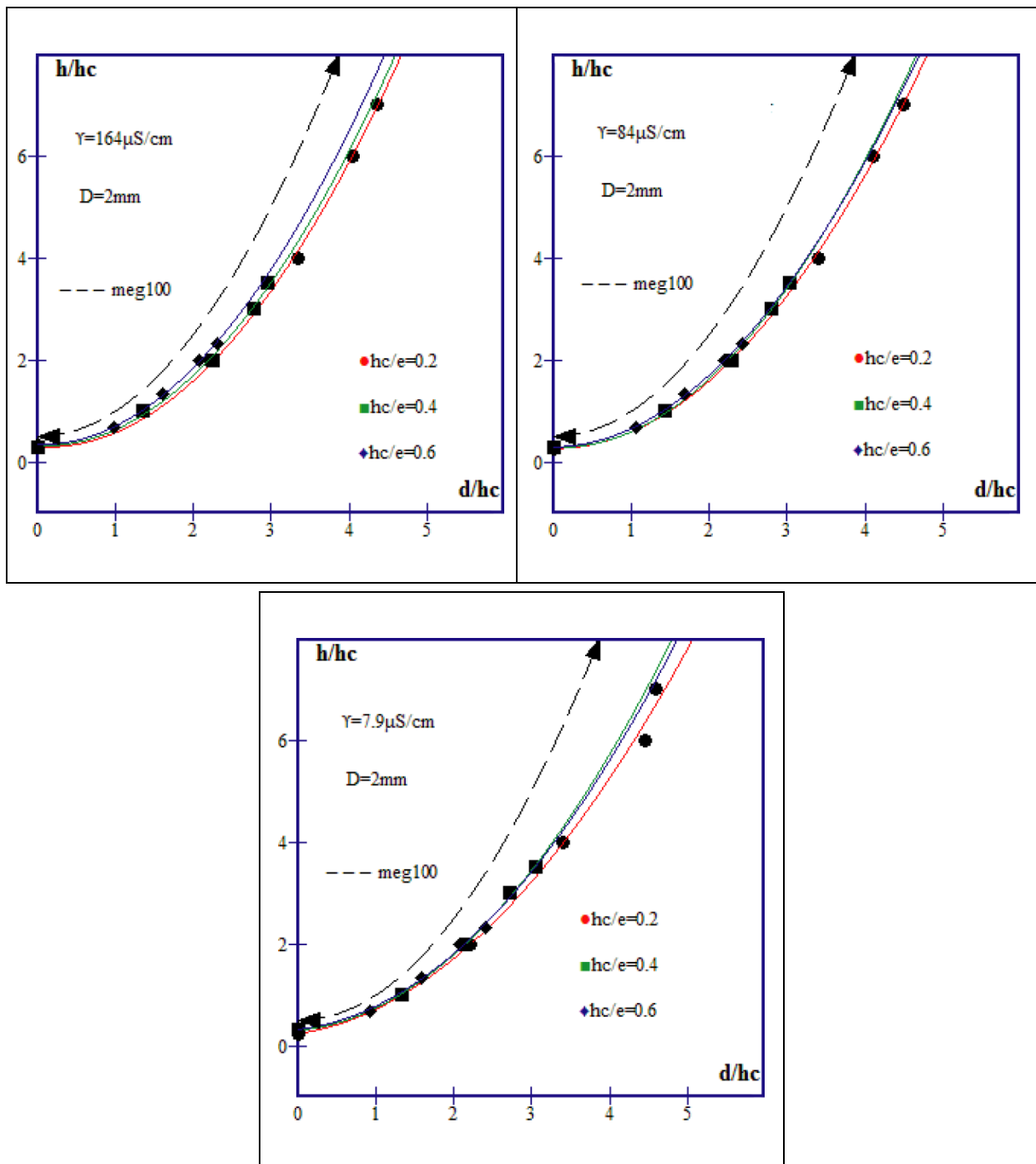


Fig (III.11) : Zones d'attraction pour différent rapports  $hc/e$  ;( $D=2\text{mm}$ ) [Rah.96]

A partir de la Figure. (III.11) nous constatons que, pour tous les diamètres des conducteurs utilisés dans les résultats représentés ( $D=0.4, 2, 4, 8$  et  $12\text{ mm}$ ) et les différentes conductivités, les zones d'attraction s'élargissent au fur et à mesure que la hauteur  $hc/e$  du paratonnerre diminue.

### **III.4.3 Terre discontinue**

Dans le cas de la terre discontinue, quatre configurations peuvent être présentées suivant les positions du paratonnerre et de la tige par rapport à l'interface (Fig.III.6). Pour les quatre configurations l'étude des zones de capture du paratonnerre, a été réalisée en se basant sur l'influence de la distance relative du paratonnerre par rapport à la discontinuité ainsi que le rayon de courbure du paratonnerre.

#### **III.4.3.1 1<sup>ère</sup> configuration: Paratonnerre horizontal situé entre l'axe de la décharge et l'interface**

La première configuration a été étudiée pour quatre diamètres du paratonnerre horizontal ( $D_p = 0.5, 4, 8$  et  $12\text{mm}$ ). [Bro.00]

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

La figure (III.12) donne les zones d'attraction en fonction de la distance horizontale relative du paratonnerre par rapport à l'interface ( $D/h_c$  égal à 2, 6 et 12), pour différents diamètres du paratonnerre. Ces zones ont été comparées à celle du même diamètre correspondant à 90% de décharge au paratonnerre dans le cas d'une terre homogène conductrice.

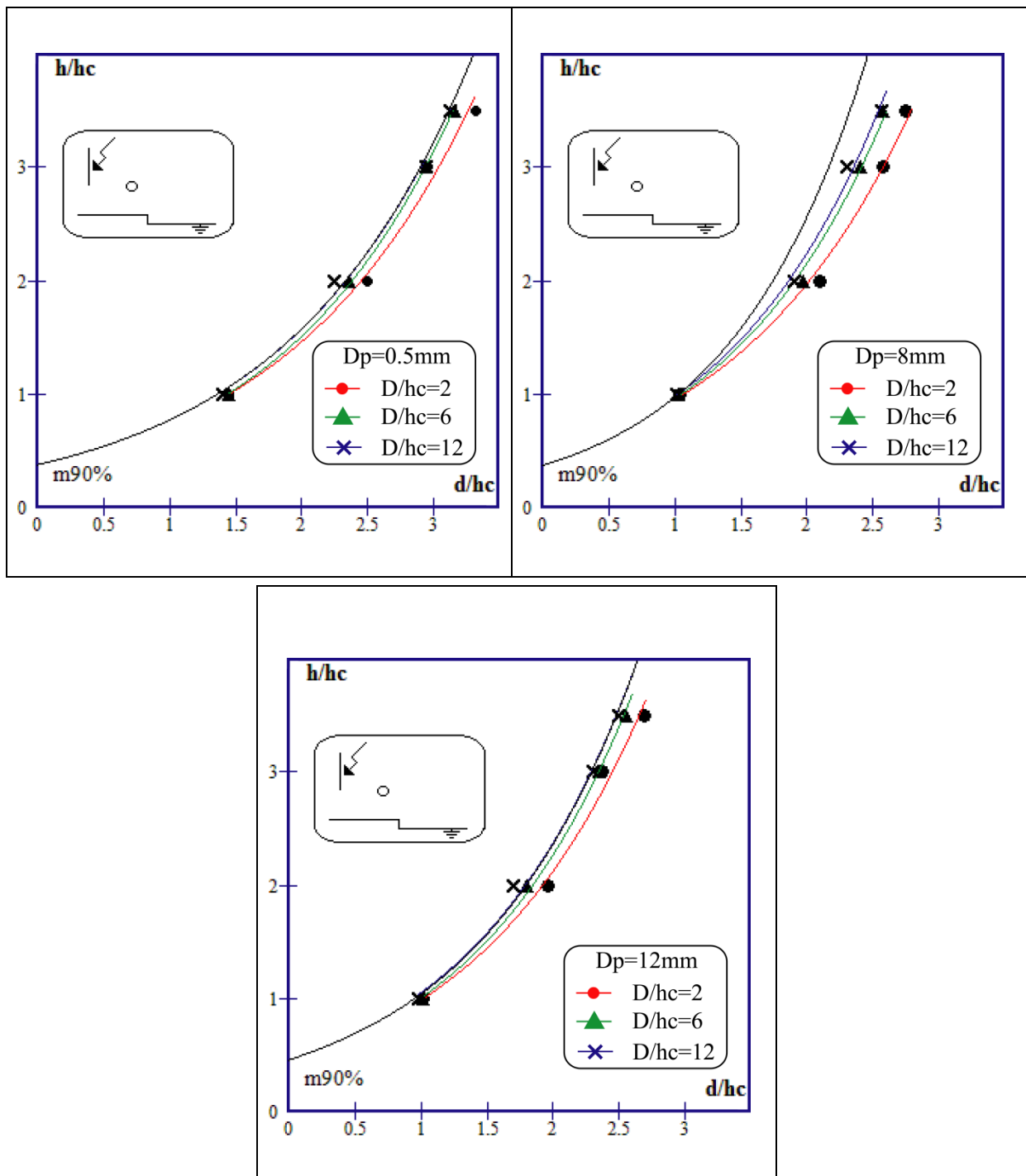


Fig (III.12) : Influence du rapport D/hc pour la première configuration de la terre discontinue. [Bro.00]

Nous constatons d'après ces courbes que :

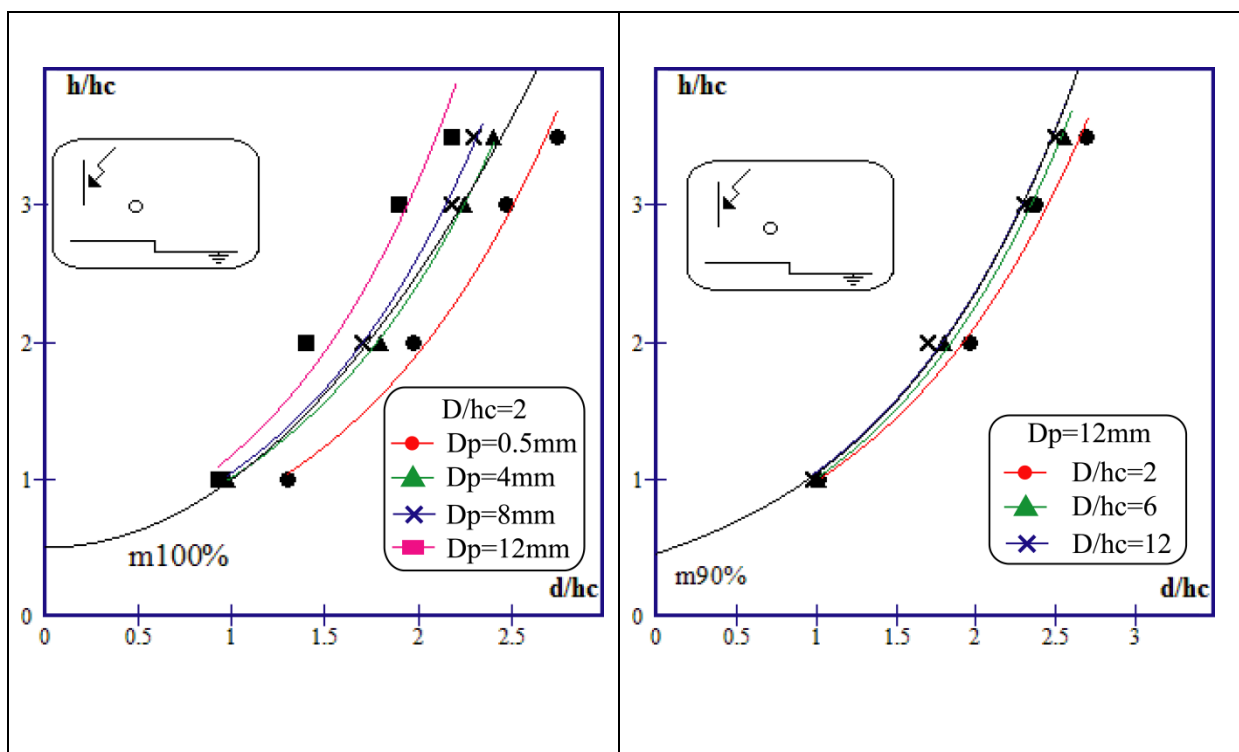
- Les zones d'attraction obtenues pour les différents diamètres sont plus larges que celle définie dans le cas de terre homogène conductrice.
- Les zones s'élargissent au fur et à mesure que le rapport D/hc diminue.

- Pour un rapport  $D/h_c$  égal ou supérieur à 12, les zones se confondent avec celle définie pour une terre homogène conductrice.

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

**b) Influence du diamètre du paratonnerre horizontal  $D_P$  :**

Les courbes de la (figure III.13) présente les zones d'attraction du paratonnerre horizontal de différents diamètres ( $D_P = 0.5, 4, 8$  et  $12\text{mm}$ ), et un rapport  $D/h_c$  constant. Ces courbes illustrent l'influence du diamètre du paratonnerre sur les zones d'attraction et vérifient le modèle de protection des paratonnerres horizontaux pour des rapports  $D/h_c$  suffisamment faibles, C'est le cas du paratonnerre de diamètre  $4\text{mm}$ .



**Fig (III.13):** Influence du diamètre  $D_P$  pour la première configuration de la terre discontinue.

[Bro.00]

Donc, on peut dire que la première configuration de la terre discontinue et pour un faible rapport  $D/h_c = 2$ , la zone d'attraction est devenue plus large que celle du modèle électro géométrique 100%.

**III.4.3.2 2<sup>ème</sup> configuration: L'axe de la décharge situé entre l'interface et le paratonnerre horizontal**

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

Dans cette configuration, Les zones d'attraction sont plus petites que celle définie pour un sol homogène bon conducteur. Plus le paratonnerre est proche de l'interface ( $D/h_c$  relativement petit), plus la zone d'attraction est réduite. Ce résultat est expliqué par la présence d'un champ électrique relativement fort au niveau de l'interface augmentant la probabilité de décharge au sol où le champ est plus intense. Lorsque le paratonnerre horizontal est éloigné de l'interface ( $D/h_c$  relativement grand), la zone d'attraction s'approche de celle définie pour une terre homogène conductrice. L'interface n'a aucun effet sur les zones lorsque  $D/h_c$  est supérieur ou égal à 8 (Figure III.14).

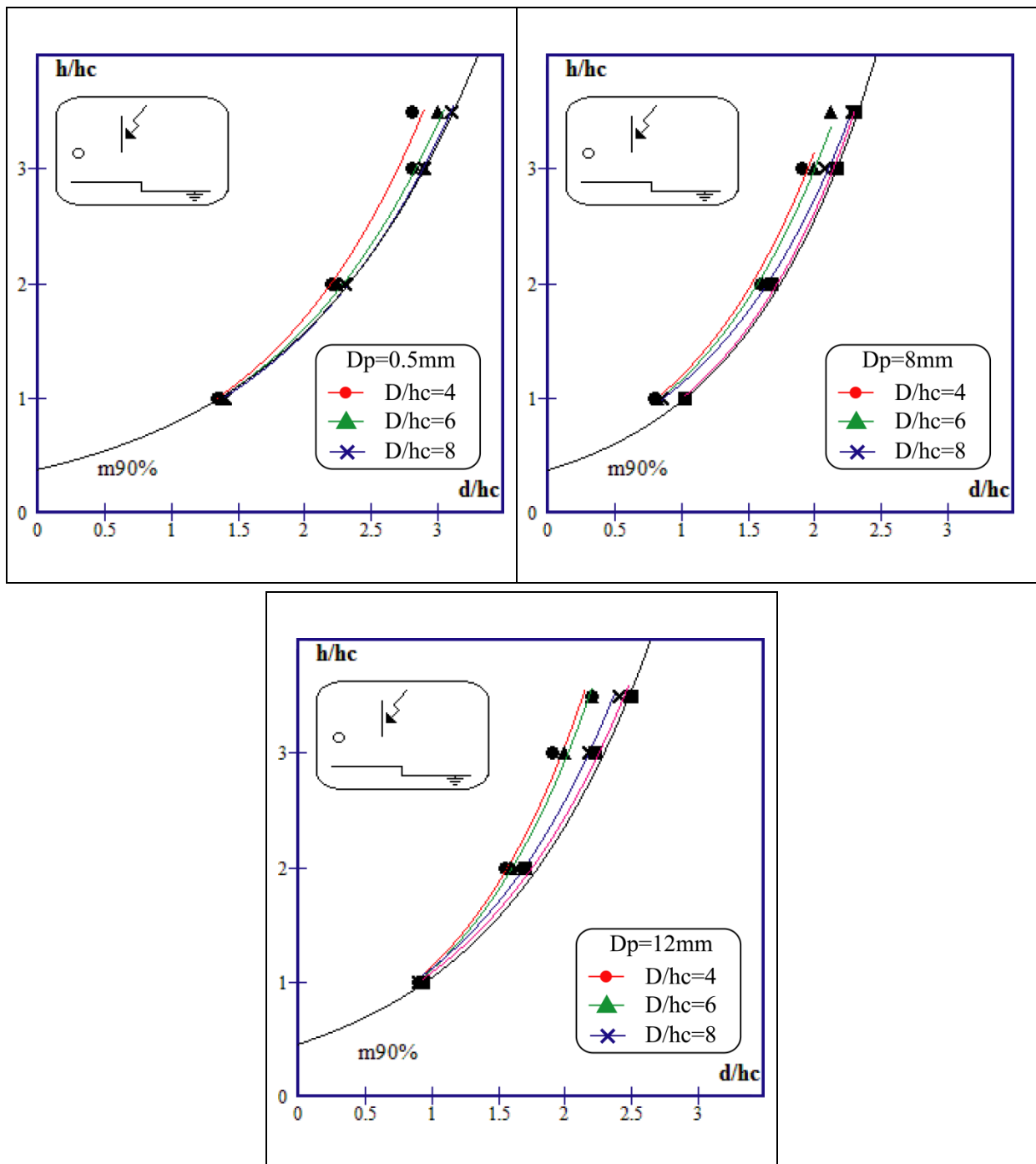


Fig (III.14) : Influence du rapport  $D/hc$  [Bro.00]

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

Les zones d'attraction définies pour les cinq diamètres utilisés ( $D_{P1}$  à  $D_{P5}$ ) sont influencées par la présence de l'interface dans la deuxième configuration de la terre discontinue. Nous constatons de (figure III.15) :

- Pour les valeurs 2 et 4 du rapport  $D/h_c$ , les zones d'attraction déterminées pour les différents diamètres du paratonnerre horizontal sont moins larges que celle du modèle électrogéométrique classique.

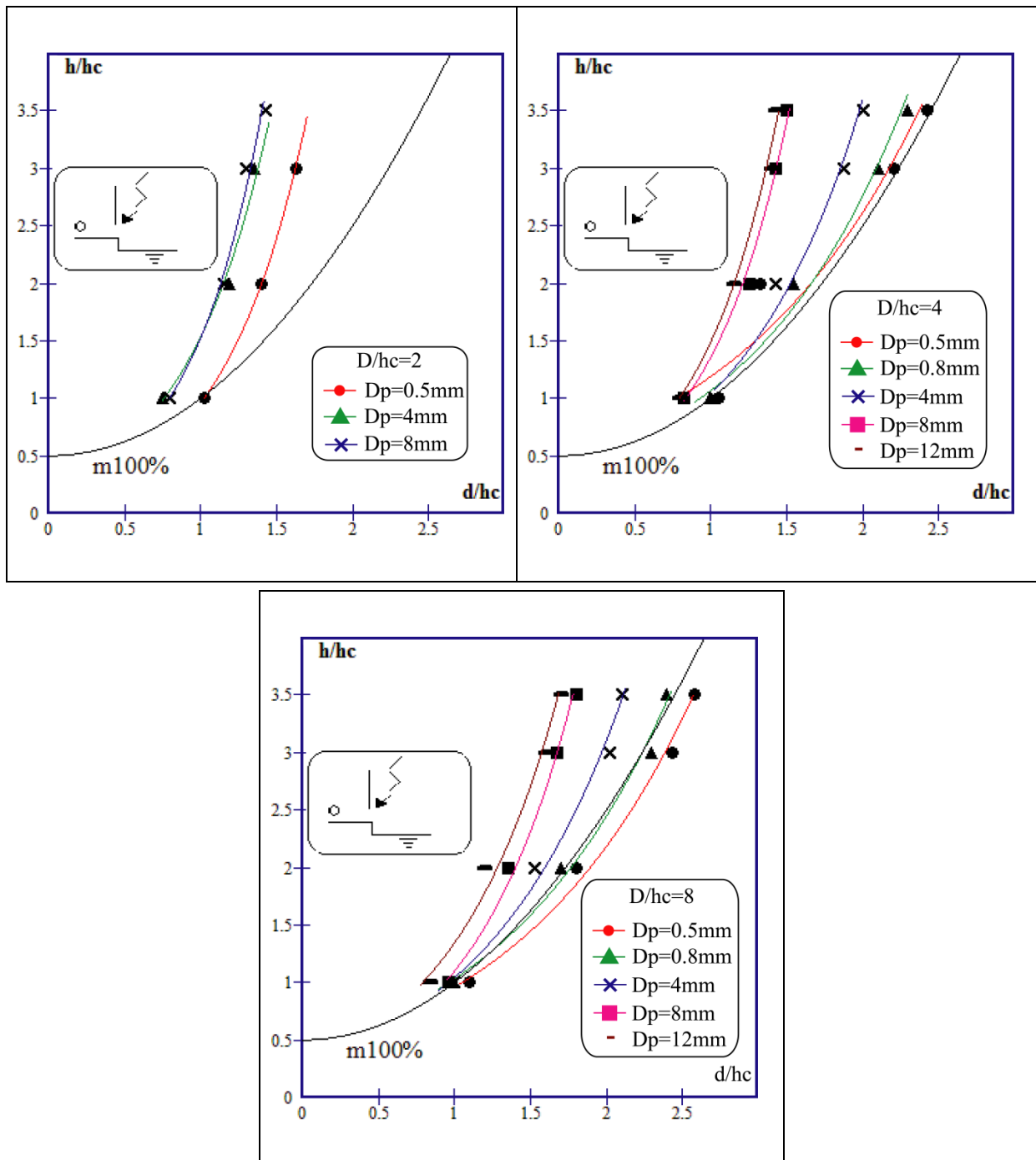


Fig (III.15):Influence du diamètre du paratonnerre horizontal DP [Bro.00]

- Pour le rapport  $D/h_c$  égal à 6, la zone d'attraction obtenue pour le diamètre 0,5mm du paratonnerre horizontal est pratiquement confondue avec celle définie par le modèle électrogéométrique.
- Pour le rapport  $D/h_c$  égal à 8, la zone d'attraction obtenue pour le diamètre 0,5mm du paratonnerre horizontal est plus large que celle définie par le modèle électrogéométrique classique. Pour  $D_p$  égal à 0,8mm, la zone est confondue avec celle donnée par le modèle électrogéométrique.

### **III.4.3.3 3<sup>ème</sup> configuration : L'axe de la décharge situé entre l'interface et le paratonnerre horizontal**

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

Pour l'étude de cette configuration, trois rapports sont considérés  $D/h_c$  : 4, 6 et 10. Ces derniers représentent respectivement la position proche, moyenne, et éloignée de l'axe de la tige verticale par rapport à l'interface. Les courbes obtenues avec cette configuration (Fig III.16) montrent que les zones d'attraction diminuent au fur et à mesure que le paratonnerre s'éloigne de l'interface ( $D/h_c$  augmente) (figure III.16). Cette tendance est expliquée par :

- Le rapprochement de la tige de haute tension par rapport à l'interface.
- L'intervalle d'air tige-interface constitue un chemin préférentiel pour les décharges électriques.

En effet, le système tige-interface, qui est un système pointe-pointe, est moins rigide qu'un système pointe négative-plan [Bou98], c'est pourquoi nous n'avons pas remarqué, pour le rapport  $D/h_c$  égal à 4, des décharges vers le sol. Dès que le rapport  $D/h_c$  augmente ( $D/h_c$  supérieur à 4), les zones d'attraction s'élargissent à cause de la diminution de la fréquence d'impact sur l'interface. Lorsque le paratonnerre est situé suffisamment loin de l'interface ( $D/h_c$  supérieur ou égal à 10) la zone d'attraction tend à devenir confondue avec celle du modèle électrogéométrique. Dans ce dernier cas, l'influence de l'interface devient négligeable.

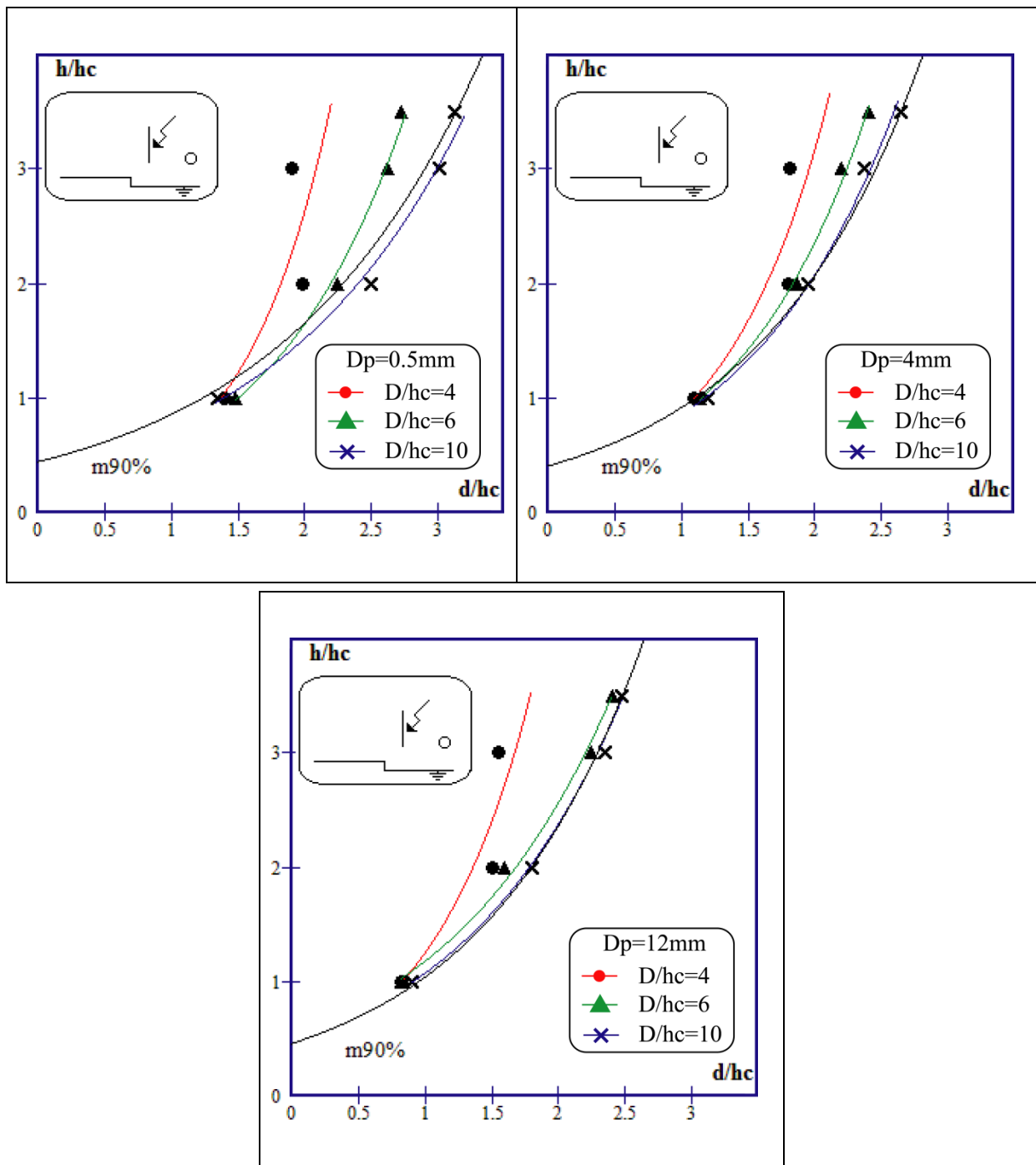


Fig (III.16): Influence des rapports  $D/h_c$  [Bro.00]

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

La figure III.17 illustre les caractéristiques présentant l'influence du diamètre  $D_p$  du paratonnerre horizontal sur les zones d'attraction pour les différents rapports  $D/h_c$ .

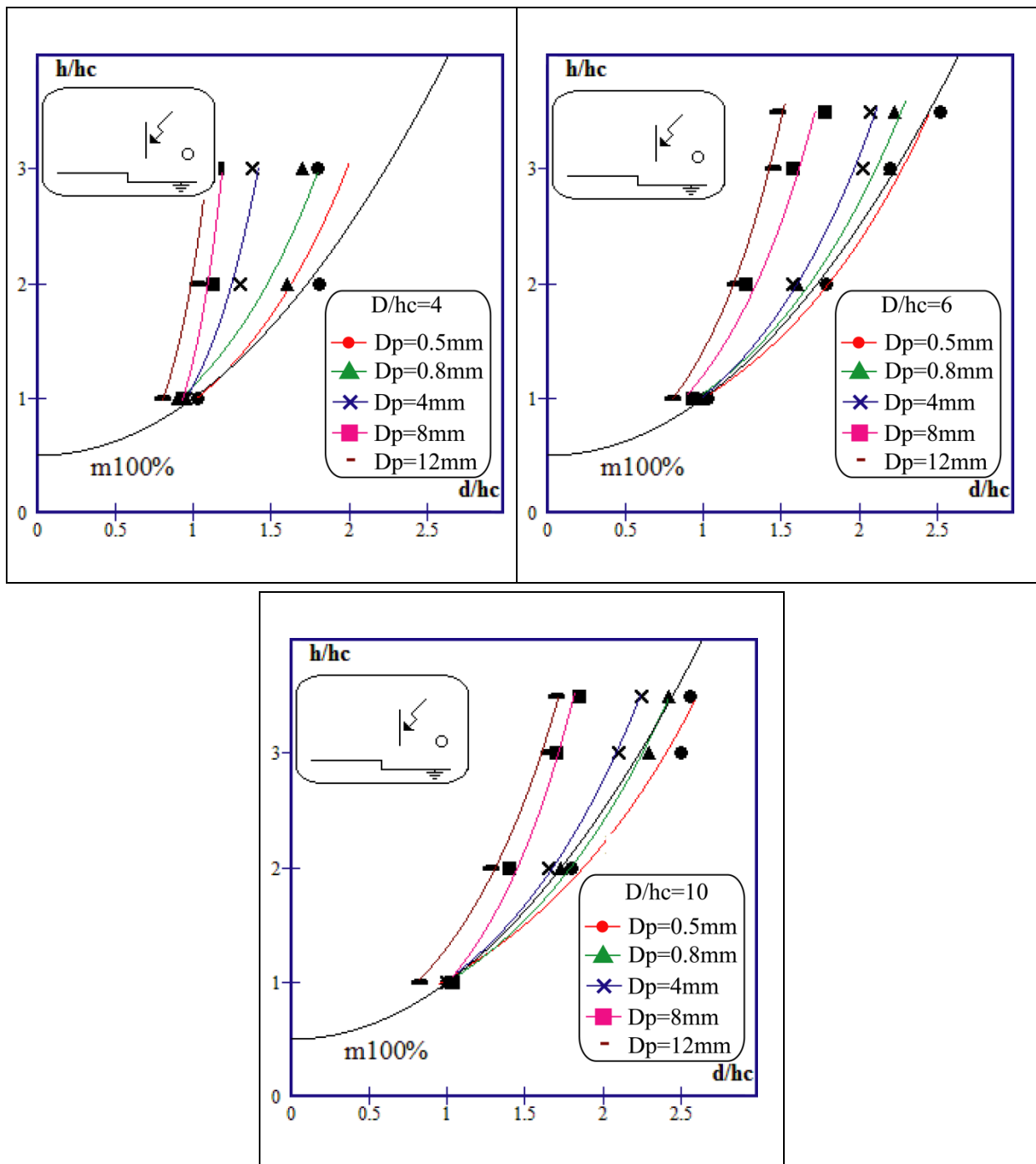


Fig (III.17) : Influence du diamètre du paratonnerre horizontal  $D_p$  [Bro.00]

A partir de la figure(III.17) nous constatons que :

- Pour  $D/h_c$  égal à 4, la zone d'attraction du paratonnerre horizontal pour tous les diamètres ( $D_{P1}$  à  $D_{P5}$ ) sont moins larges que celle du modèle électrogéométrique classique.
- Pour  $D/h_c$  égal à 6, la zone d'attraction du paratonnerre horizontal de 0,5mm de diamètre est légèrement plus large que celle du modèle électrogéométrique classique.

- Pour  $D/h_c$  égal à 10, la zone d'attraction du paratonnerre horizontal de 0,5mm et 0,8mm de diamètre est plus large que celle définie par le modèle électrogéométrique classique. Ce résultat est pratiquement similaire à celui obtenu dans le cas de la terre homogène conductrice.

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

#### III.4.3.4 4<sup>ème</sup> configuration : Paratonnerre horizontal situé entre l'interface et l'axe de la décharge

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

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

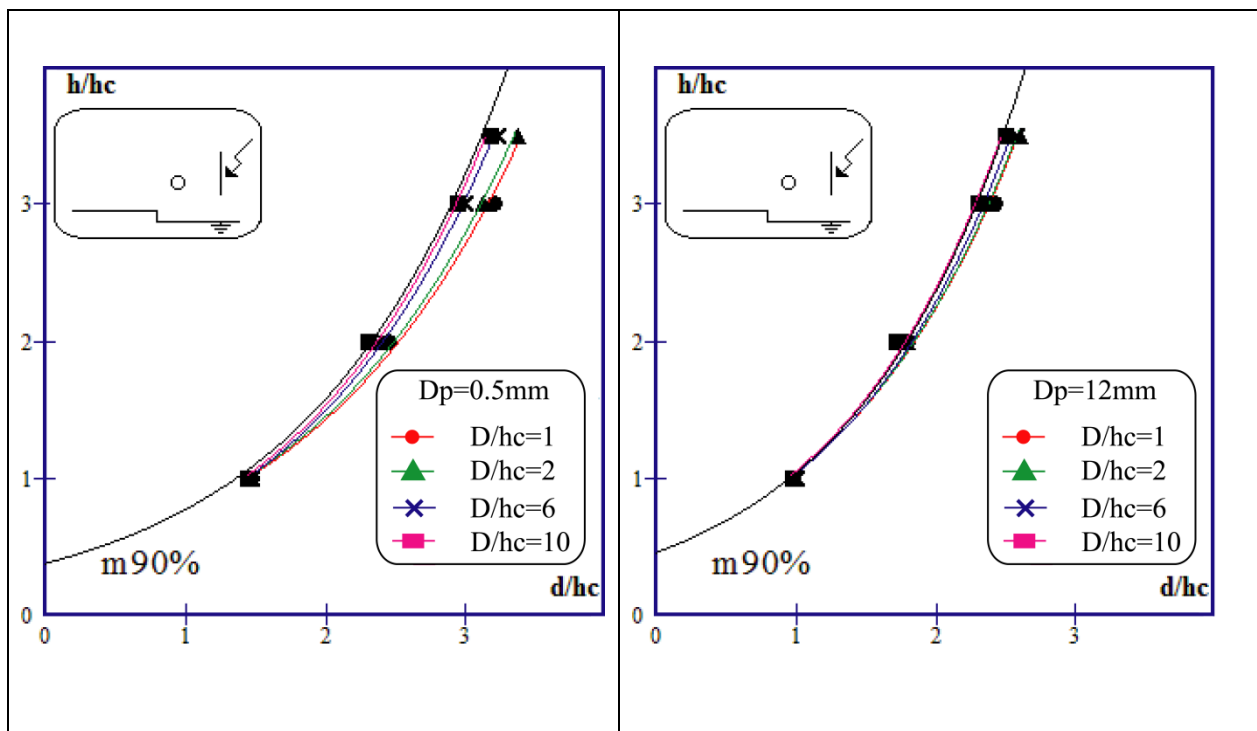


Fig (III.18): Influence du rapport  $D/h_c$  sur les zones d'attraction du paratonnerre horizontal

[Bro.00]

A partir de la figure(III.18) on remarque des zones d'attraction plus larges que celle définie dans le cas d'un sol homogène bon conducteur.

Lorsque le paratonnerre est relativement proche de l'interface ( $D/h_c$  petit). L'élargissement des zones d'attraction est plus prononcé.

Lorsque le paratonnerre horizontal est relativement éloigné de l'interface ( $D/h_c$  supérieur ou égal à 10). La zone d'attraction est confondue avec celle définie dans le cas de la terre homogène conductrice.

### **III.4.CONCLUSION :**

Ce chapitre a été consacré à la présentation des zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal dans le cas de terre hétérogène. D'après les résultats obtenus avec les deux cas de terres homogène mauvaise conductrice et discontinue, on peut conclure que la nature électro-géologique de la terre, influe considérablement sur les zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal.

Dans le cas d'un sol parfaitement conducteur, les zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal dépendent beaucoup de la hauteur de suspension ( $h_c$ ) et du diamètre ( $D_p$ ) du paratonnerre. En effet, elles s'élargissent, par rapport à la zone définie par le modèle électro-géométrique, si  $h_c$  et  $D_p$  sont faibles.

Dans le cas des terres mauvaises conductrices, les zones d'attraction des paratonnerres peuvent être plus larges que celles définies 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 horizontal, dépend en premier lieu de la position de l'axe de la décharge par rapport à l'interface et au paratonnerre. Outre la position du paratonnerre, l'influence de la discontinuité de la terre dépend de la grandeur relative de la hauteur du paratonnerre par rapport à la profondeur de la partie basse de la terre.

- Indépendamment du type de terre, le diamètre du paratonnerre horizontal semble avoir un effet important sur les zones d'attraction. Plus le diamètre du paratonnerre diminue, plus la zone d'attraction s'élargisse.
- Dans le cas du paratonnerre situé entre l'interface et la tige de haute tension, sur la partie haute ou basse de la terre discontinue, les zones d'attraction du paratonnerre horizontal sont plus larges que celle définie pour une terre homogène conductrice (première et quatrième configuration).
- Quel que soit le diamètre du paratonnerre horizontal, les zones d'attraction sont moins larges que celle définie pour une terre homogène conductrice lorsque la tige de haute tension est située entre le paratonnerre et l'interface (deuxième et troisième configuration).

## IV.1 INTRODUCTION :

Le modèle électro-géométrique a été largement utilisé à ce jour pour la prédétermination des points d'impact. Ce modèle reste encore 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 soient les caractéristiques géologiques du sol (la résistance de la terre, l'hétérogénéité du sol et la forme des objets au sol).

L'existence des décharges ascendantes est bien prouvée, tant par observations photographiques que par les recherches en laboratoires. Les expériences réalisées au laboratoire montrent que la tige dont la résistance de prise de terre est faible attire le traceur principal. On peut dire donc qu'une bonne conductivité du sol favorise le développement de la décharge ascendante.

On signale aussi que le modèle ne tient pas compte des particularités électro-géologiques du sol, cependant, et d'après les résultats présentés dans le chapitre précédent où c'était très claire qu'en général lorsque la terre est différente d'une terre homogène bonne conductrice les zones d'attraction sont plus larges ou plus petites que celle donnée par le modèle électro-géométrique classique. Les propriétés du sol ont une grande influence sur le point d'impact et par la suite sur la distance d'amorçage.

Vu les limitations du modèle classique de Whitehead pour la détermination de la zone de protection, cette partie sera consacrée à la présentation des alternatives à ce modèle et qui peut effectuer des corrections au niveau de la zone d'attraction d'un paratonnerre.

## IV.2 MODELE EQUIVALENT 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  $\epsilon$  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 ou discontinue pourrait être assimilé comme équivalent à celui avec terre conductrice, où la hauteur  $h_c$  du paratonnerre est remplacée par  $(h_c + \epsilon)$  et la distance  $h$  remplacée par  $(h + \epsilon)$ .

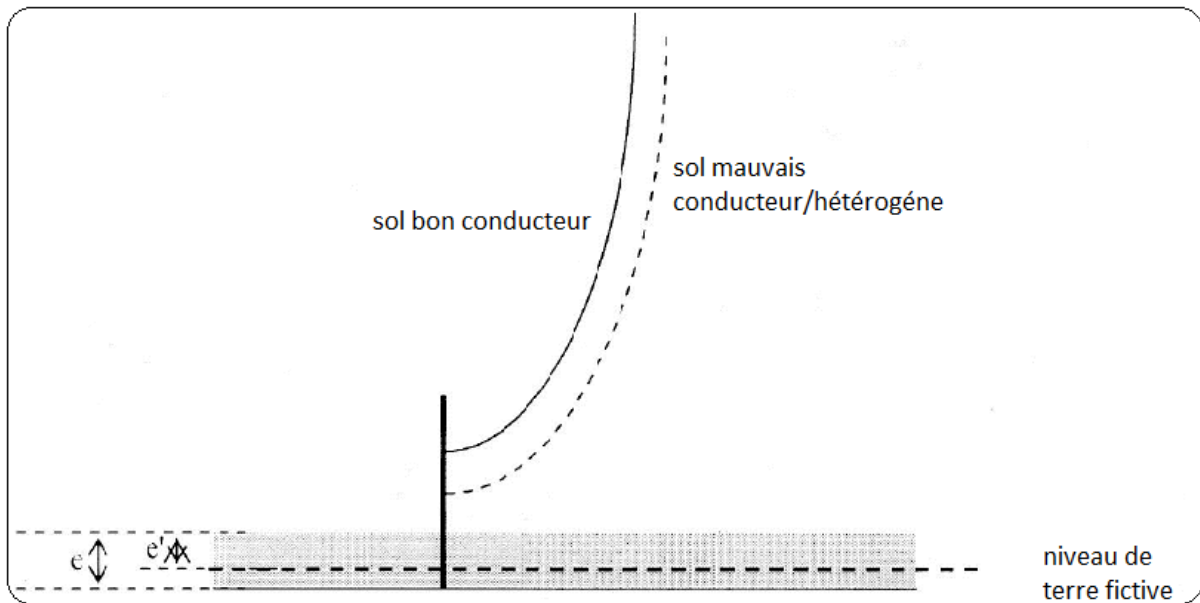


Fig (IV.1): niveau de terre fictive

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

$$X^2 - 2Y(1 + \epsilon/hc) + 1 - (\epsilon/hc)^2 = 0 \quad (IV.1)$$

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

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

$$\epsilon/hc = (X^2 - 2Y + 1 + Y^2)^{1/2} - Y \quad (IV.3)$$

D'après ce résultat, quand le rapport  $\epsilon/hc$  tend vers zéro, nous retrouvons la zone d'attraction définie par le modèle électrogéométrique classique, et quand ce rapport devient grand, nous obtenons des zones d'attraction plus larges [Cho.99], [Bel94].

### IV.3 MODÈLES ELECTROGEOMETRIQUE REVISE

#### IV.3.1 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 [Joh.03] :

$D=2I+30(1-e^{-\frac{I}{6.8}})$	<i>Darveniza (1975)</i>	(IV.4)
$D=10*I^{0.65}$	<i>Love (1993)</i>	(IV.5)
$D=9.4*I^{2/3}$	<i>Whitehead (1974)</i>	(IV.6)
$D=8*I^{0.65}$	<i>IEEE (1985)</i>	(IV.7)
$D=3.3*I^{0.78}$	<i>Suzuki (1981)</i>	(IV.8)

D : Distance d'amorçage en mètres

I : Intensité de courant de foudre en kiloampères

Le modèle de électrogéométrie 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 (IV.4) jusqu'à (IV.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)

### IV.3.2 Mise en œuvre du 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 (IV.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 ou un fil de protection et la terre.

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

$$D_m = 8 \cdot k \cdot I^{0.65} \quad (\text{IV.9})$$

Avec :

$D_m$  : 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.

#### **IV.5 APPLICATION DU MODELE EGM REVISE PAR LA METHODE DE LA SPHERE FICTIVE :**

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 de courant de 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 lieu nous considérons le courant du coup  $I_d$  :

- **Protection Contre le Courant du Coup  $I_d$**

On peut déterminer  $I_d$  à partir de L'équation (IV.10) ou l'équation (IV.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 (IV.12) ou l'équation (IV.13) cela donne la distance de la décharge  $D$ .

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

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

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

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

Avec:

BIL : le niveau de foudre base d'impulsion en kilovolt

CFO : la tension de la polarité négative en kilovolt

Zd : impédance caractéristique des condensateurs en Ohm

Sm : distance d'amorçage en mètre

Sf : distance d'amorçage en pied

En 1977, Lee a développé une technique simplifiée pour appliquer la théorie électrostatique 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 d'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 (IV.1). **[Joh.03]**.

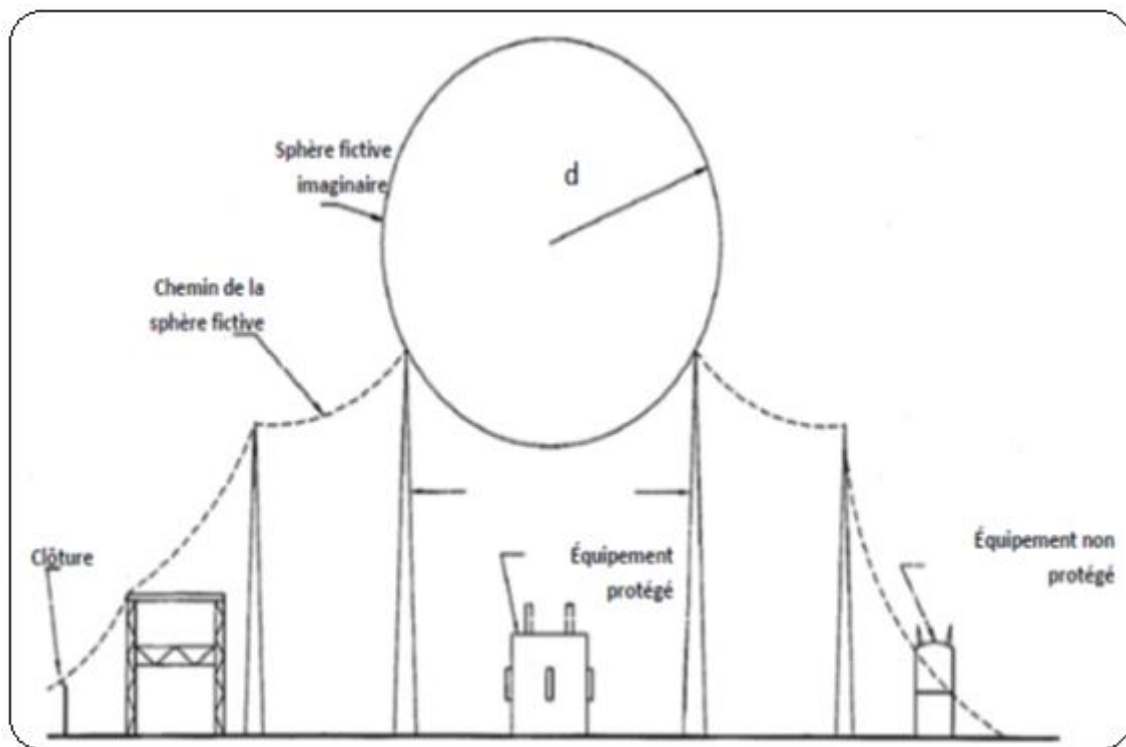


Fig. (IV.2) : Principe de la sphère fictive. [IEEE. 96].

En continuant la discussion de la protection contre le courant de la décharge  $I_d$ , considérant en premier temps un seul paratonnerre. La figure (IV.2) 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 , 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 de foudre  $I_d$  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. 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.

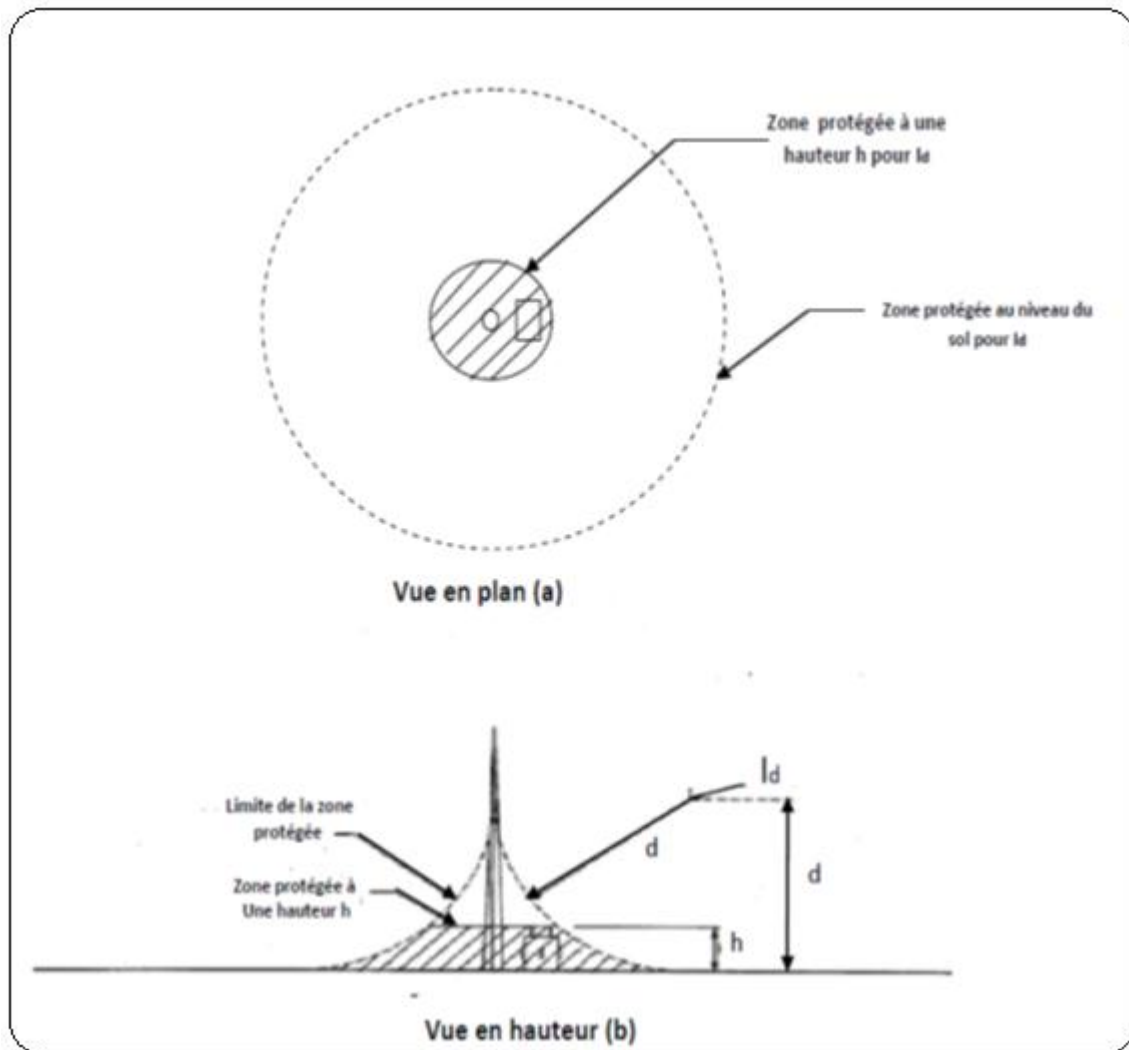


Fig (IV.3) : Zone de protection d'un paratonnerre selon le REGM [IEEE. 96]

- **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 (IV.6) ou l'équation (IV.7) est  $d_1$ . Le modèle géométrique pour cette condition est illustré à la figure (IV.4). 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  $d_1$ .

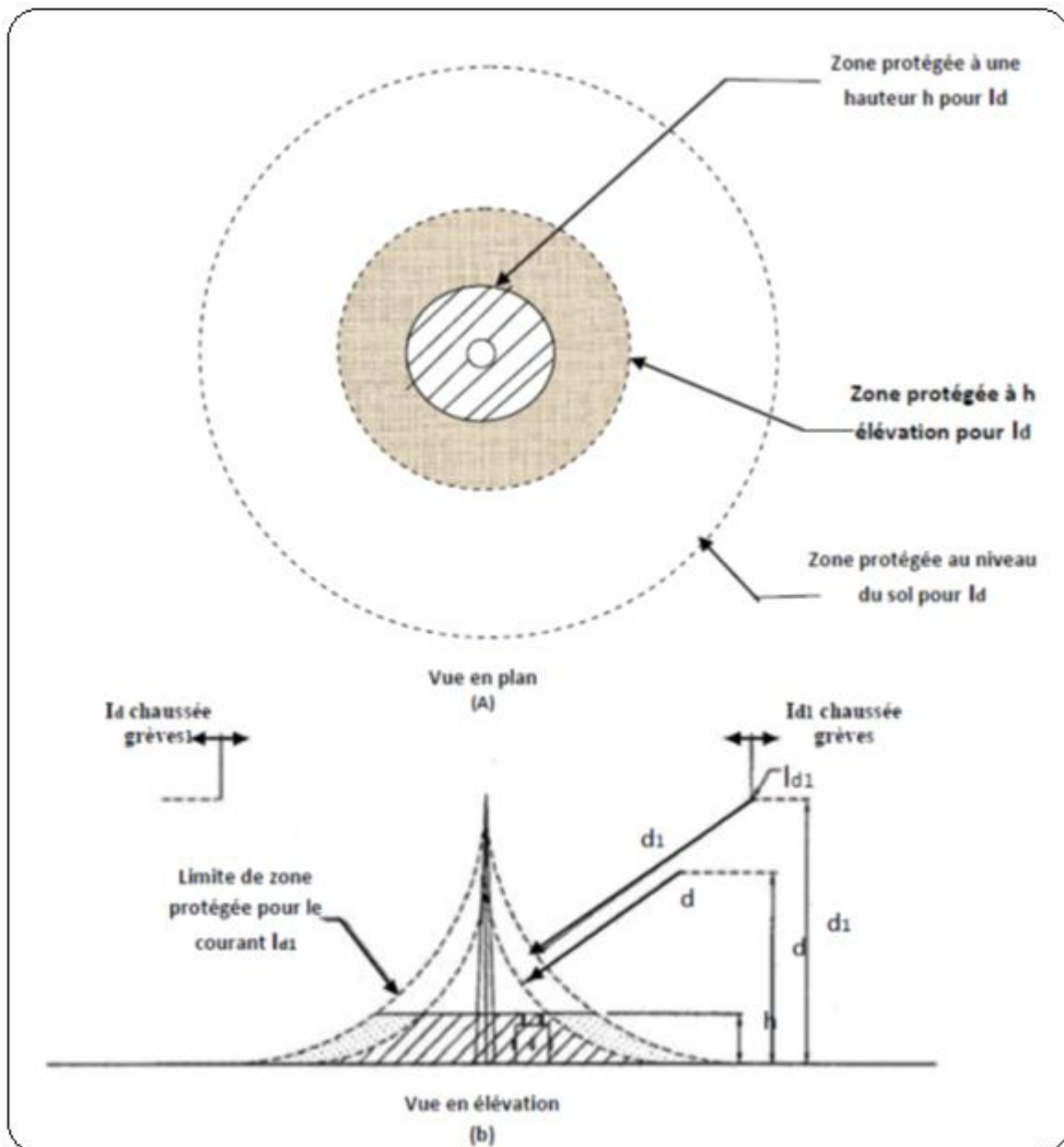


Fig (IV.4) : Zones de protection d'un paratonnerre pour les courants  $I_d$  et  $I_{d1}$ .

- **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 (IV.6) ou l'équation (IV.7) est  $d_0$ . La figure (IV.5) 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  $I_d$ . [Joh.03]

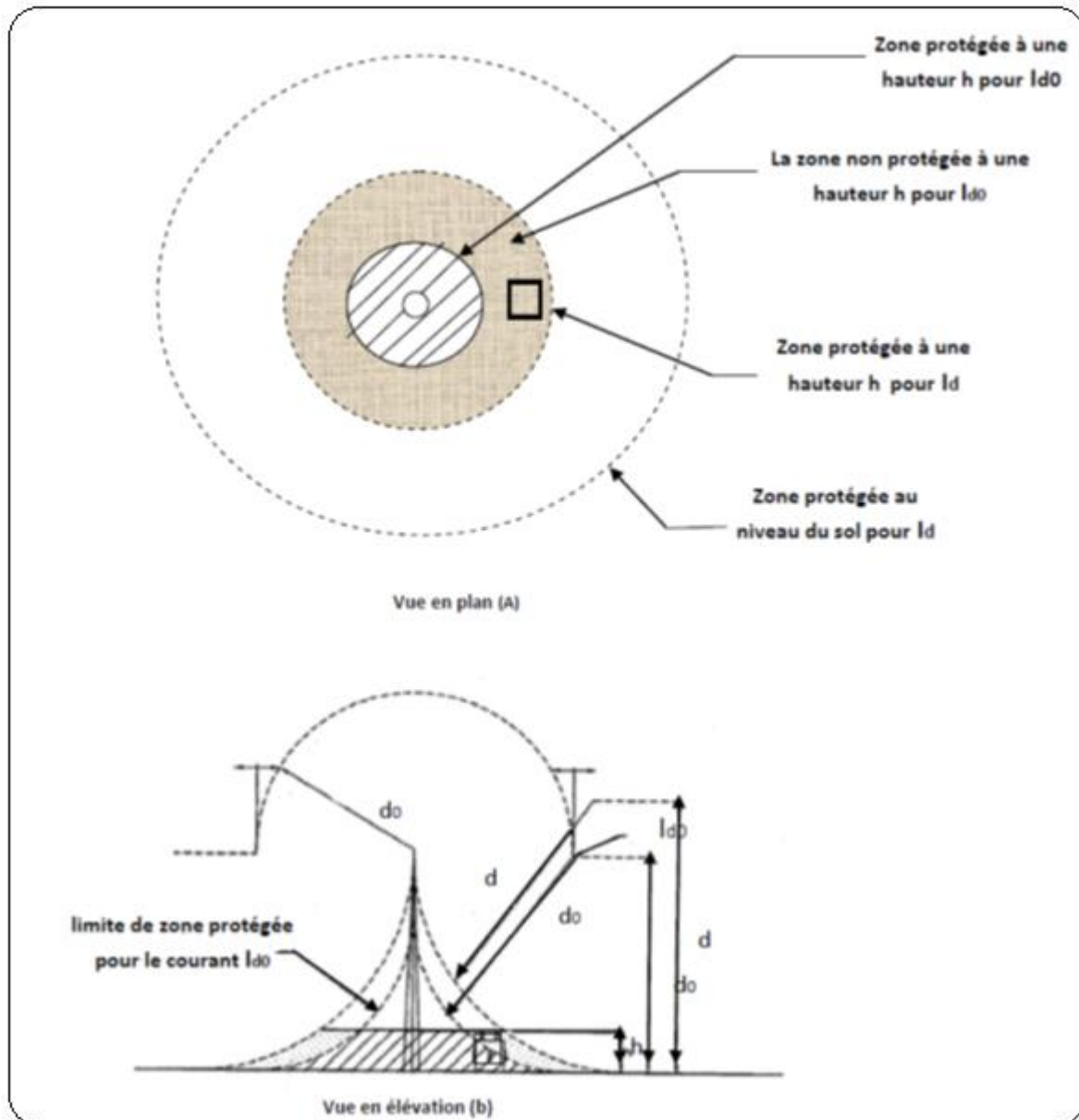


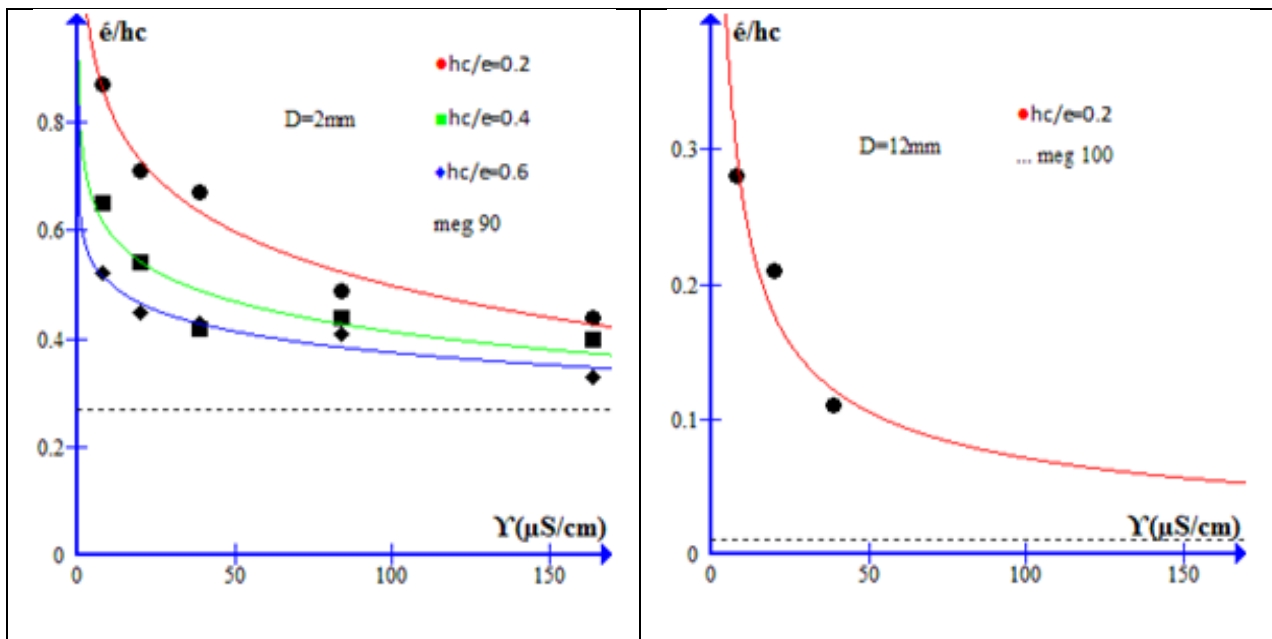
Fig (IV.5) : Zones de protection d'un paratonnerre pour les courants  $I_d$  et  $I_{d0}$ .

## IV.6 APPLICATION DU MODELE EQUIVALENT AVEC NIVEAU DE TERRE FICTIVE

### IV.6.1 cas de terre mauvaise conductrice

#### IV.6.1.1 Influence de la conductivité du sol sur le niveau de terre fictive

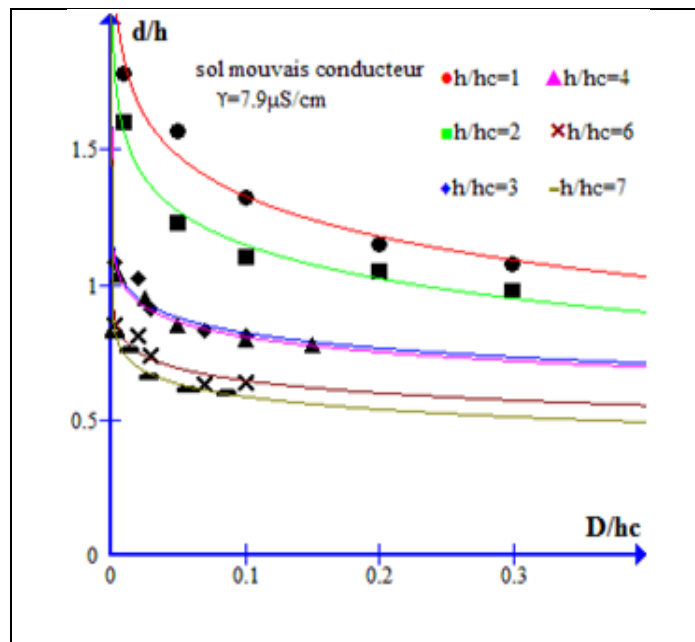
Pour étudier cette caractéristique, nous devons maitre la relation réduite suivante  $\epsilon/hc=f(\gamma)$ , pour les rapports  $(hc/e)$  constants. [Rah.96]



**Fig (IV.6) :** Influence de la conductivité du sol sur le niveau de terre fictive [Rah.96]

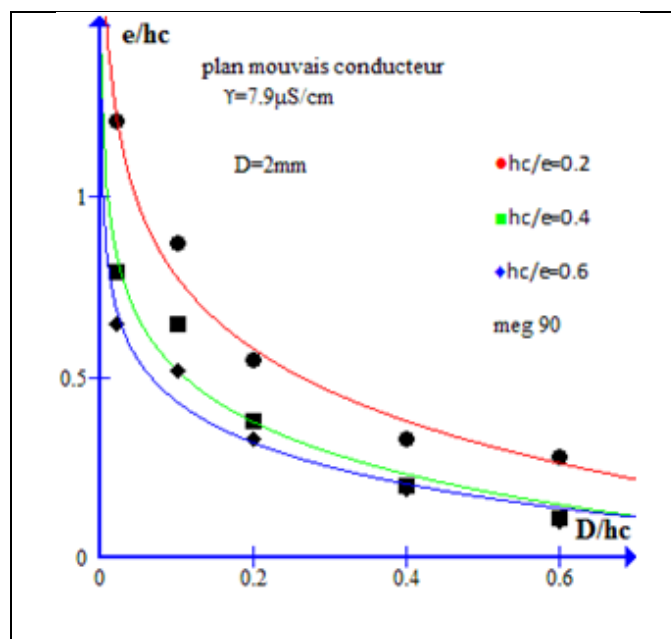
Nous constatons que plus la conductivité  $\gamma$  du sol augmente et/ ou le rapport  $(hc/e)$  augmente, le niveau relatif de terre fictive diminue et tend ainsi vers celui du sol parfaitement conducteur.

## IV.6.1.2 Influence de la conductivité du sol sur le niveau de terre fictive



**Fig (IV.7):** Influence du rayon de courbure du paratonnerre horizontal sur les zones d'attraction [Rah.96]

La figure (IV.7) montre que, pour différents rapports  $h/hc$  (1, 2, 3, 4, 6 et 7) et une conductivité  $\gamma$  donné, la distance relative d'amorçage ( $d/h$ ) diminue lorsque le rayon de courbure  $D/h$  et /ou la hauteur relative ( $h/hc$ ) augmentent, et lorsque  $D/h$  augmente, le rapport  $d/h$  tend à devenir constant.



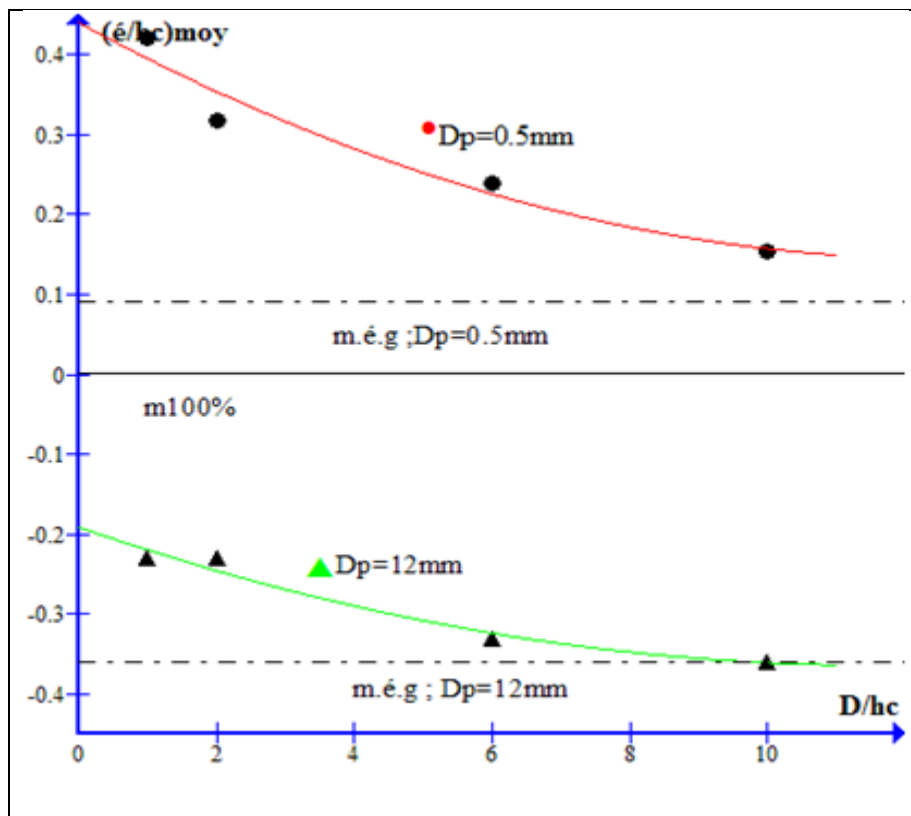
**Fig (IV.8):** Influence de rayon de courbure sur le niveau de terre fictive pour différents rapport  $hc/e$  ( $\gamma = 7.9 \mu S/cm$ ) [Rah.96]

Pour une conductivité donnée, nous constatons que le niveau relatif de terre fictive  $\epsilon/h_c$  tend vers une constante (celui du sol bon conducteur) lorsque le rayon de courbure relatif  $D/h_c$  ou le rapport  $h_c/e$  augmente.

#### IV.6.2 Cas de terre discontinue

##### Niveau de terre fictive pour la quatrième configuration:

Pour  $d_p$  constant, le niveau relatif de terre fictive  $\epsilon'/h_c$  tend vers celui du sol homogène bon conducteur lorsque le rapport  $D/h_c$  augmente.



**Fig (IV.9) :** Niveau de terre fictive pour la quatrième configuration [Bro.00]

Pour  $(h_c/e)$  constant, nous constatons ainsi que lorsque la conductivité et/ou le diamètre relatif ( $D/h_c$ ) du conducteur augmente, le niveau relatif de terre fictive  $\epsilon/h_c$  diminue et tend ainsi vers celui du sol parfaitement conducteur.

## IV.7 APPLICATION DU MODELE EGM REVISE DANS LE CAS DE TERRE HETEROGENE :

D'après les résultats présentés au chapitre précédent concernant les zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal, pour certaines configurations au niveau de terre discontinue .le modèle EGM classique ne couvre pas toutes les zones. Afin de corriger ce problème nous avons proposés le modèle révisé REGM.

### IV.7.1 Modèle électrogéométrique révisé REGM90% :

Ce modèle de référence a été conçu pour l'amélioration des zones d'attraction déjà tracés dans les deux cas de terres hétérogène, et beaucoup plus dans le cas terre discontinue dont ces zones sont plus large que celle définie par le modèle électrogéométrique classique.

En utilisant la meilleure estimation de la distance d'amorçage (équation IV.7) et en gardant les mêmes valeurs des rapports ( $h/hc$ ), nous obtenons résultat ci-dessous.

	$h/hc$	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>3.5</b>
$d/hc$	$Dp=0.5$	1.191	1.914	2.499	2.659
	$Dp=0.8$	1.106	1.744	2.382	2.553
	$Dp=4$	0.967	1.617	2.095	2.276
	$Dp=8$	0.872	1.489	1.84	1.978
	$Dp=12$	0.829	1.489	1.957	2.127

**Tab (IV.1) :** Le modèle EGMR pour défient diamètre

Ce tableau contribue à tracer les courbes de MEGR pour défient diamètre.

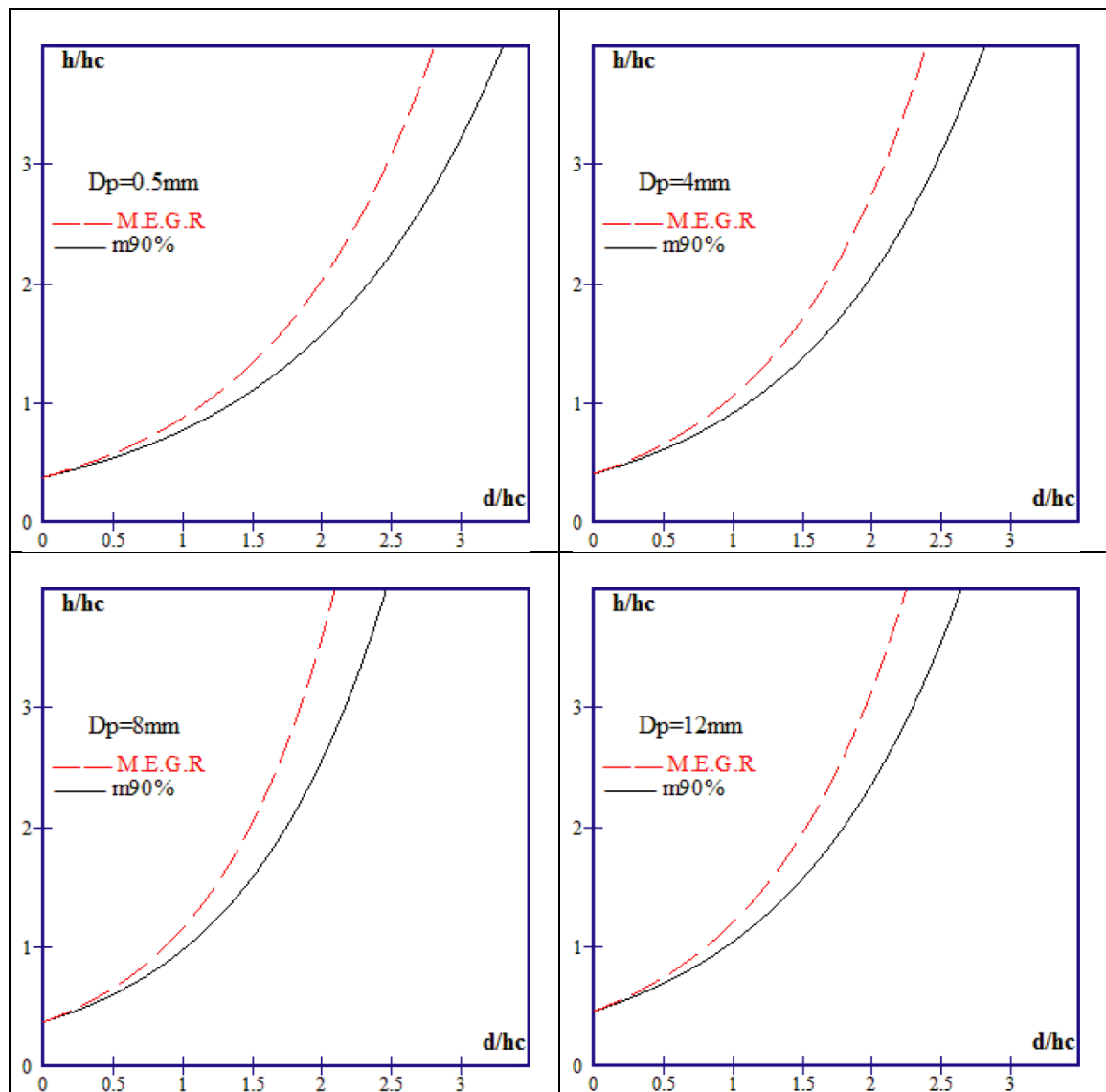


Fig (IV.10) : modèle révisé et modèle classique 90%.

La figure (IV.10) permet de faire une comparaison entre les deux modèles (classiques et révisé), d'où on constate que les zones protégées par le modèle révisé sont plus petites que celles définies par le modèle classique.

#### IV.7.2 Application de REGM pour le cas d'une terre discontinue

Pour arriver à notre but de vérifier le modèle révisé, on doit faire une comparaison entre les zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal (terre discontinue) et le modèle révisé.

- **Deuxième configuration** L'axe de la décharge situé entre l'interface et le paratonnerre horizontal dans la partie haute de la terre :

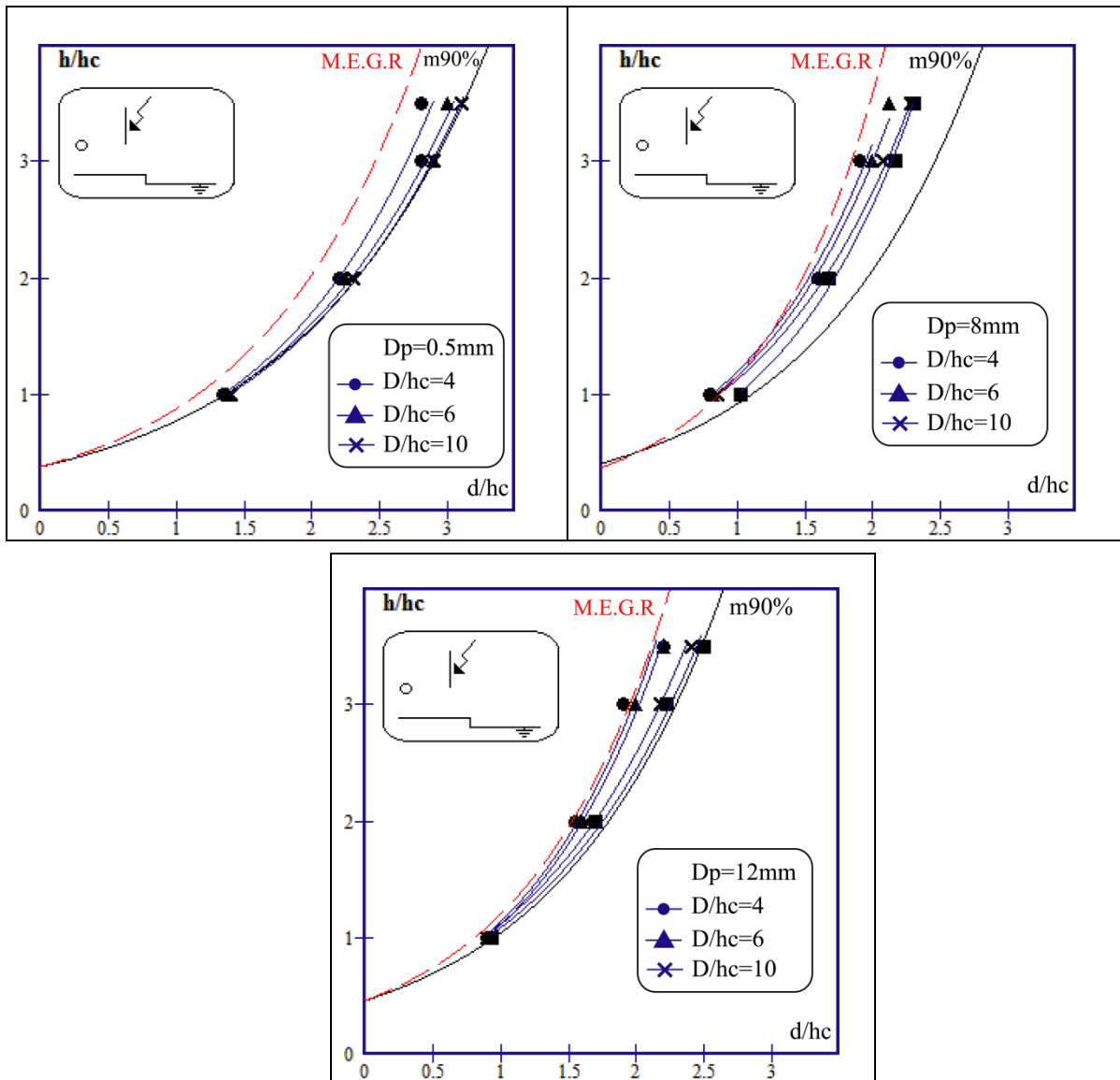
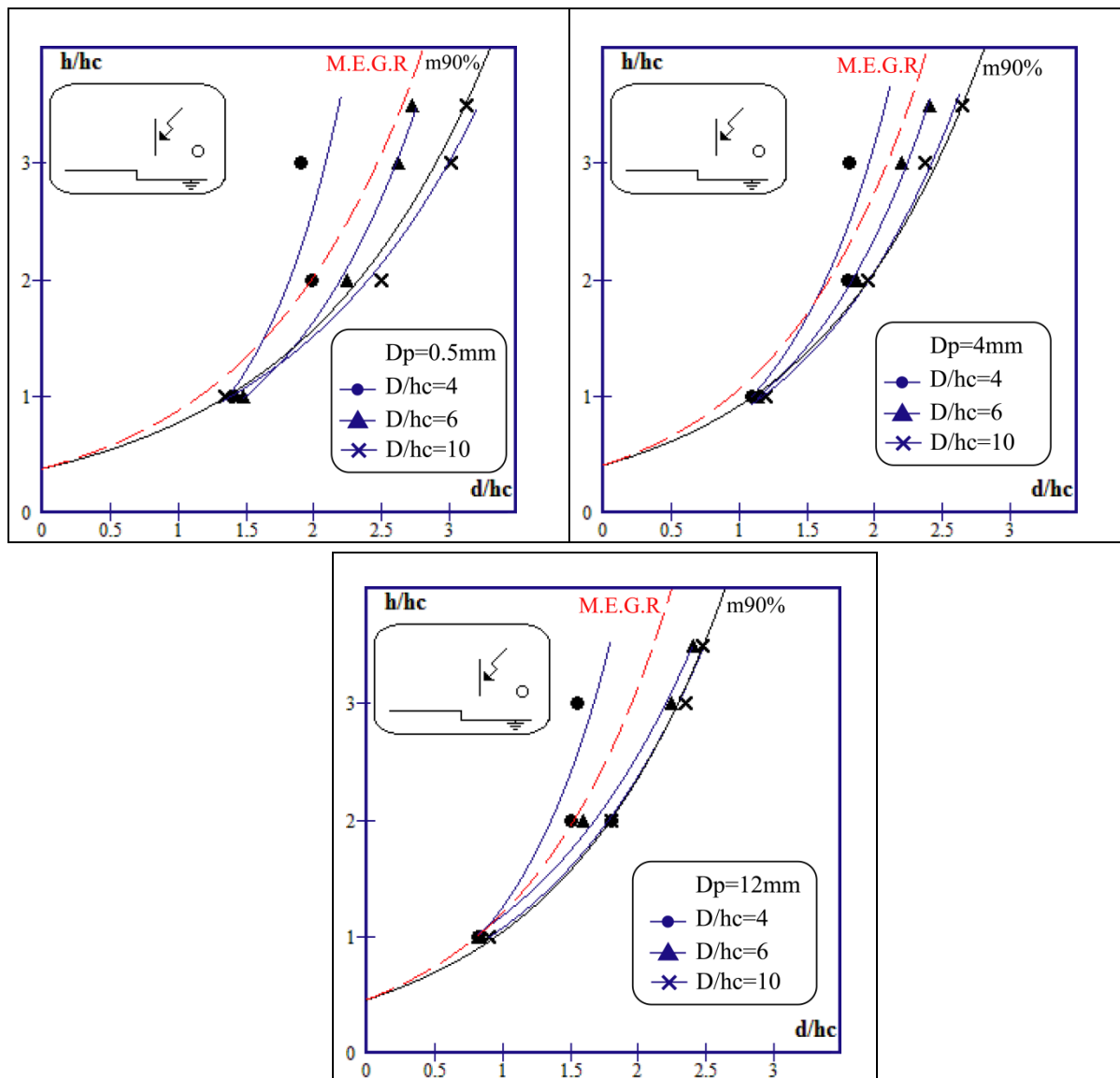


Fig (IV.11) : influence de rapport  $D/hc$  dans la 2<sup>ème</sup> configuration

- **Troisième configuration :** L'axe de la décharge situé entre l'interface et le paratonnerre horizontal, dans la partie basse de la terre :



**Fig (IV.12) :** influence de rapport  $D/hc$  dans la 3<sup>ème</sup> configuration

Les courbes de la (figure IV.11) illustrent que les courbes de modèle révisé sont plus petites par rapport à celles de modèle classique (m90), et celles des zones d'attraction pour 2<sup>ème</sup> configuration.

Pour la 3<sup>ème</sup> configuration montré dans la figure (IV.12), les zones de modèle révisé sont petite que les zones d'attraction, uniquement pour  $d/hc=6,10$ . Donc dans ce cas le modèle révisé et vérifie pour les distances d'amorçages les plus grand.

## **IV.8 : 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 à 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 définies par le 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 définies par le modèle électro-géométrique classique, un modèle révisé a été proposé, ce modèle prend en considération la nature du sol dans le dimensionnement du paratonnerre.

## CONCLUSION GENERALE

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

Les chercheurs du Laboratoire de Haute Tension de l'ENP contribuent dans ces travaux en étudiant l'influence des propriétés électrogéologiques du sol sur les zones d'attraction du paratonnerre horizontal et vertical. En effet, ces propriétés sont considérées comme l'une des insuffisances du modèle électrogéométrique [BRO.00].

Notre travail a permis en premier lieu de confirmer le modèle de protection contre la foudre. Il a été ainsi orienté vers la détermination des zones d'attraction d'un système de protection contre la foudre en tenant compte de la nature de la terre et de la forme du paratonnerre horizontal. Dont l'objectif a été la représentation de l'influence de la caractéristique électrogéologique du sol, sur les zones d'attraction. Trois types de terre ont été envisagés; le premier concerne une terre homogène bonne conductrice, le second une terre mauvaise conductrice et le troisième type une terre discontinue.

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

- Indépendamment du type de terre, le diamètre du paratonnerre horizontal semble avoir un effet important sur les zones d'attraction. Plus le diamètre du paratonnerre diminue, plus la zone d'attraction s'élargit.
- Dans le cas de la terre mauvaise conductrice, les zones d'attraction des paratonnerres pourraient être plus larges que celles définies par le modèle électrogéométrique. Cet élargissement dépendrait surtout de diamètre du paratonnerre et de la nature de la terre mauvaise conductrice, ainsi que de la hauteur du paratonnerre. la zone d'attraction serait large, lorsque la conductivité du sol diminue. Elles tendent alors vers celles définies par le modèle électrogéométrique classique (sol parfaitement conducteur).
- Dans le cas de la terre discontinue, les zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal, dépendrait en premier lieu de la position de l'axe de la décharge par rapport à l'interface et

au paratonnerre. Ceci serait dû au champ électrique relativement intense au voisinage de l'interface.

- Dans le cas où le paratonnerre est situé entre l'interface et la tige de haute tension, sur la partie haute ou basse de la terre discontinue, les zones d'attraction du paratonnerre horizontal sont plus larges que celle définie pour une terre homogène conductrice. Cet élargissement dépend de la distance horizontale du paratonnerre par rapport à l'interface. Par contre, lorsque la décharge évolue sur la même partie de la terre dans une zone comprise entre l'interface et le paratonnerre, les zones d'attraction sont plus réduites lorsque ce dernier est très proche de l'interface.
- Dans le cas où le paratonnerre est situé sur la partie basse de la terre discontinue, en plus de la position du paratonnerre, l'influence de la discontinuité de la terre dépend étroitement de la grandeur relative de la hauteur du paratonnerre par rapport à la profondeur de la partie basse de la terre. Plus cette grandeur relative est petite, plus la zone d'attraction du paratonnerre serait réduite.

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 plus petites, une deuxième solution a été proposée, concernant un modèle électro-géométrique révisé REGM.

## **BIBLIOGRAPHIE**

- [Phi.03] Philippe Dunand, « Protection des installations électriques contre la foudre », Dunod, Paris, 2003.
- [Ler.84] G. Le Roy, C. Gary, B. Hutzler, J. Lacot, C. Dubaton: « Les propriétés diélectrique de l'air et les très hautes tensions », Ed Eyrolles, Paris, 1984, pp : 92-251.
- [Age .88] M. Aguet : « Haute Tension », Vol. XXII, Presses Polytechniques et Universitaire Romandes, 1987.
- [Gar .94] C. GARY, « La Foudre : des méthodologies antiques à la recherche moderne », Masson, 1994.
- [Gar.04] C. GARY, « La Foudre : nature, histoire risques et protection », Dunod, Paris, 2004.
- [Rou.99] A. ROUSSEAU, C. Gary, Gérard Berger, « Foudre et protection des bâtiments », Technique de l'ingénieur, C3307, 1994.
- [Gar.89] C. GARY, « La Foudre et les phénomènes orageux », RGE N° 03, Mars 1989, pp 12-17.
- [Kuf.84] E. Kuffel, W. S. Zaengl: « High voltage engineering », Pergamon Press, G.B; 1ère Ed; 1984. pp: 463-488.
- [Hor.91] T. Horvath: « Computation of lightning protection », Research studies press LTD, England; 1ère Ed; 1991. pp.: 1-76.
- [Sab.99] A. Sabot, J. Michaud ; « Lignes et postes. Choix et coordination des isolements », Techniques de l'ingénieur », D4750. 1999.
- [Xem.94] A. Xemard, A. Sabot, P. Lalande, M. Nguyen ; « Modèles électro géométriques utilisés en électrotechnique : Comparaison et utilisation par EDF. », Foudre et Montagne, Chamonix, France, 1994.
- [Eri.75] A.J. Eriksson ; « Surtensions de foudre sur les lignes de transport à haute tension », Electra, N°47, 1975. pp : 87-110.
- [Nof.87] Norme Française; « Protection contre la foudre : Installation de paratonnerres », C17-100, Février, 1987. pp : 1-19.

- [**Nof.95**] *Norme Française ; « Protection contre la foudre : Protection des structures et des zones ouvertes contre la foudre par paratonnerre à dispositif d'amorçage. », C17-102, Juillet 1995. pp : 1-48.*
- [**Ler84**] *G. Le Roy, C. Gary, B. Hutzler, J. Lacot, C. Dubaton; " Les propriétés diélectrique de l'air et les très hautes tensions (la foudre) ", Ed Eyrolles, 1984, Paris. pp. 92-251.*
- [**Hut88**] *B. Hutzler ; " Simulation de la foudre en laboratoire ", EDF bulletin de la direction des études et recherche- série B, Réseau électrique et matériels électriques, N°3, pp. 31-40, 1988.*
- [**Hut.89**] *Hutzler B. and C. Gary ; " Simulation en laboratoire de l'impact au sol ", RGE, N°03, Mars 1989.*
- [**Gol.77**] *R. H. Golde; «Physics of lightning ", Volume 1, Academic Press, 1977.*
- [**Oui.07**] *OUIDIU CENTEA, " Sur l'invalidité du Modèle électro-géométrique de la Foudre", Revue Science Technique, Électrotechnique et Énergétique, pp. 291–300, Bucarest, 2007.*
- [**Rah.96**] *A. Rahmani; " Détermination des zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal dans le cas d'une terre mauvaise conductrice ", Thèse de Magister, Université de Bejaïa, Algérie, 1996.*
- [**Agu.87**] *M. Aguet ; " Haute Tension " , Vol. XXII, Presses Polytechniques Romandes, 1987.*
- [**Dja.08**] *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'École nationale Polytechnique, 2008.*
- [**Gar.95**] *C. Gary, La foudre, MASSON Paris Milan Barcelone, 1995.*
- [**Bro.00**] *H. Brouri : «Détermination des zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal dans le cas d'une terre discontinue », Thèse de Magister, ENP, Alger, Algérie, 2000.*
- [**Bou.09**] *A. Boubakeur, A. Chouchou, S. A. A. Boumaza; « Influence of earth discontinuity on the capture zones of a vertical lightning conductor », 25<sup>th</sup> ICLP, Rhodes, Greece, 2000. (Submitted).*

- [IEEE.96]** *Guide for Direct Lightning Stroke Shielding of Substations, IEEE Std. 998-1996, IEEE Working Group D5, Substations Committee.*
- [Mou.88]** *Mousa, A. M. and Srivastava, K. D., A revised electrogeometric model for the termination of lightning strokes on ground objects, in Proceedings of International Aerospace and Ground Conference on Lightning and Static Electricity, Oklahoma City, OK, Apr. 1988, 342–352.*
- [Mou.89]** *Mousa, A. M. and Srivastava, K. D., The implications of the electrogeometric model regarding effect of height of structure on the median amplitudes of collected lightning strokes, IEEE Trans. on Power Delivery, 4(2), 1450–1460, 1989.*
- [Lee.79]** *Lee, R. H., Lightning protection of buildings, IEEE Trans. on Ind. Appl., IA-15(3), 236–240, May/June 1979.*
- [Lee.78]** *Lee, R. H., Protection zone for buildings against lightning strokes using transmission line protection practice, IEEE Trans. on Ind. Appl., IA-14(6), 465–470, 1978.*
- [Orr.88]** *Orrell, J. T., Direct stroke lightning protection, Paper presented at EEI Electrical System and Equipment Committee Meeting, Washington, D.C., 1988.*
- [Joh.03]** *John D. Mc Donald, ‘‘ Electric Power Substations Engineering ‘‘, CRC press. London 2003.*
- [Bel .94]** *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.*
- [Cho.99]** *A. CHOUCHE, ‘‘ 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.*

## ANNEXE A

## I.MODELE ÉLECTROGÉOMÉTRIQUE (TERRE HOMOGENE BONNE CONDUCTRICE) [Bro.00]

## I.1.Influence du diamètre d'un paratonnerre horizontal

- $D_{P1}=0.5\text{mm}$

$d_{90}/h_c$	1,4	2,25	2,937	3,125
$d_{100}/h_c$	1,062	1,85	2,4	2,575
$h/h_c$	1	2	3	3,5

Tab .1. a

- $D_{P2}=0.8\text{mm}$

$d_{90}/h_c$	1,30	2,05	2,8	3
$d_{100}/h_c$	1,03	1,76	2,31	2,5
$h/h_c$	1	2	3	3,5

Tab .1. b

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

$d_{90}/h_c$	1,137	1,9	2,462	2,675
$d_{100}/h_c$	1,05	1,675	2,125	2,250
$h/h_c$	1	2	3	3,5

Tab .1. c

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

$d_{90}/h_c$	1,025	1,75	2,162	2,325
$d_{100}/h_c$	0,837	1,35	1,675	1,8
$h/h_c$	1	2	3	3,5

Tab .1. d

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

$d_{90}/h_c$	0,975	1,75	2,3	2,5
$d_{100}/h_c$	0,837	1,275	1,625	1,7
$h/h_c$	1	2	3	3,5

Tab .1. e

**ANNEXE B**

**II. TERRE MAUVAISE CONDUCTRICE**

**II.1. Influence de la conductivité du sol sur les zones d'attraction**

- $\gamma = 164 \mu\text{S} / \text{cm}$  ( $e/hc=0.2$ )

D=2mm	d/hc	0	2.2	3.35	4.05	4.35
	h/hc	0.28	2	4	6	7
D=12mm	d/hc	0	1.75	2.65	3.30	3.45
	h/hc	0.51	2	4	6	7

**Tab.II.1.a**

- $\gamma = 84 \mu\text{S} / \text{cm}$  ( $e/hc=0.2$ )

D=2mm	d/hc	0	2.25	3.4	4.1	4.5
	h/hc	0.26	2	4	6	7

**Tab.II.1.b**

- $\gamma = 39 \mu\text{S} / \text{cm}$  ( $e/hc=0.2$ )

D=2mm	d/hc	0	2.3	3.65	4.55	4.8
	h/hc	0.17	2	4	6	7
D=12mm	d/hc		0	2.85		3.75
	h/hc	2	4.5	4	6	7

**Tab.II.1.c**

- $\gamma = 20 \mu\text{S} / \text{cm}$  ( $e/hc=0.2$ )

D=2mm	d/hc	0	2.3	3.7	4.6	4.95
	h/hc	0	2	4	6	7
D=12mm	d/hc	0		2.95		4.0
	h/hc	0.40	2	4	6	7

**Tab.II.1.d**

- $\gamma = 7.9 \mu\text{S} / \text{cm}$  ( $e/hc=0.2$ )

D=2mm	d/hc	0	2.45	3.80	4.85	5.30
	h/hc	0.07	2	4	6	7
D=12mm	d/hc	0	1.95	3.1	3.85	4.2
	h/hc	0.36	2	4	6	7

**Tab.II.1.e**

**II.2. Influence du rayon de courbure du paratonnerre horizontal ( $g=7.9\mu\text{S/cm}$ )**

- $D=0.4\text{mm}$

hc/e=0.2	d/hc	0	3.2	4.15	5.1	5.65
	h/hc	0.11	2	4	6	7
hc/e=0.4	d/hc	0	1.78	2.45	3.25	3.65
	h/hc	0.1	1	2	3	3.5
hc/e=0.6	d/hc	0	1.25	1.87	2.48	2.75
	h/hc	0.2	0.66	1.33	2	2.33

**Tab.II.2.a**

- $D=2\text{mm}$

hc/e=0.2	d/hc	0	2.45	3.8	4.85	5.3
	h/hc	0.07	2	4	6	7
hc/e=0.4	d/hc	0	1.58	2.40	3.05	3.4
	h/hc	0.18	1	2	3	3.5
hc/e=0.6	d/hc	0	1.08	1.75	2.37	2.58
	h/hc	0.24	0.66	1.33	2	2.33

**Tab.II.2.b**

- $D=4\text{mm}$

hc/e=0.2	d/hc	0	2.2	3.4	4.45	4.6
	h/hc	0.23	2	4	6	7
hc/e=0.4	d/hc	0	1.33	2.15	2.72	3.05
	h/hc	0.31	1	2	3	3.5
hc/e=0.6	d/hc	0	0.91	1.58	2.08	2.4
	h/hc	0.34	0.66	1.33	2	2.33

**Tab.II.2.c**

- $D=8\text{mm}$

hc/e=0.2	d/hc	0	2.1	3.2	4.85	5.3
	h/hc	0.33	2	4	6	7
hc/e=0.4	d/hc	0	1.15	1.97	2.75	3.05
	h/hc	0.4	1	2	3	3.5
hc/e=0.6	d/hc	0	0.83	1.47	1.95	2.08
	h/hc	0.41	0.66	1.33	2	2.33

**Tab.II.2.d**

- $D=12\text{mm}$

hc/e=0.2	d/hc	0	1.95	3.1	3.85	4.2
	h/hc	0.36	2	4	6	7
hc/e=0.4	d/hc	0	1.07	1.85	2.43	2.5
	h/hc	0.45	1	2	3	3.5
hc/e=0.6	d/hc	0	0.77	1.37	1.81	2.02
	h/hc	0.45	0.66	1.33	2	2.33

Tab.II.2.e

### II.3. Zones d'attraction pour différent rapports hc/e

- hc/e=0.2

$D_p=0.4\text{mm}$	d/hc	0	3.2	4.15	5.1	5.65
	h/hc	0.11	2	4	6	7
$D_p=4\text{mm}$	d/hc	0	2.2	3.4	4.45	4.6
	h/hc	0.23	2	4	6	7
$D_p=12\text{mm}$	d/hc	0	1.95	3.1	3.85	4.2
	h/hc	0.36	2	4	6	7

Tab.II.3.a

- hc/e=0.4

$D_p=0.4\text{mm}$	d/hc	0	1.78	2.45	3.25	3.65
	h/hc	0.1	1	2	3	3.5
$D_p=4\text{mm}$	d/hc	0	1.33	2.15	2.72	3.05
	h/hc	0.31	1	2	3	3.5
$D_p=12\text{mm}$	d/hc	0	1.07	1.85	2.43	2.5
	h/hc	0.45	1	2	3	3.5

Tab.II.3.b

- hc/e=0.6

$D_p=0.4\text{mm}$	d/hc	0	1.25	1.87	2.48	2.75
	h/hc	0.2	0.66	1.33	2	2.33
$D_p=4\text{mm}$	d/hc	0	0.91	1.58	2.08	2.4
	h/hc	0.34	0.66	1.33	2	2.33
$D_p=12\text{mm}$	d/hc	0	0.91	1.58	2.08	2.4
	h/hc	0.34	0.66	1.33	2	2.33

Tab.II.3.c

**II.4. Zones d'attraction pour différent rapports hc/e (D=2mm)**

- hc/e=0.2

$\Upsilon = 164\mu\text{S /cm}$	d/hc	0	2.2	3.35	4.05	4.35
	h/hc	0.28	2	4	6	7
$\Upsilon = 84\mu\text{S /cm}$	d/hc	0	2.25	3.4	4.1	4.5
	h/hc	0.26	2	4	6	7
$\Upsilon = 7.9\mu\text{S /cm}$	d/hc	0	2.45	3.80	4.85	5.30
	h/hc	0.07	2	4	6	7

**Tab.II.4.a**

- hc/e=0.4

$\Upsilon = 164\mu\text{S /cm}$	d/hc	0	1.35	2.25	2.78	2.95
	h/hc	0.3	1	2	3	3.5
$\Upsilon = 84\mu\text{S /cm}$	d/hc	0	1.43	2.28	2.8	3.03
	h/hc	0.28	1	2	3	3.5
$\Upsilon = 7.9\mu\text{S /cm}$	d/hc	0	1.38	2.28	2.73	3
	h/hc	0.29	1	2	3	3.5

**Tab.II.4.b**

- hc/e=0.6

$\Upsilon = 164\mu\text{S /cm}$	d/hc	0	0.97	1.61	2.08	2.3
	h/hc	0.34	0.66	1.33	2	2.33
$\Upsilon = 84\mu\text{S /cm}$	d/hc	0	1.05	1.68	2.18	2.42
	h/hc	0.3	0.66	1.33	2	2.33
$\Upsilon = 7.9\mu\text{S /cm}$	d/hc	0	1.05	1.72	2.2	2.42
	h/hc	0.29	0.66	1.33	2	2.33

**ANNEXE C**

**III.TERRE DISCONTINUE**

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

**III.1.1.Influence du rapport D/hc**

• **D<sub>P1</sub>=0,5mm**

h/h <sub>c</sub>	1	2	3	3,5
D/h <sub>c</sub> =2	1,45	2,5	2,95	3,312
D/h <sub>c</sub> =6	1,45	2,362	2,94	3,162
D/h <sub>c</sub> =12	1,4	2,25	2,937	3,125

**Tab III.1.1.a**

• **D<sub>P1</sub>=8mm**

h/h <sub>c</sub>	1	2	3	3,5
D/h <sub>c</sub> =2	1,04	2,10	2,575	2,75
D/h <sub>c</sub> =6	1,025	1,975	2,40	2,575
D/h <sub>c</sub> =12	1,012	1,90	2,30	2,562

**Tab III.1.1.b**

• **D<sub>P1</sub>=12mm**

h/h <sub>c</sub>	1	2	3	3,5
D/h <sub>c</sub> =2	1,012	1,962	2,375	2,687
D/h <sub>c</sub> =6	1,012	1,80	2,35	2,55
D/h <sub>c</sub> =12	0,975	1,70	2,30	2,50

**Tab III.1.1.c**

**III.1.2.Influence du diamètre du paratonnerre horizontal D<sub>P</sub>**

• **D/h<sub>c</sub> = 2**

h/h <sub>c</sub>	1	2	3	3,5
<b>D<sub>P1</sub></b>	1,30	1,975	2,475	2,75
<b>D<sub>P2</sub></b>	0,975	1,80	2,25	2,40
<b>D<sub>P3</sub></b>	0,95	1,70	2,175	2,30
<b>D<sub>P4</sub></b>	0,925	1,40	1,90	2,175

**Tab III.1.2.a**

• **D/h<sub>c</sub> =12**

h/h <sub>c</sub>	1	2	3	3,5
<b>D<sub>P1</sub>=0.5mm</b>	1,175	1,80	2,30	2,55
<b>D<sub>P2</sub>=4mm</b>	1,05	1,60	2,00	2,30
<b>D<sub>P3</sub>=8mm</b>	0,925	1,35	1,675	1,937

<b>D<sub>P4</sub>=12mm</b>	0,875	1,25	1,60	1,90
----------------------------	-------	------	------	------

**Tab III.1.2.b**

**III.2.ZONES D'ATTRACTION DU PARATONNERRE HORIZONTAL POUR LA DEXIEME CONFIGURATION DE TERRE DISCONTINUE**

**III.2.1.Influence du rapport D/h<sub>c</sub>**

- **D<sub>P1</sub> = 0,5mm**

<b>h/h<sub>c</sub></b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>3,5</b>
D/hc = 4 (d90%)	1,25	1,90	2,60	2,80
D/hc = 6 (d90%)	1,25	1,90	2,70	2,85
D/hc = 8 (d90%)	1,25	2,00	2,75	2,90

**Tab III.2.1.a**

- **D<sub>P4</sub> = 8mm**

<b>h/h<sub>c</sub></b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>3,5</b>
D/hc = 2 (d90%)	0,80	1,60	1,90	
D/hc = 4 (d90%)	0,825	1,65	2,00	2,125
D/hc = 6 (d90%)	0,85	1,68	2,07	2,275
D/hc =8 (d90%)	1,025	1,675	2,162	2,30

**Tab III.2.1.b**

- **D<sub>P4</sub> = 12mm**

<b>h/h<sub>c</sub></b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>3,5</b>
D/hc = 2 (d90%)	0,90	1,55	1,90	2,20
D/hc = 4 (d90%)	0,9	1,60	2,00	2,20
D/hc = 6 (d90%)	0,90	1,625	2,175	2,40
D/hc =8 (d90%)	0,937	1,70	2,225	2,50

**Tab III.2.1.c**

**III.2.2.Influence du diamètre D<sub>P</sub> sur les zones d'attraction**

- **D/h<sub>c</sub> = 2**

<b>h/h<sub>c</sub></b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>3,5</b>
<b>D<sub>P3</sub> =4mm</b>	1,025	1,4	1,625	
<b>D<sub>P4</sub> =8mm</b>	0,75	1,1875	1,35	
<b>D<sub>P5</sub> =12mm</b>	0,8	1,15	1,3	1,425

**Tab III.2.2.a**

- **D/h<sub>c</sub> = 4**

<b>h/h<sub>c</sub></b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>3,5</b>
<b>D<sub>P1</sub></b>	1,05	1,325	2,2	2,425
<b>D<sub>P2</sub></b>	1	1,55	2,1	2,3
<b>D<sub>P3</sub></b>	1,025	1,425	1,875	2

<b>D<sub>P4</sub></b>	0,825	1,25	1,425	1,5
<b>D<sub>P5</sub></b>	0,8	1,15	1,4	1,425

**Tab III.2.2.b**

- **D/h<sub>c</sub> = 8**

<b>h/h<sub>c</sub></b>	1	2	3	3,5
<b>D<sub>P1</sub></b>	1,1	1,8	2,437	2,58
<b>D<sub>P2</sub></b>	1	1,7	2,3	2,4
<b>D<sub>P3</sub></b>	1	1,525	2,025	2,1
<b>D<sub>P4</sub></b>	0,962	1,325	1,675	1,8
<b>D<sub>P5</sub></b>	0,84	1,2	1,6	1,7

**Tab III.2.2.c**

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

#### III.3.1.Influence du rapport D/h<sub>c</sub>

- **D<sub>P1</sub> = 0,5mm**

<b>h/h<sub>c</sub></b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>3,5</b>
D/hc = 4 (d90%)	1,4	1,9825	1,9	
D/hc = 6 (d90%)	1,4875	2,25	2,625	2,725
D/hc =10 (d90%)	1,35	2,5	3,0125	3,125

**Tab III.3.1.a**

- **D<sub>P3</sub> = 4mm**

<b>h/h<sub>c</sub></b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>3,5</b>
D/hc = 4 (d90%)	1,1	1,8	1,8125	
D/hc = 6 (d90%)	1,1375	1,875	2,2	2,4
D/hc =10 (d90%)	1,2	1,95	2,375	2,65

**Tab III.3.1.b**

- **D<sub>P5</sub> = 12mm**

<b>h/h<sub>c</sub></b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>3,5</b>
D/hc = 4 (d90%)	0,825	1,5	1,55	
D/hc = 6 (d90%)	0,825	1,6	2,25	2,4
D/hc =10 (d90%)	0,9	1,8	2,35	2,475

**Tab III.3.1.c**

#### III.3.2.Influence du diamètre D<sub>p</sub> sur les zones d'attraction

- **D/h<sub>c</sub> = 4**

<b>h/h<sub>c</sub></b>	1	2	3
<b>D<sub>P1</sub></b>	1,025	1,8125	1,8

<b>D<sub>P2</sub></b>	0,9	1,6	1,7
<b>D<sub>P3</sub></b>	0,95	1,3	1,375
<b>D<sub>P4</sub></b>	0,925	1,125	1,15
<b>D<sub>P5</sub></b>	0,8	1,025	1,05

**Tab III.3.2.a**

- **D/h<sub>c</sub> = 6**

<b>h/h<sub>c</sub></b>	1	2	3	3,5
<b>D<sub>P1</sub></b>	1,025	1,785	2,2	2,525
<b>D<sub>P2</sub></b>	1,0	1,6	2,2	2,225
<b>D<sub>P3</sub></b>	1,0	1,575	2,025	2,075
<b>D<sub>P4</sub></b>	0,925	1,275	1,575	1,775
<b>D<sub>P5</sub></b>	0,8	1,2	1,45	1,475

**Tab III.3.2.b**

- **D/h<sub>c</sub> = 10**

<b>h/h<sub>c</sub></b>	1	2	3	3,5
<b>D<sub>P1</sub></b>	1,0	1,8	2,5	2,5625
<b>D<sub>P2</sub></b>	1,0375	1,725	2,3	2,425
<b>D<sub>P3</sub></b>	1,0	1,65	2,1	2,25
<b>D<sub>P4</sub></b>	1,0375	1,4	1,7	1,85
<b>D<sub>P5</sub></b>	0,825	1,28	1,65	1,7

**Tab III.3.2.c**

### III.4.ZONES D'ATTRACTION DU PARATONNERRE HORIZONTAL POUR LA QUATRIEME CONFIGURATION DE TERRE DISCONTINUE

**Influence du rapport D/h<sub>c</sub> sur les zones d'attraction**

- **D<sub>P3</sub> = 0,5mm**

<b>h/h<sub>c</sub></b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>3,5</b>
D/hc =1 (d90%)	1,475	2,45	3,2	
D/hc =2 (d90%)	1,475	2,4	3,125	3,375
D/hc = 6 (d90%)	1,475	2,325	3	3,225
D/hc =10 (d90%)	1,45	2,3	2,95	3,175

**Tab III.4.a**

- **D<sub>P3</sub> = 12mm**

<b>h/h<sub>c</sub></b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>3,5</b>
D/hc =1 (d90%)	0,975	1,8	2,425	
D/hc =2 (d90%)	0,975	1,8	2,4	2,6
D/hc = 6 (d90%)	1,0	1,775	2,35	2,575

*Annexes*

---

D/hc =10 (d90%)	0,975	1,725	2,3	2,5
-----------------	-------	-------	-----	-----

**Tab III.4.b**