

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



UNIVERSITÉ MOHAMED BOUDIAF DE M'SILA  
FACULTE DES SCIENCES ET SCIENCES DE L'INGENIEUR  
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

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

OPTION : COMMANDE ELECTRIQUE

THEME

---

*CONTRIBUTION A L'ETUDE NUMERIQUE DE LA Foudre DANS LES  
INTERVALLES D'AIR POINTE-PLAN*

---

*Proposé et Dirigé par:*

M<sup>r</sup>. CHOUCOU A/MADJID

*Présenté par :*

ABD ELKEBIR ABD ELHAKIM

DJAAFRI ABD ELKARIM

**Année universitaire : 2008 / 2009**

## REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier tout d'abord الله, seigneur de l'univers, qui a permis à ce travail de voir la lumière. A lui toute louange.

La présentation de ce modeste travail nous offre l'opportunité d'exprimer notre gratitude et reconnaissance à notre encadreur Mr ABD ELMADJID CHOUCOU pour son suivi et ses judicieux conseils qui nous ont permis de mener à bien notre mémoire.

Nous tenons à remercier également :

Tous les enseignants qui ont participé à notre formation, plus particulièrement monsieur S.Barkati pour ses conseils qui sont été très bénéfiques.

Mr Bendjaima.B, chef de département

Monsieurs les membres de jury de la qualité de leurs conseils et de l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant à la participation au jury de ce travail.

Nous exprimant notre sympathie et nous vifs remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire qu'ils soient tous assurés de notre profonde reconnaissance et trouvent dans ces mots l'expression de nos sincères remerciements.

---

---

Introduction Générale.....	1
----------------------------	---

## **CHAPITRE I : Foudre et protection contre la foudre**

I.1. INTRODUCTION.....	3
I.2. ELECTRICITE ATMOSPHERIQUE.....	3
I.2.1. Le condensateur terrestre .....	3
I.2.2. Différents types des décharges .....	4
I.2.2.1 Décharges intra - nuages .....	4
I.2.2.2 Décharges entre nuages .....	4
I.2.2.3 Décharges nuage - sol .....	5
I.3. PHYSIQUE DES PHENOMENES ORAGEUX.....	5
I.3.1. Distribution statistique des orages.....	5
I.3.1.1. Niveau kéraunique.....	5
I.3.1.2. Définition du foudroiement.....	5
I.3.1.3. Densité réelle de coup de foudre .....	5
I.3.1.4. Facteurs locaux influant sur le foudroiement.....	6
a) Facteurs topologiques.....	6
b) Facteurs géologiques.....	6
c) Concentration ionique de l'air (conductivité de l'air).....	7
I.3.2. Phénomènes précurseurs.....	7
I.3.2.1. Nuage orageux.....	7
I.3.2.2. Effet couronne au sol.....	9
I.4. CLASSIFICATION DES COUPS DE Foudre.....	9
I.4.1. Coup de foudre ascendant.....	10
I.4.2. Coup de foudre descendant négatif.....	11
I.4.3. Coup de foudre descendant positif.....	12
I.5. PROTECTION CONTRE LA Foudre .....	13
I.5.1. introduction .....	13
I.5.2. Mécanisme d'impact d'un coup de foudre négatif;;;.....	13
1.5.2.1. Distance d'amorçage.....	14
1.5.2.2. Structure du champ généré au sol par un traceur descendant .....	14
I.5.3. Le modèle Electrogéométrique.....	17

i.5.3. Méthode graphique pour la détermination de la zone de protection .....	17
a) Principe de la méthode de la sphère fictive .....	17
b) Application au cas d'une tige verticale .....	18
I.5.3.2 La zone d'attraction .....	20
II.6 Conclusion.....	22

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

II.1. INTRODUCTION.....	23
II.2. MODELE EXPERIMENTAUX UTILISEE .....	23
II.2.1 Les Configurations étudiés .....	24
II.3. VERIFICATION DU MODELE ELECTROGEOMETRIQUE.....	25
II.4 CAS D'UNE TERRE MAUVAISE CONDUCTRICE.....	26
II.4.1 Influence de la conductivité et l'épaisseur "e" du sol sur les zones d'attraction du paratonnerre vertical .....	26
II.5. MODELE EQUIVALENT TENANT COMPTE DES PROPRIETES ELECTROGEOLOGIQUES DU SOL .....	29
II.6 CAS D'UN SOL DISCONTINU .....	31
II.6.1 Paratonnerre situé sur la partie haute de la terre discontinue entre l'interface et l'axe de la tige .....	31
a) Influences du rapport $D/hc$ sur le niveau de terre fictive .....	32
II.6.2. Paratonnerre sur la partie haute de la terre discontinue, et l'axe de la tige situé entre l'interface et le paratonnerre .....	32
II.6.3. paratonnerre sur la partie basse de terre discontinu et l'axe de la décharge situé entre l'interface et le paratonnerre .....	33
a) Influence du rapport $hc/e$ sur les zones d'attraction du paratonnerre .....	35
II.6.4. Paratonnerre situé sur la partie basse de la terre discontinue entre l'axe de la tige décharge et l'interface .....	36
a) influence du rapport $hc/e$ sur les zones d'attraction .....	38
II.7 Conclusion.....	40

---

---

## **CHAPITRE III : CONTRIBUTION A LA MODELISATION DE DECHARGE DE Foudre**

III.1. INTRODUCTION.....	41
II.2. STRUCTURE GENERALE .....	42
III-3 PARAMATRE CARACTERISTIQUE DE LA DECHARGE .....	43
III-3-1 Nature du gaz.....	43
III-3-2 Géométrie de l'intervalle .....	44
III-3-3 Contrainte de tension.....	44
III-4- ETUDE DES GENERATEURS D'IMPULSIONS .....	45
III-4.1 Représentation du générateur d'impulsions par des circuits électriques équivalents .....	45
III-4-2 Analyse des circuits équivalent simplifiés .....	46
III-4.2.a- Analyse du premier circuit équivalent.....	46
III-4.2.b- Analyse du deuxième circuit équivalent.....	47
III-5 ETUDE DU GENERATEUR DE CHOC (type Marx).....	48
III.5.1 Principe de fonctionnement.....	48
III.5.2 Schéma pratique d'un générateur de choc.....	50
III.5.3 Etude de générateur de choc de type Marx en utilisant les circuits équivalents .....	52
III-6 APPLICATION SUR LA TENSION DE GENERATEUR DE CHOC.....	58
III-7 Conclusion.....	60
Conclusion général .....	61
Bibliographie.....	63

## INTRODUCTION GENERALE

Il est très clair aujourd'hui que les décharges électriques peuvent être générées par un nuage électrisé ; ce sont les orages on estime qu'il existe en permanence, autour du globe terrestre quelques deux milles orages, produisent une centaine de décharges par seconde, parmi celles-ci, celles qui frappent le sol sont appelées coups de foudre. Il en résulte un courant appelé courant de foudre, c'est un courant électrique comme les autres, qui circule suivant les lois ordinaires de l'électrotechnique, dont on peut prévoir le comportement dans la mesure où la configuration du système électrique se prête au calcul, et que l'on peut étudier à tension réduite au moyen de générateurs de choc.

Nous pensons que tous les moyens pratiques de protection contre la foudre se ramènent à un seul : offrir au courant un chemin conducteur aussi direct que possible et y interconnecter tous les éléments métalliques voisins où elle pense à tort ou à raison à trouver un trajectoire plus facile, il vaut mieux l'y aider par des interconnexions appropriées que de lui opposer des obstacles qui risquent généralement de présenter un point faible.

L'idée essentielle de tous les systèmes de protection, est donc de véhiculer, sans danger, les grandes quantités des charges électriques transportées par la foudre vers la masse terrestre, moyennant des paratonnerres (horizontaux ou verticaux) convenablement dimensionnés.

Ce langage peu animiste traduit la réalité physique : la foudre tâte l'espace avoisinant grâce à l'espèce de sensibilité que lui procure le champ électrique qu'elle propage à l'aide de ce champ, ce dernier lui procure un moyen d'action qui consiste à perforer les isolants en leur appliquant sa contrainte électrique. L'idée essentielle de tout système de protection doit être de lui éviter les occasions de mettre ce moyen en œuvre.

Dans le but d'atteindre une meilleure protection contre ce phénomène, des travaux de recherche ont mené, au développement de nouvelles méthodes de détection et de localisation des coups de foudre, à une connaissance améliorée du processus physique de la décharge, et à des conditions d'essais plus valides. Ces travaux ont permis d'élaborer une nouvelle méthode de détermination de la zone de protection d'une tige verticale. Cette méthode est basée sur la

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

Les recherches dans le domaine d'étude de la décharge de foudre présentent certaines difficultés ; Cet état de fait résulte bien évidemment de l'insuffisance des connaissances théoriques concernant des phénomènes complexes tels que l'ionisation, la formation et le développement des décharges qui se produisent dans l'air. Aussi ; l'élaboration des lois de prédétermination générales nécessite une meilleure compréhension des phénomènes en jeu, et l'amélioration de ces connaissances passe obligatoirement par l'étude de la physique de la décharge. Pour cela, le premier chapitre de ce mémoire, sera consacré au physique de la décharge de foudre, le mécanisme d'impact et le modèle électrogéométrique et son application dans le domaine de la protection.

Malgré une quantité impressionnante de résultats ayant nécessité des investissements et un temps considérables, les techniques actuelles présentent encore certains handicaps pour être appliquées à tout nouveau cas qui se présente. Dans le deuxième chapitre, nous présentons les résultats de certaines travaux de recherche entrepris dans le domaine d'étude de l'influence des propriétés électrologiques du sol sur les zones d'attraction d'un paratonnerre vertical avec les deux types de terre mauvaise conductrice et discontinue. Cette étude a été faite en utilisant un modèle expérimental réduit, au Laboratoire de Haute Tension de l'E.N.P.Alger.

Dans le dernier chapitre, nous essayons de s'approcher vers un modèle numérique de la décharge de foudre, un modèle qui va permettre de faciliter relativement l'étude de la foudre en passant vers une simulation numérique du phénomène par l'intermédiaire d'une modélisation globale de la décharge qui tient compte simultanément des quatre principales phases : streamers, leader, saut final et arc en retour.

## I-1 INTRODUCTION

Malgré le grand nombre de travaux consacrés à la foudre par les chercheurs depuis plusieurs décennies, ce phénomène reste encore assez mal connu.

La foudre et les phénomènes orageux peuvent être considérés de point de vue du physicien des phénomènes assez compliqués, qui cherche toujours à les comprendre et les expliquer pour une meilleure maîtrise.

Dans la première partie de ce chapitre, nous allons présenter le phénomène de la foudre, la décharge électrique et la formation des nuages orageux.

Dans la deuxième partie, nous étudions la physique de l'impact, et le modèle électrogéométrique et enfin la protection contre la foudre.

## I-2 ELECTRICITE ATMOSPHERIQUE

### I-2-1 Le condensateur terrestre

L'étude de l'électricité atmosphérique permanente conduit à représenter la terre comme une armature d'un immense condensateur, la seconde armature étant constituée par l'ionosphère. Ce condensateur est normalement chargé et il existe une différence de potentiel de 300 kV. Le sol étant chargé négativement par beau temps. Le champ électrique au sol est d'environ 100 à 150 V/m [2].

A ce champ de 100V/m correspond une densité de charge superficielle moyenne à la surface du sol de :

$$\sigma = E \times \epsilon_0 \quad (1.1)$$

Avec:

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

E: Champ électrique en Volts par mètre (V/m)

$\epsilon_0$ : Permittivité diélectrique du vide  $\approx 8.854$  (pF/m)

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

La densité de courant égale à:

$$\square = \gamma \times E \quad (1.2)$$

Avec :

$\square$  : Densité de courant en Ampères par mètre carré ( $A/m^2$ )

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

E : Champ électrique en Volts par mètre (V/m)

On en déduit que la densité superficielle de la charge à la surface de la terre est d'environ  $8.85 \times 10^{-10} (C/m^2)$  et que la densité de courant qui circule est de  $3 \times 10^{-12} (A/m^2)$ .

La surface de la terre étant d'environ  $5 \times 10^{14} m^2$ . Un courant permanent de 1500 A circule et le condensateur devrait donc se décharger en 300s. Or le champ électrique terrestre est permanent. Seules quelques légères variations sont observables en cours de journée [1].

## **I 2-2 Différents types des décharges**

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

### **I-2-2-1 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 [2].

### **I-2-2-2 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-2-2-3 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 [1].

## **I-3 PHYSIQUE DES PHENOMENES ORAGEUX**

### **I-3-1 Distribution statistique des orages**

#### **I-3-1-1 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).

Le niveau Kéraunique est par définition " le nombre de jours par an ou le tonnerre a été entendu".

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 [2].

#### **I-3-1-2 Définition du foudroïement**

Il est évident que la notion du niveau kéraunique est trop rudimentaire pour pouvoir fournir 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 foudroïement, par exemple la densité de coups de foudre au sol, exprimée en nombre de coups par kilomètre carré et par an [6].

#### **I-3-1-3 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 céramique [6].

#### **I-3-1-4 Facteurs locaux influant sur le foudroiement**

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 [1].

##### **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. C'est l'orage de chaleur, souvent très localisé.

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 [6] [2].

### **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 pour qu'un effet sensible puisse se manifester [1].

## **I-3-2 Phénomènes précurseurs**

### **I-3-2-1 Nuage orageux**

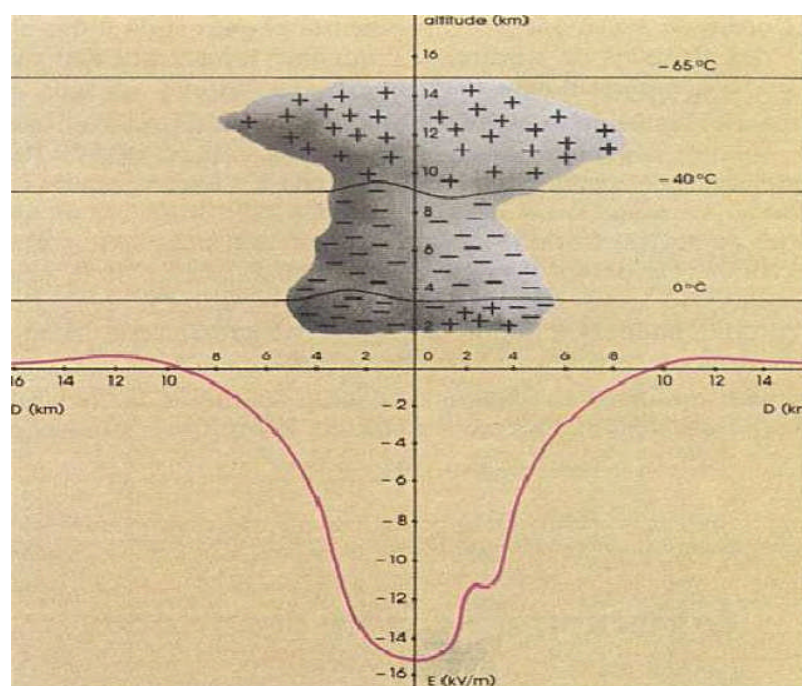
Les nuages orageux sont d'énormes masses généralement du type cumulo-nimbus, occupant une surface de quelques dizaines de kilomètres carrés, ayant une épaisseur de plusieurs kilomètres. Leur masse est de l'ordre de centaines de milliers de tonnes d'eau. Ils sont constitués de gouttes d'eau à leur partie inférieure et de particules de glace à leur partie supérieure [7]. 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 [1] 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'électrification, 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 [2].



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

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 [1].

### **I-3-2-2 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 [12], 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 [1].

## **I-4 CLASSIFICATION DES COUPS DE Foudre**

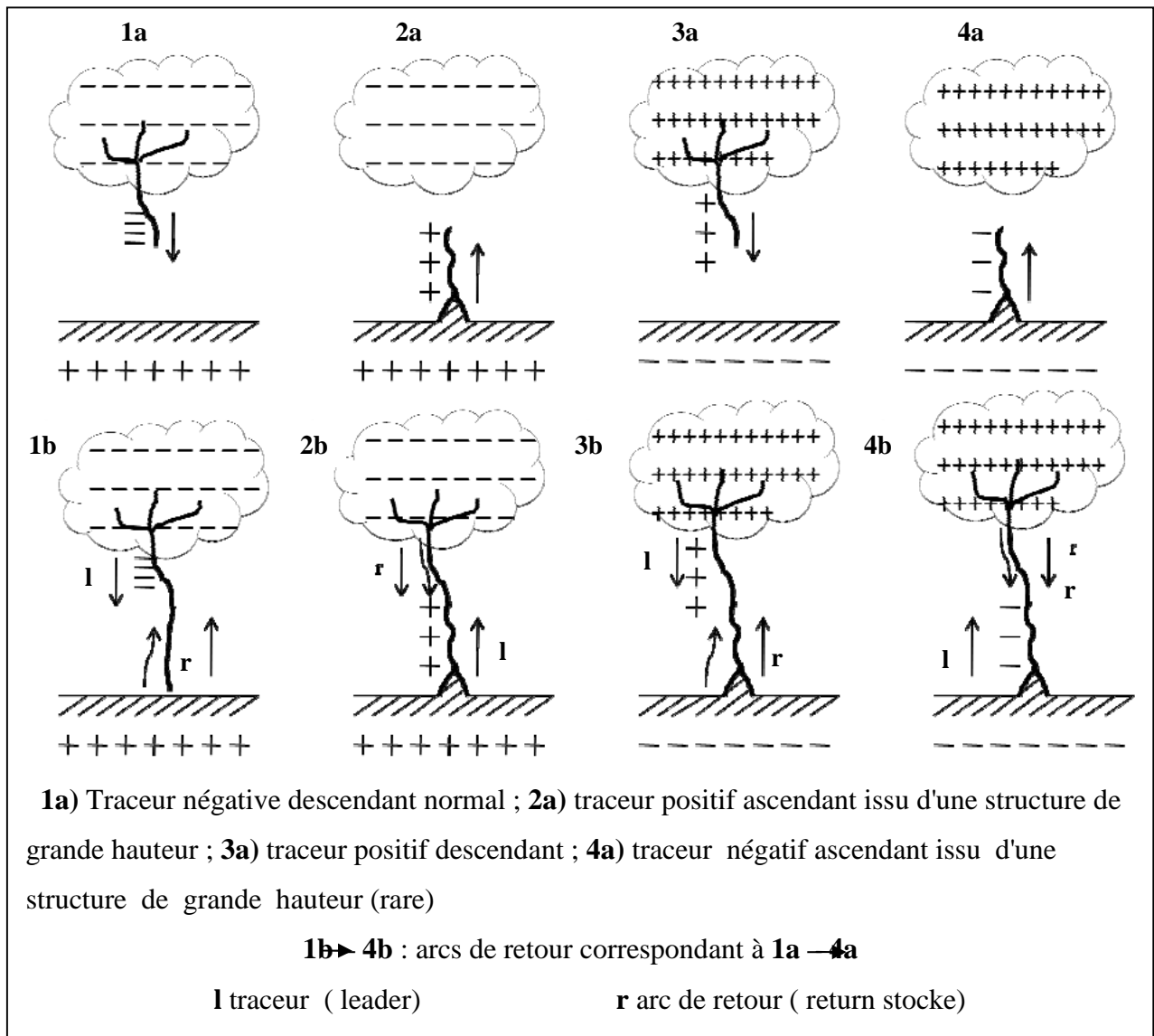
Les coups de foudre sont classés tout d'abord selon le sens de développement du traceur (ou premier leader) :

- Coups de foudre descendants (développement du traceur à partir du nuage)
- Coups de foudre ascendants (développement du traceur à partir du sol)

En second lieu, on classe les coups de foudre selon leurs polarités :

- Coups de foudre négatifs (décharge d'un nuage chargé négativement)
- Coups de foudre positifs (décharge d'un nuage chargé positivement)

La figure (I.2) résume cette classification selon K. Berger [7]



**Figure (I.2) :** Les différents types de coup de foudre selon k Berger [1]

### I-4-1 Coup de foudre ascendant

Dans un champ négatif, les effluves d'effet couronne qui apparaissent au sommet des aspérités du sol sont des effluves de type positif, puisque par effet d'induction le sol porte des charges positives. Ces effluves se développent d'autant plus loin et avec d'autant plus d'intensité, que les dimensions de l'aspérité sont plus importantes. A partir d'une certaine taille de l'aspérité, entraînant une certaine intensité d'effluve, le phénomène se modifie brusquement et l'effluve se transforme en une décharge ascendante, qui se développe suffisamment loin pour atteindre le nuage : c'est le coup de foudre ascendant.

De tels coups ascendants sont fréquemment observés à partir des tours de télévision modernes, dont la hauteur dépasse les 300m, à partir de gratte-ciels, et à partir de pics montagneux.

Notons cependant que ce mécanisme est plus probable en décharge positive, c'est à dire lorsque le nuage négatif induit des décharges superficielles positives dans le sol [2].

#### **I-4- 2 Coup de foudre descendant négatif**

La première phase d'un coup de foudre descendant négatif est une prédécharge faiblement lumineuse ou traceur qui se propage du nuage vers le sol en progressant par bonds de quelques dizaines de mètres (c'est le traceur par bonds ou steppe leader, suivant la terminologie anglo-saxonne).

Il y a entre les bonds des temps d'arrêt de l'ordre de 40 à 100  $\mu$ s, de sorte que sa vitesse de progression moyenne soit comprise entre 0.15 et 1 m/ $\mu$ s [1]. Au fur et à mesure que ce traceur progresse, la décharge se ramifie et la luminosité du chemin ionisé s'accroît.

Dès que la tête d'un traceur par bonds approche du sol, des prédécharges ascendantes se développent à partir de celui-ci, généralement depuis un arbre, une saillie, dans la direction du traceur.

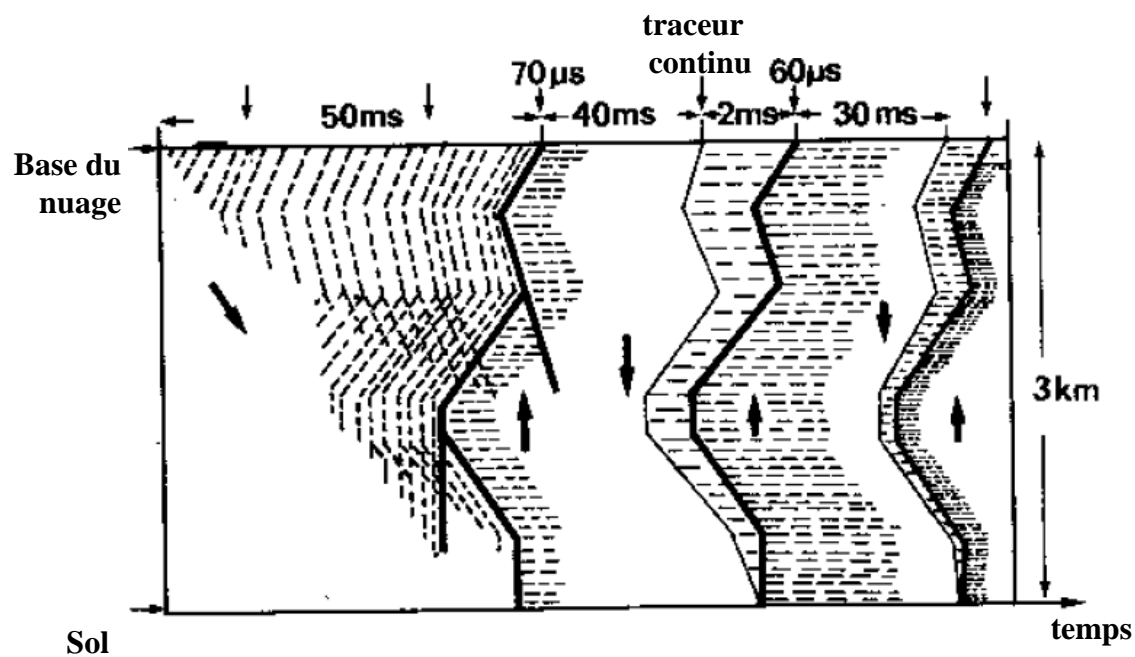
Lorsque l'une de ces prédécharges ascendantes et le traceur par bonds se rejoignent, il s'établit un pont conducteur, entre le nuage et le sol qui va permettre le passage d'un courant à forte intensité. Ce courant est en fait constitué par les charges superficielles du sol qui, en remontant le canal ionisé formé par le traceur, neutralisent les charges de ce dernier ; un trait fortement lumineux qui progresse depuis le sol jusqu'au nuage est observé, celui-ci a une vitesse estimée à  $10^8$ m/s, c'est l'arc de retour.

Un coup de foudre est en général, composé de plusieurs décharges partielles s'écoulant par le même canal ionisé. Le processus en est le suivant :

- Lorsque le courant de la première décharge a cessé de s'écouler, il peut se passer environ 100  $\mu$ s avant qu'une deuxième décharge apparaisse, le nuage pouvant contenir encore une certaine quantité de charges. Cette deuxième décharge commence par l'apparition d'un traceur qui, contrairement au traceur par bonds, progresse de façon continue, c'est le trait flèche dont la vitesse de propagation est de l'ordre de  $10^8$ m/s .
- Il est également suivi d'un arc en retour.
- Plusieurs décharges successives peuvent ainsi avoir lieu, selon ce type de mécanisme.

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

La figure (I.3) schématise le phénomène, conformément à l'analyse que nous venons d'en faire.



**Figure (I.3):** Schématisation d'un coup de foudre descendant [2]

#### I-4-3 Coup de foudre descendant positif

Tout comme le coup négatif, ce coup de foudre commence toujours par un traceur descendant. Dans le cas du traceur positif, le processus de bonds n'existe pas systématiquement, et la progression se fait le plus généralement de façon continue, avec une vitesse moyenne d'ordre de grandeur de 0.2 à 1 m/ $\mu\text{s}$ . Un coup de foudre descendant positif n'est constitué que d'un seul arc en retour, toutefois de durée beaucoup plus longue, et est de ce fait responsable en général de dégâts plus importants [2].

## **I-5 PROTECTION CONTRE LA Foudre**

### **I-5-1 Introduction**

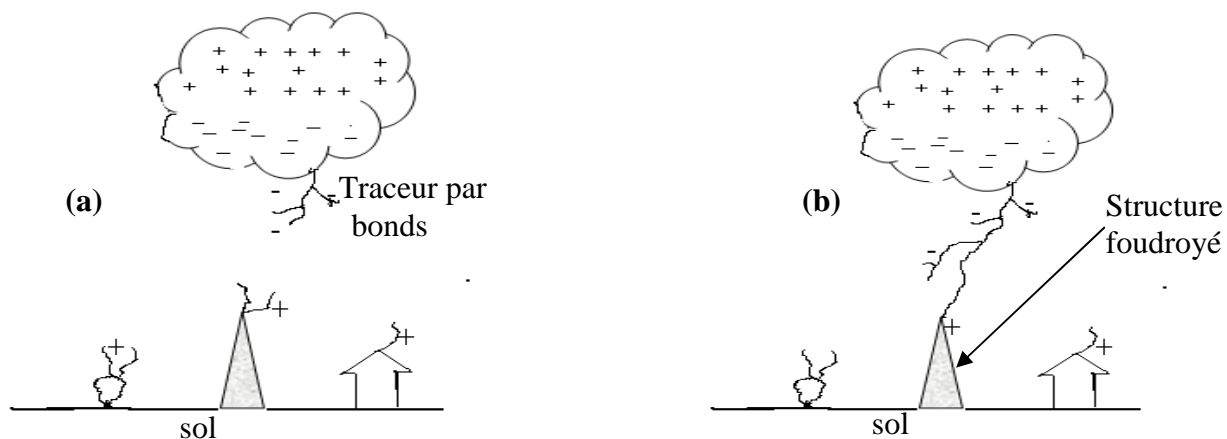
La connaissance actuelle des phénomènes physiques mis en jeu par la foudre, permis d'élaborer une nouvelle méthode de la détermination de la zone de protection d'une tige verticale ou des fils tendus horizontalement; elle permet également de définir la taille des mailles d'une cage.

Cette méthode est basée sur une nouvelle connaissance du mécanisme d'impact de la foudre, et est mise en œuvre au moyen d'un modèle mathématique appelé " modèle électrogéométrique " [10].

### **I-5-2 Mécanisme d'impact d'un coup de foudre descendant négatif**

Le traceur par bonds est un canal ionisé comparant un excédent de charges négatives, sachant qu'il existe une forte concentration de charges de même signe a sa pointe. Lorsque le traceur se rapproche du sol, le champ électrique dans la zone située à la verticale de cette concentration de charges s'accroît considérablement pour atteindre le seuil de la décharge [2].

Le point probable qui sera frappé par la foudre appelé le point d'impact du coup de foudre, est déterminé au moment où le traceur descendant atteint dans sa progression une certaine distance au-dessus du sol, le processus d'amorçage s'oriente dans une direction préférentielle qui est le point d'impact du coup de foudre.



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

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

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

### I-5-2-1 Distance d'amorçage

Une expression analytique de la distance entre traceur et l'objet au sol, pour laquelle une décharge ascendante rencontre le traceur descendant, a pu être établie. Cette distance est appelée distance d'amorçage.

Pourvu que la mise à la terre de cet objet soit suffisamment conductrice, cette expression analytique est:

$$d = 10 \times I^{2/3} \quad (1.3)$$

Avec:

d en mètre et I en kilo-Ampères.

Cette relation est mise en évidence sur le modèle de WHITEHEAD, lors des observations sur grand nombre de foudroiements de conducteurs de lignes aériennes[1].

### I-5-2-2 Structure du champ généré au sol par un traceur descendant

Le champ électrique au sol est fonction de la quantité de charges contenues dans le traceur, notamment à sa pointe, et la distance séparent celle-ci du sol. Généralement 10% de la charge du traceur est concentrée à sa pointe, et 90% restants sont répartis uniformément sur sa longueur [4].

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

Dans ces conditions, en désignant par "l"; la longueur de traceur, par "Q" : charge totale, "q" charge linéaire.

La formule suivante à été proposé :

$$Q = 0,1Q + l q \quad (1.4)$$

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

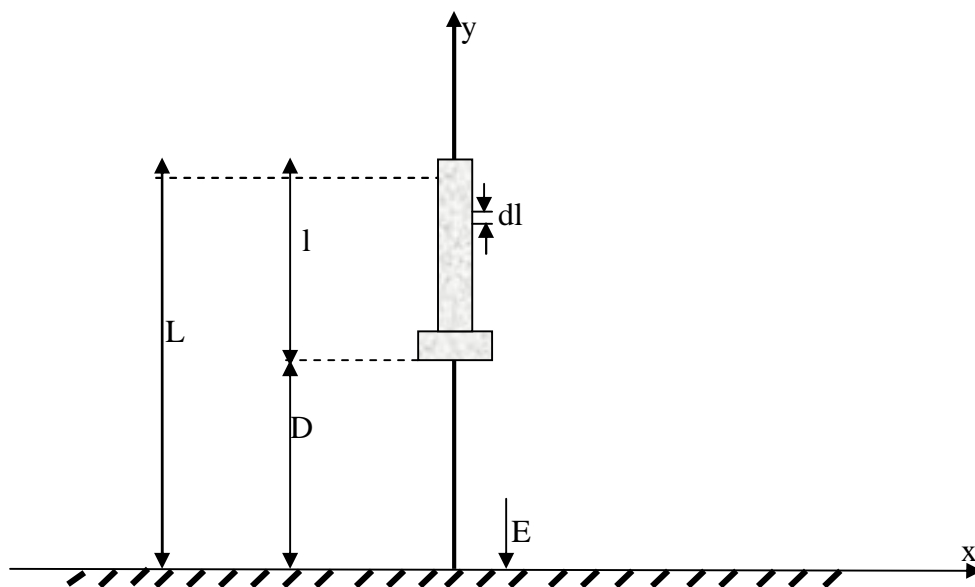
$$I = 15 Q \quad (1.5)$$

Avec: I en KA et Q en coulomb

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

L: hauteur de formation du traceur

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



Figure(I.5) : Champ au sol crée par un traceur descendant

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

$$E = \frac{q}{2\pi \varepsilon_0} \left[ \int_D^L \frac{dl}{l^2} + \frac{L-D}{9} \right] = \frac{q}{2\pi \varepsilon_0} (1 - k) \frac{9k+D^2}{9k^2} \quad (1.6)$$

Avec :  $k = \frac{D}{L}$

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

$$q = \frac{0,9 Q}{L} \quad (1.7)$$

A partir de (1.5) et (1.7) on déduit que

$$q = \frac{0,9 I}{15 L} \quad (1.8)$$

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

A titre d'exemple, supposons un nuage orageux, situé à  $L = 2\text{km}$  du sol, injectant une décharge électrique, les charges linéiques aussi obtenus pour certaines valeurs de courant crête sont consignées dans le tableau suivant [13].

I (kA)	10	20	25	50	75	100	150	200
$q$ ( $\mu\text{C}/\text{m}$ )	300	600	600	750	2250	3000	4500	6000

**Tableau (I.1) :** charge linéique en fonction de la courante crête

Si on remplace les valeurs de la charge linéaire de ce tableau dans l'expression (1.6), on obtient la relation  $E = f(d, I)$  qui est représentée sous forme de courbes sur la figure (I.6).

A partir de ces courbes on remarque que :

Plus la distance d'amorçage est faible, plus le courant et le champ électrique sont faibles. Le champ électrique augmente pour les basses altitudes du nuage [9]

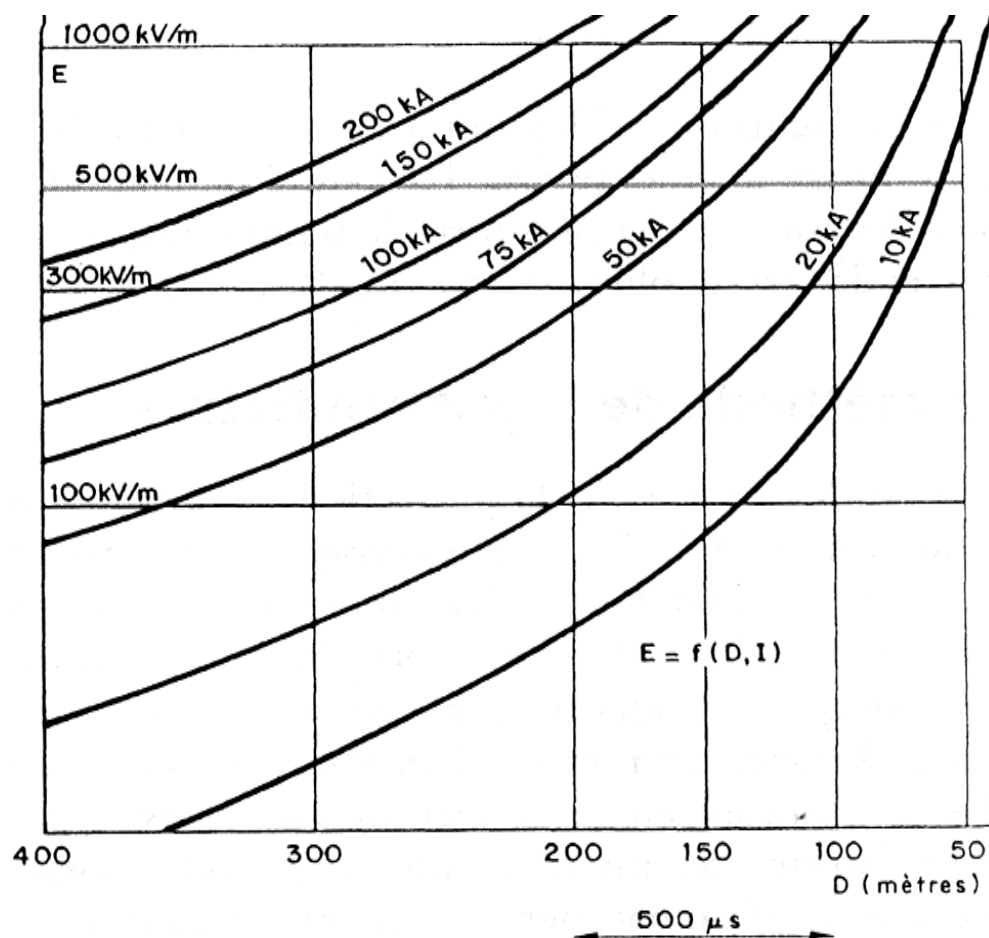


Figure (I.6) : Champ au sol créé par un traceur descendant [2].

### I-5-3 Modèle électrogéométrique

Le modèle électrogéométrique a pour objet la prédétermination des points d'impacts les plus probables de la foudre, et si nécessaire, prévoir des dispositifs de protection appropriés tels que, paratonnerres, cage de Faraday ou câbles de garde dans le cas des lignes aériennes [10].

#### I-5-3-1 Méthode graphique pour la détermination de la zone de protection

##### a) Principe de la méthode de la sphère fictive

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

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

D'où le procédé : on imagine que la sphère fictive de rayon "d" roule au sol, dans toutes les directions, sans jamais perdre le contact soit avec le sol, soit avec un objet proéminent.

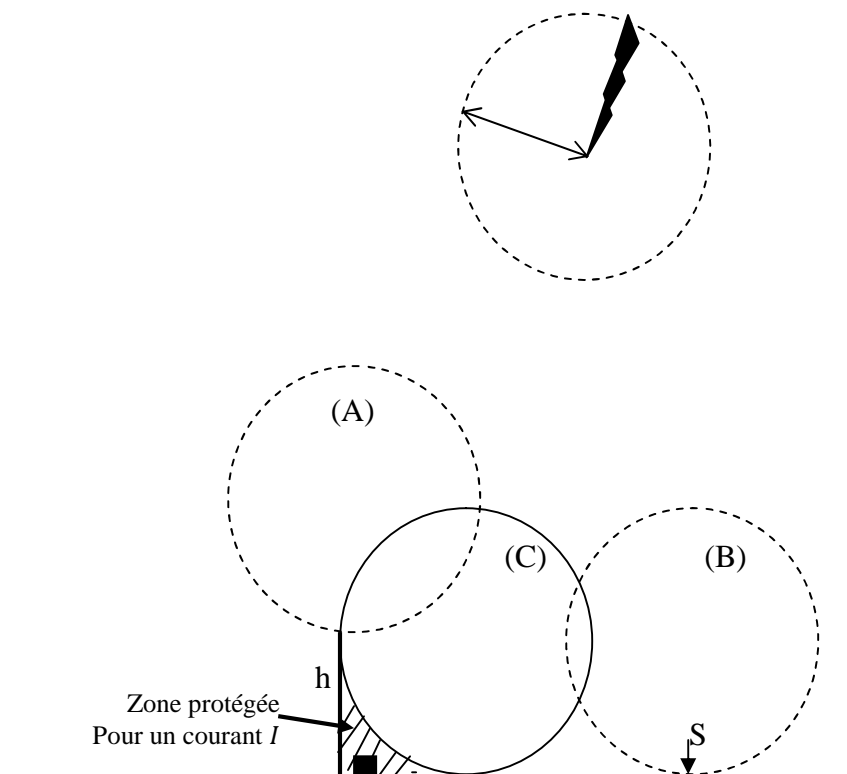
Si au cours de ce mouvement, la sphère entre en contact avec l'un des objets à protéger, le dispositif de protection devra être remanié jusqu'à ce qu'aucun de ces contacts ne puisse plus se produire [7].

### **b) Application au cas d'une tige verticale**

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

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

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



**Figure (I.7) :** Méthode de la sphère fictive appliquée à une tige verticale de hauteur  $h$

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

\* En fin, si la sphère entre en contact simultanément avec la tige et avec le sol, le coup de foudre pourra toucher soit l'une soit l'autre, mais l'impact ne pourra jamais se produire dans la zone hachurée qui constitue la zone de protection de la tige verticale.

Mais notons que cette zone est obtenue avec la sphère de rayon " $d$ " et qu'elle est donc relative à un courant de foudre d'intensité de crête " $I$ ".

Un paratonnerre de tige franklin va dépendre du rayon " $d$ " de la sphère, et par conséquent, de l'intensité " $I$ " du courant de foudre qui va suivre.

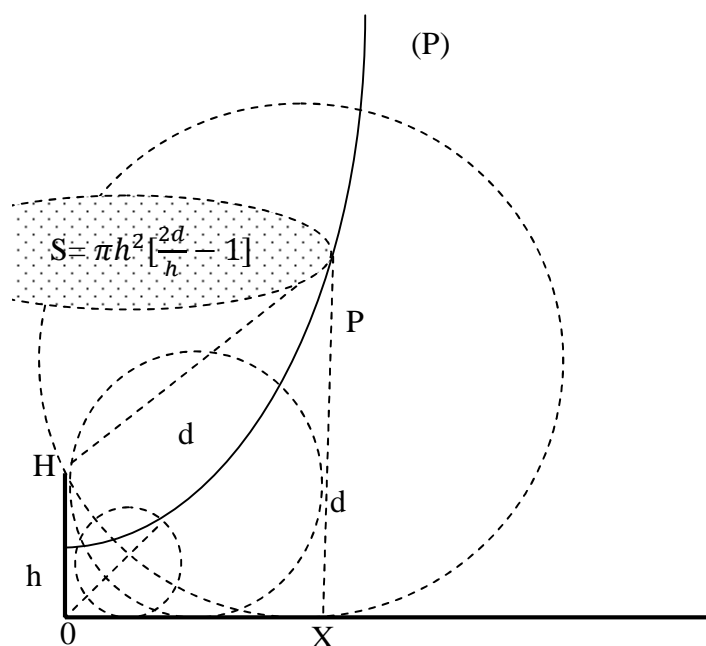
En particulier si " $d$ " est inférieur à " $h$ ", hauteur de la tige, le contact avec celle-ci peut avoir lieu bien au dessus de la pointe, ce qui explique parfaitement l'impact à mi-hauteur [6].

### I-5-3-2 La zone d'attraction

Pour déterminer la zone d'attraction de la tige, on considère l'ensemble des sphères qui touchent simultanément la tige et le sol, le lieu des centres de ces sphères délimite la zone d'attraction de cette tige

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

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



**Figure (I.8):** Zone de protection et de capteur d'une tige verticale

A partir de la figure (I.9) la parabole (P) définie par les points "P" à égale distance du sol et de la pointe H de la tige, divise le plan perpendiculaire à la terre en deux zones (I et II) est pour équation mathématique.

$$X^2 = 2PY \quad (1.9)$$

Ou P représente le paramètre de la parabole  $= Y - \frac{h}{2}$

$$X^2 = 2Y \left( Y - \frac{h}{2} \right) = 2h \left( Y - \frac{h}{2} \right) = 2hY - h^2 \quad (1.10)$$

$$X^2 + h^2 - 2hY = 0 \quad (1.11)$$

D'après l'hypothèse de la distance d'amorçage, tout traceur qui se présente dans la zone (I) figure (I.9) ne sera jamais capté par la pointe H et touchera le sol. Par contre, tout traceur qui se présente dans la zone (II) figure (I.9) comprise entre (OY) et (P) sera capté par la pointe des que la distance (HT) (T étant la pointe du traceur) Devient inférieure à la distance d'amorçage du coup de foudre considéré.

Donc  $HT_1 \leq d$ , représente la condition limite de capture de la pointe (H) tout long de la parabole, d'autre part ou a  $HT_1 = Y$  on remplace "Y" par "d" dans l'expression (1.11).

$$X^2 + h^2 - 2hd = 0 \quad (1.12)$$

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

$$d \geq h ; X \leq h \sqrt{\frac{2d}{h} - 1} \quad (1.13)$$

Aussi le volume de capture de la tige est un cône prolongé par un parabololoïde de révolution, la bas de ce volume constitue la surface de capture de la tige (Figure I.8) elle est donnée par

$$S = \pi h^2 \left[ \frac{2d}{h} - 1 \right] \quad (1.14)$$

Notons que : pour  $(d < \frac{h}{2})$ , l'expression (1.13), n'a pas de solution cela signifie que la pointe ne capte pas les courant très faible [1].

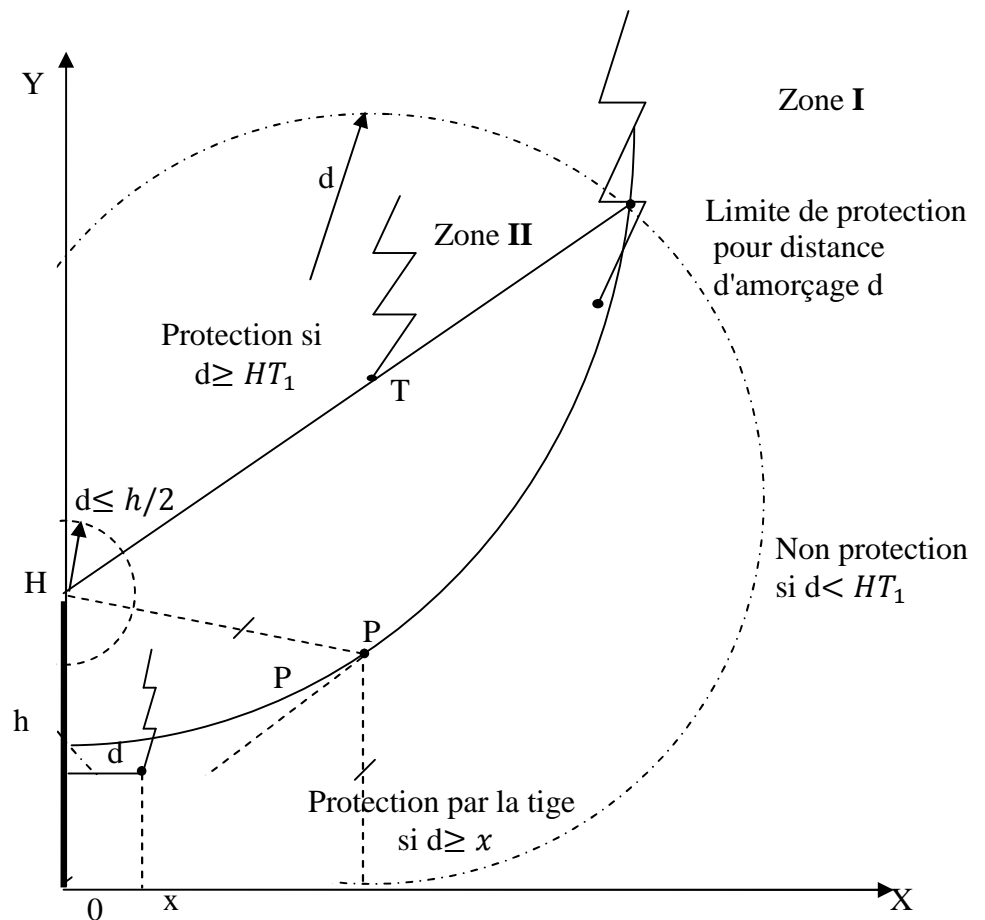
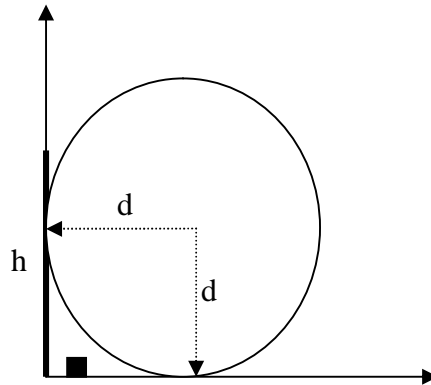


Figure (I.9): Zone de capture d'une tige verticale

Pour  $d < h$ , le rayon protégé au sol sera:  $X = d$ , dans ce cas l'augmentation de  $h$  est sans effet sur la zone de protection (Figure I.10)



**Figure (I.10) :** Zone de capture d'une tige verticale de hauteur  $h > d$  [10].

## II-6 CONCLUSION

La compréhension théorique du phénomène de décharge de foudre permet de faire une bonne base de connaissances sur cette décharge qui se classe comme phénomène électrique. Le courant de foudre est un courant électrique comme les autres, qui circule suivant les lois ordinaires de l'électrotechnique. Ces lois déterminent les points d'impact du coup de foudre.

Le modèle électrogéométrique constitue jusqu'à maintenant le modèle le plus pratique qui permet de déterminer les points d'impacts et la zone de protection d'un paratonnerre vertical ou tige de franklin et donc éliminer les risques de la foudre. Néanmoins, ce modèle présente des imperfections lorsque les propriétés électrologiques du sol varient. L'influence de ces propriétés de la terre sur les zones d'attraction d'un paratonnerre vertical sera le thème du chapitre suivant.

## II-1 INTRODUCTION

Dans le domaine de la protection contre la foudre, le modèle électrogéométrique est largement utilisé.

Cependant, ce modèle de protection considère que la terre est homogène et parfaitement conductrice, hypothèse très rarement rencontrée en pratique car les propriétés électrologiques du sol sont variables d'un site à l'autre ; le plus souvent, la terre est hétérogène au dessous d'un nuage orageux.

Dans ce chapitre, nous présentons une synthèse des résultats obtenus suite aux travaux de recherche sur les zones d'attraction d'un paratonnerre vertical avec terre mauvaise conductrice et terre discontinue effectués au niveau du Laboratoire Haute Tension d'E.N.P - Alger. Le modèle de la terre mauvaise conductrice est réalisé par " R. Belaïcha" [9] tandis que, le modèle de la terre discontinue est réalisé par "A. Chouchou" [10]

## II-2 MODELES EXPERIMENTAUX UTILISES [9,10]

Dans ces modèles réduits, le système pointe- plan est choisi pour simuler le cas pratique de la foudre, ce système constitué par une électrode haute tension et un plan conducteur ou moins conducteur mise à la terre simule le système réel composé du nuage chargé et de la terre. Dans ces modèles réduits le paratonnerre a été simulé par une tige conductrice en laiton de 3.5mm de diamètre connectée au plan conducteur mis à la terre, la décharge préliminaire d'un coup de foudre descendant négatif juste avant le saut final a été simulé par une tige conductrice en acier de 4.8mm de diamètre mise sous une tension de type choc de foudre négatif (-1.2/50  $\mu$ S) généré par un générateur de choc de type Marx. Pour chaque essai, le niveau de tension appliquée devait engendrer une décharge disruptive certaine dans le système sans paratonnerre ( $U_{100\%}$  ou  $p=1$ ).

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

Dans le cas du sol mauvais conducteur, la terre est simulée par une couche d'eau distillée reposant sur un plan conducteur mise à la terre.

Enfin, le modèle de la terre discontinue est composé de deux plaques métalliques situées à deux niveaux différents.

### II-2-1 Les Configurations étudiées

La figure ci-dessous donne les trois configurations utilisées dans l'étude de l'influence des propriétés électrogéologiques du sol sur les zones d'attraction d'un paratonnerre vertical.

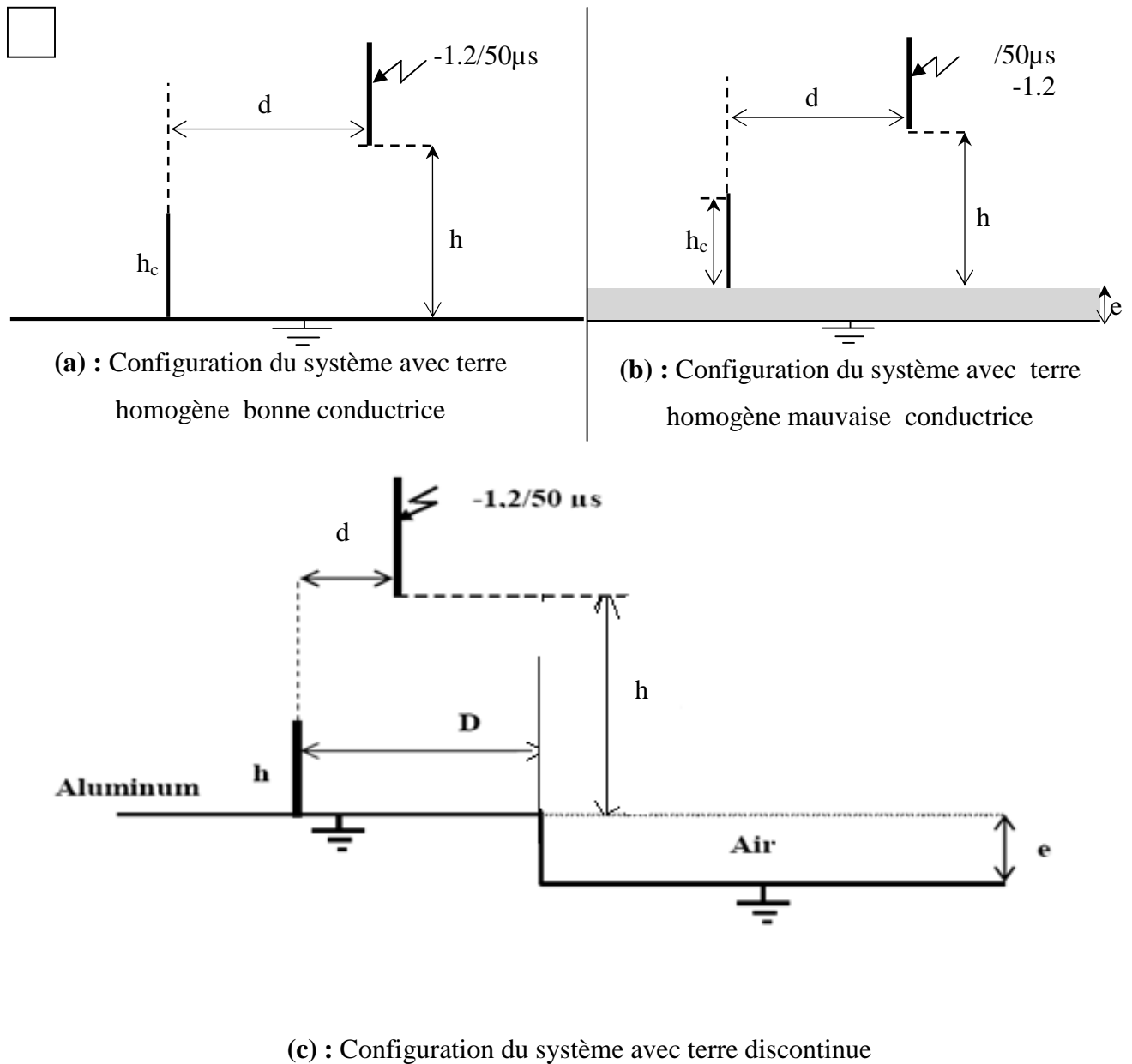


Figure (II.1) : Différentes configurations des systèmes étudiés.

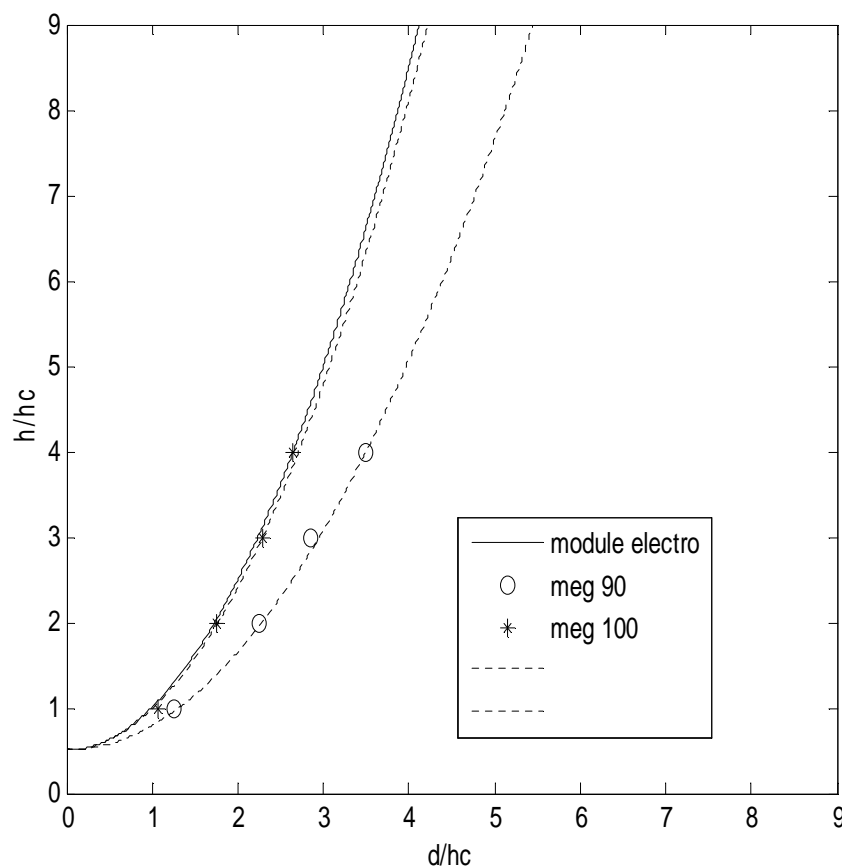
### II-3 VERIFICATION DU MODELE ELECTROGEOMETRIQUE

Conformément au modèle électrogéométrique, la zone d'attraction d'un paratonnerre est limitée, dans un plan perpendiculaire à la terre, par la parabole définie par l'ensemble des points équidistants de la terre et du mât du paratonnerre [16] [1].

$$X^2 - 2Y + 1 = 0 \quad (2.1)$$

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

Les résultats obtenus dans le cas d'une terre bonne conductrice en utilisant la configuration donnée par la figure II.1.a, montrent que, la zone d'attraction pour différentes valeurs de « h » et de « h<sub>c</sub> » coïncide avec celle définie par le modèle électrogéométrique donné par l'équation (2.1), pour les positions « d » à partir desquelles la probabilité d'impact sur le paratonnerre est égale à 100%. Pour les positions correspondantes à une probabilité d'impact de 90%, la zone d'attraction est un peu plus large (figure II.2).



**Figure (II.2):** Zones d'attraction dans le cas d'une terre bonne conducteur

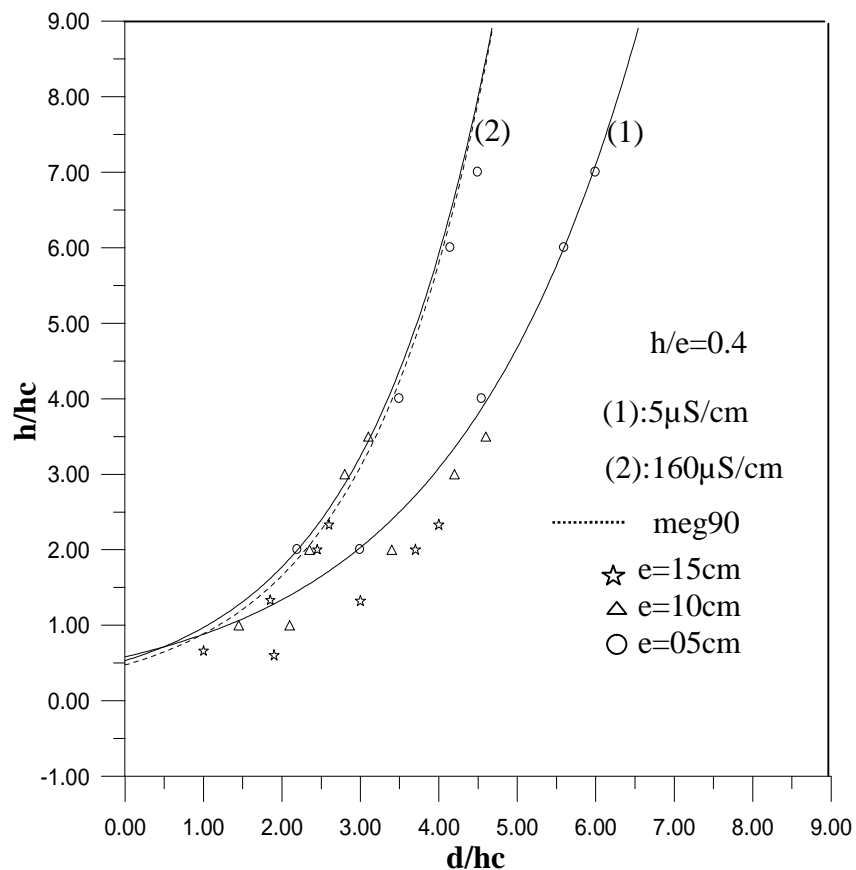
## II-4 CAS D'UNE TERRE MAUVAISE CONDUCTRICE

Nous présentons ici les résultats obtenus lorsque l'épaisseur et la conductivité d'un sol mauvais conducteur varient. La variation de l'épaisseur choisie est entre 5 à 15 cm et la conductivité varie de  $5\mu\text{s/cm}$  à  $160\mu\text{s/cm}$ .

### II-4-1 Influence de la conductivité et de l'épaisseur "e" du sol sur les zones d'attraction du paratonnerre vertical

Sur la figure (II.3), on remarque que pour un rapport " $hc/e=0.4$ " constant, les zones d'attraction s'élargissent au fur et à mesure que la conductivité du sol diminuait.

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



**Figure (II.3):** Zones d'attraction pour deux conductivités et différentes épaisseurs de la terre [9].

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

Dans le cas d'un sol mauvais conducteur, la quasi-totalité des charges positives est concentrée sur la pointe du paratonnerre qui présente ainsi un meilleur point d'impact pour la charge électrique  $Q$ . La force coulombienne qui guide cette dernière vers la pointe du paratonnerre est plus intense dans le cas d'un sol mauvais conducteur. De ce fait, la zone d'attraction d'un paratonnerre vertical sera plus large au dessus d'un sol ayant une faible conductivité [1].

Pour l'épaisseur, D'après la figure (II.3), on constate que l'augmentation de l'épaisseur " $e$ " faisait élarger de plus en plus les zones d'attraction pour une conductivité constante ( $5\mu\text{s/cm}$ ,  $160\mu\text{s/cm}$ ). Ce phénomène s'explique par la tendance de la densité volumique de charges vers la densité superficielle. Plus l'épaisseur " $e$ " diminue, plus les charges électriques contenues dans le liquide vont se localiser à la surface; on se rapproche ainsi d'un système pointe négative-plan parfaitement conducteur.

La figure (II.4) donne l'influence de la hauteur du paratonnerre sur les zones d'attraction. On remarque que plus le rapport  $hc/e$  augmente plus les paraboles tendent vers celle définie par le modèle électrogéométrique.

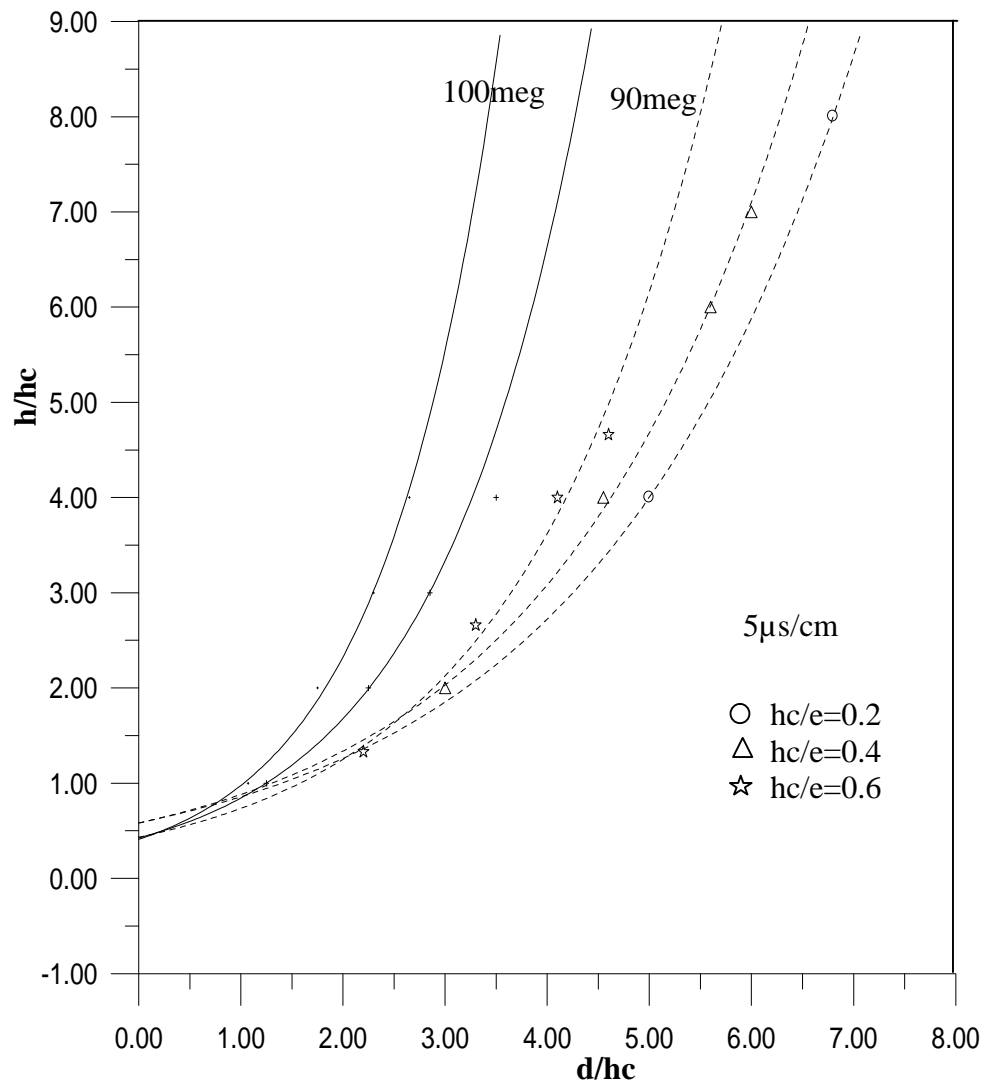
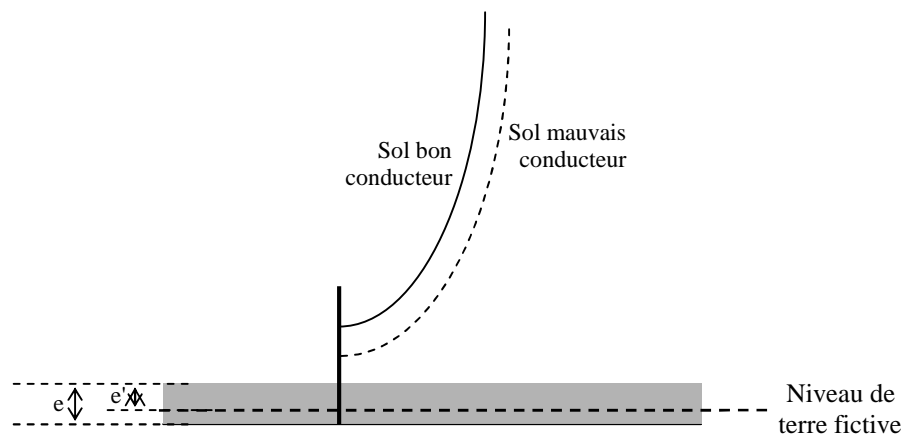


Figure (II.4): Zone d'attraction pour différents rapports  $h_c/e$

## II-5 MODELE EQUIVALENT TENANT COMPTE DES PROPRIETES ELECTROGEOLOGIQUES DU SOL

Dans le cas où la terre est homogène et présente une mauvaise conductivité et d'après les résultats présentés précédemment, les zones d'attraction peuvent être nettement plus larges que celle définie par le modèle électrogéométrique classique. Pour tenir compte de l'influence de la nature du sol ; on peut définir un niveau de terre fictive ( $e'$ ) Figure (II.5).



**Figure (II.5) :** Niveau de terre fictive d'un système avec sol mauvais conducteur

Suivant ce modèle équivalent, pour une disposition «  $h, h_c, e$  » donnée, la zone d'attraction d'une terre mauvaise conductrice, pour une conductivité donnée est limitée par la parabole d'expression

$$X^2 - 2y (1 + e'/h_c) + [1 - (e'/h_c)^2] = 0 \quad (2.2)$$

$$\text{Avec : } x = d/h_c \text{ et } y = h/h_c$$

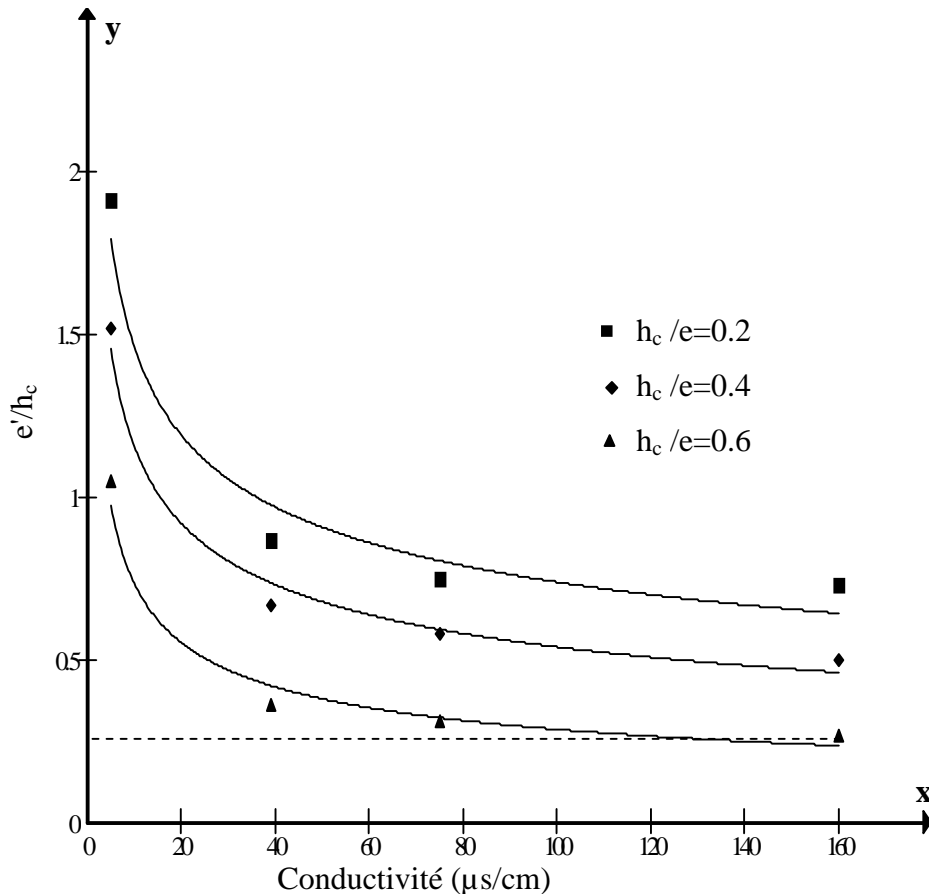
L'équation (2.2) admet pour solution

$$e'/h_c = (x^2 - 2y + 1 + y^2)^{1/2} - y \quad (2.3)$$

D'après l'expression précédente, lorsque le rapport ( $e'/h_c$ ) tend vers zéro, on tend vers la zone d'attraction définie par le modèle électrogéométrique sur sol homogène

parfaitement conducteur. Tandis que, lorsque ce rapport devient grand, on tend vers des zones plus larges [9].

Pour mieux illustrer cette influence, une relation réduite  $e'/h_c = f(\sigma)$  peut donner la variation de niveau de terre fictive pour les rapports  $(h_c/e)$  constants (figure II.6).



**Figure (II.6) :** Variation du niveau de terre fictive suivant la conductivité.

D'après l'équation (2.3) quand le rapport  $e'/hc$  tend vers zéro, nous retrouvons la zone d'attraction définie par le modèle électrogéométrique classique. Quant ce rapport devient grand, nous obtenons des zones plus larges.

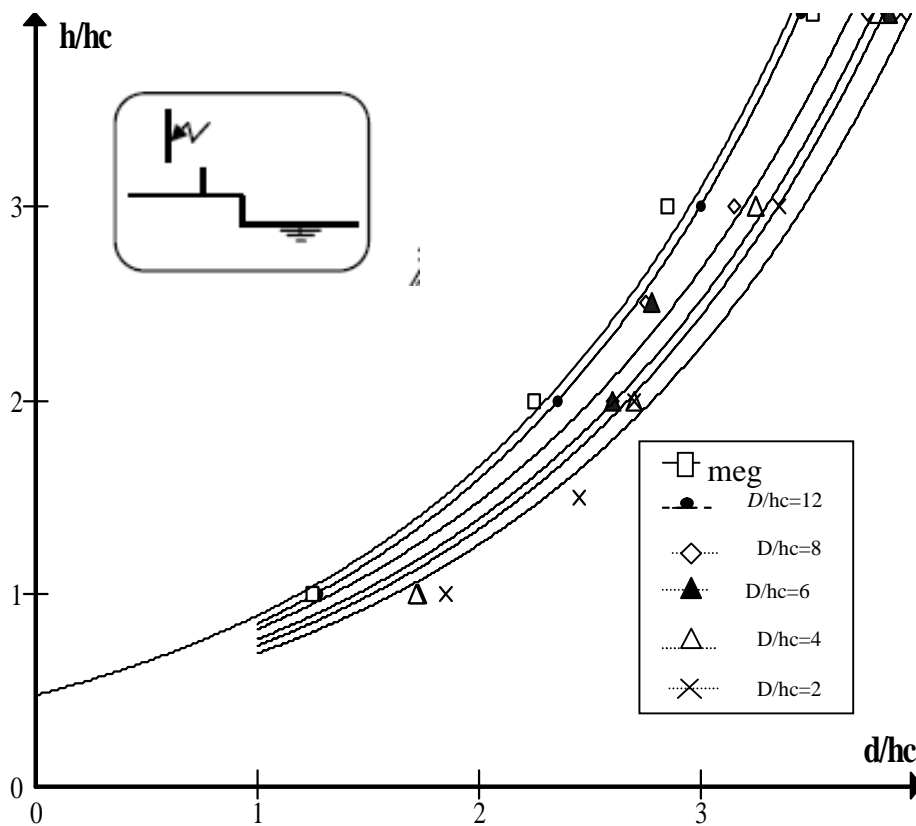
Pour les différentes valeurs du rapport  $h_c/e$  et de la conductivité de l'eau choisies dans cette étude, le niveau relatif de terre fictive  $e'/hc$  tend vers celui de la terre bonne conductrice lorsque la conductivité du sol et/ou le rapport  $h_c/e$  augmente [10] [3].

## II-6 CAS D'UN SOL DISCONTINU

Dans le cas d'un sol discontinu (figure II.1.c), deux configurations ont été étudiées suivant la position du paratonnerre sur la partie haute ou basse de la terre discontinu [10].

### II-6-1 Paratonnerre situé sur la partie haute de la terre discontinue entre l'interface et l'axe de la tige

La figure (II. 7) donne les zones d'attraction en fonction de la distance du paratonnerre par rapport à l'interface (rapport  $D/hc$ ), on constate que lorsque le paratonnerre est très proche de l'interface ( $D/hc=2$ ), la zone d'attraction est plus éloignée. Cette dernière se rapproche vers celle définie par le modèle électro géométrique classique au fur et à mesure que le paratonnerre s'éloigne de l'interface. Pour  $D/hc=12$ , les points obtenus coïncident avec la parabole donnée par le modèle électro géométrique classique. En effet, pour cette disposition du paratonnerre, l'interface n'a aucun effet, sur les zones d'attraction.



**Figure (II.7) :** Zones d'attraction verticale située sur de partie haute de la terre discontinue entre l'interface et l'axe de la tige [10]

### a) Influence du rapport $D/hc$ sur le niveau de terre fictive

A partir de la figure (II.8) qui présente la variation  $\epsilon/hc=f(D/hc)$ , on remarque que le niveau de la terre fictif varie dans le sens inverse de la variation du rapport  $D/hc$ . Pour  $D/hc$  suffisamment grand ( $D/hc=12$ ), le niveau relatif de la terre fictive  $\epsilon/hc$  tend vers celui du sol bon conducteur

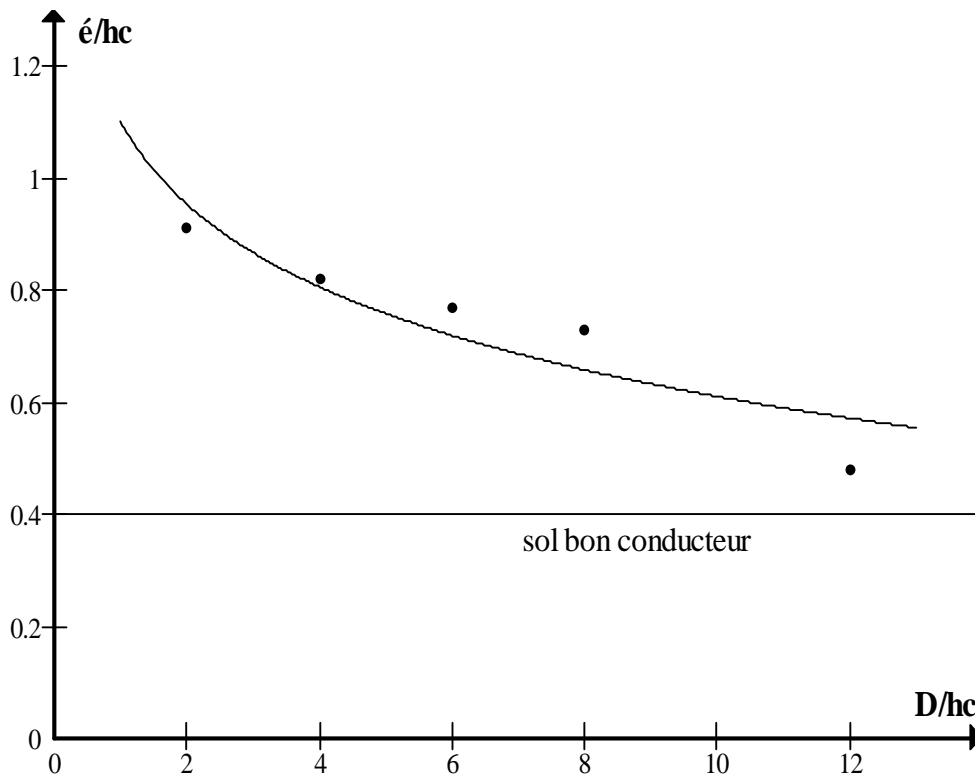
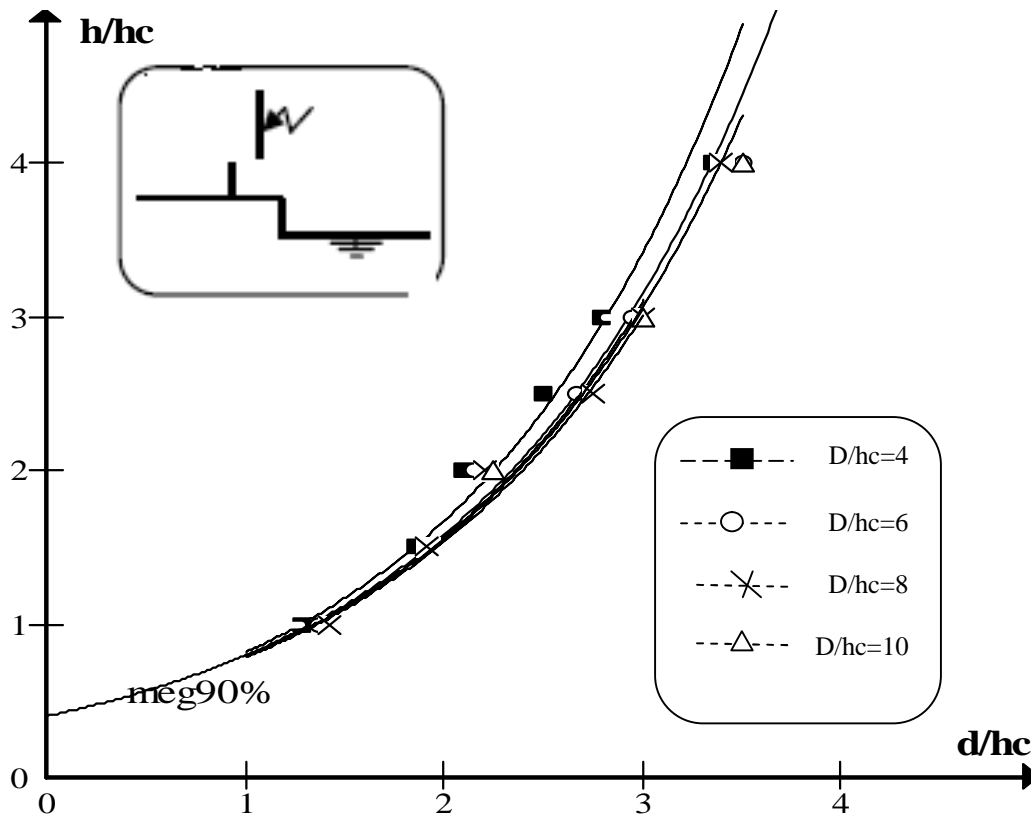


Figure (II.8) : Influence de rapport  $D/hc$  sur le niveau de terre fictive

### II-6-2 Paratonnerre sur la partie haute de la terre discontinue, et l'axe de la tige situé entre l'interface et le paratonnerre

Les résultats présentés sur la figure(II.9) montrent que lorsque le paratonnerre est relativement proche de l'interface  $D/hc=4$ , la zone d'attraction est plus petite que celle définie pour un sol homogène bon conducteur. Cela nous conduit à conclure que dans ce cas la présence de l'interface où le champ électrique est relativement intense amoindrit l'efficacité du paratonnerre. En effet, les décharges de foudre sont attirées par le paratonnerre dans une zone plus petite que celle définie par le modèle électrogéométrique classique. Nous citons aussi que l'interface n'a aucun effet sur les zones d'attraction qui sont confondues avec celle donnée par le modèle électrogéométrique classique dès que le rapport  $D/hc$  devient supérieur ou égal à 6.



**Figure (II.9) :** Zones d'attraction d'un paratonnerre vertical situé sur de partie haute de la terre discontinue et l'axe de la tige situé entre l'interface et le paratonnerre

### II-6-3 Paratonnerre sur la partie basse de la terre discontinue et l'axe de la décharge situé entre l'interface et le paratonnerre

D'après la figure (II.10), lorsque le paratonnerre s'approche de l'interface, la zone d'attraction est plus petite que celle définie pour un sol homogène parfaitement conducteur.

Tandis que lorsque le paratonnerre s'éloigne ( $D/hc > 10$ ), la zone d'attraction devient confondue avec celle donnée par le modèle électrogéométrique classique. Cette constatation a été vérifiée pour un rapport ( $hc/e = 4$ ). Pour  $hc/e = 1.6$  il n'y a pratiquement aucune influence de l'interface sur l'attraction des décharges par le paratonnerre. En effet, les zones d'attraction pour les différentes positions de paratonnerre par rapport à l'interface sont confondues avec celle définie pour un sol homogène bon conducteur figure (II.11)

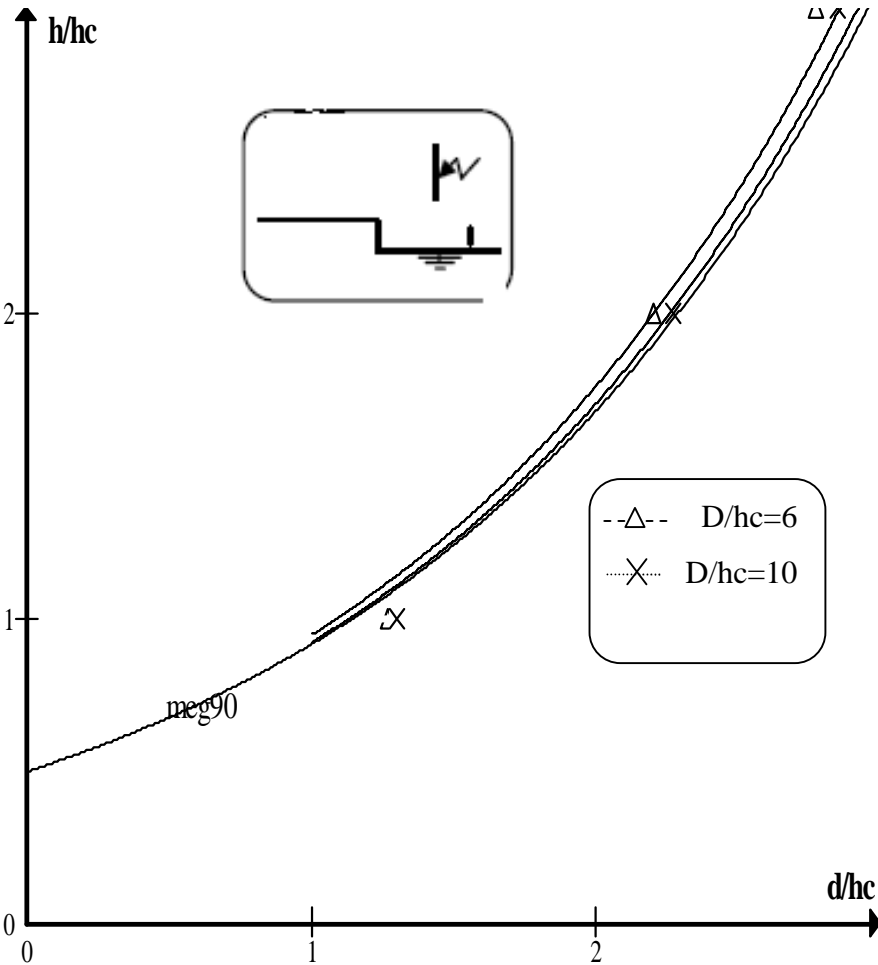
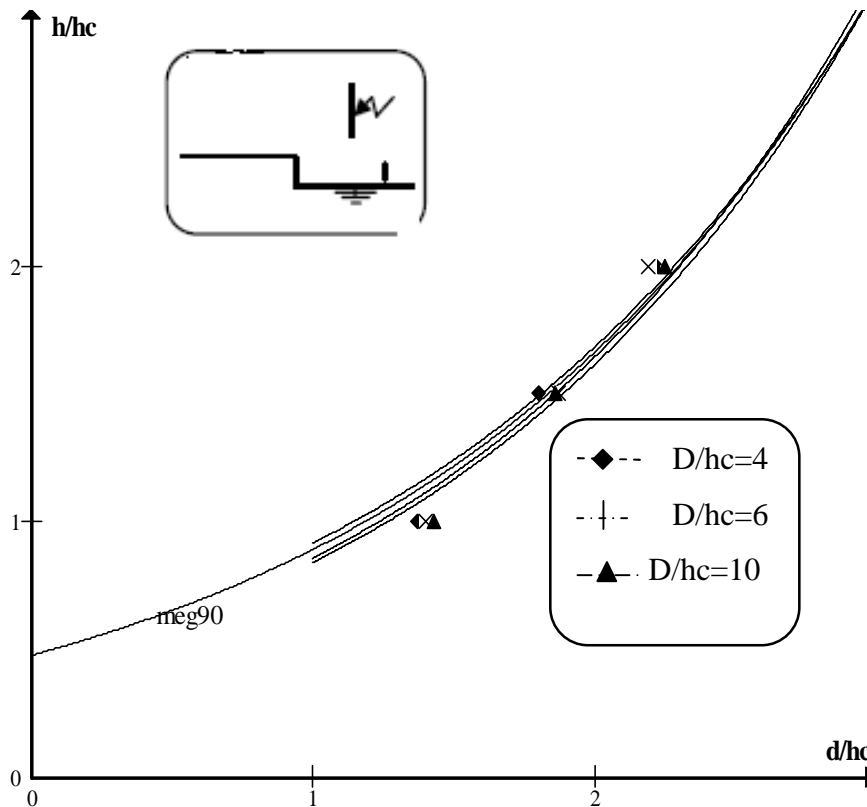


Figure (II.10) : Zones d'attraction d'un paratonnerre verticale pour un rapporte  $hc/e= 0.4$



**Figure (II.11) :** Zone d'attraction d'un paratonnerre vertical pour un rapport  $hc/e=1.6$

#### a) Influence du rapport $hc/e$ sur les zones d'attraction du paratonnerre

D'après la figure (II.12), les zones d'attraction sont plus petites que celle donnée par le modèle électrogéométrique

Pour  $hc/e=0.4$ , la plupart des décharges sont attirées par l'interface.

Pour  $hc/e=0.8$ , la zone d'attraction est plus petite.

Pour  $hc/e=1.2$ , la zone d'attraction devient plus large que celle définie avec la structure précédent ( $hc/e=0.8$ ), mais reste plus petite que celle donnée par le modèle électrogéométrique classique.

Pour ( $hc/e=1.6$ ) la zone d'attraction devient confondue avec celle définie pour un sol homogène bon conducteur.

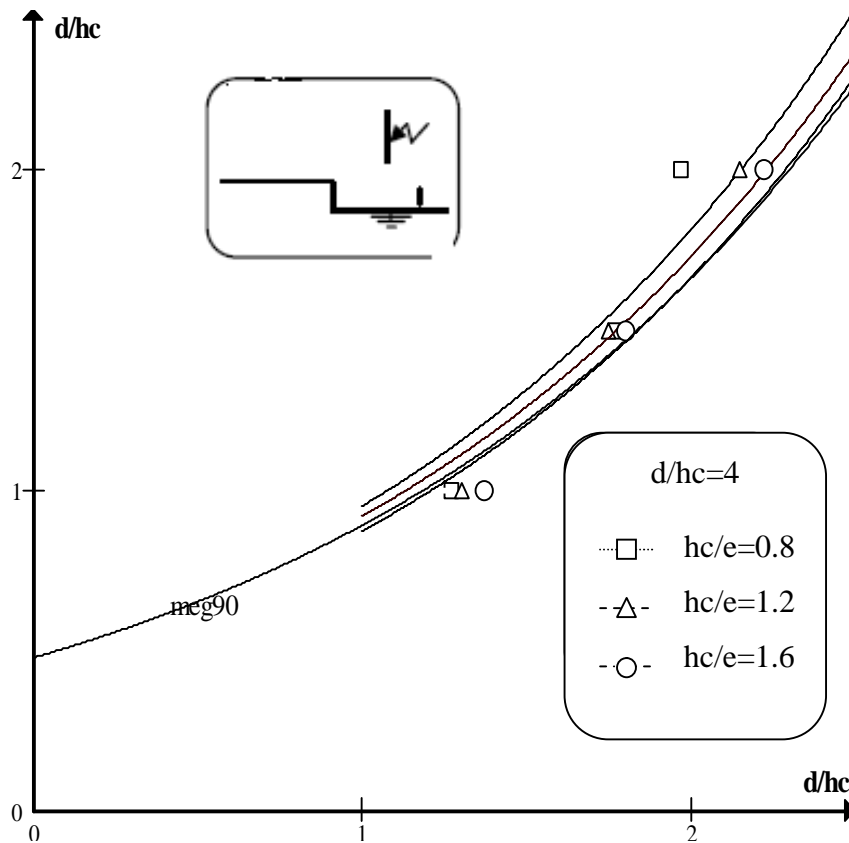


Figure (II.12) : Influence du rapport  $hc/e$  sur les zones d'attraction du paratonnerre

#### II-6-4 Paratonnerre situé sur la partie basse de la terre discontinuée entre l'axe de la tige de décharge et l'interface

Les résultats obtenus avec cette configuration sont présentés par les figures (II.13 et II.14). Nous constatons que les zones d'attraction du paratonnerre pour  $hc/e=0.4$  sont légèrement plus larges lorsque le rapport  $D/hc$  diminue. Tandis que pour  $hc/e=1.6$ , les paraboles sont confondues avec celle donnée par le modèle électrogéométrique, indépendamment de la position du paratonnerre.

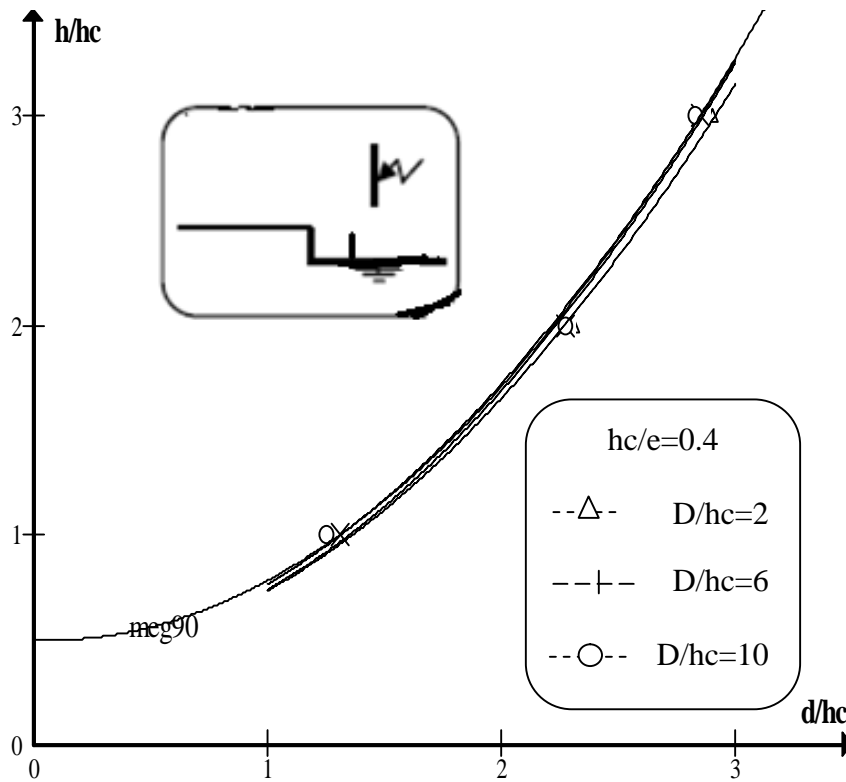


Figure (II.13) : Zones d'attraction d'un paratonnerre vertical pour un rapport  $hc/e=0.4$

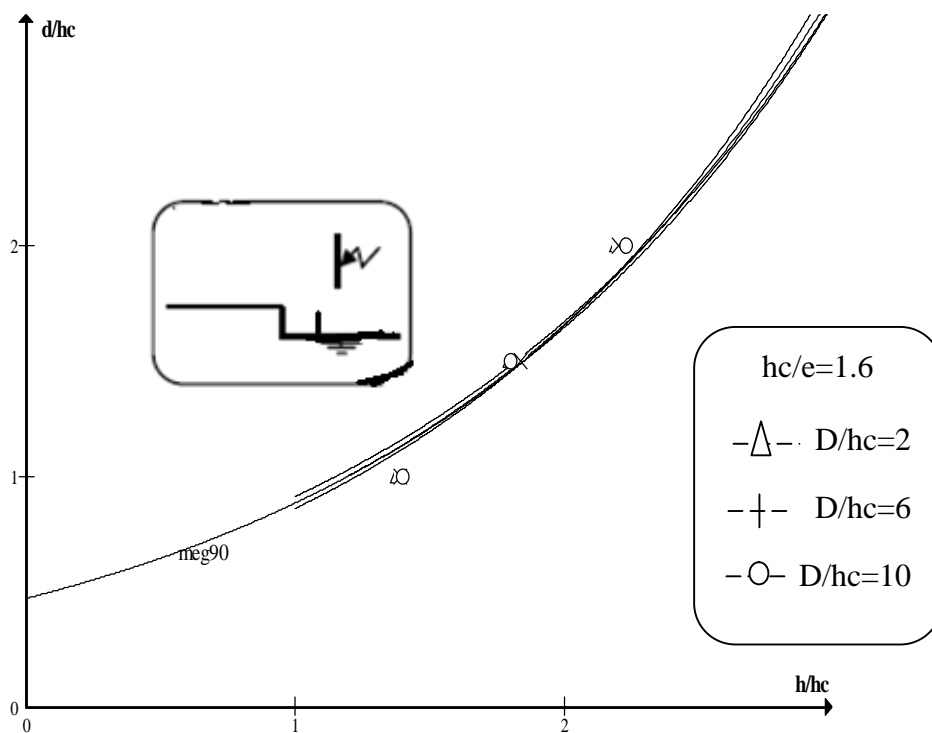
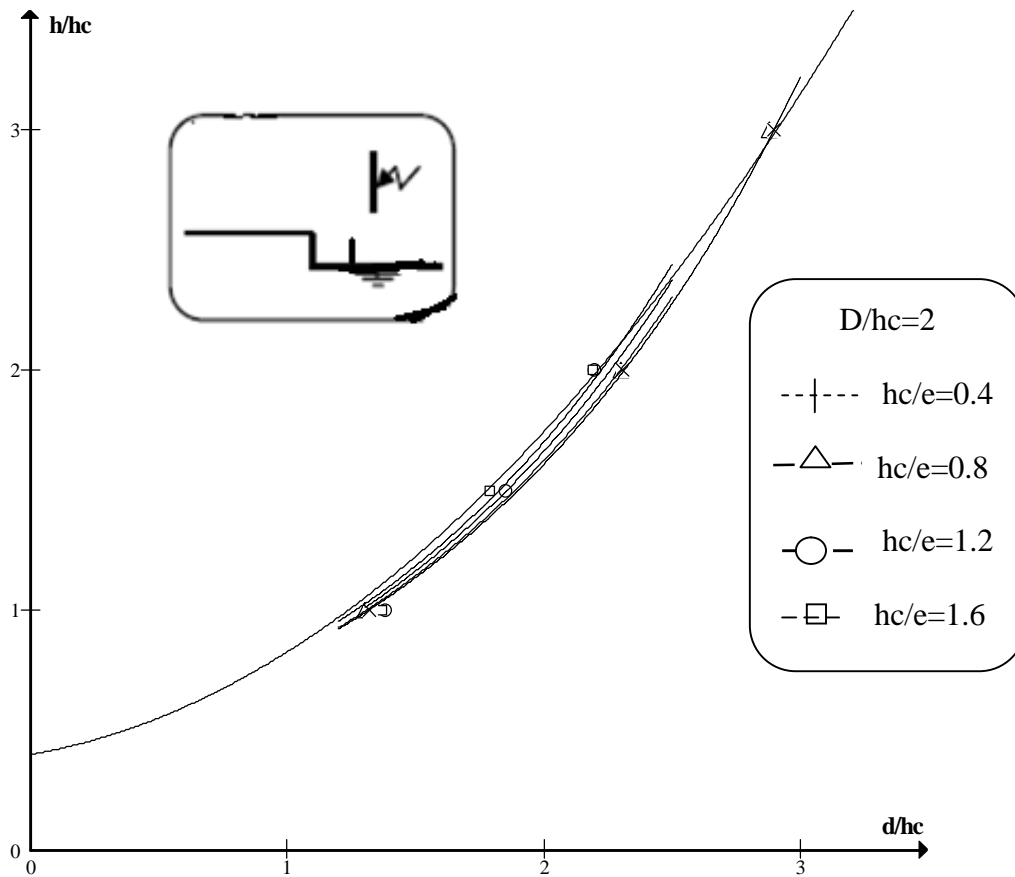


Figure (II.14) : Zones d'attraction d'un paratonnerre vertical pour un rapport  $hc/e=1.6$

**a) influence du rapport  $hc/e$  sur les zones d'attraction**

La figure (II.15) montre que pour un rapport de  $hc/e < 1$ , les zones d'attraction sont les plus larges, cependant la plus grande zone a été obtenue avec  $hc/e=0.4$ . Par contre, lorsque ce rapport devient supérieur à l'unité, il n'y a pratiquement pas d'influence de l'interface sur les zones d'attraction.



**Figure (II.15) :** Influence du rapport  $hc/e$  sur les zone d'attraction du paratonnerre  $D/hc=2$

D'après la figure(II.16), nous constatons aussi que le rapport  $\epsilon/hc$  tend vers celui du sol homogène bon conducteur lorsque le rapport  $hc/e$  augmente et la distance relative  $D/hc$  du paratonnerre par rapport à l'interface augmente [8].

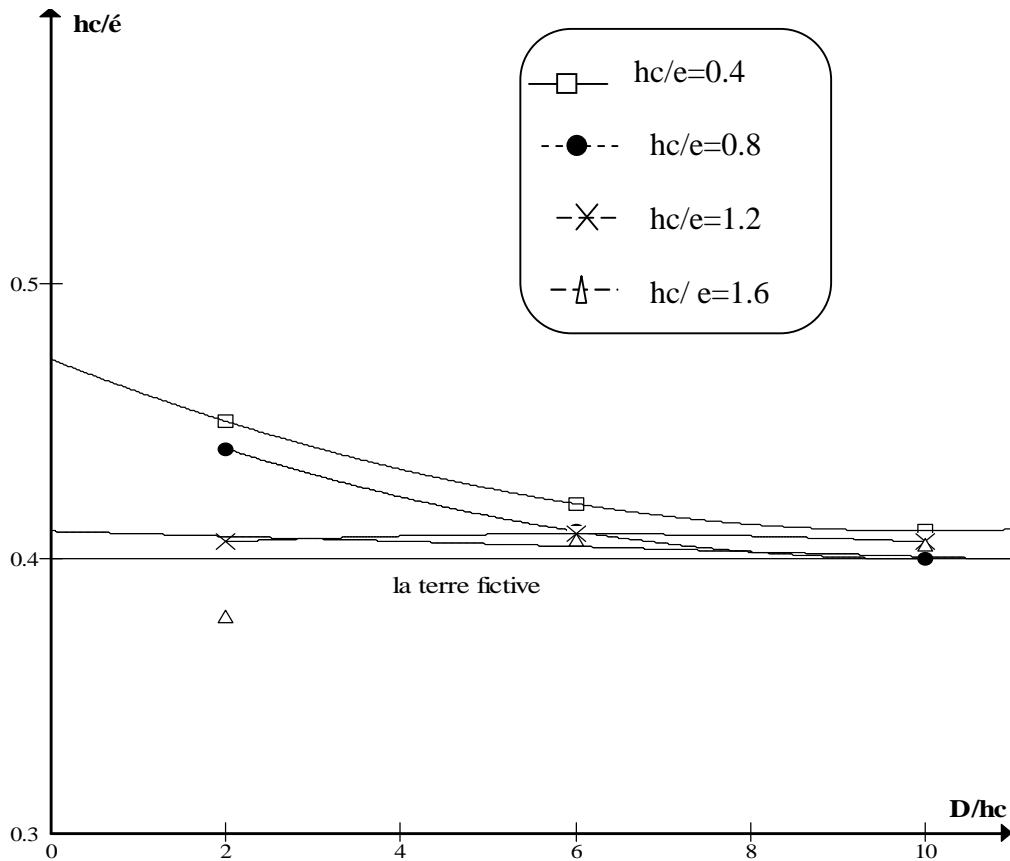


Figure (II.16) : Influence de rapport  $hc/e$  sur le niveau de terre fictive

## II-7 CONCLUSION

Dans le cas d'une terre mauvaise conductrice, les zones d'attraction des paratonnerres peuvent être plus larges que celle définie par le modèle électrogéométrique, cet élargissement dépendrait surtout de l'épaisseur et de la nature de la terre mauvaise conductrice et plus particulièrement de sa conductivité, ainsi que de la hauteur du paratonnerre.

Dans le cas de la terre discontinue, l'influence de l'interface diminue lorsque le paratonnerre s'éloigne. Elle est plus marquée lorsque le paratonnerre est situé très proche de l'interface, dans le cas contraire, c'est-à-dire pour des positions du paratonnerre relativement loin, l'interface ne présente aucun effet sur les zones d'attraction du paratonnerre qui se trouvent confondues avec celle définie par le modèle électrogéométrique classique. On note que des zones d'attraction plus larges sont enregistrées lorsque le paratonnerre est situé sur la partie haute de la terre discontinue entre l'axe de la décharge et l'interface. D'autre part, des zones réduites sont notées sur la même partie de la terre et lorsque la décharge évolue entre l'interface et le paratonnerre.

La notion de niveau de terre fictive ou modèle équivalent, permet d'assimiler la terre mauvaise conductrice ou discontinue à une terre homogène bonne conductrice située à une certaine profondeur ( $e'$ ) du sol réel, ce niveau augmente au fur et à mesure que la zone d'attraction est plus large. Cette notion de terre fictive permet d'aboutir à une définition de la zone d'attraction, plus générale que celle définie par le modèle électrogéométrique classique.

### III-1 INTRODUCTION

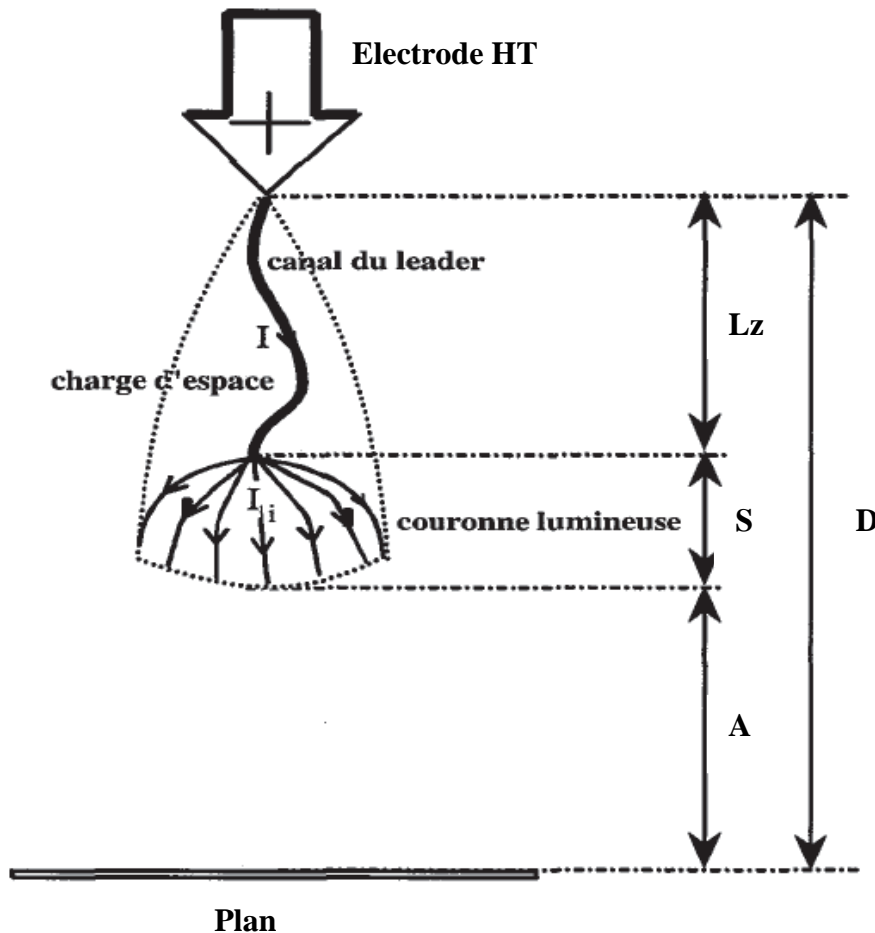
Les systèmes de transmission de puissance, les isolations et les dispositifs de protection sont souvent soumis à deux principaux types de contraintes diélectriques: celles causées par les surtensions de foudre (ondes de foudre) et les surtensions de manœuvre dues aux opérations sur le réseau lui même (ondes de manœuvre). Ces dernières ont un impact économique considérable, car elles permettent de dimensionner les systèmes à haute tension.

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

Dans ce chapitre, nous allons contribuer à la modélisation numérique de la décharge de foudre ; cette modélisation est basée sur le principe des circuits équivalents qui simulent les différentes étapes de la foudre naturelle. Ainsi, deux circuits équivalents sont présentés, le premier de la décharge complète et le deuxième sera réservé au dispositif utilisé dans les laboratoires pour les simulations de la décharge réelle qui est le générateur de choc (type Marx), qui délivre des ondes de choc de type choc de foudre (positive et négative) [11][17].

### III-2 STRUCTURE GENERALE DE LA DECHARGE

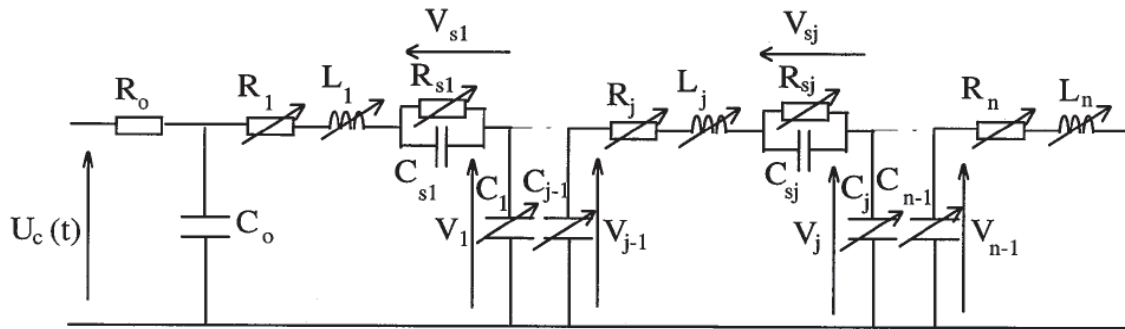
De façon générale, une décharge positive se présente comme un leader se propageant dans l'intervalle avec à sa tête une couronne lumineuse (figure III- 1).



**Figure(III.1):** Représentation schématique du système leader – streamer [11].

L'idée générale consiste à assimiler la décharge à un conducteur cylindrique et à le représenter par un schéma électrique équivalent comme indiqué à la figure (III-2).  $R_i$ ,  $L_i$ , et  $C_i$  étant respectivement la résistance, l'inductance et la capacité caractérisant la décharge, déterminés par des lois physiques, la théorie des gaz et par calcul de champs électromagnétiques.

Le critère de propagation utilisé est celui de **Hutzler**, la tête du leader positif est remplacée par une électrode équivalente. Si le champ électrique est suffisamment supérieur à un champ électrique critique  $E_c$  - pour entretenir un effet de couronne, le canal du leader est alimenté par le courant d'effet couronne et peut donc s'allonger dans l'intervalle.



**Figure(III.2):** Schéma électrique équivalent à la propagation de la décharge [11][17].

### III-3 PARAMATRE CARACTERISTIQUE DE LA DECHARGE

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

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

#### III-3-1 Nature du gaz

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

L'influence des conditions d'ambiance (humidité, température, pression, ...) est très complexe et se prête mal à des formulations empiriques d'usage limité .On introduit la densité relative de l'air "  $\delta$  ", par le rapport de sa densité dans les conditions de pression  $p_1$  ou  $p_2$  et de température  $T_e$ , à sa densité dans des conditions de référence  $p_0=1013\text{mbars}$  et  $T_e=200\text{C}$  :

$$\delta = \frac{0,392P_1}{273+T_e} = \frac{2,92P_2}{273+T_e} \quad (3.1)$$

où  $p_1$  est la pression barométrique en mm Hg et  $p_2$  la pression barométrique en kPa .

La fluctuation naturelle du taux d'hygrométrie est donnée par un facteur qui peut se mettre sous la forme:

$$K_H = 1 + \alpha(H_0 + H) \quad (3.2)$$

Avec:  $\alpha$  est un coefficient empirique dépend de la géométrie des électrodes,

H : L'humidité absolue présente dans l'air est exprimée en  $\text{g/m}^3$  et est référencée à la valeur  $H_0=11 \text{ g/m}^3$ .

### III-3-2 Géométrie de l'intervalle

L'étude de la géométrie de l'intervalle détermine la différence de potentiel donnée appliquée entre les deux électrodes, l'amplitude, l'orientation et la variation spatiale du champ électrique.

Comme les problèmes industriels relatifs aux hautes tensions sont généralement des problèmes de tenue diélectrique, nous nous intéresserons au type de géométrie présentant les plus faibles performances de tenue diélectrique c'est à dire menant le plus facilement au claquage de l'intervalle : la géométrie pointe – plane une géométrie dont on a des résultats expérimentaux à partir des essais au laboratoires présentés au deuxième chapitre de ce mémoire.

### III-3-3 Contrainte de tension

Il est impossible de reproduire en laboratoire les formes complexes de surtensions observées ou attendues en réseau ; c'est pourquoi, la plupart des résultats ont été obtenus avec une onde de forme simple, en double exponentielle produite par les générateurs de choc. Si l'on veut étudier les problèmes de claquage de grands intervalles d'air.

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

- La durée conventionnelle de front  $T_1 = 1.67 (T_{90}-T_{30})$  ( $\mu\text{S}$ ).
- La durée de queue à mi - amplitude  $T_2$ .

$T_{90}$  : est le temps au bout duquel l'impulsion atteint 90% de sa valeur crête **Ucr**

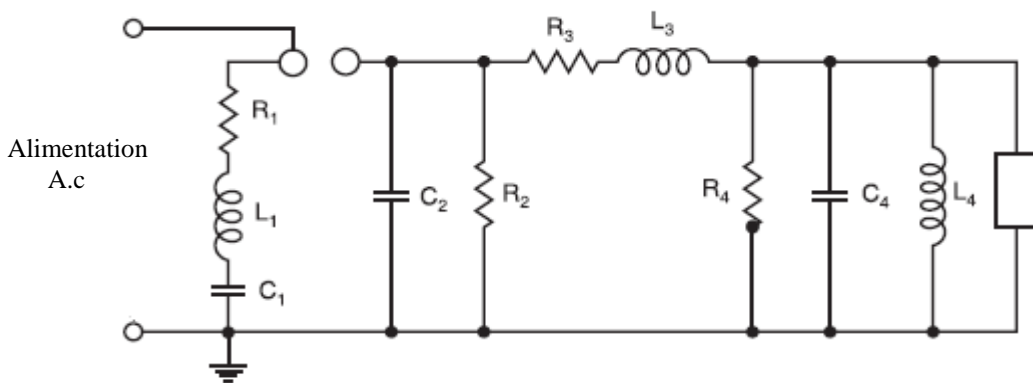
$T_{30}$  : correspondant à **30%Ucr**. Chaque forme d'onde est notée par le facteur ( $T_1 / T_2$ ).

En réglant convenablement la valeur de différentes résistances et de condensateur de front, on peut faire varier les formes des tensions produites par ces générateurs, et les ajuster en fonction des besoins des recherches. Précisons que la générateur de 6 millions de volts est constitué de 30 étages de condensateurs, pouvant chacun être chargé à 200 kV [1].

### III-4 ETUDE DES GENERATEURS D'IMPULSIONS

#### III-4-1 Représentation du générateur d'impulsions par des circuits électriques équivalents

La figure (III.3) représente un circuit équivalent d'un générateur d'impulsion en un seul étage.



**Figure (III.3):** Circuit équivalent d'un générateur d'impulsion en un seul étage [29].

**C<sub>1</sub>:** Condensateur du générateur chargé par une source de tension continu avec la tension désirée.

**L<sub>1</sub> :** Inductance du générateur et les conducteurs connectés au circuit de décharge, en général, prends de faibles valeurs.

**R<sub>1</sub> :** Résistance insérée pour contrôler la forme d'onde.

**L<sub>3</sub>.R<sub>3</sub> :** Eléments externes qui peuvent être reliés au générateur pour contrôler la forme d'onde.

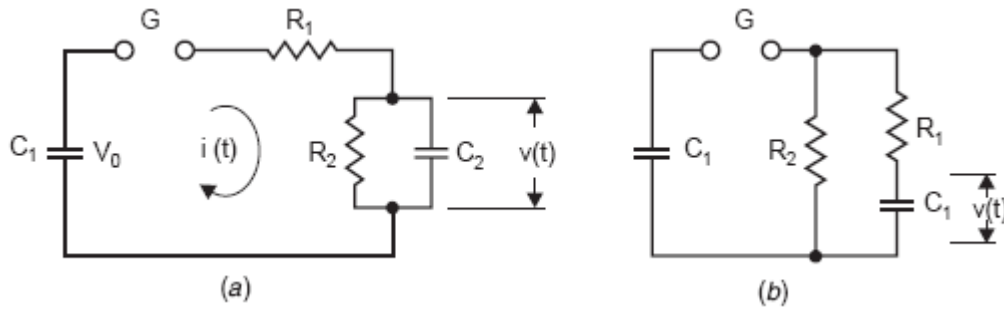
**C<sub>4</sub> et C<sub>2</sub> :** Condensateurs pour compenser la tension.

**R<sub>4</sub> et R<sub>2</sub> :** Résistance pour contrôler la duré d'onde.

**L<sub>4</sub> :** Représenté l'inductance de l'élément en test et peut affecter sensiblement la forme d'onde.

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

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



**Figure (III.4):** Circuit équivalent simplifiés d'un générateur à impulsions [29].

### III-4-2 Analyse des circuits équivalent simplifiés

#### III-4-2-a Analyse du premier circuit équivalent

On se réfère à la figure (III.4.a) et après l'éclatement des éclateurs à sphères qui permet la circulation du courant dans le circuit, et en utilisant la transformé de Laplace ; l'impédance du circuit :

$$Z(s) = R_1 + \frac{1}{C_1 s} + \frac{R_2}{R_2 C_2 s + 1} \quad (3.3)$$

$$I(s) = \frac{V_0}{sZ(s)} \quad (3.4)$$

Avec :

$$v(s) = I(s) \frac{R_2}{R_2 C_2 s + 1} \quad (3.5)$$

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

$$V(t) = V_n [e^{-(\alpha-\beta)t} - e^{-(\alpha+\beta)t}] \quad (3.6)$$

Avec

$$V_n = \frac{V_0}{2\beta R_1 C_2} \quad (3.7)$$

$$\gamma = \frac{C_1}{C_2} \quad (3.8)$$

Après calcul, on obtient :

$$v(t) = V_0 R_2 C_1 \frac{\alpha^2 - \beta^2}{2\beta} [e^{-(\alpha-\beta)t} - e^{-(\alpha+\beta)t}] \quad (3.9)$$

Avec :

$$\alpha = \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_2 C_2} + \frac{1}{R_1 C_2} \right] \quad (3.10)$$

$$\alpha^2 - \beta^2 = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} \quad (3.11)$$

On obtient :

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{1}{2} [(\alpha^2 - \beta^2) C_2 R_2 + \frac{1}{C_2 R_2} + C_1 R_2 (\alpha^2 - \beta^2)] \\ &= \frac{1}{2} [(\alpha^2 - \beta^2) \frac{C_1 R_2}{\gamma} + \frac{\gamma}{C_1 R_2} + C_1 R_2 (\alpha^2 - \beta^2)] \\ &= \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\gamma+1}{\gamma} \right) (\alpha^2 - \beta^2) C_1 R_2 + \frac{\gamma}{C_1 R_2} \right] \end{aligned} \quad (3.12)$$

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

$$R_2 = \frac{1}{C_1} \left[ \frac{\alpha \mp \sqrt{\alpha^2 - (\gamma+1)(\alpha^2 - \beta^2)}}{\frac{\gamma+1}{\gamma} (\alpha^2 - \beta^2)} \right] \quad (3.13)$$

$$R_1 = \frac{1}{C_1} \left[ \frac{\gamma+1}{\alpha \mp \sqrt{\alpha^2 - (\gamma+1)(\alpha^2 - \beta^2)}} \right] \quad (3.14)$$

#### III-4-2-b Analyse de deuxième circuit équivalent

En utilisant le même raisonnement pour le circuit de la figure (III.4.b), et après fermeture des éclateurs à sphères, on aura :

$$Z(s) = \frac{1}{c_1 s} + \frac{R_2 \left( \frac{1}{C_2 s} + R_1 \right)}{R_1 + R_2 + \frac{1}{C_2 s}} \quad (3.15)$$

$$R_2 = \frac{1}{C_1(\alpha+\beta)} + \frac{\gamma}{C_1(\alpha+\beta)} \quad (3.16)$$

$$R_1 = 2\sqrt{L/C} \quad (3.17)$$

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

$$\alpha = \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1}{R_1 C_2} + \frac{1}{R_1 C_1} \right] \quad (3.18)$$

$$\beta = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_1 C_1} \right)^2 - \frac{4}{R_1 R_2 C_1 C_2} \right]^{1/2} \quad (3.19)$$

### III-5 ETUDE DU GENERATEUR DE CHOC (TYPE MARX)

#### III-5-1 Principe de fonctionnement

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

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

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

A l'aide du schéma de la figure (III.5), montrons en quelques mots comment fonctionne un générateur de choc. Cet appareil comporte en premier lieu une série de condensateurs, montés en colonne verticale, qui peuvent être chargés en parallèle par une source de tension continue. Ces condensateurs sont reliés les uns aux autres par des résistances dites de décharge (à gauche sur le schéma), de sorte que toutes les bornes de

gauche vont être connectées à la sortie de la source, les bornes de droite seront bien évidemment connectées à la sortie négative par l'intermédiaire des résistances  $R_q$  du schéma.

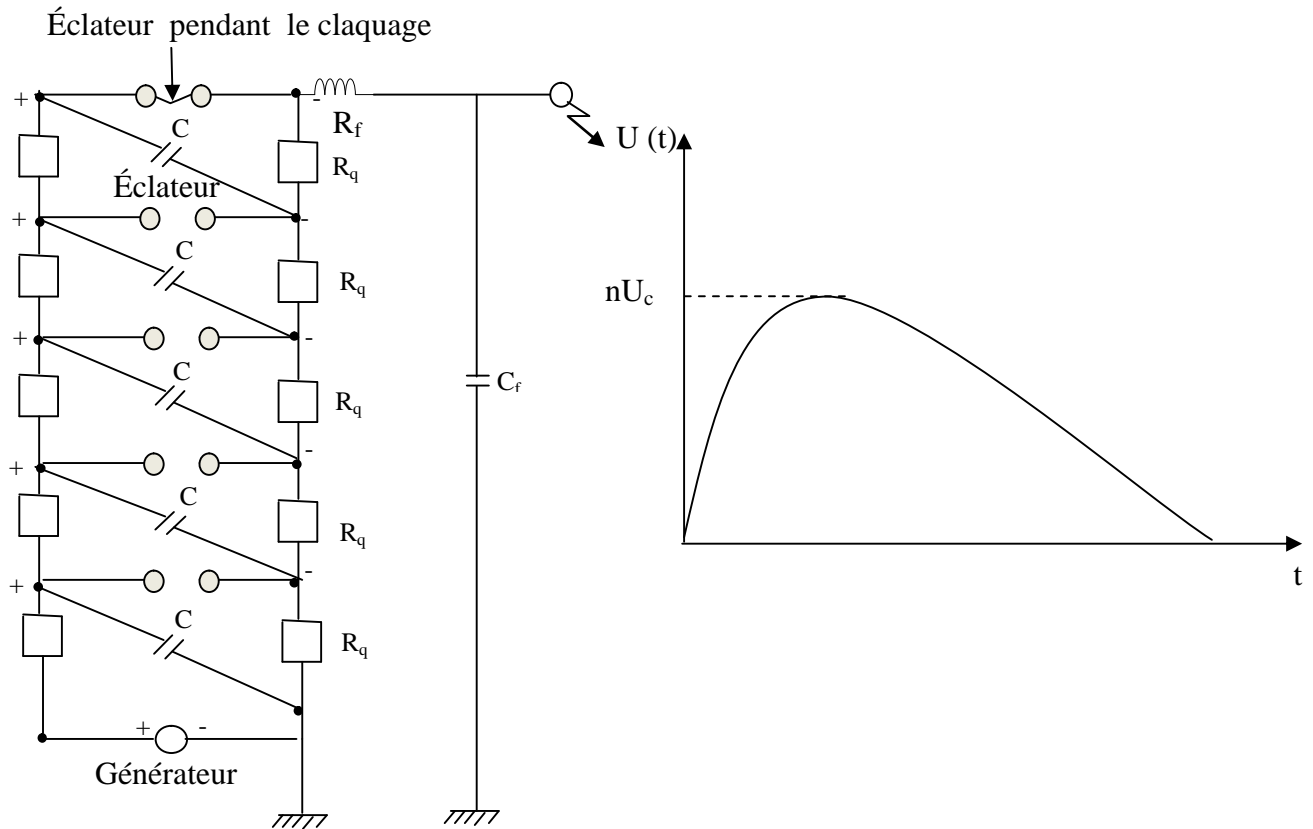
Entre le (+) de l'un des condensateurs et le (-) du condensateur suivant se trouvent des petits éclateurs à sphères, ils sont constitués essentiellement par deux électrodes dans l'air, qui sont réglés pour amorcer une étincelle, à partir d'une certaine valeur, que l'on peut faire varier, de la tension de charge. Lorsque la charge des condensateurs a atteint cette valeur critique, tous ces éclateurs amorcent simultanément et créent un chemin conducteur qui va mettre tous les condensateurs en série, de sorte qu'au sommet du générateur, on va trouver la somme des tensions de charge individuelles. Ainsi, si chaque condensateur est chargé à la tension  $U$  et s'il y a  $n$  étages de condensateurs, on obtiendra au sommet de la colonne une tension égale à  $(nU)$ .

A cet instant, chaque condensateur va se décharger à travers sa résistance associée  $R_q$ , et il en résulte une décroissance à loi exponentielle de la tension, avec une constante de temps fixée par le produit  $(R_q C)$ . Pour cette raison, on appelle ces résistances les "résistances de queue". Mais pour générer les formes de tensions de choc souhaitées, il faut aussi créer un front de montée [1].

A cet effet, on charge un condensateur  $C_f$ , que l'on appelle "Condensateur de front", à travers une résistance  $R_f$  : on obtient alors une charge exponentielle du condensateur  $C_f$  qui se superpose à la décharge des condensateurs principaux [1]. Dans le schéma de la figure (III.5), nous avons représenté par souci de clarté une seule résistance de front, mais dans les générateurs, cette résistance est répartie sur tous les étages. La forme de tension que fournit le générateur dans les conditions décrites ci-dessus est dite " bi-exponentielle", et répond à l'équation:

$$U(t) = nU (\exp (-t/T_q) - \exp (-t/T_f)) \quad (3.20)$$

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



**Figure(III.5)** : Schéma électrique d'un générateur de choc : noté les éclateurs à sphères pour la commutation en série des condensateurs [1].

### III-5-2 Schéma pratique d'un générateur de choc

Le générateur de choc exige une source de tension continue pour son alimentation en énergie pour charger le condensateur de charge  $C_1$ , cette alimentation est constitué d'un transformateur et un redresseur. La charge dure de 3 à 10s pour chaque application, ce qui exige un temps de séparation entre deux applications successives pour des raisons pratiques. La figure (III.6), montre un schéma pratique détaillé d'un générateur de choc.

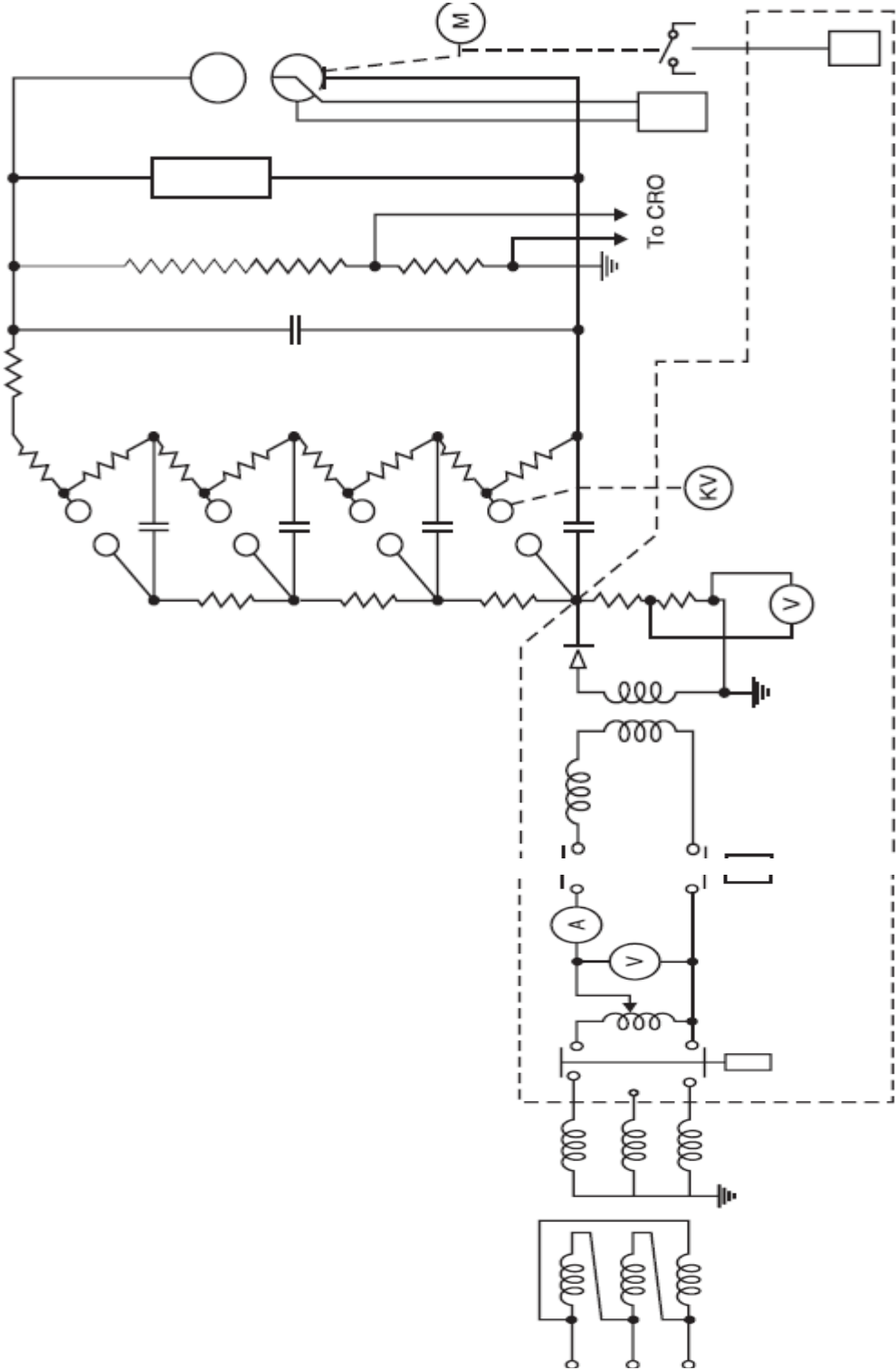


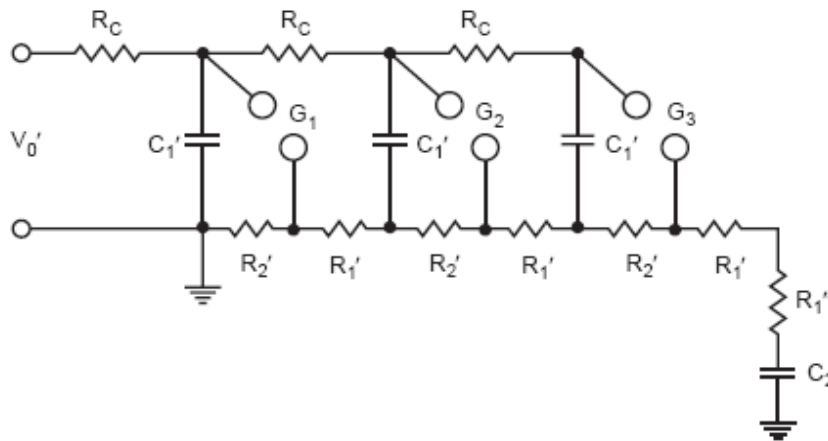
Figure (III.6): Circuit de générateur de choc [29]

### III-5-3 Etude de générateur de choc de type Marx en utilisant les circuits équivalents

La figure (III.7), montre un générateur de choc qui contient trois étages à base de circuits de type figure (III.4.b) citée précédemment.

Le condensateur  $C_1$  est chargé par la grande tension de charge  $V_0$  à travers les résistances de charge en parallèle  $R_c$ .

La tension  $V_0$  est déchargé à travers les éclateurs  $G$  avec une valeur suffisante à travers les condensateurs  $C_1'$  vers le condensateur  $C_2$ .



**Figure(III.7):** Schéma équivalent du générateur de Marx à trois étages [29].

Ce circuit peut être réduit vers un générateur de choc à un seul étage suivant la figure (III.4.b).

$$R_1 = \sum^n R_1' + R_1'' \quad (3.21)$$

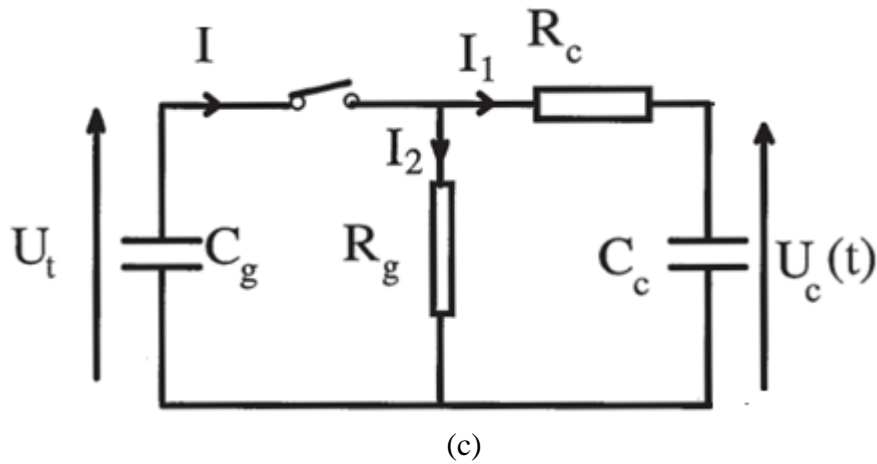
$$R_2 = \sum^n R_2' \quad (3.22)$$

$$1/C_1 = \sum^n \frac{1}{C}, \quad (3.23)$$

Avec  $n$  les nombre des étages.

Afin de faciliter l'étude, on utilise le schéma équivalent de générateur de Marx simplifié présenté à la figure (III.8). Ceci consiste en une capacité  $C_g$  qui est chargée à la tension requise  $U_i$  et qui se décharge à travers un circuit ; les constantes de temps peuvent être ajustées afin d'obtenir la forme de l'onde de tension désirée [11][17].

Les éléments  $R_c$  et  $C_c$  contrôlent le front et  $R_g$  et  $C_g$ , la queue de l'onde.



**Figure (III.8):** Schéma simplifié du générateur choc [11][29].

En utilisant les propriétés de la transformée de Laplace pour obtenir l'expression de la tension  $U_c(t)$ .

L'analyse de ce circuit, nous donne :

$$\frac{U_t}{p} = I_1 R_g + (I_1 + I_2) \frac{1}{p C_g} \quad (3.24)$$

$$I_1 R_g = I_2 \left( R_c + \frac{1}{p C_c} \right) \quad (3.25)$$

$$U_c(p) = \frac{I_2}{p C_c} \quad (3.26)$$

En remplaçant les équations (3.24) et (3.25) dans (3.26), nous obtenons :

$$U_c(p) = \frac{U_t}{R_c C_c} \frac{1}{p^2 + bp + c} \quad (3.27)$$

Ou

$$U_c(p) = \frac{U_t}{R_c C_c} \frac{1}{\left(p + \frac{1}{T_a}\right) \left(p + \frac{1}{T_b}\right)} \quad (3.28)$$

Avec:

$$b = \frac{1}{R_c C_c} + \frac{1}{R_g C_g} + \frac{1}{R_c C_g} \quad (3.29)$$

$$C = \frac{1}{R_g R_c C_g C_c} \quad (3.30)$$

$$T_{a,b} = \frac{2}{b \pm \sqrt{b^2 - 4c}} \quad (3.31)$$

Où :  $(1/T_a)$  et  $(1/T_b)$  sont les racines de l'équation :  $p^2 + bp + c = 0$ .

Finalement, en inversant la transformée de Laplace dans l'équation (3.24), nous obtenons :

$$U_c(t) = \frac{U_t}{R_c C_c} \frac{T_a T_b}{T_a - T_b} \left[ \exp\left(-\frac{t}{T_a}\right) - \exp\left(-\frac{t}{T_b}\right) \right] \quad (3.32)$$

Nous voyons ainsi que la forme de l'onde de tension  $U_c(t)$  dépend des constantes de temps  $T_a$  et  $T_b$ ; leurs expressions sont bien connues :

$$T_a = \frac{T_2 - T_{cr}}{0,7} \quad (3.33)$$

Et:

$$T_b = \frac{T_a}{\exp\left(1,35 + 1,2 \ln \frac{T_2}{T_{cr}}\right)} \quad (3.34)$$

La valeur maximale de  $U_c(t)$  sera:

$$T_{cr} = \frac{T_a T_b}{T_a - T_b} \ln \frac{T_a}{T_b} \quad (3.35)$$

Où  $T_a$ ,  $T_b$ ,  $T_2$ ,  $T_{cr}$  et  $U_t$  sont respectivement le temps de montée, le temps de descente, le temps à mi - amplitude, le temps crête et un facteur amplitude.

En posant:

$$\frac{T_a T_b}{(T_a - T_b) R_c C_c} = 1 \quad (3.36)$$

Nous pouvons écrire  $U_c(t)$  sous la forme :

$$U_c(t) = U_t \left( \exp\left(-\frac{t}{T_a}\right) - \exp\left(-\frac{t}{T_b}\right) \right) \quad (3.37)$$

$C_c$  sera alors :

$$C_c = \frac{T_a T_b}{T_a - T_b} \frac{1}{R_c} \quad (3.38)$$

Les éléments du générateur sont tels que  $R_g$  et  $C_g$  sont très grands devant  $R_c$  et  $C_c$  respectivement.

L'examen de l'équation (3.25), nous donne alors :

$$T_a \approx R_g (C_g + C_c) \quad (3.39)$$

$$T_b \approx R_c \frac{C_g C_c}{C_g + C_c} \quad (3.40)$$

Ces équations nous permettent de déduire  $C_g$  et  $R_g$ . D'autre part, en posant :  $\delta = T_a/T_b$  on peut déduire  $U_t$ .

$$U_t = \frac{U_{cr}}{\delta^{1/(1-\delta)} - \delta^{\delta/(1-\delta)}} \quad (3.41)$$

Finalement,  $U_c(t)$  sera obtenue à partir du bloc diagramme de la figure (III.9). Dans la pratique, les systèmes d'isolation, ou de protection, liés au transport d'énergie électrique ne sont soumis que rarement à des contraintes de formes purement bi-exponentielles telles que les chocs dits de manœuvre. Les opérations d'ouverture et de fermeture des disjoncteurs, ou des sectionneurs, sont responsables d'oscillations apparaissant sur le front d'onde des perturbations (tension) en raison de l'existence d'inductances parasites ou de réflexions de ces ondes. Il est donc intéressant d'analyser le comportement d'une décharge pilotée par de telles ondes oscillantes. En laboratoire, il est possible de superposer une oscillation sur l'onde de tension bi-exponentielle en introduisant, dans le circuit de charge, des inductances de différentes valeurs [11] [17].

Le schéma proposé pour cette étude est la totalité de la figure (III.9). La fréquence des oscillations de l'onde de tension est :

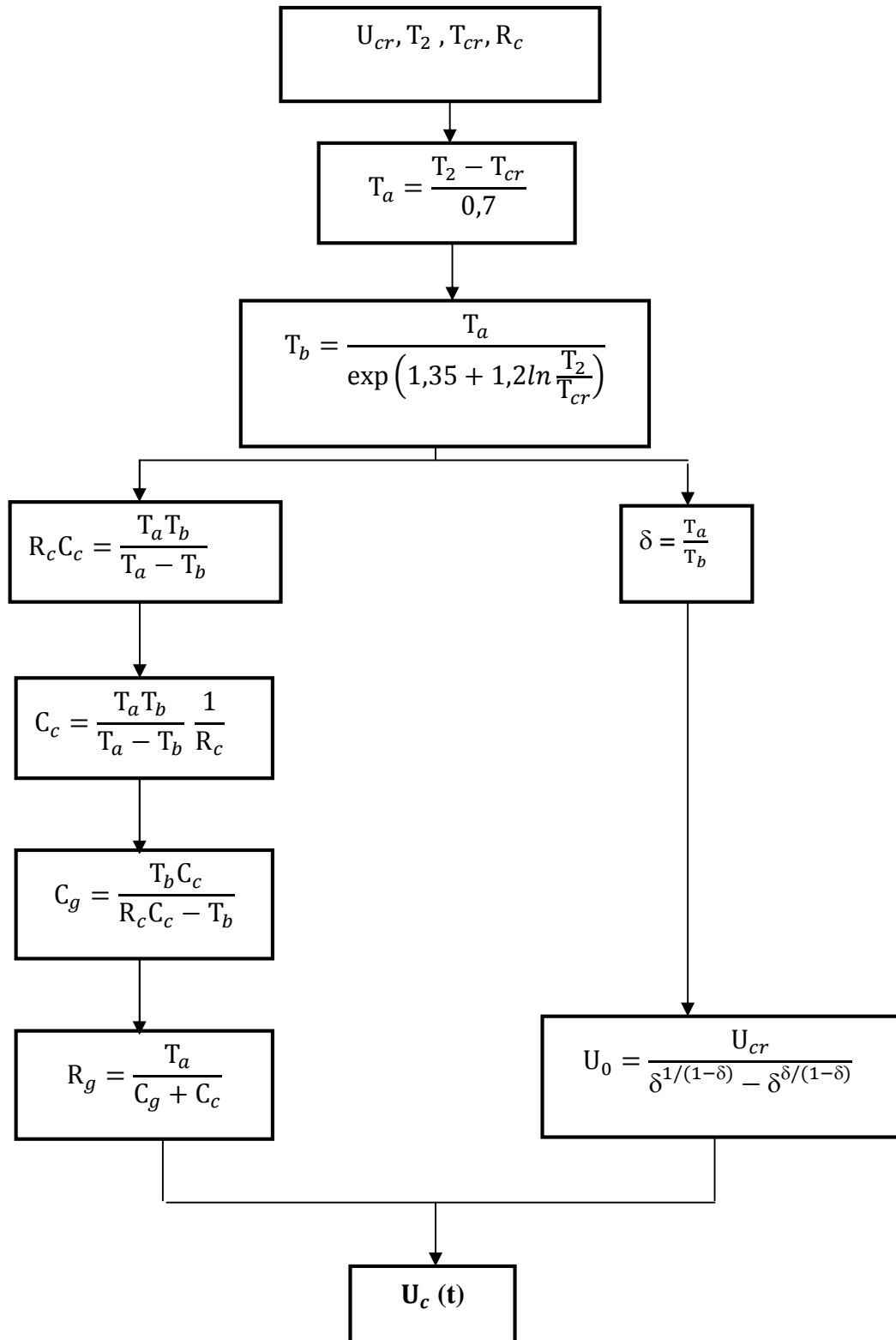
$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} \quad (3.42)$$

Où R et C sont définis comme suit:

$$R = \sqrt{2} \frac{L}{(R_g + R_c \left(\frac{C_c}{C_m}\right))(C_m + C_c)} \quad (3.43)$$

Et

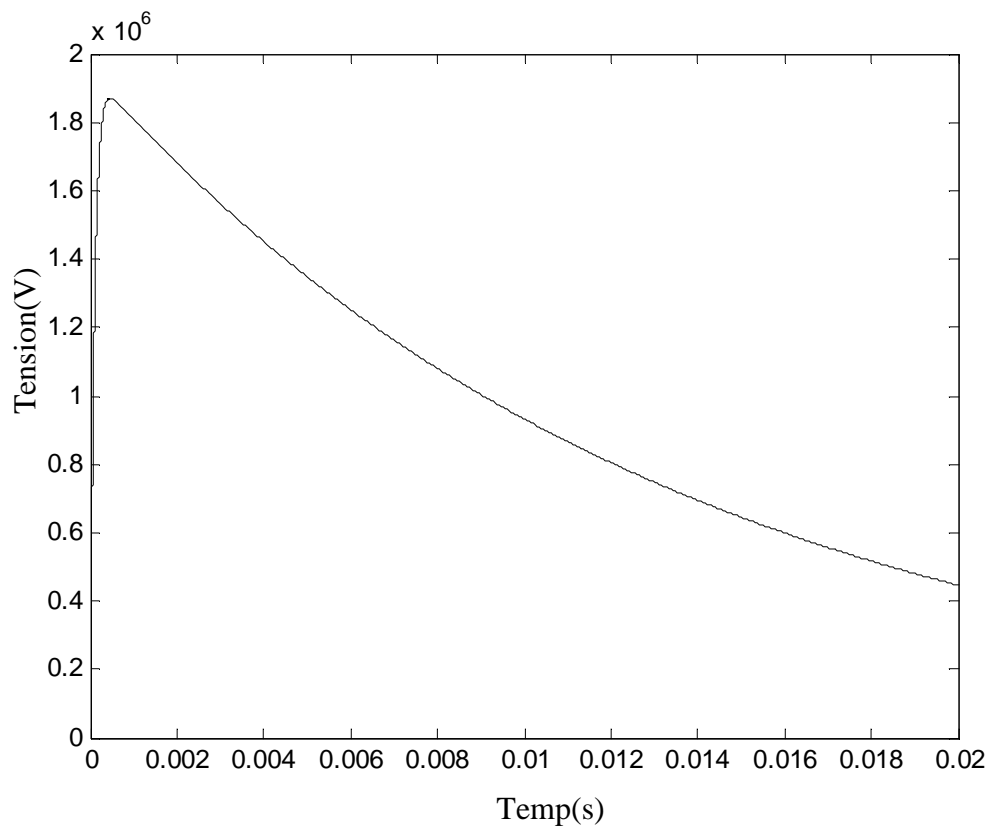
$$C = \frac{C_m C_c}{C_m + C_c} \quad (3.44)$$



**Figure (III.9):** Bloc diagramme permettant le calcul des paramètres du schéma équivalent du générateur de Marx [11].

### III-6 APPLICATION SUR LA TENSION DE GENERATEUR DE CHOC

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



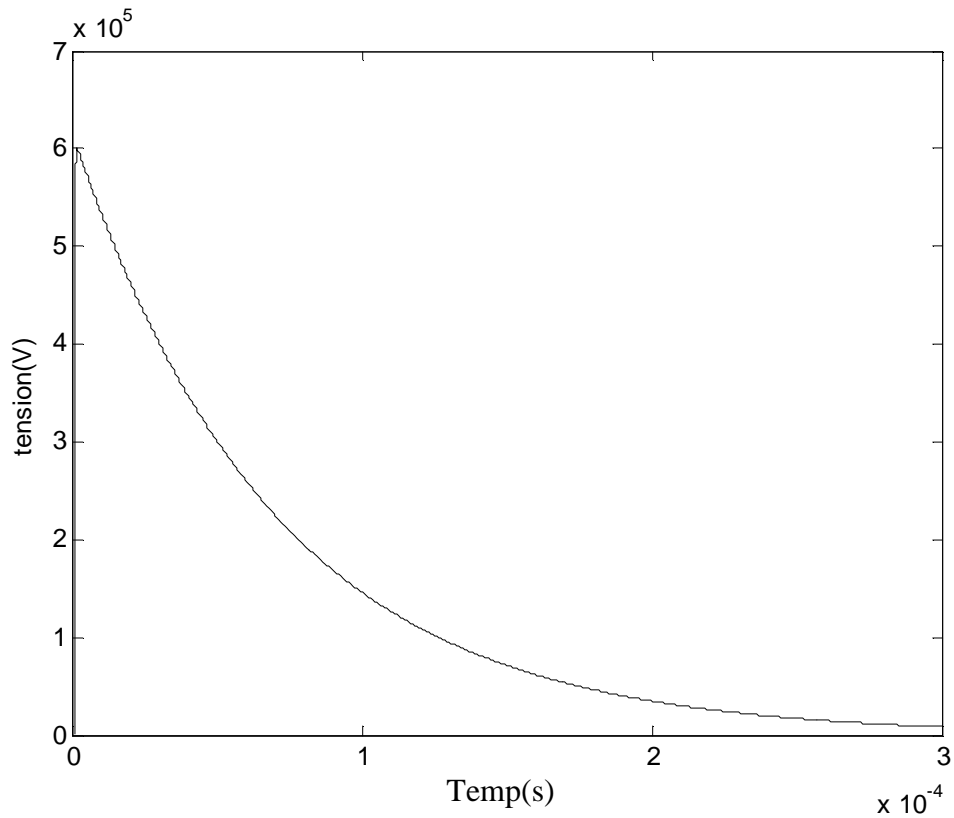
**Figure(III.10):** tension de générateur de choc d'une onde (500/10000) $\mu$ s est tension crête 1870kV

Les résultats des paramètres de circuit équivalent pour  $R_c = 49$  d'une onde (500/10000)  $\mu$ s

$$R_g = 48,65 \Omega$$

$$C_g = 2,76 \cdot 10^{-4} \text{ F}$$

$$C_c = 1,98 \cdot 10^{-6} \text{ F}$$



**Figure(III.11):** tension de générateur de choc d'une onde (1.2/50)  $\mu$ s est tension crête 600kV

Les résultats des paramètres de circuit équivalent pour  $R_c = 160$  d'une onde (1.2/50)  $\mu$ s

$$R_g = 159.527 \Omega$$

$$C_g = 4.35 \cdot 10^{-7} \text{ F}$$

$$C_c = 1.28 \cdot 10^{-9} \text{ F}$$

On constate que les valeurs de circuit équivalent sont proches avec les valeurs railles [10].

### III-7 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons étudié la génération par simulation numérique des ondes d'impulsions et plus particulièrement l'onde de choc de foudre, en utilisant les circuits équivalents. Cette étape permet par la suite de passer à la modélisation de la décharge de foudre en utilisant toujours la théorie de circuit équivalent. Le circuit électrique proposé permet de présenter sous forme de circuit électrique l'ensemble d'une décharge négative dans un grand intervalle d'air depuis l'initiation de la première couronne jusqu'à la tenue diélectrique ou au claquage c'est-à-dire l'arc en retour, en passant par les phases de ré-illuminations et du saut final. Il intègre le type de tension appliquée et est valable quelle que soit la forme de la tension même si nous n'avons considéré dans cette étude que des ondes de tensions bi-exponentielles (ondes de foudre et de manœuvre). Chaque bond de la décharge est représenté par une cellule de circuit RLC. Le calcul des éléments du circuit dépend des paramètres physiques relatifs aux différentes étapes de propagation de la décharge. La tension ainsi générée sera appliquée à l'intervalle d'air pointe-plan en remplaçant ainsi la simulation pratique en laboratoire.

## CONCLUSION GENERALE

L'étude et la compréhension de la décharge de foudre est très importante afin de maîtriser ce phénomène et de prévoir les moyens de protection nécessaire contre ses effets négatifs et ses dégâts. La maîtrise de ce phénomène passe obligatoirement par l'étude théorique de la physique de la décharge et ses différentes étapes ; comme l'ionisation, les prédécharges, le leader et le saut final.

La méthode de la sphère fictive et le modèle électrogéométrique permettent de déterminer la zone de protection d'un paratonnerre vertical en fonction de sa hauteur, un modèle très utile dans le domaine de la protection contre la foudre. Néanmoins, ce modèle présente certaines imperfections, en effet, et d'après les résultats d'essais effectués en laboratoire en utilisant des modèles réduits avec deux types de terre, homogène mauvaise conductrice et discontinue. Il était clair que la nature électrogéologique du sol peut influe sur les zones d'attraction d'un paratonnerre vertical.

Dans le cas d'une terre mauvaise conductrice, les zones d'attraction des paratonnerres peuvent être plus larges que celle définie par le modèle électrogéométrique, cet élargissement dépendrait surtout de l'épaisseur et la nature de la terre mauvaise conductrice et plus particulièrement de sa conductivité, ainsi que de la hauteur du paratonnerre.

Dans le cas de la terre discontinue, l'influence de l'interface diminue lorsque le paratonnerre s'éloigne. Elle est plus marquée lorsque le paratonnerre est situé très proche de l'interface, dans le cas contraire, c'est-à-dire pour des positions du paratonnerre relativement loin, l'interface ne présente aucun effet sur les zones d'attraction du paratonnerre. On note que des zones d'attraction plus larges sont enregistrées lorsque le paratonnerre est situé sur la partie haute de la terre discontinue entre l'axe de la décharge et l'interface. Des zones réduites sont enregistrées sur cette partie de la terre.

L'introduction de la notion de niveau de terre fictive ou modèle équivalent, a permis d'assimiler la terre mauvaise conductrice ou discontinue à une terre homogène bonne conductrice située à une certaine profondeur ( $e'$ ) du sol réel, ce qui a permis aussi d'aboutir à

une définition de la zone d'attraction, plus générale que celle définie par le modèle électrogéométrique classique.

Dans le but de passer de l'étude de la foudre par sa reproduction au laboratoire et qui demande des investissements généralement très coûteux, vers la simulation numérique de la décharge. Dans la troisième partie de ce mémoire, nous avons traité la modélisation de la décharge à l'aide des circuits équivalents. Comme première étape, nous avons présenté un circuit équivalent du générateur de choc de type Marx à plusieurs étages utilisé pour reproduire l'onde de choc de foudre. Ainsi, nous avons présenté un circuit équivalent de la décharge qui tient compte des différentes phases de la décharge.

Comme perspectives à ce travail, nous proposons d'utiliser le circuit équivalent proposé pour la modélisation de la décharge de foudre (aussi bien négative que positive) des grandes intervalles d'air pointe – plan, la tension d'entrée sera délivrée par le circuit équivalent présenté dans ce mémoire.

- [1] **C. GARY**, « La Foudre : nature, histoire risques et protection », Dunod, Paris, 2004.
- [2] **C. GARY**, « La Foudre : des méthodologies antiques à la recherche moderne », Masson, 1994.
- [3] **A. BOUBAKEUR, R. BELAÏCHA**, « Contribution à l'étude d'un modèle électrogéométrique élargie », 13<sup>èmes</sup> Journées Tunisiennes de l'électrotechnique et de l'automatique JTEA- 93, Hammamet, Tunisie, 1993, pp. 136-142.
- [4] **B. HUTZLER**, « Simulation de la foudre en laboratoire » EDF Bull. D.E.R, série B, réseaux électriques, matériels électriques N°3, 1988, pp.31-40.
- [5] **A. BOUBAKEUR, R. BELAÏCHA**, « Modèle de protection en cas de la terre mauvaise conductrice », Congrès International "Foudre et Montagne", SEE, Chamonix, France, 1994, pp . 100-103.
- [6] **A. ROUSSEAU, C. Gary, Gérard Berger**, « Foudre et protection des bâtiments », Technique de l'ingénieur, C3307, 1994.
- [7] **C. GARY**, « La Foudre et les phénomènes orageux », RGE N° 03, Mars 1989, pp 12-17.
- [8] **A. BOUBAKEUR, A. CHOUCOU, S. A. A. BOUMAZA** « Influence of earth discontinuity on the capture zones of a vertical lightning conductor », 25<sup>th</sup> International Conference on lightning Protection ICLP2000, Rhodes, Greece, 18-22 sept 2000.
- [9] **R. BELAÏCHA**, « Zones d'attraction d'un paratonnerre vertical dans le cas d'une terre mauvaise conductrice », Mémoire de Magister, U. T. O Tizi-Ouzou, 1994.
- [10] **A. CHOUCOU**, « Détermination des zones d'attraction d'un paratonnerre vertical dans le cas d'une terre discontinue », département du génie électrique, Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, 1999.
- [11] **I. FOFANA**, « Modélisation de la grandes intervalles d'air », Thèse Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 1996.
- [12] **K. DJAZIA**, « Modélisation de la décharge de foudre en présence d'un paratonnerre et détermination de la dimension fractale » Département du Génie Electrique, Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, 2008.
- [13] **A. BOUBAKEUR, A. MEKHALDI** , «Capture zones of a lightning conductor in the case of bad conducting earth», second middle east system conference MEPCON' 92 , Assiut UNIV, Egypt.
-

[14] **C. GARY, D. CRISTESCU**, « Laboratory simulation the lightning impact to the lightning impact to the ground simulation en laboratoire de l'impact au sol », Foudre et Montagne, Chamanix – Mont-blanc France, 6-ç Juin 1994.

[15] **A. BOUBAKEUR**, «Influence of earth electrogeological properties on lighting protection modelisation » vol. electrical engineering /// 7-8.1997, Batna University, Algeria.

[16] « Isolation électrique à base tension »: règles norme NF C 15-100 – Février 1981, éditée par l'union technique de l'Electricité)

[17] **J. H. RAKOTONANDRASANA**, «Modélisation de la décharge négative dans les grands intervalles d'air application a la foudre », L'école doctorale électronique, électrotechnique, automatique de Lyon, 2008.

[18] **I. FOFANA, A. BEROUAL, A. BOUBAKEUR** « Influence of insulating barriers on positive long air gaps in divergent field», High Voltage Engineering Symposium, 22-27 August 1999 Conference Publication No. 467, IEEE, 1999.

[19] **I. FOFANA , A. BEROUAL** «A Model for long air gap discharge using an equivalent electrical network », IEEE transactions on dielectrics and electrical insulation *Vol. 3 No. 2*, April- 1996.

[20] **I. FOFANA, A.BEN RHOUMA, A. BEROUAL**« Modeling a positive lightning downward leader to study its effects on engineering systems »,iee proc-generation. Transmission. distribution, Vol. 145, no. 4, July 1998.

[21] **A. BÉROUAL, I. FOFANA** « Modeling of the streamer in dielectric liquids with an equivalent electrical network», conference record of the ICDL '96 12'h International conference on conduction and breakdown in dielectric liquids, Roma, Italy, July 15 - 19, 1996.

[22] **J. M. K. MACALPINE, L. H. CHEUNG, W. L. Ip, P. Y. Ng and D. H. QIU** «Prediction of spark paths in a Pointe to -rod gap in air» IEEE transactions on dielectrics and electrical insulation Vol. 12, No. 3; June 2005.

[23] **A. FAROUK, M. RIZK** «Critical switching impulse strength of long air gaps: modeling of air density effects», IEEE transactions on power delivery, Vol. 7, No. 3, July 1992.

[24] **H. D.BETZ. U. SCHUMANN, P. LAROCHE** (Eds.) « Lightning: principles, instruments and applications», library of congress control number, 2008.

---

[25] **A. FAROUK, M. RIZK, LIFE FELLOW**, IEEE, and François Vidal « Modeling of Positive Leader Speed under Slow Front Voltages—Part I: Long Air Gaps », IEEE transactions on power delivery, vol. 23, no. 1, January 2008.

[26] **A. BÉROUAL, A. BOUBAKEUR** «Influence of barriers on the lightning and switching impulse strength of mean air gaps in point/plane arrangements », IEEE Transactions on Electrical Insulation Vol. 26 No. 6, December 1991.

[27] **G. BALDO I. GALLIMBERTI** «Breakdown phenomena of long gaps under switching impulse conditions influence of distance and voltage level» IEEE transactions on power apparatus and systems, vol. PAS-94, no. 4, July/August 1975.

[28] **L. LEONARD .GRIGSBY** « Electric Power Engineering Handbook Second Edition», Taylor & Francis Group, LLC, 2006.

[29] **C. L. WADHWA** « High voltage engineering », New Age International (P) Ltd., Publishers Published by New Age International (P) Ltd., Publishers Copyright © 2007.

---

---

