

**République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'enseignement Supérieur  
et de la Recherche scientifique**



**Université d'EL-Oued  
Faculté des Sciences et de Technologies**

**Mémoire de Fin d'Etude  
En vue de l'obtention du diplôme de**

**MASTER ACADEMIQUE**

**Domaine : Sciences et de Technologies  
Filière: Génie Électrique  
Spécialité: Réseaux Électriques**

**Thème**

***Modélisation numérique de la  
protection primaire contre la foudre***

Réalise par:

- ✓ Alalei Hamza
- ✓ Beher Yacine

Encadreur: Mr. Khechkhoche ALI

**Soutenu Juin 2013**

---

بسم الله الرحمن الرحيم

"و يرسل الصواعق فيصيب بها من يشاء"

صدق الله العظيم

سورة - الرعد -

---

## Remerciements

En premier lieu, nous tenons à remercier «DIEU» qui nous a aidé pour que ce modeste travail soit achevé et pour que nous ayons réussi.

Nous tenons à remercier vivement tous ceux qui nous ont orientées et nous ont encouragées. Nous pensons, en particulier, à notre professeur encadreur **Khechekhouché ALI**, pour savoir bien nous suivi durant notre travail et de nous faire profit de son savoir, ainsi de ses conseils, et pour toute l'aide, les remarques

Constructives qui nous ont d'amélioré ce travail, et qui grâce à lui nous avons pu réaliser nos objectifs.

Nous précieux remerciements vont au président et les membres de jury pour l'honneur qu'ils ont accepté de juger ce travail.

Nous remercies aussi tous les enseignants qui ont contribué à notre formation et l'institut d'électrotechnique.

Enfin, nous remercions nous amis pour leur aide, leur soutien et leur compréhension.

---

## Dédicaces

*Je dédie ce travail à tout ceux et celles qui ont contribué à mon éducation, ma formation tout au long de mon cursus d'étude primaires, collégiales, secondaires et universitaires. Qu'ils trouvent ici toute ma gratitude.*

*A mes chers parents, mes guides, à qui je témoigne ma reconnaissance.*

*A toute ma grande famille éparpillée un peu partout sous d'autre firmament.*

*A toutes et tous mes amis.*

*A mon encadreur.*

*Hamza*



---

## Dédicaces

*Je dédie le fruit de mon labeur tout d'abord à :*

*Mes chers parents qui de part leur tendresse et bienveillance ont pu voir réaliser de leur rêve. Et je leurs souhaite la santé et longue de vie.*

*A toute ma famille sans exception.*

*A toutes et à tous mes amis à l'institut d'électrotechnique.*

*Et tous les amis à la cité universitaire.*

*A toutes et à tous ceux que j'aime et que je ne cesserai d'aimer.*

*A mes professeurs.*

*A mon encadreur*

*Yacine*

# Liste de figures

## Liste de figures

| <b>Chapitre I: Foudre et la protection contre la foudre</b>                                                                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure I.1-</b> Cumulo-nimbus.                                                                                                                                                            | 5  |
| <b>Figure I.2-</b> Schéma montrant la distribution des charges électriques dans la masse d'un nuage orageux et la répartition du champ électrique au sol, au moment au va éclater la foudre. | 8  |
| <b>Figure I.3-</b> Illustration des différentes phases d'une décharge négative nuage-sol.                                                                                                    | 10 |
| <b>Figure I.4-</b> Classification des coups de foudre selon K berger.                                                                                                                        | 12 |
| <b>Figure I.5-</b> Déroulement spatio-temporel d'un coup descendant et courant mesurés à la surface de la terre.                                                                             | 15 |
| <b>Figure I.6-</b> Point d'impact sur une structure au sol.                                                                                                                                  | 17 |
| <b>Figure I.7-</b> Zone de protection d'un paratonnerre horizontal.                                                                                                                          | 19 |
| <b>Figure I.8-</b> Zone de protection d'un paratonnerre vertical.                                                                                                                            | 19 |
| <b>Chapitre II: Méthode numérique de calcul de champ électrique</b>                                                                                                                          |    |
| <b>Figure II.1-</b> conditions de passage entre milieux différent.                                                                                                                           | 25 |
| <b>Figure II.2-</b> l'organigramme de résolution par la MEF.                                                                                                                                 | 29 |
| <b>Figure II.3-</b> transformation des coordonnées des éléments réels en celles de l'élément de référence.                                                                                   | 30 |
| <b>Chapitre III: Modèle expérimental</b>                                                                                                                                                     |    |
| <b>Figure III.3-</b> Modèle expérimental avec terre homogène.                                                                                                                                | 34 |
| <b>Figure III.2-</b> Modèle expérimental de terre discontinue en présence de la sonde à capacité répartie.                                                                                   | 35 |
| <b>Figure III.3-</b> Configurations du modèle expérimental dans le cas de terre discontinue.                                                                                                 | 37 |
| <b>Figure III.4-</b> Champ électrique en fonction de position de la sonde (d/h) Avec h=8cm.                                                                                                  | 39 |
| <b>Figure III.5-</b> Champ électrique en fonction de position de la sonde (d/h) Avec h=16cm.                                                                                                 | 40 |
| <b>Figure III.6-</b> Champ électrique en fonction de position de la sonde (d/h) Avec h=8cm.                                                                                                  | 42 |
| <b>Figure III.7-</b> Champ électrique en fonction de position de la sonde (d/h) Avec h=16cm.                                                                                                 | 43 |
| <b>Figure III.8-</b> Champ électrique en fonction de position de la tige (D/h) Avec h= 8cm.                                                                                                  | 45 |
| <b>Figure III.9-</b> Champ électrique en fonction de position de la tige (D/h) Avec h= 16cm.                                                                                                 | 46 |
| <b>Figure III.10-</b> Champ électrique en fonction de position de la tige (D/h) Avec h= 8cm.                                                                                                 | 48 |
| <b>Figure III.11-</b> Champ électrique en fonction de position de la tige (D/h) Avec h=16cm.                                                                                                 | 49 |
| <b>Chapitre IV: Simulation et interprétation des résultats</b>                                                                                                                               |    |
| <b>Figure IV. 1-</b> Champ électrique calculé au sol pour position de la tige (A -h=40 cm),(B- h= 40 cm +e)                                                                                  | 52 |

## Liste de figures

---

|                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure IV. 2-</b> distribution du champ électrique au sol homogène .a(h=40cm)<br>b.(h=40cm +e)      | 52 |
| <b>Figure IV. 3 -</b> Modèle de la simulation                                                          | 54 |
| <b>Figure IV. 4-</b> champ électrique calculé au la terre partie haute de D=10 cm et h= 40cm           | 56 |
| <b>Figure IV. 5-</b> Champ électrique (l'interface au point 50)                                        | 56 |
| <b>Figure IV. 6 -</b> champ électrique calculé (3D)                                                    | 57 |
| <b>Figure IV. 7-</b> champ électrique au partie haute de D =8 cm et h= 40 cm                           | 57 |
| <b>Figure IV. 8-</b> Champ électrique (interface au point de 50)                                       | 58 |
| <b>Figure IV. 9 -</b> Champ électrique calculé (3D)                                                    | 58 |
| <b>Figure IV. 10 -</b> Champ électrique calcule au surface sol discontinu D=10 cm et h=40+e            | 59 |
| <b>Figure IV. 11-</b> champ électrique calcule au surface discontinu (l'interface en point 50)         | 60 |
| <b>Figure IV. 12-</b> Distribution de champ électrique calcule au sol discontinu (3D)                  | 60 |
| <b>Figure IV. 13 -</b> Champ électrique calcule au surface de sol discontinu D=10 cm , h= (30+e) cm    | 61 |
| <b>Figure IV. 14-</b> champ électrique calcule au surface de sol discontinu (l'interface en point 50)  | 61 |
| <b>Figure IV. 15 –</b> distribution du champ électrique calcule au sol discontinu(3D)                  | 62 |
| <b>Figure IV. 16 -</b> Champ électrique calcule au surface de sol discontinu (D=0,h=40 cm)             | 63 |
| <b>Figure IV. 17 -</b> champ électrique calcule au surface de sol discontinu (l'interface en point 50) | 63 |
| <b>Figure IV. 18 -</b> champ électrique calcule au surface de sol discontinu (3D)                      | 64 |
| <b>Figure IV. 19 -</b> Champ électrique calcule au surface de sol discontinu (D=0, h=30 cm)            | 64 |
| <b>Figure IV. 20 -</b> champ électrique calcule au surface de sol discontinu (l'interface en point 50) | 65 |
| <b>Figure IV. 21 -</b> champ électrique calcule au surface de sol discontinu (3D).                     | 65 |

## SOMMAIRE

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

|                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------|----|
| I.1-Introduction :.....                                       | 3  |
| I.2- Historique .....                                         | 3  |
| I.3-Phénomène de la foudre .....                              | 4  |
| I.4-Formation des nuages orageux .....                        | 4  |
| I.5-Electrification du nuage.....                             | 5  |
| I.6-Formation des éclairs et déclenchement de la foudre ..... | 6  |
| I.6.1- Les décharges entre nuages .....                       | 7  |
| I.6.2- Les décharges intra-nuages .....                       | 7  |
| I.6.3- Les décharges nuage- sol .....                         | 7  |
| I.7-Phase de variation du champ électrique au sol .....       | 7  |
| I.7.1-Phase d'émission d'un précurseur .....                  | 8  |
| I.7.2-Phase de Formation d'un contre précurseur .....         | 8  |
| I.7.3-Phase de Production de la foudre .....                  | 9  |
| I.7.4-Classification et description des décharges .....       | 10 |
| I.7.5-Coups de foudre descendants négatifs .....              | 11 |
| I.7.6-Coups de foudre descendants positifs .....              | 11 |
| I.7.7-Coups de foudre ascendants positifs et négatifs .....   | 11 |
| I.8-Les effets de la foudre .....                             | 12 |
| I.9-Les conséquences directes du foudroiement .....           | 12 |
| I.9.1- Effets thermiques .....                                | 12 |
| I.9.2- Etincelages thermiques .....                           | 13 |
| I.9.3- Effets mécaniques .....                                | 13 |
| I.10-Les conséquences indirectes du foudroiement .....        | 13 |

|                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| I.11-Mécanisme du coup de foudre descendant négatif.....                                | 14 |
| I.12-Protection contre la foudre .....                                                  | 16 |
| I.13-Modèle électrogéométrique.....                                                     | 17 |
| I.14-Zone de protection .....                                                           | 18 |
| I.15.1-Zone de capture d'un paratonnerre horizontal                                     | 18 |
| I.15.2-Zone de capture d'une tige verticale                                             | 19 |
| I.15-Influence des propriétés électrogéologiques du sol sur la décharge de foudre ..... | 20 |
| I.16-Propriétés électrogéologiques de la terre et distribution du champ au sol .....    | 20 |
| I.17-Conclusion .....                                                                   | 22 |

## **CHAPITRE II: Méthode numérique de calcul de champ électrique**

|                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------|----|
| II.1.Introduction.....                                    | 23 |
| II.2.Equations à résoudre dans un domaine.....            | 23 |
| II.3.Modèle électrostatique de maxwell .....              | 24 |
| II.4.Equations de passage entre différents milieux.....   | 25 |
| II.5.Condition aux limites .....                          | 26 |
| II.6.Méthode numérique de résolution.....                 | 27 |
| II.7.Méthode des éléments finis .....                     | 28 |
| II.8.Approximation par élément finis .....                | 29 |
| III.8.1-Elément de référence .....                        | 30 |
| III.8.2-Construction des fonctions $N_{\xi}$ .....        | 31 |
| III.8.3-Transformation des opérateurs de dérivation ..... | 31 |
| III.8.4-Formulation intégrale .....                       | 32 |
| III.8.4.1- Méthodes des résidus pondérés                  | 32 |
| III.8.4.2- Méthode variationnelle                         | 33 |
| II.9.Conclusion.....                                      | 33 |

### **CHAPITRE III: Modèle expérimental**

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| III.1-Technique expérimentale.....                                       | 34 |
| III.2-Modèle expérimental.....                                           | 34 |
| III.2.1-  Modèle expérimental avec terre homogène                        | 34 |
| III.2.2-  Modèle expérimental avec terre discontinue                     | 34 |
| III.3-Configuration du modèle expérimental.....                          | 36 |
| III.4.1-Cas de terre hétérogène .....                                    | 37 |
| III.4.2-Distribution du champ en fonction de position de la sonde .....  | 37 |
| III.4.3-Distribution du champ en fonction de position de la tige HT..... | 43 |

### **Chapitre IV: Simulation et interprétation de résultats**

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| IV.1-Introduction.....                                                | 50 |
| IV.2-Cas de la terre homogène (terre continu): .....                  | 51 |
| IV.2.1-Distribution du champ en fonction de position de la tige:..... | 51 |
| IV.3-Cas de terre discontinu: .....                                   | 54 |
| IV.3.1- Distribution du champ selon la position de la tige HT:        | 54 |
| IV.3.2- La première essai:                                            | 54 |
| IV.3.3- Le deuxième essai:                                            | 59 |
| IV.3.4- La troisième essai                                            | 62 |
| IV.4-Conclusion: .....                                                | 66 |

## Introduction générale

La compatibilité électromagnétique est une discipline scientifique et technique qui trouve sa justification dans les problèmes de cohabitation entre les systèmes industriels et leur environnement. Ces problèmes ont certes toujours existé, mais ils deviennent aujourd'hui de plus en plus importants en raison de la concentration dans un même environnement d'appareils ou de systèmes dont les niveaux de puissance et de sensibilité sont très différents [3].

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 distribution du champ électrique au sol.

Cette méthode est basée sur une nouvelle connaissance du mécanisme d'impact de la foudre, et mise en œuvre au moyen d'un modèle appelé « modèle électrogéométrique ». Bien que ce dernier constitue, 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 simpliste actuelle néglige un grand nombre de paramètres essentiels à une bonne détermination des points d'impact de la foudre. Parmi ces paramètres, les propriétés électrogéologiques semblent avoir une influence importante sur les caractéristiques des décharges atmosphériques.

Vu le nombre limité des investigations effectuées dans le domaine, le Laboratoire de Haute Tension de l'ENP contribue, depuis 1985, à l'étude de l'influence des propriétés électrogéologiques sur l'impact de la décharge de foudre et pour élargir ces études le Laboratoire aborde une nouvelle vue, qui concerne la distribution du champ électrique au niveau du sol. Dans le cas de notre étude le sol a été choisi discontinu représentant le cas limite d'hétérogénéité.

Dans la premier chapitre de cette mémoire nous avons étudié le phénomène de la foudre, et son effet en sens thermique, électrique, magnétoélectrique et statique, après ça nous avons fait une étude de la protection contre la foudre (paratonnerre verticale et horizontale) et la zone de capture de parafoudre.

Dans le deuxième chapitre est consacré aux méthodes de calcul de champ électrique rayonné par la foudre, et après ça nous avons parlé de la méthode des éléments finis qui est utilisée pour résoudre le problème en question

## INTRODUCTION GENERALE

---

Dans le troisième chapitre, ce sont les résultats expérimentaux, avec différents essais pour obtenir un modèle pour la comparaison avec notre simulation.

Dans le chapitre quatre nous appliquons la méthode des éléments finis avec le logiciel COMSOL, avec un modèle similaire au modèle expérimental pour la validation des résultats.

Enfin, nous terminons ce travail par une conclusion générale.

## I.1- Introduction :

En générale la foudre apparaît en présence d'un nuage orageux du type cumulo-nimbus. Il est très complexe à maîtriser et malgré le grand nombre de travaux consacrés à la foudre par des chercheurs de nombreux pays, ce phénomène reste encore assez mal connu. Cette situation provient en grande partie de la nature insaisissable de la foudre.

La foudre est l'un des phénomènes naturels les plus courants et les plus spectaculaires. Depuis que Benjamin Franklin a démontré, il y a deux cents ans, qu'il s'agissait d'une gigantesque décharge électrique, nombreux sont les chercheurs qui ont étudié les nuage et les éclairs. Pourtant, malgré la mise au point de nouveaux appareillages et de nouvelles techniques de recherche, l'origine des éclairs et le mécanisme d'électrisation des nuages pluvieux nous échappent encore.

Benjamin Franklin avait mis le doigt sur l'une des difficultés fondamentales du problème. En 1752, il observa que "les nuages d'une ondée orageuse sont le plus souvent dans un état d'électricité négative, mais parfois dans un état d'électricité positive".

Depuis ces mots écrits par Benjamin Franklin, on admet que la foudre est un transfert de charges électriques, soit positives soit négatives, d'une région d'un nuage à une autre, où entre le nuage et la terre.

Dans ce chapitre nous avons fait un étude de la phonème de la foudre en la sens d'effet thermique, électrique, magnéto-électrique et la protection contre la foudre.

## I.2- Historique

Depuis l'aube de l'humanité, l'homme est fasciné par la foudre. Il attribuait alors au phénomène orageux une dimension mythique qui traduisait la colère des dieux et à la notion de châtement pour les fautes ou les péchés.

On retrouve ces représentations primitives chez tous les peuples et dans toutes les religions de la terre, y compris chez les chrétiens du Moyen-âge.

Ce n'est qu'au XVIIe siècle que l'homme commence à ces superstitions, et c'est du XVIIIe siècle que l'on peut dater les débuts de la connaissance proprement scientifique de la foudre. Celle-ci coïncide avec la formidable épopée des travaux de franklin, Nollet, Dalibard et autres savants, grâce notamment aux expériences du cerf-volant et de la tige de Marly [1].

Le XIXe siècle fut principalement consacré à la collecte d'observations visuelles et de statistiques de foudroiements, faute d'une instrumentation adéquate pour pouvoir véritablement progresser [1].

À partir du XXe siècle que l'étude de la foudre est devenue une science. On découvre alors que les orages sont indispensables à la vie, qu'ils assurent le maintien du champ électrique de notre planète.

Au cours du premier tiers du XXe siècle cependant, disons jusqu'en 1930, divers dispositifs de mesure et d'observation photographique avaient déjà permis de défricher un peu plus la phénoménologie de l'électricité atmosphérique.

Depuis le milieu du XXe siècle à aujourd'hui, le développement des réseaux de transport et de distribution d'énergie, de l'informatique et de l'électronique motive sérieusement la recherche en matière de protection contre la foudre et donc sur le phénomène lui-même [1].

### **I.3- Phénomène de la foudre**

La foudre est définie comme une décharge électrique d'une longueur de plusieurs kilomètres associée à une impulsion de courant transitoire de très forte amplitude qui traverse l'espace atmosphérique, depuis la masse des nuages orageux électrisés jusqu'au sol [2].

### **I.4- Formation des nuages orageux**

Les nuages orageux sont généralement de type cumulo-nimbus (Figure I.1), ils se forment sous l'effet de courant d'air chaud ascensionnel qui monte à des vitesses importantes entraînant dans ces turbulences des centaines de milliers de tonnes d'eau.

Le mouvement est si puissant que le sommet du nuage s'écrase contre une couche supérieure de l'atmosphère, ce qui explique qu'ils ont très souvent une forme caractéristique dite « enclumes » leur base peut atteindre des surfaces de plusieurs dizaines de km<sup>2</sup> et dont le sommet atteint 15 km et ils s'étendent entre des altitudes allant de 2 à 20 km.



*Figure I. 1* Cumulo-nimbus [3].

On distingue deux sortes d'orages [1] :

- Les orages de chaleur naissant d'un effet de réchauffement des sols, associé à une forte humidité. Ce sont des orages locaux. L'origine de la création du nuage réside dans l'apparition des bulles d'air chaud et humide qui s'élèvent et forment un nuage à des altitudes où peut s'initier la condensation. Ce type ne vit généralement qu'une ou deux heures.
- Les orages océaniques ou frontaux se formant lors de la rencontre de masse d'air importante de température et d'humidité différente, cette rencontre produit des mouvements d'air ascendant accompagnés de phénomènes de condensation. Ces orages peuvent présenter des fronts de centaines de kilomètres, persister des jours durant et se propager sur des milliers de kilomètres.

Les nuages orageux sont donc caractérisés par la présence de masses d'eau considérables (vapeur, gouttes, cristaux de glace, grésil, grêlons) et de mouvements d'air puissants conduisant à des vents extrêmement violents pouvant dépasser la centaine de km /heure [4].

### **I.5- Electrification du nuage**

Les champs électriques d'un nuage d'orage sont alimentés essentiellement par deux facteurs :

- la force des ascendances et des descendances, dont la vitesse peut dépasser 25 m/s;
- la présence simultanée dans le nuage de particules de glace lourdes et légères

Dans les zones à fortes turbulences, les particules lourdes (grésil ou grêlons) se heurtent [4], [1] aux cristaux infimes de glace. Lorsque ces chocs se produisent à une température inférieure à une limite critique, les grains de grésil se chargent négativement, et positivement si cette température est supérieure à la dite limite.

Ceux qui portent les charges positives sont assez légers pour être entraînés par les courants ascendants vers le haut, ceux qui portent les charges négatives sont assez lourds pour tomber malgré ces courants vers le bas.

Quoi qu'il en soit, le résultat net de ces processus de séparation est que la partie supérieure des nuages orageuse constituée de cristaux infimes de glace, est chargée positivement, tandis que leur base est chargée négativement souvent, un îlot de charges positives est enserré dans la masse négative, sans qu'une explication satisfaisante de sa présence ait encore pu être donnée.

Il y a donc un déséquilibre entre les charges électriques à l'intérieur du nuage ainsi qu'à l'extérieur entre la base négative du nuage et le sol positif. Quand les charges accumulées deviennent trop importantes, et surtout lorsqu'il y a opposition directe entre ces charges, Il y a décharge électrique (éclair) et un orage s'éclate [4].

### **I.6- Formation des éclairs et déclenchement de la foudre [4], [1], [5]**

Une décharge électrique permet la recombinaison des charges électriques positives et négatives et le rééquilibrage des potentiels différents, donc deux charges électriques opposées sont fortement attirées l'une vers l'autre. La transition de l'état isolant de l'air en un état conducteur permet de rétablir l'équilibre entre les charges électriques opposées. Ce rééquilibrage se produit par la formation de décharges électriques. Parmi celle-ci, il faut distinguer l'éclair de la foudre:

- La décharge qui frappe le sol est appelée foudre ou coup de foudre.
- La décharge qui se produit à l'intérieur d'un nuage ou entre nuages orageux, est appelée éclair inter ou intra nuages.

Il faut noter que 90% des décharges se développent à l'intérieur des nuages (éclairs) 10% seulement des décharges frappent le sol (coups de foudre).

Donc la décharge électrique se présente sous plusieurs formes, à savoir :

#### **I.6.1- Les décharges entres nuages**

Comme leur nom l'indique, ces décharges se développent entre deux ou plusieurs nuages orageux différemment chargés se trouvant à une distance telle que l'ionisation de l'air qui les sépare devient possible. Elles se produisent généralement à une très grande altitude. Ces décharges sont inquiétantes principalement pour les engins aéronautiques.

#### **I.6.2- Les décharges intra-nuages**

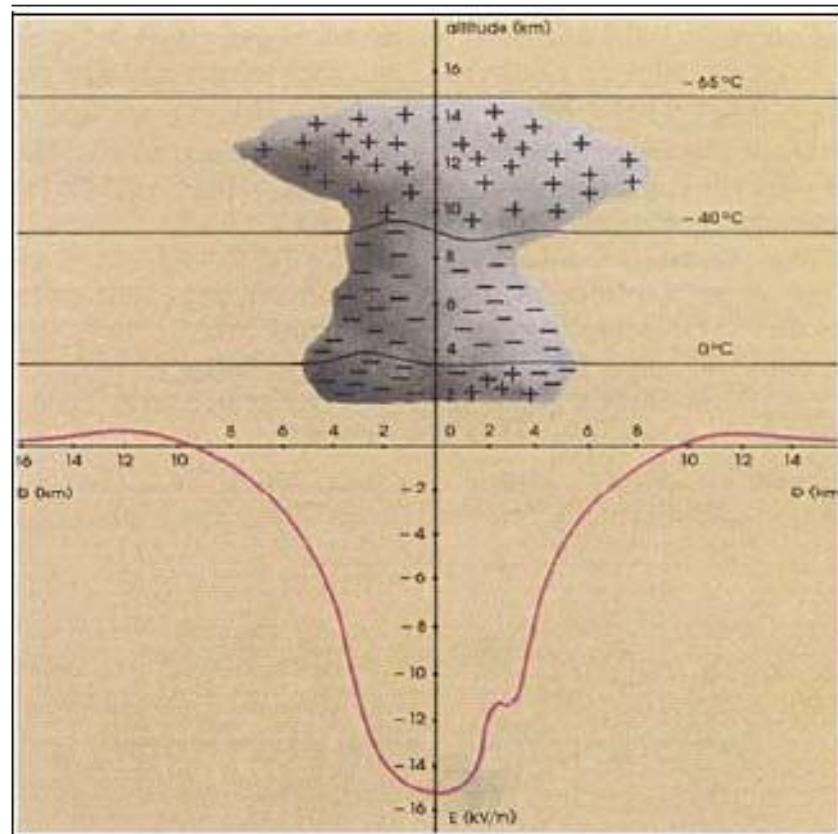
Elles se manifestent sous forme d'une succession d'arcs électriques qui s'étend entre deux ou plusieurs poches de charges opposées contenues dans un même nuage. Ces arcs sont fortement ramifiés et leur durée est de l'ordre de la milliseconde. Les Effets de ces décharges sont plutôt minimes.

#### **I.6.3- Les 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 présente à peu près 10% à 50% de la totalité des décharges atmosphériques que connaît le globe. Les effets nuisibles de ces décharges touchent principalement les réseaux de communication et de transport d'énergie, les équipements industriels à base d'électronique, le transport aérien.

### **I.7- Phase de variation du champ électrique au sol**

Sous l'effet des charges électriques, et au cours de leur formation, le champ électrique au sol va varier dans de fortes proportions. Alors qu'il était positif et de l'ordre de la centaine de volts par mètre par beau temps, il va commencer à s'inverser, puis va croître considérablement. Au droit du nuage, le champ peut alors atteindre des valeurs comprises entre -15 et -20 KV/m (Figure I.2). A cette valeurs les conditions de déclenchement de la foudre sont atteintes [6].



**Figure I. 2** Schéma montrant la distribution des charges électriques dans la masse d'un nuage orageux et la répartition du champ électrique au sol, au moment au va éclater la foudre [1]

#### I.7.1- Phase d'émission d'un précurseur [4]

Lorsque le champ électrique est suffisamment intense dans le nuage, des décharges électriques se produisent à partir du nuage, Il s'agit de pré décharge électriques faiblement lumineuses, elles se propagent par bond de 30 à 50 m vers le sol, à la vitesse de 1/1000 de celle de la lumière.

#### I.7.2- Phase de Formation d'un contre précurseur

Il existe en permanence dans l'atmosphère un champ électrique faible qui, mesurer sur un terrain plat et par beau temps, est de l'ordre de 100 à 150 volts par mètre, et qui est dû à des charges positives situées à des altitudes de l'ordre de cinquante Kilomètre.

Au moment de la formation ou de l'approche d'un nuage orageux, 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 croit dans de fortes proportions de -10 à -15 KV/m [1] (Figure I .3). Cette augmentation locale du

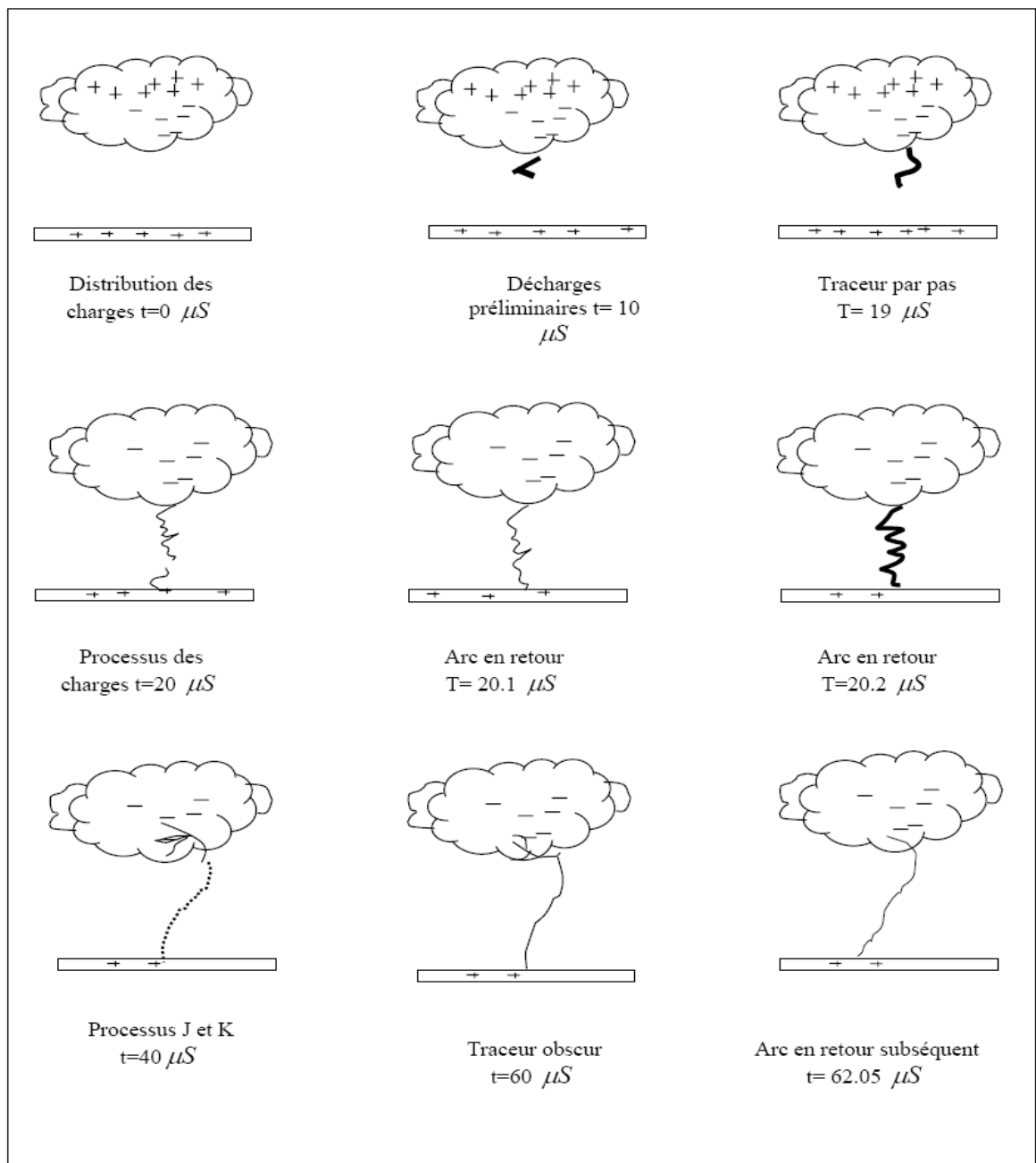
champ électrique au sol qui traduit dans un premier temps par ionisation de l'air (effet couronne) autour de la pointe des objets en contact avec le sol (effet de pointe) [5]. Le champ électrique est encore renforcé par l'approche du précurseur négatif descendant du nuage

Lorsque le champ électrique au sol dépasse une certaine intensité, les effluves de l'effet couronne en tournant les objets pointus se transforment brusquement en traceur ascendant, un contre précurseur positif encore appelé précurseur de capture, partant de l'objet et montant vers le ciel [4].

Tous les phénomènes de nature à renforcer localement le champ électrique vont conquérir à favoriser l'initiation de ces contre précurseurs et donc le déclenchement de la foudre tel est le cas en particulier des pointes métalliques effet bien connu depuis les expérimentations de benjamin Franklin et son invention du paratonnerre en 1752 [4].

### **I.7.3- Phase de Production de la foudre**

Ce contre précurseur va aller à la rencontre du précurseur provenant du nuage. Lorsqu'ils se connectent, une décharge électrique très violente rééquilibre instantanément les charges opposées : c'est le coup de foudre. Un courant électrique intense se propage alors de la terre vers le nuage. Ce courant de nature impulsion elle est appelé arc en retour. Après la phase de l'arc en retour, l'éclair peut disparaître. Cependant, si une quantité résiduelle de charges est encore présente au sommet du canal, il se développe dans le canal précédemment tracé un traceur obscur ("D'art leader") possédant une vitesse de l'ordre de  $3.10^6$  m/s et apportant une charge d'environ 1Coulomb à la quelle est associée un courant de 1 kA. Entre la fin du premier arc en retour et le début du traceur obscur, une activité électrique, désignée par les processus J et K, se manifeste. Le traceur obscur déclenche enfin l'arc en retour subséquent ("Subsequent return stroke"). Cette décharge est caractérisée par une trajectoire continue et sans ramification, une vitesse de progression élevée et pratiquement constante l'arc en retour et certainement l'étape la plus redoutable dans le mécanisme de la foudre, en raison de la raideur des fortes impulsions électromagnétiques rayonnées pendant cette phase (Endommagement possible des systèmes électriques et électroniques). [1],[5].



**Figure I. 3-** Illustration des différentes phases d'une décharge négative nuage-sol [5], [7].

#### I.7.4- Classification et description des décharges

Le professeur BERGER et ses coéquipiers [2], [8] à présenté une subdivision en quatre catégories.

On classe tout d'abord les coups de foudre selon le sens de développement du traceur, en coups de foudre descendants et en coup de foudre ascendant.

En second lieu, on classe les coups de foudre selon le sens découlement du courant principal. Conventionnellement, on définira le coup négatif, lorsque la partie négative d'un nuage se décharge, et le coup positif, lorsque c'est la partie positive du nuage (îlot positif situé à sa base, et quelque fois partie supérieur) qui se décharge.

#### **I.7.5- Coups de foudre descendants négatifs**

Dans les régions tempérées, plus 90% des coups de foudre nuage-sol appartiennent à la catégorie des décharges négatives descendantes (catégorie " a " figure I .4).

Le traceur prend naissance dans le sein des masses négatives du nuage , se progresse en direction du sol, par bonds successifs de quelques dizaines de mètres ,et avec des temps d'arrêt de 40 à 100  $\mu$ s entre bond , des vitesses de progression moyenne comprises entre 0,15 et 1 m/  $\mu$ s [5].

#### **I.7.6- Coups de foudre descendants positifs**

Les décharges appartenant à la catégorie (catégorie " c " figure I .4) sont déclenchées par un traceur descendant chargé positivement. Cette dernière catégorie constitue moins de 10% des décharges nuage-sol.

Le traceur prend naissance dans le sein des masses positives du nuage, qui progresse d'une façon contenue avec une vitesse de progression comprise entre 0,2 et 1 m/  $\mu$ s comme pour les traceurs ascendants, une fois arrivés au sol, les effluves d'effet couronne se transforment en traceurs ascendants, les deux traceurs se rejoignent et un intense courant est portée par l'arc en retour [4], [5]

#### **I.7.7- Coups de foudre ascendants positifs et négative**

Enfin les décharges de catégories (catégorie " b "et" d " figure. I .4).qui sont déclenchés par des traceurs ascendants, sont relativement rares et apparaissent généralement aux sommets des montagnes ou au niveau des longues structures [5].

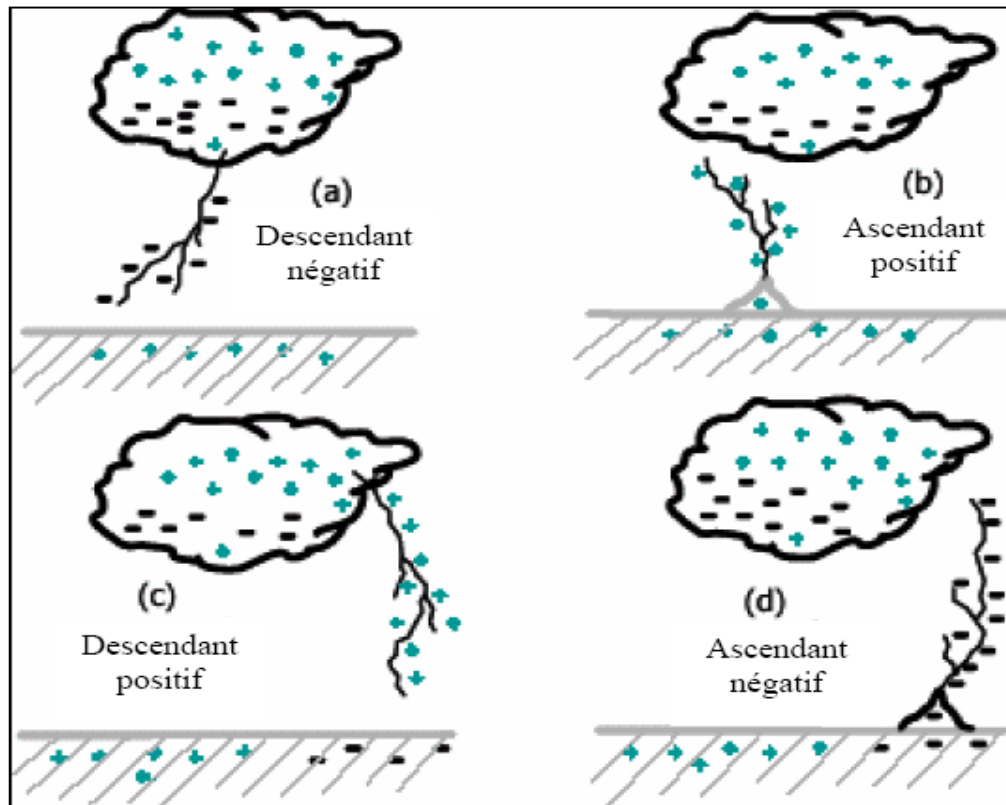


Figure I. 4 Classification des coups de foudre selon K Berger [8].

## I.8- Les effets de la foudre

Si les éclairs sont aussi dangereux, c'est qu'ils déclenchent une puissance de destruction quadruple: des ondes de courant, de chaleur et de pression ainsi qu'un effet électromagnétique à distance [1].

Le courant de foudre est un courant électrique haute fréquence qui entraîne les mêmes effets que tout autre courant circulant dans un conducteur électrique, les risques liés à la foudre sont de deux types [1], [4] :

- Ceux directement liés au coup de foudre : le foudroïement.
- Les conséquences induites par l'impacte indirect de la foudre : les perturbations électromagnétiques.

## I.9- Les conséquences directes du foudroïement [1], [4], [5]

### I.9.1- Effets thermiques

Les bâtiments non métalliques sont de mauvais conducteurs de l'électricité. Lorsqu'ils sont frappés par la foudre, le courant de foudre cherche toujours le chemin de moindre résistance pour s'écouler à la terre .si le bâtiment est en pierre, le courant

cherche à se frayer un chemin par les interstices entre les moellons, surtout s'ils contiennent de l'humidité. par effet joule cette humidité est instantanément échauffée et vaporisée. Du fait de la brièveté de courant de foudre .le phénomène prend une allure d'explosion et capable de projeter de moellons de grande taille jusqu'à des distances de la centaine de mètre.

C'est le même phénomène d'échauffement et de vaporisation, qui fait éclater les arbres et les poutres en bois. Le courant chemine souvent entre l'écorce et le bois des arbres : conséquence, le tronc est déchiqueté, des débris d'écorce et de bois en sont arrachés.

### **I.9.2- Etincelages thermiques**

C'est un cas particulier des effets thermiques. Ces derniers sont tellement intenses, qu'ils peuvent se propager à travers les matériaux, jusqu'au niveau de la face interne des structures ces effets thermiques peuvent conduire à des éjections brutales de manières incandescentes. Ce phénomène est particulièrement dangereux en présence de matière inflammable ou explosive.

### **I.9.3- Effets mécaniques**

Le transfert brutal d'énergie entre l'arc de foudre et la structure peut se faire aussi sous forme mécanique.les courants de foudre injectés dans la structure sont suffisamment intenses pour engendrer, dans certaines conditions, des déformations de structure, l'éclatement des matériaux composites stratifiés.

Si les coups de foudre sont violents les efforts électrodynamiques peuvent conduire à des déformations mécaniques pouvant entraîner des ruptures ou des arrachages de support.

## **I.10-Les conséquences indirectes du foudroiement [4], [5]**

Les coups de foudre sont des phénomènes extrêmement brefs : quelques millièmes de seconde. Lorsque des variations de forte intensité de courant électrique se produisent si violemment, elles rayonnent des ondes électromagnétiques le canal de foudre agit ainsi comme une gigantesque antenne émettrice d'ondes électromagnétiques. Celles-ci se propagent dans l'espace comme des ondes radioélectriques. Ces ondes sont captées par les parties métalliques des installations

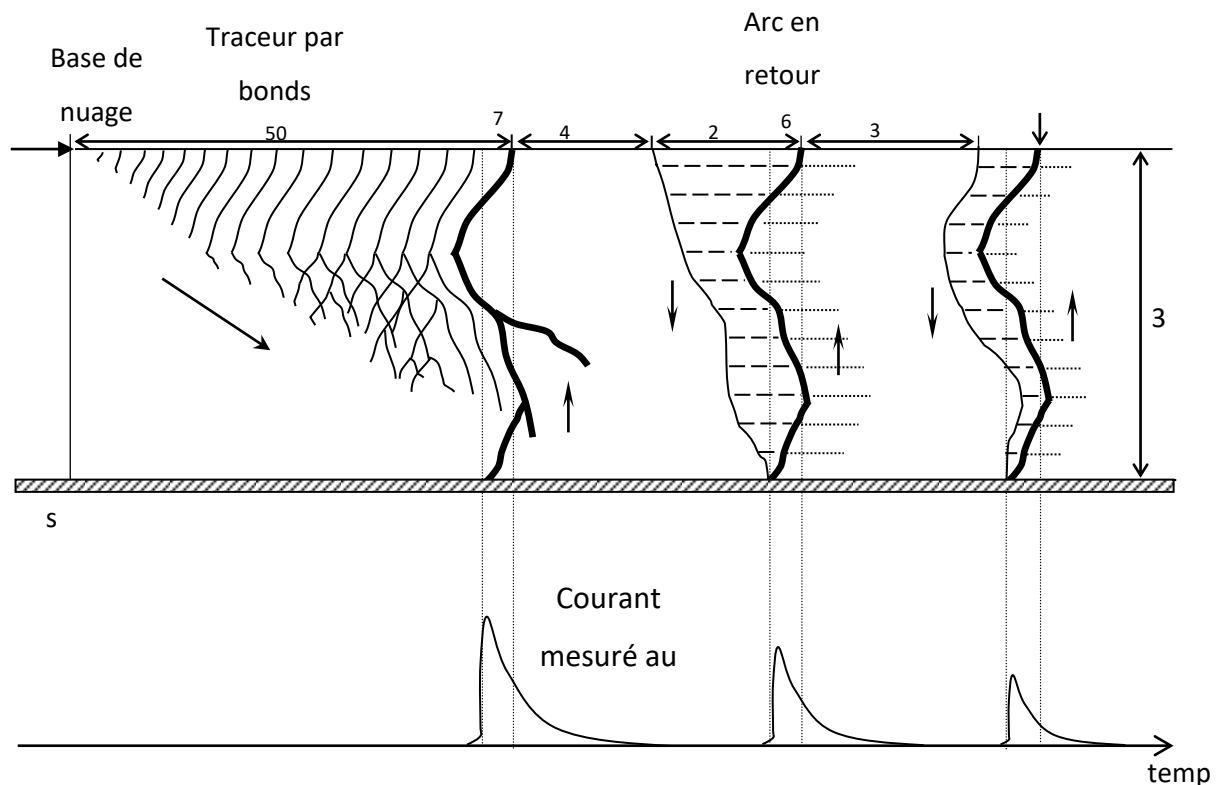
voisines du point d'impact qui se comportent comme des antennes réceptrices de télévision. Le moindre fil conducteur subit alors des surtensions électriques d'autant plus élevées que le coup de foudre est situé à proximité, des tensions de l'ordre de plusieurs milliers de volts peuvent ainsi apparaître dans le réseau électrique d'un bâtiment, même s'il est distant de plusieurs kilomètres du lieu où se manifeste l'orage.

Les surtensions et surintensités induites par ce champ électromagnétique vont occasionner des perturbations de nature électrique, particulièrement sur les systèmes comme les circuits électroniques, les automates programmables, les calculateurs, etc....

### **I.11- Mécanisme du coup de foudre descendant négatif**

A l'œil nu, le coup de foudre apparaît comme une seule décharge lumineuse, tandis que les équipements photographiques à grande vitesse, utilisés sur sites, ont montré que son développement est formé en plusieurs phases. La figure I.5 illustre ces différentes phases et les courants de foudre induits au sol.

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



**Figure I.5** Déroulement spatio-temporel d'un coup descendant et courant mesurés à la surface de la terre.

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

Dès que le traceur s'approche du sol, le champ électrique provoque une concentration de charges au niveau du sol, beaucoup plus accentuée au niveau de certains points de grandes hauteurs (généralement des tours, des pylônes ou des arbres...). Des pré décharges ascendantes positives, appelées décharges de connexion, prennent naissance à partir de ces points à la terre dès que l'intensité critique du champ électrique y est atteinte. Lorsque les deux traceurs se rejoignent, l'Arc principal ou l'arc en retour se propage depuis le sol, avec une grande vitesse (environ 50 m/ $\mu$ s) en traversant le canal ionisé établie auparavant. L'arc en retour génère un courant de forte intensité et de faible durée: quelques kilos ampères à plusieurs dizaines de kilo ampères pendant des dizaines à des centaines de microsecondes. Le passage de ce courant accroît

brutalement, par chauffage, la luminosité du canal ionisé (l'éclaire) ainsi que la pression à l'intérieur du canal par rapport à la pression de l'extérieur. La température du canal est de 15.000°C à 20.000°C L'onde résultante provoque le coup de tonnerre.

Souvent, l'arc en retour est suivi de décharges subséquentes, dont le traceur de la deuxième décharge est appelé trait flèche ou « d'art leader ». Le trait progresse d'une façon continue suivant le même trajet du traceur par bonds mais avec une vitesse 10 fois plus grande [13].

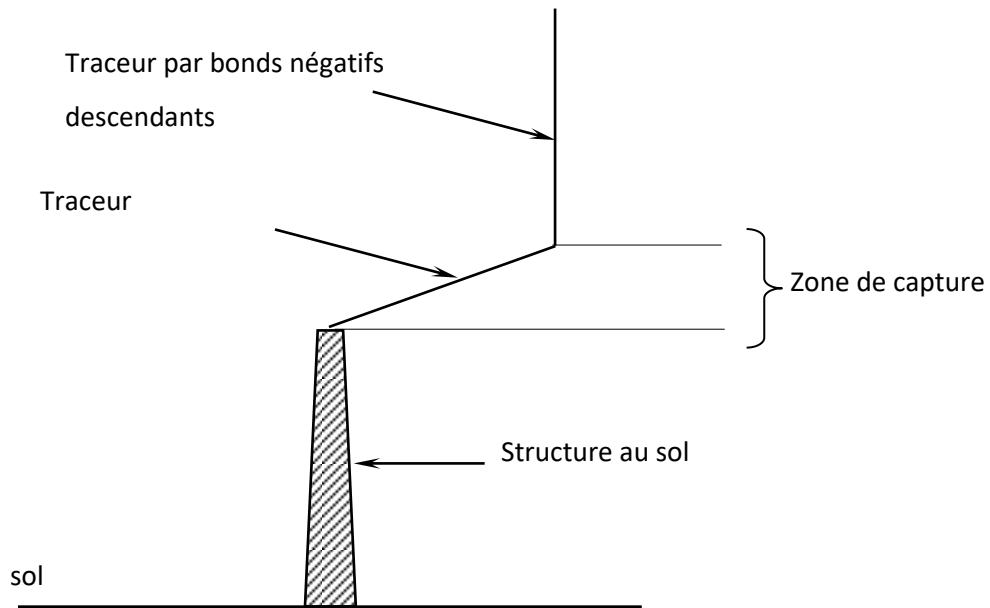
Il reste à signaler que les décharges nuages-terre représentent seulement 10% de l'ensemble des décharges atmosphériques. La majorité de ces dernières s'effectue entre nuages. On les appelle dans ce cas « sheet leader » en Anglais

## **I.12-Protection contre la foudre**

### **I.12.1- Point d'impact**

Au moment du saut final l'impact serait le point à la terre où l'intensité du champ électrique est la plus élevée. Sur un sol plan, ce sont les points culminants (tours, roches, arbres, etc..) qui facilitent le développement d'une telle décharge atmosphérique.

La figure I.6 schématise les étapes intervenant dans le coup de foudre au sol. On remarquera que le point d'impact du coup de foudre est déterminé par l'endroit où s'amorce la contre-décharge de capture. Aussi, tous les modèles de prévision du point d'impact se basent sur la propagation des traceurs par bonds négatifs ainsi que sur les critères de formation des contre décharge de capture [9][10].



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

### I.13-Modèle électrogéométrique

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

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

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

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

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 [24] a proposé l'expression suivante :

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

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

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

### I.14-Zone de protection

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

La zone de protection est déterminée par la surface non touchée par le contour de la sphère fictive [11][12].

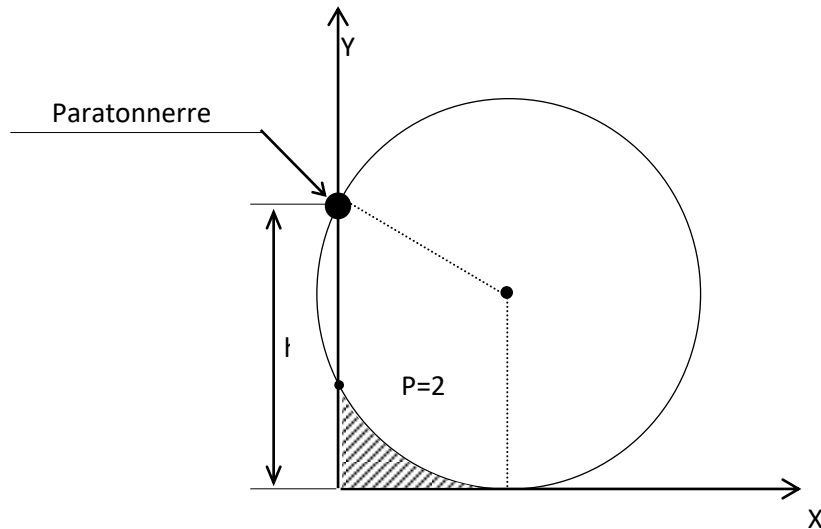
#### I.15.1-Zone de capture d'un paratonnerre horizontal

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

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

Où h est la hauteur du paratonnerre horizontal.

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



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

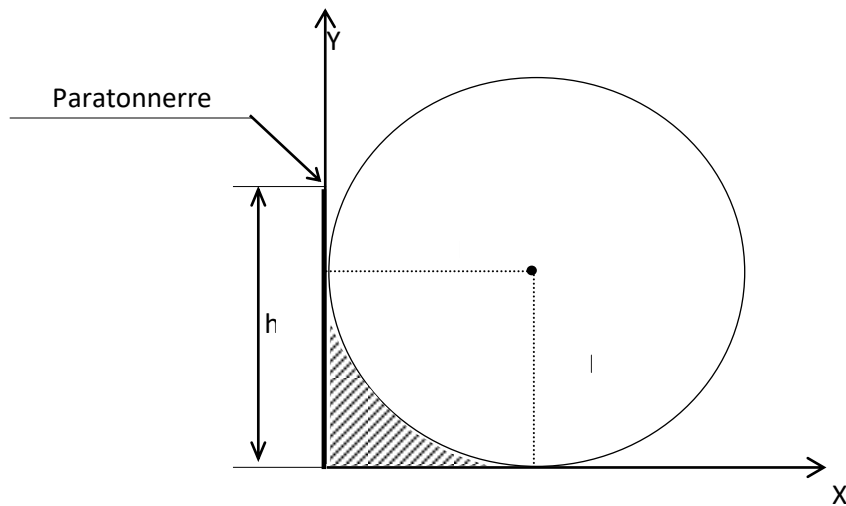
#### I.15.2-Zone de capture d'une tige verticale

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

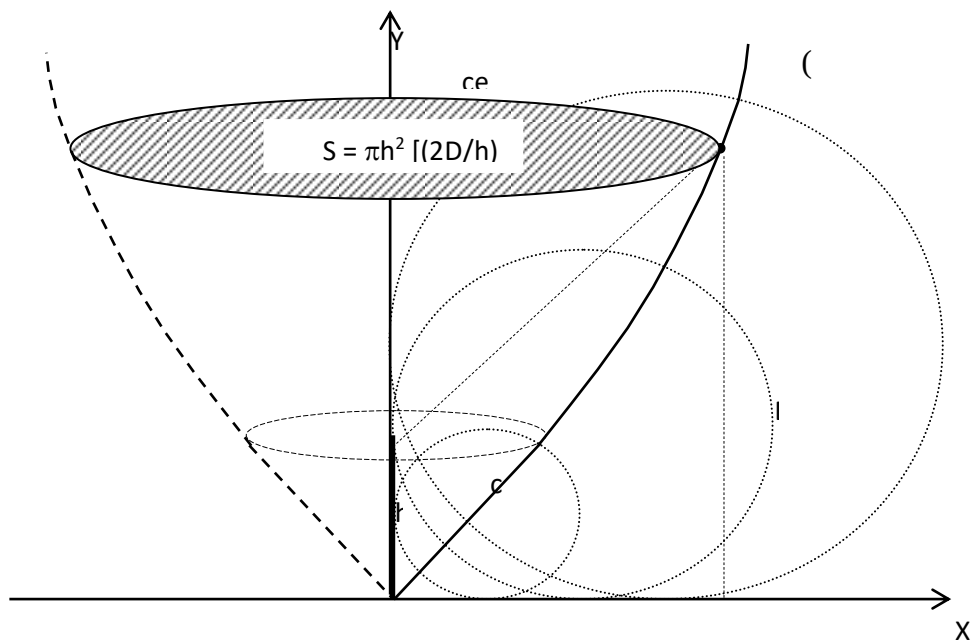
$$\begin{cases} \text{Si } D < h: & Y = X \\ \text{Si } D \geq h: & X^2 - 2Yh + h^2 = 0 \end{cases}$$

où  $h$  est la hauteur de la tige verticale.

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



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



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

### I.15-Influence des propriétés électrogéologiques du sol sur la décharge de foudre

Le modèle électrogéométrique est largement utilisé, dans le domaine de la protection contre la foudre. Ce modèle, qui est basé sur le calcul de la distance d'amorçage en fonction de l'intensité du courant de l'arc en retour, ignore les caractéristiques électrogéologiques du sol.

Plusieurs travaux sur la fréquence de foudrolement d'un lieu donné de la terre, ont confirmé que la nature du sol pourrait avoir une influence considérable sur la position finale du point d'impact de la foudre [17] [13]. Ceci a amené le laboratoire de Haute Tension de l'ENP à s'intéresser à l'influence des propriétés électrogéologiques du sol sur l'attraction des décharges de foudre par un paratonnerre [14] [15] [16].

### **I.16-Propriétés électrogéologiques de la terre et distribution du champ au sol**

Au-dessous d'un nuage orageux, le sol est constitué de plusieurs matériaux qui diffèrent par leurs propriétés électrogéologiques, et présente généralement une structure stratifiée. Du point de vue électrique, les différents matériaux qui le constituent, sont caractérisés par leur conductivité et leur permittivité relative. Les valeurs de ces deux paramètres déterminent la nature du sol.

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

Soient  $\sigma$  la conductivité du sol,  $\varepsilon$  sa permittivité, et  $\rho$  sa densité volumique de charges. L'équation de continuité s'écrit [14] :

$$\frac{d\rho}{dt} + \frac{\sigma}{\varepsilon} \cdot \rho = 0 \quad (I.1)$$

La solution de cette équation différentielle est donnée par :

$$\rho(t) = \rho_0 \cdot e^{-(t-t_0)/T_c} \quad (I.2)$$

Avec :  $\rho_0$  ; densité de charge initiale à l'instant  $t = t_0$ .

$T_c = \varepsilon/\sigma$  ; Constante de temps.

D'après l'expression (I.2), la densité volumique de charge diminue en exponentielle, ce qui traduit le déplacement des charges vers la surface du sol ; contribuant ainsi à l'augmentation de l'intensité du champ électrique à son niveau. La

vitesse de déplacement de ces charges est liée aux valeurs des paramètres  $\sigma$  et  $\varepsilon$  et plus précisément à la constante de temps  $T_c$ . La valeur de ce paramètre pour les matériaux conducteurs est de l'ordre de  $T_{c(\min)} = 1.4 \cdot 10^{-19}$  s, tandis que, pour les matériaux isolants  $T_{c(\max)} = 9.3 \cdot 10^6$  s.

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

### I.17-Conclusion

Le fort champ électrique statique qui précède l'éclair indique l'imminence d'un choc. L'éclair génère un champ magnétique variable bien plus perturbateur que la variation du champ électrique. Les effets du champ magnétique sont sévères car il pénètre au cœur des immeubles ou il agit par l'induction de surtension.

La foudre peut aussi perturber ou détruire des équipements par des impulsions directement propagées par les câbles externes. Quelle que soit la résistance de la prise de terre, toute canalisation conductrice qui pénètre dans une installation devrait y être raccordée.

De même, tout conducteur électrique externe devrait être protégé par un éclateur.

Les réseaux à fils tendus sont intéressants quand la sûreté de la protection prime sur l'esthétique. Dans tous les cas, les conducteurs de descentes à la terre doivent être multiples et si possible relié aux masses internes.

Un tel maillage est efficace contre les chocs directs par division du courant et contre les effets induits par cage de Faraday.

## II.1- Introduction

La fréquence du réseau électrique est suffisamment faible pour que les champs électriques et magnétiques dans l'air peut être considérés comme s'ils étaient indépendants. En outre, la distribution de chaque champ peut être calculée selon l'hypothèse que la théorie statique s'applique.

Dans ce contexte, à la fois l'électricité et champs magnétiques peuvent être calculés à partir d'un potentiel scalaire.

Avec une connaissance des conducteurs qui constituent la géométrie et la répartition des courants de surface potentielle, les chercheurs peut alors calculer les champs électriques et magnétiques.

Le terme champ électrique possède deux sens significatifs :

*Sens qualitatif* : c'est la région de l'espace ou il existe un état électrique susceptible de se traduire par des forces.

*Sens quantitatif* : c'est le vecteur, dont la grandeur est égale au quotient de la force s'exerçant sur une quantité d'électricité par cette quantité et dont la direction est celle de la force.

Fondamentalement, un appareil de mesure de l'intensité du champ électrique présente deux parties, la sonde (sensible au champ) et le détecteur qui comprend le circuit de traitement du signal et un indicateur analogique ou numérique.

La dimension de la sonde sera telle que les distributions de charge sur les surfaces limites qui génèrent le champ (surface sous tension et mises à la terre) ne soient pas perturbées de manière significative lorsque la sonde y est introduite [18].

Dans ce chapitre nous avons étudié le modèle mathématique et physique du champ électrique (équation de MAXWELL), et la méthode des éléments finis pour résoudre les équations de champ électrique.

## II.2- Equations à résoudre dans un domaine

Les applications de la modélisation tridimensionnelle sont de plus en plus nombreuses, mais pour des dispositifs ayant des structures compliquées et constitués de matériaux possédant des caractéristiques non linéaires, une telle modélisation s'avérerait coûteuse. Par conséquent, on est amené à des modèles bidimensionnels qui représentent correctement les phénomènes, pour des coûts de calcul raisonnables. Pour ces conditions, le système est contenu dans le plan.

### II.3- Modèle électrostatique de maxwell [20, 18]

Le champ électrique est produit par des charges dont la répartition et la valeur ne varient pas en fonction de temps. Les équations correspondantes s'écrivent :

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\vec{E}) = \vec{0} \quad (\text{II.1})$$

$$\text{div}(\vec{D}) = \rho \quad (\text{II.2})$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (\text{II.3})$$

L'équation (II.1) permet de définir une fonction potentielle scalaire électrique Tel que :

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}} u \quad (\text{II.4})$$

Le modèle se ramène à :

$$\text{div}(\epsilon \overrightarrow{\text{grad}} u) = \rho \quad (\text{II.5})$$

Les objets conducteurs se trouvant à une tension élevée sont aussi parcourus par des courants électriques (alternatifs ou continus). Ces derniers génèrent aussi des champs magnétiques. Cependant sous la haute tension, les champs électriques sont prépondérants. Ainsi dans un poste de haute tension 220KV, le champ électrique à une distance de 6 mètres du conducteur central d'une ligne en nappe atteint 2 KV/m, ce qui pour le champ électrique est une valeur élevée, tandis que le champ magnétique n'est que de 0.07KA/m. Suivant la fréquence de la haute tension qui les génère, les champs électriques peuvent être [19] :

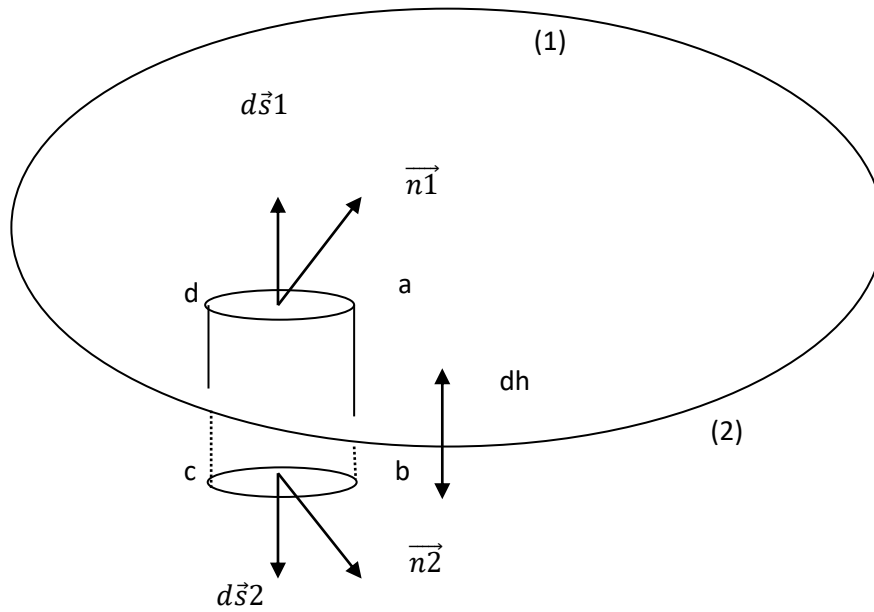
- stationnaires (HT. Continue)
- Quasi stationnaire (HT. à fréquence industrielle de 50HZ)
- transitoires (HT. De choc)

Le champ électrique en haute tension constitue une contrainte pour le matériel électrique et un danger pour le personnel d'exploitation des postes. Pour l'isolateur ou les systèmes d'isolation (pylônes, isolateur-éclateur et parafoudres d'une ligne aérienne), les valeurs locales du champ électrique sont déterminantes pour la fiabilité de la durée de vie du matériau considéré [19]. D'où l'importance du calcul du champ électrique.

### II.3.1- Equations de passage entre différents milieux

En général un problème d'électrostatique fait intervenir plus d'un milieu. Il peut s'agir par exemple de deux milieux diélectriques solides ou séparés par l'air. Dans certains cas, un diélectrique liquide vient remplir l'espace entre les conducteurs.

Considérons une surface fermée, formée d'une cellule cylindrique dont une base est située dans le milieu (1), l'autre dans le milieu (2), les dimensions de la cellule sont infinitésimales, sa hauteur est (dh) et chacune des bases a une surface (dh).



**Figure II. 1** conditions de passage entre milieux différent.

Lorsque (dh) et (ds) tendent vers zéro,  $\vec{E}$  ou  $\vec{D}$  sur l'une ou l'autre des bases, tend vers sa valeur infiniment près de l'interface de part et d'autre de celle-ci. L'application du théorème de Gauss sur la surface de la cellule donne :

$$\oint_S \vec{D} \cdot \vec{n} \cdot ds = Q = \int \sigma ds \quad (\text{II.6})$$

La face latérale ne contribue pas puisque  $dh \rightarrow 0$ . En appelant  $D_1$ ,  $D_2$  les limites du flux électrique très près de l'interface, dans les milieux 1 et 2, le théorème de Gauss donne :

$$(D_1 + D_2)ds = \sigma ds \quad (\text{II.7})$$

A la limite où  $dh$  tend vers zéro,  $n_1$  et  $n_3$  sont normaux à l'interface entre les diélectriques ,

$$n_1 = -n_2.$$

$$(D_1 + D_2)n_1 = \sigma \text{ d'où } D_{n1} - D_{n2} = \sigma$$

Au passage entre deux milieux diélectrique, la composante normale de la densité du flux électrique  $D$  subit une discontinuité égale à la densité de charge libre  $\sigma$  déposée à l'interface.

$D_1 = D_2$  à l'interface dépourvue de charge

Examinons les conditions de passage imposées au champ  $E$  en électrique :

$$\int_1 \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_S (\text{rot } \vec{E}) \cdot \vec{n} \cdot d\vec{s} = 0 \quad (\text{théorème de Stokes})$$

Nous avons choisi un contour fini  $abcd$  (figure. II.1), une partie de ce contour se trouve dans le milieu (1) et l'autre dans le milieu (2). Les segments  $ab$  et  $cd$  ont une longueur que l'on fera tendre vers zéro. Les contributions à l'intégrale de la ligne sont donc négligeable dans ces conditions, l'intégrale précédente se réduit à :

$$\vec{E}_2 d\vec{l} + \vec{E}_1 d\vec{l} = 0 \quad (\text{II.8})$$

Les deux termes de l'équation ci-dessus représentent les composantes tangentielles de  $\vec{E}_2$  et  $\vec{E}_1$  d'où :

$$E_{t2} = E_{t1} \quad (\text{II.9})$$

Le composant tangentielle du champ électrique est continue au passage d'un milieu diélectrique à un autre.

#### II.4- Condition aux limites [20]

Généralement, le potentiel est supposé connu sur une limite (condition de Dirichlet), ou bien les lignes équipotentielles scalaires sont supposées orthogonales aux limites (cas des plans de symétrie, ou du voisinage avec des matériaux totalement isolants). Dans ce cas, la dérivée normale  $\frac{\partial u}{\partial n}$  est alors supposée nulle (condition de Neumann). Enfin il existe des études pour lesquelles on connaît la valeur du flux de  $D$  sortant sur une limite. On est alors en présence de la condition :

$$\frac{\partial u}{\partial n} = K \quad (\text{Condition de Neumann}) \quad (\text{II.10})$$

Si  $\epsilon$  peut être supposée constante cela simplifie le problème ; mais il est tout à fait possible de traiter les cas où  $\epsilon$  dépend du champ électrique. L'équation (II.5) devient dans ce cas non linéaire et la loi de variation de  $\epsilon$  devra être fournie pour le

matériau concerné. Le coût de la solution est élevé, mais les problèmes techniques résolus sont plus proches du cas réel [10].

## II.5- Méthode numérique de résolution

Les principaux modèles utilisables pour simuler le fonctionnement des dispositifs électrotechniques mettent en œuvre des équations aux dérivées partielles [20]. Ces équations ne peuvent être résolues d'une manière générale par des méthodes analytiques. En effet, ces méthodes ne peuvent être appliquées pour traiter des dispositifs où la géométrie est complexe ou bien les matériaux ont des propriétés non linéaires.

Les seules méthodes disponibles sont alors celles qui font appel à des techniques de discrétisation [20, 21]. Parmi ces méthodes, on pourrait utiliser la méthode des différences finies qui consiste à discrétiser le domaine à étudier par un réseau de points à mailles rectangulaires ou carrées et à remplacer les opérateurs différentiels par des opérateurs de différence entre les valeurs de l'inconnue en différents points voisins. Bien que cette méthode soit simple, elle nécessite un maillage régulier qui s'adapte difficilement à des géométries complexes [22]. Par contre la méthode, dite des éléments finis, est mieux adaptée à ce type de géométrie [20].

L'aspect de cette méthode consiste à découper le domaine d'étude en petits domaines appelés éléments finis, et à construire ensuite des fonctions d'interpolations qui sont généralement des polynômes de degrés 1 ou 2.

L'une des originalités de la méthode des éléments finis est qu'elle est basée sur la formulation intégrale du phénomène à étudier et ses conditions aux limites. Dans ce cas on discrétise la formulation intégrale de l'équation pour aboutir à un système d'équations algébriques qui fournit la solution approchée.

La méthode des intégrales de frontières consiste à ramener tout le domaine d'étude sur un contour. Cette méthode ne traite pas les problèmes non linéaires et elle obéit à beaucoup de singularités. Cette méthode peut être couplée à celle des éléments finis si l'on a des conditions aux limites particulières.

Une autre méthode pour le calcul du champ dans les domaines des hautes tensions est celle des charges fictives (simulation de charge). Elle est basée sur une simulation de la distribution superficielle des charges électriques, sur la surface des électrodes, par une distribution discrète des charges fictives, à l'intérieur de ces dernières. L'emplacement et la grandeur de ces charges seront déterminés de manière à

ce que leur effet intégré satisfasse aux conditions aux limites du potentiel connu sur la surface des électrodes [18]. La méthode utilisée dans notre travail est la méthode des éléments finis(MEF)

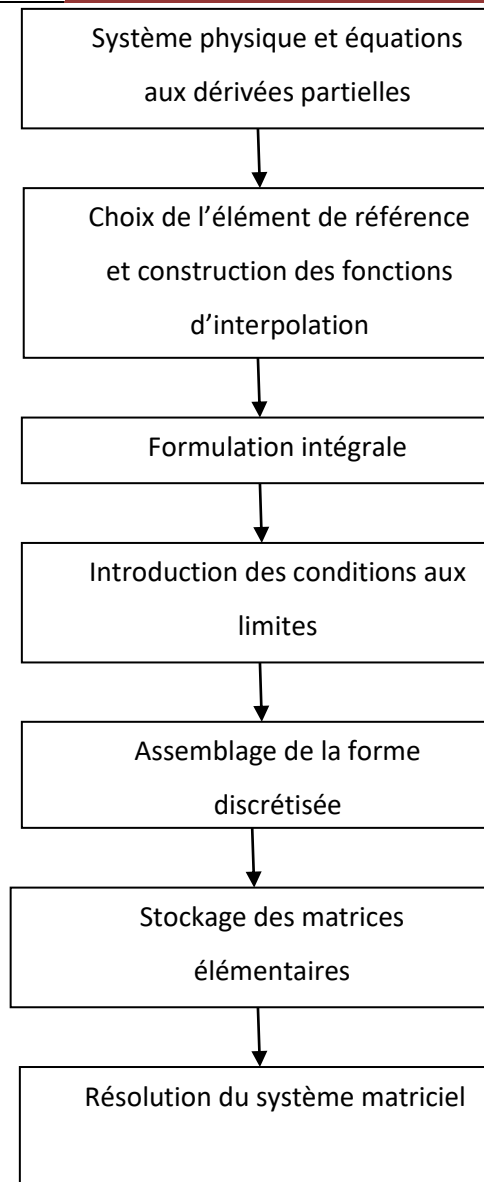
## II.6- Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis est définie comme une méthode de discrétisation des formes intégrales suivant le type de Galerkin ; l'intégrale est remplacée sur tout le domaine par une somme d'intégrales élémentaires.

Dans le cadre de l'approximation par éléments finis, les fonctions d'approximation de la solution sont définies uniquement sur leur élément associé et sont nulles partout ailleurs.

Le principe fondamental de la MEF réside dans le découpage du domaine d'étude en domaine élémentaires de dimensions finis. Sur chacun de ces éléments, la fonction inconnue est approchée par un polynôme dont le degré peut varier d'une application à l'autre.

On présente dans l'organigramme ci dessous les étapes de résolution par la MEF.



*Figure II. 2- l'organigramme de résolution par la MEF.*

## II.7- Approximation par élément finis

La méthode d'approximation nodal par sous domaines simplifie la construction de l'inconnue  $U(x)$ . Elle consiste à identifier un ensemble de sous domaines  $V^e$  et à définir une fonction approchée  $u^e(x)$ . L'approximation nodale sur  $V^e$  ne fait intervenir que les variables nodales attachées à des nœuds situés sur  $V^e$  et sa frontière. Les fonctions approchées  $u^e(x)$  sur chaque sous domaine  $V^e$  doivent être continues sur  $V^e$  et doivent satisfaire les conditions de continuité entre différents sous domaines [19].

Les points où la fonction approchée  $u^e(x)$  coïncide avec la fonction exacte sont des nœuds d'interpolation. Il faut d'abord définir analytiquement la géométrie de tous les éléments et ensuite construire les fonctions d'interpolation  $N_1(x)$  correspondants.

On va se retrouver obligé à calculer les fonctions d'interpolation sur chaque domaine (élément) ce qui demande un cout très élevé de calcul et de mémoire. Ceci nécessite l'introduction de la notion de l'élément de référence.

### II.7.1- Élément de référence

C'est un élément de forme très simple repéré dans un espace de référence qui peut être transformé en chaque élément réel  $V^e$  par la transformation  $\mathfrak{I} \rightarrow x^e = X^e(\xi)$ .

Les transformations  $\mathfrak{I}^e$  doivent être bijectives en différents points  $\xi$  situés  $V^e$  ou sa frontière [22], d'où l'utilisation des fonctions de transformation géométriques

$$\langle \overline{N(\xi)} \rangle$$

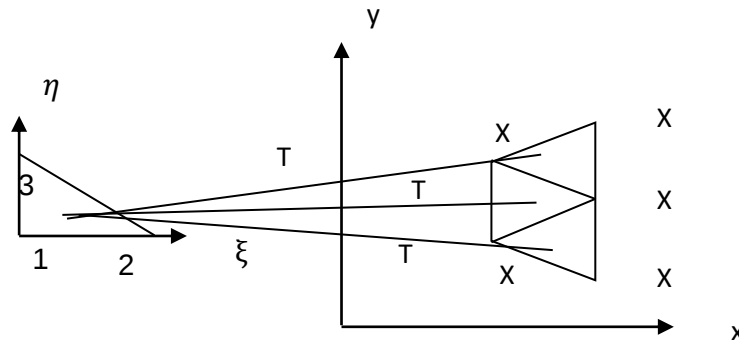
$$x(\varepsilon) = \langle \overline{N(\xi)} \rangle \{x_n\}$$

(II .11)

$$y(\varepsilon) = \langle \overline{N(\xi)} \rangle \{y_n\}$$

Pour que  $\mathfrak{I}^e$  soit bijective il faut que la matrice jacobéenne correspondante ait un déterminant différent de zéro.

Elle est définie comme suit :



**Figure II. 3** transformation des coordonnées des éléments réels en celles de l'élément de référence.

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_1}{\partial \eta} \\ \frac{\partial N_1}{\partial \varsigma} \end{bmatrix} [\{x_n\} \{y_n\} \{z_n\}] \quad (II.12)$$

Elle est le produit d'une matrice contenant les drivées en  $\xi, \eta, \varsigma$ . Des fonctions de transformation géométrique et celle des coordonnées des nœuds de l'élément.

- Intérêt de l'utilisation de l'élément de référence

La fonction approchée  $u(x)$  s'écrit

$$u(x) = \langle N(x) \rangle \{u_n\}$$

Si l'élément de référence est iso-paramétrique on écrit :

$$x(\xi) = \langle N(\xi) \rangle \{X_n\} \quad (II.13)$$

$$u(\xi) = \langle N(\xi) \rangle \{u_n\}$$

$\langle N(x) \rangle$ : est la fonction d'interpolation sur ...

$\{u_n\}$ : Valeurs nodales de  $u(x)$ .

Les fonctions  $N(x)$  sur l'élément réel dépendent des coordonnées des nœuds de l'élément, par contre les fonctions  $N(\xi)$  sont indépendantes de la géométrie de l'élément réel  $v^e$ , les mêmes fonctions  $N(\xi)$  peuvent donc être utilisées pour tous les éléments de mêmes formes.

### II.7.2- Construction des fonctions $N(\xi)$

Il n'existe pas de technique manuelle systématique pour construire  $N(\xi)$ . Seule l'expérience a permis de trouver des fonctions correspondant à un certain nombre d'éléments classique d'une manière générale, on écrit :

$$u(\xi) = \langle p_i(\xi_i) \rangle \begin{Bmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{Bmatrix} \quad (II.14)$$

Les  $p_i(\xi_i)$  Constituent les polynômes dits bases polynomiales.

- les étapes de construction de  $\langle N \rangle$  sont :
  - choix de la base polynomiale  $\langle p(\xi) \rangle$
  - évaluation de la matrice nodale  $[p_n] = [p_j(\xi_i)]$
  - inversion de la matrice nodale  $[p_n]$ , calcul de  $\langle N \rangle$  Aux point  $\xi$  désignés.

### II.7.3- Transformation des operateurs de dérivation

Pour calculer les dérivées premières en  $\xi$ , d'une fonction a partir de ses dérivées en  $x$  on a :

$$\{\partial_\xi\} = [J]\{\partial_x\}$$

$$\{\partial_x\} = [J]^{-1}\{\partial_\xi\} \quad (II.15)$$

$$\langle x \ y \ z \rangle = \langle \overline{N(\xi)} \rangle [\{x_n\} \ \{y_n\} \ \{z_n\}] \quad (II.16)$$

$[J]$  : est la matrice Jacobéenne de la transformation géométrique.

$N(\xi)$ : fonction d'interpolation sur l'élément de référence.

En dérivant la relation (II.16) on obtient [J] avec :

$$[j]^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \xi}{\partial x} & \frac{\partial \eta}{\partial x} & \frac{\partial \varsigma}{\partial x} \\ \frac{\partial \xi}{\partial y} & \frac{\partial \eta}{\partial y} & \frac{\partial \varsigma}{\partial y} \\ \frac{\partial \xi}{\partial z} & \frac{\partial \eta}{\partial z} & \frac{\partial \varsigma}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

Donc pour passer de l'intégration d'une fonction f sur l'élément  $v^e$  à une autre intégrale sur l'élément de référence  $v^r$  on écrit :

$$\int_{v^e} f(x) dx dy dz = \int_{v^r} f(x(\xi)) \det(j) d\xi d\eta d\varsigma \quad (\text{II.18})$$

#### II.7.4- Formulation intégrale

##### II.7.4.1-Méthodes des résidus pondérés

Résidus : un système physique continu stationnaire dont le comportement est décrit par

$$\mathcal{L}(u) + f_V = 0 \text{ sur } V \quad (\text{II.19})$$

Les conditions aux limites sont :

$$\mathcal{G}(u) = f_S \text{ sur } S \quad (\text{II.20})$$

U constitue une solution du problème si elle satisfait (II.19) et (II.20) en même temps.

Nous appelons résidus la quantité  $R(u)$

$$R(u) = \mathcal{L}(u) + f_V \quad (\text{II.21})$$

Qui s'annule quand u est la solution exacte de (II.19)

$\mathcal{L}$ ,  $\mathcal{G}$ , sont des opérateurs différentiels caractérisant le système.

**\*Formule intégrale :** la méthode des résidus pondérés consiste à rechercher les fonctions u qui annulent la forme (II.21)

$$w(u) = \int_V \langle \Psi \rangle \{R(u)\} dv = \int_V \langle \Psi \rangle \{\mathcal{L}(u) + f_V\} dv \quad (\text{II.22})$$

$\langle \Psi \rangle$  : fonction de pondération

**\*Transformation des formes intégrales :** par intégration par partie, on diminue l'ordre des dérivées partielles. Certaines conditions aux limites sont prises en compte par la formulation. (II.20). [20.1, 22].

**\*Choix des fonctions de pondération :** selon le choix de la fonction de pondération, l'équation (II.22) conduit à différentes méthodes parmi lesquelles on cite [22] :

-Collocation par points : La matrice  $\langle \Psi \rangle$  est la distribution de Dirac ( $x_i$ ) aux points  $x_i$  dits points de collocation.

$$w = \int_v (x_i) \cdot R(x, y) dv = R(x_i, u) = 0$$

Elle a l'avantage d'éviter l'intégrale sur le volume.

-Méthode de Galerkin : Les valeurs données par  $\langle \Psi \rangle$  sont constituées par l'ensemble des fonctions d'interpolation  $N$  tel que :

$$\Psi = N$$

Donc :

$$w = \int_v \{N\} (\{N\}^T \{U\}) dv = 0 \quad (II.23)$$

L'intégration par partie donne :

$$w(u) = \int_v \{N\}^T (\{N\}^T \{U\}) dv + \int_v \{N\} f_v dv + \int_{sf} \{N\} f_s ds = 0 \quad (II.24)$$

C'est la méthode la plus utilisée.

-méthode des moindres carrés : cette méthode est peu utilisée car elle ne permet pas l'intégration par partie.

Dans notre travail on a utilisé la méthode de Galerkin.

#### II.7.4.2-Méthode variationnelle

Elle consiste à minimiser la fonctionnelle d'énergie du système dont le sens physique est la différence de deux types d'énergies, l'une est l'énergie cinétique et l'autre est l'énergie potentielle [19].

L'avantage peut s'appliquer à toute équation, indépendamment de l'existence et de la connaissance d'une formulation variationnelle du problème par contre, utiliser la méthode des résidus pondérés, dès le départ, il existe une erreur de méthode caractérisée par le choix de la fonction de pondération [20].

### II.8- Conclusion

La méthode des éléments finis est arrivée aujourd'hui à un degré de maturité et est en fait un des outils d'analyse les plus utilisés dans les disciplines de l'ingénieur.

Associer aux techniques graphiques interactive propres à l'informatique moderne et aux méthodes utilisées dans le domaine de conception assisté par ordinateur (utilisation de bases de données technique) elle peut être mise à la portée de la plus part des ingénieurs.

### III.1- Techniques expérimentales [23]

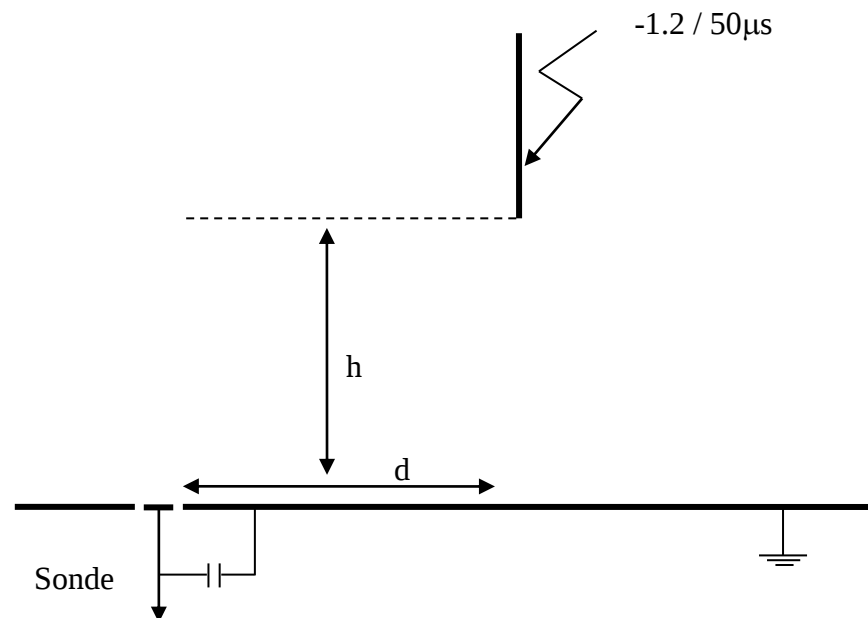
Les essais et les mesures présentés dans ce travail ont été réalisés au Laboratoire de Haute Tension de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger ENP.

Ils présentent dans ce chapitre le circuit d'essai ainsi que la méthode utilisée pour déterminer la tension  $U_{0\%}$  du système avec terre homogène conductrice, qui sera appliquée par la suite au système avec terre discontinue. Enfin, on donne le circuit utilisé pour la mesure du champ électrique au sol par la méthode de la sonde à capacités réparties (S.C.R).

### III.2- Modèle expérimental

#### III.2.1- Modèle expérimental avec terre homogène

Ce système est constitué d'une tige en cuivre de 4.8 mm de diamètre, et d'un plan en Aluminium plusieurs niveaux de tension de choc de foudre négative différents ont été appliqués. Pour chaque niveau de tension, elles enregistrent les formes d'ondes captées par la sonde et visualisée par un oscilloscope numérique de la marque TEKTRONIX TDS 340A 100MH.



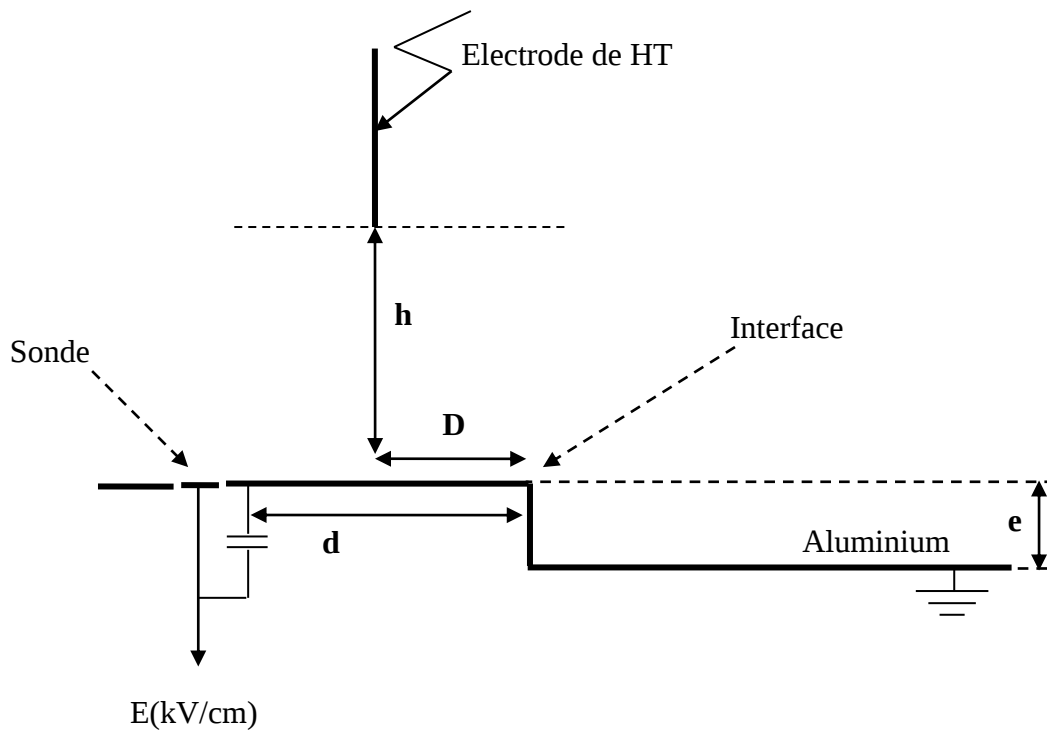
*Figure III. 1- Modèle expérimental avec terre homogène*

#### III.2.2- Modèle expérimental avec terre discontinue

La terre discontinue est constituée de deux plaques en aluminium de 4 mm d'épaisseur ayant chacune une surface de  $1 \times 1 \text{ m}^2$ . La première (la partie haute)

présente à l'une de ses extrémités un coude d'un angle de  $90^\circ$  qui simule l'interface. La deuxième (la partie basse) est une simple plaque horizontale. En joignant les deux parties, la terre de type discontinu aura une surface de  $2 \times 1 \text{ m}^2$  et une interface perpendiculaire de profondeur «e»,

La figure III.2 représente le modèle expérimental.



**Figure III.2-** Modèle expérimental de terre discontinu en présence de la sonde à capacité répartie.

Avec :

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

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

**d** : distance horizontale entre l'interface et la sonde.

**D** : distance horizontale entre l'interface et l'axe de la tige haute tension.

Les distances **h** sont les mêmes qu'au système homogène, mais les distances **d**, **D** et **h** sont choisies de telle sorte qu'un rapport avec **h** soit vérifié.

Dans tous les cas on garde la profondeur de l'interface constant  $e = 10 \text{ cm}$  les deux niveaux de tension utiliser sont  $0.3U_{0\%}$  et  $0.5U_{0\%}$  des systèmes tige-plan correspondants.

Les différentes distances utilisées sont données dans le tableau III.1 ci-dessous:

| h (cm) | 8                | 16               |
|--------|------------------|------------------|
| d (cm) | 0, 4, 8, 16, 40  | 0, 8, 16, 32, 80 |
| D (cm) | 0, 4, 8, 1.6, 32 | 0, 8, 16, 32, 80 |

**Tableau III. 1-** Les différents paramètres pris pour la mesure.

### III.3- Configuration du modèle expérimental

Après la détermination des tensions  $U_{0\%}$  pour les différentes hauteurs  $h$  et la mesure du champ électrique du système homogène conductrice, nous procédons à l'étude des différentes configurations de terre discontinue (figure III.3). A cet effet, nous distinguons, deux types de variation du champ électrique, selon la position de la tige HT (D) et de la sonde (d).

**1<sup>er</sup> cas :** La sonde balayée tout le plan

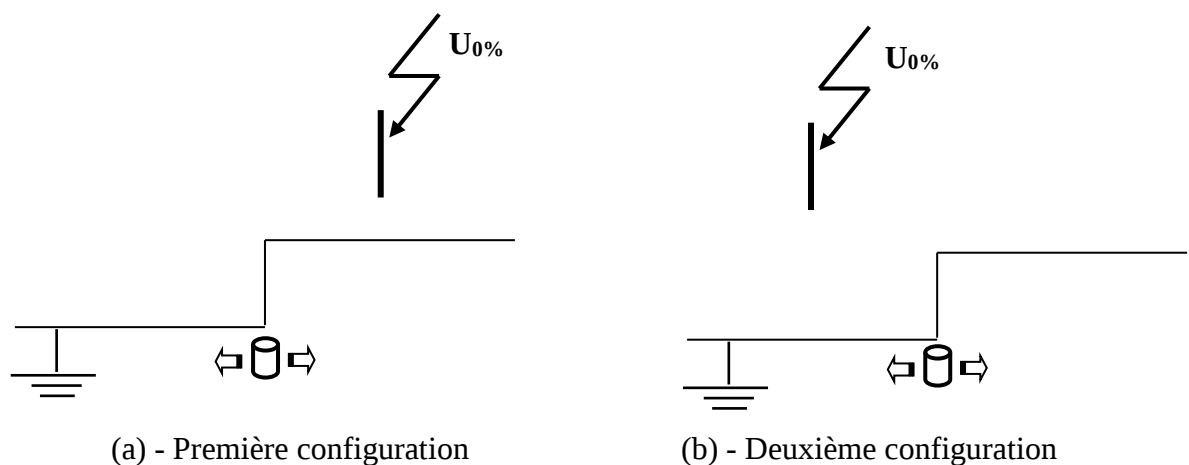
**a - Première configuration :** la tige HT située au-dessus de la partie haute de la terre discontinue.

**b - Deuxième configuration :** la tige HT située au-dessus de la partie basse de la terre discontinue.

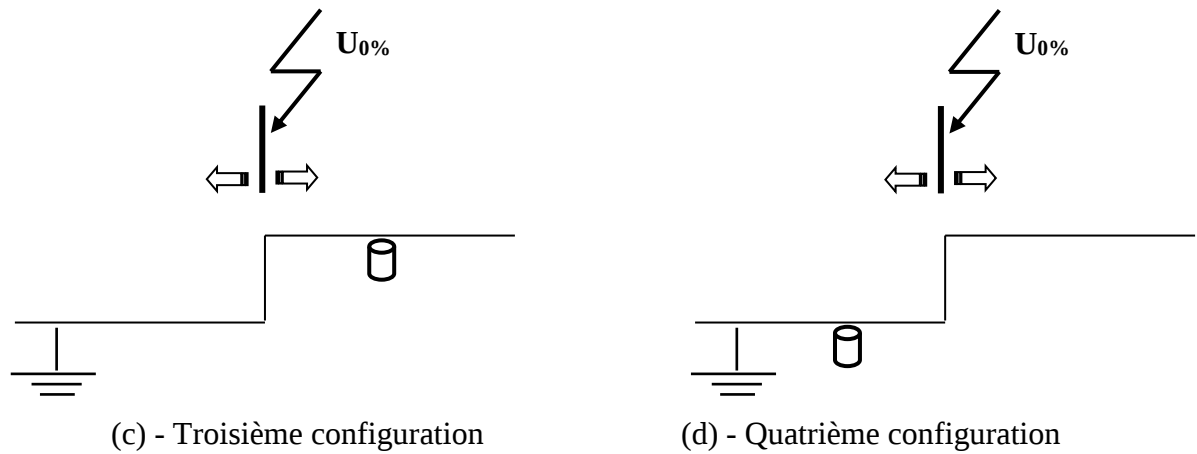
**2<sup>ème</sup> cas :** La tige sous tension TH balayé tout le plan

**c - Troisième configuration :** la sonde située sur la partie haute de la terre discontinue.

**d - Quatrième configuration :** la sonde située sur la partie basse de la terre discontinue.



(1) La sonde balayée tout le plan



## (2) La tige sous tension TH balayé tout le plan

**Figure III.3-** Configurations du modèle expérimental dans le cas de terre discontinue.

### III.4. Présentation des résultats

#### III.4.1-Cas de terre hétérogène

Dans cette partie, nous avons comme objectif l'étude de l'influence de la terre discontinue sur la distribution du champ électrique au sol, pour les différents paramètres :

- Distance (d) entre l'axe de la sonde et l'interface.
- Distance (D) entre la tige HT et l'interface.
- l'intervalle d'air tige-plan (h).

Ainsi que l'effet de l'interface sur l'intensité du champ.

La distribution du champ au sol discontinu est déterminée à l'aide de la comparaison des deux systèmes homogène et hétérogène, avec ces deux parties haute et basse.

Pour une étude détaillée, nous avons intéressé au deux variations:

- la sonde est fixée la tige se déplace au-dessus de plan discontinu.
- la tige est fixée la sonde se déplace sous le plan discontinu.

#### III.4.2-Distribution du champ en fonction de position de la sonde

Elles ont regroupé les résultats, pour ce paramètre ( $d/h$ ), avec les deux premières configurations possible, qui correspondent aux deux positions de la tige, la première si la tige au dessus de la partie haute et, la deuxième si la tige au dessus de la partie basse. Avec les points de mesure de la sonde sur tout le plan.

***La Première configuration : La tige au dessus de la partie haute de la terre discontinue, la sonde balayée tout le plan***

Pour le niveau de la tension appliquée  $0.3U_{0\%}$ , avec les grandes positions de la sonde ( $d/h > 2$ ), les figures III.4, III.5, montrent que, l'intensité du champ mesurée sur la partie haute de la terre discontinue est supérieure à celle du système homogène. On compare le rapport entre l'intensité de ces deux systèmes avec l'unité, système homogène ( $E_0$ ) et système hétérogène ( $E$ ), avec les mêmes paramètres.

Au voisinage de l'interface ( $d/h < 2$ ), les résultats obtenus, montrent une sorte de discontinuité dans l'évolution du champ électrique, celle-ci devient inférieure à la valeur obtenue dans le cas du sol homogène ( $E/E_0 < 1$ )

Au niveau de l'interface, le système tige-interface se comporte comme un système tige-tige. Or sous tension négative, celui-ci est moins rigide que le système tige-plan.

A cause de l'intensité de champ plus importante dans l'intervalle tige-tige, le champ s'accroît sur l'interface d'une valeur très élevée par rapport aux autres points du plan discontinu.

Ces résultats, confirment les recherches abordées par notre laboratoire de haute tension sur la rigidité des intervalles d'air tige-plan discontinu.

Pour le niveau de tension  $0.5U_{0\%}$ , et pour la même configuration, nous constatons que l'intensité du champ augmente avec l'augmentation du niveau de tension, cela est visible au niveau de l'interface, qui se comporte comme un système tige-tige, qui est le moins rigide.

En ce qui concerne, le champ sur la partie basse de la terre discontinue, de même configuration (la tige au dessus de la partie haute), les résultats montrent que, l'intensité du champ diminue, et tend vers un niveau inférieur au niveau des valeurs du champ sur la partie haute. Cela dû à l'élévation de distance tige-sonde.

Au voisinage de l'interface située entre la tige HT (partie haute) et la sonde (partie basse), le champ prend la valeur la plus faible, au cours de son évolution sur le plan côté partie basse. Nous constatons que l'interface joue un rôle attractif important sur la distribution des lignes du champ au sol discontinu.

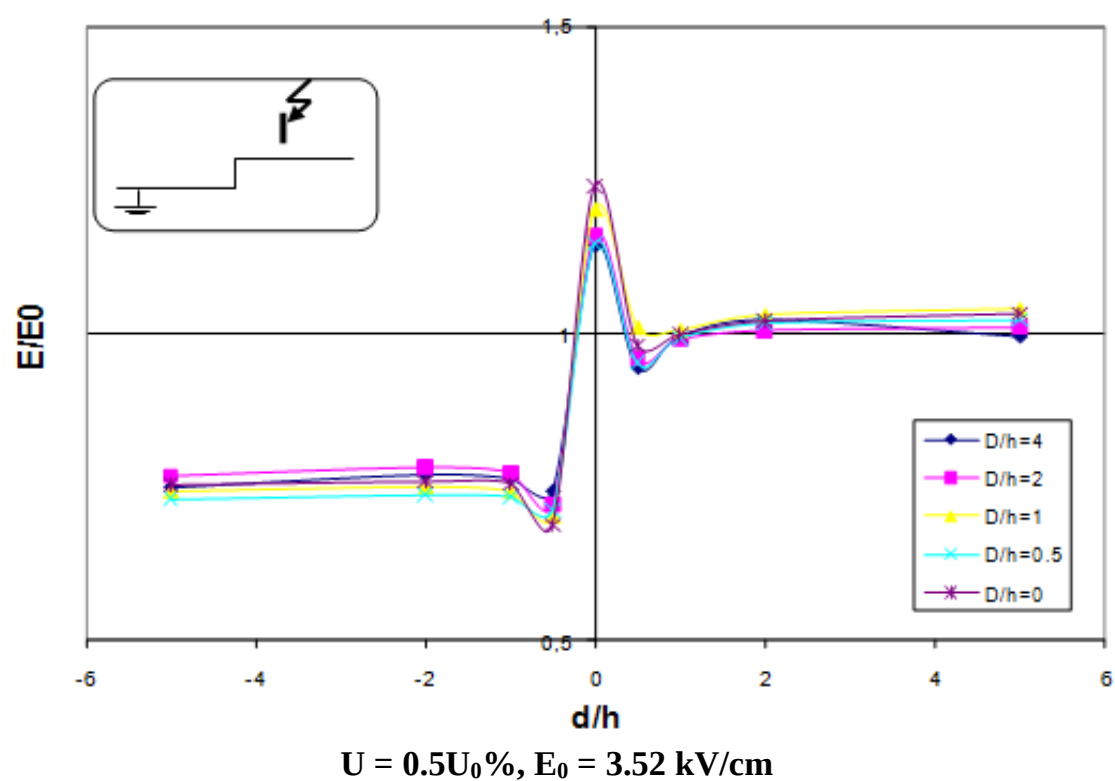
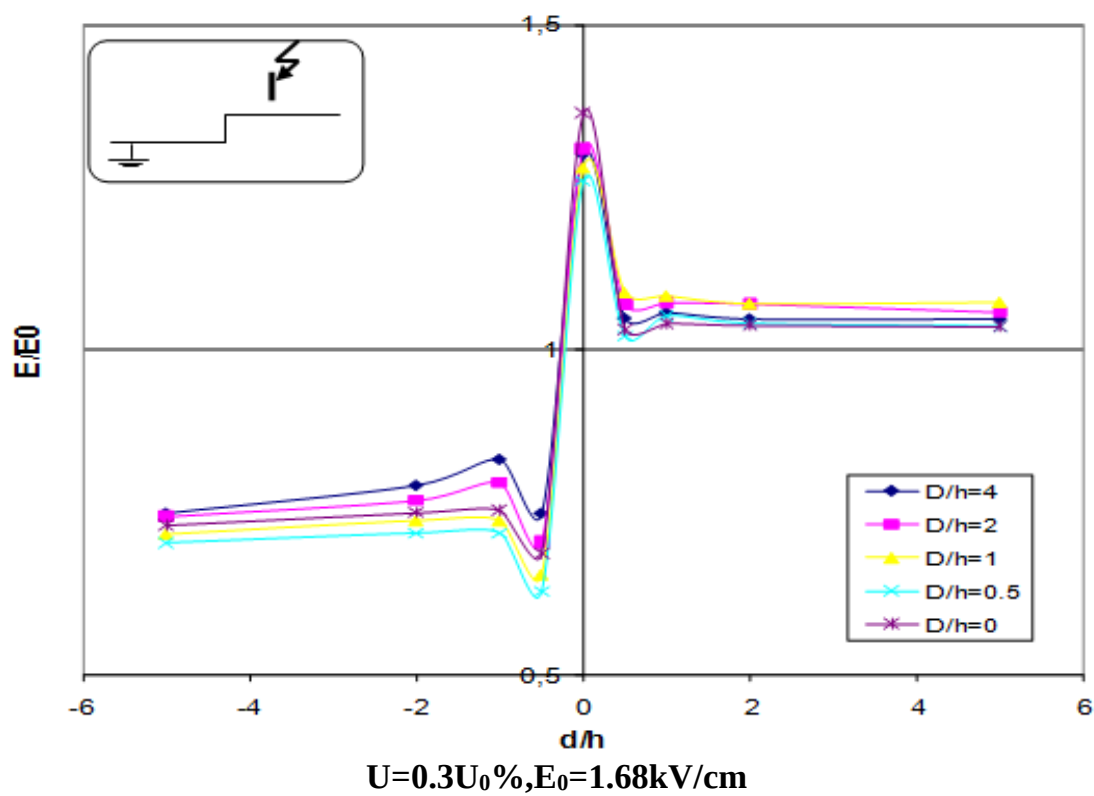
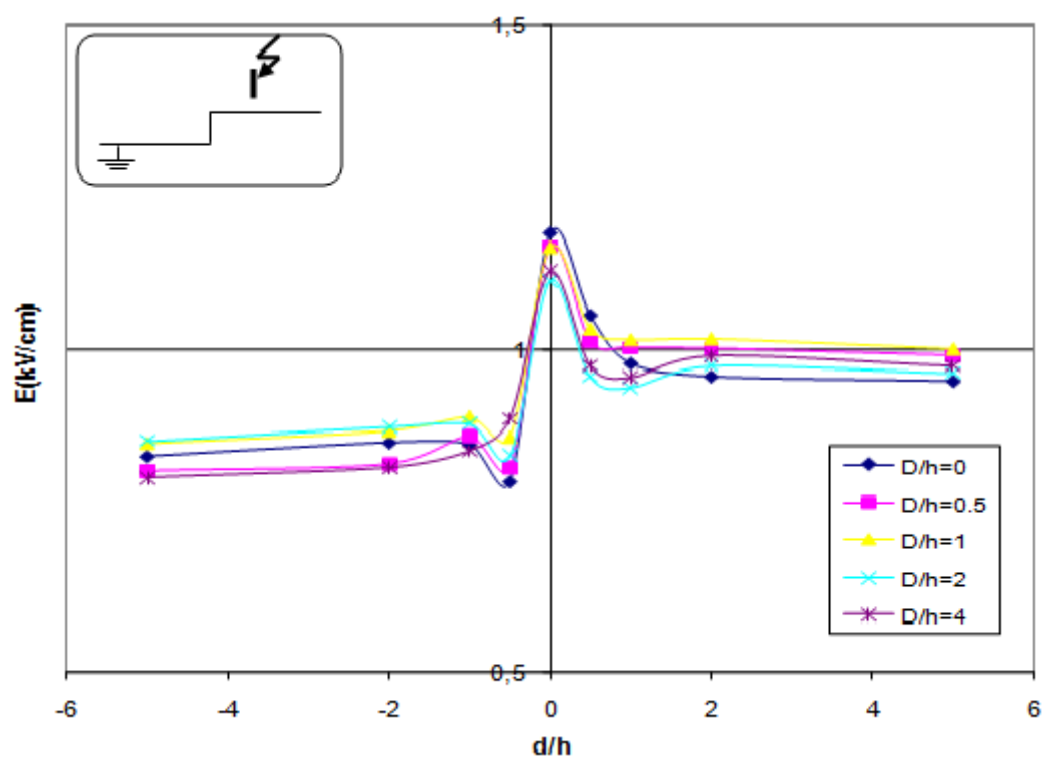
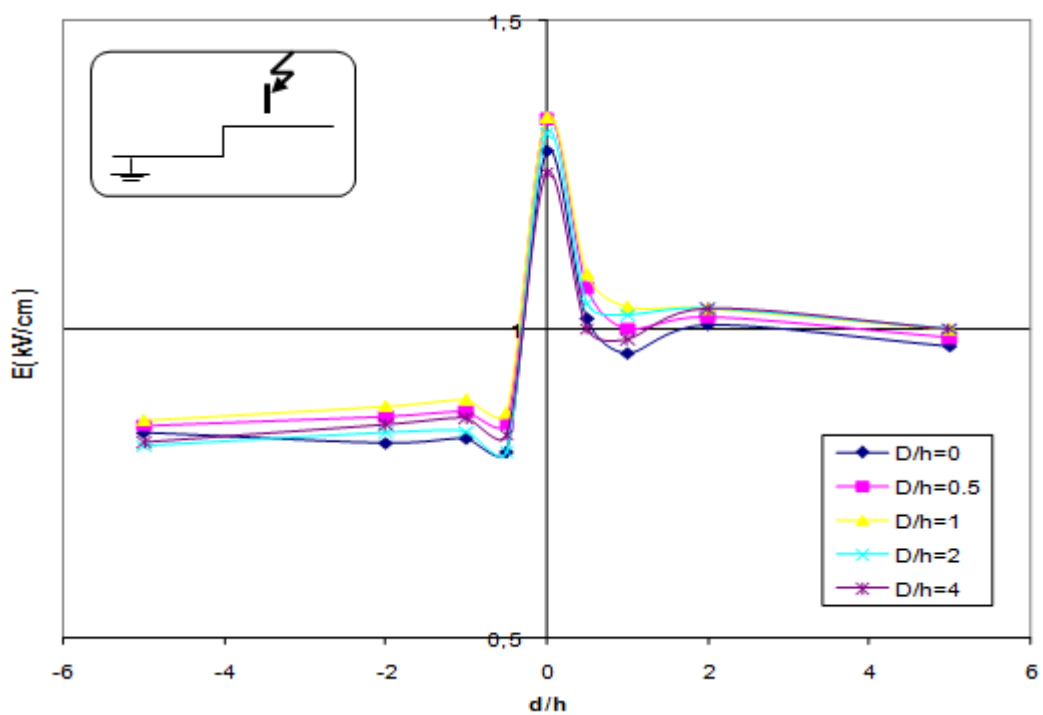


Figure III.4- Champ électrique en fonction de position de la sonde ( $d/h$ )

Avec  $h = 8 \text{ cm}$ .



$U = 0.3U_0\%, E_0 = 2.9$  kV/cm



$U = 0.5U_0\%, E_0 = 4.6$  kV/cm

**Figure III.5-** Champ électrique en fonction de position de la sonde ( $d/h$ )

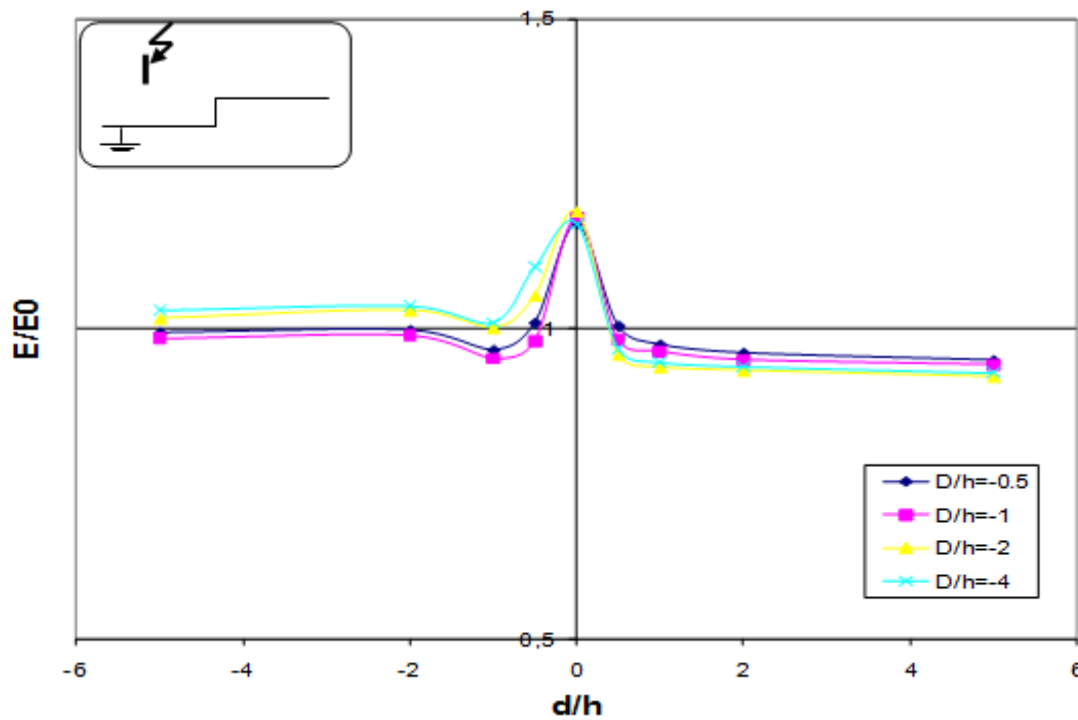
Avec  $h=16$ cm.

***La deuxième configuration : La tige au dessus de la partie basse de la terre discontinue, la sonde balayé tout le plan***

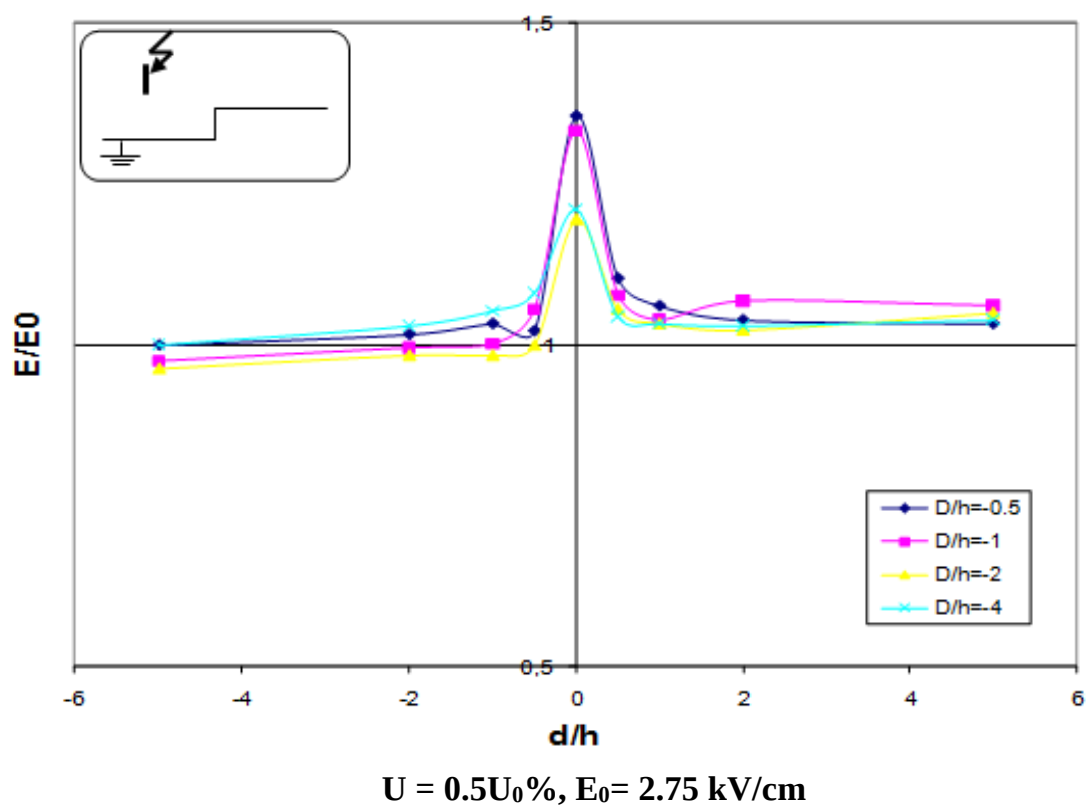
Les figures III.6, III.7 montrent que, sur la partie basse de la terre discontinue, plus la sonde s'approche de l'interface ( $|d/h| < 1$ ), plus l'intensité du champ devient importante par rapport à celle obtenue pour un sol homogène bon conducteur, Cette constatation a été vérifiée pour un rapport  $d/h$  égal à 0.5, 1.

Quand la sonde s'éloigne de l'interface ( $|d/h| > 1$ ), la valeur du champ mesurée devient presque confondue avec celle donnée par le modèle électro-géométrique classique. Nous observons, qu'il n'y a pratiquement aucune influence de l'interface sur la distribution du champ au sol ( $d/h = 2$  et 5), ceci est vérifié par le rapport  $E/E_0$ , qui est très proche de l'unité.

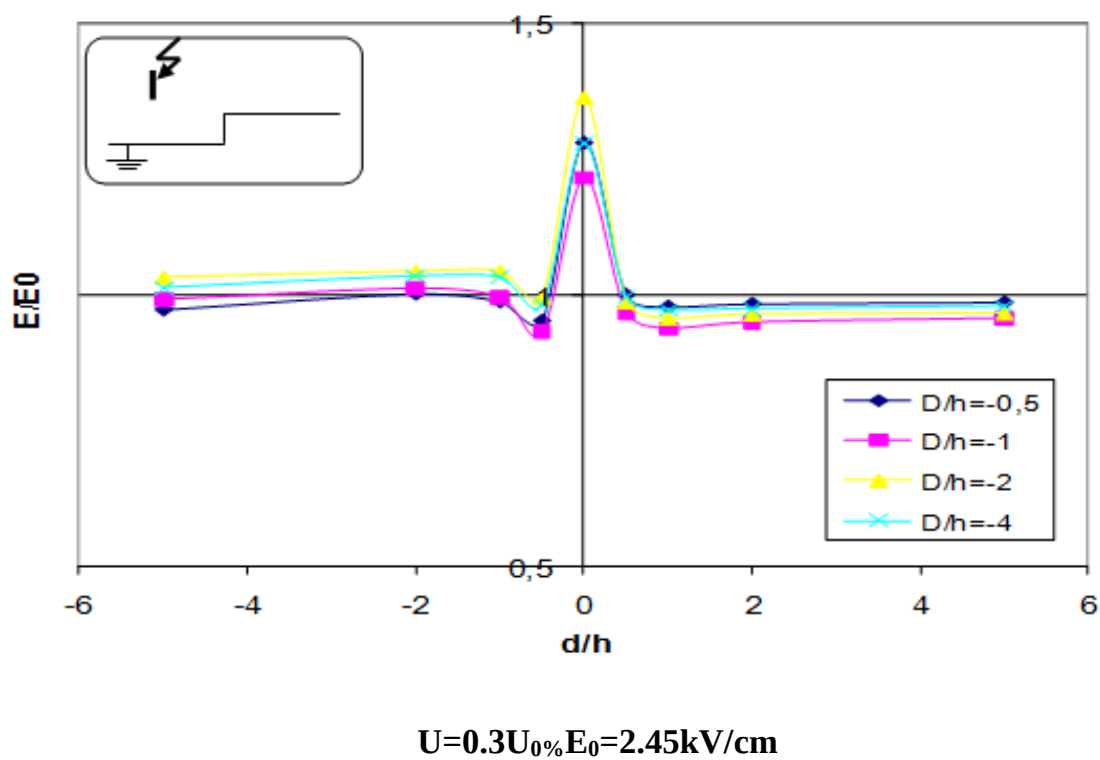
La distribution du champ est presque similaire, si nous la comparons sur les deux parties du sol discontinu, à cause de l'élévation de distance tige-plan (partie basse), qui est la superposition de ( $h$ ) et la profondeur de l'interface ( $e$ ).

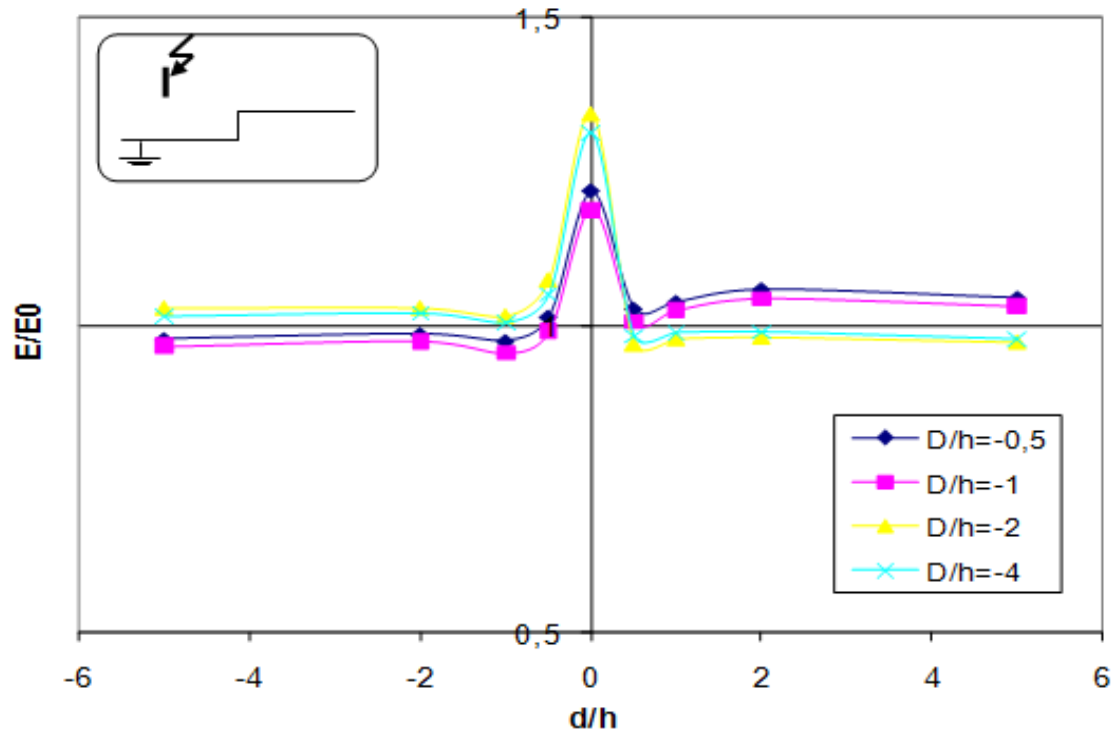


$$U = 0.3U_0\%, E_0 = 1 \text{ kV/cm}$$



*Figure III.6- Champ électrique en fonction de position de la sonde ( $d/h$ )  
Avec  $h=8\text{cm}$ .*





$$U = 0.5U_0\%, E_0 = 3.82 \text{ kV/cm}$$

*Figure III.7- Champ électrique en fonction de position de la sonde ( $d/h$ )*

*Avec  $h = 16\text{cm}$ .*

#### III.4.3-Distribution du champ en fonction de position de la tige ht

Pour l'étude de la distribution du champ électrique au sol discontinu, en fonction de la distance ( $D$ ), entre la tige HT et l'interface. Ainsi que la position de la tige où l'interface a une influence sur la distribution globale du champ au sol, nous avons considéré, deux configurations possibles pour ce cas, qui nous permettent de donner une analyse détaillée sur la distribution du champ au sol discontinu. Ces deux configurations sera distinguent par la position de la sonde sur la partie haute ou basse de la terre discontinue.

La procédure de mesure, est de fixer certains points de mesure sur les deux parties de la terre discontinue, et faire déplacer la tige HT au-dessus de tout le plan.

***La troisième configuration : La sonde au-dessous de la partie haute de la terre discontinue, la tige balayé tout le plan.***

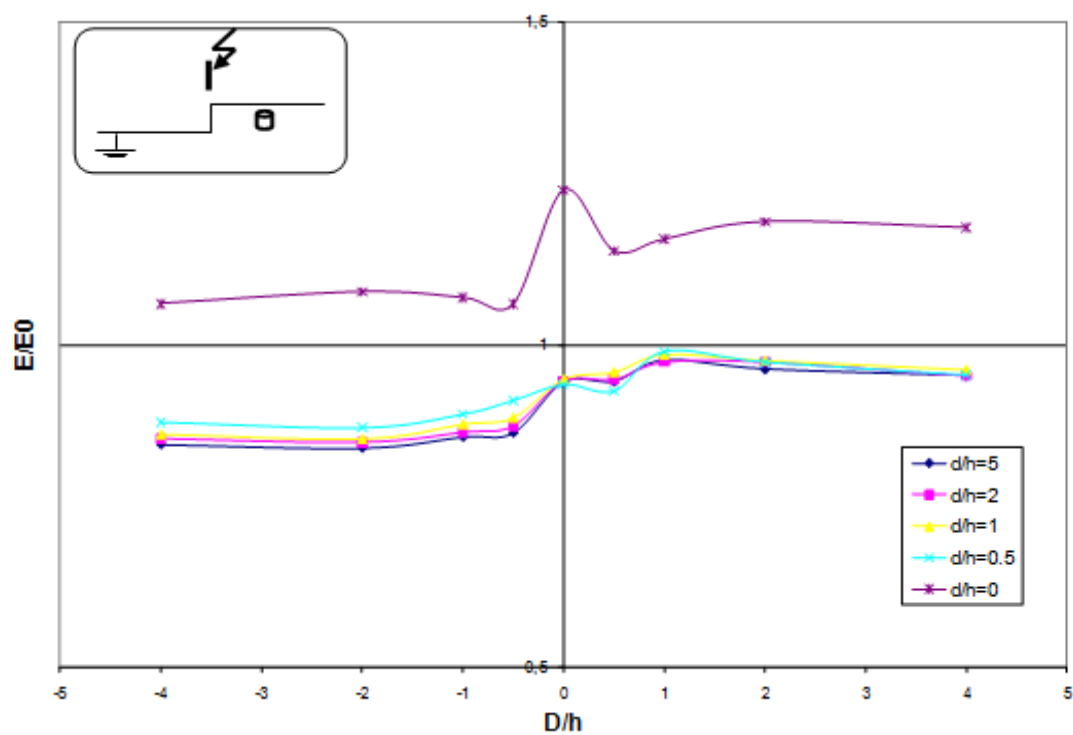
D'après les figures III.8, III.9, nous constatons que, la distribution du champ électrique se comporte comme un système homogène, cela pour les grandes positions de la tige ( $D/h=5,2$ ). L'évolution du champ au sol, pour les points de mesure réalisé, suit le même comportement. En suite le champ se renforce au fur et à mesure que la tige s'approche d'interface  $D/h=0,5$ .

Au niveau de l'interface, l'intensité du champ augmente à cause du comportement de système tige-interface, mais elle se diminue en passant à la partie basse, en augmentant l'intervalle d'air tige-plan par la superposition de la profondeur d'interface ( $e$ ).

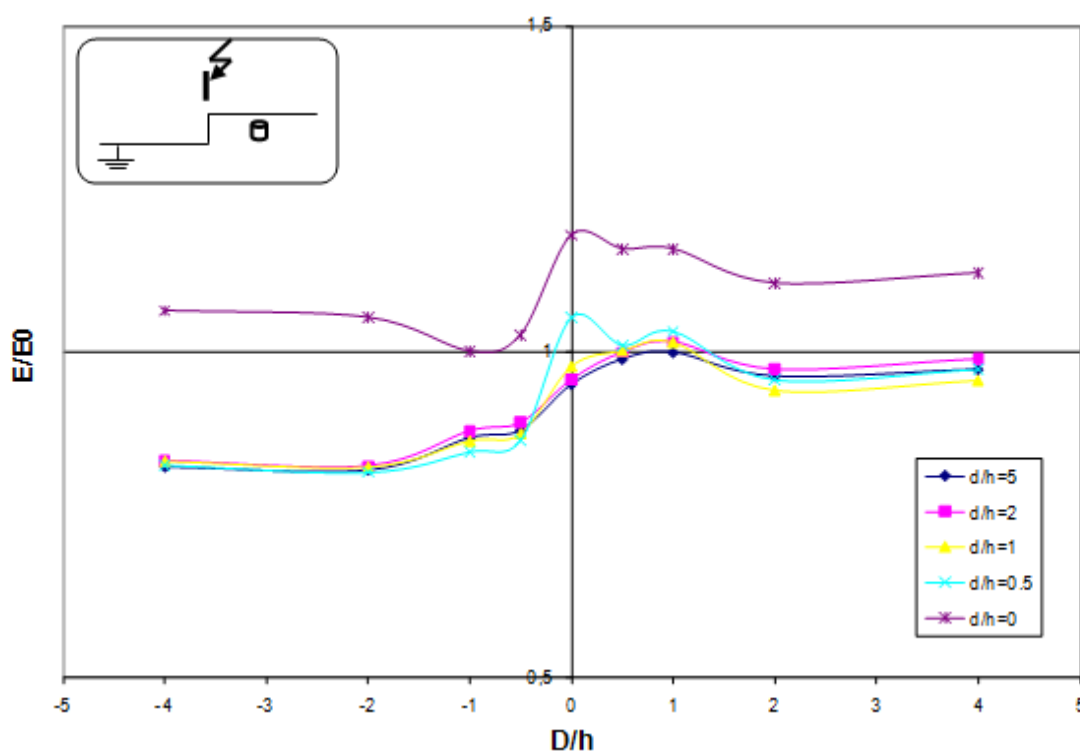
Nous constatons que, si l'interface est situé entre le point de mesure (partie haute), et la tige HT (partie basse), le champ au partie basse de plan diminue à cause de l'effet d'attraction de l'interface sur les lignes du champ.

Pour la position de la sonde  $d/h=0$ , l'intensité du champ prend des valeurs très importantes par rapport aux autres points de mesure proposés, ainsi que, l'intensité du champ est la plus forte pour la position de la tige  $D/h=0$ .

Au fur et à mesure, la tige s'éloigne de l'interface côté basse de terre discontinue, l'intensité du champ au niveau d'interface décroît, mais reste toujours supérieur au champ sur tout le plan.



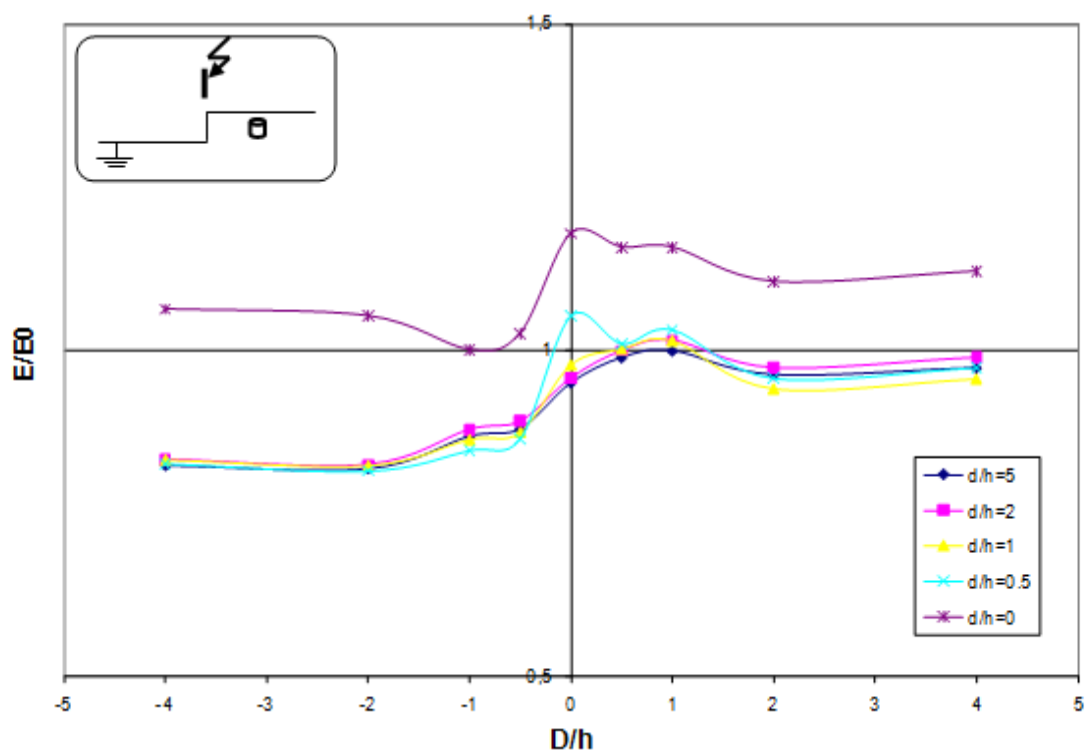
$U = 0.3U_0\%$



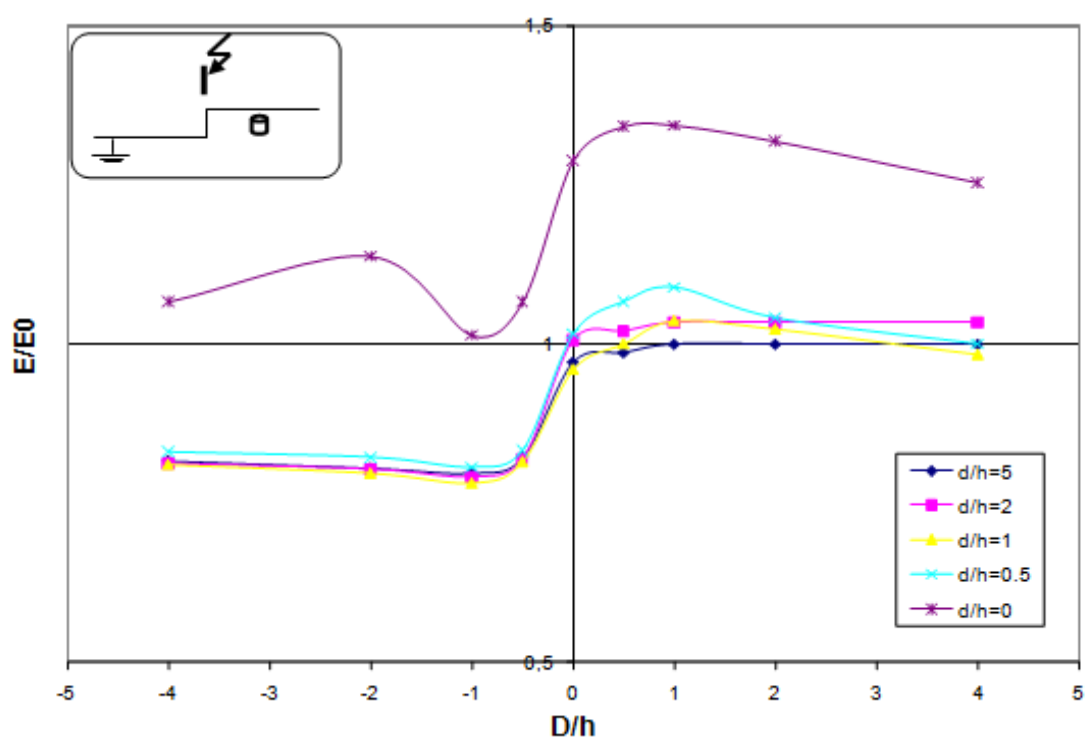
$U = 0.5U_0\%$

**Figure III.8-** Champ électrique en fonction de position de la tige ( $D/h$ )

Avec  $h = 8\text{cm}$ .



$U = 0.3U_0\%$



$U = 0.5U_0\%$

**Figure III.9-** Champ électrique en fonction de position de la tige ( $D/h$ )

Avec  $h = 16\text{cm}$ .

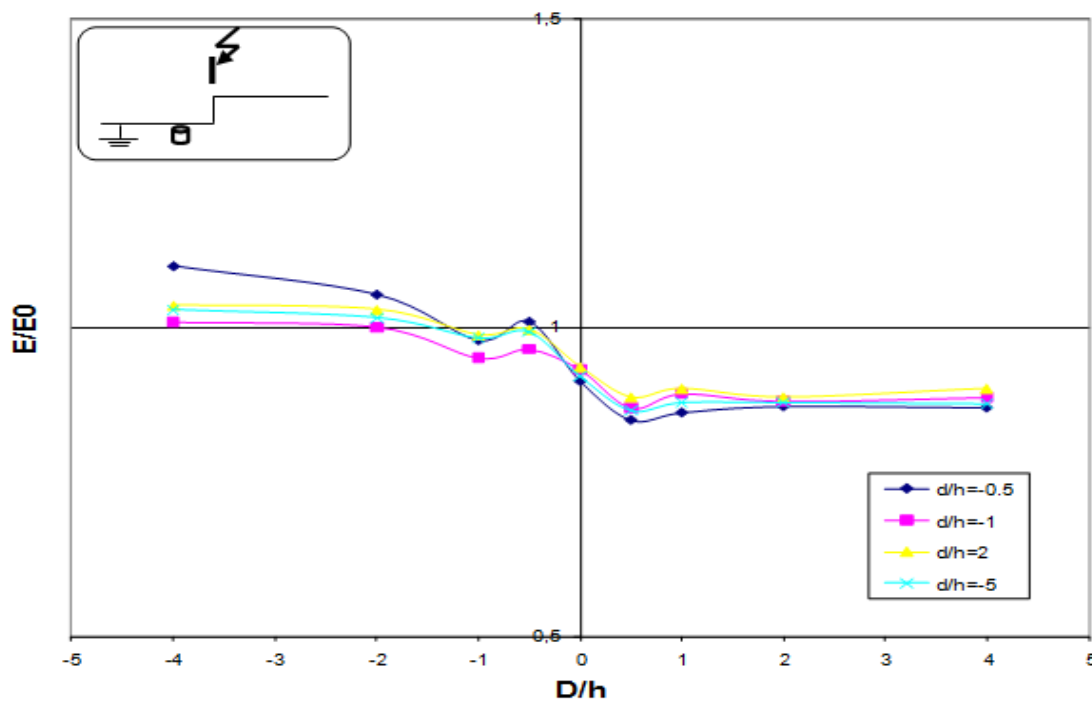
***La quatrième configuration : La sonde au-dessous de la partie basse de terre discontinue, la tige balayé tout le plan***

Les figures III.10, montrent que, le champ subit une légère variation sur la partie basse de la terre discontinue, mais le rapport  $E/E_0$  reste toujours égal à l'unité.

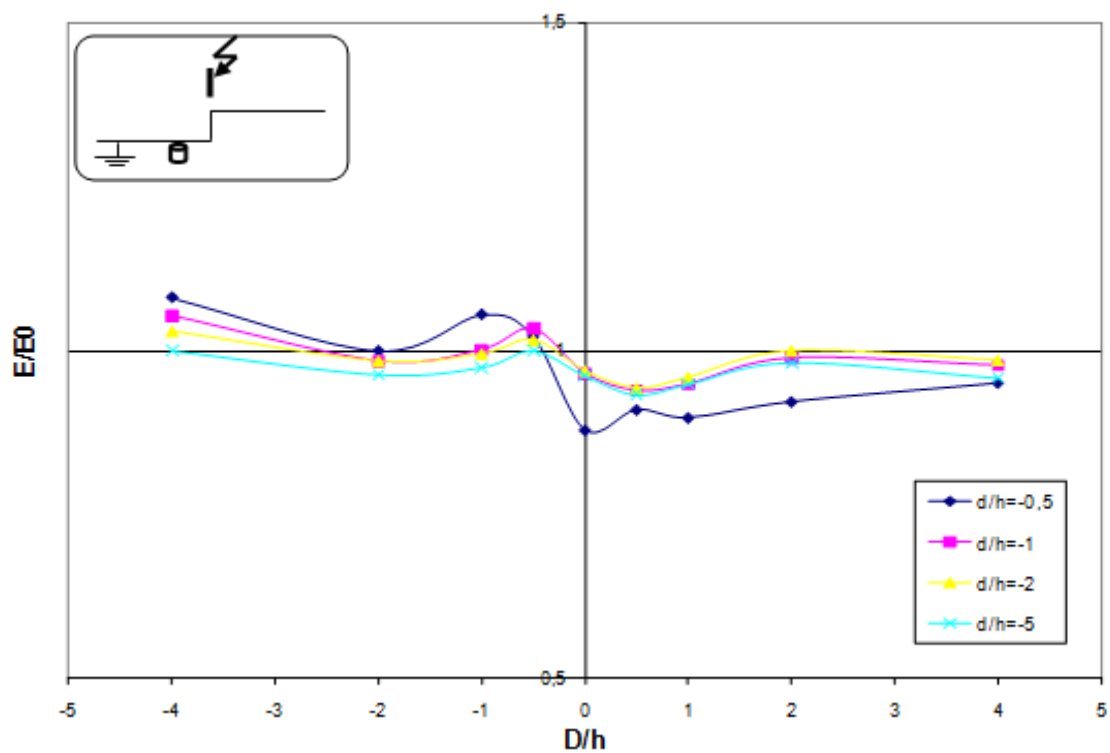
Le champ mesuré diminue, au fur et à mesure que, la tige se rapproche de l'interface. Cette tendance est dû à l'effet d'attraction des lignes du champ vers l'interface, ainsi que, la distance tige-interface, quel est petite par rapport à la distance tige-plan (partie basse).

Pour la figure III.11, qui illustre la variation d'intensité du champ en fonction de distance ( $D$ ), pour l'intervalle d'air ( $h=16\text{cm}$ ). Ces courbes montre que, l'intensité du champ sur la partie basse de la terre discontinue prend la valeur la plus faible, si la tige passe au-dessus de l'interface ( $D/h=0$ ).

L'intervalle d'air tige-interface constitue un chemin préférentiel pour les lignes de champ. En effet, le système tige-interface qui se comporte comme un system pointe-pointe est moins rigide que le system pointe (négative)-plan. Ce qui justifie que pour les faibles valeurs du rapport  $D/h$ , on obtient parfois des décharges disruptives sur l'interface, malgré l'application de 0.5 jusqu'à 0.3 de tension  $U_{0\%}$  qui garantie l'absence de décharge disruptive dans l'intervalle tige-plan.



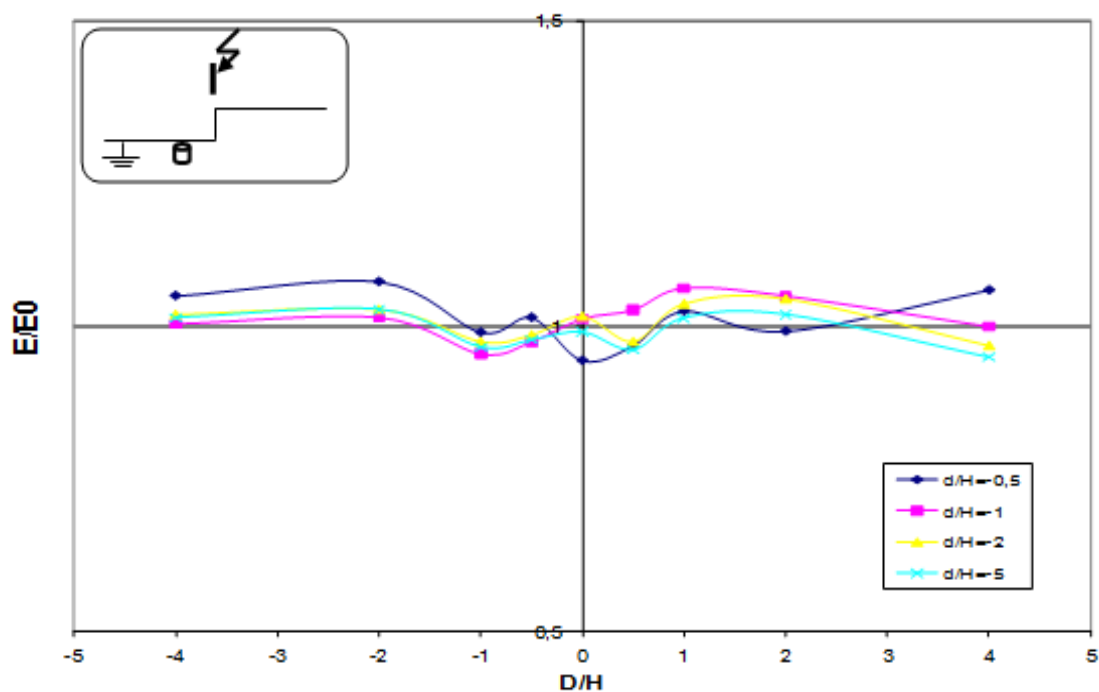
$$U = 0.3U_0\%$$



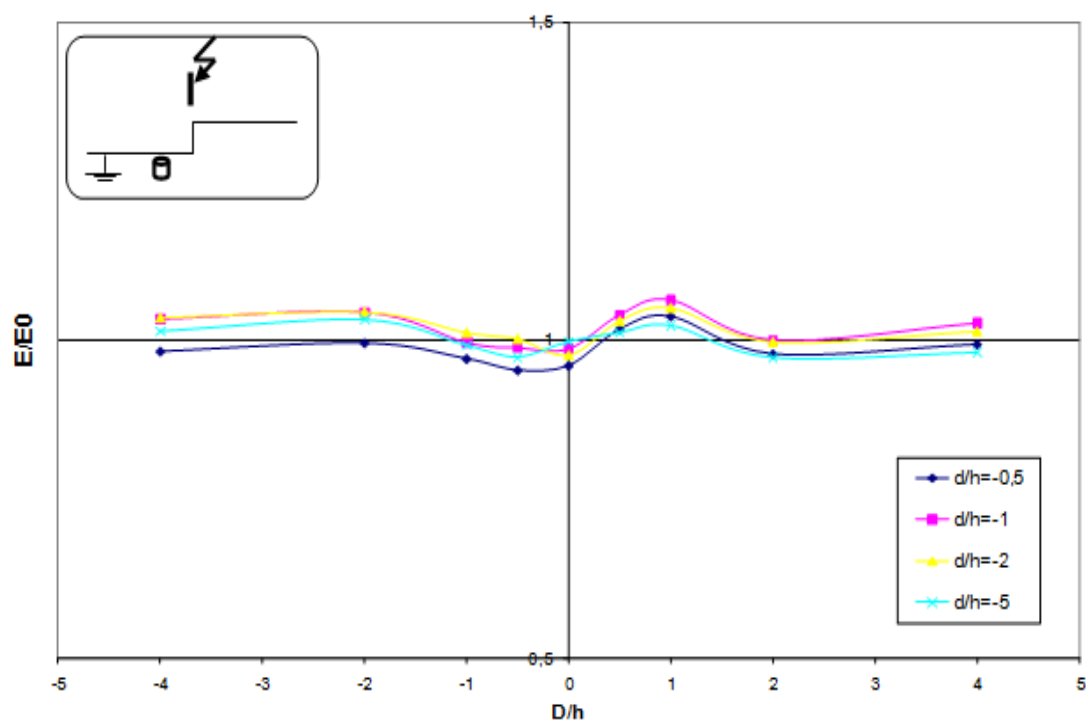
$$U = 0.5U_0\%$$

Figure III.10- Champ électrique en fonction de position de la tige ( $D/h$ )

Avec  $h = 8\text{cm}$ .



$$U = 0.3U_0\%$$



$$U = 0.5U_0\%$$

**Figure III.11-** Champ électrique en fonction de position de la tige ( $D/h$ )

Avec  $h = 16\text{cm}$ .

## IV.1- Introduction

La programmation informatique permet l'évolution de l'efficacité des méthodes des résolutions des différents problèmes en particulier, les équations aux dérivées partielles, et constitué aussi un outil puissant qui aide à l'étude et de développent de tel méthode, parmi les raisons qui montrent l'importance de cet outil est que quelque niveaux d'analyse ne sont pas faisables avec les outils mathématique, traditionnel, surtout qu'on est on face d'un problème complexe.

L'évaluation des méthodes de résolution se fait en calculant l'erreur commise et le temps d'exécution (donc la complexité) de leurs programmes.

Dans cette partie nous allons présenter les résultats de simulation obtenus à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics 4.2.

### À propos de COMSOL Multiphysics [25]

COMSOL Multiphysics est un puissant environnement interactif pour la modélisation et la résolution de toutes sortes de problèmes scientifiques et techniques basées sur les équations aux dérivées partielles (EDP). Avec ce logiciel vous pouvez facilement étendre les modèles classiques pour un type de la physique dans les modèles multiphysiques qui permettent de résoudre phénomènes physiques couplés et le faire simultanément. Accéder à ce pouvoir ne nécessite pas une connaissance approfondie des mathématiques ou de l'analyse numérique. Grâce à le mode intégré physique, il est possible de construire des modèles en définissant les quantités physiques pertinentes, telles que les propriétés des matériaux, les charges, les contraintes, les sources et les flux, plutôt que par la définition des équations sous-jacentes. Vous pouvez toujours appliquer ces variables, expressions, ou des numéros directement à des domaines solides, les limites, les bords, et les points de manière indépendante de la maille de calcul.

COMSOL Multiphysics puis compile en interne un ensemble d'équations aux dérivées partielles représentant l'ensemble du modèle. Vous pouvez accéder à la puissance de COMSOL Multiphysics tant que produit autonome grâce à une interface utilisateur graphique flexible, ou par programmation de script dans la langue COMSOL Script ou dans le langage MATLAB.

Nous utilisons la AC/DC Module est un logiciel optionnel qui s'étend environnement COMSOL Multiphysics ® de modélisation avec des interfaces utilisateur personnalisées et des fonctionnalités optimisées pour l'analyse des effets électromagnétiques, les composants et systèmes. Comme tous les modules de la famille COMSOL, il fournit une bibliothèque de modèles prédéfinis prêts à terme qui font qu'il est plus rapide et plus facile à analyser les problèmes spécifiques à chaque discipline.

Ce module particulier résout les problèmes dans les domaines généraux de champ électrostatiques, des champs magnétostatiques, et les champs quasi-statique. Les modes d'application (interfaces de modélisation) inclus ici sont entièrement multiphysique permis les équations sous-jacentes de l'électromagnétisme sont automatiquement disponibles dans tous les modes d'application de la-une caractéristique unique à COMSOL Multiphysics. Cela rend également la modélisation non standard facilement accessible [25]

## **IV.2- Cas de la terre homogène (terre continu):**

### **IV.2.1-Distribution du champ en fonction de position de la tige:**

D'après le modèle expérimental, nous voulons calculer la distribution du champ électrique dans le cas de terre homogène, avec plusieurs position de la tige .

Les paramètres de modèle:

La terre:

Surface partie haute:100x50 cm.

Surface de l'interface:100x10 cm.

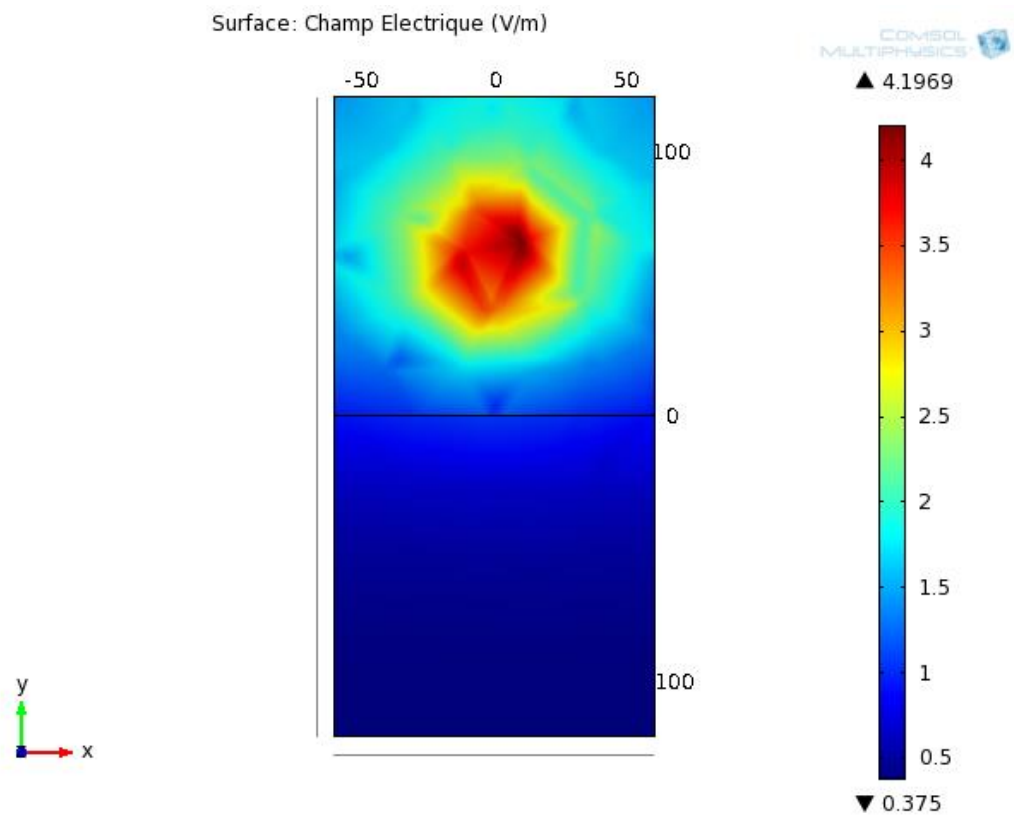
Surface partie basse:100x50 cm.

La tige:

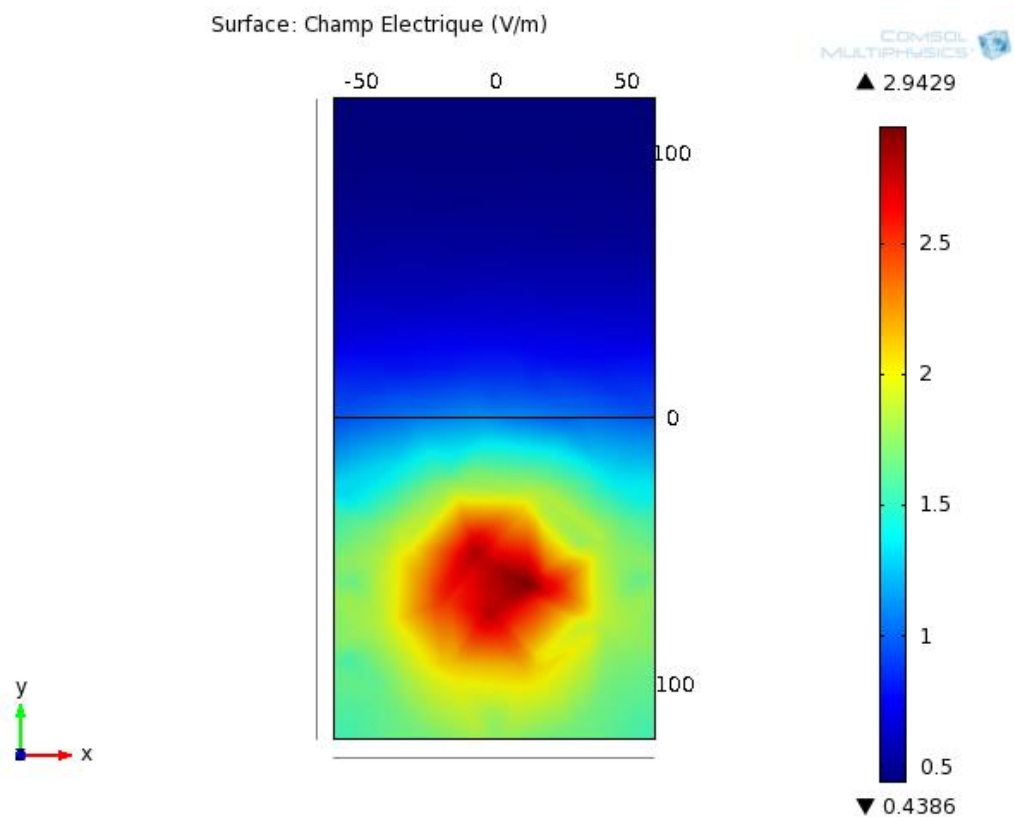
C'est un point avec un potentiel égal 1V.( pour néglige le effet de champ de tige).

- Le résultat de simulation:

A-



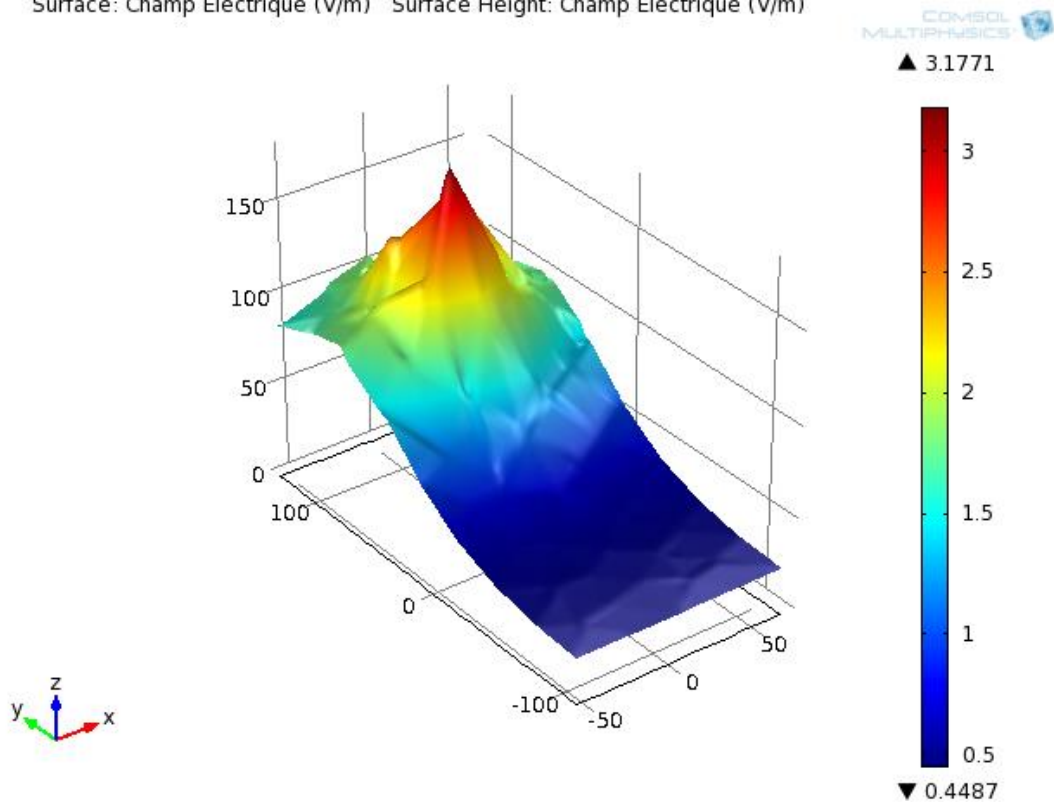
B-



**Figure IV. 1-** Champ électrique calculé au sol pour position de la tige (A - $h=40$  cm),(B-  $h= 40$  cm + $e$ )

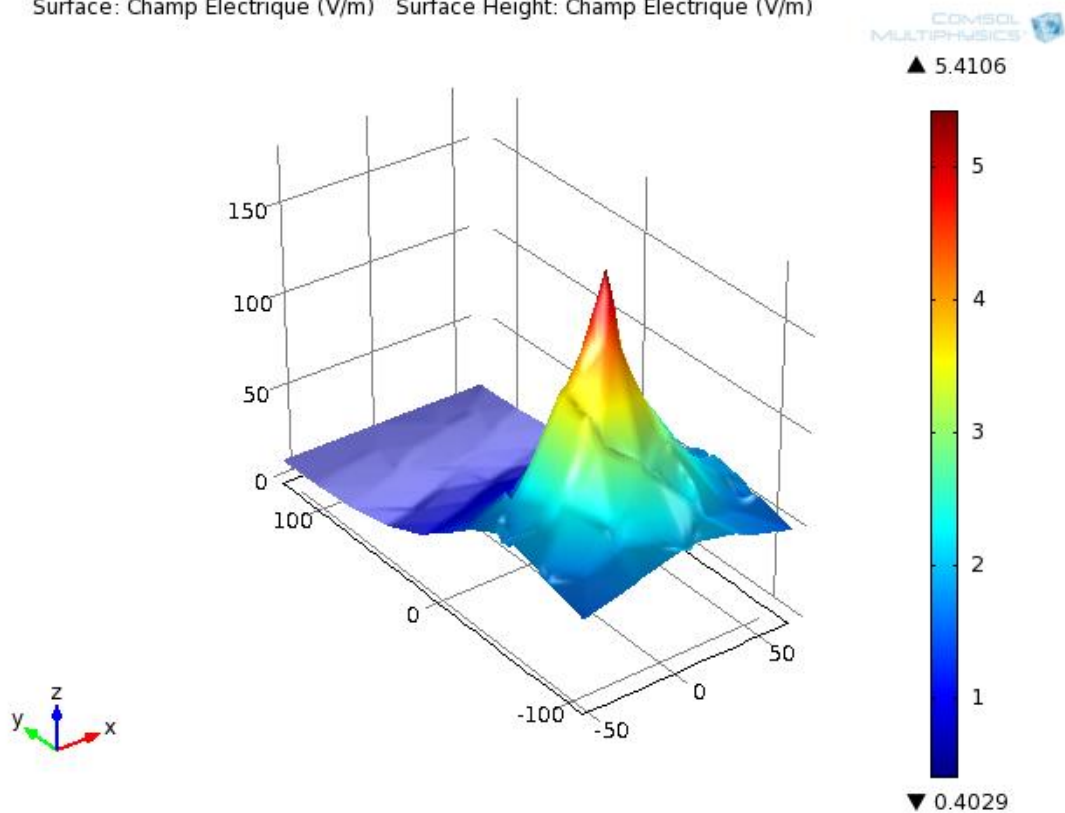
A-

Surface: Champ Electrique (V/m) Surface Height: Champ Electrique (V/m)



B-

Surface: Champ Electrique (V/m) Surface Height: Champ Electrique (V/m)



**Figure IV. 2** – distribution du champ électrique au sol homogène. a.( $h=40\text{cm}$ ) b.( $h=40\text{cm} + e$ )

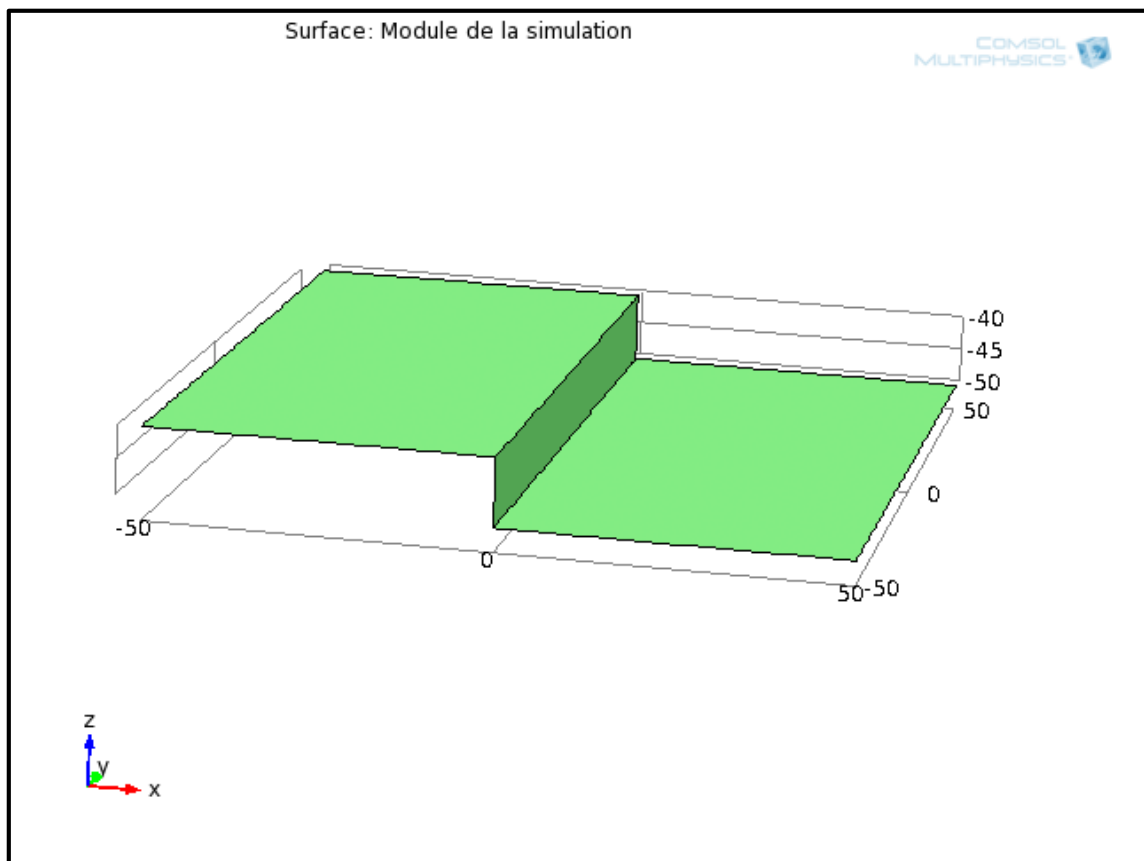
### IV.3- Cas de terre discontinu:

#### IV.3.1- Distribution du champ selon la position de la tige HT:

On cette partie de la simulation, nous avons fait le calcul avec une terre discontinu (avec plusieurs positions de tige), pour avoir la distribution de champ électrique au deux surface de la terre.

- ✓ Surface de partie haute: 50 cm x 100 cm
- ✓ Surface de partie basse: 50 cm x 100 cm
- ✓ Surface de l'interface : 10 cm x 100 cm
- ✓ Matériel de la plaque: Aluminium.

- **Modèle de la simulation:**



*Figure IV. 3 - Modèle de la simulation*

#### IV.3.2-La première essai:

Cette essai est consacré pour les paramètres de tige au dessus de la partie haute de terre discontinue, avec un niveau de tension applique au tige, nous avons calculé le champ électrique au niveau de deux surfaces de la terre.

Les deux suivants résultats de paramètre:

- $D=10$  cm à la parité haut,  $h=40$  cm
- $D= 8$  cm à la partie haut de la terre,  $h=40$  cm.

Au voisinage de l'interface ( $D \approx 0$ ), les résultats obtenus montre que l'intensité du champ électrique est plus forte celle-ci devient supérieure à la valeur obtenue dans le cas du sol homogène.

Au niveau de l'interface ( $D=0$ ), le système tige-interface se comporte comme un système tige-tige. Or sous tension négative, celui-ci est moins rigide que le système tige-plan.

A cause de l'intensité de champ plus importante dans l'intervalle tige-tige, le champ s'accroît sur l'interface d'une valeur très élevée par rapport les autres points du plan discontinu.

Ces résultats, confirment les recherches abordées par la modèle expérimentales de haute tension sur la rigidité des intervalles d'air tige-plan discontinu.

En ce qui concerne, le champ sur la partie basse de la terre discontinue, de même configuration (la tige au dessus de la partie haute), les résultats de simulations montrent que, l'intensité du champ diminue, et tend vers un niveau inférieur au niveau des valeurs du champ sur la partie haute. Cela dû à l'élévation de distance de tige

On note que la distribution du champ électrique sur la partie basse prend ainsi la valeur la plus faible, au cours de son évolution sur le plan côté partie basse.

Nous constatons que l'interface joue un rôle attractif important sur la distribution des lignes du champ au sol discontinu.

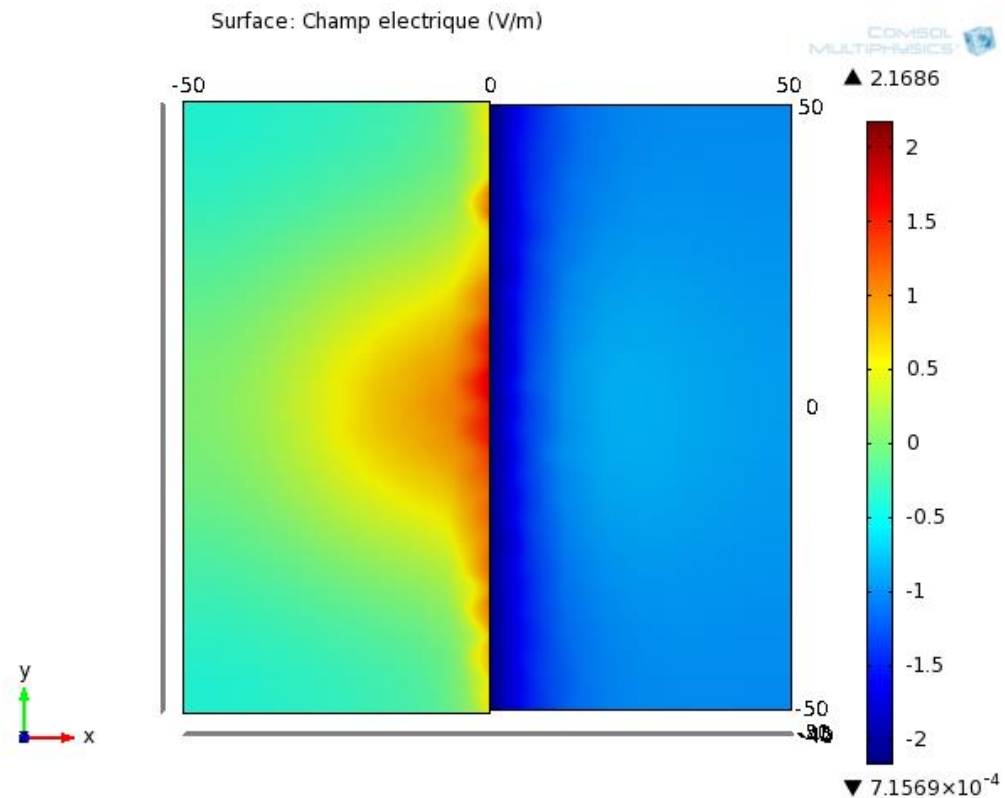


Figure IV. 4- champ électrique calculé a la terre partie haute de  $D=10$  cm et  $h=40$ cm

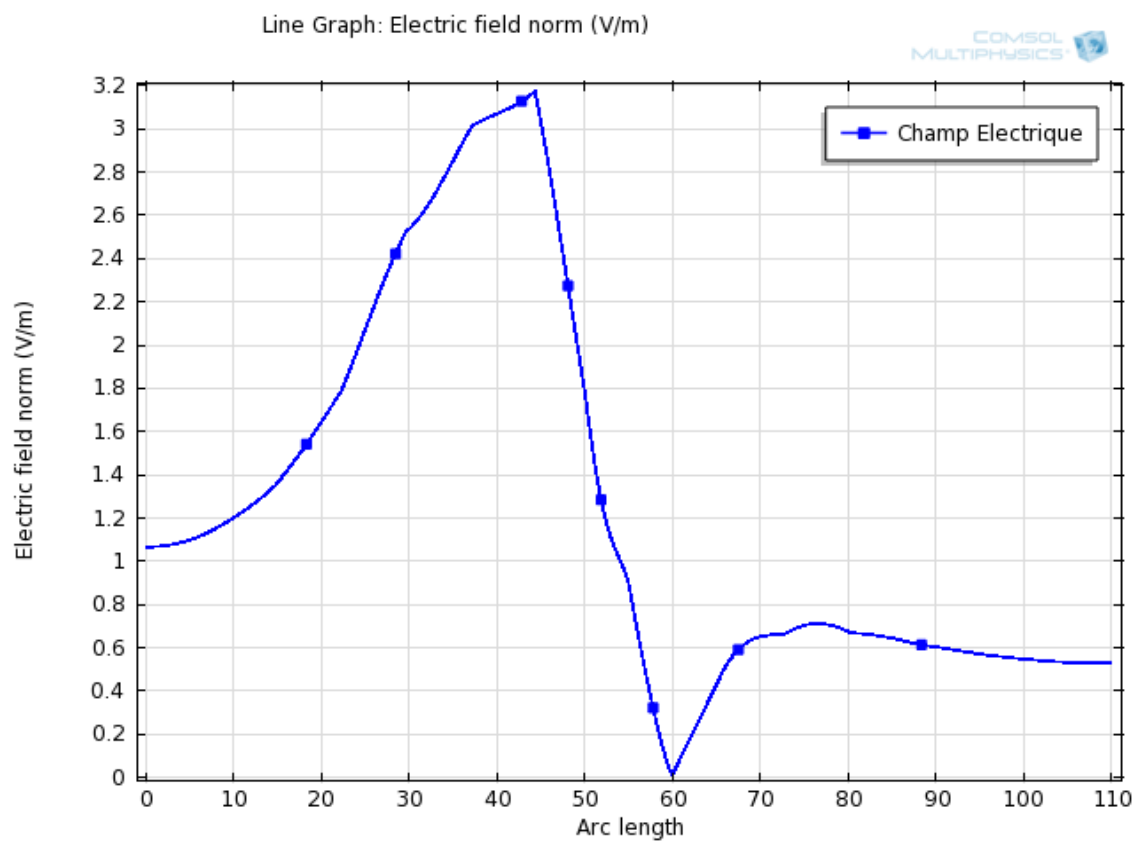
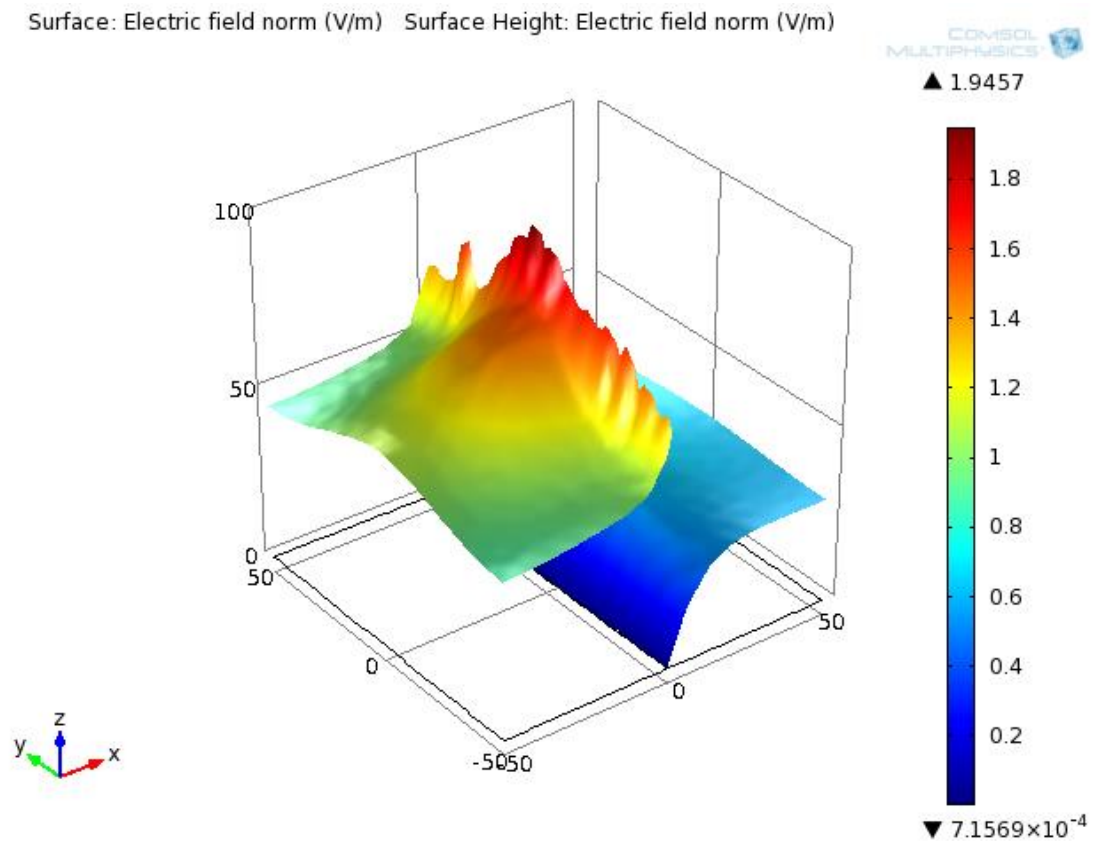
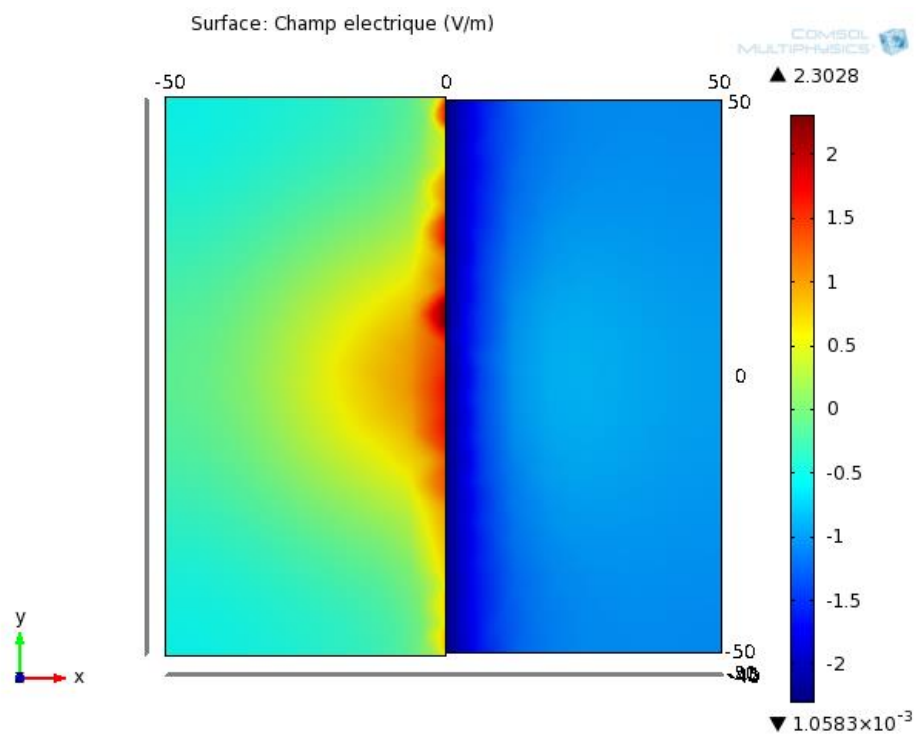


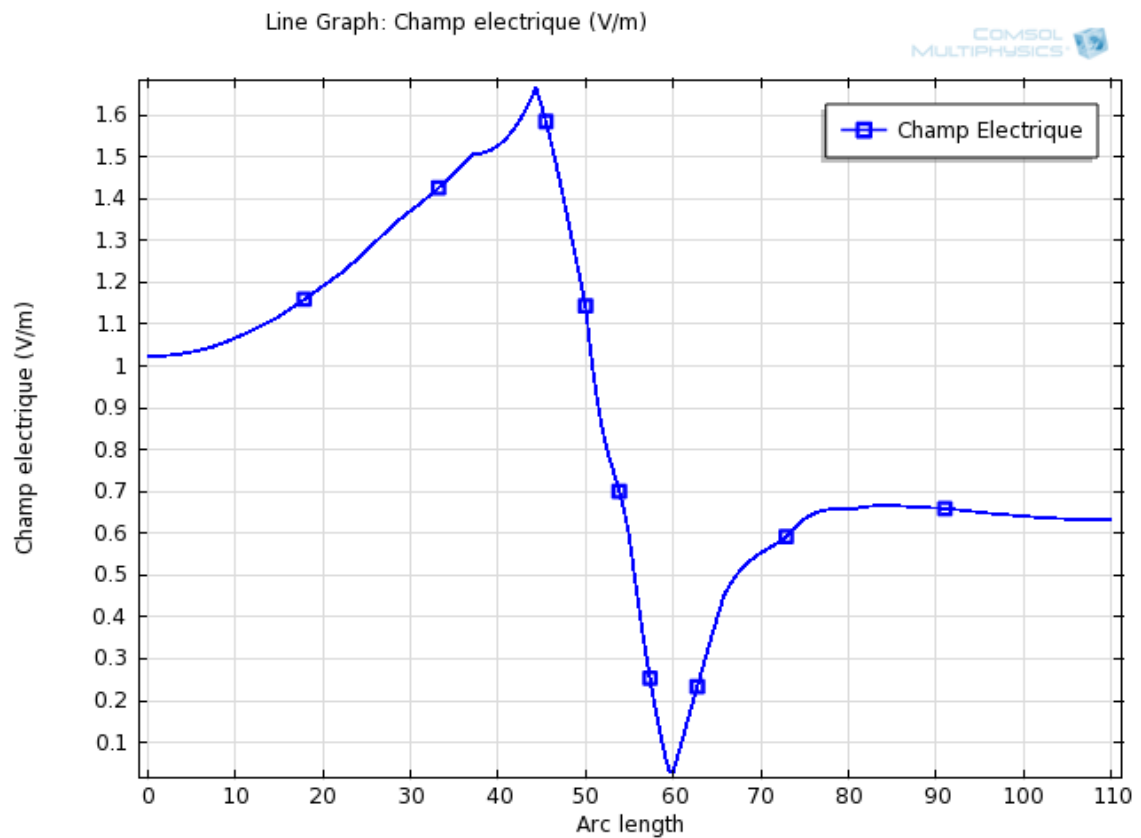
Figure IV. 5- Champ électrique (l'interface au point 50)



**Figure IV. 6 - champ électrique calculé (3D)**

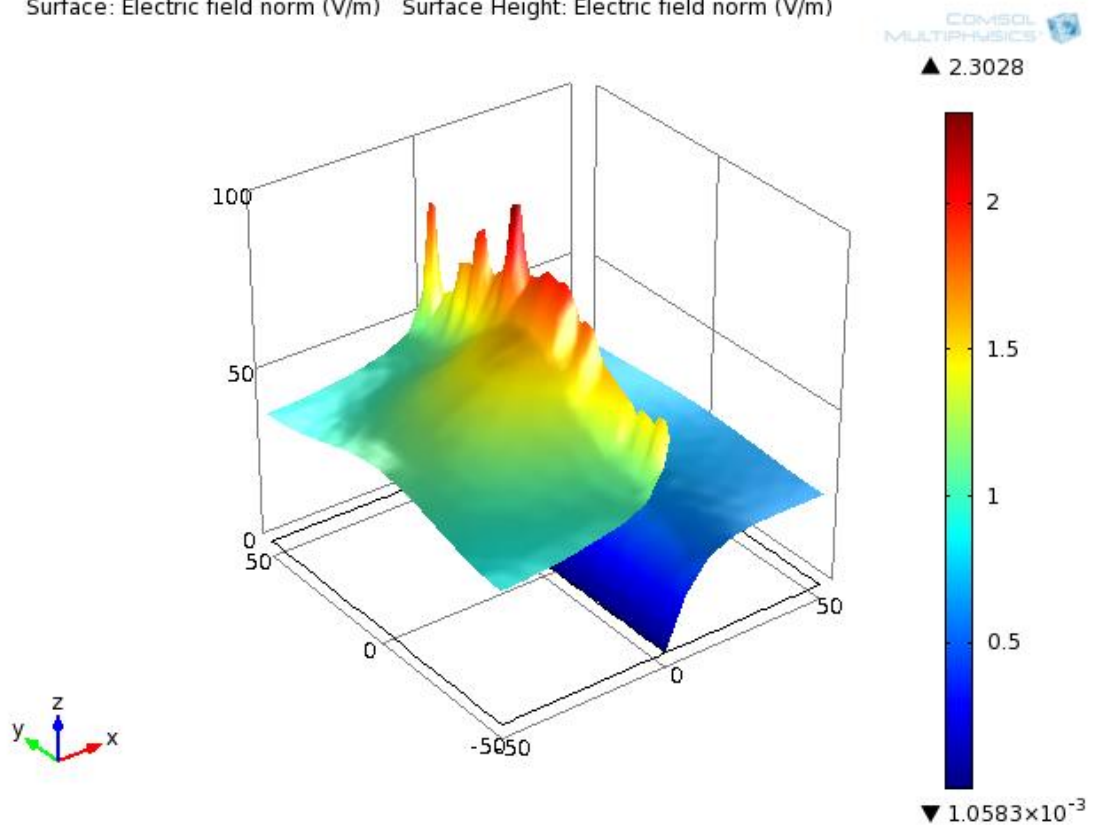


**Figure IV. 7- champ électrique à la partie haute de  $D = 8 \text{ cm}$  et  $h = 40 \text{ cm}$**



**Figure IV. 8-** Champ électrique (interface au point de 50)

Surface: Electric field norm (V/m) Surface Height: Electric field norm (V/m)



**Figure IV. 9 -** champ électrique calculé (3D)

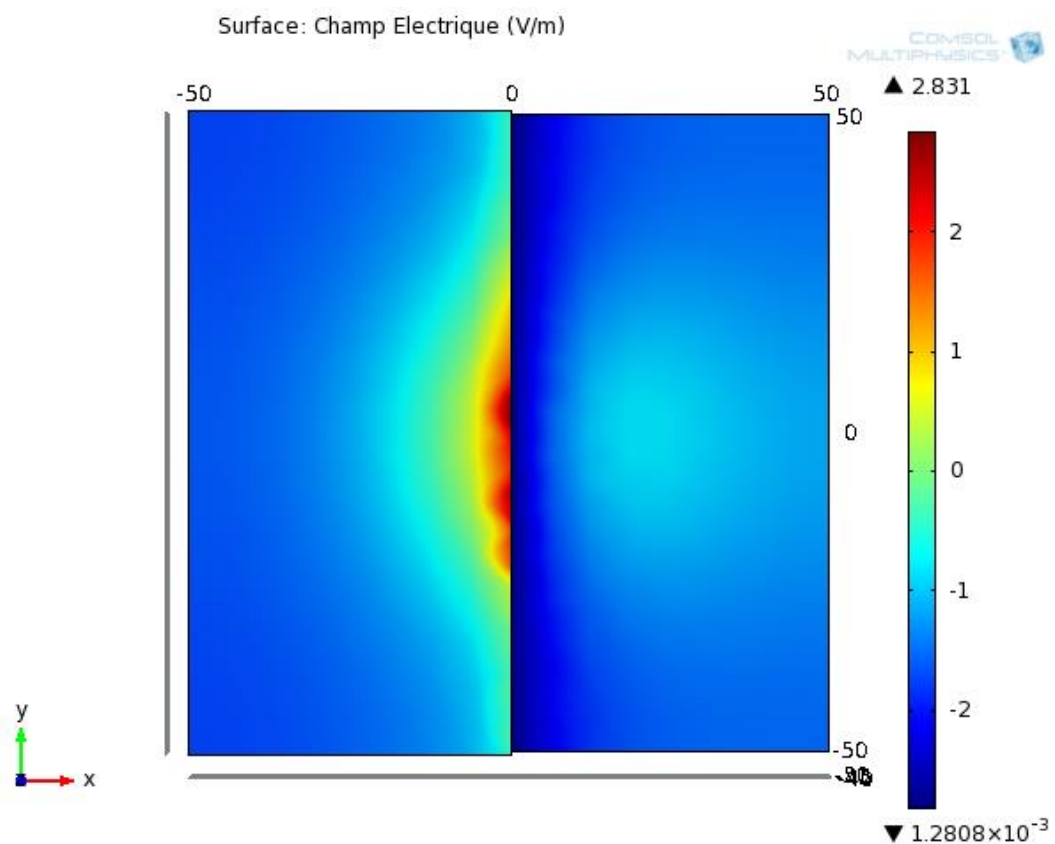
### IV.3.3-Le deuxième essai:

Cette essai est consacré pour les paramètres de modèle avec sol discontinu de tige au dessus de la partie basse avec plusieurs position, avec un niveau de tension applique  $U_{0\%}$ , nous avons calcule la distribution de le champ électrique au niveau de surface de la terre discontinu.

Les deux suivants résultats avec de paramètre:

$e = 10$  cm (la longueur de l'interface).

- 1<sup>ere</sup> cas  $D = 10$  cm à la partie basse de la terre,  $h = (40 + e)$  cm
- 2<sup>eme</sup> cas  $D = 10$  cm à la partie basse de la terre,  $h = (30 + e)$  cm



**Figure IV. 10** - Champ electrique calculé a la surface sol discontinue  $D=10$  cm et  $h=40+e$ .

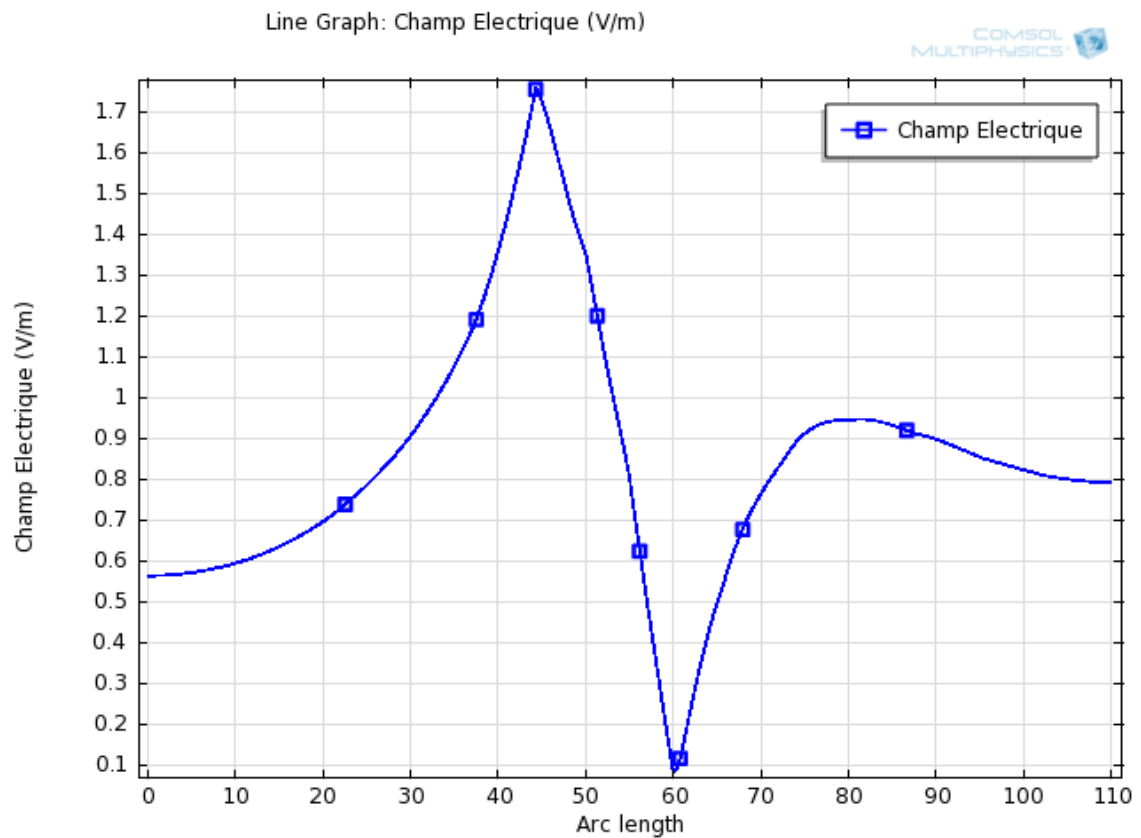


Figure IV. 11- champ electrique calcule a la surface discontinu (l'interface en point 50)

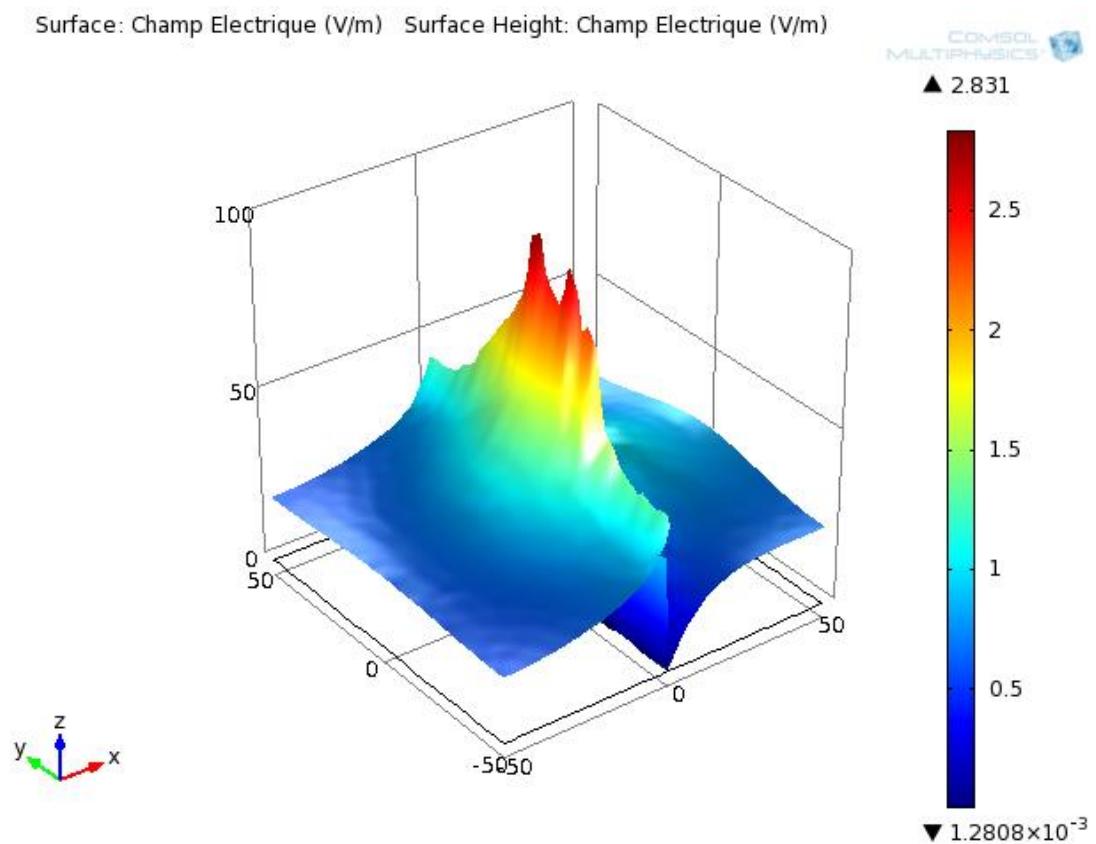
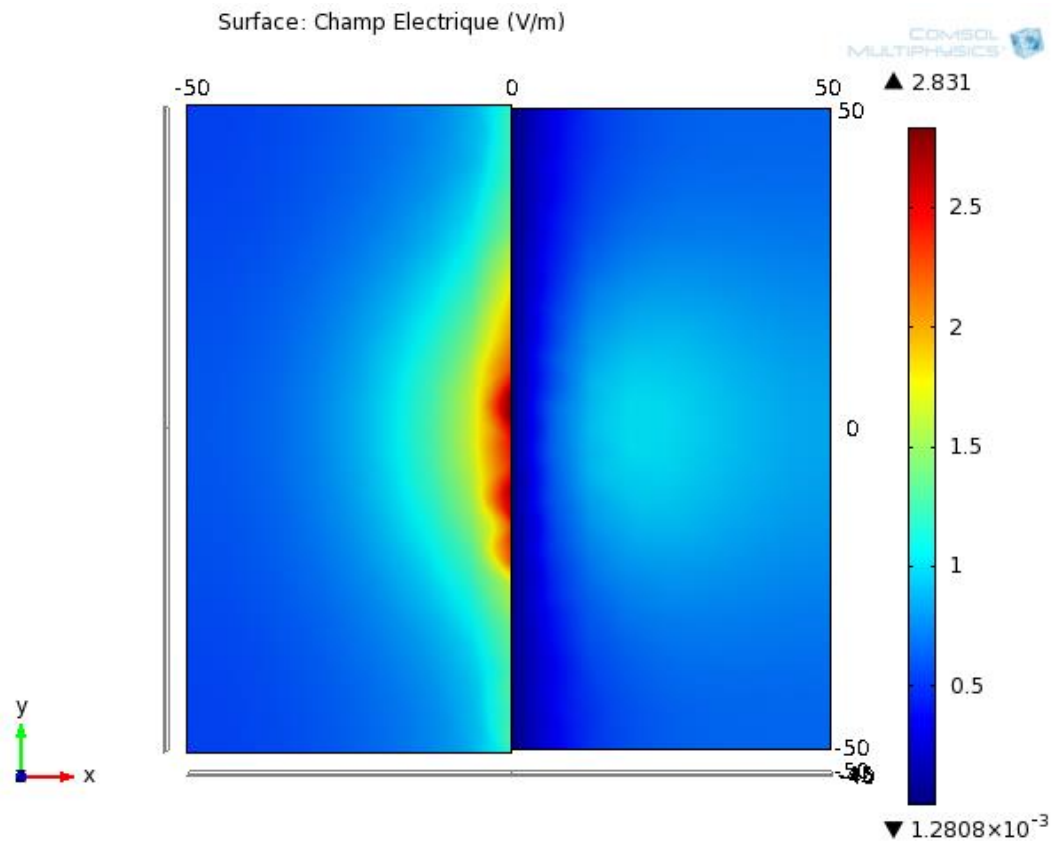
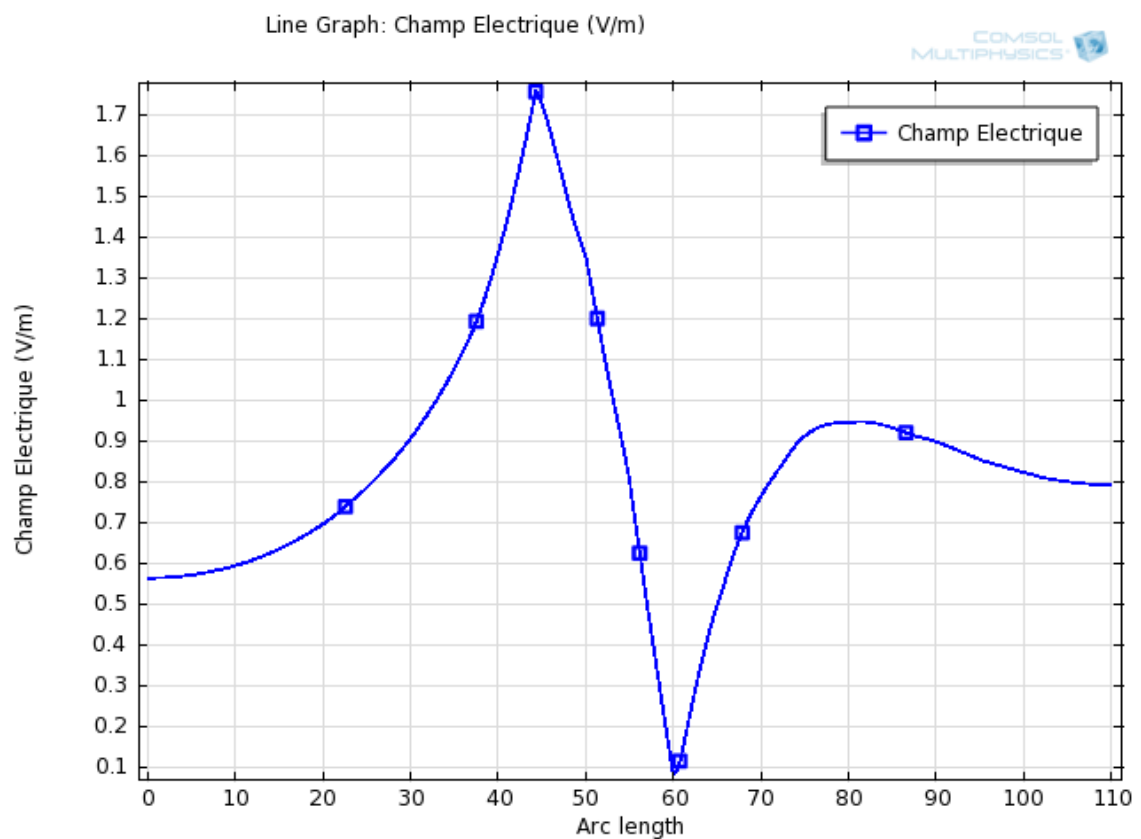


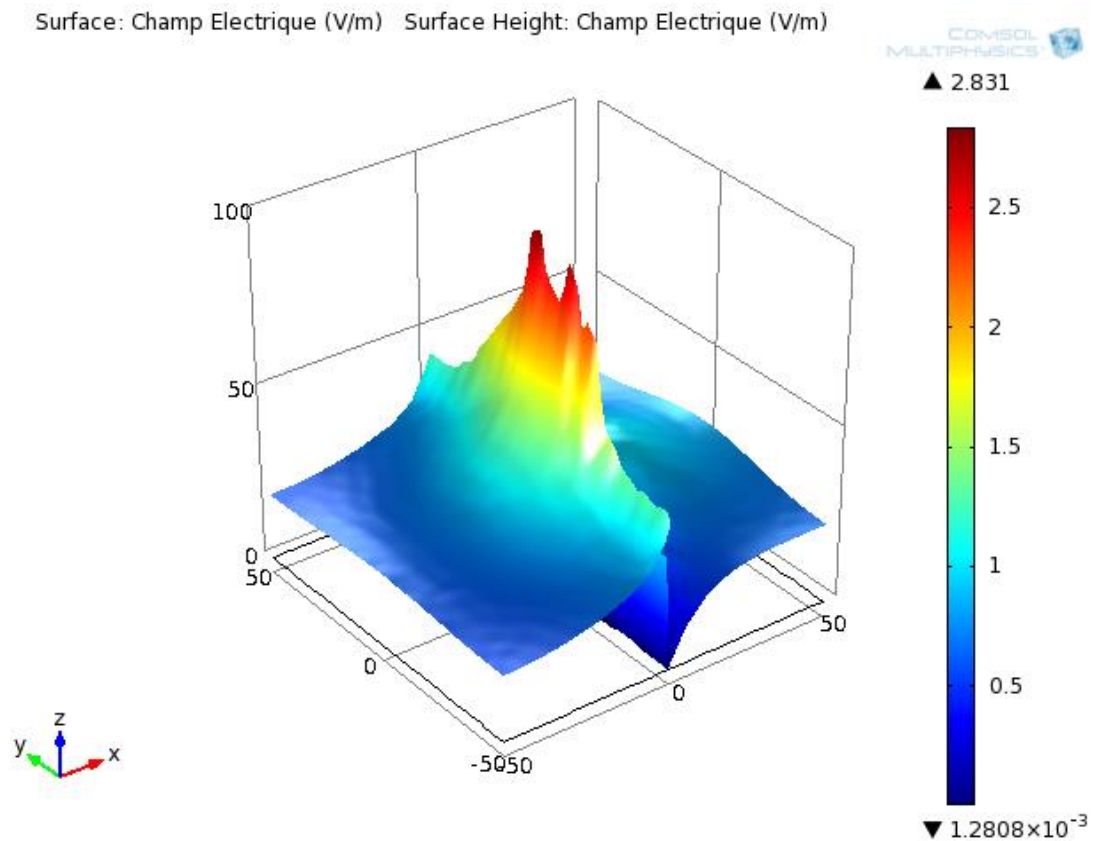
Figure IV. 12 – Distribution de champ électrique calculé au sol discontinu (3D)



**Figure IV. 13** - Champ électrique calculé à la surface de sol discontinu  $D=10$  cm,  $h=(30+e)$  cm



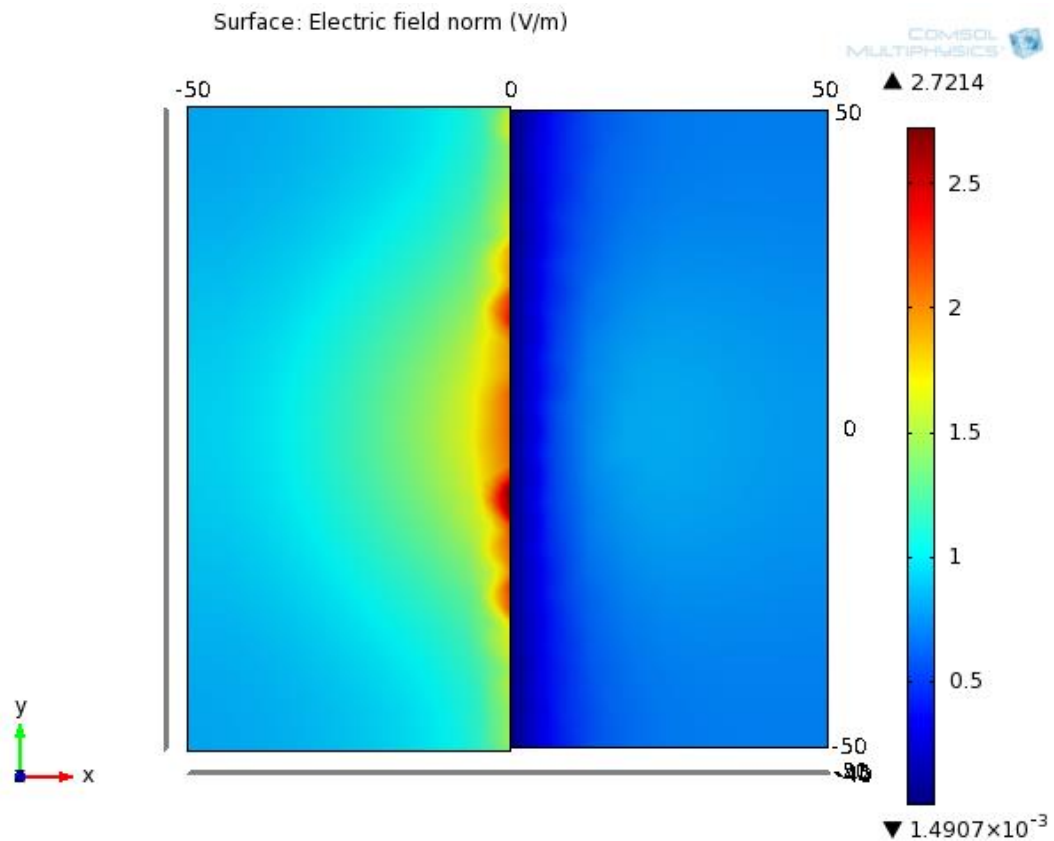
**Figure IV. 14**- champ électrique calculé à la surface de sol discontinu (l'interface en point 50)



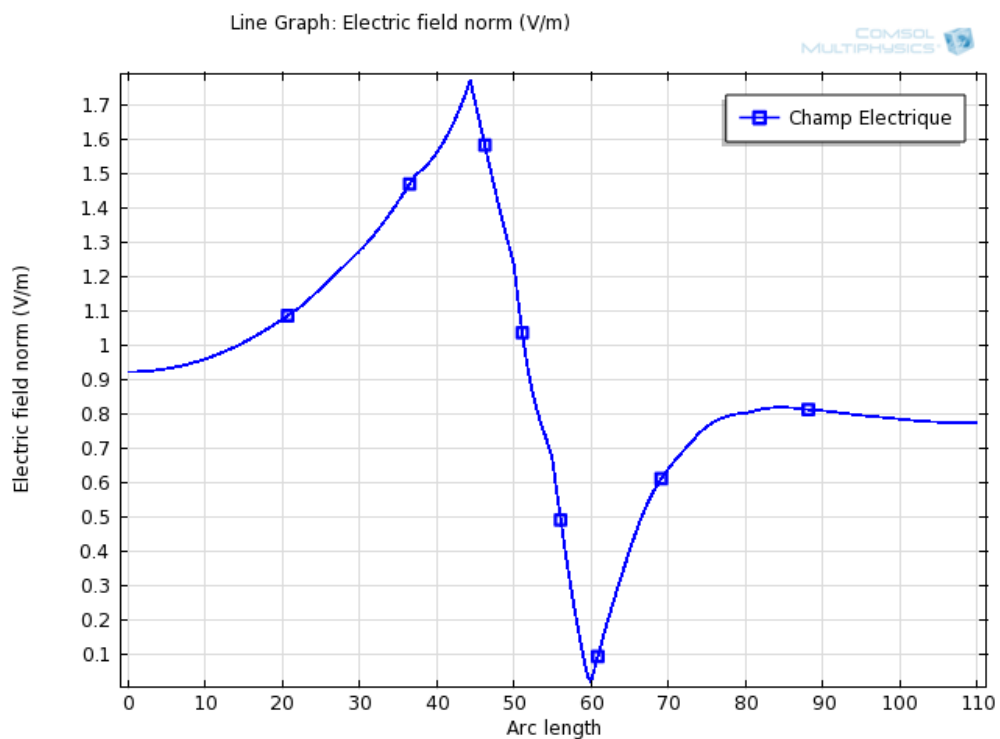
*Figure IV. 15 – distribution du champ électrique calculé au sol discontinu(3D)*

#### IV.3.4-La troisièmes essai:

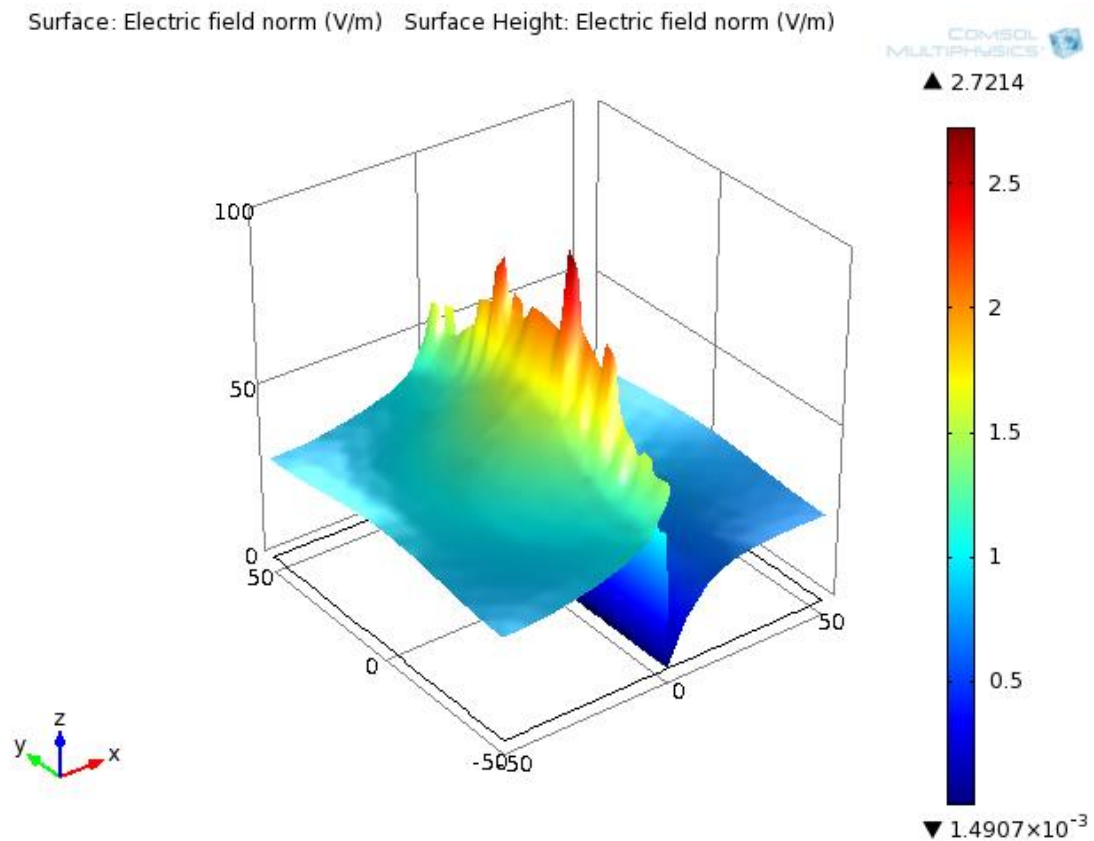
pour la position de la tige au dessus de l'interface, avec deux hauteurs,  $h = 40$  cm, et  $h = 30$  cm.



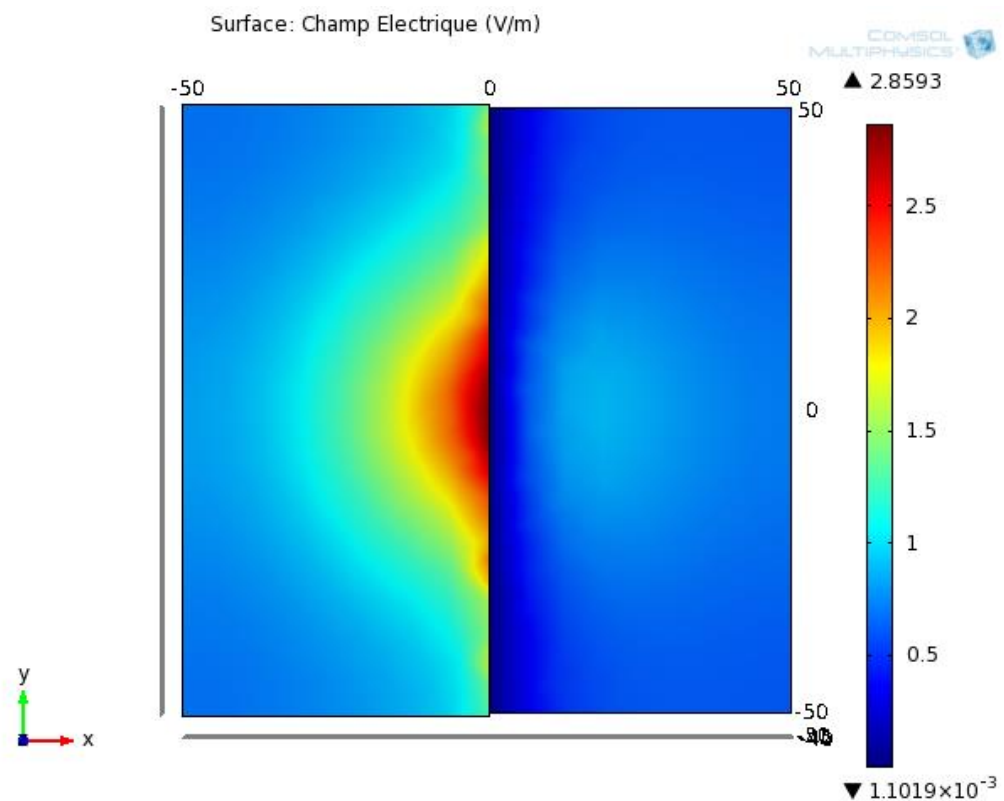
**Figure IV. 16** - Champ électrique calculé à la surface de sol discontinue ( $D=0, h=40$  cm)



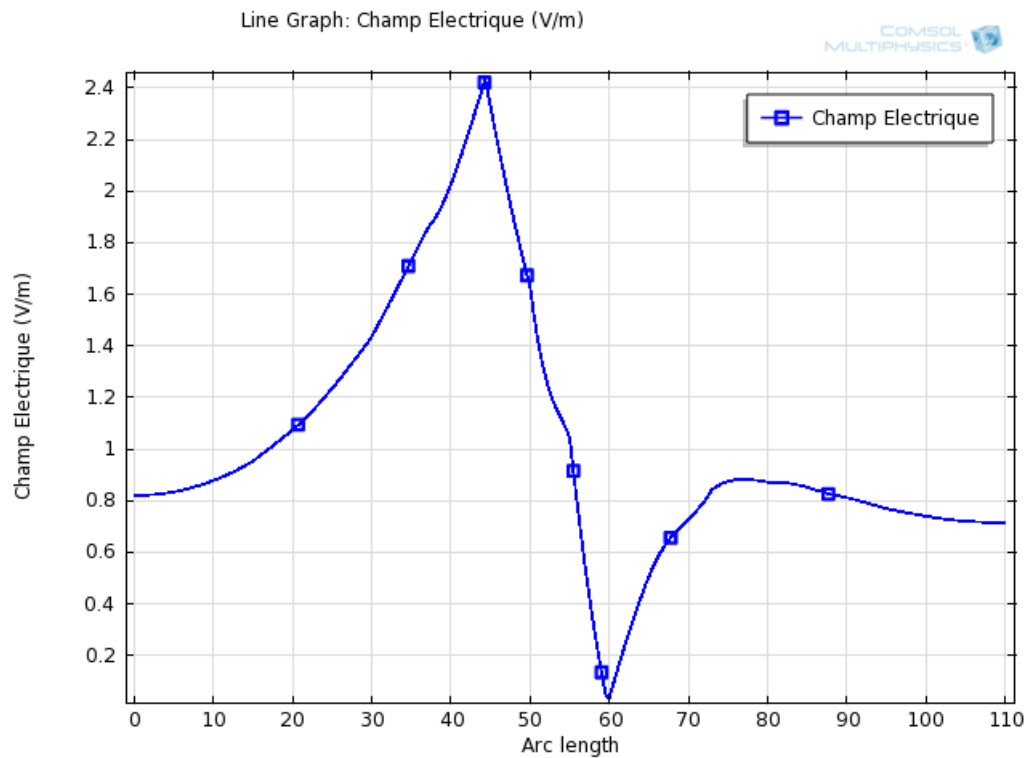
**Figure IV. 17** - champ électrique calculé à la surface de sol discontinu (l'interface en point 50)



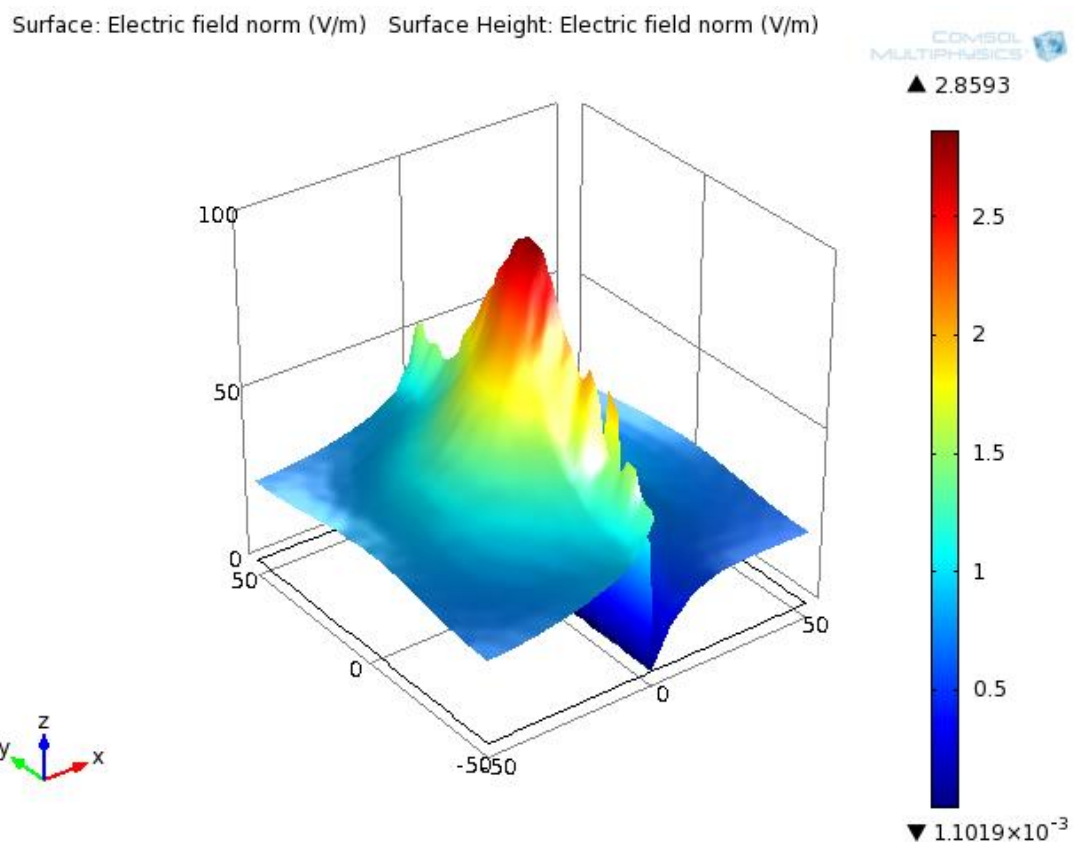
**Figure IV. 18** - champ électrique calculé à la surface de sol discontinu (3D)



**Figure IV. 19** - Champ électrique calculé à la surface de sol discontinue ( $D=0$ ,  $h=30$  cm)



**Figure IV. 20** - champ électrique calculé à la surface de sol discontinue (l'interface en point 50)



**Figure IV. 21** - champ électrique calculé à la surface de sol discontinue (3D).

#### IV.4- Conclusion:

nous avons établi deux modèles représentant le phénomène de la pré-décharge de foudre. le premier était un modèle mathématique et le deuxième était un modèle expérimental. A l'aide de ces deux modèles nous avons étudié l'influence de la discontinuité du sol sur l'impact probable par la décharge de foudre.

le modèle mathématique nous a permis. à l'aide d'un programme numérique de calculer l'intensité du champ électrique sur la surface du sol discontinu lors de l'évolution du le pré-décharge de foudre qui augmentée au niveau de l'interface. cette augmentation dépend des la distance (h) entre la tige de la pré décharge et la sol et de la distance (D) qui sépare l'axe de cette décharge et l'interface.

L'intervalle d'air tige-interface constitue un chemin préférentiel pour les lignes de champ. En effet, le système tige-interface qui se comporte comme un system pointe-pointe est moins rigide que le system pointe (négative)-plan. Ce qui justifie que pour les faibles valeurs du déplacement de la tige, on obtient parfois des décharges disruptives sur l'interface, malgré l'application de tension  $U_{0\%}$  qui garantie l'absence de décharge disruptive dans l'intervalle tige-plan.

### Conclusion générale

Si des progrès importants peuvent 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 la distribution du champ électrique. [23]

En effet, ces propriétés sont considérées comme l'une des insuffisances du modèle électrogéométrique.

Notre travail est orienté vers la détermination numérique de la distribution du champ sur un sol discontinu, afin de confirmer l'influence de l'interface.

Le modèle que nous avons réalisée, est incorporée dans un système d'électrode tige-plan, les divers essais effectués ont permis de donner l'intensité du champ électrique à la surface du sol discontinu, en fonction de plusieurs paramètres :

- Intervalle d'air (h) entre la tige HT et le plan.
- Position de la tige (D) entre la tige et l'interface.

Utilisant cette méthode de calcul (les éléments finis), nous avons déterminé la distribution du champ au sol pour un système homogène, ainsi qu'un système hétérogène avec une interface de profondeur (e).

Les résultats d'essais obtenus, nous ont menés à citer les constatations suivantes :

- ✓ La rigidité diélectrique du système pointe-pointe étant inférieure à celle du système pointe-plan. L'intensité du champ calculée au niveau de l'interface, est beaucoup plus importante que celle des autres points du sol. Ceci est dû au fait que l'interface renforce localement le champ électrique, ce qui provoque l'élévation de celui-ci, et l'apparition de décharges sur l'interface dans certains cas.
- ✓ Au voisinage de l'interface, nous observons une sorte de discontinuité dans l'évolution de l'intensité du champ électrique. Celle-ci en diminuant, devient inférieure à la valeur obtenue dans le cas du sol homogène bon conducteur de même longueur.
- ✓ D'après les deux configurations considérées, nous avons pu faire une analyse bien détaillée de la distribution du champ au sol discontinu, en fonction des deux

## CONCLUSION GENERALE

---

niveaux de terre, et les deux paramètres de ce système (position de la tige et de la hauteur de la tige par rapport le plan).

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

- ✓ D'enrichir les connaissances permettant de comprendre la plupart des manifestations de la foudre, bien que plus qualitativement que quantitativement.
- ✓ De se familiariser avec les différents dispositifs de la modélisation de haute tension.
- ✓ D'observer les différentes formes d'ondes captées par le logiciel.

En perspectives à ce travail nous proposons les travaux concernant la mesure du champ électrique avec tension de choc :

- En utilisant dans le modèle numérique avec terre discontinue un parafoudre vertical et horizontal avec différents diamètres
- En utilisant un modèle numérique avec terre hétérogène (multi-matérielle Aluminium ou fer + eau ou sable) pour une simulation plus en réel.
- En utilisant un modèle numérique avec un modèle d'architecture (COMSOL capable d'import des plans de AUTOCAD, ARCHICAD....)

# Bibliographie

- [1] — **C.GARY** "la foudre des mythologies antiques à la recherche moderne". Edition Masson. 1994.
- [2] — **G.Roy** " la propriété diélectrique de l'air et les très hautes tension". Edition eyrolles. 1984.
- [3] — **J.Arianer** "les processus d'ionisation ". Cours université Paris sud .2004.
- [4] — **E.Kuffel, W.Zaenguele** "high voltage engineering" .Pergamon press, 1984.
- [5] — **J.R LUCAS** "high voltage engineering ".2001.
- [6] — **S.Raphaél** " travaux pratique physique II ". Université de Génère.
- [8] — Présentation INSA de Lyon en partenariat avec EDF/SEPTEN - juin 2004
- [9] — **A. Xemard, A. Sabot, P. Lalande, M. Nguyen** ; « Modèles électrogéométriques utilisés en électrotechnique : Comparaison et utilisation par EDF.», Foudre et Montagne, Chamonix, France, 1994.
- [10] — **A. Sabot, J. Michaud** ; « Lignes et postes. Choix et coordination des isolement », Techniques de l'ingénieur », D4750. 1999.
- [11] — **Norme Française**; « Protection contre la foudre : Installation de paratonnerres», C17-100, Février, 1987. pp : 1-19.
- [12] — **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.
- [13] — **G. Le Roy, C. Gary, B. Hutzler, J. Lacot, C. Dubaton** ; « Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions (la foudre) », Ed Eyrolles, 1984, Paris. pp : 92-251.
- [14] — **J. Ferras** ; « Influence des propriétés électrogéologiques du sol sur le point d'impact de la décharge de foudre », Thèse de Magister, ENP, Alger, Algérie 1987.
- [15] — **A. Boubakeur, A. Mekhaldi** ; « Capture zones of a lighting conductor in the case of bad conducting earth », Middle East Power Systems Conference, MEPCOM'92, Assiut, Egypt, 1992. pp :122-123.

## Bibliographie

---

- [16] — **A. Rahmani** ; « Détermination des zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal dans le cas d'une terre mauvaise conductrice », thèse de Magister, université de Béjaïa, Algérie, 1996.
- [17] — **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.
- [18] — **M. Aguet** ; « Haute Tension », Vol. XXII, Presses Polytechniques Romandes, 1987.
- [19] — **J.L.Coulomb et J.C.Sabonnadiere**, 'C.A.O en éléments finis en électrotechnique', Hermes, 1985
- [20] — **J.Coulomb et J.C.Sabonnadiere**, 'C.A.O en électrotechnique', Hermes, 1985
- [21] — **P.P.Silvester et R.L.Ferrari**, 'finite elements for electrical engineers', Cambridge university 1991.
- [22] — **L.Lapidus, G.F Pindor**, 'numerical solution of partial differential equations in science and engineering'.
- [23] — **A.Boubakeur** ; « Protection contre la foudre dans le cas d'une terre hétérogène », Séminaire sur la sécurité et la protection des installation et des équipement électriques, ENSEM-LPEE, Casablanca, Maroc, 1991.
- [24] — **A.J. Eriksson** ; « Surtensions de foudre sur les lignes de transport à haute tension », Electra, N°47, 1975. pp : 87-110.
- [25] — COMSOLE Guide.