

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



Université d'EL-Oued
Faculté des Sciences et de la Technologie

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme de la

LICENCE ACADEMIQUE

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

Modélisation du champ électrique par le
logiciel COMSOL

Dirigé par :

-M. KHECHEKHOUCHE Ali

Réalisés par :

- HADA Mounir

- LIMANE Abderrahmane

Soutenu au Juin 2013

Remerciements

Tous d'abord nous remercions **Dieu** le but puissant de nous avoir montré la voie guidée et donne le courage de résoudre tous les problèmes.

Au terme de ce mémoire de fin d'études, nous tenons à formuler nos chaleureux remerciements à Mr **kh.ALI** Professeur de l'université d'El-oued, notre encadreur, qui a dirigé notre travail avec dévouement jusqu'à son achèvement.

Nous adressons nos vifs remerciements au président du jury ainsi qu'aux examinateurs qui ont accepté de juger ce travail.

Nous tenons aussi à exprimer notre profonde gratitude à l'ensemble de nos enseignants de département de génie électrique pour leurs efforts déployés à notre égard tout au long de notre parcours universitaire, sans oublier nos amis qu'ils nous ont accompagné, et qui nous ont aidé au cours de ce parcours.

Enfin, nous remercions tous ce qui a contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

SOMMAIRE DE FIGURE

| | |
|---|----|
| Figure I.1 : cumulo-nimbus | 04 |
| Figure I.2 : Principe d'une décharge | 05 |
| Figure I.3 : les éclairs intra nuageux et inter nuageux | 06 |
| Figure 1.4 : les coups de foudre pour lesquels décharge électrique s'effectue entre le nuage Et le sol | 06 |
| Figure I.5 : Classification des coups de foudre | 07 |
| Figure I.6 : Différents types de coups de foudre | 08 |
| Figure I.7 : oscillogramme d'un courant de foudre | 09 |
| Figure I.8 : Schéma montrant la distribution des charges électriques dans la masse d'un nuage orageux et la réparation du champ électrique au sol, au moment au va éclater la foudre | 10 |
| Figure I.9 ondes de surtensions de foudre normalisées | 12 |
| Figure II.1 : conditions de passage entre milieux différent | 16 |
| Figure II.2 : transformation des coordonnées des éléments réels en celles de l'élément de référence | 20 |
| Figure III.1 : Modèle expérimental avec terre homogène | 25 |
| Figure III.2 : Modèle expérimental de terre discontinue en présence de la sonde à capacité Répartie | 26 |
| Figure III.3 : Configurations du modèle expérimental dans le cas de terre discontinue | 28 |
| Figure III.4 : Champ électrique en fonction de position de la sonde (d/h) Avec h=8cm | 31 |
| Figure III.5 : Champ électrique en fonction de position de la sonde (d/h) Avec h=16cm | 32 |
| Figure III.6 : Champ électrique en fonction de position de la sonde (d/h) Avec h=8cm | 34 |
| Figure III.7 : Champ électrique en fonction de position de la sonde (d/h) Avec h= 16cm | 35 |
| Figure III.8 : Champ électrique en fonction de position de la tige (D/h) Avec h= 8cm | 37 |
| Figure III.9 : Champ électrique en fonction de position de la tige (D/h) Avec h= 16cm | 38 |
| Figure III.10 : Champ électrique en fonction de position de la tige (D/h) Avec h= 8cm | 40 |
| Figure III.11 : Champ électrique en fonction de position de la tige (D/h) Avec h= 16cm | 41 |

| | |
|--|----|
| Figure IV.1. Champ électrique calculé au sol pour deux positions de la tige avec $h=8\text{cm}$ | 44 |
| Figure IV.2. Champ électrique en fonction de position de la tige -partie haut (D)- Avec $h=8\text{cm}$ | 46 |
| Figure IV.3. Champ électrique en fonction de position de la tige -partie haut (D)- Avec $h=16\text{cm}$ | 47 |
| Figure IV.4. Champ électrique en fonction de position de la tige -partie basse (D)- Avec $h=8\text{cm}$ | 49 |
| Figure IV.5. Champ électrique en fonction de position de la tige -partie basse(D)- Avec $h=16\text{cm}$ | 50 |

SOMMAIRE

| | |
|------------------------------|-----------|
| INTRODUCTION GENERALE | 01 |
|------------------------------|-----------|

❖ CHAPITRE I: GENERALITES SUR LA Foudre

| | |
|--|-----------|
| I.1. Introduction | 03 |
| I.2. Phénomène de foudre | 03 |
| I.2.1. Formation des nuages orageux | 04 |
| I.2.2. Caractéristiques du cumulo-nimbus | 05 |
| I .3. Décharge du foudre | 05 |
| I .3.1. Principe d'une décharge | 05 |
| I .3.2. La décharge atmosphérique | 06 |
| I .3.3. Classification des coups de foudre | 07 |
| I .3.3.1. le traceur | 08 |
| I .3.3.2. l'arc en retour | 08 |
| I .3.4. Paramètres électriques de la foudre | 08 |
| I .3.5. Courbe du champ électrique au voisinage du sol | 10 |
| I.4.les surtensions de foudre | 11 |
| I.5. Effets de la foudre | 12 |
| I.6.Conclusion | 13 |

❖ CHAPITREII : LES METHODES NUMERIQUE DE CALCUL DU CHAMP ELECTRIQUE

| | |
|---|-----------|
| II.1. Introduction | 14 |
| II.2. Equation à résoudre dans un domaine | 14 |
| II.2.1.Modèle électrostatique de MAXWELL | 14 |
| II.2.2. Equations de passage entre différents milieux | 15 |
| II.2.3. Condition aux limites | 17 |
| II.3. Méthode numérique de résolution | 17 |
| II.3.1. Méthode des éléments finis | 18 |
| II.4. Approximation par élément finis | 19 |
| II.4.1.Elément de référence | 20 |
| II.4.2. Construction des fonctions | 21 |
| II.4.3. Transformation des operateurs de dérivation | 21 |

| | |
|---|-----------|
| II.4.4. Formulation intégrale | 22 |
| II.4.4.1. Méthodes des résidus pondérés | 22 |
| II.4.4.2. Méthode variationnelle | 23 |
| II.5. Conclusion | 24 |

❖ CHAPITRE III : MODULE EXPERIMENTALE

| | |
|--|-----------|
| III.1. Techniques expérimentales | 25 |
| III.2. Module expérimentale | 25 |
| III.2.1. Module expérimentale avec terre homogène | 25 |
| III.2.2. Module expérimentale avec terre homogène discontinue | 26 |
| III.3. Configuration du module expérimental | 27 |
| III.4. Présentation des résultats | 29 |
| III.4.1. Cas de terre hétérogène | 29 |
| III.4.2. Distribution du champ en fonction de position de la sonde | 29 |
| III.4.3. Distribution du champ en fonction de position de la tige HT | 36 |

❖ CHAPITRE IV : RESULTATS NUMERIQUE ET INTERPRETATION

| | |
|--|-----------|
| IV.1. Introduction | 42 |
| IV.2. Cas de terre homogène | 43 |
| IV.2.1. Distribution du champ en fonction de position de la tige | 43 |
| IV.3. Distribution du champ selon de position de la tige HT | 45 |
| IV.3.1. La première configuration : la tige au dessus de la partie haute de la terre discontinue | 45 |
| IV.3.2. La deuxième configuration : la tige au dessus de la partie basse de la terre discontinue | 48 |
| IV.4. Conclusion | 51 |
| CONCLUSION GENERALE | 52 |

INTRODUCTION GENERALE

Évaluée en termes de risque, la nécessité de la protection contre la foudre n'est plus à démontrer. En effet, elle réduit les risques et les dégâts matériels si elle fait l'objet d'un soin attentif.

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, néanmoins, une approche cohérente de la protection contre la foudre dans le cas d'un sol homogène et parfaitement conducteur, hypothèse rarement rencontrée en réalité, il ne présente pas une perfection absolue. En effet, sa formulation 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.

Le premier chapitre de ce mémoire débute par un exposé sur la physique des orages et les caractéristiques électriques de la foudre. La compréhension de ces phénomènes nous aide à concevoir le système de protection contre la foudre. Nous présentons ainsi une brève description des mécanismes d'impacts, qui expliquent comment se décide le point de chute d'un coup de foudre et la présentation de l'influence des propriétés électrogéologiques du sol sur le point d'impact de la foudre. Les principaux résultats d'investigations sur des terres homogènes, hétérogènes et discontinues sont analysés

Le deuxième chapitre est consacré aux méthodes de calcul du champ électrique rayonné par la foudre, ainsi que la description de la méthode des éléments finis qui est utilisé dans ce projet pour le calcul du champ électrique.

Les résultats expérimentaux obtenus dans cette l'étude [BOU91] sont présentées avec soin et nous présentons les différents résultats qui mettent en relief l'influence de plusieurs paramètres sur la distribution du champ électrique dans le cas de la terre discontinue dans le troisième chapitre.

En quatrième chapitre nous appliquons la méthode des éléments finie, afin de modélisée les tests atteint au chapitre trois en modèle numérique avec le COMSOL Multiphasiques et de comparer les résultats obtenus avec les résultats expérimentale qui mettent dans le troisième chapitre.

Enfin, nous terminons ce travail par une conclusion générale.

I.1. Introduction :

La foudre est un phénomène perturbateur important du fonctionnement de toutes Les installations électriques, à plusieurs titres :

- elle peut être à l'origine de perturbation momentanée dans la continuité de service, donc de dégradation de la qualité des alimentations.
- Elle peut causer des destructions de matériel, et en conséquence de longues Interruptions de service des installations.
- Elle constitue un danger pour les personnes (tension de pas, élévation de potentiel des Masses et du circuit de terre).

La foudre a toujours été une cause de perturbation dans l'utilisation de l'électricité.

Dans ce chapitre nous allons revoir quelque information d'ordre générale sur la foudre et les surtensions.

I.2. Phénomène de foudre :

Qu'est-ce que la foudre ?

La foudre est une manifestation de l'électricité d'origine atmosphérique, comportant une décharge électrique accompagnée d'une lumière vive (éclair) et d'une violente détonation (tonnerre). L'éclair est l'ensemble des manifestations lumineuses provoquées par les décharges d'origine atmosphérique .Le tonnerre est le bruit induit par la décharge électrique.

- La terre et l'électrosphère, zone conductrice de l'atmosphère (épaisseur de l'ordre de 50 à 100km), constituent un condensateur sphérique naturel qui se charge par ionisation.
- l'air étant faiblement conducteur, il existe donc un courant de conduction permanent associé, de l'ordre de 1500 A pour tout le globe terrestre.

La foudre est liée à la formation du nuage orageux, masses d'eau sous forme d'aérosols, il y'a un courant de conduction entre la base et le sommet due à la différence de température, ce courant d'aire ascendant entraîne les particules les plus légères qui s'élèvent sous forme de glace et se chargent positivement tandis que les particules plus lourdes descendantes qui se trouvent en bas sont chargées négativement tombent sous l'action de leur poids. Il y'a trois type de décharges, une décharge se produit au sein du nuage ou entre nuage ou entre nuage et sol. Dans ce dernier cas on parle de foudre.

Le phénomène conduit à un champ électrique nuage-sol peut atteindre -15 à -20 kv/m sur sol plat. Mais la présence d'obstacles déforme et augmente localement ce champ d'un facteur 10 à 100 ou même 1000 selon la forme des aspérités (phénomène aussi appelé « effet de point ». il apparait un canal ionisé appelé traceur en direction [2].

I .2.1. Formation des nuages orageux [1], [7] :

Les nuages orageux sont généralement de type cumulo-nimbus (fig. 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 bas peut atteindre des surfaces de plusieurs dizaines de km² et dont le sommet atteint 15 km et ils s'étendent entre des altitudes allant de 2 à 20 km.



Fig. I.1 : cumulo-nimbus

On distingue deux sortes d'orages :

- les orages de chaleurs 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 forment 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.

I.2.2. Caractéristiques du cumulo-nimbus [2] :

Le nuage orageux est plus vigoureux des nuages. On l'appelle cumulo-nimbus ou roi des nuages. Les cumulo-nimbus se présentent rarement sous forme isolée (fig. 1.1), mais plutôt en agrégats. Ils diffèrent des autres nuages d'averses à la fois par l'échelle de leur extension tant verticale qu'horizontale et par leur aptitude à donner naissance à des phénomènes électriques.

Un cumulo-nimbus isolé a la forme d'une énorme tour verticale surmontée d'une zone supérieure en forme d'enclume et appelée enclume, située à une altitude variant entre 6 et 18km, parfois davantage. Les cumulo-nimbus sont pratiquement tous observés dans la troposphère ou la température décroît, en moyenne, jusqu'à la tropopause, limite supérieure de la troposphère.

I.3. Décharge du foudre :

I.3.1. Principe d'une décharge :

Le principe de la décharge d'un coup de foudre négatif descendant est le suivant :

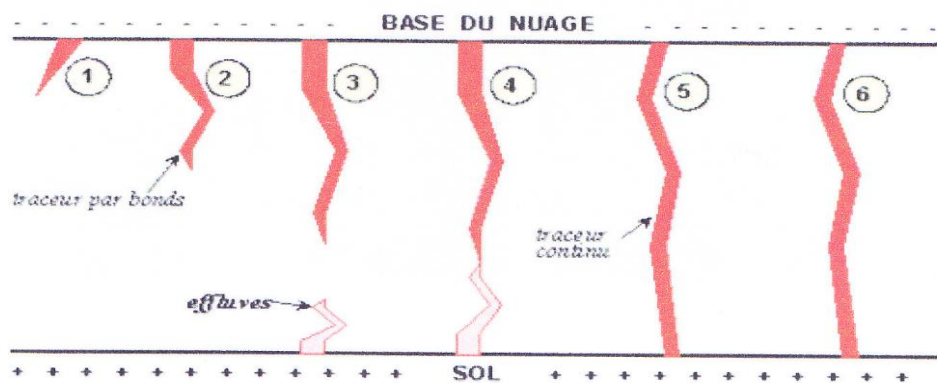


Fig. I.2 : Principe d'une décharge

1. Un traceur se développe à partir du nuage.
2. Ce traceur progresse par bonds vers le sol. Il est constitué de particules électriques arrachées au nuage par le champ électrique nuage-sol. Ces particules forment un canal lumineux qui se dirige vers le sol.
3. Lorsque le traceur arrive à proximité du sol, des effluves (étincelles) partent du sol.
4. Les effluves entrent en contact avec la pointe du traceur.
5. Un arc électrique circule dans le canal ionisé créé par le traceur. Cet arc très lumineux permet l'échange des charges électriques entre le nuage et le sol. Le traceur ne progresse plus et devient continu, l'onde de choc se transforme en onde sonore (le tonnerre).

6. Une succession d'arcs de moins en moins intenses suivra. Entre ces arcs, le traceur continu subsiste laissant circuler un courant.

I .3.2. La décharge atmosphérique :

On distingue deux grandes familles d'éclairs :



Fig. I.3 : les éclairs intra nuageux (à l'intérieur du nuage) et inter nuageux (entre différent nuages)



Fig. I.4 : les coups de foudre pour lesquels décharge électrique s'effectue entre le nuage et le sol.

- la première phase de la décharge qui se produit à l'intérieur même d'un nuage, ou entre deux nuages orageux, est appelée l'éclair intra -nuage ou inter -nuage.

-la deuxième phase d'un coup de foudre (donc entre la terre et le nuage) est toujours la formation d'un pré-décharge peu lumineuse, appelée traceur, qui progresse à travers l'air neutre avec une vitesse relativement faible (environ 200 km/s). Un traceur (ou précurseur ou encore leader) est en fait un canal ionisé, d'une grandeur caractéristique importante à l'échelle macroscopique (typiquement 2 à 3 cm de diamètre), qui est la conséquence directe des phénomènes d'avalanche électronique.

En effet, l'air atmosphérique contient en permanence des ions négatifs et positifs, en quantité variant de 100 à 1000 ions par centimètre cube. Lorsqu'un de ces électrons se trouve dans une région de l'espace où règne un champ électrique important il va subir une accélération et acquérir une énergie cinétique. Très vite il va entrer en collision avec un atome neutre. Si à cet instant l'énergie acquise par l'électron est supérieure à l'énergie d'ionisation de l'atome considéré, la collision va créer un nouvel électron libre. Ce processus est appelé "ionisation par choc" ou "ionisation collisionnelle". Ce nouvel électron se comporte comme le précédent et crée donc à son tour un autre électron libre et rapidement le phénomène prend une allure d'avalanche. L'intensité de champ électrique nécessaire pour qu'un électron puisse ioniser un atome est de l'ordre de 30 kv/cm dans l'air et à pression normal.

Lorsqu'un traceur établit un canal ionisé entre le sol et le nuage, une ou plusieurs décharges se produisent. Ces décharges constituent la foudre proprement dite. Elles se déplacent à une vitesse de l'ordre de 40 000 km/s et correspondent à une tension de l'ordre de 100 millions de volts et un ampérage de 30 000 A. Le long du trajet de la décharge, l'air peut atteindre une température de 30000°C.

I.3.3. Classification des coups de foudre [1], [4], [7] :

Les coups de foudre sont classés selon :

- La partie positive ou négative du nuage qui se décharge.
 - Le sens de formation du traceur qui se développe entre le nuage et le sol.
- Ce traceur crée un canal ionisé dans lequel circule l'arc. Selon l'origine du traceur, le coup de foudre sera descendant ou ascendant.

a) Coups de foudre descendants :

- Négative
- Positif

b) Coups de foudre ascendants :

- Négative
- Positif

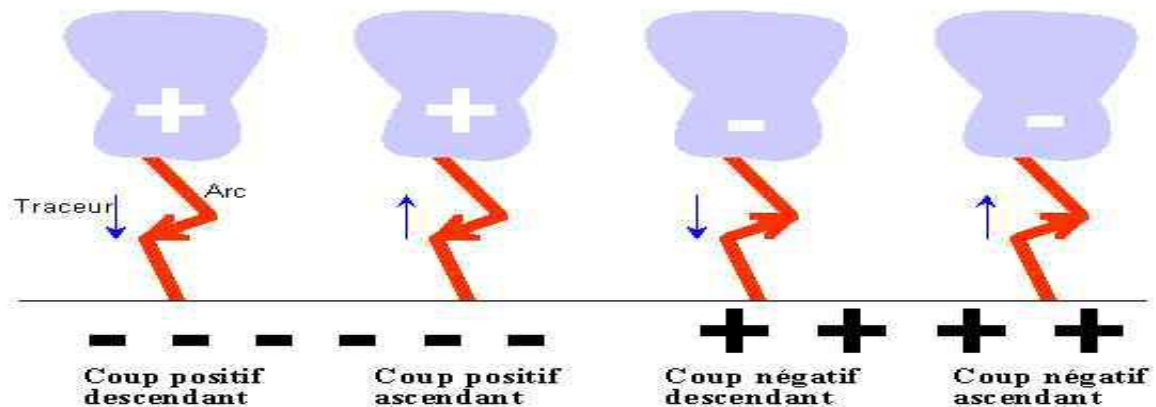


Fig. I.5 :Classification des coups de foudre

- Un coup de foudre est dit descendant, lorsque le traceur se développe à partir du nuage, il est ascendant lorsque le traceur se propage à partir du sol.
- Un coup de foudre est dit négatif, si la partie négative du nuage se décharge, il est dit positif, si la partie positive se décharge.

1. les coups de foudre négatifs descendants et ascendants sont les plus fréquents. Leurs fréquences d'apparition sont l'ordre de 80 à 90 % en région tempérées. le coup de foudre négatif descendant apparaît en régions plates, tandis que le coup de foudre négatif ascendant apparaît en région montagneuses et en présence d'aspérités (structures élevées, tours et pylônes).
2. les coups de foudre positifs descendants se présentent dans 10 à 20 % des cas, tandis que le coupe positif ascendant est très rare par ce qui précède, nous pouvons conclure qu'en terrains plats ,le coupe de foudre négatif descendant est plus fréquent et plus dangereux.

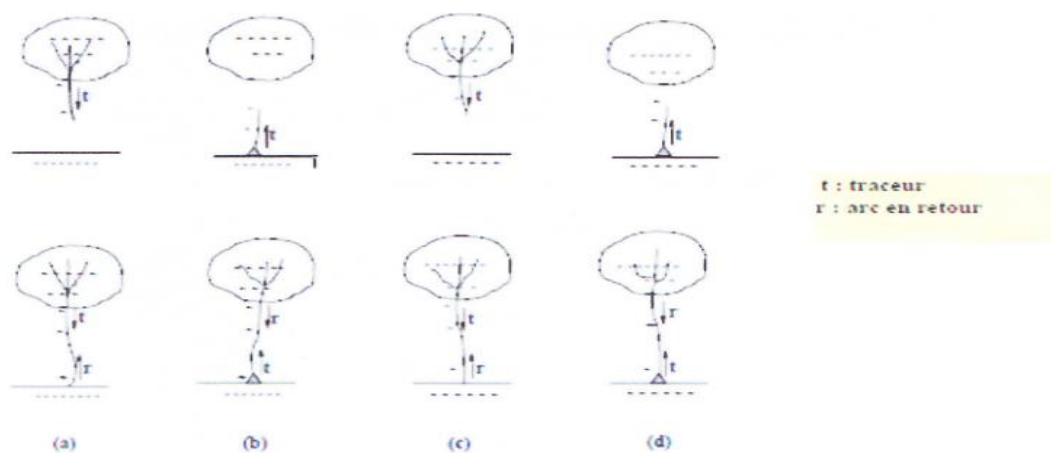


Fig. I.6 : Différents types de coups de foudre [3]

I.3.3.1. le traceur [4] :

Le canal ionisé formé établi ainsi entre les deux pôles un pont suffisamment conducteur pour permettre à la foudre de se propager. On l'appelle « traceur par bonds », car il « trace » le chemin de l'éclair, en formant une ramification dans le ciel visible à l'œil nu, en progressant par bonds. 40 à 100 us s'écoulent entre chaque bond.

I.3.3.2. l'arc en retour [4] :

Dès que la pointe du traceur s'approche du sol, les pré-décharges ascendantes se forment et rejoignent le traceur ascendant situé à quelques dizaines de mètres au-dessus du sol (60mètres en moyenne). Dès que le traceur par bonds négatif rencontre la pré-décharge positive du sol, une connexion se produit entre elles. Les pré-décharge qui neutralisent à ce moment le traceur par bonds en remontant le canal ionisé est appelé (arc en retour).

I.3.4. Paramètres électriques de la foudre [7] :

➤ **La forme d'onde :**

La forme d'onde réelle est très variable : elle consiste en montée jusqu' à l'amplitude maximale (de quelques microseconde à 20 microsecondes) suivie d'une queue de décroissance de quelque dizaines de microsecondes. Donc le courant est de nature impulsionnelle et sa forme se caractérise par une valeur de crête, un front de montée jusqu' à la crête (ou temps de montée), et un temps de décroissance.

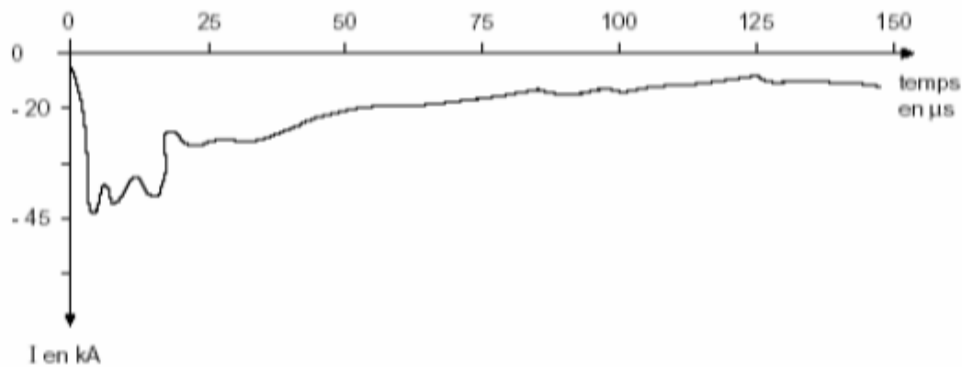


Fig. I.7 : oscillogramme d'un courant de foudre [6]

➤ **valeur de crête du courant :**

La valeur maximale atteinte par l'intensité d'une impulsion de courant. Cette valeur est variable d'un coup de foudre à l'autre, pour traiter des problèmes de surtensions et des problèmes d'efforts mécaniques engendrés par les chocs de foudre.

➤ **Temps de montée (temps de front) :**

Durée entre l'instant début de l'impulsion de courant atteint sa valeur maximale.

➤ **Temps de décroissance (le temps de queue) :**

Durée entre l'origine conventionnelle et l'instant où la valeur de l'onde est retombée à 50% de la valeur de crête. Il est lié aux efforts mécaniques, et sert à déterminer la durée d'application de la force électromagnétique.

➤ **Pente du courant (raideur du courant) :**

Elle s'exprime en kilo ampères par microseconde. La raideur maximale est toujours liée à la course du front de montée.

➤ **Energie spécifique :**

Pour calculer l'échauffement d'un conducteur, la grandeur utilisée est le « i^2t ». Elle s'exprime en joule par ohm ou en ampères x secondes, et elle représente l'énergie que le

courant d'un coup de foudre peut dégager dans une résistance de 400Ω ; ce paramètre sert à l'estimation des effets thermiques de la foudre [1], [4]

➤ **charge totale :**

Ce paramètre exprimé en coulombs(c) permet de déterminer l'énergie transformée en chaleur par l'arc électrique en surface de conducteur .Il permet notamment de déterminer les risques liés à la perforation des conducteurs au des point d'impacts. La charge totale est égale à $Q=I.t$.

I.3.5. Courbe du champ électrique au voisinage du sol [2], [4] :

Dans sa phase de maturité, le cumulo-nimbus chargé électriquement, à sa base, un potentiel électrique (encadré) de l'ordre de 100 MV (millions de volts) par rapport au sol. Représente le champ électrique que créent les charges électriques d'un cumulo-nimbus au voisinage de sol. en terrain plat , par beau temps (en l'absence de nuages orageux !) , la composante verticale du champ électrique est de l' ordre de 100 v/m , à cause de la présence d'une charge électrique positive au niveau de l'ionosphère , et de charge négatives en même nombre au niveau du sol. L'approche du nuage orageux, qui se déplace à des vitesses atteignant parfois 80 km/h, le champ électrique au niveau du sol s'inverse et croit fortement, car la base du nuage agit comme une charge négative nette importante par rapport à un sol qui s'électrise positivement. Dès que le champ électrique atteint des valeurs de l'ordre de 10 kV/m, c'est-à-dire dix mille volts par mètre, la décharge au sol est imminente.

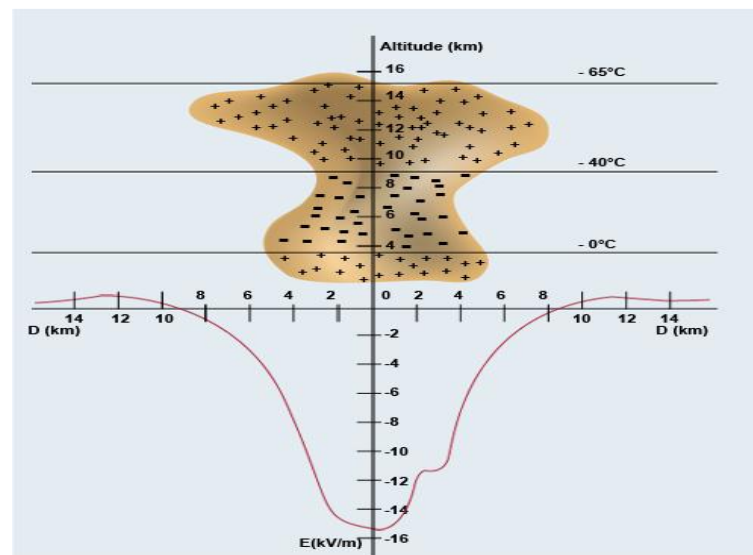


Fig. I.8 : Schéma montrant la distribution des charges électriques dans la masse d'un nuage orageux et la répartition du champ électrique au sol, au moment où va éclater la foudre.

I.4.les surtensions de foudre [5] :

Elles ont pour origine des décharges atmosphérique de foudre .d'après les statistiques, la moitié des coupes de foudre ont une amplitude supérieure à 38kA .pour les essais, les parafoudres sont testés avec une onde de choc de courant normalisée de 65 KA.

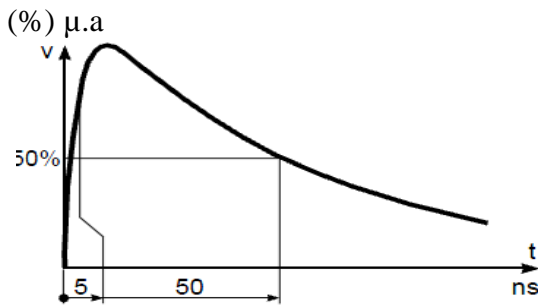
L'amplitude des surtensions de foudre peut atteindre pratiquement de 2 à 5 fois la tension nominale du réseau, et leur temps de montée est compris entre 0.1 et 10 μ s. L'onde conventionnelle universellement admis comme représentative de ces surtensions, est l'onde pleine normalisée 1,2/50 μ s, (Fig. I.9.a).

L'apparition d'amorçages, aux éclateurs ou par contournement de chaines d'isolement souvent cette onde en « onde coupée », représentée dans (Fig. .I.9.b).

La répartition des charges électrique de signes contraire, dans les parties basse et haute du nuage, lu donne l'aspect d'un condensateur plan. La rupture diélectrique à l'intérieure du nuage, engendre une décharge électrique accompagnée de l'éclair, et peut provoquer une élévation de potentiel d'un linge proche. On peut aussi considérer le sol comme une électrode de charge opposée à la partie basse du nuage distance de 2 à 3 Km l'air constituant le diélectrique du condensateur la foudre a lieu lorsque le gradient limite est atteint. Cela se concrétise par la formation d'un canal conducteur entre le sol et le nuage qui va permettre décharger l'énergie du nuage en écoulant un courant intense dans les régions à climat tempéré , la partie basse des nuage est chargée négativement dans 80 à 90 % des cas, la décharge est alors désignée par :

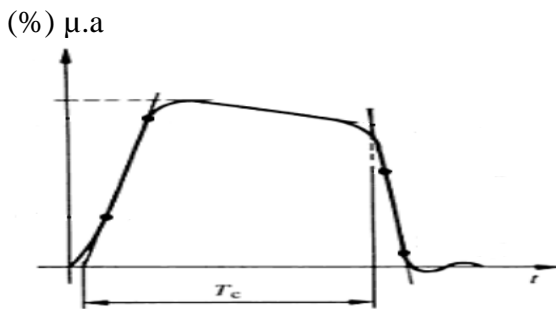
Coup de foudre négatif. Dans le cas contraire, les coups de foudre sont dits positive généralement ce sont ces derniers qui sont les plus contraignants en véhiculant plus d'énergie. Notons que les aspérités ou saillies du terrain (arbre, tour, pylône, etc.....) offrent des points d'impacts préférentiels, à cause de croissance du champ électrique par effet de pointe.

Tension



a) Choc de foudre plein 1.2/50 μs
 $T_1 = 1.2 \pm 0.36 \mu s$ (temps de montée)
 $T_2 = 50 \pm 10 \mu s$ (durée jusqu'à la mi-amplitude)

Tension



b) Choc de foudre coupée sur la queue
 t_c : temps de coure

Fig. I.9 : ondes de surtensions de foudre normalisées

I.5. Effets de la foudre :

Le coudre est un phénomène haut fréquence qui va provoquer en plus des effets d'induction et de surtension d'autres effets tel que [1], [4].

I.5.1. Effets thermiques (effet Joule) :

La fusion des éléments au point d'impact du coup de foudre.

- Écrasement des câbles à cause de la produite par la vaporisation de l'eau dans les sols humides.
- Le risque d'incendie dû à la circulation de courant importante (1 à 100 KA).
- Dissipation de l'énergie sous forme de chaleur.

I.5.2. Effets mécanique :

Lorsque le courant de la foudre circule dans des conducteurs parallèles, ils provoquent de la force d'attraction ou de répulsion pouvant entraîner des déformations mécaniques et des ruptures.

- Dégradation de matériel de façon brutale comme le claquage diélectrique par surtension ou par vieillissement prématuré à cause des contraintes des structures.

I.5.3. Effets acoustiques :

Les forces électrodynamiques liées au courant dans l'éclair créent une dilatation de l'air du canal de foudre accompagnée d'élévation de pression dans le canal. Cette surpression et sa disparation brutal

créent une onde de choc se propagent ensuite dans l'atmosphère. Cette onde de choc peut générer de fortes surpressions sur des structures avoisinantes et conduire au renversement de panneaux, murs,etc.

I.5.4.Effets lumineux :

Les effets sur la installation sont limités aux équipements optique (cellules, caméra, ...).En ce qui concerne l'homme des lésions oculaires peuvent toutefois apparaître.

I.5.5.Effets électromagnétiques :

La foudre génère des ondes électromagnétiques à large spectre de fréquence (KHZ à MHZ) provoque des perturbations radiophoniques.

I.6.Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons regroupé les informations concernant les surtensions à travers ces informations il s'est avéré que les surtensions de foudre sont les plus dangereux, à cause de la fréquence très élevé.

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 calculées 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 [AGU87].

II.2. Equation 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.2.1. Modèle électrostatique de MAXWELL [COB85, AGU87] :

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 [SAB85] :

- 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 [SAB85]. D'où l'importance du calcul du champ électrique.

II.2.2. 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).

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

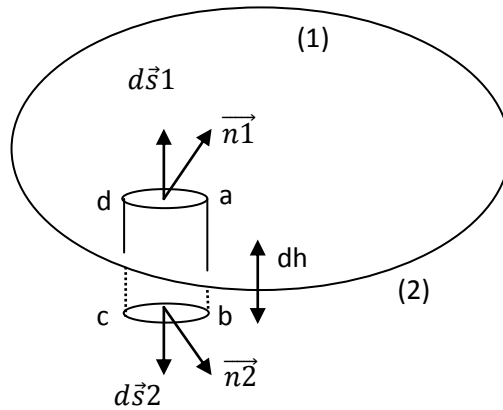


Figure. II.1. conditions de passage entre milieux différent.

D'autre de celle-ci. L'application du théorème de Gauss sur la surface de la cellule donne :

$$\oint_S \vec{D} \cdot \vec{n} \cdot ds = Q = \int \sigma ds \tag{II.6}$$

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 :

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

A la limite ou dh tend vers zéro. n_1 et n_3 sont normaux à l'interface entre les diélectriques, $n_1 = -n_2$.

$$(D_1 + D_2)n_1 = \sigma d \text{ où } D_{n1} - D_{n2} = \sigma \tag{II.8}$$

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 σ déposée à l'interface.

$$D_1 = D_2 \text{ à l'interface dépourvue de charge}$$

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

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

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 condition, l'intégrale précédent se réduit à :

$$\vec{E}_2 dl + \vec{E}_1 dl = 0 \quad (\text{II.9})$$

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

$$E_{t2} = E_{t1} \quad (\text{II.10})$$

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

II.2.3. Condition aux limites [COB85] :

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 :

$$\frac{\partial u}{\partial n} = K \quad (\text{Condition de Neumann}) \quad (\text{II.11})$$

Si ε peut être supposée constante cela simplifie le problème ; mais il est tout à fait possible de traiter les cas où ε dépend du champ électrique. L'équation (II.5) devient dans ce cas non linéaire et la loi de variation de ε devra être fournie pour le matériau concerné. Le cout de la solution est élevé, mais les problèmes techniques résolus sont plus proche du cas réel [SAB85].

II.3. Méthode numérique de résolution :

Les principaux modèles utilisables pour simuler le fonctionnement des dispositifs électrotechniques mettent en œuvre des équations aux dérivées partielles [COB85]. 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 [COB85, SIL91]. 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 [LAP]. Par contre la méthode, dite des éléments finis, est mieux adaptée à ce type de géométrie [COB85].

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.

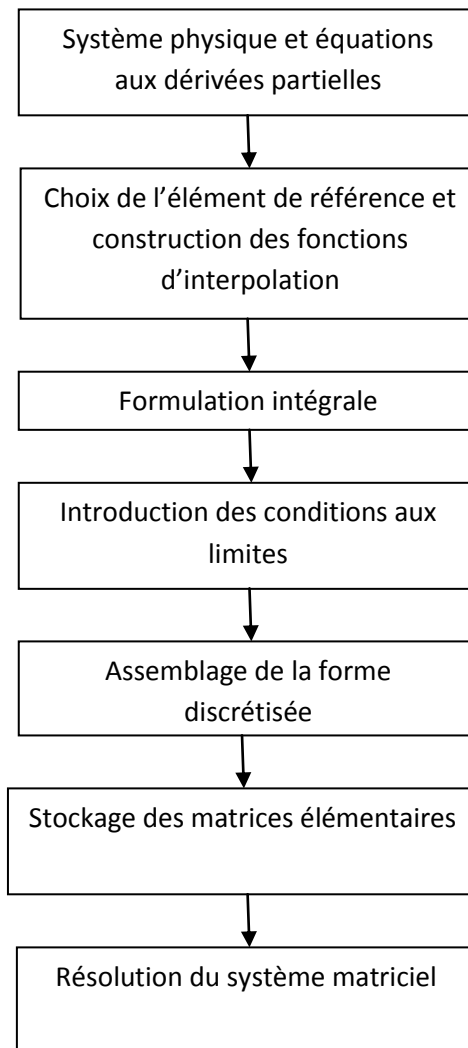
La méthode des intégrales de frontières consiste à ramener tout le domaine d'étude sur un contour. Cette méthode ne traite pas les problèmes non linéaires et elle obéit à beaucoup de singularités. Cette méthode peut être couplée à celle des éléments finis si l'on a des conditions aux limites particulières.

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 [AGU87]. La méthode utilisée dans notre travail est la méthode des éléments finis (MEF)

II.3.1. Méthode des éléments finis :

Le principe fondamental de la MEF réside dans le découpage du domaine d'étude en domaines élémentaires de dimensions finies. 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.



II.4. 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 approchées $u^e(x)$. 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 [SAB85].

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 $N_I(x)$ 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.4.1. Elément 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 $\mathfrak{J} \rightarrow x^e = X^e(\xi)$.

Les transformations \mathfrak{J}^e doivent être bijectives en différents points ξ situés V^e ou sa frontière [LAP], d'où l'utilisation des fonctions de transformation géométriques $\langle \overline{N(\xi)} \rangle$

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

$$y(\varepsilon) = \langle \overline{N(\xi)} \rangle \{y_n\} \tag{II.12}$$

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

Elle est définie comme suit :

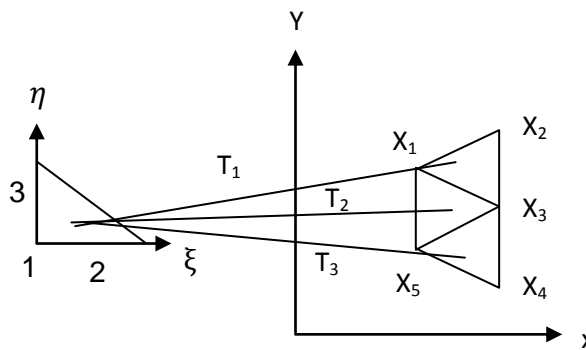


Figure. II.2 transformation des coordonnées des éléments réels en celles de l'élément de référence.

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \zeta} \end{bmatrix} [\{x_n\} \{y_n\} \{z_n\}] \tag{II.13}$$

Elle est le produit d'une matrice contenant les drivées en ξ, η, ζ . 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 :

$$x(\xi) = \langle N(\xi) \rangle \{X_n\}$$

$$u(\xi) = \langle N(\xi) \rangle \{u_n\} \quad (\text{II.14})$$

$\langle N(x) \rangle$: 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.4.2. 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 :

$$u(\xi) = \langle p_i(\xi_i) \rangle \begin{Bmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{Bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

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 ξ désignés.

II.4.3. Transformation des operateurs de dérivation :

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

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

$$\{\partial_x\} = [j]^{-1} \{\partial_\xi\} \quad (\text{II.16})$$

$$\langle x \ y \ z \rangle = \langle \overline{N(\xi)} \rangle [\{x_n\} \{y_n\} \{z_n\}] \quad (\text{II.22})$$

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

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

En dérivant la relation (II.22) on obtient $[J]$ avec :

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

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 :

$$\int_{v^e} f(x) dx dy dz = \int_{v^r} f(x(\xi)) \det(j) d\xi d\eta d\zeta \quad (\text{II.24})$$

II.4.4. Formulation intégrale :

II.4.4.1. Méthodes des résidus pondères :

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

$$\mathcal{L}(u) + f_v = 0 \text{ sur } V \quad (\text{II.18})$$

Les conditions aux limites sont :

$$\mathcal{G}(u) = f_s \text{ sur } S \quad (\text{II.26})$$

U constitue une solution du problème si elle satisfait (II.25) et (II.26) en même temps.

Nous appelons résidus la quantité $R(u)$

$$R(u) = \mathcal{L}(u) + f_v \quad (\text{II.19})$$

Qui s'annule quand u est la solution exacte de (II.25)

$\mathcal{G}\mathcal{L}$, 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.27)

$$\begin{aligned} w(u) &= \int_v \langle \Psi \rangle \{R(u)\} dv \\ &= \int_v \langle \Psi \rangle \{\mathcal{L}(u) + f_v\} dv \quad (\text{II.20}) \end{aligned}$$

$\langle \Psi \rangle$: 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.26). [COB85, LAP].
- **Choix des fonctions de pondération** : selon le choix de la fonction de pondération, l'équation (II.28) conduit à différentes méthodes parmi lesquelles on cite [LAP] :
 - 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 :

$$w = \int_v \{N\} (\{N\} \{U_n\} + f_v) dv = 0 \quad (\text{II.21})$$

L'intégration par partie donne :

$$w(u) = \int_v \{N\} \{N\} \{U_n\} dv + \int_v \{N\} f_v dv + \int_{s_f} \{N\} f_s ds = 0 \quad (\text{II.22})$$

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.4.4.2. 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 [SAB85]

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 [COB85].

II .5.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 expérimentale [BOU91]

Les essais et les mesures présentés dans ce travail ont été réalisés au Laboratoire de Haute Tension de l'École 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. Module expérimentale

III.2.1. Module expérimentale 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.

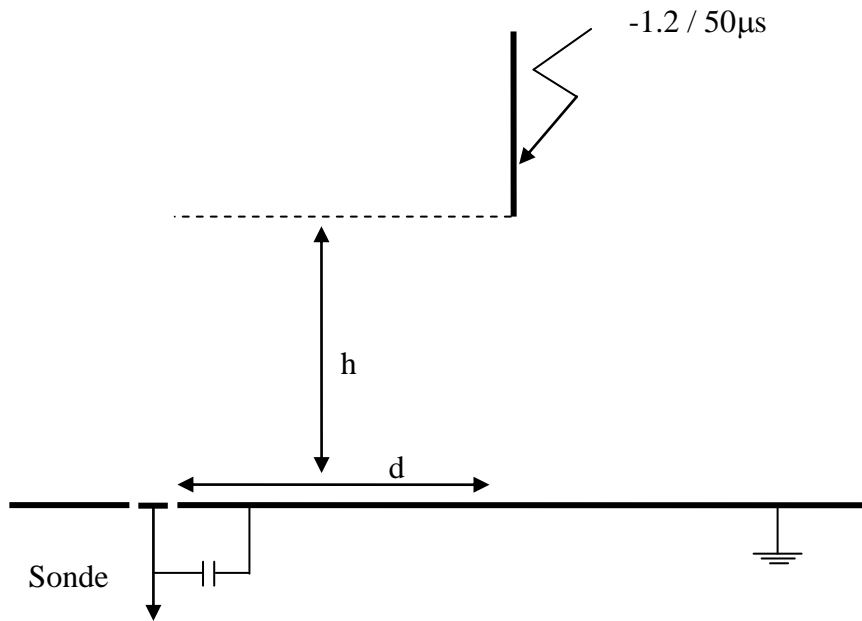


Figure III.1 Modèle expérimental avec terre homogène.

III.2.2. Module expérimentale avec terre homogène 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° 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.

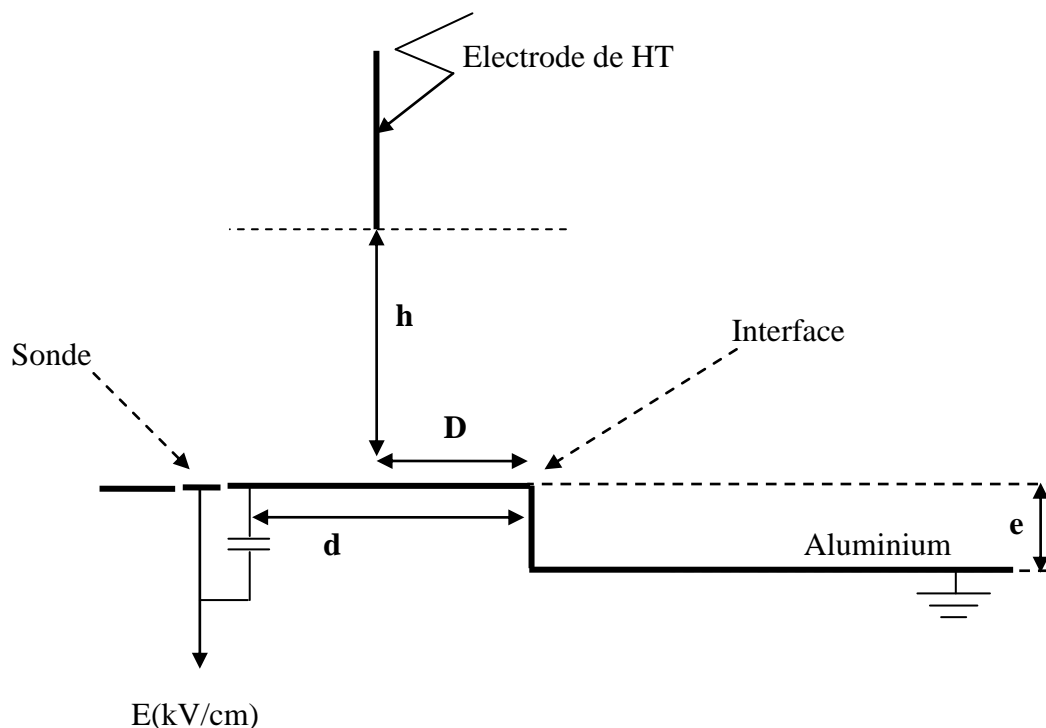


Figure III.2 Module expérimentale de terre discontinue en présence de la sonde à capacité répartie.

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 même 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 $e = 10$ 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 module 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^{er} cas : La sonde balayée tout le plan

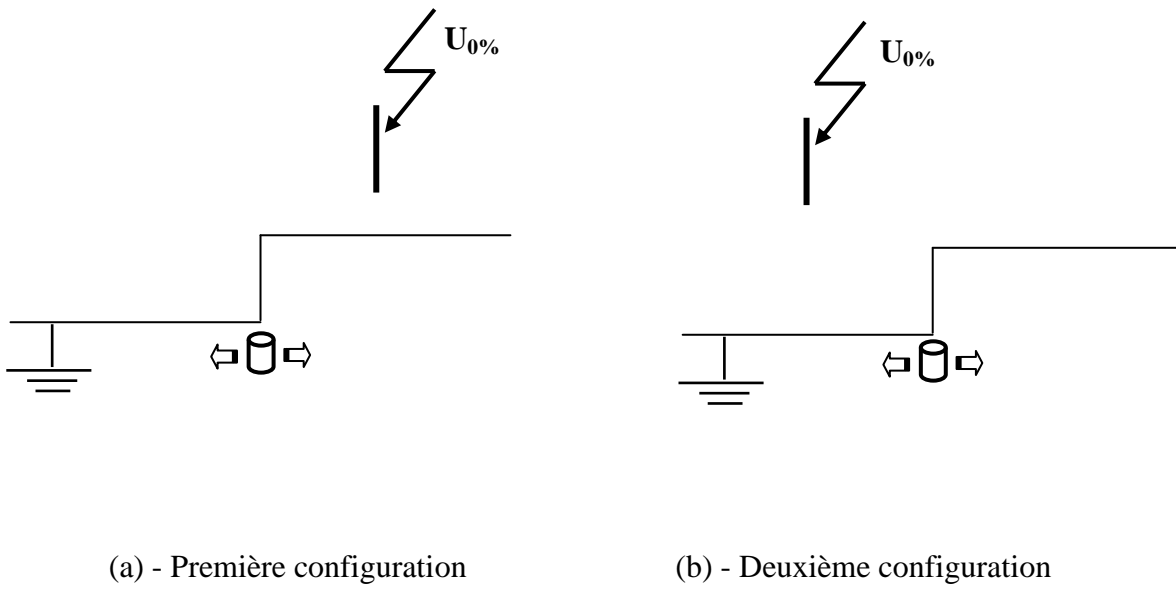
a - Première configuration : la tige HT située au-dessus de la partie haute de la terre discontinue.

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

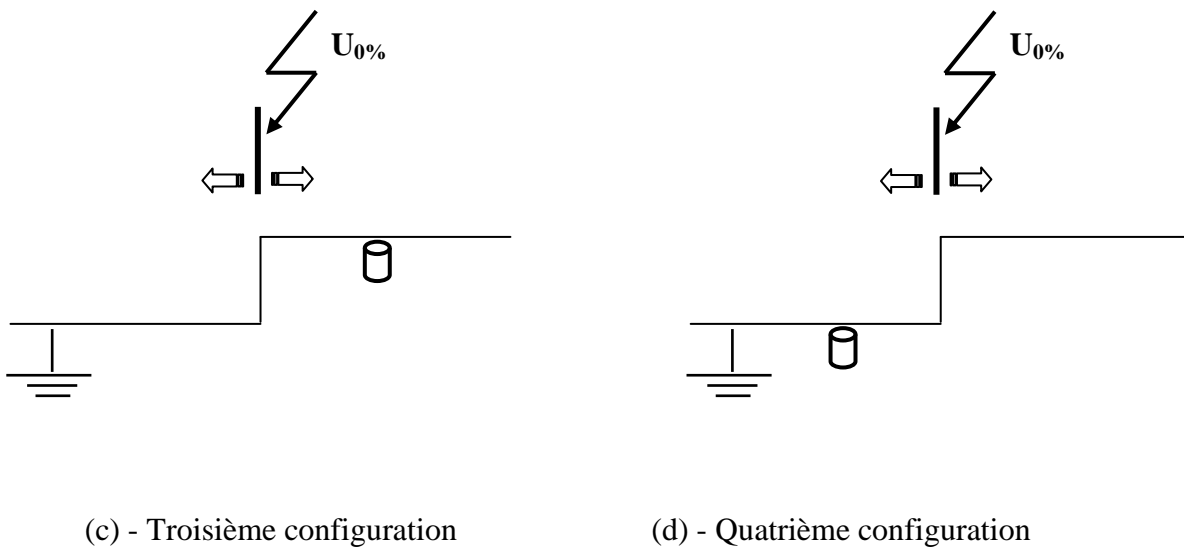
2^{ème} cas : La tige sous tension TH balayé tout le plan

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 module expérimentale 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 variation,

- 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 balayé 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.

À 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 discontinu, 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.

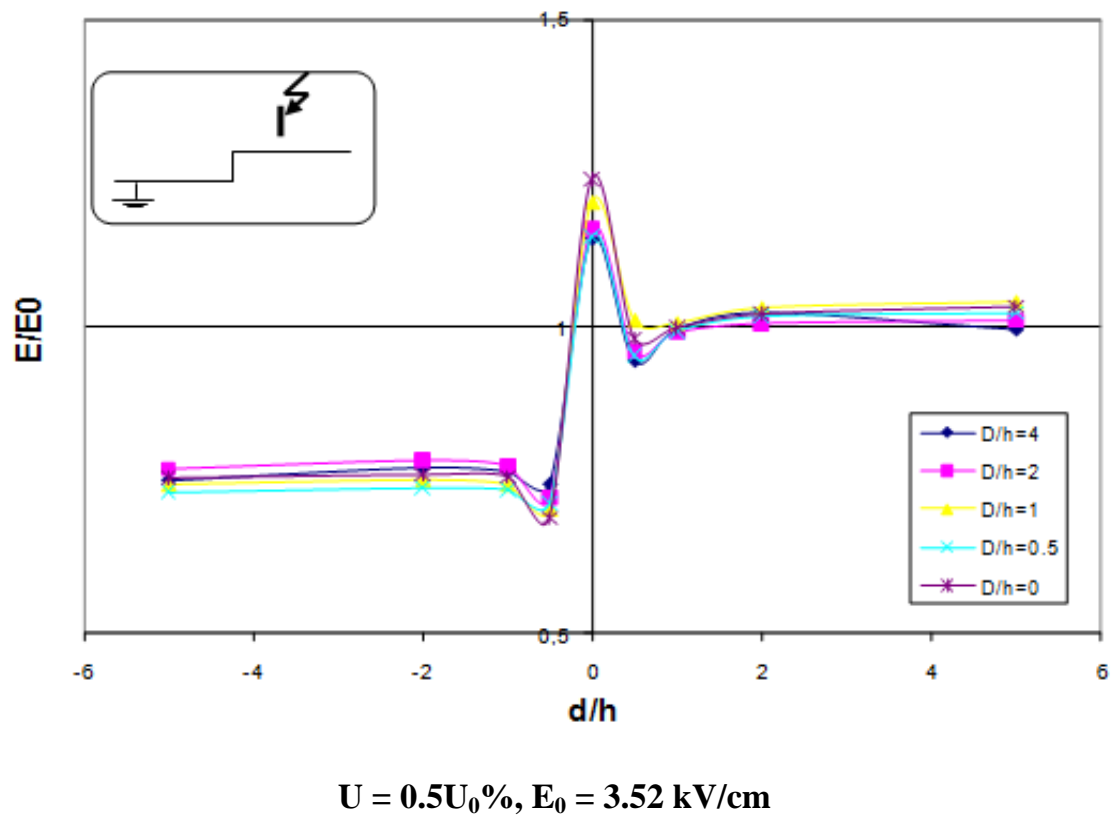
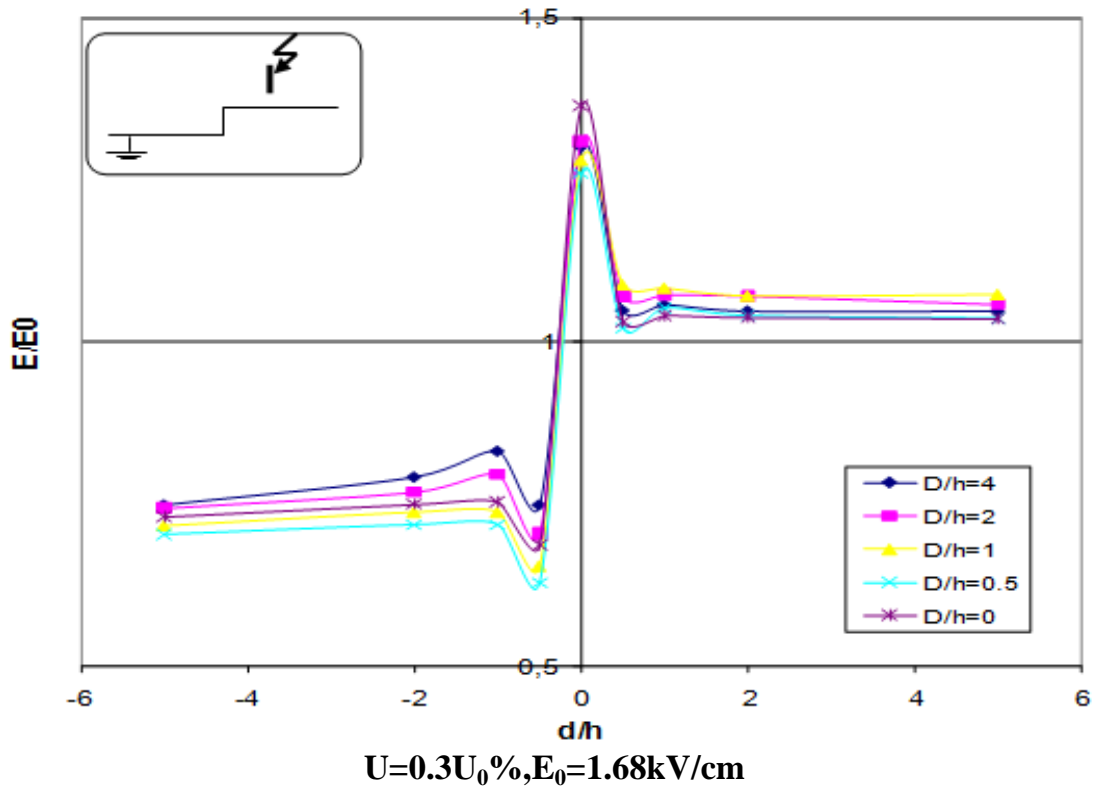
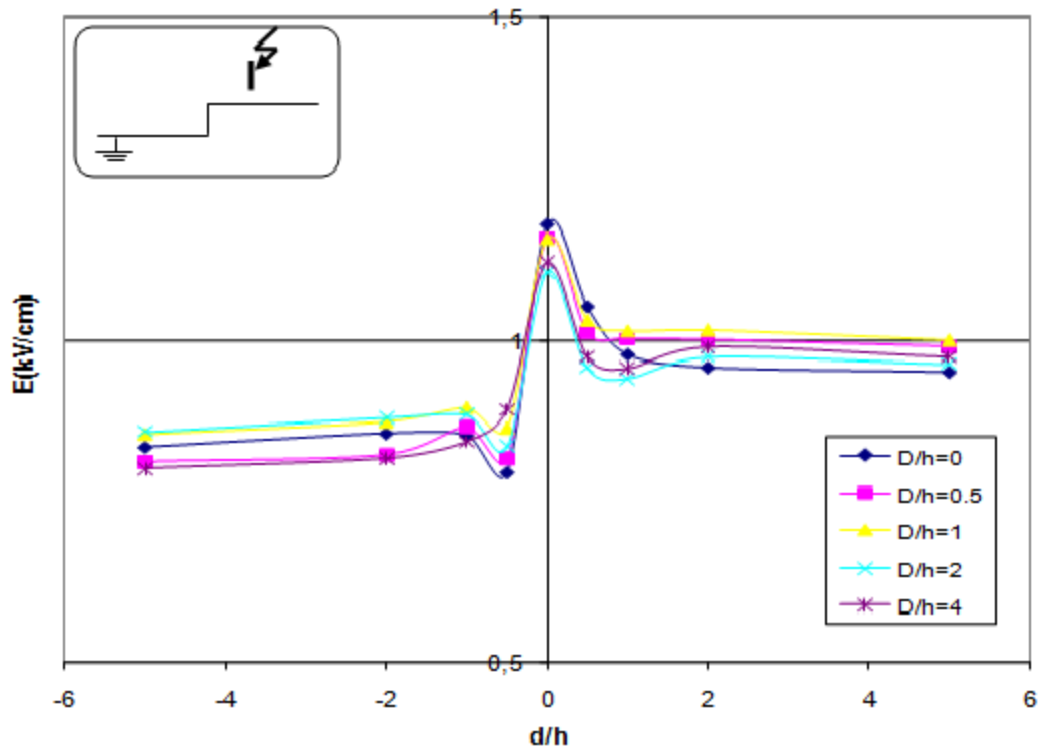
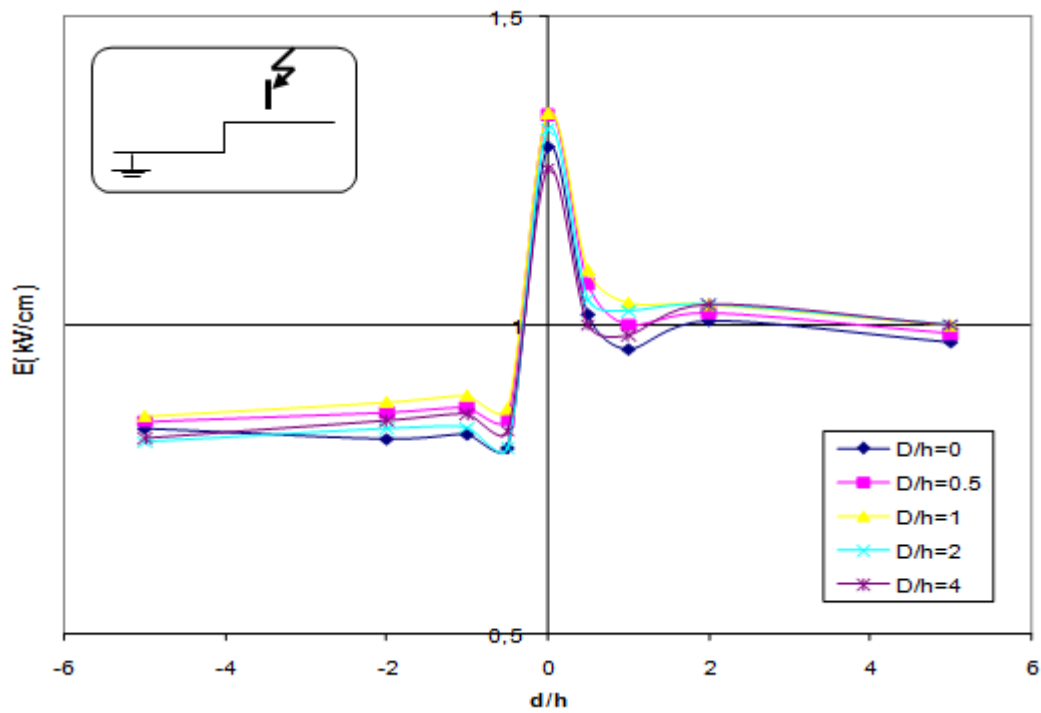


Figure III.4 Champ électrique en fonction de position de la sonde (d/h)
Avec $h=8\text{cm}$.



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



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

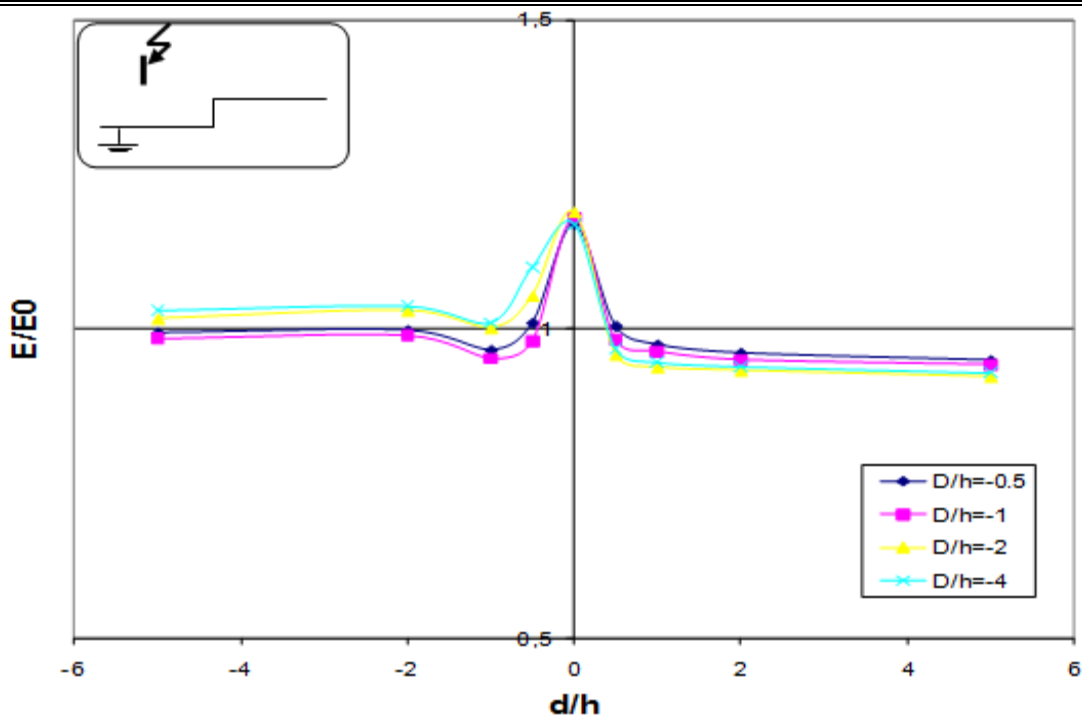
Figure III.5 Champ électrique en fonction de position de la sonde (d/h)
Avec $h=16\text{cm}$.

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

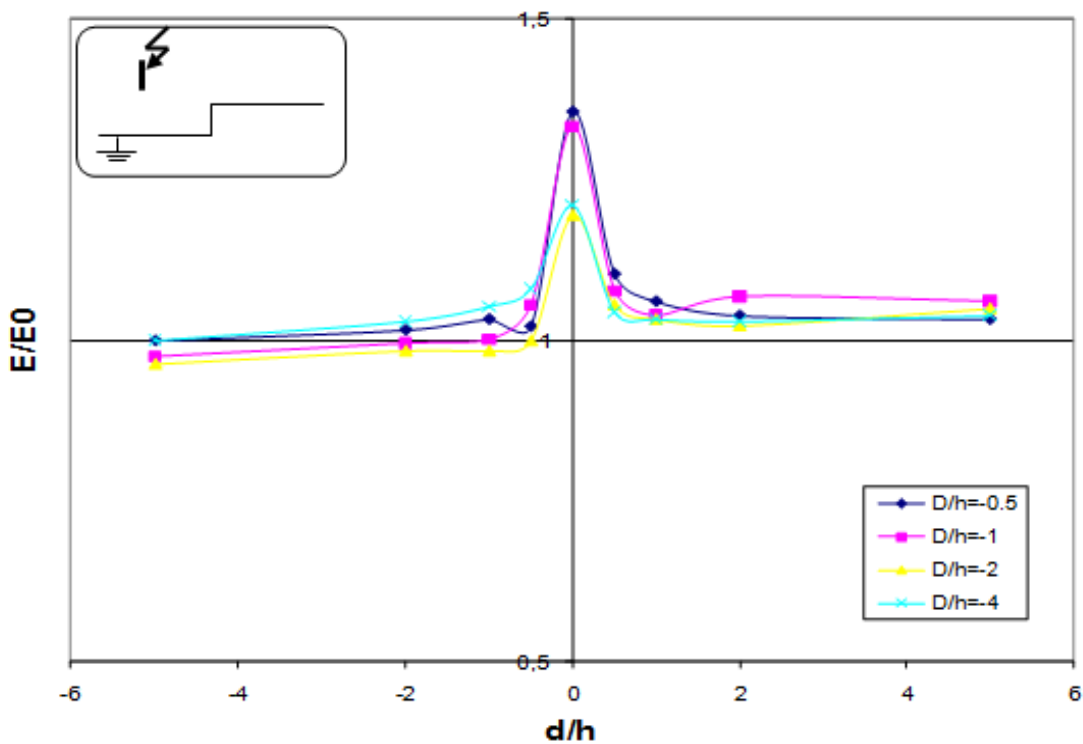
Les figures III.6, III.7 montrent que, sur la partie basse de la terre discontinue, plus la sonde s'approche de l'interface ($d/h < 1$), plus l'intensité du champ devient importante par rapport à celle obtenue pour un sol homogène bon conducteur, Cette constatation a été vérifiée pour un rapport d/h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



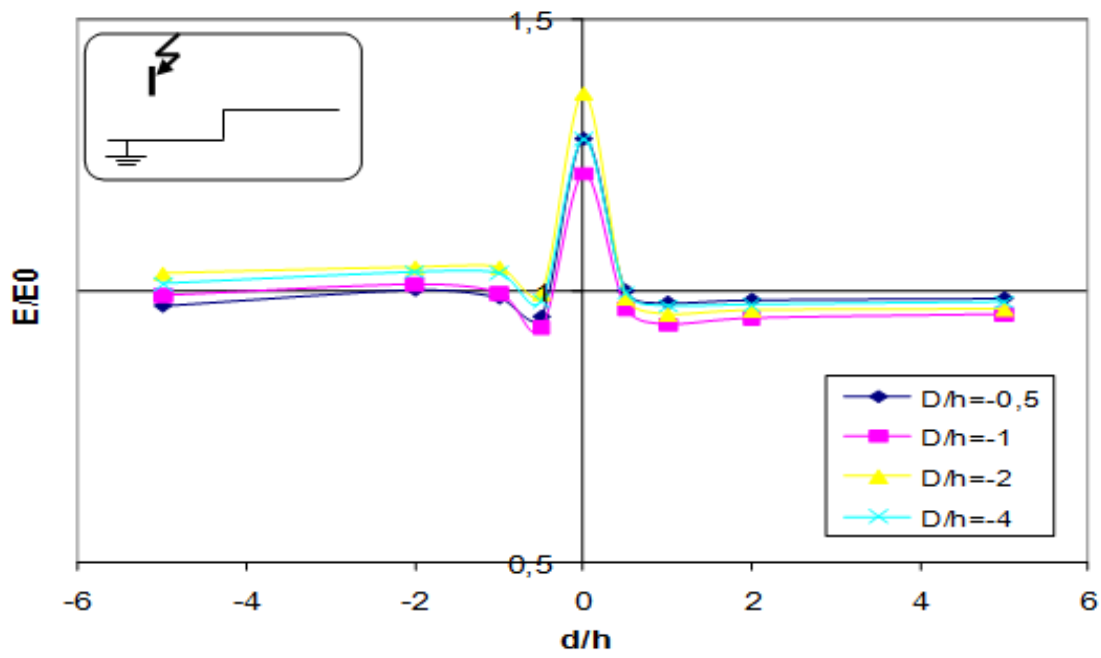
$U = 0.3U_0\%$, $E_0 = 1 \text{ kV/cm}$



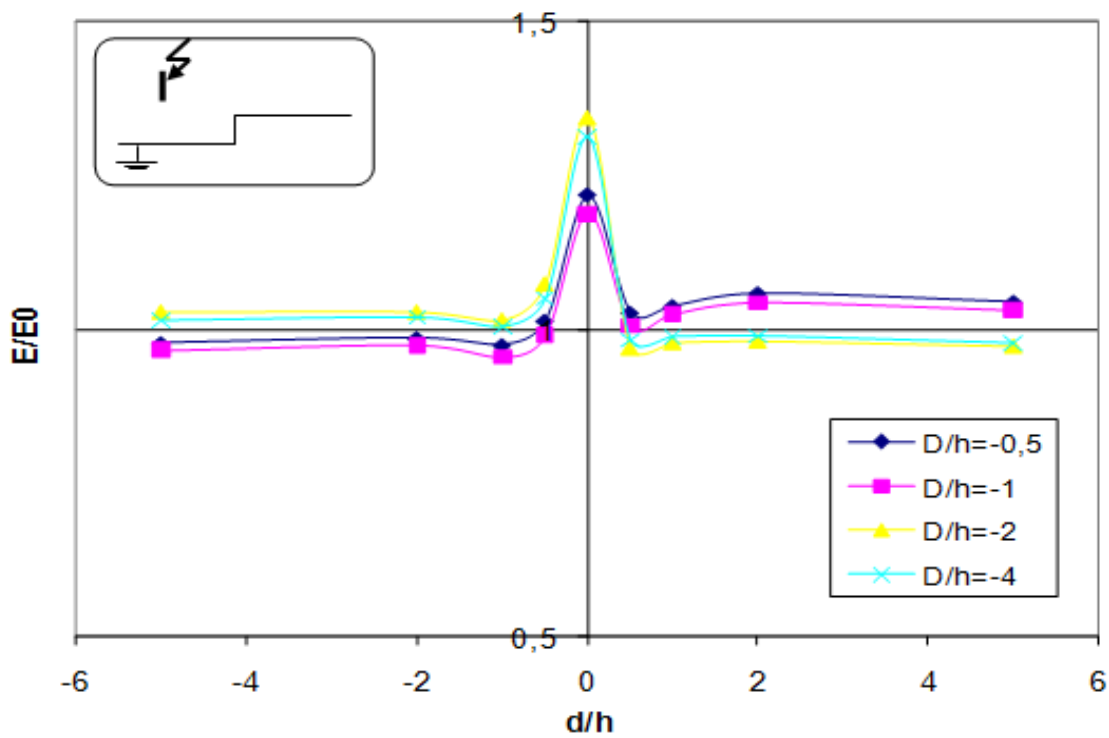
$U = 0.5U_0\%$, $E_0 = 2.75 \text{ kV/cm}$

Figure III.6 Champ électrique en fonction de position de la sonde (d/h)

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



$U=0.3U_0\%, E_0=2.45\text{kV/cm}$



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

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 distingué par la position de la sonde sur la partie haute ou basse de la terre discontinu.

La procédure de mesure, est de fixer certains points de mesure sur les deux parties de la terre discontinu, 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 discontinu, la tige balayé tout le plan.

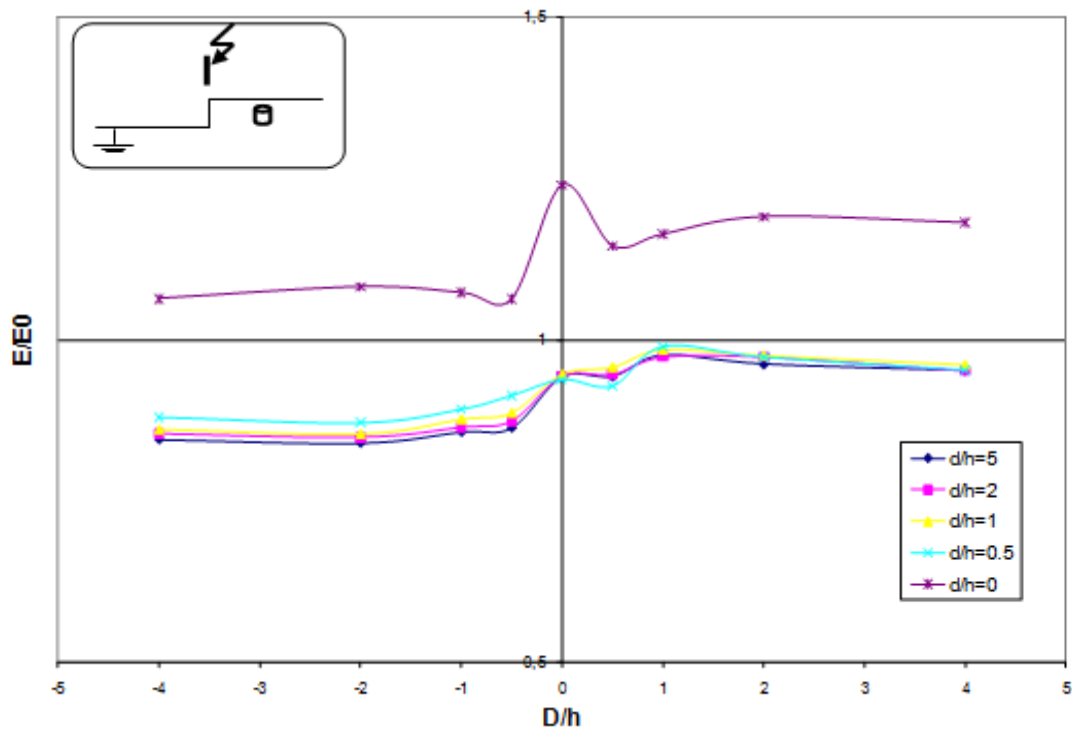
D'après les figures III.8, III.9, nous constatons que, la distribution du champ électrique se comporte comme un système homogène, cela pour les grandes positions de la tige ($D/h=5,2$). L'évolution du champ au sol, pour les points de mesure réalisé, suit le même comportement. En suite le champ se renforce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

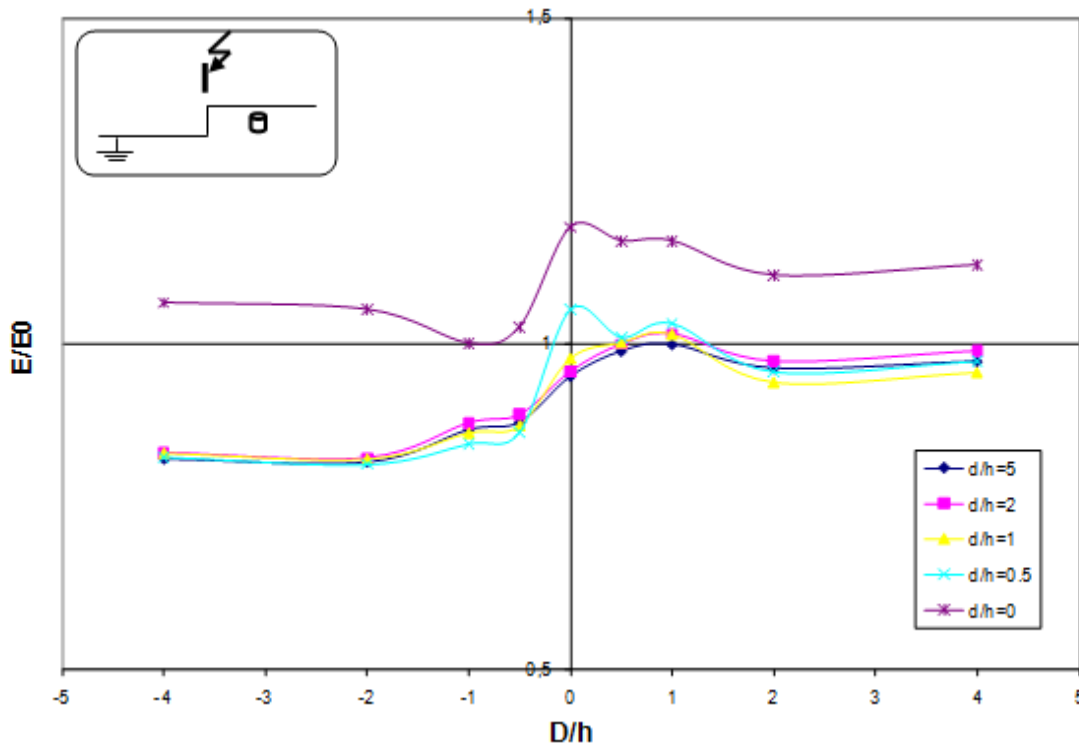
Nous constatons que, si l'interface est situé entre le point de mesure (partie haute), et la tige HT (partie basse), le champ au partie basse de plan diminue à cause de l'effet d'attraction de l'interface sur les lignes du champ.

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 discontinu, 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 $h= 8\text{cm}$.

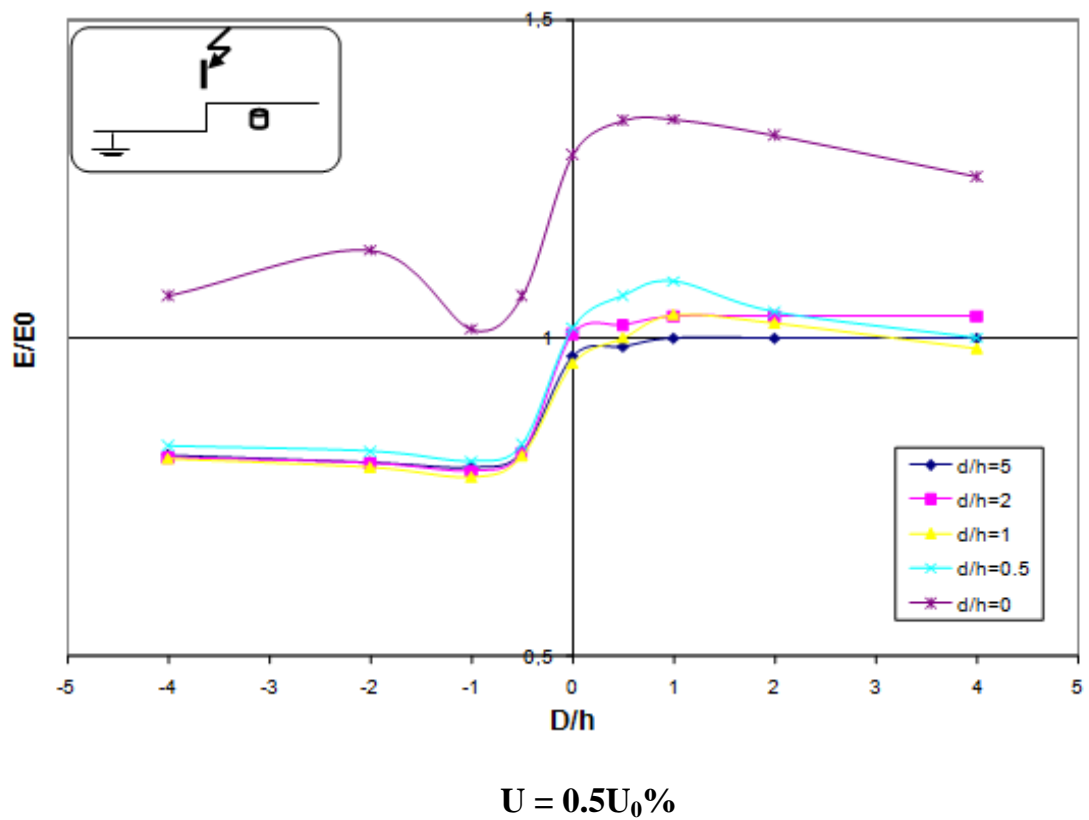
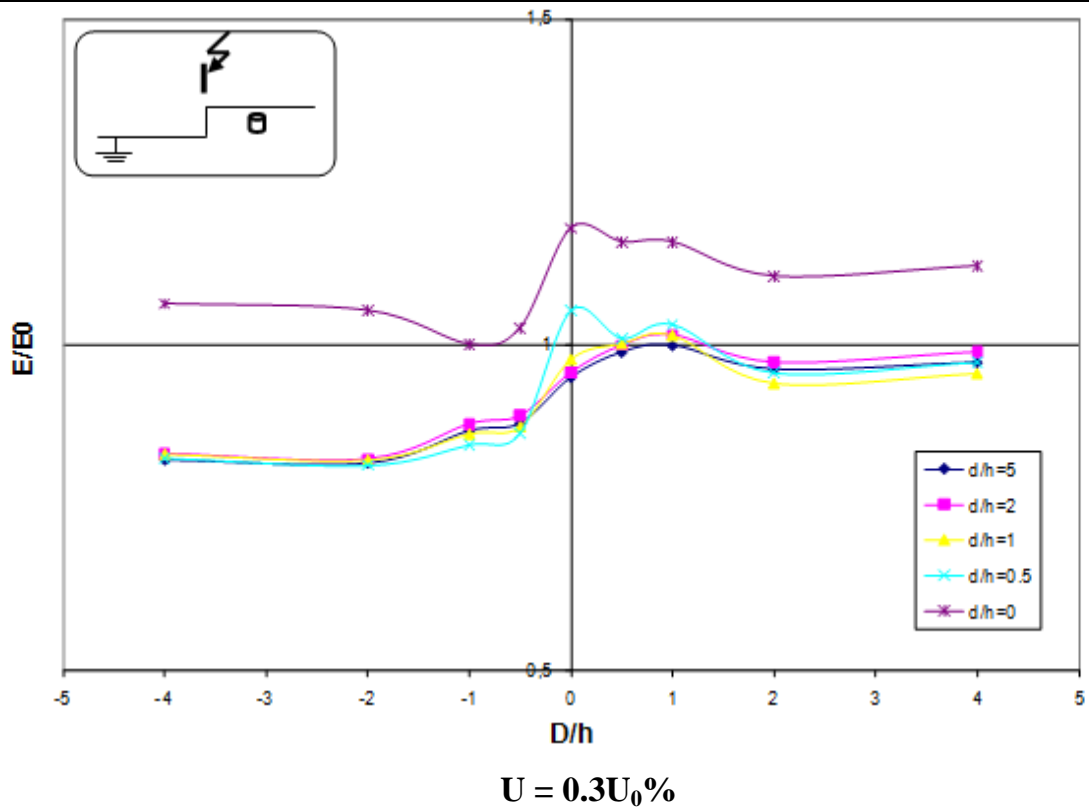


Figure III.9 Champ électrique en fonction de position de la tige (D/h)

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

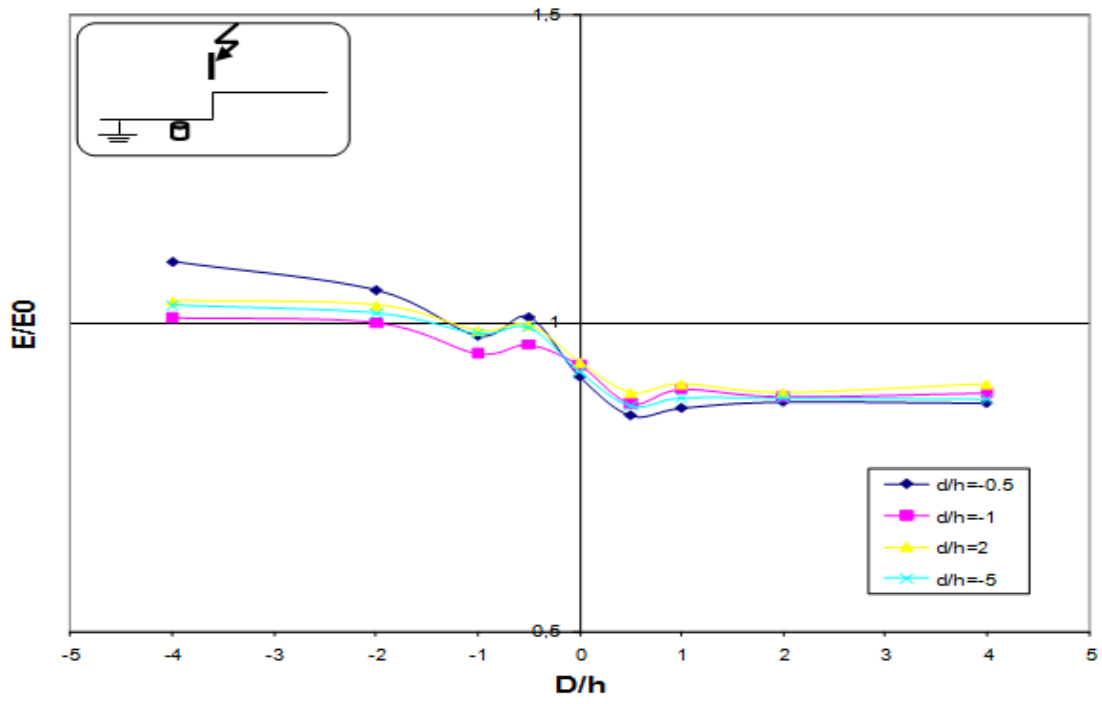
La quatrième configuration : La sonde au-dessous de la partie basse de terre discontinue, la tige balayé tout le plan

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.

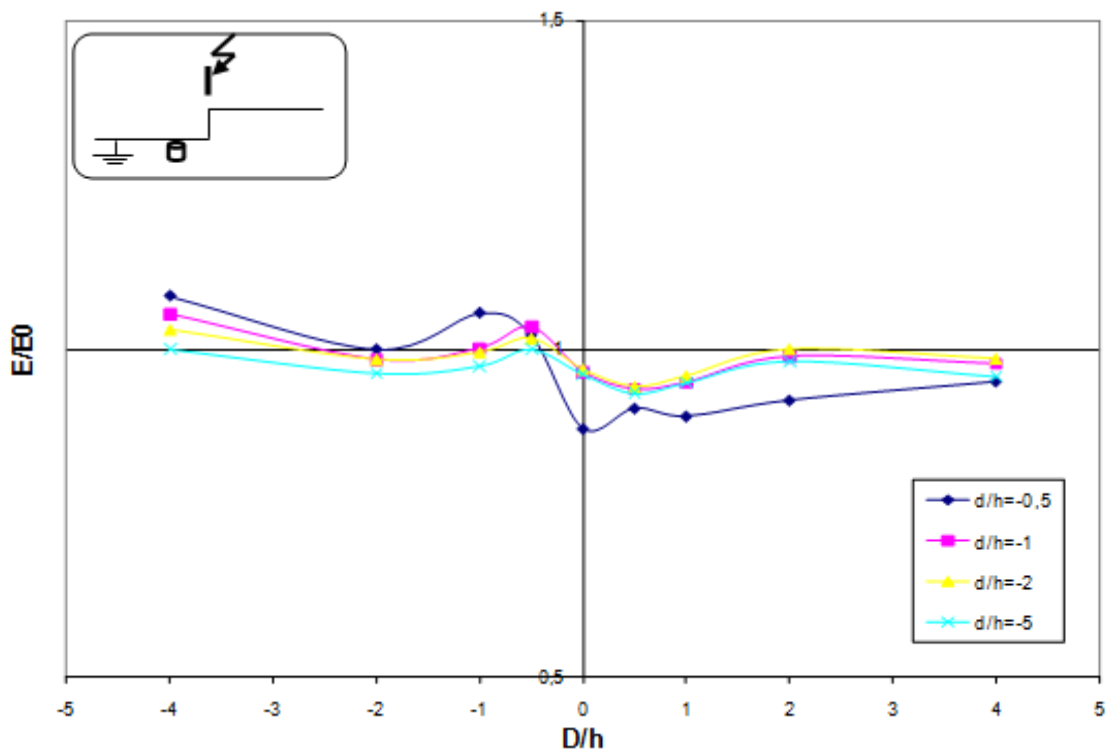
Le champ mesuré diminue, au fur et à mesure que, la tige se rapproche de l'interface. Cette tendance est dû à l'effet d'attraction des lignes du champ vers l'interface, ainsi que, la distance tige-interface, quel est petite par rapport à la distance tige-plan (partie basse).

Pour la figure III.11, qui illustre la variation d'intensité du champ en fonction de distance (D), pour l'intervalle d'air ($h=16cm$). 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.



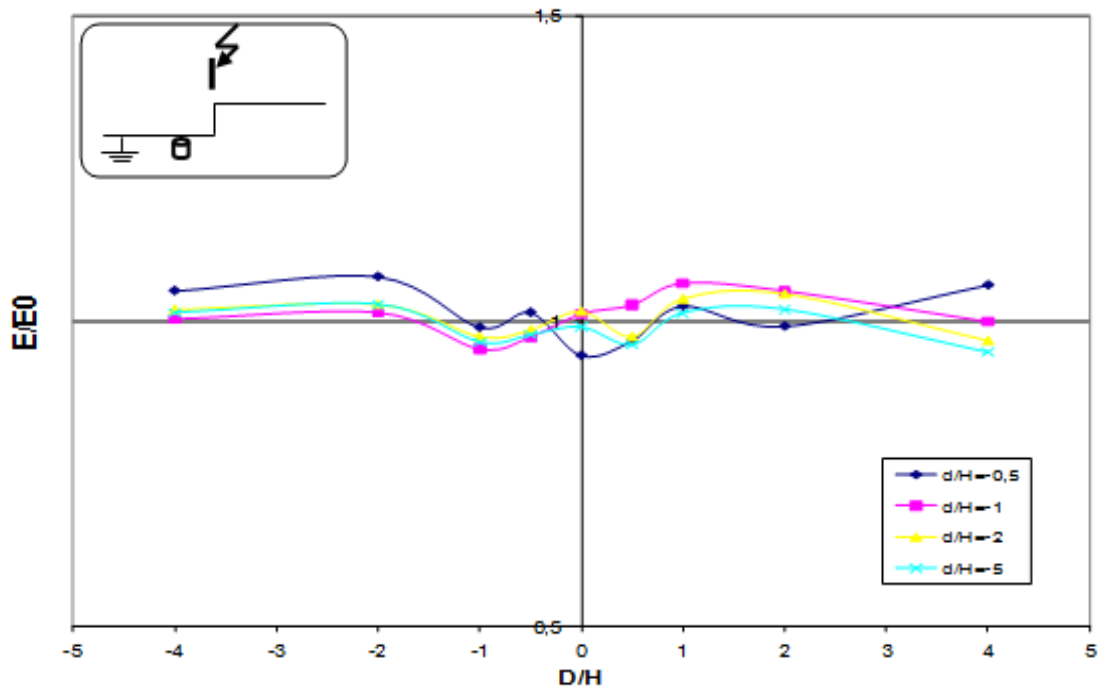
$U = 0.3U_0\%$



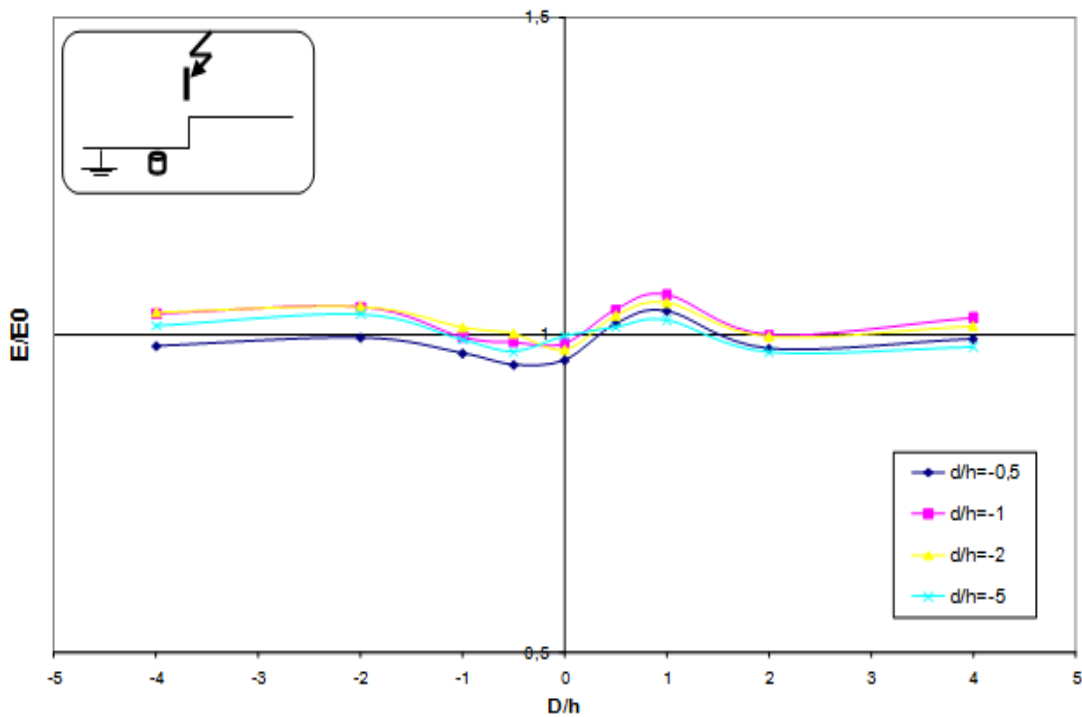
$U = 0.5U_0\%$

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 information 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 Multiphasiques 3.5

À propos de COMSOL Multiphasiques

COMSOL Multiphasiques 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 multiphasiques 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 parla 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 Multiphasiques puis compile en interne un ensemble d'équations aux dérivées partielles représentant l'ensemble du modèle. Vous pouvez accéder à la puissance de COMSOL Multiphasiques 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 Multiphasiques® 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 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 champs électrostatiques, des champs magnétostatiques, et les champs quasi-statique. Les modes d'application (interfaces de modélisation) inclus ici sont entièrement multi-physique permis les équations sous-jacentes de l'électromagnétisme sont automatiquement disponibles dans tous les modes d'application de la-une caractéristique unique à COMSOL Multiphasiques. Cela rend également la modélisation on standard facile ment accessible [COMG]

IV.2. Cas de terre homogène

IV.2.1. Distribution du champ en fonction de position de la tige

Afin d'obtenir une référence pour la comparaison des résultats du système homogène et hétérogène, nous voulons déterminer la distribution du champ dans le cas du système homogène, en fonction de position de la tige haute tension avec l'application de tension U_0

D'après la Figure IV.1. Nous constatons que, l'intensité du champ électrique tend vers une valeur constante,

Sous dessus de la tige, l'intensité du champ augmente légèrement et prend la valeur maximale, Ce qui est dû au phénomène de charge d'espace, malgré que cette notion ne soit pas encore maîtrisée par un modèle mathématique qui estime ces charges.

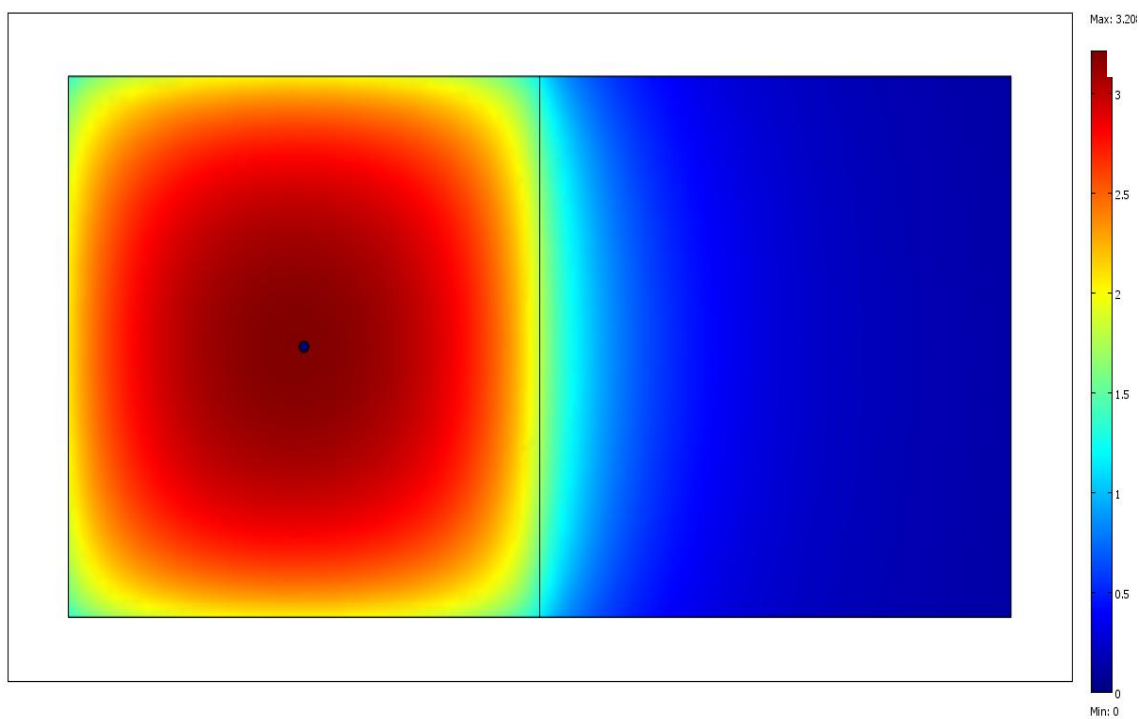
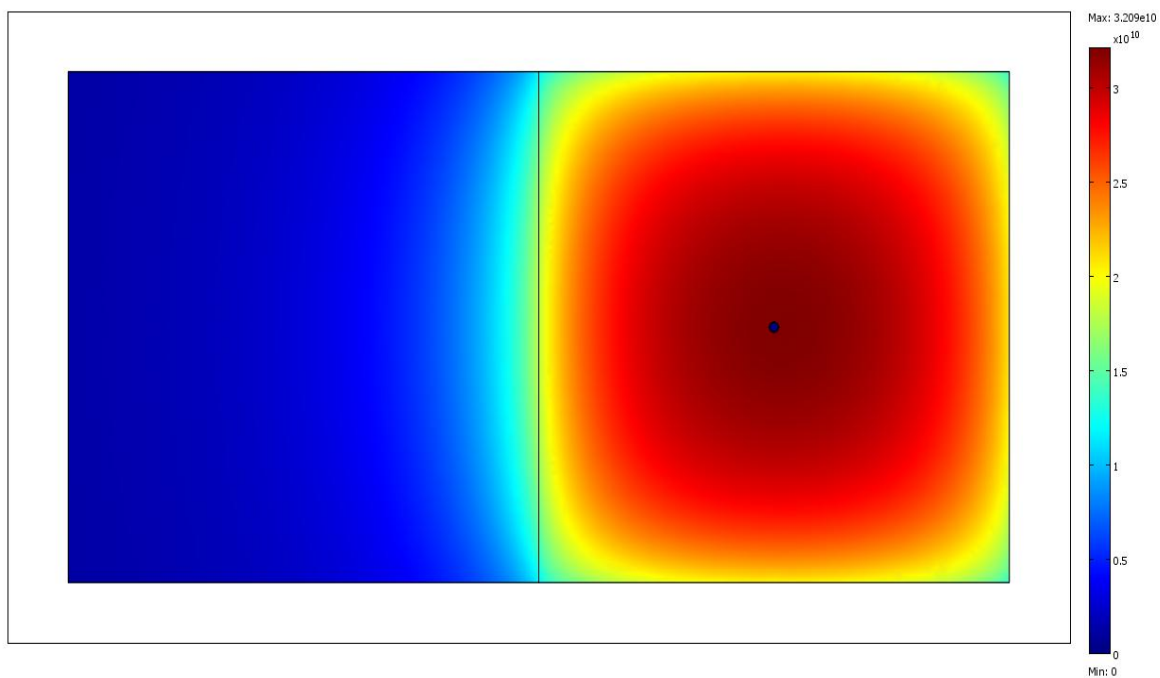


Figure IV.1. Champ électrique calculé au sol pour deux positions de la tige avec $h=8\text{cm}$

IV.3. Distribution du champ selon de position de la tige HT

Nous avons regroupé les résultats, pour ce paramètre (changement de « D » et « h »), avec les deux premières configurations possible (la tige HT située au-dessus de la partie haute de la terre discontinue et la tige HT située au-dessus de la partie basse de la terre discontinue), qui correspondent aux deux positions de la tige avec le calcul de le champs électrique sur tout le plan.

IV.3.1. La première configuration: la tige au dessus de la partie haute de la terre discontinue

Pour le niveau de la tension appliquée $U_{0\%}$, les figures IV.2 et IV.3, l'intensité du champ calculée sur la partie haute de la terre discontinue est supérieure à celle du système homogène. Nous comparons 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 ($D=0$), dans les résultats obtenus le champ électrique est plus forte celle-ci devient supérieure 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.

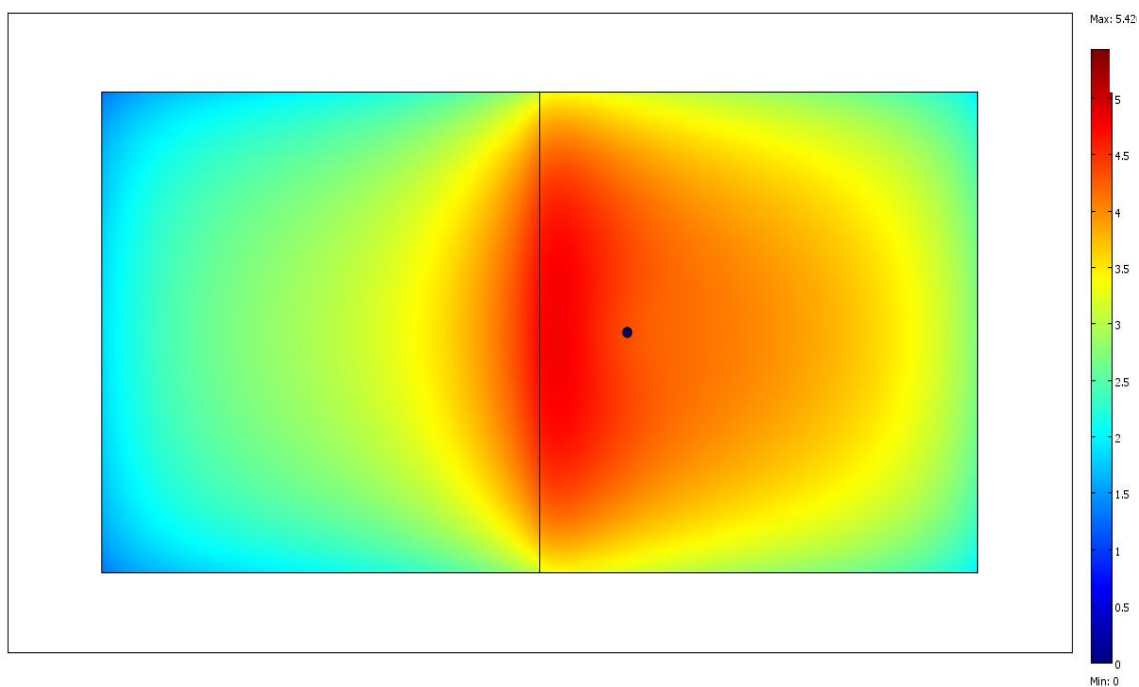
A cause de l'intensité de champ plus importante dans l'intervalle tige-tige, le champ s'accroît sur l'interface d'une valeur très élevée par rapport les autres points du plan discontinu.

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

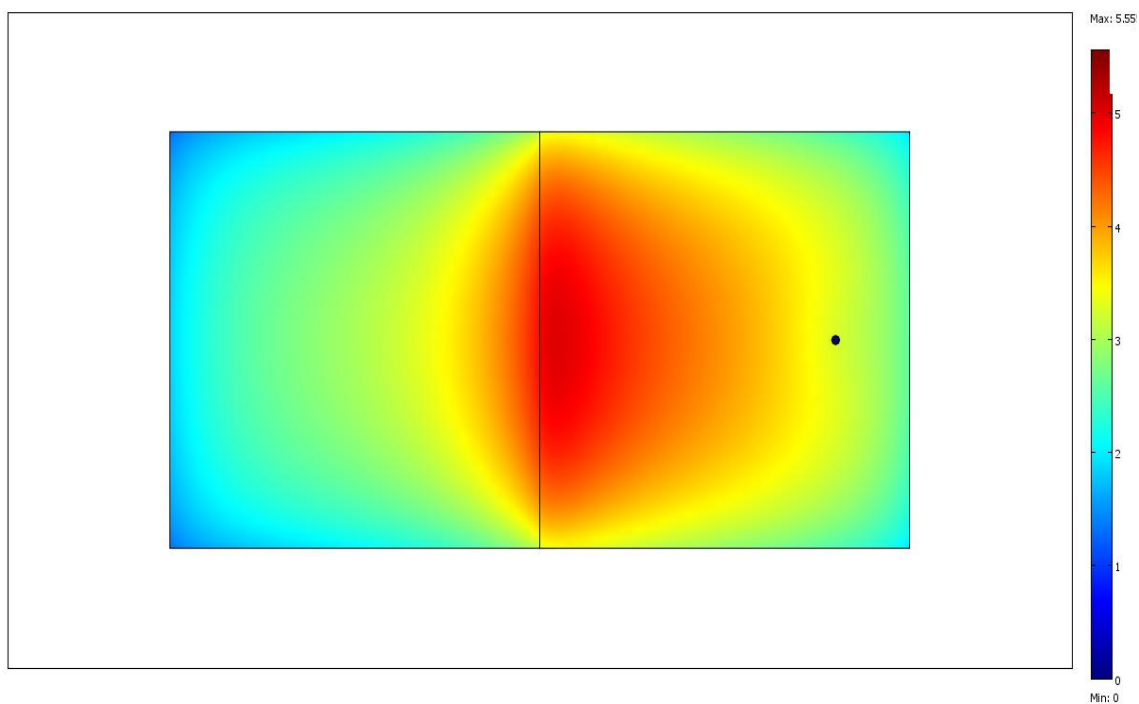
En ce qui concerne, le champ sur la partie basse de la terre discontinue, de même configuration (la tige au dessus de la partie haute), les résultats montrent que, l'intensité du champ diminue, et tend vers un niveau inférieur au niveau des valeurs du champ sur la partie haute. Cela dû à l'élévation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

Au voisinage de la distribution du champ électrique sur la 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

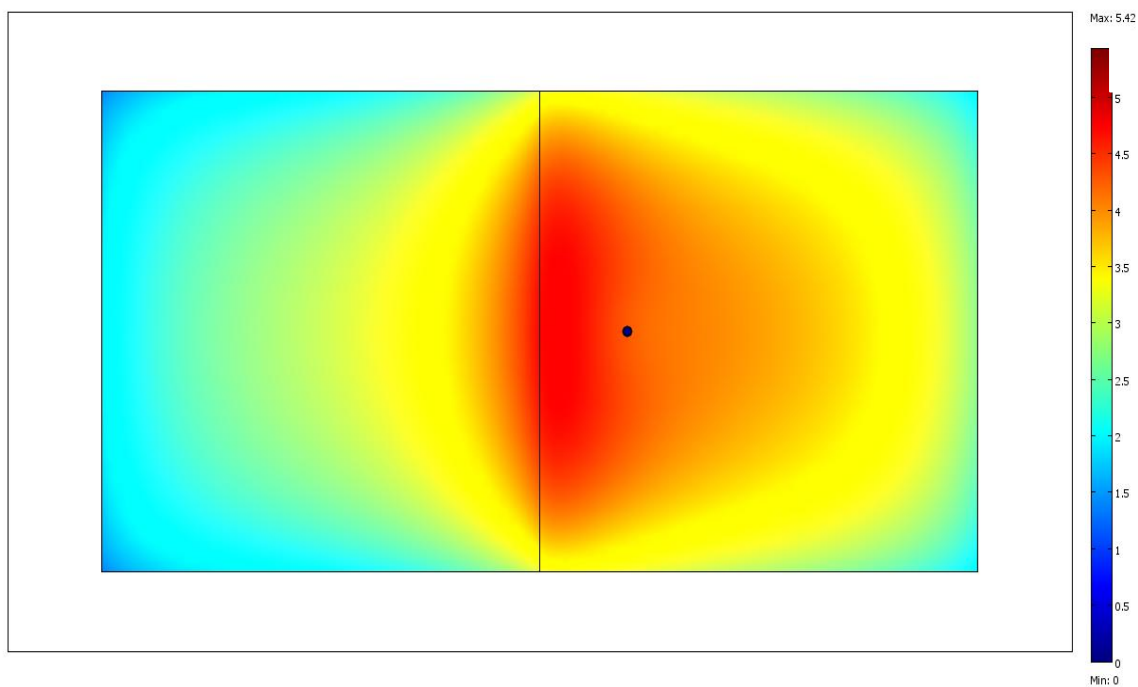


D=20cm

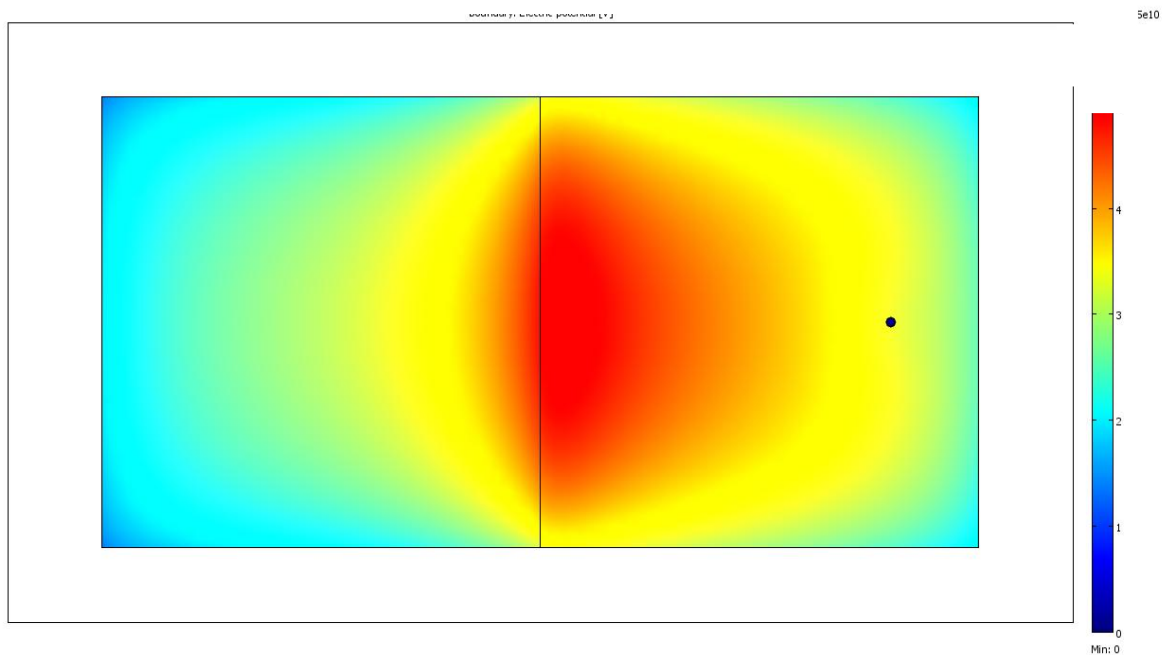


D=80cm

Figure IV.2. Champ électrique en fonction de position de la tige -partie haut (D)-
Avec h=8cm.



D=20cm



D=80cm

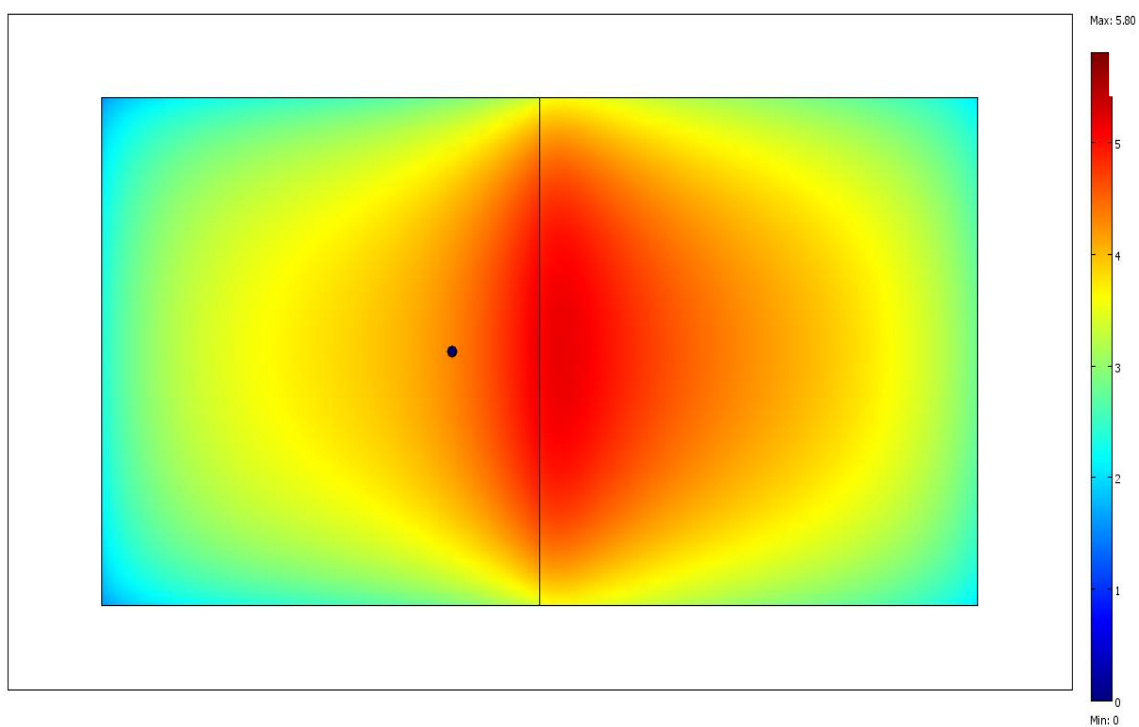
Figure IV.3. Champ électrique en fonction de position de la tige -partie haut (D)-
Avec h=16cm.

IV.3.2. La deuxième configuration : la tige au dessus de la partie basse de la terre discontinue

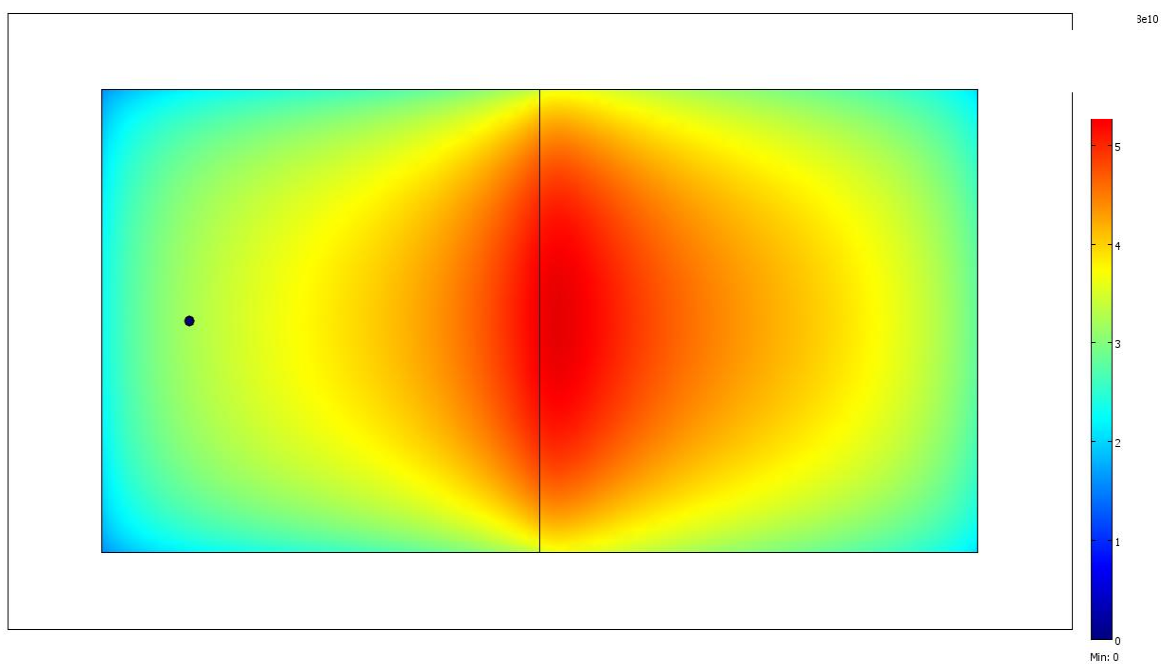
Les figures IV.4 et IV.5, montrent que, sur la partie basse de la terre discontinue (changement de « D » et « h »), plus l'intensité du champ devient importante par rapport à celle obtenue pour un sol homogène bon conducteur, Cette constatation a été vérifiée pour le déplacement de la tige

Au voisinage de l'interface, la valeur du champ calculée 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 (partie basse), 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).

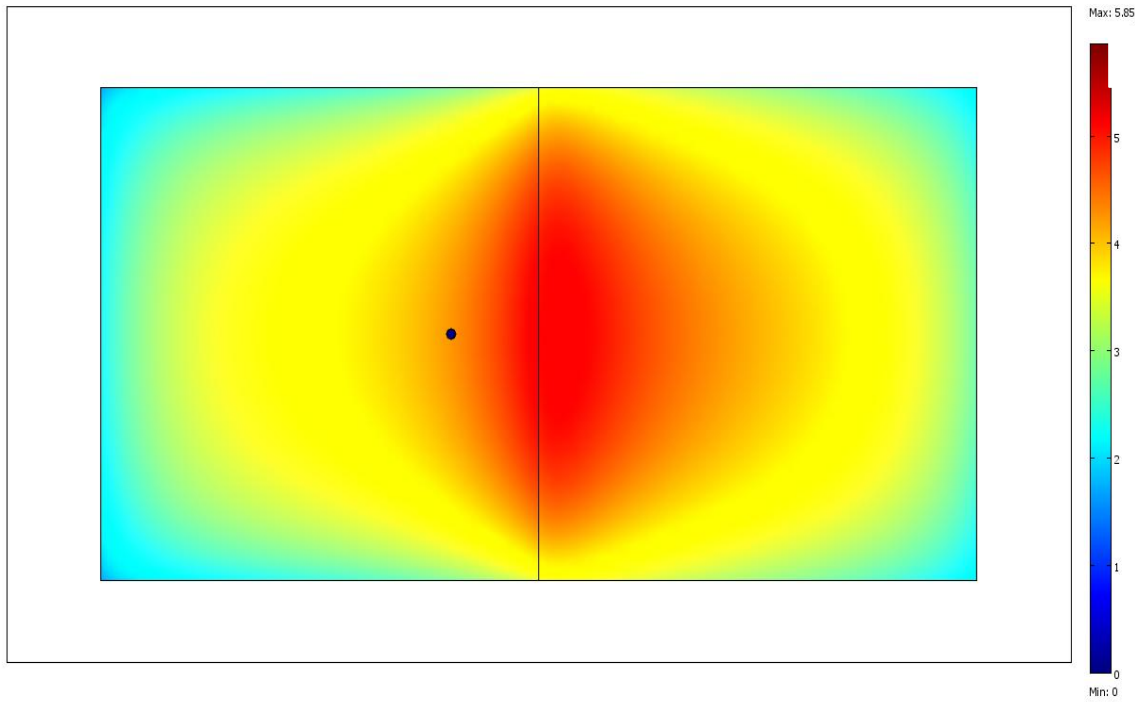


D=20cm

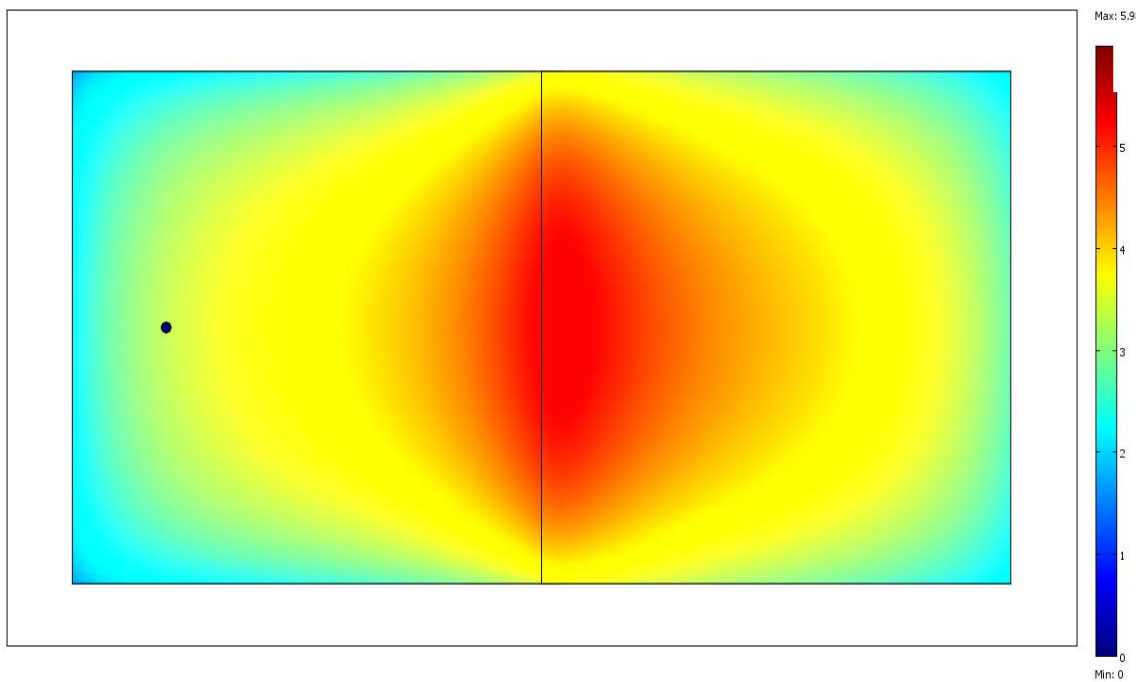


D=80cm

Figure IV.4. Champ électrique en fonction de position de la tige -partie basse (D)-
Avec $h=8\text{cm}$.



D=20cm



D=20cm

Figure IV.5. Champ électrique en fonction de position de la tige -partie basse(D)-
Avec h=16cm.

IV.4. Conclusion

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 système pointe-pointe est moins rigide que le système 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 garantit l'absence de décharge disruptive dans l'intervalle tige-plan.

CONCLUSION GENERALE

Les progrès importants peut 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.

[BOU91]

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 module que nous avons réalisé, est incorporé 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. que diminu, et 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 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 la logicielle.

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 (Aluminium + sable).
- En utilisant un modèle numérique avec terre discontinue de différentes profondeurs de l'interface.

Bibliographie

- [1] Rahim Zineb, Gatt Siham, « calcule du champ magnétique généré par un coup de foudre », Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en électrotechnique, université Mohamed Kheider –Biskra- juin 2008.
- [2] Christian Bouquegneau, « doit-on craindre la foudre ? », EDP sciences 2006, Imprimé en France.
- [3] Ahmed Boubakeur, « détermination de la zone d'attraction d'un paratonnerre (TP de HT) », École Nationale Polytechnique, Laboratoire de haute tension, Avenue Pasteur, Hacen Badi, B.P.182, El-Harrach, Alger.
- [4] Lassoued Issa, Slimani Soufiane, « l'étude de la foudre », Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de ingénieur d'état en électrotechnique, Université Mohamed Kheider -Biskra- juin 2006.
- [5] Christophe Séraudie, « surtensions et parafoudre en BT-coordination de l'isolement en BT », Cahier Technique Merlin Gerin n° 179, septembre 1995, valence DTE-09-95-3500-Imprimeur : CLERC.
- [6] Benoit de Metz-Noblat, « la foudre et les installations électriques HT », Technique Merlin Gerin, juillet 1993, Illustration Technique Lyon-DTE-07/93/ 3500- Imprimeur : Léostic.
- [7] Alain Rousseau, Claude Gary, Gérard Berger, « la foudre et protection des bâtiments », Techniques de l'Ingénieur, Centre Français.
- [AGU87] M .Aguet, « Haute Tension », Vol. XXII, Presses Polytechniques Romandes, 1987.
- [COB85] J.Coulomb et J.C.Sabonnadiere, 'C.A.O en électrotechnique', Hermès, 1985.
- [SAB85] J.L.Coulomb et J.C.Sabonnadiere, 'C.A.O en éléments finis en électrotechnique', Hermès, 1985.
- [SIL9] P.P.Silvester et R.L.Ferrari, 'Finité éléments for electrical engainées', Cambridge université 1990.
- [LAP] L.Lapidus, G.F Pindor, 'numecical solution of partial différentiel équations in science and engineering.
- [BOU91] A. Boubaker, « Protection contre la foudre dans le cas d'une terre hétérogène », Séminaire sur la sécurité et la protection de l'installation et de l'équipement électrique, ENSEM-LPEE, Casablanca, Maroc, 1991.
- [COMG] COMSOLE GUIDE.

