

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'Electrotechnique

Mémoire de Fin d'Etudes De MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Electrique

Spécialité : RESEAUX ELECTRIQUES

Présenté par

Mohamed SLAMANI
Mohammed OUENDI

Theme

Etude d'un dispositif pointe-plan en présence de la charge d'espace avec la méthode des éléments finis

Mémoire soutenu publiquement le 28 septembre 2014 devant le jury composé de :

M S. HADDAD

Professeur, UMMTO, Président

M Y. BOUTORA

M C-A, UMMTO, Rapporteur

M M. MEKIOUS

M A-A, UMMTO, Examineur

M D. BOUGUEDAD

M C-B, UMMTO, Examineur

Remerciements

On dit souvent que le trajet est aussi important que la destination. Les cinq années de maîtrise nous ont permis de bien comprendre la signification de cette phrase toute simple.

Ce parcours en effet, ne s'est réaliser sans défis et sans soulever de nombreuses questions pour les quelles les réponses nécessitent de longues heures de travail.

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux qui nous à donnés la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Nous remercions vivement notre promoteur M^r.Y.BOUTORA, Maitre de conférences à l'UMMTO, pour leurs orientations et leurs conseils tout le long de ce travail.

Notre remerciement s'adresse aussi aux membres de jury qui nous ont fais l'honneur en acceptons de juger ce travail

Tous les enseignants du département d'électrotechnique de l'UMMTO qui ont participé à notre formation durant tout notre cycle universitaire ainsi à tous ceux qui ont contribué de prés ou de loin à la réalisation de ce travail, trouvent ici l'expression de notre plus profond remerciement.

Dédicaces

Aux être qui me sont les plus chers

« MES PARENTS »

*Pour leurs AMOUR leur EDUCATION et leurs
SACRIFICES.*

*A mes frères et sœurs, pour qui je souhaite la
réussite dans leurs projets en avenir.*

A mes tantes, mes oncles, mes cousins, mes cousines.

A mes chers amis (es).

A toute ma famille.

A mon binôme Mohammed

Enfin tout ceux et celles qui me sont chers (es).

SLAMANI Mohamed

Dédicaces

Aux être qui me sont les plus chers

« MES PARENTS »

*Pour leurs AMOUR leur EDUCATION et leurs
SACRIFICES.*

*A mes frères et sœurs, pour qui je souhaite la
réussite dans leurs projets en avenir.*

A mes tantes, mes oncles, mes cousins, mes cousines.

A mes chers amis (es).

A toute ma famille.

A mes nièces Céline, Ilyana, Lyna.

A mon binôme Mohamed

Enfin tout ceux et celles qui me sont chers (es).

OUENDI Mohammed

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I. Généralités sur les décharges électriques	
I.1 Introduction	2
I.2. Définitions	2
I.2 .1.La décharge électrique.....	2
I.2 .1.1.La décharge électrique dans la nature.....	2
I.2.2.La rigidité diélectrique.....	3
I.2.3.La charge d'espace	3
I.3. Les décharges électriques dans les gaz.....	4
I.3.1.Généralités	4
I.3.2.Décharge électrique non-autonome.....	5
I.3.3. Décharge électrique autonome	6
I.3.4.Décharge de Townsend	6
I.3.5. Décharge couronne.....	7
I.3.6. Tension d'amorçage en champ homogène (loi de PASCHEN)	8
I.3.7.Mécanisme d'un Streamer	8
I.4. Les types de décharges électriques	10
I.4.1.Décharge pointe -pointe	10
I.4.2.Décharge pointe -plan.....	11
I.4.3.Décharge plan -plan.....	13
I.5.Conclusion	13
Chapitre II. Description du logiciel utilisé	
II.1. Introduction	14
II.2. La méthode des éléments finis (MEF)	14

Sommaire

II.2.1. Principe de la discrétisation géométrique	14
II.3. Avantages et inconvénients la méthode des éléments finis(MEF)	15
II.4 .Etude par la méthode des éléments finis (MEF).....	15
II.4.1.Problème et domaine d'étude	15
II.4.2.Conditions aux limites appliquées	15
II.4.3. Le maillage	16
II.5. Logiciel FEMM	16
II.5.1. Introduction à FEMM	17
II.5.2. La procédure de mise en œuvre de FEMM	17
II.5.2.1. Définition du type de problème	17
II.5.2.2. Définition de la géométrie	17
II.5.2.3. Les différentes instructions permettant de manipuler le logiciel.....	18
II.5.2.4. Manipulation du logiciel par la souris.....	19
II.5.2.5.La manipulation du grillage de l'écran	20
II.5.2.6. Définition du type de problème	21
II.5.2.7. Conditions aux limites.....	22
II.5.2.8. Opération de calcul de champ et de visualisation	23
II.5.2.9. Le post processeur électrostatique	24
II.6. Introduction à Lua Scripting	25
II.6.1. Tracé de la géométrie	25
II.6.1.1. Les nœuds	25
II.6.1.2. Les segments.....	25
II.6.1. 3. Les arcs de segments	25
II.6.2 Autres instruction de Lua Scripting	26
II.6.2.1.Ouverture des fichiers	26

Sommaire

II.6.2.2. Déclaration de variables	26
II.6.2.3. Définition du type de problème	26
II.6.2.4. Déclaration des matériaux utilisés	26
II.6.2.5. Condition aux limites	27
II.7. Equations à résoudre	27
II.8. Conclusion.....	28
III. Etude sans présence de la charge d'espace	
III.1. Introduction	29
III.2. La structure étudiée.....	29
III.3. Calcul des coordonnées de la pointe.....	30
III.4. Les cartographies du champ électrique	31
III.4.1. En fonction du rayon de la pointe.....	31
III.4.2. En fonction de la distance inter-électrode.....	34
III.5. Observations sur les cartographies du champ électrique	36
III.6. Cartographies du potentiel électrique	36
III.7. Observations sur les cartographies du potentiel électrique.....	37
III.8. représentation des courbes	38
III.8.1. Courbe du champ électrique en fonction de la distance inter-électrode.....	38
III.8.2. Courbe du champ électrique en fonction rayon de la pointe.....	39
III.9. Interprétation des courbes	40
III.10. Conclusion.....	40
IV. Etude avec présence de la charge d'espace.	
IV.1. Introduction	41
IV.2. La densité volumique de la charge d'espace dans l'air atmosphérique.....	41

Sommaire

IV.3. Calcul de la densité volumique de la charge d'espace	41
IV.4. La structure étudiée.....	42
IV.5. Cartographies de champ et de potentiel électrique	42
a- Représentation avec des lignes équipotentiels	42
b- Représentation avec effet loupe	45
IV.6 Commentaires sur les cartographies de champ et de potentiel électrique	43
IV.7. Les courbes de champ et de potentiel électrique sur l'axe vertical de l'électrode.....	47
a- les courbes de potentiel électrique.....	47
b- Interprétation des courbes de potentiel électrique	49
c- les courbes de champ électrique	51
d- Interprétation des courbes de champ électrique	53
IV.8. Les courbes de composante normale du champ électrique	54
IV.9. Interprétation des courbes de la composante normale du champ électrique	55
IV.10. Conclusion	56
Conclusion générale	57

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

Introduction générale

L'étude des décharges électriques a toujours été un sujet intéressant pour les chercheurs. Des phénomènes naturels souvent spectaculaires comme la foudre ont poussé les chercheurs à essayer de comprendre le phénomène des arcs et des plasmas.

Ces études ont obtenu des résultats conséquents, et ont permis, en l'occurrence, l'utilisation des plasmas dans plusieurs secteurs de l'industrie.

Les décharges électriques sont considérées aujourd'hui comme l'une des solutions majeures qui peuvent ralentir la destruction de l'environnement. Les décharges électriques permettent d'éliminer la pollution des effluents gazeux et de certains composés organiques très polluants. Comme elles sont utilisées pour le traitement de surface, la stérilisation des équipements médicaux, le dessalement de l'eau de mer... [1].

Les décharges électriques se trouvent en plusieurs types, dont les plus répandues sont les décharges couronnes, qui sont des décharges électriques se produisant entre deux électrodes dissymétriques, les systèmes d'électrodes utilisées sont généralement un système pointe-plan.

Notre travail consiste à étudier le comportement du champ et du potentiel électrique pour un dispositif pointe-plan en absence et en présence de charge d'espace. L'étude sera faite en utilisant un logiciel éléments finis.

Nous allons diviser notre travail en quatre chapitres dont le premier sera consacré aux généralités sur les décharges électriques, le second à la présentation du logiciel utilisé. Le troisième chapitre comportera les résultats obtenu, du calcul, effectué avec le logiciel en absence totale de la charge électrique. En fin, le dernier chapitre sera consacré à l'étude de la structure en présence de la charge d'espace, et de tirer des résultats, en faisant varier le volume par la charge, ainsi que la constante diélectrique de l'isolant.

CHAPITRE I
GÉNÉRALITÉ SUR
LES
DÉCHARGES
ÉLECTRIQUES

I.1. Introduction

Lorsqu'un milieu isolant est soumis à une tension électrique suffisante, un courant de particules chargées électriquement devient possible par l'ionisation partielle du milieu. On parle de décharge électrique. Ce phénomène est particulièrement intéressant, car il est rencontré dans l'expérience commune et utilisé dans de nombreuses applications technologiques [2]. La compréhension de ce phénomène dans les grands intervalles d'air présente un grand intérêt du point de vue industriel et de protection de l'environnement. On peut citer parmi les principales raisons, les problématiques relatives à l'isolation et à la protection des réseaux de transport et de distribution de l'énergie électrique ainsi les composants associés [3].

I.2. Définitions

I.2.1. La décharge électrique : On désigne par l'expression décharge électrique, ou simplement décharge, le passage de courant dans un isolant.

I.2.1.1. Décharge électrique dans la nature

Deux phénomènes naturels connus mettent en jeu les éléments que nous étudions [4].

Ø **La foudre :** lorsque de l'air froid recouvre de l'air chaud, les conditions sont favorables au déclenchement des orages. De violents courants d'air verticaux entraînent l'humidité, les fragments de glace, les grêlons et les gouttelettes d'eau à l'intérieur des nuages. On ne connaît pas encore exactement les mécanismes à l'origine de la tension qui se forme dans les nuages d'orage, mais cette tension est influente sur des dizaines, voire des centaines de kilomètres. Lorsque la tension est suffisante, on peut observer des éclairs entre les nuages et le sol (25% d'entre eux) ou entre les nuages eux-mêmes. Ces arcs ont des vitesses de propagation de l'ordre de 200 km/s. Leur tension est de l'ordre de 100 millions de voltes et ils sont parcourus par un courant de 30000 Ampères. Ce sont donc des phénomènes développant beaucoup de puissance et très visibles pour l'homme.

La figure I.1, représente une décharge électrique dans la nature.



Figure I.1 : Foudre (Photo Fédération Française de Montagne et d'Escalade)

Ø **Aurore polaire :** les aurores polaires apparaissent, vues depuis la Terre, comme des taches ou des bandes de lumière, souvent striées, un peu comme des rideaux lumineux se balançant dans un courant d'air. Elles sont surtout de couleur verte ou rouge. On peut les observer pendant plusieurs dizaines de minutes. On les observe à des latitudes voisines de 70 degrés, c'est à dire en Scandinavie, au Nord de la Sibérie, au Canada, en Alaska, ou - au Sud - aux abords du continent Antarctique. Ces lumières aurorales sont émis à des altitudes comprises entre 80 et 150 kilomètres, dans l'ionosphère. La lumière des aurores provient des collisions entre des particules rapides provenant de la magnétosphère et les atomes et ions de l'ionosphère. Les aurores boréales sont les aurores polaires que l'on observe dans l'hémisphère Nord ; les aurores australes sont observées dans l'hémisphère Sud [4].

I.2.2. La rigidité diélectrique

La rigidité diélectrique est liée à la tension de claquage d'un diélectrique placé entre deux électrodes, c'est-à-dire c'est le champ électrique maximum que peut supporter un diélectrique sans claquage [5].

I.2.3. La charge d'espace

Les électrons plus rapides sont absorbés par l'anode, tandis que les ions positifs lourds et plus lents forment entre les électrodes un ensemble de charges qu'on appelle charge d'espace [6].

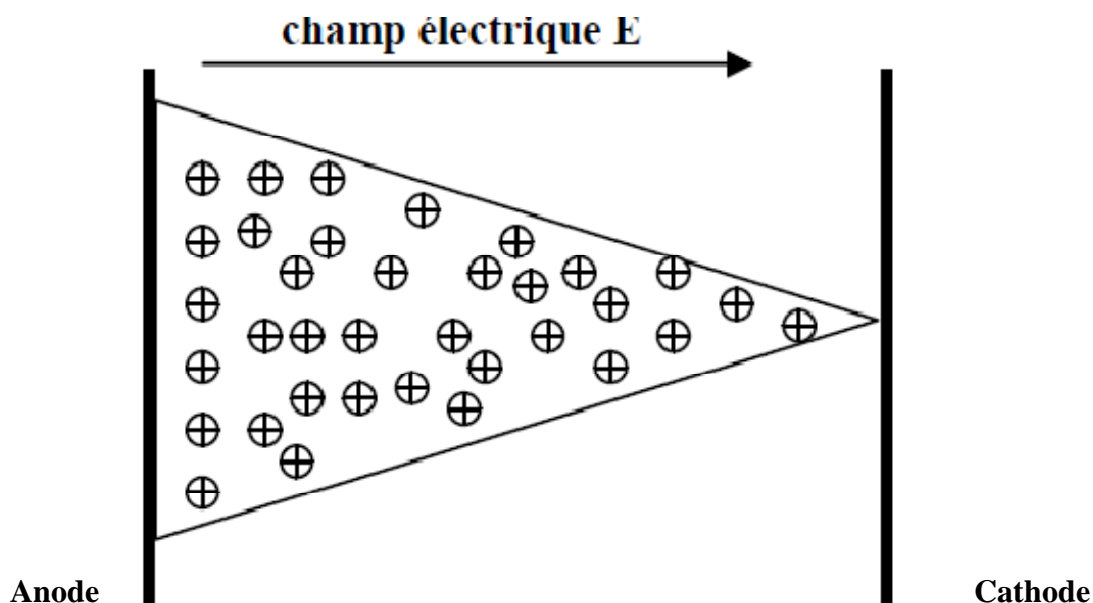


Figure. I.2 : La forme de la charge d'espace

Une charge d'espace due à l'accumulation des ions positifs dans un intervalle inter électrodes provoque la déformation du champ électrique [7].

I.3. Décharges électriques dans le gaz

I.3.1. Généralités

Les gaz sont en général, de bons isolants électriques. Ils présentent un grand avantage, celui d'être une isolation régénératrice. Certains gaz, tel que l'azote, le CO_2 et le SF_6 permettent de diminuer sensiblement les dimensions, donc l'encombrement et le coût des installations électriques et ceci d'autant plus que la pression à laquelle ils sont utilisés est grand.

Le vide poussé est aussi de plus en plus utilisé pour ses bonnes caractéristiques isolantes particulièrement dans la technique de coupure (disjoncteurs).

A l'état naturel, les gaz peuvent présenter une certaine conductibilité. Celle-ci s'explique par l'existence d'électrons libres produits par une ionisation due aux rayons cosmiques ou aux substances radioactives ou à un échauffement.

I.3.2. Décharges électrique non-autonome

Une décharge électrique est dite non-autonome, si elle s'interrompt dès que cesse d'agir l'agent ionisant extérieur. On sait que les gaz sont généralement de bons isolants, mais il est possible sous certaines conditions de les faire traverser par un courant de particules chargées. On dit alors que le gaz est le siège d'une décharge.

Si nous appliquons une tension V entre les électrodes, aucun courant ne passe. Par un procédé thermique direct ou indirect, ou par un rayonnement ultraviolet, provoquons une émission thermoélectronique ou photoélectrique à la cathode. Les électrons sont émis et forment une Charge d'espace près de la cathode. Si on augmente V , on collecte de plus en plus d'électrons (partie A de la figure I.3) jusqu'au moment où, pour une émission donnée, on a saturation (partie B de la figure I.3). Le caractère essentiel de cette décharge est qu'elle n'est pas auto-entretenu et que le courant cesse dès que la production est arrêtée par un processus extérieur [8].

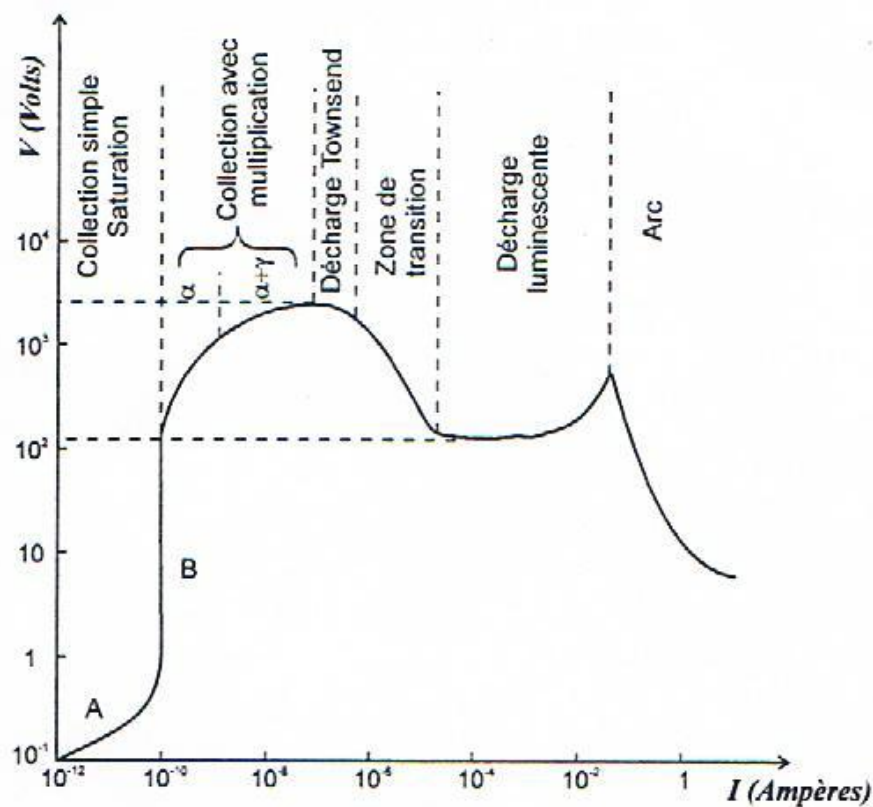


Figure I.3 : Caractéristique schématique de la décharge.

I.3.3. Décharge électrique autonome

Les décharges qui peuvent survivre à l'agent ionisant extérieur, sont dites autonomes. Les décharges apparaissent lorsque la tension appliquée aux électrodes dépasse une valeur minimale [8].

Au-delà de cette valeur, le gaz devient le siège d'un ou plusieurs phénomènes produisant les électrons nécessaires à l'entretien de la décharge sans intervention d'un agent ionisant extérieur.

La nature et les conditions d'établissement d'une décharge autonome dépendent de la pression du gaz. Townsend a étudié la transition de la décharge dite non autonome à la décharge autonome, en considérant un ensemble de processus susceptible d'être à l'origine de ce phénomène.

I.3.4. Décharge de Townsend

L'énergie cinétique d'un électron détermine sa capacité à exciter ou à dissocier les molécules du gaz plasmagène. L'énergie acquise par un électron placé entre deux électrodes dépend de son libre parcours moyen et du champ électrique auquel il est soumis. L'obtention d'un nombre d'électrons suffisant pour exciter le gaz de façon significative exige un mécanisme de multiplication. Si l'énergie d'un électron est supérieure à l'énergie d'ionisation d'une molécule, alors un choc inélastique est susceptible de libérer un électron par ionisation. L'électron obtenu par ionisation est alors accéléré par le champ électrique et peut à son tour ioniser de nouvelles molécules. En 1914, Townsend a proposé l'introduction d'un coefficient d'ionisation α (appelé premier coefficient de Townsend) pour traduire mathématiquement ce phénomène d'ionisation [8].

Ce coefficient dépend du champ réduit E/N (avec N désignant la densité du gaz) et de $1/\alpha$ qui représente le libre parcours moyen d'un électron entre deux collisions ionisantes. L'apparition d'un électron primaire au niveau de la cathode se traduit par l'arrivée de $e^{\alpha d}$ électrons au niveau de l'anode. Ce processus est appelé «avalanche électronique».

La relation de Townsend s'écrit alors :

$$I = I_0 e^{\alpha d}$$

Avec:

I : Courant (A).

I_0 : Courant initial dû aux électrons primaires (A).

d : Distance inter électrodes (m).

α : Premier coefficient de Townsend (m^{-1}).

La probabilité de produire des électrons secondaires se traduit par l'introduction d'un second coefficient de Townsend γ . Le critère d'auto-entretien de la décharge s'écrit alors:

$$\gamma (e^{\alpha d} - 1) = 1$$

C'est le critère de Townsend.

I.3.5. Décharge couronne

L'effet couronne est lié à l'apparition de l'avalanche électronique qui se développe dans un intervalle gazeux, séparant deux électrodes asymétriques soumises à un champ électrique hétérogène à des pressions de quelques atmosphères. La décharge couronne se manifeste dans les conditions naturelles. Elle apparaît sous forme d'une gaine lumineuse qui apparaît autour des conducteurs entourés par l'air, lorsque la valeur maximale du champ électrique atteint celle du champ d'ionisation de l'air et se manifeste sur toute la gamme de fréquence de la tension. La décharge couronne se caractérise par des phénomènes de nature optique, acoustique et électrique.

En particulier, si un objet chargé possède des pointes ou des coins, le champ électrique y sera plus important qu'ailleurs, c'est là en général que se produira une décharge couronne. Ce phénomène tendra à se stabiliser de lui-même puisque, la région ionisée devenant conductrice, la pointe aura apparemment tendance à disparaître. Les particules chargées se dissipent alors sous l'effet de la force électrique et se neutralisent au contact d'un objet de charge inverse. Les décharges couronne se produisent donc en général autour d'une électrode pointe dont le champ électrique à ses environs est suffisamment important [5].

I.3.6. Tension d'amorçage en champ homogène (loi de PASCHEN)

La tension d'alimentation minimale pour déclencher la décharge est appelée tension de claquage. Il existe une relation qui lie la valeur de cette tension de claquage à la pression du gaz, et de la distance inter électrode : la loi de PASCHEN. Cette loi est habituellement représentée par la courbe caractéristique $U_0 = f(P, d)$, où P est la pression et d la distance inter électrode, et dépend de la nature du gaz introduit.

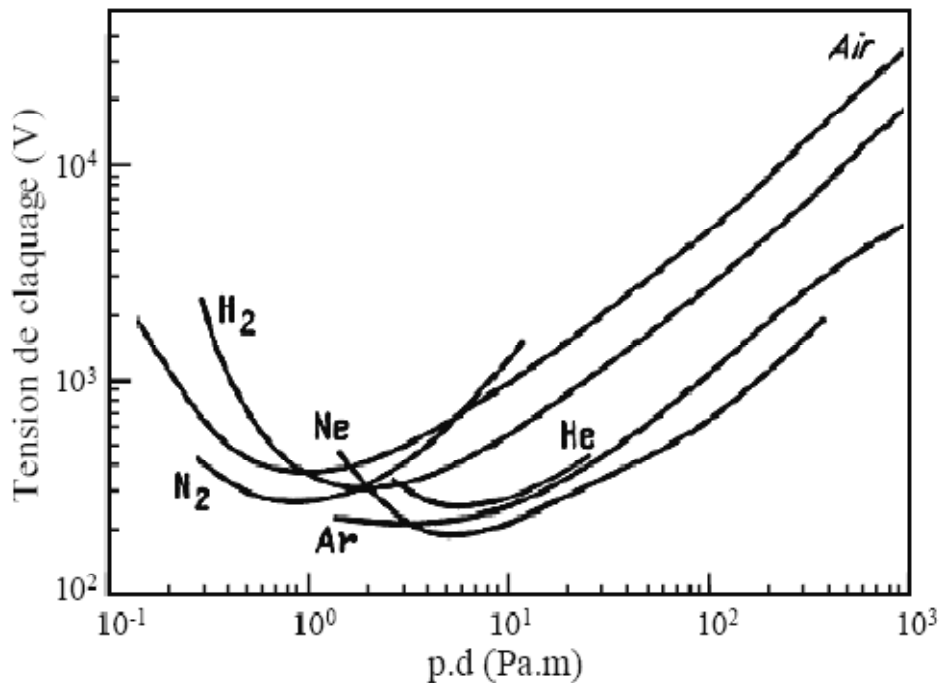


Figure I. 4 : tension de claquage pour différents gaz en fonction du produit (P.d).

Nous pouvons constater que pour un gaz à pression atmosphérique ($P=1.013 \cdot 10^5$ Pascal), les courbes passent par un minimum pour une distance inter électrode d'environ $10 \mu\text{m}$ ($P.d = 0.5$ à 5 Pa.m environ), cela signifie que, pour la production des décharges à pression atmosphérique dans des conditions d'utilisation usuelles ($d \geq 1 \text{ mm}$), la tension du claquage est une fonction croissante de la distance inter électrode [9].

I.3.7. Mécanisme d'un streamer

La théorie de Townsend ne peut expliquer complètement la décharge par étincelle ou arc. En effet, Raëther, Meek et Loeb ont remis en cause cette théorie après avoir fait les observations suivantes :

- ∅ Certains résultats expérimentaux montrent que la tension de claquage dans l'air à quelques atmosphères de pression ne varie pas beaucoup avec la nature de la cathode.
- ∅ Le courant de décharge pour des surtensions importantes atteint des valeurs notables avant même que la première avalanche se soit écroulé.
- ∅ La décharge n'est plus diffuse, comme celle de Townsend, mais concentrée en un canal étroit avec des ramifications et des changements de direction (étincelle).

Si pour qu'un ion se déplace de l'anode jusqu'à la cathode il lui faut 10^{-4} à 10^{-5} s, l'expérience a montré que le temps de la formation d'étincelle est de 10^{-7} s et moins, donc l'émission secondaire (due aux ions positifs) ne peut expliquer la décharge par étincelle.

L'explication de la grande vitesse avec laquelle se développe l'étincelle est donnée par la théorie des streamers (ou théorie des canaux) qui est actuellement bien justifiée par des données expérimentales [10].

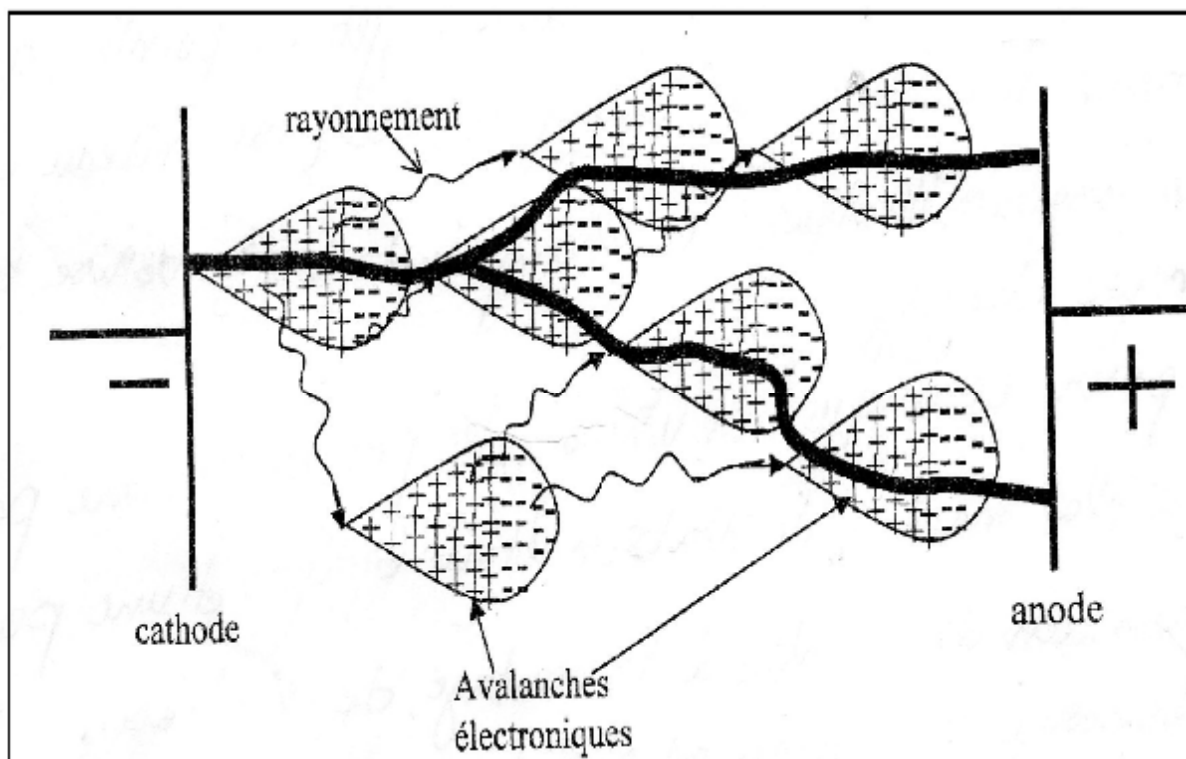


Figure. I. 5 : Mécanisme de décharge par streamer

Une première avalanche de Townsend faiblement luminescente se forme en streamer ou dard. Sous l'effet de la photo ionisation due aux rayonnements émis par cette avalanche, de nouvelles avalanches prennent naissance et donnent naissance à leur tour à d'autres avalanches dans le volume du gaz. Au cours de leur développement, les diverses avalanches se rattrapent les unes les autres et se confondent en donnant un canal bon conducteur du streamer. Ce canal à grande conductivité constitué de charges positives et de charges négatives formées dans le gaz court-circuitera les deux électrodes et conduira les charges en provenance de la source.

La grande vitesse à laquelle se produit la décharge est due au fait que le streamer est conduit par plusieurs avalanches qui se développent simultanément entre les deux électrodes.

Au moment où le plasma atteint l'anode, nous aurons une décharge complète sous forme d'arc.

L'arc se distingue de la décharge de Townsend par le fait que :

- la densité de courant d'arc est très élevée 0.1 à 100 KA/cm²
- le courant d'arc est principalement dû aux électrons issus de la cathode et résultant de l'ionisation du gaz
- la tension d'arc n'est que de quelques dizaines de volts [10].

I.4. Les types de décharges électriques

Les caractéristiques électriques des décharges dépendent fortement de la géométrie des électrodes. On classe celles-ci en trois familles qui induisent des comportements électriques et des applications différentes.

I.4.1. Décharges pointe-pointe

L'utilisation de pointes métalliques pour l'étude des décharges est assez courante. Cela est dû à l'effet de pointe, qui permet d'obtenir localement un champ intense (au niveau des pointes et des angles métalliques). Ce champ intense favorise le claquage électrique des gaz. C'est pour cela que l'on utilise des pointes comme paratonnerre et que la machine de Watson était équipée d'une pointe.

L'utilisation de pointes a l'avantage de stabiliser le lieu de la décharge puisqu'on est sûr du point de départ et du point d'arrivée de celle-ci (mais rien n'impose que le trajet entre ces deux points soit une ligne droite). Ce sont souvent des décharges entre deux électrodes métalliques, on n'utilise que rarement cette configuration avec des décharges à barrière diélectrique.

I.4.2. Décharges pointe-plan

Ce sont des arcs dont le chemin peut être instable ; c'est à dire que l'on connaît de manière certaine le point de départ de l'arc mais qu'on ne peut pas prédire quel sera le point d'arrivée sur le plan ni même le chemin parcouru. On peut distinguer trois types de décharge pointe plan: les arcs transférés, les arcs non transférés et les arcs glissants, qui ont des utilisations industrielles différentes. Les arcs transférés ou non transférés sont utilisés tous les deux en sidérurgie pour obtenir des gaz à de très hautes températures, à l'aide de courants importants (plusieurs centaines d'Ampères).

- Ø **Arc transféré** : Un arc transféré est un arc pointe-plan utilisé couramment pour la soudure. La pointe est utilisée par le soudeur et le plan est la plaque de métal à souder. Il arrive qu'on utilise un sous presseur pour protéger la zone de soudage (protection contre les oxydations) mais cela ne change pas fondamentalement le trajet de l'arc qui va naturellement d'une électrode à l'autre.

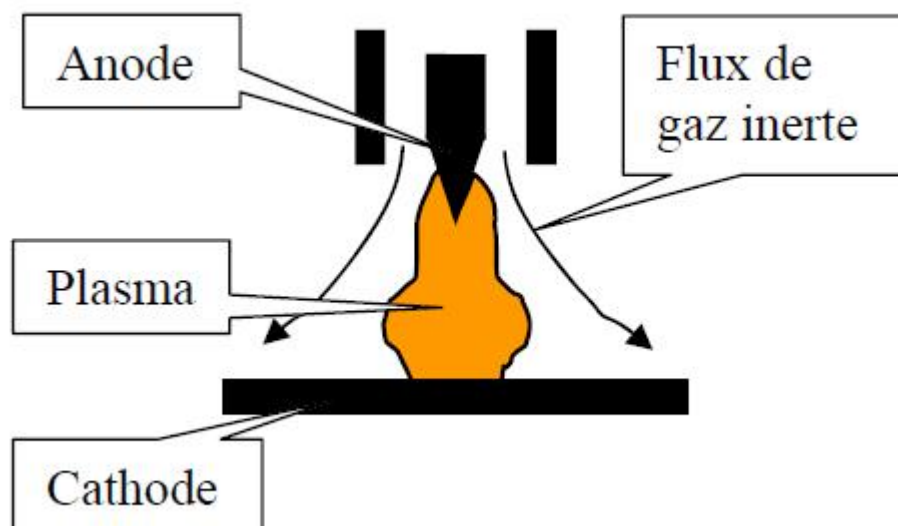


Figure. I.6 : Arc transféré

- Ø **Arc non transféré** : La pointe de cet arc est le centre du dispositif et le plan est le tube qui entoure la pointe (cathode le plus souvent). La différence essentielle avec l'arc précédent est que celui-ci est soufflé par un flux de gaz (gaz plasmagène) ce qui crée un arc protégé (jet de plasma) ; c'est une torche à plasma. La plupart du temps, on se sert de ce type de dispositif pour réaliser un dépôt de métaux sur différents matériaux.

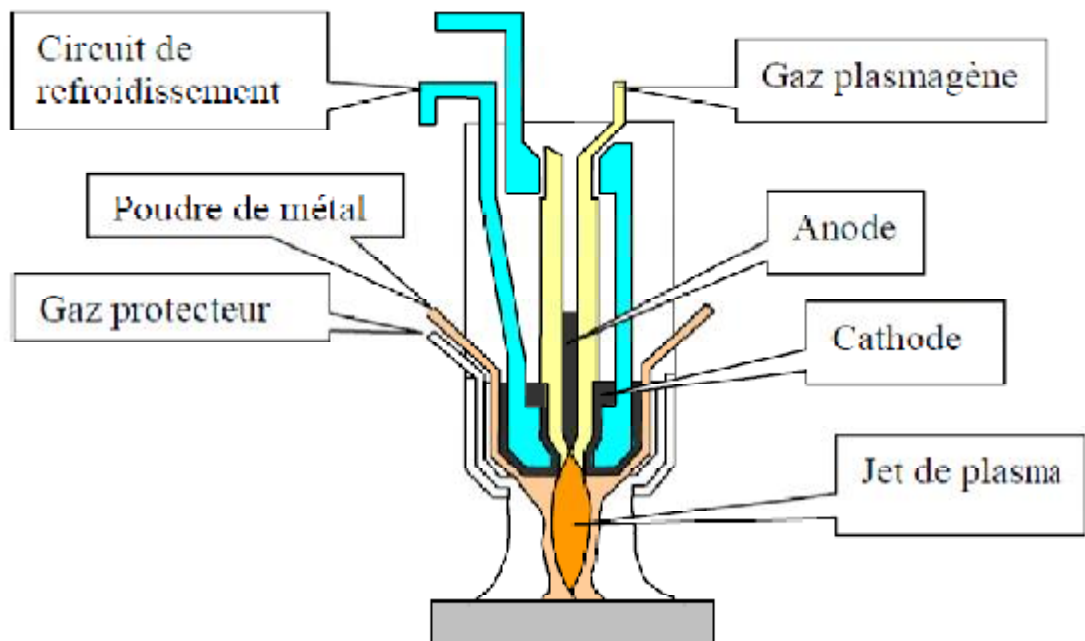


Figure. I.7 : Arc non transféré

Ø **Décharge glissante** : Dans certains cas, on cherche à faire glisser l'arc en le soufflant le long d'une des électrodes, dans une configuration géométrique de décharge plan-plan ou pointe-plan. Ce sont des dispositifs à arc glissant, généralement caractérisés par un courant de faible intensité ; l'allongement de la longueur de l'arc qui résulte du soufflage peut conduire à des tensions élevées relativement à celle qui seraient obtenues sans soufflage.

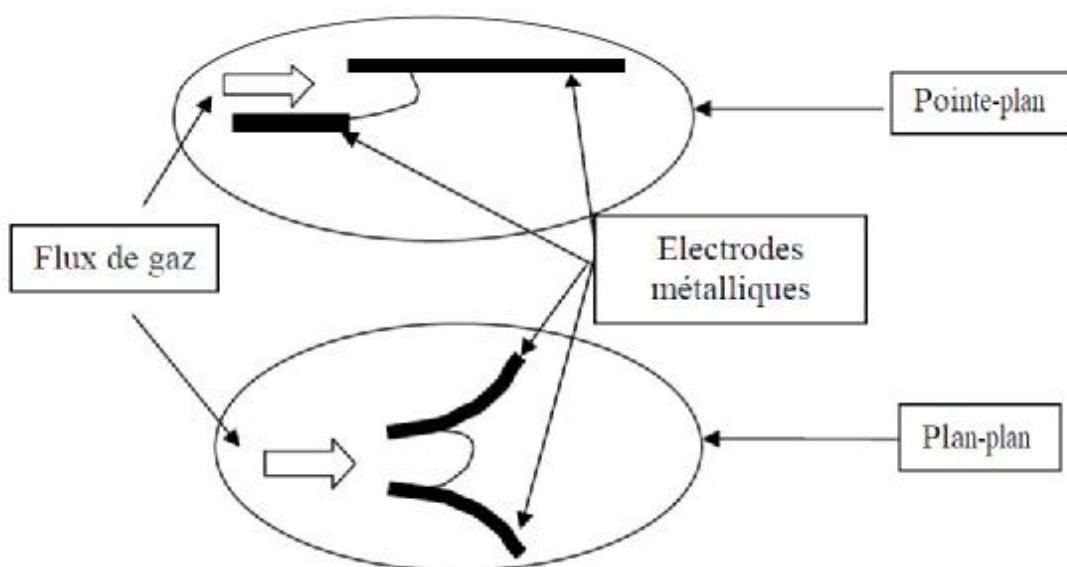


Figure. I.8 : Décharge glissante

I.4.3. Décharges plan-plan

Les décharges plan-plan sont rarement des décharges entre électrodes métalliques. En effet, dans le cas d'une utilisation d'électrodes métalliques planes, on ne connaît ni le point de départ de la décharge, ni le point d'arrivée et, sans traitement particulier sur ces électrodes, on n'obtient pas un arc homogène, réparti sur toute la surface des électrodes, on observe un arc unique se déplaçant dans l'espace inter électrodes, ou parfois, plusieurs arcs apparaissant et disparaissant dans ce même espace.

Dans la plupart des cas, on utilise des électrodes qui sont recouvertes d'une couche de diélectrique côté décharge. Avec ce type de dispositif, il est beaucoup plus facile d'obtenir une décharge homogène sur tout le plan. Ce type de décharge met en jeu des tensions importantes (dizaine(s) de KV) et des courants relativement faibles (quelques centaines de mA pour des sections de l'ordre de 10 cm²). On utilise ces décharges à barrière diélectrique, entre autre, pour la production d'ozone [11].

I.5. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une brève revue sur les différents types de décharge électrique, et nous sommes intéressés particulièrement aux décharges pointe-plan. Nous avons décrit l'origine des différents facteurs qui influent sur se type de décharge, et les domaines d'utilisation de ce système dans l'industrie.

CHAPITRE II

DESCRIPTION DU LOGICIEL UTILISÉ

II.1. Introduction

La détermination du potentiel et du champ électrique d'un matériau passe par la résolution de l'équation de Poisson ou de Laplace. Il s'agit donc de la détermination de la répartition spatiale du champ électrostatique ou du vecteur de déplacement et du potentiel (V) en fonction de la répartition connue des charges et des conditions aux limites, c'est-à-dire de la répartition donnée du potentiel sur les surfaces limitant le volume pour lequel le champ est calculé. Le calcul du champ peut être effectué par plusieurs méthodes analytiques, graphiques, expérimentales et numériques.

Le développement des méthodes numériques a ouvert des champs d'applications très divers et plus particulièrement celui de la détermination des caractéristiques des matériaux. La performance de ces méthodes numériques a été démontrée par plusieurs chercheurs, parmi ces méthodes numériques les plus connues, la méthode des éléments finis (MEF) et la plus répandue pour la résolution des équations différentielles.

II.2. La méthode des éléments finis (MEF)

La méthode des éléments finis nous fournit un outil intéressant dans la discrétisation géométrique, apparue à la fin des années trente, elle n'a été appliquée aux structures électromagnétiques qu'à la fin des années 1968 [12].

II.2.1. Principe de discrétisation géométrique

Pour étudier le système électromagnétique représenté par la figure II.1, par la discrétisation géométrique, il faut :

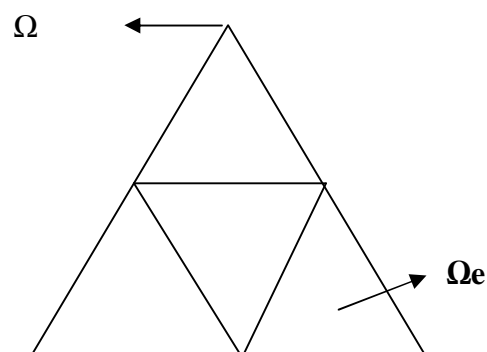


Figure. II.1 : La discrétisation géométrique

Ω : le domaine définissant l'espace de la structure électromagnétique.

La discrétisation consiste à subdiviser le domaine Ω en sous-domaines élémentaires Ω_e dits aussi éléments finis, il faut que :

- ∅ Ω_e doit être homogène (un seul milieu, une seule source de courant, géométrie simple)
- ∅ Aucun sous-domaine ne doit empiéter sur son voisin et les vides sont interdits.

II.3. Avantages et inconvénients de la méthode (MEF)

La méthode des éléments finis consiste à approcher dans un sous-espace de dimension finie, un problème écrit sous forme variationnelle dans un espace de dimension infinie. La solution approchée est dans ce cas une fonction déterminée par un nombre fini de paramètres comme, par exemple, ses valeurs en certains points (les nœuds du maillage).

Cette méthode est intéressante compte tenu de sa souplesse d'utilisation en particulier lorsqu'il s'agit de phénomène non linéaire de la géométrie complexe, et de couplage multiphysique. Elle a aussi la possibilité de démonstration mathématique de convergence et de majoration d'erreurs, et la détermination plus naturelle des conditions aux limites.

La complexité de mise en œuvre et le coût en temps de calcul et en mémoire, sont les inconvénients de la méthode [13].

II.4. Etude par la méthode des éléments finis en régime électrostatique

II.4.1. Problème étudié et domaine d'étude

Nous allons étudier la décharge pointe plan avec le logiciel éléments finis FEMM, cette étude sera faite en régime électrostatique en mode plan.

II.4.2. Condition aux limites appliquées

Nous allons appliquer deux conditions aux limites de Dirichlet à la structure étudiée,

- l'une sera appliquée à l'électrode pointe (Dirichlet 1), l'électrode pointe sera portée à un potentiel de 1000 volts.
- L'autre sera appliquée à l'électrode plane (Dirichlet), dans le cas où en considère que la charge d'espace est totalement absente, cette électrode sera portée à zéro volt. Cette condition sera aussi appliquée aux bornes délimitant le domaine d'étude.

II.4.3. Le maillage

Le logiciel effectue un maillage automatique de la structure avec des éléments triangulaires, figure (II.2)

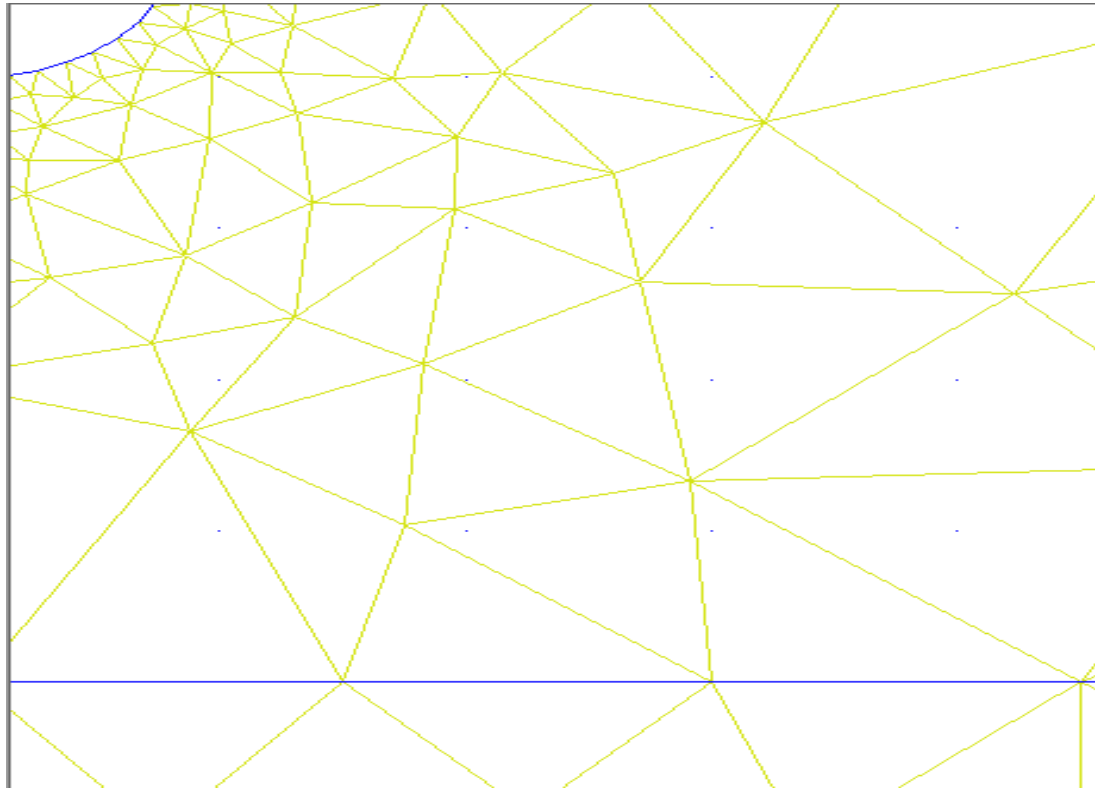


Figure. II.2: Représentation du maillage

II.5. Logiciel éléments finis FEMM

II.5.1. Introduction à FEMM 4.2

Le logiciel FEMM Finite Element Methode magnetic est un logiciel libre et gratuit, disponible sur le réseau internet, c'est un freeware développé par David MEEKER, qui a aussi écrit et publié ce logiciel. Ce dernier est devenu un outil très convoité par les chercheurs. La méthode qu'il utilise est celle des éléments finis, méthode appliquée aux structures électromagnétiques depuis 1968. Ce logiciel permet la résolution des problèmes de type magnétique, électrostatique. . . etc.

Le logiciel FEMM est composé de trois modules essentiels, un module d'édition qui permet de définir le type de problème, de tracer la géométrie, de définir les différents milieux, ainsi

que les termes sources et les conditions aux limites, de mailler la structure proposée (préprocesseur). Un deuxième module permet de résoudre le problème (processeur). Le logiciel est utilisé généralement en compagnie d'un outil de programmation (lua scripting), qui sera d'ailleurs présenté dans les paragraphes à venir.

II.5.2. La procédure de mise en œuvre de FEMM

II.5.2.1. Définition du type de problème

On commence toujours par cette étape, avant d'entamer le calcul à faire, il faut définir d'abord sa nature (problème magnétique, électrostatique,....).

II.5.2.2. Définition de la géométrie

Pour tracer la géométrie à étudier, on utilise ce qu'on appelle des icônes en modes dessin, qui sont représentés sur la figure suivante :



Figure II.3 : Les modes dessin

La figure II.3 représente cinq modes, qui sont respectivement, le mode point, segment, arc, milieux, groupes de modes. Les quatre premiers modes suffisent pour définir la géométrie à étudiée.

Ø **Le mode point** : c'est le premier mode qu'on utilise pour commencer à définir la géométrie, il sert à placer les nœuds de liaison des segments et des arcs. Il ya deux façons de placer les nœuds :

Soit en cliquant sur le curseur gauche de la souris, ce procédé est aléatoire et peu précis ; soit en pressant la touche tabulation, cela fait apparaitre une boite de dialogue ou il suffit d'insérer les coordonnées du point désiré.

Pour supprimer un point, il suffit d'un clic droit sur le point pour le sélectionner (un objet sélectionné prend toujours la couleur rouge) et de le supprimer par la touche suppr.

A noter que le mode point est actif par défaut.

- ∅ **Le mode segment** : ce mode sert à dessiner un segment, une fois que les nœuds sont placés, il suffit de désigner le début et la fin du segment par un clic gauche de la souris. La procédure de sélection et d’effacement sont les même que les points.
- ∅ **Le mode arc** : ce mode sert à dessiner un arc entre deux points déjà existant. Il s’applique exactement comme le mode segment.
- ∅ **Le mode milieux** : ce mode sert à définir les propriétés des milieux utilisés, par exemple pour choisir un point du milieu air, on clique avec le bouton gauche sur un point. Un point « none » apparaît. On sélectionne ce point puis on appuie sur la barre espace, une boîte de dialogue apparaît. Dans la case block type on choisit « air » puis on clique sur ok. Cette opération se répétera pour le nombre de milieux utilisés.
- ∅ **Le mode groupe d’objet** : On désignera dans ce qui suit un objet comme étant soit un nœud, soit un arc soit un milieu. Il sert à regrouper plusieurs objets pour faciliter les différentes manipulations.

II.5.2.3. Les différentes instructions permettant la manipulation du logiciel par clavier

Nous allons dresser des tableaux qui contiennent les différentes actions exécutables par clavier pour chaque mode.

Les touches des modes sélectionnés.	
Touche	Fonction
Espace	Editer les propriétés de l’objet (ou groupe d’objet sélectionné.)
Tabulation	Crée de nouveaux nœuds (ou milieux) en faisant entrer leurs coordonnées dans une boîte de dialogue activée à cet effet.
Echap	Désélectionner tous les objets sélectionnés
Supp	Supprimer les objets sélectionnés

Tableau1 : commandes touches clavier du préprocesseur

Touches manipulation de la vue	
Touche	Fonction
Flèche gauche	Gauche
Flèche droite	Droite
Flèche haute	Haute
Flèche bas	Bas
Page haut	Zoom avant
Page bas	Zoom arrière
Home	Zoom naturel

Tableau2 : commandes touches clavier du préprocesseur pour visualisation

II.5.2.4. Manipulation du logiciel par la souris

Les actions des boutons de la souris servant à manipuler le logiciel, sont répertoriées sur les tableaux ci-dessous :

Mode point	
Action	Fonction
Bouton du clic gauche	Créer un nouveau point sur le lieu de positionnement du pointeur de la souris
Bouton du clic droit	Sélectionner le point proche
Bouton du double clic droit	Afficher les coordonnées du point proche

Segment/ arc segment mode	
Action	Fonction
Bouton du clic gauche	Sélectionner les points début/ fin pour un nouveau segment
Bouton du clic droit	Sélectionner segment/ arc segment proche
Bouton du double clic droit	Afficher la longueur de l'arc / ligne segment

Mode milieu	
Action	Fonction
Bouton du clic droit	Créer un nouveau milieu sur l'actuelle position du pointer de la souris
Bouton du clic gauche	Sélectionner le milieu proche
Bouton du double clic droit	Afficher les coordonnées du milieu proche
Mode groupe	
Action	Fonction
Bouton du clic droit	Sélectionner le groupe associé avec l'objet proche

Tableau 3 : Les actions des boutons de la souris du processeur magnétique.

II.5.2.5. La manipulation du grillage de l'écran

Les grillages est un outil important, il aide beaucoup l'utilisateur à dessiner la géométrie.

Un grillage de couleur bleu s'applique à l'écran. La taille du grillage peut être réglée par l'utilisateur, en cliquant sur la barre d'outils avec la souris, cette barre d'outils est représentées sur la figure suivante



Figure II.4 : La barre d'outils de la manipulation du grillage

- Ø Le premier bouton est pressé par défaut, il nous donne un premier grillage.
- Ø Le second bouton n'est pas pressé par défaut, une fois on clique dessous
- Ø Le troisième bouton nous permet de régler la taille de la grille via la boîte de dialogue suivante :

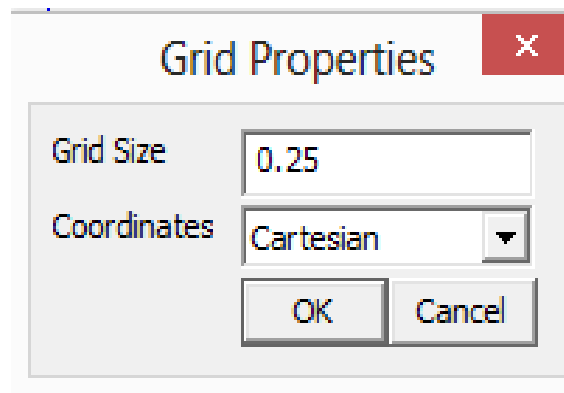


Figure II.5: La boîte de dialogue des propriétés de la grille

II.5.2.6. Définition du type de problème

Pour définir le type de problème à étudier, on doit remplir la boîte de dialogue sur la figure II.6 :

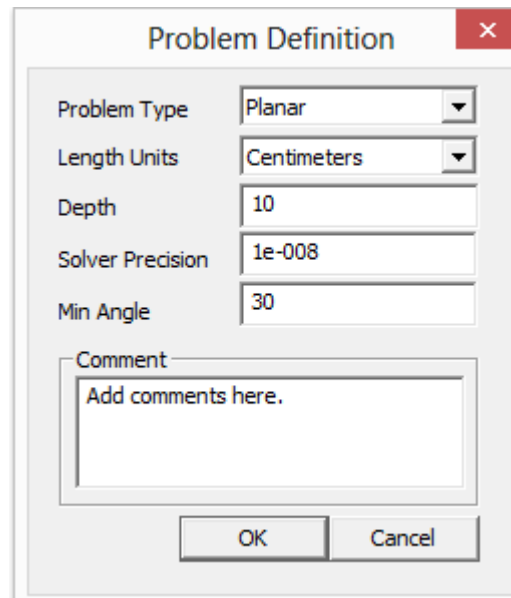


Figure II.6: La boîte de dialogue de la définition du problème

Sur la première case, on met le type de problèmes à étudier, soit la sélection plan cartésien ou la sélection axisymétrique.

Sur la deuxième case, on met l'unité des dimensions du modèle géométrique étudié.

Généralement ces unités sont : le millimètre, ou le centimètre.

Sur la troisième case, on met la fréquence, cette fréquence vaut zéro pour les cas magnétostatique, si cette fréquence est différente de zéro, le programme tiendra compte des analyses d'harmoniques.

II.5.2.7. Condition aux limites

La boîte de dialogue des propriétés des limites est utilisée pour spécifier les propriétés des segments ou des arcs de segment qui seront les limites du domaine de solution. Cette boîte de dialogue est schématisée sur la figure II.7 :

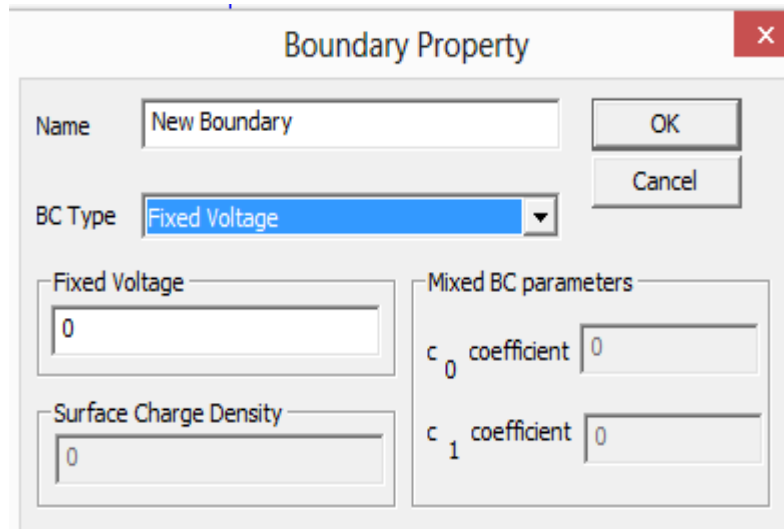


Figure II.7 : Boite de dialogue des conditions aux limites

La première sélection de cette boîte est le nom de la propriété. Le non par défaut est « New boundary » mais nous pouvons changer ce nom par la condition aux limites que nous définissons.

La seconde sélection est BC type, il est utilisé pour spécifier le type de condition aux limites. Généralement dans les problèmes électrostatiques de logiciel, le type utilisé est un voltage fixe.

II.5.2.8. Opération de calcul de champ et de visualisation

Pour cette opération, une barre d'outils composée de trois icônes est proposée :



Figure II.8 : Barre d'outils pour le début des analyses

- Ø **Première icône** : création du maillage. Une fois le maillage effectué, il nous renseigne sur le nombre de nœuds utilisés.
- Ø **deuxième icône** : calcul et résolution de l'équation de poisson.
- Ø **troisième icône** : visualisation des résultats obtenus.

II.5.2.9. Le post processeur électrostatique

La fonctionnalité du post processeur de FEMM est utilisée pour la généralisations des solutions des vues par le belasolv solver. Les **différentes** partions sont schématisées par la figure II.9:



Figure II.9 : Les boutons de la barre d'outils du mode graphe

Les courbes contours de visualisation les plus utiles pour avoir une bonne estimation de la solution et des lignes équipotentiellles. Par défaut, 19 lignes équipotentiellles sont dessinées quand la solution est initialement lancée dans le post processeur. Cette courbe est représentée par l'icône contours hachurée en noir (figure II.9).

Ø **Les courbes de densités** : la cartographe du champ est utile pour estimer rapidement la densité du flux dans divers parties de domaine. Par défaut la courbe de la densité du flux n'est pas affichée quand le post processeur démarre la première fois.

Mais elle peut être affichée en pressant la touche hachurée en couleurs (figure. II.9).

L'utilisateur peut sélectionner entre les courbes de la densité du potentiel (V) ou la magnitude de l'intensité du champ (E) ou la densité du flux électrique (D).

Ø **Les courbes vectrices**: pour avoir une bonne estimation du sens d'orientation du champ électrique, on a recours des vecteurs champs. Une flèche est alors dessinée dont la direction indique l'orientation du champ et la taille de la flèche indique la magnitude du champ.

Ø **Les courbes lignes** : quand le post processeur est sur le mode contours. De nombreuses valeurs du champ peuvent être dessinées le long du contour défini. En pressant l'une des icones sur la figure ci-dessous :



Figure II.10 : Courbe ligne, intégration, et bouton de la barre d'outils des résultats du conducteur.

II.6. Introduction à Lua Scripting

Lua Scripting est un langage évolué complet. Il remplit toutes les fonctionnalités remplies par langages orientés objet

Maintenant, nous allons faire un résumé des du contenu de Lua Scripting, en exposant les instructions principales.

II.6.1. Tracé de la géométrie

II.6.1.1. Les nœuds

Pour placer un nœud on fait : `addnode (x1, y1)`

Avec `x1, y1` : coordonnées du nœud à placer. Par exemple :

`addnode (0,0)`

`addnode (0, 1)`

Pour sélectionner un nœud, il faudra activer l'instruction :

`Selectnode (x1, y1).`

II.6.1.2. Les segments :

Pour placer un segment on fait `addsegment (x1, y1, x2, y2)`

`x1, y1, x2, y2` : les coordonnées des nœuds 1 et 2 à lier.

II.6.1.3. Les arcs de segments :

Pour placer un arc de segment on fait : `addarc (x1, y1, x2, y2, tet, nt)`

Avec :

Ø `tet` : angle à placer.

Ø nt : ouverture angulaire des segments.

II.6.2. Autres instructions de Lua Scripting

II.6.2.1. Ouverture des fichiers

Pour entamer un fichier lua, on commence par ouvrir nouveau fichier FEMM avec l'instruction : `newdocument ()`.

Cette instruction permet d'ouvrir un nouveau fichier FEMM (fichier de travail).

II.6.2.2 Déclaration de variables

Les variables qui seront utilisées seront celles qui concernent les dimensions de la géométrie pointe-plan qu'on a étudié. Soit r : rayon de la pointe, D , l'épaisseur du plan, h est la hauteur de la pointe par rapport à la terre, d et la distance inter-électrode.

Les instructions deviennent alors simplement :

`r = 0.2 cm`

`D = 1 cm`

`h = 0.7 cm`

`d = 0.2 cm`

II.6.2.3. Définition du type de problème

Cette instruction permet de définir le type de problème à traiter (fréquence, dimension, type, précision). On prend l'exemple suivant :

```
_probdef("centimeters","planar",1.e-8,10)
```

II.6.2.4. Déclaration des matériaux utilisés

Pour déclarer un matériau on procède de la manière suivante :

```
_addmaterial("vide", 1, 1, 0)
```

A noter les zéros et les uns désigne les grandeurs caractérisant le matériau.

II.6.2.5. Condition aux limites

La seule condition aux limites que nous utiliserons sera la condition de Dirichlet que nous déclarons comme suit :

```
ei_addboundprop("dir", 0, 0,0,0)
```

```
ei_addboundprop("dir1", 1000, 0,0,0)
```

Pour appliquer cette condition nous allons procéder comme suit :

d'abord, il faut délimiter le contour externe, en appliquant la condition (Setsegmentprop("dir", 0, 0,0,0)); en fin en appliquant pour la pointe la 2^{ème} condition (Setsegmenttprop ("dir1", 1000, 0,0,0)).

II.7. Equations à résoudre

Les équations ci-dessous sont celles caractérisant les problèmes électrostatiques

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \dots \dots \dots (1)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0 \dots \dots \dots (2)$$

$$\vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E} \dots \dots \dots (3)$$

$$\vec{E} = -\vec{\nabla} \cdot V \dots \dots \dots (4)$$

$$-\epsilon \nabla \cdot \nabla \vec{E} = \rho$$

Les équations (1) et (3) donne :

$$\epsilon \cdot \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \rho \dots \dots \dots (5)$$

On remplace (4) dans (5) :

$$\epsilon \cdot \vec{\nabla} \cdot (-\vec{\nabla} \cdot V \vec{E}) = \rho$$

En fin on trouve :

Ø Equation de Poisson :

$$\Delta V = \rho / \epsilon$$

En absence de la charge d'espace :

Ø Equation de Laplace :

$$\Delta V = 0$$

II.8. Conclusion

Le logiciel FEMM, et Lua scripting nous a permis de faire un calcul rapide sur la décharge pointe plan. Cette étude théorique est très bénéfique, dans la mesure où elle permis d'évaluer le degré d'influence des paramètres de la structure sur les grandeurs étudiées telle que le champ.

CHAPITRE III
ÉTUDE SANS
PRÉSENCE DE LA
CHARGE D'ESPACE

III.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter les différents résultats obtenus avec le logiciel FEMM en absence de la charge d'espace. En premier lieu, nous allons intéresser aux cartographies globales du champ électrique en faisant varier la distance inter-électrode (d), et le rayon de courbure de la pointe (r). En second lieu, nous allons représenter les différentes courbes de la variation du champ électrique en fonction de la distance inter-électrode (d) et le rayon de courbure (r), en fin nous allons tirer les observations des cartographies du champ et donner des interprétations essentielles des courbes.

III.2. La structure étudiée

Les dimensions de la structure étudiée sont exposées sur la figure (III.1) A noter que ces dimensions sont en centimètre.

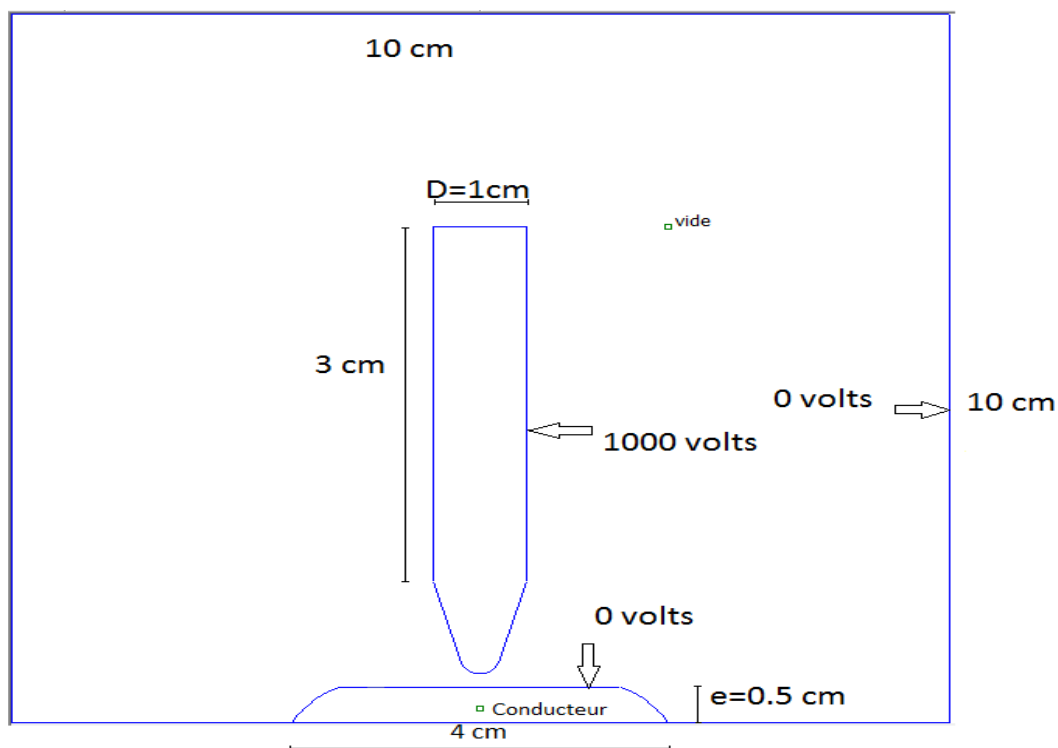


Figure.III.1 : La structure étudiée

III.3. Calcul des coordonnées de la pointe

On a θ , après les calculs on trouve que

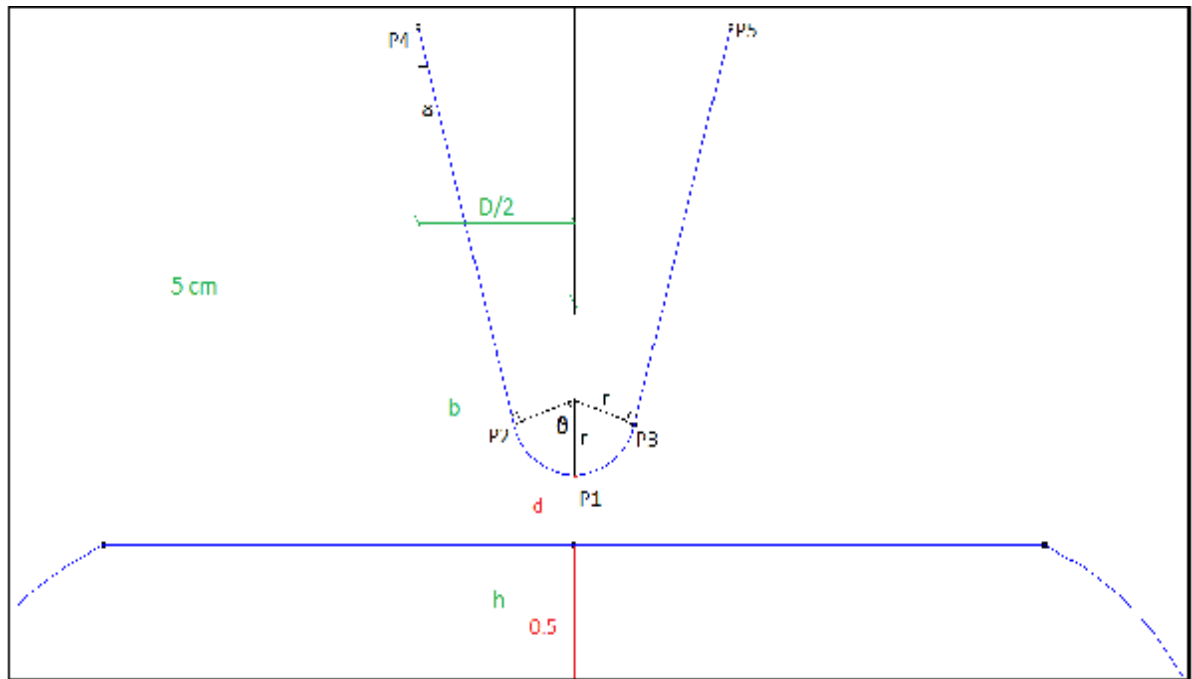


Figure.III.2 : Représentation des coordonnées de la pointe

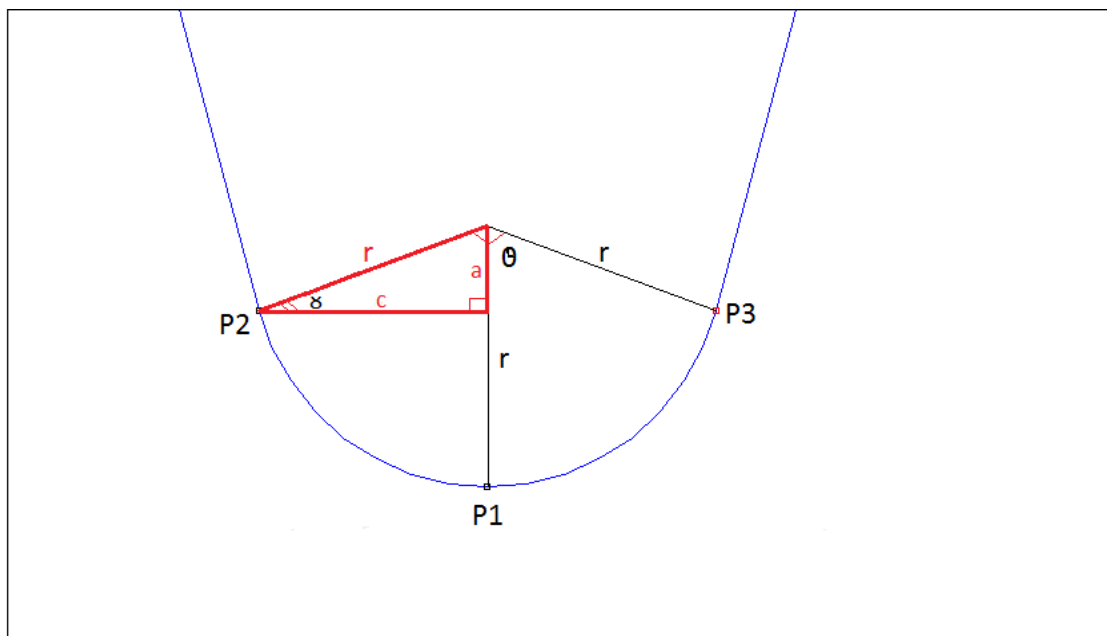


Figure.III.3 : Représentation de la pointe

$a = r \cdot \cos \theta$ (1)

$c = r \cdot \sin \theta$ (2)

$h = 0.5 + d + r - a$, donc :

$$h = 0.5 + d + r (1 - \cos \theta)$$

$$P_2(x,y) = P_3(x,y) = ($$

$$P_1(x,y) = (5, d+0.5)$$

$$b = D/2 - c, \text{ mais } c = r \cdot \cos \theta$$

$$\text{Donc : } b = D/2 - r \cdot \cos \theta$$

$$P_4(x,y) = P_5(x,y) = (5 - D/2, h + b / \tan \theta)$$

III.4. Les cartographie du champ électrique

III.4.1. Le rayon de la pointe (r) varie, la distance inter-électrode (d) est fixe

Pour $d = 0.2 \text{ cm}$, on a :

Ø Le rayon de la pointe (r) = 0.02 cm

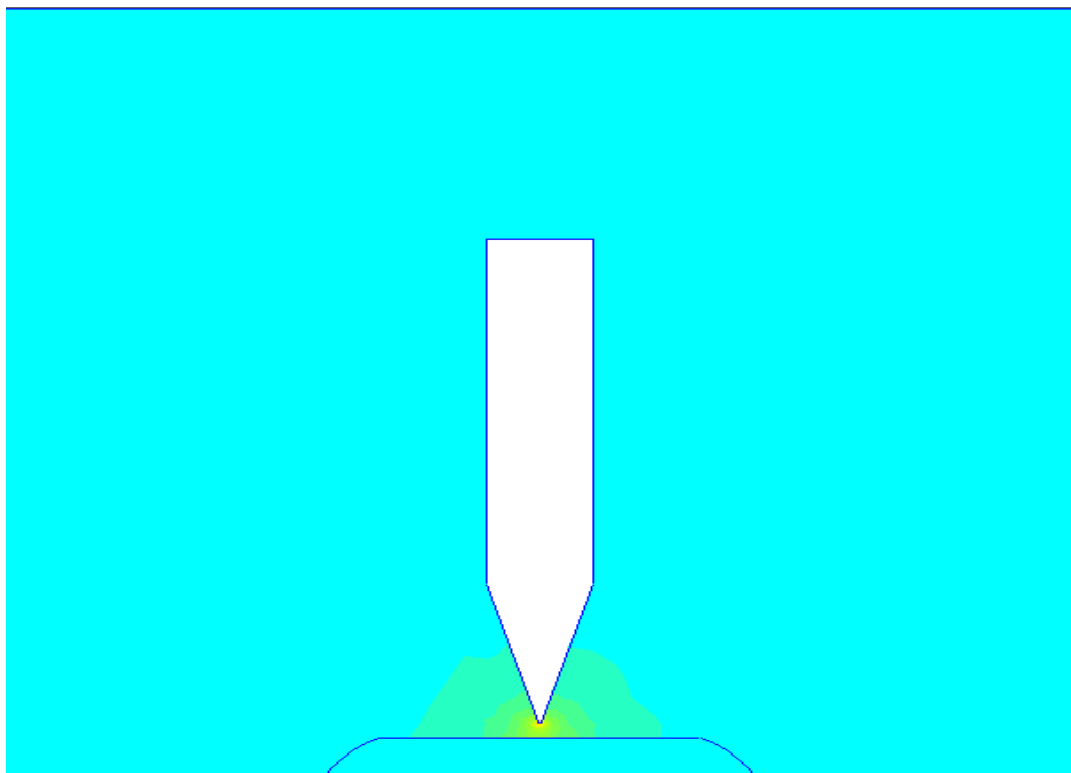


Figure III.4 : a- La cartographie de champ pour un rayon de courbure $r = 0.02$

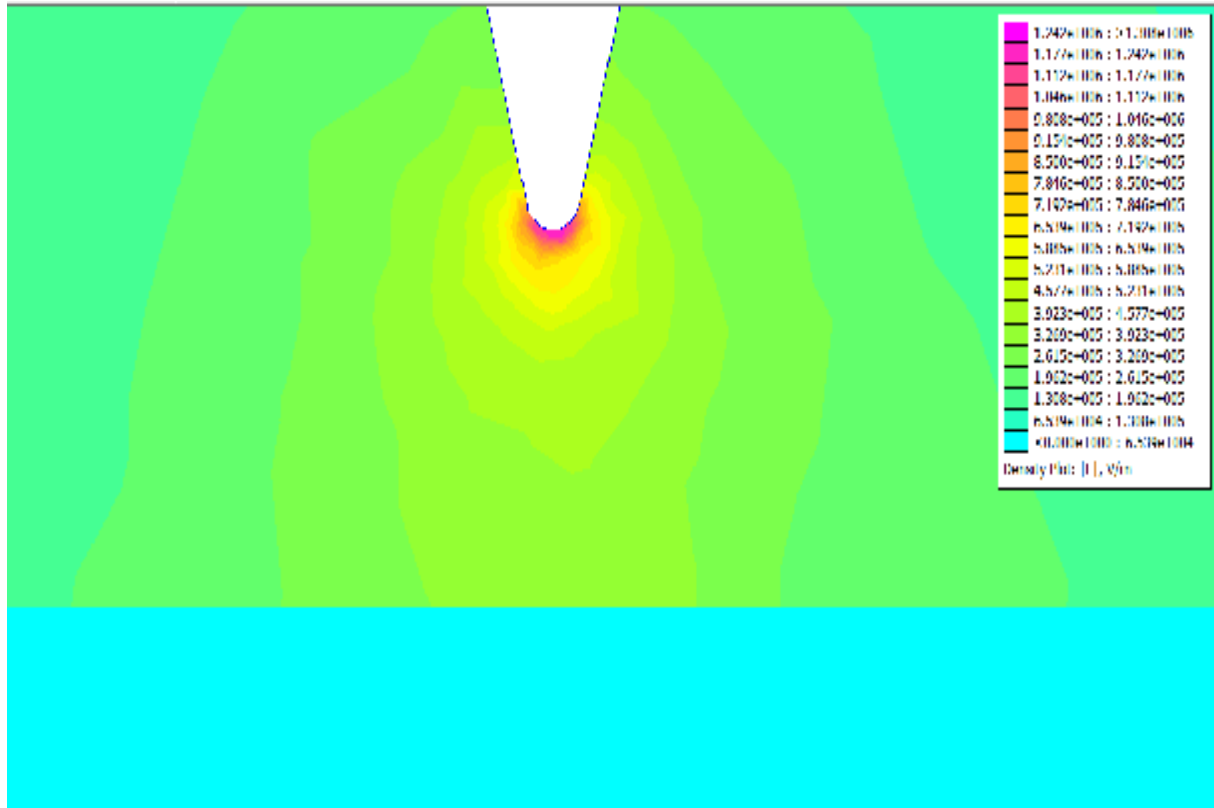


Figure III.4 : b- la cartographie de champ avec effet loupe

Ø Le rayon de la pointe (r) = 0.08 cm

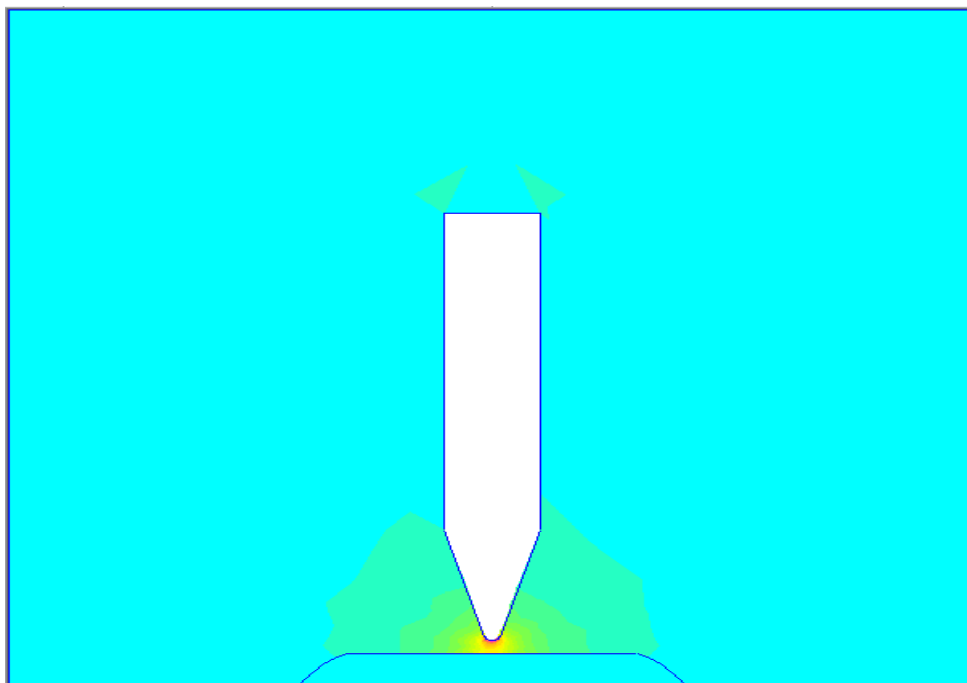


Figure III.5 : a- La cartographie de champ pour un rayon de courbure r = 0.08 cm

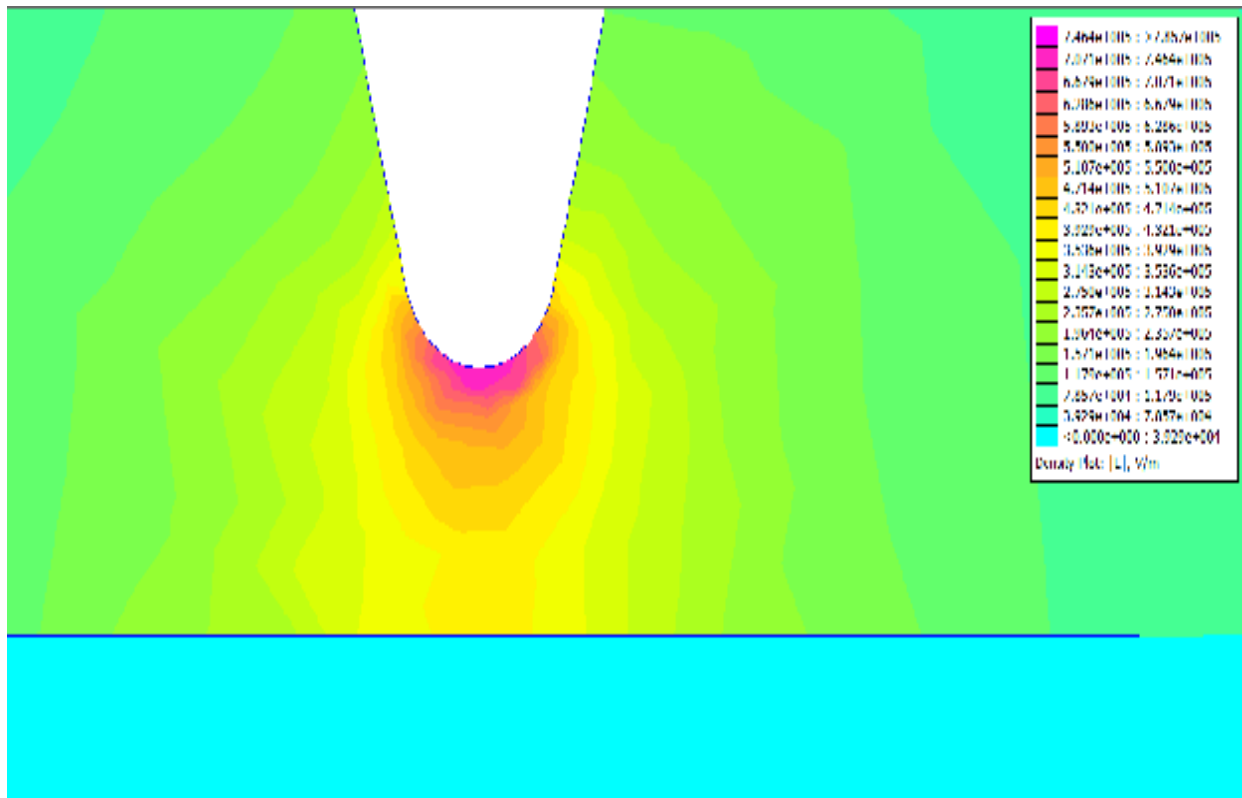


Figure III.5 : b- la cartographie de champ avec effet loupe

Ø Le rayon de la pointe (r) = 0.5 cm

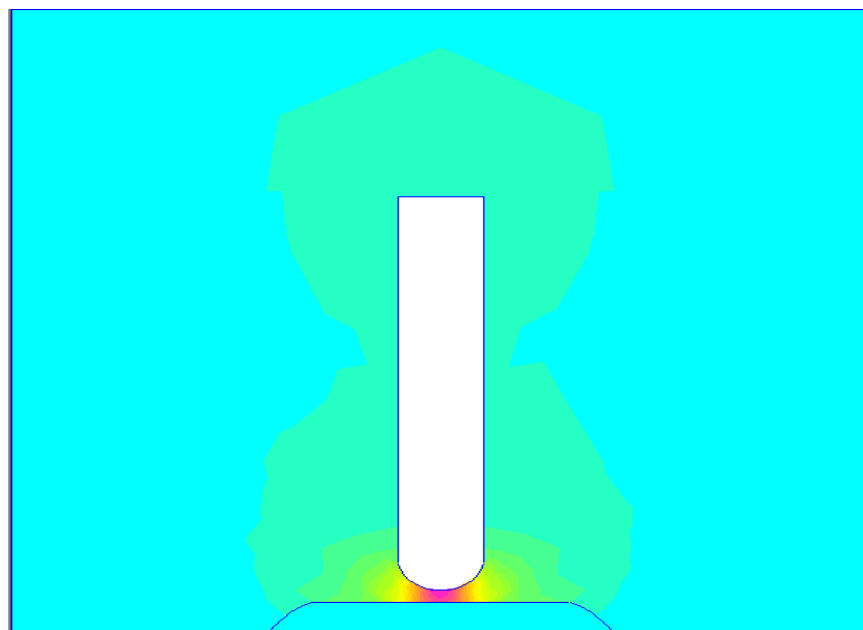


Figure III.6: a- La cartographie de champ pour un rayon de courbure r = 0.5

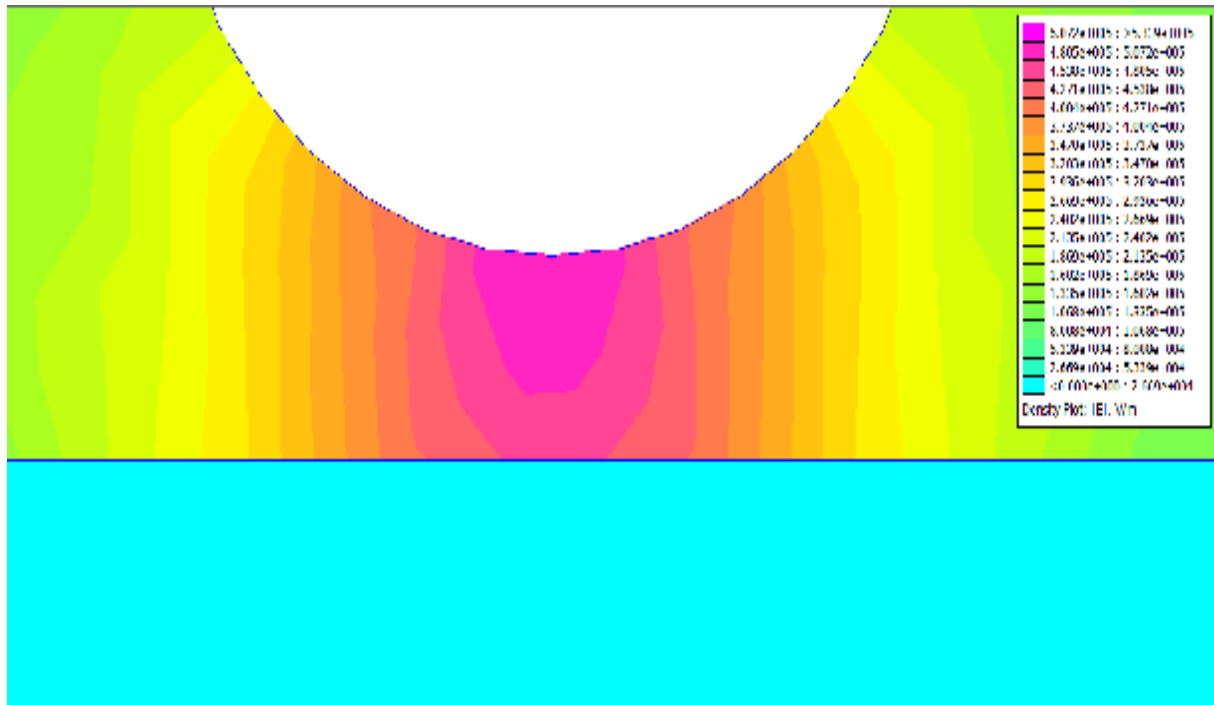


Figure III.6 : b- la cartographie de champ avec effet loupe

III.4.2. Le rayon de la pointe (r) est fixe, la distance inter-électrode (d) varie

Pour $r = 0.2$ cm, on a :

Ø La distance inter-électrode (d) = 0.2 cm

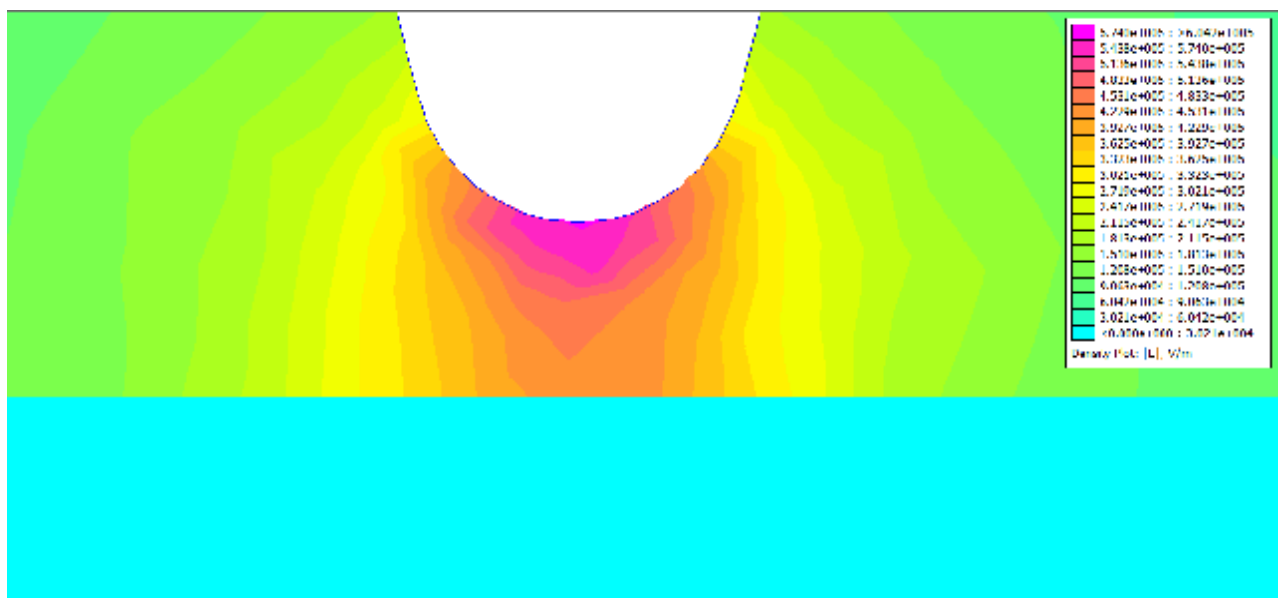


Figure III.7 : La cartographie du champ pour une distance inter-électrode $d = 0.2$ cm (effet loupe)

Ø La distance inter-électrode (d) = 1 cm

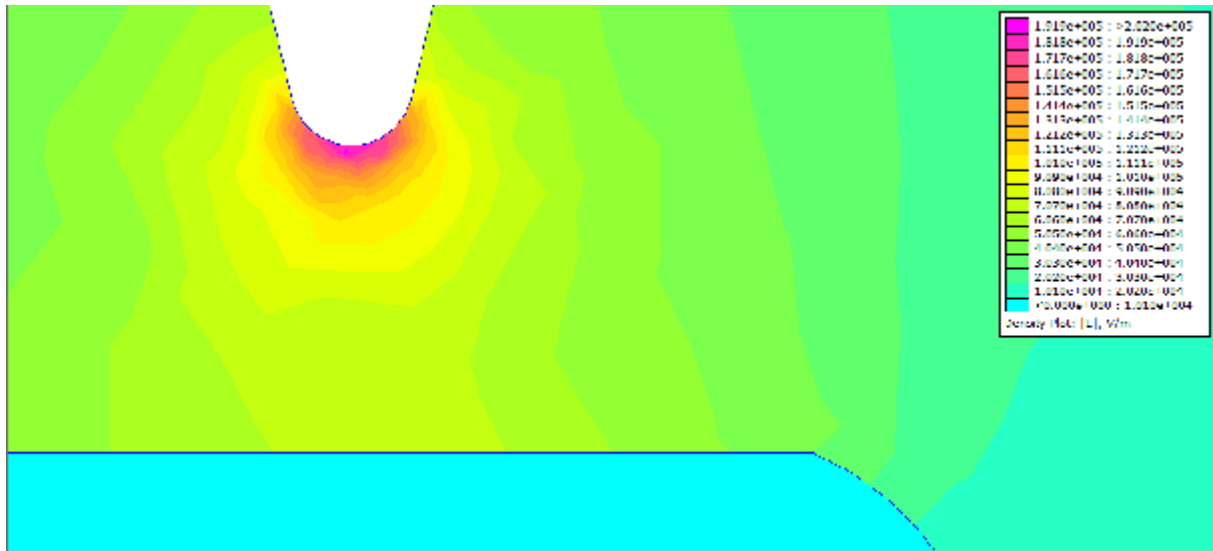


Figure III.8 : La cartographie de champ pour une distance inter-électrode d = 1 cm (effet loupe)

Ø La distance inter-électrode (d) = 2 cm

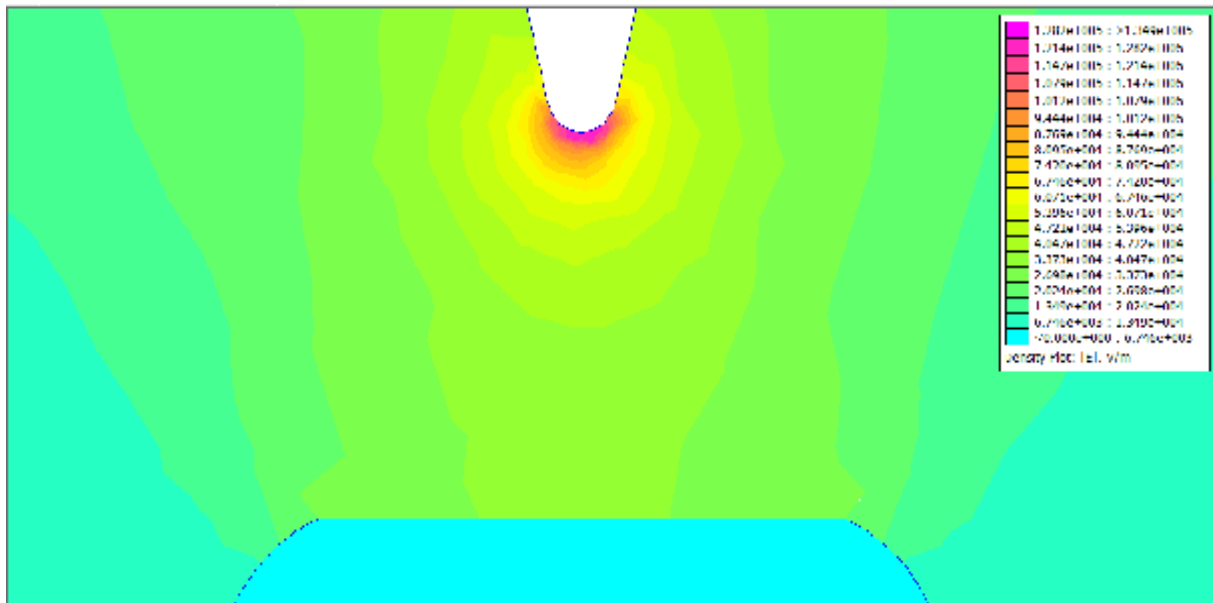


Figure III.9 : La cartographie de champ pour une distance inter-électrode d = 2 cm (effet loupe)

III.5. Observations sur les cartographies du champ électrique

Lorsqu'on augmente le rayon de courbure, on observe que la valeur du champ électrique au voisinage de la pointe diminue, par exemple pour la première cartographie, le champ maximal est de 13.08 KV/cm, pour un rayon de courbure de 0.02 cm, tandis que le champ maximal dans la 2^{ème} cartographie est de 7.857 KV/cm, pour un rayon de courbure de 0.08cm, et pour la troisième cartographie le champ diminue jusqu'à 5.339 KV/cm (champ uniforme) pour un rayon de courbure de 0.5 cm. Donc on peut dire que l'augmentation du rayon de courbure de la pointe diminue le champ électrique.

Lorsqu'on augmente la distance inter-électrode (d), on observe que le champ électrique diminue au voisinage de l'électrode pointe, par exemple la valeur du champ pour la première cartographie et de 6.042 KV/cm (d=0.2 cm), tandis que pour la 2^{ème} cartographie la valeur maximale du champ est de 2.02 KV/cm (d=1cm), et pour la troisième cartographie le champ diminue jusqu'à 1.349 KV/cm pour une distance (d=2cm). On constate que l'augmentation de la distance inter-électrode diminue le champ électrique.

III.6. Cartographies du potentiel électrique

Quelque soit la valeur du rayon (r) et de la distance inter-électrode (d) on a les cartographies suivantes:

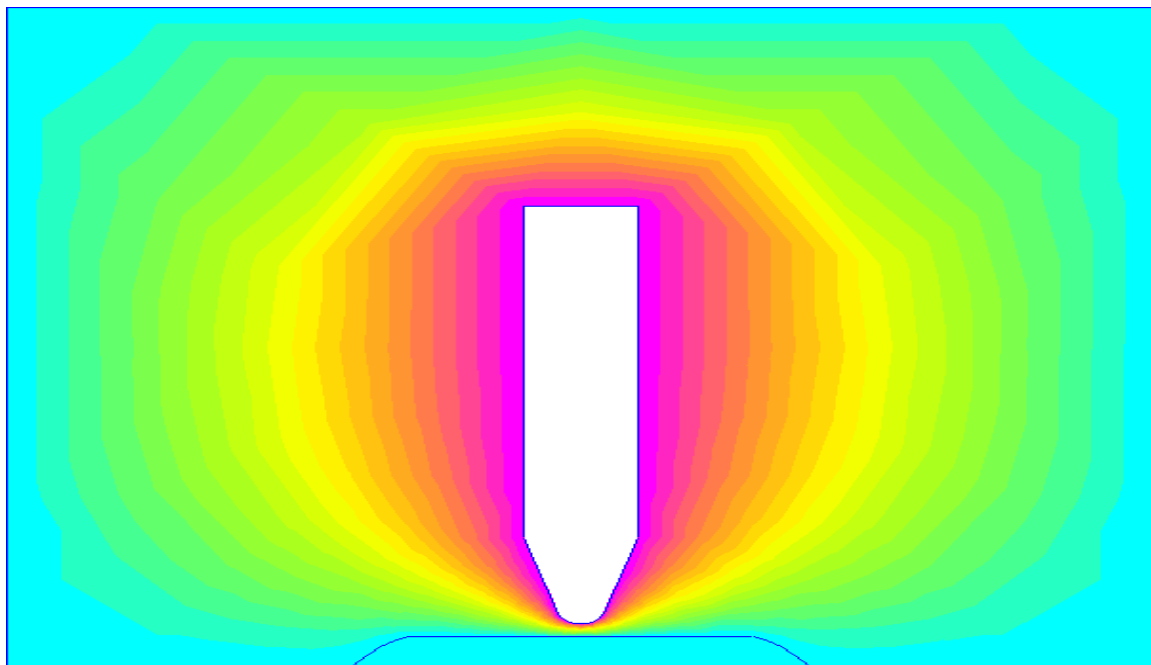
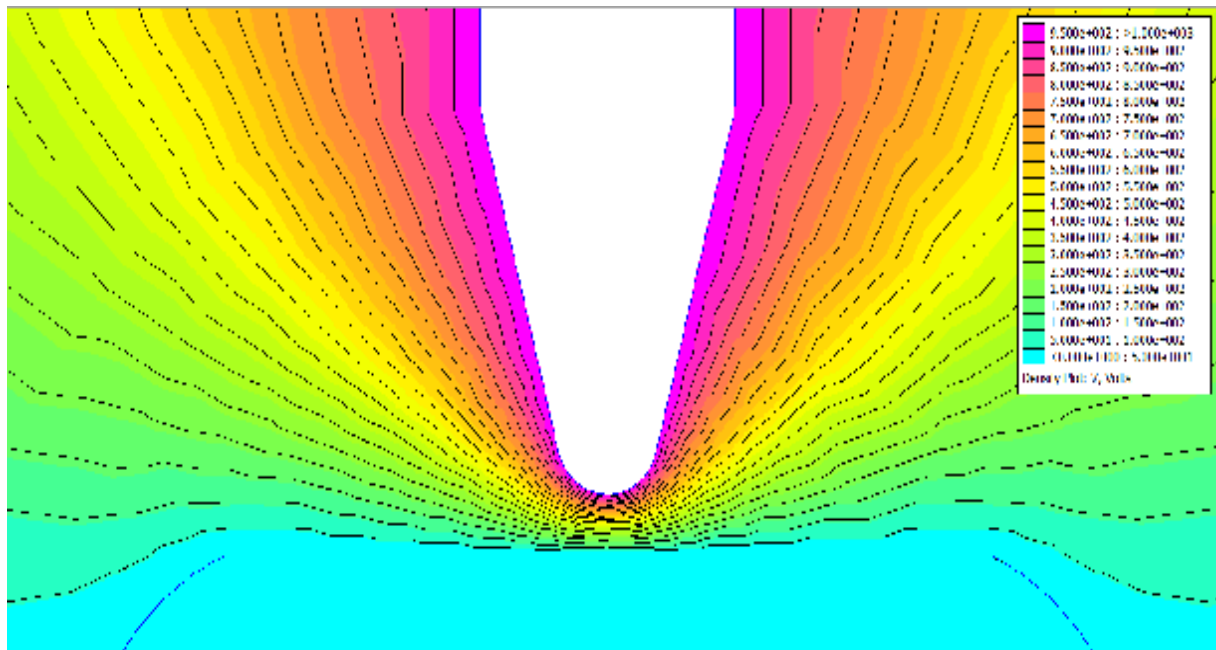


Figure III.10 : a-La cartographie de potentiel électrique (effet loupe)



**Figure III.10 : b-La cartographie de potentiel électrique
(Représentation avec des lignes équipotentielles)**

III.7. Observations sur les cartographies du potentiel électrique

D'après les cartographies du potentiel électrique représentées au-dessus ; on remarque que quelque soit la valeur du rayon de la courbure (r) et la distance inter-électrode (d), la valeur du potentiel électrique reste la même. Elle est très importante au voisinage de l'électrode pointe 1000 volts, cette valeur diminue progressivement jusqu'à atteindre une valeur de 0 volts au tour de l'électrode plane et de la cage de Faraday.

III.8. Représentation des courbes

Dans ce paragraphe nous allons convertir les résultats obtenus de la simulation sur FEMM, sous forme de courbes

La première courbe représente la variation du champ électrique en fonction de la distance inter-électrode (d), pour trois valeurs de rayon de la pointe.

La deuxième courbe représente la variation du champ électrique en fonction du rayon de courbure (r) pour trois valeurs de la distance inter-électrode (d).

III.8.1. Courbes du champ électrique (E) en fonction de la distance inter-électrode

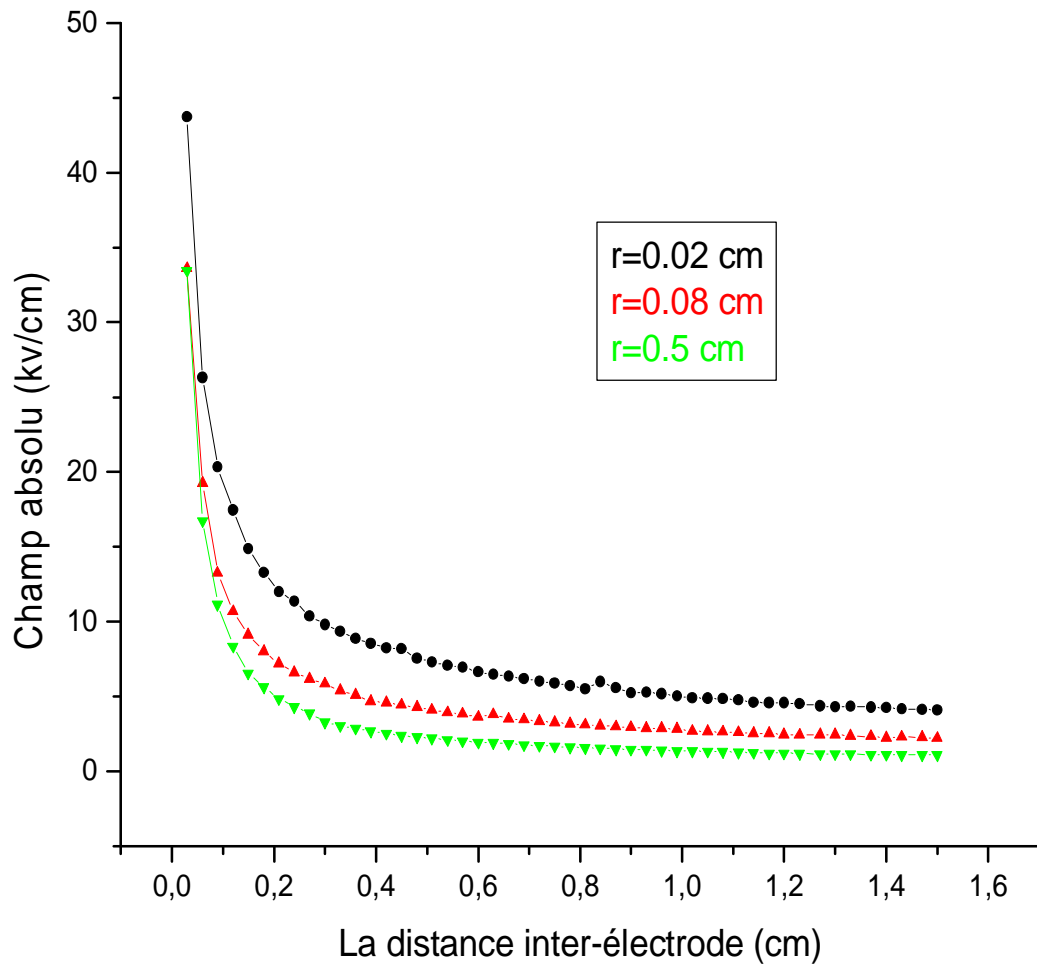


Figure.III.11 : courbe E (KV/cm) en fonction de d (cm)

III.8.2. Courbes du champ électrique (E) en fonction du rayon de courbure (r)

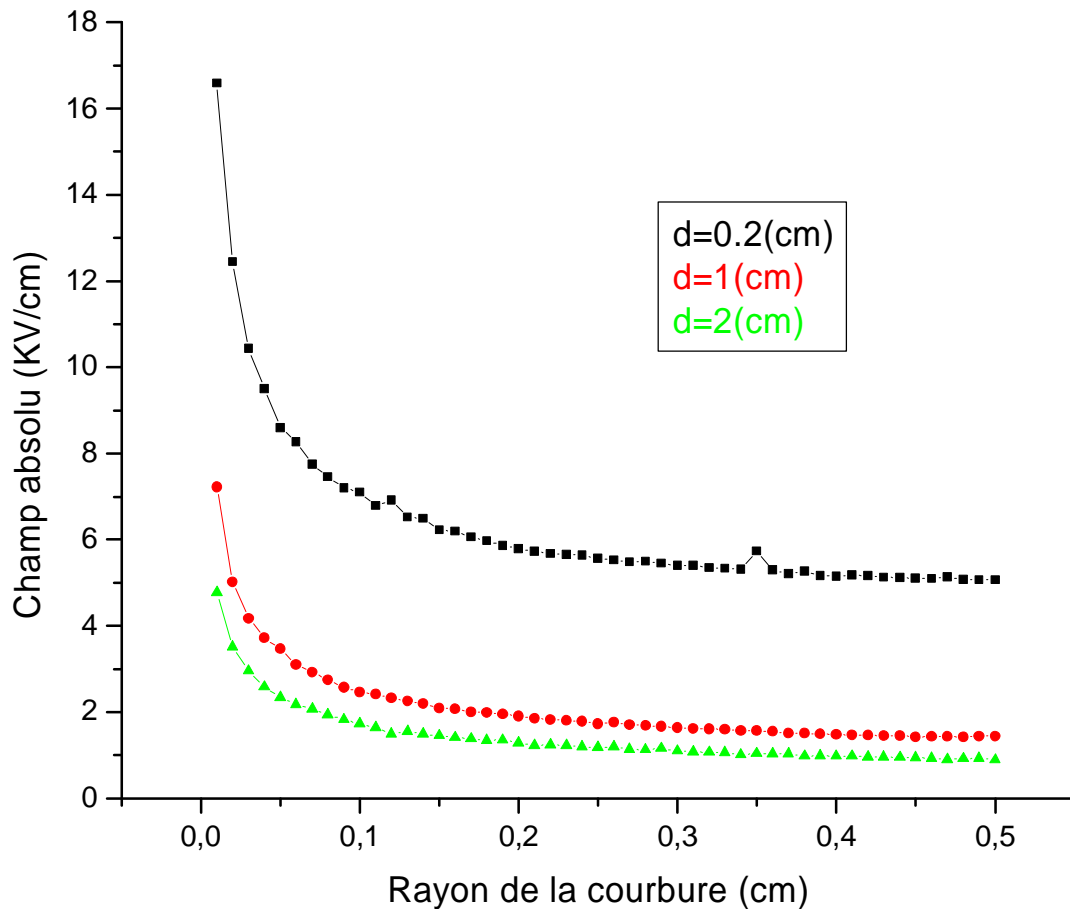


Figure.III.12 : E (KV/cm) en fonction r (cm)

III.9. Interprétation des courbes

Ø **Interprétation de la courbe $E=f(d)$** : En analysant la courbe III.11, on voit que le champ électrique, prend des valeurs très importantes pour des petites distances inter-électrodes, on remarque aussi lorsque on augmente le rayon de courbure de la pointe cette valeur de champ diminue. Par exemple, pour un rayon de courbure de 0.02 cm, la valeur de champ maximal est de 43.73 KV/cm pour une distance inter-électrode $d=0.03$ cm, mais le champ diminue progressivement jusqu'à atteindre une valeur de 4.09 KV/cm pour $d=1.5$ cm, on prend le même exemple avec les mêmes distances

inter-électrodes mais on augmente le rayon de courbure de la pointe jusqu'à 0.5 cm on remarque que le champ maximal diminue jusqu'à 33.45 KV/cm.

On constate que le champ électrique diminue progressivement avec l'augmentation de la distance inter-électrode.

Ø **Interprétation de la courbe $E=f(r)$** : En analysant la courbe de la figure III.12, on constate que pour les faibles valeurs du rayon de courbure, le champ prend des valeurs très importantes 16.59 KV/cm. Alors qu'il perd en intensité lorsqu'on augmente le rayon de la courbure de la pointe (5.06 KV/cm pour $r=0.5$ cm), on remarque aussi l'augmentation de la distance inter-électrode (d) diminue la valeur de champ du (4.78 KV/cm pour $d=2$ cm).

D'après la figure III.12, on peut dire que le champ électrique diminue progressivement avec l'augmentation de rayon de la pointe.

III.10. Conclusion

D'après les courbes et les cartographies du champ électrique, on constate que :

- Ø Le champ diminue avec l'augmentation de rayon de courbure de la pointe.
- Ø Le champ diminue avec l'augmentation de la distance inter-électrode.

CHAPITRE IV
ETUDE AVEC
PRÉSENCE DE LA
CHARGE D'ESPACE

IV.1. Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons considéré une structure pointe-plan avec comme principale hypothèse l'absence totale de charge d'espace. Dans ce chapitre, nous allons étudier la même structure en considérant l'apparition de charges (naturelle ou forcée) dans l'espace dans le cas de deux matériaux de différentes permittivités (germanium et mica) avec le logiciel FEMM.

En premier lieu, nous allons nous intéresser aux cartographies globales du champ et du potentiel électrique, pour différents volumes occupés par la charge d'espace. En second lieu, nous allons tirer les observations et donner des interprétations essentielles à partir des cartographies et des courbes de champ et de potentiel électrique.

IV.2. La densité volumique de la charge dans l'air atmosphérique

Le nombre d'électrons libres et d'ions qui sont présents dans l'atmosphère de manière naturelle est très faible ; ainsi, dans l'atmosphère terrestre, le nombre de paires électrons /ion par rayonnement naturel est 10^7 par mètre cube et par seconde, et à l'état permanent la concentration en ions est de l'ordre de 10^9 par mètre cube [14].

IV.3. Calcul de la densité volumique de la charge d'espace

Pour la suite de l'étude, nous allons considérer une densité de charge maximale, répartie dans un volume fini, situé entre les deux électrodes

$$C=Q/q \dots\dots\dots(1)$$

C, représente la charge molaire

Q la quantité de charge électrique

q le nombre de moles occupé par un volume unitaire d'air (1 m^3)

La charge molaire est donnée par l'expression suivante :

$$C_F=e.N_a$$

où e représente la charge élémentaire ($e=1,602.10^{-19}$)

et N_a le nombre d'Avogadro ($N_a=6,02214.10^{23}$)

$$C_F = 96485 \text{ C/Mol}$$

L'air contient de façon générale 20% d'oxygène (O₂) et 80% d'azote (N₂)

$$M_{\text{air}} = (0,2 \times 32) + (0,8 \times 28) = 28,8 \text{ g/mol}$$

Une mole d'air pèse donc environ 28,8g

$$\rho_{\text{air}} = 1,293 \text{ kg/m}^3$$

Le nombre de moles contenues dans 1 m³ d'air est alors comme suit :

$$q = (1,293 \cdot 10^3) / 28,8 = 45 \text{ mol}$$

D'après l'équation (1), on trouve [15] :

$$Q = 4341825 \text{ C}$$

$$\text{Or } Q = \rho \cdot V \dots \dots \dots (2)$$

D'après l'équation (2), la densité de charge maximale est de : $\rho = 4341825 \text{ C/m}^3$

IV.4. Structure étudiée :

La structure précédemment étudiée est reprise pour l'étude du cas où le rayon de courbure de la pointe vaut 0,2 cm et l'espace inter électrode vaut 2 cm.

L'étude se fait dans un espace en coordonnées cartésiennes, ce qui nécessite une adaptation de la valeur de la densité de charge.

La charge d'espace est supposée concentrée dans un espace d'abord sphérique, puis dans un espace sous forme de tube. La densité de charge est supposée fixe, ce qui veut dire que la charge augmente.

IV.5. Cartographies de champ et de potentiel électrique

On va fixer la densité de la charge ($\rho = 4341825 \text{ C/m}^3$) ensuite, on va calculer à chaque fois la nouvelle quantité de charge (Q) et la densité ρ' qui correspond à cette dernière.

a-représentation avec des lignes équipotentiels

Ø Cas d'un volume sphérique (petit volume)

A partir de l'équation (2), on trouve que, $57868,737 \text{ C/m}^3$, et que la quantité de charge qui occupe ce volume vaut: $Q=1,818.10^{-2} \text{ C}$

Sur la figure IV.1, on voit l'influence de la petite charge sur le champ électrique, et on constate l'effet de présence d'un diélectrique (mica et germanium).

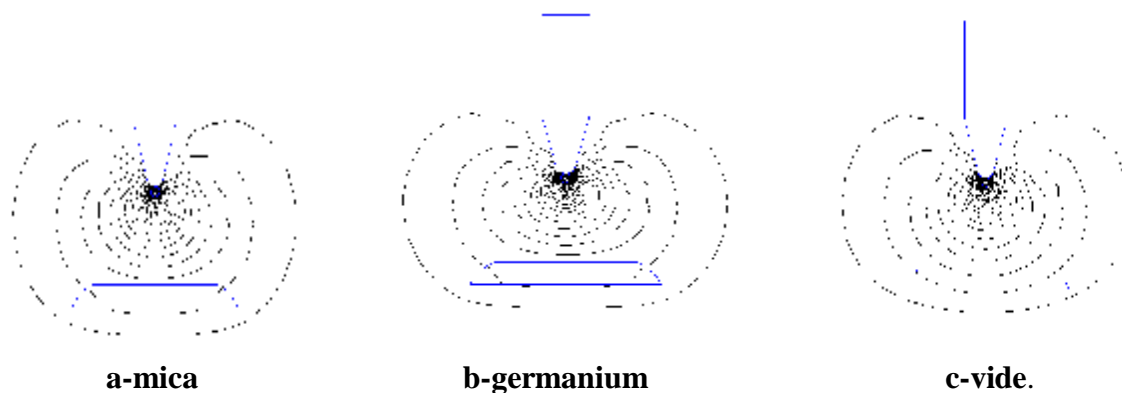


Figure IV.1 : lignes équipotentiels de champ pour une petite charge

Ø Cas d'un volume moyen

A partir de l'équation (2), on trouve que, C/m^3 , et que la quantité de charge qui occupe ce volume vaut: $Q= 0,2295 \text{ C}$

Sur la figure IV.2, on voit l'influence de la charge moyenne sur le champ électrique, et on constate l'effet de la présence d'un diélectrique (mica et germanium).

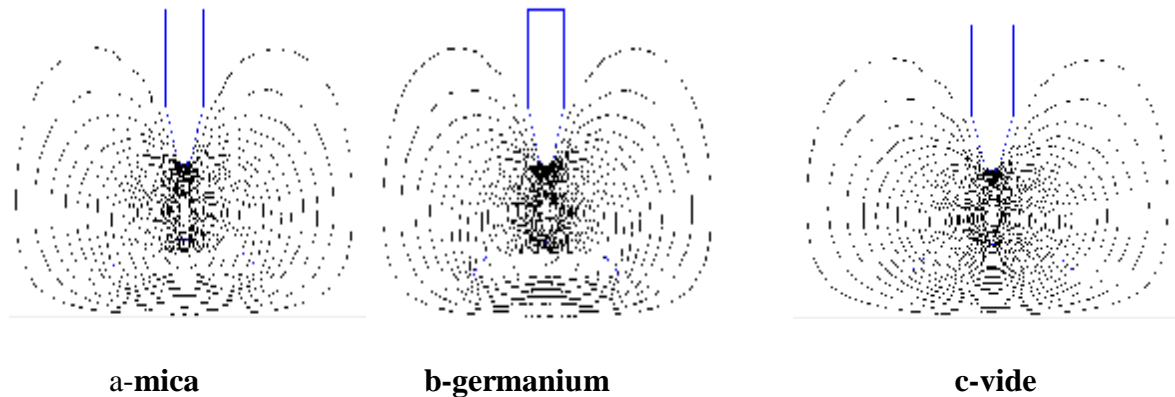


Figure IV.2 : lignes équipotentiels de champ pour une moyenne charge

Ø Cas d'un grand volume

A partir de l'équation (2), on trouve que, $67347,98 \text{ C/m}^3$, et que la quantité de charge qui occupe ce volume vaut: $Q=0.2636 \text{ C}$

Sur la figure IV.3, on voit l'influence de la grande charge sur le champ électrique, et on constate l'effet de présence d'un diélectrique (mica et germanium).

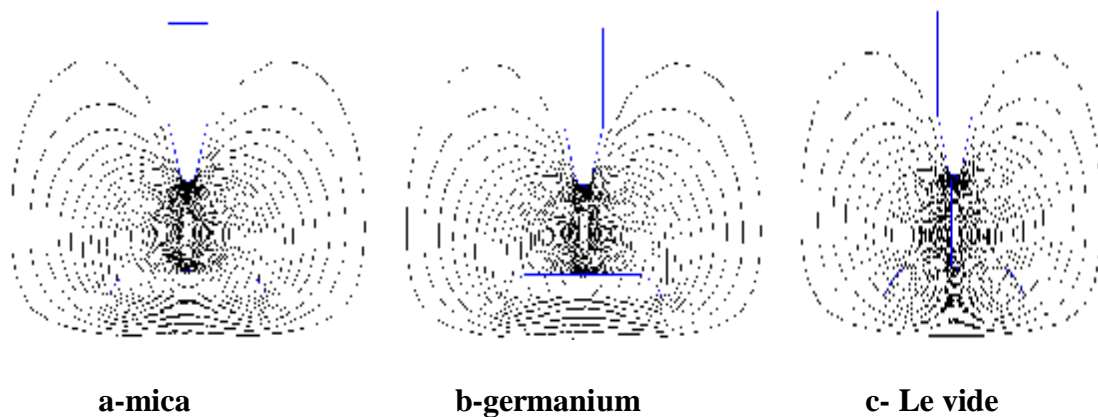
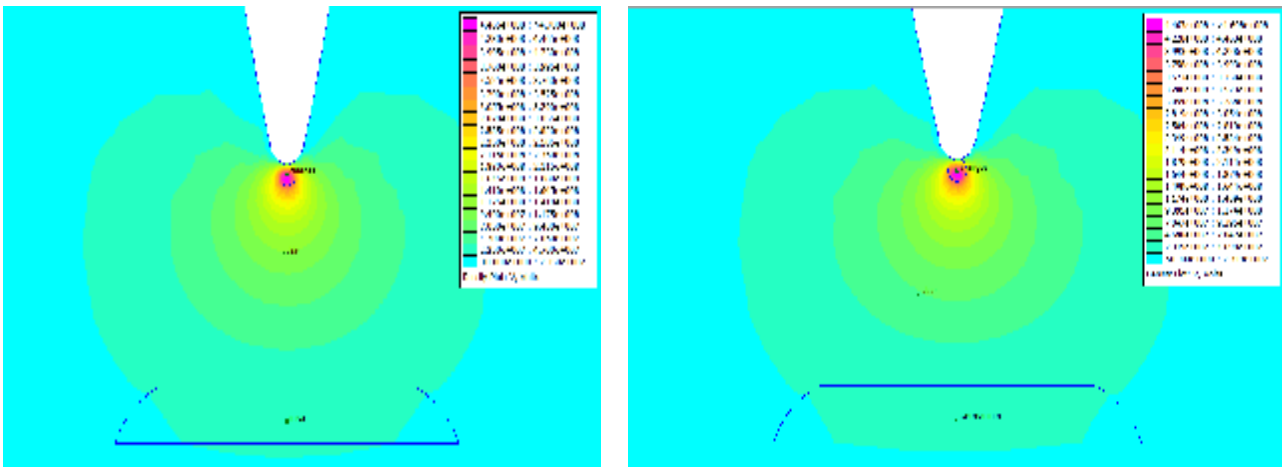


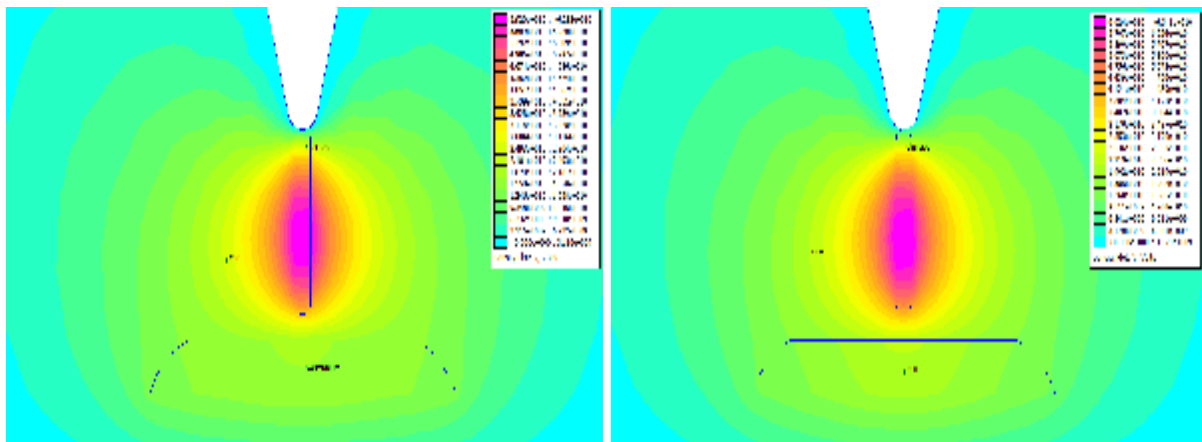
Figure IV.3 : lignes équipotentiels de champ pour une grande charge

b- représentation avec l'effet loupe

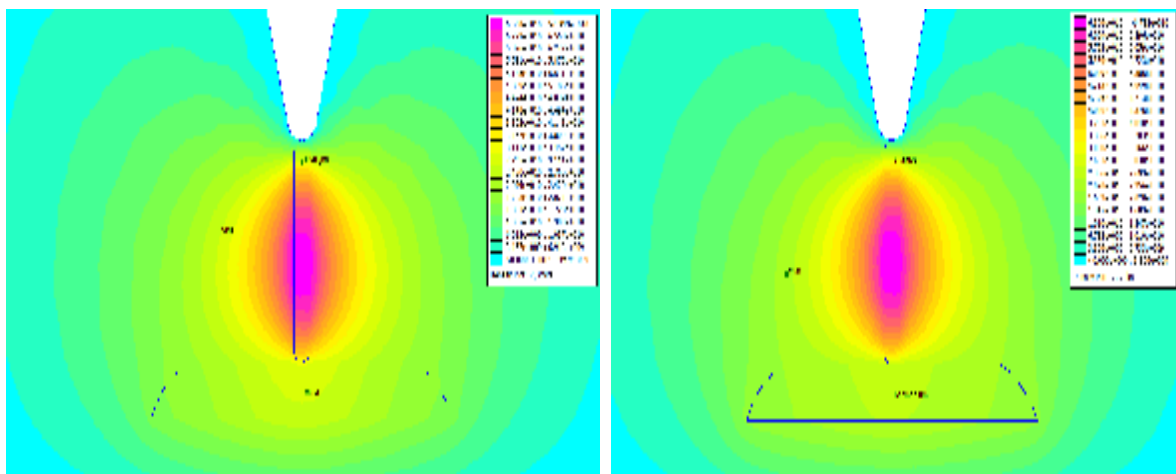
Ø Le potentiel électrique



a- cas d'un volume sphérique (mica) b- cas d'un volume sphérique (germanium)



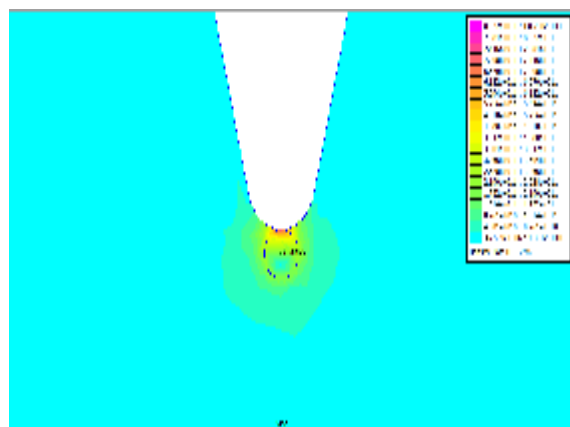
c- Cas d'un volume moyen (germanium) d- cas d'un volume moyen (mica)



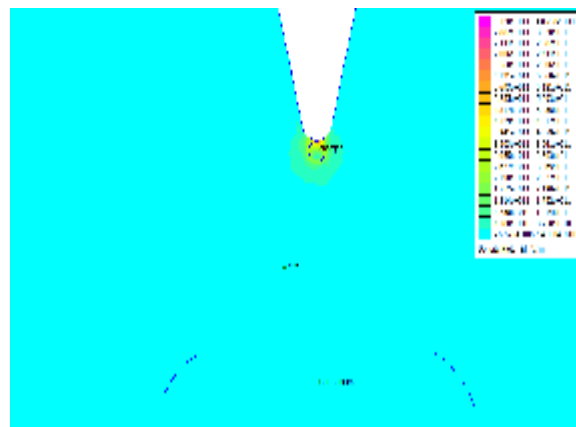
e- cas d'un grand volume (mica) f- cas d'un grand volume (germanium)

Figure IV.4 : les cartographies de potentiel électrique

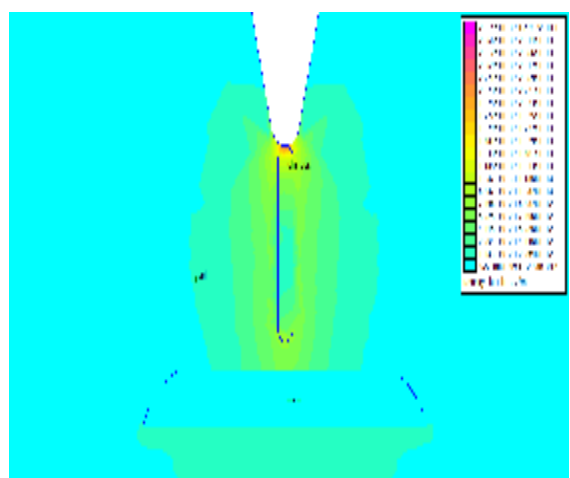
Ø Le champ électrique



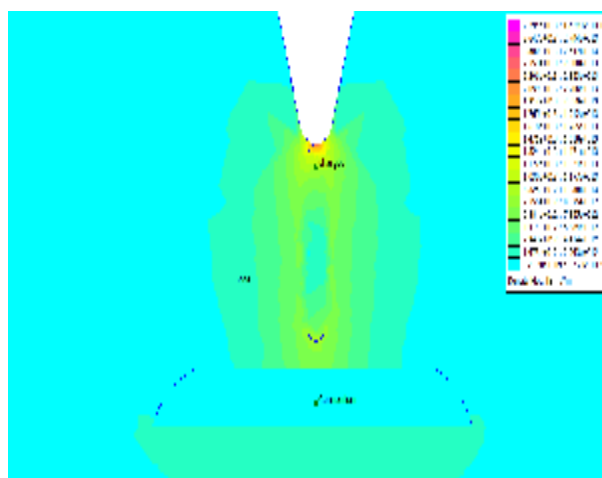
a- cas d'une sphère (mica)



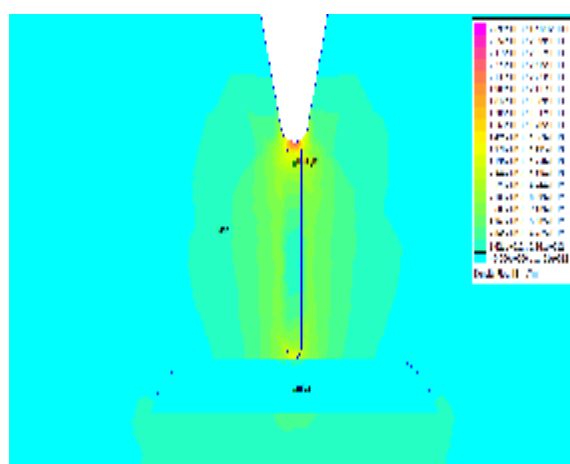
b- cas d'une sphère (germanium)



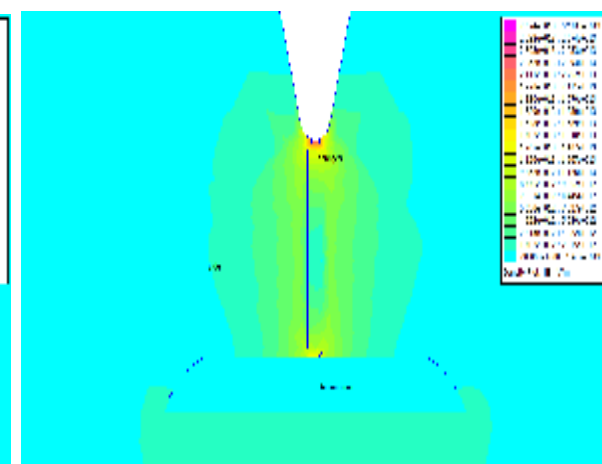
c- cas d'un volume moyen (mica)



d- cas d'un volume moyen (germanium)



e- cas d'un grand volume (mica)



f- cas d'un grand volume (germanium)

Figure IV.5 : les cartographies de champ électrique

IV.6. Commentaires sur les Cartographies de champ et de potentiel électrique

Nous remarquons que lorsqu'on augmente le volume de la charge d'espace la valeur du champ et du potentiel électrique augmente, à cause de l'évolution de la quantité de charge qui occupe ce volume.

Nous constatons aussi que quand on augmente permittivité relative de l'électrode plane (Germanium), la valeur du champ et du potentiel électrique diminue. par contre si cette électrode est loin de la charge, n'influe pas (la même valeur pour les deux cas germanium et le mica).

Ø Les observations tirées à partir des lignes équipotentiels

La densité des lignes du champ électrique est plus intense lorsque la quantité de charge est plus élevée.

La présence du diélectrique dans le système engendre une déformation des lignes du champ électrique.

Lorsqu'on augmente la permittivité de diélectrique les lignes du champ entrant diminuent.

IV.7. Les courbes de potentiel et du champ électriques

Nous allons étudier le comportement de champ et de potentiel électrique le long de l'axe vertical de l'électrode.

a- Les courbes de potentiel

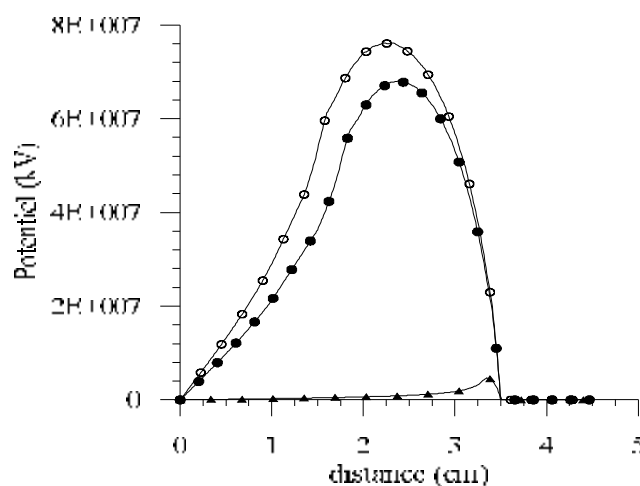


Figure IV. 6 : Variation du potentiel le long de l'axe de l'électrode en absence de diélectrique
(o : grand volume ; Δ : petit volume ; \bullet : volume moyen)

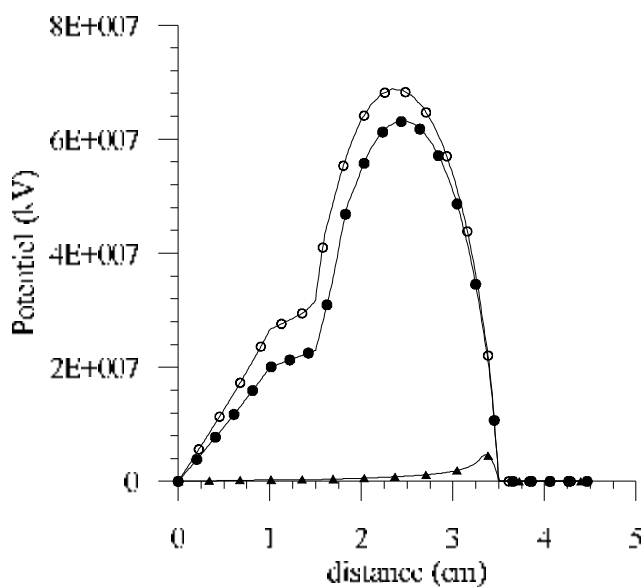


Figure IV. 7 : Variation du potentiel le long de l'axe de l'électrode en présence du diélectrique en mica

(o : grand volume ; Δ : petit volume ; ● : volume moyen)

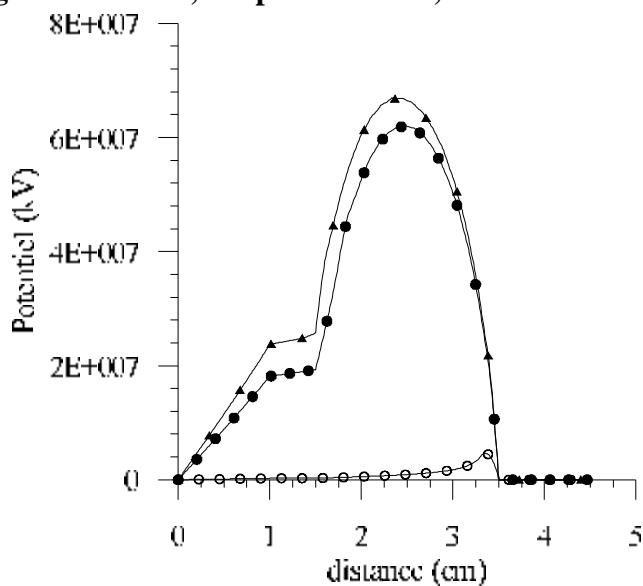


Figure IV. 8 : Variation du potentiel le long de l'axe de l'électrode en présence du diélectrique en germanium

(o : petit volume ; Δ : grand volume ; ● : volume moyen)

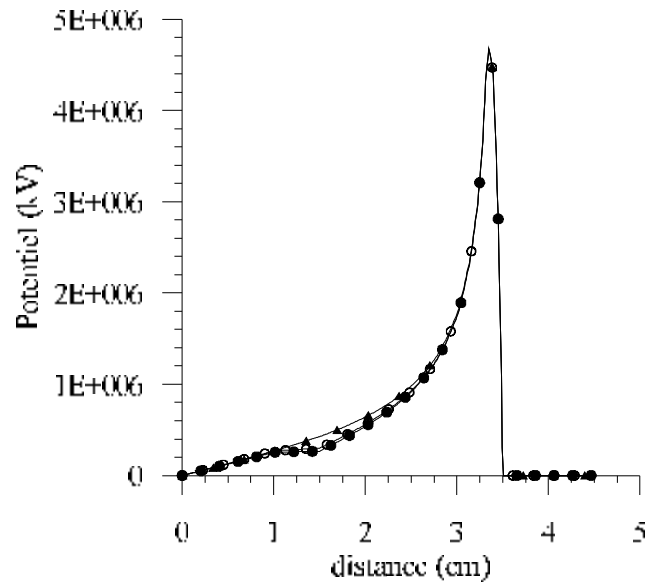


Figure IV. 9: Variation du potentiel le long de l'axe de l'électrode en cas d'un petit volume

(o : mica ; Δ : vide ; \bullet : germanium)

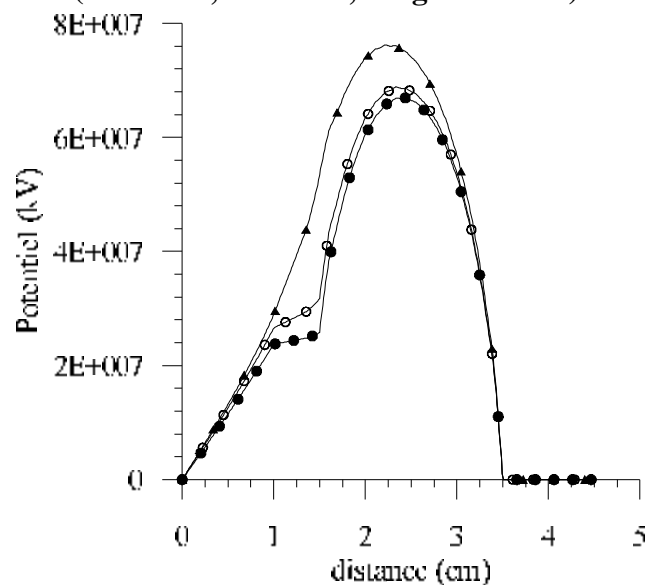


Figure IV. 10: Variation du potentiel le long de l'axe de l'électrode en cas d'un grand Volume

(o : mica ; Δ : vide ; \bullet : germanium)

b- Interprétation des courbes de potentiel électrique

Ø La courbe à vide

Nous constatons d'après la courbe IV.6, que le potentiel électrique prend des valeurs très importantes dans le cas d'un grand volume de charge (plus $8 \cdot 10^7$ KV), on remarque aussi que dans le cas d'un petit volume le potentiel prend des valeurs

très faibles (inférieur à $2 \cdot 10^7$ KV) par rapport à celle trouvées dans les deux cas précédents (moyen et grand volume)

D'après les résultats obtenus dans la courbe IV.6, on constate que l'augmentation de la quantité de la charge, augmente le potentiel électrique au niveau de la charge.

Ø la courbe de mica

Nous remarquons d'après la courbe IV.7, l'augmentation de la charge d'espace, augmente la valeur de potentiel (le potentiel supérieur à $6 \cdot 10^7$ KV, dans le cas d'un grand volume, $V=6 \cdot 10^7$ KV, pour le volume moyen et inférieur à $2 \cdot 10^7$ KV, pour le petit volume), et cela du à l'évolution de la quantité de la charge.

Nous remarquons aussi que le taux de croissance de la courbe diminue au niveau de diélectrique (mica) et cela est du à la présence de la permittivité relative de ce dernier.

Ø la courbe de germanium

Nous remarquons d'après la courbe IV.8, l'augmentation de la charge d'espace, augmente la valeur de potentiel (le potentiel supérieur à $6 \cdot 10^7$ KV, dans le cas d'un grand volume, $V=6 \cdot 10^7$ KV, pour le volume moyen et inférieur à $2 \cdot 10^7$ KV, pour le petit volume), et cela est du à l'évolution de la quantité de la charge.

Nous remarquons aussi que le taux de croissance de la courbe diminue au niveau du diélectrique (germanium) et cela du à la présence de la permittivité relative de ce dernier.

Ø la courbe de petit et grand volume

D'après la courbe IV.9, les trois graphes du potentiel (vide, mica, germanium) pratiquement sont les mêmes, car la charge est loin du diélectrique.

Nous remarquons aussi à partir de la courbe IV.10 (cas d'un grand volume), que le potentiel électrique est très important en absence d'un diélectrique (vide).

Nous constatons que le potentiel est faible dans le diélectrique à cause de la présence de la constante diélectrique de ce dernier (le potentiel est très faible en cas du germanium que du mica).

c- les courbes de champ électrique

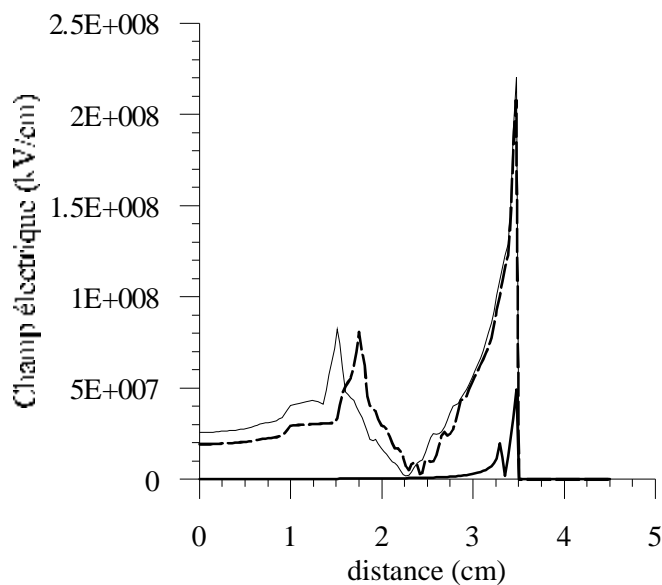


Figure IV. 11 : Champ en absence de diélectrique

(— : grand volume de charge ; ——— : petit volume de charge ; - - - : volume moyen)

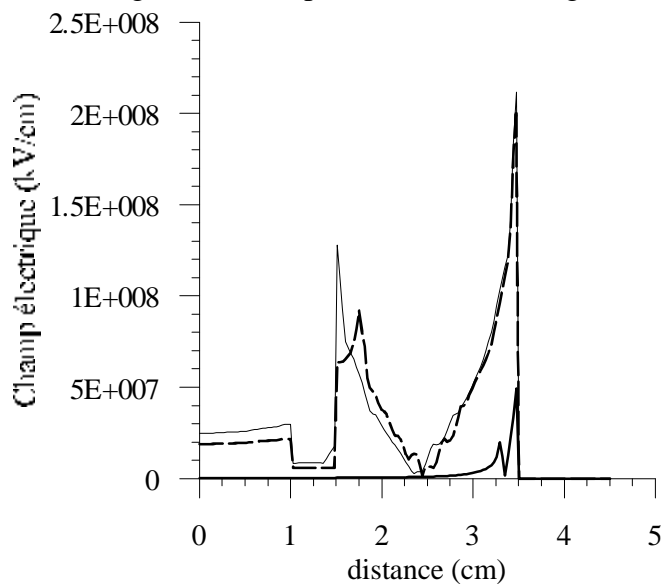


Figure IV. 12 : Champ en présence d'un diélectrique en mica

(— : grand volume de charge ; ——— : petit volume de charge ; - - - : volume moyen)

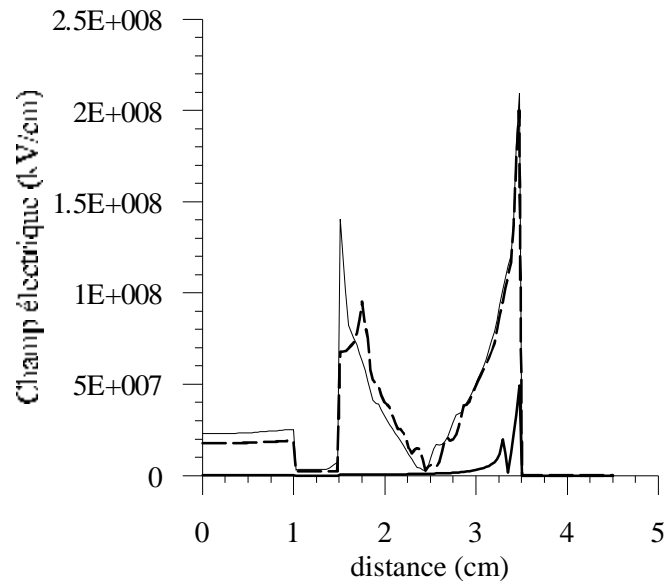


Figure IV. 13 : Variation de champ le long de l'axe de l'électrode en cas d'un petit volume

(— : vide ; — : germanium ; - - - : mica)

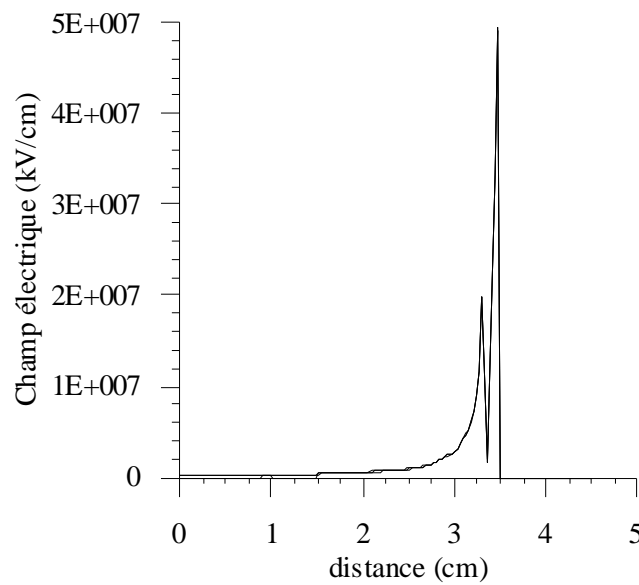


Figure IV. 14 : Variation de champ le long de l'axe de l'électrode en cas d'un petit volume

(— : vide ; — : germanium ; - - - : mica)

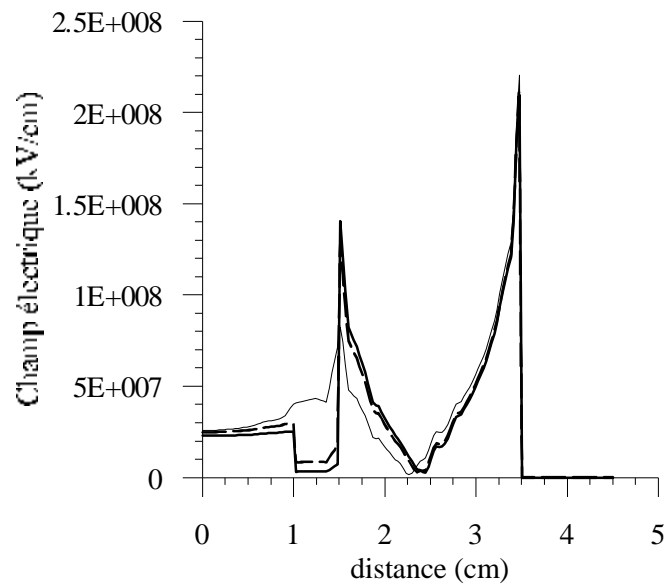


Figure IV. 15 : Variation du champ le long de l'axe de l'électrode en cas d'un grand volume

(— : vide ; ——— : germanium ; - - - : mica)

d- Interprétation des courbes de champ électrique

Ø la courbe à vide

D'après la figure IV.11, nous remarquons que le champ est très intense au niveau de la charge, ce dernier prend des valeurs très importantes dans le cas d'un grand volume de la charge et cela est dû à l'augmentation de la quantité de la charge électrique.

Ø la courbe de mica

A partir de la courbe IV.12, nous constatons que le champ est très intense au niveau de la charge, il est très faible au niveau de diélectrique à cause de la permittivité relative de ce dernier.

Nous remarquons aussi lorsqu'on augmente le volume de la charge d'espace, la valeur du champ électrique augmente.

Ø la courbe de germanium

A partir de la courbe VI.12, nous constatons que le champ est très intense au niveau de la charge est très faible au niveau du diélectrique à cause de la permittivité relative de ce dernier.

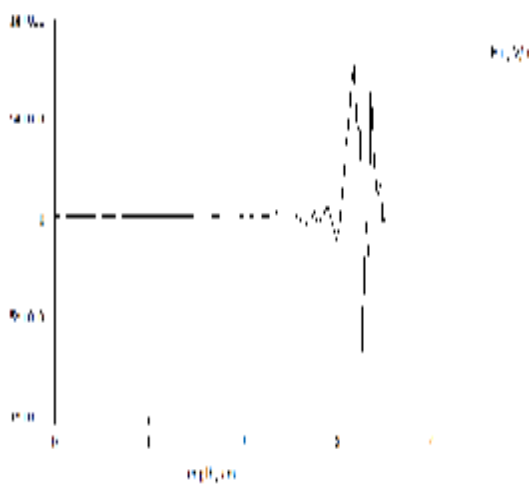
Nous remarquons aussi lorsqu'on augmente le volume de la charge d'espace, la valeur de champ électrique augmente.

Ø la courbe de petit et grand volume

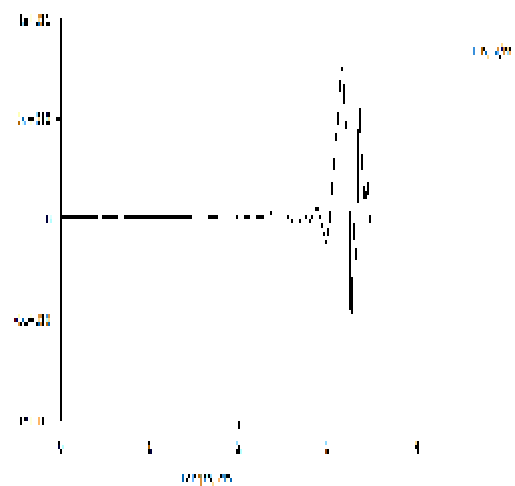
D'après la courbe IV.14 (petit volume), les trois graphes du champ (mica, germanium, vide) pratiquement sont les même, car la charge est loin du diélectrique.

D'après la courbe IV.15 (grand volume). Nous remarquons que le champ électrique prend des valeurs très importantes à vide (sans diélectrique), il est très faible en présence d'un diélectrique notamment dans le cas de germanium à cause de la permittivité relative de se dernier.

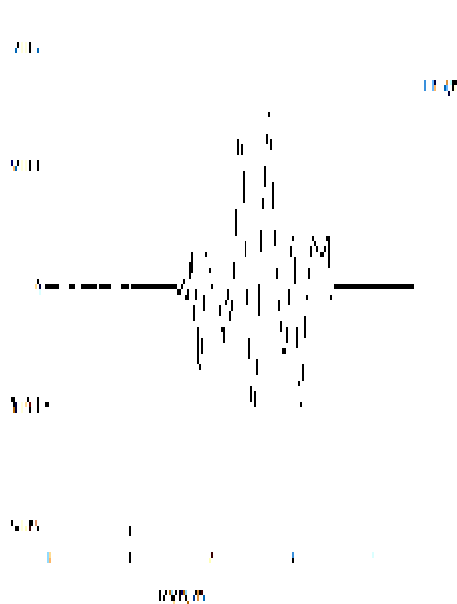
VI.8. Les courbes de la composante normale du champ électrique



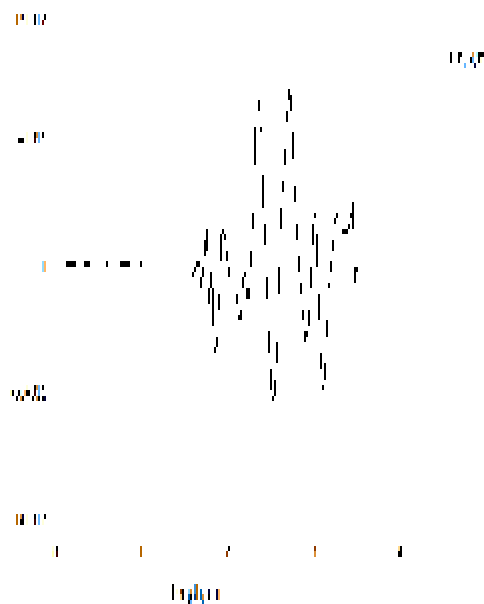
a- cas d'un petit volume (mica)



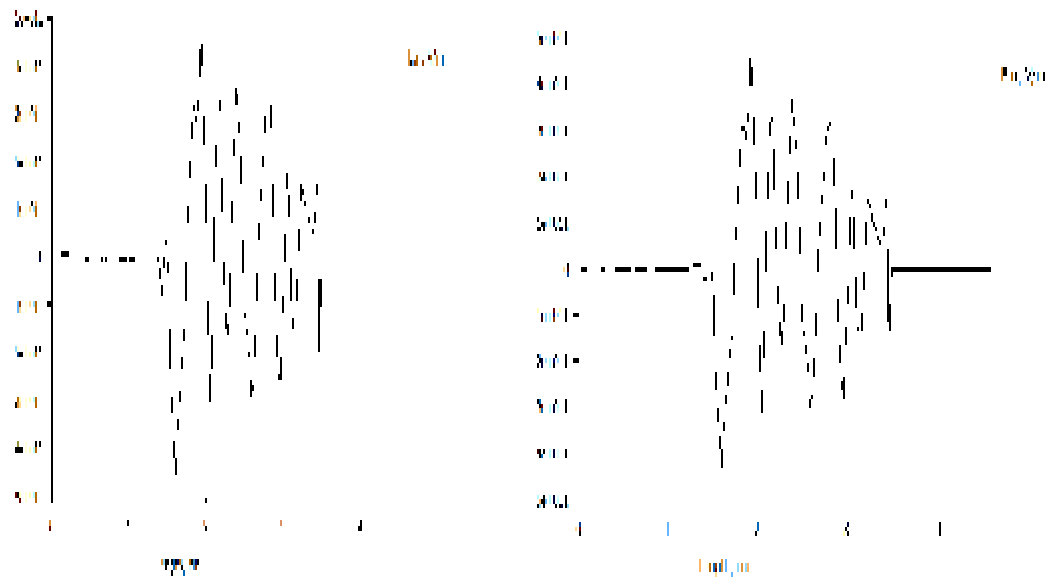
b- cas d'un petit volume (Germanium)



c- cas d'un volume moyen (mica)



d- cas d'un volume moyen (germanium)



e- cas d'un grand volume (mica)

f- cas d'un grand volume (germanium)

Figure IV.15 : La variation de champ normal le long de l'axe de l'électrode

VI.9. Interprétation des courbes de la composante normale du champ électrique

a- Cas d'un petit volume

Nous remarquons que le champ varie dans l'intervalle $[-8.10^5, 8.10^5]$ KV/cm, cet intervalle contient des valeurs positive et négative et cela est du au sens d'orientation de champ électrique.

b- Cas d'un volume moyen

Nous remarquons que le champ varie dans l'intervalle $[-7.10^6, 8.10^6]$ KV/cm, sauf qu'ils contiennent beaucoup de pics par rapport au cas précédent.

Nous constatons aussi que cet intervalle contient des valeurs positives et négatives et cela est du au sens d'orientation de champ électrique.

c- Cas d'un grand volume

Nous remarquons que le champ varie dans l'intervalle $[-4.5.10^6, 5.10^6]$ KV/cm, sauf qu'ils contiennent beaucoup de pics par rapport au cas précédent.

Nous constatons aussi cet intervalle contient des valeurs positives et négatives et cela est du au sens d'orientation de champ électrique.

VI.11. Conclusion

D'après les courbes et les cartographies du champ et de potentiel électrique, on constate que :

- Ø le champ diminue avec l'augmentation de la permittivité relative de l'isolant.
- Ø l'augmentation de la quantité de charge d'espace augmente la valeur du champ et du potentiel électrique.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

Conclusion générale

Le logiciel éléments finis « FEMM » nous a permis de faire un calcul rapide sur la décharge pointe-plan. Cette étude théorique est très bénéfique, dans la mesure où elle permet d'évaluer le degré d'influence des paramètres de la structure sur les grandeurs étudiées telle que le champ et le potentiel électrique.

En premier lieu, on a étudié la structure pointe-plan sans présence de la charge d'espace, on a essayé d'évaluer l'influence de la distance inter-électrode sur le champ et le potentiel. On a fixé le rayon de courbure et on fait varier la distance inter-électrodes. Les résultats obtenus nous ont bien montré qu'il y a une grande influence de la distance inter-électrodes sur les deux grandeurs étudiées.

Notre étude a permis de montrer la grande influence du rayon de courbure de la pointe, et la distance inter-électrodes sur le champ et le potentiel.

En second lieu, on a étudié la structure pointe-plan en présence de la charge d'espace, on a essayé d'évaluer l'influence de la variation de quantité de charge et de volume occupé par cette dernière sur le champ et le potentiel.

Notre étude a permis de montrer la grande influence de la constante diélectrique sur les grandeurs étudiées.

Nous espérons que cette étude théorique effectuée sur la structure pointe-plan, permettra de mieux comprendre les phénomènes liés à cette structure.

LA BIBLIOGRAPHIE

La bibliographie

Les références bibliographiques

- [1] : F. SLIMANI, « Etude de la configuration pointe-plan en absence de charge d'espace avec FEMM », mémoire fin d'étude, UMMTO, 2011.
- [2] :F. Lounes, « Contribution à l'étude du vieillissement électrique d'interfaces isolantes air – solides », mémoire de fin d'études, UMMTO, 2007.
- [3] : K. Khadidja, « Modélisation unidimensionnelle d'une décharge à barrières diélectriques pour lampe à excimère », mémoire de Magister en physique, Université d'oran, 2010.
- [4] : S.OUENDI, « Influence de la nature du matériau et de la pollution sur la décharge couronne», mémoire de fin d'études, UMMTO, 2013.
- [5] : Makhlof. DEBIT, « Etude des phénomènes de pré claquage à l'interface d'une isolation mixte solide/gaz, mémoire magister », UMMTO, 2012.
- [6] : A.Tilmatine, « Cours technique de la haute tension, chapitre I», Université de DJELLALI LIABES.
- [7] : Brahim BENAMA, «La faisabilité de l'électro filtration d'une atmosphère chargée en poussières de bois : étude expérimentale et numérique ».Thèse de doctorat de l'université, Henri Poincaré, Nancy, le 13 novembre 2008.
- [8] : D.MEZAGUER et T.TALEB, « Etude de l'influence de la géométrie des électrodes sur la contrainte électrique appliquée aux interfaces air/solide», mémoire de fin d'études, UMMTO, 2013.
- [9] : Anis. BRAHIMA et A. SACI, « Etude de l'influence de la rigidité diélectrique de l'air », mémoire de fin d'études, Université KASDI MERBAH OUERGLA, 2013.
- [10] : M .A. HANDALA, « Cours diélectrique et isolation électrique », master 1, réseaux électriques, UMMTO, 2013.
- [11] : M. SALANNE JEAN-PHILIPPE, « Contrôle du point de fonctionnement des décharges électriques par l'intermédiaire de leur alimentation. », thèse doctorat de l'école polytechnique de Toulouse, 2005.
- [12] : Y. BOUTORA, « Cours calcul numérique des champs (CNC) », master 2, réseaux électriques, UMMTO, 2014.

La bibliographie

[13] : Ourdia. HAMADOUCHE, « Modélisation numérique du transport de charges dans les diélectriques soumis à un champ électrique extérieur », mémoire magister, UMMTO.

[14] : bassem. KHADDOUR, « Modélisation du champ électrique modifié par la charge d'espace injectée », thèse doctorat, institut national polytechnique de GRENOBLE, novembre 2006.

[15] : <http://www.formules-physique.com/categorie/540>