الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

Département du Génie Électrique
et de l'Informatique

Mémoire de Fin d'Études

Présenté pour l'obtention du Diplôme
de Master en Génie Électrique

Option : Réseau Électrique

Thème

Etude de la distribution du champ électrique à l'intérieure d'une conduite électrique isolée d'un diélectrique ($Gaz\ SF_6$, Solide stratifiée)

Proposé et dirigé par :

⇨ *Dr. Houassine Hamza*

Préparé et présenté par :

⇨ *Rézgui Mahdi Dhou El Fikar*

⇨ *Cherair Mahfoud*

Année-Universitaire 2014-2015

Dédicaces

Je dédie ce travail

A Mes très chers parents qui ont tout fait pour moi pour y'arriver

A' toute ma grande famille

A' monsieur H.Houassine mon encadreur

A' tous mes amis

A' mon binôme : Rézgui Mahdi Dhou El fikar

A' ceux qui ont fait de leur mieux pour me

Soutenir Durent ce travail
A' mes amis de Groupe

Réseau Electrique

Dédicaces

Je dédie ce travail

A Mes très chers parents qui ont tout fait pour moi pour y'arriver

A' toute ma grande famille

A' ma chère M.abed qui na cessé de m'encouragé et de me soutenir

A' monsieur H.Houassine mon encadreur

A' tous mes amis

A' mon binôme : Cherair Mahfoud et sa famille

A' ceux qui ont fait de leur mieux pour me

Soutenir Durent ce travail

A' mes amis de Groupe

Réseau Electrique

Remercîment

Au terme de ce travail, nous tenons à remercier en premier lieu

⮜Le bon Dieu⮞ qui nous a donné la force la patiente et le courage d'achever notre travail de fin d'étude.

Nous remercions vivement notre promoteur Dr .HOUASSINE HAMZA

Qui nous a beaucoup aidé et d'érigée dans notre travail.

Nous remercions du fond du cœur nos chers parents de tout ce qu'ils ont fait pour nous.

Nous tenons également à remercier tous les professeurs qui nous ont suivis pendant toutes nos années d'étude et à ceux qui nous ont aidés à réaliser ce travail de près ou de loin.

Mes sincères remerciements également à tous les membres de jury, qui feront l'honneur de juger notre travail.

ملخص:

يتكون هذا العمل على دراسة توزيع الحقل الكهربائي في الموصلات الكهربائية المقدمة مع الشوائب .وجود الشوائب يقلل بشكل ملحوظ من قوة العزل، وتحديد انهيار العزل في القنوات الكهربائية في الأماكن المغلقة معزولة بمادة عازلة يتطلب معرفة توزيع الحقل الكهربائي.

تم استخدام طريقة العناصر المحددة في هذا العمل مواتية النمذجة و الدقة في خط كهربائي تم تصميم وتنفيذ في FEMM softwareمع الشوائب .البعد والتصرف الجسيم إلى داخل الخط الكهربائي يؤثر على قيمة الحقل الكهربائي.

كلمات مفتاحة: طريقة العناصر المحدودة، الحقل الكهربائي، الشوائب والمواد العازلة، القنوات الكهربائية، برنامج FEMM.

Résumé :

Ce mémoire de fin d'études porte sur la distribution du champ électrique dans un conducteur électrique munie d'impuretés. La présence des impuretés réduit nettement la rigidité diélectrique de l'isolant, la détermination de la rupture d'isolation à l'intérieure d'une conduite électrique isolé par un matériau diélectrique nécessite la connaissance de la distribution du champ électrique à l'intérieure.

La méthode des éléments finis a été utilisé dans ce travail pour sa précision, la modélisation électrostatique d'une conduite électrique est étudiée et implémentée sous FEMM. L'effet des dimensions et de la disposition de la particule impure à l'intérieure de la conduite électrique sur la distribution du champ électrique a été mis en évidence.

Mots clés : Méthode des éléments fini, Champ électrique, impuretés, Matériaux diélectriques, Conduite électrique, FEMM.

Abstract :

This work consists on the study of the electric field distribution in an electrical conductor provided with impurities. The presence of impurities significantly reduces the dielectric strength of the insulation, the determination of the insulation breakdown in an indoor electric driving isolated by a dielectric material requires knowledge of the distribution of the electric field.

The finite element method has been used in this work to its favorable precision electrostatic modeling of a power line is designed and implemented in FEMM softwer with impurities. The dimension and the disposition of the particle to the interior of the electrical line affect the value of the electric field.

Keys words: finite element method, Electric field, impurities, dielectric materials, electric cable, FEMM

Sommaire

Dédicaces **1-2**

Remerciements **3**

Résumé **4**

Sommaire **5-7**

Liste des tableaux et figures **8-11**

Liste des acronymes **12**

Introduction générale **13-14**

Chapitre I : Les câbles souterrains et les décharges partielles

Introduction **15**

I.1 Diagnostic des câbles souterrains **16**

I.2 Les décharges partielles **16**

I.2.1 Excitation d'une décharge partielle **16**

I.2.2 Origines d'une décharge partielle **17**

I.2.3 Phénomène de décharge partielle **19**

I.2.4 Conséquences des décharges partielles **24**

I.2.5 Mesure des décharges partielles **25**

I.2.6 Propagation d'une décharge partielle **27**

Conclusion **27**

Chapitre II : La méthode des éléments finis avec résolution des équations partielles

Introduction **28**

II.1.Le logiciel FEMM **28**

II.2. La Méthode des éléments finis **29**

II.2.1Formulation intégrale **31**

II.2.2. Formulation variationnelle 31

II.2.3 Méthode des résidus pondérés 32

II.3. Discrétisation 33

II.3.1. Elément de référence 34

II.3.2.Fonction d'interpolation 35

II.3.2.a Le principe de l'état complet 35

II.3.2.b Le principe de compatibilité 35

II.4. Fonction d'approximation sur un élément 2D 36

II.4.1. Cas d'un élément triangulaire linéaire 2D 36

II.5. Fonction d'approximation sur le domaine 2D 39

II.6. Avantages et les inconvénients de la méthode des éléments finis 39

II.7. Implémentation de la méthode des éléments finis 40

II.8. Résolution de l'équation magnétostatique par la méthode des éléments finis 41

II.8.1. Ecriture intégrale de l'équation 42

II.8.2. Application des conditions aux limites 44

II.8.3. Discrétisation 45

II.8.4. Interpolation éléments finis 45

II.8.5 Calcul des termes élémentaires des matrices K^e 46

II.8.6. Assemblage 47

Conclusion 47

Chapitre III : Distribution du champ électrique dans un conducteur muni d'impureté

Introduction 48

III .Matériaux diélectrique d'utilisation 49

III.1 Modélisation de la conduite par un gaz 49

III.1.1.la modélisation électrostatique des avec une particule contaminée (impureté).....50

III.1.1.a. pour un fil de particule (impureté) de 10mm de longueur et de 0.5mm de rayon 50

III.1.1.b. Effet de la longueur de fil de la particule sur les valeurs du champ électrique 54

III.1.1.c. L'effet du rayon sur le champ électrique 54

III.1.2.1modélisation électrostatique des (GIBD) avec une impureté et une gaine 56

III.1.2.a. Lorsque la gaine de l'enceinte mise à la terre est à 2mm d'épaisseur 57

III.1.2.b. l'effet de l'épaisseur du revêtement diélectrique sur le champ électrique maximal 59

III.1.3 modélisation électrostatique d'une conduite électrique avec impureté de 3.5mm de l'enceinte mise a la terre 60

III.1.3.a. Etude du champ électrique pour des particules de dimension l=5mm, r=0.5mm 61

III.1.3.b Effet de la variation de la longueur de l'impureté central sur le champ électrique 67

III.1.3.c L'effet de la variation de rayon r de la particule central sur le champ électrique 69

III.2 Modélisation d'une conduite de bus isolé d'un solide stratifiée 69

III.2.1 Modélisation électrostatique d'une conduite électrique stratifiée 70

III.2.1.a. Conduite dépourvue d'impureté 70

III.2.1.b. Avec impureté 72

III.2.1.c. Pour une impureté qui contient de l'aire 77

Conclusion 78

Conclusion générale 81

Liste des tableaux et figures

Liste des tableaux :

Tableau	Titre	Page
Tab. I.1	*Facteurs affectant, au cours du temps, l'isolation d'un câble souterrain [Den01].*	3
Tab III.1	*les valeurs maximales du champ électrique par rapport à l'épaisseur du revêtement qui est en époxy*	46
Tab III.2	*le champ électrique maximal a de différentes distances par rapport au conducteur et permittivité relative de chaque couche solide*	63
Tab III.3	*le champ électrique maximal dans l'impureté a de différentes distances par rapport au conducteur.*	64

Liste des figures :

Figure	Titre	Page
Fig. I.1	*Constitution d'un câble souterrain isolé au polyéthylène réticulé*	*1*
Fig. I.2	*Imperfections dans un câble monophasé [4].*	**4**
Fig. I.3	*Mécanisme de décharge partielle*	**7**
Fig. I.4	*Evolution des champs électriques au cours du temps*	**8**
Fig. I.5	*Evolution de la répartition de charges [9].*	**9**
Fig. I.6	*Une décharge partielle a entraîne une arborescence électrique [10].*	**10**
Fig. I.7	*Destruction d'un matériau isolant [10].*	**11**
Fig. I.8	*Deux façons de mesurer une décharge partielle [11].*	**12**
Fig. II.1	*Transformation des équations d'un système physique [19].*	**16**
Fig. II.2	*Discrétisation d'un domaine par le maillage.*	**20**
Fig. II.3	*Organisation du logiciel.*	**27**
Fig.III.1	*Conduite de bus isolé d'un gaz avec une enceinte en aluminium de diamètre*	**35**

	de 152mm et un conducteur de 55mm de diamètre	
Fig.III.1.1	***la distribution du champ électrique au long de la surface intérieur de la conduite électrique isolé par un gaz avec impureté posé en bas à 3.5mm de l'enceinte***	**36**
Fig.III.1.2	***la distribution du champ électrique au long de la surface du file de particule du point supérieur au point inférieur***	**37**
Fig.III.1.3	***Le champ électrique maximal au long de la particule en fonction de sa position par rapport au conducteur interne***	**38**
Fig.III.1.4	***distribution du champ électrique de la pointe supérieure de la particule au conducteur interne de***	**49**
Fig.III.1.5	***distribution du champ électrique de la pointe supérieur au conducteur interne***	**49**
Fig.III.1.6	***le champ électrique a l'extrémité supérieur en fonction de la longueur a un rayon r=0.5mm***	**40**
Fig.III.1.7	***champ électrique a l'extrémité supérieur du fil de particule en fonction du rayon a L=10mm***	**41**
Fig.III.1.8	***le champ électrique a l'extrémité supérieure du fil de particule en fonction de rapport (L/r) a r=05.mm***	**42**
Fig.III.2.1	***conduite de bus isolé d'un gaz avec une particule filamentaire contaminé prés de 3.5mm de la couche diélectrique de l'enceinte mise a la terre.***	**43**
Fig.III.2.2	***la distribution de champ électrique au long de la surface intérieur de la conduite de bus isolé d'un gaz avec un revêtement diélectrique et un fil de particule contaminer situé à 3.5mm de l'enceinte mise à la terre.***	**44**
Fig.III.2.3	***La distribution de champ électrique au long de la surface du fil de particule du l'extrémité supérieure a l'extrémité inferieure.***	**45**
Fig.III.2.4	***la distribution du champ électrique au long de l'espace entre l'extrémité supérieure du fil de particule et le conducteur interne de (GIBD)***	**46**
Fig.III.3.1	***conduite de bus isolé d'un gaz avec multi-fils de particule contaminé situé de 3.5mm de l'enceinte mise à la terre.***	**47**
Fig.III.3.2	***La distribution du potentielle au long de la surface intérieure de la conduite de bus isolé d'un gaz avec multi-fils de particule contaminer placé a 3.5mm de l'enceinte mise a la terre .***	**48**
Fig.III.3.3	***la distribution du champ électrique au long de la surface intérieure de la conduite de bus isolé d'un gaz avec multi-fils de particule contaminer placé a 3.5mm de l'enceinte mise a la terre .***	**49**

Fig.III.3.4	***la distribution du champ électrique au long de la surface de la particule situé au milieu des deux autre***	**50**
Fig.III.3.5	***la distribution du champ électrique au long de la surface des deux particules situé à la périphérie de celle au milieu de***	**50**
Fig.III.3.6	***la distribution du champ électrique au long de la surface de la particule centrale et celles des deux cotés.***	**51**
Fig.III.3.7	***la distribution du champ électrique au long de l'écart Gu1 de l'extrémité supérieure de la particule centrale au conducteur de haute tension***	**52**
Fig.III.3.8	***la distribution de champ électrique au long de l'écart Gu2 à partir de l'extrémité supérieure des deux particules jusqu'au conducteur haute tension.***	**52**
Fig.III.3.9	***champ électrique à l'extrémité supérieure du fil de particule central en fonction de la longueur a rayon r=0.5mm.***	**53**
Fig.III.3.10	***le champ électrique à l'extrémité supérieure du fil de particule central en fonction du***	**54**
Fig.III.4.1	***Conduite de bus isolé d'un solide stratifiée modélisé sur (FEMM).***	**55**
Fig.III.4.2	***conduite de bus isolé d'un solide stratifiée sans impureté modélisé sur (FEMM) avec Maillage en éléments triangulaire.***	**56**
Fig.III.4.3	***la distribution du potentiel électrique au long de la conduite du conducteur interne jusqu'à l'enceinte***	**56**
Fig.III.4.4	***la distribution du champ électrique au long de la conduite, du conducteur interne jusqu'à l'enceinte***	**57**
Fig.III.4.5	***conduite de bus isolé d'un solide stratifiée avec impureté et sans gaine modélisé sur (FEMM) avec maillage en élément triangulaire.***	**58**
Fig.III.4.6	***la distribution du champ électrique au long de la surface de la couche isolante époxy avec une impureté.***	**59**
Fig.III.4.6.1	***la distribution du champ électrique au long de la surface de la couche isolante époxy correspond à la Fig.III.4.6***	**69**
Fig.III.4.7	***la distribution du champ électrique au long de la surface de la couche isolante PRC avec une impureté.***	**60**
Fig.III.4.7.1	***la distribution du champ électrique au long de la surface de la couche isolante PRC correspond à la Fig. III.4.7***	**60**
Fig.III.4.8	***la distribution du champ électrique au long de la surface de la couche isolante papier avec une impureté***	**61**

Fig.III.4.8.1	***la distribution du champ électrique au long de la surface de la couche isolante papier correspond à la Fig.III.4.8***	**61**
Fig.III.4.9	***le champ électrique maximal au long de la surface de la particule à de différentes distance par rapport au conducteur interne.***	**62**
Fig.III.4.10	***la variation du champ électrique maximal au long de la surface d'impureté en fonction de l'écart (conducteur-impureté).***	**63**

Liste des acronymes

PILC :	***Paper-insulated lead cable (câble isolation en papier)***
XLPE :	***Cros-linked polyéthylène (polyéthylène réticulé)***
DP :	***Décharge partiel***
HF :	***Haute fréquence***
FEMM :	***Finite élément méthode magnetics***
MEF :	***Méthode des éléments finis***
MDF :	***Méthode des différances finis***
MEIF :	***Méthode des différences finies dans le domaine des temps***
FDTD :	***Méthode de simulation de charge***
MSC :	***Méthode des éléments de frontière***
GIBD	***Gas insulated bus duct (conduit électrique à isolation gazeuse)***

Introduction Générale

Introduction générale :

L'étude de l'électricité comprend les notions de champ électrique, de force électrique, de tension électrique, d'énergie électrique, d'intensité de courant électrique, de résistance électrique.

La plupart des systèmes électrotechniques (Machines électriques, ouvrage de haute tension, chauffage par induction, propagation d'ondes électromagnétiques,...) peuvent être modélisés par des équations aux dérivées partielles qui sont obtenues à partir des équations de Maxwell et les relations des milieux.

L'équation aux dérivées partielles ainsi obtenue pour un système donné, peut être résolue par des méthodes analytiques pour des géométries simples, cependant si cette dernière est complexe don doit faire recours aux méthodes numériques telles que la méthode de différences finies et la méthode des éléments finis.

La méthode des éléments finis permet de représenter finement les différentes grandeurs dans le système. Cependant, les résultats obtenus nécessitent des ressources informatiques importantes.

L'objectif de notre travail est l'étude de la distribution et variation du champ électrique crée par des structures diélectriques utilisées en électrotechnique autour des particules contaminées, soumises à une tension de 30kV a l'intérieure d'une conduite électrique modélisée sur FEMM.

Afin de mener à terme notre travail, nous avons subdivisé notre mémoire en trois chapitres. Implémenté

Le premier chapitre est consacré aux câbles souterrains et les décharges dans les câbles.

Les causes de la décharge partielle, son phénomène, son origine, ses conséquences, sa propagation, sa mesure et son influence sur les câbles ont été développés dans ce chapitre.

Dans le troisième chapitre, on a abordé la modélisation électrostatique d'une conduite isolé par un gaz (SF_6), puis à isolation solide stratifiée modélisé sur logiciel FEMM.
On étudie la distribution et la variation du champ électrique autour d'une ou plusieurs impuretés dans l'isolant à l'intérieure de la conduite électrique.

Cette étude va nous nous permettre a permis de voir l'effet des dimensions de l'impureté et l'effet de la gaine sur le champ électrique maximal aux extrémités de l'impureté, et de déterminer les valeurs du champ maximal dépassant le champ électrique critique.
Par ailleurs, une comparaison entre les deux câbles à isolation gazeuse d'SF_6 et àisolation solide stratifiée.

Ainsi nous terminons notre travail par une conclusion générale regroupant l'essentiel des résultats obtenus ainsi que des perspectives pour ce travail.

ChapitreI:

Les câbles souterrains et les décharges partielle

Introduction :

Les réseaux de distribution et de transport de l'´energie électrique sont constitues de lignes Aériennes, de câbles souterrains et de postes. Depuis 1994, la plupart des compagnies d'électricité ont d'ailleurs pris la décision de ne plus établir de nouvelles liaisons aériennes au delà de 150 kV. Tout le réseau de distribution et progressivement celui de répartition se fera en câbles souterrains [1]. Certes, les investissements liés à l'installation de nouveaux câbles sont parfois prohibitifs. Leur impact environnemental et esthétique est bien moindre que celui des lignes souterraines. les câbles souterrains ont pris et prendront encore une ampleur certaine.

Malheureusement, tout câble électrique possède un point faible qui n'est autre que son isolation. La figure (fig. I.1) illustre la constitution typique d'un câble monophasé. D'un point de vue purement technique, on peut distinguer deux types de câbles ; ceux isolés au papier imprègne (câble PILC) et ceux isolés au polyéthylène réticulé (câble XLPE). Inéluctablement, l'isolant agencé autour du conducteur d'un câble (figure I.1**)** vieillit et se dégrade au cours du temps. La destruction, partielle ou complète de cet isolant, implique un effort de maintenance du câble ou pire encore son remplacement [1].

Les câbles doivent donc faire l'objet d'un diagnostic régulier ayant pour principale mission de vérifier la qualité de leur isolation. A cet égard, la mesure de décharges partielles est une technique qui à prouvé toute son efficacité depuis de nombreuses années. [1]

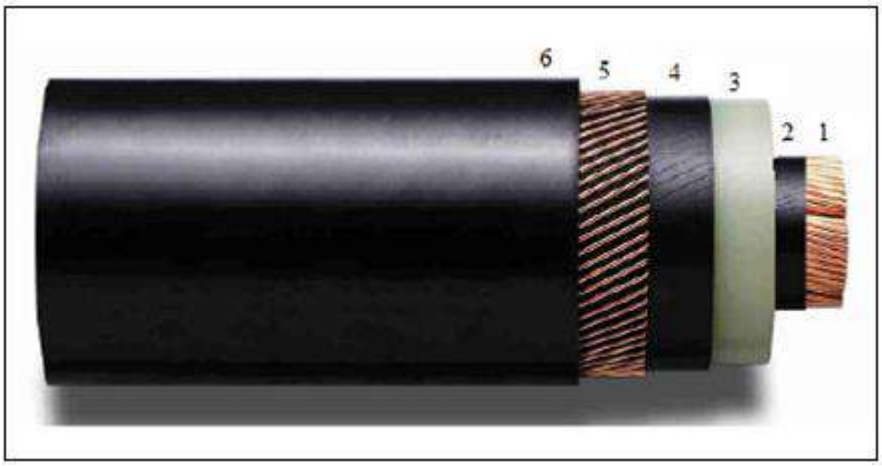


Fig. I.1 Constitution d'un câble souterrain isolé au polyéthylène réticulé [1]

Légende : (1) âme conductrice, (2) couche semi-conductrice interne, (3) isolant au polyéthylène réticulé, (4) couche semi-conductrice externe, (5) écran conducteur, (6) protection au PVC.

I.1 Diagnostic des câbles souterrains :

Une grande majorité des pannes et des coupures d'électricité sont dues à des défauts des Câbles souterrains. Les origines de ces défauts sont variées et peuvent se scinder en 5 classes [2].

1. Influences externes : dommages mécaniques, réactions chimiques, . . . sont tant d'attaques Externes contre lesquelles les couches de protection du câble sont censées résister.
2. Défauts de production : on observe fréquemment l'inclusion de cavités, d'impuretés dans L'isolant des câbles lors de leur production.
3. Application incorrecte : e.g. sous estimation du courant maximal, de la tension, de la résistance thermique de l'environnement, . . .
4. Installation incorrecte : un travail bâclé des ouvriers responsables de la pose du câble n'est qu'un exemple parmi d'autres.
5. Vieillissement de l'isolation.

La durée de vie d'un câble n'est donc jamais illimitée. Tôt ou tard se pose la question de son remplacement ou du moins de sa maintenance.

I.2 Les décharges partielles :

I.2.1 Excitation d'une décharge partielle :

Définition :

Une décharge partielle (DP) apparaît lorsque l'intensité du champ électrique est suffisante, i.e. lorsque la tension appliquée au câble est supérieure à un niveau critique. On définit dés lors la tension d'apparition des DP. Il s'agit du niveau de tension, lorsqu'il augmente progressivement, à partir duquel les premières DP sont observées.

De même, on définit la tension d'extinction des DP. Il s'agit du niveau de tension, lorsqu'il diminue progressivement, en delà duquel les DP ne sont plus excitées. Certains

facteurs, comme la température, l'humidité et la pollution influencent les tensions d'apparition et d'extinction des DP [2].

I.2.2. Origines d'une décharge partielle :

L'isolation d'un câble souterrain n'est jamais parfaite. Non seulement, on y trouve des défauts qui dérivent directement de la production du câble mais en outre, l'isolation vieillit inéluctablement.

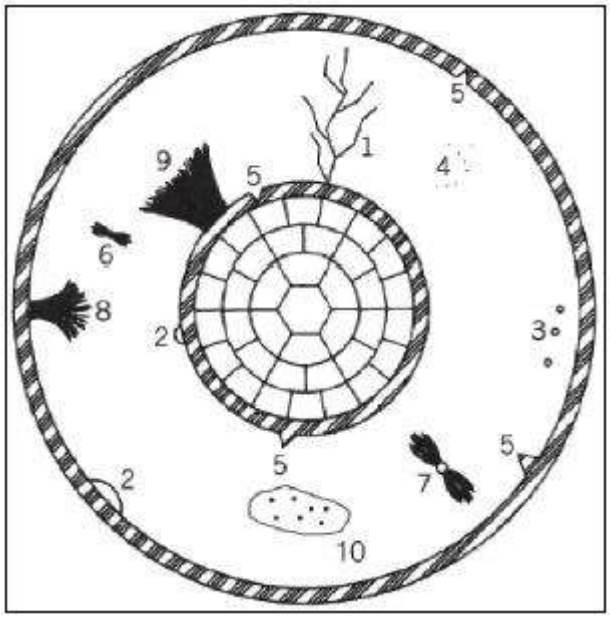
Lorsqu'un câble est en service, son isolation est le siège de contraintes thermiques, électrique, mécaniques et enfin de contraintes liées à l'environnement [3]. Au cours du temps, ces diverses charges (Tab. I.1) engendrent des modifications irréversibles de l'isolant. On parle généralement d'un vieillissement intrinsèque du câble concerné, au cours duquel l'isolation se dégrade de façon homogène.

Thermique	Electrique	Environnement	Mécanique
– Température maximale – Température ambiante – Gradient thermique – Cycle thermique – . . .	– Tension (AC,DC) – Courant – Fréquence – Impulsions – . . .	– Gaz (air, O2) – Humidité – Eau – Corrosion – . . .	– Flexion – Traction – Compression – Torsion – Vibrations – . . .

Tab. I.1Facteurs affectant, au cours du temps, l'isolation d'un câble souterrain [3].

Par ailleurs, le vieillissement prématuré des câbles peut provenir de contaminants (particules étrangères), de défauts, de protubérances ou de vides qui apparaissent dans l'isolant lors de la production, du transport ou de l'installation du câble. Initialement, ces imperfections constituent des défauts ponctuels ou localisés de l'isolant. Par contre au cours du temps, elles peuvent s'aggraver et se propager progressivement au sein de l'isolation lorsque le câble est en service. En fin, elles peuvent même impliquer la destruction complète de l'isolant.

La figure (Fig. I.2) illustre un ensemble d'imperfections susceptibles de se manifester dans un câble monophasé.



1. Arborescence électrique
2. Vide à l'interface
3. Vide dans l'isolant
4. Contaminant
5. Protubérance dans le semi-conducteur
6. Décharge à partir d'un contaminant
7. Décharge à partir d'un vide
8. Décharge à partir de l'isolant
9. Décharge à partir du conducteur
10. Humidité

Fig. I.2 Imperfections dans un câble monophasé [4]

En particulier, remarquons que les jonctions ou joints entre câbles sont souvent le siège d'un nombre important de défauts. En effet, ces joints thermo rétractables sont réalises in situ et manuellement. On ne peut donc y éviter la présence de multiples imperfections. Il en résulte notamment que l'activité des décharges partielles est souvent prépondérante au niveau de ces jonctions. Nous devrons par conséquent examiner ces accessoires lors de l'analyse des décharges partielles [4].

Toutes ces imperfections constituent des sites particulièrement propices aux décharges partielles. Pour le comprendre, prenons l'exemple d'une cavité (remplie d'air) malheureusement présente dans l'isolant. Typiquement, celle-ci constitue un point faible pour deux raisons.

• D'une part, la rigidité diélectrique de l'air est plus faible que celle de l'isolant (polyéthylène réticulé ou papier imprégné). Or, rappelons que cette rigidité s'exprime sous la forme d'un champ électrique au-delà duquel le diélectrique concerné perd ses propriétés isolantes.

· D'autre part, la permittivité diélectrique relative de l'air vaut $\epsilon_r \approx 1$. Par conservation du déplacement électrique ($\epsilon_{r,air}.E_{air} = \epsilon_{r,isolant}.E_{isolant}$), le champ électrique est amplifié par le ratio $\frac{\epsilon_{r,isolant}}{\epsilon_{r,air}}$ au niveau de la cavité lorsque le câble est sous tension. ε_r

En d'autres termes, les contraintes électriques sont accrues au niveau des imperfections qui, en outre, résistent moins bien que l'isolant. Par conséquent, les décharges partielles apparaissent inévitablement au sein de ces défauts d'isolation. C'est d'ailleurs l'intérêt de l'étude des DP puisque celles-ci révèlent la présence d'imperfections dans l'isolant du câble et en reflètent donc indirectement la qualité.

I.2.3 Phénomène de décharge partielle :

Le terme décharge partielle est défini par la norme IEC 60270 comme une décharge électrique localisée qui ne traverse que partiellement un isolant compris entre deux électrodes (Fig. I.2.). En d'autres termes, elle ne court-circuite pas l'entièreté de cet isolant.

Pour les raisons évoquées précédemment, les décharges partielles surviennent au niveau des imperfections du diélectrique, comme le montre la figure (Fig. I.2). Par exemple, dans le cas d'une cavité, l'air qui y règne claque et perd ses propriétés isolantes lorsque le champ électrique y est trop important.

Les décharges partielles [5] sont donc dues à un processus d'ionisation, induit par le champ électrique extérieur. Ce processus s'interprète physiquement par un phénomène d'avalanche électronique. La physique qui se cache derrière ce phénomène est relativement complexe et ne fait pas l'objet de ce mémoire. Par contre, remarquons d'ores et déjà que le champ électrique local doit excéder une valeur critique E critique pour que le phénomène d'avalanche puisse s'enclencher.

En résumé, pour que le phénomène d'avalanche puisse avoir lieu, il faut que les deux conditions suivantes soient vérifiées.

– Un électron germe est disponible pour déclencher l'avalanche.

– Le champ électrique local dépasse un certain seuil critique.

Electrons germes :

Il n'est pas inutile de se rappeler l'origine des électrons germes, présents par exemple au sein d'une cavité d'un isolant [5 - 6 - 7]. Nous pouvons entre autres distinguer :

– Les radiations ionisantes provenant du rayonnement ambiant.

– Les phénomènes de surface : les surfaces de la cavité concernée émettent des électrons.

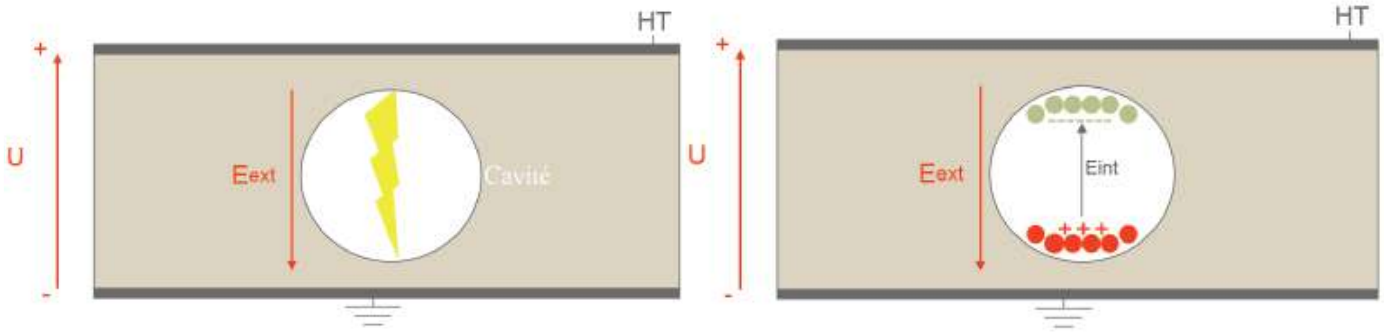
L'intensité de cette émission [5] est supposée augmenter exponentiellement avec le champ électrique applique. De plus, elle dépend d'autres facteurs parmi lesquels la nature de l'isolant, la rugosité de surface de la cavité, la polarité de cette surface mais surtout la concentration de charges laissées sur les surfaces par les décharges partielles qui y sont précédemment apparues.

– On ne peut jamais exclure une radioactivité naturelle (très faible évidemment).

Ces différents mécanismes peuvent intervenir séparément ou collectivement, leur importance respective dépendant de la géométrie et des conditions du défaut, du champ électrique appliqué et du stade de dégradation du défaut.

La présence de ces électrons libres peut d'ailleurs être considérée comme un processus stochastique auquel on associe en pratique un décalage temporel $\Delta_t$lag (time lag).

On définit cette variable stochastique comme le temps qui s'écoule entre le moment auquel le champ électrique local (dans une cavité par ex.) atteint sa valeur de claquage théorique et le moment auquel l'effet d'avalanche se déclenche réellement (Fig. I.4). Il est évident que plus la concentration d'électrons germes augmente et plus Δ_t lag diminue.[7]



(a) Décharge partielle (b) Répartition des charges

Fig. I.3: Mécanisme de décharge partielle.[7]

.

Phénomène d'avalanche :

Le processus d'avalanche débute avec des électrons germes qui sont accélères par le champ électrique extérieur E_{ext}. Ces électrons entrent inévitablement en collision avec des molécules du gaz présent dans la cavité. Pour autant que l'´energie des électrons soit suffisante, ceux-ci ionisent les molécules percutées lors des collisions. De nouveaux électrons sont ainsi libères et peuvent prendre part, à leur tour, au phénomène [7].

L'effet d'avalanche entraine une répartition de charges similaire à celle illustrée à la figure (Fig. I.3). A cette accumulation de charges, on peut associer un champ électrique E_{int} qui compense le champ extérieur E_{ext}.

Ce phénomène porte le nom de relaxation. Au passage, rappelons que le champ électrique est amplifié au niveau des imperfections de l'isolant par un facteur f qui dépend de la permittivité diélectrique de l'isolant, de la forme du défaut, etc. Lorsqu'une décharge survient, l'amplitude du champ électrique local $E_{tot} = E_{ext} + E_{int}$ s'´ecroule suite au phénomène de relaxation. Notons Δ_E la chute de ce champ électrique.

$$\Delta_E = E(t-) - E(t+) \qquad (I.1)$$

Où t+ et t− représentent respectivement le moment auquel débute la décharge et le moment auquel elle se termine. Niemeyer [5] a montré que l'amplitude q de la décharge partielle associée est proportionnelle à Δ_E.

$$q \propto \Delta_E \qquad \text{(I.2)}$$

La figure (Fig. I.4) représente l'´evolution du champ électrique extérieur E_{ext} (proportionnel à la tension appliquée) et celle du champ électrique total E_{tot}.

Notons Ecrit le champ électrique théorique de claquage et E_{res} le champ électrique résiduel à la suite d'une décharge. Enfin, rappelons que Δ_t lag représente le décalage temporel, variable stochastique dépendant de la disponibilité d'´electrons germes. Lors de la période représentée à la figure (Fig. I.4) surviennent trois décharges partielles. A chacune des décharges est associée une chute du champ électrique E_{tot} [5]

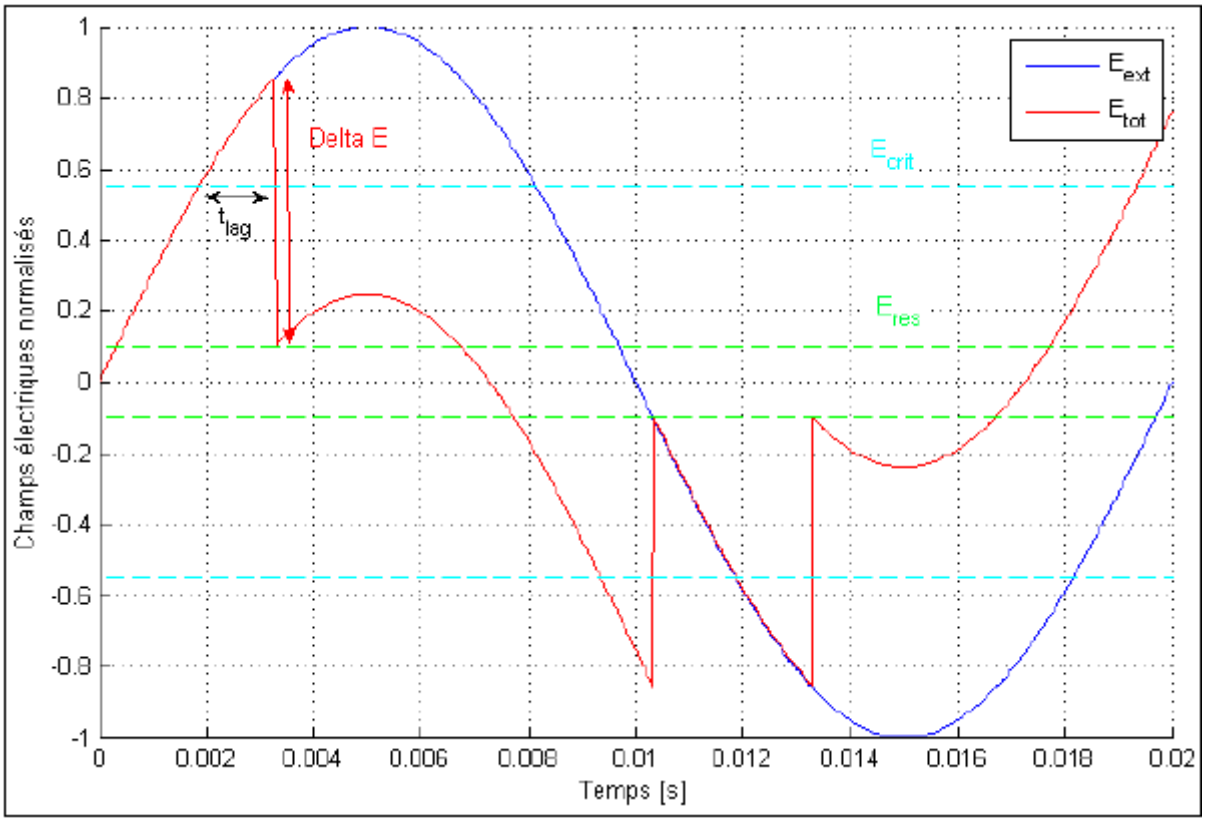


Fig. I.4: ***Evolution des champs électriques au cours du temps [5].***

Lorsque le champ électrique total E_{tot} s'effondre, sa valeur chute en très peu de temps (de l'ordre de la ns). Cette variation transitoire importante du champ électrique induit dans les électrodes, disposées de part et d'autre de l'isolant, une pulsation de courant I_{ind} (t).

D'après [8], le temps de montée de ce pulse est de l'ordre de la ns. Quant à la fréquence qui y est associée, elle s'élève à quelques centaines de MHz, voire 1GHz. Le signal de DP (sous la forme d'une impulsion de courant et de tension) peut alors se propager vers les deux extrémités du câble concerné.

Enfin, remarquons que la répartition des charges représentée à la figure (Fig. I.3 b) (faisant suite à une décharge partielle) n'est que transitoire. D'une part, ces charges peuvent diffuser vers l'isolant et d'autre part, elles peuvent se recombiner entre elles (Fig. I.5). Il s'en suit que le champ électrique E_{int} n'est pas constant mais suit plutôt une loi du type

$$E_{int}(t) = E_{int}(t0) * \exp^{t/\tau} \qquad (I.3)$$

Où $t0$ est l'instant marquant la fin d'une décharge et τ une constante de temps.

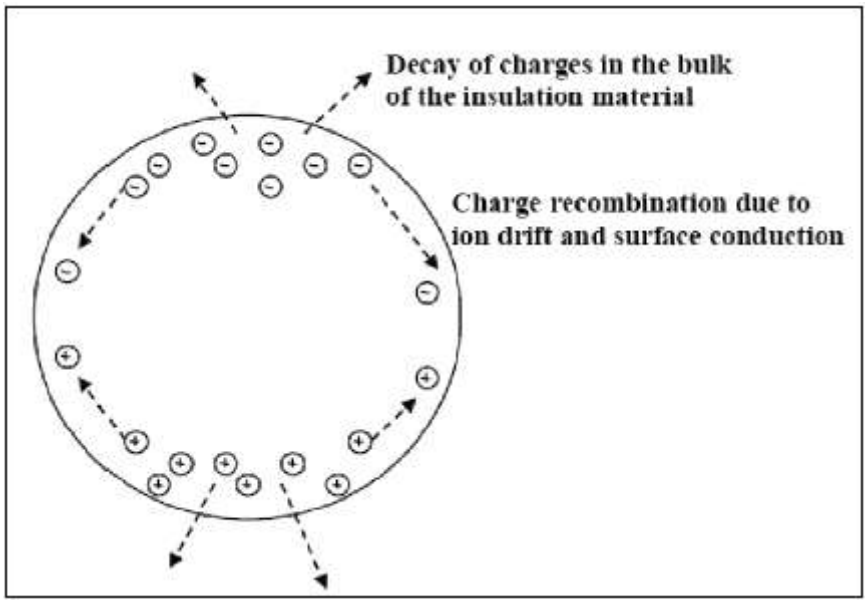


Fig. I.5: ***Evolution de la répartition de charges [9].***

I.2.4 Conséquences des décharges partielles :

Le phénomène de décharges partielles crée localement à la fois une érosion et une oxydation de l'isolant (par réactions chimiques).

Une décharge partielle entraîne donc un vieillissement local qui a de grandes chances de s'étendre en fonction du temps. Il est même admis à ce jour que le phénomène de décharges partielles peut entraîner la destruction du matériel après un certain temps d'usage.

Destruction de l'isolation :

Nul doute ne le fait que la détection de l'activité des DP est d'un intérêt capital pour prévenir toute dégradation d'un isolant.

La figure (Fig. I.5**)** illustre un site de DP, photographie grâce à un microscope [10]. Une décharge partielle y a créé une arborescence électrique.



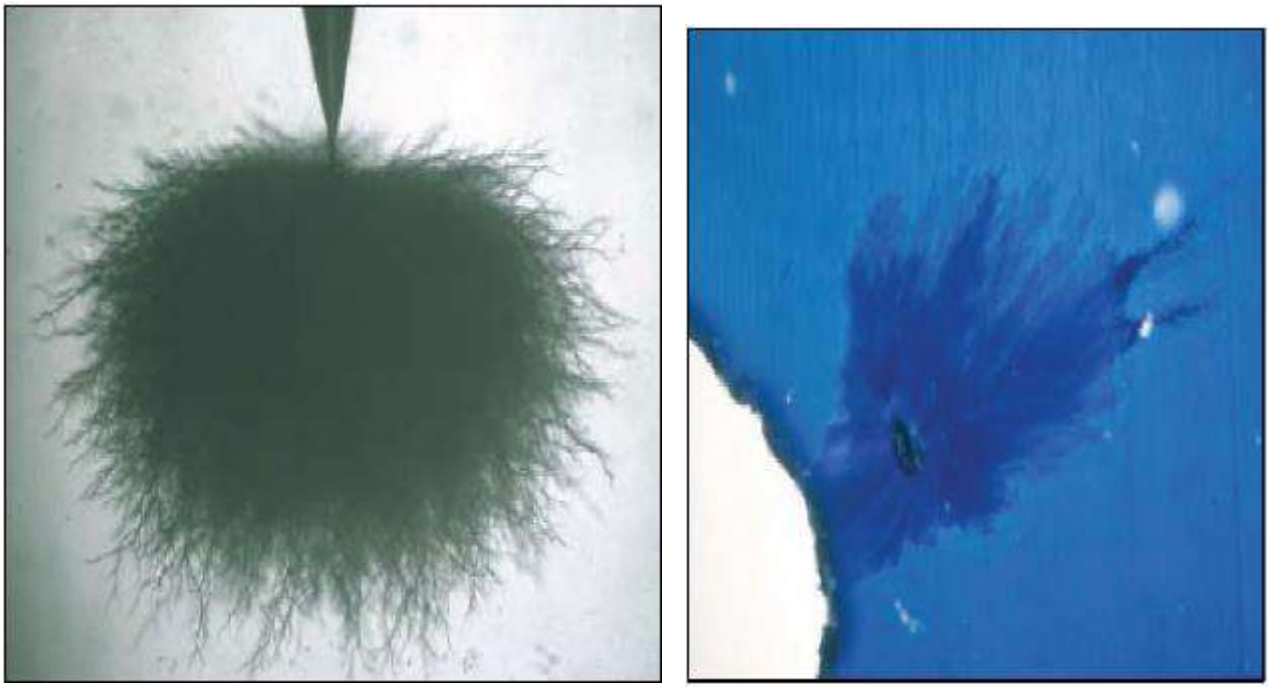
Fig. I.6: ***Une décharge partielle à entraîne une arborescence électrique [10].***

Une arborescence électrique est un réseau de fins canaux carbonises qui se propagent relativement vite dans l'isolation et qui finissent par le détruire [3].

Autre ennemi juré des câbles extrudes et de leurs accessoires (joints) : l'arborescence d'eau (Fig. I.7.b). En soi, une arborescence d'eau n'engendre pas de décharges partielles. Par

contre, elle provoque localement un accroissement du champ électrique, donnant lieu avec le temps à une arborescence électrique.

Cette dernière est alors responsable des nombreuses décharges partielles associées à ce type d'imperfection.



(a) Arborescence électrique (b) Arborescence d'eau

Fig. I.7: ***Destruction d'un matériau isolant [10].***

I.2.5 Mesure des décharges partielles :

L'isolation des câbles en service subit l'action d'un champ électrique alternatif à la fréquence du réseau. Toute imperfection de cet isolant peut dés lors être le siège de petites décharges, appelées Décharges Partielles (DP), si le champ électrique y dépasse une valeur seuil.

Une décharge partielle ne court-circuite jamais l'entièreté de l'isolation d'un câble. Il s'agit plutôt d'une décharge localisée au niveau d'un défaut d'isolation, qui témoigne indirectement de l'état de dégradation de cet isolant. Pour cette raison, la mesure de DP a déjà prouvé toute son efficacité dans le cadre du diagnostic des câbles souterrains.

Les décharges partielles induisent des pulsations électriques Haute Fréquence (HF) dans les conducteurs d'un câble (écran conducteur et âme centrale représentés à la figure (Fig. I.1). Ces pulses vont ensuite se propager vers les deux extrémités du câble. C'est d'ailleurs à cet endroit qu'il convient de les détecter, comme le préconise la figure (Fig. I.8).

A priori, on peut envisager de mesurer ces pulsations HF de deux façons fondamentalement différentes (Fig. I.8).

– **Mesure Off-line:** Elle consiste à déconnecter le câble du réseau et à le tester off-line (lorsqu'il n'est pas en service). Un générateur extérieur est utilisé pour mettre sous tension le câble à tester.

– **Mesure On-line.** Dans ce cas, le câble n'est pas déconnecté du réseau. Il reste donc en service lors de son diagnostic. Cette méthode jouit de nombreux avantages vis-à-vis de la mesure off-line — tels que la possibilité de suivre en continu l'état d'un câble ou encore la possibilité de réaliser ces mesures sans interrompre la puissance que ce câble transite —. En contrepartie, son application est beaucoup plus difficile car de nombreux parasites polluent les mesures réalisées.

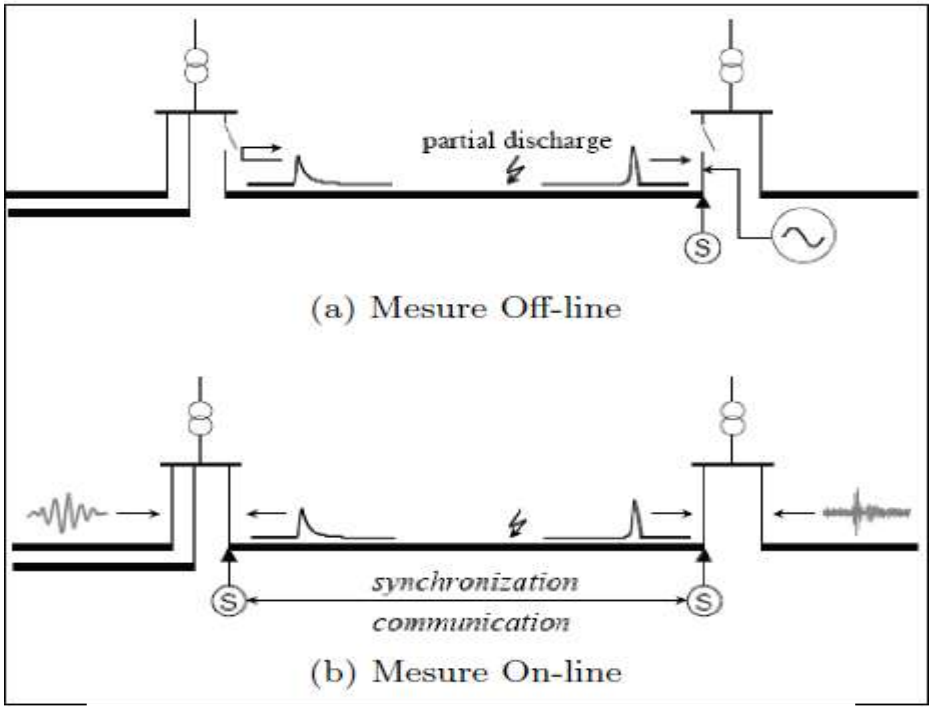


Fig. I.8: ***Deux façons de mesurer une décharge partielle [11].***

I.2.6 Propagation d'une décharge partielle :

Une décharge partielle se manifeste par un pulse de courant dont le temps de montée est de l'ordre de l ns. Il convient de remarquer que, lorsque cette pulsation se propage dans l'ecran métallique ou le conducteur central d'un câble, elle s'affaiblit et se déforme.

L'objectif de la présente section est donc de dresser une synthèse du phénomène de propagation des signaux Haute Fréquence dans les câbles souterrains.

On peut admettre que la fréquence du signal considérer est supérieure à 10 MHz et que la vitesse de propagation du signal1 vaut Vp $\approx \frac{3*10^8}{\sqrt{2.3}}$ pour un câble au polyéthylène réticulé.

Pour f = 10MHz, on peut associer au signal une longueur d'onde valant $\lambda \approx 20$m. Si la longueur du câble Ic >> λ, l'hypothèse d'un circuit distribué est de rigueur. De plus, λ étant largement supérieur à la distance séparant les conducteurs ; nous considérerons le mode de propagation électromagnétique transverse [11]

Conclusion :

Toute imperfection d'isolant peut dés lors être le siège de petites décharges, appelées Décharges Partielles (DP), si le champ électrique y dépasse une valeur seuil.

Une décharge partielle ne court-circuite jamais l'entièreté de l'isolation d'un câble. Il s'agit plutôt d'une décharge localisée au niveau d'un défaut d'isolation, qui témoigne indirectement de l'état de dégradation de cet isolant.

Enfin, nous devons noter que les décharges partielles n'engendrent pas systématiquement la destruction de l'isolation du câble. En effet, certaines sources de DP peuvent être actives. Pendant des années sans pour autant causer de dommages catastrophiques.

Néanmoins, quelle que soit la situation, le suivi de l'activité des DP nous renseignera avec intérêt sur l'´etat d'un isolant.

ChapitreII:

La méthode des élémentsfinis avec résolution des équations partielles

Introduction :

Introduite en électromagnétisme par M.V.K.Chari et P.P. Sylvester vers 1970, la méthode des éléments finis a connue un essor considérable. Le développement de la méthode permet actuellement de traiter différents types de problème couplé : magnétothermique, électromagnétique, électromagnétique-mécanique et magnétohydrodynamique.

Le principe de la méthode est basé sur une formulation intégrale du problème aux dérivées partielles et de leurs conditions aux limites, cette formulation peut être de type variationnelle ou résidus pondérés [12].

II.1.Le logiciel FEMM :

Le logiciel FEMM est une suite de programmes modulaires utilisés pour résoudre les problèmes magnétostatique et électrostatique en deux dimensions (axisymétrique ou plan) ; le FEMM peut diviser en trois parties essentielles [13] :

- **Préprocesseur** (femm.exe) : C'est un programme de CAO pour la définition de géométrie du problème à résoudre, et définissant les conditions aux limites.
  Les fichiers DXF d'autocad peuvent être importés pour faciliter des géométries.

- **Solveur** (fkern.exe) : Le solveur pend en compte les fichiers de données décrivant le problème et résout les équations de Maxwell pour obtenir les valeurs de l'induction magnétique dans domaine de résolution.

- **Post processor** (femmview.exe) : C'est un programme graphique qui affiche les résultants sous forme de champ, de conteur et densité. Le programme permet aussi à l'utilisateur d'inspecter le champ aux points arbitraires, et d'évaluer plusieurs différentes intégrales et tracer diverses quantités d'intérêt le long des contours définis par l'utilisateur. Deux programmes supplémentaires sont aussi appelés pour exécuter des tâches spécialisées. Ceux-ci sont:

1. triangle.exe : Triangle découpe la région avec en grand nombre de triangles, c'est une partie vitale du procédé d'éléments finis.
2. femmplot.exe : Ce programme est utilisé pour afficher les diverses solutions en 2D.

Pour traiter des problèmes magnétodynamiques on doit intégrer un sous programme par langage **LUA.**

Lua est un langage de programmation étendu, conçu pour des procédures générales de programmation avec des facilités de description des données, Lua est prévu pour être employé comme un langage puissant et facile à concevoir, pour différents programmes. Lua est implémenté comme une bibliothèque en C.

Le script LUA est une partie de programme directement interprétée par FEMM, contenant des fonctions propres au logiciel FEMM.

L'utilisation de la méthode numérique de calcul par éléments finis nous apporte plusieurs avantages : la prise en compte de la géométrie de la machine, de la saturation des matériaux magnétiques, ainsi que l'effet de peau dans les barres rotoriques.

D'autre part, d'un point de vue pratique, il est très facile de faire varier les conditions de fonctionnement de la machine (fréquence et l'alimentation), en changeant simplement les données du programme de calcul d'où une grande souplesse d'utilisation .Ainsi ce code de calculs permet de calculer les différentes grandeurs pour plusieurs positions sans pour autant être obligé à chaque fois de redéfinir la géométrie et le maillage.

II.2. La Méthode des éléments finis :

La méthode des éléments finis (MEF) est l'une des méthodes les plus employées aujourd'hui pour résoudre des équations aux dérivées partielles. Elle a fait son apparition dans les années 70, après la MDF.

Son histoire remonte à l'année 1943 [14,15]. La MEF est une méthode générale qui s'applique à la majorité des problèmes rencontrés dans la pratique: problèmes stationnaires ou

non stationnaires, linéaires ou non linéaires, définis dans un domaine géométrique quelconque à une, deux ou trois dimensions.

En plus, elle s'adapte bien aux milieux hétérogènes. Elle consiste à utiliser une approximation simple des variables inconnues pour transformer les équations aux dérivées partielles en équations algébriques. Les conditions aux limites sont prises en compte aisément. Enfin, la méthode est décrite par une théorie mathématique très riche, qui permet de conserver les propriétés des opérateurs mathématiques.

Néanmoins, cette méthode exige un traitement particulier des équations, qui sont transformées à l'aide d'une formulation intégrale, puis discrétisées pour aboutir à un système d'équations algébriques (Fig. II.1)

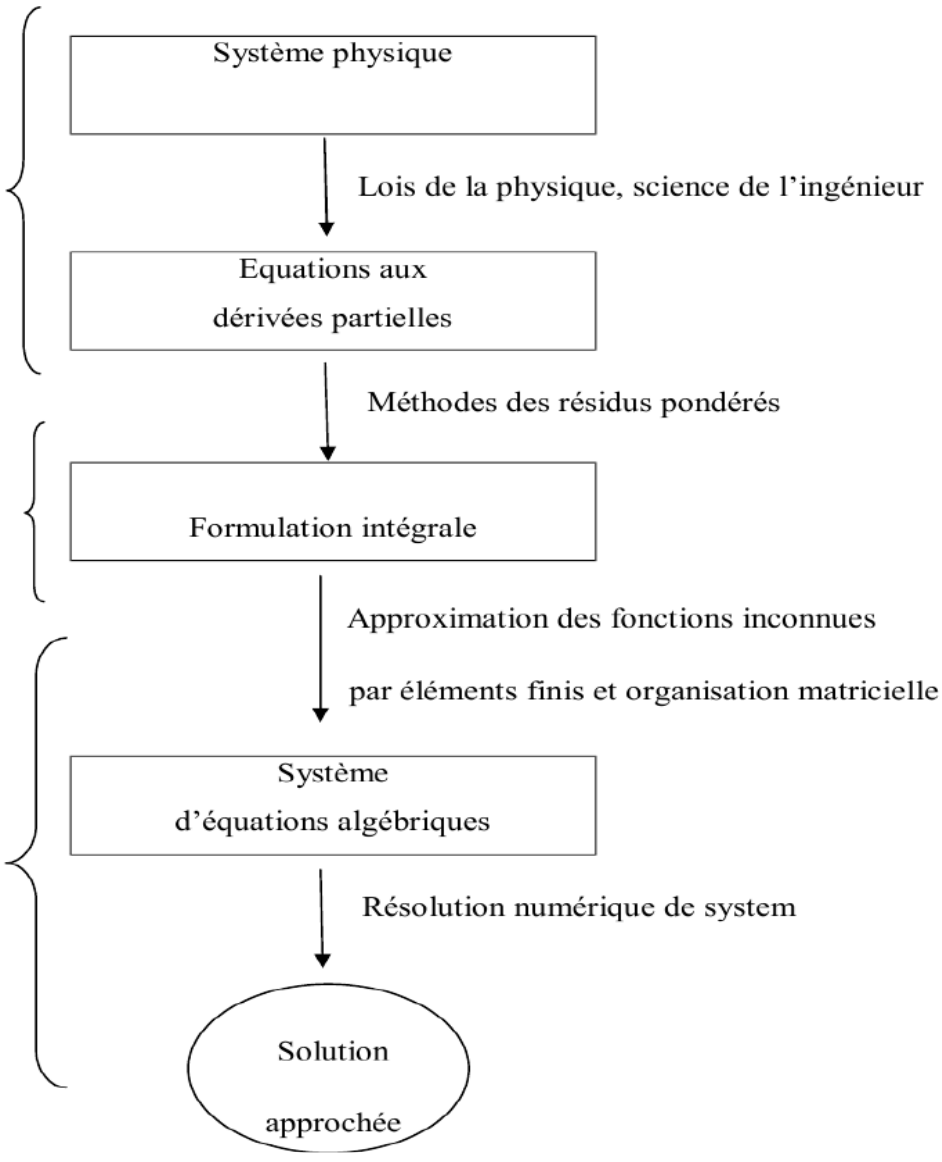


Fig. II.1Transformation des équations d'un système physique [16].

II.2.1Formulation intégrale :

Nous allons exposer les deux formulations intégrales qui sont les plus couramment utilisées dans la méthode des éléments finis pour le calcul du champ électrostatique formulation variationnelle et la formulation des résidus pondérés [17].

II.2.2. Formulation variationnelle :

La formulation variationnelle nécessite la connaissance à priori de la fonctionnelle d'énergie du système à étudier. Celle-ci est déterminée à partir du principe de l'action hamiltonienne qui stipule l'existence d'une fonctionnelle type intégrale, définie par [18] :

$$F(A) = \int_{\Omega} L d\Omega \qquad (II.1)$$

L: est la fonction de Lagrange résultante de la co-énergie du système de type cinétique et de son énergie potentielle.
Ω: est le domaine d'étude.

Dans le cas d'un problème magnétique, la fonction L est donnée par:

$$L = \int_{0}^{B} vBdB - JA \qquad (II.2)$$

La fonction d'énergie est donnée alors comme suit :

$$F(A) = \int_{\Omega} [\int_{0}^{B} vBdB - JA] d\Omega \qquad (II.3)$$

Où

v: est la réluctivité magnétique

B: l'induction magnétique

J: la densité de courant

A: le potentiel vecteur magnétique

La résolution du problème variationnel ainsi défini, revient à minimiser la fonctionnelle d'énergie F (A), la minimisation est effectuée en utilisant le principe de Rayleigh-Ritz qui consiste à écrire:

$$\frac{\partial F(A)}{\partial A} = 0 \qquad \text{(II.4)}$$

Ou:

$$\frac{\partial F(A)}{\partial A_1} = \frac{\partial F(A)}{\partial A_2} = \ldots = \frac{\partial F(A)}{\partial A_N} = 0 \qquad \text{(II.5)}$$

Avec:

N: le nombre de nœuds du domaine d'étude.

A_i: est l'inconnue au nœud i du domaine.

II.2.3 Méthode des résidus pondérés :

La méthode des résidus pondérés est basée sur la détermination du résidu défini par:

$$R=L(A)-f \qquad \text{(II.6)}$$

Où:

R: représente le résidu de l'approximation.

L: opérateur différentiel

f: fonction définie sur le domaine d'étude Ω.

A: est la fonction inconnue.

La méthode des résidus pondérés consiste à trouver les fonctions A qui annule la forme intégrale suivante :

$$\iint_{\Omega} R_i \Psi_i d\Omega = 0 \qquad \text{(II .7)}$$

Ψ_i : est une fonction de projection définie sur Ω.

Les valeurs de A qui permettent d'annuler l'intégrale, sont solutions du système algébrique obtenu.

Les choix des fonctions de projection permettent de définir plusieurs méthodes, parmi elles, on cite :

- La méthode de collocation par points.
- La méthode des moindres carrés.
- La méthode de Galerkine, appelée aussi Pétrov-Galerkine.

La méthode de collocation par points utilise les fonctions de Dirac, celle des moindres carrés est basée sur la minimisation de la norme quadratique de l'erreur sur l'équation et les conditions aux limites [18].

La méthode de Galerkine consiste à choisir des fonctions de projection identiques aux fonctions d'approximation.

On s'intéressera à la méthode de Galerkine, elle est plus utilisée en électrotechnique, vu qu'elle conduit à un système matriciel symétrique.

Remarque:

Les deux approches, variationnelle et projective, ont le même ordre de précision; mais la méthode projective est plus employée vu qu'elle peut s'appliquer à toute équation sans avoir recours à la connaissance ou l'existence d'une fonctionnelle d'énergie du système étudié [18,19].

II.3. Discrétisation :

Une fois l'équation aux dérivées partielles est transformée en une forme intégrale, on passe à l'étape de discrétisation qui consiste à subdiviser le domaine concerné en un nombre fini de sous domaines appelés «Eléments», dont la géométrie est préalablement choisie. Cette étape est très importante dans l'analyse par élément fini, car l'espace de stockage est sur ordinateur, le temps de calcul et la précision de la solution en dépendent.

Le maillage respecte les règles dites de conformité. Les éléments ne se recouvrent pas et deux éléments sont voisins, soit par un sommet commun, soit par une arête qu'ils partagent alors entièrement.

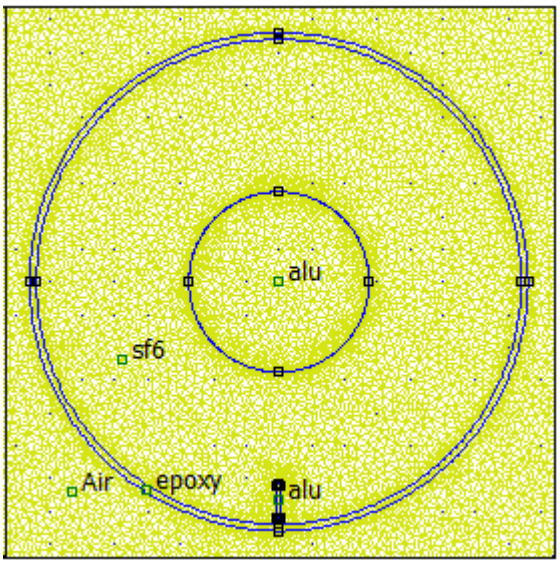


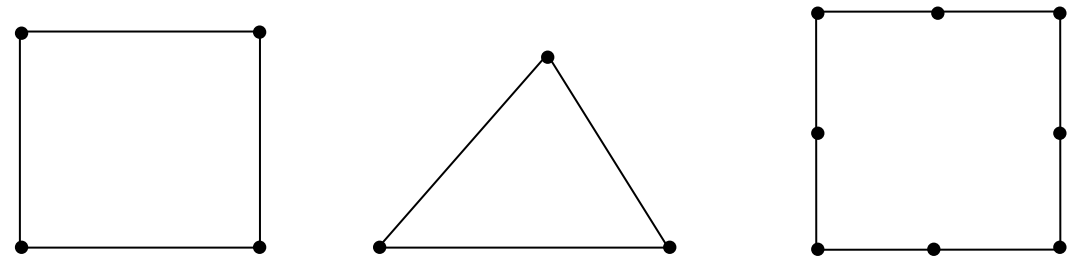
Fig. II.2 Discrétisation d'un domaine par le maillage.

II.3.1. Elément de référence :

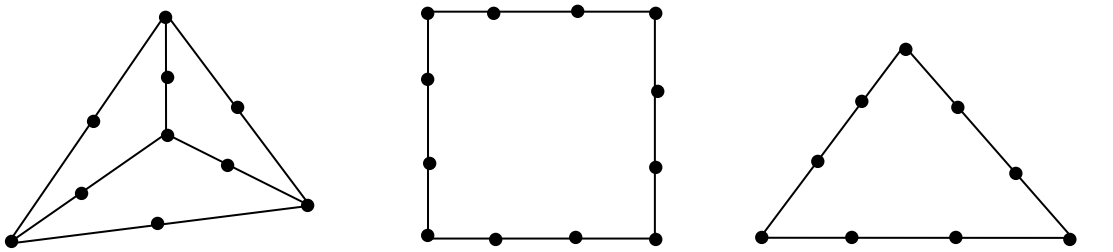
Les éléments de référence utilisés pour la subdivision du domaine sont des éléments simples, comme le triangle, le rectangle, le tétraèdre et le parallélépipède, pour les quels on associe un système de coordonnées normées, dans le but de définir pour chaque type d'élément, la fonction d'interpolation associée.

Une fois cette dernière est construite, on obtient les fonctions associées au système réel à l'aide de transformations géométriques.

Pour des domaines d'étude à une, deux ou trois dimensions, on rencontre généralement des éléments linéaires, quadratiques ou cubiques.



Elément linéaire carré | Elément linéaire triangulaire | Elément quadratique carré



Elément quadratique tétraèdre | Elément cubique carré | Elément cubique triangulaire

Fig. II.3 Elément de référence

II.3.2.Fonction d'interpolation :

Les fonctions d'interpolation sont obtenues à partir du triangle de Pascal donné ci dessous:

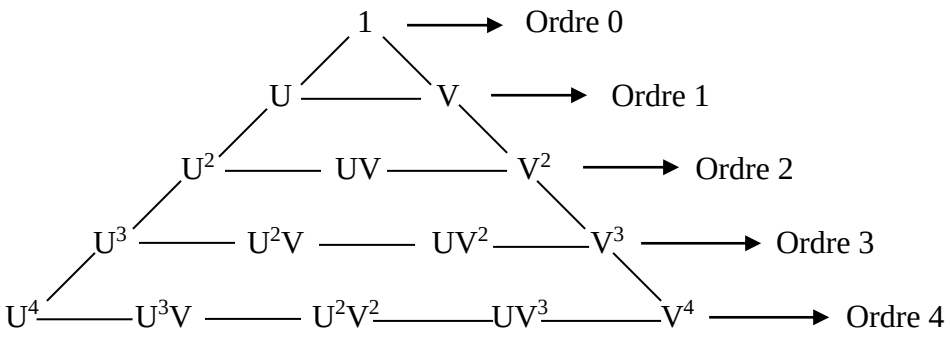


Fig. II.4Triangle de Pascal

Leur construction doit vérifier deux principes:

II.3.2.a Le principe de l'état complet :

- le nombre de termes de la fonction doit être égal au nombre de nœuds de l'élément.
- la fonction doit contenir un terme constant.

II.3.2.b Le principe de compatibilité :

Celui-ci veut dire que la fonction doit être continue.

II.4. Fonction d'approximation sur un élément 2D :

Sur le domaine (Ω), nous choisirons un ensemble de n nœuds d'interpolations de coordonnées (x_i, y_i). Sur chaque élément (Ω^e), nous utiliserons une approximation nodale de la fonction exacte U(x, y).

$$U^e(x,y) = \left\langle N_1^e(x,y) \quad N_2^e(x,y) \quad ..... \quad N_{n_e}^e(x,y) \right\rangle \begin{Bmatrix} U_1^e \\ U_2^e \\ U_3^e \\ \\ U_{n_e}^e \end{Bmatrix} \qquad \text{(II.8)}$$

$U^e(x, y)$ fonction d'approximation sur l'élément e.

U_1^e, U_2^e et $....U_{n_e}^e$ Sont les valeurs de U(x, y) aux nœuds d'interpolation de l'élément.

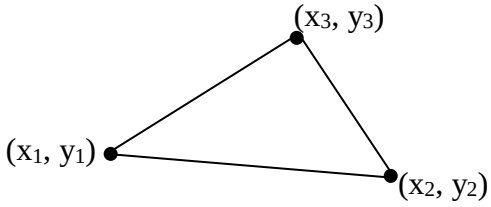
$N_1^e(x,y), N_2^e(x,y), N_3^e(x,y), ..., N_{n_e}^e(x,y)$ Sont les fonctions de forme ou d'interpolation sur l'élément.

n_e Est le nombre de nœuds d'un élément.

Les fonctions d'interpolation dépendent des coordonnées des nœuds de l'élément et sont différentes pour chaque élément.

II.4.1. Cas d'un élément triangulaire linéaire 2D :

Dans le cas où l'élément de référence est un triangle linéaire, les fonctions d'interpolation sont calculées comme suit :



A partir du triangle de Pascal, on trouve que :

$$U(x, y) = a + bx + cy$$

On pose U_1, U_2, U_3 les valeurs de la fonction respectivement aux nœuds 1, 2, 3.

Dans chaque point, on a :

$$U(x_1, y_2) = a + bx_1 + cy_1 = U_1$$
$$U(x_2, y_2) = a + bx_2 + cy_e = U_2$$
$$U(x_3, y_3) = a + bx_3 + cy_3 = U_3$$

On obtient le système matriciel suivant :

$$\begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix}$$

Alors :

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix}^{-1} = \frac{1}{\det} {}^{C}\left(\begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix}^{t} \right)$$

$${}^{C}\left(\begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix}^{t} \right) = {}^{C}\left(\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \end{bmatrix} \right)$$

$$= \begin{bmatrix} x_2y_3 - y_2x_3 & x_3y_1 - y_3x_1 & x_1y_2 - y_1x_2 \\ y_2 - y_3 & y_3 - y_1 & y_1 - y_2 \\ x_3 - x_2 & x_1 - x_3 & x_2 - x_1 \end{bmatrix}$$

$$\det = \det\left(\begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix} \right)$$

$$\begin{aligned}\det &= (x_2y_3 - x_3y_2) - x_1(y_3 - y_2) + y_1(x_3 - x_2)\\ &= x_2y_3 - x_3y_2 - x_1y_3 + x_1y_2 + y_1x_3 - y_1x_2\end{aligned}$$

On ajoute et on soustrait le terme y_3x_3 à l'expression du déterminant.

$$\begin{aligned}\det &= x_2y_3 - x_3y_2 - x_1y_3 + x_1y_2 + y_1x_3 - y_1x_2 + y_3x_3 - y_3x_3\\ &= y_2(x_1 - x_3) - y_3(x_1 - x_3) - y_3(x_3 - x_2) + y_1(x_3 - x_2)\\ &= (y_2 - y_3)(x_1 - x_3) - (y_3 - y_1)(x_3 - x_2)\end{aligned}$$

Finalement, on a

$$\det = 2\Delta$$

Avec Δ l'aire du triangle.

Alors :

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \frac{1}{2\Delta}\begin{bmatrix} x_2y_3 - y_2x_3 & x_3y_1 - y_3x_1 & x_1y_2 - y_1x_2 \\ y_2 - y_3 & y_3 - y_1 & y_1 - y_2 \\ x_3 - x_2 & x_1 - x_3 & x_2 - x_1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix}$$

Et :

$$U(x, y) = \begin{bmatrix} 1 & x & y \end{bmatrix}\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}$$

$$U(x, y) = \frac{1}{2\Delta}\begin{bmatrix} 1 & x & y \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x_2y_3 - y_2x_3 & x_3y_1 - y_3x_1 & x_1y_2 - y_1x_2 \\ y_2 - y_3 & y_3 - y_1 & y_1 - y_2 \\ x_3 - x_2 & x_1 - x_3 & x_2 - x_1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix}$$

On trouve que :

$$U = \begin{bmatrix} N_1 & N_2 & N_3 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix}$$

Avec :

$$N_1 = \frac{1}{2\Delta}[(x_2y_3 - y_2x_3) + (y_2 - y_3)x + (x_3 - x_2)y]$$

$$N_2 = \frac{1}{2\Delta}[(x_3y_1 - y_3x_1) + (y_3 - y_1)x + (x_1 - x_3)y]$$

$$N_3 = \frac{1}{2\Delta}[(x_1 y_2 - y_1 x_2) + (y_1 - y_2)x + (x_2 - x_1)y]$$

Pour chaque élément du domaine, on a alors :

$$U^e(x,y) = \begin{bmatrix} N_1^e & N_2^e & N_3^e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1^e \\ U_2^e \\ U_3^e \end{bmatrix}$$

$$N_1^e = \frac{1}{2\Delta^e}(a_1^e + b_1^e x + c_1^e y)$$

$$N_2^e = \frac{1}{2\Delta^e}(a_2^e + b_2^e x + c_2^e y) \ , \ N_3^e = \frac{1}{2\Delta^e}(a_3^e + b_3^e x + c_3^e y)$$

Avec :

$$a_1^e = x_2^e y_3^e - y_2^e x_3^e \qquad b_1^e = y_2^e - y_3^e \qquad c_1^e = x_3^e - x_2^e$$

$$a_2^e = x_3^e y_1^e - y_3^e x_1^e \qquad b_2^e = y_3^e - y_1^e \qquad c_2^e = x_1^e - x_3^e$$

$$a_3^e = x_1^e y_2^e - y_1^e x_2^e \qquad b_3^e = y_1^e - y_2^e \qquad c_3^e = x_2^e - x_1^e$$

$$\Delta^e = \frac{1}{2}\left(b_1^e c_2^e - b_2^e c_1^e\right)$$

II.5. Fonction d'approximation sur le domaine 2D :

Les fonctions $U^e(x, y)$ doivent être construites sur chaque élément, de manière à être continues sur chaque élément.

Dans un domaine global à N_e éléments, l'inconnue s'exprime par assemblage de toutes les fonctions élémentaires :

$$U(x, y) = \sum_{e=1}^{N_e} U^e(x, y) \qquad \text{(II.9)}$$

II.6. Avantages et les inconvénients de la méthode des éléments finis :

La méthode des éléments finis présente les avantages et les inconvénients suivants [20**]**:

Les avantages:

- Adaptation aux géométries complexes.
- Prise en compte des non linéarités.
- Temps de calcul relativement avantageux.

Les inconvénients:

- Inapplicable sur les domaines infinis.
- Présence des singularités dans le domaine d'étude.
- Mise en oeuvre relativement difficile.

II.7. Implémentation de la méthode des éléments finis :

La mise en œuvre de la méthode des éléments finis débouche inévitablement sur un logiciel qui lui est associé.

Si, lors des premières tentatives de calcul par la méthode des éléments finis, on écrivait, pour chaque nouveau problème, un programme différent tenant compte de sa géométrie particulière, de ses particularités physiques et de ses conditions aux limites, on s'oriente aujourd'hui vers la réalisation de logiciels généraux dont la structure informatique est adaptée au traitement d'un grand nombre de problèmes d'un même type [17].

Ces logiciels ont pratiquement tous la structure représentée sur la figure (Fig. II.3**)** qui consiste en un programme séparé en quatre grands blocs : le pré processeur, le mailleur, le solver et le post processeur.

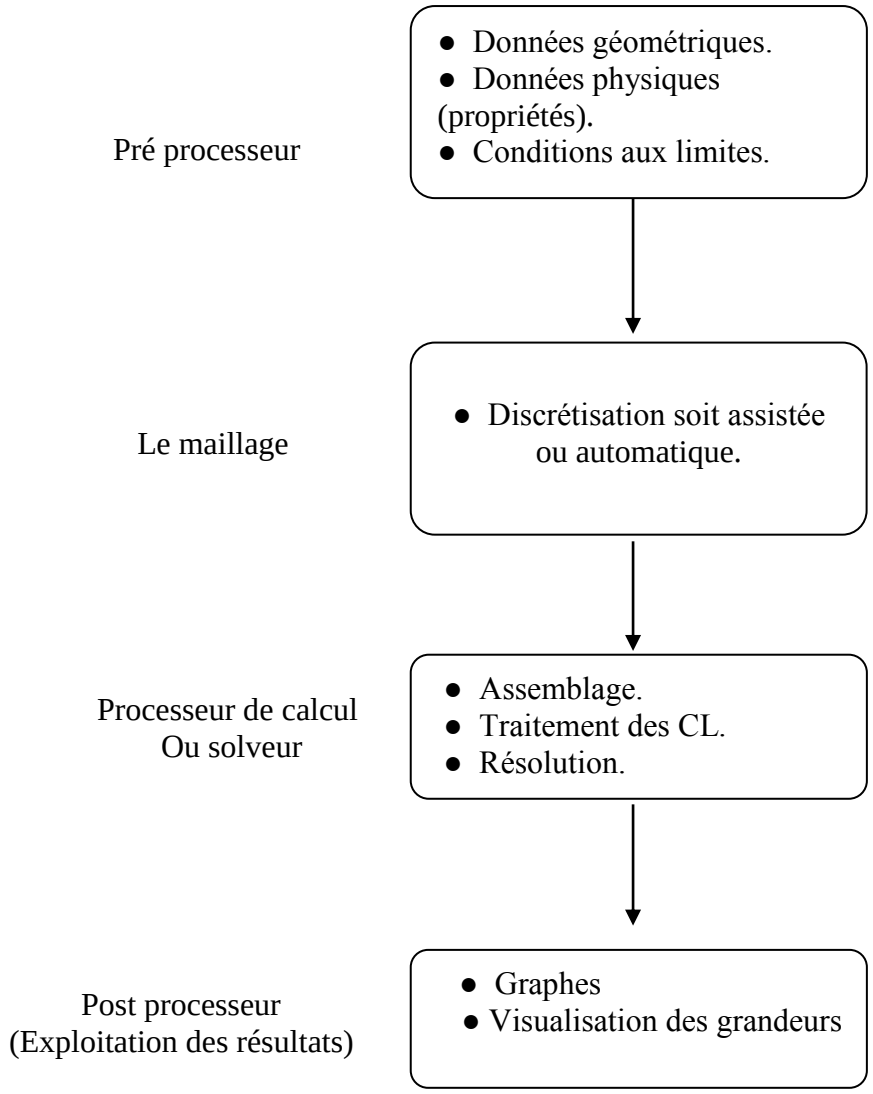


Fig. II.3 Organisation du logiciel.

II.8. Résolution de l'équation magnétostatique par la méthode des éléments finis :

L'équation EDP en terme du champ électrique régissant d'un phénomène électrique est donné par:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} = 0 \qquad (II.10)$$

II.8.1. Ecriture intégrale de l'équation :

Pour mettre l'équation magnétostatique en forme intégrale, nous utiliserons la Formulation des résidus pondérés.

On pose

$$L(E) = \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2}$$

$$F=0$$

Le résidu R s'écrit alors :

$$R = L(E)-F$$

La méthode des résidus pondérés consiste à trouver les fonctions E qui annulent la forme intégrale suivante :

$$\iint_{\Omega} \Psi R(E) d\Omega$$

Ω Représente le domaine sur lequel est définie la fonction E, et Ψ une fonction quelconque définie aussi sur Ω.

On a à résoudre l'équation suivante :

$$\iint_{\Omega} \Psi[\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2}] = 0$$

Cette dernière équation peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\iint_{\Omega} \Psi[\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2}] = 0$$

$$\iint_{\Omega} (\Psi \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \Psi \frac{\partial^2 E}{\partial y^2}) dxdy = 0 \qquad \text{(II.11)}$$

Pour rendre l'équation (II.10) plus simple, il faut calculer le terme :

$$\iint_{\Omega} (\Psi \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \Psi \frac{\partial^2 E}{\partial y^2}) dxdy$$

$$\iint_{\Omega}(\Psi\frac{\partial^2 E}{\partial x^2}+\Psi\frac{\partial^2 E}{\partial y^2})dxdy=\iint_{\Omega}\Psi\frac{\partial^2 E}{\partial x^2}dxdy+\iint_{\Omega}\Psi\frac{\partial^2 E}{\partial y^2}dxdy$$

On a :

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\Psi\frac{\partial E}{\partial x}\right)=\frac{\partial\Psi}{\partial x}\frac{\partial E}{\partial x}+\Psi\frac{\partial^2 E}{\partial x^2}$$

Alors :

$$\Psi\frac{\partial^2 E}{\partial x^2}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\Psi\frac{\partial E}{\partial x}\right)-\frac{\partial\Psi}{\partial x}\frac{\partial E}{\partial x}$$

De même, on trouve que :

$$\Psi\frac{\partial^2 E}{\partial y^2}=\frac{\partial}{\partial y}\left(\Psi\frac{\partial E}{\partial y}\right)-\frac{\partial\Psi}{\partial y}\frac{\partial E}{\partial y}$$

Alors :

$$\iint_{\Omega}\Psi\frac{\partial^2 E}{\partial x^2}dxdy+\iint_{\Omega}\Psi\frac{\partial^2 E}{\partial y^2}dxdy=-\iint_{\Omega}\frac{\partial\Psi}{\partial x}\frac{\partial E}{\partial x}dxdy+\iint_{\Omega}\frac{\partial}{\partial x}\left(\Psi\frac{\partial E}{\partial x}\right)dxdy-\iint_{\Omega}\frac{\partial\Psi}{\partial y}\frac{\partial E}{\partial y}dxdy$$

$$+\iint_{\Omega}\frac{\partial}{\partial y}\left(\Psi\frac{\partial E}{\partial y}\right)$$

$$\iint_{\Omega}(\Psi\frac{\partial^2 E}{\partial x^2}+\Psi\frac{\partial^2 E}{\partial y^2})dxdy=-\iint_{\Omega}\left(\frac{\partial\Psi}{\partial x}\frac{\partial E}{\partial x}+\frac{\partial\Psi}{\partial y}\frac{\partial E}{\partial y}\right)dxdy+\iint_{\Omega}\left(\frac{\partial}{\partial x}\left(\Psi\frac{\partial E}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\Psi\frac{\partial E}{\partial y}\right)\right)dxdy$$

On pose:

$$\vec{f}=\Psi\frac{\partial E}{\partial x}\vec{i}+\Psi\frac{\partial E}{\partial y}\vec{j}$$

On a:

$$div(\vec{f})=\frac{\partial}{\partial x}\left(\Psi\frac{\partial E}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\Psi\frac{\partial E}{\partial y}\right)$$

En utilisant le théorème de divergence qui énonce que :

$$\iint_{\Omega}div(f)dxdy=\oint_{\Gamma}f.nd\Gamma$$

Où :

Γ Est le contour entourant le domaine Ω.

On aboutit à la relation suivante :

$$\iint_{\Omega}\left(\frac{\partial}{\partial x}\left(\Psi\frac{\partial E}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\Psi\frac{\partial E}{\partial y}\right)\right)dxdy=\oint_{\Gamma}\left(\Psi\frac{\partial E}{\partial x}\vec{i}+\Psi\frac{\partial E}{\partial y}\vec{j}\right)nd\Gamma$$
$$=\oint_{\Gamma}\Psi\left(\frac{\partial E}{\partial x}\vec{i}+\frac{\partial E}{\partial y}\vec{j}\right)nd\Gamma$$

Comme :

$$\left(\frac{\partial E}{\partial x}\vec{i}+\frac{\partial E}{\partial y}\vec{j}\right)n=\frac{\partial E}{\partial n}$$

Alors :

$$\iint_{\Omega}\left(\frac{\partial}{\partial x}\left(\Psi\frac{\partial E}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\Psi\frac{\partial E}{\partial y}\right)\right)dxdy=\oint_{\Gamma}\Psi\frac{\partial E}{\partial n}d\Gamma$$

D'où :

$$\iint_{\Omega}(\Psi\frac{\partial^2 E}{\partial x^2}+\Psi\frac{\partial^2 E}{\partial y^2})dxdy=-\iint_{\Omega}\left(\frac{\partial\Psi}{\partial x}\frac{\partial E}{\partial x}+\frac{\partial\Psi}{\partial y}\frac{\partial E}{\partial y}\right)dxdy+\oint_{\Gamma}\Psi\frac{\partial E}{\partial n}d\Gamma$$

L'équation (II.10) devient :

$$-\iint_{\Omega}\left(\frac{\partial\Psi}{\partial x}\frac{\partial E}{\partial x}+\frac{\partial\Psi}{\partial y}\frac{\partial E}{\partial y}\right)dxdy+\oint_{\Gamma}\Psi\frac{\partial E}{\partial n}d\Gamma=0 \qquad \text{(II.12)}$$

II.8.2. Application des conditions aux limites :

Dans notre système, la tôle baigne dans champ électrique dont la valeur est connue, alors, la condition aux limites qui convient est la condition de Dirichlet :

$$E = C$$

Tel que C est une constante.

D'où :

$$\frac{\partial E}{\partial n}=0$$

L'équation (II.11) se simplifie en :

$$-\iint_{\Omega}\left(\frac{\partial\Psi}{\partial x}\frac{\partial E}{\partial x}+\frac{\partial\Psi}{\partial y}\frac{\partial E}{\partial y}\right)dxdy=0 \qquad (II.13)$$

II.8.3. Discrétisation :

La subdivision par la méthode des éléments finis permet de trouver une approche à la solution cherchée E dans l'élément de domaine subdivisé (élément triangulaire linéaire), cette solution approchée sera de la forme suivante :

$$E^{e}=\sum_{i=1}^{3}E_{i}\times N_{i}^{e}$$

Avec :

E_i est la valeur du champ électrique au nœud considéré.

N_i^e Fonction d'interpolation nodale.

II.8.4. Interpolation éléments finis :

En remplaçant E par sa solution approchée dans l'équation (II.13), on trouve :

$$-\iint_{\Omega^{e}}\left(\frac{\partial\Psi}{\partial x}\frac{\partial\left(\sum_{1}^{3}E_{i}N_{i}^{e}\right)}{\partial x}+\frac{\partial\Psi}{\partial y}\frac{\partial\left(\sum_{1}^{3}E_{i}N_{i}^{e}\right)}{\partial y}\right)dxdy=0$$

Avec Ω^e sous domaine.

La méthode Galerkine permet d'identifier la fonction inconnue Ψ, en mettant :

$$\Psi=N_{j}^{e}$$

Finalement, on a :

$$-\iint_{\Omega^{e}}\left(\frac{\partial N_{j}^{e}}{\partial x}\frac{\partial\left(\sum_{1}^{3}E_{i}N_{i}^{e}\right)}{\partial x}+\frac{\partial N_{j}^{e}}{\partial y}\frac{\partial\left(\sum_{1}^{3}E_{i}N_{i}^{e}\right)}{\partial y}\right)dxdy=0$$

En développant l'équation précédente, on aboutit à l'équation suivante :

$$-\sum_{1}^{3}\iint_{\Omega^e}\left(\frac{\partial N_j^e}{\partial x}\frac{\partial N_i^e}{\partial x}+\frac{\partial N_j^e}{\partial y}\frac{\partial N_i^e}{\partial y}\right)dxdy\{E_i\}=0 \qquad (II.14)$$

L'écriture matricielle de l'équation (II.14) est la suivante :

$$-[K^e]\{E_i\}=0 \qquad (II.15)$$

Les éléments élémentaires des matrices K^e sont donnés par :

$$K_{ij}^e=\iint_{\Omega^e}\left(\frac{\partial N_i^e}{\partial x}\frac{\partial N_j^e}{\partial x}+\frac{\partial N_i^e}{\partial y}\frac{\partial N_j^e}{\partial y}\right)dxdy$$

Remarque :

Les matrices K^e sont des matrices symétriques. On a alors :

$$K_{ij}^e=K_{ji}^e$$

II.8.5 Calcul des termes élémentaires des matrices K^e :

Nous avons :

$$N_i^e=\frac{1}{2\Delta^e}(a_i^e+b_i^e x+c_i^e y)$$

$$N_j^e=\frac{1}{2\Delta^e}(a_j^e+b_j^e x+c_j^e y)$$

Alors :

$$\frac{\partial N_i^e}{\partial x}=\frac{1}{2\Delta^e}b_i^e \qquad \text{Et} \qquad \frac{\partial N_j^e}{\partial x}=\frac{1}{2\Delta^e}b_j^e$$

$$\frac{\partial N_i^e}{\partial y}=\frac{1}{2\Delta^e}c_j^e \qquad\qquad \frac{\partial N_j^e}{\partial y}=\frac{1}{2\Delta^e}c_j^e$$

D'où :

$$K_{ij}^e=\frac{1}{4(\Delta^e)^2}(b_i^e b_j^e+c_i^e c_j^e)\iint_{\Omega^e}dxdy$$

$$K_{ij}^{e} = \frac{1}{4\Delta^{e}}(b_i^e b_j^e + c_i^e c_j^e)$$

II.8.6. Assemblage :

La subdivision du domaine complet en sous domaines (éléments) donne un nombre « ne » d'éléments et « nn » de nœuds. L'assemblage des matrices élémentaires de touts les éléments donne le système matriciel suivant :

$$[K]\{E\} = 0$$

Avec :

$$[K] = \sum_{1}^{ne}[K^e]$$

Et

$$\{E\} = \sum_{1}^{ne}\{E^e\}$$

On note que la matrice carrée K sera de l'ordre $nn \times nn$, et le vecteur V de l'ordre $nn \times 1$.

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté :

Le logiciel FEMM qui est une suite de programme modulaire utilisés pour résoudre des problèmes magnétostatique et électrostatique en deux dimensions.

La méthode des éléments finis et ses étapes de qui nécessite une transformation du problème à résoudre en forme intégrale, nous avons aussi vu comment construire les fonctions d'interpolation associes à une subdivision triangulaire.

La formulation intégrale et le calcul des fonctions d'interpolation sont les deux étapes les plus importantes, par ailleurs nous avons écrit la formulation intégrale de notre problème qui est de nature électrostatique.

ChapitreIII:

Distribution du champ électrique dans un conducteur muni d'impuretés

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 ($\vec{E}$) ou du vecteur déplacement ($\vec{D}$) 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.

Parmi les méthodes numériques les plus connues et les plus répandues pour la résolution des équations différentielles, décrivant des phénomènes ou des structures électromagnétiques, on peut citer la méthode des éléments finis (MEF), la méthode des différences finis (MDF), la méthode des équations intégrales de frontière (MEIF), la méthode des différences finies dans le domaine des temps (FDTD), la méthode simulation de charge (MSC), la méthode des éléments de frontière (BEM).

Dans ce chapitre on se limite uniquement à la présentation de la méthode des éléments finis celle utilisée sous Femm (Finite Element Method Magnetics), logiciel de résolution des problèmes physiques représentés par des équations aux dérivées partielles.

Toute conduite électrique possède un point faible qui est que son isolation. Lorsqu'un câble de distribution de l'énergie électrique est en service son isolation vieillit et se dégrade au cours du temps.

Ce dernier est due à l'imperfection de son isolant qui se manifeste d'ailleurs par des petites décharges partielles. Ces décharge conduit ver le claquage ensuite la destruction, partielle ou complète de cet isolant.

Dans ce chapitre on va utiliser le logiciel FEMM pour modéliser une conduite électrique (câble) avec isolation gazeuse puis avec une isolation solide stratifiée. On utilise le gaz SF6 comme isolant gazeux pour ses très bonnes propriétés diélectriques en premier cas et plusieurs couches solide en (papier, PRC, époxy), gaine en PVC en second cas.

On étudie la distribution du champ électrique le long de la surface de la conduite électrique avec et sans impuretés. On va voir l'impacte de ces dernières sur la conduite électrique et voir L'effet de gaine sur le champ électrique maximal.

Matériaux diélectrique d'utilisation :

Les propretés diélectriques des matériaux utilisés sont regroupées dans le tableau suivant :

Propriétés diélectrique / Matériaux	Permittivité relative ϵ_r	Champ critique E_c (KV/cm)
Hexafluorure de soufre (SF6)	1.00191	89
Papier	5	50 à 80
Polyéthylène Réticulé Chimiquement (PRC)	2.3	18
Epoxy	4.5	20
Polychlorure de vinyle (PVC)	3	20

III.1 Modélisation d'une conduite isolée par un gaz :

Les données géométriques du câble à isolation gazeuse étudié sont illustrées dans la figure suivante :

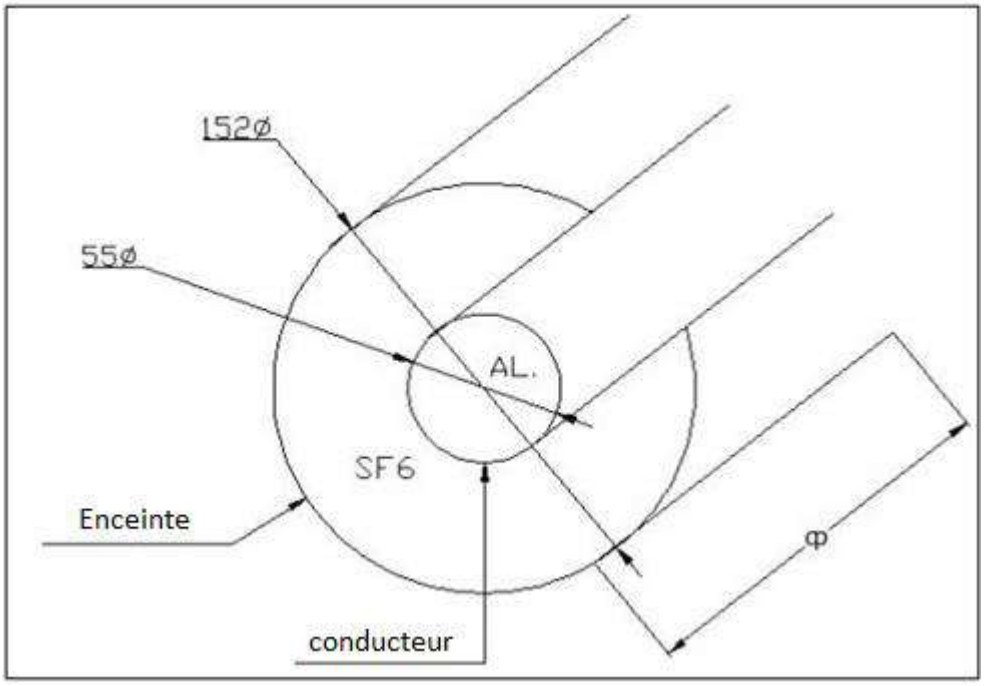


Fig.III.1 Conduite électrique isolée par un gaz avec une enceinte de diamètre 152mm et un conducteur de 55mm de diamètre

Cette conduite est à isolation gazeuse avec une enceinte et un conducteur en aluminium modélisée sur la figure **(**Fig.III.1**)** dans un axe en deux dimensions. Le diamètre de l'enceinte et du conducteur est de 152mm et 55mm respectivement. Le vide est rempli avec un gaz Sf_6.

L'analyse est effectuée en utilisant deux cylindres concentriques de longueur infinie comme il est représenté sur la figure **(**Fig.III.1) Le potentiel du conducteur interne considéré est pris à 30kV.

III.1.1. Modélisation électrostatique avec une particule contaminée (impureté) :

III.1.1.a. pour un fil de particule (impureté) de 10mm de longueur et de 0.5mm de rayon :

La figure (Fig.III.1.1) montre la distribution du champ électrique au long du vide intérieur de la conduite électrique avec impureté posée en bas à 62mm de l'âme conductrice.

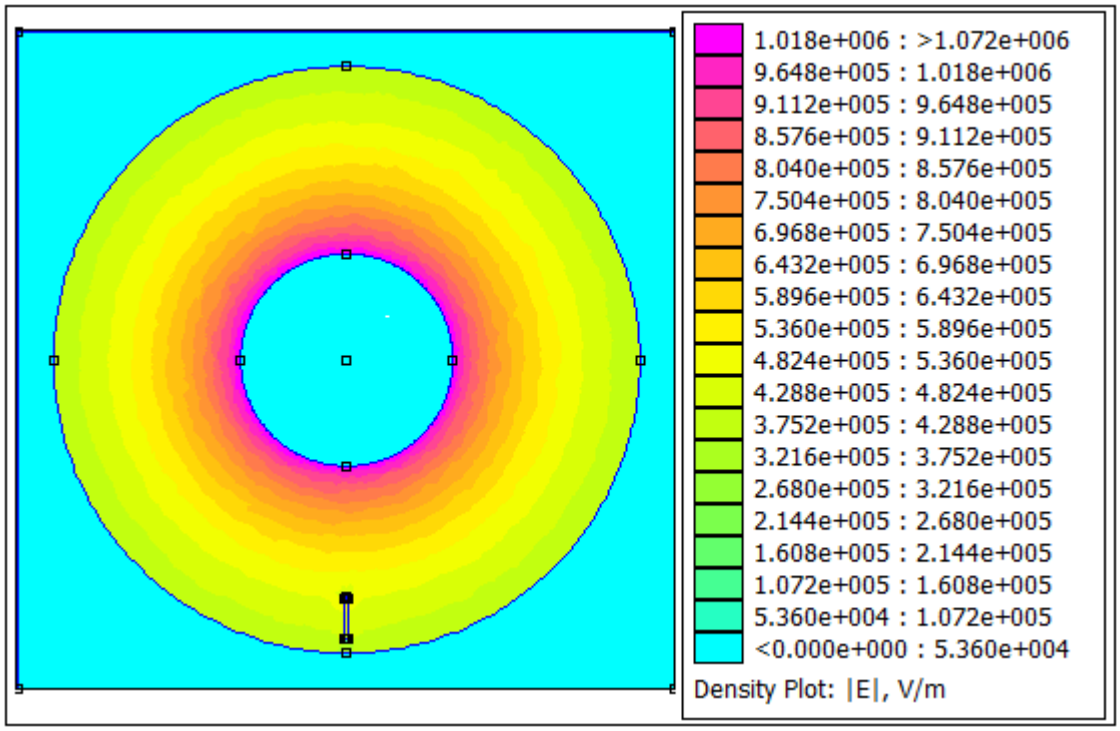


Fig.III.1.1 la distribution du champ électrique au long de la surface intérieur de la conduite électrique isolé par un gaz avec impureté posé en bas à 3.5mm de l'enceinte.

La figure (Fig.III.1.2) montre la distribution du champ électrique au long de la surface de l'impureté de la pointe supérieur à la pointe inférieur.

On peut observer que le champ électrique est minimale à la pointe inférieur de la particule et il est maximale à la pointe supérieur et aussi le champ électrique diminue de la point supérieur de la particule jusqu' il atteint une certaine valeur de 4.49559 kV/cm après il retourne a augmenté pour atteindre une valeur de 6.59951 kV/cm.

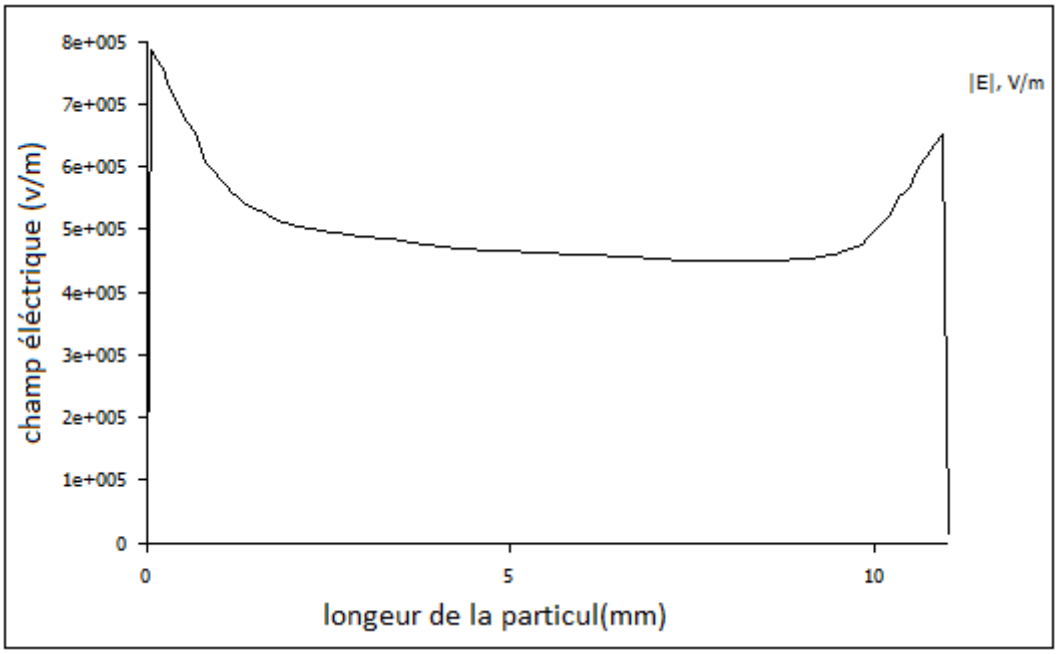


Fig.III.1.2 la distribution du champ électrique au long de la surface de l'impureté du point supérieur au point inférieur.

La figure (Fig.III.1.3) montre la distribution du champ électrique maximale au long de la surface de la particule d'une longueur et rayon fixe L=5mm et r=0.5mm à de différents positions dans la conduite par rapport au conducteur interne.

On peut voire que le champ électrique maximale au long de la particule diminue graduellement lorsque la particule s'éloigne du conducteur interne. La valeur maximale du champ est enregistrée à la position plus proche du conducteur cette valeur est de l'ordre de 16.3 KV/cm.

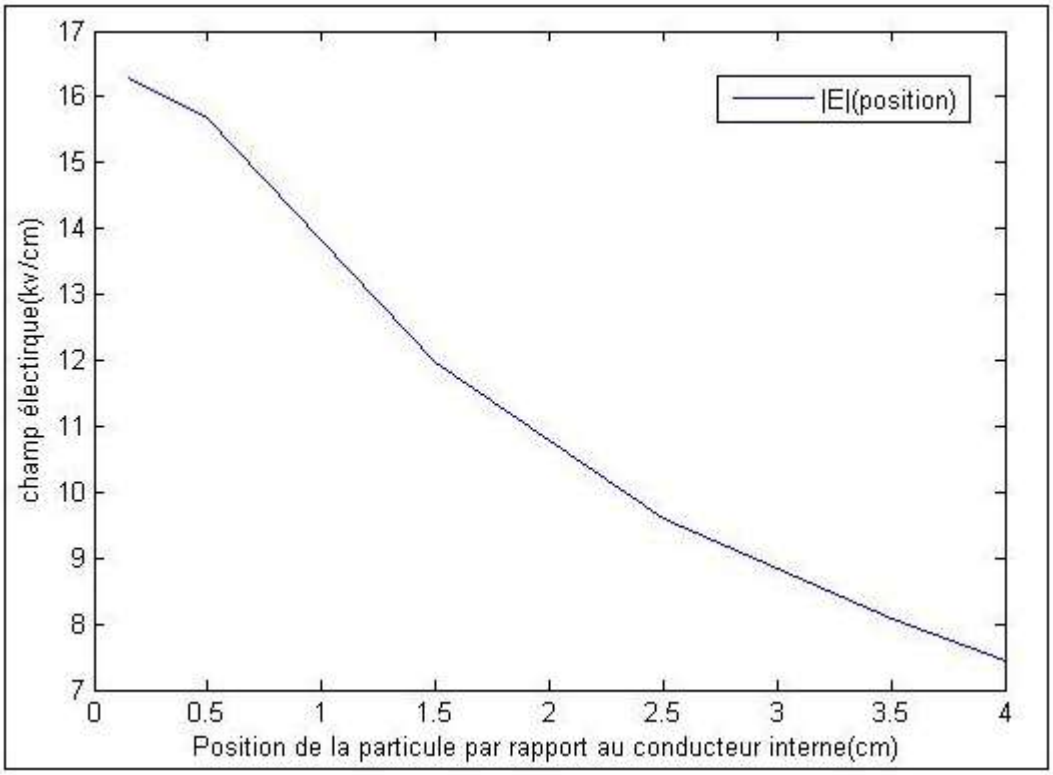


Fig.III.1.3 Le champ électrique maximale au long de la particule en fonction de sa position par rapport au conducteur interne.

La figure (Fig.III.1.4) montre la distribution du champ électrique entre de la pointe supérieure de la particule et le conducteur interne. On peut observer que le champ est presque nul a la pointe supérieur de la particule (Fig.III.1.5).il augmente graduellement lorsqu'on s'approche du conducteur interne de GIBD jusqu'à qu'il atteint une valeur maximale prés définie de 10.53940 kV/cm.

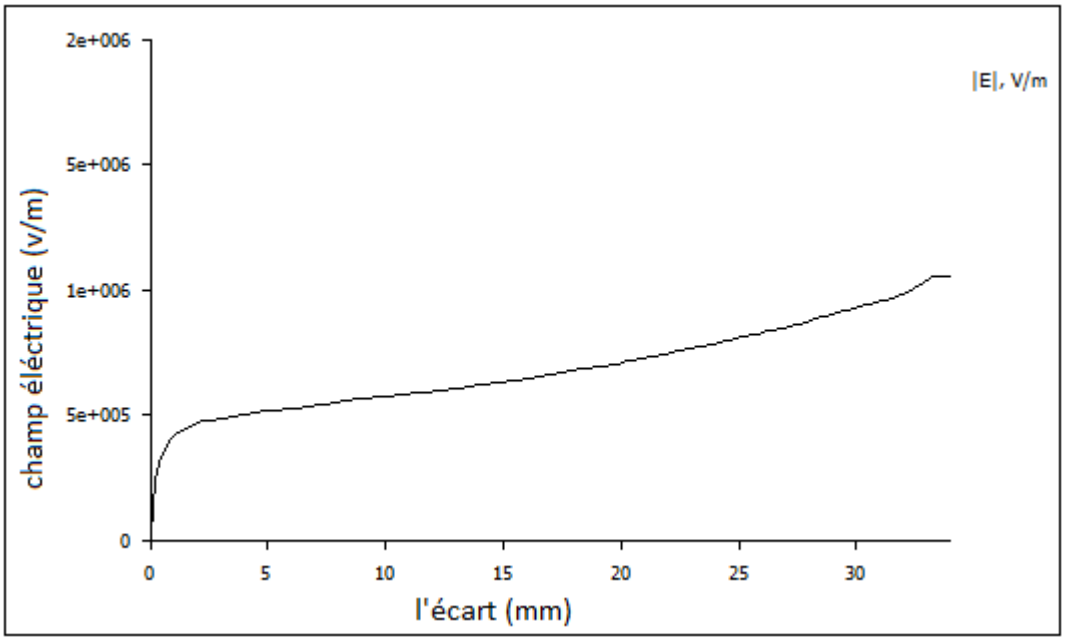


Fig.III.1.4 distribution du champ électrique de la pointe supérieure de la particule au conducteur interne

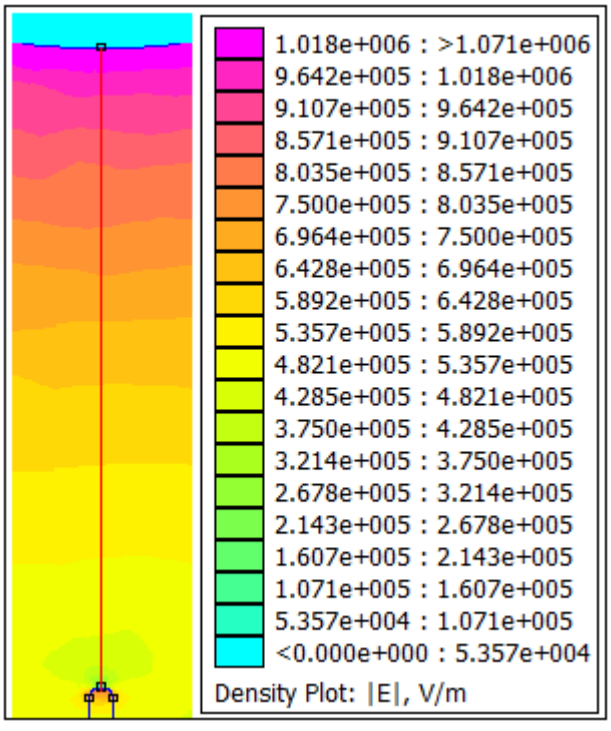


Fig.III.1.5 distribution du champ électrique de la pointe supérieur au conducteur interne

III.1.1.b. Effet de la longueur de fil de la particule sur les valeurs du champ électrique :

La variation du champ électrique a l'extrémité supérieur du fil de la particule en fonction de la longueur a (r=0.5mm) est montrée sur la figure (Fig.III.1.6).

On peut voir que le champ maximal à l'extrémité supérieure est proportionnel, à la longueur de la particule.

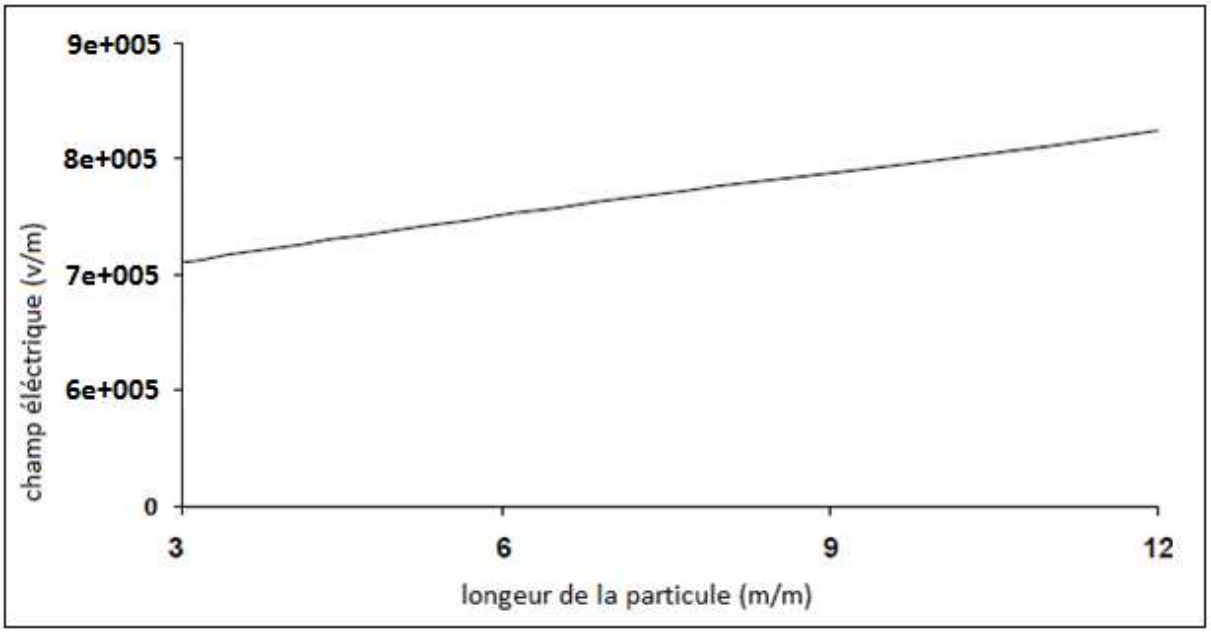


Fig.III.1.6 **le champ électrique a l'extrémité supérieur en fonction de la longueur à un rayon r=0.5mm**

III.1.1.c. L'effet du rayon sur le champ électrique :

La figure (Fig.III.1.7) montre l'effet de la variation du rayon à l'extrémité supérieure du fil de particule sur le champ électrique.

Pour une longueur fixe de la particule (prise égale à 10mm) et pour des rayons variables de 0.5 à 1mm, le champ électrique maximal à l'extrémité supérieur du fil de particule diminue graduellement d'une valeur prés définie de 7.96601 kV/cm a 7.75601 Kv/cm. on constate que lorsqu'on augmente le rayon le champ électrique diminue.

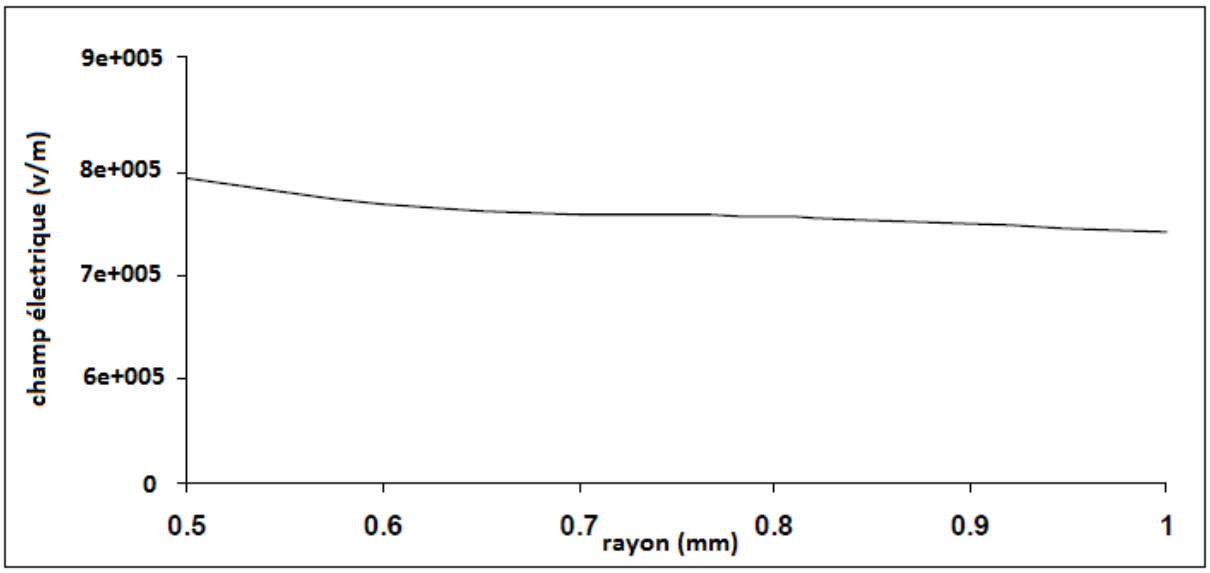


Fig.III.1.7 champ électrique a l'extrémité supérieur du fil de particule en fonction du rayon a L=10mm

III.1.2.1 La modélisation électrostatique des conduites isolées par un gaz avec une impureté et une gaine :

L'objectif de revêtement concernant la surface interne de la conduite électrique isolé par un gaz avec un matériau diélectrique (gaine) réduit l'effet violent (décharges) sur la surface d'électrode, et augmente le champ électrique nécessaire pour soulever les particules, il réduit la charge acquise par les particules.[21]

Le champ électrique nécessaire pour soulever une particule posé sur la surface intérieur de l'enceinte (GIBD) augmente à cause du revêtement diélectrique ajouté. Une fois la particule commence à se déplacer dans l'espace de gaz sous une tension appliquée, il se peut qu'elle fasse des collisions avec n'importe quels conducteurs.

Avec le revêtement du conducteur la particule acquerra considérablement une charge réduite, ainsi le risque de rupture amorcée par une décharge est réduit d'une manière significatif.

La figure **(**Fig.III.2.1) montre une conduite de bus d'une isolation gazeuse avec une particule filamentaire contaminé prés de 3.5mm de la couche diélectrique de l'enceinte mise a

la terre. Dans cette figure (t) est définie comme un revêtement d'une épaisseur diélectrique qui varie de 0.2mm à 2mm. Le matériau diélectrique du revêtement est en époxy.

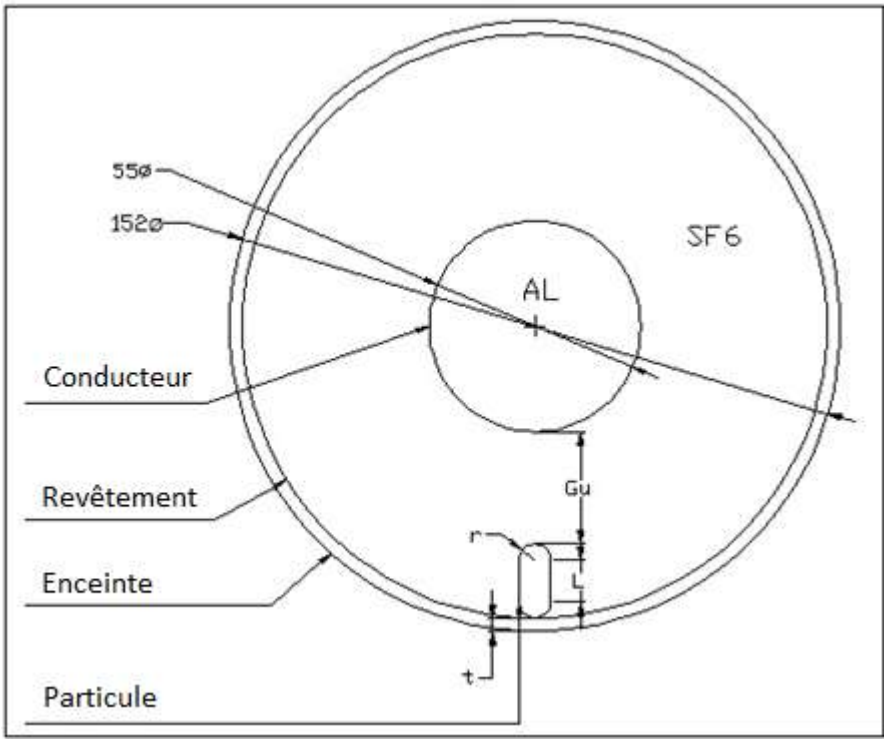


Fig.III.2.1 conduite de bus isolé d'un gaz avec une particule filamentaire contaminé prés de 3.5mm de la couche diélectrique de l'enceinte mise a la terre.

III.1.2.a. Lorsque la gaine de l'enceinte mise à la terre est à 2mm d'épaisseur :

Les dimensions de la particule sont prises de 10mm de longueur et de 0.5 mm de rayon. L'épaisseur du revêtement diélectrique de l'enceinte mise à la terre est prise de 2mm avec un matériau diélectrique époxy sa permittivité relative est de (ε_r = 4.5).

Le potentiel diminue graduellement de 30kV depuis le conducteur intérieures à travers la surface intérieure de la conduite jusqu'il atteint 0kv à l'enceinte mise a la terre.

La figure (Fig.III.2.2) montre la distribution de champ électrique au long de la surface intérieure de la conduite de bus isolé d'un gaz avec un fil de particule contaminé situé de 3.5mm de l'enceinte mise à la terre gainé d'un diélectrique.

On peut observer que le champ électrique a une valeur minimale à l'extrémité inférieure et une valeur maximale à l'extrémité supérieure de la particule et aussi il diminue a

partir de l'extrémité supérieure du fil de particule pour atteindre une certaine valeur puis il retourne a augmenter jusqu'une valeur de 6.59855 kV/cm au conducteur intérieure de la conduite isolé d'un gaz.

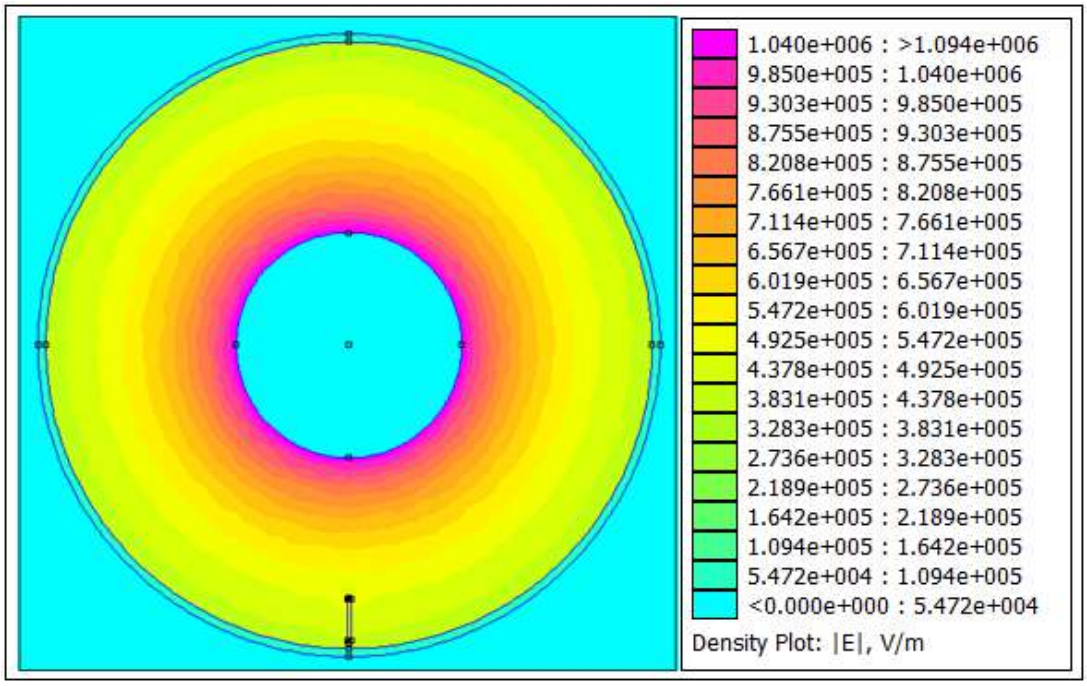


Fig.III.2.2 la distribution de champ électrique au long de la surface intérieur de la conduite électrique avec un revêtement diélectrique et une impureté.

La figure (Fig.III.2.3) Montre la distribution du champ électrique au long de la surface du fil de la particule.

On peut voir que le champ électrique à l'extrémité supérieure augmente d'une certaine valeur a une valeur prés définie de 8.12200 kV/cm puis il diminue et augmente a nouveau de 6.59908 kV/cm à l'extrémité inferieure.

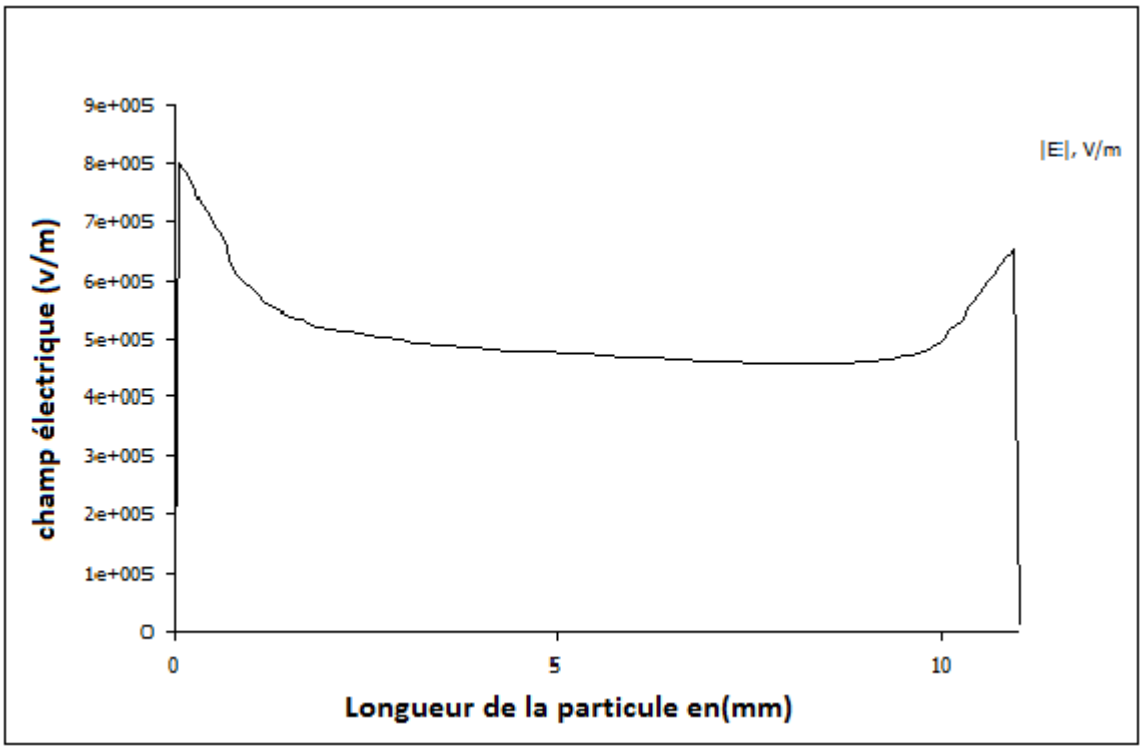


Fig.III.2.3 La distribution de champ électrique au long de la surface du fil de particule du l'extrémité supérieure a l'extrémité inferieure.

La figure (Fig.III.2.4) montre la distribution du champ électrique au long de l'espace entre la pointe supérieure du fil de particule et le conducteur interne.

On peut voir que le champ électrique augmente graduellement à partir d'une valeur de 0.159509 kV/cm depuis l'extrémité supérieure jusqu'à ce qu'il atteint une valeur maximale de 10.79490 kV/cm au conducteur interne.

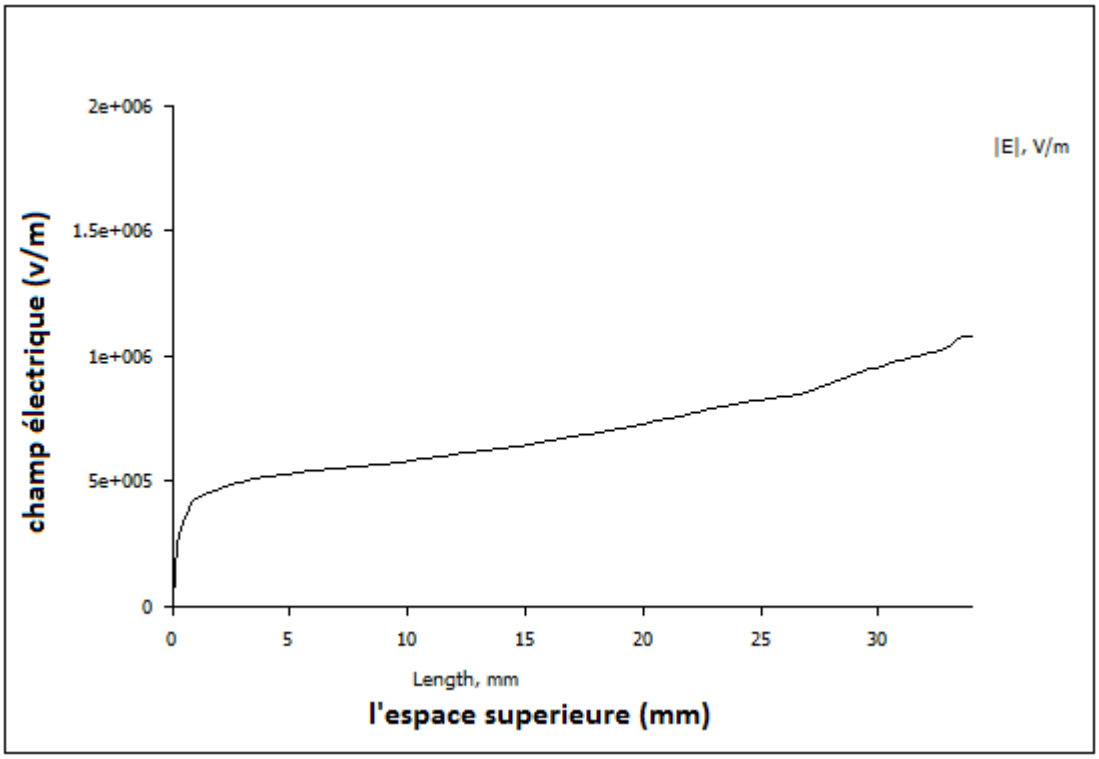


Fig.III.2.4. la distribution du champ électrique au long de l'espace entre l'extrémité supérieure du fil de particule et le conducteur interne.

III.1.2.b. l'effet de l'épaisseur du revêtement diélectrique sur le champ électrique maximal :

Le tableau (Tab III.1.1) montre les valeurs maximales du champ électrique à l'extrémité supérieur du fil de particule en fonction d'épaisseur du revêtement de l'enceinte mise à la terre de la conduite avec un diélectrique en époxy comme montre le tableau**.**

De ce tableau on peut constatée qu'il ya un très faible effet sur les valeurs du champ électrique à l'extrémité supérieur de la particule avec ou sans revêtement et aussi la variation de l'épaisseur de la gaine (revêtement) à un faible effet sur le champ électrique.

Epaisseur du revêtement (mm)	E_{max} (kV/cm)	Matériau du revêtement
00	7.96882	Sans revêtement
0.2	7.99912	Revêtement en époxy
0.5	8.03230	
1	8.03852	
1.2	8.08610	
2	8.12557	

Tab III.1 les valeurs maximales du champ électrique par rapport à l'épaisseur du revêtement qui est en époxy

Le champ électrique maximale augmente à l'intérieure de la conduite électrique ce qui favorise le déplacement des impuretés dans l'espace du gaz vers l'enceinte mise a la terre et ce qui diminue le risque d'atteindre le claquage.

III.1.3 modélisation électrostatique de la conduite électrique avec des impuretés de 3.5mm de l'enceinte mise à la terre :

Une étude du groupe CIGRE suggère que 20% d'échec dans les (GIS) est due à l'existence de divers impureté métallique sous forme de particule libre. [21]

Dans ce qui suit, on va étudier l'effet des impuretés sur la distribution du champ électrique.

La figure (Fig.III.3.1) montre la conduite électrique isolée par un gaz avec plusieurs impuretés situé à 3.5mm de l'enceinte mise à la terre avec gaine. Les trois fils des particules sont identiques en termes de longueur et rayon.

Considérons trois particules, consistant l'impureté, de dimension identiques, les trois particules sont située en bas au voisinage de la gaine et à 15 mm de l'axe les particules de part et d'autre.

On définit Gu1 la distance séparant l'impureté du milieu par rapport à l'âme conductrice et Gu2 est la distance séparant les deux autres particules du conducteur.

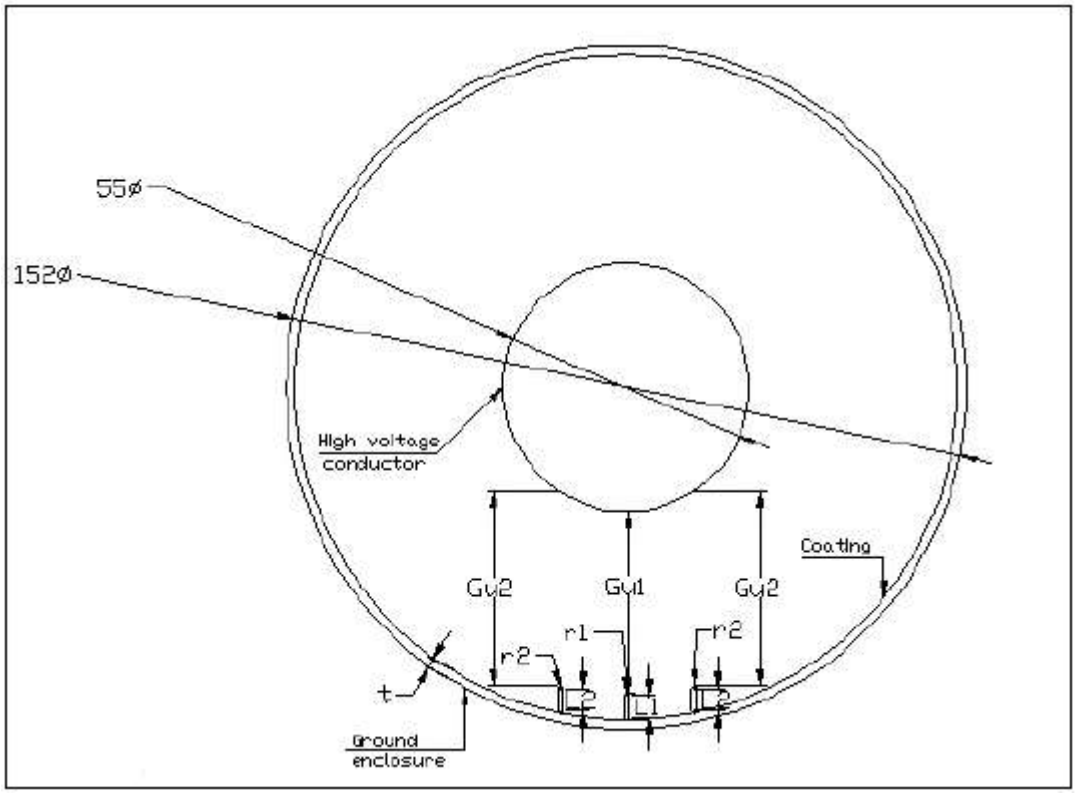


Fig.III.3.1 conduite électrique isolé par un gaz avec trois particules impures au voisinage de l'enceinte misse à la terre.

III.1.3.a. Etude du champ électrique pour des particules de dimension l=5mm, r=0.5mm :

La distribution du potentielle au long de l'espace entre le conducteur interne et l'enceinte mise a la terre de la conduite de bus isolé d'un gaz avec multitude d'impuretés est montré sur la figure (Fig.III.3.2).

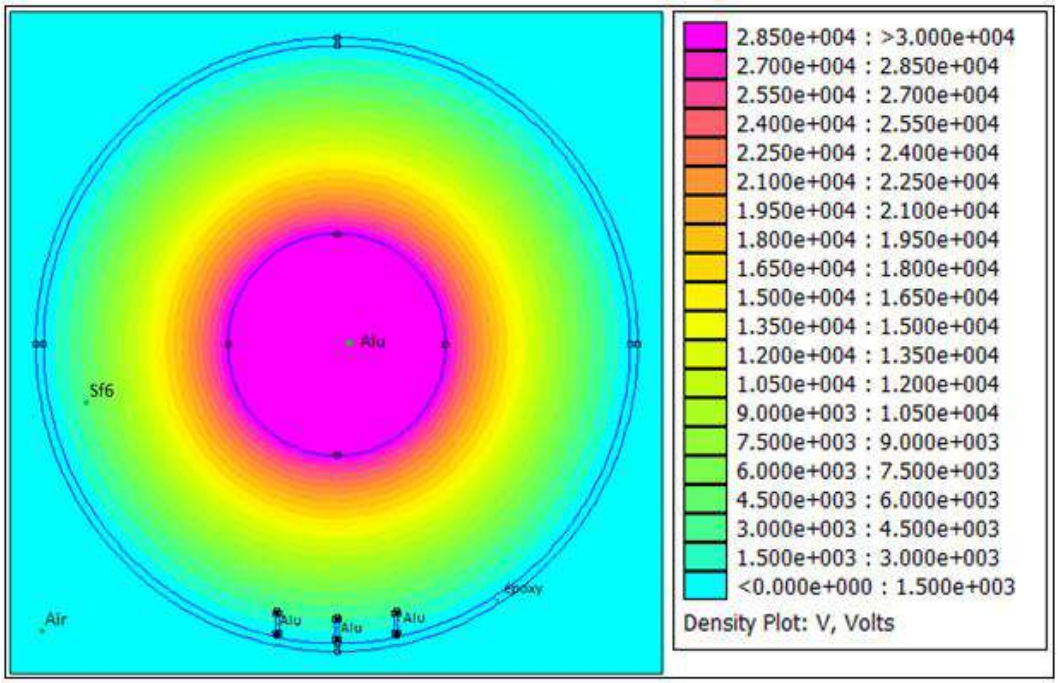


Fig.III.3.2 La distribution du potentiel au long de la surface intérieure de la conduite de bus isolé d'un gaz avec trois particules contaminer.

La figure (Fig.III.3.3) illustre la distribution de champ électrique au long de la surface intérieure de la conduite de bus isolé d'un gaz avec multi-fils de particule contaminer placé à 3.5mm de l'enceinte mise à la terre.

On peut voire que le champ électrique est minimum a l'extrémité inférieure des trois particules et il est maximum a l'autre extrémité supérieure mais le champ électrique maximal de l'extrémité supérieure des deux particules a la périphérie du celle au centre est légèrement plus supérieure a celle au milieu.

L'âme

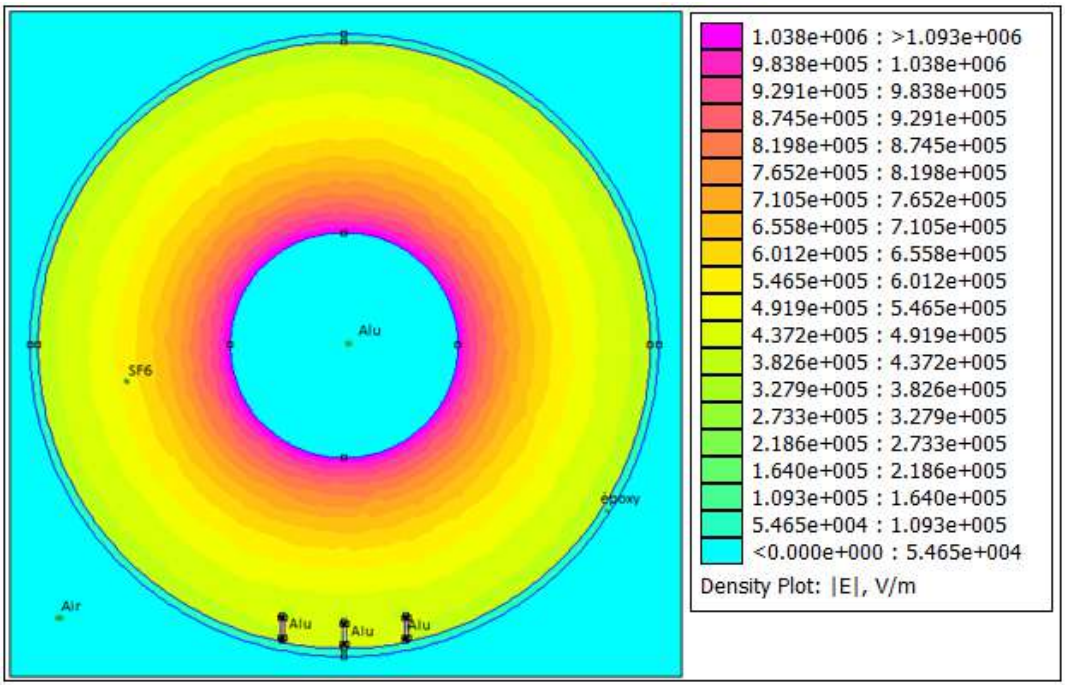


Fig.III.3.3 ***la distribution du champ électrique au long de la surface intérieure de la conduite électrique isolé par un gaz avec trois particule impures.***

Le champ électrique décroit de la pointe supérieure du fil de particule à atteindre une certaine valeur puis il retourne a augmenté pour atteindre une valeur maximal du champ électrique, dans un cas sain sans impuretés.

Les figures (Fig.III.3.4) et (Fig.III.3.5) montrent la distribution du champ électrique au long de la surface de la particule situé au milieu et les deux autres situés des deux cotés respectivement du celle de centre.

On peut observer que le champ électrique augmente d'une faible valeur pour atteindre une valeur maximale prés définie de 7.56397 kV/cm et de 8.02202 kV/cm à l'extrémité supérieure de la particule centrale et les deux autres particules des deux cotés respectivement, puis il se décroit et il retourne à augmente légèrement d'une valeur prés définie de 6.20050 kV/cm et de 6.57104 kV/cm à l'extrémité inférieure de la particule centrale et les deux autres particules des deux cotés respectivement.

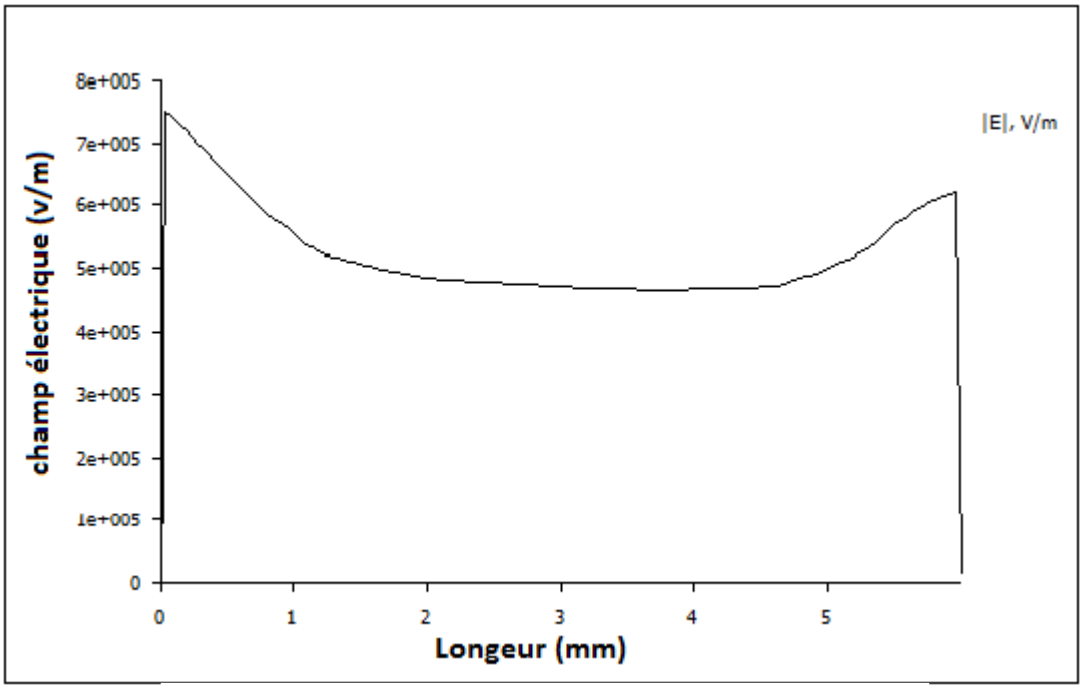


Fig.III.3.4 la distribution du champ électrique au long de la surface de la particule situé au milieu des deux autre

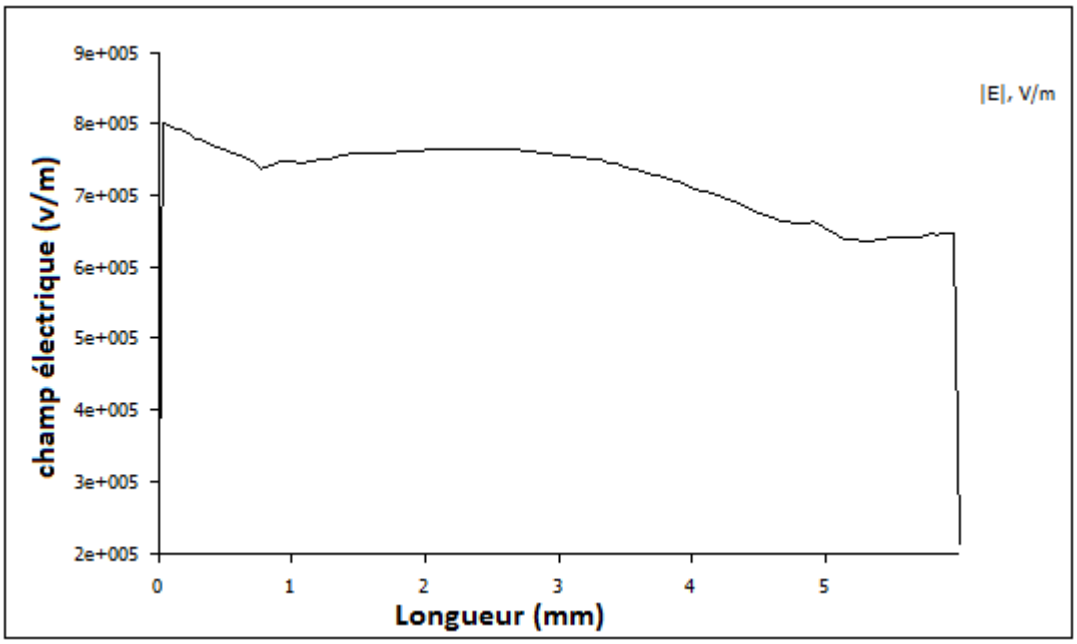


Fig.III.3.5 la distribution du champ électrique au long de la surface des deux particules de part et d'autre de l'axe

La figure (Fig.III.3.6) illustre la distribution du champ électrique au long de la surface de la particule situé au milieu et les deux autres situés de part et d'autre de l'axe.

On peut constater que le champ électrique à l'extrémité supérieure des deux particules est légèrement plus supérieur que ce lui de la particule centrale car les deux particules sont plus proche de conducteur haute tension que celle au milieu.

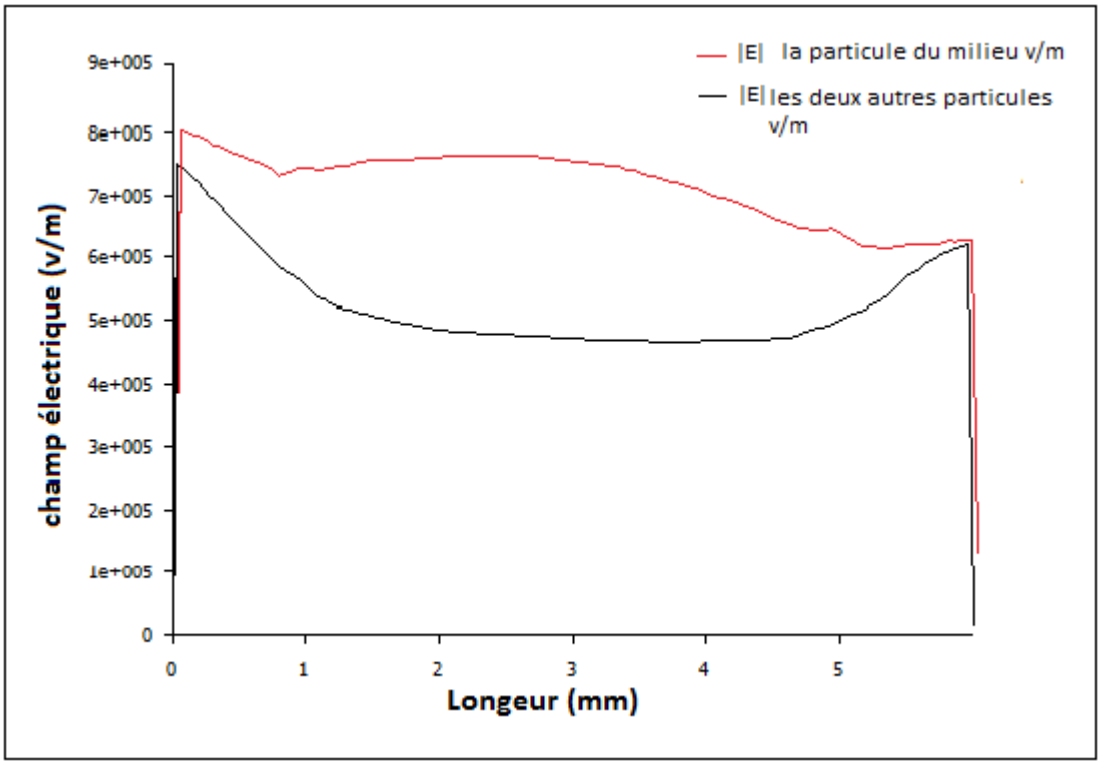


Fig.III.3.6 la distribution du champ électrique au long de la surface de la particule centrale et celles des deux cotés.

Les figures (Fig.III.3.7) et (Fig.III.3.8) montre la distribution du champ électrique au long de l'écart Gu1 et Gu2 entre l'extrémité supérieure des trois particules et le conducteur haute tension.

On peut voir que le champ électrique augmente de 0.120339 kV/cm à 3.36022 kV/cm à l'extrémité supérieures de la particule centrale et les deux autres particules jusqu' il atteint une valeur maximal de 10.77340 kV/cm.

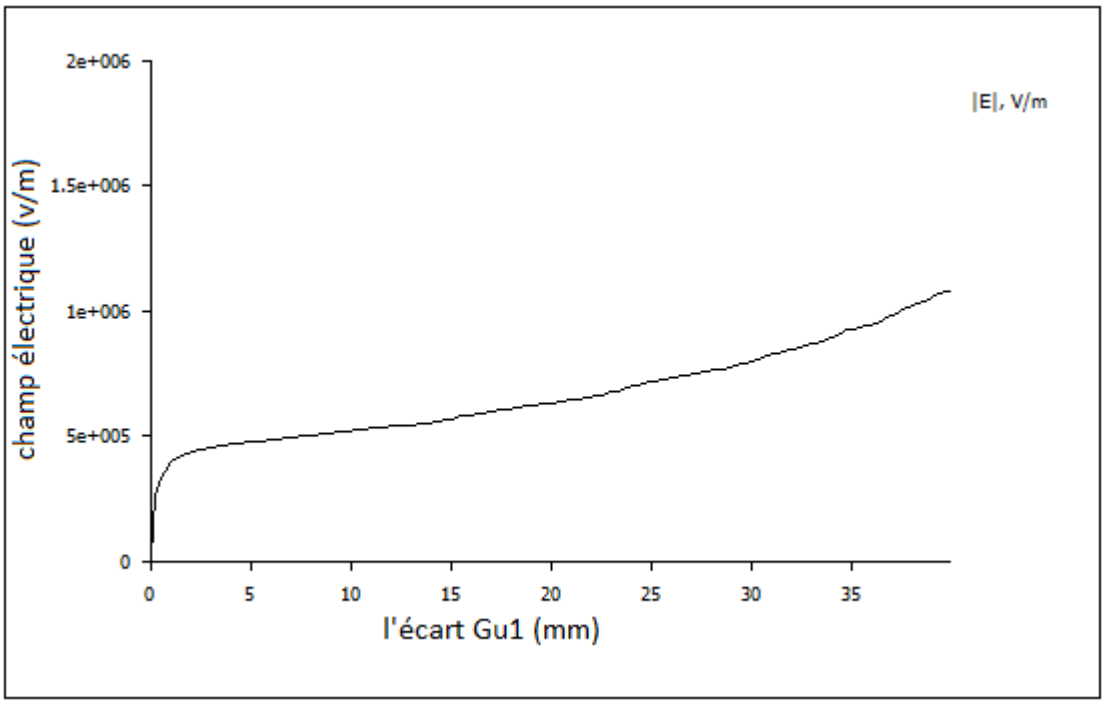


Fig.III.3.7 la distribution du champ électrique au long de l'écart Gu1 de l'extrémité supérieure de la particule centrale au conducteur de haute tension

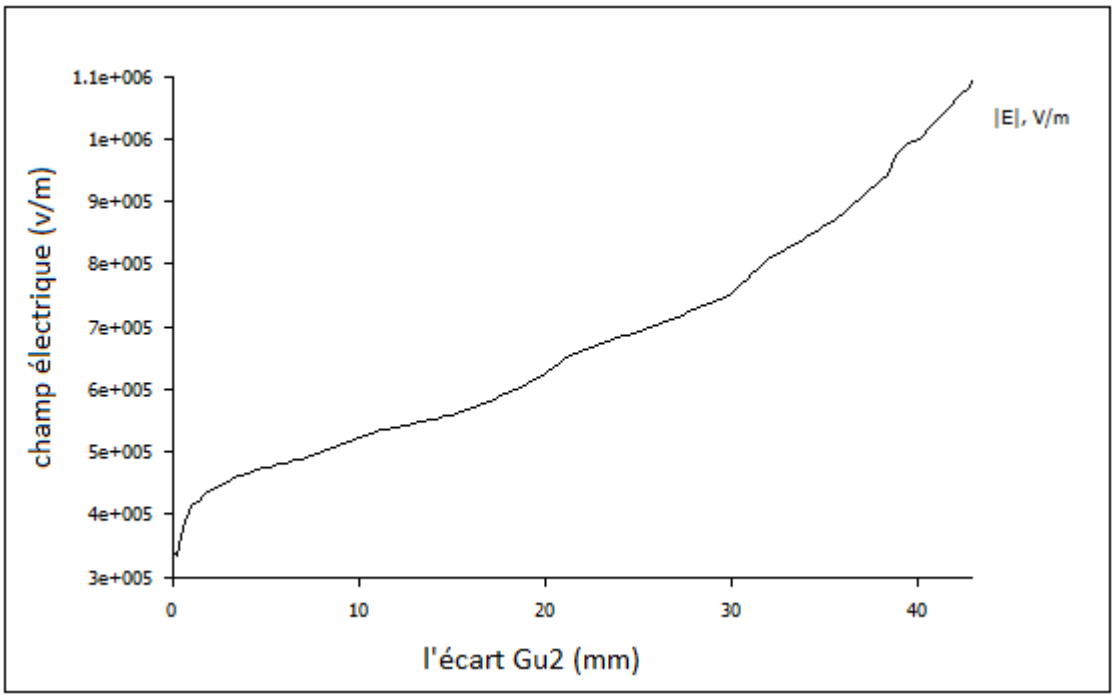


Fig.III.3.8 la distribution de champ électrique au long de l'écart Gu2 à entre l'extrémité supérieure des deux particules et le conducteur haute tension.

III.1.3.b Effet de la variation de la longueur de l'impureté central sur le champ électrique :

La variation du champ électrique à l'extrémité supérieur de la particule centrale et les deux autres particules pour les mêmes valeurs de rayon (r1=r2=0.5mm) est montrée sur la figure (Fig.III.3.9).

Les dimensions des deux particules placé à coté de celle du centre sont considérés constante (L=5mm, r=0.5mm), en faisant varier la longueur de la particule centrale de 3mm à 12mm en maintenant son rayon constant et égal à 0.5mm.

On remarque que le champ électrique maximal au niveau de l'extrémité supérieure de la particule centrale augmente avec l'augmentation de sa longueur passent de (7.48834 kV/cm à L=3mm) à la valeur (8.23059 kV/cm).

Par contre le champ électrique sur les deux autres particules reste sensiblement constant à une valeur de 8.06421 kV/cm.

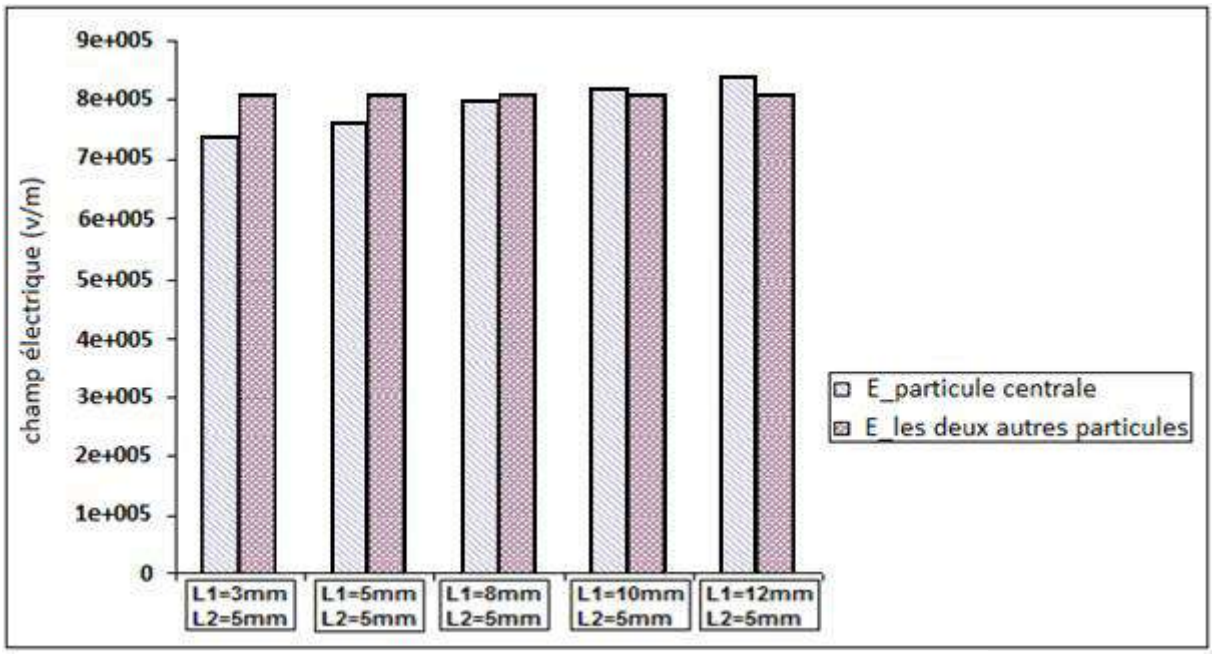


Fig.III.3.9 le champ électrique à l'extrémité supérieure du fil de particule centrale en fonction de la longueur à un rayon de 0.5mm.

III.1.3.c L'effet de la variation de rayon r de la particule central sur le champ électrique :

La variation du champ électrique à l'extrémité supérieure de la particule centrale et les deux autres particules fixes en respectant les rayons à (L1, L2=5mm) est montrer sur la figure (Fig.III.3.10).

Les dimensions des deux particules placées de part et d'autre de celle du centre sont maintenues constantes (L = 5mm, r = 0.5mm), cette fois en faisant varier le rayon de la particule centrale de 0.2mm à 0.7mm en maintenant sa longueur constante à 5mm.

On peut observer que le champ électrique maximal à l'extrémité supérieure de la particule centrale diminue avec l'augmentation du son rayon passant de (7.60845 kV/cm à r1 = 0.2mm) à la valeur (7.46542 kV/cm à r1 = 0.7mm), le champ électrique dans les deux autre particules reste à une valeur constante de 8.06421 kV/cm.

Le champ électrique est plus intense sur les particules fines à faible rayon.

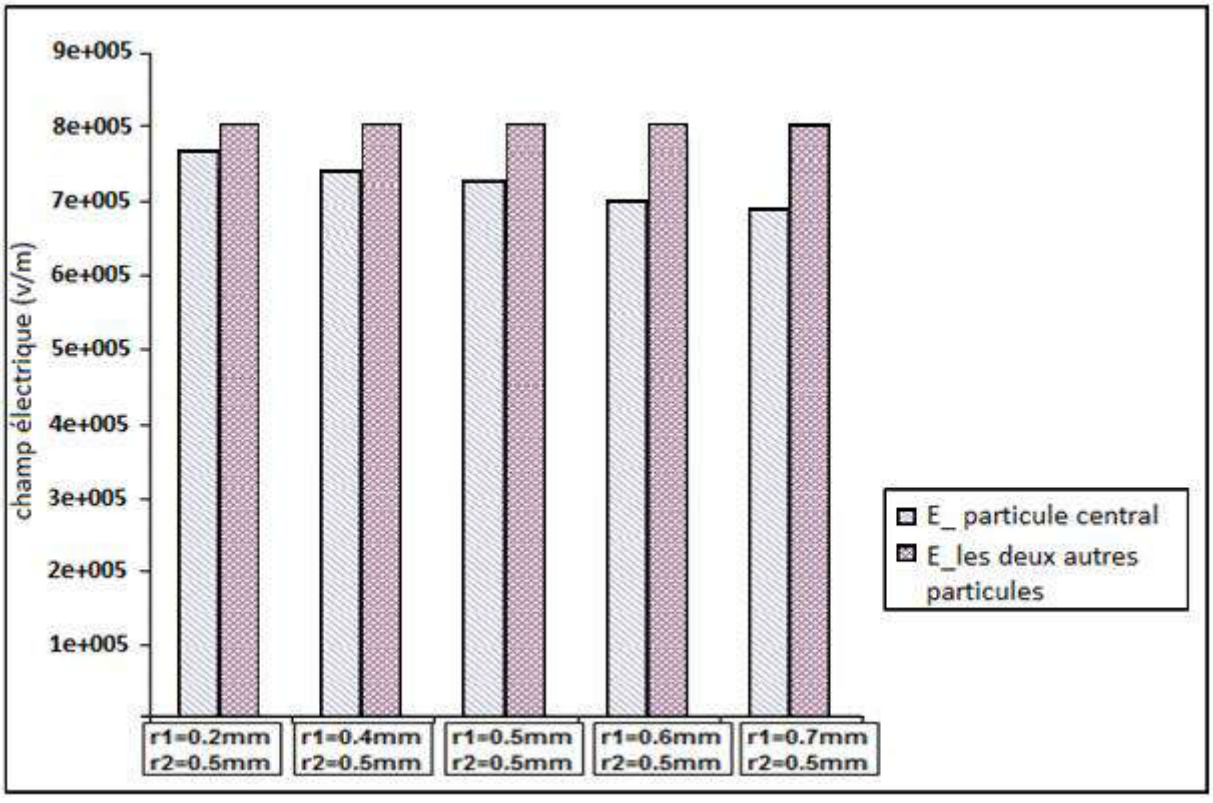


Fig.III.3.10 le champ électrique à l'extrémité supérieure du fil de particule central en fonction du rayon.

III.2 Modélisation d'une conduite à isolation solide stratifiée :

La figure (fig.III.4.1) représente une conduite électrique à isolation solide de diamètre 152mm constitué d'un conducteur de 52mm de diamètre et trois couches d'isolation solide disposé comme suit :

- Couche en papier de 17mm d'épaisseur ε_r= 5, E_c= 80 kV/cm
- Couche en PRC (Polyéthylène Réticulé Chimiquement) de 17mm d'épaisseur ε_r= 2.3, E_c= 18 kV/cm.
- Couche en époxy de 14.5mm d'épaisseur, ε_r= 4.5, E_c= 20 kV/cm.
- Couche de 2mm de gaine en PVC (polychlorure de vinyle), ε_r= 3, E_c= 20 kV/cm.

Le conducteur est soumis à un potentiel de 30kV.

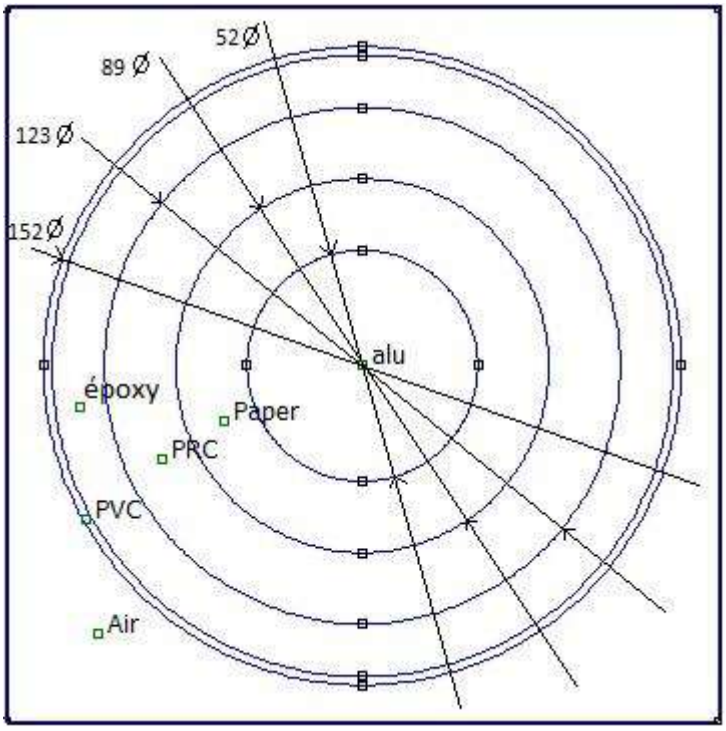


Fig.III.4.1 Conduite électrique à isolation solide stratifiée.

La géométrie de la conduite électrique implémentée sous (FEMM) avec maillage est donnée par la figure (fig.III.4.1).

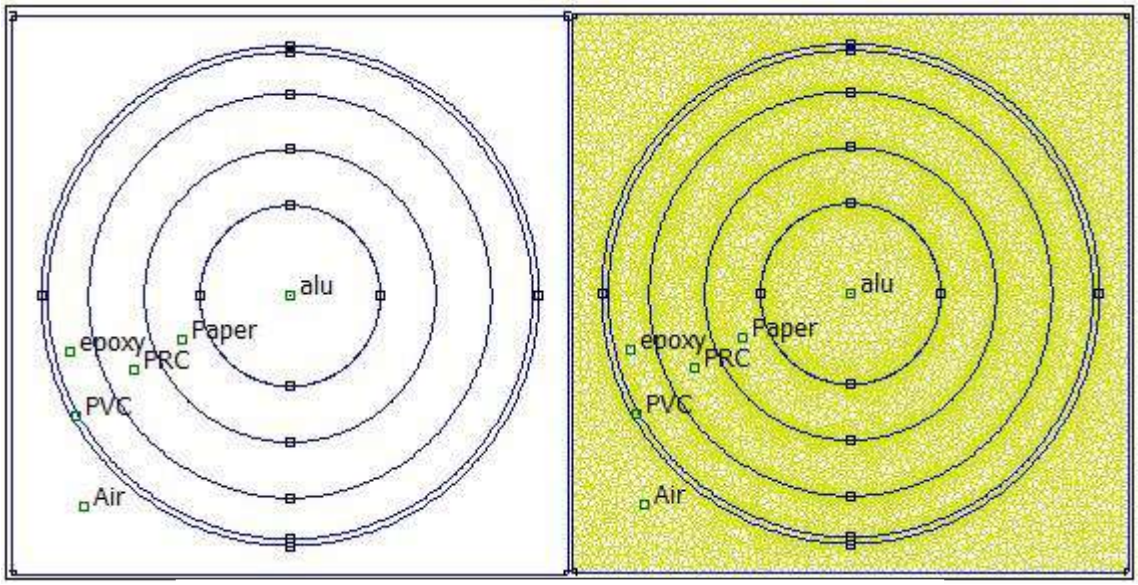


Fig.III.4.2 conduite électrique isolé par un solide stratifié sans impureté implémentée sous(FEMM) avec Maillage en élément triangulaire.

III.2.1 Modélisation électrostatique d'une conduite électrique stratifiée:

III.2.1.a. Conduite dépourvue d'impureté:

La figure (Fig.III.4.3) montre la distribution du potentiel électrique au long de la surface intérieur de la conduite depuis le conducteur interne jusqu'à l'enceinte mise a la terre.

On peut voir que le potentiel diminue graduellement de 30 kV à 0 kV au long de la surface intérieure de la conduite.

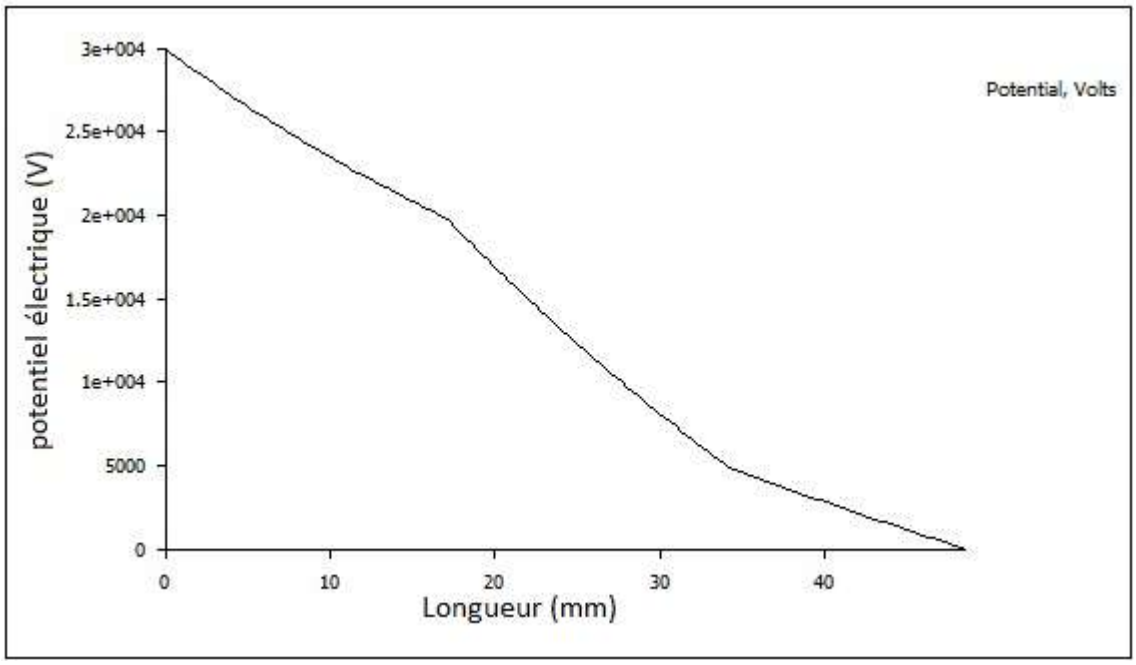


Fig.III.4.3 la distribution du potentiel électrique au long de la conduite du conducteur interne jusqu'à l'enceinte

La figure (Fig.III.4.4) montre la distribution du champ électrique au long de la surface intérieur de la conduite depuis le conducteur interne jusqu'à l'enceinte mise a la terre.

On peut observer que le champ électrique dans le premier milieu (papier) diminue de 7.47426kV/m à 4.78218v/m puis il augment à 10.09090 kV/cm dans le deuxième milieu (PRC) ensuite il diminue à7.50145kV/cm.

Il continue sa diminution de 3.72688kV/cm à 3.18972kV/cm dans le troisième milieu. Chaque milieu a sa marge de variation de champ électrique due à sa permittivité relative spécifique. Si le champ électrique atteint une certaine valeur critique maximale assignée de 80kv/mm. Il se passera une décharge électrique au niveau du diélectrique qui peu mené au claquage.

La non homogénéité de la distribution du champ électrique dans la conduite est dû de la variation de la permittivité relative d'un milieu à l'autre, les milieux qui présentent une permittivité relative élevée le champ électrique dedans est faible et les milieux ayant une permittivité relative faible le champ électrique est élevée.

Comme le champ électrique n'a pas atteint la valeur critique minimale qui est de 18kV/cm dans le PRC le claquage n'est pas probable.

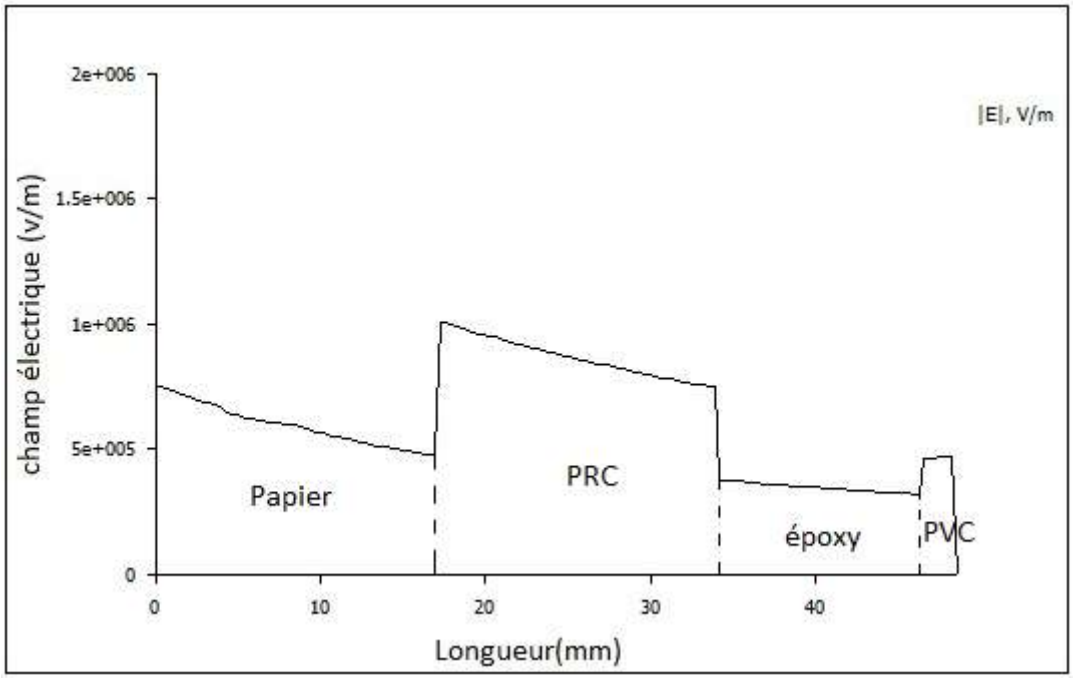


Fig.III.4.4 la distribution du champ électrique au long de l'isolation solide stratifiée

III.2.1.b. Avec impureté :

Dans cette partie, on considère une particule rectangulaire de dimension 6 X 0.5mm, donc l'emplacement est horizontal dans la couche diélectrique d'une distance d de l'âme conductrice.

Des simulations on été effectuée par la présence de l'impureté dans les différentes couches isolantes dans le tout détecter la probabilité de décharge en fonction de la zone ou l'impureté est présente.

La géométrie de la conduite électrique avec impureté implémenté sous (FEMM) est donnée par la figure (fig.III.4.5).

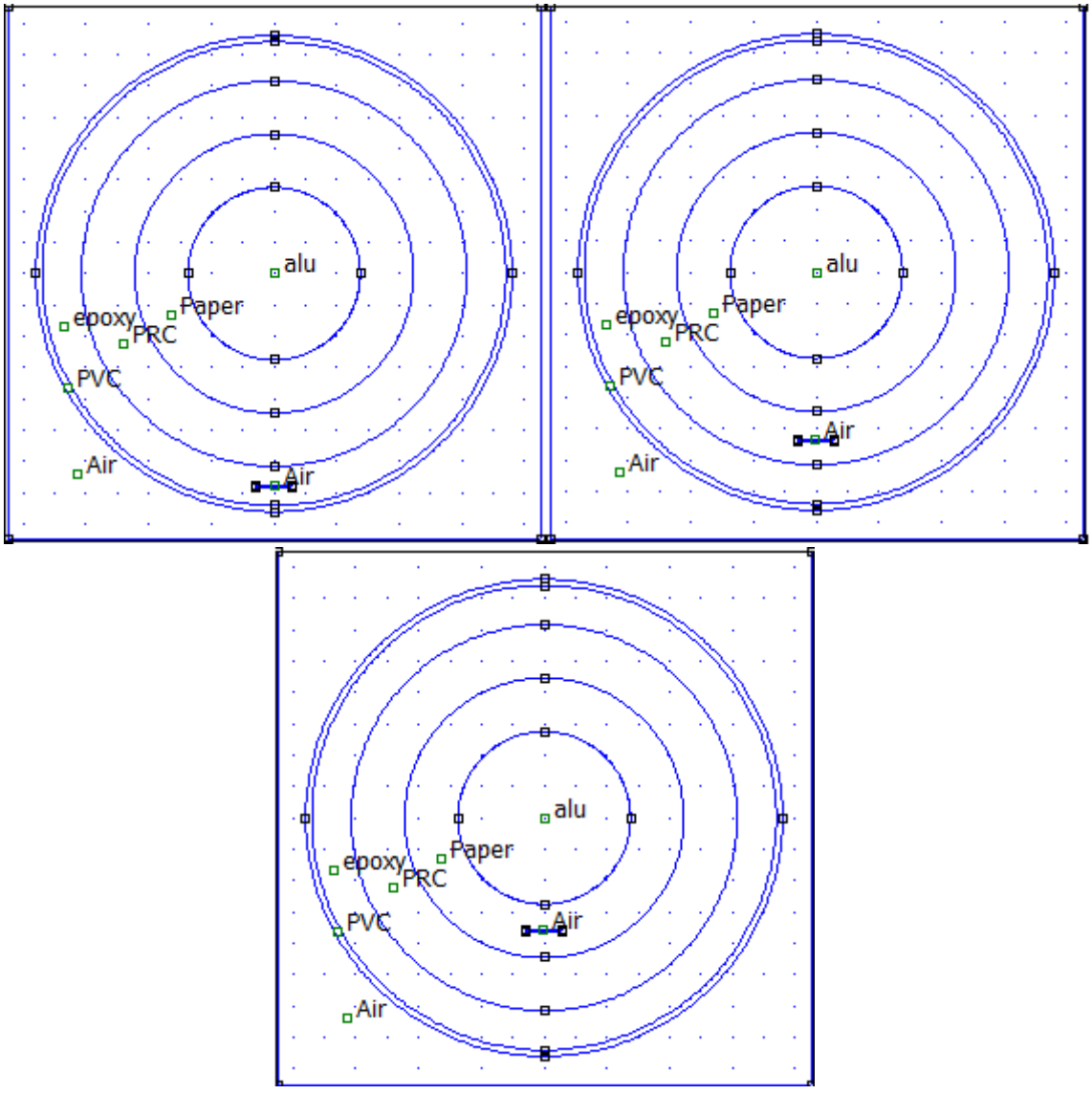


Fig.III.4.5 conduite électrique isolé par un solide stratifié avec impureté.

[(Fig.III.4.7),(Fig.III.4.7.1),(Fig.III.4.8),(Fig.III.4.8.1),(Fig.III.4.9),(Fig.III.4.9.1)] Ces figures Montrent respectivement la distribution du champ électrique à chaque couche isolante solide spécifiée avec une particule d'impureté dans la conduite.

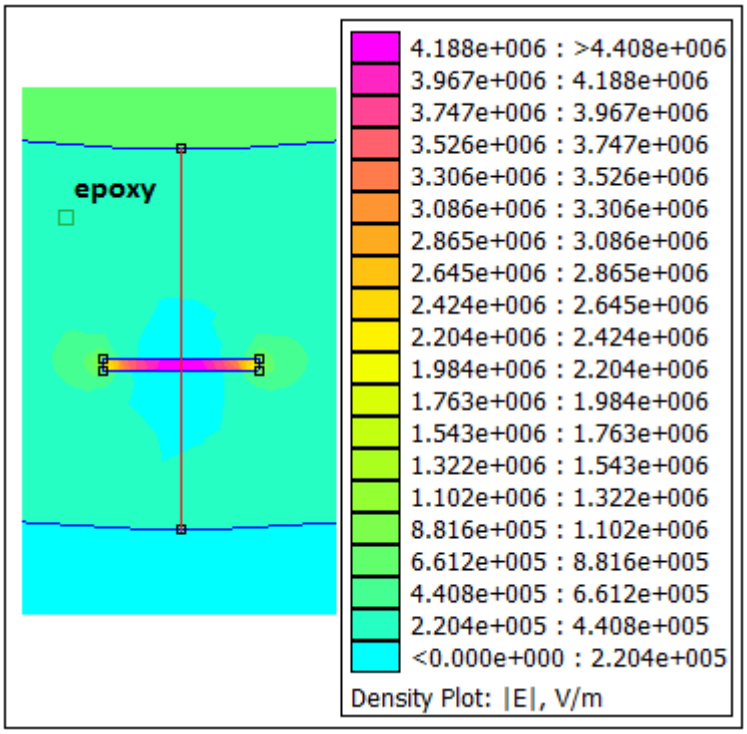


Fig.III.4.6 la distribution du champ électrique au long de la surface de la couche isolante époxy avec une impureté.

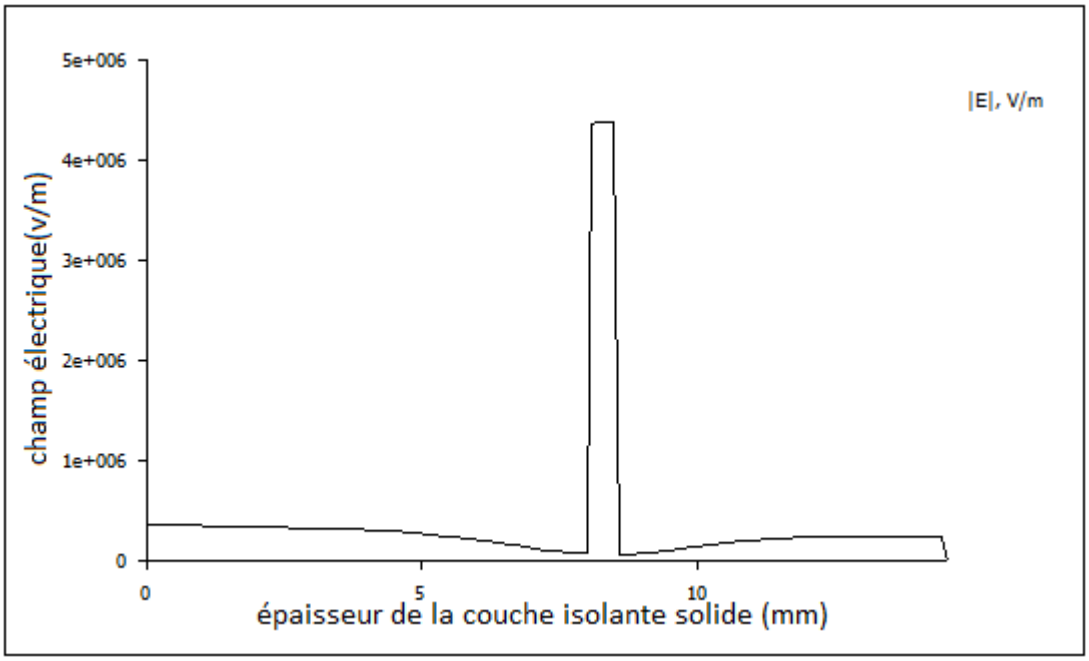


Fig.III.4.6.1 la distribution du champ électrique au long de la surface de la couche isolante époxy correspond à la Fig.III.4.6

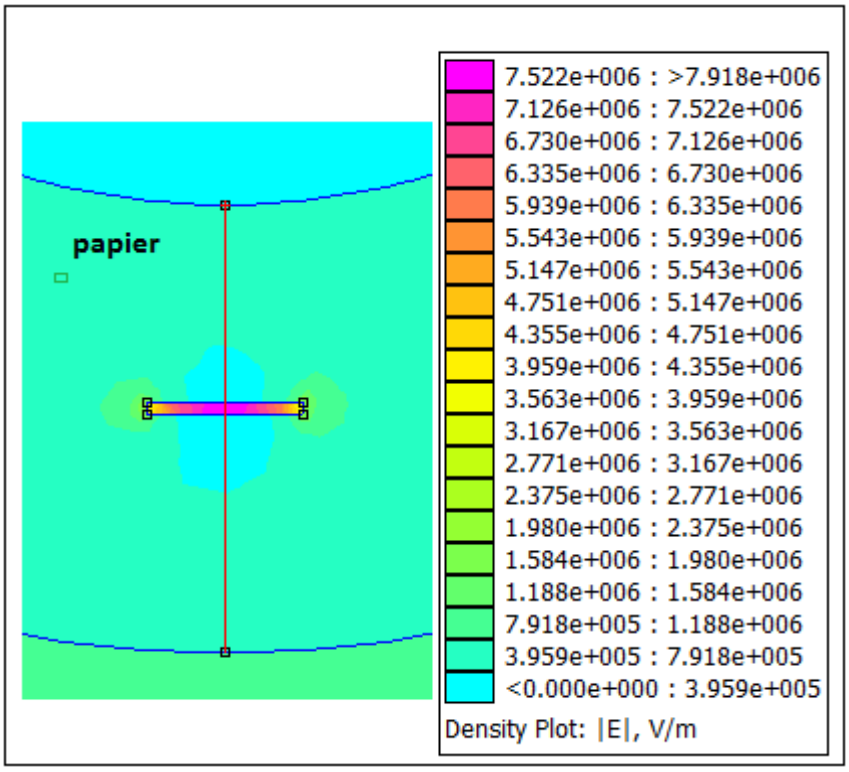


Fig.III.4.7 la distribution du champ électrique au long de la surface de la couche isolante PRC avec une impureté.

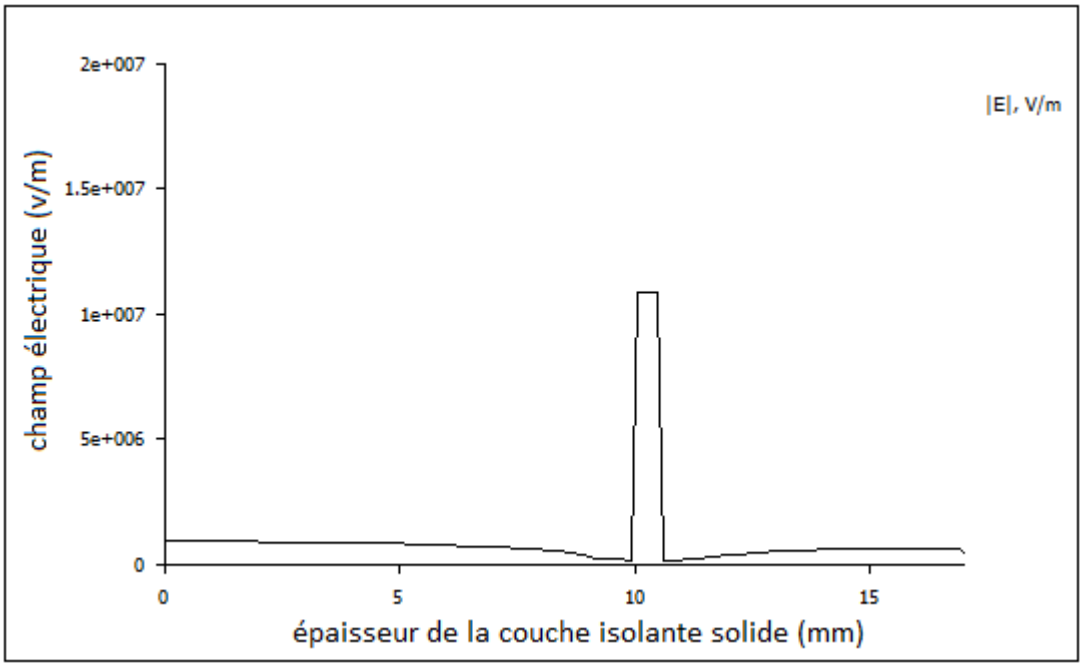


Fig.III.4.7.1 la distribution du champ électrique au long de la surface de la couche isolante PRC correspond à la Fig. III.4.7

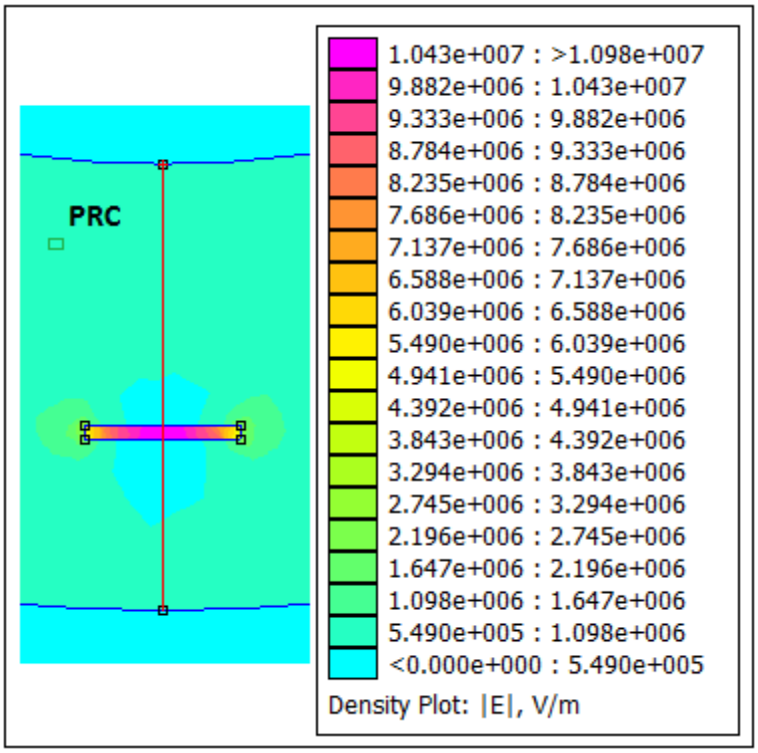


Fig.III.4.8 la distribution du champ électrique au long de la surface de la couche isolante papier avec une impureté.

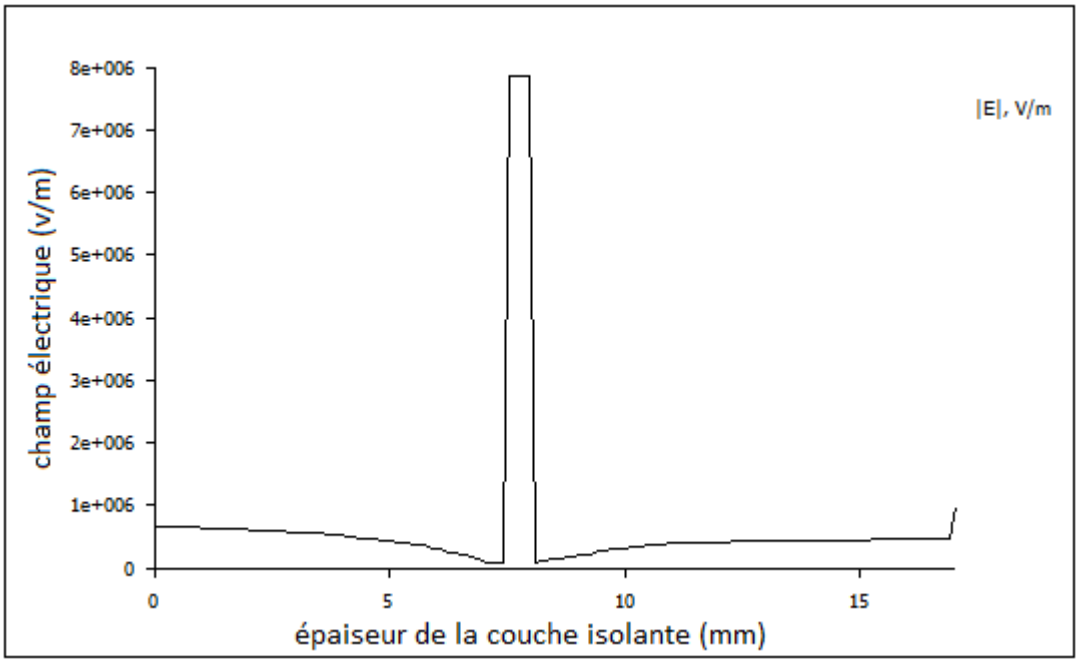


Fig.III.4.8.1 la distribution du champ électrique au long de la surface de la couche isolante papier correspond à la Fig.III.4.8

On peut observer que le champ électrique est uniforme dans les trois milieux considérer mais dès qu'on atteint la particule on voie un pique du champ électrique ou une augmentation brusque du champ électrique à des valeurs maximal de 78.55630 kV/cm, 108.67500 kV/cm, 43.59820 kV/cm respectivement. La valeur critique du champ électrique maximal est dépassée par les 3 milieux le claquage est fortement probable.

Après avoir effectués les simulations des trois cas sur cités, on a relevé les valeurs maximales du champ électrique des différentes couches diélectriques. Les résultats retrouvés sont présenté sur la figure (fig.III.4.9) et le tableau (Tab.III.2).

On voie bien que sur la figure (fig.III.4.9) que le champ électrique atteint des valeurs critiques a voisinent 120kV/cm et le risque de claquage est imminent car cette valeur dépasse la rigidité diélectrique des isolant utilisé.

Il est a noté, que pour les mêmes conditions, le champ électrique dans la conduite électrique isolée par SF6 n'atteint qu'une valeur de 16.3kV/cm seulement alors que la rigidité diélectrique du SF6 est de 89kV/cm a qui prouve que l'isolation gazeuse SF6 est plus rigide qu'une isolation solide stratifiée.

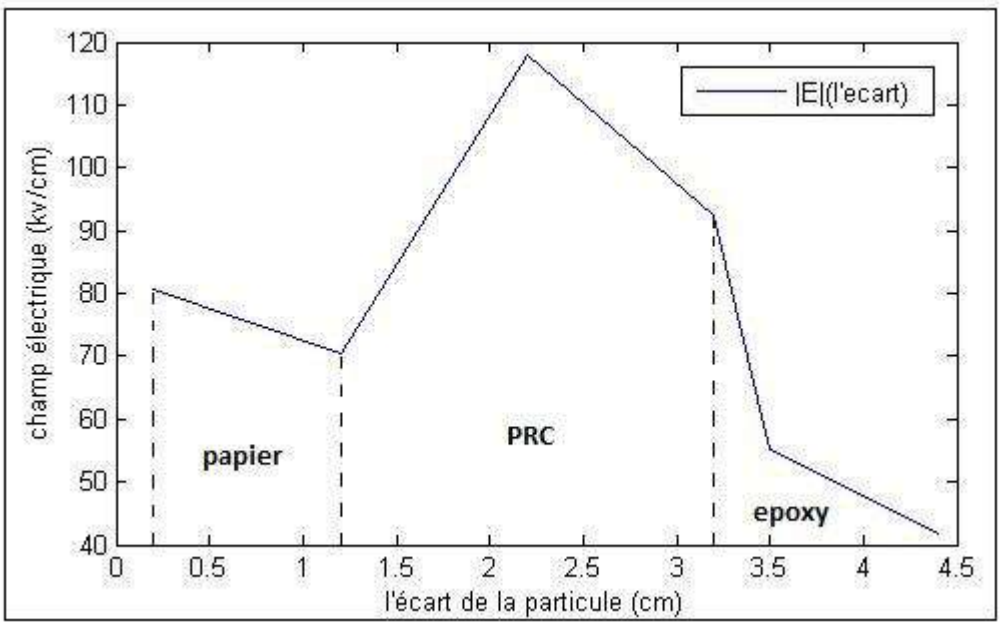


Fig.III.4.9 le champ électrique maximal au long de la surface de la particule à de différentes distance par rapport au conducteur interne.

E (kV/cm)	41.76730	55.11110	92.37800	118.03300	70.17950	80.66740
d (cm)	4.4	3.5	3.2	2.2	1.2	0.2
ε_r	4.5	4.5	2.3	2.3	5	5

Tab III.2 le champ électrique maximal a de différentes distances par rapport au conducteur et permittivité relative de chaque couche solide

III.2.1.c. Pour une impureté qui contient de l'air :

Dans cette simulation l'impureté considérée contient de l'air et de dimensions 6 ×0.1mm disposée et caractérisée comme précédemment, les valeurs maximales du champ électrique à l'intérieure de l'impureté dans les différentes couches diélectriques sont représentées sur la figure (Fig.III.4.10) et le tableau (Tab.III.3).

On constate d'après la figure (Fig.III.4.10) que le champ électrique maximal à l'intérieure de l'impureté atteint sa valeur critique au niveau de la couche diélectrique PRC à 2.2cm de l'âme conductrice et il atteint sa valeur critique de l'air contenue dans l'impureté à 0.2cm du conducteur. Des décharges partielles sont probables à ces deux distances précises.

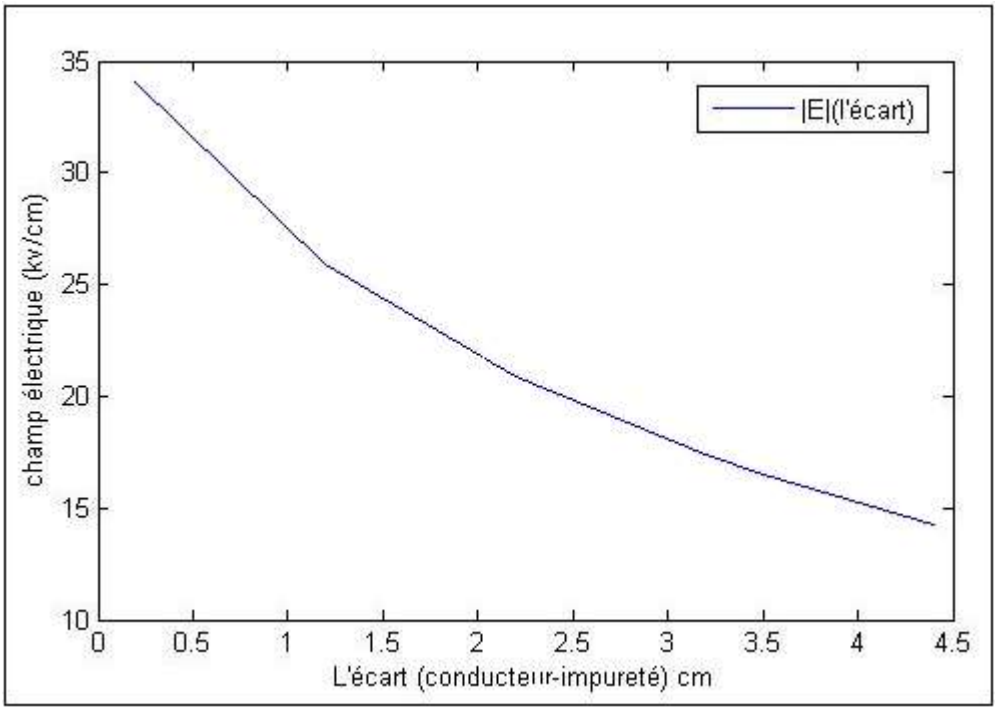


Fig.III.4.10 la variation du champ électrique maximal à la surface intérieure de l'impureté en fonction de l'écart (conducteur-impureté).

E (kV/cm)	14.28930	16.47570	17.40260	20.92240	25.88020	34.10160
d (cm)	4.4	3.5	3.2	2.2	1.2	0.2

Tab. III.3 le champ électrique maximal dans l'impureté a de différentes distances par rapport au conducteur.

Par suite de manipulation sous FEMM, on remarque que le champ électrique est très intense si on applique une tension plus élevé et que L'impureté est plus fine.

Dans ce cas le champ électrique dépasse forcément le champ électrique critique des matériaux diélectriques, ce champ va provoquer une ou plusieurs décharges partielles qui peuvent par la suite mener vers le claquage qui causera la détérioration ou la rupture de la conduite électrique. Une intervention est nécessaire pour la maintenance ou le remplacement de la conduite électrique.

En comparant entre un câble avec isolation à gaz SF_6 et un câble avec isolation solide, on a remarqué que la tenue en tension est plus grande dans le cas d'une isolation gazeuse SF_6 par rapport à une isolation solide. Par ailleurs, un câble avec isolation a gaz SF6 à une grande endurance électrique ce qui augmente sa longévité.

Conclusion :

Dans cette étude, une modélisation électrostatique d'une conduite isolée par un gaz a été réalisée. La conduite est représentée par deux cylindres concentriques de longueur infinie avec un vide rempli d'SF_6 dans un premier cas et de solide stratifié en second cas. Plusieurs cas d'impuretés de dimensions et propriétés physiques différentes et de dispositions variées à l'intérieur de la conduite ont été simulés, afin d'étudier la distribution du champ électrique à l'intérieur de la structure étudiée.

D'après l'étude réalisée on peut retenir les points suivants :

- Pour le cas d'une seule impureté présente dans une conduite isolée par le gaz SF_6 :

✓ Le champ électrique est minimal à l'extrémité de l'impureté orientée vers la terre et il est maximal à l'extrémité de la particule orientée vers l'âme conductrice.

✓ Le champ électrique est lié aux dimensions de l'impureté. Il augmente proportionnellement avec la longueur de la particule, et il diminue avec l'augmentation de son rayon.

✓ Un très faible effet sur le champ électrique à l'extrémité supérieure de la particule avec ou sans revêtement et aussi la variation d'épaisseur du revêtement de 0 à 2mm a un faible effet sur le champ électrique.

- Pour le cas de trois particules impures dans une conduite isolée par le gaz SF_6 , on a constaté :

✓ Le champ électrique à l'extrémité supérieure des deux particules disposée de part et d'autre de l'axe du conducteur est légèrement supérieur à celui enregistré à l'extrémité supérieure de la particule centrale.

✓ Lorsque la longueur de la particule centrale augmente et celle des deux autres particules est fixe le champ électrique maximal à la pointe supérieure de la particule centrale augmente mais il reste invariable sur les deux autres particules.

✓ En augmentant le rayon de la particule centrale et maintenant inchangé le rayon des deux autres particules, le champ électrique est inversement proportionnel au rayon de la particule centrale mais sans influence sur les deux autres particules.

- Pour le cas d'une conduite à isolation stratifiée composée de trois couches diélectriques (papier, PRC, époxy) avec impureté de géométrie rectangulaire, l'impureté est considérée en Aluminium et puis comme dislocation contenant de l'air. Cette étude nous a permis de relever les points suivants :

✓ Le champ électrique maximal sur le long de l'impureté augmente au voisinage du conducteur interne et varie selon la permittivité électrique des matériaux diélectriques considérés.

- ✓ champ électrique maximal dans l'impureté en aluminium est plus intense que celui dans l'impureté qui contient de l'air ceci est dû à permittivité relative de l'Aluminium qui est prise inférieure à celle de l'air.

- ✓ Dans les deux cas d'impuretés étudiés, le champ électrique a atteint des valeurs maximales dépassant celles de la rigidité diélectrique des trois matériaux diélectrique ce qui rend le risque de claquage imminent dans la conduite. En comparaison avec la conduite à isolation gazeuse les valeurs critiques n'ont pas été atteintes pour le niveau de tension considéré, ce qui confirme les bonnes performances diélectriques et la durée de vie importante des conduites électriques à isolation gazeuse.

Conclusion Générale

Conclusion Générale :

La modélisation numérique permet d'étudier la plupart des phénomènes électromagnétiques qui se produisent dans les dispositifs électriques, cette modélisation est menée par l'emploi des équations de Maxwell et les méthodes numériques. Dans notre travail, nous nous sommes intéressés à la méthode des éléments finis qui est intégrés sur FEMM.

Les câbles souterrains, les décharges dans les câbles, les équations de maxwell, le logiciel FEMM et la méthode des éléments finis ont été abordée avant de les mettre en œuvre.

L'étude que nous avons menée est en électrostatique qui consiste à étudier la distribution et la variation du champ électrique crée a l'intérieure et autour d'une ou plusieurs impuretés soumises à une tension de 30 kV dans une conduite électrique isolée avec un gaz diélectrique (SF_6), puis avec isolant solide stratifiée.

On a conclue de cette étude:

- Le champ électrique maximal dépend des dimensions de la particule et la disposition de l'impureté à l'intérieure de la conduite électrique.

- Le champ électrique s'intensifier sur les impuretés fines ayant un faible rayon.

- Lorsque le champ électrique maximal atteint ou dépasse le champ critique d'un milieu ou du matériau diélectrique. Il apparait un arc électrique ou bien une décharge électrique dans l'isolant (rupture diélectrique) ce dernier peut se prolongé et atteindre le claquage qui va détruire le câble.

- Un câble ou une conduite électrique à isolation gaz SF_6 est préférable et meilleure qu'une conduite à isolation solide due aux très bonnes propriétés diélectrique du gaz SF_6. Il est plus performant qu'un isolant solide.

- Un câble avec isolation à gaz SF_6 a une grande endurance électrique qui permet de garantir une durée de vie importante.

Comme perspectives pour ce travail, on propose :

- Une étude en trois dimensions afin de cerner toutes les influences des impuretés sur la distribution du champ électrique.
- Une étude en régime alternatif sera d'une importance capitale, puisque les réseaux en général sont à courant alternatif, afin de mettre en relief l'effet de la fréquence sur la distribution du champ électrique d'une part et d'autre mettre en évidence l'effet d'influence entre les conducteur des trois phases.