



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique

Université de Tissemsilt

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Sciences et de la Technologie



Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme de Master
académique en

Filière : **Electronique**

Spécialité : **Instrumentation**

Présenté par: **BOURAS BRAHIM KHALIL**

Thème

***Etude et analyse des champs électriques DC et
AC d'un isolateur silicone par la méthode des
éléments finis***

Soutenu le,..... /2022

Devant le Jury:

TAIBI Ahmed	Président	M.A.B.Univ-Tissemsilt
MARICH Mohamed	Encadreur	M.C.B.Univ-Tissemsilt
HABEL Elhadj	Examineur	M.C.B.Univ-Tissemsilt

Année universitaire : 2021-2022

Remerciements

Je remercie DIEU de nous avoir donné la force, le courage et la volonté de faire ce travail.

Je tiens à remercier tout particulièrement mon encadreur Monsieur **MARICH Mohamed** d'avoir accepté de diriger ce travail et je lui témoigne toute mon gratitude pour toute sa patience communicatrice et ses orientations.

Je tiens à remercier les membres du jury d'avoir accepté d'examiner et de juger mon travail.

J'exprime aussi mes remerciements à mes amis et collègues de la faculté des sciences et de la technologie Tissemsilt et à l'ensemble des enseignants qui nous ont enseigné durant notre formation master 2.

Enfin, je ne saurais terminer sans remercier toute personne, dont le nom n'a pas figuré dans ces lignes (mais à qui, certainement, je pense), et dont l'aide, le soutien, et les prières m'ont permis d'achever ce travail.

Résumé

La pollution atmosphérique présente un risque non seulement sur la santé de la population mais également sur la sécurité des réseaux d'énergie électrique, affectant ainsi l'économie du pays. Les accidents dus au contournement sous pollution des isolateurs "classiques" des lignes aériennes à haute tension peuvent provoquer des dégâts considérables. Plusieurs solutions ont été adoptées par les gestionnaires des réseaux électriques pour faire face au contournement comme : le nettoyage des isolateurs, l'allongement de la ligne de fuite, le graissage des isolateurs et l'utilisation des revêtements à base d'émaux semi-conducteurs ou de caoutchoucs isolants synthétiques.

L'utilisation des isolateurs composites présente une meilleure alternative notamment dans les zones fortement polluées grâce à leur hydrophobicité qui limite le mouillage de la surface de l'isolateur, et qui le protège ainsi contre les effets du courant de fuite. Depuis leur commercialisation, ces isolateurs ont connu plusieurs modifications dans la structure chimique/physique des matériaux avec lesquels ils sont fabriqués, ce qui a permis d'améliorer leurs performances.

Notre travail a porté sur l'étude et l'analyse des champs électriques DC et AC d'un isolateur de haute tension de silicone (SIR.11kV) dans l'état propre et pollué pour comprendre l'effet de la fréquence et la conductivité de l'air sur la distribution de champ et de potentiel électrique. Pour ce faire, nous avons utilisé la méthode des éléments finis pour simuler en 2D la distribution de champ et de potentiel électrique par un logiciel commercial (COMSOL Mutliphysics).

Mots clé :

Isolateur silicone, pollution, méthode des éléments finis, potentiel, champ DC- AC, fréquence, conductivité, permittivité complexe.

Abstract:

Air pollution poses a risk not only to the health of the population but also to the safety of electrical energy networks, thus affecting the country's economy. Accidents due to flashover under pollution of the "classic" insulators of high voltage lines can cause considerable damage. Several solutions have been adopted by the managers of the electrical networks to counteract the flashover phenomenon such as: cleaning the insulators, lengthening the creepage line, greasing the insulators and the use of coatings based on semi-conductor enamels or synthetic insulating rubbers.

The use of composite insulators presents a better alternative, especially in heavily polluted areas thanks to their hydrophobicity which limits the wetting of the surface of the insulator, and which thus protects it against the effects of leakage current. Since their commercialization, these insulators have undergone several modifications in the structure chemical/physical of the materials with which they are made, which has improved their performance.

Our work focused on the study and analysis of DC and AC electric fields of a high voltage silicone insulator (SIR.11kV) in the clean and polluted state to understand the frequency effect and the conductivity of the air on the distribution of electric field and potential. To do this, we used the finite element method to simulate in 2D the field and electrical potential distribution by using the commercial software (COMSOL Mutliphysics).

Key word:

Insulator, silicone, pollution, finite element method, potential, field DC-AC, frequency, conductivity, complex permittivity.

ملخص:

يشكل تلوث الهواء خطراً ليس فقط على صحة السكان ولكن أيضاً على سلامة شبكات الطاقة الكهربائية ، مما يؤثر على إقتصاد البلاد. يمكن أن تتسبب الحوادث الناتجة عن الإلتفاف الكهربائي للعوازل الملوثة "الكلاسيكية" للخطوط الكهربائية ذات التوتر العالي في حدوث أضرار جسيمة. تم إعتقاد العديد من الحلول من قبل مسيري الشبكات الكهربائية للتعامل مع ظاهرة الإلتفاف الكهربائي كهربي مثل: تنظيف العوازل ، وإطالة طول خط السطح الخارجي للعازل ، وتشحيم العوازل ، وإستخدام الطلاءات القائمة على المطاط العازل الصناعي.

يقدم إستخدام العوازل المركبة بديلاً أفضل ، خاصة في المناطق شديدة التلوث بفضل قدرتها على مقاومة الماء مما يحد من ترطيب سطح العازل ، وبالتالي يحمي من تأثيرات تيار التسرب. منذ تسويقها ، خضعت هذه العوازل لعدة تعديلات كيميائية / فيزيائية في الهيكل للمواد التي صنعت بها ، مما أدى إلى تحسين أدائها.

ركز عملنا على دراسة وتحليل المجالات الكهربائية DC و AC لعازل السيليكون العالي التوتر (SIR.11kV)

في الحالة النظيفة والملوثة لفهم تأثير التردد وناقلية الهواء على توزيع الحقل الكهربائي والتوتر .

للقيام بذلك ، إستخدمنا طريقة العناصر المحدودة (MEF) لمحاكاة توزيع ثنائي الأبعاد للحقل و التوتر الكهربائي بفضل برنامج تجاري (COMSOL Mutliphysics)

الكلمات المفتاحية:

عازل ، تلوث ، طريقة العناصر المحدودة ، التوتر ، الحقل الكهربائي المتناوب- المستمر ، التردد ، الناقلية ، السماحية المركبة

SOMMAIRE

Sommaire

Résumé	
Liste des abréviations et des symboles	
Liste des Figures	
Liste des Tableaux	
Introduction générale	1
CHAPITRE I : Généralités sur les isolateurs haute tension, pollution et phénomène de contournement	
I.1 Introduction	4
I.2 Isolateur de haute tension	4
I.2.1 Définition	4
I.2.2 Fonctionnement et constitution d'un isolateur.....	5
I.2.3 Caractéristiques d'un isolateur	5
I.2.4 Principaux types d'isolateurs.....	6
I.2.4.1 Isolateurs rigides.....	6
I.2.4.2 Chaîne d'isolateurs.....	7
I.2.4.3 Isolateurs capot et tige.....	7
I.2.4.4 Isolateur à long fût.....	8
I.2.5 Différents profils des isolateurs.....	8
I.2.6 Matériaux isolants utilisés pour la fabrication des isolateurs.....	9
I.2.6.1 Partie isolante.....	9
I.2.6.1.1 Céramique.....	10
I.2.6.1.2 Verre.....	10
I.2.6.1.3 Matériaux synthétiques.....	11
I.2.6.1.3.1 Silicone.....	11
I.2.6.1.3.2 Grandes familles de silicones.....	12
I.2.6.1.3.3 Propriété de la surface.....	12
I.2.6.1.3.4 Hydrophobicité.....	13
I.2.6.1.3.5 Applications des élastomères silicones dans l'isolation électrique.....	13
I.2.6.2 Pièces métalliques de liaison.....	13
I.2.7 Choix des isolateurs.....	14

I.3 Pollution.....	14
I.3.1 Source de pollution.....	14
I.3.1.1 Pollution naturelle.....	14
I.3.1.2 Pollution marine.....	15
I.3.1.3 Pollution désertique.....	15
I.3.1.4 Pollution industrielle.....	15
I.3.1.5 Pollution Mixte.....	15
I.3.2 Classement de degré de pollution.....	16
I.4 Contournement.....	16
I.4.1 Définition.....	16
I.4.2 Déroulement du contournement.....	17
I.5 Remèdes	18
I.5.1 Allongement de la ligne de fuite	18
I.5.2 Graissage.....	19
I.5.3 Lavage périodique	19
I.5.4 Anneaux de garde.....	19
I.6 Conclusion.....	20
CHAPITRE II : Méthode des éléments finies "Logiciel COMSOL"	
II .1 Introduction.....	22
II.2 Définition de la méthode des éléments finis	22
II.3 Historique	22
II.4 Avantages et inconvénients de la MEF.....	23
II.4.1 Avantages de la MEF.....	23
II.4.2 Inconvénients de la MEF	24
II.5 Etapes de la méthode des éléments finis.....	24
II.6 Caractéristiques d'un élément fini.....	24
II.6.1 Nœuds géométriques	24
II.6.2 Attributs d'un élément fini	25
II.6.3 Type des éléments finis.....	25

II.6.4 Choix des éléments finis	27
II.6.5 Qualité d'un élément fini	27
II.7 Principes de la MEF.....	27
II.8 Différents types de modèles d'un EF	28
II.8.1 Modèle déplacement	29
II.8.2 Modèle équilibre ou contrainte	29
II.8.3 Modèle mixte	29
II.8.4 Modèle hybride	29
II.8.5 Modèle en déformation	30
II.9 Concept de la MEF.....	30
II.10 Domaines d'application de la MEF.....	30
II.11 Utilisation d'un Logiciel élément fini.....	31
II.12 Étapes logiques du calcul par éléments finis	31
II.13 Description du logiciel « COMSOL Multyphysics ».....	32
II.13.1 L'interface graphique de COMSOL	33
II.14 Conclusion.....	38
 CHAPITRE III: Etude et analyse des champs électriques DC et AC d'un isolateur silicone 11kV	
III.1 Introduction	40
III.2 Simulation du modèle réel par COMSOL	40
III.2.1 Modèle de l'isolateur étudié	40
III.2.2 Identification des domaines de l'isolateur	41
III.2.3 Conditions aux limites	42
III.2.4 Maillage des domaines.....	42
III.3 Analyse du champ électrique	42
III.4 Résultats des simulations.....	43
III.4.1 Résultats de calcul du potentiel et du champ électrique pour le cas propre	44
III.4.1.1 Influence de la fréquence pour une conductivité de l'air $\sigma_{\text{air}}=10^{-12}$ S/m.....	44
III.4.1.2 Influence de la fréquence pour une conductivité de l'air $\sigma_{\text{air}}=10^{-14}$ S/m.....	45
III.4.1.3 Influence de la fréquence pour une conductivité de l'air $\sigma_{\text{air}}=10^{-17}$ S/m.....	46

III.4.1.4 Influence de la conductivité de l'air pour une fréquence $f=50\text{Hz}$	47
III.4.1.5 Influence de la conductivité de l'air pour une fréquence $f=10^{-4}\text{Hz}$	48
III.4.1.6 Influence de la conductivité de l'air pour une fréquence $f=10^{-5}\text{Hz}$	49
III.4.1.7 Influence de la conductivité de l'air pour une fréquence $f=10^{-6}\text{Hz}$	50
III.4.1.8 Variation des parties réelles et imaginaires de la permittivité relative complexe en fonction de la fréquence pour $\sigma_{\text{air}} = 10^{-17} \text{ S/m}$	52
III.4.2 Résultats de la distribution du potentiel et de champ pour le cas pollué	53
III.4.2.1 Influence de la fréquence pour une conductivité de l'air $\sigma_{\text{air}}=10^{-12} \text{ S/m}$	53
III.4.2.2 Influence de la fréquence pour une conductivité de l'air $\sigma_{\text{air}}=10^{-14} \text{ S/m}$	54
III.4.2.3 Influence de la fréquence pour une conductivité de l'air $\sigma_{\text{air}}=10^{-17} \text{ S/m}$	55
III.4.2.4 Influence de la conductivité de l'air pour une fréquence $f=50\text{Hz}$	56
III.4.2.5 Influence de la conductivité de l'air pour une fréquence $f=10^{-4}\text{Hz}$	57
III.4.2.6 Influence de la conductivité de l'air pour une fréquence $f=10^{-5}\text{Hz}$	58
III.4.2.7 Influence de la conductivité de l'air pour une fréquence $f=10^{-6}\text{Hz}$	59
III.5 Conclusion	60
Conclusion générale.....	62
Bibliographie	

Liste des abréviations et des symboles

HT	Haute tension
AC	Alternative courant
DC	Direct courant
P	Le pas
Lf	Ligne de fuite
Lc	Ligne de contournement
C	Capot
D	Diélectrique
M	Mortier de ciment alumineux ou portland
T	Tige
R	Routile
l	La plus court distance dans l'air, extérieur isolateur
ε	Longueur de canal de perforation
PDMS	Poly-Di-Méthyl Siloxane
MT	Moyen Tension
THT	Très Haute Tension
MEF	Méthodes des éléments finis
Ke	Matrice de rigidité élémentaire
Ue	Les degrés de libertés (déplacements) nodaux
Fe	Les forces appliquées aux nœuds
$\nabla \cdot E$	La divergence des champs électriques
ρ	La densité de charge volumique
ε_0	La permittivité du vide
ε_r	La permittivité diélectrique relative.
V	La tension d'un point le long de l'isolant ou de la espace défini
\vec{J}_{tot}	Le courant effectif total
\vec{J}	La densité de courant dans les matériaux
\vec{D}	La densité de flux électrique
σ	La conductivité du matériau
ω	La fréquence angulaire

Liste des Figures

CHAPITRE I : Généralités sur les isolateurs haute tension, pollution et phénomène de contournement des isolateurs

Figure I.1 : Isolateur de haute tension (capot et tige).....	5
Figure I.2: Les caractéristiques d'un isolateur.....	6
Figure I.3 : Isolateur rigide.....	6
Figure I.4 : Assemblage à rotule.....	7
Figure I.5 : Isolateur à capot et tige.....	7
Figure I.6 : Isolateur long fût.....	8
Figure I.7 : Les différents profils des isolateurs	9
Figure I.8: Comportement d'une surface hydrophile et hydrophobe	12
Figure I.9: Hydrophobicité d'une surface en silicone.....	13
Figure I.10 : Décharge électrique (contournement).....	17
Figure I 11 : Déroulement du contournement	18

CHAPITRE II : Méthode des éléments finies "Logiciel COMSOL"

Figure II.1 : Domaine discrétisé par sous domaine	24
Figure II.2 : Principe d'analyse par la MEF.....	28
Figure II.3 : Maillage du domaine en triangles à trois nœuds.....	30
Figure II.4 : Fenêtre de select « model wizard».....	33
Figure II.5: Fenêtre de« SELECT SPACE».....	34
Figure II.6: Fenêtre de «ADD PHYSICS(MODEL)».....	34
Figure II.7: Fenêtre «SELECT STUDY TYPE».....	35
Figure II.8: Géomètre exemple de l'équivalent de l'isolateur.....	35
Figure II.9: Matériel exemple de l'équivalent de l'isolateur.....	36
Figure II.10: Détermination de physiques.....	36
Figure II.11:Maillage.....	37
Figure II.12: Résultats de simulation.....	37

CHAPITRE III : Etude et analyse des champs électriques DC et AC d'un isolateur silicone 11kV

Figure III.1: Géométrie et caractéristiques dimensionnelles de l'isolateur en silicone (SIR.11kV).....	41
Figure III.2: Différentes domaines de l'isolateur(SIR.11kV).....	41
Figure III.3: Maillage de l'isolateur(SIR.11kV).....	42
Figure III.4: Influence de la variation de la fréquence sur le potentiel et le champ électrique pour la conductivité de l'air $\sigma_{air}10^{-12}$ S/m.....	44
Figure III.5: Influence de la variation de la fréquence sur le potentiel et le champ électrique pour la conductivité de l'air $\sigma_{air}10^{-14}$ S/m.....	45
Figure III.6: Influence de la variation de la fréquence sur le potentiel et le champ électrique pour la conductivité de l'air $\sigma_{air}10^{-17}$ S/m.....	46
Figure III.7: Influence de la variation de la conductivité de l'air sur le potentiel et le champ électrique pour la fréquence $f=50$ Hz.....	47
Figure III.8: Influence de la variation de la conductivité de l'air sur le potentiel et le champ électrique pour la fréquence $f=10^{-4}$ Hz.....	48
Figure III.9: Influence de la variation de la conductivité de l'air sur le potentiel et le champ électrique pour la fréquence $f=10^{-5}$ Hz.....	49
Figure III.10: Influence de variation de conductivité de l'air sur le potentiel et le champ électrique pour la fréquence ($f=10^{-6}$ Hz).....	50
Figure III.11: Variation les valeurs réelles et parties imaginaires de la permittivité relative complexe par rapport à la fréquence dans l'échelle logarithmique pour $\sigma_{air}=10^{-17}$ S/m.....	52
Figure III.12: Influence de la variation de la fréquence sur le potentiel et le champ électrique pour la conductivité de l'air $\sigma_{air}=10^{-12}$ S/m.....	53
Figure III.13: Influence de la variation de la fréquence sur le potentiel et le champ électrique pour la conductivité de l'air $\sigma_{air}=10^{-14}$ S/m.....	54
Figure III.14: Influence de la variation de la fréquence sur le potentiel et le champ électrique pour la conductivité de l'air $\sigma_{air}=10^{-17}$ S/m.....	55
Figure III.15: Influence de la variation de la conductivité de l'air sur le potentiel et le champ électrique pour la fréquence $f=50$ Hz.....	56
Figure III.16: Influence de la variation de la conductivité de l'air sur le potentiel et le champ électrique pour la fréquence $f=10^{-4}$ Hz.....	57
Figure III.17: Influence de la variation de la conductivité de l'air sur le potentiel et le champ électrique pour la fréquence $f=10^{-5}$ Hz.....	58
Figure III.18: Influence de la variation de la conductivité de l'air sur le potentiel et le champ électrique pour la fréquence $f=10^{-6}$ Hz.....	59

Liste des Tableaux

CHAPITRE I: Généralités sur les isolateurs haute tension, pollution et phénomène de contournement

Tableau I.1 Classement de degré de pollution.....	16
---	----

CHAPITRE II: Méthode des éléments finies "Logiciel COMSOL"

Tableau II.1 : Les types d'éléments finis.....	26
--	----

CHAPITRE III : Etude et analyse des champs électriques DC et AC d'un isolateur silicone 11KV

Tableau III.1: Propriétés électriques des matériaux.....	41
--	----

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Les équipements H.T présents dans les réseaux aériens de transport de l'énergie électrique sont supposés opérer de façon fiable quelles que soient les conditions environnementales et météorologiques (tropical, arctique, côtier, atmosphère polluée, etc..) auxquelles ils sont soumis. Cela s'applique tout particulièrement aux isolateurs que ton trouve en très grand nombre sur les réseaux électriques aériens et dont le rôle est d'assurer l'isolement électrique entre les parties portées à la H.T ou entre les parties H.T et les parties mises à la terre. Bien que le prix des isolateurs ne représente qu'un faible pourcentage du coût total associé à la construction des lignes de transport, la fiabilité de ces derniers sous diverses conditions météorologiques est primordiale afin d'éviter toute interruption intempestive de la distribution en énergie électrique. Depuis plusieurs décennies, l'une des principales cibles des travaux de recherche et de développement dans le domaine de la transmission et de la distribution électrique a été la diminution du nombre et de la durée des interruptions de l'alimentation en énergie électrique des consommateurs dont une grande majorité est attribuable aux contournements des isolateurs qui sont directement exposés aux conditions atmosphériques.(1)

Une quantité importante de travaux tant théoriques qu'expérimentaux a été consacrée à l'étude du contournement des isolateurs sans pour autant aboutir à l'élaboration d'un modèle pouvant tenir compte des paramètres réels caractéristiques du phénomène de pollution. Il s'agit en particulier de la forme des isolateurs, de la répartition des couches polluantes (continue ou discontinue) et de leur résistivité, des échanges thermiques, de la non uniformité du mouillage et de l'intensité des arcs au voisinage de la surface de l'isolateur, de la formation d'arcs multiples,.... Aussi, la détermination de la tension de contournement d'un isolateur pollué est entachée d'une dispersion marquée, même lorsque les conditions sont en apparence contrôlées.

La pollution des isolateurs associée à la présence d'humidité diminue le niveau d'isolation du système. En effet l'apport d'eau au niveau du dépôt de pollution provoque la dissolution des sels et conduit à la formation d'une couche électrolytique. Cette couche, soumise à la différence de potentiel aux bornes de l'isolateur devient le siège d'un courant de fuite conduisant à l'échauffement de la couche par effet Joule et par conséquent à l'apparition de bandes sèches.

La différence de potentiel, qui initialement est appliquée entre la ligne et la partie la plus éloignée de la chaîne d'isolateurs, se portera aux frontières de ces zones.

A cause des champs électriques très élevés, une étincelle, prenant racine sur la zone humide où le potentiel est élevé, apparaît au-dessus de la bande sèche en ionisant l'air environnant. L'étincelle atteint alors une telle taille, qu'elle se propage sur toute la longueur de la couche de pollution. L'isolateur cesse d'assurer sa fonction première et le court-circuit de la ligne devient alors inévitable : c'est le contournement. (1)

L'objectif dans notre travail, est de faire dans un premier temps, le calcul de la répartition du potentiel et de champ électrique le long d'un isolateur composite (11kV) et la prédiction de la valeur de champ maximal autour de cet isolateur. Par la suite nous allons exploiter le logiciel COMSOL Multiphysics pour étudier l'influence des paramètres électriques sur les distributions du potentiel et du champ électriques le long d'une chaîne d'isolateurs.

Pour ce faire, nous avons réparti le manuscrit en trois chapitres:

Dans le premier chapitre, nous allons donner quelques généralités sur les isolateurs, la pollution et le phénomène de contournement.

Le deuxième chapitre fera l'objet des principales bases de la méthode des éléments finis et comment l'exploiter à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics.

Dans le dernier chapitre, nous présenterons et interpréterons les résultats de l'étude et de l'analyse des champs électriques DC et AC d'un isolateur de haute tension en silicone (SIR.11kV) dans l'état propre et pollué pour comprendre l'effet de la fréquence et de la conductivité de l'air sur la distribution de champ et de potentiel électrique. Nous terminerons par une conclusion générale.

CHAPITRE I

Généralités sur les isolateurs haute tension, pollution et phénomène de contournement

I.1 Introduction

Les éléments constituant les systèmes de transport d'énergie électrique sont exposés à diverses contraintes. Parmi celles-ci, la pollution des isolateurs constitue un des facteurs de première importance dans la qualité et la fiabilité du transport d'énergie. Les isolatrices hautes tensions se couvrent d'une couche de pollution qui provient de l'atmosphère. Associée à la rosée de matin, à la pluie, ou au brouillard, cette couche de pollution devient conductrice et sera le siège de passage d'un courant de fuite vers la masse des pylônes. Dans certaines conditions favorables il y aura l'apparition des décharges partielles sur la surface de l'isolateur qui s'allongent et mènent au contournement complet de l'isolateur. (2)

Nous avons présenté dans ce chapitre une étude bibliographique concernant, les isolateurs hautes tensions, pollution et phénomène de contournement des isolateurs pollués.

I.2 Les isolateurs

I.2.1 Définition :

L'isolateur est un matériau isolant solide que présente une très grande résistance au passage du courant et dont la conductibilité est pratiquement nulle. Il est utilisé pour isoler les conducteurs ou des pièces sous tension afin d'empêcher les court-circulation, les pertes de courant et les charges d'électrocution.

L'isolateur (figure I.1) est formé par un isolant auquel sont fixés deux pièces métalliques M1 et M2. L'isolant peut être du verre, céramique ou matériaux synthétiques. La pièce M1 se fixe au pylône et la pièce M2 porte le conducteur.

L'isolateur possède un double rôle :

- Rôle mécanique : porte le conducteur
- Rôle électrique : isole le conducteur par rapport au pylône.

Les isolateurs sont des composants indispensables au transport et à la distribution de l'énergie électrique. Leur fonction est de réaliser une liaison entre des conducteurs HT et la terre. (3)

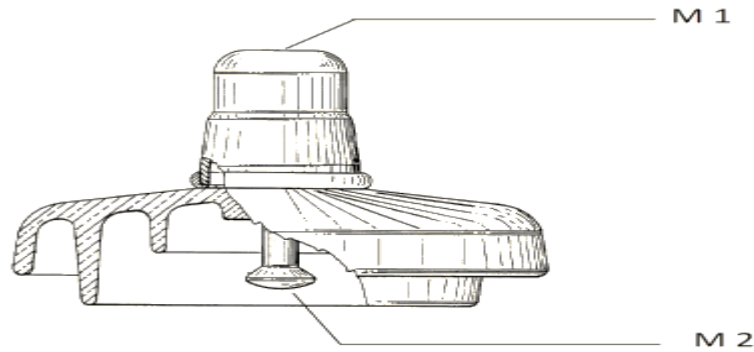


Figure I.1 : Isolateur de haute tension (capot et tige).

I.2.2 Fonctionnement et constitution d'un isolateur:

Les isolateurs sont des éléments indispensables au transport et à la distribution d'énergie électrique. Leur fonction est de réaliser une liaison mécanique entre des conducteurs portés à des potentiels différents. Accrochés aux pylônes des lignes aériennes, ils maintiennent les conducteurs dans la position spécifiée (isolateur d'alignement ou d'ancrage), assurent la transition entre l'isolation interne (huile, SF₆) et l'isolation externe (Traversées de transformateurs, extrémités de câbles) et constituent également l'enveloppe de certains appareils (disjoncteurs, parafoudres,...).

Les isolateurs sont conçus et dimensionnés pour résister aux contraintes introduites par l'environnement. (4)

I.2.3 Caractéristiques d'un isolateur :

Le pas P: C'est la distance séparant deux parties homologues de deux isolateurs consécutifs dans une chaîne. La détermination de ce paramètre nous permet donc de connaître la longueur d'une chaîne ayant un nombre donné d'isolateurs.

La ligne de fuite Lf: C'est la plus courte distance, suivant les contours de la surface extérieure des parties isolantes, mesurée entre les parties métalliques.

La ligne de contournement Lc: C'est la distance la plus courte dans l'air entre deux parties conductrices. (3)

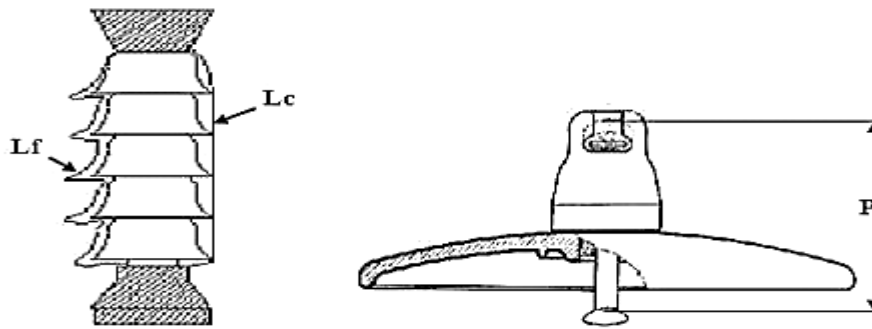


Figure I.2: Les caractéristiques d'un isolateur.

I.2.4 Principaux types d'isolateurs :

On peut distinguer deux principaux types d'isolateurs :

I.2.4.1 Isolateurs rigides :

Ce type d'isolateur permet d'obtenir une liaison rigide entre le support et le câble. Il est constitué d'un ou plusieurs isolateurs encastrés et scellés entre eux, ils sont fixés aux pylônes par des ferrures de différentes formes (Figure I.3). Ils sont montés sur pylônes soit d'une façon verticale, horizontale ou oblique (inclinée). Mais ce type d'isolateurs est utilisé pour les lignes aériennes qui ne dépassent pas le niveau de tension de 60 KV. (5)



Figure I.3 : Isolateur rigide.

La céramique et le verre sont les deux matériaux utilisés pour les isolateurs rigides. (6)

I.2.4.2 Chaîne d'isolateurs :

Une chaîne d'isolateurs est constituée de plusieurs éléments de type capot et tige ou autres (figure I.4). Ces éléments sont soumis principalement à des efforts de traction. Ils sont généralement utilisés en suspension et forment des chaînes d'isolateurs soit verticales (alignement), soit horizontale (ancrage). (6)

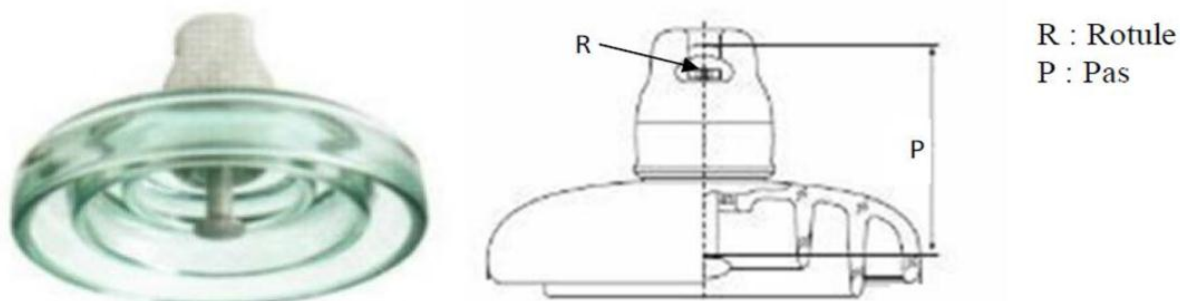


Figure I.4 : Assemblage à rotule.

I.2.4.3 Isolateurs capot et tige :

L'isolateur capot et tige est constitué d'un bloc isolant portant à sa partie supérieure un capot scellé en fonte malléable et à l'intérieur une tige en acier, avec cannelures et dont la tête conique est également scellée dans le verre (ou la porcelaine). L'extrémité inférieure de cette tige est arrondie et a les dimensions voulues pour pénétrer dans le capot de l'élément suivant, et y être maintenue par une goupille. L'assemblage consiste à effectuer un scellement du capot et du diélectrique par du ciment, puis celui de la tige et du diélectrique. (7) La coupe de l'isolateur capot-tige est schématisée à la figure I.5

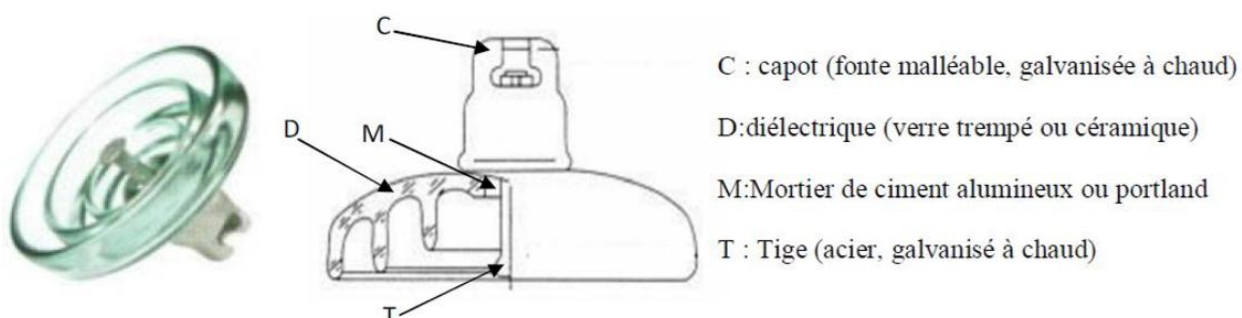
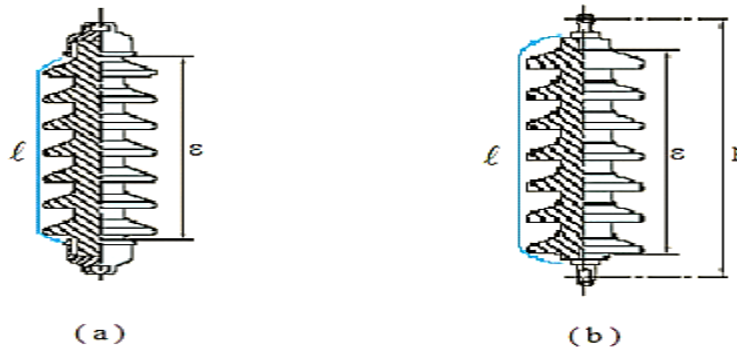


Figure I.5 : Isolateur à capot et tige.

I.2.4.4 Isolateur à long fût :

Isolateur à long fût ils sont constitués d'un cylindre plein en céramique, en porcelaine ou en matériaux synthétique, muni d'ailettes (figure I.6). A chaque extrémité est fixée une pièce métallique de liaison. Cette extrémité métallique peut se présenter sous deux formes distinctes soit en forme de tige scellée dans une cavité prévue à cet effet (a) elle enveloppe les extrémités tronconiques sur le cylindre (b). (7)



t : Plus courte distance dans l'air, extérieure à l'isolateur.

P : Pas nominal.

ε : Longueur du canal de perforation, $t/2 \ll \varepsilon$

Figure I.6 : Isolateur long fût.

I.2.5 Différents profils des isolateurs :

Afin d'améliorer le fonctionnement des isolateurs dans les régions polluées, la CEI proposé plusieurs profils.(Comité international d'électrotechnique) Nous pouvons citer :(2)

	<p>Profil standard : La forme et les dimensions sont en accord avec la normalisation internationale (CEI 305 1978), à cause de leur planéité, les rainures internes bien espacées et la longueur de la ligne de fuite supérieure à la demande standard. Ce type est très utilisé dans les endroits à pollution moyenne.</p>
	<p>Profil antibrouillard (forme A) : Il est conçu avec un diamètre plus grand que le type de profil standard muni de deux ou trois rainures à grande profondeur. Cette conception permet également un lavage manuel facile si c'est nécessaire et empêche le claquage entre rainures voisines quand il y a une pollution sévère et tout le profil intérieur simplifie la maintenance.</p>




	<p>Profil antibrouillard (forme B) : Dans cette conception, l'épaisseur de la rainure extérieure agit comme une barrière contre l'action du brouillard et le dépôt des sels minéraux sur la surface de l'isolateur, empêchant alors la formation d'un électrolyte conducteur sur la surface. Ce type d'isolateur est efficace dans les zones côtières</p>
	<p>Profil sphérique : La forme sphérique permet une longueur de fuite équivalente à celle d'absence de rainures internes permet un lavage manuel facile et efficace.</p>
	<p>Profil plat : L'élimination complète des rainures internes réduit grandement l'accumulation de pollution sur la surface basse, grâce au courant d'air. Cette conception est particulièrement efficace dans les zones désertiques où l'auto lavage est peu fréquente par pluie</p>

Figure I.7 : Les différents profils des isolateurs.

I.2.6 Matériaux isolants utilisés pour la fabrication des isolateurs :

Un isolateur est constitué en général de deux parties: une partie isolante et des pièces métalliques de liaison, scellées sur cette partie isolante.

I.2.6.1 Partie isolante :

On trouve plusieurs isolants solides qui peuvent être utilisés pour la fabrication des isolateurs de haute tension comme le verre, la céramique et la porcelaine. Mais durant ces dernières années, la porcelaine est de plus en plus abandonnée à cause de deux inconvénients principaux qui sont le poids des isolateurs et la difficulté de détection des amorçages.

Ces dernières années, on s'intéresse de plus en plus à l'utilisation des isolateurs en matériaux polymères. (9)

I.2.6.1.1 Céramique :

Le développement de la fabrication des céramiques datent depuis longtemps à cause de leurs performances. Pour les isolateurs qui vont être utilisés dans des lieux où il y a des contraintes mécaniques très importantes, on utilise de préférence des céramiques à grains très fins. Souvent on trouve la céramique dans les postes :isolateurs supports, couverture isolante des sectionneurs, des disjoncteurs, des transformateurs de potentiel ,des bornes de traversées des transformateurs de puissance.(10)

I.2.6.1.2 Verre :

En Algérie, les isolateurs utilisés dans les lignes de moyenne et haute tension sont en verre. Parmi les avantages que présentent le verre, le bas prix et l'observation des défauts est très facile. On trouve deux types de verre pour la fabrication des isolateurs: le verre trempé et le verre recuit. (09)

➤ Le verre trempé :

La résistance à la traction du verre trempé est environ 5 à 6 fois plus grande que le verre recuit et peut supporter des variations brusques de température pouvant atteindre 100°C.

➤ Le verre recuit :

Le verre recuit est utilisé pour la fabrication d'isolateurs rigides, mais présente cependant des inconvénients. Parmi ces inconvénients, nous citons le fait qu'il ne résiste pas aux variations brusques de température et qu'il ne supporte que des tensions mécaniques relativement faible et c'est pour cette raison qu'il n'est pas utilisé pour la fabrication des isolateurs de suspension.

I.2.6.1.3 Matériaux synthétiques :

Les isolateurs en matériaux synthétiques sont composés d'un centre en fibres de verre imprégnées d'une résinée et d'un revêtement à ailettes de type élastomère. Leurs avantages est qu'ils sont légers et présentent une grande résistance mécanique.

Ils sont de bonnes propriétés hydrophobes et peuvent être utilisés dans des conditions de pollution très sévères. (10)

L'inconvénient de ces isolateurs est le vieillissement sous l'effet des différentes contraintes auxquelles ils sont soumis (électriques, mécanique, atmosphériques...).

I.2.6.1.3.1 Silicone :

La silicone est une substance synthétique à base de silicium et d'oxygène formant une classe particulière de plastique. Les silicones, ou poly-siloxanes, sont des polymères inorganiques formés d'une chaîne silicium oxygène (...-Si-O-Si-O-Si-O-...) sur laquelle des groupes se fixent sur les atomes de silicium. Certains groupes organiques peuvent être utilisés pour relier entre elles plusieurs de ces chaînes Si-O. Le type le plus courant est le poly-diméthyl siloxane linéaire ou PDMS. Le silicium étant présent en proportion suffisante pour affecter les propriétés du produit de façon sensible. Les silicones sont des excellents isolants pour les applications hautes et moyenne tension en raison de leur structure moléculaire. Par exemple, les isolateurs en silicone recouverts d'une couche de pollution présentent une résistance aux courants de cheminement plus élevée que les modèles en porcelaine, en verre ou en EPDM. Les décharges électriques sont évitées même dans des conditions de pollution extrêmes. Mais leurs avantages ne se limitent pas aux isolateurs. Aujourd'hui, on utilise les silicones isolants dans toutes les applications MT et HT exigeant une haute sécurité de fonctionnement et une grande longévité, par exemple. Dans les transformateurs, sous forme d'huile, ou dans les extrémités de câbles haute tension. (10)

I.2.6.1.3.2 Propriétés du silicone :

Les silicones se distinguent par quelques propriétés fondamentales:(11)

- Liaison Si-O 'forte' et grande inertie chimique ;
- Bonne stabilité thermique (de -80 à +250°C) ;
- Bonne stabilité chimique et tenue au vieillissement naturel ;
- Propriétés modulables d'anti adhérence ou d'adhésion ;
- Bonne tenue au feu sans dégagement de fumées toxiques ;
- Isolation électrique ;
- Bonne tenue aux UV par rapport aux autres polymères ;
- Flexibilité à froid de la chaîne polymérique ;
- Faible dépendance des propriétés mécaniques (viscosité,...) ;
- Rigidité diélectrique 15kV/mm ;
- Permittivité relative à 25°C et de 5,4 ;
- Facteur de dissipation diélectrique à 25°C et 10kHz; $\text{tg}\delta=4.10^{-3}$ à 5.10^{-3} ;

- Conductivité thermique:0,41à 0,62W/m.K ;
- Température d'auto-inflammation est supérieure à300°C ;
- Masse volumique de2300 à 2800 kg/m³

I.2.6.1.3.3 Grandes familles de silicones :

Généralement on s'accorde à regrouper l'ensemble de ces produits en trois grandes familles: (12)

- Les fluides ;
- les résines ;
- les élastomères.

I.2.6.1.3.4 Propriété de la surface :

La géométrie spécifique et la surface préférablement non mouillante (hydrophobe) de ces isolateurs composites (silicone) leur confèrent une fiabilité en service supérieure à celle des isolateurs conventionnels lorsqu'ils sont en crassés .Une «surface mouillante» est une surface sur laquelle l'eau à tendance s'étendre, les deux extrêmes de cette propriété sont représentés sur une surface hydrophile (a) et une surface hydrophobe (b). (13)

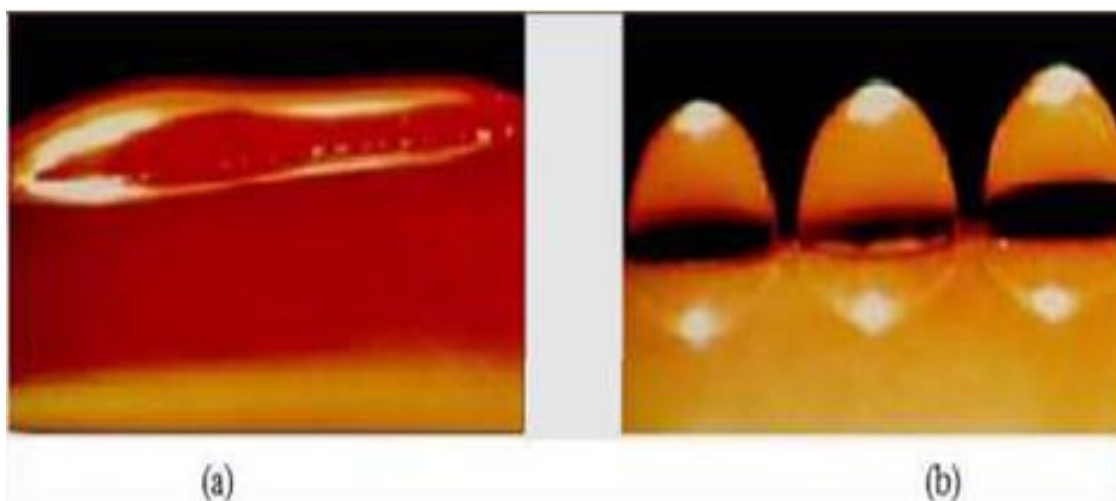


Figure I.8: Comportement d'une surface hydrophile et hydrophobe. (14)

I.2.6.1.3.4 Hydrophobicité :

Par rapport aux autres matériaux, les silicones se distinguent par un très haut pouvoir imperméabilisant à long terme, appelé hydrophobicité: l'eau ne pénètre pas dans les pièces d'isolation en élastomères silicones, mais perle à la surface même au bout de nombreuses années. Ils minimisent les courants de cheminement et évitent les décharges dues au contournement électrique, même si la surface est fortement polluée, car ils transmettent leurs propriétés hydrophobes à la couche de dépôts par transfert d'hydrophobie.

L'application d'un revêtement silicone à posteriori sur les isolateurs en verre ou en porcelaine permet d'obtenir le même effet et supprime les opérations de nettoyage difficiles jusqu'à, présent nécessaires. (10).



Figure I.9: Hydrophobicité d'une surface en silicone. (10)

I.2.6.1.3.5 Applications des élastomères silicones dans l'isolation électrique :

Les caoutchoucs silicones sont utilisés pour l'isolation des conducteurs et des câbles.

Ils servent à isoler divers composants haute tension (revêtement).

I.2.6.2 Pièces métalliques de liaison :

Les parties isolantes constitutives de l'isolateur sont reliées entre elles ou au support par des pièces métalliques, réalisées par des métaux qui doivent répondre aux contraintes mécaniques et thermiques appliquées à l'isolateur au cours de son exploitation.

De la qualité du scellement et des différents assemblages dépendent, en grande partie la sécurité d'exploitation et la durée de vie de l'isolateur. (10)

I.2.7 Choix des isolateurs :

Les isolateurs entrent pour un pourcentage très modeste de l'ordre de 7%, dans le prix d'une ligne aérienne. Cependant, ils sont un élément essentiel dont dépendent la sécurité d'exploitation, la qualité et la continuité de service. Les isolateurs les mieux adaptés à un environnement donné sont ceux qui retiennent le taux de dépôts polluant le moins élevé, c'est-à-dire les isolateurs qui possèdent les meilleures propriétés d'auto-nettoyage. Même bien choisie, une isolation n'est jamais à l'abri d'un incident. La sévérité de la pollution d'un site peut changer. L'apparition d'une nouvelle usine à proximité d'un poste, la construction d'un ouvrage routier voisin ou plus simplement, un événement météorologique exceptionnel peuvent augmenter, durablement ou temporairement, la pollution d'un site, alors qu'un poste ou une ligne y sont déjà en exploitation. Le dimensionnement initialement correct des isolateurs peut alors devenir insuffisant et il faut pouvoir protéger les installations existantes contre les nouvelles sources de pollution éventuelles. (3)

I.3 Pollution :

Le phénomène de pollution des isolateurs est un sujet d'actualité important; car il présente un sérieux problème pour l'exploitation des réseaux de transport et de distribution de l'énergie électrique. Une couche de pollution se forme sur les surfaces des isolateurs suite à une interaction entre l'air transportant des grains de poussières et ces dernières. Une fois cette couche est humidifiée, la tension de tenue diminue et provoque des incidents graves. Cela est dû à plusieurs facteurs dont les plus importants sont la nature de l'agent polluant, le profil de l'isolateur ainsi que les facteurs climatiques et météorologiques.(6)

I.3.1 Source de pollution :

Les divers types de pollution atmosphérique les plus fréquemment observés peuvent être regroupés selon leurs origines et classes comme suit :

I.3.1.1 Pollution naturelle :

La pollution naturelle provient:

- des sels marins dans les régions côtières ;
- des poussières du sol (notamment lors de chantiers importants) ;
- des sables véhiculés par le vent en régions désertiques.

I.3.1.2 Pollution marine :

Les installations situées en bord de mer sont exposées aux embruns portés par le vent et qui se déposent progressivement sur les isolateurs, formant une couche de pollution de sel qui devient conductrice lorsqu'elle est humidifiée par le brouillard ou simplement par condensation. Un courant de fuite s'établit alors à travers la couche superficielle et des arcs électriques peuvent prendre naissance.

I.3.1.3 Pollution désertique :

La pollution désertique est caractérisée surtout par les dépôts de sable se formant à la surface des isolateurs après les vents de sable. Une fois humidifiés, ces dépôts deviennent plus ou moins conducteurs (en fonction des concentrations en sels solubles qu'ils contiennent) et engendrent la circulation d'un courant de fuite qui apparaît brusquement et qui est suivi par l'apparition d'arcs partiels qui peuvent conduire au contournement total de l'isolateur.

I.3.1.4 Pollution industrielle :

Au voisinage de certaines zones industrielles, la pollution est engendrée par l'évacuation des fumées des usines (raffinerie, cimenterie, minerais etc.). La présence d'éléments conducteurs dans les couches, et/ou la dissolution des sels qu'elles contiennent engendrent la circulation d'un courant de fuite plus ou moins fort selon les concentrations des agents polluants. Les usines ne sont pas les seules responsables de ce genre de pollution ; les gaz d'échappement des véhicules et les engrais utilisés en agriculture contribuent aussi aux dépôts observés à la surface des isolateurs.

I.3.1.5 Pollution mixte :

Ce type de pollution est en fait le plus fréquent et le plus sévère pour l'exploitation des ouvrages électriques. La pollution mixte résulte de la combinaison entre les différents types de pollution, comme par exemple les pollutions marine et industrielle lorsque des installations industrielles sont situées en bord de mer. (3)

I.3.2 Classement de degré de pollution :

Niveau de pollution	Niveau d'isolement	Environnements caractéristiques	Ligne de fuite spécifique
I Faible	N1	Zone continentale -Faible densité d'habitations et sans industrie. -Faible densité d'industrie avec vent et pluie fréquents. -Régions agricoles et montagneuses.	16mm/KV
II Moyen	N2	Zone continentale -Industrie peu polluante et /ou de densité moyenne d'habitation. -Fort densité d'habitation et d'industrie mais avec pluie et vent fréquents.	20 mm/KV
III Fort	N3	Fort densité d'habitation et banlieues de grandes villes ; Zone bord de mer.	25 mm/KV
IV Très fort	N4	Fort concentration de poussière et/ ou de fumées industrielles ; exposition directe aux vents forts et polluants venant de la mer.	31 mm/KV
V Exceptionnel	N5	Forte pollution industrielle aggravée par pollution marine ; Forte pollution saharienne	35 mm/KV
	N6	Zones sahariennes exposées aux effets pollutions de l'industrie et des vents de sable et des vents venant de la mer.	40 mm/KV

Tableau I.1 Classement de degré de pollution. (14)

I.4 Contournement :

Le résultat extrême de phénomène de pollution des lignes aériennes est le contournement. En effet, une fois la couche de dépôt polluant est humidifiée, une circulation de courant de fuite prend naissance. Cette circulation de courant de fuite sur les surfaces des isolateurs provoque un échauffement de la couche polluante conductrice. Ceci entraîne des assèchements locaux de la couche et l'apparition d'arcs partiels. Dans les conditions les plus défavorables, ces arcs peuvent se développer et provoquent ainsi le contournement total des isolateurs et la mise hors tension de l'installation. (3)

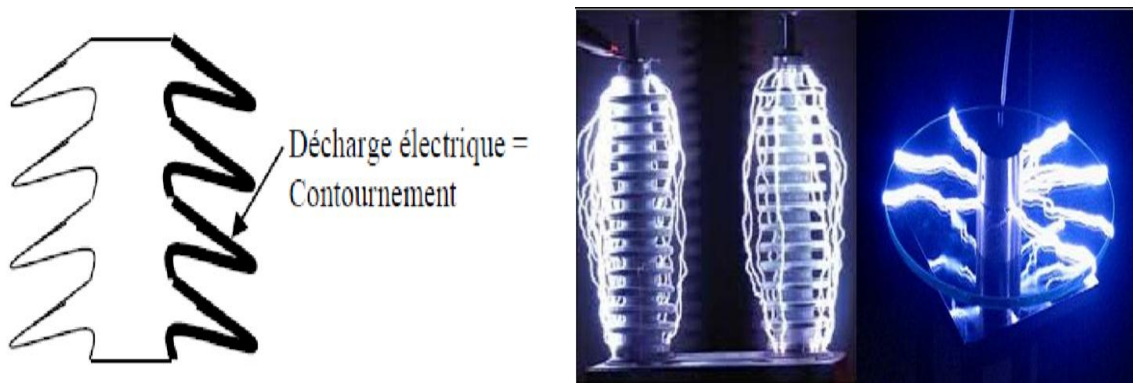


Figure I.10 : Décharge électrique (contournement).

I.4.1 Définition :

On dit que le contournement se produit sur la surface de l'isolateur lorsqu'une décharge électrique s'établit entre ses extrémités et contourne la surface de l'isolateur. Le contournement provoque l'ouverture du disjoncteur, car il établit un court-circuit entre le conducteur et le pylône (défaut monophasé à la terre). Le contournement cause habituellement l'interruption momentanée de l'écoulement de l'énergie dans le réseau. De telles interruptions, bien qu'étant nocives, peuvent être tolérées dans des endroits ruraux. Dans des secteurs urbains avec les industries de pointe (domaines pharmaceutiques, production de véhicules...) les interruptions ne sont pas acceptables parce qu'elles mènent à d'énormes pertes financières de production, de machines bloquées et des pertes de contrôle du cycle du processus. Par exemple, aux USA une interruption de 0,25 s dans une usine à papier peut provoquer des pertes de 100 000 dollars. (3)

I.4.2 Déroulement du contournement :

Phase 1 : dépôt des grains de pollution se déposent sur la surface de l'isolateur (Fig.a).

Phase 2 : formation d'un électrolyte conducteur à sec, la résistance superficielle reste élevée malgré le dépôt de pollution. Quand la couche de pollution devient humide (brouillard, humidité, rosée du matin, pluie fine...), elle se transforme en électrolyte conducteur et donne naissance à un courant de fuite superficiel circulant sur la surface de l'isolateur (Fig.b).

Phase 3 : formation d'une bande sèche dans les régions étroites de l'isolateur, où la densité de courant est élevée, une partie de l'électrolyte s'évapore et crée une bande sèche (Fig.c).

Phase 4 : contournement

Comme la résistance de la bande sèche est beaucoup plus grande par rapport au reste de l'électrolyte, pratiquement toute la tension aux bornes de l'isolateur est maintenant appliquée aux extrémités de cette zone. Il se produit alors un claquage dans la bande sèche : Soit la décharge ne s'éteint pas de contournement (Fig.d). Soit la décharge progresse sur la surface \Rightarrow contournement de l'isolateur (Fig.e).

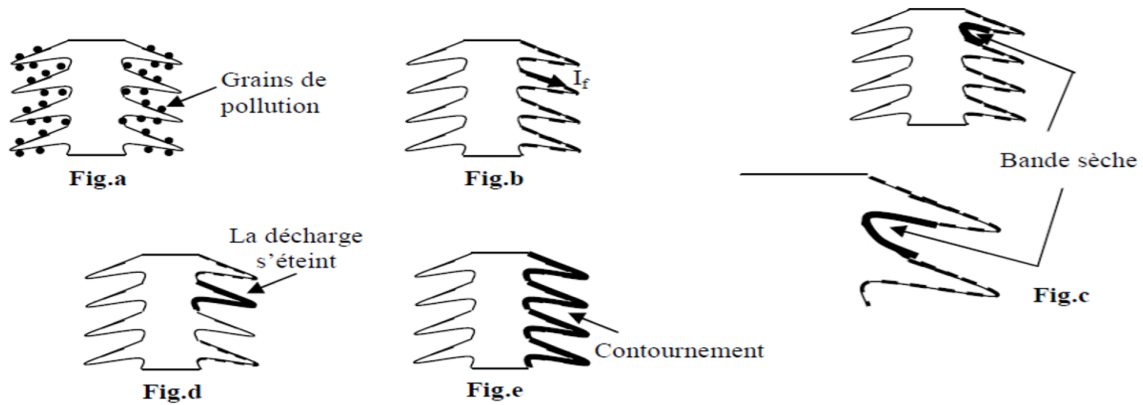


Figure I.11 : Déroulement de contournement.

I.5 Remèdes :

I.5.1 Allongement de la ligne de fuite :

Utiliser de longs isolateurs avec des lignes de fuite plus longues possibles (jusqu'à 10m pour les réseaux THT). Cette solution est très efficace et présente seulement des problèmes dans les régions à forte pollution.

I.5.2 Graissage :

Une graisse chimique spéciale, imperméable et possédante d'une grande résistance superficielle, est appliquée sur la surface de l'isolateur. Son rôle est d'absorber les grains de pollution qui se déposent sur l'isolateur pour garder la surface propre. Le traitement par la graisse permet de rendre l'eau accumulée à la surface dispersée en gouttes, par conséquent le courant de fuite diminue sensiblement. Le grand inconvénient des enduits de graisse est le temps court de l'intervalle d'application (en général moins de 1 à 2 ans) entre deux applications successives pour empêcher toute panne d'électricité par contournement. En outre, l'enlèvement de la graisse saturée est un travail long et fatigant comportant l'utilisation d'agents de nettoyage à sec et suivie par le lavage à l'eau. Si on laisse trop longtemps la graisse à la surface de l'isolateur elle se sature et peut mener à une rupture qui peut causer la détérioration de l'isolateur de porcelaine. En outre, dans certains pays

comme les Etats-Unis, l'utilisation de la graisse devient de plus en plus difficile à accepter pour la préservation de l'environnement.

Remarque :

Dans des conditions de décharge à long terme (sur une période longue), la surface de l'isolateur enduit de graisse peut perdre son hydrophobicité dans ces régions soumises aux décharges. Cette perte hydrophobe est habituellement provisoire, et l'isolateur récupérera son hydrophobicité si la surface est sèche pour quelques heures. Cela est dû à la nature dynamique du polymère silicone qui permet à des chaînes de polymère d'émigrer vers les parties vides et enduire de nouveau la surface.

I.5.3 Lavage périodique :

Les isolateurs placés dans des sites à grande pollution sont régulièrement lavés avec de l'eau distillée. Le lavage s'effectue avec un fusil à jet d'eau puissant, généralement au mois de Juin à cause de l'humidité. Actuellement les travaux de maintenance comme le lavage, s'effectuent sous tension (TST). Cependant, certains types de contaminants (par exemple, ciment, dépôts graisseux, certains engrais) qui adhèrent fortement à la surface de l'isolateur ne peuvent pas être facilement enlevés par un jet d'eau à haute pression. Dans ces cas-ci, le nettoyage est effectué en employant des agents abrasifs secs. La limitation principale de cette méthode est qu'elle nécessite un travail long et cher. En outre, il n'y a aucune méthode fiable autre que l'expérience humaine de service pour déterminer quand le nettoyage de l'isolateur est nécessaire. Une attention particulière devrait être exercée pour le lavage des isolateurs composites parce que tous les matériaux ne peuvent être lavés à haute pression d'eau.

I.5.4 Anneaux de garde :

L'utilisation des anneaux de garde sur les chaînes d'isolateurs à leur extrémité est un moyen communément pratiqué pour réduire l'effet couronne. Quand les isolateurs composites sont employés, l'utilisation des anneaux de garde aux extrémités des isolateurs est une pratique courante pour des tensions au-dessus de 230 KV. (3)

I.6 Conclusion :

Dans ce chapitre introductif, une synthèse des différents aspects des phénomènes de pollutions est présentée. Les principales conclusions que l'on peut tirer de cette synthèse sont: La pollution reste un facteur déterminant pour le dimensionnement des isolateurs dans les ouvrages de haute tension. La connaissance de degré de pollution est une condition indispensable, pour prévoir une isolation externe convenable. La nature et la sévérité de pollution dépendent, en grande partie, de la localisation géographique et de l'industrialisation du site. La meilleure définition de degré de pollution d'un site est d'obtenir la salinité équivalente du site. Les techniques de lutte contre la pollution actuellement connues (graissage, lavage, nouveau type d'isolateurs, revêtements hydrophobes) permettent de disposer aujourd'hui de solutions curatives à la plupart des problèmes de pollution rencontrés par les exploitants sur le réseau.

CHAPITRE II

Méthode des éléments finies "Logiciel COMSOL"

II.1 Introduction :

L'objectif principal de cette simulation est de déterminer la résistance résiduelle de la couche de pollution lors de propagation de la décharge électrique. L'utilisation d'une méthode numérique par l'intermédiaire d'un logiciel (COMSOL) s'est avérée être une des meilleures solutions compte tenu de la difficulté des mesures expérimentales. À cet effet, la méthode des Éléments Finis était la mieux adaptée aux contraintes imposées par le problème. De plus, cette méthode numérique avait été appliquée avec succès dans le calcul du potentiel et du champ électrique autour des isolateurs.

II.2 Définitions de la méthode des éléments finis:

La méthode des éléments finis est une procédure numérique pour analyser les structures et les milieux continue. Habituellement le problème adressé est compliqué à résoudre d'une manière satisfaisante par des méthodes analytiques classiques.

Le problème peut concerner des analyses des contraintes, la conduction de la chaleur, ou n'importe lequel de plusieurs autres secteurs.

Le procédé de la méthode des éléments finis produit beaucoup d'équations algébriques simultanées, qui sont produites et résolues sur un ordinateur numérique.

Les calculs des éléments finis sont exécutés sur l'ordinateur personnel. Cependant, les erreurs ont diminué en traitant plus d'équations. Et les résultats assez précis pour la technologie sont parcourables à un coût raisonnable.

La méthode des éléments finis a commencé comme méthode d'analyse des contraintes. Aujourd'hui les éléments finis sont également employés pour analyser des problèmes du transfert thermique, champs de lubrification de flux de fluide, électriques et magnétiques et beaucoup d'autres. Les problèmes qui étaient précédemment tout à fait insurmontables sont maintenant résolus par habitude. Les procédures des éléments finies sont employées dans la conception des bâtiments, des moteurs de chaleur de moteurs électriques, des fuselages des bateaux et du vaisseau spatial. (15)

II.3 Historique :

Les bases théoriques de la MEF reposent d'une part sur la mécanique des structures de la formulation énergétique et d'autre part sur les méthodes d'approximations. La MEF est mise au point en 1953 chez Boeing (Seattle, USA, calcul des structures d'ailes d'avion) ; On y développe le premier élément fini, sa matrice de rigidité, l'assemblage et la résolution

par la méthode des déplacements (publié par Turner, Clough, Martin et Topp en 1956). (16) Quant aux bases théoriques générales, alliant l'analyse des structures en barres et poutres avec celle des solides, elles sont étudiées de 1954 à 1960 (Argyris, Kelsey).(17) certaines idées apparurent auparavant, en particulier chez les mathématiciens pour résoudre divers problèmes aux limites par exemple celui de la torsion de Saint Venant en divisant la section en triangles, mais elles restèrent sans suite.

L'expression élément finie a été inventée par Clough en 1960. Années 60, la MEF s'attaque à tous les domaines du calcul de structures. Des programmes on trouve, la MEF, principalement dans le domaine de la mécanique des solides et des structures. Ont été conçus pour être exécutés sur de gros ordinateurs tels que : ABAQUS, SAP2000, CATIA, FORTRAN, etc. La crédibilité des résultats obtenus va permettre l'utilisation de la méthode des éléments finis par des entreprises et des bureaux d'études de taille réduite. C'est évidemment l'apparition d'ordinateurs puissants qui a permis le développement de la simulation numérique. Le rythme d'évolution de l'informatique est actuellement gigantesque et les possibilités d'application augmentent sans cesse.

II.4 Avantages et inconvénients de la MEF:

Toutes les méthodes permettant de résoudre des problèmes aux limites de manière approximative (séries, différences finies,.....), la méthode des éléments finis présente de tels avantages qu'elle est la plus utilisée (parfois même exagérément), sauf cas particuliers.

II.4.1 Avantages de la MEF :

- La puissance de la méthode des éléments finis réside essentiellement dans sa généralité et sa souplesse. Elle peut être applicable à une variété de problèmes mécanique ou bien physiques. La géométrie du domaine peut être quelconque, les forces et les conditions aux limites peuvent être aussi de nature quelconque.
- Le maillage peut combiner autant de types d'éléments que l'on souhaite. Et toute cette généralité est contenue dans un programme unique qu'on peut faire tourner sur un ordinateur (sélection du type de problème, de la géométrie, du type d'élément, des chargements et des conditions aux limites).
- La méthode des éléments finis réside dans le fait que le modèle qu'elle utilise est très proche de la structure réelle.

II.4.2 Inconvénients de la MEF :

- La méthode des éléments finis a néanmoins quelques inconvénients. Elle donne un résultat numérique particulier pour un problème spécifique. Elle ne fournit aucune forme de solution susceptible de permettre une étude analytique de l'effet d'un changement de paramètre par exemple.
- Un ordinateur, un programme fiable et une utilisation intelligente sont nécessaires.
- Les programmes généraux de calcul doivent être fortement documentés.
- L'expérience et le bon sens de l'ingénieur sont indispensables à la définition d'un bon modèle. (16), (18)

II.5 Etapes de la méthode des éléments finis:

Les principales étapes de construction d'un modèle éléments finis, qui sont détaillées par la suite, sont les suivantes : (19)

- Discrétisation du milieu continu en sous domaines. (Figure II.17)
- Construction de l'approximation nodale par sous domaine.
- Calcul des matrices élémentaires correspondant à la forme intégrale du problème.
- Assemblage des matrices élémentaires.
- Prise en compte des conditions aux limites.
- Résolution du système d'équations.

II.6 Caractéristiques d'un élément fini:

II.6.1 Les nœuds géométriques :

Nous choisissons un ensemble de n points, sur le domaine V , qui servira à définir la géométrie des éléments. Ces points, appelés les nœuds géométriques, Elle coïncider éventuellement avec les nœuds d'interpolation. Puis nous remplaçons le domaine V par un ensemble de domaines V_e de formes relativement simples (voir figure II.1).(20)

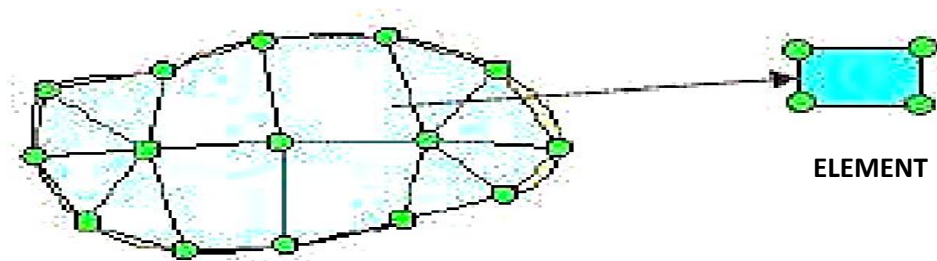


Figure II.1 : Domaine discrétisé par sous domaine. (20)

II.6.2 Attributs d'un élément fini :

Eléments finis permet d'isoler un de ces éléments pour l'étudier et établir les caractéristique l'identification d'un élément fini comprend les points suivants :

- **Géométrie** : un élément fini peut être un segment de droite ou de courbe, triangulaire ou quadrilatère (plan ou courbe), tétraèdre, prismes ou hexaèdre (brique). Les frontières entre les éléments peuvent être respectivement des points, des segments de droite ou de courbe, des faces planes ou courbes.
- **Matériau** : le matériau de l'élément est défini par une loi de comportement (loi de Hooke isotrope...etc.).
- **Nœuds** : les nœuds définissent la géométrie et assurent la connectivité des éléments les uns aux autres, ils occupent les sommets, les milieux des arêtes et faces, selon le type de l'élément et la théorie adaptée.
- **Degrés de liberté** : la fonction d'approximation (ex : le champ de déplacements) est exprimée en fonction des valeurs particulières qu'elles prennent aux nœuds, valeur qui deviennent les inconnues nodales. L'union, par leurs degrés de nodaux communs des différents éléments adjacents, permet de reconstituer la solution complète (assemblage) tout en veillant à respecter certaines règles, dites critères de convergence.
- **Forces nodales** : à travers les nœuds transitent des forces associées aux degrés de liberté. Elles sont dues aux charges appliquées à l'élément (poids propre, charge uniforme, température....etc.). Ces paramètres d'identification permettent de construire les deux caractéristiques clés d'un élément fini qui sont sa matrice de rigidité et son vecteur force.

II.6.3 Type des éléments finis:

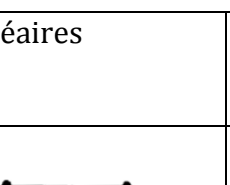
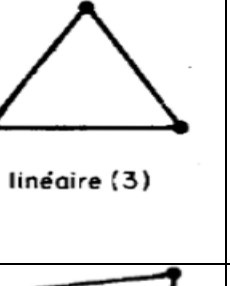
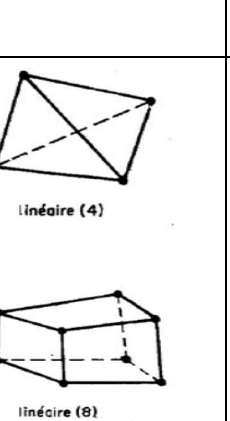
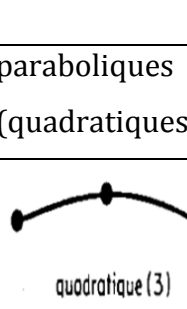
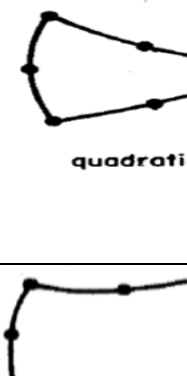
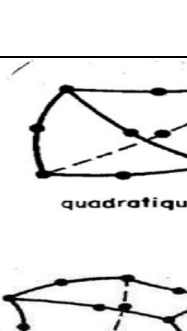
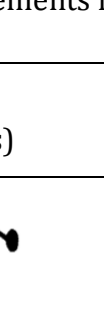
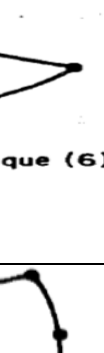

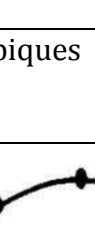








La sélection de l'élément sera fonction du type de problème à résoudre, généralement. Ils sont groupés en quatre classes :

- 1- Les déplacements et les déformations planes.
- 2- La flexion des plaques.
- 3- Les coques.
- 4- L'analyse des solides (3D).

Nous distinguons trois familles correspondantes à des différents type d'éléments finis à une, deux, trois dimension :

- **Les éléments unidimensionnels (1D)** : barres, poutres rectilignes ou courbes utilisées de façon individuelle ou associées à des plaques pour modéliser les raidisseurs dans un voile.
- **Les éléments bidimensionnels (2D)** : élasticité plane (déformation ont contraint) on plaque en flexion, coques courbes, de forme triangulaire ou quadrangulaire.
- **Les éléments tridimensionnels (3D)** : éléments de volume ou coques épaisses.
- **Les éléments axisymétriques** : qui constituent une classe bien particulière : toutes à section triangulaire ou quadrangulaire, coques conique ou méridienne courbe, (éléments de volume ou coques épaisses). (21)

Tableau II.1 : les types d'éléments finis (19)

Eléments	Linéaires	paraboliques (quadratiques)	cubiques
Unidimensionnels	 linéaire (2)	 quadratique (3)	 cubique (4)
Bidimensionnels Triangulaires	 linéaire (3)	 quadratique (6)	 cubique (9)
Bidimensionnels quadrilatéraux	 linéaire (4)	 quadratique (8)	 cubique (12)
Tridimensionnel Tétraédriques et hexaédriques	 linéaire (4)	 quadratique (10)	 cubique (16)
	 linéaire (8)	 quadratique (20)	 cubique (32)
Autres types	 Masse	 Ressort	 Contact

II.6.4 Choix des éléments finis:

Les éléments doivent s'adapter à la nature du problème à traiter, c'est-à-dire respecter les hypothèses et se conformer aux caractéristiques de la modélisation. Certains programmes offrent un choix très vaste, d'autres très limité. Il convient donc de passer en revue les particularités essentielles des éléments disponibles : (22)

- Modèle (déplacement, équilibre, mixte, ...)
- Convergence (critères et taux)
- Degré (des divers champs)
- Nœuds, et inconnues aux divers noeuds
- Compatibilité des éléments les uns avec les autres
- Performances et limitations.

II.6.5 Qualité d'un élément fini :

Un bon élément fini doit réunir les propriétés suivantes : (22)

- Aucun défaut de base (mécanisme...)
- Convergence rapide
- Bonne précision, déjà dans un maillage grossier
- Qualités de convergence et précision conservée pour une distorsion raisonnable
- Vecteurs forces consistants
- Souplesse d'emploi
- Connexion (conforme) possible avec d'autres modèles
- Dérivation théorique simple et claire
- Programmation efficace et limpide.

II.7 Principes de la MEF:

- La MEF est basée sur une idée simple : subdiviser (discrétiser) une forme complexe en un grand nombre de sous domaines élémentaires de forme géométrique simple (éléments finis) interconnectés en des points appelés nœuds.
- Nous considérons le comportement mécanique de chaque élément séparément, puis nous assemblons ces éléments de telle façon que l'équilibre des forces et la compatibilité des déplacements soient satisfaits en chaque nœud.
- La MEF utilise des approximations simples des variables inconnues dans chaque élément pour transformer les équations aux dérivées partielles en équations algébrique.

- Les nœuds et les éléments n'ont pas forcément de signification physique particulière, mais sont basés sur des considérations de précision de l'approximation.
(19)

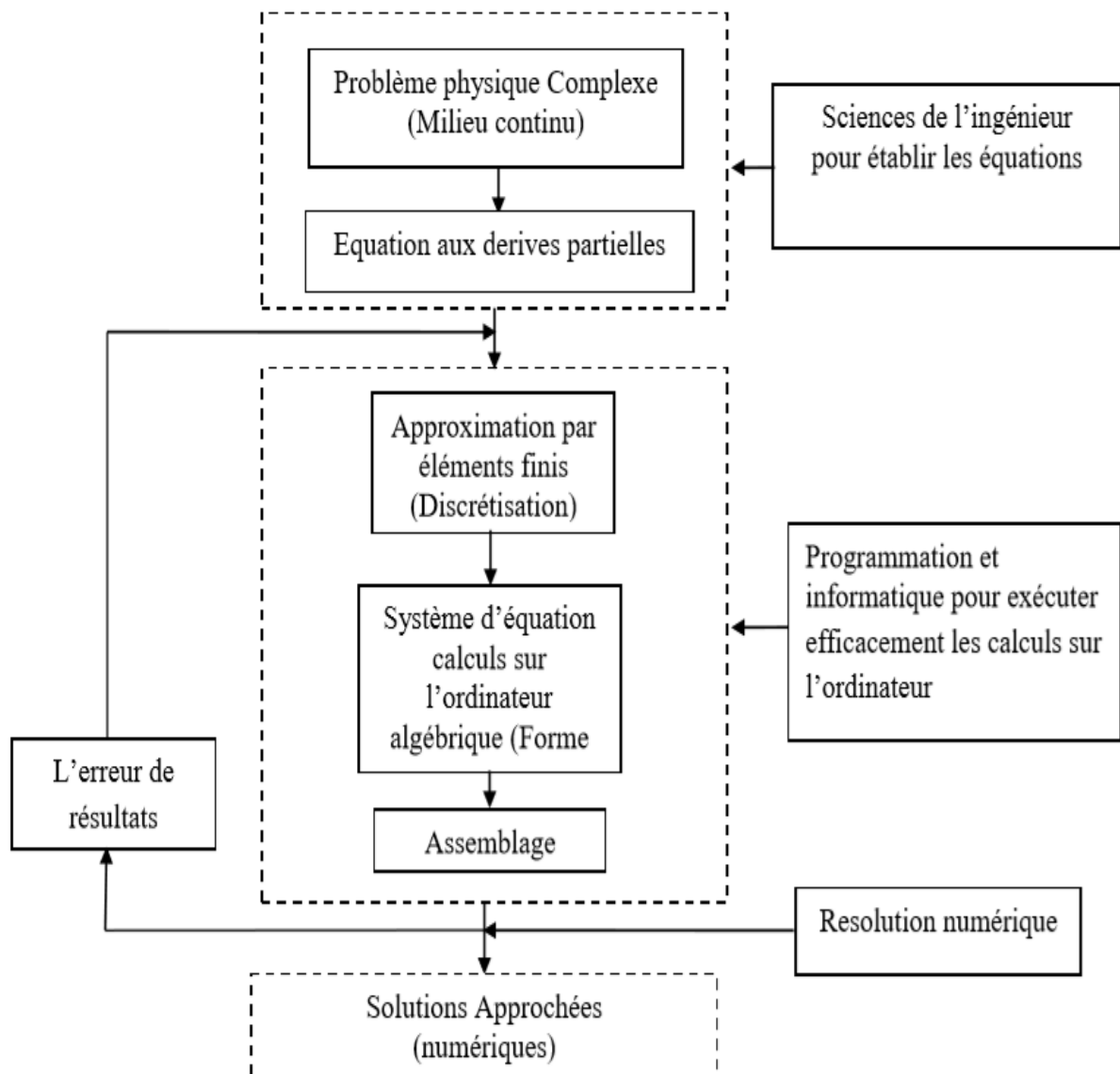


Figure II.2 : Principe d'analyse par la MEF. (19)

II.8 Différents types de modèles d'un EF:

Le plus souvent, le champ interpolé est celui des déplacements, et il est rarement celui des déformations ou des contraintes. Ces interpolations portent sur tout l'élément ou une partie de celui-ci, à l'intérieur ou à la frontière. On peut créer divers types, dits « modèles » d'éléments finis selon la combinaison choisie comme :

II.8.1 Modèle déplacement :

Ce modèle est le plus populaire, le plus connu et le plus développé. Dans cette catégorie, les éléments finis sont basés sur une interpolation du champ des déplacements, étendu à tout l'élément. Alors, les déplacements sont déterminés de manière détaillée et unique dans la structure, donc les contraintes ne peuvent être connues que par certaines moyennes et ne sont pas continués aux frontières. (23)

II.8.2 Modèle équilibre ou contrainte :

Contrairement au précédent, un tel élément est construit à partir d'une approximation du seul champ des contraintes. La connaissance des contraintes est alors détaillée, celle des déplacements est par contre sommaires.

Ce modèle est rarement employé en pratique car, il conduit en général à qualité égale à un plus grand nombre d'inconnues que le modèle déplacement. (23)

II.8.3 Modèle mixte :

Ce modèle est basé sur des approximations indépendantes des divers champs inconnus (déplacements, déformations, contraintes), étendues à tout l'élément. En général, les paramètres inconnus des champs de ce modèle sont conservés comme degrés de liberté. La mise au point peut être longue et coûteuse, mais les éléments peuvent être d'excellente qualité.

Parfois le modèle mixte est utilisé pour corriger certains défauts du modèle déplacement, par exemple pour améliorer la précision au niveau des contraintes on interpole certaines composantes internes de la déformation, les paramètres correspondants peuvent alors être éliminés par condensation, de telle sorte que l'élément reprend l'aspect d'un modèle déplacement. (23)

II.8.4 Modèle hybride :

Ce modèle est basé sur deux interpolations a priori indépendantes, l'une portant sur un champ à l'intérieur de l'élément, l'autre sur un champ touchant la seule frontière. Le critère variationnel utilisé est une variante de l'énergie potentielle complémentaire. Le modèle hybride fournit d'ordinaire de meilleurs résultats que le modèle déplacement, surtout au niveau des contraintes. (23)

II.8.5 Modèle en déformation :

Ce modèle présente une approximation qui se fait sur le champ de déformation, puis on intègre pour retrouver le champ de déplacement de telle sorte que les équations d'équilibres et de compatibilité soient satisfaites à l'intérieur de l'élément. (23)

II.9 Concept de la MEF:

Le concept de base de la méthode des éléments finis est la subdivision du modèle mathématique à des composants disjoints de géométrie simple appelés (Éléments finis), le comportement de chaque élément est exprimé en terme d'un nombre fini de degrés de liberté, le comportement (réponse) du modèle mathématique est considéré, approximativement, celui du modèle discret obtenu par connexion ou assemblage des éléments. (24)

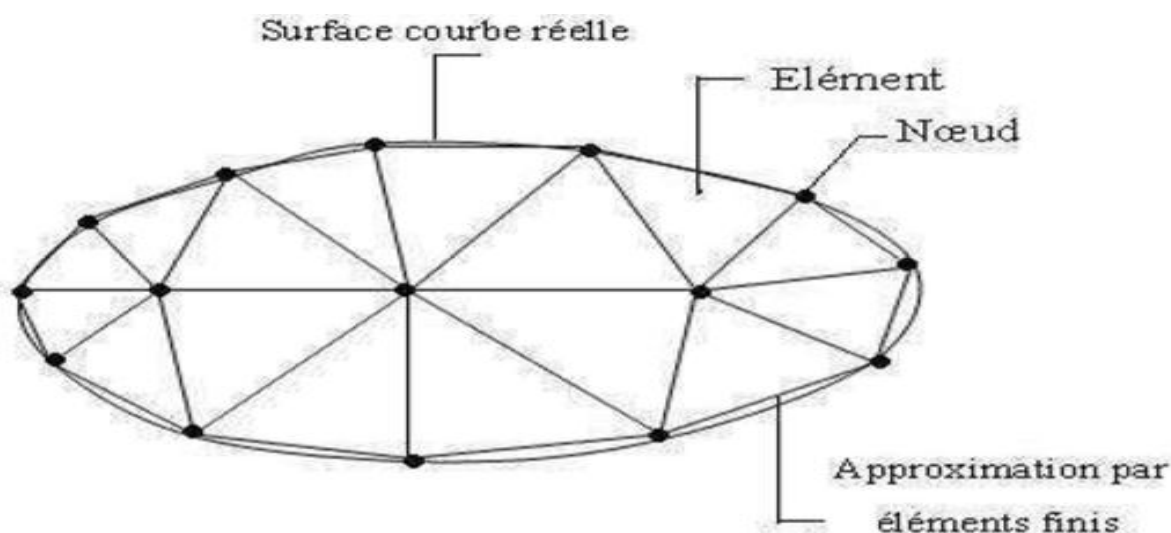


Figure II.3 : Maillage du domaine en triangles à trois nœuds. (24)

II.10 Domaines d'application de la MEF:

Modélisation des structures. (25)

- Analyse linéaire (statique et dynamique).
- Analyse non linéaire (grands déplacements et rotations, grandes déformations, contact et frottement, flambage, ...).
- Mise en forme des matériaux thermique (en régime permanent et transitoire,...).
- Mécanique des fluides.
- Electromagnétisme.
- Dynamique rapide (choc, impact, crash).
- Optimisation des structures.

II.11 Utilisation d'un Logiciel élément fini:

Un programme général de type industriel doit être capable de résoudre des problèmes variés de grandes tailles (de mille à quelques centaines de milliers de variables). Ces programmes complexes nécessitent un travail d'approche non négligeable avant d'espérer pouvoir traiter un problème réel de façon correcte. Citons à titre d'exemple quelques noms de logiciels: NASTRAN, ANSYS, ADINA, ABAQUS, CASTEM 2000, CESAR, FORTRAN , etc. ... Les possibilités offertes par de tels programmes sont nombreuses :

- Analyse linéaire ou non d'un système physique continu.
- Analyse statique ou dynamique.
- Prise en compte de lois de comportement complexes.
- Prise en compte de phénomènes divers (élasticité, thermiques, électromagnétiques, de plasticité, d'écoulement, etc. ...) pouvant être couplés.
- Problèmes d'optimisation.
- Ils ne cessent de se développer !

L'utilisation de tels programmes nécessite une formation de base minimum, suivie d'applications pratiques sur des problèmes simples. Voyons tout d'abord comment se déroule une étude basée sur l'utilisation d'un logiciel éléments finis. (19)

II.12 Étapes logiques du calcul par éléments finis:

- Définir les nœuds et les propriétés des éléments (Créer le maillage) :
- Pour chaque élément, établir la matrice de rigidité élémentaire $[K_e]$
- Reliant les degrés de libertés (déplacements) nodaux $\{U\}$ et les forces $\{F_e\}$ appliquées aux nœuds : $[K_e] \{U_e\} = \{F_e\}$
- Assembler les matrices et les vecteurs élémentaires en un système global.
- $[K] \{U\} = \{F\}$ de manière à satisfaire les conditions d'équilibre aux nœuds.
- Modifier le système global en tenant compte des conditions aux Limites.
- Résoudre le système $[K] \{U\} = \{F\}$ et obtenir les déplacements $\{U\}$ aux nœuds.
- Calculer les gradients (flux de chaleur, déformations et contraintes) dans les éléments et les réactions aux nœuds sur lesquels les conditions aux limites sont imposées.

Utilisation d'un logiciel éléments finis un programme général de type industriel doit être capable de résoudre des problèmes variés de grandes tailles (de mille à quelques centaines de milliers de variables). Ces programmes complexes nécessitent un travail d'approche non

négligeable avant d’espérer pouvoir traiter un problème réel de façon correcte. Citons à titre d’exemple quelques noms de logiciels : NASTRAN, ANSYS, ADINA, ABAQUS, CASTEM 2000, CESAR, SAMCEF, etc. et dans notre cas en utilisant logiciel COMSOL. Les possibilités offertes par de tels programmes sont nombreuses : (26)

- Analyse linéaire ou non d’un système physique continu;
- Analyse statique ou dynamique ;
- Prise en compte de lois de comportement complexes ;
- Prise en compte de phénomènes divers (élasticité, thermiques, électromagnétiques, de plasticité, d’écoulement. . .) pouvant être couplés ;
- Problèmes d’optimisation, etc.
- L’utilisation de tels programmes nécessite une formation de base minimale.

II.13 Description du logiciel « COMSOL Multyphysics »:

La simulation numérique est une approche donnant la possibilité aux chercheurs d'analyser le comportement de plusieurs phénomènes qui, par leur complexité, échappent au calcul classique. La modélisation, quant à elle, est la mise en équations de ces phénomènes. Vue la large gamme de problèmes scientifiques basés sur des équations aux dérivées partielles, COMSOL Multyphysics® peut servir d'une manière puissante et interactive à les résoudre en se fondant sur la méthode des éléments finis ou encore interagir avec des logiciels de programmation tels que Matlab. (27)

COMSOL Multyphysics est un outil très employé dans des secteurs divers de recherche, car il facilite amplement les étapes de modélisation et de simulation, soit : la définition de la géométrie, des propriétés physiques des matériaux présents et des conditions aux frontières, le maillage, la résolution et l'affichage des résultats. Par ailleurs, le logiciel ne demande pas de connaissances approfondies dans les mathématiques ou les analyses numériques. En effet, toutes les équations nécessaires à la résolution sont déjà prédéfinies, il suffit alors de préciser dans quel domaine (électromagnétisme, transfert de chaleur, acoustique...) et dans quel régime (stationnaire, temporel...) le modèle doit être construit selon ce choix, la modélisation est disponible en 1D, 2D, 2D axisymétrique ou encore en 3D. (28)

À propos de cette étude, le logiciel COMSOL Multyphysics a été retenu pour modéliser la couche conductrice recouvrant l'isolateur. En sélectionnant l'option 'Module Electric Currents' pour construire une géométrie surfacique et spécifier les conditions aux

limites et les propriétés physiques de couche de pollution, COMSOL procède à l'exécution des étapes résumées dans la section précédente.

Ce programme, il est basé sur le modèle mathématique à l'aide des équations de Maxwell suivant :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = Q_j \quad \text{II.1}$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} + \vec{j}_e \quad \text{II.2}$$

$$\vec{E} = -\vec{\nabla} \cdot V \quad \text{II.3}$$

II.14 L'interface graphique de COMSOL :

Au démarrage du logiciel, le navigateur de modèle apparaît. C'est lui que permettra de spécifier le ou les modèles physique qui seront utilisés. C'est aussi ici que la dimension de l'espace est choisie. Pour chacun des modèles, il est précisé quelles sont les variables propres à ce modèle. (Figure II.4)



Figure II.4 : Fenêtre de «select model »

Après on choisit « select space » pour préciser les dimensions du travail (0D, 1D ,1D axisymétrique, 2D, 2D axisymétrique ou encore en 3D).

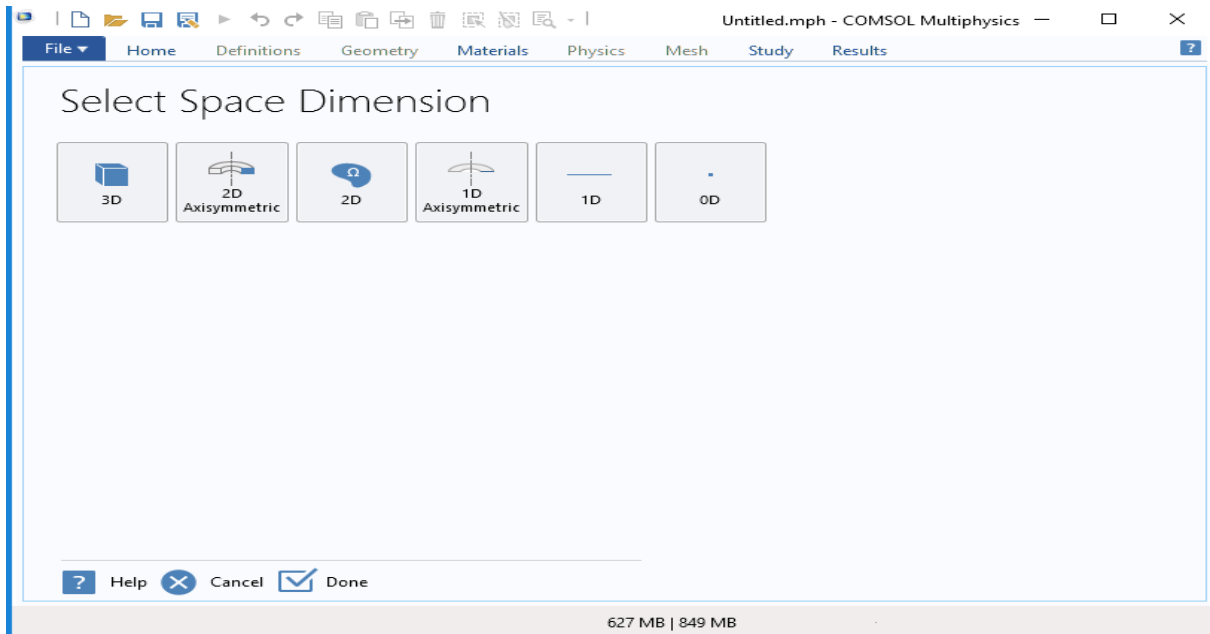


Figure II.5 : Fenêtre de « SELECT SPACE »

Dans cette étape, on choisit le type de champs physique du modèle (PHYSICS). Pour notre cas on choisi « ELECTRIC CURRENT » (figure II.6)

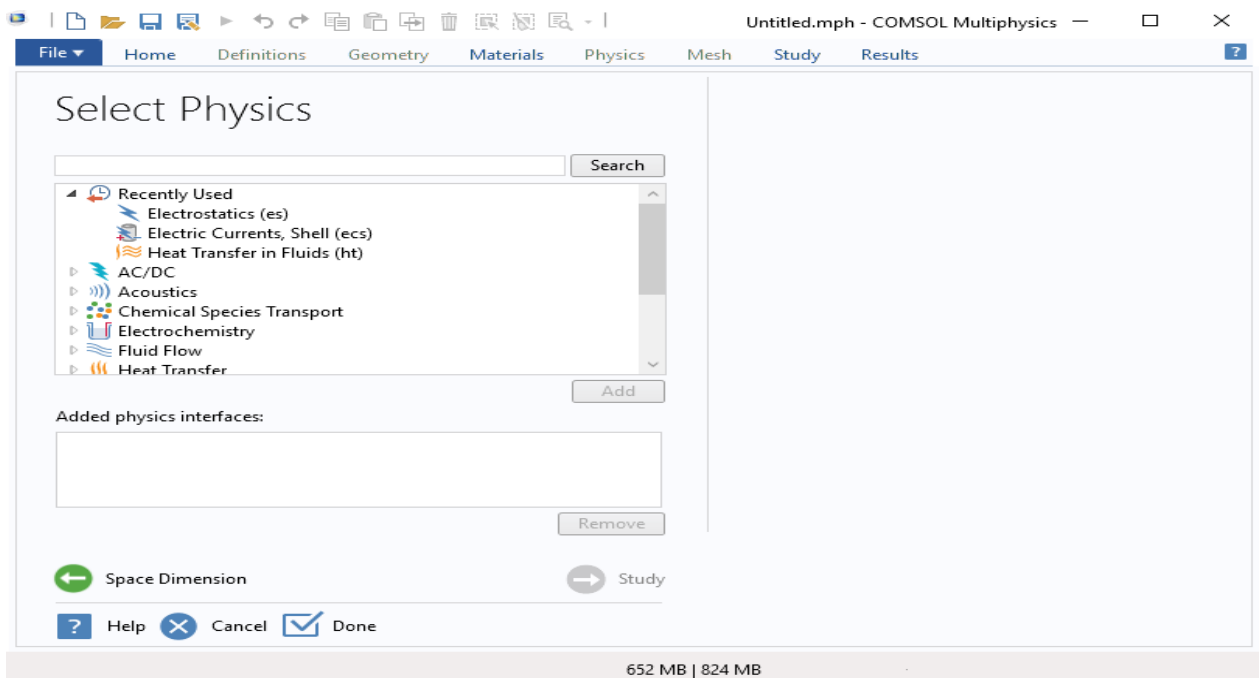


Figure II.6 : Fenêtre de « ADD PHYSICS(MODEL) »

La prochaine étape est de sélectionner le type d'étude qu'on doit appliquer « SELECT STUDY TYPE ». Dans cette étude on choisi le type « STATIONARY ».

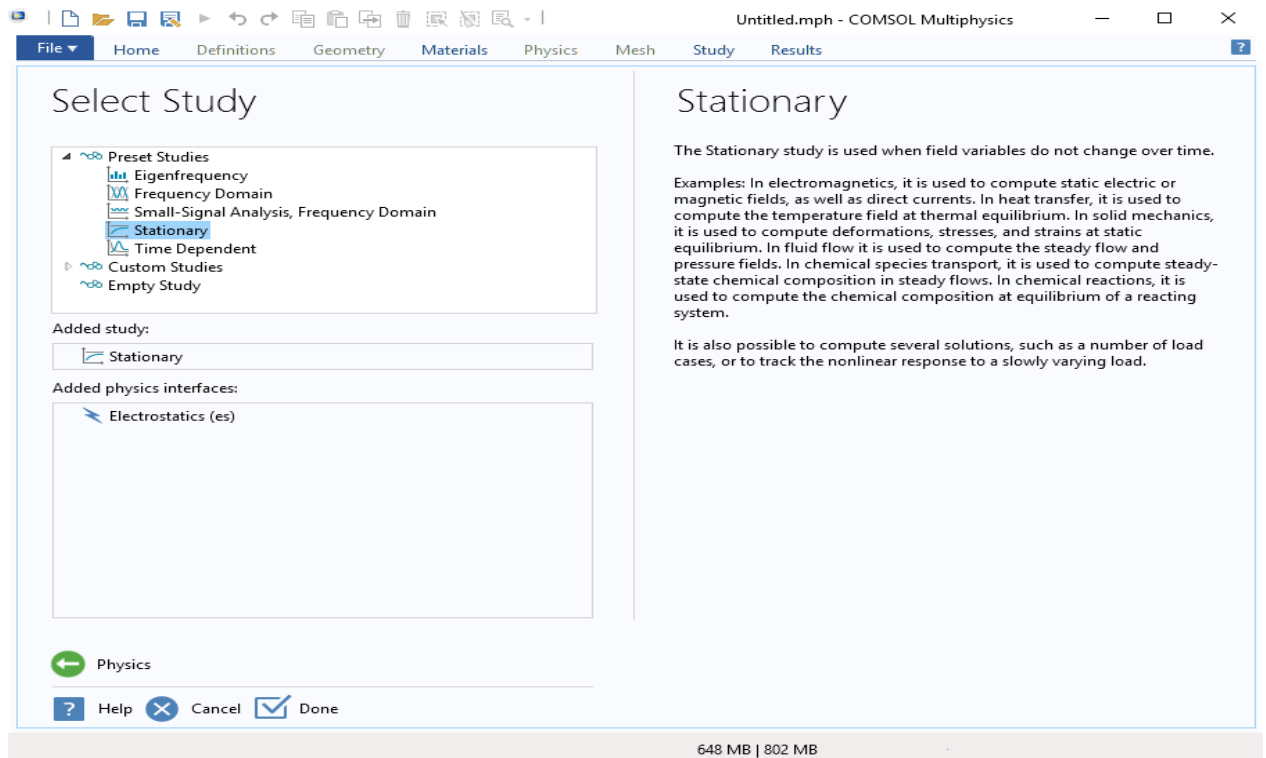


Figure II.7: Fenêtre « SELECT STUDY TYPE ».

Ensuite, on dessine la géométrie de l'élément à simuler à travers des outils de la rubrique « GEOMETRY ». Pour cela, on définit d'abord les unités de mesure (m, cm, mm ...), puis on construit la forme du modèle à partir de formes simples déjà disponibles (rectangle, cercle...) ou bien importer la forme d'un autre logiciel de dessin.

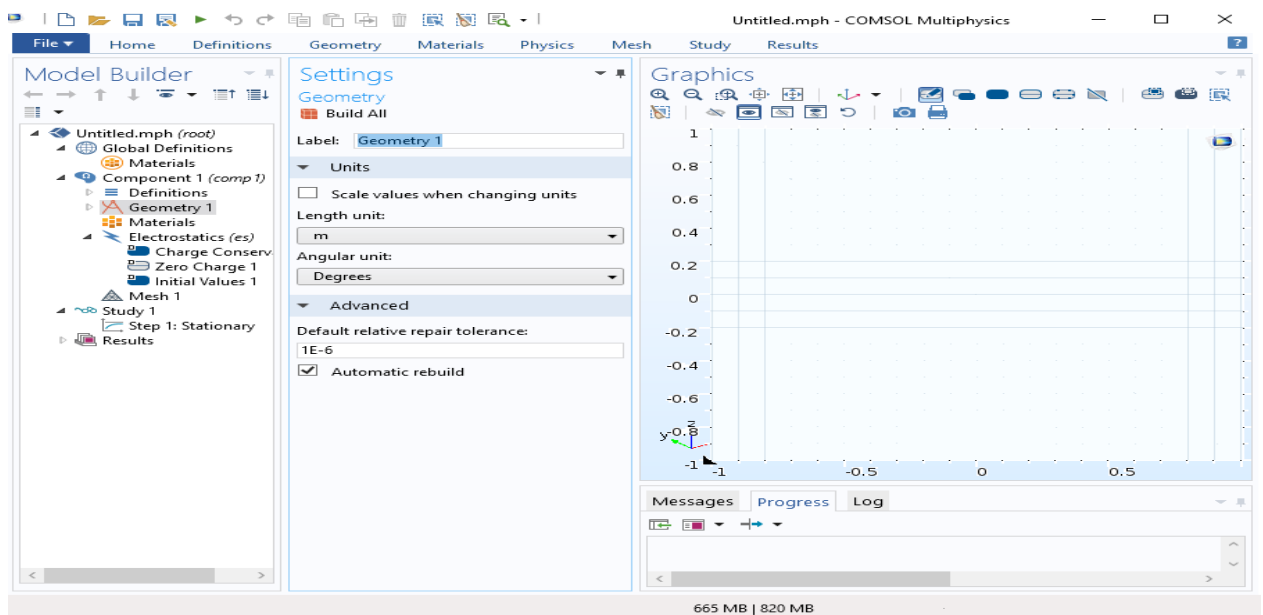


Figure II.8: Géomètre exemple de l'équivalent de l'isolateur.

ar la suite, on définit les matériaux utilisés dans chaque domaine du modèle. Dans notre étude il y a trois différents types de matériels (silicone, quartz, cuivre...)

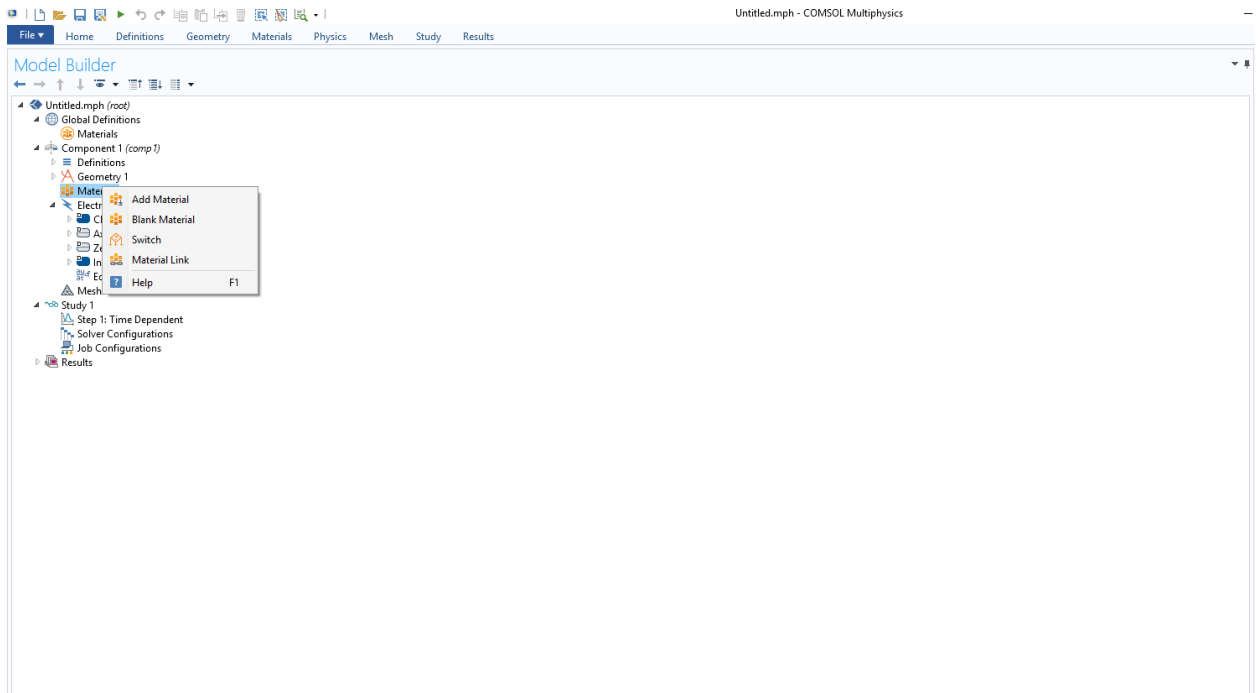


Figure II.9 : Choix les matériaux utilisés.

Après, on sélectionne le type de champs physique à utiliser « ELECTROSTATICS».

Dans ce cas on doit préciser l'emplacement de la mise à terre 'GROUND' et la borne haute tension« TERMINAL» où la tension est appliquée.

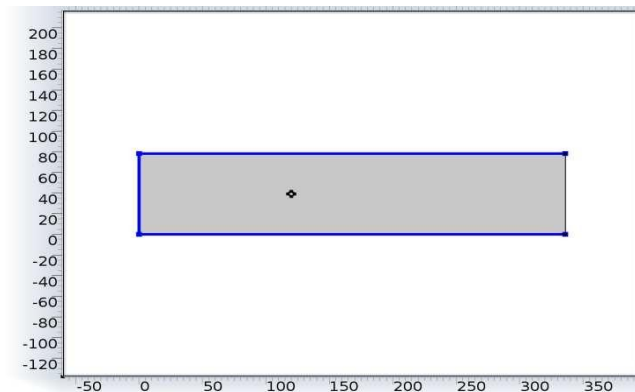


Figure II.10: Détermination des physiques.

➤ **Le maillage (mesh):**

COMSOL propose un maillage adéquat qui est plus dense autour des formes de petite dimension et un maillage moins dense ailleurs .Les dimensions de maillage peuvent aussi être modifiées manuellement selon le choix de l'utilisateur.

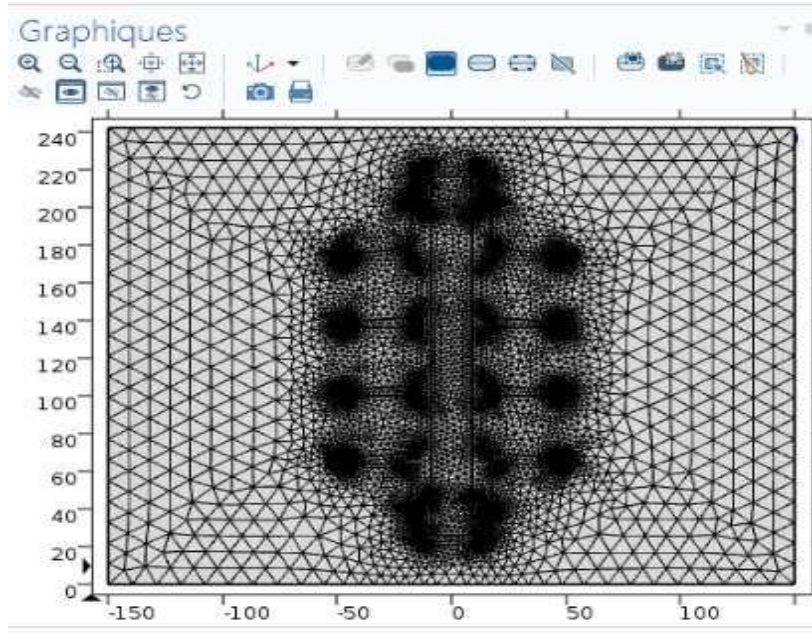


Figure II.11: Maillage.

➤ **Résolution et visualisation des résultats:**

Cette dernière étape lance le programme de calcul des propriétés physiques recherchés dans tous les points du maillage .Les résultats sont affichés comme illustré dans la figure II.12.

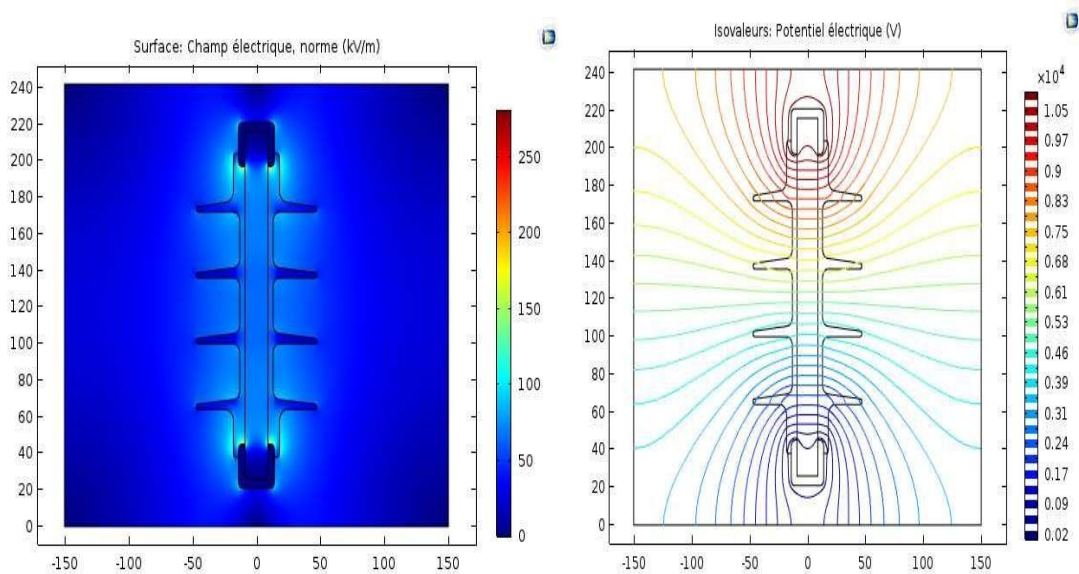


Figure II.12: Résultats de simulation.

II.15 Conclusion

La détermination de la distribution du champ et du potentiel électriques de tout système de haute tension, est un problème de calcul complexe. Pour remédier à ce problème, la méthode des Eléments Finis était la mieux adaptée aux contraintes imposées par le problème.

Le logiciel COMSOL Multiphysics peut servir d'une manière puissante et interactive à les résoudre en se fondant sur la méthode des éléments finis.

La modélisation et la simulation d'un isolateur peuvent se résumer en cinq étapes successives suivantes:

- La première étape consiste à définir la géométrie entière de modèle l'isolateur par l'intermédiaire d'une interface graphique de conception.
- Dans la deuxième étape on définit les conditions aux limites qui se traduisent par le potentiel imposé sur chaque électrode et déterminer les frontières de l'isolation électrique c'est-à-dire les frontières où le champ électrique peut être considéré comme nul.
- La troisième étape consiste en la résolution du problème par l'application de la méthode numérique.
- La dernière étape consiste à l'affichage des résultats obtenus par miles quels les équipotentielles, la norme du champ électrique et ses composantes normales et tangentielles, etc.

CHAPITRE III

Etude et analyse des champs électriques DC et AC d'un isolateur silicone 11kV

III.1 Introduction :

Les isolateurs silicone ont été largement utilisés dans systèmes de transport et de la distribution d'énergie électrique en raison de leurs avantages par rapport aux isolateurs conventionnels en verre et en céramique comme un poids plus faible, une meilleure performance contre l'humidité et la pollution, moindre coût, montage et maintenance faciles. (29–31)

On va présenter l'analyse du champ électrique et sa vérification sous excitations en tension continue et alternative pour un milieu 11 kV de l'isolateur de silicone. Les simulations ont été menées à l'aide d'un logiciel commercial (Comsol Multiphysics).

Le modèle **2D** de l'isolateur silicone en dimensions réelles et les propriétés électriques des matériaux ont été prises en considération. La distribution de tension ainsi le champ électrique le long de la ligne de fuite d'un isolateur propre et pollué a été obtenue pour les tensions appliquées AC et DC. Des études de simulation ont également été répétées pour plusieurs valeurs de fréquence pour comprendre l'effet de fréquence et également pour déterminer les valeurs de fréquence de seuil pour les régions de champ résistif capacitif. De plus, l'influence de la conductivité de l'air sur la distribution du champ a été étudiée. Les gammes de fréquences correspondant au comportement capacitif, capacitif-résistif et résistif ont été déterminées pour différentes valeurs de conductivité de l'air.

III.2 Simulation du modèle réel par COMSOL :

L'objectif principal de notre simulation dans cette partie est de déterminer la distribution du potentiel et du champ électrique DC et AC autour d'un isolateur silicone (SIR.11kV), en utilisant la méthode des éléments finis par l'intermédiaire de logiciel (COMSOL).

III.2.1 Modèle de l'isolateur étudié :

Dans ce travail, les simulations numériques sont réalisées sur le modèle isolateur polymère (SIR en caoutchouc de silicone) de quatre ailettes 11kV, cet isolateur utilisé actuellement dans les réseaux de la SONELGAZ.

Ce modèle a été sélectionné pour calculer la distribution de potentiel et du champ. L'isolateur est composé de trois matériaux principaux comme illustré dans la figure III.1.

1. Tige centrale: matériau isolant porteur (en quartz) ;
2. Matériau Isolant: en caoutchouc de silicone recouvre le cœur et construire les ailettes ;
3. Pièces métalliques : Extrémités métalliques(en cuivre) ;

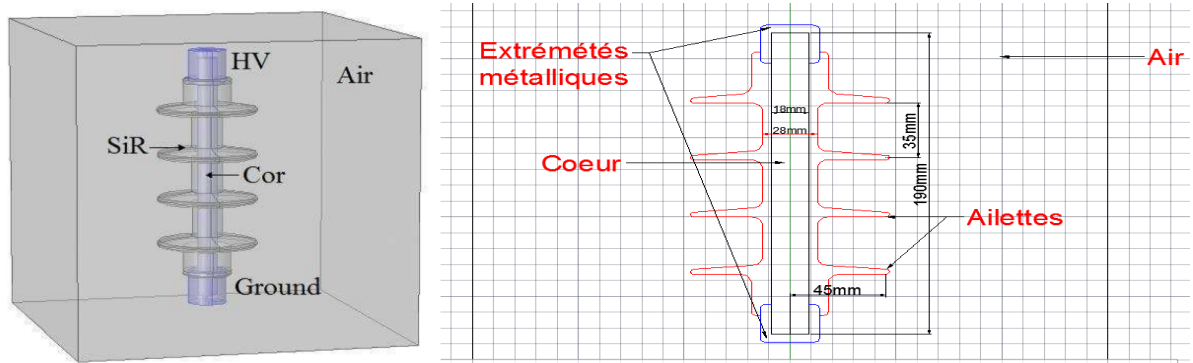


Figure III.1:Géométrie et caractéristiques dimensionnelles de l'isolateur en silicone (SIR.11kV).

III.2.2 Identification des domaines de l'isolateur :

Nous avons défini les différents domaines de l'isolateur étudié dans (COMSOL) en introduisant pour chaque matériau: la permittivité relative ϵ_r et la conductivité électrique σ .

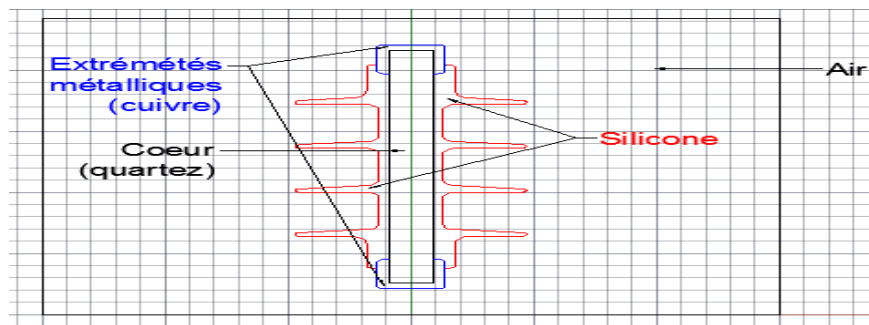


Figure III.2:Différentes domaines de l'isolateur(SIR.11kV).

Domaine	Permittivité relative ϵ_r	Conductivité électrique σ (S/m)
Air	1	$1 \cdot 10^{-13}$
Extrémités métalliques (Cuivre)	1	$26.31 \cdot 10^6$
Tige centrale (quartz)	7.1	$1 \cdot 10^{-13}$
Silicone	2.9	$1 \cdot 10^{-13}$
Pollution	80	$1 \cdot 10^{-3}$

Tableau III.1: Propriétés électriques des matériaux.

III.2.3 Conditions aux limites :

Dans notre études, nous avons pris comme conditions aux limites pour l'électrode haute tension un potentiel DC-AC d'amplitude constante de valeur 11kV avec des fréquences variables et celui de l'électrode inférieure un potentiel nul (masse).

III.2.4 Maillage des domaines:

Concernant le maillage, la densité des éléments finis est importante pour les régions critiques (proches de la surface de l'isolateur) où une plus grande précision est exigée, car les propriétés électriques des matériaux sont très changeantes.

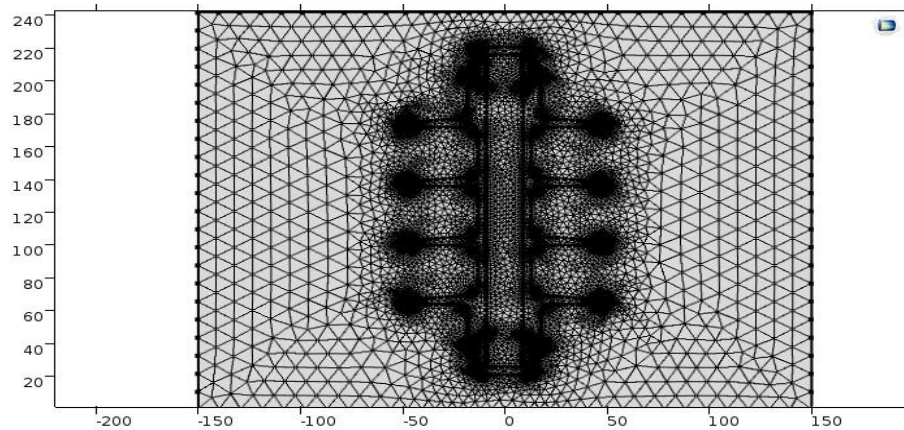


Figure III.3: Maillage de l'isolateur(SIR.11kV).

III.3 Analyse du champ électrique :

La méthode des éléments finis (MEF) est une technique numérique pour prendre un résultat d'approximation des problèmes techniques et scientifiques, le système à résoudre doit être en zone fermée (2D) ou en volume (3D).

Aussi, les conditions aux limites du domaine et certaines parties du système et les propriétés matérielles de tous les sous-systèmes doit être défini. Ensuite, le système est divisé en des régions plus petites appelées éléments qui peuvent être triangulaires, rectangulaire pour 2D et tétraèdre, prisme triangulaire, hexaèdre et pyramide pour la 3D. Les équations différentielles définies selon le type de problème sont approximées pour chaque élément en utilisant des fonctions polynomiales d'ordre inférieur. (32)

Les équations de Maxwell jouent un rôle important dans la MEF pour la détermination de la tension et de la distribution du champ électrique.

Selon la loi de Gauss (33), la divergence du champ électrique est :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0 \epsilon_r} \quad \text{III.1}$$

Où ρ est la densité de charge volumique, ϵ_0 est la permittivité en espace libre $\epsilon_0=8,854 \times 10^{-12}$ F/m et ϵ_r est la permittivité diélectrique relative.

La relation de gradient entre le champ électrique et la tension peut être définie comme :

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}V \quad \text{III.2}$$

Où V est la tension d'un point le long de l'isolant ou de l'espace défini.

Après avoir combiné les eqs. 1 et 2, la relation entre le potentiel et la charge électrique sont pris comme indiqué dans l'équation. 3.

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\epsilon_0 \epsilon_r} \quad \text{III.3}$$

Les équations 3 et 4 doivent être définies comme une condition aux limites sur le système isolateur de silicone (34).

$$\vec{J}_{\text{tot}} = \vec{J} + j\omega\vec{D} = (\sigma + j\omega\epsilon)\vec{E} \quad \text{III.4}$$

Où \vec{J}_{tot} est la densité de courant total, \vec{J} est la densité de courant dans les matériaux, \vec{D} est la densité de flux électrique, σ est la conductivité du matériau et ω est la fréquence angulaire.

De l'éq. 4, la constante de permittivité complexe, $\epsilon_{\text{complexe}}$, est obtenu comme indiqué dans l'équation. 5.

$$\epsilon_{\text{complexe}} = \epsilon_{\text{réel}} - j\epsilon_{\text{imag}} = \epsilon - j\frac{\sigma}{\omega} \quad \text{III.5}$$

Comme on le voit à partir des équations. 4 et 5, en cas de basse fréquence et $\sigma \gg \omega\epsilon$, la distribution de champ converge vers un champ résistif et la partie imaginaire deviendra plus dominante.

Pour $\omega\epsilon \gg \sigma$, la partie imaginaire de la permittivité complexe peut être négligée et la distribution de champ se comporte comme un champ capacitif dans une situation électrostatique. Sinon, le système se comporte à la fois capacitif et résistif, en bref, champ hétérogène comportement (35, 36). Dans cette étude, les effets de la fréquence sur la distribution ont été étudiés et les limites de la fréquence de la distribution de champ capacitif et résistif ont été découvertes.

III.4 Résultats des simulations :

Dans cette étude, une approche particulière est appliquée pour évaluer la répartition du champ DC. **La condition DC est modélisée par l'utilisation d'une tension AC avec une fréquence assez basse.** Avant d'attribuer les valeurs de fréquence appropriées pour DC, il est nécessaire d'examiner l'effet de la fréquence sur la distribution du champ pour connaître la valeur de fréquence seuil du système qui génère les mêmes conditions que dans le système à courant continu. Par conséquent, des tensions AC ayant des valeurs basse fréquence telles que $10^{-6}, 10^{-5}, 10^{-4}$ Hz et ainsi de suite sont appliqués à la partie sous tension du modèle.

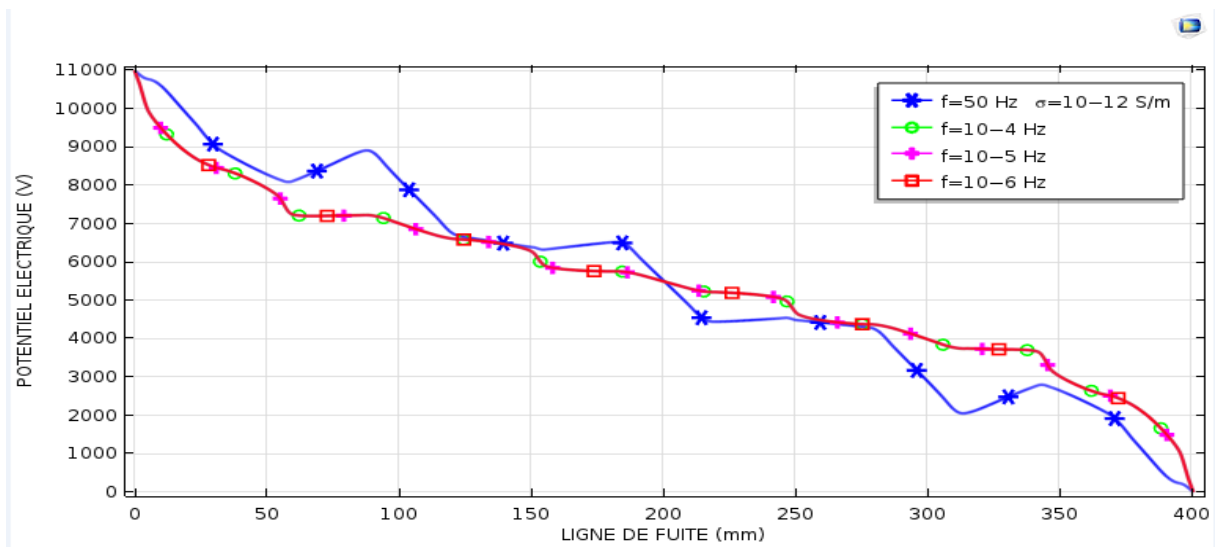
III.4.1 Résultats de calcul du potentiel et du champ électrique pour le cas propre :

III.4.1.1 Influence de la fréquence pour une conductivité de l'air $\sigma_{\text{air}}=10^{-12}$ S/m:

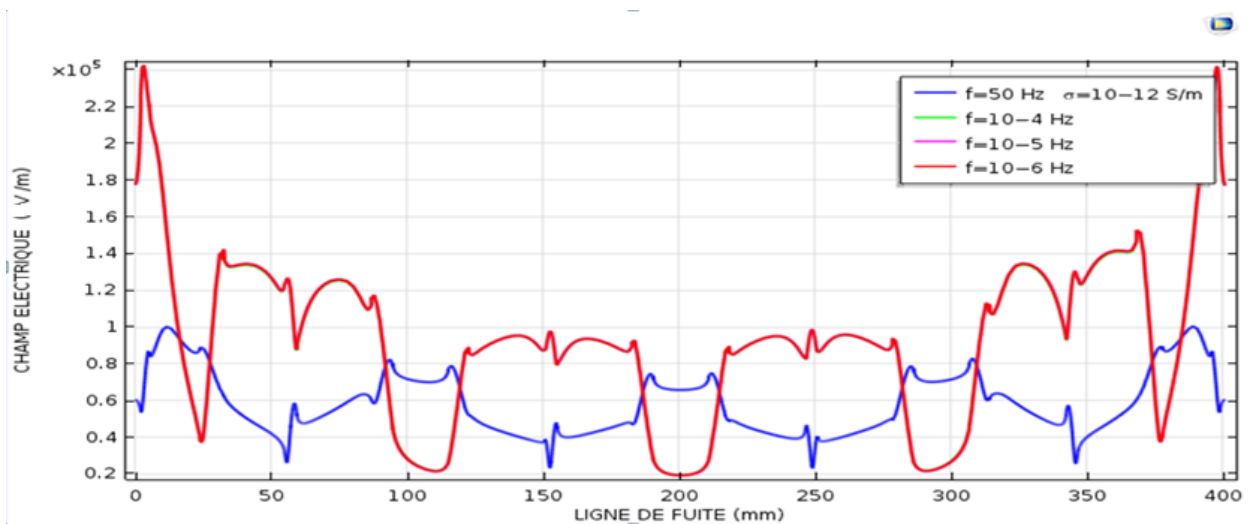
Pour étudier l'effet de la fréquence de la tension appliquée, on applique sur la partie sous tension du modèle des tensions AC ayant des valeurs basses fréquences telles que 10^{-6} , 10^{-5} , 10^{-4} Hz et 50Hz.

La figure III.4-(a) représente la répartition du potentiel électrique le long de la ligne de fuite de l'isolateur en fonction des différentes valeurs de fréquence de la tension d'alimentation.

La figure III.4-(b) représente la variation du champ électrique le long de la ligne de la fuite de l'isolateur en fonction des différentes valeurs de fréquence de la tension d'alimentation.



(a)



(b)

Figure III.4: Influence de la variation de la fréquence sur le potentiel et le champ électrique pour une conductivité de l'air $\sigma_{\text{air}}=10^{-12}$ S/m.

Analyse :

- Les distributions de potentiel électrique convergent vers un comportement linéaire le long de la ligne de fuite si la valeur de fréquence diminue, ce qui signifie que le silicone est presque la même conductivité de l'air ($\sigma_{\text{silicone}} = 10^{-13}$ S/m). Dans ce cas aucun changement pour les différentes valeurs de basses fréquences comme illustré dans la figure III.4-(a).

-Les distributions du champ électrique selon les résultats de la simulation pour des valeurs de fréquences plus petites génèrent la même distribution de potentiel comme indiqué dans la figure III.4-(b).

III.4.1.2 Influence de la fréquence pour une conductivité de l'air $\sigma_{\text{air}} = 10^{-14}$ S/m:

On applique sur la partie sous tension du modèle des tensions AC ayant des valeurs basse fréquences telles que $10^{-6}, 10^{-5}, 10^{-4}$ Hz et 50Hz.

La figure III.5-(a) représente la répartition du potentiel électrique le long de la ligne de fuite de l'isolateur en fonction des différentes valeurs de la fréquence de tension d'alimentation.

La figure III.5-(b) représente la variation du champ électrique le long de la ligne de la fuite de l'isolateur en fonction des différentes valeurs de la fréquence de tension d'alimentation.

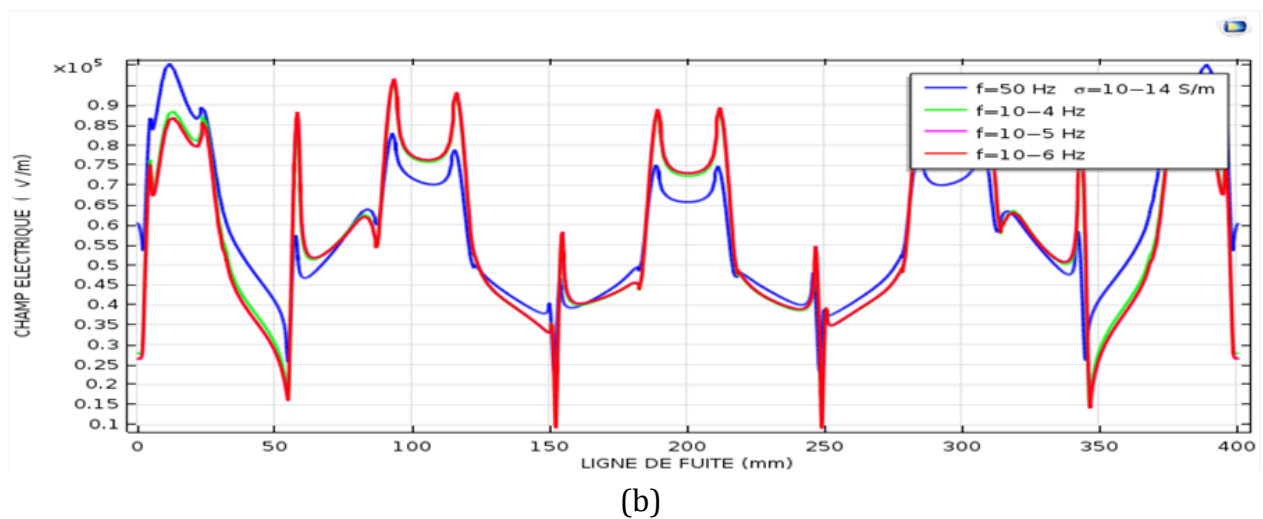
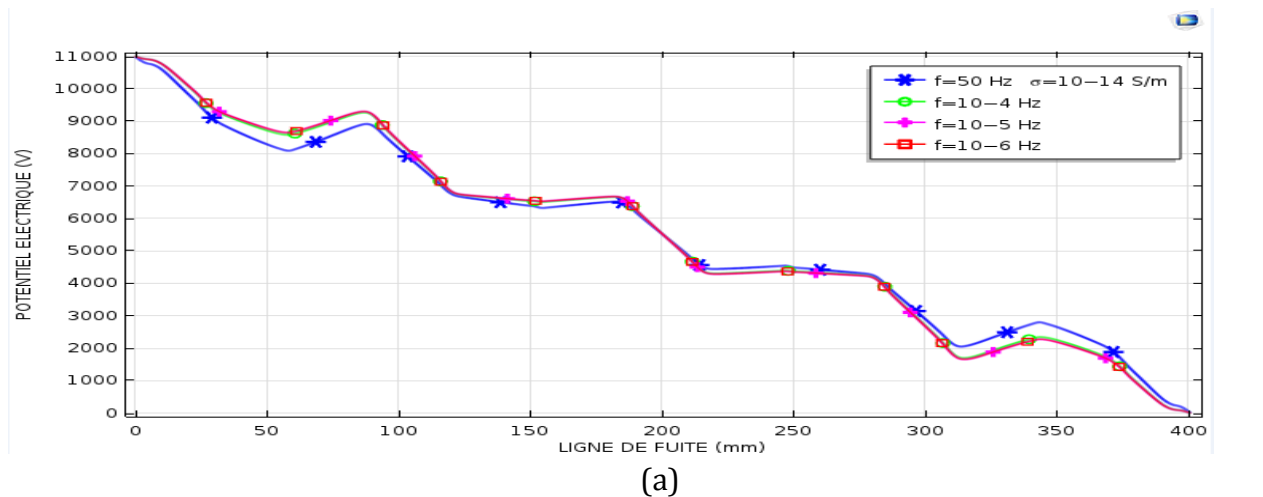


Figure III.5: Influence de la variation de la fréquence sur le potentiel et le champ électrique pour une conductivité de l'air $\sigma_{\text{air}} = 10^{-14}$ S/m.

Analyse :

- Les distributions de potentiel électrique convergent vers un comportement linéaire le long de la ligne de fuite si la valeur de fréquence diminue, ce qui signifie que le matériau de silicone est presque la même conductivité de l'air ($\sigma_{\text{silicone}} = 10^{-13}$ S/m). Dans ce cas des changements négligeables pour les différentes valeurs basses fréquences comme illustré dans la figure III.5-(a).

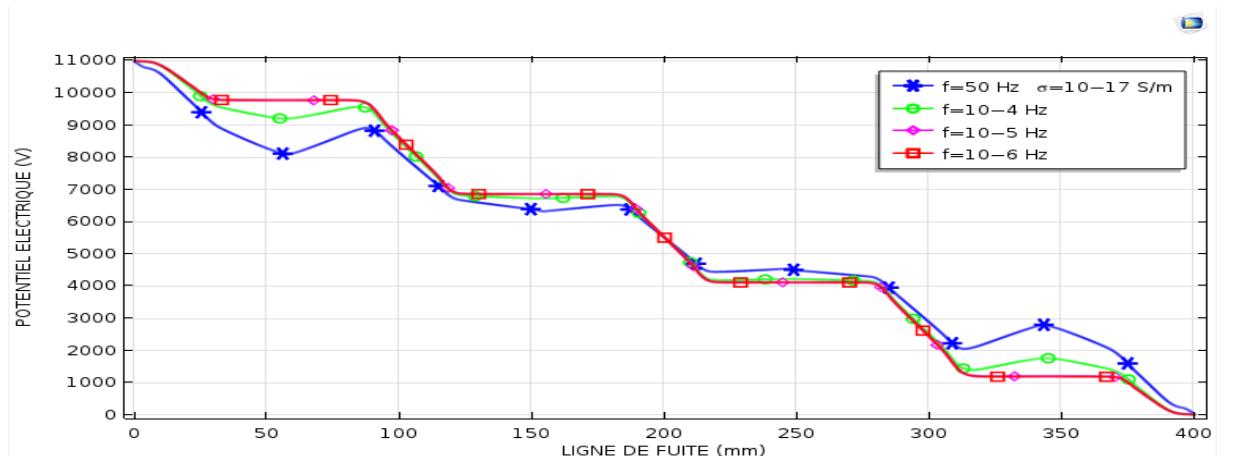
-La distribution du champ électrique selon les résultats de la simulation pour des valeurs de fréquences plus petites génère presque la même distribution de potentiel comme indiqué dans la figure III.5-(b).

III.4.1.3 Influence de la fréquence pour une conductivité de l'air $\sigma_{\text{air}} = 10^{-17}$ S/m:

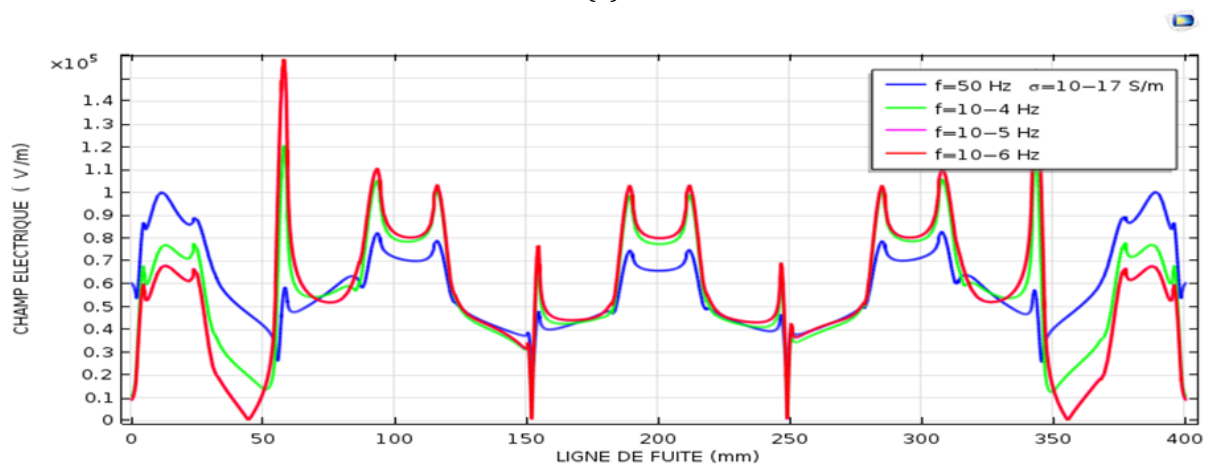
On applique sur la partie sous tension du modèle des tensions AC ayant des valeurs de basse fréquence telles que 10^{-6} , 10^{-5} , 10^{-4} Hz et 50Hz.

La figure III.6-(a) représente la répartition du potentiel électrique le long de la ligne de fuite de l'isolateur en fonction des différentes valeurs de la fréquence de la tension de service.

La figure III.6-(b) représente la variation du champ électrique le long de la ligne de la fuite de l'isolateur en fonction des différentes valeurs de valeurs de la fréquence de la tension de service.



(a)



(b)

Figure III.6: Influence de la variation de la fréquence sur le potentiel et le champ électrique pour une conductivité de l'air $\sigma_{\text{air}} = 10^{-17}$ S/m.

Analyse :

-Les distributions de potentiel donnent une variation linéaire le long de la ligne de fuite. Ce serait en raison de l'effet négligeable des capacités parasites autour de l'isolateur dans les gammes de basses fréquences, telles que 10^{-6} Hz. Comme fourni dans l'éq. 5, la partie imaginaire de la permittivité complexe est une fonction de la fréquence, et dans des conditions de basse fréquence, comme DC, la partie imaginaire dominera dans la permittivité complexe, et deviennent plus efficaces sur la tension. Comme illustré par des lignes droites dans la figure III.6-(a).

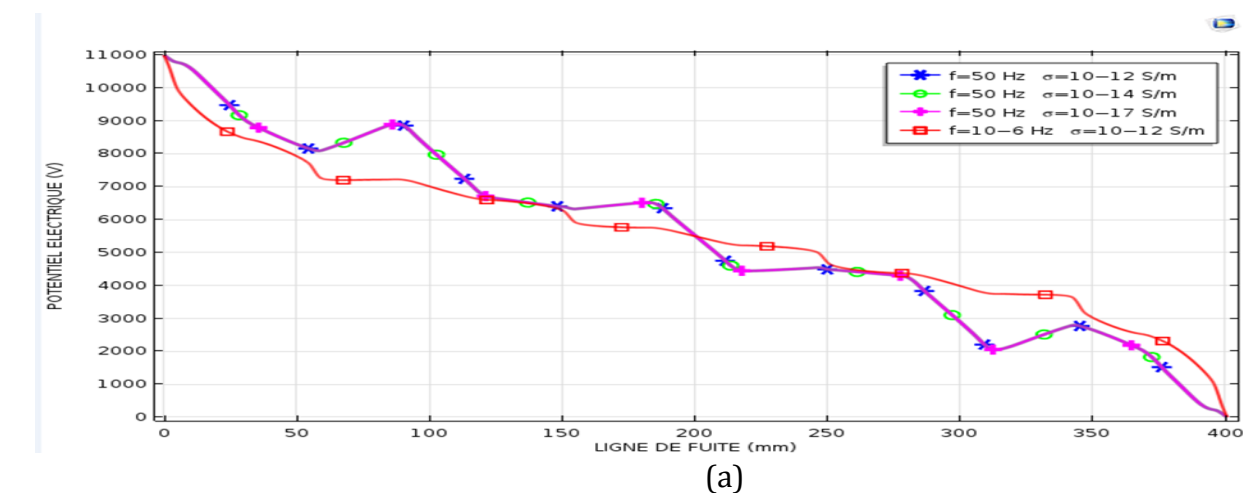
-Les distributions du champ E sont différentes selon les résultats de la simulation pour des valeurs de fréquences plus petites comme indiqué dans la figure III.6-(b).

III.4.1.4 Influence de la conductivité de l'air pour la fréquence $f=50\text{Hz}$:

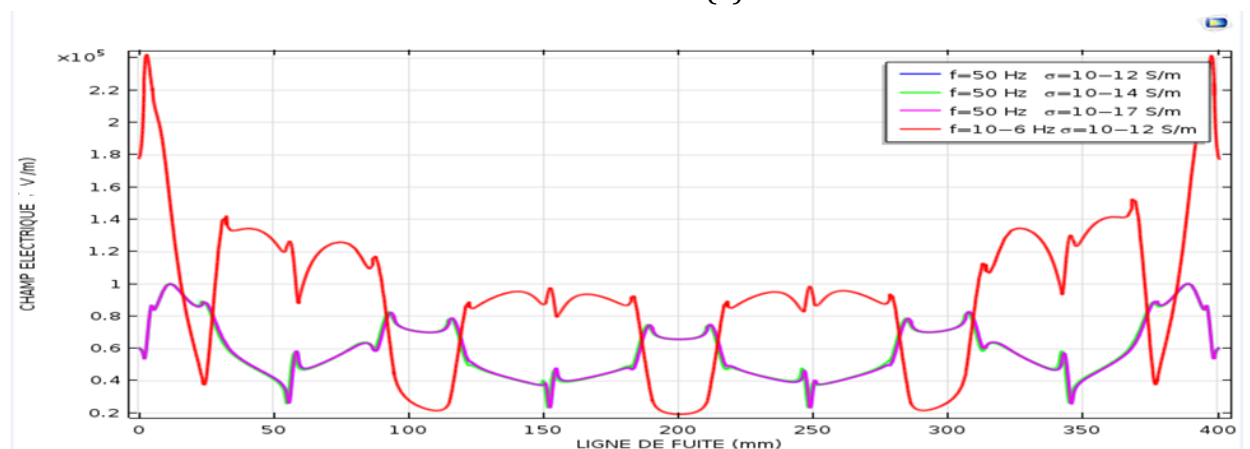
Afin de monter l'influence de la conductivité de l'air, on applique sur la partie sous tension du modèle une tension AC de fréquence 50 Hz.

La figure III.7-(a) représente la répartition du potentiel électrique le long de la ligne de fuite de l'isolateur en fonction des différentes valeurs de conductivité de l'air.

La figure III.7-(b) représente la variation du champ électrique le long de la ligne de la fuite de l'isolateur en fonction des différentes valeurs de conductivité de l'air.



(a)



(b)

Figure III.7: Influence de la variation de la conductivité de l'air sur le potentiel et le champ électrique pour la fréquence $f=50\text{Hz}$.

Analyse :

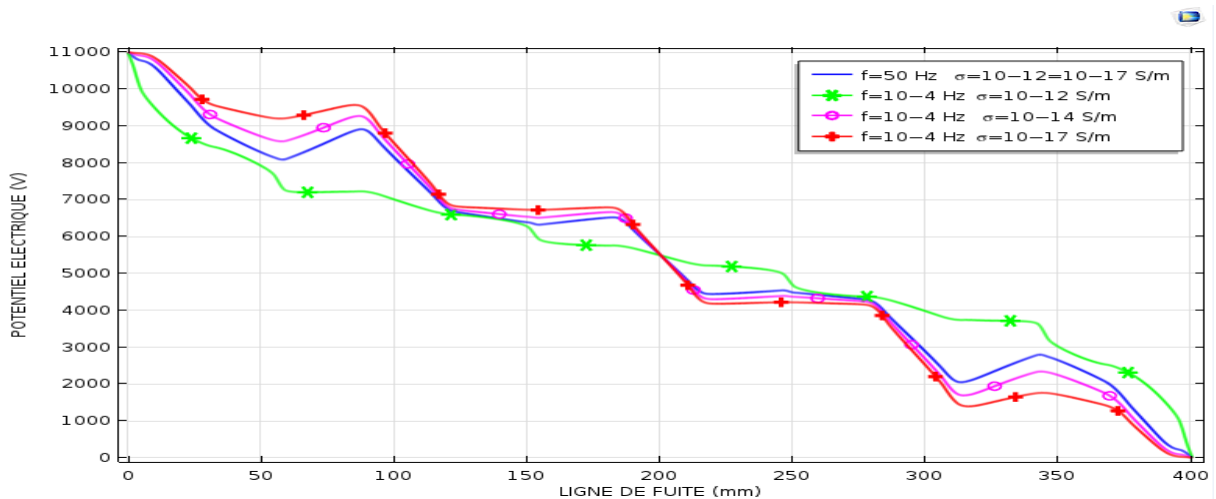
-Les distributions de potentiel et les champs électriques pour la fréquence industrielle 50 Hz donnent les mêmes courbes comme indiqué dans la figure III.7 .Ce qui indiquent que le potentiel et le champ ne sont pas influencés par la conductivité de l'air.

III.4.1.5 Influence de la conductivité de l'air pour la fréquence $f=10^{-4}$ Hz:

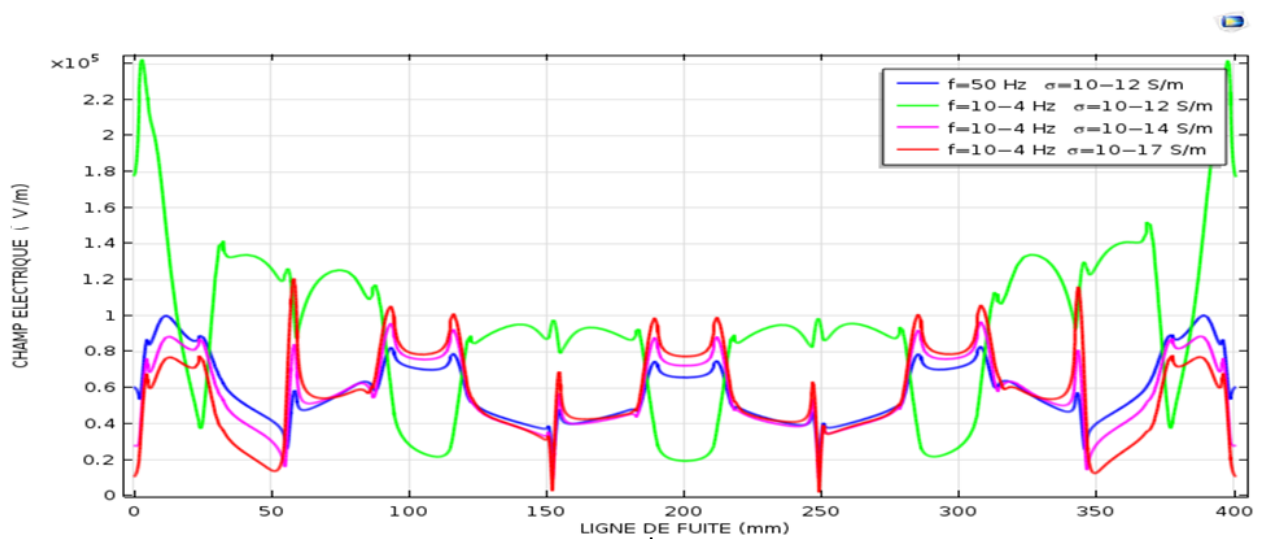
On applique sur la partie sous tension du modèle une tension AC de fréquence 10^{-4} Hz.

La figure III.8-(a) représente la répartition du potentiel électrique le long de la ligne de fuite de l'isolateur en fonction des différentes valeurs de conductivité de l'air.

La figure III.8-(b) représente la variation du champ électrique le long de la ligne de la fuite de l'isolateur en fonction des différentes valeurs de conductivité de l'air.



(a)



(b)

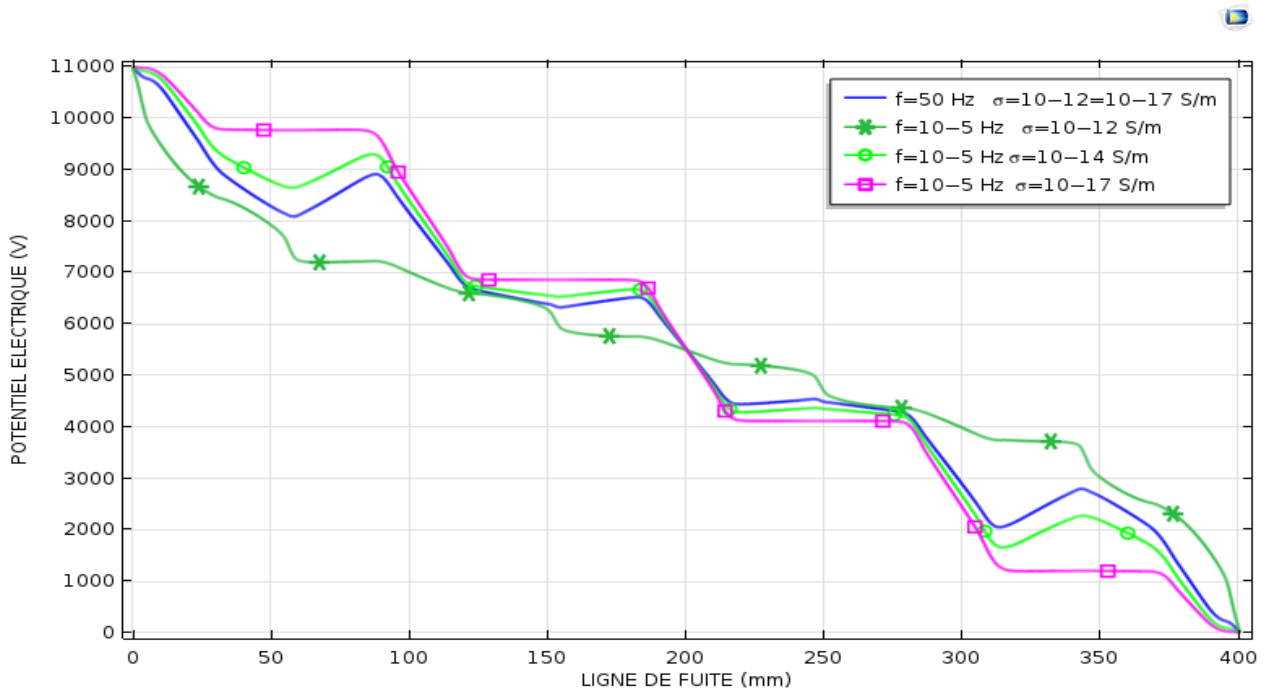
Figure III.8: Influence de la variation de la conductivité de l'air sur le potentiel et le champ électrique pour la fréquence $f=10^{-4}$ Hz.

III.4.1.6 Influence de la conductivité de l'air pour la fréquence $f=10^{-5}$ Hz:

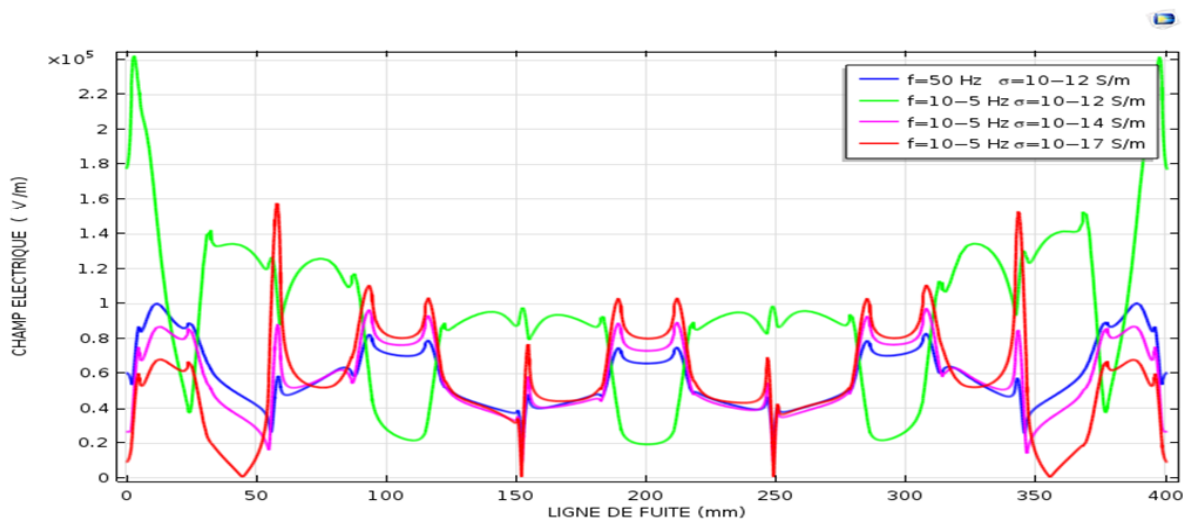
On applique sur la partie sous tension du modèle une tension AC de fréquence 10^{-5} Hz.

La figure III.9-(a) représente la répartition du potentiel électrique le long de la ligne de fuite de l'isolateur en fonction des différentes valeurs de conductivité de l'air.

La figure III.9-(b) représente la variation du champ électrique le long de la ligne de la fuite de l'isolateur en fonction des différentes valeurs de conductivité de l'air.



(a)



(b)

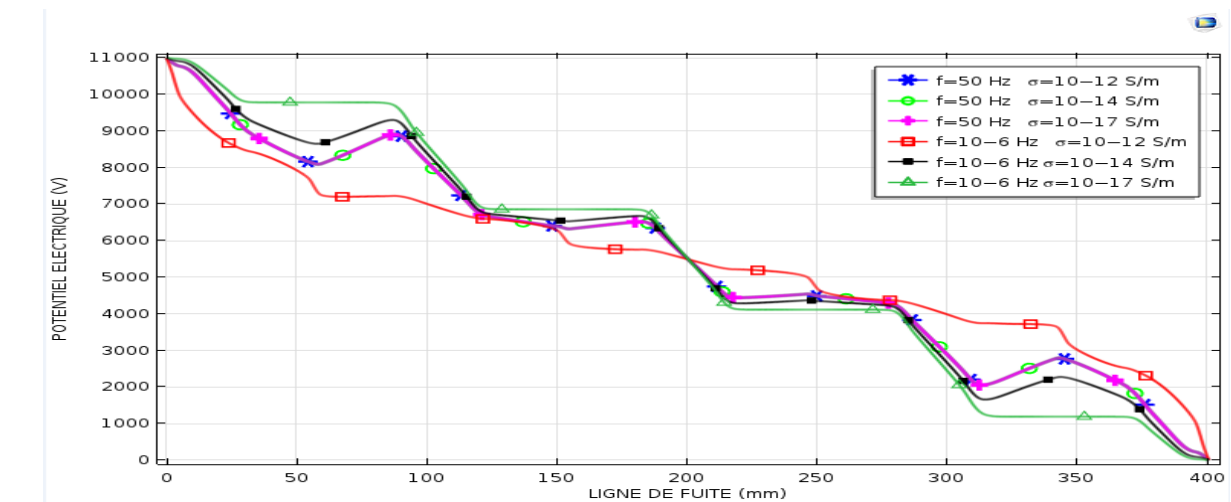
Figure III.9: Influence de la variation de la conductivité de l'air sur le potentiel et le champ électrique pour la fréquence $f=10^{-5}$ Hz.

III.4.1.7 Influence de la conductivité de l'air pour la fréquence $f=10^{-6}$ Hz:

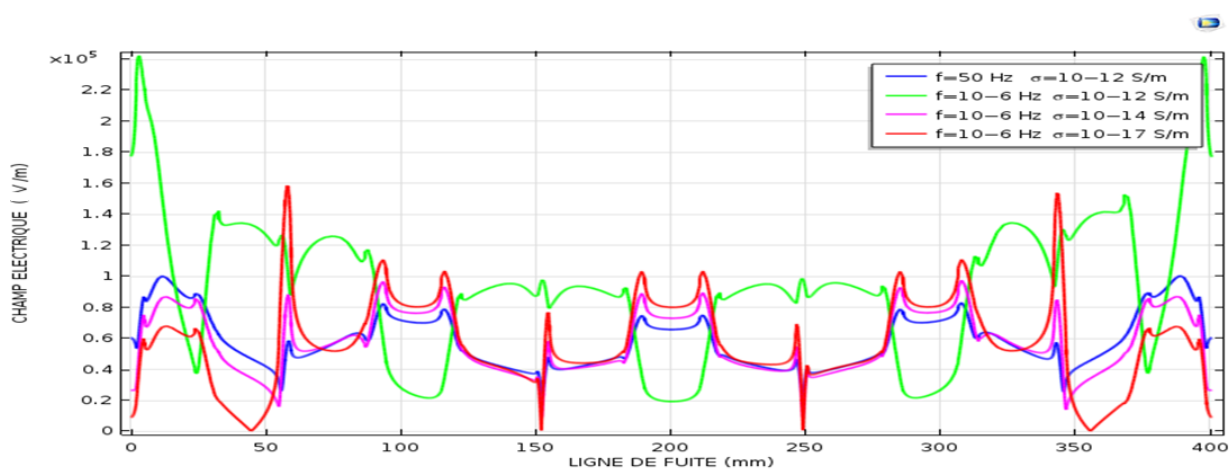
On applique sur la partie sous tension du modèle une tension AC de fréquence 10^{-6} Hz.

La figure III.10-(a) représente la répartition du potentiel électrique le long de la ligne de fuite de l'isolateur en fonction des différentes valeurs de conductivité de l'air.

La figure III.10-(b) représente la variation du champ électrique le long de la ligne de la fuite de l'isolateur en fonction des différentes valeurs de conductivité de l'air.



(a)



(b)

Figure III.10: Influence de la variation de la conductivité de l'air sur le potentiel et le champ électrique pour la fréquence $f=10^{-6}$ Hz.

Analyse :

-Les distributions de la tension continue le long de l'isolant a été obtenue comme plus non linéaire que AC ($f=50$ Hz) pour raison de l'effet de conductivité de l'air. L'air serait plus conducteur que le matériau isolant dans des conditions de courant continu en raison de la présence d'ions positifs et négatifs.

-Comme la conductivité augmente, le comportement non linéaire est observé comme dans littérature. Pour certaines conductivités de l'air (37), la distribution de tension sous tension continue donne un comportement plus non linéaire que condition AC.

-De plus sous tension à fréquence industrielle, la distribution de tension n'est pas influencée par la conductivité des diélectriques matériaux (air, silicone, quartz,...etc) et donc est représentée dans une seule courbe.

- Lorsque la conductivité de l'air est considérée comme 10^{-12} S/m, qui est supérieure à celle du matériau silicone, l'intensité du champ électrique est maximale, comme illustré dans la Figure III.8, est toujours supérieure à condition AC. Cependant, son emplacement est proche de la triple jonction. Si la conductivité de l'air est égale à la conductivité volumique du matériau de silicone, l'intensité du champ la plus élevée le long de la surface est plus faible. L'intensité de champ E maximales résultantes sous la tension assignée sont encore plus petits que la rigidité diélectrique de l'air.

-Lorsque la conductivité de l'air est considérée comme 10^{-14} S/m le maximum l'intensité du champ électrique dans des conditions de courant continu est observée sur les extrémités des ailettes près de la ligne et des extrémités du sol. Pour plus conductivités de l'air, la région du champ électrique maximal la force approche des pointes des ailettes à la région du métal.

-Lorsque la conductivité de l'air est considérée comme 10^{-17} S/m des intensités de champ électrique élevées se produisent à l'extrémité des ailettes sous condition DC ($f=10^{-4}$ Hz) en raison du petit rayon de courbure ainsi que les lignes équipotentiellles autour des ailettes.

Cependant, l'emplacement du champ E maximum pour la condition AC est différent. Le champ E le plus élevé sous AC est observé sur la surface de l'isolant, qui est proche de la triple jonction point où la tige en quartz, le corps en silicone et l'extrémité de la ligne sont attachés. Au voisinage de l'extrémité du sol, le champ E et les forces sont également plus grandes que celles de la partie médiane de l'isolateur, mais pas le plus critique. (38)

La valeur maximale de l'intensité du champ E pour le courant continu est plus élevée que celle du courant alternatif.

III.4.1.8 Variation les parties réelles et imaginaires de la permittivité relative complexe en fonction de la fréquence pour $\sigma_{\text{air}} = 10^{-17}$ S/m :

La figure III 11 illustre la variation de la partie réelle et imaginaire de la permittivité complexe relative ($\epsilon_{\text{complex}}/\epsilon_0$) déduite de l'éq. 5 par rapport à la fréquence en utilisant échelle logarithmique, en considérant que les parties réelles de la permittivité relative de l'air et de silicone sont constantes pour toutes les fréquences. Une analyse paramétrique a été réalisée en utilisant un modèle 2D pour les fréquences allant de 10^{-9} jusqu'à 10^2 Hz.

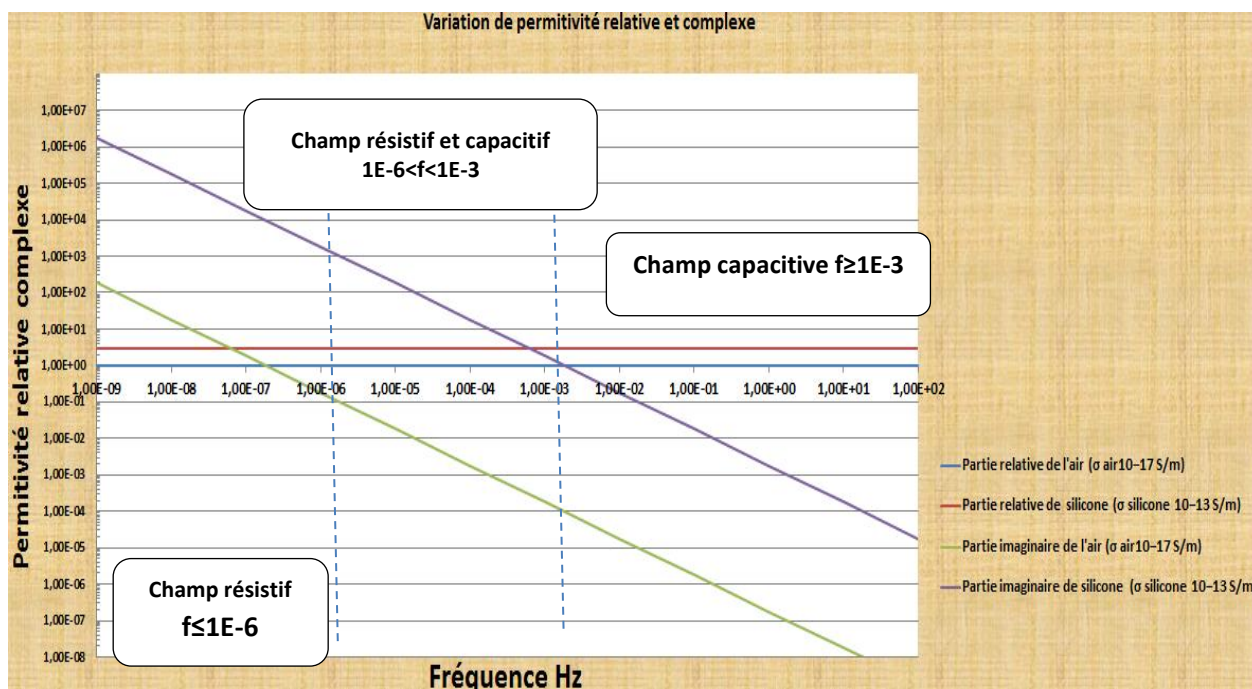


Figure III.11: Variation les parties réelles et imaginaires de la permittivité relative complexe par rapport à la fréquence dans l'échelle logarithmique pour $\sigma_{\text{air}}=10^{-17}$ S/m.

Sur la base des résultats de la simulation, si la fréquence est égale ou supérieure à 10^{-6} Hz, la distribution du champ est "capacitive", comme en 50 Hz, et la partie réelle de la permittivité complexe relative détermine la distribution du champ.

Si la fréquence est égale ou inférieure à 10^{-6} Hz, le la distribution du champ est "résistive", comme dans l'état DC, et la partie imaginaire de la permittivité complexe relative domine la répartition du champ.

La distribution de champ pour les fréquences entre 10^{-6} et 10^2 Hz est un hybride, à la fois capacitif et résistif. Les gammes de fréquences correspondant à la transition du champ d'un comportement à un autre est illustré à la Fig. 11 pour la conductivité de l'air de 10^{-17} S/m, ce qui est inférieur à celui de silicone.

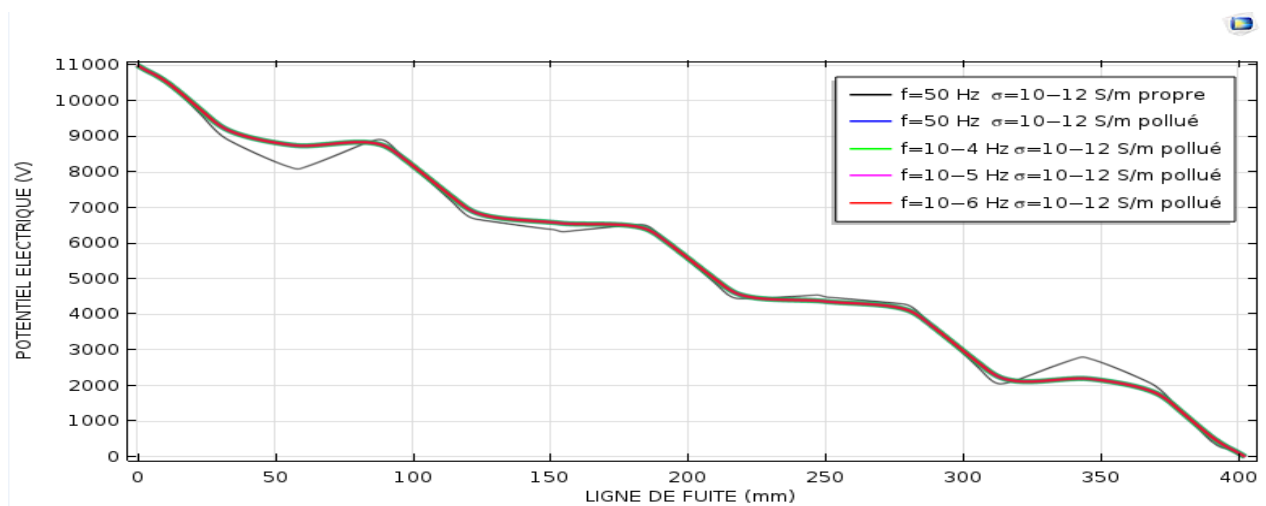
III.4.2 Résultats de la distribution du potentiel et de champ pour le cas pollué :

III.4.2.1 Influence de la fréquence pour une conductivité de l'air $\sigma_{\text{air}}=10^{-12}$ S/m:

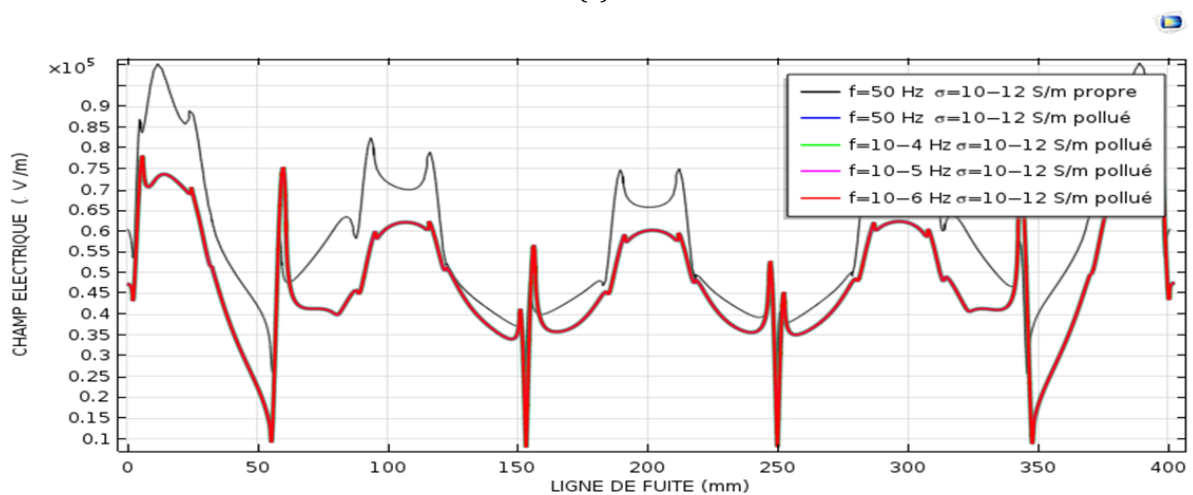
On applique sur la partie sous tension du modèle des tensions AC ayant des valeurs de basse fréquence telles que 10^{-6} , 10^{-5} , 10^{-4} et 50Hz , $\sigma_{\text{air}}=10^{-12}$ S/m, $\sigma_{\text{pollution}}=10^{-3}$ S/m, épaisseur de la couche pollution est 0.5mm.

La figure III.12-(a) représente la répartition du potentiel électrique le long de la ligne de fuite de l'isolateur en fonction des différentes valeurs de fréquence de tension d'alimentation.

La figure III.12-(b) représente la variation du champ électrique le long de la ligne de la fuite de l'isolateur en fonction des différentes valeurs de fréquence de tension d'alimentation.



(a)



(b)

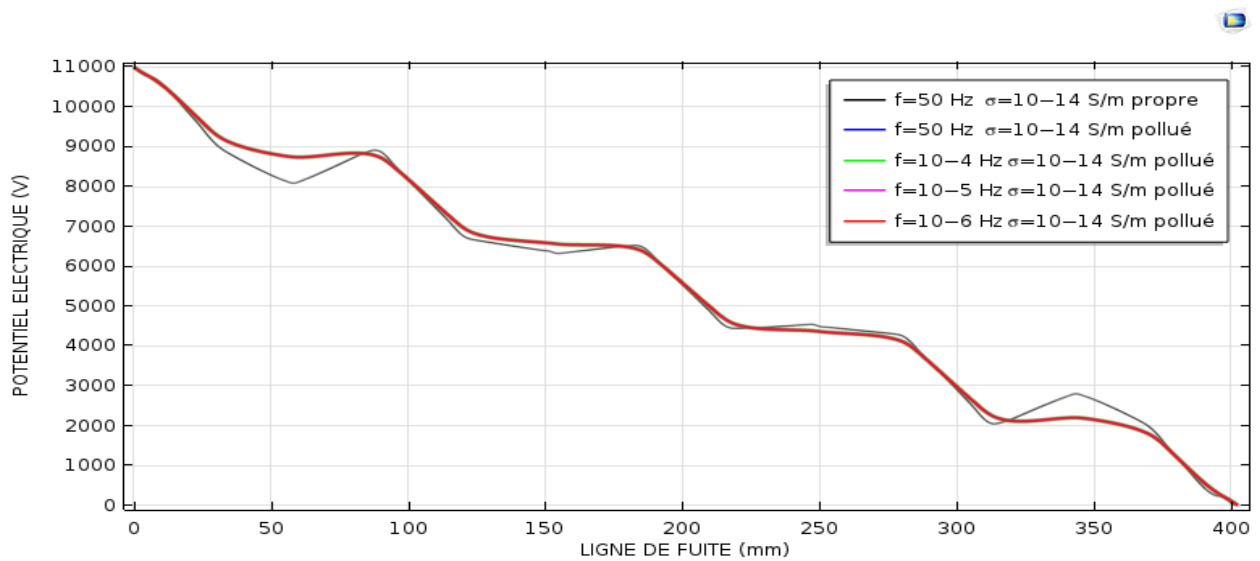
Figure III.12: Influence de la variation de la fréquence sur le potentiel et le champ électrique pour une conductivité de l'air $\sigma_{\text{air}}=10^{-12}$ S/m.

III.4.2.2 Influence de la fréquence pour une conductivité de l'air $\sigma_{\text{air}}=10^{-14}$ S/m:

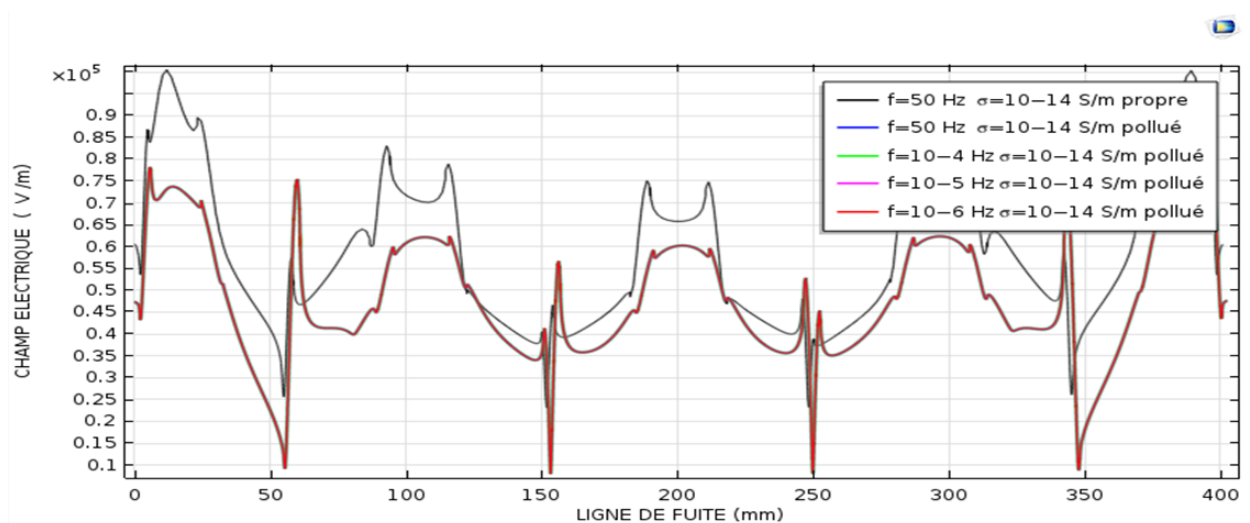
On applique sur la partie sous tension du modèle des tensions AC ayant des valeurs de basse fréquence telles que 10^{-6} , 10^{-5} , 10^{-4} et 50Hz, $\sigma_{\text{air}}=10^{-12}$ S/m, $\sigma_{\text{pollution}}=10^{-3}$ S/m, épaisseur de la couche pollution est 0.5mm.

La figure III.13-(a) représente la répartition du potentiel électrique le long de la ligne de fuite de l'isolateur en fonction des différentes valeurs de fréquence de tension d'alimentation.

La figure III.13-(b) représente la variation du champ électrique le long de la ligne de la fuite de l'isolateur en fonction des différentes valeurs de fréquence de tension d'alimentation.



(a)



(b)

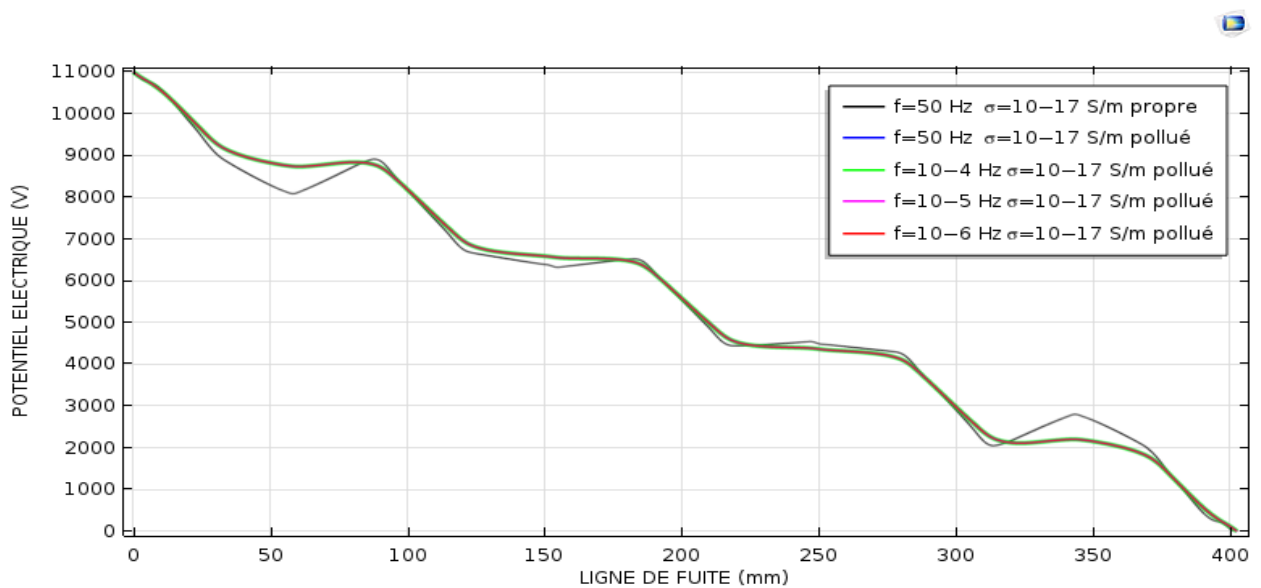
Figure III.13: Influence de la variation de la fréquence sur le potentiel et le champ électrique pour une conductivité de l'air $\sigma_{\text{air}}=10^{-14}$ S/m.

III.4.2.3 Influence de la fréquence pour une conductivité de l'air $\sigma_{\text{air}}=10^{-17}$ S/m:

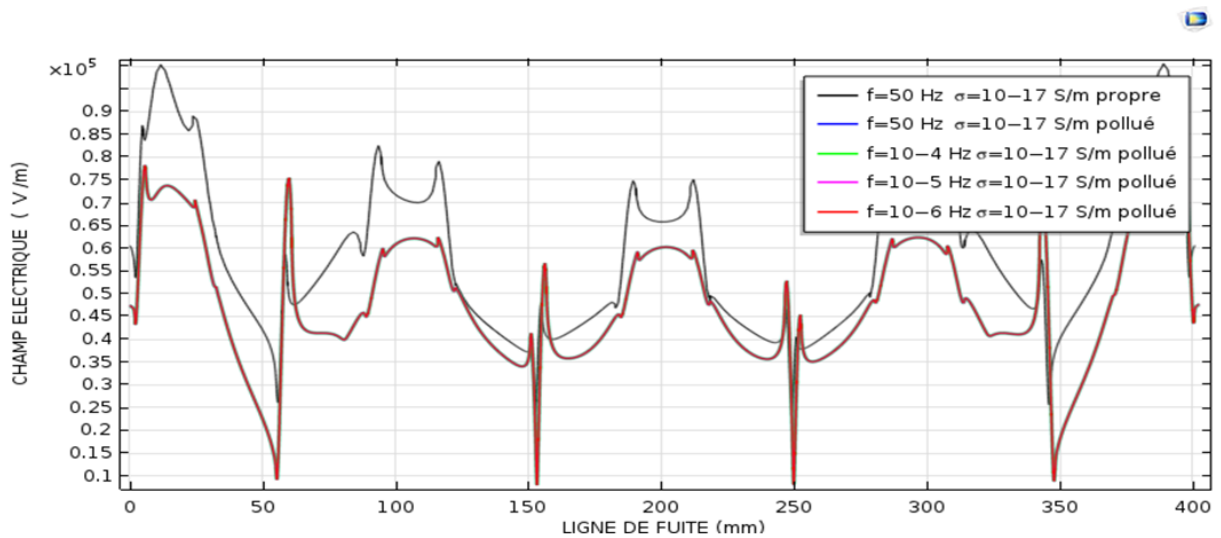
On applique sur la partie sous tension du modèle des tensions AC ayant des valeurs de basse fréquence telles que 10^{-6} , 10^{-5} , 10^{-4} et 50Hz, $\sigma_{\text{air}} = 10^{-12}$ S/m, $\sigma_{\text{pollution}} = 10^{-3}$ S/m, épaisseur de la couche pollution est 0.5mm.

La figure III.14-(a) représente la répartition du potentiel électrique le long de la ligne de fuite de l'isolateur en fonction des différentes valeurs de fréquence de tension d'alimentation.

La figure III.14-(b) représente la variation du champ électrique le long de la ligne de fuite de l'isolateur en fonction des différentes valeurs de fréquence de tension d'alimentation.



(a)



(b)

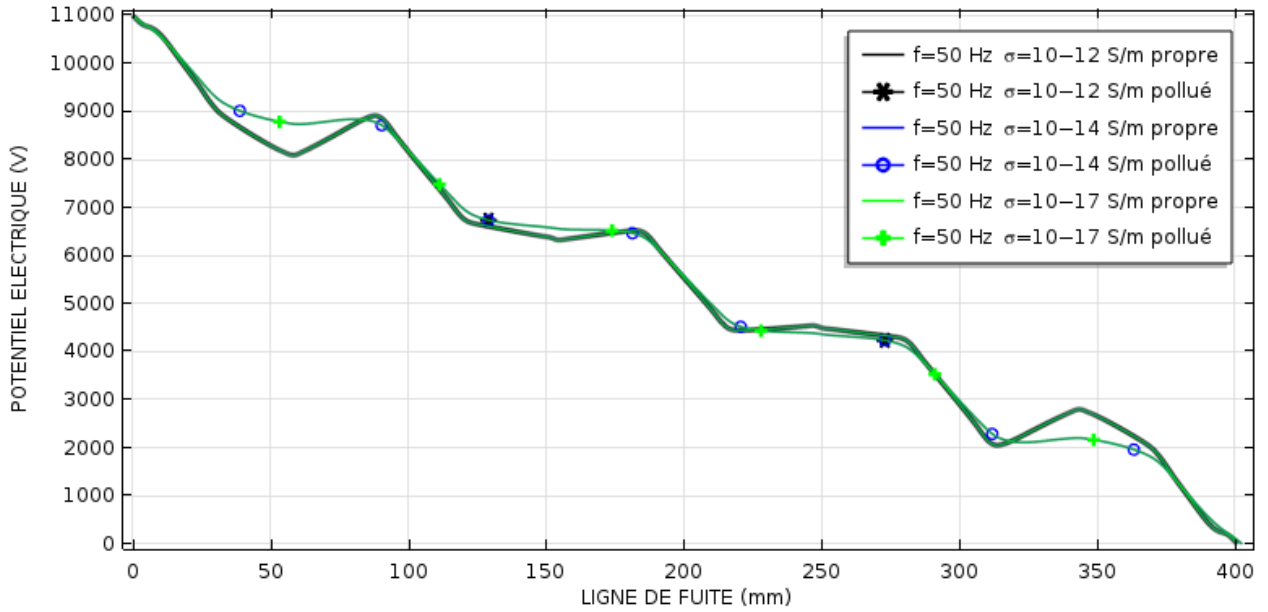
Figure III.14: Influence de la variation de la fréquence sur le potentiel et le champ électrique pour une conductivité de l'air $\sigma_{\text{air}}=10^{-17}$ S/m.

III.4.2.4 Influence de la conductivité de l'air pour la fréquence $f=50\text{Hz}$:

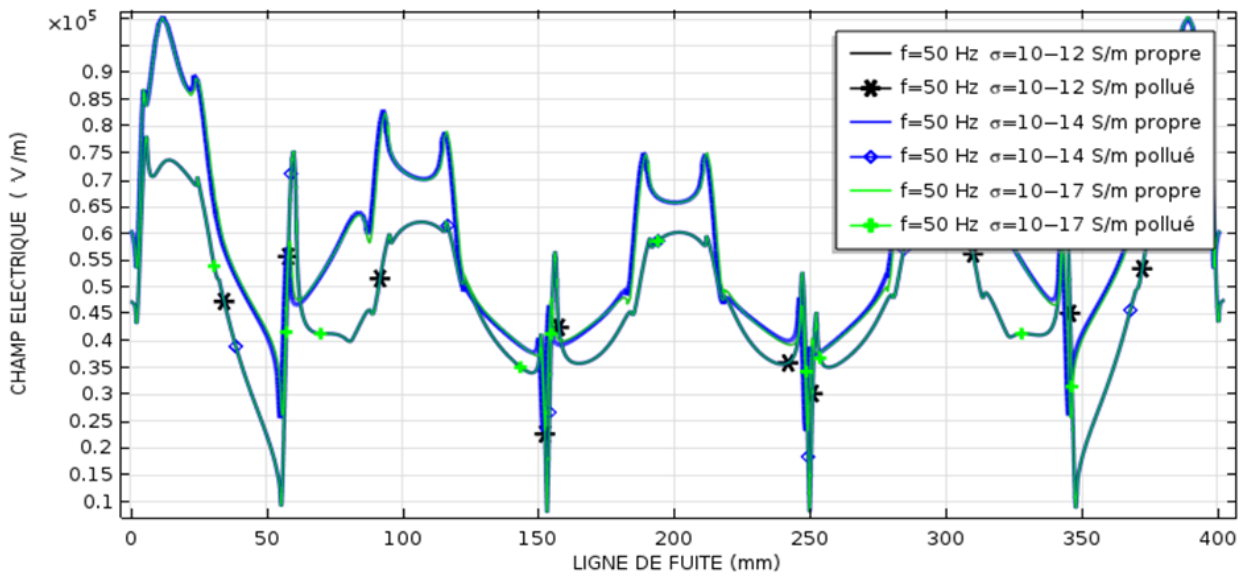
On appliqué sur la partie sous tension du modèle une tension AC de fréquence 50 Hz.

La figure III.15-(a) représente la répartition du potentiel électrique le long de la ligne de fuite de l'isolateur en fonction des différentes valeurs de conductivité de l'air.

La figure III.15-(b) représente la variation du champ électrique le long de la ligne de la fuite de l'isolateur en fonction des différentes valeurs de conductivité de l'air.



(a)



(b)

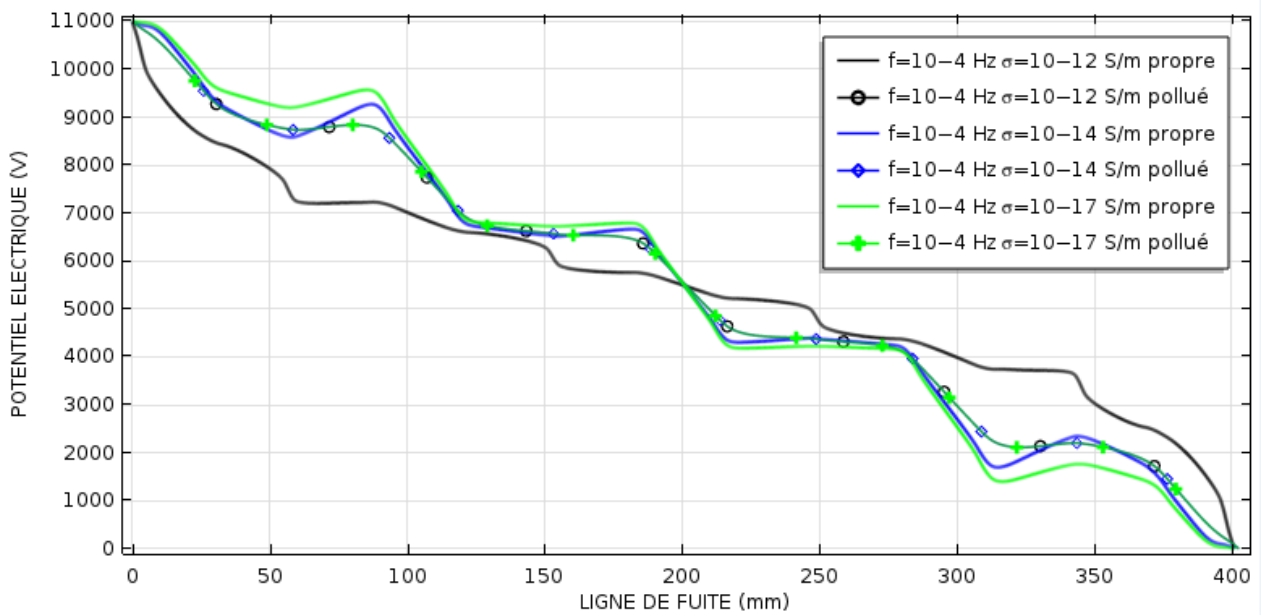
Figure III.15: Influence de la variation de la conductivité de l'air sur le potentiel et le champ électrique pour la fréquence $f=50\text{Hz}$

III.4.2.5 Influence de la conductivité de l'air pour la fréquence $f=10^{-4}$ Hz:

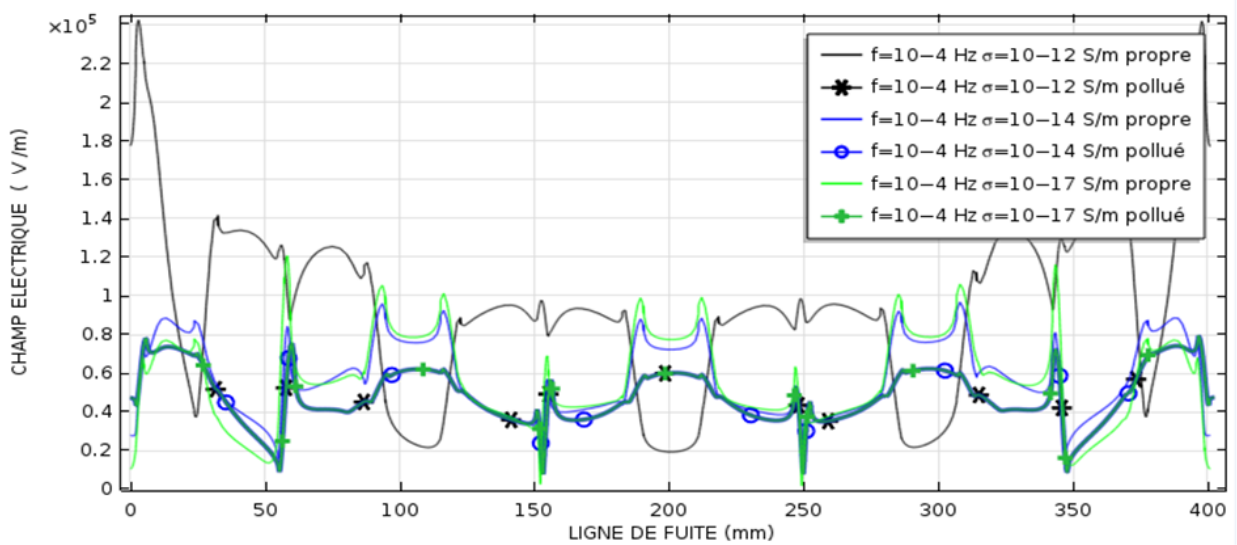
On appliqué sur la partie sous tension du modèle une tension AC de fréquence 10^{-4} Hz.

La figure III.16-(a) représente la répartition du potentiel électrique le long de la ligne de fuite de l'isolateur en fonction des différentes valeurs de conductivité de l'air.

La figure III.16-(b) représente la variation du champ électrique le long de la ligne de la fuite de l'isolateur en fonction des différentes valeurs de conductivité de l'air.



(a)



(b)

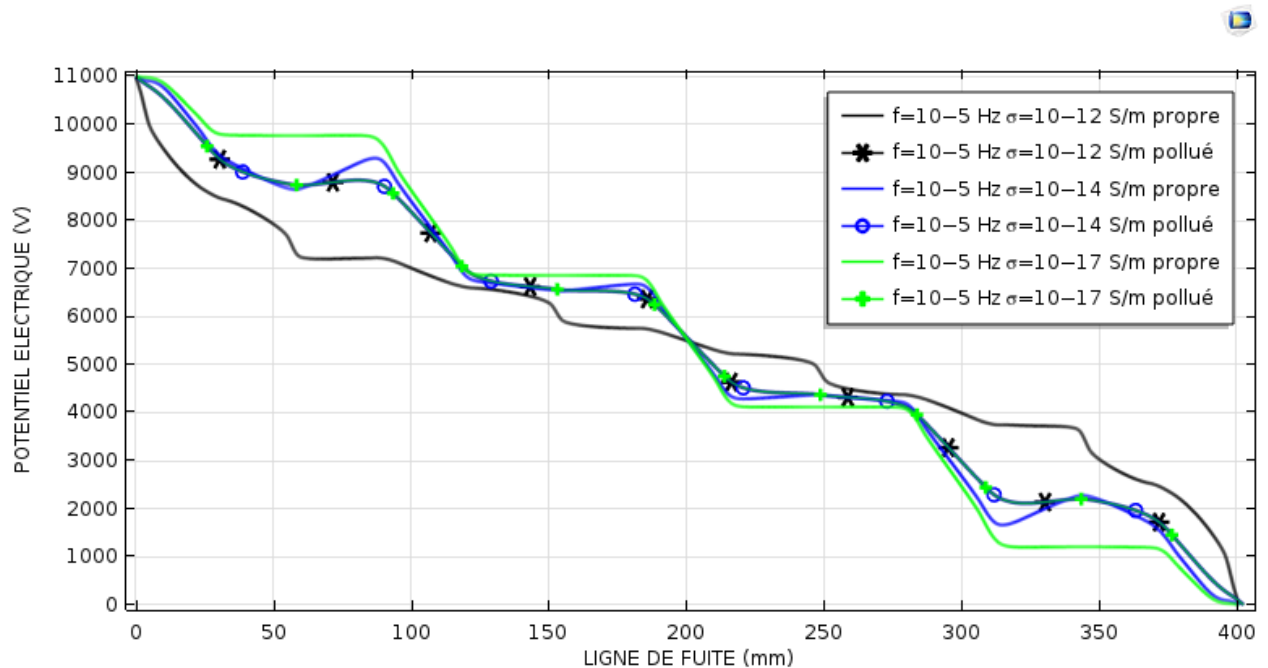
Figure III.16: Influence de la variation de la conductivité de l'air sur le potentiel et le champ électrique pour la fréquence $f=10^{-4}$ Hz.

III.4.2.6 Influence de la conductivité de l'air pour la fréquence $f=10^{-5}$ Hz:

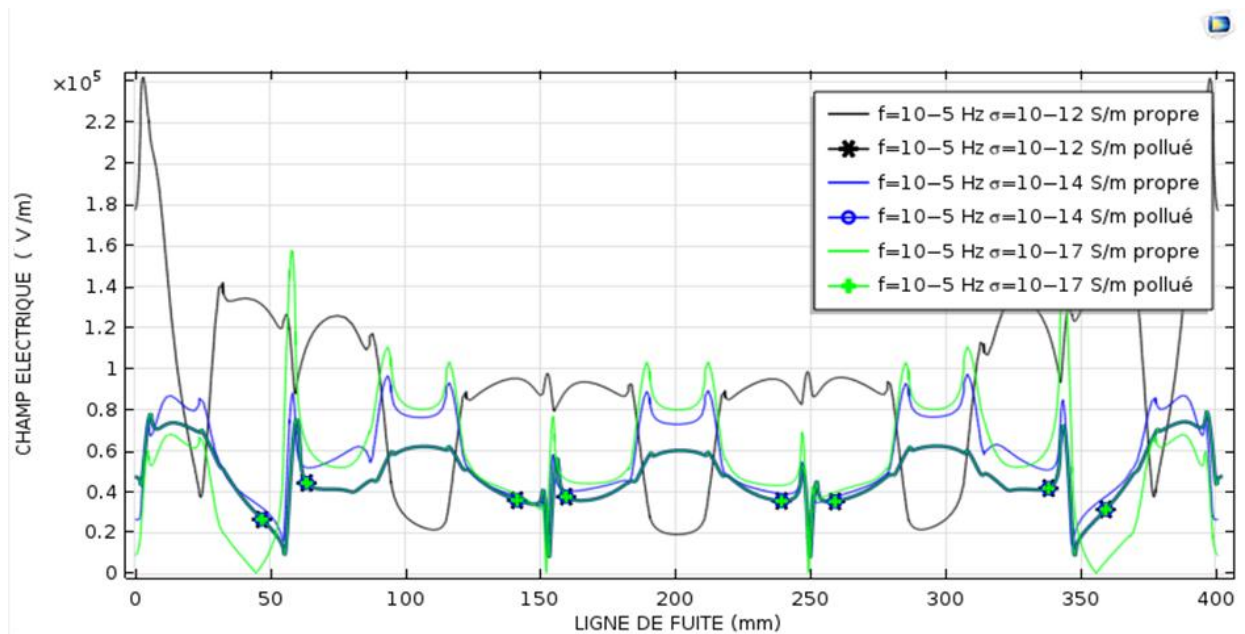
On appliqué sur la partie sous tension du modèle une tension AC de fréquence 10^{-5} Hz.

La figure III.17-(a) représente la répartition du potentiel électrique le long de la ligne de fuite de l'isolateur en fonction des différentes valeurs de conductivité de l'air.

La figure III.17-(b) représente la variation du champ électrique le long de la ligne de la fuite de l'isolateur en fonction des différentes valeurs de conductivité de l'air.



(a)



(b)

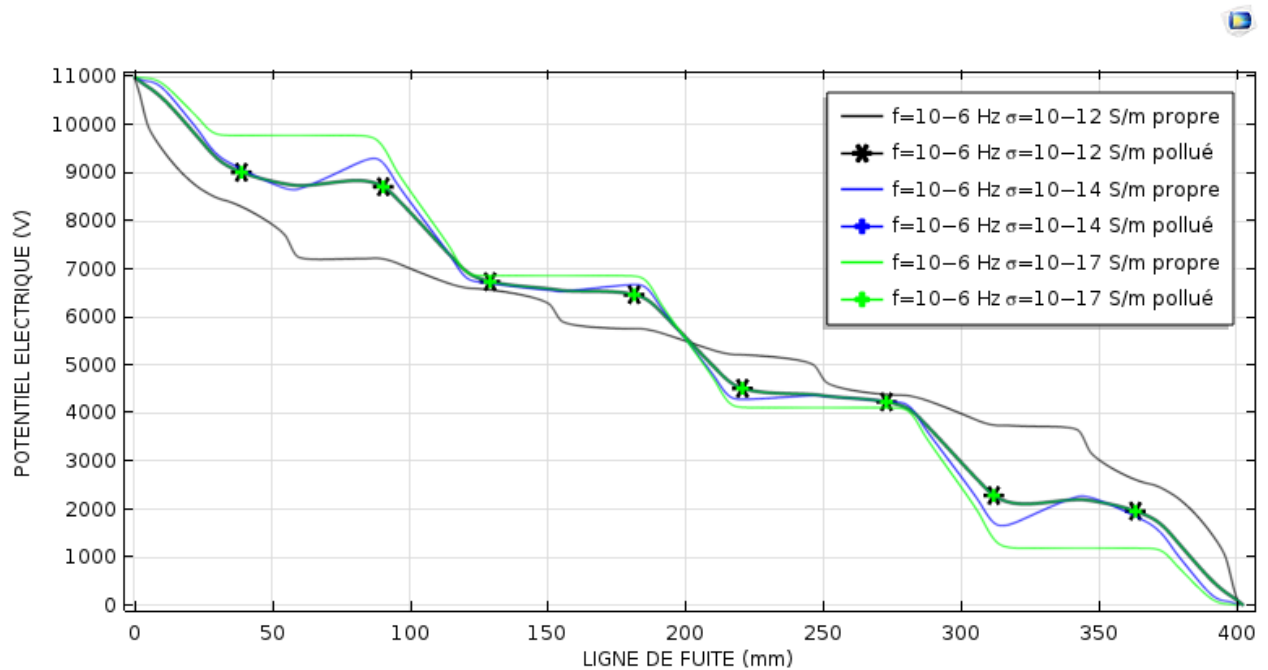
Figure III.17: Influence de la variation de la conductivité de l'air sur le potentiel et le champ électrique pour la fréquence $f=10^{-5}$ Hz.

III.4.2.7 Influence de la conductivité de l'air pour la fréquence $f=10^{-6}$ Hz:

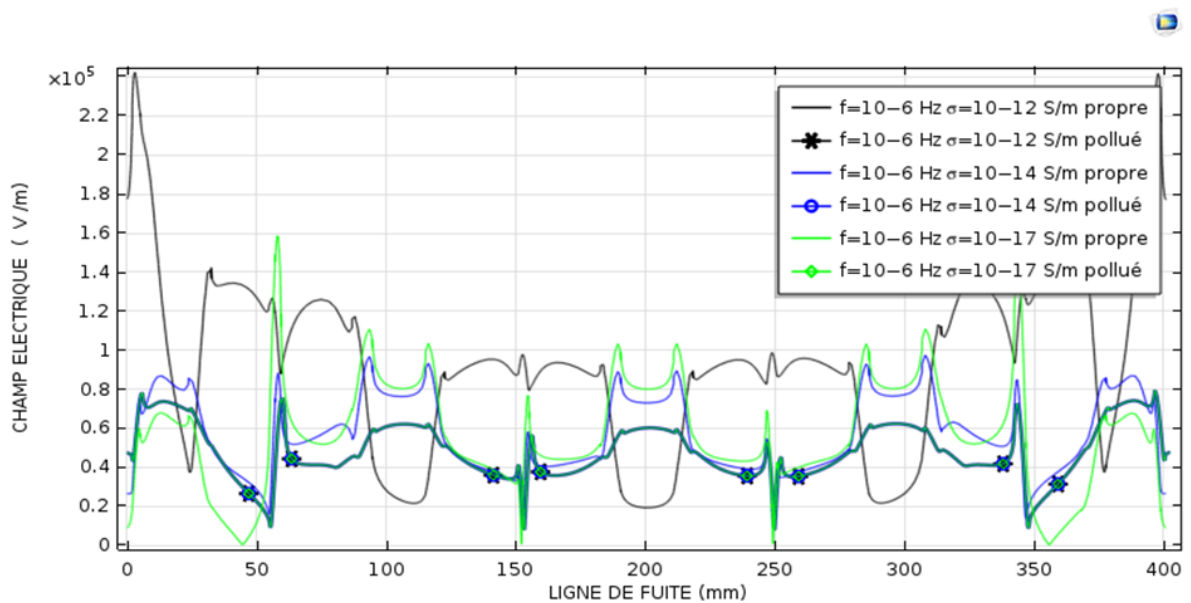
On appliqué sur la partie sous tension du modèle une tension AC de fréquence 10^{-6} Hz.

La figure III.18-(a) représente la répartition du potentiel électrique le long de la ligne de fuite de l'isolateur en fonction des différentes valeurs de conductivité de l'air.

La figure III.18-(b) représente la variation du champ électrique le long de la ligne de la fuite de l'isolateur en fonction des différentes valeurs de conductivité de l'air.



(a)



(b)

Figure III.18: Influence de la variation de la conductivité de l'air sur le potentiel et le champ électrique pour la fréquence $f=10^{-6}$ Hz.

Analyse :

Pour une couche de pollution d'épaisseur 0.5mm nous constatons que les courbes ont la même forme ; donc la variation de la fréquence et la conductivité de l'air n'influent pas sur potentiel et le champ électrique le long de la ligne de fuite de l'isolateur.

D'autre part; on peut remarquer que seulement un changement minime qui a eu lieu (le cas propre et pollué) .Comme il était attendu la pollution influe légèrement sur la distribution du potentiel et champ électrique ce qui veut dire que l'isolateur n'est pas contraint de la même manière ce qui favorise l'apparition des contournements

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté l'influence de la variation de la fréquence et de la conductivité de l'air sur le potentiel et le champ électrique pour le cas propre et pollué.

Les importants résultats obtenus par cette étude sont:

- ✓ Sous tension à **fréquence industrielle** 50 Hz, la distribution de la tension n'est pas influencée par la conductivité de l'air
- ✓ Comme la **conductivité** augmente, la distribution de tension sous tension continue donne un comportement plus non linéaire que condition AC.
- ✓ Lorsque la conductivité de l'air est supérieure à celui du matériau de silicone, l'intensité du champ électrique est maximale.
- ✓ Pour une couche de pollution d'épaisseur 0.5mm, la variation de la fréquence et la conductivité de l'air n'influent pas sur le potentiel et le champ électrique.
- ✓ La pollution influe légèrement sur la distribution du potentiel et champ électrique si on compare le cas propre et le cas pollué.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Notre travail se concentre sur l'étude et analyse de champ électrique et la distribution de potentiel pour un isolateur silicone sous conditions AC et DC puisque la connaissance de la distribution du champ a une grande importance dans son processus de conception. La fréquence 50Hz de la tension a été prise en compte pour les études en courant alternatif AC. En plus, une approche basse fréquence a été utilisée pour représenter état du courant continu CC. Le champ électrique et la distribution de potentiel ont été obtenus le long de la ligne de fuite de l'isolant par à l'aide d'un modèle 2D dans des conditions d'isolant propre et pollué, l'influence de la conductivité de l'air sur les distributions de champ a été étudiée et discuté en détail en particulier pour les conditions DC.

La distribution du champ sous condition DC est différente de Condition AC et conductivité de l'air ambiant joue un rôle important dans la distribution du champ CC. Lorsque la conductivité de l'air est inférieure à celle du matériau en silicone, par ex. 10^{-17} S/m, la distribution de potentiel DC donne un comportement linéaire. Dans ce cas, chaque ailette du l'isolateur se comporte comme une surface équipotentielle, et le maximum des intensités du champ électrique se produisent à l'extrémité des ailettes. Donc, la conception de l'ailette prend une grande importance dans cette condition.

De plus, l'amplitude des intensités du champ électrique DC est plus grande que celle de la condition AC.

Lorsque la conductivité de l'air est supérieure à celle de silicone, par ex. 10^{-12} S/m, la distribution du potentiel DC montre un comportement hautement non linéaire, encore pire que l'état AC. Dans ce cas, encore une fois, l'amplitude du champ maximum pour le cas DC est supérieure à celui du cas AC, mais pas au même endroit.

Pour les valeurs de conductivité de l'air inférieures ou supérieures à celle de silicone, et compte tenu des tensions AC et DC avec les mêmes valeurs de crête, les intensités de champ les plus élevées se produisent pour le cas DC.

Dans l'approche basses fréquence, par ex. 10^{-6} Hz ou fréquence inférieure dans cette étude, peuvent être utilisés pour refléter la condition DC correctement. Pour un isolant propre, et une valeur d'air plus faible valeur de conductivité (c'est-à-dire 10^{-17} S/m), fréquence $f \geq 10^{-3}$ Hz le comportement de la distribution du champ est capacitif, pour $f \leq 10^{-6}$ Hz la

distribution de champ est résistive, et entre ces deux seuils de fréquence produisent une distribution de champ capacitif-résistif.

Pour une couche de pollution d'épaisseur 0.5mm, la variation de la fréquence et la conductivité de l'air n'influent pas sur la distribution de potentiel et de champ électrique.

La pollution influe légèrement sur la distribution du potentiel et champ électrique si on compare le cas propre et le cas pollué.

Bibliographie

- (1) M. Farzaneh, (chair) et al « Selection of Line Insulators with respect to Ice and Snow, Part I: Context and Stresses ». A position paper prepared by the IEEE Task Force on icing performance of line insulators, IEEE Trans, on Power Delivery, vol. 22, no. 4, pp. 2289-2296, octobre 2007.
- (2) HAMZA Slamet Amina «contribution à l'étude de model développé d'un isolateur pollue» s.l. mémoire magister, université des sciences et de la technologie d'Oran u.s.t.o - Mohamed Boudiaf, 20/01/2013.
- (3) A.Tilamtine « cours techniques de la haute tension », université DJILLALI LIABES.
- (4) D.Dumora, "Matériaux isolant céramique en électrotechnique", Technique de l'ingénieur D275
- (5) M.Terkmani, M .Bouamer, "Contournement des isolateurs des lignes de haut tension", PFE, USTO, Juin 2005
- (6) SATTA Samia, «contribution à l'étude de l'influence de la pollution discontinue sur le comportement des isolateurs : expérimentation et simulation », thèse de magister en Génie Electrique, Faculté de technologie, Université Ferhat Abbas- Stif
- (7) F.Amidi, K.Ouerdane, " Les effets de la pollution sur les ouvrages électriques à 30 kV en régions littorales ", Projet de fin d'Etude, Département d'électrotechnique, Université des Sciences et Technologies Houari Boumediene, Bab Ezzouar, juin 1998.
- (8) L.Arrabiy, " Visualisation et Traitement de Signal de Courant de Fuite sur une Surface Isolante Polluée" PFE, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger (E.N.P), 1999
- (9) ABIMOULOUD. Adel. « Comportement d'une surface isolante partiellement polluée sous tension alternative 50hz ». s.l. : thèse de magister en Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique Alger Décembre, 1999.
- (10) MEKHALDI. Abdelouahab. «Etude des phénomènes de conduction et de décharge électrique sur des surfaces isolantes polluées sous tension alternative 50 Hz». s.l. : Thèse de doctorat d'Etat en Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique Alger , 1999.
- (11) M. Tegar. Etude mathématique des mécanismes de développement des décharges électriques sur des isolateurs installés en régions polluées. s.l. : Mémoire Magister, Génie Electrique, ENP , 1993.
- (12) D. Namane. Effet de la discontinuité de la pollution sur le comportement d'isolateur haute tension, sous la fréquence de 50 Hz. s.l. : Mémoire de Magister, Génie Electrique, ENP, 1998
- (13) Mekhaldi, H.Boudjelthia,. "Contribution à l'étude de la pollution des isolateurs de haute tension dans la région électrique de Annaba". s.l. : PFE, Génie Electrique, ENP, 1984.
- (14) Spécification technique one st n° c64 – l64 isolateurs en verre, Office national de l'électricité, Maroc édition décembre 2003
- (15) ROBERT D. COOK, DAVID S. Malkus and Michael E. plesha , « Concepts and applications of finit element analyses » . University of Wisconsin-Madison, john wiley & sons 1988.
- (16) TURNER G. ET DHATT G, «Une présentation de la méthode des éléments finis », Eds.P.U.L.Q., France, 1981.
- (17) ARGYRIS J.H. AND KELSEY S, « Energy theorems and Structural Analysis ». Butterworh, London, 1960
- (18) MEZIANI NEDJMA, Mémoire de magister« contribution de l'approche en déformation dans la modélisation des structures a contour circulaire ». Université de Med Khider Biskra 2006.
- (19) Hervé Oudin. Méthode des éléments finis. Engineering school. Ecole Centrale de Nantes, 2008, pp.63. ffccl-00341772v1f.

- (20) Yves Debard « Modélisation Numérique et Réalité Virtuelle », mémoire Master Université du Maine.
- (21) BATOZ J.L. ET DHATT G, « Modélisation des structures par éléments finis. Poutres et Plaques ». Vol. 2: élastiques, Eds Hermès, Paris, 1990.
- (22) FRE F. ET JIROUSK J, « Analyse des structures et milieux continus, Méthode des éléments finis » .Vol.6 Eds P.P.U.R., 1èreEdition, Lausanne, 2001.
- (23) ANTOINE LEGAY. « Calcul des structures par éléments finis » CNAM-Paris, Édition (2012).
- (24) ZIENKIEWCZ O.C ET TAYLOR R.L, « The Finite element Method », Mc Graw Hill, London 1991.
- (25) BATHE K.J. « Finite Element Procedures » .Prentice Hall, 1996.
- (26) LAKHDAR BESSAIS. « Analyse des structures par la M.E.F basée sur l'approche en déformation » . chapitre 01 Mémoire mestre université Biskra 2012.
- (27) COMSOL Multyphysics User's Guide, version 3.5a, [logiciel], Burlington, Ma. : COMSOL, Inc., novembre 2008.
- (28) Nisrine Mhaguen, « Développement de modèles dynamiques de prédiction de la tension critique de contournement des isolateurs recouverts de glace basés sur la méthode des éléments finis », thèse d'ingénierie, Université de Québec à Chicoutimi, 2011
- (29) Arshad Nekahi A, McMeekin SG, Farzaneh M (2018) Measurement of surface resistance of silicone rubber sheets under polluted and dry band conditions. *Electr Eng* 100:1729–1738. <https://doi.org/10.1007/s00202-017-0652-x>
- (30) Anbarasan R, Usa S (2015) Electric field computation of polymeric insulator using reduced dimension modeling. *IEEE Trans Dielectr Electr Insul* 22(2):739–746. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2015.7076770>
- (31) Chandrasekar S, Sarathi R, Danikas MG (2007) Analysis of surface degradation of silicone rubber insulation due to tracking under different voltage profiles. *Electr Eng* 89:489–501. <https://doi.org/10.1007/s00202-007-0114-4>. Zhao T, Comber MG (2000) Calculation of electric field and potential distribution along non-ceramic insulators considering the effects of conductors and transmission towers. *IEEE Trans Power Deliv* 15(1):313–318. <https://doi.org/10.1109/61.847268>
- (32) Whiteley J (2017) *Finite element methods a practical guide*. Springer, Oxford
- (33) Hayt HW, Buck JA (2012) *Engineering electromagnetics*. McGraw-Hill, New York
- (34) Quin S et al (2016) the influence of the insulator volume conductivity on charge accumulation in HVDC-GIL. In: 2016 IEEE electrical insulation conference (EIC), Montreal, QC, Canada, pp. 325–328. <https://doi.org/10.1109/eic.2016.7548593>
- (35) Okubo H (2018) HVDC electrical insulation performance in oil/pressboard composite insulation system based on kerr electrooptic field measurement and electric field analysis. *IEEE Trans Dielectr Electr Insul* 25(5):1785–1797. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2018.007187>
- (36) Jaiswal V, Farzaneh M, Lowther DA (2005) Impulse flashover performance of semiconducting glazed station insulator under icing conditions based on field calculations by finite-element method. *IEE Proc Gener Transm Distrib* 152(6):864–870. <https://doi.org/10.1049/ip-gtd:20045231>.
- (37) Halil Ibrahim , Baris Karaca ,Suat Ilhan (2020) ANALYSE ET VERIFICATION EXPERIMENTALE DES CHAMPS ELECTRIQUES DC ET AC D'UN ISOLATEUR EN CAOUTCHOUC DE SILICONE ,*Electr Eng*,Springer, <https://doi.org/10.1007/s00202-020-00954-3>.
- (38) Othman NA et al (2014) Characterization of charge distribution on the high voltage glass insulator string. *J Electrostat* 72:315–321. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2014.05.003> Publisher's Note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.