

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT : GENIE
ELECTRIQUE N° D'ORDRE: RE-



DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIES
FILIERE : ELECTROTECHNIQUE
SPECIALITE : RESEAUX ELECTRIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU
DIPLOME DE MASTER

Présenté par
LORABI Khaled

Intitulé

Etude de l'influence des conditions polluées sur la
tension de contournement d'un isolateur en
porcelaine en utilisant la méthode ANOVA

Soutenu le : 11 / 06 / 2024 devant le jury composé de :

| | | |
|-----------------------|-------------------------------------|-----------|
| Dr. ZEMMIT Abderrahim | Université Mohamed Boudiaf - M'SILA | Président |
| Dr. BELHOUCHE Khaled | Université Mohamed Boudiaf - M'SILA | Encadreur |
| Dr. ZORIG Assam | Université Mohamed Boudiaf - M'SILA | Examineur |

Année universitaire : 2023 / 2024

Remerciements

Avant tout, je rends grâce à Allah, le Tout-Puissant, pour la force, la santé et la patience qu'il m'a octroyées tout au long de ces années d'étude et de recherche.

Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude à mon encadreur, Dr. Khaled Belhouchet, pour son accompagnement assidu et ses précieux conseils durant l'élaboration de ce mémoire.

Mes remerciements s'adressent aussi à l'ensemble des enseignants et au chef du département de Génie électrique de l'Université pour leur rôle significatif dans mon parcours académique. De même, je suis reconnaissant envers les membres du jury qui ont évalué ce travail avec rigueur.

Enfin, je souhaite exprimer ma reconnaissance à mes amis et collègues pour leur soutien moral indéfectible. Je suis également reconnaissant à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à l'accomplissement de ce projet.

Dedicase



Je dédie ce travail à mes parents, les piliers de mon existence, pour leur amour sans bornes et leur soutien inébranlable.

Aux membres de ma famille, mes compagnons de toujours, pour leurs encouragements et leur présence constante, je vous offre le fruit de mon travail.

Et à mon professeur, le Dr. Khaled Belhouchet, je tiens à exprimer toute ma gratitude et mon respect. je vous présente ce travail avec une grande fierté et reconnaissance pour votre guidance éclairée.



Khaled LORABI

Résumé

La fiabilité du système électrique dépend en grande partie de la bonne performance des isolateurs haute tension, qui doivent résister à toutes les conditions météorologiques. La déposition de pollution sur les surfaces des isolateurs peut entraîner une chute significative de leur efficacité et même des perturbations électriques importantes. Les effets de divers paramètres de couches de pollution, notamment la conductivité, la position et la longueur de couche, sur les performances des isolateurs en céramique ont été étudiés. En utilisant l'analyse de variance statistique et la méthodologie de surface de réponse, l'étude a évalué les effets individuels et interactifs de ces paramètres sur le champ électrique maximal et la tension de contournement. L'étude a employé un modèle 3D issu de Comsol Multiphysics et des simulations effectuées par la méthode des éléments finis (FEM) pour étudier les relations entre ces paramètres. Les résultats ont révélé que le champ électrique le long de surface non uniformément contaminée est principalement influencée par la longueur de la couche de pollution. Les simulations ont montré que l'intensité du champ électrique augmente avec la longueur et la position de la couche de pollution. Les résultats de l'étude peuvent informer la conception et la configuration des isolateurs utilisés dans les régions polluées, et la méthode développée offre une approche fiable et réaliste pour estimer les performances de pollution des isolateurs en céramique cylindriques en porcelaine.

Mots-clés : Porcelaine, Pollution, Champ électrique, Méthode des éléments finis (MEF), ANOVA, Simulation.

Abstract

The reliability of a high-voltage electrical system depends largely on the ability of outdoor high-voltage insulators to withstand varied weather conditions. Deposits of pollution on the surfaces of these insulators can lead to a significant degradation of their performance and potentially cause major electrical disruptions. The effects of various pollution layer parameters, including conductivity, position, and length, on the performance of high-voltage cylindrical insulators were examined. By using statistical variance analysis and response surface methodology, the study evaluated the individual and interactive effects of these parameters on the flashover voltage, maximum electric field, and breakdown strength. The study employed a 3D model from Comsol Multiphysics and finite element method (FEM) simulations to investigate the relationships between these parameters. The findings revealed that the flashover voltage of non-uniformly contaminated surfaces is primarily influenced by the length of the pollution layer. Simulations showed that the electric field intensity increases with the length and position of the pollution layer. The study's findings can inform the design and configuration of insulators used in polluted regions, and the developed methodology offers a reliable and realistic approach for estimating the pollution performance of cylindrical porcelain insulators.

Keywords: Porcelain, Pollution, Electric field, Finite Element Method (FEM), ANOVA, Simulation.

ملخص

تعتمد موثوقية النظام الكهربائي إلى حد كبير على الأداء الجيد لعوازل الجهد العالي، والتي يجب أن تتحمل جميع الظروف الجوية. يمكن أن يؤدي ترسب التلوث على أسطح العوازل إلى انخفاض كبير في كفاءتها وحتى حدوث اضطرابات كهربائية كبيرة. تمت دراسة تأثير عوامل طبقة التلوث المختلفة، بما في ذلك الموصلية، الموقع وطول طبقة التلوث ، على أداء العوازل الخزفية. باستخدام التحليل الإحصائي للتباين ومنهجية سطح الاستجابة، قامت الدراسة بتقييم التأثيرات الفردية والتفاعلية لهذه المعلمات على ذروة المجال الكهربائي. استخدمت الدراسة نموذجًا ثلاثي الأبعاد من باستخدام **Comsol Multiphysics** والمحاكاة التي بواسطة طريقة العناصر المحدودة (FEM) لدراسة العلاقات بين هذه المعلمات. أظهرت النتائج أن المجال الكهربائي على طول السطح الملوث يتأثر بشكل رئيسي بطول طبقة التلوث. وأظهرت عمليات المحاكاة أن شدة المجال الكهربائي تزداد مع طول وموقع طبقة التلوث. يمكن لنتائج الدراسة أن تفيد تصميم وتكوين العوازل المستخدمة في المناطق الملوثة، وتوفر الطريقة المطورة نهجًا موثوقًا وواقعيًا لتقدير أداء التلوث للعوازل الخزفية الأسطوانية.

الكلمات المفتاحية: الخزف، التلوث، المجال الكهربائي، طريقة العناصر المحدودة (FEM)، تحليل التباين، المحاكاة.

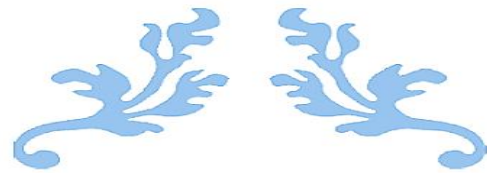


Table des Matières



Table des Matières

| | |
|---------------|-----|
| Résumé..... | v |
| Abstract..... | vi |
| ملخص..... | vii |

Chapitre 1 Introduction Générale

| | |
|--------------------------------|----|
| 1.1. Contexte Général..... | 15 |
| 1.2. Problématique..... | 16 |
| 1.3. Objectifs..... | 17 |
| 1.4. Structure du Mémoire..... | 17 |

Chapitre 2 Revue de Littérature

| | |
|--|----|
| 2.1. Introduction..... | 19 |
| 2.2. Isolateurs en porcelaine..... | 19 |
| 2.2.1. Définitions..... | 19 |
| 2.2.2. Types des isolateurs céramiques..... | 20 |
| 2.2.3. Le Contournement..... | 22 |
| 2.2.4. Fonctionnement d'un isolateur..... | 24 |
| 2.2.5. Constitution d'un isolateur..... | 25 |
| 2.2.6. Caractéristique d'un isolateur..... | 25 |
| 2.2.7. Avantages des isolateurs en porcelaine..... | 26 |
| 2.2.8. Inconvénients des isolateurs en porcelaine..... | 27 |
| 2.3. Pollution des isolateurs..... | 27 |
| 2.3.1. L'origine de la pollution..... | 28 |
| 2.3.2. Formation et répartition de la couche de pollution..... | 29 |
| 2.3.3. Sources de pollution..... | 30 |
| 2.3.4. Influence des conditions climatiques sur la distribution de la pollution..... | 32 |
| 2.3.5. Conséquences de la pollution..... | 32 |
| 2.3.6. Contournement des isolateurs pollués..... | 32 |
| 2.3.7. Modèles de contournement..... | 33 |
| 2.4 Conclusion..... | 35 |

Chapitre 3

Modélisation et simulation d'un isolateur cylindrique en porcelaine

| | |
|---|----|
| 3.1. Introduction..... | 37 |
| 3.2. COMSOL Multiphysics | 37 |
| 3.2.1. L'interface graphique de COMSOL..... | 38 |
| 3.3. Simulation | 43 |
| 3.3.1. Modèle de l'isolateur étudié | 43 |
| 3.3.2. Propriétés des matériaux | 45 |
| 3.3.3. Conditions aux limites..... | 45 |
| 3.3.4. Résultats de Simulation | 46 |
| 3.4 Conclusion..... | 49 |

Chapitre 4

Analyse des Variances ANOVA

| | |
|---|----|
| 4.1. Introduction | 51 |
| 4.2. Analyse des variances (ANOVA)..... | 52 |
| 4.3. Résultats et Discussions | 54 |
| 4.4. Conclusion | 59 |

Chapitre 5

Conclusions Générales

| | |
|----------------------------------|----|
| 5.1. Conclusions Générales | 61 |
|----------------------------------|----|

Liste des Figures

Chapitre 2 Revue de Littérature

| | |
|---|----|
| Figure 2. 1. Photo représente un isolateur en porcelaine | 20 |
| Figure 2. 2. Isolateurs à Capot et tige..... | 20 |
| Figure 2. 3. Isolateurs à noyau central | 21 |
| Figure 2. 4. Isolateurs à fûts multiples | 21 |
| Figure 2. 5. Isolateurs suspendus | 22 |
| Figure 2. 6. contournement d'un isolateur | 23 |
| Figure 2. 7. Les caractéristiques d'un isolateur..... | 26 |
| Figure 2. 8. Entretien des isolateurs sous pollution..... | 28 |
| Figure 2. 9. Etapes déroulement du contournement sur une surface polluée | 33 |
| Figure 2. 10. Circuit électrique équivalent d'après Obenaus | 34 |

Chapitre 3 Modélisation et simulation d'un isolateur cylindrique en porcelaine

| | |
|---|----|
| Figure 3. 1. Démarrage de la fenêtre du logiciel. | 38 |
| Figure 3. 2. Fenêtre de « SELECT SPCAE »..... | 38 |
| Figure 3. 3. Fenêtre de « Select Physics (MODEL)»..... | 39 |
| Figure 3. 4. Fenêtre "SELECT STUDY TYPE" | 39 |
| Figure 3. 5. Géométrie d'isolateur | 40 |
| Figure 3. 6. Matériaux de l'isolateur..... | 40 |
| Figure 3.7. Permittivités relatives et conductivités électriques pour chaque partie de l'isolateur. | 41 |
| Figure 3. 8. Conditions aux limites | 41 |
| Figure 3. 9. Maillage d'isolateur..... | 42 |
| Figure 3. 10. Résultats de simulation..... | 42 |
| Figure 3. 11. Diagramme de différentes étapes de résolution dans Comsol..... | 43 |
| Figure 3. 12. La géométrie de l'isolateur étudié..... | 44 |

| | |
|---|----|
| Figure 3.13. Distribution du champ électrique le long d'un isolateur pollué de manière non uniforme l'extrémité de terre, près de l'extrémité alimentée et au centre. | 46 |
| Figure 3.14. Fig.12.Electric field distribution along a cylindrical porcelain insulator with pollution layer length (a) 4 mm (b) 8 mm and (c) 12 mm..... | 47 |
| Figure 3.15. Distribution du champ électrique le long d'un isolant en porcelaine cylindrique avec différentes longueurs de couche de pollution | 47 |
| Figure 3.16. Répartition du champ le long d'un isolant cylindrique en porcelaine avec une position de pollution (a) près de la HT (b) au milieu et (c) à la terre | 48 |
| Figure 3.17. Distribution du champ électrique le long d'un isolant en porcelaine cylindrique avec différentes positions de la couche de pollution | 49 |

Chapitre 4

Analyse des Variances ANOVA

| | |
|--|----|
| Figure 4.1. Graphiques des principaux effets des paramètres de la couche de pollution sur la tension de contournement | 54 |
| Figure 4.2. Graphique de probabilité normale de la tension de claquage à un intervalle de confiance de 95%..... | 55 |
| Figure 4.3. Graphiques des principaux effets des paramètres de la couche de pollution sur le Champ Electrique | 56 |
| Figure 4.4. Graphique de probabilité normale du champ électrique maximal, à un intervalle de confiance de 95%..... | 57 |
| Figure 4.5. Graphiques des principaux effets des paramètres de la couche de pollution sur la résistance à la rupture..... | 58 |
| Figure 4.6. Graphique de probabilité normale de la résistance à la rupture à un intervalle de confiance de 95%..... | 59 |

Liste des Tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau 2. 1. Contaminants et leurs sources..... | 29 |
| Tableau 3. 1. Propriétés de chaque paramètre de l'isolateur | 45 |
| Tableau 4. 1. Paramètres de pollution non uniforme et leurs niveaux étudiés..... | 52 |
| Tableau 4. 2. Les résultats de calcul..... | 53 |

Chapitre 1

Introduction Générale



1.1. Contexte Général

Le domaine de l'énergie électrique, englobant la conception et l'exploitation des systèmes de production, de transport et de distribution, a connu une série d'évolutions majeures depuis la fin des années 1970 [1]. Les composants à haute tension, tels que les câbles, les pylônes et les isolateurs, sont essentiels aux réseaux aériens de transport de l'électricité, conçus pour fonctionner de manière fiable dans toutes les conditions environnementales [2]. Malgré leur faible impact financier global, les isolateurs jouent un rôle critique dans le bon fonctionnement des lignes aériennes [3]. Les lignes et les stations de transport électrique sont confrontées à diverses contraintes, la pollution des isolateurs étant l'une des plus préoccupantes en termes de qualité et de fiabilité du transport d'électricité [4]. Par exemple, par temps humide, les dépôts polluants peuvent sérieusement compromettre l'isolation des isolateurs, augmentant le risque de défaillance [5]. Les isolateurs revêtent une importance capitale dans la conception des lignes aériennes, assurant l'isolement électrique entre les conducteurs sous tension et les supports [6]. Le choix approprié des isolateurs, ainsi que des procédures de contrôle et de surveillance rigoureuses, sont essentiels pour garantir le bon fonctionnement et la fiabilité des lignes électriques [7]. En effet, la qualité et la performance des isolateurs utilisés jouent un rôle crucial dans la fiabilité globale du transport d'énergie électrique [8]. Les isolateurs en porcelaine sont des composants fondamentaux dans les réseaux de distribution et de transmission d'électricité [9]. Leur structure en porcelaine les rend résistants à la corrosion et aux intempéries, en en faisant un choix privilégié pour les applications en extérieur. Ces isolateurs sont couramment utilisés pour soutenir les lignes aériennes électriques et maintenir une isolation électrique adéquate [10]. Bien que les isolateurs en porcelaine présentent de nombreux avantages, ils peuvent être sensibles à la pollution atmosphérique, ce qui

peut affecter leur performance [11]. Par conséquent, un entretien régulier et des procédures de nettoyage sont souvent nécessaires pour assurer leur bon fonctionnement à long terme. La surface des isolateurs est compromise par cette pollution, ce qui modifie leurs propriétés électriques et accroît le risque de claquages, pouvant perturber l'alimentation électrique. La pollution pose un tel problème car elle entraîne un vieillissement prématuré et une dégradation des performances de l'isolateur.

1.2. Problématique

Les isolateurs sont des composants électriques essentiels dans de nombreux domaines tels que l'énergie, les télécommunications, etc. Cependant, la présence de pollution dans l'environnement peut avoir un impact négatif sur leur fonctionnement et leur durée de vie. Les isolateurs en porcelaine sont particulièrement sensibles à la pollution en raison de leur structure cristalline unique qui peut être altérée par les substances chimiques présentes dans l'environnement. Les polluants peuvent pénétrer dans les porosités de l'isolateur et réduire sa résistance à la fuite, ce qui peut entraîner une dégradation de sa performance et une augmentation du risque de perte de fonctionnalité [12]. Les isolateurs en porcelaine sont également vulnérables aux attaques chimiques et aux agents de corrosion, ce qui peut réduire leur durée de vie. Dans le contexte des installations électriques à haute tension, la pollution peut avoir des conséquences graves pour la sécurité et la stabilité du réseau. Les défaillances d'isolateurs peuvent entraîner des perturbations dans la distribution de l'énergie, des incendies, des chocs électriques et des dommages aux équipements [13]. En outre, les isolateurs en porcelaine sont utilisés dans de nombreux domaines tels que l'industrie énergétique, où la sécurité et la fiabilité sont essentielles. La dégradation de leurs performances peut avoir des conséquences importantes sur la sécurité et la disponibilité des systèmes [14]. Les problèmes liés à la pollution des isolateurs en porcelaine sont donc nombreux et complexes. Il est donc essentiel de développer des solutions pour réduire l'impact de la pollution sur les isolateurs en général et en particulier sur les isolateurs en porcelaine.

1.3. Objectifs

Dans Ce mémoire, les impacts de la pollution sur le fonctionnement d'un isolateur cylindrique en porcelaine sont étudiés. Ce travail vise à évaluer l'effet des couches de pollution non uniformes sur les performances des isolateurs cylindriques en porcelaine à haute tension, en examinant l'influence de la conductivité, de la position et de la longueur de la couche de pollution sur les caractéristiques électriques des isolateurs. L'étude examinera divers scénarios de pollution, y compris la pollution près du côté énergisé (HT), près du côté terre et au milieu de la surface de l'isolateur, et évaluera l'impact de la longueur et de la conductivité de la couche de pollution en utilisant des couches avec des valeurs variables. Le logiciel Comsol Multiphysics, basé sur la méthode des éléments finis, est employé pour réaliser différentes simulations dans cette étude. Pour l'analyse, un modèle statistique est utilisé afin d'explorer la relation entre les caractéristiques de l'isolateur et les paramètres de la couche de pollution, notamment sa position et sa conductivité. Ces paramètres sont systématiquement variés au cours de l'étude. La technique statistique de l'analyse de la variance (ANOVA) est employée pour évaluer l'impact de chaque paramètre sur les résultats.

1.4. Structure du Mémoire

Le présent mémoire est organisé en 5 chapitres qui se présentent comme suit :

- Introduction : Ce premier chapitre expose la problématique, les objectifs et la méthodologie de cette étude.
- Concepts fondamentaux : Le deuxième chapitre explore les notions de base liées aux isolateurs haute tension, à la pollution et au phénomène de contournement.
- Distribution du champ et du potentiel électrique avec pollution: Le troisième chapitre présente l'analyse de la distribution du potentiel et du champ électrique le long de l'isolateur pollué,
- Analyse des variances : Le quatrième chapitre présente les résultats obtenus par l'analyse ANOVA.
- Conclusions générales : Enfin, le cinquième chapitre résume les conclusions générales tirées de cette étude.

Chapitre 2

Revue de littérature



2.1. Introduction

Un isolateur est un composant essentiel qui assure la liaison mécanique entre les conducteurs sous tension et les structures de support, tout en garantissant l'isolation électrique entre eux. Il se compose de deux parties : une partie isolante en verre, porcelaine ou matériau composite (comme le silicone), et une seconde partie constituée d'éléments métalliques ou en fibre de verre qui assurent la connexion scellée avec le diélectrique.

Les principaux types d'isolateurs sont les isolateurs rigides et les isolateurs de suspension. Les premiers sont généralement fixés au support par une ferrure solide et sont couramment utilisés dans les lignes de distribution. Quant aux isolateurs de suspension, les plus fréquemment employés sont les isolateurs à capot et tige. Pour remplir leur rôle tout au long de la durée de vie d'une ligne, les isolateurs doivent présenter de bonnes propriétés mécaniques et électriques.

2.2. Isolateurs en porcelaine

2.2.1. Définitions

Un isolateur en porcelaine, également connu sous le nom d'isolateur de haute tension, est un composant électrique utilisé pour isoler des conducteurs électriques de haute tension entre eux ou de la terre. Il est fabriqué à partir de matières premières telles que le kaolin, le feldspath et le quartz, qui sont mélangées pour former une pâte céramique. Cette pâte est ensuite moulée ou façonnée en différentes formes, selon les besoins spécifiques de l'application [15]. Les isolateurs en porcelaine sont généralement utilisés dans les systèmes de transmission et de distribution électriques, tels que les lignes aériennes, les lignes souterraines, les transformateurs, les disjoncteurs, les interrupteurs, etc. Ils sont conçus pour résister aux hautes tensions électriques et aux

courants électriques, tout en protégeant les conducteurs électriques des dommages causés par la foudre, les courants parasites, les décharges électriques, etc. [16].



Figure 2. 1. Photo représente un isolateur en porcelaine

2.2.2. Types des isolateurs céramiques

2.2.2.1. *Isolateurs à chapeau et tige*

Ces isolateurs sont constitués d'une tige en porcelaine et d'un capot, généralement en porcelaine ou en métal. Ils sont couramment utilisés pour supporter les lignes électriques aériennes [2,4].

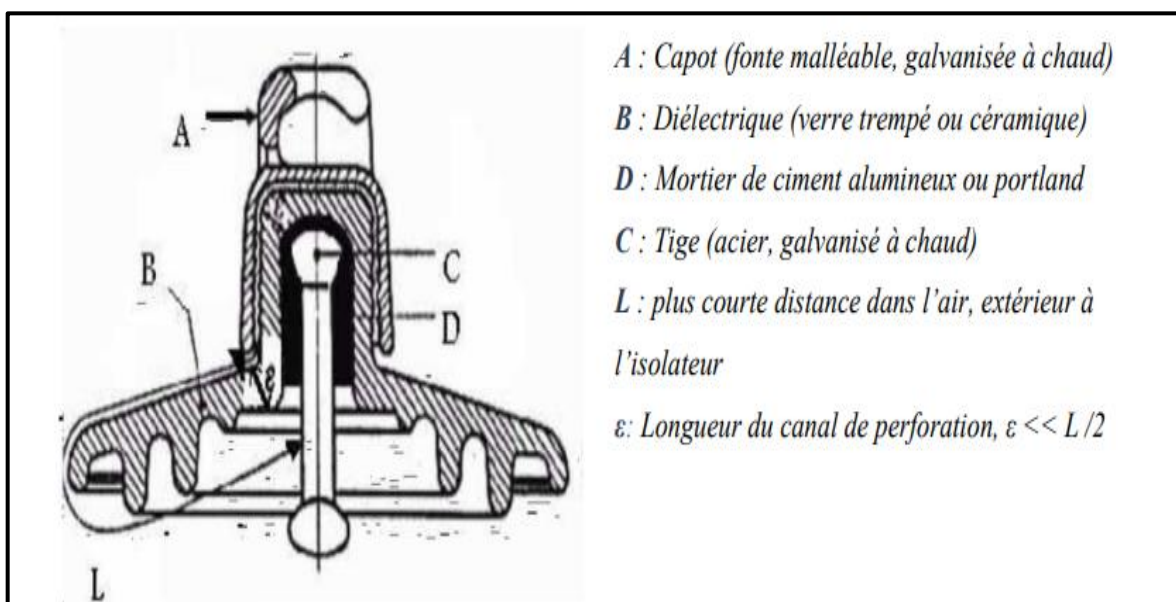


Figure 2. 2. Isolateurs à Capot et tige

2.2.2.2. *Isolateurs à noyau central*

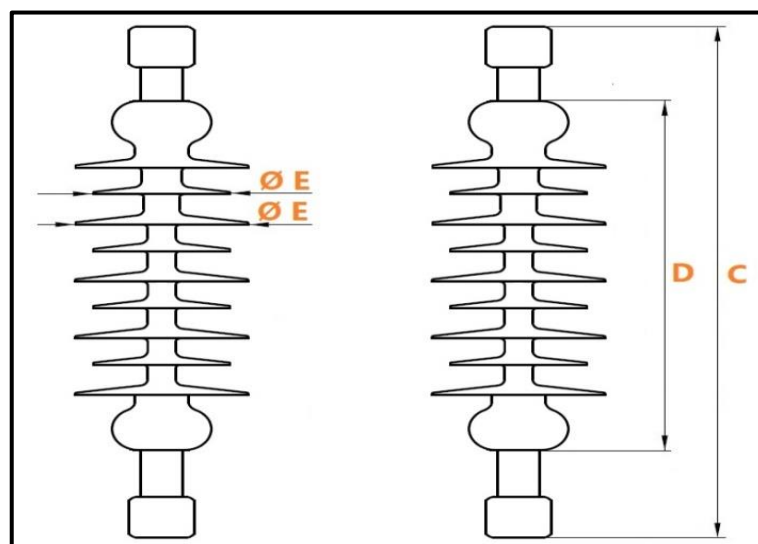
Ces isolateurs ont une conception monobloc avec un noyau central en porcelaine entouré d'anneaux ou de jupes en porcelaine. Ils sont souvent utilisés pour les lignes de transmission haute tension [17,18].



Figure 2. 3. Isolateurs à noyau central

2.2.2.3. *Isolateurs à fûts multiples*

Ces isolateurs sont constitués de plusieurs éléments cylindriques en porcelaine empilés, offrant une grande longueur de fuite électrique. Ils sont adaptés aux environnements pollués et aux hautes tensions [19,20].



D: Longueur de l'isolant C: Longueur totale

E: Diamètre des ailettes

Figure 2. 4. Isolateurs à fûts multiples

2.2.2.4. *Isolateurs suspendus*

Ces isolateurs sont conçus pour être suspendus aux lignes électriques aériennes. Ils peuvent être de type chapeau et tige ou en forme de cloche [21,22].



Figure 2. 5. Isolateurs suspendus

2.2.3. Le Contournement

Le contournement est l'un des principaux modes de défaillance des isolateurs en porcelaine, se produisant lorsqu'un arc électrique se forme le long de leur surface en raison d'une distance d'isolation insuffisante pour supporter la tension appliquée Figure 2.6. Cela peut être causé par la formation d'une bande sèche conductrice due à la pollution et à l'humidité [18].

Les facteurs influençant le contournement incluent les conditions environnementales, la conception de l'isolateur, la tension de service et la qualité de fabrication [23].



Figure 2. 6. Contournement d'un isolateur

2.2.3.1. Définitions

- **La tension de contournement** : également appelée tension de tenue, est la valeur minimale de tension à laquelle se produit un contournement électrique le long de la surface de l'isolateur. Elle est déterminée par des facteurs tels que la géométrie de l'isolateur, la distance de fuite électrique, le champ électrique maximal et la rigidité diélectrique de l'air environnant [20].
- **La tension de tenue**: est cruciale pour assurer une isolation adéquate et éviter les défaillances dues aux surtensions transitoires dans les systèmes électriques. Elle peut être réduite par des conditions environnementales défavorables, comme la pollution ou l'humidité [22].
- **Le courant de fuite** : est le courant qui circule le long de la surface de l'isolateur en raison de la pollution, de l'humidité ou d'autres facteurs environnementaux. Un courant de fuite élevé peut entraîner un échauffement excessif, une érosion de la surface et une diminution des performances [24].
- **Courant de fuite critique** : Le courant de fuite critique est la valeur maximale du courant de fuite que peut supporter un isolateur avant de subir une défaillance diélectrique, telle qu'un contournement ou un claquage électrique [15]). Cette

valeur dépend de facteurs tels que la géométrie de l'isolateur, la tension appliquée, les conditions environnementales et le niveau de pollution [16].

- **Le facteur de forme (F) d'un isolateur :** est une mesure qui dépend des dimensions physiques de l'isolateur. Pour déterminer ce facteur graphiquement, on représente la courbe de l'inverse du périmètre ($1/p$) en fonction de la longueur de la ligne de fuite partielle[4]. Le facteur de forme correspond à l'intégral de l'aire sous cette courbe, et il est calculé par la formule suivante :

$$F = \int_0^l \frac{1}{P(l)} dl$$

(l) représente la longueur partielle de l'isolateur en mètres (m)

($P(l)$) est le périmètre de l'isolateur qui varie avec la longueur de fuite partielle.

- **La ligne de fuite:** est le chemin le plus court que doit parcourir un courant de fuite ou une décharge électrique le long de la surface de l'isolateur [17]. Elle est généralement exprimée en centimètres ou en pouces.
- **La ligne de contournement :** est la distance la plus courte le long de la surface de l'isolateur qu'un arc électrique doit parcourir pour court-circuiter l'isolation [13].
- **La tension de perforation :** également appelée tension de claquage, est la valeur maximale de tension que peut supporter un isolateur avant qu'un claquage ou une perforation diélectrique ne se produise à travers son corps [14].
- **La longueur critique d'arc :** est la distance minimale le long de la surface d'un isolateur au-delà de laquelle un arc électrique ne peut plus s'amorcer ou se maintenir [17]. Cette longueur dépend de facteurs tels que le niveau de pollution, l'humidité, la géométrie de l'isolateur et la tension appliquée [13].

2.2.4. Fonctionnement d'un isolateur

Les isolateurs en porcelaine sont conçus pour assurer l'isolation électrique entre les conducteurs et les structures de support dans les systèmes de transport et de distribution d'électricité. Leur fonctionnement repose principalement sur leurs propriétés diélectriques, leur géométrie et leur résistance aux conditions environnementales.

- ❖ **Isolation diélectrique :**

La porcelaine, un matériau céramique vitrifié non poreux, possède une rigidité diélectrique élevée qui lui permet de supporter des champs électriques élevés sans se ioniser ou se claquer [14 ,18]. Cette propriété est essentielle pour assurer une isolation électrique efficace.

❖ **Géométrie et conception :**

La géométrie des isolateurs en porcelaine, avec des jupes ou des anneaux de garde, augmente la distance de fuite électrique et la ligne de contournement, améliorant ainsi la tension de tenue et réduisant le risque de contournement [19].

❖ **Résistance aux conditions environnementales :**

Les isolateurs en porcelaine sont conçus pour résister aux intempéries, à la pollution et aux variations de température grâce à leur composition et à leur structure robuste [6]. Cela leur permet de fonctionner de manière fiable dans des environnements extérieurs difficiles.

2.2.5. Constitution d'un isolateur

Les isolateurs en porcelaine sont constitués principalement d'un mélange de matières premières argileuses et de feldspath [15], qui sont cuits à haute température pour former un matériau céramique vitrifié non poreux.

Matières premières :

- Argiles (kaolin, ball clay, etc.)
- Feldspath
- Quartz
- Autres additifs (alumine, oxydes métalliques, etc.)

2.2.6. Caractéristique d'un isolateur

Dans le cadre des standards de test pour les isolateurs, certaines mesures clés sont établies :

- **Le pas (P) :** C'est l'écart entre deux éléments identiques sur des isolateurs successifs dans une série. Ce critère est essentiel pour déterminer la longueur totale d'une série d'isolateurs.

- **La ligne de fuite (Lf)** : Elle représente la distance minimale qui suit le profil de la surface isolante externe, calculée entre les composants métalliques.
- **La ligne de contournement (Lc)** : C'est la plus courte distance à travers l'air entre deux éléments conducteurs [21].

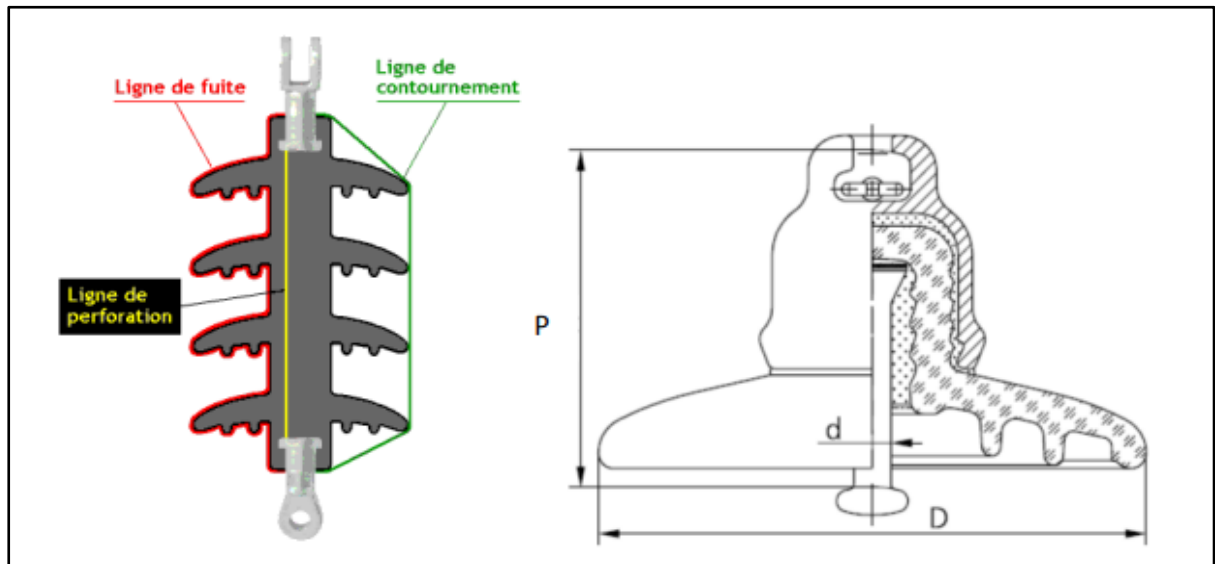


Figure 2. 7. Les caractéristiques d'un isolateur

2.2.7. Avantages des isolateurs en porcelaine

* **Stabilité dimensionnelle :**

Les isolateurs en porcelaine présentent une excellente stabilité dimensionnelle, même après avoir été soumis à des cycles thermiques ou à des charges mécaniques élevées. Cela garantit une fiabilité à long terme [25-27].

* **Résistance aux décharges couronnes :**

La surface lisse et non-corrodable des isolateurs en porcelaine contribue à réduire les décharges couronnes, qui peuvent endommager les isolateurs et provoquer des pertes d'énergie [23,24]

* **Longévité :** Grâce à leur composition et à leur structure robuste, les isolateurs en porcelaine ont une durée de vie très longue, pouvant atteindre plusieurs décennies dans des conditions d'utilisation normales [25,26].

- * **Facilité de nettoyage** : La surface lisse des isolateurs en porcelaine facilite leur nettoyage, ce qui permet de maintenir leurs performances d'isolation même dans des environnements pollués [6,16].

2.2.8. Inconvénients des isolateurs en porcelaine

- * **Fragilité** : Bien que résistants, les isolateurs en porcelaine sont relativement fragiles et peuvent se fissurer ou se briser en cas de chocs mécaniques importants ou de contraintes excessives [27].
- * **Sensibilité aux variations de température** : Les changements brusques de température peuvent provoquer des contraintes thermiques élevées dans les isolateurs en porcelaine, entraînant potentiellement des fissures ou des ruptures [26].
- * **Poids élevé** : En raison de leur composition et de leur conception massive, les isolateurs en porcelaine ont généralement un poids élevé, ce qui peut compliquer leur transport et leur installation [28].
- * **Coût de fabrication** : Le processus de fabrication des isolateurs en porcelaine, impliquant des températures de cuisson élevées et des contrôles de qualité stricts, peut entraîner des coûts de production plus élevés par rapport à certains autres types d'isolateurs [25].

2.3. Pollution des isolateurs

La contamination des isolateurs constitue une préoccupation majeure dans la gestion des systèmes de transmission et de distribution d'électricité. Les isolateurs s'encrassent lorsqu'ils entrent en contact avec l'air pollué et les particules de poussière. L'humidité transforme cette accumulation en un film conducteur qui réduit la résistance diélectrique, menant potentiellement à des pannes critiques. Ce problème est influencé par divers éléments, notamment le type de pollution, la conception de l'isolateur, et les conditions environnementales [32].

Lorsque les courants de fuite traversent ce film polluant, ils génèrent de la chaleur, asséchant localement la surface et causant des arcs électriques intermittents. Dans des circonstances extrêmes, ces arcs peuvent s'intensifier, entraînant le court-circuit des isolateurs et l'interruption du service électrique.



Figure 2. 8. Entretien des isolateurs sous pollution

2.3.1. L'origine de la pollution

Les contaminants affectant les isolateurs peuvent provenir de sources naturelles. Par exemple, les lignes électriques et les installations situées près des côtes sont susceptibles de se voir recouvertes d'une pellicule saline due aux embruns marins. Cette pellicule, une fois mouillée par le brouillard, devient conductrice d'électricité. De même, à proximité d'industries telles que les usines métallurgiques ou chimiques, les isolateurs peuvent s'enduire de particules solides minuscules. Bien que ces particules soient peu conductrices, elles absorbent l'humidité. Lorsqu'elles sont exposées à une humidité élevée, comme en présence de brouillard ou de pluie, les sels qu'elles contiennent se dissolvent, formant ainsi un électrolyte. Ces situations illustrent des cas classiques où la pollution des surfaces isolantes atteint un niveau critique. Cependant, il est incorrect de supposer que les zones éloignées du littoral ou des centres industriels sont à l'abri de toute forme de pollution.

Le tableau suivant résume certains contaminants, et leurs sources [33].

Tableau 2. 1. Contaminants et leurs sources

| Contamination naturelle anthropogénique | Source probable de pollution |
|--|---------------------------------------|
| H ⁺ | Atmosphère |
| NO, NO ₂ , CO ₂ , NO ⁻ ₄ , NH ⁻ ₃ , SO ₂ , NH ⁻ ₄ | Atmosphère, Fertilisation, combustion |
| SO, NO ⁻ ₃ , NH ⁺ ₄ , CL ⁻ | Mer, brouillard, précipitation |
| Na ⁺ , Mg ⁺⁺ , Ca ⁺⁺ , K ⁺ | Mer |

2.3.2. Formation et répartition de la couche de pollution

L'accumulation et la distribution de la pollution sur les isolateurs sont influencées par leur conception, leur hauteur et leur orientation (verticale, horizontale ou inclinée) par rapport au sol, ainsi que par le voltage appliqué. Typiquement, la pollution s'accumule davantage sur les parties des isolateurs proches du conducteur sous haute tension et dans les zones moins exposées aux éléments naturels nettoyants comme le vent et la pluie. Ainsi, la pollution n'est pas répartie de manière uniforme le long des chaînes d'isolateurs, et cette irrégularité s'accroît avec l'allongement des chaînes. On peut catégoriser l'irrégularité de la pollution en trois types principaux.

2.3.2.1. *Non-uniformité longitudinale par groupe*

Ce type de pollution se caractérise par des groupes d'isolateurs affectés par des niveaux de conductivité constants de la couche polluante, qui restent stables au sein de chaque groupe. Ce modèle de pollution est typiquement observé dans les situations suivantes :

- De façon temporaire durant les procédures de nettoyage des isolateurs sous tension.
- Dans les arrangements de chaînes d'isolateurs qui adoptent une configuration en forme de 'T'.

2.3.2.2. *Non-uniformité transversale*

Ce modèle de pollution se distingue par l'apparition de zones ou de bandes présentant des conductivités différentes sur la couche de pollution. Ces bandes sont disposées de

façon transversale autour de chaque isolateur de la chaîne, avec une conductivité uniforme dans chaque bande le long de la ligne de fuite. Ce phénomène est principalement attribuable à l'orientation constante des vents et des précipitations [34].

2.3.2.3. Non-uniformité longitudinale périodique

Ce genre de pollution est communément observé et se caractérise par des changements réguliers dans la conductivité de la couche polluante le long de la ligne de fuite, tout en maintenant une symétrie circulaire. Les caractéristiques principales de ce type sont les suivantes :

- * La partie inférieure de l'isolateur a une conductivité supérieure à celle de la partie supérieure
- * La densité de la pollution croît depuis la périphérie vers le centre.
- * La pollution est plus prononcée dans les interstices des nervures.

2.3.3. Sources de pollution

La pollution atmosphérique résulte de la conjonction d'un dépôt et de son humidification. Ces pollutions peuvent être regroupées en trois catégories distinctes selon leur origine [35].

2.3.3.1. Pollution naturelle

La pollution naturelle est causée par [34] :

- La présence de sel marin dans les zones côtières
- La présence de poussière dans le sol (en particulier lors de travaux lourds) ;
- Le vent transporte des sables dans les régions désertiques.

2.3.3.2. Pollution marine

La proximité des installations avec la mer entraîne le dépôt progressif d'embruns portés par le vent sur les isolateurs. Ce processus forme une couche de sel qui recouvre toute leur surface. Lorsque cette couche est humidifiée par les mêmes embruns, elle devient de plus en plus conductrice. En conséquence, des courants de fuite plus intenses se forment, et des arcs électriques peuvent se développer, allant jusqu'à provoquer le contournement total de l'isolateur. Cette interaction entre le sel marin, l'humidité et les

isolateurs est un phénomène de pollution électrique qui peut avoir des conséquences importantes dans les installations situées à proximité des zones côtières [36].

2.3.3.3. Pollution désertique

La pollution d'origine désertique est causée par des particules telles que le sable, la terre et la poussière. Elle est principalement accentuée par les facteurs climatiques suivants :

Le vent, en transportant ces particules arides, les dépose progressivement sur les isolateurs, formant ainsi une couche qui recouvre toute leur surface. Les variations de température entre le jour et la nuit entraînent le phénomène de condensation, conférant au dépôt une certaine conductivité électrique. En somme, ces interactions entre les éléments naturels et les isolateurs peuvent avoir des conséquences importantes dans les installations situées dans des zones désertiques [37].

2.3.3.4. Pollution industrielle

La pollution industrielle survient dans les zones à forte concentration industrielle, notamment à proximité d'usines de pétrochimie, de cimenteries, etc. Dans ces environnements, les isolateurs accumulent progressivement des poussières provenant des fumées émises par ces installations. Ces poussières, bien que faiblement conductrices, sont hygroscopiques et absorbent l'humidité ambiante. Le sel contenu dans ces dépôts réduit considérablement la résistivité superficielle des isolateurs. De plus, dans les régions agricoles, les agents polluants peuvent inclure des insecticides, des engrais et des grains de pollen. Il est également important de noter que cette pollution peut avoir une origine domestique, notamment lorsque des fumées et des gaz résultent des systèmes de chauffage des habitations ou des moyens de transport [37].

2.3.3.5. La pollution mixte

La pollution mixte constitue la plus sévère pour l'exploitation des ouvrages électriques, car elle résulte de la combinaison de deux ou plusieurs types de pollution mentionnés précédemment. Lorsque les dépôts solides s'accumulent progressivement sur la surface des isolateurs, le processus d'humidification forme une couche électrolytique. Cette couche entraîne une diminution significative de la rigidité diélectrique.

2.3.4. Influence des conditions climatiques sur la distribution de la pollution

- **Humidité** : L'humidification de l'air accroît la conductivité des dépôts polluants, ce qui diminue la résistance des isolateurs contaminés.
- **Température** : Les hautes températures entraînent le dessèchement des dépôts polluants, augmentant ainsi leur résistivité et, par conséquent, la capacité des isolateurs à résister à la tension. Cependant, les variations de température entre le jour et la nuit peuvent provoquer la condensation et l'humidification de la couche de pollution.
- **Vent** : Le vent transporte les poussières et les sels marins qui se déposent sur la surface des isolateurs. Toutefois, des vents forts peuvent contribuer au nettoyage des isolateurs, agissant comme un agent d'auto-nettoyage.
- **Pluie** : D'une part, les fines pluies peuvent mouiller les surfaces polluées, augmentant les risques de contournement. D'autre part, les fortes pluies ont généralement un effet nettoyant sur les surfaces polluées des isolateurs [37].

2.3.5. Conséquences de la pollution

La pollution électrique résulte de l'accumulation de couches polluantes à la surface des isolateurs, ce qui entraîne une conductivité électrique superficielle. En fonction des conditions atmosphériques telles que la pluie fine ou le brouillard, la tension de rupture diélectrique de l'air peut être atteinte entre deux points de la surface isolante, provoquant l'amorçage d'un arc électrique qui court-circuite une partie de la ligne de fuite.

2.3.6. Contournement des isolateurs pollués

Le contournement des isolateurs pollués est un processus complexe qui implique plusieurs étapes. Tout d'abord, les polluants s'accumulent à la surface de l'isolateur. Ensuite, lorsque l'humidité est présente, elle crée un électrolyte conducteur, générant un courant de fuite superficiel. Ce courant peut entraîner la formation d'une bande sèche dans les zones à forte densité de courant. Lors de la phase de contournement, la résistance de la bande sèche est significativement plus élevée, concentrant la tension aux extrémités de cette zone. Ce processus met en évidence l'importance de maintenir les isolateurs propres pour assurer leur efficacité dans les systèmes électriques.

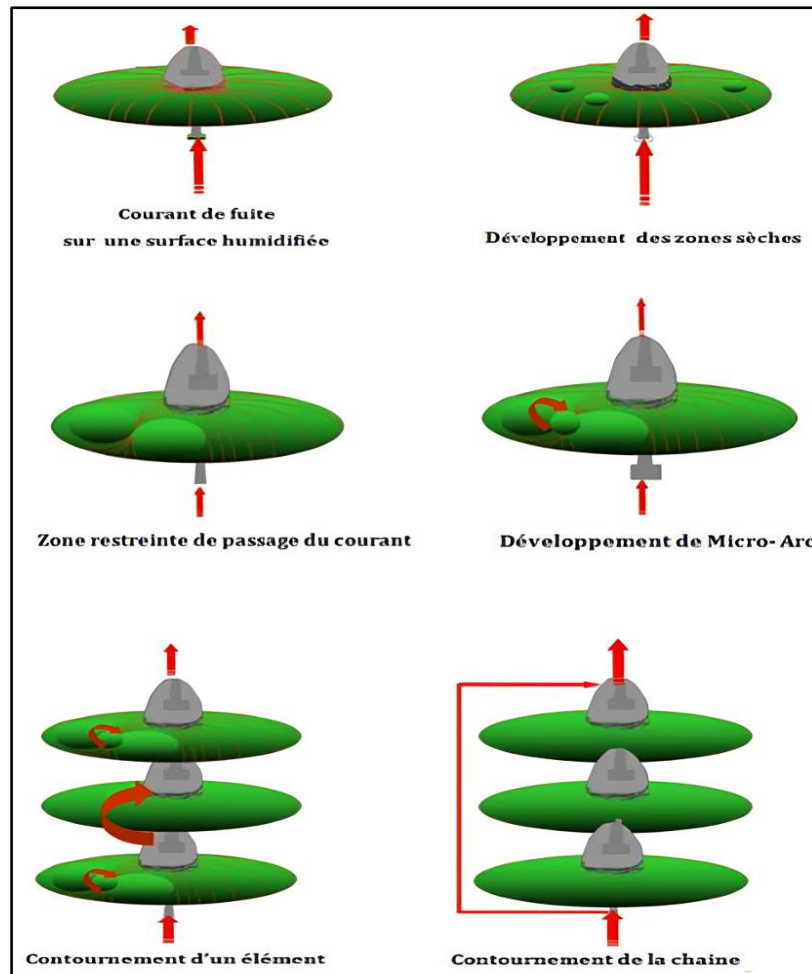


Figure 2. 9. Etapes déroulement du contournement sur une surface polluée

2.3.7. Modèles de contournement

2.3.7.1. Modèle d'Obenaus

Le modèle d'Obenaus est un modèle théorique important pour décrire le phénomène de contournement des isolateurs pollués. Proposé par Obenaus en 1958, ce modèle décrit le processus de formation d'une bande sèche conductrice sur la surface d'un isolateur pollué et humide, ce qui peut éventuellement conduire au contournement. Le modèle divise la surface de l'isolateur en plusieurs zones avec différents degrés d'humidité et de conductivité [14].

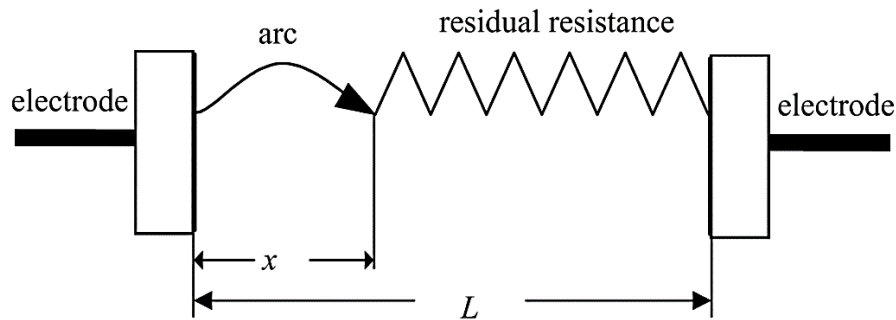


Figure 2. 10. Circuit électrique équivalent d'après Obenaus

$$"V = V_e + V_{arc} + R_p(X)I"$$

(V) représente la tension appliquée.

(V_e) est la chute de tension totale aux bornes des électrodes.

(X) désigne la longueur de l'arc.

($R_p(X)$) est la résistance de la couche polluante.

(I) représente le courant de fuite à travers la couche polluée.

V_{arc} : la tension d'arc communiquée par le :

$$V_{arc} = R_{arc}(X)I$$

(R_{arc}) est la résistance d'arc par unité de longueur

La décharge se distingue par la présence d'un champ électrique en longueur E_a :

$$E_a = \frac{V_{arc}}{X} = NI^{-n}$$

C'est pourquoi l'équation est formulée :

$$V_{arc} = X.N.I^{-n}$$

Donc, l'équation de la tension totale appliquée au système est obtenue :

$$V = V_e + N.X.I^{-n} + R_p(X).I$$

Les paramètres n et N varient en fonction de l'environnement dans lequel la décharge brûle.

$$0,40 \leq n \leq 1 \text{ et } 3 \leq N \leq 500$$

2.4. Conclusion

Pour résumer, ce chapitre a effectué une analyse approfondie de la littérature concernant les isolateurs en porcelaine. Il a examiné leur importance cruciale et la diversité de leurs conceptions, ainsi que les défis posés par la pollution, qui constitue un problème majeur pour ces composants essentiels des infrastructures électriques. De plus, nous avons exploré les critères clés qui influent sur le phénomène de contournement électrique. En somme, ce chapitre a fourni une vision détaillée des enjeux et des facteurs à prendre en compte dans la compréhension et la gestion des isolateurs en porcelaine dans les réseaux électriques.

Chapitre 3

Modélisation et simulation d'un isolateur
cylindrique en porcelaine



Chapitre 3

Modélisation et simulation d'un isolateur cylindrique en porcelaine

3.1. Introduction

La modélisation joue un rôle crucial dans tout processus de simulation numérique. Plus précisément, cela permet de déterminer et d'analyser les propriétés géométriques et physiques du problème étudié ; suggérer un modèle simplifié qui soit le plus proche de la réalité. Cette simulation vise principalement à évaluer la répartition du potentiel et du champ électrique le long d'un isolateur. La méthode des éléments finis est en effet la plus appropriée pour résoudre le problème posé. Dans la plupart des cas, les logiciels utilisant cette méthode numérique couvrent un domaine plus large que le problème étudié et ne répondent pas aux exigences particulières du problème. Toutefois, ils proposent fréquemment une interface facilitant la modélisation du problème (interface de conception et de définition des propriétés des matériaux), la résolution du problème (définition des conditions initiales et des conditions aux limites, maillage automatique ainsi que divers solveurs) et enfin, la visualisation des résultats (affichage des résultats sous forme de courbes, d'équipotentiels, de vecteurs, etc....) [38].

3.2. COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics est un logiciel commercial qui permet aux utilisateurs de simuler et d'analyser un large éventail de phénomènes physiques. Il est largement utilisé dans divers domaines de recherche en raison de sa capacité à simplifier les processus de modélisation et de simulation. Cela inclut la spécification de la géométrie, l'établissement des propriétés physiques des matériaux, la mise en place des conditions limites, l'exécution du maillage, le traitement des calculs et la visualisation des données. De plus, ce logiciel est conçu pour être accessible même pour ceux qui n'ont pas une expertise poussée en mathématiques ou en analyse numérique[39].

3.2.1. L'interface graphique de COMSOL

L'interface graphique de COMSOL est un outil puissant et intuitif qui permet aux utilisateurs de créer, de modifier et de simuler des modèles de phénomènes physiques complexes. Au démarrage, l'interface de gestion des modèles se présente. En optant pour le module 'Électrostatique (es)', il est possible de créer une géométrie en deux dimensions et de définir à la fois les conditions limites et les caractéristiques physiques de l'isolateur, permettant ainsi au logiciel de mener à bien les différentes phases du processus de simulation [32].

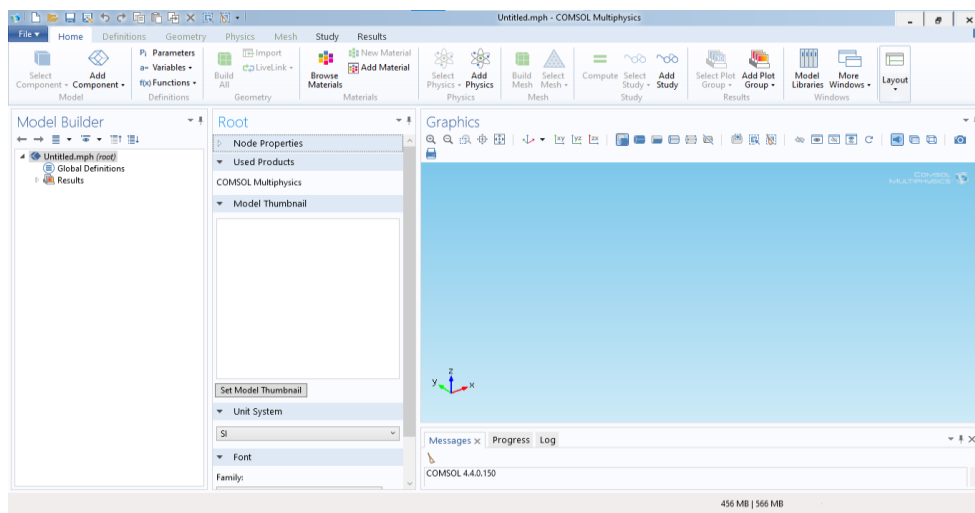


Figure 3. 1. Démarrage de la fenêtre du logiciel.

Ensuite, on procède à la sélection de l'espace de travail en spécifiant les dimensions requises, qui peuvent être en dimension zéro (0D), une dimension (1D), une dimension avec symétrie axiale (1D Axisymétrique), deux dimensions (2D), deux dimensions avec symétrie axiale (2D Axisymétrique) ou en trois dimensions (3D).

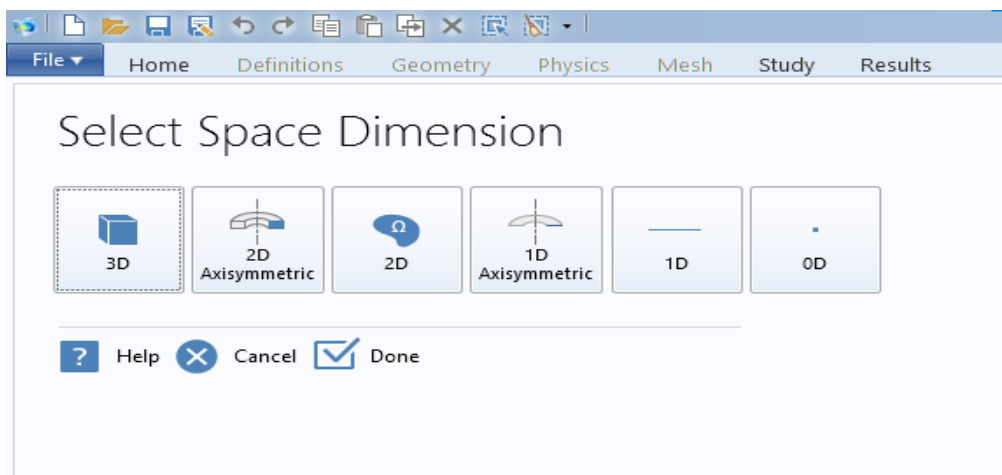


Figure 3. 2. Fenêtre de « SELECT SPACE ».

À ce stade du processus, la sélection s'oriente vers la catégorie de champs physiques appropriée au modèle (PHYSICS). Dans notre situation, l'option retenue est celle de l'« ÉLECTROSTATIQUE ».

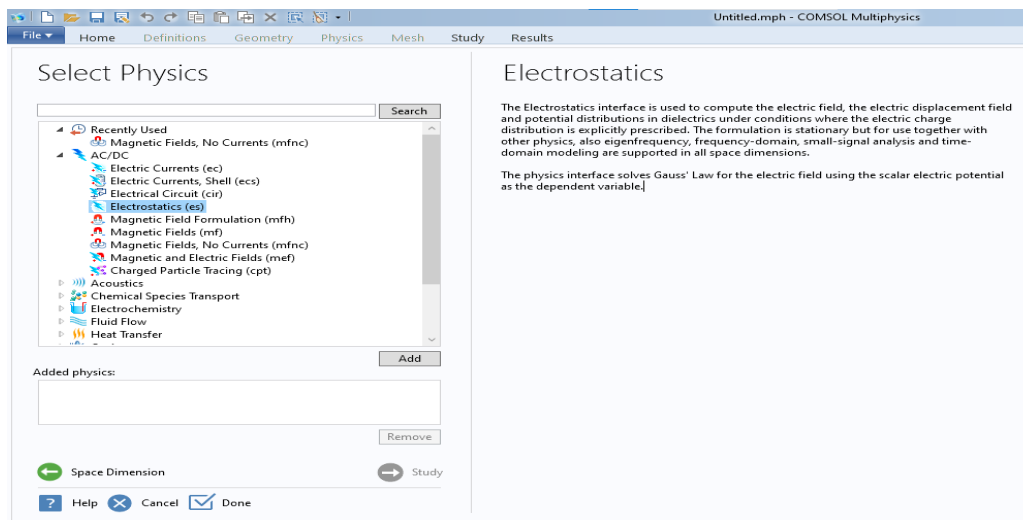


Figure 3. 3. Fenêtre de « Select Physics (MODEL)».

L'étape suivante consiste à déterminer la nature de l'analyse à effectuer, en optant pour l'option « TYPE D'ÉTUDE ». Pour les besoins de notre recherche, le choix s'est porté sur le mode « STATIONNAIRE ».

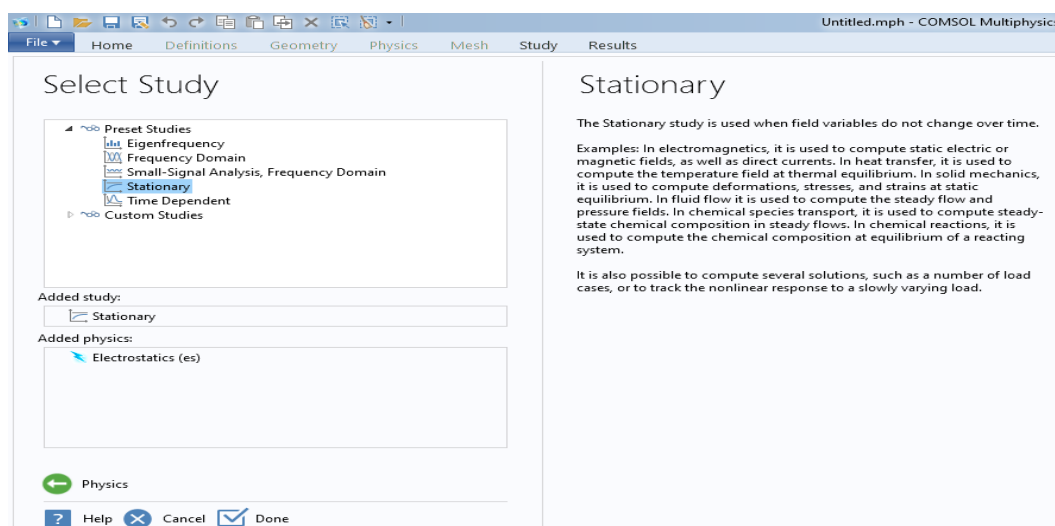


Figure 3. 4. Fenêtre “SELECT STUDY TYPE”

Le programme s'appuie sur la méthode des éléments finis pour simuler un isolateur cylindrique en porcelaine. Le résumé des étapes consécutives est le suivant : Initialement, il est nécessaire d'établir la géométrie complète de l'isolateur en deux

dimensions via COMSOL. La création de la géométrie occupe une position centrale dans la démarche de modélisation.

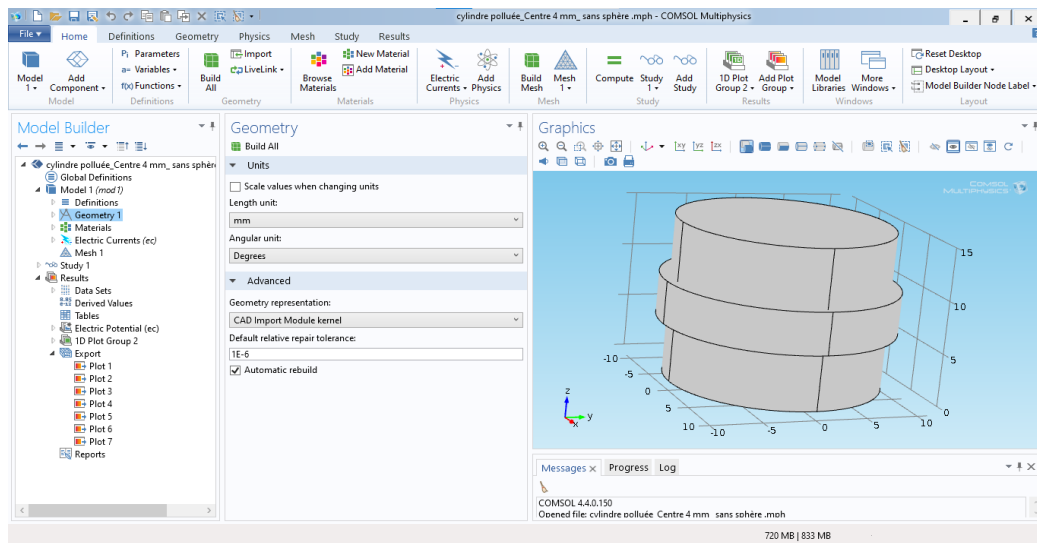


Figure 3. 5. Géométrie d'isolateur

La phase subséquente implique la spécification des caractéristiques électriques des matériaux utilisés.

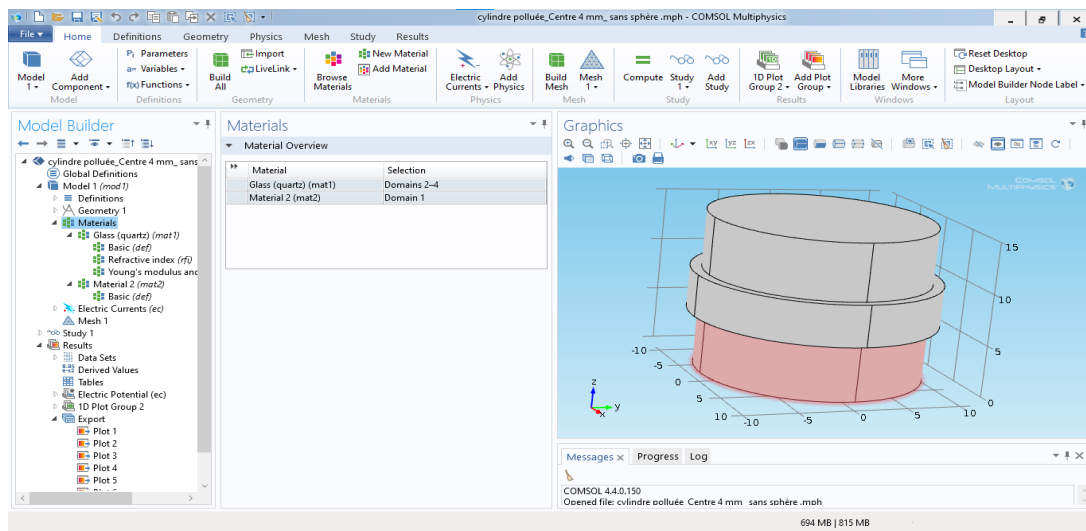


Figure 3. 6. Matériaux de l'isolateur.

L'opération englobe l'établissement des valeurs de permittivité relative et de conductivité électrique attribuées à chaque segment de l'isolateur.

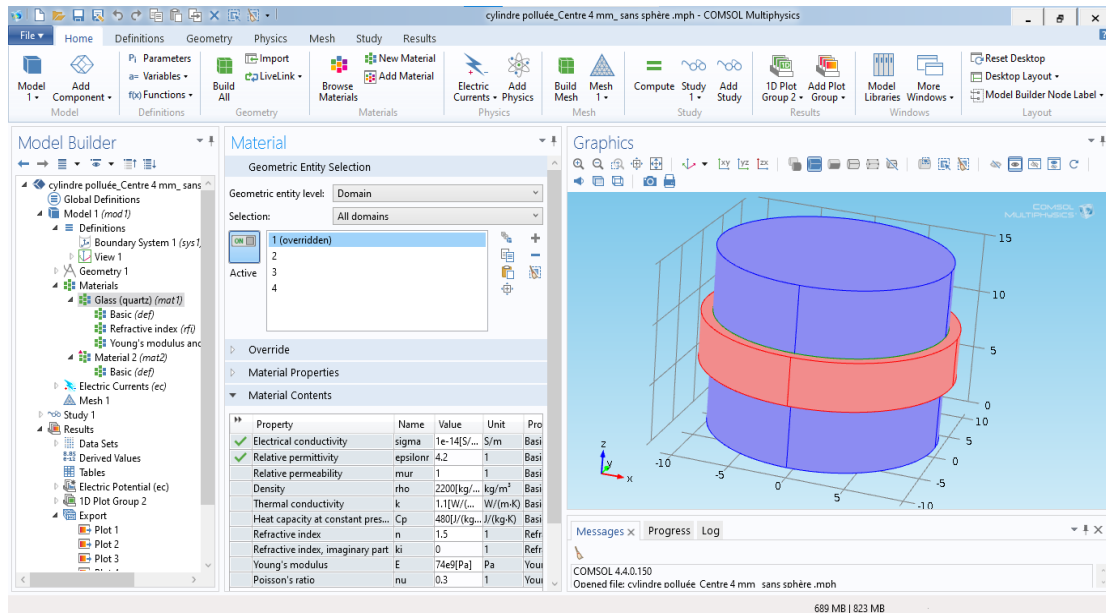


Figure 3. 7. Permittivités relatives et conductivités électriques pour chaque partie de l’isolateur.

Par la suite, il est nécessaire de choisir la catégorie de champ physique, ici l’‘ÉLECTROSTATIQUE’. Il convient alors de définir le point de mise à terre ‘GROUND’ ainsi que le point d’application du potentiel électrique «POTENTIEL ÉLECTRIQUE»

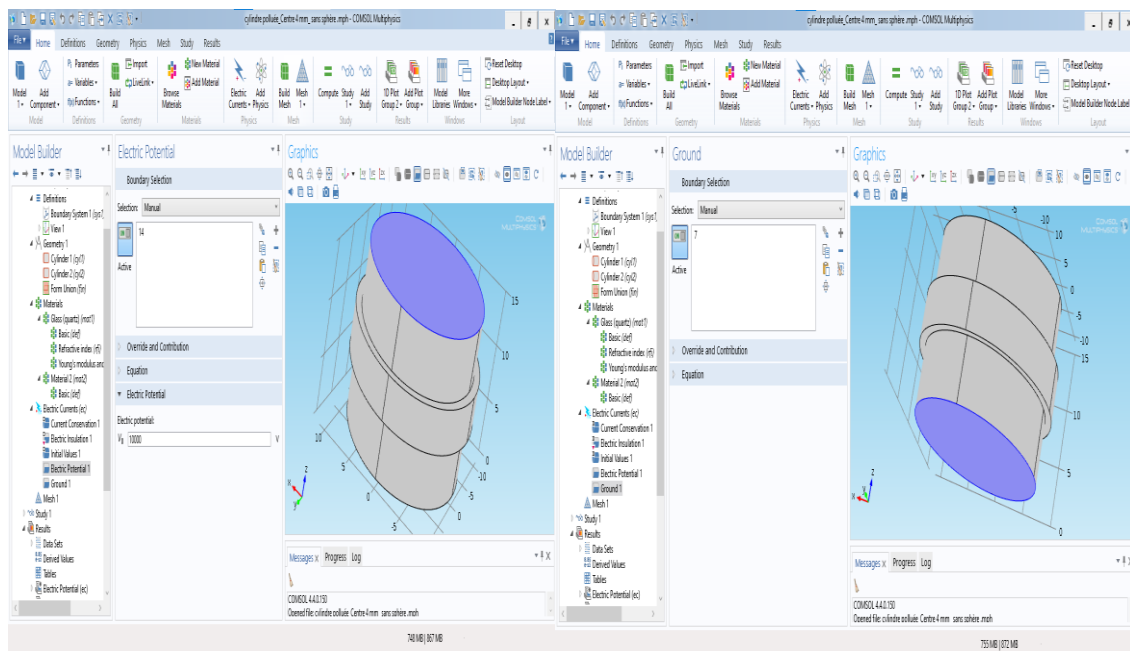


Figure 3. 8. Conditions aux limites

COMSOL offre une solution de maillage optimisée, avec une densité accrue près des structures de petite taille et une densité réduite dans les autres zones. L'utilisateur a

également la possibilité d'ajuster les tailles de maillage de manière manuelle selon ses préférences.

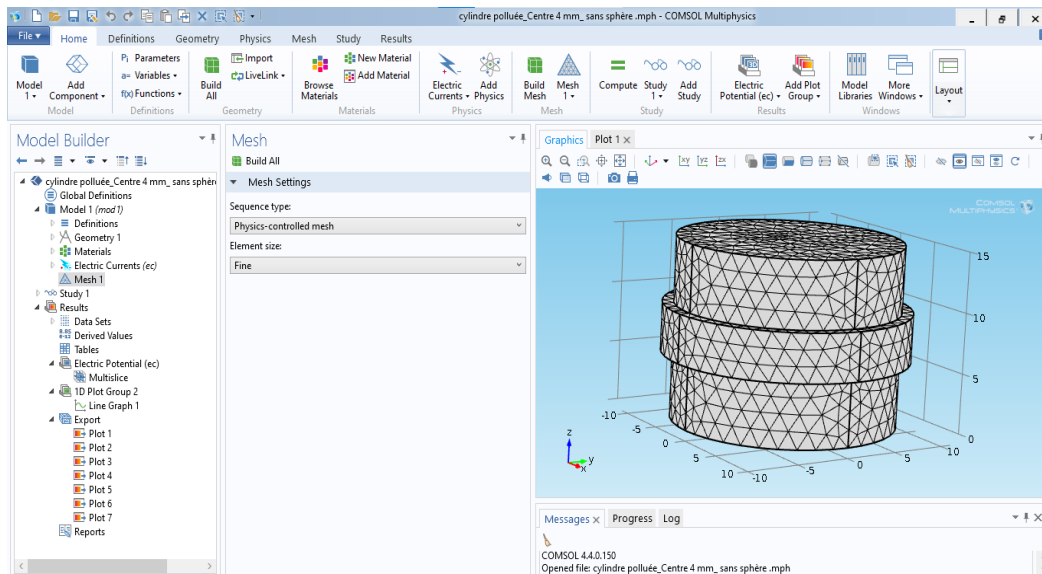


Figure 3. 9. Maillage d'isolateur

L'étape finale du processus implique la visualisation des données, telles que les valeurs du potentiel électrique et de l'intensité du champ électrique, ainsi que leurs magnitudes respectives. Ces informations sont présentées en fonction de chaque segment de l'isolateur et de leur distribution dans l'espace [40].

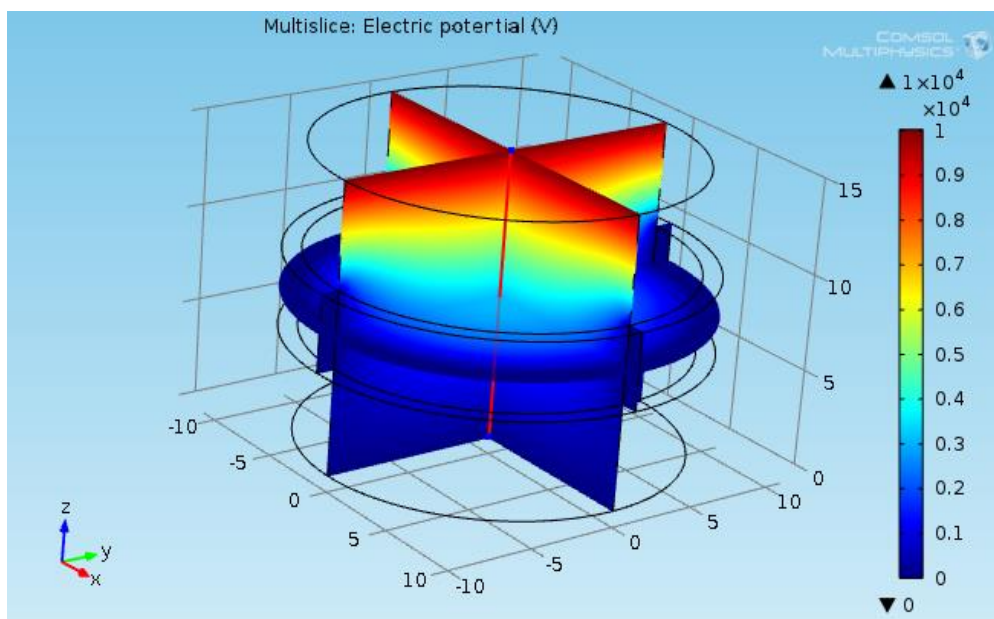


Figure 3. 10. Résultats de simulation

Les étapes de résolution peuvent être résumées selon l'organigramme montré dans la figure (3.11).

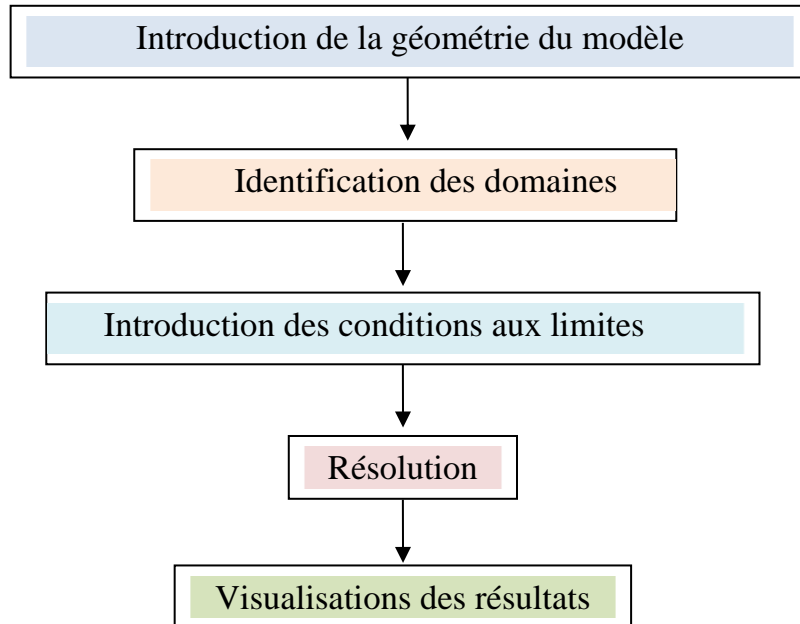


Figure 3. 11. Diagramme de différentes étapes de résolution dans Comsol

3.3. Simulation

Dans cette section de notre simulation, nous visons principalement à évaluer comment le potentiel et le champ électrique se distribuent autour de diverses configurations géométriques d'un isolateur cylindrique en porcelaine soumis à la pollution. Nous examinerons l'influence de différents paramètres de la couche polluante, tels que sa longueur, sa position et sa conductivité, sur l'efficacité de l'isolateur. Pour ce faire, nous appliquerons la méthode des éléments finis à l'aide du logiciel COMSOL.

3.3.1. Modèle de l'isolateur étudié

Dans le cadre de cette étude, les simulations numériques sont effectuées sur un isolateur cylindrique en porcelaine. Ce modèle est choisi pour examiner la distribution du potentiel et du champ électrique autour de l'isolateur. La structure de l'isolateur est représentée dans la figure 3.12.

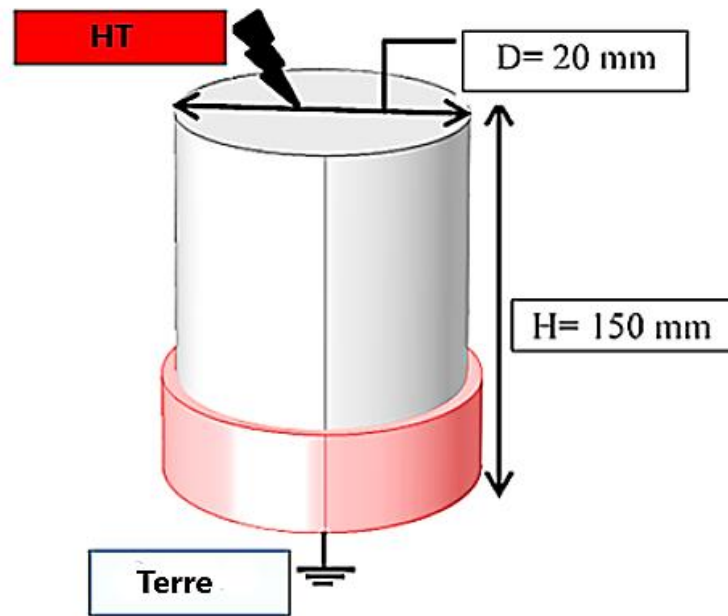


Figure 3. 12. La géométrie de l'isolateur étudié

L'étude de la distribution du champ électrique sur la surface de l'isolateur est très importante pour comprendre ses caractéristiques de franchissement de l'arc. Le modèle d'isolant étudié est présenté à la figure 3.11 et a été simulé en 3D. Les équations Maxwell régissant le calcul du champ électrique dans Comsol sont données ci-dessous [41].

$$\vec{E} = -\nabla V \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon} \quad (2)$$

La combinaison de l'équation de Maxwell, l'équation de continuité du courant et la loi d'Ohm est donnée par les équations (1) et (2) respectivement:

$$\nabla \cdot \vec{j} = \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (3)$$

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (4)$$

Avec:

V : Le potentiel électrique (V);

E : Le champ électrique (V / m);

ε : La permittivité du matériau diélectrique;

ρ : La densité de charge (C / m^3);

J : La densité de courant (A / m^2);

σ : La conductivité électrique (S / m).

3.3.2. Propriétés des matériaux

Dans le cadre de notre projet, les propriétés spécifiques des matériaux sélectionnés ont été méticuleusement établies. Nous avons choisi des conductivités intentionnellement basses, distinctes de zéro, pour le noyau de l'isolateur, sa couverture externe et l'espace aérien adjacent. Les paramètres électriques clés, tels que la conductivité électrique (σ) et la permittivité diélectrique (ε_r), ont été soigneusement assignés pour chaque segment du modèle, conformément aux indications du tableau 3.1.

Tableau 3. 1. Propriétés de chaque paramètre de l'isolateur

| Matériels | Permittivité Relative ε_r | conductivité électrique σ (S / m) |
|-----------------|---------------------------------------|--|
| Verre trempé | 4,2 | 10^{-14} |
| Ciment | 15 | 10^{-4} |
| Fonte malléable | 1000 | $1,04 \cdot 10^5$ |
| Air | 1 | 10^{-14} |
| Acier galvanisé | 1000 | $4 \cdot 10^6$ |
| Pollution | 80 | 10^{-3} |

3.3.3. Conditions aux limites

Dans l'étude présentée, nous avons défini les conditions limites suivantes à travers trois scénarios distincts :

Scénario 01 : Un isolateur souillé est soumis à une tension de 10 kV.

Scénario 02 : Le même isolateur en condition de pollution est exposé à une tension de 30 kV.

Scénario 03 : L'isolateur pollué est testé sous une tension de 50 kV.

Pour chaque scénario, la couche de pollution est appliquée différemment : dans le cas (a), la couche de pollution située près de la zone de haute tension et dans le cas (b), elle est répartie au milieu de l'isolateur, tandis que dans le cas (c), elle est localisée près de la terre. Ces configurations permettent d'évaluer l'impact de la position de la pollution sur la performance de l'isolateur sous différentes tensions.

3.3.4. Résultats de Simulation

L'étude vise à comprendre comment se répartit le champ électrique le long d'un isolateur cylindrique en porcelaine dans des conditions de contamination, afin d'évaluer l'impact des paramètres de la couche de pollution sur le stress du champ électrique le long de la surface de l'isolateur. La Figure 3.13 illustre la répartition du champ électrique pour différentes configurations de pollution.

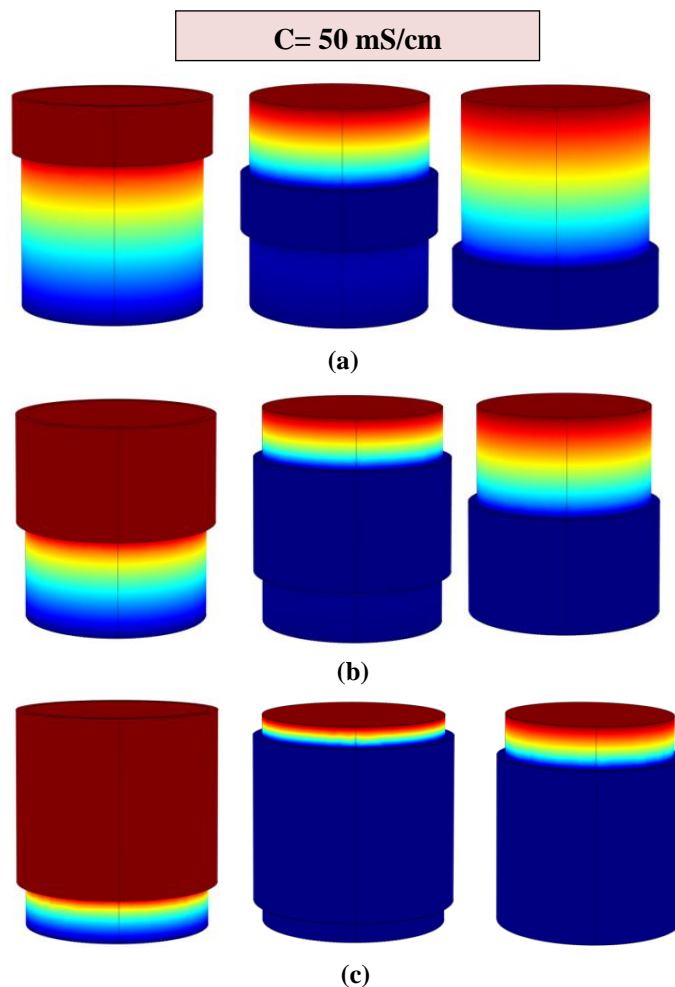


Figure 3. 13. Distribution du champ électrique le long d'un isolateur pollué de manière non uniforme : (a) couche non uniforme de 4 mm près de l'extrémité de terre, près de l'extrémité alimentée et au milieu du modèle d'isolateur, (b) couche non uniforme de 8 mm près de l'extrémité de terre, près de l'extrémité alimentée et au centre (c) couche non uniforme de 12 mm près de l'extrémité de terre, près de l'extrémité alimentée et au centre.

Les simulations ont révélé que les changements de longueur et de position de la couche de pollution modifient les distributions du champ électrique le long de la surface de l'isolateur, comme le montrent les Figures 3.14. Cet effet était particulièrement prononcé lors de la comparaison des variations de longueur et de position de la couche par rapport à la conductivité. Lorsque la longueur de la couche de pollution est passée de 4 à 12 mm, le champ électrique est passé de 4 à 18 kV/cm, comme illustré dans la Figure 3.15.

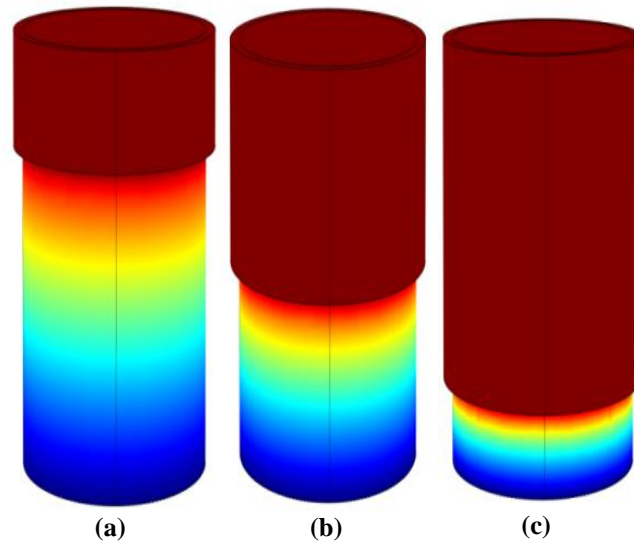


Figure 3. 14. Distribution du potentiel et champ électrique le long d'un isolant cylindrique en porcelaine avec une longueur de couche de pollution (a) 4 mm (b) 8 mm and (c) 12 mm

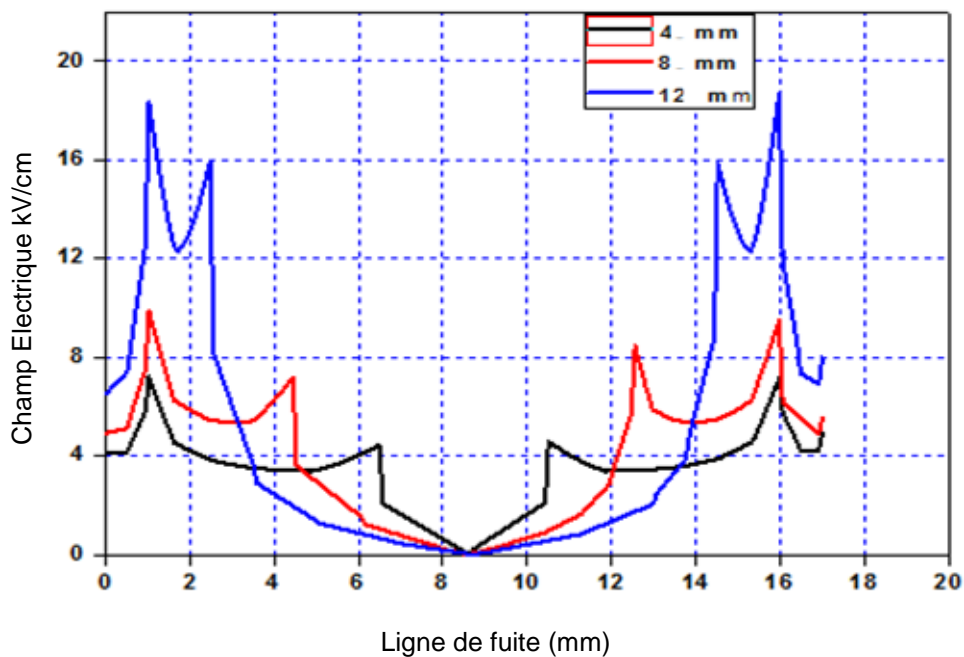


Figure 3. 15. Distribution du champ électrique le long d'un isolateur en porcelaine cylindrique avec différentes longueurs de couche de pollution

La conductivité de la couche de pollution est restée constante à 50 mS/cm pour tous les scénarios. De plus, la position de la couche de pollution était fixée à l'extrémité alimentée dans ce cas. Malgré la conductivité constante de la couche de pollution, une augmentation de la longueur de la couche et un changement de position ont entraîné une densité de courant accrue et, par conséquent, une augmentation du champ électrique.

Il est évident, d'après les Figures 3.16 et 3.17, que l'intensité du champ électrique augmente lorsque la position de la pollution change. La plus forte contrainte électrique a été calculée pour une couche de pollution située près de l'extrémité alimentée en électricité. La longueur de cette couche de pollution a été maintenue constante à 4 mm.

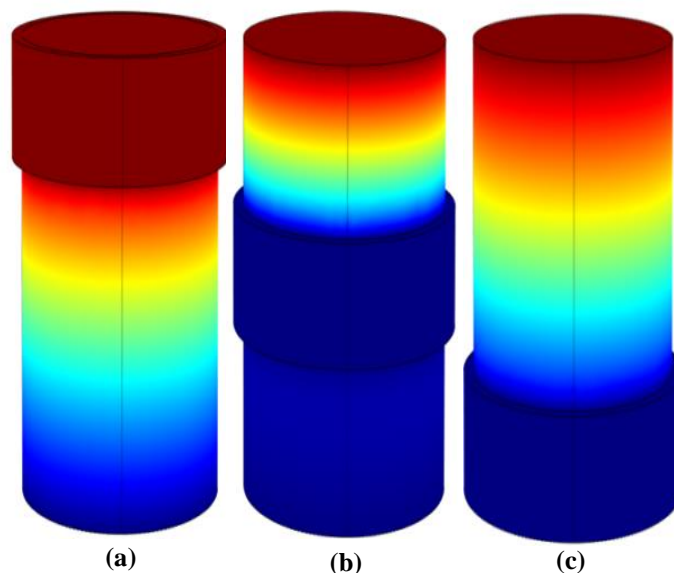


Figure 3. 16. Répartition du champ le long d'un isolateur cylindrique en porcelaine avec une position de pollution (a) près de la HT (b) au milieu et (c) à la terre

Les résultats de simulation montrent que le champ électrique dépend à la fois de la position et de la longueur de la couche de pollution. En fait, il a été démontré que le champ électrique maximal est le moins élevé lorsque la couche de pollution est située au milieu par rapport aux cas où elle est près des extrémités alimentée et de terre. De plus, il est intéressant de noter que l'augmentation de l'intensité du champ électrique est plus marquée avec l'augmentation de la longueur de la couche de pollution par rapport à sa position.

La répartition non uniforme du champ électrique le long de la surface de l'isolateur peut avoir des répercussions sur leurs caractéristiques de claquage et peut endommager

l'isolant à long terme. En particulier, les zones où l'intensité du champ électrique est la plus élevée sont susceptibles d'être les plus vulnérables aux décharges électriques et à l'usure, ce qui peut compromettre la fiabilité et la durabilité de l'isolateur.

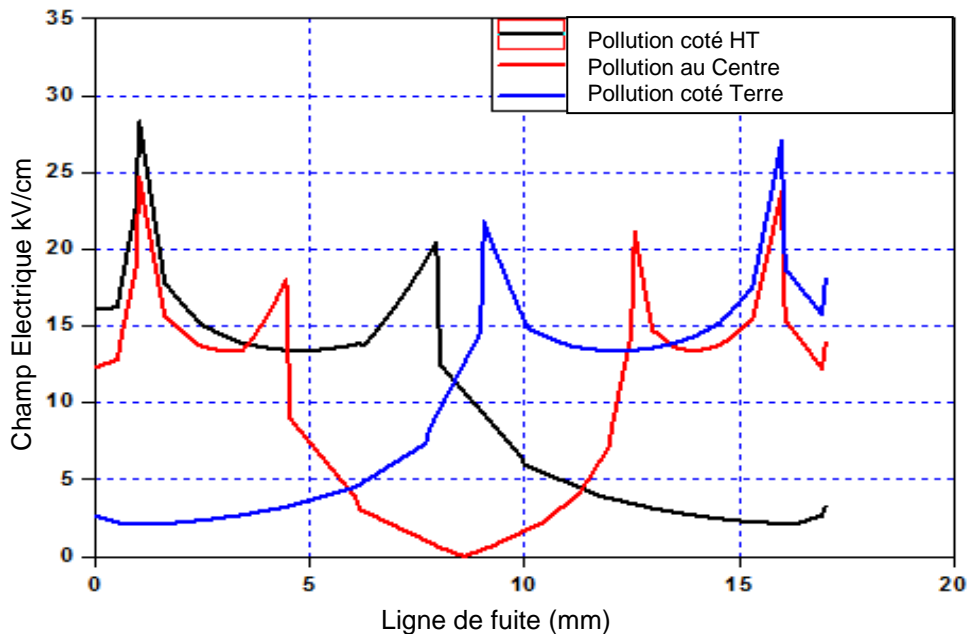


Figure 3. 17. Distribution du champ électrique le long d'un isolateur en porcelaine cylindrique avec différentes positions de la couche de pollution

3.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons entrepris des simulations numériques en utilisant le logiciel Comsol Multiphysics pour modéliser un isolateur cylindrique en porcelaine. Nous avons soigneusement défini les propriétés des matériaux et la géométrie de l'isolateur pour assurer la précision de nos simulations. En outre, nous avons expliqué comment le programme Comsol Multiphysics est utilisé pour simuler un isolateur en porcelaine dans un état pollué. Les résultats de ces simulations montrent que le stress du champ électrique augmente de manière significative avec l'augmentation de la longueur de la couche de pollution. La conductivité de la pollution n'a pas d'impact notable car elle a un effet négligeable sur la redistribution du potentiel électrique en surface.

Chapitre 4

Analyse des Variances

ANOVA



4.1. Introduction

L'analyse de la variance (ANOVA), une méthode statistique robuste, constitue un outil fondamental dans l'évaluation des variations entre les moyennes de trois groupes ou plus. Dans le domaine de l'ingénierie électrique, son application revêt une importance particulière pour évaluer la relation entre les paramètres de pollution et le champ électrique sur des isolateurs en porcelaine. Cette approche méthodologique, largement utilisée dans la littérature scientifique, permet de déterminer de manière rigoureuse si les variations observées dans le champ électrique sont significativement attribuables aux variations des paramètres de pollution ou simplement dues au hasard [42]. Pour mettre en œuvre l'ANOVA dans cette étude, des expériences ou des simulations seraient menées en variant les paramètres de pollution, tels que la longueur et la position de la couche de pollution, sur les isolateurs en porcelaine. Les mesures du champ électrique seraient ensuite enregistrées dans chaque configuration. L'application de l'ANOVA à ces données permettrait d'évaluer statistiquement si les variations observées dans le champ électrique peuvent être attribuées de manière significative aux différences de paramètres de pollution [43]. L'identification de différences significatives entre les moyennes du champ électrique pour différentes configurations de pollution grâce à l'ANOVA fournirait une compréhension approfondie de l'impact des paramètres de pollution sur la distribution du champ électrique le long des isolateurs en porcelaine. En outre, cette approche statistique permettrait d'orienter de manière éclairée la conception et l'optimisation des systèmes d'isolation électrique, contribuant ainsi à améliorer leur fiabilité et leurs performances [44]. L'intégration de l'ANOVA dans l'étude de la relation entre les paramètres de pollution et le champ électrique sur les isolateurs en porcelaine représente une démarche méthodologique robuste et rigoureuse, offrant des résultats précis et fiables pour l'ingénierie électrique moderne

4.2. Analyse des variances (ANOVA)

Le plan d'expérience en réseau orthogonal Taguchi, ou L9 OA, est une méthode stratégique qui permet de réduire le nombre d'essais nécessaires pour évaluer plusieurs facteurs simultanément. Cette approche est particulièrement utile dans les situations où l'on souhaite optimiser un processus en manipulant plusieurs variables à la fois. En utilisant le L9 OA, il est possible de sélectionner un ensemble réduit de tests tout en garantissant une évaluation complète des interactions entre les différents facteurs.

Dans cette étude, le L9 OA a été utilisé pour examiner l'impact des paramètres de la couche de pollution non uniforme sur plusieurs aspects critiques, notamment la tension de claquage, le champ électrique maximal et la résistance à la rupture. En déterminant les niveaux optimaux de ces paramètres, il devient possible d'identifier les conditions qui minimisent le risque de claquage et maximisent la robustesse de l'isolant en porcelaine dans des environnements contaminés.

Le tableau 1 répertorie les différents paramètres de pollution non uniforme qui ont été étudiés, ainsi que les niveaux spécifiques auxquels ils ont été réglés pour les essais. Ces paramètres peuvent inclure des caractéristiques telles que l'épaisseur de la couche de pollution, sa répartition le long de l'isolant, ou d'autres propriétés pertinentes.

Le tableau 2 présente ensuite les résultats des essais expérimentaux, indiquant comment les différentes combinaisons de paramètres de pollution non uniforme ont affecté les mesures de tension de claquage, de champ électrique maximal et de résistance à la rupture. Ces données permettent d'identifier les tendances et les relations entre les paramètres de pollution et les performances de l'isolant, fournissant ainsi des informations précieuses pour l'optimisation des systèmes d'isolation électrique dans des environnements réels.

Tableau 4. 1. Paramètres de pollution non uniforme et leurs niveaux étudiés

| Paramètres | Code | variation des ranges | | |
|--------------------|------|----------------------|------------|-------|
| Conductivité mS/cm | C | 10 | 50 | 80 |
| Longueur (mm) | L | 4 | 8 | 12 |
| Position | P | Terre (G) | Centre (M) | HT(H) |

Dans cette étude, le logiciel MINITAB® a été utilisé. Une analyse statistique utilisant l'ANOVA a été réalisée pour étudier l'impact de la couche de pollution non uniforme sur la résistance au claquage, le champ électrique maximal et la résistance à la rupture de la surface de l'isolateur. L'analyse de la réponse obtenue prend en compte les effets des facteurs et de leurs interactions. Un modèle quadratique - de la tension de claquage dans le cas de la pollution non uniforme - a été établi par régression et est donné par la forme suivante:

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^3 a_i X_i + \sum_{i=1}^3 a_{ii} X_i^2 + \sum_{i<j}^3 a_{ij} X_i X_j \quad (5)$$

Y: La réponse souhaitée, a_0 , est une constante. Les coefficients a_i , a_{ii} et a_{ij} représentent respectivement les termes linéaires, quadratiques et de produits croisés. X_i désigne les facteurs codés qui sont liés aux paramètres considérés.

Pour résoudre les problèmes de conception à l'aide de techniques d'optimisation, il est nécessaire de formuler une fonction objectif. Cette conception optimale est obtenue en minimisant le champ électrique à travers cette fonction. La fonction cible est une corrélation mathématique entre les amplitudes du champ électrique et les propriétés de l'isolant. Elle peut être représentée comme suit :

$$E = 37.01 + 2.940L + 1043C - 7.982P + 0.005417L * L + 5833G * C + 19.83P * P + 57.92V * C - 0.3500V * P \quad (6)$$

Tableau 4. 2. Les résultats de calcul

| Longueur (mm) | Conductivité (mS/cm) | Position | Champ Electrique (kV/cm) | Contournement (kV) | La résistance à la rupture (kV/cm) |
|---------------|----------------------|----------|--------------------------|--------------------|------------------------------------|
| 4 | 10 | HT | 9,60 | 23,20 | 19,5 |
| 4 | 50 | Centre | 8,97 | 22,20 | 16,2 |
| 4 | 80 | Terre | 9,49 | 21,50 | 17,3 |
| 8 | 10 | HT | 11,62 | 19,02 | 17,2 |
| 8 | 50 | Centre | 10,90 | 18,55 | 16,5 |
| 8 | 80 | Terre | 11,40 | 17,20 | 15,4 |
| 12 | 10 | HT | 12,80 | 16,80 | 14,1 |
| 12 | 50 | Centre | 11,30 | 18,22 | 12,8 |
| 12 | 80 | Terre | 13,20 | 17,60 | 11,2 |

4.3. Résultats et Discussions

Les principaux effets des paramètres de la couche de pollution sur la tension de claquage sont tracés et présentés dans la figure (4.1.a). Il est clairement visible que la tension de claquage est fortement influencée par la longueur de la couche de pollution. La longueur de la couche de pollution a un effet décroissant sur la résistance diélectrique. Cela peut s'expliquer par la réduction de la largeur de la bande propre. Pour une tension appliquée plus faible, le champ électrique appliqué sur ces bandes augmente et atteint la résistance à la rupture, entraînant ainsi une réduction de la résistance au claquage. Électriquement, la réduction de l'impédance équivalente totale du modèle isolant proportionnellement à l'augmentation de la longueur de la couche conductrice peut expliquer ce phénomène.

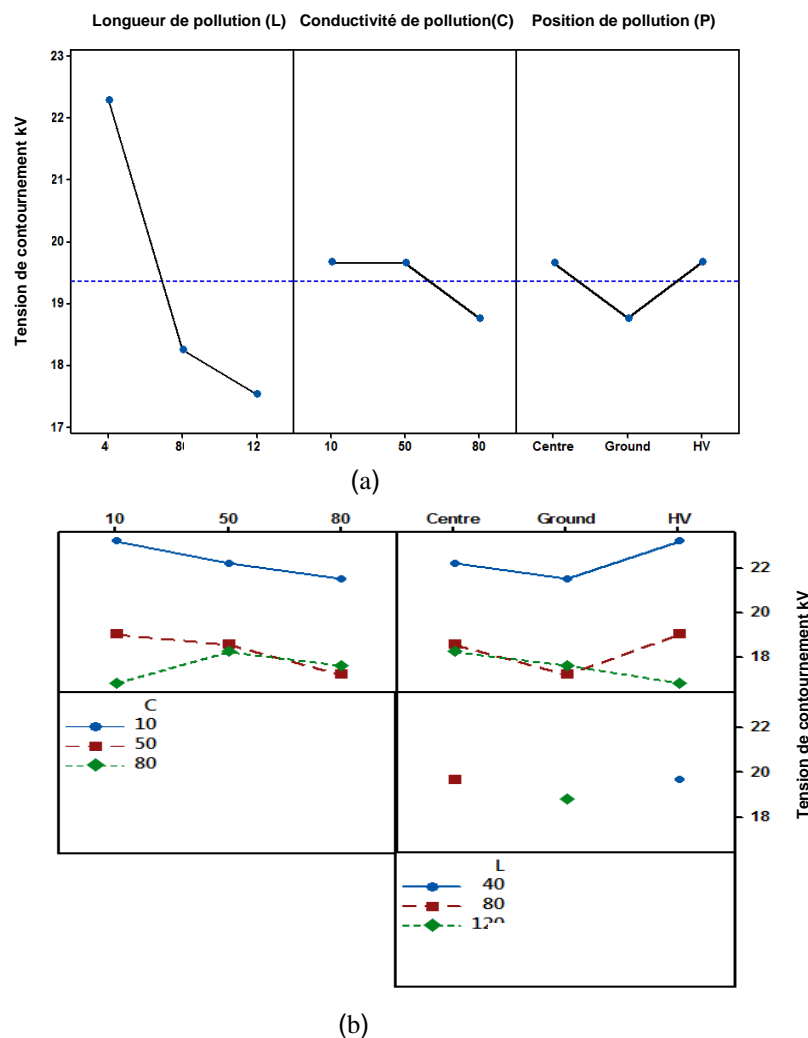


Figure 4. 1. Graphiques des principaux effets des paramètres de la couche de pollution sur la tension de contournement

De plus, la conductivité de la couche de pollution affecte le claquage par un impact

décroissant. On sait que la résistance diélectrique de la surface des isolateurs est améliorée en diminuant la conductivité de la pollution. De la même figure, il ressort que la tension de claquage dépend de la position, de la longueur et de la conductivité de la couche de pollution. Il est démontré que la résistance au claquage est plus élevée lorsque la couche est située au milieu et à l'extrémité alimentée qu'en cas de couche près des extrémités à la terre. On peut en conclure que la plus grande résistance diélectrique d'un modèle isolant est observée dans le cas d'une plus petite couche conductrice située au milieu.

À partir des graphiques des effets d'interaction dans la figure (4.1.b), un léger effet d'interaction entre la position et la longueur se produit lorsque les lignes ne sont pas parallèles. Lorsque la longueur de la couche de pollution augmente jusqu'à 80 mm, cet effet devient négligeable. Cela peut s'expliquer par la diminution significative de la longueur de la bande propre.

La figure 4.2. montre le graphique de probabilité normale de la tension de claquage avec un intervalle de confiance de 95 %. On peut observer que les données suivent une ligne droite. Dans cette étude, la valeur P est enregistrée à 0,183. Cette valeur est supérieure à l'alpha de 0,05. Par conséquent, l'hypothèse nulle ne peut pas être rejetée. L'hypothèse nulle est que la distribution des lois des données est normale. Par conséquent, le modèle proposé est adéquat.

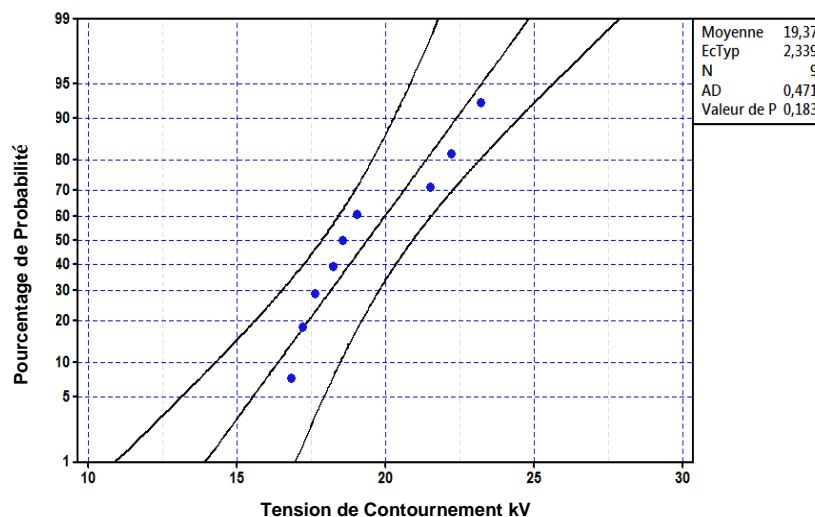


Figure 4. 2. Graphique de probabilité normale de la tension de claquage à un intervalle de confiance de 95%.

La figure 4.3 présente les principaux graphiques d'effet d'interaction des trois paramètres

étudiés (conductivité, longueur de la couche de pollution et sa position) sur le champ électrique maximal. On observe que la valeur du champ électrique maximal augmente considérablement lorsque la longueur de la couche de pollution augmente. Cette observation est enregistrée car la bande propre est limitée et devient la seule zone qui supporte le champ électrique maximal. La position de la couche de pollution a également un effet significatif sur la valeur du champ électrique maximal, tout comme sa longueur. On constate clairement que le champ électrique maximal atteint sa valeur la plus élevée lorsque la couche de pollution est située près des extrémités alimentée et de terre. En revanche, lorsque la couche de pollution est située au milieu, le champ électrique atteint sa valeur la plus basse. En raison de son impact négligeable sur la redistribution du potentiel électrique, la conductivité n'a pas un effet remarquable sur la valeur du champ électrique maximal.

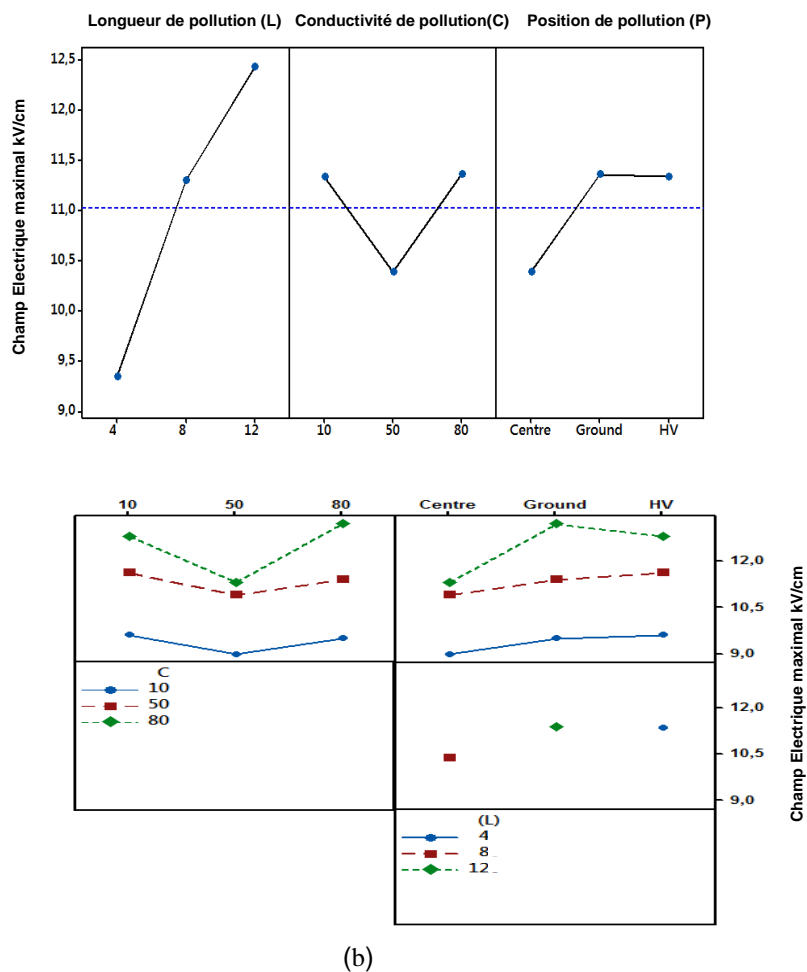


Figure 4. 3. Graphiques des principaux effets des paramètres de la couche de pollution sur le Champ Electrique

Il est bien remarqué par l'intersection des graphiques que l'emplacement de la couche de pollution au milieu de la surface isolante conduit à la réduction du champ électrique maximal. Cette réduction peut s'expliquer par les deux bandes propres qui se trouvent près des extrémités.

La figure 4.4 présente le graphique de probabilité normale des réponses prédites des valeurs maximales de champ électrique à un intervalle de confiance de 95%. Comme mentionné précédemment, on observe qu'une légère ligne est suivie. La valeur P du champ électrique maximal est supérieure à alpha 0,05. Dans ce cas, l'hypothèse nulle ne peut pas être rejetée, donc les données suivent une distribution normale.

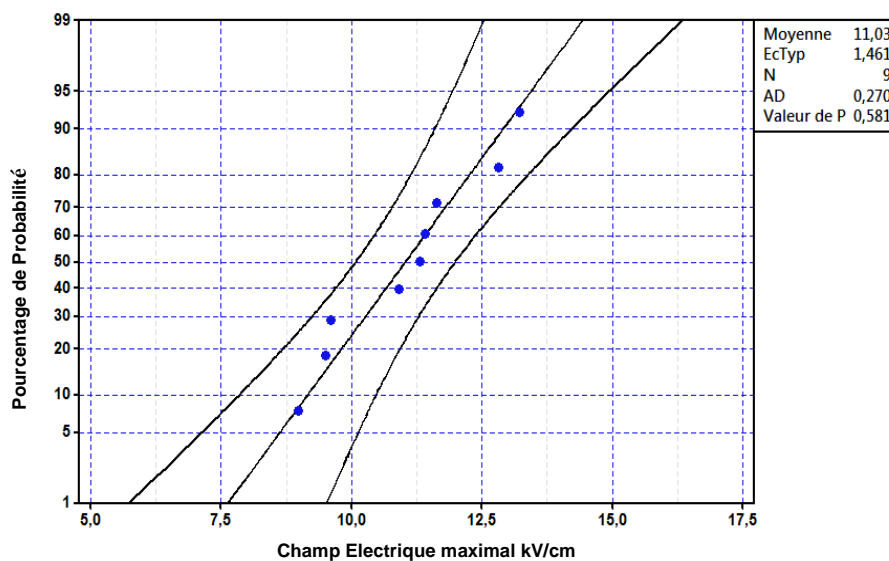


Figure 4. 4. Graphique de probabilité normale du champ électrique maximal, à un intervalle de confiance de 95%

L'effet des paramètres de pollution non uniforme sur la résistance à la rupture est examiné et les principaux graphiques d'effet d'interaction sur la résistance à la rupture sont présentés dans la figure 4.5. La conductivité, la longueur de la couche de pollution et sa position ont un impact sur la résistance à la rupture, tout comme la tension de claquage et la valeur du champ électrique maximal. Il semble que la résistance à la rupture diminue avec l'augmentation à la fois de la conductivité et de la longueur de la couche de pollution. En revanche, la résistance à la rupture diminue lorsque la couche de pollution est positionnée au milieu et près de l'extrémité de terre du modèle isolant. La présence de la couche de pollution près de l'extrémité alimentée conduit à une

augmentation de la résistance à la rupture. L'augmentation de la conductivité de la couche de pollution entraîne un plus grand flux de courant de fuite sur la surface de l'isolateur.

L'augmentation du nombre de bandes sèches au milieu de la surface de l'isolant peut entraîner une augmentation de l'impact sur la résistance à la rupture. En revanche, lorsque de nombreuses bandes sèches sont créées près des deux extrémités, la contrainte du champ électrique sur la surface diminue. Ils présentent dans ce cas une barrière potentielle qui diminue l'intensité du champ électrique sous basse tension.

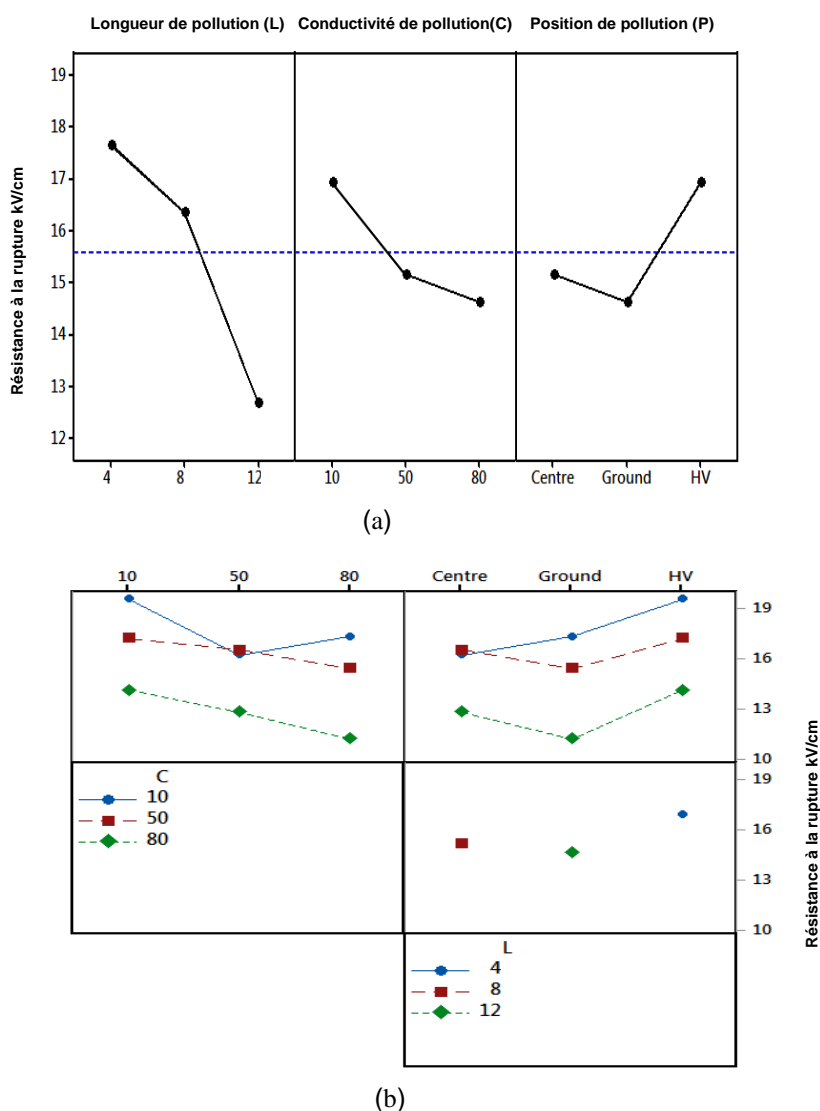


Figure 4. 5. Graphiques des principaux effets des paramètres de la couche de pollution sur la résistance à la rupture

La Figure 4.6. présente le graphique de probabilité normale des réponses prédites pour les valeurs maximales du champ électrique, avec un intervalle de confiance de 95%.

Comme mentionné précédemment, on observe qu'une légère ligne est suivie. La valeur P pour le champ électrique maximal dépasse 0,05, ce qui signifie que dans ce cas, l'hypothèse nulle ne peut être rejetée et que les données suivent une distribution normale.

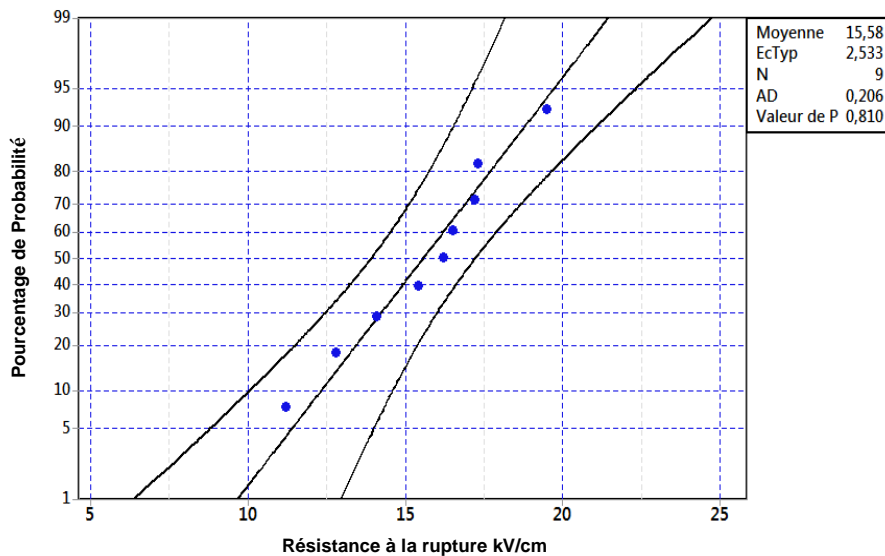


Figure 4. 6. Graphique de probabilité normale de la résistance à la rupture à un intervalle de confiance de 95%

4.4. Conclusion

L'analyse de variance (ANOVA) a été un outil essentiel dans cette étude pour évaluer l'impact des paramètres de pollution non uniforme sur le processus de contournement et le comportement diélectrique des isolateurs en céramique. Les résultats ont révélé que la longueur et la position de la couche de pollution ainsi que l'effet sont significatifs. Le principal avantage de la méthodologie présentée est qu'elle fournit une connaissance intéressante sur l'impact des paramètres de pollution non uniforme sur le processus de claquage et le comportement diélectrique le long des isolateurs en céramique. Les recherches présentées peuvent constituer un outil efficace pour développer un modèle mathématique adapté aux calculs sous pollution non uniforme. Par conséquent, les résultats de cette étude pourraient être utiles pour la conception et la sélection d'isolateurs en céramique pour les zones polluées.

Chapitre 5

Conclusions Générales



5.1. Conclusions Générales

La fiabilité du système électrique repose en grande partie sur la performance efficace des isolateurs haute tension, qui jouent un rôle crucial dans le maintien de l'intégrité du réseau électrique face à diverses conditions environnementales. Cependant, l'accumulation de pollution sur les surfaces des isolateurs peut compromettre leur efficacité et entraîner des perturbations électriques potentiellement graves. Dans cette étude, une analyse approfondie a été menée pour évaluer les effets des différents paramètres de pollution, notamment la conductivité, la position et la longueur de la couche de pollution, sur les performances des isolateurs en céramique. En utilisant des techniques d'analyse statistique avancées telles que l'analyse de variance (ANOVA), les chercheurs ont pu déterminer les effets individuels et interactifs de ces paramètres sur des aspects critiques tels que le champ électrique maximal et la tension de contournement. Les résultats ont mis en évidence que la longueur de la couche de pollution exerce une influence significative sur le champ électrique le long de la surface contaminée, montrant une augmentation de l'intensité du champ électrique avec l'augmentation de la longueur et de la position de la couche de pollution. Ces conclusions offrent des perspectives précieuses pour la conception et la configuration des isolateurs utilisés dans les régions sujettes à la pollution atmosphérique, fournissant ainsi des directives essentielles pour améliorer la fiabilité et la durabilité des réseaux électriques. Par conséquent, il est fortement recommandé de tenir compte de ces paramètres de pollution lors de la conception et de l'installation d'isolateurs, afin de garantir des performances optimales et une résilience accrue dans des environnements variés et souvent difficiles.

Références



Références

- [1] O. Lamarene, « influence d'une barrière isolante sur la tension de claquage et sur le champ électrique », PFE Ingénieur, UAM Béjaïa septembre 2005.
- [2] F. Amir et KH. Namaoui, « étude du comportement d'un isolateur pollué soumis à une tension alternative », PFE Ingénieur, UAM Béjaïa, juin 2004.
- [3] Kothari, D. P. (2018). *Modern Power System Analysis* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
- [4] Rao, N. V. (2016). *Electrical Power Systems* (2nd ed.). Khanna Publishers.
- [5] Sood, V. K., Chandel, R., & Saini, R. P. (2020). "Impact of Pollution on Electrical Insulators: A Review". *IEEE Access*, 8, 152570-152583.
- [6] Zhou, Y., Xu, B., & Li, Z. (2019). "Analysis of Insulator Pollution Flashover Characteristics under Different Fog Conditions". *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 26(4), 1197-1204.
- [7] Chen, Y., Yang, L., & Ma, X. (2017). "Investigation on Fog Conductivity and Its Influence on Pollution Flashover of Insulators". *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 24(6), 3930-3937.
- [8] Wang, S., Zhou, J., & Yu, C. (2021). "Analysis of the Leakage Current Characteristics and Pollution Performance of Composite Insulators". *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 28(1), 278-286.
- [9] Liu, Y., Cheng, S., & Lei, Y. (2018). "Research on Pollution Characteristics of Porcelain Insulators and Its Influence on Pollution Flashover Voltage". *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 25(2), 678-685.
- [10] Gupta, R. (2020). "Review on Design and Material Selection of Insulators for High-Voltage Transmission Lines". *IEEE Access*, 8, 130525-130543. [6] M. Terkmani, M. Babouamer, « Contournement des Isolateurs des Lignes de Haute Tension », Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, juin 2005.
- [11] S. Satta, « 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- Sétif, 2018.

- [12] H. A. Slamet «Contribution à l'étude du modèle développé d'un isolateur pollué »
Mémoire de magister, Sétif 2013.
- [13] S. E. Makhloufi «Comportement d'un modèle plan d'isolateur pollué sous tension
alternative», Mémoire de master, Université de M'sila, 2020.
- [14] R. Boudissa, R. Baersch, A. Mekhaldi, Z. Sahli, (effet de la non uniformité de la
distribution sur le contournement des isolateurs), 6 CNHT, 5, 6 et 7
Nov. 2007, Taghit, Béchar, Algérie.
- [15] Belhouchet K, Bayadi A, Belhouchet H, Romero M, Improvement of mechanical
and dielectric properties of porcelain insulators using economic raw materials,
Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, 2019; 58 (1), pp. 28-37.
- [16] Ranjbar, M. H., & Shadaram, M. (2017). A survey on the properties and
applications of porcelain insulators. Dans *Insulation Materials in Context of
Integrated Circuits and Microelectronic Devices* (pp. 23-55).
- [17] Tunaboylu, B., & Sultana, M. (2017). Mechanical and electrical analysis of
porcelain insulator using finite element method. *Engineering Failure Analysis*, 79,
631-643.
- [18] Nekahi, A., McMeekin, S. G., & Farzaneh, M. (2016). Effect of humidity, air pressure,
air flow velocity and wind chill on the flashover performance of silicone rubber
insulators. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 23(1), 433-
440.
- [19] Malmedal, K., & Sen, P. N. (2003). Structural integrity of porcelain insulator: A study on
the effect of manufacturing defects. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical
Insulation*, 10(1), 88-95.
- [20] Lambeth, P. J. (1983). The breakdown strength of porcelain and other insulating materials
in uniform and divergent fields. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, (3), 278-285.
- [21] Ridolfi, M. (1984). Analyse des modes de défaillance des isolateurs en porcelaine des
lignes électriques aériennes. *Bulletin des Electriciens Suisses*, 75(13), 606-612.
- [22] Dong, B., Wong, P. L., Jiang, X., & Wong, C. S. (2004). Electrical performance of
porcelain and toughened glass insulators under artificial pollution. *IEEE Transactions on
Dielectrics and Electrical Insulation*, 11(1), 170-176.
- [23] Hill, R. J., Reynders, J. P., & Mahatho, N. (1995). Dry-band arc inception behaviour on
porcelain insulators. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2(3),
501-508.

- [24] Ilhan, S., Ab-Raufu, A. A., Tunaboylu, B., & Soultan, M. M. (2018). Thermal analysis of porcelain insulator used in overhead transmission lines. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 25(1), 280-287.
- [25] Sedlar, D., Štubňa, I., Palou, M., & Kozáková, Z. (2017). The effect of ceramic raw material composition on the properties of porcelain insulators. *Ceramics International*, 43(15), 12390-12397.
- [26] A.HAMZA SLAMET, « Contribution à l'étude du modèle développé d'un isolateur pollué », Mémoire de Magister de l'USTO, 2013.
- [27] Jiang, C. H., Huang, Z. Y., Zhang, J. H., & Liu, W. Z. (2009). Microstructure and mechanical properties of porcelain insulators. *Journal of the European Ceramic Society*, 29(5), 867-876.
- [28] Gregorová, E., Vojtová, L., Košňovská, J., Šašek, L., & Palou, M. (2018). Porcelain insulators: Materials and production process. *Ceramics International*, 44(8), 9510-9517.
- [29] Chen, S., Gorur, R. S., Liu, Y., & Zhao, J. (2008). Thermal analysis of porcelain insulators with different diameters. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 15(2), 347-353.
- [30] Illias, H. A., Gomes, C., & Mokhlis, H. (2020). Mechanical failure analysis of porcelain insulator for overhead transmission line. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 736, 022027.
- [31] Shahbaz, S., & Ahmad, S. (2021). Applications of composite insulators in electrical power systems: A review. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 8(1), 1-12.
- [32] A.ADEL KARA, « Contribution à l'étude d'un modèle dynamique de contournement d'un isolateur pollué », Mémoire de Magister de l'U.F.A SETIF, 2013.
- [33] F. Amidl, K. Ouerdane, 'Les effets de la pollution sur les ouvrages électriques à 30kV en régions littorales', projet de fin d'études, département d'électrotechnique, université des sciences et technologies houari boumediene, bab Ezzouar, juin 1998.
- [34] T. Meragni, I. Guia, « L'effet de la pollution désertique sur l'isolateur de haute tension », Mémoire de Master de l'Université d'El Oued, 2015.
- [35] F. Amidi, k. Ouerdane, « Les effets de la pollution sur les ouvrages électriques à 30kV en régions littorales », Projet de Fin d'Etude, Département d'Electrotechnique, Université des Sciences et Technologies Houari Boumediene, Bab Ezzouar, juin 1998.
- [36] A. Mekhaldi, "Etude du Développement d'un Arc Electrique sur des Surfaces Isolantes Contaminées par la Pollution Désertique", Thèse de Magister, Département de Génie

Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, Juin 1990.

- [37] D.ZIANI, « Influence de la forme des électrodes sur le contournement des isolateurs propres », Mémoire de Magister de l'USTO.
- [38] M.KERN « Introduction à la méthode des éléments finis », paris : école nationale supérieure des mines de paris. 2004-2005.
- [39] P.CLAVERIE, Y.PORCHERON, « Les phénomènes de pollution des isolateurs et l'isolement des ouvrages en région polluées », RGE N 3 mars 1973.
- [40] M.Teguar, <<Modelisation d'isolateurs pollues soumis a diver's parametres Eléctrogeometriques>> Thèse Doctorat ENP.Alger .Algerie, 2003.
- [41] Ouchen L, Bayadi A, and Boudissa R, Dynamic model to predict the characteristics of the electric arc around a polluted insulator, IET Sci.Meas.Technol. 2020;14 no. 1, pp. 83–90.
- [42] D. C. Montgomery, "Design and Analysis of Experiments," John Wiley & Sons, 2017.
- [43] B. G. Tabachnick and L. S. Fidell, "Using Multivariate Statistics," 7th ed., Pearson, 2019.
- [44] J. F. Hair, W. C. Black, B. J. Babin, and R. E. Anderson, "Multivariate Data Analysis," 8th ed., Cengage Learning, 2018.

المخلص

تعتمد موثوقية النظام الكهربائي إلى حد كبير على الأداء الجيد لعوازل الجهد العالي، والتي يجب أن تتحمل جميع الظروف الجوية. يمكن أن يؤدي ترسب التلوث على أسطح العوازل إلى انخفاض كبير في كفاءتها وحتى حدوث اضطرابات كهربائية كبيرة. تمت دراسة تأثير عوامل طبقة التلوث المختلفة، بما في ذلك الموصلية، الموقع وطول طبقة التلوث، على أداء العوازل الخزفية. باستخدام التحليل الإحصائي للتباين ومنهجية سطح الاستجابة، قامت الدراسة بتقييم التأثيرات الفردية والتفاعلية لهذه المعلمات على ذروة المجال الكهربائي. استخدمت الدراسة نموذجًا ثلاثي الأبعاد من استخدام Comsol Multiphysics والمحاكاة التي بواسطة طريقة العناصر المحدودة (FEM) لدراسة العلاقات بين هذه المعلمات. أظهرت النتائج أن المجال الكهربائي على طول السطح الملوث يتأثر بشكل رئيسي بطول طبقة التلوث. وأظهرت عمليات المحاكاة أن شدة المجال الكهربائي تزداد مع طول وموقع طبقة التلوث. يمكن لنتائج الدراسة أن تفيد تصميم وتكوين العوازل المستخدمة في المناطق الملوثة، وتوفر الطريقة المطورة نهجًا موثوقًا وواقعيًا لتقدير أداء التلوث للعوازل الخزفية الأسطوانية.

الكلمات المفتاحية: الخزف، التلوث، المجال الكهربائي، طريقة العناصر المحدودة (FEM)، تحليل التباين، المحاكاة

Abstract

The reliability of a high-voltage electrical system depends largely on the ability of outdoor high-voltage insulators to withstand varied weather conditions. Deposits of pollution on the surfaces of these insulators can lead to a significant degradation of their performance and potentially cause major electrical disruptions. The effects of various pollution layer parameters, including conductivity, position, and length, on the performance of high-voltage cylindrical insulators were examined. By using statistical variance analysis and response surface methodology, the study evaluated the individual and interactive effects of these parameters on the flashover voltage, maximum electric field, and breakdown strength. The study employed a 3D model from Comsol Multiphysics and finite element method (FEM) simulations to investigate the relationships between these parameters. The findings revealed that the flashover voltage of non-uniformly contaminated surfaces is primarily influenced by the length of the pollution layer. Simulations showed that the electric field intensity increases with the length and position of the pollution layer. The study's findings can inform the design and configuration of insulators used in polluted regions, and the developed methodology offers a reliable and realistic approach for estimating the pollution performance of cylindrical porcelain insulators.

Keywords: Porcelain, Pollution, Electric field, Finite Element Method (FEM), ANOVA, Simulation.

Résumé

La fiabilité du système électrique dépend en grande partie de la bonne performance des isolateurs haute tension, qui doivent résister à toutes les conditions météorologiques. La déposition de pollution sur les surfaces des isolateurs peut entraîner une chute significative de leur efficacité et même des perturbations électriques importantes. Les effets de divers paramètres de couches de pollution, notamment la conductivité, la position et la longueur de couche, sur les performances des isolateurs en céramique ont été étudiés. En utilisant l'analyse de variance statistique, l'étude a évalué les effets individuels et interactifs de ces paramètres sur le champ électrique maximal et la tension de contournement. L'étude a employé un modèle 3D issu de Comsol Multiphysics et des simulations effectuées par la méthode des éléments finis (FEM) pour étudier les relations entre ces paramètres. Les résultats ont révélé que le champ électrique le long de surface non uniformément contaminée est principalement influencée par la longueur de la couche de pollution. Les simulations ont montré que l'intensité du champ électrique augmente avec la longueur et la position de la couche de pollution. Les résultats de l'étude peuvent informer la conception et la configuration des isolateurs utilisés dans les régions polluées, et la méthode développée offre une approche fiable et réaliste pour estimer les performances de pollution des isolateurs en céramique cylindriques en porcelaine.

Mots-clés: Porcelaine, Pollution, Champ électrique, Méthode des éléments finis (MEF), ANOVA, Simulation.