



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية

N° d'enregistrement

Université de Ghardaïa

...../...../.....

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم الية وكهروميكانيك

Département de d'automatique et d'électromécanique

Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme

Master

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electromécaniques

Spécialité : maintenance industrielle

Thème

**Etude par simulation de la performance électrique d'un
isolateur HT sous contrainte de tension continue**

Présenté par :

Guesmia Adnan

Ben Messaoud Abderazzak

Soutenue publiquement le : /05/2024

Devant le jury composé de :

.....NOM.....

.....grade.....

Univ. Ghardaïa

Président

.....NOM.....

.....grade.....

Univ. Ghardaïa

Examinateur

.....NOM.....

.....grade.....

Univ. Ghardaïa

Examinateur

BOUCHELGA Fatma

MCA

Univ. Ghardaïa

Encadreur

AOUABED Fatiha

MCB

Univ. Ghardaïa

CO-Encadreur

Année universitaire 2023/2024

Remerciements

Nous souhaitons exprimer nos sincères remerciements à Allah, le Tout-Puissant, pour nous avoir accordé la volonté, la santé et la patience nécessaires tout au long de ces années.

Nous tenons également à exprimer notre profonde gratitude à notre superviseur, le Dr F. BOUCHELGA, pour son accompagnement constant tout au long de la réalisation de ce mémoire et pour ses précieux conseils.

Nous adressons également nos remerciements à tous les membres du jury qui ont accepté d'évaluer notre travail.

Enfin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis et collègues pour leur soutien moral.

Nous sommes reconnaissants envers toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail, et leur adressons nos plus sincères remerciements.

Introduction Générale.....	
Chapitre I : Isolateurs des lignes aériennes hautes tension.....	
I.1. Introduction.....	4
I.2. Types d’isolateurs.....	4
I.2.1. Isolateurs rigides.....	4
I.2.2. Isolateurs suspendus ou éléments de chaîne.....	5
I.2.3. Isolateur à long fût.....	5
I.2.4. Isolateur capot et tige.....	6
I.2.4.1. Profil standard.....	7
I.2.4.2. Profil antibrouillard (forme A).....	8
I.2.4.3. Profil antibrouillard (forme B).....	8
I.2.4.4. Profil sphérique.....	9
I.2.4.5. Profil plat.....	9
I.3. Matériaux utilisés pour la fabrication des isolateurs et leur impact sur leur performance électrique.....	10
I.3.1. Isolateur en céramique.....	10
I.3.2. Isolateur en verre.....	10
I.3.2.1. Verre recuit.....	10
I.3.2.2. Verre trempé	11
I.3.3. Isolateur en matériaux synthétiques.....	11
I.4. Effets des conditions climatiques et de la pollution sur la performance des isolateurs.....	12
I.4.1. Différentes sources de pollution.....	12
I.4.1.1. Source de pollution naturelle.....	12
I.4.1.2. Source de pollution marine.....	13
I.4.1.3. Source de pollution désertique.....	13
I.4.1.4. Source de pollution industrielle.....	13
I.4.1.5. Source de pollution mixte.....	13

I.5. Sévérité de pollution d'un site.....	13
I.6. Conséquences de la pollution.....	14
I.6.1. Arc non localisé.....	14
I.6.2. Arc fixe.....	14
I.6.3. Contournement des isolateurs pollués.....	14
I.7. Techniques de lutte contre la pollution.....	16
I.7.1. Allongement de la ligne de fuite.....	16
I.7.2. Utilisation des isolateurs à profil plat.....	16
I.7.3. Graissage des isolateurs par une couche hydrophobe.....	17
I.7.4. Revêtement à base de silicone.....	17
I.7.5. Utilisation des isolateurs composites.....	17
I.7.6. Nettoyage sous et hors tension.....	17
I.8. Installation et maintenance.....	18
I.8.1. Méthodes d'installation des isolateurs sur les lignes haute tension.....	18
I.8.2. Contraintes et précautions à prendre.....	19
I.8.3. Les bonnes pratiques de maintenance.....	20
I.8.4. Évaluation de l'état des isolateurs et les signes de dégradation.....	22
I.9. Conclusion.....	23
Chapitre II : Recherches et développements actuels sur les isolateurs.....	
II.1. Introduction.....	24
II.2. Méthodes numériques de calcul du potentiel et du champ électrique.....	24
II.2.1. Equations de Maxwell.....	25
II.2.2. Condition aux limites.....	26
II.2.3. Méthode des différences finis (MDF).....	27
II.2.3.1. Principe de la méthode des différences finis (MDF).....	27
II.2.3.2. Avantages de la méthode des différences finis (MDF).....	28
II.2.3.3. Inconvénients de la méthode des différences finis (MDF).....	28
II.2.4. Méthode des éléments finis (MEF).....	28

II.2.4.1. Principe de la méthode des éléments finis (MEF)	28
II.2.4.2. Avantages de la Méthode des éléments finis (MEF).....	29
II.2.4.3. Inconvénients de la Méthode des éléments finis (MEF).....	29
II.2.5. Méthode de simulation de charges.....	30
II.2.5.1. Principe de la méthode de simulation de charges (MSC)	30
II.2.5.2. Avantages de la méthode de simulation de charges (MSC)	30
II.2.5.3. Inconvénients de la méthode de simulation de charges (MSC)	30
II.2.6. Méthode des éléments finis de frontière (MEFF).....	30
II.2.6.1. Principe de la Méthode des éléments finis de frontière (MEFF).....	30
II.2.6.2. Avantages de la Méthode des éléments finis de frontière (MEFF).....	31
II.2.6.3. Inconvénients de la Méthode des éléments finis de frontière (MEFF).....	31
II.3. Travaux des simulations réalisées sur la distribution du champ et du potentiel électriques.....	32
II.3.1. Travaux de Zhao et Comber.....	32
II.3.2. Travaux de Chakravorti et Mukherjee.....	32
II.3.3. Travaux d'El-Kishky et Gorur.....	33
II.3.4. Travaux de volat.....	33
II.3.5. Travaux d'Aydogmus et Cebeci.....	35
II.3.6. Travaux de M. S. Kamarudin.....	36
II.3.7. Travaux de Jiamin Wu.....	36
II.3.8. Travaux de HADFI Youcef.....	36
II.3.9. Travaux de Yu Zhong.....	37
II.3.10. Travaux de Lichun.....	37
II.4. Conclusion.....	37
Chapitre III : Simulation les distributions du champ et du potentiel électrique.....	
III.1. Introduction.....	39
III.2. Modèle d'isolateur simulé.....	39
III.2.1. Modèle sur SolidWorks.....	39

III.2.2. Modèle sur Comsol Multiphysics.....	40
III.3. Résultats de la simulation.....	42
III.3.1. Simulation d'un isolateur en verre.....	42
III.3.1.1. Effet du profil de l'isolateur.....	42
III.3.1.2. Effet de présence de la couche de pollution.....	45
III.3.1.3. Effet de la conductivité.....	47
III.3.2. Simulation d'un isolateur en silicone.....	48
III.3.2.1. Effet du profil de l'isolateur.....	48
III.3.2.2. Effet de présence et du mode de distribution de pollution.....	51
III.3.2.3. Effet de la conductivité.....	56
III.3.3. Simulation d'un isolateur en isolateur en surface super hydrophobe.....	57
III.3.3.1. Effet du profil de l'isolateur.....	57
III.3.3.2. Effet de présence et du mode de distribution de pollution.....	60
III.3.3.3. Effet de la conductivité.....	64
III.3.4. Comparaison des résultats.....	65
III.3.4.1. Effet de la variation du type de matériau isolant sur la distribution du champ électrique.....	65
III.4. Conclusion	68
Conclusion Générale.....	

Figure I.1. Vue en coupe d'un isolateur rigide en verre	5
Figure I.2. Isolateurs à long fut.....	6
Figure I.3. Vue en coupe d'un isolateur capot et tige 9.....	7
Figure I.4. Isolateur capot et tige de profile standard.....	8
Figure I.5. Isolateur capot et tige de profile anti-brouillard (forme A).....	8
Figure I.6. Isolateur capot et tige de profile anti-brouillard (forme B).....	9
Figure I.7. Isolateur capot et tige de profile sphérique.....	9
Figure I.8. Isolateur capot et tige de profile plat.....	9
Figure I.9. Isolateur en céramique.....	10
Figure I.10. Isolateur en verre recuit.....	11
Figure I.11. Isolateur en verre trempé.....	11
Figure I.12. Isolateur composite.....	12
Figure II.1. Maillage carrée.....	27
Figure II.2. Analyse comparative des résultats expérimentaux et numériques pour un modèle 2D.....	34
Figure II.3. Analyse comparative des résultats expérimentaux et numériques pour un modèle 3D.....	35
Figure II.4. Isolateur BSFT-9336 : (a) : profil réel, (b) : modèle ouvert.....	36
Figure III.1. Modèles simulés sous SolidWorks.....	40
Figure III.2. Maillage des deux modèles d'isolateurs.....	41
Figure III.3. Distribution du champ électrique sur la surface d'un isolateur en verre.....	43
Figure III.4. Photos de distribution du champ électrique sur la surface d'un isolateur en verre à ailettes uniformes et non-uniformes.....	44
Figure III.5. Distribution du potentiel électrique sur la surface d'un isolateur en verre.....	44
Figure III.6. Photos de distribution du potentiel électrique sur la surface d'un isolateur en verre à ailettes uniformes et non-uniformes.....	45
Figure III.7. Distribution du champ électrique sur la surface d'un isolateur en verre.....	46
Figure III.8. Distribution du potentiel électrique sur la surface d'un isolateur en verre.....	46
Figure III.9. Distribution du potentiel et champ électrique sur la surface d'un isolateur en verre contaminé.....	47

Figure III.10. Distribution du champ électrique sur la surface d'un isolateur en verre.....	47
Figure III.11. Distribution du potentiel électrique sur la surface d'un isolateur en verre.....	48
Figure III.12. Distribution du champ électrique sur la surface d'un isolateur en silicone.....	49
Figure III.13. Photos de distribution du champ électrique sur la surface d'un isolateur en silicone propre avec ailettes uniformes et non-uniformes.....	49
Figure III.14. Distribution du potentiel électrique sur la surface d'un isolateur en silicone...	50
Figure III.15. Photos de distribution du potentiel électrique sur la surface d'un isolateur en silicone avec ailettes uniformes et non-uniformes.....	50
Figure III .16. Distribution du champ électrique sur la surface d'un isolateur en silicone.....	52
Figure III.17. Photos de la distribution du champ électrique sur la surface d'un isolateur en silicone en fonction du mode de distribution des gouttes d'eau.....	53
Figure III.18. Distribution du potentiel électrique sur la surface d'un isolateur en silicone...	54
Figure III.19. Photos de la distribution du potentiel électrique sur la surface d'un isolateur en silicone en fonction du volume des gouttes d'eau.....	54
Figure III.20. Distribution du champ électrique sur les ailettes de l'isolateur en silicone uniformément polluée.....	55
Figure III.21. Distribution du champ électrique sur les ailettes de l'isolateur en silicone uniformément polluée.....	55
Figure III.22. Distribution du champ électrique sur la surface d'un isolateur en silicone.....	56
Figure III.23. Distribution du potentiel électrique sur la surface d'un isolateur en silicone...	57
Figure III.24. Distribution du champ électrique sur la surface d'un isolateur superhydrophobe.....	58
Figure III.25. Photos de la distribution du champ électrique sur la surface d'un isolateur superhydrophobe avec ailettes uniformes et non-uniformes.....	58
Figure III.26. Distribution du potentiel électrique sur la surface d'un isolateur superhydrophobe.....	59
Figure III.27. Photos de la distribution du potentiel électrique sur la surface d'un isolateur superhydrophobe avec ailettes uniformes et non-uniformes.....	59
Figure III.28. Distribution du champ électrique sur la surface d'un isolateur superhydrophobe.....	60

Figure III.29. Photo de la distribution du champ électrique sur la surface d'un isolateur superhydrophobe en fonction du volume des gouttes d'eau.....	61
Figure III.30. Distribution du champ électrique sur les ailettes de l'isolateur superhydrophobe.....	62
Figure III.31. Distribution du potentiel électrique sur la surface d'un isolateur superhydrophobe.....	62
Figure III.32. Photo de la distribution du potentiel électrique sur la surface d'un isolateur superhydrophobe en fonction du volume des gouttes d'eau.....	63
Figure III.33. Distribution du potentiel électrique sur les ailettes de l'isolateur en surface superhydrophobe.....	64
Figure III.34. Distribution du champ électrique sur la surface d'un isolateur superhydrophobe.....	64
Figure III.35. Distribution du potentiel électrique sur la surface d'un isolateur superhydrophobe.....	65
Figure III.36. Distribution du champ électrique sur la surface des isolateurs dans le cas sec.	66
Figure III.37. Distribution du champ électrique sur la surface des isolateurs dans le cas polluée.....	67
Figure III.38. Distribution du champ électrique sur la surface des isolateurs dans le cas sec.	67
Figure III.39. Distribution du champ électrique sur la surface des isolateurs dans le cas polluée.....	68

Tableau III.1. Spécifications techniques des isolateurs utilisés dans la simulation.....	40
Tableau III.2. Propriétés des matériaux utilisés pour la modélisation des isolateurs.....	42

Liste des acronymes et symboles

EPI	Equipements de protection individuelle
CA	Courant alternatif
HT	Haute tension
MDF	Méthode des différences finis
SDM	Méthode des différences structurées
MEF	Méthode des éléments finis
SMC	Méthode de simulation de charges
MEFF	Méthode des éléments finis de frontière
NFDM	New Flashover Dynamics Model
2D	Bidimensionnel
3D	Tridimensionnel
L	Plus courte distance dans l'air
P	Pas nominal
ε	Longueur du canal de perforation
\vec{H}	Champ magnétique
\vec{B}	Induction magnétique
\vec{E}	Champ électrique
\vec{D}	Induction électrique
ρ_v	La densité volumique de charges
J	La vectrice densité de courant
ε	La permittivité électrique
μ	La perméabilité magnétique
σ	La conductivité électrique du milieu
$j\omega$	La grandeur complexe
j	Unité imaginaire
ω	La fréquence angulaire de la source
ρ_s	Le produit de la résistivité électrique du contaminant (Ω/m)
m	L'épaisseur de la couche de pollution
E_{av} et E_{max}	Quantifier le degré de distorsion du champ électrique
V	Volt

Introduction Générale

L'électricité est cruciale pour le progrès économique et industriel d'un pays et, à mesure que les marchés de l'énergie s'ouvrent, il devient impératif de fournir une électricité fiable et ininterrompue aux consommateurs. Par conséquent, l'un des principaux objectifs de la recherche énergétique est de réduire la fréquence et la durée des interruptions de l'approvisionnement en électricité afin d'assurer la continuité et la fiabilité du service.

L'électrification des sociétés modernes a révolutionné l'infrastructure de distribution électrique, permettant de transférer d'importantes quantités d'énergie sur des vastes distances. Cette infrastructure, indispensable à la distribution fiable et sécuritaire de l'électricité, englobe divers éléments tels que les câbles haute tension, les isolateurs, les transformateurs et les sous-stations. Parmi ceux-ci, les isolateurs haute tension jouent un rôle particulièrement crucial.

Ces isolateurs subissent de nombreuses contraintes, notamment des tensions élevées, des variations de température, des charges mécaniques et des conditions environnementales extrêmes, qui peuvent affecter leur performance électrique et leur durée de vie.

Le choix des matériaux des isolateurs haute tension est d'une importance primordiale pour garantir la performance électrique, la fiabilité et la durabilité de tout réseau électrique. Les matériaux isolants qui résistent bien à des conditions de contamination auront une durée de vie plus longue et nécessiteront moins d'entretien, ce qui contribuera à une meilleure performance électrique globale du réseau. Il existe une variété des matériaux, à savoir, des isolateurs fabriqués par des matériaux hydrophiles, hydrophobes et des recherches sont effectuées sur la possibilité d'utiliser des isolateurs superhydrophobes.

Les isolateurs sont exposés à différentes pressions environnementales, la pollution étant la plus importante d'entre elles. Cette pollution peut provenir de diverses sources telles que les activités industrielles, les environnements marins, les régions désertiques ou une combinaison de ces sources.

La pollution, lorsqu'elle est sèche, ne dégrade pas la rigidité diélectrique des isolateurs. Cependant, l'humidification de celle-ci, entraîne la dissolution des sels et la formation d'une couche électrolytique. Cela conduit à la génération d'un courant de fuite qui chauffe la couche électrolytique par effet Joule. En s'échauffant, la couche de pollution s'assèche progressivement [1], ce qui modifie la distribution du champ électrique entre les électrodes. Par conséquent, une partie importante de la tension appliquée se transfère à la partie sèche, ce

Introduction Générale

qui peut provoquer une rupture diélectrique si le champ local dépasse un certain seuil. Cette rupture peut conduire à l'apparition de décharges électriques ou d'arcs partiels. Dans certaines conditions, cette décharge peut continuer à croître jusqu'à ce qu'elle contourne complètement l'isolant.

Une compréhension approfondie de la distribution du potentiel et du champ électrique à travers les isolateurs recouverts de couches de pollution nous permettrait d'identifier les niveaux critiques de potentiel et de champ électrique qui conduisent à la formation d'arcs partiels.

La difficulté de mener de telles recherches réside dans la complexité de la mesure précise de la distribution du potentiel et du champ électrique le long des isolateurs pollués. Ces mesures nécessitent un équipement spécialisé, coûteux et souvent complexe, généralement disponible uniquement en laboratoire.

Cependant, il est possible de contourner les mesures expérimentales en utilisant des outils numériques pour analyser les distributions du potentiel et du champ électriques le long des isolateurs pollués. Avec l'avancement continu de l'informatique et des logiciels de calcul électromagnétique de plus en plus performants, il est aujourd'hui réalisable d'obtenir des résultats précis et rapides sans nécessiter d'équipements coûteux et complexes. Parmi les méthodes numériques disponibles pour les calculs électromagnétiques, la Méthode des Éléments Finis se démarque comme étant particulièrement adaptée à cette tâche. Son utilisation à travers des logiciels comme COMSOL Multiphasiques 6.1 permet d'effectuer de manière efficace diverses simulations.

L'objectif visé par ce travail est de réaliser une analyse précise de la distribution du champ électrique autour des isolateurs réels de différents matériaux et format et de comparer les résultats de simulation obtenus. De plus, l'effet de plusieurs paramètres sur la distribution du champ électrique au niveau des isolateurs seront examinés.

Le travail est subdivisé en trois chapitres essentiels :

Dans le premier chapitre, nous allons présenter les divers types, profils et matériaux des isolateurs utilisés dans les lignes de transport de l'énergie électrique, puis nous citons les sources de pollution et leurs influence sur la performance électrique des isolateurs, ainsi que les solutions proposer pour lutter contre la contamination des surfaces isolantes. Vers la fin, un petit aperçu sur la maintenance de ces éléments sera présenté.

Introduction Générale

Concernant le deuxième chapitre, nous allons discuter l'état de l'art des travaux réalisés auparavant dans le même sens de notre travail.

Le troisième chapitre sera consacré à la présentation de notre modèle de simulation, nous allons parler sur les détails du modèle, les différentes simulations, par la suite, nous allons discuter les résultats obtenus.

I. 1. Introduction

Les isolateurs hautes tensions jouent un rôle crucial dans la séparation de deux corps ou composants exposés à des tensions différentes. Leur fonction première est d'éviter les court-circuités, les pertes de courant et les risques d'électrocution, qui peuvent entraîner des pertes financières, voire des décès. Les isolateurs présentent une résistance élevée au passage du courant et une conductivité pratiquement nulle.

Dans notre étude, nous nous concentrons sur les isolateurs de lignes aériennes, qui remplissent deux fonctions principales. Premièrement, ils isolent électriquement les lignes transmission et les structures de support (comme les pylônes), afin de prévenir les arcs électriques et les courts-circuits, garantissant ainsi une transmission sûre. Deuxièmement, ils fournissent un support mécanique en supportant le poids des lignes et en endurant diverses contraintes mécaniques, principalement dues au poids propre de la ligne.

I. 2. Types d'isolateurs

Les isolateurs utilisés dans les lignes de transport d'énergie électrique peuvent être classés en fonction de différents facteurs ; tels que l'application prévue (support ou douille), les matériaux utilisés, leurs profils et d'autres critères comme la capacité de traversée.

I. 2. 1. Isolateurs rigides

Ils comprennent un ou plusieurs isolateurs fusionnés et solidement enfermés ensemble (Figure I.1). Ils sont fixés aux pylônes par l'intermédiaire d'un raccord fixe. L'isolateur rigide supporte principalement les forces de flexion et de compression lorsqu'il est positionné verticalement, mais il peut également être utilisé horizontalement ou en angle. Il est généralement utilisé dans le cas des lignes aériennes jusqu'à 60 kV. Les isolateurs céramiques rigides normalisés modernes sont dotés d'un arbre solide, remplaçant les anciennes versions composées de plusieurs cloches. Tous les isolateurs rigides normalisés sont dotés d'une douille scellée qui permet de les visser directement sur les raccords correspondants. Il n'est donc plus nécessaire de procéder à un scellement délicat au plâtre lors de l'assemblage de la ligne [2].

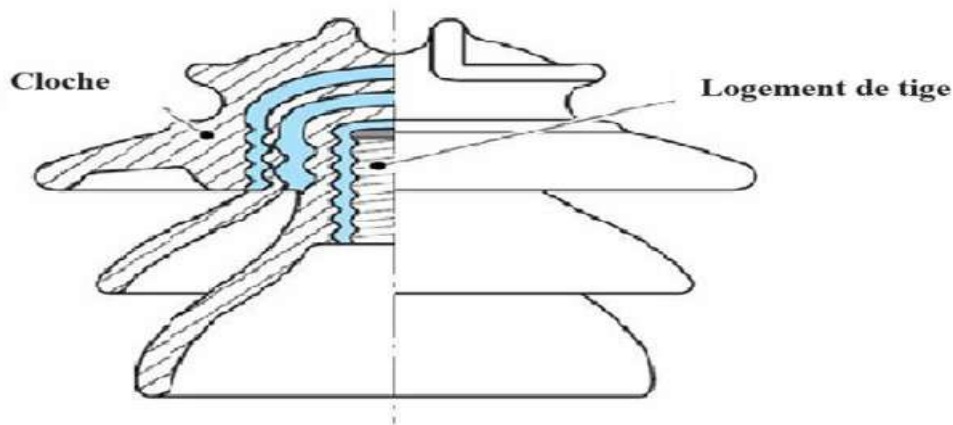


Figure I. 1. Vue en coupe d'un isolateur rigide en verre

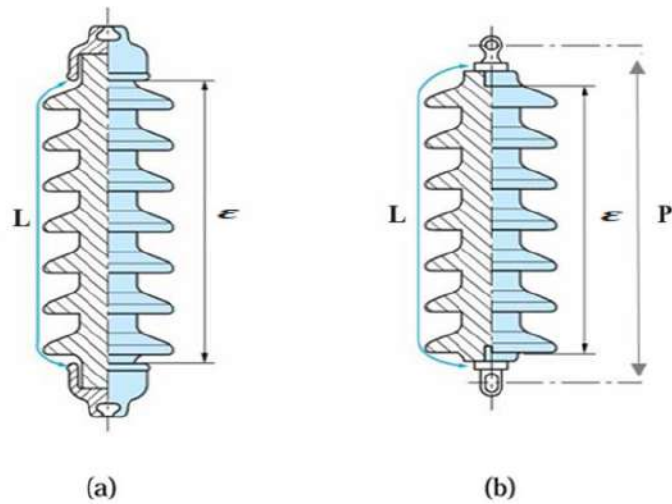
I. 2. 2. Isolateurs suspendus ou éléments de chaîne

Ces chaînes sont constituées d'un matériau isolant et d'un composant métallique utilisé pour relier deux isolateurs, ce qui confère à la chaîne un certain niveau de flexibilité. Cette disposition permet une certaine flexibilité au sein de la chaîne d'isolateurs [3, 4]. La chaîne d'isolateurs peut être installée sur le pylône de manière suspendue, verticale (en tant que chaîne d'alignement) ou horizontale (en tant que chaîne d'ancrage). Il existe deux types de composants de la chaîne :

- l'isolateur capot et tige.
- l'isolateur à long fût.

I. 2. 3. Isolateur à long fût

Il s'agit d'une tige cylindrique solide fabriquée en céramique, en porcelaine ou en matériaux synthétiques, généralement dotée d'ailettes. Chaque extrémité de la tige comprend un élément métallique pour les connexions [4]. Cette extrémité métallique peut prendre deux formes différentes : soit elle enveloppe les extrémités tronconiques du cylindre (Figure I.2.a), ou bien elle se présente sous la forme d'une tige scellée placée dans une cavité désignée (Figure I.2.b) [2, 3, 5].



L: Plus courte distance dans l'air, extérieure à l'isolateur.

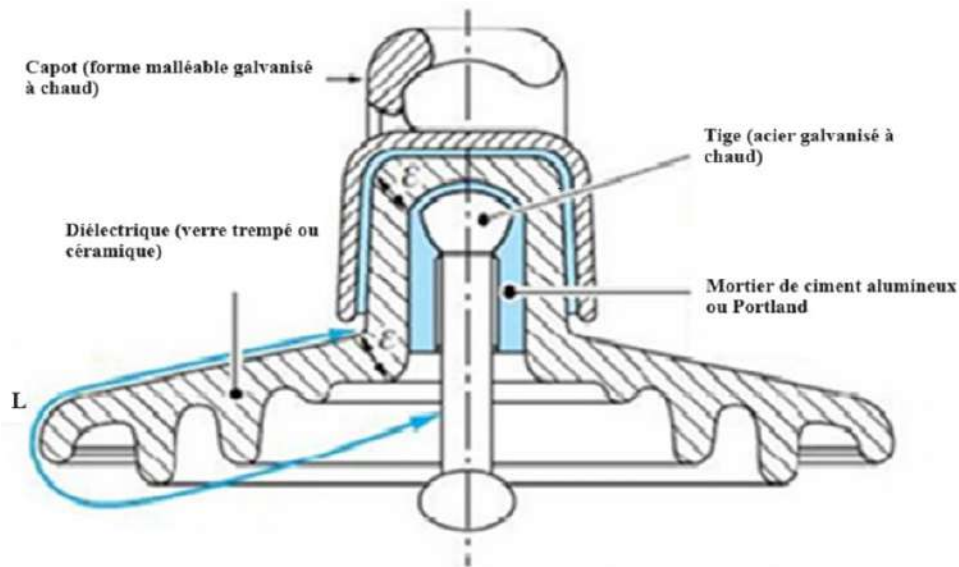
P : Pas nominal.

ϵ : Longueur du canal de perforation ($\epsilon \gg 1/2$).

Figure I. 2. Isolateurs à long fut

I. 2. 4. Isolateur capot et tige

L'isolateur à capuchon et à tige comprend un corps isolant dans lequel est logée une tige d'acier, la tête conique de la tige étant scellée dans le matériau isolant, généralement du verre ou de la porcelaine. À l'extrémité supérieure de l'isolateur se trouve un capuchon en fonte malléable scellé, perforé pour permettre l'insertion de l'extrémité inférieure de la tige. Le scellement de ces éléments de chaîne est réalisé en insérant la partie inférieure de la tige de l'élément supérieur dans le chapeau de l'élément inférieur, fixé avec du ciment, comme le montre (Figure I.3) [2].



L : Plus courte distance dans l'air entre le capot et la tige.

ε : Longueur du canal de perforation. $\varepsilon \ll 1/2$.

Figure I. 3. Vue en coupe d'un isolateur capot et tige [9]

Les spécifications des éléments d'isolateurs à chapeau et à tige sont conformes aux lignes directrices énoncées dans la NORME CEI-60305 [2]. Cette norme s'applique aux isolateurs situés dans des environnements non pollués ou pollués. Néanmoins, dans des conditions extrêmes, il est possible d'adapter certaines caractéristiques des isolateurs, telles que la ligne de fuite et la forme, afin d'améliorer leur efficacité.

I. 2. 4. 1. Profil standard

La forme et les mesures sont conformes aux normes mondiales, comme le précise la norme IEC 305 1978. La conception incorpore la planéité, des rainures internes bien espacées et une longueur de fuite supérieure à l'exigence de la norme. Ce type particulier est couramment utilisé dans les régions caractérisées par des niveaux de pollution moyens, comme l'illustre (Figure I.4) [3].



Figure I. 4. Isolateur capot et tige de profile standard

I. 2. 4. 2. Profil antibrouillard (forme A)

Le diamètre de ce profilé dépasse celui de la version standard et comprend deux ou trois rainures profondes. Ces rainures, ainsi que l'espacement plus large du profilé, facilitent l'auto nettoyage sous l'effet du vent et de la pluie. En outre, cette conception permet un nettoyage manuel simple en cas de besoin, comme l'illustre (Figure I.5) [2, 3].



Figure I. 5. Isolateur capot et tige de profile anti-brouillard (forme A)

I. 2. 4. 3. Profil antibrouillard (forme B)

Cette conception utilise l'épaisseur de la rainure extérieure pour servir de barrière protectrice contre le brouillard et l'accumulation de sels minéraux à la surface de l'isolateur. Ce faisant, il empêche la formation d'une couche conductrice d'électrolyte à la surface, ce qui le rend particulièrement efficace dans les régions côtières (Figure I.6).



Figure I. 6. Isolateur capot et tige de profile anti-brouillard (forme B)

I. 2. 4. 4. Profil sphérique

Cette configuration particulière, dépourvue de rainures, se traduit par une longueur de fuite relativement importante et facilite un nettoyage manuel simple et efficace (Figure I.7).



Figure I. 7. Isolateur capot et tige de profile sphérique

I. 2. 4. 5. Profil plat

L'élimination complète des rainures internes minimise l'accumulation de polluants sur la surface inférieure, facilitée par le flux d'air. Cette conception s'avère particulièrement efficace dans les régions désertiques où les précipitations pour l'auto nettoyage sont rares (Figure I.8).



Figure I. 8. Isolateur capot et tige de profile plat

I. 3. Matériaux utilisés pour la fabrication des isolateurs et leur impact sur leur performance électrique

Il existe plusieurs variétés des matériaux, chaque type a ses avantages et ses inconvénients, alors que le verre, la céramique et la porcelaine sont fréquemment utilisés dans la fabrication d'isolateurs malgré leur fragilité, la céramique perd progressivement de sa popularité en raison de deux inconvénients majeurs : son poids et les difficultés liées à la détection. Ces dernières années, l'utilisation de matériaux synthétiques dans la production d'isolateurs a pris de l'ampleur [3, 4].

I. 3. 1. Isolateur en céramique

Les céramiques ont été largement développées et fabriquées au fil du temps en raison de leurs performances exceptionnelles. Dans les zones soumises à des contraintes mécaniques intenses, la préférence va à l'utilisation d'isolateurs céramiques à grain extrêmement fin. Les céramiques trouvent des applications courantes dans les sous-stations, notamment les isolateurs de support, les couvercles isolants pour les sectionneurs et les disjoncteurs, les transformateurs de potentiel et les bornes de traversée pour les transformateurs de puissance... (Figure I.9) [2, 3].



Figure I. 9. Isolateur en céramique

I. 3. 2. Isolateur en verre

Le verre est le matériau de prédilection pour la fabrication des isolateurs des lignes électriques de moyenne et haute tension. Les avantages de l'utilisation du verre sont son coût abordable et la facilité avec laquelle les défauts peuvent être observés [4, 5]. Il existe deux variétés d'isolateurs en verre:

I. 3. 2. 1. Verre recuit

Il est utilisé dans la production d'isolateurs rigides, il manque toutefois de résilience face aux changements brusques de température et ne peut résister à des contraintes mécaniques importantes (Figure I.10).



Figure I. 10. Isolateur en verre recuit

I. 3. 2. 2. Verre trempé

Sa résistance à la traction est environ 5 à 6 fois supérieure à celle du verre recuit, ce qui lui permet de supporter de brusques variations de température pouvant aller jusqu'à 100°C (Figure I.11).



Figure I. 11. Isolateur en verre trempé

I. 3. 3. Isolateur en matériaux synthétiques

Les isolateurs composites comprennent un noyau composé de fibres de verre imprégnées de résine, qui confère à l'isolateur sa robustesse mécanique, ainsi qu'un revêtement nervuré en résine, qui assure l'isolation. Ils se caractérisent par leur légèreté et leur exceptionnelle résistance mécanique (Figure I.12) [2, 4, 5].

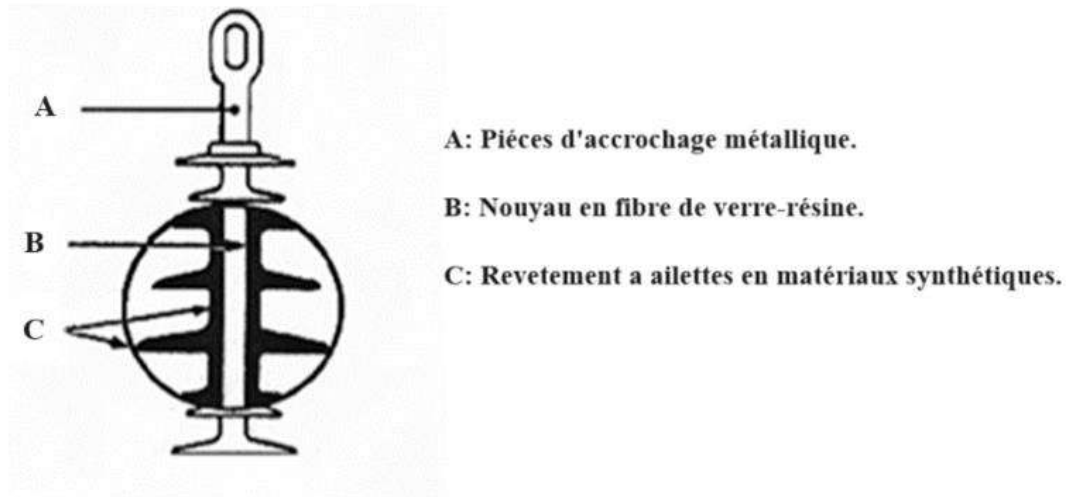


Figure I. 12. Isolateur composite

I. 4. Effets des conditions climatiques et de la pollution sur la performance des isolateurs

Les isolateurs hautes tensions sont soumises à différents types et niveaux de contraintes, la pollution atmosphérique étant reconnue comme l'un des principaux facteurs de défaillance des lignes aériennes. L'accumulation de pollution à la surface des lignes de transmission détériore considérablement leurs performances électriques en réduisant la résistivité de surface des isolateurs. Cette pollution s'accumule progressivement sur les isolateurs et, en particulier dans des conditions d'humidité élevée telles que le brouillard, la condensation matinale ou la pluie, forme un électrolyte conducteur qui entraîne des courants de fuite à la surface de l'isolateur. Lorsque ces courants atteignent une certaine intensité, la couche conductrice s'assèche dans les régions où la densité de courant est élevée, ce qui entraîne la formation d'arcs mineurs et des altérations du potentiel électrique et de la distribution du champ. Dans certaines circonstances, ces arcs mineurs se propagent jusqu'à la rupture de l'isolation.

I. 4. 1. Différentes sources de pollution

On distingue trois catégories de pollution : naturelle, industrielle et mixte.

I. 4. 1. 1. Source de pollution naturelle

La pollution naturelle provient du sel de mer dans les zones côtières, de la poussière du sol (particulièrement présente lors d'activités de construction importantes) et du sable transporté par le vent dans les environnements désertiques [6].

I. 4. 1. 2. Source de pollution marine

Les lignes à haute tension situées près de la côte sont soumises aux vents marins, qui transportent des embruns qui déposent une couche polluante sur les surfaces des isolateurs. Lorsque cette couche devient humide ou mouillée, elle peut acquérir de la conductivité, ce qui entraîne la génération de courants de fuite et peut provoquer des arcs électriques ou, dans certains cas, un contournement complet [2, 3].

I. 4. 1. 3. Source de pollution désertique

Les tempêtes de sable, un phénomène caractéristique des environnements désertiques, entraînent le dépôt de particules de sable sur les surfaces des isolateurs. Lorsque ces dépôts deviennent humides, ils acquièrent une conductivité plus ou moins importante en raison des sels présents dans le sable. Cette conductivité induite par l'humidité provoque l'apparition soudaine de courants de fuite, souvent accompagnés d'arcs partiels. La propagation de ces arcs le long de la surface de l'isolateur peut finalement aboutir à un contournement complet de l'isolation [3, 7].

I. 4. 1. 4. Source de pollution industrielle

La question de la pollution industrielle se pose lorsque les lignes électriques traversent des zones adjacentes à des zones industrielles (émissions de fumées provenant d'usines, de raffineries, de cimenteries, de mines de minerai, etc.), à des zones urbaines densément peuplées (émissions de gaz d'échappement des véhicules) ou à des régions agricoles (épandage d'engrais) [6].

I. 4. 1. 5. Source de pollution mixte

Cette forme de pollution présente le plus grand risque car elle résulte de la coexistence de plusieurs sources de pollution dans une même zone, comme c'est le cas des isolateurs installés dans les zones industrielles à proximité des zones côtières.

I. 5. Sévérité de pollution d'un site

Il est essentiel de comprendre l'ampleur de la pollution pour déterminer la taille appropriée de l'isolation afin de garantir un fonctionnement fiable et sans problème. Pour classer les sites pollués, on peut évaluer la gravité de la pollution à l'aide de méthodes telles que la technique des embruns salés équivalents. Cette approche quantifie la gravité de la pollution en mesurant les niveaux de salinité équivalents. Il s'agit essentiellement d'attribuer

une solution saline équivalente à chaque site affecté par une pollution naturelle ou industrielle. Afin de déterminer les besoins d'isolation des lignes de transmission et de relier la salinité équivalente aux niveaux de pollution naturelle, quatre classes de gravité ont été proposées.

Classe 1 : Pollution minimale provenant de sources naturelles (à l'exclusion de la mer).

Classe 2 : Pollution modérée provenant de sources naturelles (à l'exclusion du milieu marin) ou pollution minimale provenant de sources industrielles.

Classe 3 : Pollution importante provenant de sources marines et industrielles.

Classe 4 : Représente les régions présentant des niveaux de pollution exceptionnellement élevés.

S'appuyant sur des théories et des preuves empiriques, diverses techniques de mesure ont été proposées pour évaluer la gravité d'un site, dont certaines restent sujettes à débat.

I. 6. Conséquences de la pollution

Les couches de polluants accumulées sur les surfaces des isolateurs entraînent une conductivité électrique de surface, influençant la distribution du potentiel le long de la distance de fluage. Cela peut conduire à l'apparition d'arcs électriques entre deux points de la surface de l'isolateur, ce qui peut provoquer un court-circuit sur une partie de la distance de fluage. Trois types distincts d'arcs peuvent se manifester dans ce scénario.

I. 6. 1. Arc non localisé

L'arc s'éteint rapidement pour se rallumer à un autre endroit, répétant ce cycle. Ce processus entraîne la génération de courants de fuite, ce qui provoque une légère perte d'énergie, généralement considérée comme acceptable au sein du réseau de distribution [8].

I. 6. 2. Arc fixe

L'arc électrique reste à la surface de l'isolant (courant continu) ou se rallume au même endroit (courant alternatif). L'impact thermique de cet arc peut entraîner une détérioration thermique du support isolant du composant défectueux [9, 10].

I. 6. 3. Contournement des isolateurs pollués

En général, les principaux phénomènes à l'origine du contournement d'un isolateur contaminé à la tension de fonctionnement comprennent la création d'une couche conductrice électrolytique par l'interaction de l'humidité avec le dépôt de polluant sur la surface de l'isolateur. Cela conduit à l'émergence d'un courant de fuite, ainsi qu'à la formation de bandes sèches et d'arcs partiels, facilitant la propagation du courant de fuite et la propagation ultérieure de l'arc. Le contournement des isolateurs peut être classé en quatre étapes distinctes.

Etape 01 : Dépôt de la pollution

Les particules contenues dans le dépôt sont transportées par le vent et ont tendance à s'accumuler entre les nervures ou autour du capot. Les facteurs contribuant à cette accumulation sont les suivants [10]:

- ❖ Les caractéristiques des particules polluantes, notamment leur nature, leur poids et leur taille.
- ❖ La proximité de l'isolateur par rapport à la source de pollution et au sol, d'où peuvent provenir les poussières.
- ❖ La vitesse du vent
- ❖ L'alignement ou le positionnement de la chaîne d'isolateurs.
- ❖ La configuration de l'isolateur et sa capacité à s'auto-nettoyer en cas de forte pluie ou de vent.

Etape 02 : Humidification de la pollution

Le brouillard et les pluies légères font pénétrer l'humidité dans la couche polluante, dissolvant les sels dans le dépôt et formant un électrolyte conducteur à la surface de l'isolateur. Il en résulte un courant de fuite. Tout au long du processus de mouillage, le courant de fuite augmente progressivement jusqu'à ce qu'il atteigne son niveau maximal. Ce courant peut diminuer au fur et à mesure que l'isolateur se dessèche. L'ampleur du courant de fuite est influencée par des facteurs tels que la durée, le type et la quantité de sels présents.

Etape 03 : Développement des zones sèches et apparition d'arcs

L'effet Joule se traduit par une augmentation de la température, entraînant l'évaporation de l'eau et une diminution de la conductivité du dépôt. Par conséquent, l'amplitude du courant de fuite diminue en raison de la formation d'une bande sèche. Cette bande sèche modifie la distribution du potentiel sur l'isolant car une partie importante du

potentiel électrique est concentrée à ses extrémités. Si la bande sèche n'a pas la capacité de résister au potentiel associé, un arc est généré à ses bornes [10].

Etape 04 : comportement des arcs

La présence du dépôt humide, qui n'est pas déformé par l'arc, impose une limite au courant et à la longueur de l'arc. Si le courant est insuffisant, l'arc s'éteint et la bande sèche redevient humide, ce qui déclenche un processus cyclique. Ce cycle persiste tant que le courant de fuite ne dépasse pas le "courant critique" associé à une "longueur critique" spécifique de l'arc, ce qui maintient la stabilité. Toutefois, si ce seuil est dépassé, l'isolateur risque d'être contourné [8].

I. 7. Techniques de lutte contre la pollution

Si d'autres sources de pollution apparaissent, comme la construction de routes ou de nouvelles usines, le dimensionnement initial de l'isolation peut être inadéquat [11]. Pour éviter les incidents sur les lignes électriques actives, il existe plusieurs méthodes pour prévenir la pollution des isolateurs. Ces méthodes comprennent :

I. 7. 1. Allongement de la ligne de fuite

Cette approche permet d'adapter la conception à l'évolution des conditions de pollution. Deux méthodes sont employées à cette fin :

- Modifier le type d'isolateur pour augmenter la ligne de fuite, bien que cette méthode soit souvent prohibitive et peu pratique, en particulier dans les sous-stations.
- L'utilisation de prolongateurs de lignes de fuite en polymère, qui sont apposés sur la surface des isolateurs actuels [12].

I. 7. 2. Utilisation des isolateurs à profil plat

L'utilisation d'isolateurs plats réduit la distance de fuite, mais ces isolateurs, dépourvus de nervures, accumulent moins de pollution que les isolateurs conventionnels et sont facilement nettoyés par le vent. Utilisés principalement dans les zones désertiques, ces isolateurs offrent des propriétés autonettoyantes améliorées [13].

I. 7. 3. Graissage des isolateurs par une couche hydrophobe

En raison de ses caractéristiques hydrophobes, la graisse offre une protection temporaire aux isolateurs, avec une durée de vie allant généralement de 1 à 4 ans. Cette durée dépend principalement de facteurs environnementaux tels que les niveaux de pollution, les conditions climatiques et la qualité intrinsèque du produit. Cette méthode est largement utilisée dans le monde entier. Néanmoins, le processus de nettoyage et d'application ultérieure de la lubrification est laborieux, long et coûteux. En outre, il nécessite des interruptions de service [14].

I. 7. 4. Revêtement à base de silicone

Cette méthode consiste à appliquer un caoutchouc de silicone qui vulcanise à température ambiante sur la surface des isolateurs, soit par pulvérisation, soit par brossage. Comme les traitements hydrophobes, ce revêtement protège et renforce la résistance des isolateurs à la pollution. Cependant, il offre une durée de vie nettement plus longue que les méthodes de graissage.

I. 7. 5. Utilisation des isolateurs composites

Ces isolateurs présentent l'avantage d'être légers, très résistants aux contraintes mécaniques et de posséder des propriétés hydrophobes favorables. Ils peuvent être utilisés dans des environnements très pollués. Néanmoins, malgré leur revêtement, ces isolateurs subissent des modifications de leurs propriétés au fil du temps, leur vieillissement étant dû aux effets combinés des contraintes électriques et climatiques subies pendant leur fonctionnement [14].

I. 7. 6. Nettoyage sous et hors tension

Le nettoyage manuel (essuyage à sec) ou le lavage hors ligne sont utilisés périodiquement, en particulier dans les sous-stations. Cependant, ces méthodes nécessitent des interruptions de service qui peuvent parfois être longues. Pour éviter ces interruptions, on utilise le lavage en direct, qui permet de maintenir la propreté de l'isolateur sans interrompre les opérations. Cette méthode utilise des installations fixes ou mobiles, en respectant des directives strictes concernant la qualité de l'eau, les procédures de lavage et les distances de sécurité pour atténuer les risques de contournement pendant le lavage [15].

Le nettoyage des isolateurs par pulvérisation d'abrasifs sous pression est une technique couramment employée. Cette méthode permet d'éliminer efficacement les couches de pollution tenaces telles que le ciment et peut également être utilisée pour dégraisser les isolateurs.

I. 8. Installation et maintenance

L'installation et la maintenance d'isolateurs jouent un rôle essentiel dans de nombreux domaines industriels et technologiques, notamment dans le secteur de l'énergie, des télécommunications et de la construction. Les isolateurs sont des dispositifs conçus pour séparer des éléments électriques ou mécaniques, empêchant ainsi la transmission de courant électrique ou de vibrations indésirables. Leur bonne installation et leur entretien régulier sont cruciaux pour assurer la sécurité des installations, prolonger leur durée de vie et garantir leur bon fonctionnement.

Dans cette présentation, nous explorerons les différentes étapes de l'installation et de la maintenance des isolateurs, en mettant en évidence les meilleures pratiques, les considérations de sécurité et les techniques essentielles. Nous examinerons également les types d'isolateurs les plus courants, leurs applications spécifiques et les défis potentiels rencontrés lors de leur installation et de leur entretien.

Que ce soit dans le cadre de lignes électriques haute tension, de réseaux de télécommunications ou d'équipements industriels, la compréhension des procédures appropriées pour l'installation et la maintenance des isolateurs est indispensable pour garantir la fiabilité et la durabilité des infrastructures. En suivant les bonnes pratiques et en accordant une attention particulière à la sécurité, les professionnels peuvent assurer le bon fonctionnement des systèmes tout en minimisant les risques d'incidents ou de pannes.

I. 8. 1. Méthodes d'installation des isolateurs sur les lignes haute tension

L'installation des isolateurs sur les lignes haute tension nécessite des méthodes spécifiques pour assurer la sécurité, la durabilité et le bon fonctionnement du réseau électrique. Voici quelques techniques couramment utilisées pour installer des isolateurs sur ces lignes :

- **Installation par grue :** Cette méthode est fréquemment employée pour les lignes à haute tension où les isolateurs sont lourds et demandent un levage important. Une grue est utilisée pour soulever et positionner les isolateurs sur les supports de ligne.
- **Installation par hélicoptère :** Dans des environnements difficiles d'accès ou dans des zones montagneuses où les véhicules terrestres ne peuvent pas accéder facilement, les isolateurs peuvent être installés à l'aide d'un hélicoptère. Cela nécessite une expertise particulière et des équipements adaptés pour garantir la sécurité du personnel et des équipements.
- **Installation par nacelle :** Pour les lignes de moyenne tension, des nacelles élévatrices peuvent être utilisées pour installer les isolateurs. Les travailleurs montent dans la nacelle pour accéder aux supports de ligne et réaliser l'installation en hauteur.
- **Installation à l'aide de cordes et de poulies :** Cette méthode est souvent utilisée dans les zones où l'accès est difficile pour les véhicules. Les travailleurs utilisent des cordes et des poulies pour hisser manuellement les isolateurs jusqu'aux supports de ligne et les installer.
- **Installation au sol puis levage :** Pour les isolateurs de grande taille ou de poids important, une méthode consiste à les installer au sol puis à les lever à l'aide d'équipements de levage comme des grues ou des treuils jusqu'à leur position finale sur les supports de ligne.
- **Installation avec assistance robotique :** Dans certains cas, des robots ou des dispositifs automatisés peuvent être utilisés pour assister à l'installation des isolateurs, surtout dans des environnements dangereux ou difficiles d'accès.

Il est crucial de respecter rigoureusement les procédures de sécurité et les recommandations du fabricant lors de l'installation des isolateurs sur les lignes haute tension. De plus, une formation adéquate du personnel est essentielle pour garantir des installations sûres et fiables.

I. 8. 2. Contraintes et précautions à prendre

Lors de l'installation des isolateurs sur les lignes haute tension, il est important de prendre en compte diverses contraintes et de prendre des précautions pour garantir la sécurité des travailleurs et la fiabilité du système électrique. Voici quelques-unes des contraintes et précautions à prendre en compte :

➤ Contraintes de sécurité

Assurez-vous que seuls les travailleurs formés et qualifiés sont autorisés à effectuer l'installation des isolateurs.

Utilisez des équipements de protection individuelle (EPI) tels que des casques, des gants isolants, des harnais de sécurité, etc., conformément aux normes de sécurité en vigueur.

Respectez les consignes de sécurité spécifiques à chaque méthode d'installation, que ce soit par grue, par hélicoptère, par nacelle, ou par d'autres moyens.

➤ **Contraintes environnementales**

Tenez compte des conditions météorologiques telles que le vent, la pluie, la neige, etc., qui peuvent affecter la sécurité et la stabilité lors de l'installation des isolateurs.

Évaluez les risques liés à l'environnement, comme la présence d'objets ou de structures proches des lignes électriques.

➤ **Précautions spécifiques par méthode d'installation**

Pour l'installation par grue, assurez-vous que la grue est correctement positionnée et que sa capacité de levage est adaptée au poids des isolateurs.

Lors de l'installation par hélicoptère, suivez les protocoles de sécurité aérienne et assurez-vous que le personnel est formé pour travailler dans ces conditions particulières.

En cas d'installation par nacelle, vérifiez que la nacelle est en bon état de fonctionnement et que toutes les mesures de sécurité sont respectées pendant le travail en hauteur.

Pour l'installation à l'aide de cordes et de poulies, utilisez du matériel de levage de qualité et assurez-vous que les travailleurs sont formés aux techniques de levage sécurisées.

➤ **Inspection et vérification**

Avant l'installation, inspectez soigneusement les isolateurs pour détecter tout défaut ou dommage pouvant compromettre leur intégrité.

Effectuez des tests de charge appropriés pour vérifier la résistance des isolateurs et des supports de ligne.

➤ **Communication et coordination**

Assurez une communication claire et efficace entre les équipes de travail et les opérateurs de l'installation, notamment lors de l'utilisation de machines telles que des grues ou des hélicoptères. Coordonnez les activités d'installation avec d'autres travaux sur le réseau électrique pour éviter les conflits et les risques.

En respectant ces contraintes et en prenant les précautions nécessaires, l'installation des isolateurs sur les lignes haute tension peut être réalisée de manière sécurisée et efficace.

I. 8. 3. Bonnes pratiques de maintenance

Les bonnes pratiques de maintenance des isolateurs sur les lignes haute tension sont essentielles pour assurer leur fiabilité, prolonger leur durée de vie et garantir la sécurité du

réseau électrique. Voici quelques bonnes pratiques à suivre dans le cadre de la maintenance des isolateurs :

Inspections régulières

Effectuez des inspections visuelles régulières pour détecter tout dommage visible tel que des fissures, des éclats, des dépôts de pollution, etc.

Utilisez des équipements d'inspection tels que des jumelles, des drones, ou des caméras thermiques pour une évaluation plus détaillée si nécessaire.

Nettoyage périodique

Nettoyez périodiquement les isolateurs pour éliminer toute accumulation de pollution, de saleté ou de dépôts qui pourraient compromettre leur performance.

Utilisez des agents de nettoyage appropriés et respectez les recommandations du fabricant pour éviter d'endommager les isolateurs.

Tests d'isolation

Effectuez des tests d'isolation périodiques à l'aide d'appareils de mesure spécifiques pour vérifier l'intégrité de l'isolation des isolateurs. Interprétez correctement les résultats des tests pour détecter tout problème potentiel et prendre les mesures nécessaires.

Remplacement des isolateurs défectueux

Remplacez immédiatement tout isolateur endommagé ou défectueux pour éviter les pannes ou les accidents. Assurez-vous d'avoir des isolateurs de rechange disponibles pour une intervention rapide si nécessaire.

Gestion des dépôts de pollution

En cas de pollution importante, envisagez des interventions spécifiques telles que le nettoyage avec des agents spéciaux ou l'utilisation d'isolateurs conçus pour résister à la pollution. Surveillez attentivement l'évolution des dépôts de pollution et ajustez les actions de maintenance en conséquence.

Formation du personnel

Assurez-vous que le personnel chargé de la maintenance des isolateurs est correctement formé aux bonnes pratiques de sécurité et de maintenance spécifiques aux isolateurs.

Sensibilisez-les aux risques potentiels liés à la maintenance des isolateurs et aux mesures de prévention à prendre.

En suivant ces bonnes pratiques de maintenance, vous pouvez contribuer à maintenir des isolateurs en bon état de fonctionnement, à réduire les risques d'interruptions de service et à assurer la fiabilité du réseau électrique. N'oubliez pas de documenter toutes les activités de maintenance effectuées pour un suivi et une traçabilité adéquats.

I. 8. 4. Évaluation de l'état des isolateurs et les signes de dégradation

L'évaluation de l'état des isolateurs sur les lignes haute tension ainsi que la détection des signes de dégradation sont des aspects cruciaux de la maintenance préventive. Voici quelques éléments à prendre en compte lors de l'évaluation de l'état des isolateurs et des signes de dégradation :

- **Inspections visuelles**

Recherchez des signes évidents de dommages tels que des fissures, des éclats, des égratignures, ou des zones d'usure anormales sur la surface des isolateurs.

Vérifiez l'intégrité des attaches et des connexions pour vous assurer qu'ils sont solidement fixés aux supports de ligne.

- **Détection de la pollution**

Surveillez les dépôts de pollution tels que la saleté, la poussière, les dépôts chimiques, ou les excréments d'oiseaux qui peuvent compromettre l'isolation.

Si possible, effectuez des tests de conductivité pour évaluer le niveau de pollution et son impact sur les performances des isolateurs.

- **Analyse thermographique**

Utilisez des caméras thermiques pour détecter les points chauds ou les anomalies thermiques sur les isolateurs, ce qui peut indiquer des problèmes d'isolation ou de surcharge.

- **Tests d'isolation électrique**

Effectuez des tests d'isolation à l'aide d'appareils de mesure spécifiques pour évaluer la résistance diélectrique des isolateurs. Comparez les résultats avec les spécifications du fabricant pour détecter toute dégradation de l'isolation.

- **Évaluation de l'état des matériaux**

Vérifiez l'état des matériaux constitutifs de l'isolateur (verre, céramique, composite, polymère) pour détecter toute dégradation due à l'exposition aux conditions environnementales ou aux contraintes mécaniques.

- **Suivi des historiques de maintenance**

Consultez les données des précédentes inspections et interventions de maintenance pour détecter les tendances de dégradation ou les zones problématiques récurrentes.

- **Écoutez les experts et utilisez des outils d'analyse avancés**

Impliquez des experts en maintenance des lignes électriques pour une évaluation approfondie de l'état des isolateurs.

Utilisez des outils d'analyse avancés tels que l'analyse de vibration, l'analyse acoustique, ou d'autres techniques de diagnostic pour détecter les problèmes potentiels.

En combinant ces méthodes d'évaluation et de détection, vous pourrez identifier efficacement l'état des isolateurs, détecter les signes de dégradation et prendre les mesures de maintenance préventive nécessaires pour assurer la fiabilité du réseau électrique.

I. 9. Conclusion

Les isolateurs représentent environ 7 % du coût total de la construction d'une ligne aérienne à moyenne ou haute tension. Malgré leur pourcentage de coût relativement faible, ils sont essentiels pour garantir la sécurité opérationnelle, la qualité du service et une alimentation électrique ininterrompue [16]. Les isolateurs les mieux adaptés à des environnements spécifiques sont ceux qui peuvent minimiser l'accumulation de polluants, comme ceux qui ont d'excellentes capacités d'auto-nettoyage. Par conséquent, la pollution qui affecte les isolateurs est une considération essentielle dans la conception des lignes de transport d'électricité à haute tension. Il est essentiel de comprendre la gravité de la pollution sur différents sites et les divers paramètres environnementaux, tels que les précipitations, l'humidité, la température et le vent, qui contribuent à la dégradation de la surface des isolateurs, pour pouvoir gérer efficacement les chaînes d'isolateurs.

II. 1. Introduction

Les recherches et développements actuels sur les isolateurs représentent un domaine clé de l'ingénierie électrique moderne. Cette introduction s'attache à explorer les avancées récentes ainsi que les défis inhérents à la conception, à l'analyse et à l'optimisation des isolateurs utilisés dans les systèmes électriques à haute tension. En examinant les méthodes de calcul sophistiquées nécessaires pour évaluer la distribution du champ et du potentiel électriques le long de ces isolateurs, nous aborderons également les nouvelles technologies et les approches innovantes qui contribuent à améliorer la performance et la fiabilité de ces éléments cruciaux. En outre, nous mettrons en lumière les applications pratiques de ces recherches, en mettant en évidence les résultats obtenus et en discutant des perspectives futures pour l'évolution des isolateurs dans les environnements électriques exigeants d'aujourd'hui.

II. 2. Méthodes numériques de calcul du potentiel et du champ électrique

La résolution de la distribution du champ électrique et du potentiel dans tout système de haute tension représente un problème computationnel complexe. Cette complexité ne découle pas de la complexité des équations aux dérivées partielles qui les décrivent, mais plutôt de la forme irrégulière des diélectriques, de la proximité des diélectriques de forme irrégulière, des surfaces métalliques aux formes complexes, des lignes de transmission et, dans certains cas, de la présence d'une couche conductrice.

Pour surmonter ce problème, plusieurs méthodes de calcul ont été développées, regroupées en deux catégories : les méthodes numériques et les méthodes analogiques [17]. Les méthodes analogiques ne sont plus utilisées aujourd'hui car elles sont encombrantes et inadaptées aux problèmes tridimensionnels. Les méthodes numériques incluent les différences finies, les éléments finis, les charges équivalentes et les éléments finis de frontières. Ces méthodes reposent sur la résolution de l'équation de Laplace en imposant des conditions aux limites adaptées à chaque problème.

Dans ce qui suit, nous débutons par une revue du modèle de Maxwell, des différentes formulations et des équations résultantes. Ensuite, nous discutons séparément chaque méthode numérique en mettant en avant leurs avantages et leurs inconvénients respectifs.

II. 2. 1. Equations de Maxwell

Les équations qui décrivent la distribution du potentiel électrique et du champ électrique dans un milieu spécifique sont dérivées des équations de Maxwell. Ces équations consistent en quatre relations qui relient les propriétés magnétiques, représentées par le champ magnétique \vec{H} et l'induction magnétique \vec{B} , aux propriétés électriques, représentées par le champ électrique \vec{E} et l'induction électrique \vec{D} . Ces quatre équations permettent de relier les phénomènes magnétiques aux phénomènes électriques au sein du milieu.

$$\overrightarrow{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.1})$$

$$div \vec{D} = \rho_v \quad (\text{II.2})$$

$$\overrightarrow{rot} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II.3})$$

$$div \vec{B} = 0 \quad (\text{II.4})$$

Avec :

ρ_v : la densité volumique de charges.

\vec{J} : la vectrice densité de courant.

Outre ces quatre équations, il y a les relations constitutives qui lient \vec{D} à \vec{E} , \vec{J} à \vec{E} et \vec{B} à \vec{H} :

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (\text{II.5})$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{II.6})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{II.7})$$

Avec :

ε : la permittivité électrique.

μ : la perméabilité magnétique.

σ : la conductivité électrique du milieu.

Ces paramètres jouent un rôle essentiel dans la description de l'interaction des champs électriques et magnétiques avec le milieu.

Lors de l'application d'une différence de potentiel en courant alternatif (CA), la méthode permettant de déduire l'évolution des grandeurs électriques dans le temps consiste à les multiplier par la grandeur complexe $j\omega$, où j représente l'unité imaginaire et où ω représente la fréquence angulaire de la source. Compte tenu des relations constitutives, les équations (II.1) et (II.3) sont transformées en conséquence.

$$\overrightarrow{rot} \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H} \quad (\text{II.8})$$

$$div (\varepsilon\vec{E}) = \rho_v \quad (\text{II.9})$$

$$\overrightarrow{rot} \overrightarrow{H} = \sigma \overrightarrow{E} + j\omega \overrightarrow{E} \quad (\text{II.10})$$

Étant donné l'intensité relativement faible du champ magnétique dans l'équipement à haute tension (HT) examiné, le deuxième terme de l'équation (II.8) peut être négligé. Ce que donne :

$$\overrightarrow{rot} \overrightarrow{E} = 0 \quad (\text{II.11})$$

Par conséquent, nous pouvons séparer les équations (II.9) et (II.11), qui décrivent le comportement des grandeurs électriques, de celles qui régissent les grandeurs magnétiques. L'équation (II.9) représente essentiellement la manifestation locale du théorème de Gauss, illustrant le principe de conservation de la charge. L'équation (II.11) nous permet de déduire que le champ \overrightarrow{E} provient d'un potentiel ϕ par la relation suivante :

$$\overrightarrow{E} = -\overrightarrow{grad} \phi \quad (\text{II.12})$$

La substitution de l'équation (II.12) dans l'équation (II.9) donne :

$$div(-\varepsilon \overrightarrow{grad} \phi) = \rho_v \quad (\text{II.13})$$

Ainsi, avec ces considérations, nous dérivons l'équation régissant la distribution du potentiel dans un milieu ayant une permittivité absolue ε et une densité de charge volumétrique ρ_v . Dans le cas des matériaux isolants couramment utilisés dans les équipements à haute tension (HT), la densité de charge volumétrique ρ_v est typiquement nulle. Sous ces hypothèses, nous arrivons à l'équation de Laplace (II.14), qui dicte la distribution du potentiel à l'intérieur des matériaux isolants :

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (\text{II.14})$$

Il convient de mentionner que l'équation de Laplace (II.14) s'applique également à la distribution du potentiel dans les matériaux conducteurs tels que les électrodes. En effet, les électrodes sont considérées comme des régions à potentiel constant, ce qui en fait des volumes équipotentiels.

II. 2. 2. Condition aux limites

Les conditions aux limites sont essentielles pour déterminer une solution unique aux équations différentielles. Il en existe deux types principaux : Les conditions de Dirichlet, où la valeur du potentiel est spécifiée (comme sur les surfaces conductrices ou les surfaces équipotentiels), et les conditions de Neumann, où la dérivée normale du potentiel est définie (comme sur les plans de symétrie ou les surfaces avec un flux imposé). Ces conditions sont dites homogènes si les valeurs spécifiées sont nulles, et inhomogènes dans le cas contraire [18].

II. 2. 3. Méthode des différences finis (MDF)

II. 2. 3. 1. Principe de la méthode des différences finis (MDF)

Le concept de base de la méthode des différences structurées (SDM) est d'approximer les dérivées partielles en considérant les différences entre les valeurs nodales qui sont espacées d'une distance finie. Cette méthode, historiquement la plus ancienne connue pour résoudre des équations différentielles sur ordinateur, consiste à diviser le domaine d'étude en une grille rectangulaire uniforme où chaque nœud est espacé uniformément de ses voisins le long des axes x et y . À chaque nœud, le système d'équations différentielles est satisfait [19]. À chaque nœud, le système d'équations différentielles est satisfait. L'utilisation d'un maillage régulier garantit que les équations conservent la même forme en tout point [20]. La forme la plus élémentaire de ce type de maillage est le maillage carré. Au lieu de résoudre directement l'équation différentielle partielle, on la remplace par un système d'équations algébriques concernant les valeurs nodales. Pour des problèmes tels que le calcul du potentiel et du champ électrique, ces équations sont généralement linéaires et les solutions pour chaque valeur nodale sont obtenues soit par itération, soit par inversion de matrice. Un exemple pratique de cette approche est illustré par l'équation de Laplace en deux dimensions, définie dans un domaine spécifique (Figure II.1).

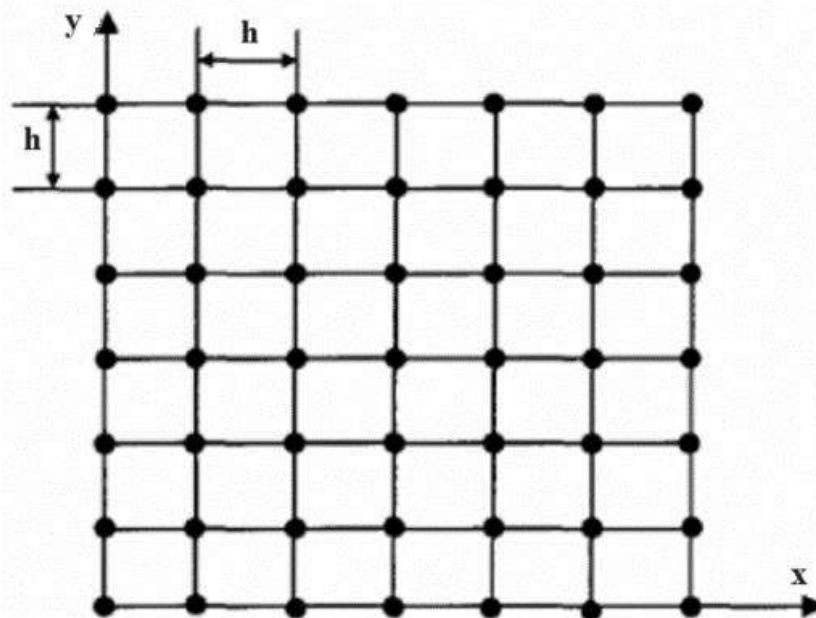


Figure II. 1. Maillage carrée

II. 2. 3. 2. Avantages de la méthode des différences finis (MDF)

- La méthode des différences finies est facile à mettre en œuvre lorsque la géométrie le permet.
- En outre, elle est facile à coder et ne nécessite qu'une mémoire minimale pour le stockage des données.

II. 2. 3. 3. Inconvénients de la méthode des différences finis (MDF)

- Lorsqu'il s'agit de frontières incurvées, l'approche SDM se heurte à des limites près des frontières irrégulières, ce qui rend son application difficile. Il est donc nécessaire de rechercher des méthodes qui restent efficaces quelle que soit la géométrie concernée [21].
- La SDM n'est pas adaptée à la résolution de problèmes dans des contextes tridimensionnels.
- En outre, cette méthode nécessite une connaissance complète du potentiel sur l'ensemble de la frontière entourant le domaine étudié, ce qui n'est pas toujours possible.

II. 2. 4. Méthode des éléments finis (MEF)

II. 2. 4. 1. Principe de la méthode des éléments finis (MEF)

Le concept fondamental de cette approche consiste à diviser la zone d'étude en de nombreux éléments finis, connus sous le nom de maillage. Cette étape revêt une grande importance, car le choix de la forme de l'élément de maillage a un impact considérable sur la précision des résultats. Il est donc essentiel de déterminer la forme et le niveau d'approximation les mieux adaptés à la géométrie de la zone d'étude. Il existe un large éventail de formes géométriques pour les éléments de maillage, et le choix de la forme appropriée est essentiel pour obtenir des résultats précis. Par exemple :

- Diverses formes telles que les triangles, les rectangles et les quadrilatères peuvent être utilisées pour résoudre des problèmes bidimensionnels, en tenant compte de leurs dimensions respectives.
- En outre, pour la résolution de problèmes tridimensionnels, des formes telles que les tétraèdres, les hexaèdres, les cubes et les prismes entrent en jeu, chacune ayant des dimensions et des propriétés uniques.

Le phénomène à l'intérieur de chaque élément de la subdivision est généralement représenté par une fonction d'interpolation, les polynômes étant souvent choisis à cette fin en raison de leur facilité d'intégration et de différenciation. Le degré du polynôme utilisé est déterminé par des facteurs tels que le nombre de nœuds attribués à chaque élément [22], les caractéristiques et la quantité d'inconnues à chaque nœud et, en particulier, le niveau de différentiabilité requis pour les variables impliquées dans la forme variationnelle associée aux équations aux dérivées partielles du problème, y compris les conditions aux limites.

II. 2. 4. 2. Avantages de la méthode des éléments finis (MEF)

- Le MEF offre des avantages significatifs, notamment son adaptabilité à diverses géométries complexes et aux propriétés des matériaux.
- La flexibilité inhérente à ses éléments permet de s'adapter facilement aux formes complexes et aux caractéristiques non linéaires des matériaux.
- En outre, la nature symétrique des matrices impliquées dans le système d'équation final simplifie considérablement le processus de résolution. En outre, la programmation de la méthode est relativement simple, en particulier en ce qui concerne l'incorporation des conditions aux limites.
- La MEF a démontré son efficacité dans de nombreux domaines de l'ingénierie et est soutenue par des logiciels commerciaux conviviaux, ce qui la rend largement accessible, même sans une compréhension approfondie de ses subtilités.

II. 2. 4. 3. Inconvénients de la méthode des éléments finis (MEF)

- Le résultat du calcul dépend fortement des données numériques initiales, notamment des propriétés des matériaux et des conditions aux limites. Ainsi, la modification de ces paramètres nécessite de recalculer la solution avec les valeurs mises à jour.
- La modification de n'importe quelle partie de la géométrie nécessite la création d'un nouveau maillage, ce qui entraîne des recalculs ultérieurs.
- Le fait de se fier uniquement à la sélection de maillage par défaut du logiciel peut entraîner une précision sous-optimale, ce qui oblige les utilisateurs à faire preuve de prudence au cours de cette phase.
- L'utilisation efficace de la méthode des éléments finis pour la résolution de problèmes exige une compréhension globale du domaine géométrique et des conditions aux limites, ce qui peut poser des problèmes lorsque ces connaissances font défaut.

II. 2. 5. Méthode de simulation de charges (MSC)

II. 2. 5. 1. Principe de la Méthode de simulation de charges (MSC)

Dans le SMC, la simulation du champ électrique implique la génération d'un champ électrique à travers des charges discrètes positionnées à l'extérieur de la zone d'intérêt où le champ doit être calculé [23]. Ces charges discrètes se voient attribuer des valeurs spécifiques qui satisfont aux conditions limites à des points de contour définis. Une fois que les positions et les valeurs de ces charges de simulation sont établies, il devient possible de calculer le potentiel et le champ électriques en tout point de l'espace considéré. La méthode repose sur un principe simple : si plusieurs charges discrètes, chacune de forme différente, existent dans une région, le potentiel électrostatique en un point donné de cette région peut être déterminé en additionnant les potentiels générés par ces charges individuelles (en utilisant le théorème de superposition), à condition que le point C en question ne se trouve pas directement sur l'une des charges.

II. 2. 5. 2. Avantages de la Méthode de simulation de charges (MSC)

- Le SMC permet de calculer le potentiel et le champ électriques dans des scénarios impliquant des configurations géométriques complexes, comme les isolateurs à haute tension.
- Contrairement à certaines méthodes, le SMC ne nécessite pas de discrétiser le champ autour de ses limites pendant le calcul.

II. 2. 5. 3. Inconvénients de la Méthode de simulation de charges (MSC)

- Le traitement de problèmes impliquant plus de deux diélectriques complique l'utilisation de la MSC et détériore l'effort de programmation requis pour de tels modèles.
- Bien que l'expression du CSM soit numériquement simple, il est difficile d'atteindre la précision nécessaire dans la mise en œuvre. Le niveau de précision requis dépend de plusieurs facteurs, notamment du type, de l'emplacement et du nombre de charges utilisées, ainsi que de la quantité de points de contour concernés.

II. 2. 6. Méthode des éléments finis de frontière (MEFF)

II. 2. 6. 1. Principe de la méthode des éléments finis de frontière (MEFF)

L'utilisation des équations intégrales aux limites pour résoudre les problèmes liés au calcul de la distribution du champ électrique est relativement récente. Cette approche s'est révélée remarquablement efficace pour résoudre les problèmes de champ magnétique et déterminer la distribution du champ électrique autour des isolateurs contaminés [24].

Le principe fondamental de cette méthode consiste à transformer les équations aux dérivées partielles décrivant le problème en équations intégrales qui impliquent exclusivement des inconnues situées à la limite du domaine. Ces équations sont ensuite résolues à l'aide de la méthode des éléments de frontière, qui applique la technique des éléments finis au contour du domaine examiné [25].

Dans les problèmes de calcul du potentiel et du champ électriques, deux formulations distinctes sont couramment rencontrées dans la méthode des éléments finis : la formulation indirecte et la formulation directe. Dans la formulation directe, le potentiel et le champ électrique normal sont directement évalués, tandis que dans la formulation indirecte, la distribution des charges est d'abord évaluée, puis le potentiel et le champ électrique sont déduits. Nous nous concentrerons ici sur la présentation de la formulation indirecte, qui a été utilisée jusqu'à présent pour calculer l'intensité du champ et le potentiel tout en tenant compte des effets de la pollution [26].

II. 2. 6. 2. Avantages de la méthode des éléments finis de frontière (MEFF)

- La discrétisation du milieu infini ne pose plus de problème, puisque tout est condensé à la limite du milieu étudié.
- La transformation des équations aux dérivées partielles en équations intégrales réduit la dimension du problème d'une unité, voire de deux en cas de symétrie de rotation.
- La modification de la géométrie ne nécessite pas de réévaluer l'ensemble du maillage, contrairement à la méthode des éléments finis. Seuls les paramètres de la partie concernée de la frontière doivent être ajustés, car la formulation fondamentale des équations intégrales reste indépendante des géométries spécifiques.
- Par rapport à d'autres méthodes numériques, le nombre d'inconnues à déterminer pour un problème équivalent est réduit, ce qui permet d'économiser du temps de calcul.

II. 2. 6. 3. Inconvénients de la méthode des éléments finis de frontière MEFF

- La méthode indirecte ne permet pas de calculer directement le potentiel et le champ électrique, ce qui nécessite des calculs supplémentaires, qui peuvent être coûteux en ressources pour les problèmes plus importants.

- L'adaptation de MEFF aux problèmes non linéaires pose des problèmes. Dans de tels scénarios, l'ensemble du domaine où la non-linéarité matérielle ou géométrique est présente doit être discrétisé, perdant ainsi l'avantage de la discrétisation limitée à la frontière de MEFF.

II. 3. Travaux de simulations réalisées sur la distribution du champ et du potentiel électriques sur les isolateurs en HT:

Dans cette partie, nous nous pencherons sur les simulations effectuées sur la distribution du champ et du potentiel électriques. Ces simulations jouent un rôle crucial dans la compréhension du comportement des champs et des potentiels électriques au sein de différents types des isolateurs HT. En employant des méthodes de calcul, en particulier l'analyse par éléments finis, les auteurs cherchent à explorer et à analyser les modèles et les caractéristiques complexes des champs et des potentiels électriques. La compréhension de ces distributions est essentielle pour diverses applications d'ingénierie, allant de la conception d'isolateurs à haute tension à l'optimisation des systèmes électriques. Grâce à ces simulations, ils essaient à mieux comprendre l'interaction complexe des facteurs qui influencent les champs et les potentiels électriques, contribuant ainsi à l'avancement des connaissances et des pratiques dans le domaine de l'ingénierie électrique.

II. 3. 1. Travaux de Zhao et Comber [27]

Leur recherche se concentre sur l'analyse de la distribution du potentiel électrique et du champ le long des isolateurs non céramiques en utilisant le logiciel "Coulomb". Les calculs ont pris en compte la présence d'isolateurs, de tours et de conducteurs. Les résultats indiquent que la longueur des conducteurs a un effet de blindage notable sur l'isolateur, le champ électrique maximal diminuant au fur et à mesure que la longueur des conducteurs augmente.

II. 3. 2. Travaux de Chakravorti et Mukherjee [28]

Ils ont conçu un algorithme utilisant la méthode de simulation de charge pour calculer la distribution du champ électrique sur des isolateurs haute tension exposés à une pollution uniforme et non uniforme. Ils ont introduit un paramètre ρ_s , représentant le produit de la résistivité électrique du contaminant (Ω/m) et de l'épaisseur de la couche de pollution (m), qui caractérise la résistivité de surface. Leurs conclusions ont révélé que lorsque $\rho_s \geq 10^{11}\Omega$, le champ présente un comportement capacitif, tandis que pour des valeurs de $\rho_s \leq 10^8\Omega$, il présente un comportement résistif. Les valeurs intermédiaires donnent lieu à un champ

capacitif-résistif. La valeur maximale du champ électrique résistif est deux fois supérieure à celle du champ capacitif et se produit à l'extrémité de l'ailette la plus haute. Dans les cas de pollution non uniforme, une surtension importante se produit aux jonctions entre deux milieux ayant des résistivités de surface différentes. La pollution partielle à proximité des électrodes entraîne une surtension plus élevée que dans les scénarios de pollution uniforme. En outre, ils ont étudié l'impact des zones sèches, notant que des zones sèches plus larges entraînent une réduction de la surtension à leurs limites. Toutefois, la position de la zone sèche n'a qu'une influence minimale sur le champ électrique à ses limites.

II. 3. 3. Travaux d'El-Kishky et Gorur [29]

El-Kishky et Gorur ont utilisé la méthode de simulation de charge modifiée pour calculer les distributions de champ électrique et de potentiel le long des isolateurs à haute tension. Cette méthode permet une représentation précise du modèle d'isolateur tout en réduisant considérablement le nombre de charges nécessaires. Ils ont spécifiquement étudié le champ électrique et les distributions d'énergie des isolateurs humides, en utilisant un modèle où la surface humide était représentée par une plaque rectangulaire mesurant $2\text{cm} \times 25\text{cm}$, avec des gouttelettes d'eau de tailles variables allant de 50mm^3 à 900mm^3 .

Leur étude a porté sur la relation entre le champ électrique et la taille, la distance et l'emplacement des gouttelettes. Ils ont constaté que l'augmentation du nombre de gouttelettes entraînait une diminution de la valeur maximale du champ électrique, tandis que l'espacement des gouttelettes entraînait une réduction du champ électrique maximal. En outre, les gouttelettes placées à proximité de l'électrode à haute tension ont subi une intensification significative du champ électrique.

II. 3. 4. Travaux de Volat [18]

L'objectif principal de l'étude de Volat [18] est d'analyser les distributions du potentiel électrique et du champ électrique le long d'un isolateur de poste standard recouvert de glace accumulée dans des conditions humides. L'objectif est de comprendre les phénomènes précédant le contournement électrique des isolateurs de poste, qui se produit généralement pendant les périodes de fonte. L'étude utilise des simulations numériques à l'aide d'un logiciel basé sur la méthode des éléments finis de Frontier, d'abord dans des modèles bidimensionnels, puis tridimensionnels. Grâce à des simulations bidimensionnelles, divers paramètres tels que la présence d'un film d'eau conducteur sur la surface du dépôt de glace, la position et la longueur d'un entrefer, la conductivité du film d'eau et la présence d'un arc électrique partiel

le long d'un seul entrefer sont examinés pour déterminer leur influence sur le potentiel électrique et la distribution du champ. Les comparaisons entre les distributions de potentiel obtenues numériquement et mesurées expérimentalement révèlent des disparités significatives (Figure II.2), confirmant que la modélisation bidimensionnelle n'est pas bien adaptée à la configuration géométrique de l'isolateur. L'erreur relative moyenne observée de 33% souligne la nécessité d'effectuer des simulations tridimensionnelles pour obtenir des résultats plus précis.

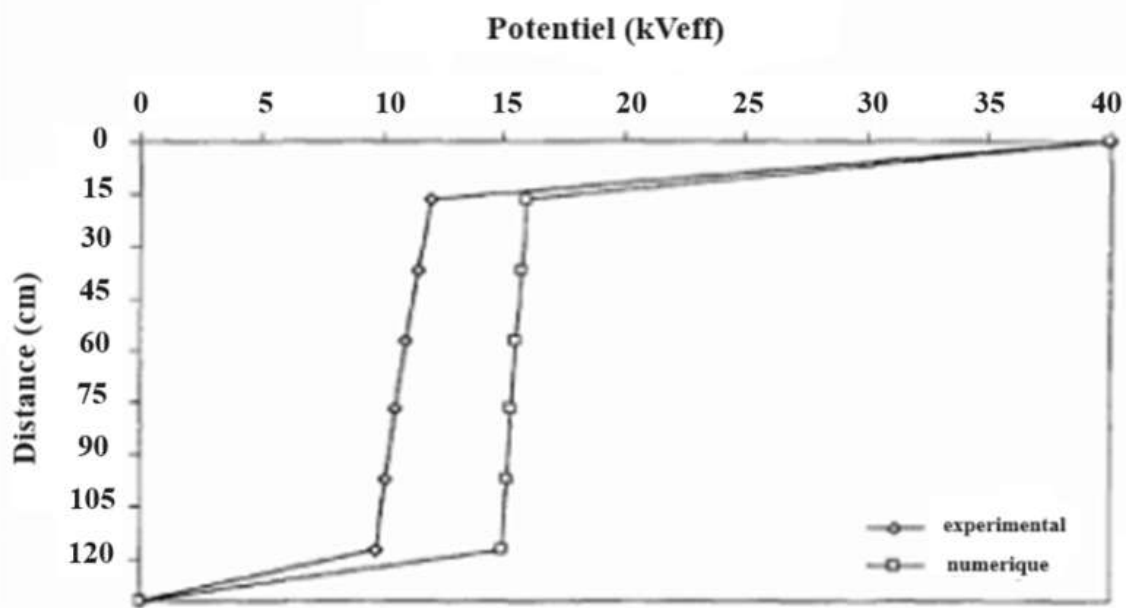


Figure II. 2. Analyse comparative des résultats expérimentaux et numériques pour un modèle 2D

Des simulations tridimensionnelles ont été réalisées à l'aide du logiciel Coulomb, en utilisant la méthode des éléments finis. La comparaison des résultats numériques obtenus à l'aide du logiciel avec les données expérimentales a révélé une excellente concordance (Figure II.3). Cette comparaison réussie a validé l'approche de modélisation 3D utilisée pour analyser les isolateurs de sous-stations recouverts de glace avec un film d'eau conducteur sur la surface de la glace, en particulier dans les scénarios où aucun arc partiel ne s'est produit le long des espaces d'air.

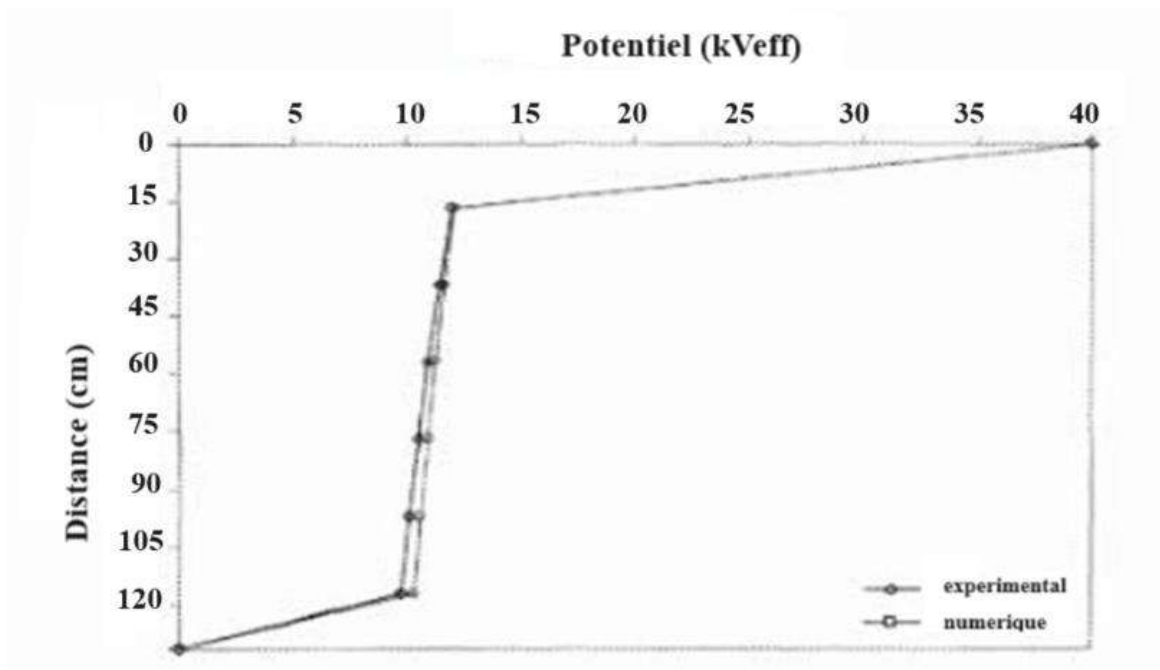


Figure II. 3. Analyse comparative des résultats expérimentaux et numériques pour un modèle 3D

II. 3. 5. Travaux d'Aydogmus et Cebeci [30]

Aydogmus et Cebeci ont développé un modèle dynamique basé sur le critère du champ pour étudier le phénomène de contournement d'un isolateur haute tension (HT) en présence de pollution de surface sous tension alternative. Ils ont utilisé la méthode des éléments finis (FEM) pour déterminer les valeurs du champ et du potentiel électriques. Plus précisément, un modèle "ouvert" bidimensionnel d'un isolateur à calotte et tige, à savoir le type BSFT-9336 (La longueur de la ligne de fuite est de 288mm, avec un facteur de forme de 1,09 et une hauteur de 140mm) (Figure II.4 (a) et (b)), a été utilisé pour calculer la résistance en série avec l'arc. En outre, ils ont introduit un algorithme appelé NFDM (New Flashover Dynamic Model) pour simuler la formation et la propagation de l'arc à la surface de l'isolateur, en tenant compte de différentes conductivités de surface et longueurs de fuite. La comparaison des résultats du NFDM avec les résultats théoriques et expérimentaux d'autres chercheurs a révélé une bonne concordance.

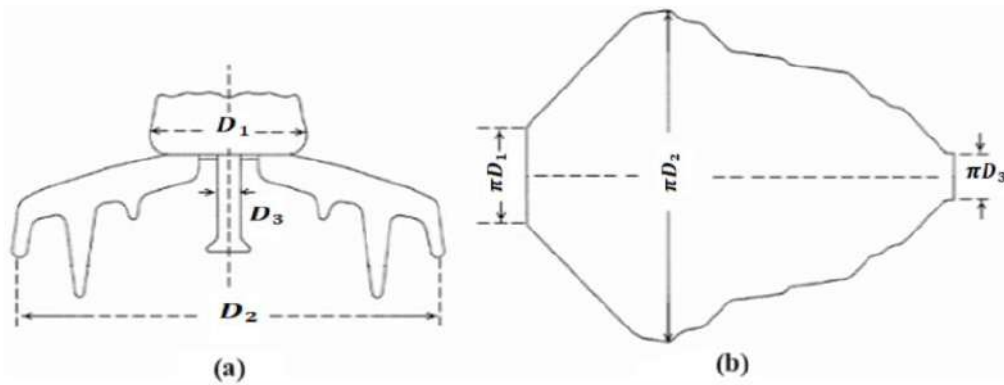


Figure II. 4. Isolateur BSFT-9336 : (a) : profil réel, (b) : modèle ouvert

II. 3. 6. Travaux de M. S. Kamarudin [31]

M. S. Kamarudin et ces collègues ont essayé de présenter un modèle de simulation du phénomène du claquage de l'air. Afin d'évaluer les valeurs du champ électrique correspondantes, ils ont utilisé le logiciel COMSOL Multiphysics, les chercheurs ont déterminé la valeur maximale du champ électrique et son emplacement probable juste avant le claquage. Dans une arrangement des électrodes plan-point avec une configuration du champ non uniforme, le claquage donne lieu à des valeurs de champ électrique très élevées.

II. 3. 7. Travaux de Zhangang Yang et all [32]

Dans ce papier, l'étude des auteurs se concentre sur l'analyse des isolateurs électriques en porcelaine utilisés dans les lignes de transport d'électricité de l'ordre de 110kV. À l'aide du logiciel Maxwell, le champ électrique autour des isolateurs dans différents états a été examiné. Les résultats obtenus indiquent que l'étude des régularités de la distribution des champs électriques autour des isolateurs, peut nous aider à estimer leurs propriétés.

II. 3. 8. Travaux de HADFI Youcef [33]

Cette étude visait à examiner l'impact du type de tension et de la polarité sur le champ électrique et la distribution du potentiel à la surface des isolateurs dans des conditions propres et contaminées. Le champ électrique et la distribution de la tension ont été analysés à l'aide de la méthode des éléments finis (FEM) mise en œuvre dans le logiciel COMSOL Multiphysics. Les résultats indiquent que la polarité de la tension a une influence minimale sur la distribution du champ électrique, tandis que le type de tension affecte de manière significative à la fois le champ électrique et la distribution du potentiel. En outre, il a été observé que le

champ électrique est plus élevé lorsqu'une tension continue est appliquée par rapport à une tension alternative dans des conditions de service similaires.

II. 3. 9. Travaux de Yu Zhong [34]

A l'aide de la méthode des éléments finis, l'article calcule la distribution du champ électrique résultant de la présence de gouttes d'eau à la surface des isolateurs composites. Les résultats démontrent que la présence de gouttes d'eau modifie de manière significative la distribution du champ électrique à la surface des isolateurs composites, entraînant une concentration de contraintes localisées.

Les chercheurs analysent dans ce papier, l'influence des gouttes d'eau sur la distribution du champ électrique des isolateurs composites haute tension et explique les principes de l'érosion électrique sur la base de ces résultats.

II. 3. 10. Travaux de Lichun Shu [35]

Dans cette étude, un modèle tridimensionnel (3D) de simulation du champ électrique a été développé par les auteurs pour analyser les isolateurs de suspension recouverts de glace dans des conditions de givrage modéré avec une tension continue appliquée. Deux paramètres caractéristiques, E_{av} et E_{max} , ont été introduits pour quantifier le degré de distorsion du champ électrique. Les résultats de la simulation ont été utilisés pour étudier les effets de la conductivité du film d'eau, de la longueur des glaçons, de l'angle de déviation des glaçons et de la distribution des glaçons sur E_{av} et E_{max} . Les résultats ont révélé que les glaçons influencent de manière significative la distribution du champ électrique des isolants. Plus précisément, E_{av} augmente avec la longueur des glaçons mais diminue avec l'angle de déviation des glaçons. D'autre part, E_{max} augmente avec la longueur des glaçons, l'espacement des glaçons et la différence de longueur entre les glaçons adjacents. Lorsque l'angle de déviation des glaçons est de 45° , E_{max} atteint sa valeur maximale. Enfin, sur la base des résultats de la simulation, les trajectoires possibles de l'embrassement ont été analysées, fournissant une base théorique pour le développement d'un modèle d'embrassement pour les isolateurs recouverts de glace.

II. 4. Conclusion

La compréhension des principes fondamentaux de l'électromagnétisme concernant les diélectriques est cruciale dans l'ingénierie de la haute tension, en particulier dans la

conception des isolateurs. Dans ce chapitre, nous avons exploré diverses relations des équations de Maxwell caractérisant le comportement électrique des matériaux diélectriques, en particulier en ce qui concerne le champ et le potentiel électriques. Bien que les équations dérivées de la modélisation électromagnétique soient simples, elles manquent généralement de solutions analytiques lorsqu'elles sont appliquées à des scénarios réels. Par conséquent, les méthodes numériques deviennent indispensables pour leur résolution. Cependant, les méthodes traditionnelles telles que les méthodes des différences finies et des éléments finis souffrent d'inconvénients tels que l'utilisation d'un grand nombre d'inconnues et l'inadéquation aux formes complexes en deux ou trois dimensions, où le maillage régulier de la méthode des différences finies n'est pas adapté.

Les simulations de la distribution du champ et du potentiel électriques permettent de visualiser et d'analyser le comportement de ces grandeurs physiques dans diverses configurations. Ces simulations offrent des informations précieuses sur les interactions électriques entre charges et sur la manière dont les champs électriques se propagent dans différents matériaux et géométries.

Les simulations de la distribution du champ et du potentiel électriques dans le cas des isolateurs en HT fournissent une compréhension approfondie des phénomènes de contournement électrique, aidant ainsi les chercheurs, ingénieurs et scientifiques à concevoir et à optimiser des dispositifs électriques, à prédire le comportement des systèmes électriques complexes et à résoudre des problèmes d'ingénierie. Ces outils de simulation sont donc essentiels pour progresser dans de nombreux domaines, de l'électronique à la physique des matériaux en passant par les systèmes de distribution d'énergie.

Chapitre III : Simulation des distributions du champ et du potentiel électrique

III.1. Introduction :

Dans ce chapitre, une simulation basée sur des méthodes numériques est employée pour calculer les distributions du potentiel et du champ électrique le long de la distance de fuite des isolateurs haute tension. Le modèle d'isolateur est développé et simulé dans des conditions de surface propre et polluée à l'aide du logiciel COMSOL Multyphysics, version 6.1. Ce dernier est un logiciel commercial réputé pour ses capacités de simulation en un, deux et trois dimensions. En déterminant avec précision la distribution du champ électrique le long de la surface de l'isolateur, cette approche vise à résoudre des problèmes tels que le phénomène du contournement électrique, qui est crucial pour le développement d'isolateurs efficaces, capables et de performances optimales dans diverses conditions atmosphériques [17].

III. 2. Modèle d'isolateur simulé :

III. 2.1. Modèle sur SolidWorks :

SolidWorks est un logiciel de CAO 3D utilisé dans l'ingénierie mécanique pour créer, simuler et dessiner des pièces techniques. Avec une interface conviviale et des outils puissants, il permet de concevoir rapidement et avec précision des géométries, vu la complexité du traçage de la géométrie sur le logiciel COMSOL, dans ce chapitre nous avons utilisé ce logiciel pour tracer deux modèles d'isolateurs électrique, le premier avec ailettes uniforme, et le deuxième avec ailettes non-uniforme (Figure III. 1), les dimensions des deux isolateurs sont mentionnées dans le tableau III.1.

Afin de transférer un modèle 2D d'un isolateur de SolidWorks vers COMSOL Multiphysics, suivez ces étapes simples :

- 1. Création du modèle 2D dans SolidWorks :** Utilisez les outils de dessin de SolidWorks pour créer le modèle d'isolateur en 2D.
- 2. Enregistrement du modèle au format DXF :** Une fois le modèle terminé, enregistrez-le au format DXF en utilisant l'option "Enregistrer sous" dans SolidWorks.
- 3. Importation du fichier DXF dans COMSOL Multiphysics :** Lancez COMSOL Multiphysics et importer le fichier DXF pour créer votre géométrie dans COMSOL.

Chapitre III : Simulation des distributions du champ et du potentiel électrique

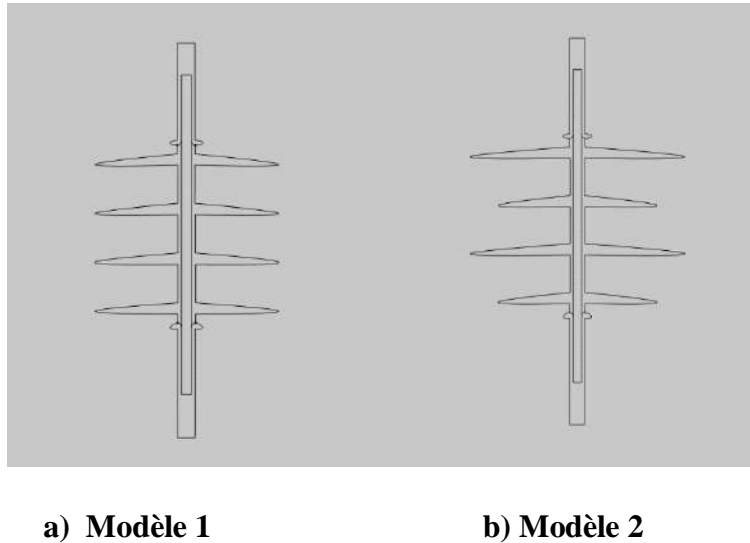


Figure III.1. Modèles simulés sous SolidWorks

Tableau III. 1. Spécifications techniques des isolateurs utilisés dans la simulation

Paramètres de structure	Module 1	Module 2
Type d'agencement des ailettes	Ailettes uniformes	Ailettes non uniformes
Distance de fuite (mm)	430	430
Distance d'arc (mm)	180	180
Longueur de la section (mm)	360	360
Épaisseur du cœur (mm)	18	18
Nombre d'ailettes	4	4
Diamètre de l'ailette (mm)	85	85/105
Espacement des ailettes (mm)	43	43

III.2.2. Modèle sur Comsol Multiphysics :

COMSOL Multiphysics simplifie le processus de modélisation et de simulation dans divers domaines de recherche en facilitant les tâches telles que la définition de la géométrie, des propriétés des matériaux, des conditions limites, du maillage, de la résolution et de l'affichage des résultats. Les utilisateurs n'ont pas besoin de connaissances approfondies en mathématiques ou en analyse numérique, car le logiciel est livré avec des équations prédéfinies pour la résolution des problèmes. Il suffit de spécifier le domaine (par exemple, électromagnétisme, transfert de chaleur, acoustique) et le régime souhaité (par exemple, stationnaire, dépendant du temps).

Chapitre III : Simulation des distributions du champ et du potentiel électrique

La modélisation et la simulation de l'isolateur peuvent être résumées en quatre étapes essentielles successives :

1. **La géométrie** : Comme en a citer auparavant nous avons utilisé le programme SolidWorks pour la tracer.
2. **Les propriétés physiques des matériaux** : Cela implique de spécifier les matériaux, leurs permittivités relatives et les conductivités volumiques pour chaque partie de l'isolateur. En outre, les conditions aux limites doivent être établies, en spécifiant le potentiel imposé à chaque électrode.
3. **Electrostatique** : Cette fonction nous permet de modéliser et de résoudre des problèmes liés à des phénomènes électriques dans des conditions où les charges électriques sont stationnaires. Au cours de cette étape, il est essentiel de sélectionner correctement les conditions aux limites de l'isolateur et d'introduire la valeur du potentiel électrique de 36 000 V, ainsi que la masse 0 V.
4. **Maillage** : En ce qui concerne le maillage, il est essentiel d'ajuster la densité des éléments finis, en particulier dans les régions critiques proches de la surface de l'isolateur, où une plus grande précision est nécessaire en raison de la variabilité importante des propriétés électriques des matériaux. La précision du maillage est liée à la précision du calcul et à la vitesse de résolution. Plus le maillage est dense, plus la précision du calcul est élevée, mais plus la vitesse de résolution est lente. La division du maillage est illustrée à la figure III.2.

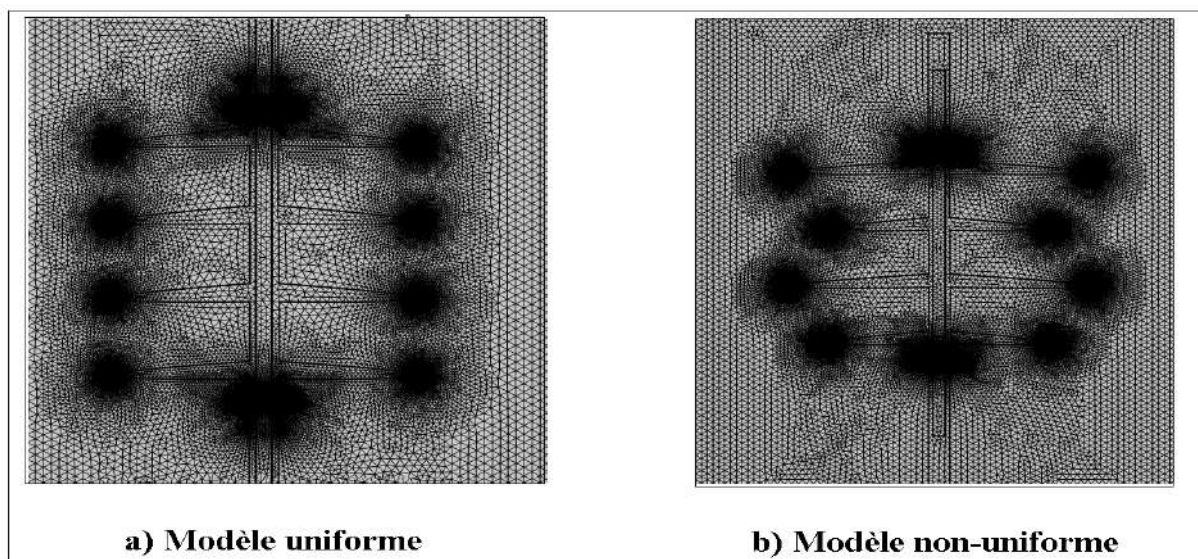


Figure III. 2. Maillage des deux modèles d'isolateurs

Chapitre III : Simulation des distributions du champ et du potentiel électrique

- 5. Etude :** Après le maillage, l'étape suivante consiste à analyser les résultats en cliquant sur « Compute ». Au cours de cette étape, les paramètres par défaut sont utilisés et des diagrammes de convergence sont générés pour garantir la précision et la fiabilité des résultats de la simulation.
- 6. Résultats :** L'étape finale consiste à afficher les résultats, tels que le potentiel et le champ électriques et leurs amplitudes, pour chaque partie de l'isolateur, en analysant leur distribution spatiale.

Voici un tableau récapitulatif des caractéristiques de chaque matériau, y compris la permittivité relative et la conductivité électrique, ainsi que le volume des gouttes d'eau.

Tableau III. 2. Propriétés des matériaux utilisés pour la modélisation des isolateurs

Matériau	Permittivité relative	Conductivité électrique (S/cm)
Cuivre	1	5.9×10^7
Fond de l'air	1	1.0×10^{-13}
Verre	3.5	1.0×10^{-12}
Silicone	4.3	1.0×10^{-12}
Couche superhydrophobe	2.8	1.0×10^3
Le cœur du FPR	7.2	1.0×10^{-12}
Gouttes d'eau	80	5.5×10^{-6}

III.3. Résultats de la simulation

Dans ce qui suit, nous allons présenter et discuter les résultats de simulation de trois types d'isolateurs ; hydrophile, hydrophobe et superhydrophobe, dans les deux cas contaminés et non-contaminés, en variant le mode de distribution de pollution, par le changement du volume des gouttes d'eau, ainsi que la valeur de la conductivité électrique de la surface polluée. De plus, nous avons choisi deux formats d'isolateur.

III. 3. 1. Simulation d'un isolateur en verre

III. 3. 1. 1. Effet du profil de l'isolateur :

La figure III.3 illustre les caractéristiques de la distribution du champ électrique sur la ligne de fuite de l'isolateur en verre, en fonction de la variation de la forme des ailettes, uniforme et non-uniforme, dans ce cas la surface de l'isolateur est propre, sans aucun mode ou bien type de contamination.

Chapitre III : Simulation des distributions du champ et du potentiel électrique

Il est à constater que l'intensité du champ est plus accentuée au niveau de l'électrode HT (6×10^5 V/m), et au niveau de point terre (4.5×10^5 V/m), de plus aux extrémités des ailettes où la courbure ou la géométrie se modifie de manière soudaine, quoique ce soit leurs formes uniformes ou non-uniformes (2×10^5 V/m) (Figure III. 3).

Dans les courbes du champ électrique, les lignes de champ se déplacent davantage vers les électrodes. Cela peut être expliqué par la base du champ transitoire capacitif-résistif. La distribution initiale du champ était régie par la distribution de la capacité inhérente de l'ensemble de l'isolateur. Mais plus tard, il devient progressivement de nature résistive puisque le nombre de lignes du champ diminue dans la majeure partie de l'isolateur. Dans ce cas les charges de surface accumulées à la surface (interface entre l'isolateur et l'air) agissent comme un écran où les lignes du champ pourraient se terminer ou provenir.

D'un autre côté, d'après nos résultats, nous remarquons que la variation de la taille des ailettes n'a pas un grand effet sur la distribution du champ électrique. Cela peut être expliqué par le fait que l'ailette de petite taille ce situé un peu loin des points HT et terre, et dans ce cas la concentration du champ est faible (Figure III. 4).

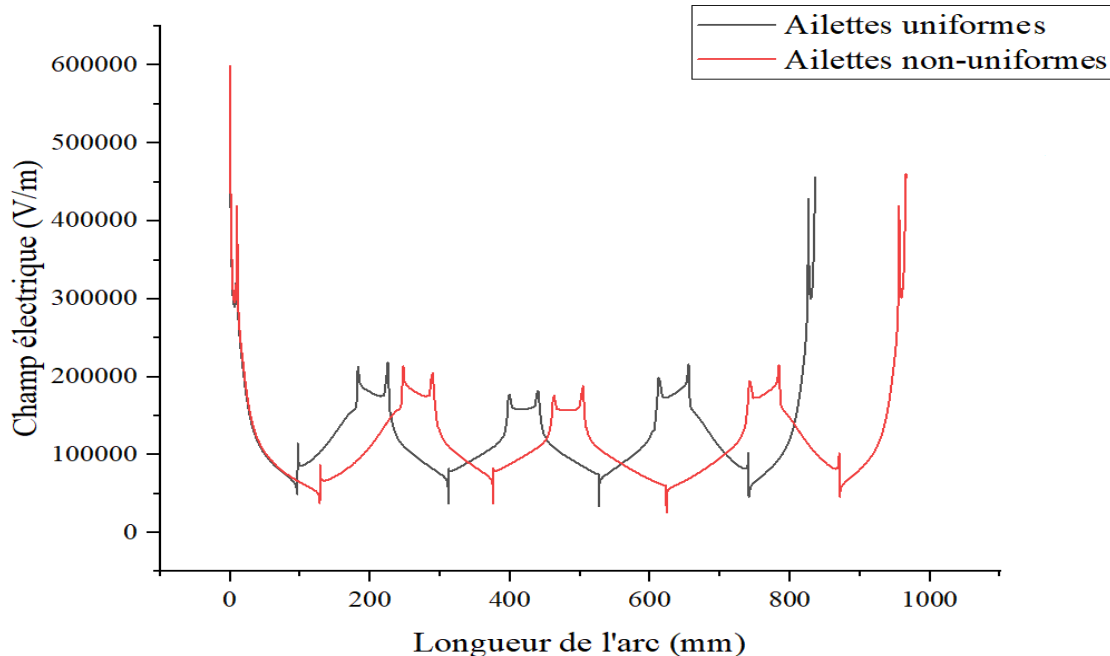


Figure III. 3. Distribution du champ électrique sur la surface d'un isolateur en verre

Chapitre III : Simulation des distributions du champ et du potentiel électrique

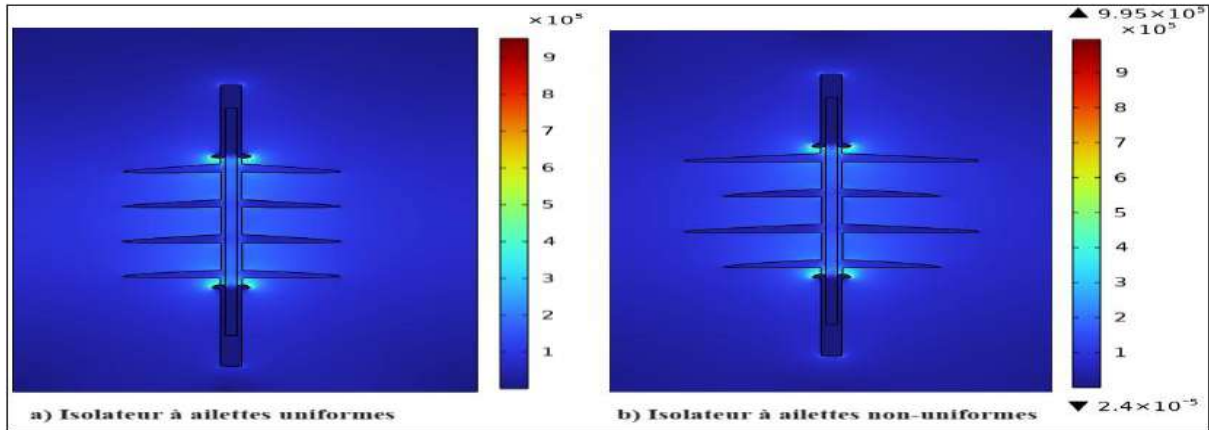


Figure III. 4. Photos de distribution du champ électrique sur la surface d'un isolateur en verre à ailettes uniformes et non-uniformes

La figure III. 5. illustre la distribution du potentiel électrique sur deux isolateurs en verre, l'un avec ailettes uniformes et l'autre à ailettes non-uniformes. Il est à noter que la distribution du potentiel est élevée au niveau de l'électrode HT (3.5×10^4 V) puis un peu plus faible sur les extrémités des ailettes (3×10^4 , 2×10^4 , 1.4×10^4 , 7×10^3 V), et vers la fin à une valeur nulle au voisinage de l'électrode terre (0 V). Concernant l'effet de la variation de la forme des ailettes, il est à signaler qu'il y a une petite différence entre le niveau du potentiel sur l'ailette de grande taille et celle de petite taille (Figure III.5 et 6).

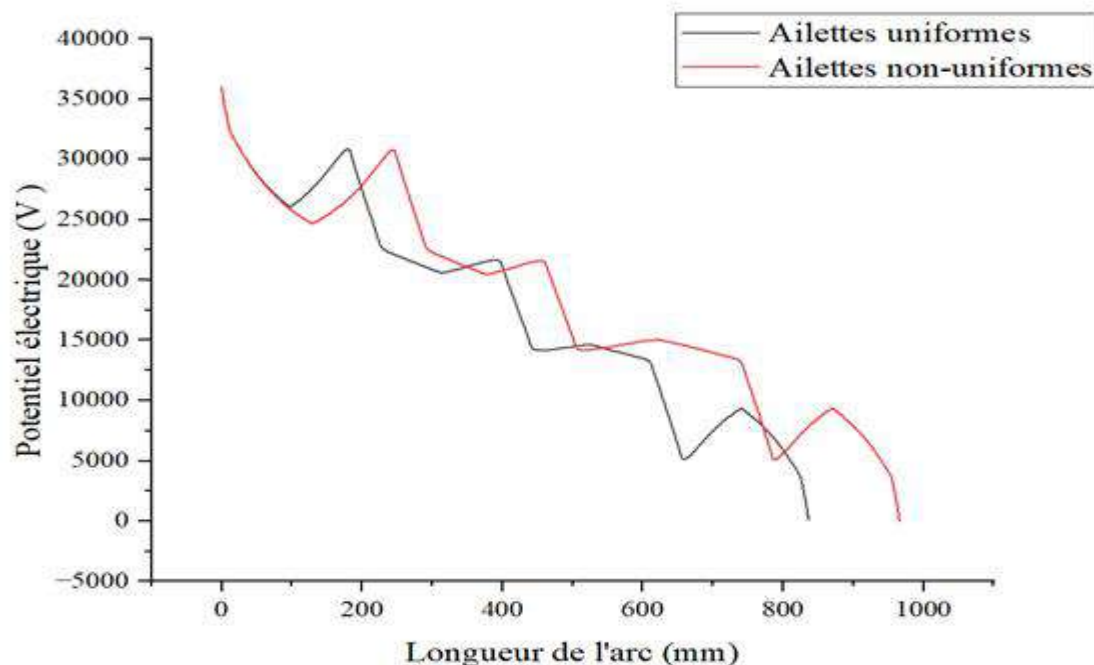


Figure III. 5. Distribution du potentiel électrique sur la surface d'un isolateur en verre

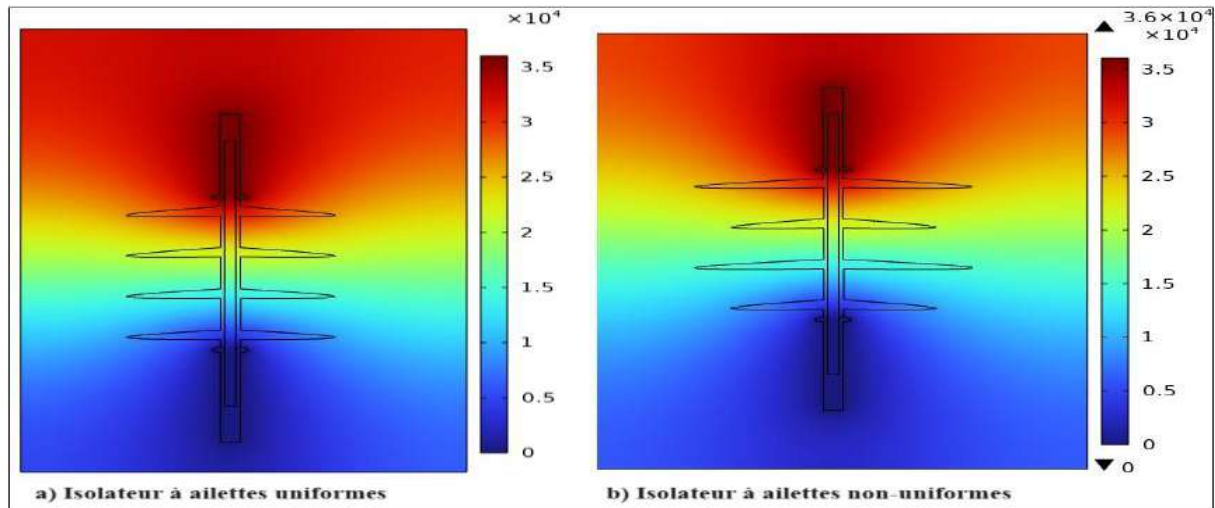


Figure III. 6. Photos de distribution du potentiel électrique sur la surface d'un isolateur en verre à ailettes uniformes et non-uniformes

III. 3. 1. 2. Effet de présence de la couche de pollution

Dans l'intention de comprendre l'influence de la présence de la couche de pollution sur le comportement d'un isolateur en verre, nous avons tracé les courbes de distribution du champ et du potentiel électrique dans les figures III. 7 et 8. Dans ce cas nous avons choisi le modèle d'isolateur avec des ailettes uniformes, et une conductivité électrique de la couche de contamination de l'ordre de $5.5 \mu\text{S}/\text{cm}$.

La présence de la couche de pollution sur l'isolateur implique la réduction de son résistivité ce qui a par conséquence une élévation de son conductivité, ce qui favorise la circulation du courant électrique le long de la ligne de fuite et par la conséquence affect la performance et la durabilité de l'isolateur. En ce qui concerne la distribution du champ électrique, l'intensité de celui-ci est plus grande dans le cas d'un isolateur pollué par rapport à un isolateur propre. Par contre, le potentiel électrique est plus faible dans le cas d'un isolateur pollué. Cela est due au fait que la présence de la couche de pollution facilite la création et la propagation des arcs électrique entre les extrémités de l'isolateur suite à la diminution de la résistance de la surface isolante (Figure III. 9).

Chapitre III : Simulation des distributions du champ et du potentiel électrique

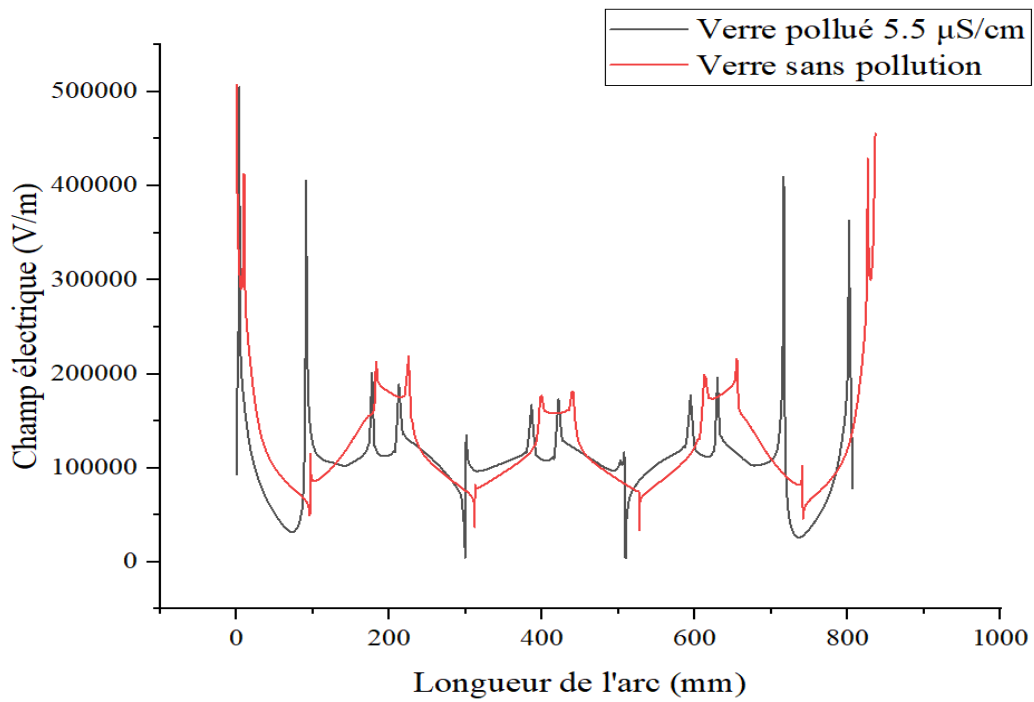


Figure III. 7. Distribution du champ électrique sur la surface d'un isolateur en verre

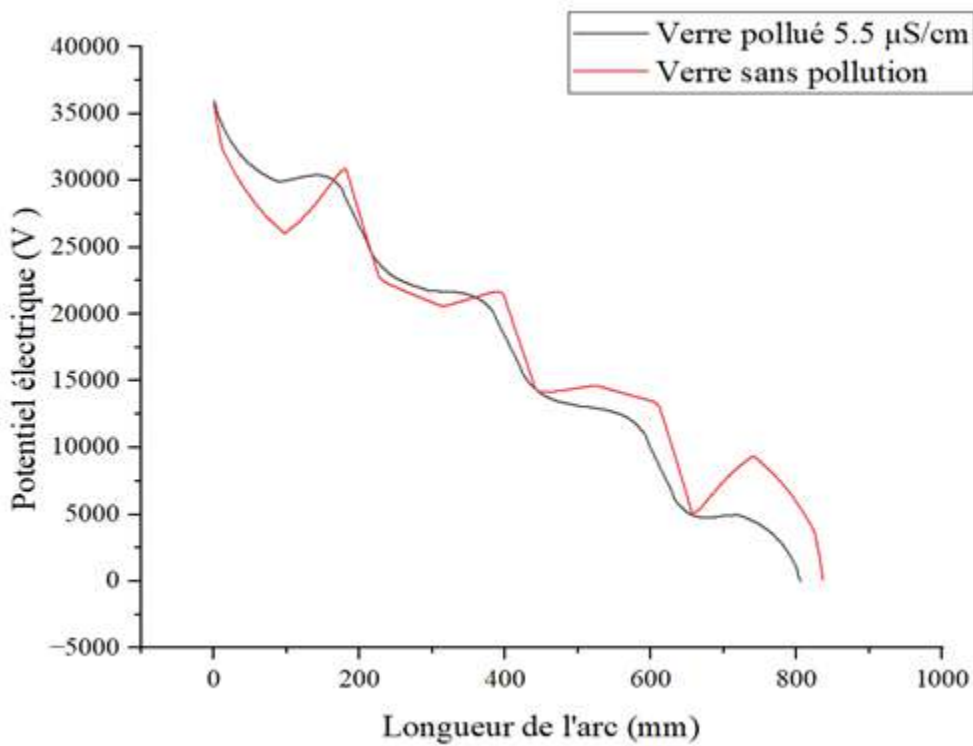


Figure III. 8. Distribution du potentiel électrique sur la surface d'un isolateur en verre

Chapitre III : Simulation des distributions du champ et du potentiel électrique

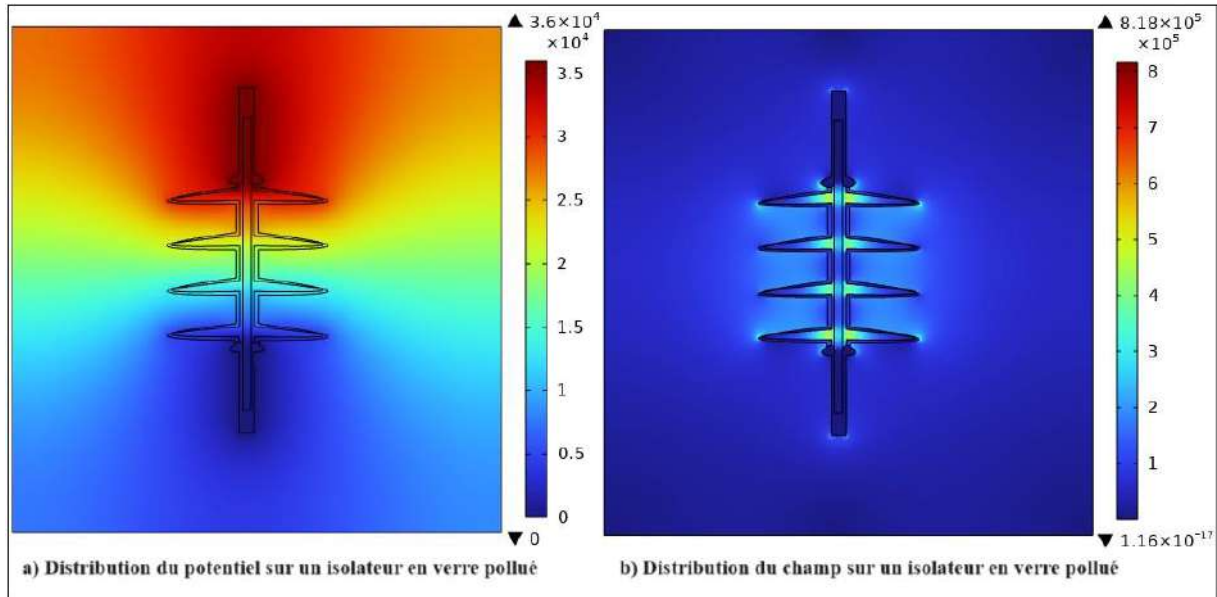


Figure III. 9. Distribution du potentiel et champ électrique sur la surface d'un isolateur en verre contaminé

III. 3. 1. 3. Effet de la conductivité

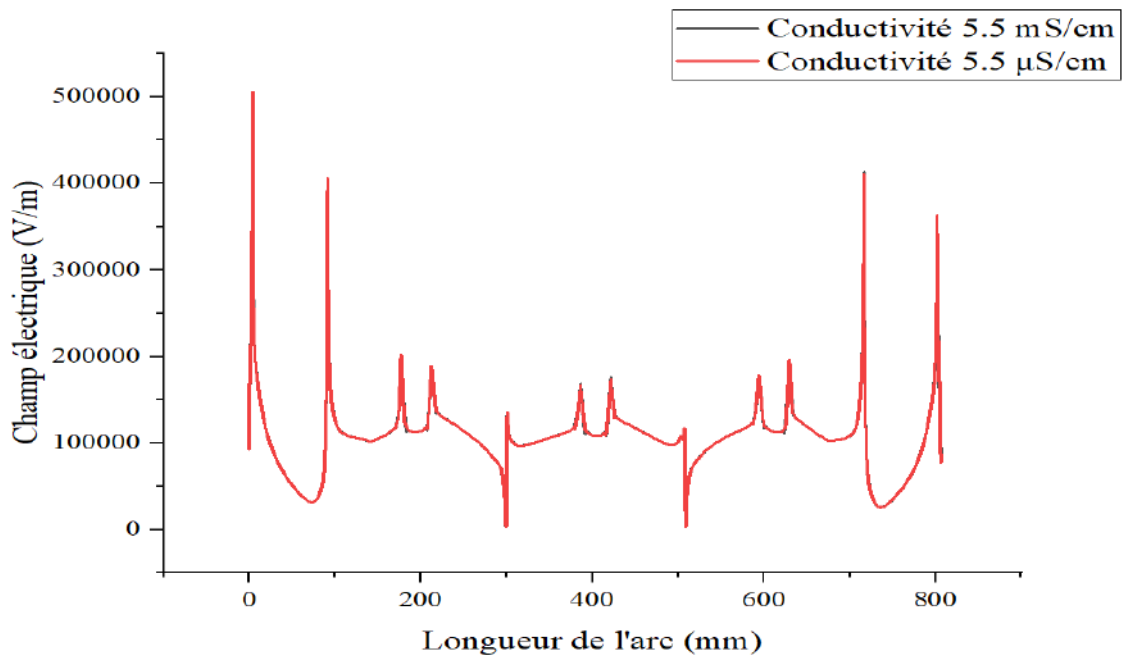


Figure III. 10. Distribution du champ électrique sur la surface d'un isolateur en verre

Afin d'étudier l'influence de la conductivité de la couche de pollution déposée sur la surface de l'isolateur hydrophile, deux valeurs de conductivités électriques, à savoir 5.5 μ S/cm et 5.5 mS/cm, ont été testées. Les caractéristiques de distribution du champ et du

Chapitre III : Simulation des distributions du champ et du potentiel électrique

potentiel électrique sont illustrées dans les figures III. 10 et 11. Les deux figures montrent que l'intensité du champ et le niveau du potentiel sous différentes conductivités n'était pas significatif, ce qui indique que l'influence de la conductivité des gouttes d'eau sur ces deux paramètres est négligeable.

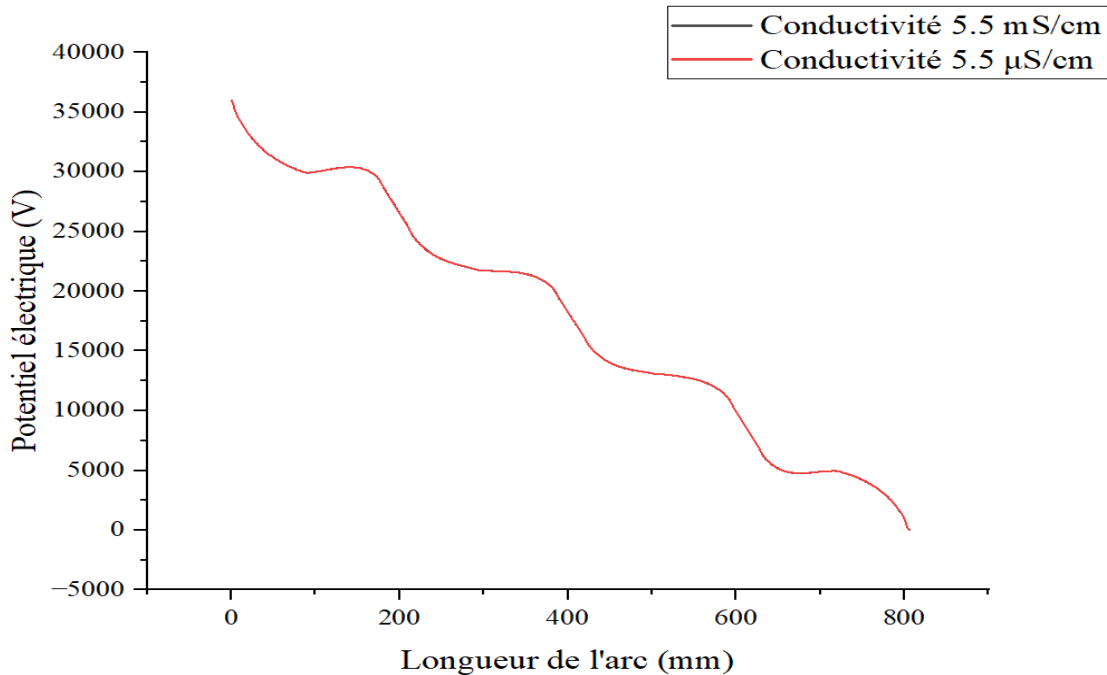


Figure III. 11. Distribution du potentiel électrique sur la surface d'un isolateur en verre

III. 3. 2. Simulation d'un isolateur en silicone

III. 3. 2. 1. Effet du profil de l'isolateur

Pour but d'étudier l'effet de la variation de la taille des ailettes sur la distribution du champ et du potentiel électrique, dans le cas d'un isolateur en silicone, nous avons simulé deux modèles d'isolateurs de format différentes. D'après les résultats présentés dans les figures 12 et 14, nous constatons que la forme des ailettes n'as pas une grande influence sur la distribution du champ électrique, il affecte juste la longueur de la ligne de fuite. La concentration du champ est toujours très élevée aux extrémités de l'isolateur (Figure III.13).

Il est à signaler aussi que le niveau du potentiel électrique est élevé au voisinage de l'électrode HT ce qui n'est pas le cas pour l'électrode terre, la valeur du potentiel diminue plus en s'approche à l'électrode terre (Figure III.15). Initialement, la distribution de tension est capacitive. Cela implique que la majeure partie de la tension est concentrée à l'extrémité sous tension de l'isolateur (Côté HT). Avec le temps, l'accumulation de charges commence et

Chapitre III : Simulation des distributions du champ et du potentiel électrique

la distribution de tension devient progressivement résistive avec une pente au niveau des ailettes.

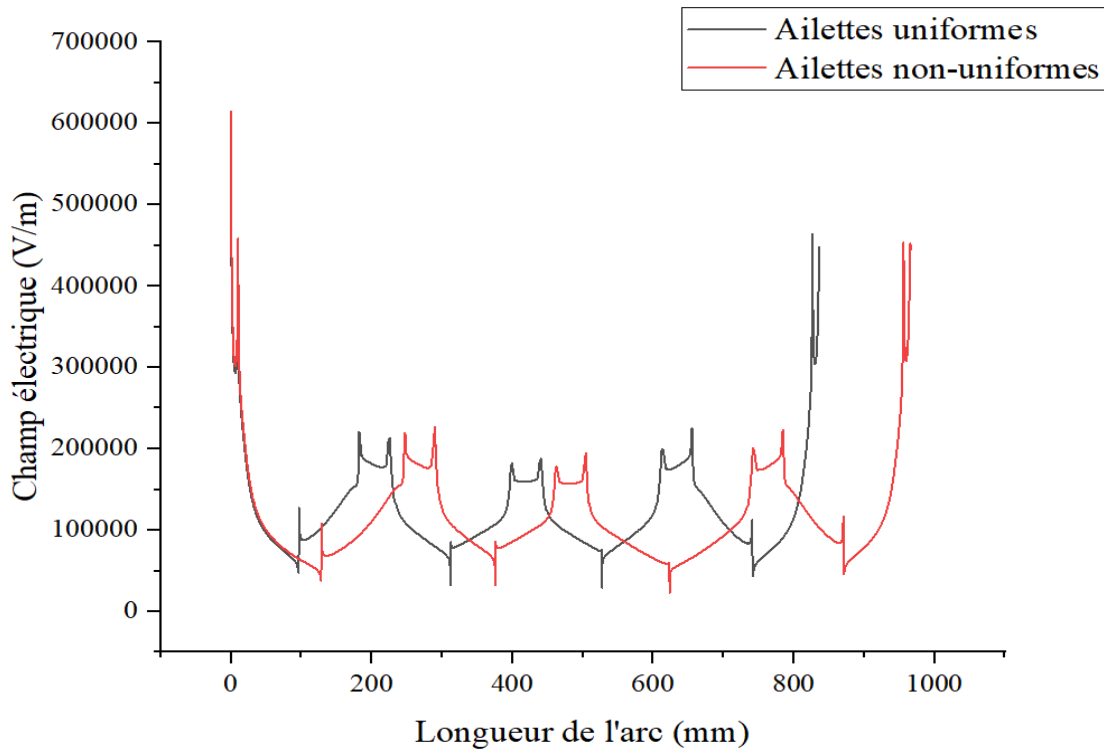


Figure III. 12. Distribution du champ électrique sur la surface d'un isolateur en silicone

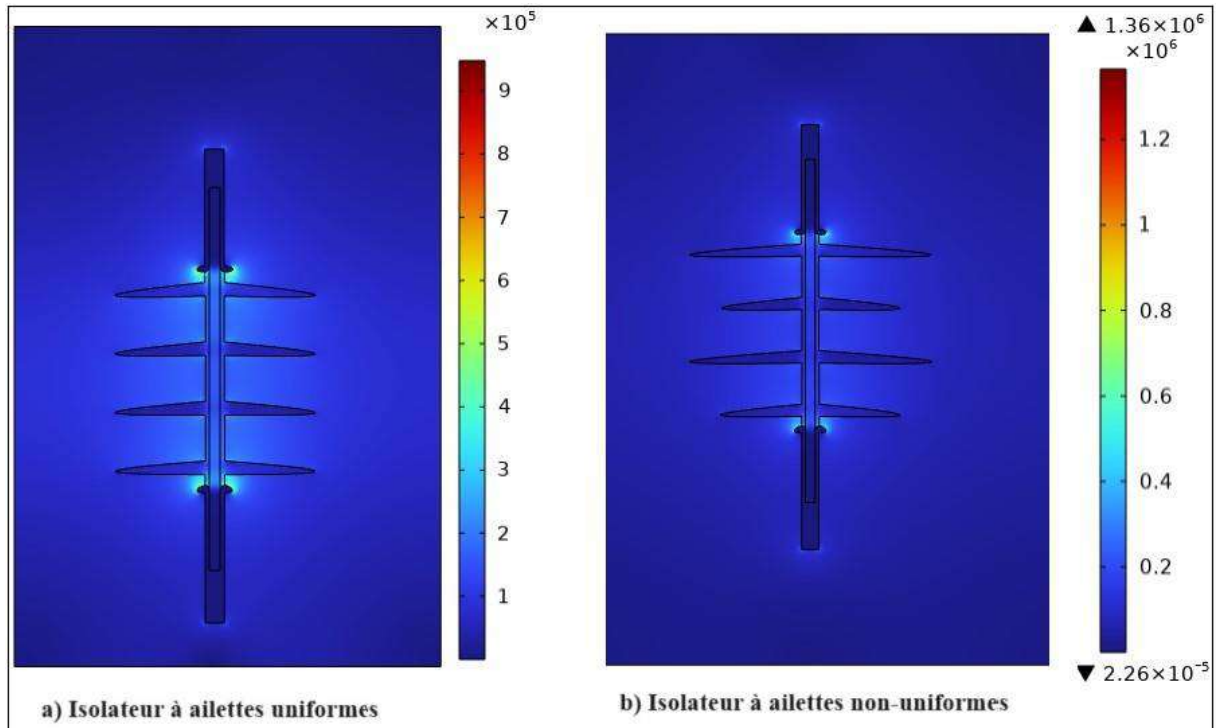


Figure III. 13. Photos de distribution du champ électrique sur la surface d'un isolateur en silicone propre avec ailettes uniformes et non-uniformes

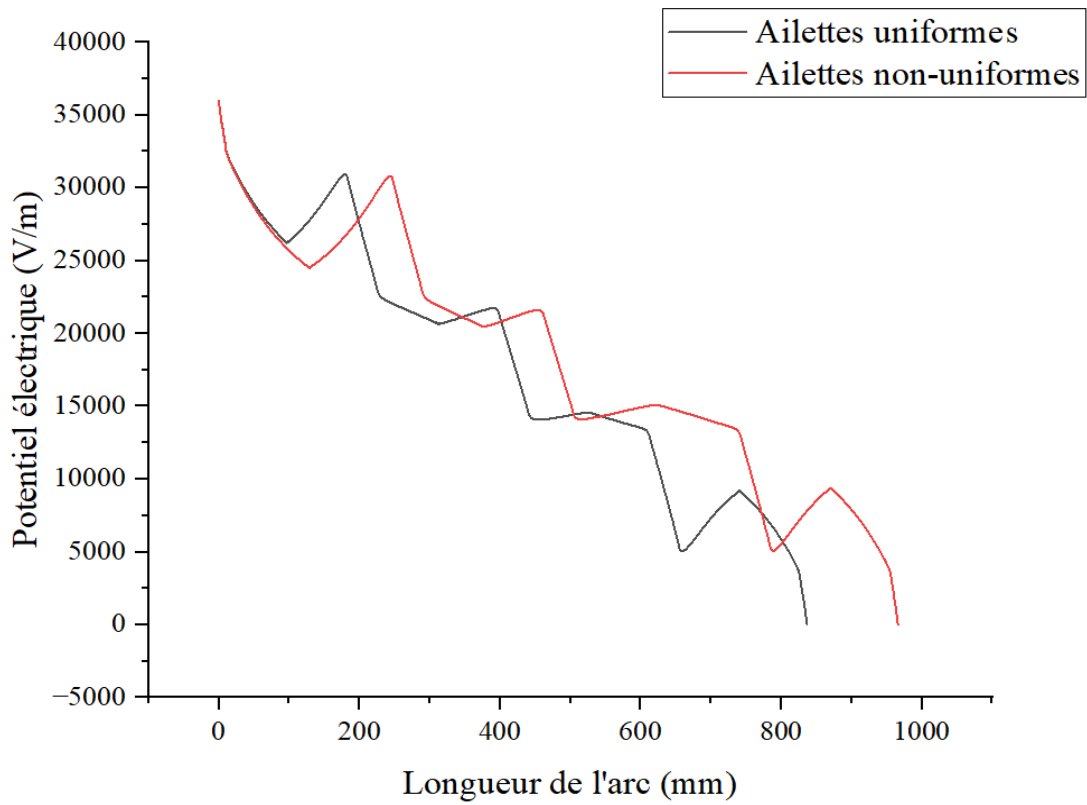


Figure III. 14. Distribution du potentiel électrique sur la surface d'un isolateur en silicone

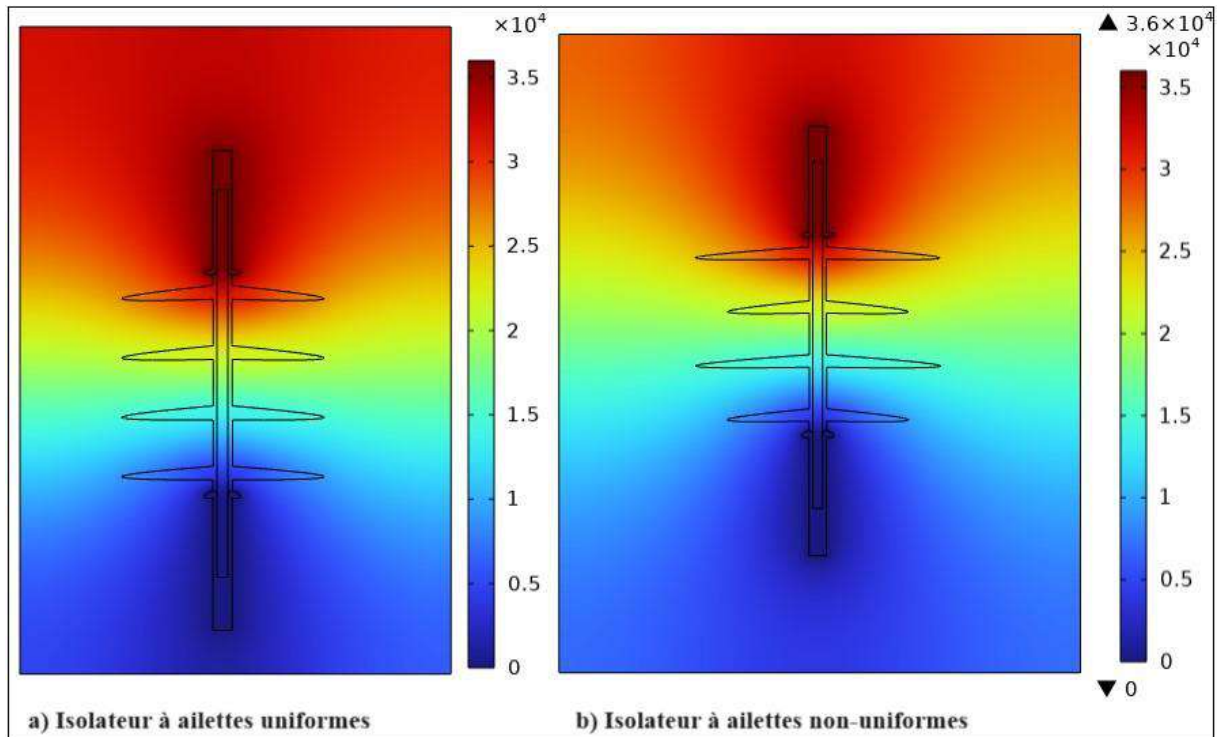


Figure III. 15. Photos de distribution du potentiel électrique sur la surface d'un isolateur en silicone avec ailettes uniformes et non-uniformes

Chapitre III : Simulation des distributions du champ et du potentiel électrique

III. 3. 2. 2. Effet de présence et du mode de distribution de pollution

Dans ce qui suit, nous avons examiné l'influence de la présence de la pollution sur la surface de l'isolateur en silicone. Dans cette partie, nous avons choisis le modèle à ailettes uniformes, et deux modes de distribution de pollution, comme nous savons que la nature de la silicone est hydrophobe, cela veut dire que cette surface à la propriété de repousser l'eau, donc le dépôt de pollution sur la surface de celui-ci est se forme des gouttes d'un angle de contact entre 90° et 150° .

Deux modes de distribution des gouttes d'eau sont testés dans ce cas, dont l'un est uniforme avec des gouttes d'eau de même volume ($100 \mu\text{l}$) en simulant le cas optimal de pollution, et l'autre mode avec des gouttes d'eau de volumes différents ($5, 10, 50$ et $100 \mu\text{l}$) distribuées aléatoirement le long de la ligne de fuite, ce cas simule le cas réelle, où nous pouvons pas contrôler la taille et l'endroit de déposition des perles d'eau. La conductivité électrique des gouttes d'eau est gardé fixe durant les deux simulations, elle est égale à $5.5 \mu\text{S/cm}$.

Il est à observer dans la figure III. 16. que le niveau du champ électrique est très faible dans le cas d'un isolateur propre, par rapport à un isolateur uniformément et non uniformément polluée. Dans le cas d'un isolateur sec, le niveau du champ est de l'ordre de $5 \times 10^5 \text{ V/m}$, au voisinage de l'électrode HT, et de l'ordre de $4.5 \times 10^5 \text{ V/m}$ au niveau de l'électrode terre, et entre 1.7 et $2 \times 10^5 \text{ V/m}$ au niveau des ailettes. Par contre, dans le cas d'une surface avec des gouttes d'eau de même volume, nous remarquons que la valeur du champ est égale à $6.4 \times 10^5 \text{ V/m}$, à proximité de l'électrode HT, et de l'ordre de $4.7 \times 10^5 \text{ V/m}$ au niveau de l'électrode terre, et entre 1.5 et $7 \times 10^5 \text{ V/m}$ au niveau des ailettes.

Dans le cas d'une surface avec des gouttes d'eau de volume variable, il est à signaler que l'intensité du champ électrique est égale à $7.3 \times 10^5 \text{ V/m}$, à proximité de l'électrode HT, et de l'ordre de $5 \times 10^5 \text{ V/m}$ au niveau de l'électrode terre, et entre 2 et $7 \times 10^5 \text{ V/m}$ au niveau des ailettes.

Alors, les gouttelettes d'eau peuvent agir comme des points de concentration de la charge électrique, ce qui implique l'élévation locale du champ électrique et favorise le risque d'apparition de décharges électriques.

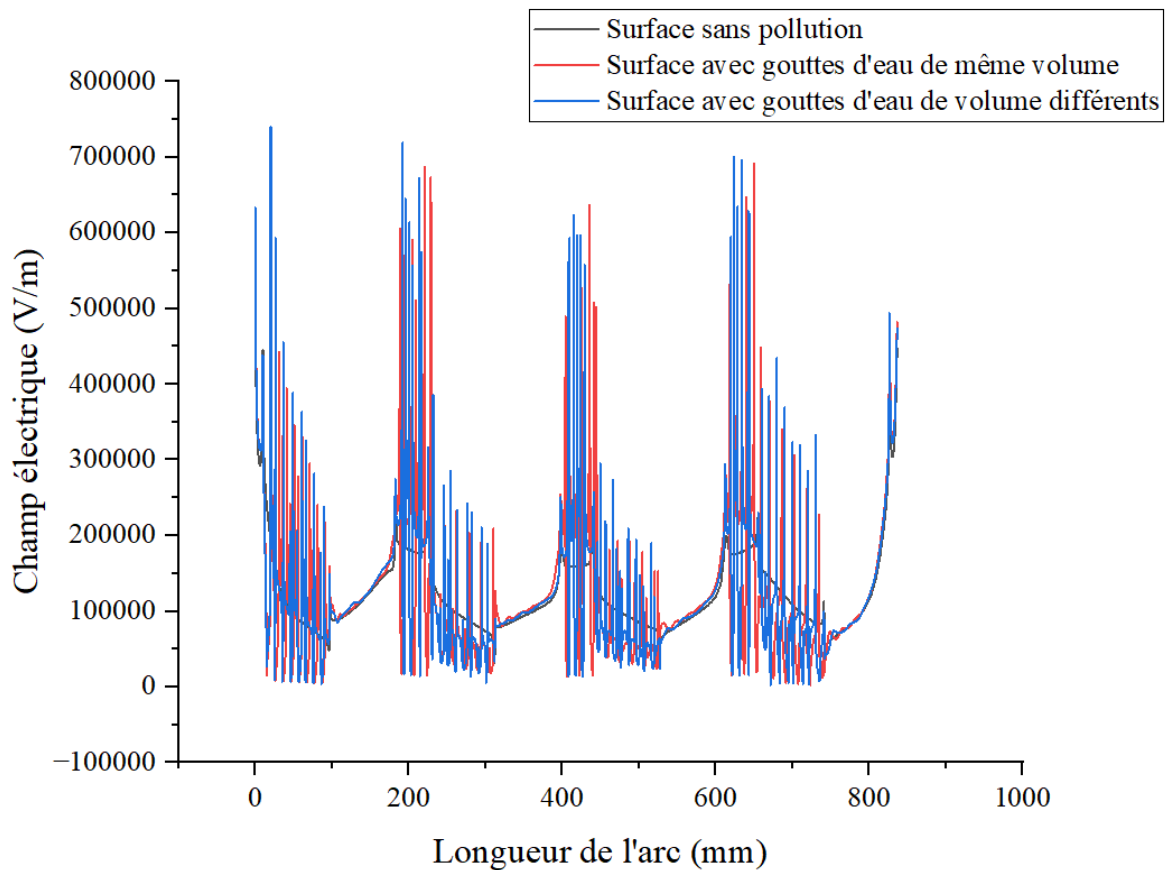


Figure III. 16. Distribution du champ électrique sur la surface d'un isolateur en silicone

D'après ces résultats nous pouvons dire que la performance électrique d'un isolateur en silicone non-uniformément contaminée est plus faible que les deux autres cas. Cela peut être expliqué par le fait que la présence des gouttes d'eau sur la surface de l'isolateur peut faciliter la conduction électrique le long de sa ligne de fuite. De plus, la différence de volume de gouttes d'eau implique une modification de la géométrie de notre isolateur, et peut créer des points de concentration du champ électrique ou bien des endroits d'une intensité du champ plus faible en fonction de la répartition de ces gouttes.

Pour le cas des gouttes uniformes, celles-ci peuvent faire apparaître des chemins de fuite conducteurs, ce qui a comme conséquence une diminution de l'efficacité de notre isolateur à garder un niveau élevé d'un champ électrique (Figure 17).

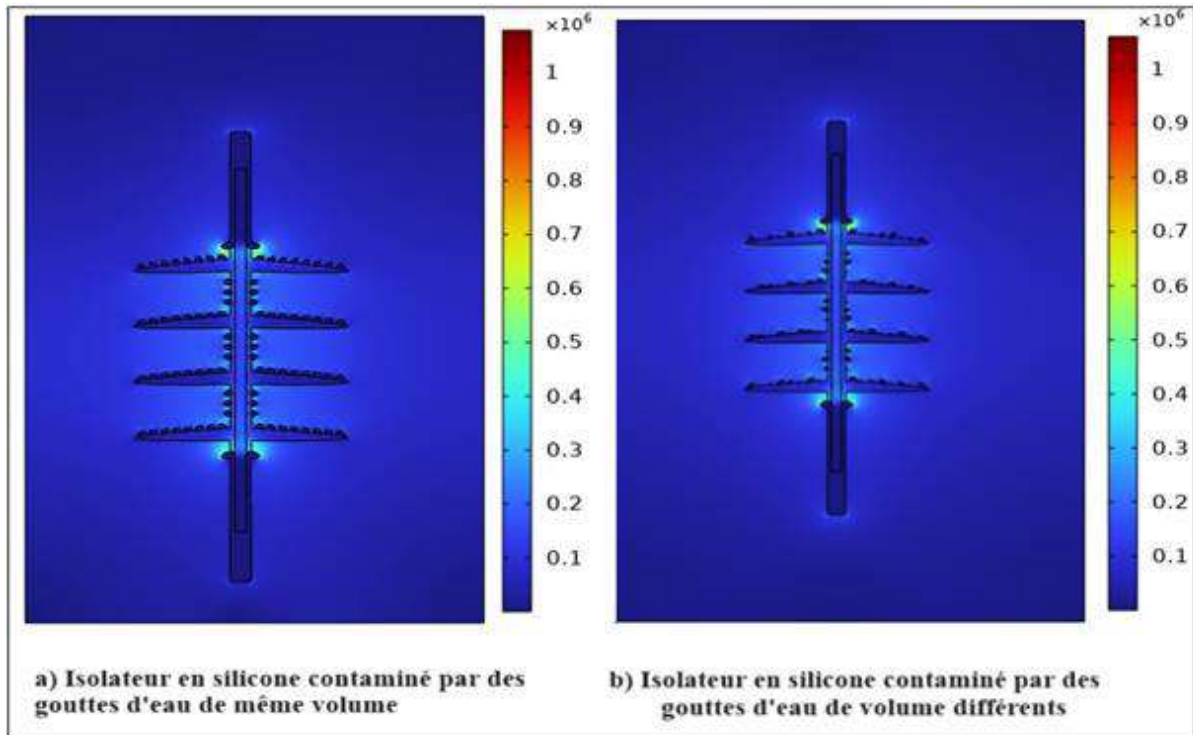


Figure III. 17. Photos de la distribution du champ électrique sur la surface d'un isolateur en silicone en fonction du mode de distribution des gouttes d'eau

Concernant l'effet de la présence des gouttes d'eau et du mode de leurs distributions ainsi que leur volume, nous remarquons qu'ils n'ont pas vraiment un effet sur le niveau du potentiel électrique au niveau de l'isolateur (Figure III. 18 et 19).

Les figures III.20 et 21 présentent la distribution du champ et du potentiel électrique sur les surfaces des ailettes dans le cas des gouttes d'eau de même volume. D'après les caractéristiques nous constatons que le niveau du champ et du potentiel est plus grand dans la première ailette au voisinage de l'électrode HT, et plus faible au niveau de l'ailette à proximité de l'électrode terre.

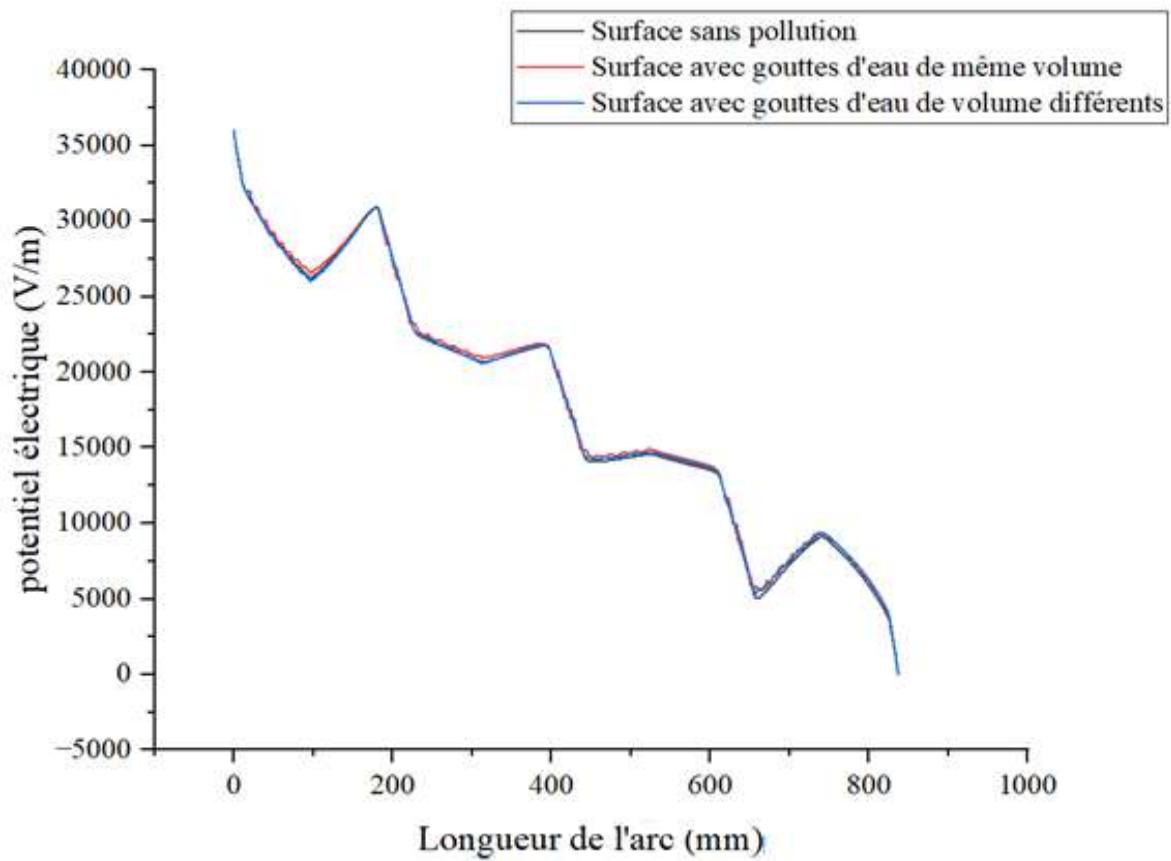


Figure III.18. Distribution du potentiel électrique sur la surface d'un isolateur en silicone

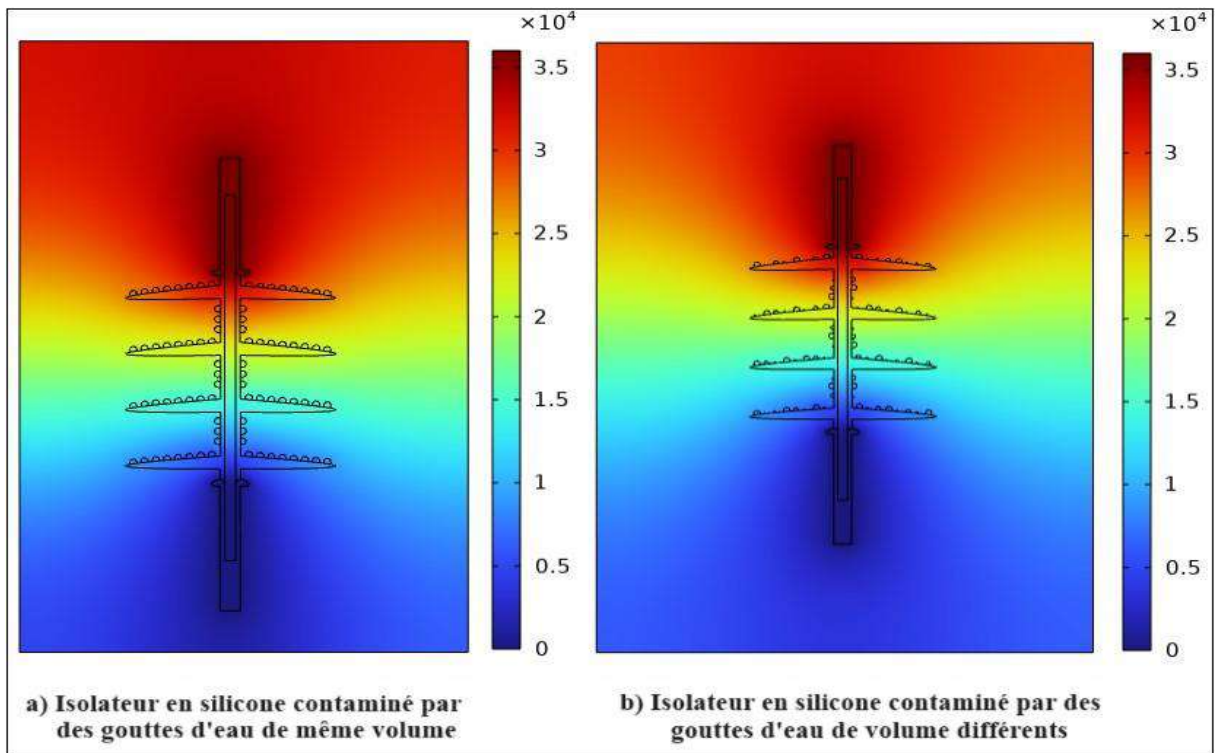


Figure III. 19. Photos de la distribution du potentiel électrique sur la surface d'un isolateur en silicone en fonction du volume des gouttes d'eau

Chapitre III : Simulation des distributions du champ et du potentiel électrique

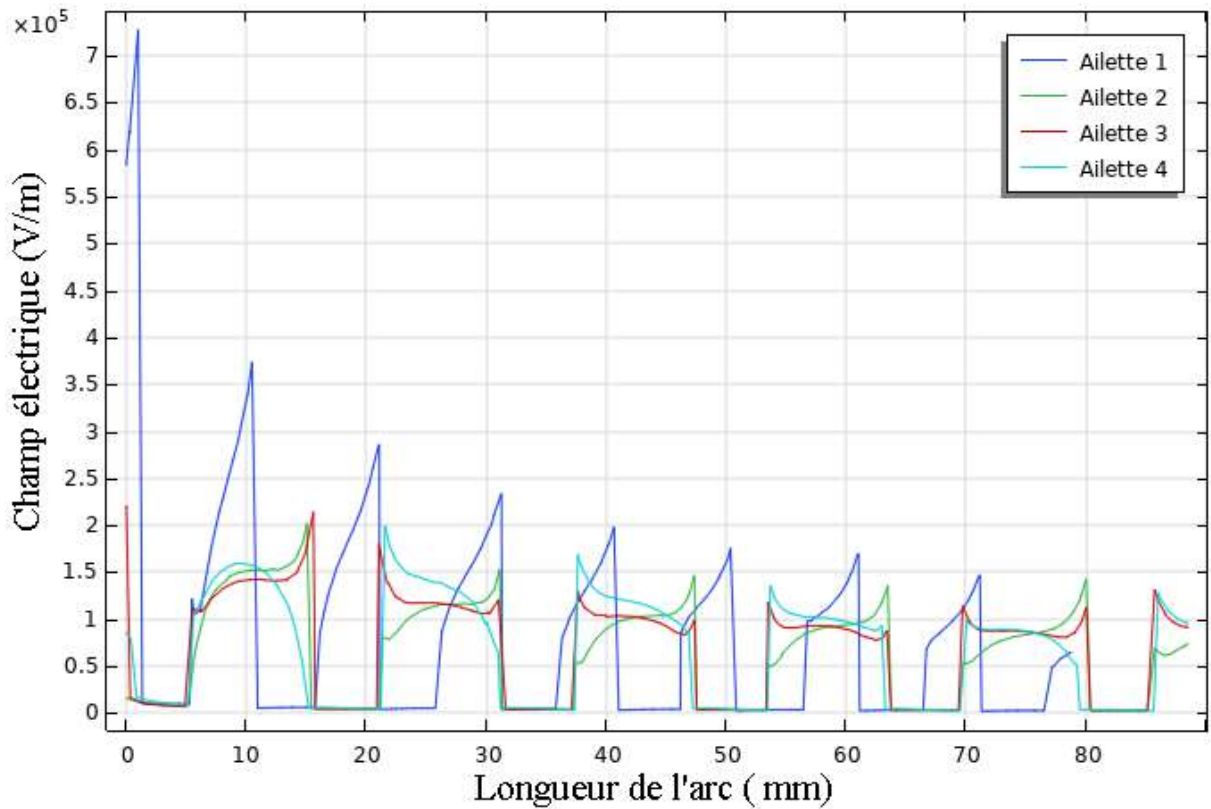


Figure III. 20. Distribution du champ électrique sur les ailettes de l'isolateur en silicone uniformément polluée

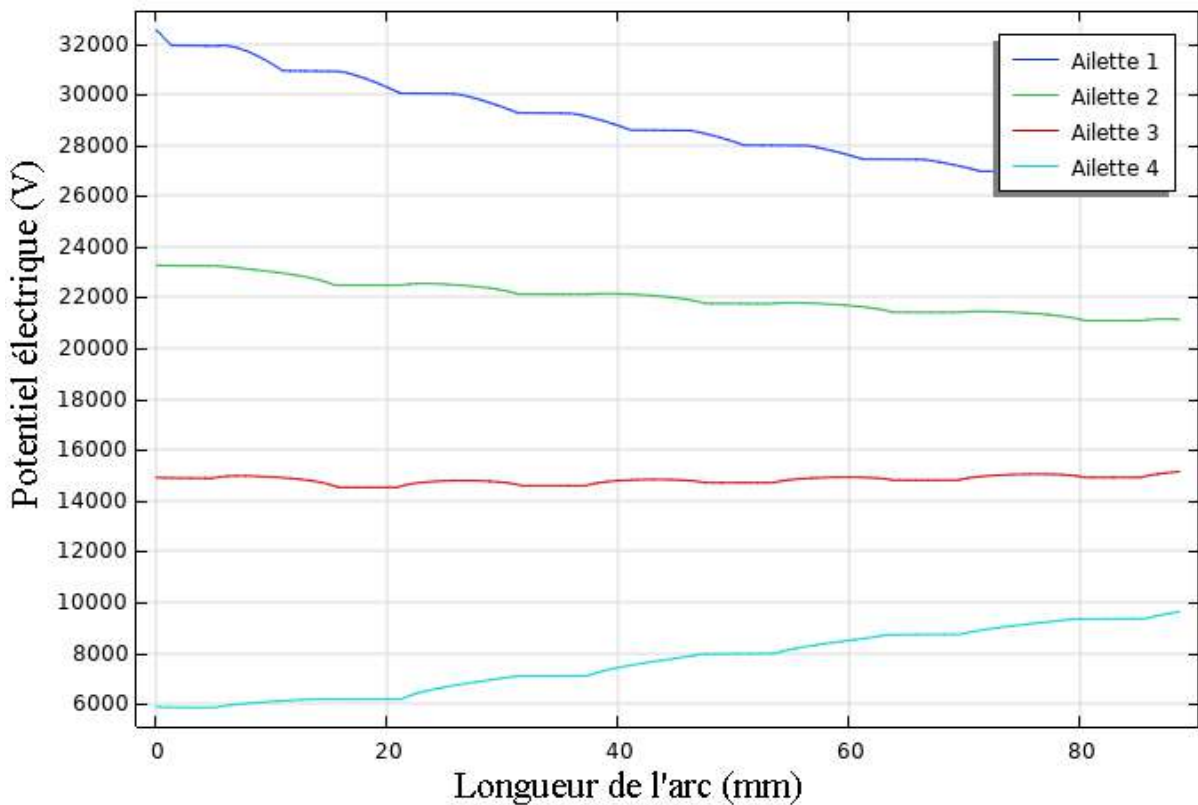


Figure III. 21. Distribution du champ électrique sur les ailettes de l'isolateur en silicone uniformément polluée

III. 3. 2. 3. Effet de la conductivité

Dans ce cas nous essayons de simuler l'effet de la variation du degré de contamination déposés sur la surface de l'isolateur, deux valeurs de conductivités sont choisies $5.5 \mu\text{S/cm}$ et 5.5mS/cm . Les résultats de cette simulation montrent que le changement de la valeur de la conductivité électrique des gouttes d'eau n'a aucune influence évidente sur la distribution du champ et du potentiel électrique (Figure III.22 et 23). Cela est peut être expliqué par le fait que la conductivité des gouttes d'eau est beaucoup plus grande que celle de l'air et du caoutchouc de silicone.

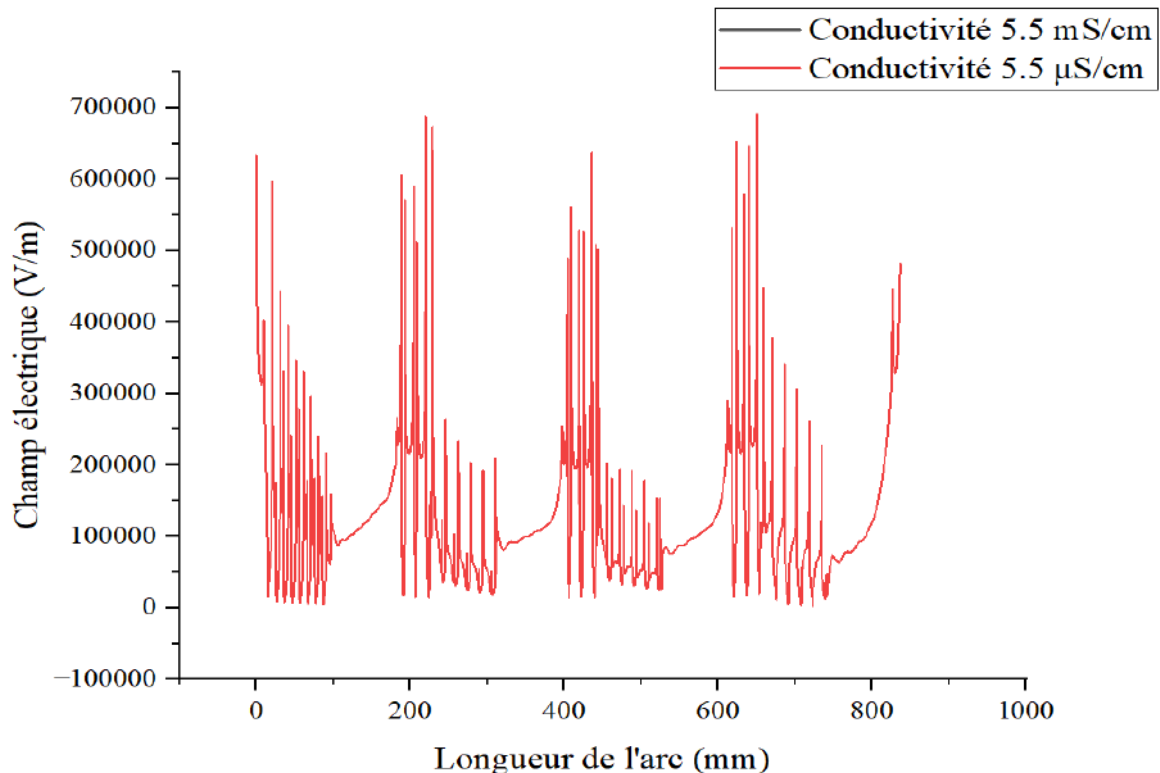


Figure III. 22. Distribution du champ électrique sur la surface d'un isolateur en silicone

Il est à signaler aussi, que la grande partie de l'intensification du champ électrique a lieu à côté des gouttelettes d'eau déposée sur la surface (figure III. 17). La principale préoccupation concerne les forces électrostatiques que subiront les gouttelettes d'eau. Les forces électrostatiques peuvent être suffisamment élevées pour allonger les gouttelettes d'eau de telle sorte qu'un canal conducteur continu se forme, entraînant un court-circuit complet. Le point ci-dessus est validé par la caractéristique du champ électrique le long de la limite de l'isolateur illustré dans la figure III. 22.

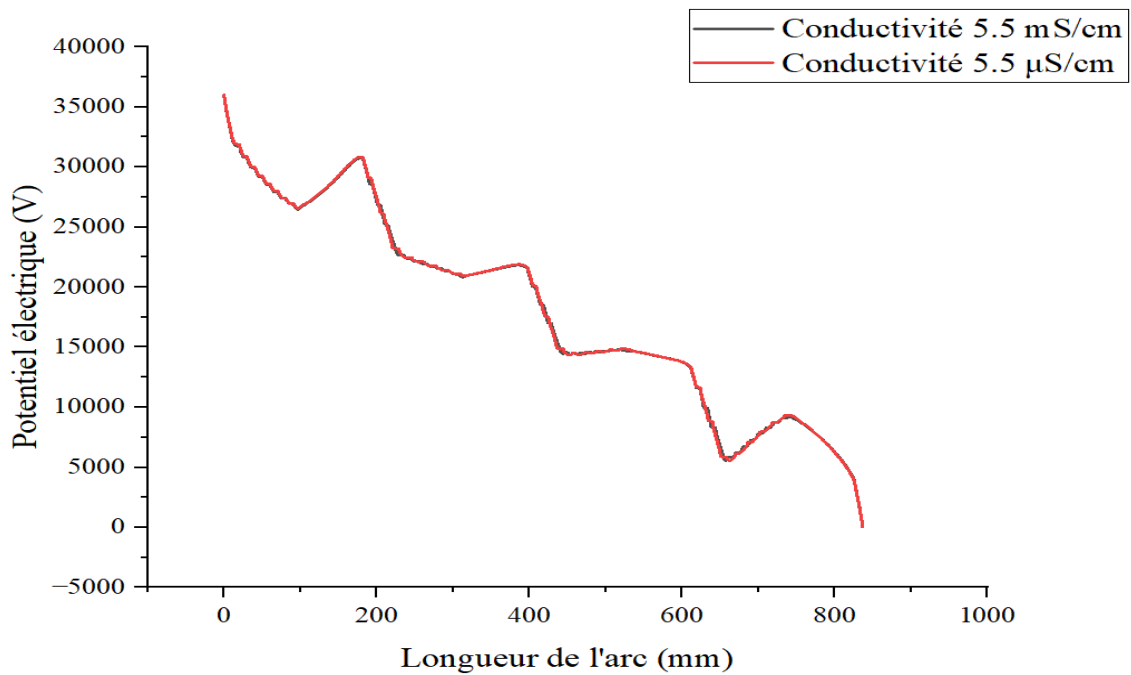


Figure III. 23. Distribution du potentiel électrique sur la surface d'un isolateur en silicone

III. 3. 3. Simulation d'un isolateur en surface superhydrophobe

III. 3. 3. 1. Effet du profil de l'isolateur :

Comme nous avons fait auparavant avec les deux autres types de matériaux, nous avons simulé l'effet de la variation de la taille des ailettes sur la distribution du champ et du potentiel électrique. D'après les résultats de simulation, nous trouvons qu'il n'y a pas vraiment une grande variation dans le niveau du champ ou bien du potentiel électrique, il y a juste une élongation de longueur de la ligne de fuite (Figure III. 24, 25, 26 et 27).

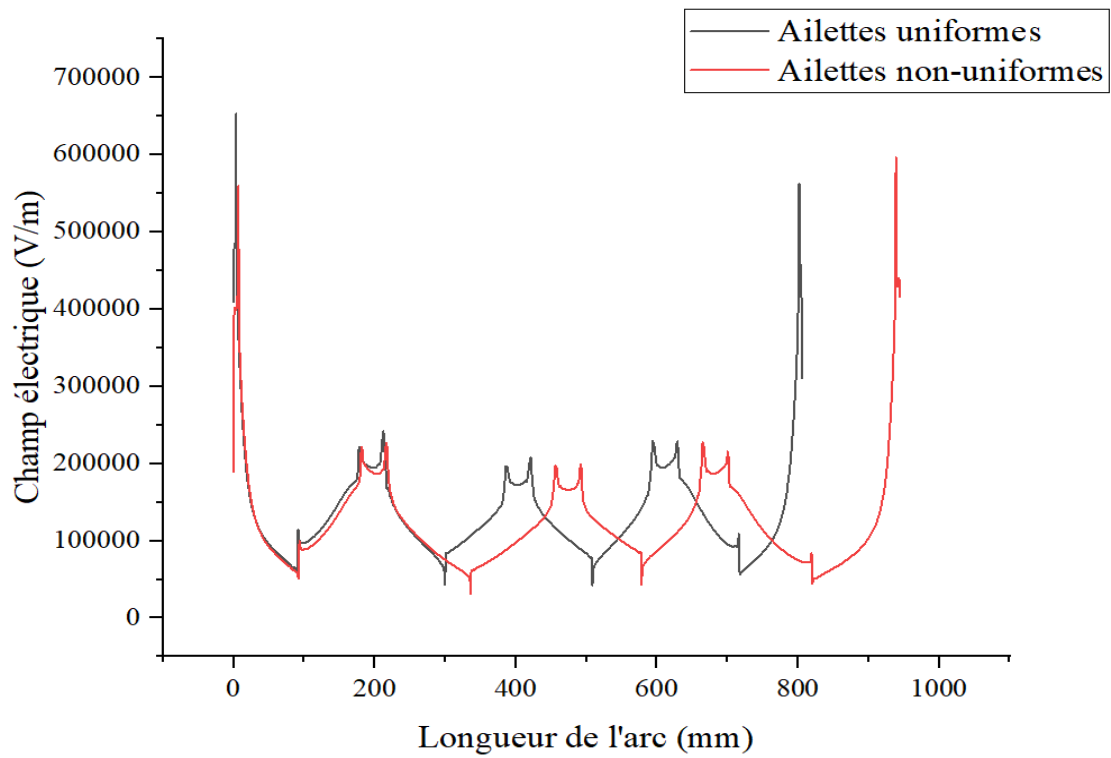


Figure III. 24. Distribution du champ électrique sur la surface d'un isolateur superhydrophobe

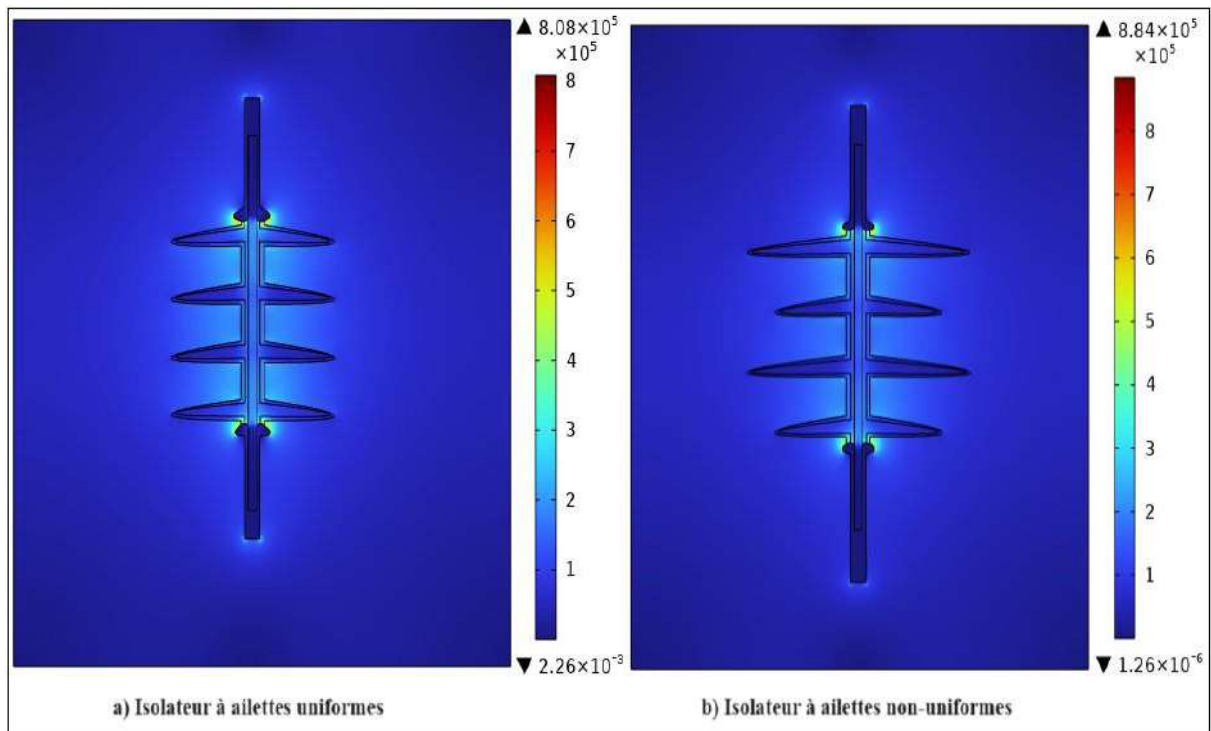


Figure III. 25. Photos de la distribution du champ électrique sur la surface d'un isolateur superhydrophobe avec ailettes uniformes et non-uniformes

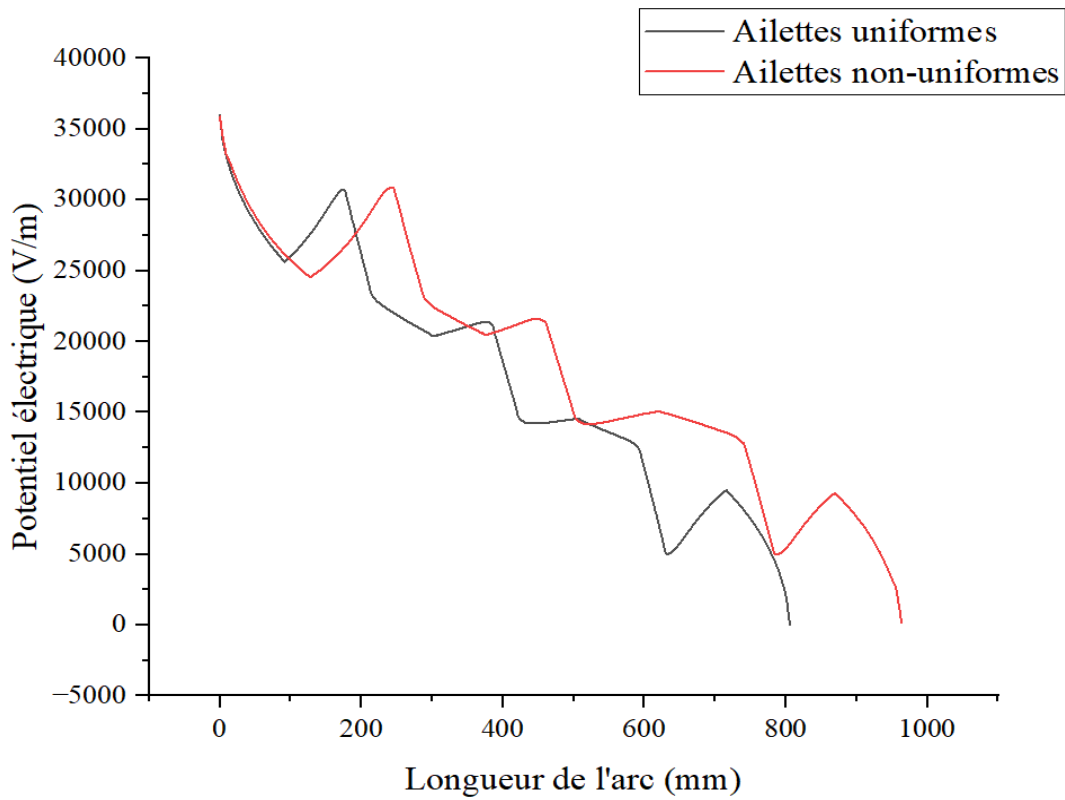


Figure III. 26. Distribution du potentiel électrique sur la surface d'un isolateur superhydrophobe

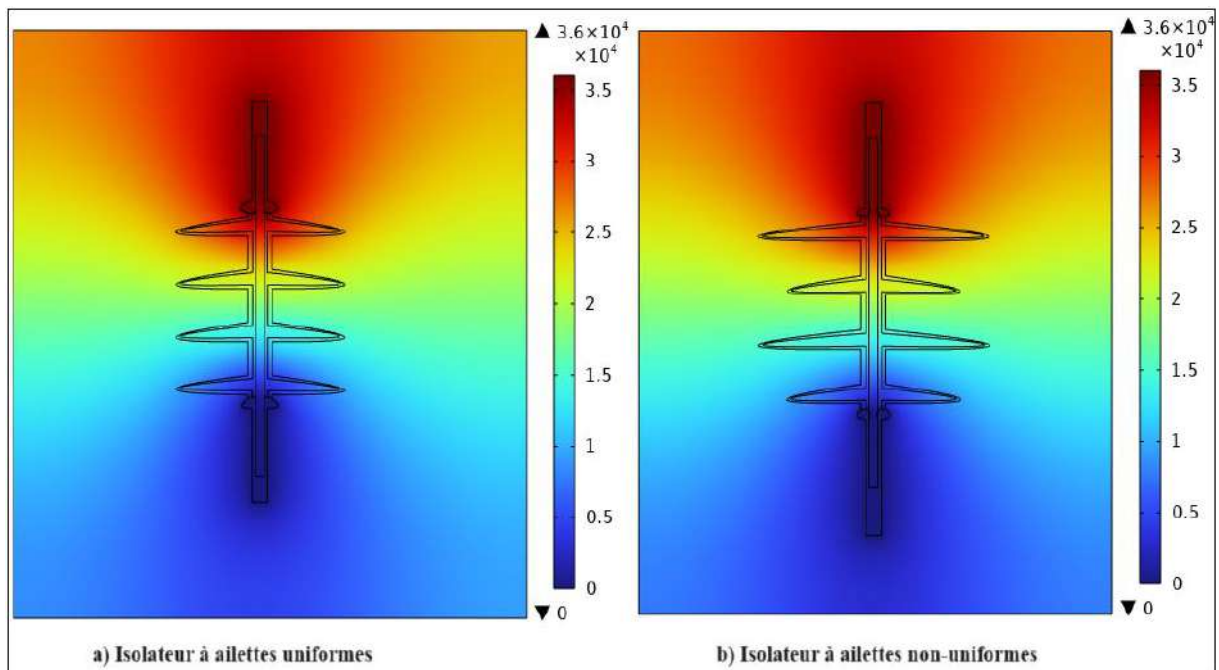


Figure III. 27. Photos de la distribution du potentiel électrique sur la surface d'un isolateur superhydrophobe avec ailettes uniformes et non-uniformes

III. 3. 3. 2. Effet de présence et du mode de distribution de pollution

Dans ce qui suit, nous nous intéressons à la simulation de l'influence de la présence de la pollution, et du mode de distribution des polluants sur la performance électrique d'un isolateur à surface superhydrophobe. Dans ce cas, la forme des gouttes d'eau est plus sphérique que celles déposées sur un isolateur hydrophobe, avec un angle de contact plus grand, ce dernier est supérieur à 150° . Donc dans ce cas la surface de contact entre la goutte d'eau et la surface superhydrophobe est plus faible.

La figure III.28 présente trois courbes de distribution du champ électrique, dont l'une pour un isolateur propre, la deuxième pour un isolateur avec des gouttes d'eau de volume uniforme ($100 \mu\text{l}$), la troisième courbe avec des gouttes d'eau de différents volumes.

Il est à remarquer que l'intensité du champ électrique est très faible le long de la ligne de fuite dans le cas d'un isolateur propre. Ce qui n'est pas le cas pour les deux autres scénarios, où nous constatons que l'intensité du champ est plus élevée dans les zones proches de la ligne de perforation (cœur du FPR) par rapport aux extrémités des ailettes, de plus, nous constatons que le volume des gouttes d'eau affecte la distribution du champ électrique (Figure III.29).

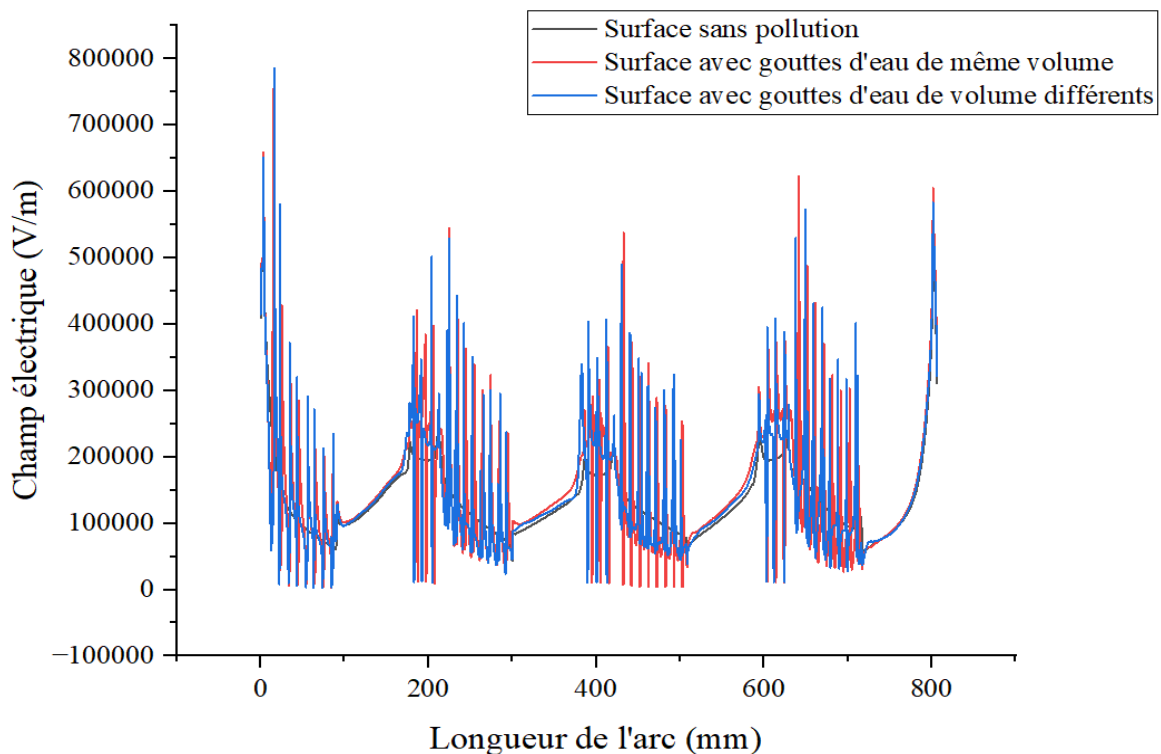


Figure III. 28. Distribution du champ électrique sur la surface d'un isolateur superhydrophobe

Chapitre III : Simulation des distributions du champ et du potentiel électrique

D'après ces résultats, nous pouvons dire que l'existence de gouttes d'eau peut évidemment modifier la répartition du champ électrique au niveau de la surface de l'isolateur superhydrophobe et provoque une concentration des contraintes locales.

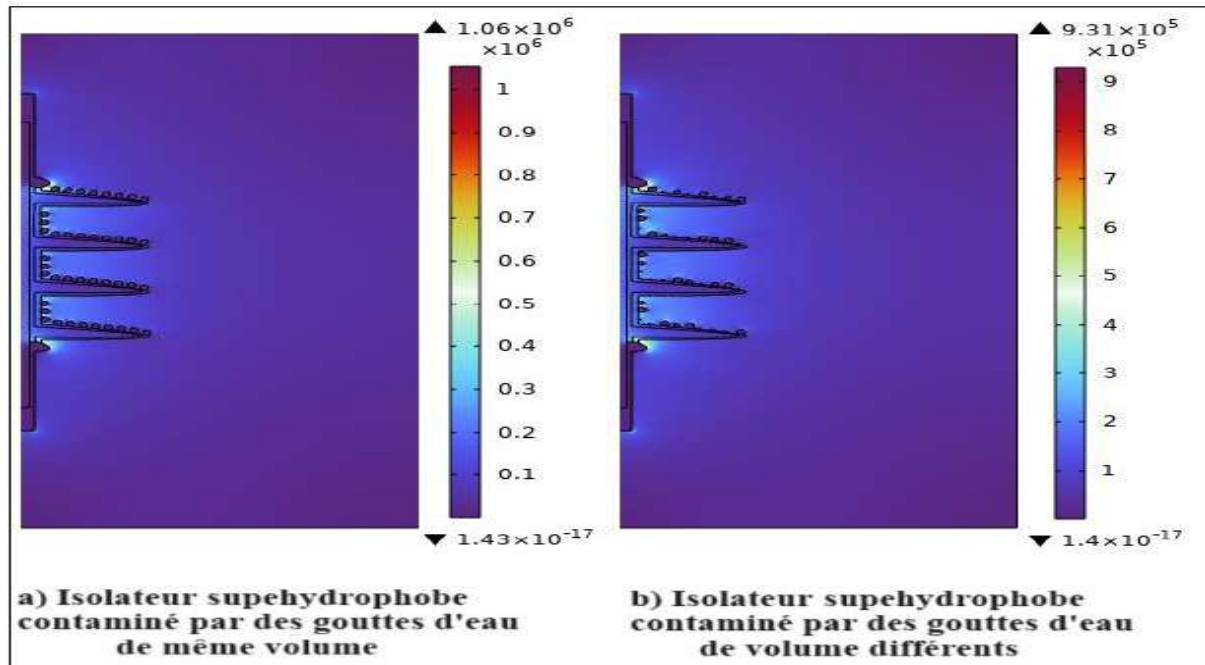


Figure III. 29. Photo de la distribution du champ électrique sur la surface d'un isolateur superhydrophobe en fonction du volume des gouttes d'eau

Le modèle pollué produit une distribution de champ avec une succession de pics à différentes positions sur la surface de l'isolateur. On a découvert que le champ s'étend également sur les ailettes et les surfaces les plus mouillées. De même, une augmentation considérable du champ est observée dans les régions des ailettes, suggérant un emplacement sensible aux opérations de décharge électrique. En revanche, les surfaces des ailettes, sont caractérisées par une humidité importante et incluant celle la plus proche de la borne HT, elles indiquent un déplacement bénéfique du champ électrique. Cela pourrait être dû aux zones soumises à une activité mouillante importante. Des bandes sèches et des décharges électriques sont largement détectées sur les zones de tige dans la plupart des investigations expérimentales, et elles correspondent bien aux résultats de modélisation de cette étude.

Sachant que, vue la nature de la surface superhydrophobe, et sa caractéristique d'auto-nettoyage, la concentration du champ électrique ne peut pas conduire à la formation des décharges électriques mais plutôt, favorise l'éjection des gouttes d'eau en dehors de la surface isolante. Plus le champ est grande à l'extrémité d'une gouttes d'eau plus sa chance de s'évacuer est grande.

Chapitre III : Simulation des distributions du champ et du potentiel électrique

D'après la figure III. 30, nous constatons que la concentration du champ est élevée au niveau de l'ailette au voisinage de l'électrode HT, puis de valeurs plus petites au niveau de l'ailette à proximité du point terre, après le tour de la deuxième ailette et vers la fin la troisième ailette, donc nous pouvons prédire l'éjection des gouttes d'eau en suivant cet ordre.

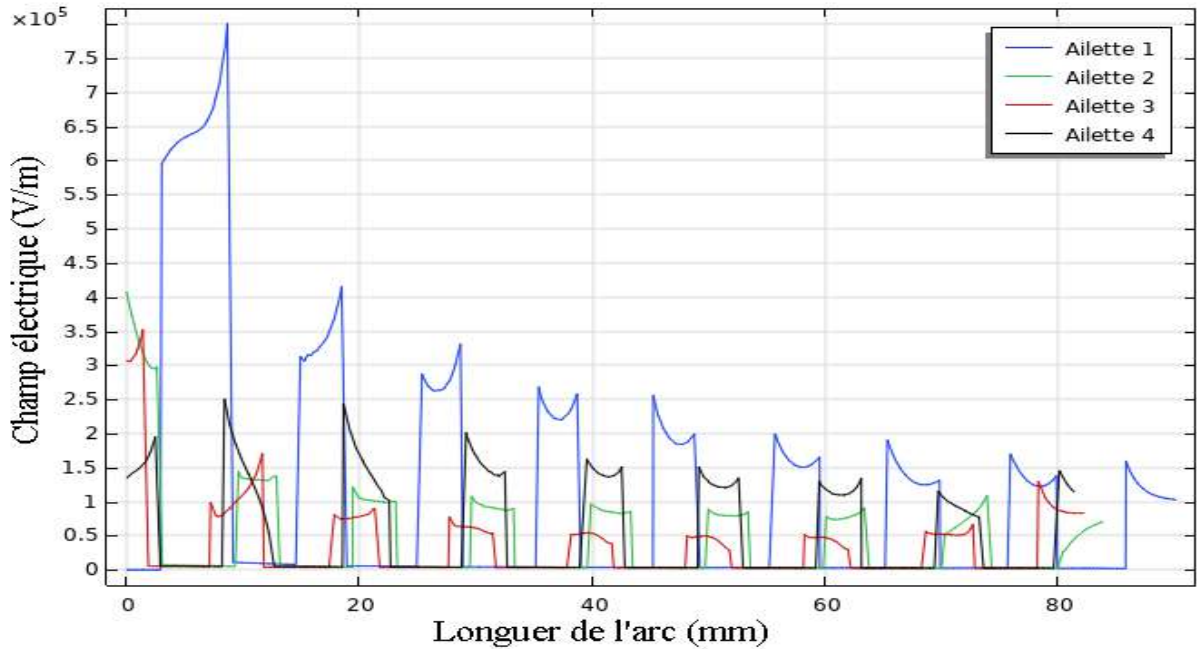


Figure III. 30. Distribution du champ électrique sur les ailettes de l'isolateur superhydrophobe

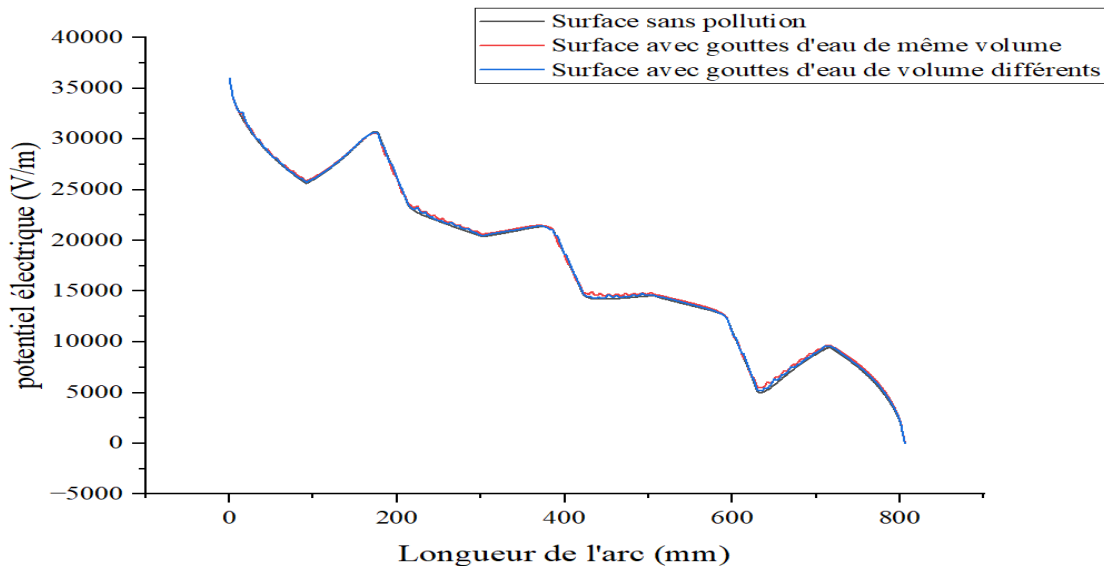


Figure III. 31. Distribution du potentiel électrique sur la surface d'un isolateur superhydrophobe

Chapitre III : Simulation des distributions du champ et du potentiel électrique

En ce qui concerne l'effet de la présence des polluants et le mode de leurs distributions sur le niveau du potentiel électrique au niveau de la surface isolante. Il est à signaler qu'aucune variation n'est remarquable dans ces trois cas (Figure III.30). Le potentiel reste toujours plus intense au niveau de l'électrode HT et se diminue jusqu'au point terre (Figure III.32 et 33).

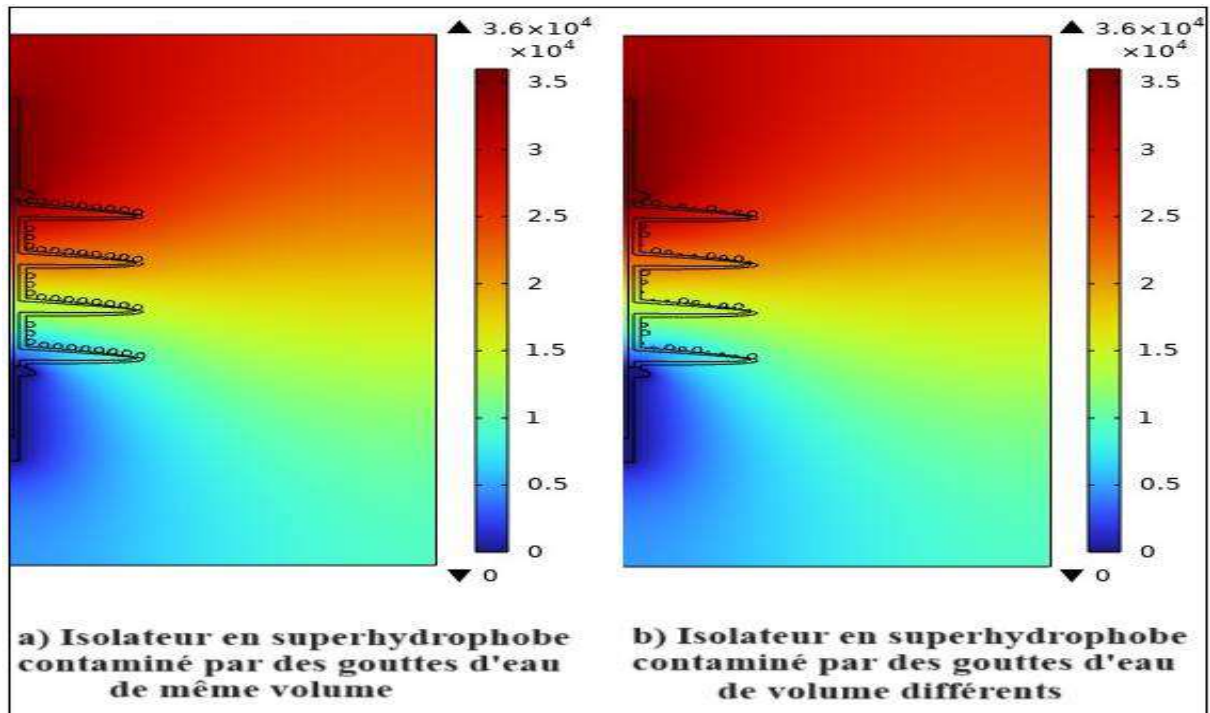
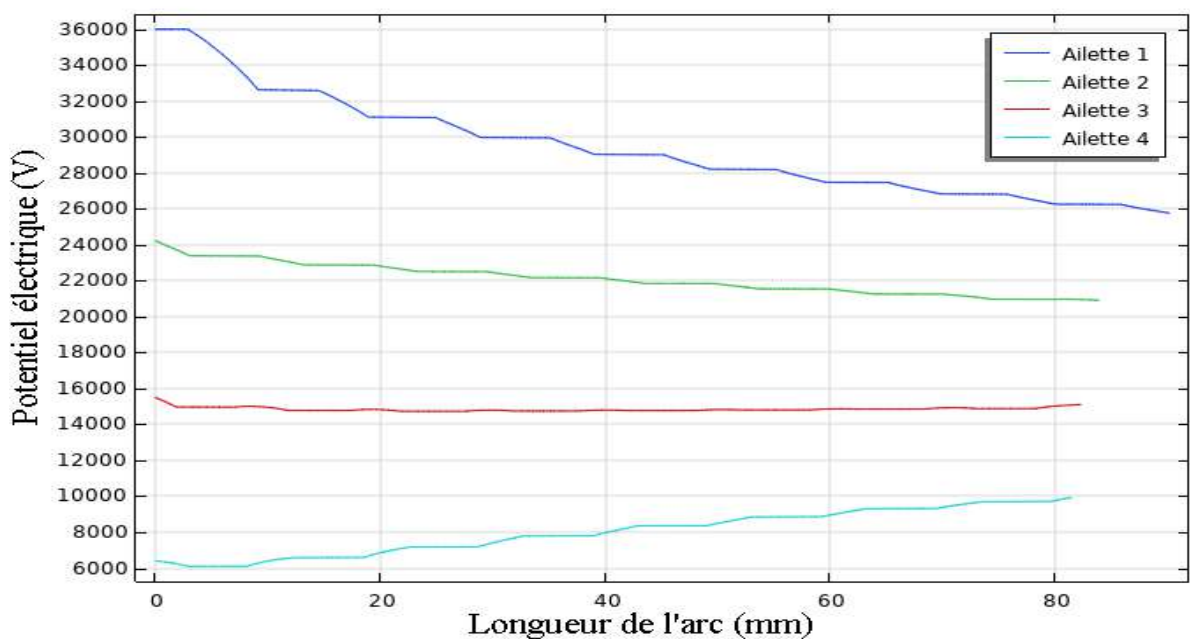


Figure III. 32. Photo de la distribution du potentiel électrique sur la surface d'un isolateur superhydrophobe en fonction du volume des gouttes d'eau



Chapitre III : Simulation des distributions du champ et du potentiel électrique

Figure III. 33. Distribution du potentiel électrique sur les ailettes de l'isolateur en surface superhydrophobe

III. 3. 3. 3. Effet de la conductivité

Les résultats de l'influence de la variation du degré de la sévérité de pollution sur la distribution du champ et du potentiel électrique sont illustrés dans les figures III. 34 et 35. Deux niveaux de conductivités électriques ont été simulés ($5.5 \mu\text{l/cm}$ et 5.5mS/cm).

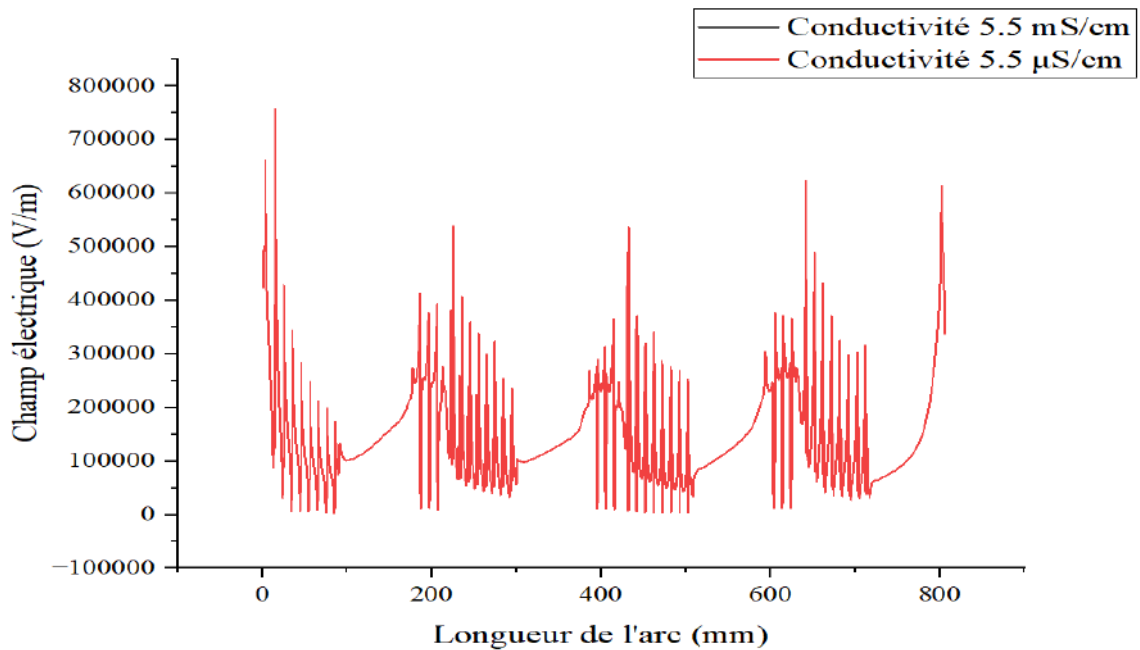
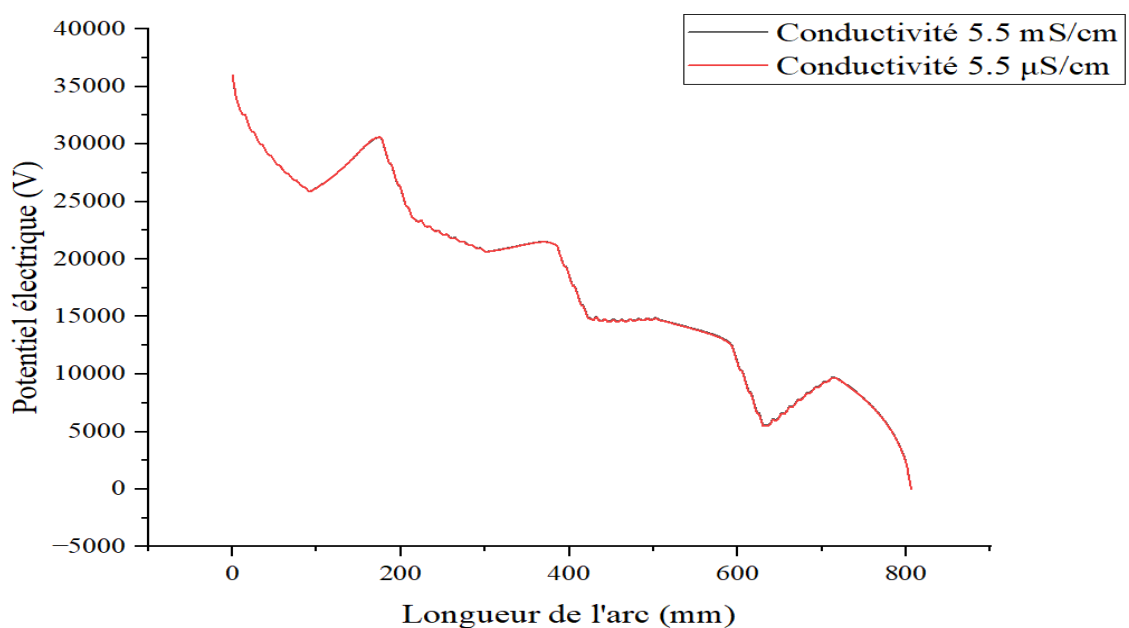


Figure III. 34. Distribution du champ électrique sur la surface d'un isolateur superhydrophobe



Chapitre III : Simulation des distributions du champ et du potentiel électrique

Figure III. 35. Distribution du potentiel électrique sur la surface d'un isolateur superhydrophobe

Il est à souligner que quoique ce soit la valeur de la conductivité électrique de la solution polluante, la concentration du champ électrique reste inchangée, ce qui a par conséquent l'obtention du même scénario d'évacuation de perles d'eau à l'extérieur de la surface de l'isolateur. Comme il a été déjà vu auparavant, l'intensité du champ électrique est très accentuée au voisinage des électrodes qu'au milieu de la surface de l'isolateur.

Par contre, dans le cas de la distribution du potentiel électrique, nous observons qu'aucun changement n'est obtenu après la variation de la valeur de la conductivité électrique. Les caractéristiques présentées dans la figure III. 35 sont identiques.

III. 3. 4. Comparaison des résultats

III. 3. 4. 1. Effet de la variation du type de matériau isolant sur la distribution du champ électrique :

En vue d'examiner l'effet du changement du type de matériau isolant utilisé dans la fabrication d'un isolateur électrique. Nous avons choisi trois types de nature différentes ; à savoir, un matériau hydrophile, hydrophobe et superhydrophobe. Les résultats illustrés dans les figures III. 36, 37, 38 et 39 représentent la distribution du champ et du potentiel électrique sur la surface des trois isolateurs électrique dans les deux cas sans et avec pollution. Dans ce qui suit nous avons pris les caractéristiques obtenues dans le cas des ailettes uniformes avec une pollution de conductivité électrique de l'ordre de $5.5 \mu\text{S/cm}$. Dans le cas de l'isolateur en verre la couche de pollution est distribuée uniformément sur la surface, par contre dans le cas des isolateurs en silicone ou bien en surface superhydrophobe, le contaminant est de sous forme des gouttes de même volume de l'ordre $100 \mu\text{l}$.

En commençons par la distribution du champ électrique, il est à noter que dans le cas sec, la concentration du champ électrique est très élevés pour l'isolateur superhydrophobe, par contre pour les deux autres isolateurs l'intensité du champ électrique est la même. Une très grande différence entre les valeurs du champ électrique dans le cas polluée de l'isolateur en verre qui à présenter des valeurs faibles par rapport à la silicone et le cas superhydrophobe, ce fait est peut être expliqué par la variation de la valeur de la conductivité du matériau isolant qui est plus faible dans le cas superhydrophobe. De plus, nous remarquons qu'aux extrémités des isolateurs le champ est très élevé dans le cas superhydrophobe, par contre le long de la

Chapitre III : Simulation des distributions du champ et du potentiel électrique

ligne de fuite nous constatons qu'il y a une petite conformité entre les courbes des deux surfaces en silicone et superhydrophobe.

Les deux figures III.38 et 39 illustrent la distribution du potentiel électrique sur les surfaces des trois isolateurs, il est à constater que dans le cas propre, la forme des courbes est la même pour les trois matériaux, par contre une petite variation dans les valeurs du potentiel est obtenu, toujours pour le cas hydrophobe et superhydrophobe les courbes sont identiques, cependant, la courbe du potentiel pour le cas de l'isolateur en verre est différente. D'un autre côté, dans le cas des isolateurs pollués, une différence est observé entre les trois types, dont les valeurs du potentiel sur la surface de l'isolateur en verre est plus faible.

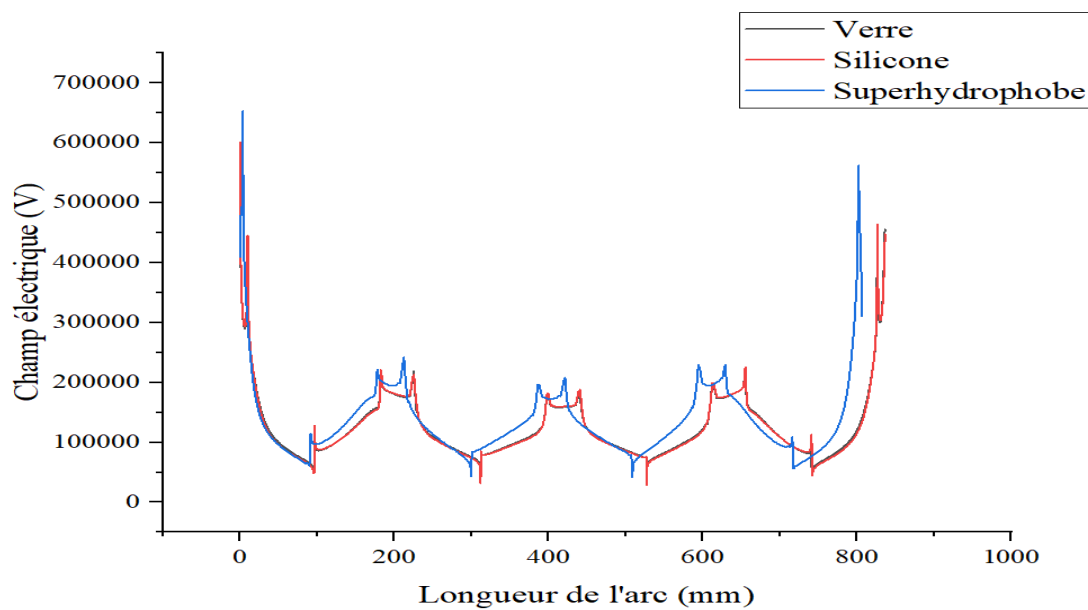


Figure III. 36. Distribution du champ électrique sur la surface des isolateurs dans le cas sec

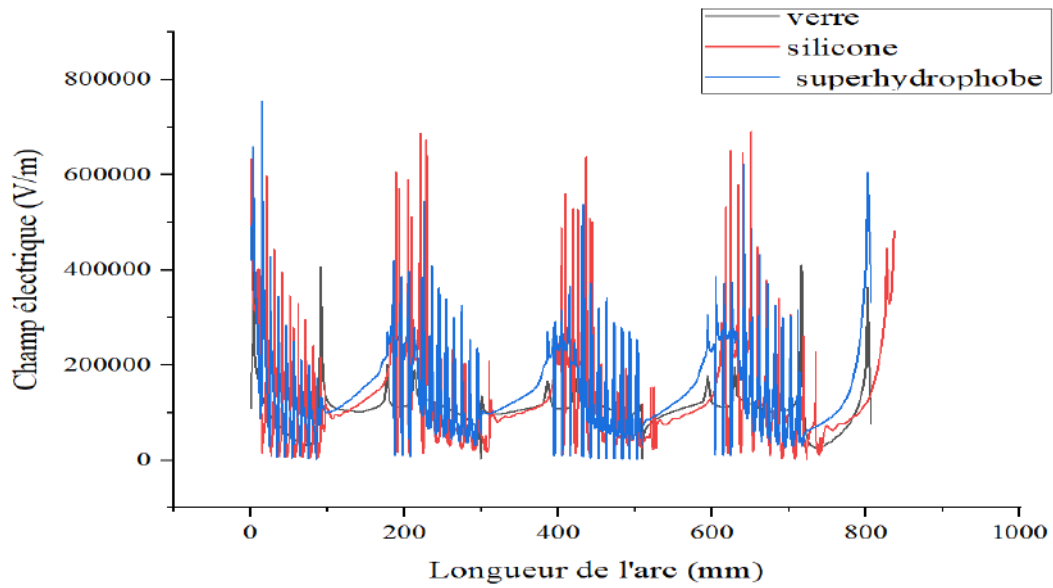


Figure III. 37. Distribution du champ électrique sur la surface des isolateurs dans le cas polluée

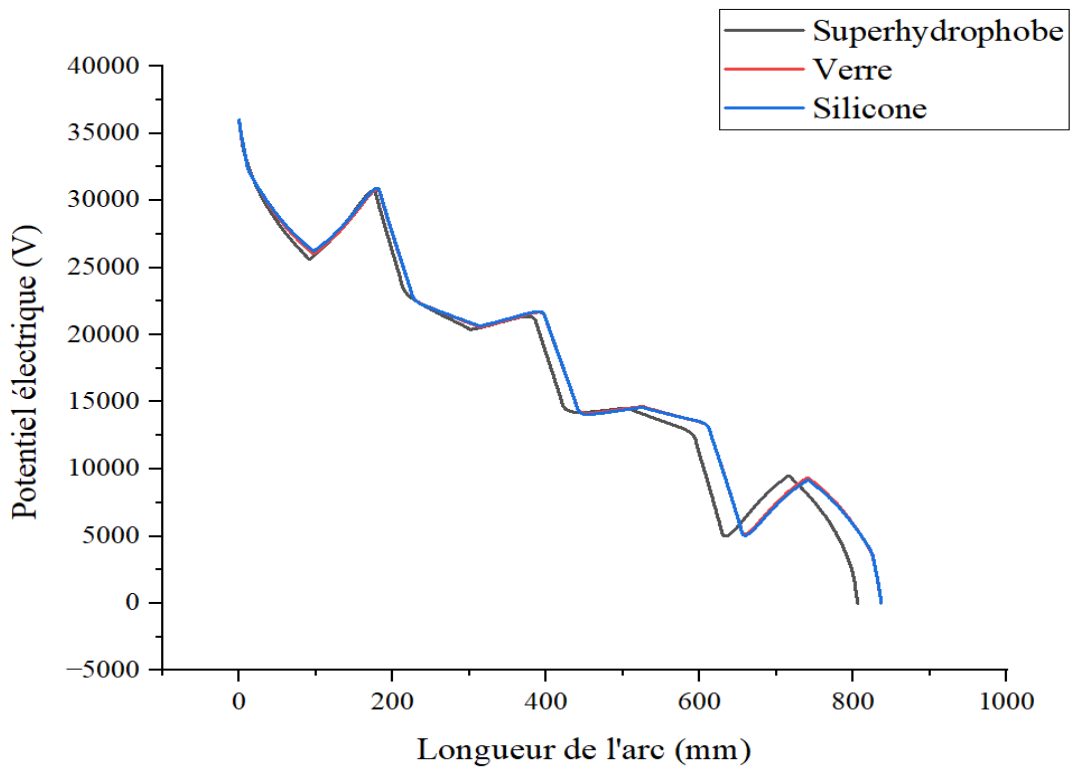


Figure III. 38. Distribution du champ électrique sur la surface des isolateurs dans le cas sec

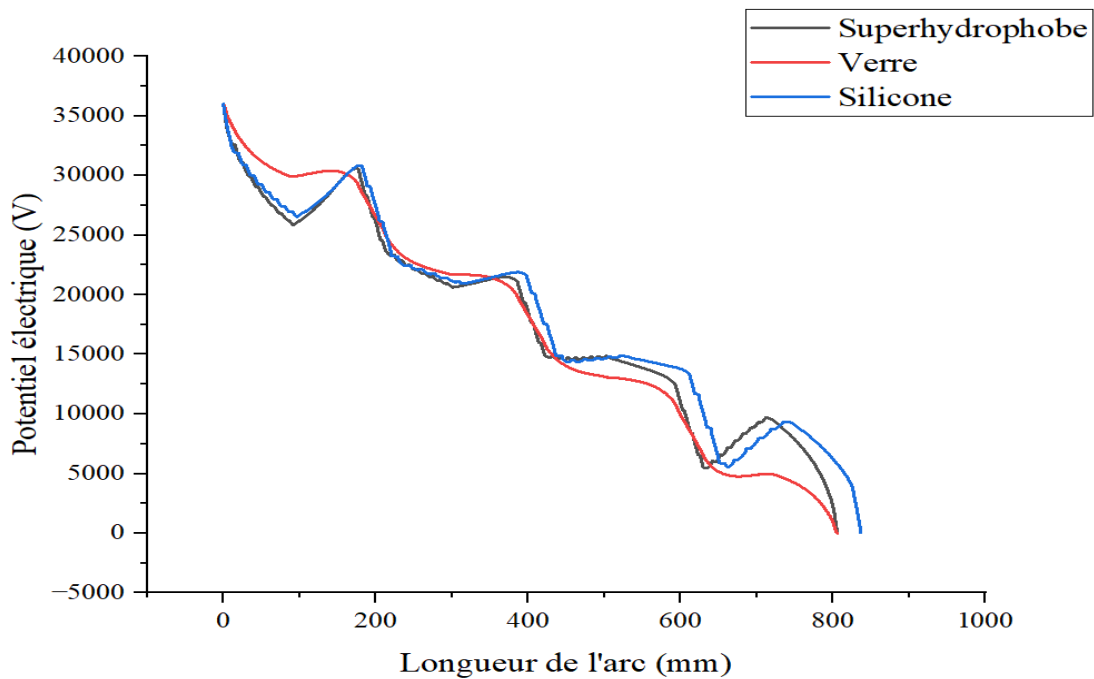


Figure III. 39. Distribution du champ électrique sur la surface des isolateurs dans le cas polluée

III. 4. Conclusion

Le contexte de cette étude se concentre beaucoup plus sur le domaine de l'isolation électrique et de la protection des isolateurs dans les environnements pollués. Les isolateurs à surface superhydrophobe sont de plus en plus utilisés pour améliorer la performance de cet élément dans des conditions de pollution sévère. Cependant, l'effet de la distribution uniforme et non uniforme de pollution sur ces isolateurs reste encore peu étudié. Cette étude vise donc à combler cette lacune en fournissant une analyse détaillée de cet effet et en identifiant les facteurs clés qui influencent les performances des isolateurs superhydrophobes, de plus nous avons réalisé une étude comparative avec les deux autres types d'isolateurs qui existent dans le marché et vastement utilisés.

L'objectif de cette recherche est de déterminer l'effet de la distribution du champ et du potentiel électrique.

D'après l'analyse des résultats obtenus nous concluons que :

- La longueur des ailettes affecte juste la longueur de la ligne de fuite, mais le format d'isolateurs étudiés dans ce travail n'a pas vraiment une influence sur la distribution du champ et du potentiel électrique le long de l'isolateur, cela est expliqué par le fait que le

Chapitre III : Simulation des distributions du champ et du potentiel électrique

champ est toujours plus concentré au niveau des électrodes, et des ailettes proches des deux électrodes puis sa valeur se diminue dans les ailettes au milieu.

- Quoi que ce soit la nature du matériau isolant, l'intensité du champ électrique est très faible dans le cas d'isolateur propre et sec et plus grande dans le cas de distribution non-uniforme des gouttes d'eau.

- Le potentiel électrique est très élevé au niveau de l'ailette à proximité de l'électrode HT puis il diminue au fur et à mesure qu'on s'approche de l'électrode terre.

- La présence ou l'absence de la pollution n'a pas un effet sur le niveau du potentiel électrique.

- Indépendamment de la valeur de la conductivité électrique de la solution polluante déposée sur la surface de l'isolateur dans les trois cas de matériaux examinés, nous obtenons les mêmes valeurs de tension et du champ électrique dans chaque cas, donc la conductivité n'a pas une influence significative sur la distribution des deux paramètres examinés.

- La nature du matériau affecte la performance électrique de l'isolateur HT, donc le matériau le plus performant est le matériau superhydrophobe.

Conclusion Générale

Les isolateurs jouent un rôle crucial dans les réseaux électriques, car leur qualité a une incidence directe sur leur fonctionnement. Au fil du temps, l'exposition aux éléments naturels et aux champs électriques puissants peut détériorer les propriétés électriques et mécaniques des isolateurs. Il est essentiel de détecter les isolateurs défectueux et de les remplacer par des isolateurs de haute qualité pour garantir la sécurité des opérations du système électrique.

Les isolateurs réels présentent dans la plupart des cas des handicaps lorsque nous menons des investigations expérimentales, car ils sont entourés par des facteurs limitant tels que les courants de fuite, les décharges partielles et les tests de vieillissement. Par conséquent, un modèle de simulation est développé pour remplacer le prototype d'isolateur. L'utilisation de ce modèle de simulation est très prometteuse, car elle offre une efficacité en termes de temps et de coût par rapport à la méthode expérimentale. Il existe de nombreuses logiciels de simulations qui peuvent être utilisés, et l'une des meilleures logiciels de simulations utilisées dans cette recherche est le COMSOL Multiphysics.

Le but de cette étude est de comprendre le comportement électrique d'isolateur haute tension avec différents types de matériaux dans des conditions sèches et humides. Dans l'objectif de comprendre le mode de répartition du champ électrique et les contraintes de tension impliqués dans l'isolateur extérieur, plusieurs paramètres ont été étudiés, à savoir, le format de l'isolateur, la présence des polluants sur sa surface, le mode de distribution de cette pollution, l'effet de la valeur de la conductivité électrique et la nature du matériau isolant.

Les résultats émanant de cette étude sont résumés dans les points suivants :

- (1) La méthode des éléments finis peut être utilisée pour simuler et calculer la distribution du champ et du potentiel électrique d'isolateurs hydrophile, hydrophobe et superhydrophobe, en service avec et sans pollution déposées sur leurs surfaces.
- (2) La conductivité du film ou bien des gouttes d'eau n'a pas d'effet évident sur la distribution du champ ou bien du potentiel électrique.
- (3) La présence des gouttes d'eau sur les surfaces des isolateurs hydrophobes et superhydrophobes, provoquent une distorsion de la distribution du champ électrique adjacent et une concentration locale des contraintes du champ électrique. La contrainte maximale est obtenue du côté ligne elle peut atteindre une très grande valeur par rapport au côté terre, par contre les valeurs les plus faibles sont obtenues dans la partie médiane.

Conclusion Générale

(4) L'effet de la longueur des ailettes choisi dans cette étude n'a pas une grande influence sur la distribution du champ et du potentiel électrique, mais plutôt, elle peut varier la longueur de fuite de l'isolateur.

(5) La présence des contaminants sur la surface de l'isolateur implique l'augmentation de l'intensité du champ électrique, spécialement le cas de répartition non-uniforme des perles d'eau.

(6) Les couches d'eau qui se trouvent à la surface de l'isolateur donnent naissance à une partie fortement sollicitée à l'extrémité de chaque goutte. Ce sont des sources de décharge électrique au niveau des gouttelettes d'eau qui provoquent une grave dégradation de la surface de l'isolateur hydrophobe et superhydrophobe.

(7) La configuration du champ non uniforme due aux gouttelettes d'eau peut provoquer un allongement des gouttelettes le long du gradient du champ électrique, ce qui peut ultérieurement donner lieu à un canal conducteur continu et donc à un contournement spécialement dans le cas d'un isolateur hydrophobe ou les gouttes d'eau ont un angle de contact plus faible que celui au niveau des gouttes d'eau déposées sur un isolateur superhydrophobe.

Références bibliographique

- [1] **J. Y. Saison**, « Etude du phénomène d'humidification des dépôts naturels et artificiels de pollution sur des isolateurs électriques », Thèse de Doctorat Es Sciences, Université de Strasbourg, France, 1992.
- [2] **M. Tegar, A. Boubakeur**, « Pollution des Isolateurs de Haute Tension », cours de graduation, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2004.
- [3] **M. Terkmani, M. Babouameur**, « Contournement des Isolateurs des Lignes de Haute Tension », Projet de Fin d'Etudes, Département d'électrotechnique, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, Juin 2005.
- [4] **L. Arrabi**, « Visualisation et Traitement de Signal de Courant de Fuite sur une Surface Isolante Polluée », Projet de Fin d'Etudes, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Juin 1999.
- [5] **M. Tegar**, « Modélisation d'Isolateurs Pollués Soumis à Divers Paramètres Electrogéométriques », Thèses de Doctorat d'Etat, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Avril 2004.
- [6] **M. A. R. M. Fernando and S. M. Gubanski**, « Leakage Current Patterns on Contaminated Polymeric Surfaces », IEEE Transaction on Dielectric and Electrical Insulation Vol. 6, No. 5, October 1999.
- [7] **S. Lotfi, S. Djafri**, « Contribution à l'Etude de la Pollution des Isolateurs des Lignes Ariennes de Haute Tension dans la Région de l'Arbaa », Projet de Fin d'Etudes, Département d'Electrotechnique, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger, Juin 1982.
- [8] **S. Guerfi**, « Modélisation des isolateurs de haute tension pollués sous tension continue », Mémoire de Magister, Génie Electrique, Université Abderahmane Mira, Bejaia.
- [9] **M. Soufi, M. Zemirline**, « Conception d'un modèle dynamique de contournement d'un isolateur pollué sous tension alternative 50 Hz », Projet de Fin d'Etudes, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2004.
- [10] **K. Amriche, S. Benayad**, « Modélisation des principales caractéristiques d'un isolateur pollué sous tension continue », Projet de Fin d'Etudes, Département d'Electrotechnique, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger, Juin 2004.
- [11] **A. Mekhaldi**, « Etude des Phénomènes de Conduction et de Décharges Electrique sur les Surfaces Isolantes Polluées sous Tension Alternative à 50 Hz », Thèse de Doctorat d'Etat, Département d'électrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Décembre 1999.
-

Références bibliographique

- [12] **Z. Sahli**, « Etude de la Non Uniformité de la Pollution sur des Caractéristiques de Contournement des Isolateurs Réels Pollués Sous Tension Continue », Thèse de Magister, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Juin 2005.
- [13] **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, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Juin 1990.
- [14] **B. A. Mhamdi**, « Modélisation d'un Isolateur Naturellement Pollué Sous Tension Impulsionnelle Utilisant des Circuits Electriques Equivalents », Mémoire de Magister, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Décembre 2008.
- [15] **A. K. Munjundar, N. Vasudev, K. N. Ravishannakeshava**, « Pollution Test Method of Insulator Under DC Voltage Using Dust Chamber », Ninth International Symposium of High Voltage Engineering, Graz, Autriche, 28 Août- 1 Septembre 1995.
- [16] **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, Alger, Juin 1998.
- [17] **M. D. R. Beasley, J. H. Pickles, L. Beretta, G. d'Amico, M. Fanelli, G. Giuseppetti, M. Morin, J. P. Grégoire, G. Gallet**, « Etude comparative de trois méthodes de calcul automatique du champ électrostatique », RGE, Tome 88, Vol. 1, pp.7-18, Janvier 1979.
- [18] **C. Volât**, « Modélisation physique et numérique par la méthode des éléments finis de frontière de la distribution du potentiel et du champ électrique le long d'un isolateur standard de poste 735 kV recouvert de glace », Thèse de Doctorat en Ingénierie, Département de Génie Electrique, Université du Québec à Chicoutimi, Juin 2002.
- [19] **G. Chavent**, « Méthodes aux différences finies », Technique de l'ingénieur, A550, 1993.
- [20] **K. J. Binns, P. J. Lawrenson**, « Analysis and computation of electric and magnetic field problems », Pergamon Press ltd, 1973.
- [21] **E. Asenjo, N. Morales**, « Low Frequency Complex Fields In Polluted Insulators », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. EI-17, No. 3, pp. 262-267, Juin 1982.
- [22] **G. Dhatt, G. Touzot**, « Une présentation de la méthode des éléments finis » Maloine S. A. Editeur, Paris, 1984.
- [23] **H. Singer, H. Steinbigler, P. Weiss**, « A charge simulation method for the calculation of high voltage field », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Pass 93, pp.1660-1668, Septembre-Octobre 1974.
-

Références bibliographique

- [24] **T. Misaki, H. Tsuboi**, « Computation of 3-Dimensional Eddy Current Problems by Using Boundary Element Method », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. MAG-21, No. 6, pp. 2227-2230, Novembre 1985.
- [25] **A. Skopec, J. G. Wankowicz et B. Sikorski**, « Electric Field Calculation for an Axiallysymmetric Insulator with Surface Contamination », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 1, No.2, pp. 332-339, Avril 1994.
- [26] **T. H. Fawzi, Y. A. Safar**, « Boundary Methods for the Analysis and Design of High Voltage Insulators », Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol 60, issue 3, pp. 134-369, February 1987.
- [27] **T. Zhao, and M. G. Comber**, « Calculation of Electric Field and Potential Distribution along Non-Ceramic Insulators Considering the Effects of Conductors and Transmission Towers», IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 1, pp. 313-318, January 2000.
- [28] **S. Chakravorti, and P. K. Mukherjee**, « Power Frequency and Impulse Field Calculation Around a HV Insulator with Uniform or Non-uniform Surface Pollution », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 28, No. 1, pp. 43-53, February 1993.
- [29] **H. El-Kishky, and R. S. Gorur**, « Electric Potential and Field Computation Along AC HV Insulators », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 1, No. 6, pp. 982-990, December 1994.
- [30] **Z. Aydogmus, M. Cebeci**, «A New Flashover Dynamic Model of Polluted HV Insulators», IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation DEI, Vol. 11, No. 4, pp. 577-584, Aout 2004.
- [31] **M.S.Kamarudin, N.H.Radzi, A. Ponniran, Abd-Rahman**, «Simulation of electric field properties for air breakdown using Comsol Multiphysics», 4th IET Clean Energy and Technology, DOI:10.1049/cp.2016.1298, 2016.
- [32] **Y.Zhangang, L. Hongbin, et all**, «Simulation of electric field around insulators in high voltage line», 5th international conference on electric utility deregulation and restructuring and power technologies, November 26-29, Changsha, China, 2015.
- [33] **Y. HADFI, A. AGGOUNE**, «Simulation 3D du champ électrique sur d'isolateurs HT sous tension continue», Mémoire de Master, Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj, 2022.
- [34] **Y. Zhong, P. ZongRren, C. Li**, «The Influence of Water Drops on the Electric Field Distribution and Electric Erosion of High Voltage Composite Insulators», XIVth International
-

Références bibliographique

Symposium on High Voltage Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, August 25-29, 2005.

[35] **S. Lichun, L. Yanqing, J. Xingliang et al**, «Three-dimensional electric field simulation and flashover path analysis of ice-covered suspension insulators», *High Volt.*, Vol. 5 Iss. 3, pp. 327-333, 2020.



ملخص:

لقد تم تحليل توزيع المجال والجهد الكهربائيين على طول العازل الكهربائي الحقيقي في ظروف التلوث والرطوبة في هذا العمل ; لدراسة تأثير عدة عوامل: شكل العازل, طبيعة المادة العازلة, والموصلية الكهربائية وطريقة توزيع التلوث على سطح هاته العوازل, تم إجراء عمليات المحاكاة على برنامج Comsol Multiphysics 6.1. بعد الحصول على النتائج, يلاحظ أن حالة الرطوبة تؤثر سلبيًا على الأداء الكهربائي للعازل, بغض النظر عن نوع المادة, وطريقة توزيع التلوث, والشكل المختار للعازل. وايضا لم يتم اكتشاف أي تأثير لتغيير قيمة الموصلية الكهربائية. علاوة على ذلك, فإن نتائج بحثنا تساعدنا على تحسين معرفتنا بسلوك العوازل المصنوعة من مواد مختلفة؛ محب للماء، كاره للماء، واكثر كرها للماء.

الكلمات المفتاحية: العوازل ، المجال الكهربائي ، الزجاج ، السيليكون ، مقاوم للماء الخارق, جهد مستمر

Résumé :

L'analyse de la distribution du champ et du potentiel électriques le long d'un isolateur réel dans des conditions de contamination secs et humides a été réalisée dans ce travail. Afin d'examiner les paramètres d'influences ; le format d'isolateur, le matériau isolant, la conductivité électrique et le mode de répartition de pollution, et voir leurs effet sur le comportement électrique de ces isolateurs, des simulations ont été effectuées sur le logiciel Comsol Multiphysics 6.1. D'après les résultats obtenus, il est à noter que l'état humide influe négativement la performance électrique de l'isolateur, indépendamment du type de matériau, mode de distribution de pollution et le profil choisi. Par contre aucune influence n'est détectée après le changement de la valeur de la conductivité électrique. De plus, les résultats de notre recherche nous aide à approfondir nos connaissances sur le comportement des isolateurs de divers matériaux ; hydrophile, hydrophobe et superhydrophobe.

Mots Clés : Isolateur, Champ électrique, Verre, Silicone, Superhydrophobe, tension continue, COMSOL Multiphysics

Abstract :

The analysis of the distribution of electric field and potential along a real insulator under dry and wet contamination's conditions was carried out in this work. In order to examine the influence parameters; the insulator format, the insulating material, the electrical conductivity and the pollution distribution mode, and to see their effect on the electrical behavior of these insulators, simulations were carried out on the Comsol Multiphysics 6.1 software. According to the results obtained, it should be noted that the humid case negatively influences the electrical performance of the insulator, independently of the type of material, pollution distribution's mode and the chosen profile. On the other hand, no influence is detected after the change in the electrical conductivity value. In addition, the results of our research help us to deepen our knowledge on the behavior of insulators of various materials; hydrophilic, hydrophobic and superhydrophobic.

Keywords: Insulators, Electric field, Glass, Silicone, Superhydrophobic, DC voltage, COMSOL Multiphysics