

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

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



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

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

Présenté par
HAMPLAOUI Farouk

Intitulé

**Influence des gouttelettes d'eau polluées sur le
comportement électrique d'un isolateur composite**

Soutenu le : 20 / 06 / 2023 devant le jury composé de :

Dr. Assam ZORIG	Université Mohamed Boudiaf - M'SILA	Président
Dr. Khaled BELHOUCHE	Université Mohamed Boudiaf - M'SILA	Encadreur
Dr. Lyamine OUCHEN	Université Ferhat Abbas – Sétif -1-	Co-Encadreur
Dr. El'hadi BELHITECHE	Université Mohamed Boudiaf - M'SILA	Examinateur

Année universitaire : 2022 / 2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



Remerciements

Je veux tout d'abord' exprimer ma gratitude et mes remerciements à Allah le tout puissant pour la santé, volonté et la patience qu'il m'a donné tout au long de ces années d'études.

Je remercie chaleureusement mon encadreur, Dr. BELHOUCHE Khaled, pour son suivi attentif pendant l'élaboration de ce mémoire et ses précieux conseils.

Je remercie également, Dr. OUCHEN LYAMINE pour son soutien, ses conseils et son aide.

Je suis reconnaissant envers tous les enseignants et le chef de département de Génie électrique qui ont contribué à ma formation.

Je tiens également à remercier les membres du jury qui ont accepté d'évaluer mon travail.

Enfin, je souhaite exprimer ma reconnaissance envers mes amis et collègues pour leur soutien moral. Je tiens à assurer toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réussite de ce travail de mes vifs remerciements.



Dédicaces

Ce modeste travail est dédié à :

Mes chers parents pour leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières durant toute mes années d'études, ainsi que pour tous les sacrifices qu'ils ont faits.

Je tiens également à dédier ce travail à ma femme pour ses encouragements constants et surtout son soutien moral.

Je remercie toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire et j'espère que ce travail sera le fruit de leur soutien infaillible.

Enfin, je suis reconnaissant envers mes collègues et enseignants qui m'ont beaucoup apporté durant cette étude.

Merci d'avoir toujours été là pour moi.



Résumé

L'isolateur composite présente des meilleures performances électriques par rapport aux isolateurs traditionnels. Cependant, la dégradation des isolateurs composites et la difficulté d'en détecter les défauts constituent les principaux inconvénients des isolateurs composites. Dans ce travail, l'influence de gouttelettes de l'eau est étudiée. Nous avons établi une évaluation de la répartition du champ électrique sur un modèle simple d'isolateur composite développé à l'aide du logiciel COMSOL en présentant l'impact de gouttelettes d'eau sur la répartition de champ et du potentiel électrique sur la surface de l'isolateur composite. Les simulations ont été réalisées via la méthode des éléments finis (FEM) en utilisant l'outil informatique COMSOL Multiphysics®. Les résultats de simulation confirment que la présence des gouttelettes à la surface de l'isolateur composite accroît localement le champ électrique. Ce dernier est étudié en fonction de plusieurs paramètres de gouttelettes de l'eau tels que le nombre de gouttes déposées, le potentiel et la conductivité. Les résultats de simulations obtenus confirment que le dépôt de gouttes d'eau augmente significativement l'intensité du champ électrique spécialement dans le cas d'augmentation du nombre de gouttelettes, là où on a marqué une influence considérable sur la distribution de champ électrique et du potentiel sur la surface de l'isolateur, en outre, la conductivité de la goutte d'eau ne n'a pas vraiment un impact significatif sur la distribution du champ électrique le long de l'isolateur. L'analyse ANOVA a été réalisée avec succès et confirme les résultats obtenus par simulation et elle permet une bonne compréhension sur l'interaction et l'impact des paramètres étudiés.

Mots clés : Isolateur Composite, Champ électrique, Gouttelette d'eau, COMSOL Multiphysics, ANOVA.

Abstract

The composite insulator exhibits better electrical performance compared to traditional insulators. However, the degradation of composite insulators and the difficulty in detecting defects are the main disadvantages of composite insulators. In this research, the influence of water droplets is studied. We conducted a study on the distribution of electric field on a simple model of composite insulator developed using COMSOL software, presenting the impact of water droplets on the distribution of field and electric potential on the surface of the composite insulator. The simulations were carried out using finite element method (FEM) with COMSOL Multiphysics® software. The obtained simulation results confirm that the presence of droplets on the surface of the polymeric insulator locally increases the electric field. This is studied as a function of several parameters such as number of deposited droplets, potential, and conductivity. The simulation results show that the presence of water droplets significantly increases the intensity of electric field, especially in cases where there is an increase in number of droplets, which has a considerable influence on the distribution of electric field and potential on the surface of the insulator. Additionally, water droplet conductivity does not have a significant impact on electric field distribution along the insulator. ANOVA analysis was successfully performed and confirms simulation results, providing a good understanding about interaction and impact of studied parameters.

Keywords: Composite Insulator, Electric Field, Water Droplet, Comsol Multiphysics, ANOVA.

ملخص

يظهر العازل المركب أداءً كهربائيًا أفضل بالمقارنة مع العوازل التقليدية. ومع ذلك، تتمثل العيوب الرئيسية للعوازل المركبة في تدهورها وصعوبة اكتشاف هذه العيوب. في هذا العمل، يتم دراسة تأثير قطرات الماء على توزيع المجال الكهربائي على طول العازل المدروس. قمنا بإجراء دراسة حول توزيع المجال الكهربائي على نموذج بسيط للعازل المركب المطور باستخدام برنامج COMSOL ، مقدمًا تأثير قطرات الماء على توزيع المجال والجهد الكهربائي على سطح العازل المركب. تم إجراء المحاكاة باستخدام طريقة العناصر المحدودة (FEM) باستخدام برنامج COMSOL Multiphysics®. تؤكد نتائج المحاكاة أن وجود قطرات الماء على سطح العازل المركب يزيد من شدة المجال الكهربائي محليًا. يتم دراسة هذا كدالة لعدة عوامل مثل عدد القطرات الموزعة والجهد والناقلية. تظهر نتائج المحاكاة أن وجود قطرات الماء يزيد بشكل كبير من شدة المجال الكهربائي، خاصة في الحالات التي يوجد فيها زيادة في عدد القطرات، مما له تأثير كبير على توزيع المجال الكهربائي والجهد على سطح العازل. بالإضافة إلى ذلك، لا تؤثر ناقلية قطرات الماء بشكل كبير على توزيع المجال الكهربائي على طول العازل المركب. تم إجراء تحليل ANOVA بنجاح وتؤكد نتائج المحاكاة، مما يوفر فهمًا جيدًا حول التفاعل وتأثير العوامل المدروسة.

الكلمات الرئيسية: العازل المركب، المجال الكهربائي، قطرات الماء، ANOVA، Comsol Multiphysics.

Table de matières

<i>Remerciements</i>	i
<i>Dédicaces</i>	ii
<i>Résumé</i>	iii
<i>Abstract</i>	iv
<i>ملخص</i>	v
<i>Table des matière</i>	vi
<i>Liste des figures</i>	vii
<i>Liste des tableaux</i>	viii

Chapitre I

Introduction Générale

I.1. Contexte général	9
I.2. Problématique	10
I.2. Objectifs.....	11
I.4. structure de mémoire	12

Chapitre II

Généralités sur les Isolateurs Composites en Haut Tension.

II.1. Introduction	14
II.2. Isolateurs polymériques	15
II.2. Historique des isolateur polymère.....	15
II.3. Structure des isolateurs composites	16
II.4. matériaux composite	17
II.5 Principaux types d'isolateurs composites.....	18
II.4. Evolution d'isolateurs composites en Algérie (en SONELGAZ).....	18
II.5. Contraintes électriques	20
II.6. Conditions d'utilisation.....	21
II.7. Avantages et inconvénients des isolateurs polymères.....	21
II.7.1. Avantage des isolateurs composites	21

II.7.2. Inconvénients des isolateurs en composite	22
II.8. Caractéristiques des surfaces diélectriques polymères	22
II.9. Classification de hydrophobicité.....	24
II.9. Pollution des isolateurs.....	25
II.9.1. Sources et nature de pollution.....	26
II.9.2. Conséquence de pollution	26
II.9.3. Techniques de lutte contre la pollution.....	27
II.10. Vieillessement des isolateurs polymères	27
II.10.1. Les types de vieillessements	28

Chapitre III

Modélisation et simulation tridimensionnelle d'un isolateur recouvert de gouttes d'eau

III.1. Introduction	30
III.2. Procédure de simulation.....	30
III.3. Modélisation d'éléments finis.....	31
III.4. L'outil informatique COMSOL Multiphysics	31
III.4.1. Définition et utilité.....	31
III.4.2. Historique de COMSOL Multiphysics.....	32
III.5. Simulation bidimensionnelle du modèle.....	34
III.5.1. Définition des paramètres de la géométrie	34
III.6. Conditions aux limites.....	35
III.7. Maillage.....	35
III.8. Conclusion.....	36

Chapitre IV

Etude de la Distribution de Champ et du Potentiel Electrique en Présence de Gouttes d'Eau Polluées sur l'Isolateur Composite

IV.1. Introduction.....	38
IV.2. Etude de simulation du champ électrique dans un isolateur composite en présence de gouttelettes d'eau	38
IV.2.1. Isolateur propre (sans gouttes d'eau).....	39
IV.2.2. Isolateur en présence de gouttes d'eau	42
.....	47
IV.3. Méthodologie Des Surfaces De Réponse (M.S.R)	50
IV.3.1. Analyse de Taguchi.....	51

IV.3.2. Méthode de ANOVA.....	53
IV.4. Conclusion	57
Chapitre IV	
Conclusions Générales	
V.1. Conclusions générales	59
<i>Références Bibliographiques</i>	60

Liste des figures

Figure II. 1. Isolateurs composites dans les lignes transmission.....	15
Figure II. 2. Coupe transversale d'un isolateur composite	16
Figure II. 3. Isolateur composé de poste de suspension	18
Figure II. 4. Isolateur de suspension composée	18
Figure II. 5. Utilisation des isolateurs composites en Algérie.....	19
Figure II. 6. Evolution de l'utilisation de chaînes isolatrices composites.....	20
Figure II. 7. Evolution d'installation des chaînes des isolateurs en polymères par rapport à la longueur totale réseau.....	20
Figure II. 8. Représentation l'angle de contact	23
Figure II. 9. Comportement d'une goutte d'eau sur une surface isolante	23
Figure II. 10. Hydrophobicité de silicone	24
Figure II. 11. Classification de hydrophobicité	25
Figure II. 12. Source de pollution.....	26
Figure II. 13. Dégradation des isolateurs composite	28
Figure III. 1. L'interface de logiciel Comsol	32
Figure III. 2. Procédures générales pour les simulations FEM.....	32
Figure III. 3. Structure de la simulation.....	33
Figure III. 4. Configuration du modèle a simulé	34
Figure III. 5. Maillage	35
Figure IV. 1. Structure de l'isolateur composite sans gouttes d'eau et maillage	40
Figure IV. 2. Distribution de lignes équipotentielles le long de l'isolateur composite sans gouttes d'eau.....	40
Figure IV. 3. Evolution du potentiel électrique sur la surface d'isolateur	41
Figure IV. 4. L'intensité du champ électrique sur la surface d'isolateur sans gouttelettes d'eau. .	41
Figure IV. 5. Structure de l'isolateur composite en présence de deux gouttes d'eau	42
Figure IV. 6. Distribution de champ électrique en présence de deux gouttelettes d'eau.....	42
Figure IV. 7. Le potentiel électrique sur la surface d'isolateur	43

Figure IV. 8. L'intensité du champ électrique sur la surface d'isolateur en présence de deux gouttelettes d'eau.....	44
Figure IV. 9. Structure de l'isolateur composite en présence de quatre gouttes d'eau	44
Figure IV. 10. Distribution de champ électrique en présence de quatre gouttelettes	45
Figure IV. 11. L'intensité du champ électrique sur la surface d'isolateur en présence de quatre gouttelettes d'eau avec une tension appliquée = 10kV/cm.	46
Figure IV. 12. L'intensité du champ électrique sur la surface d'isolateur en présence de quatre gouttelettes d'eau avec une tension appliquée = 20kV/cm.	46
Figure IV. 13. L'intensité du champ électrique sur la surface d'isolateur en présence de quatre gouttelettes d'eau avec une tension appliquée = 30kV/cm	47
Figure IV. 14. Structure de l'isolateur composite en présence de six gouttes d'eau	47
Figure IV. 15. Maillage.....	48
Figure IV. 16. Distribution de champ électrique en présence de six gouttelettes d'eau	49
Figure IV. 17. Evolution du potentiel électrique sur la surface d'isolateur	49
Figure IV. 18. L'intensité du champ électrique sur la surface d'isolateur en présence de six gouttelettes d'eau.....	50
Figure IV. 19. Les effets principaux des paramètres U, N et P sur la valeur maximale du champ E	54
Figure IV. 20. Tracés de contour de la variation du champ E par rapport aux paramètres de N ,U et P.	55
Figure IV. 21. Tracés de normalité avec des intervalles de confiance à 95% du champ E maximal.	56
Figure IV. 22. Optimisation de la réponse pour les paramètres étudiés (les valeurs optimales sont en rouge).....	57

Liste des tableaux

Tableau III. 1. Propriété des matériaux utilisés.....	34
Tableau IV. 1. Les cas étudiés	39
Tableau IV. 2. Paramètres et leurs niveaux	52
Tableau IV. 3. Les différents paramètres par Taguchi L9	53

Chapitre I.

Introduction Générale.

Chapitre 01

Introduction Générale

I.1. Contexte général

Les isolateurs à haute tension sont importants pour l'efficacité opérationnelle de sécurité et d'exploitation des réseaux de transport et de distribution de l'énergie électrique, il n'est donc pas surprenant que ces composants doivent répondre aux exigences particulièrement élevées en matière de fiabilité. Les isolateurs mis en service doivent être capable de supporter les contraintes électriques dans leurs conditions ordinaires et anormales d'exploitation que les contraintes environnementales (chaleur, pluie, rayonnements ultraviolets, ...). Un meilleur choix suivi d'un bon dimensionnement des isolateurs s'imposent pour garantir la fiabilité et la qualité de l'isolement au niveau haute tension. Les matériaux isolants sont parmi les facteurs prépondérants dans leur conception, de leur réalisation et de leur exploitation [1]. Les isolateurs en polymère, ou encore isolateurs composites, ont été largement acceptés comme substituts aux isolateurs traditionnels en porcelaine ou en verre à cause de plusieurs avantages qu'ils peuvent offrir [2]. Mais ils sont très sensibles à la présence du champ électrique. Des valeurs élevées de l'intensité du champ électrique mènent en général à la génération de décharges partielles à la surface de l'isolateur. En outre, les contraintes environnementales sévères combinées à ces décharges pourraient conduire au contournement [3]. La présence des gouttes d'eau à la surface des isolateurs en silicone est parfois à l'origine d'interruptions sur les réseaux électriques. En effet, la présence de ces gouttes d'eau entraîne réduction de qualité et des performances électriques des isolateurs et dans ce cas-là, il y aura une possibilité de l'apparition de de contournement. L'intensité de contournement des isolateurs recouverts de ces gouttes d'eau est nettement inférieure à celle des isolateurs propres. Les isolateurs à haute tension sont importants pour l'efficacité opérationnelle de sécurité et d'exploitation des réseaux de transport d'énergie, il n'est donc pas surprenant que ces composants doivent répondre aux exigences particulièrement élevées en matière de fiabilité. Deux principaux types d'isolateurs peuvent être distingués, isolateurs de conception classique en porcelaine et isolateurs capot à tige en verre.

Durant ces dernières années les isolateurs composites sont menés un grand intérêt dans le domaine des réseaux électrique à haute tension. Au cours de ces dernières décennies, les isolateurs composites ont commencé à se propager dans les services publics d'électricité du monde entier en remplacement de la céramique traditionnelle Les isolateurs polymères (composites) offrent de nombreux avantages tels que : poids, facilité de manipulation, faibles coûts d'exploitation et de maintenance, excellente électrique performances dans des environnements modérément à fortement pollués Matériau en Polymère, tel que la silicone, démontre une forte hydrophobicité. Cette propriété unique aide à minimiser le courant de fuite et la probabilité de formation de bandes sèches [4].

I.2. Problématique

La surface hydrophobe des isolateurs polymères offre un avantage significatif par rapport au verre ou à la porcelaine cependant, dans des conditions ambiantes services la formation de bandes sèches n'est pas totalement éliminée, en particulier avant que la récupération hydrophobe puisse de produire dans la couche de pollution superposée. l'environnement de service extérieur consiste en une humidité sous forme de brouillard, pluie, de rosée et d'embruns direct :les polluants de la mer et des routes qui sont salées dans les climats froids :et aussi des produits chimiques de l'industrie.de pluies ,les bâtiers d'isolateurs sont soumis à des températures extrêmes dans les ultraviolets (UV) les température extrême les surtensions dues aux surtension de commutation et de foudre ,et les charges mécaniques dues au vent et à la glace. Contrairement à la porcelaine et au verre, les matériaux polymères ont des liaisons chimique faibles qui peuvent se dégrader considérablement avec le temps et ils sont plus sensibles à la dégradation chimique sous les multiples contraintes susceptibles d'être rencontrées en services.de plus, ils souffrent de fissures de craquelures d'érosion et de cheminement, de plus leur espérance de vie est difficile à évaluer. Les modifications des propriétés de surface influencées par le service et les conditions climatiques peuvent éventuellement conduire à une perte d'hydrophobicité de surface, favorisant ainsi la formation d'un film conducteur continu sur sa surface .Le courant de fuite résultant sous la tension du système génère un échauffement résistif qui évapore l'eau des surfaces d'eau, risquant la génération de bandes sèches. L'un des principaux facteurs contribuant au développement des décharges sur les surfaces de l'isolateur est la distribution du champ électrique sur la surface de l'isolateur ,qui contrôle la densité de courant. Le profil de champ

électrique est généralement non uniforme le long de la surface de l'isolateur avant les régions de pic dans lesquelles des bandes sèches se forment provoquent par la suite des activités de couronne et de décharge qui contribuent considérablement à la dégradation de la surface par suivi par une érosion dans des conditions extrêmes et cela provoque une défaillance de l'isolation due à une détérioration grave.

I.2. Objectifs

La performance de la silicone se diffère avec d'autres matériaux isolants par la façon de l'eau qui mouille leur surface. Elle se présente sous forme de gouttes discrètes sur la silicone rubber, et le mécanisme de contournement est dû à la ventilation de l'air entre les gouttes d'eau et la déformation de ces gouttes dans la direction du champ électrique qui conduisent à la dégradation de l'isolation et l'échec. Plusieurs techniques expérimentales et de simulation ont été menées pour évaluer la dégradation de surface due aux activités de décharge, à l'arc à bande sèche et au champ électrique élevé. Des simulations du champ électrique à la surface des isolateurs sont destinées à déterminer les zones de fortes contraintes à la surface de l'isolateur. L'objectif de ce mémoire est théorique (simulation), il vise à étudier l'influence des gouttes d'eau sur l'intensité de contournement d'une surface en silicone hydrophobe à champ non uniforme mise sous tension. L'effet des gouttes d'eau est étudié en fonction de plusieurs paramètres tel que le Volume des gouttes d'eau, la conductivité de l'eau, et le nombre des gouttes sur la tension de contournement, Géométrie des électrodes (pointe - plan), Position et largeur de la bande sèche par rapport aux électrodes, horizontale de l'isolation recouverte de gouttes d'eau à nombre, volume et conductivité électrique variables. Un outil informatique disponible dans le commerce (COMSOL Multiphysics) basé sur le FEM est utilisé pour la modélisation et simulations. Ces dernières évaluent l'influence de la présence et la déformation des gouttes d'eau sur le champ électrique, les activités de la décharge électrique et les dégradations de surface. Pour évaluer la distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite de l'isolateur le logiciel COMSOL Multiphysics a été utilisé ainsi que pour identifier les principales régions de champ critique.

I.4. structure de mémoire

Le présent mémoire est rédigé autour de cinq chapitres.

Chapitre 01 : est une explication d'une problématique liée aux isolateurs et l'objectif et la structure générale de ce mémoire.

Chapitre 02 est consacré à une revue de littérature sur les isolateurs polymère dans lequel, on a décrit leur structure, les phénomènes de vieillissement causé par la présence des gouttelettes d'eau sur leurs surfaces.

Chapitre 03 : présente une étude de répartition de champ et tension électrique en présence des gouttelettes d'eau polluées sur l'isolateur composite.

Chapitre 04 : a pour objet consacré de réaliser des simulations bidimensionnelles d'un isolateur polymère en présence des gouttes d'eau à l'aide d'un logiciel COMSOL Multiphysics

Chapitre 05 : présente les conclusions générales soulignant les principaux résultats obtenus.

Chapitre II

**Généralités sur les Isolateurs Composites
en Haut Tension**

Chapitre 02

Généralités sur les Isolateurs Composites en Haut Tension.

II.1. Introduction

La pollution des isolateurs des lignes électriques aériennes et des postes des réseaux de transport d'énergie électrique constitue un véritable problème. Elle est considérée comme l'un des facteurs qui influe sur la qualité et la fiabilité du transport et de distribution d'énergie électrique. Des couches de pollution peuvent se déposer sur les isolateurs à hautes tensions, elles proviennent de l'atmosphère et de l'environnement. En présence de circonstances favorables (rosée de matin, pluie, brouillard..), la couche de pollution s'humidifie et devient conductrice. Par conséquent, il y aura un changement remarquable dans la répartition du potentiel et sera la possibilité de l'apparition d'arcs de contournement. [3,4]. Ces derniers peuvent se développer en provoquant un contournement total sur la surface de l'isolateur. Ce phénomène provoque une dégradation et une détérioration de la surface. Face aux problèmes liés à la pollution, un isolateur à haute tension doit répondre aux exigences et doit avoir de bonnes caractéristiques pour arriver à supporter les différentes contraintes en fonction de l'environnement dans lequel il est utilisé [5]. Les isolateurs aériens sont parmi les composantes les plus importantes des réseaux aériens électrique car ils assurent et garantissent à la fois le support mécanique des parties portées à la haute tension et l'isolation électrique avec les régions mises à la terre. A travers les années, les premières conçus sont en verre et en céramique Les isolateurs sont parmi les composantes les plus importantes des réseaux aériens de transport, durant ces dernières années les isolateurs composites ont acquis une grande importance dans le domaine des réseaux de transport d'énergie électrique haute tension. Les isolateurs polymères des lignes électriques aériennes ont été largement utilisés durant les dernières années en raison de leur très forte résistance à la contamination, leur résistance mécanique et leur très bonne hydrophobicité.

Dans cette partie, des généralités sur les isolateurs à haute tension ont été présentés.

II.2. Isolateurs polymériques

Les isolateurs composites sont un type spécial de contrôle de l'isolation pouvant jouer un rôle primordial dans les lignes de transmission aériennes. Les isolateurs composites sont également nommés: isolateurs synthétiques, isolateurs non en porcelaine, isolateurs en polymère, isolateurs en caoutchouc, etc. La structure principale est généralement composée d'une jupe de foule, d'une tige centrale en FRP et d'un raccord d'extrémité.

La jupe de foule est généralement constituée de matériaux synthétiques organiques, tels que le caoutchouc éthylène propylène, le caoutchouc de silicone vulcanisé à haute température,...etc.

Les mandrins FRP sont généralement constitués de fibre de verre comme matériau de renforcement et d'une résine oxydante comme matériau de base, Les raccords d'extrémité sont généralement formés à partir d'acier au carbone ou d'acier de construction au carbone revêtu de zinc-aluminium à chaud.



Figure II. 1. Isolateurs composites dans les lignes transmission.

II.2. Historique des isolateur polymère

Dans les années 1950, Rebosio a créé une des premières entreprises en Europe en introduisant le Téflon pour la production d'isolateurs, comme une alternative à la céramique et au verre.

Les années 60 et 70 ont vu d'énormes investissements en recherche et développement pour améliorer le matériel, venant ensuite aux années 80 avec la standardisation de la matière première: SILICONE HCR / LSR. Ces deux options subissent un processus de vulcanisation à haute température (HTV). Au cours de la même période, Isoélectrique a également introduit l'utilisation de la silicone pour la production d'isolateurs, alors que le traitement de la résine époxy a commencé au début des années 1970, avec l'ouverture du siège Isoélectrique lui-même

II.3. Structure des isolateurs composites

Le principe de composition des isolateurs polymères c'est la combinaison de plusieurs composants qui peuvent répondre aux différentes exigences grâce à la combinaison de leurs caractéristiques spécifiques. La structure générale d'un isolateur composite est composée d'une partie isolante correspondante à un noyau interne d'un matériau approprié et d'un revêtement extérieur et enfin d'une partie métallique solidaire au noyau. La figure II.2 illustre les détails de la structure d'un isolateur composite

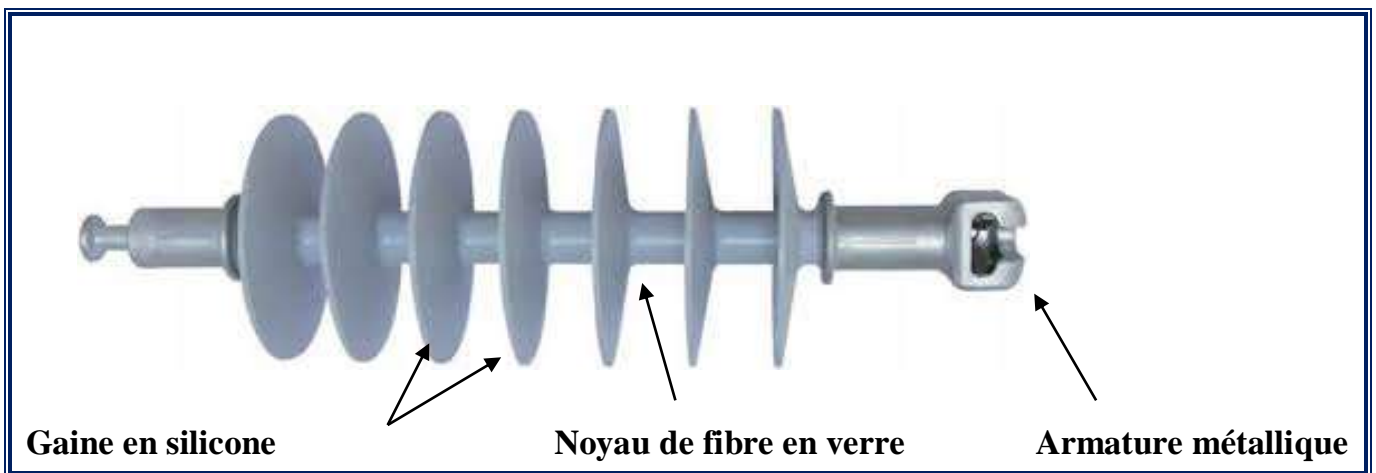


Figure II. 2. Coupe transversale d'un isolateur composite

Un isolateur polymère est composé de :

a) : **une partie isolante** qui consiste en un noyau interne d'un matériau isolant– approprié et d'un revêtement extérieur;

une partie métallique solidaire du noyau et qui sert à lui transmettre la charge– mécanique en assurant fixation à une charpente, à un conducteur, à une partie d'un équipement ou à un autre isolateur. Les isolateurs pour réseau 225kV, doivent être munis d'anneaux de répartition de potentiel.

b) Le noyau: Le noyau est la partie isolante interne de l'isolateur conçu pour garantir la charge mécanique mise en jeu à travers la ligne. Il est fait de fibres de verre disposé dans une matrice à base de résine, de façon à obtenir la tenue max.

c) Revêtement et jupes : Le revêtement est la partie isolante extérieure de l'isolateur, il doit être en matière synthétique à base de silicone ou en EPDM ; il permet d'assurer la ligne de fuite nécessaire et protège le noyau des intempéries. [6]. Le noyau doit être constitué de fibres de verre orientées et imprégnées de résine. Le revêtement doit être en silicone ou EPDM et résister aux agents extérieurs.

d) Armatures métalliques d'un isolateur composite :

Les armatures métalliques sont installées et fixées aux deux extrémités du noyau pour permet de transmettre les charges mécaniques. Parmi les matériaux les plus utilisés sont :

- ✓ la fonte,
- ✓ l'aluminium forgé ou usiné,
- ✓ le fer et l'acier forgé.

La forme des pièces d'accrochage constitue un facteur important dans la limitation des décharges couronnes qui entraînent une dégradation prématurée de l'enveloppe de l'isolateur.

II.4. matériaux composite

Les matériaux composites sont des mélanges hétérogènes d'au moins deux composants, qui ne sont pas miscibles mais qui ont une forte capacité d'interpénétration et d'adhésion. Les propriétés mécaniques de ces composants se complètent pour créer un nouveau matériau avec des avantages que les composants individuels n'ont pas. Bien que le terme "composite" soit relativement récent, ces matériaux ont été utilisés depuis l'Antiquité, comme le torchis pour la construction de bâtiments. Il existe également des composites naturels tels que l'os et le bois. L'utilisation croissante des matériaux composites dans de nombreux secteurs industriels s'explique par leur capacité à améliorer la qualité de la matière pour une utilisation spécifique, telle que la légèreté ou la rigidité mécanique. Au XXe siècle, le développement de l'informatique a permis un calcul précis des propriétés mécaniques, ce qui a conduit à une explosion de l'utilisation de ces matériaux artificiels. Cependant, en raison de la non-homogénéité du matériau, la description fine des composites reste complexe du point de vue

mécanique. Un matériau composite est constitué d'une matrice, d'un renfort et éventuellement d'une charge et/ou d'un additif. Par exemple, le béton armé est un composite béton + armature en acier et le composite fibre de verre + résine polyester est également un exemple courant..

II.5. Les Principaux types d'isolateurs composites

On peut identifier deux types d'isolateurs composites couramment utilisés dans l'industrie de l'énergie :

a) Isolateur composé de poste de suspension est illustré à la figure II.3, il est utilisé sur les sous- stations et les centrales électrique.

b) Isolateur de suspension est illustré dans la figure II.4, il est utilisé dans les lignes de transmission et de distribution haute tension et pour systèmes BT, MT et HT



Figure II. 4. Isolateur de suspension composée



Figure II. 3. Isolateur composé de poste de suspension

Un isolateur composite est déterminé par les propriétés suivantes

- Tension assignée.
- Tension assignée de tenue à choc de foudre et à fréquence industrielle sous pluie.
- Charge mécanique spécifiée
- Longueur minimale nominale de ligne de fuite;
- Pas entre les ailettes.

II.4. Evolution d'isolateurs composites en Algérie (en SONEGAS)



Figure II. 5. Utilisation des isolateurs composites en Algérie.

L'utilisation des isolateurs polymères sur les lignes transmission haute tension en Algérie ont commencé à partir l'année 2000. Les figures II.6 et II.7 représentent respectivement l'évolution d'utilisation des chaînes des isolateurs en composite et l'évolution d'installation des chaînes des isolateurs en polymères par rapport à la longueur totale du réseau. En 2000, a été installé à titre d'essai de 330 chaînes isolantes en silicone de type EPDM sur des tronçons de 4 lignes. En 2002, installation de 4400 chaînes isolantes en EPDM sur des tronçons de 12 lignes (09 lignes 220 kV et 03 lignes 60 kV) soumises à des actes de vandalisme, traversant des zones très polluées et lignes sous isolées. Mais dans les années 2006 et 2007, le montant de l'installation a diminué, atteignant en 2006 à 1704 chaînes isolantes en silicone sur des tronçons de 9 lignes 220 kV pour les mêmes raisons et 1312 chaînes isolantes en siliconé sur des tronçons de 12 lignes (10 lignes 220 kV et 02 lignes 60 kV) en 2007. En 2008, il y eu retour de nouveau à l'augmentations de l'installation, atteignant 3801 chaînes isolantes en silicone sur des tronçons de 29 lignes (26 lignes 220 kV et 3 lignes 60 kV). Dans la figure 2.2 il est à souligner que le pourcentage de l'installation des chaînes isolantes en polymères est très faible (5%) par rapport à la longueur totale du réseau.

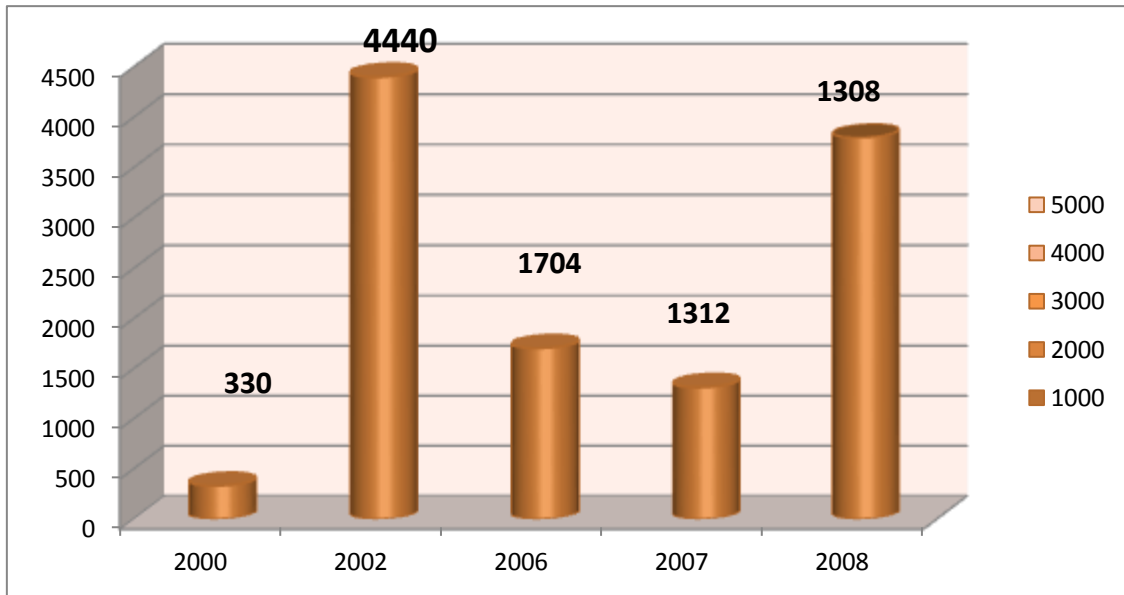


Figure II. 6. Evolution de l'utilisation de chaînes isolatrices composites.

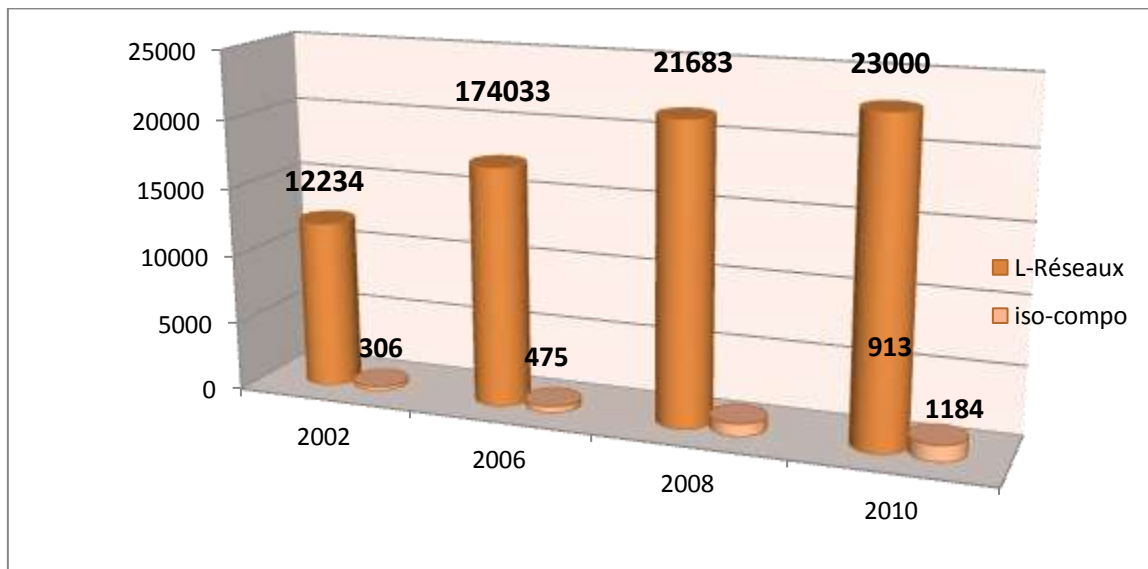


Figure II. 7. Evolution d'installation des chaînes des isolateurs en polymères par rapport à la longueur totale du réseau

II.5. Contraintes électriques [8,9]

La contrainte électrique est un type important influençant les performances des isolateurs , et elle se résume en :

- a) **Tension de service** : C'est la tension normale que supporte l'isolateur.
- b) **Décharge disruptive** : phénomène associé à une défaillance de l'isolateur sous l'effet de la contrainte électrique, avec chute de tension et passage d'un courant entraînent une perte

permanente de la rigidité diélectrique ;

c) Tension de contournement (à sec et sous pluies) : C'est la plus faible tension produisant un amorçage entre conducteurs et la masse.

d) Surtension accidentelles : Elles sont de brève durée pouvant être à l'origine d'un orage ou d'un régime transitoire.

II.6. Conditions d'utilisation

Les intervalles de températures qu'un isolateur installé à l'extérieur doit supporter sont entre 5°C et +55°C et doit être insensible à la pluie et aux effets de la condensation, et même les changements rapides de température et du rayonnement solaire.

II.7. Avantages et inconvénients des isolateurs polymères

Les avantages et les inconvénients des isolateurs polymères à haute tension sont importants pour comprendre les applications et les développements des isolateurs électriques et aussi les isolateurs polymères de lignes de transmission offrent des avantages importants par rapport aux isolateurs en porcelaine et en verre spéciaux dans les lignes de transmission ultra haute tension. Grâce aux nombreux avantages des isolateurs composites par rapport aux isolateurs classiques, l'application des premiers est en augmentation dans le monde entier.

II.7.1. Avantage des isolateurs composites [9]

L'utilisation des isolateurs composites connaît une large répartition dans le monde. Les raisons de cet intérêt varient entre les fournisseurs d'énergie électrique, mais on peut citer les plus répondues:

- **Poids réduit** (jusqu'à 80% par rapport aux types traditionnels). Cela se traduit par une conception plus
- **Économique** (plus légère) des pylônes et évite également la nécessité d'utiliser des grues lourdes pour leur installation, économisant ainsi le coût ;
- **L'énergie de surface** faible de l'isolateur polymère peut être continuellement hydrofuges (hydrophobe)
- **La capacité de tension de tenue** de l'isolateur polymère est comparable ou meilleure que celle des isolateurs en porcelaine et en verre. Avec une distance d'arc à sec inférieure de 30% par rapport aux conceptions de porcelaine standard à 230 kV,

L'utilisation d'isolateurs composites réduit les coûts d'entretien, comme le lavage de l'isolateur qui est souvent requis pour les isolateurs en céramique et en verre.

- Profil des ailettes de forme aérodynamique et présentant une ligne de fuite suffisante : 31 à 68 % supérieure par rapport à une chaîne équivalente en verre trempé.
- Facilité de manutention.
- Rapidité d'installation.

II.7.2. Inconvénients des isolateurs en composite

Les principaux inconvénients des isolateurs polymères composites sont:

- Les isolateurs polymères de nature organique sont plus sensibles.
- L'isolateur polymère est la couronne qui est causée par des champs électriques élevés sur la surface de l'isolateur.
- Fiabilité à long terme est inconnue, aussi l'espérance et la vie des isolateurs de polymère
- Difficulté de localiser les défauts.
- Les oiseaux picorant le caoutchouc et le rendant inutile sont un gros inconvénient des isolateurs polymères.
- Remplacement de toute la chaîne d'isolateurs en cas d'anomalie;
- Non possibilité d'intervention en sous tension.

II.8. Caractéristiques des surfaces diélectriques polymères

Les polymères sont identifiés par les caractéristiques suivantes :

a) Angle de contact et Energie de surface et des gouttes d'eau

Une faible énergie de surface, ou une tension de surface, est une autre caractéristique clef des polysiloxanes [9]. Une indication de l'énergie libre de la surface peut être obtenue en mesurant l'angle de contact d'une goutte d'eau sur la surface d'un matériau solide comme le montre la figure II.9 à partir de [10]. Mesurer l'angle de contact permet de diminuer le caractère hydrophobe comme le grand angle et la faible énergie de surface ou hydrophile (petit angle, grande énergie de surface) de la surface [11].

Les phénomènes de mouillage se produisent à des endroits où les trois états de "solide", "liquide" et "gazeux" sont en contact. La relation entre les différentes tensions superficielles et

l'angle de contact a été donnée par Young en 1805 [10] en tant qu'équation:

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{sg} - \gamma_{lg}}{\gamma_{sl}}$$

La tension inter-faciale solide-liquide : γ_{SL}
 La tension inter-faciale solide-vapeur : γ_{SG} ;
 La tension inter-faciale liquide-vapeur : γ_{LG} ;
 Angle de contact : θ_c

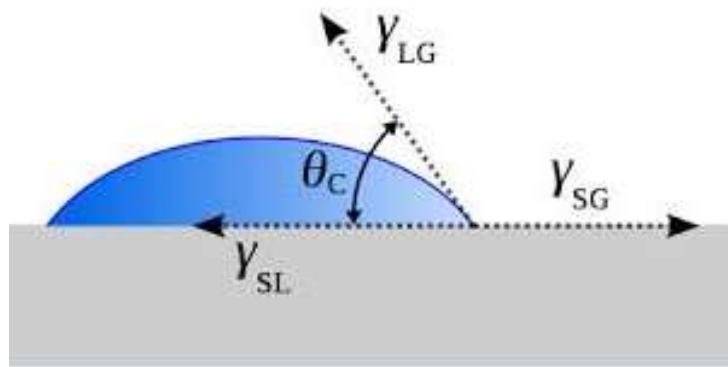


Figure II. 8. Représentation l'angle de contact

Grand angle de contact

petite angle de contact

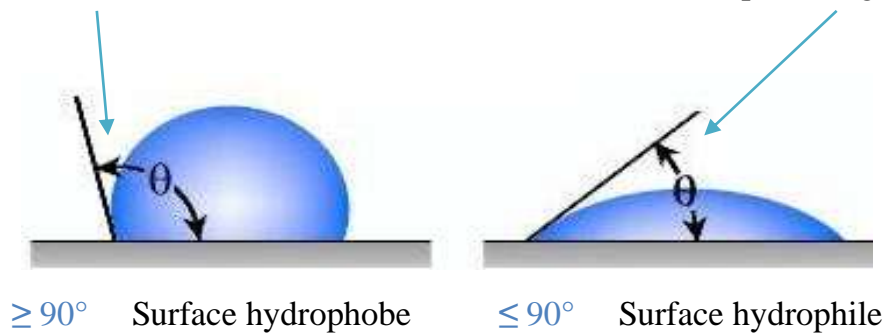


Figure II. 9. Comportement d'une goutte d'eau sur une surface isolant

Il est important de mentionner que l'équation de Young n'est valable que pour des surfaces idéales et lisses [11]. Un angle de contact inférieur à 90° indique que le fluide se répandra sur une grande surface sur la surface ($\theta \le 90^\circ$ la surface est hydrophile); alors que les angles de contact supérieurs à 90° signifient généralement que le fluide minimisera son contact avec la

surface et formera une goutte liquide compacte ($\Theta > 90^\circ$ la surface est hydrophobe) [12] figure II.8.

b) : Hydrophobicité des isolateurs composites

Une surface hydrophobe est importante pour les isolations hautes tensions. Sur la base de la définition dans IEC62073 [13], les mots l'hydrophobie et l'hydrophile sont appelés respectivement à un niveau faible et à un niveau élevé de mouillabilité.



Figure II. 10. Hydrophobicité de silicone

II.9. Classification de hydrophobicité

<p>1-Les Goutte formées décrète $\Theta \approx 80^\circ$ ou plus pour La majorité des gouttes</p>	<p>2-Les Goutte formées décrète $50^\circ < \Theta < 80^\circ$ ou plus pour la majorité des gouttes</p>

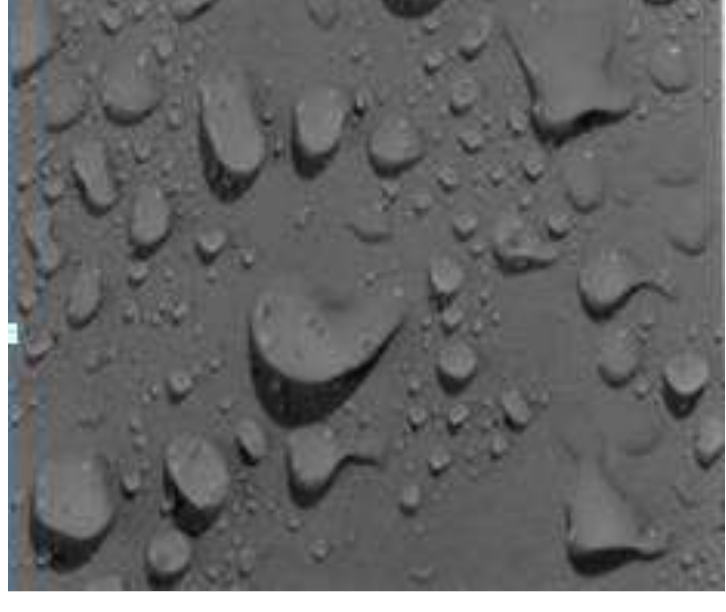
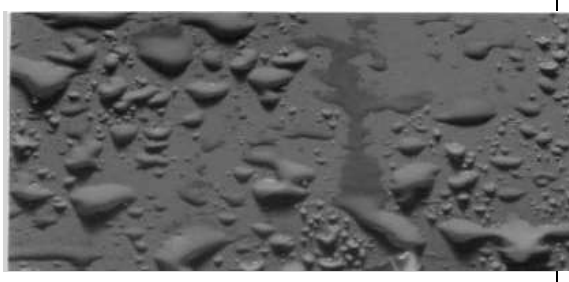
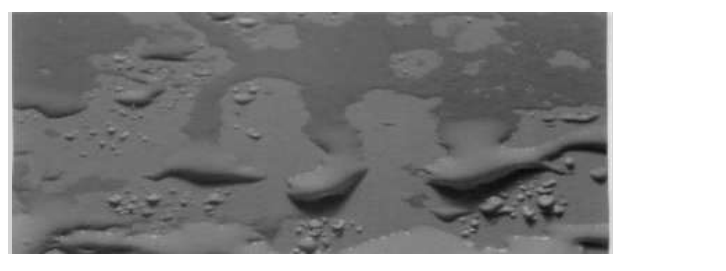
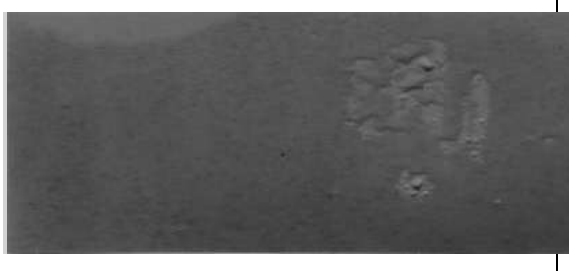

	
<p>3- Habituellement, ils ne sont plus circulaires.</p>	<p>4- sont observées des gouttes discrètes et des traces mouillées provenant des canaux d'eau. Zone complètement mouillée $< \text{cm}^2$, en se provenant des canaux, ils couvrent $< 90\%$ de la zone d'essais.</p>
	
<p>5- Certaines zones complètement mouillées $< \text{cm}^2$, qui couvrent $< 90\%$ de la zone d'essai.</p>	<p>6- Les zones mouillées couvrent $> 90\%$</p>
	
<p>7-Film d'eau continue sur toute la zone testée</p>	

Figure II. 11. Classification de l'hydrophobicité

II.9. La Pollution des isolateurs

La pollution des isolateurs des lignes électriques aériennes constitue un véritable problème. Elle est considérée comme l'un des facteurs qui influe sur la qualité et la fiabilité du transport et de distribution d'énergie électrique. Des couches de pollution proviennent de l'atmosphère peuvent se déposer sur les isolateurs et qui deviennent conductrices en présence de

circonstances favorables. Par conséquent, il y aura un changement remarquable dans la répartition du potentiel suivi de l'apparition d'arcs de contournement.

II.9.1. Sources et nature de pollution

La pollution peut être des particules solides qui se circulent dans l'environnement et qui s'installent sur la surface de l'isolateur. Cette pollution constitue une véritable problématique. Elle est classée quantitativement et qualitativement par les chercheurs afin de comprendre son comportement. La pollution se diffère d'une zone géographique à une autre et elle dépend de climat. Les types de pollution atmosphérique les plus observés peuvent être déterminés selon leur origine.

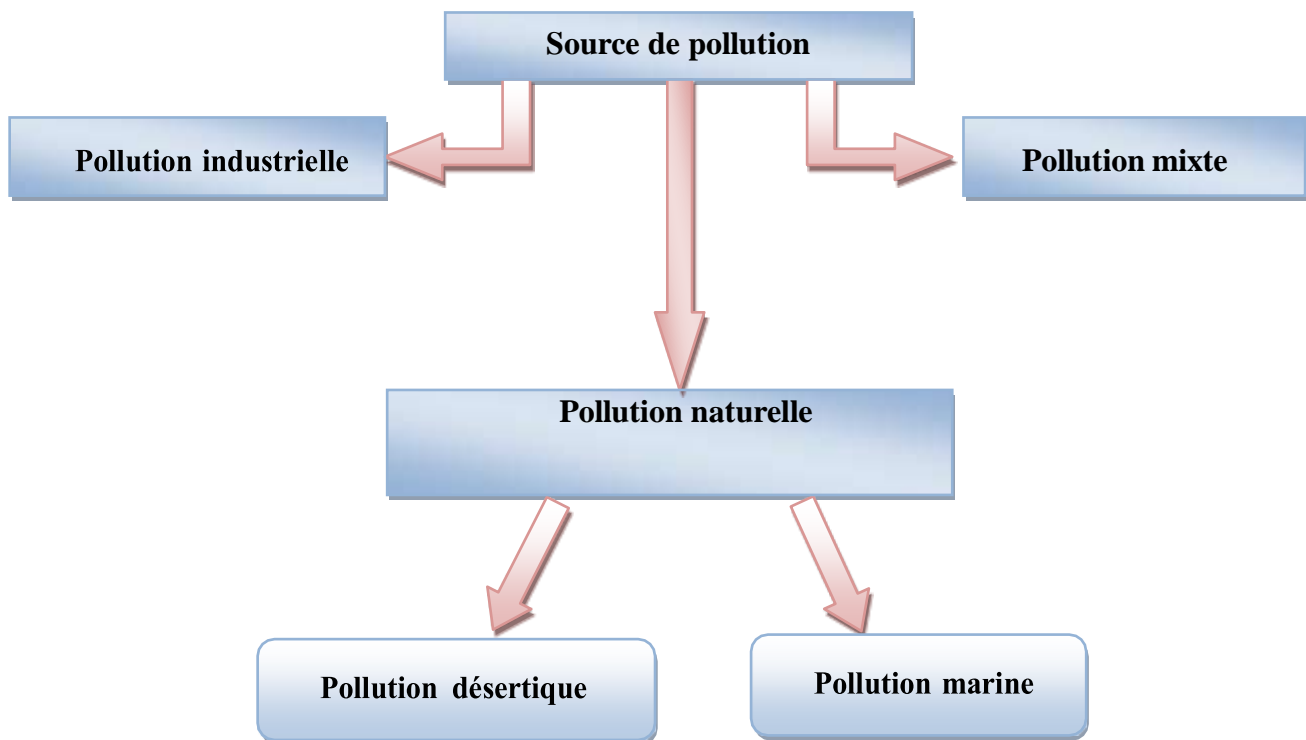


Figure II. 12. Source de pollution

II.9.2. Conséquence de pollution

Quand un dépôt de pollution sèche recouvert sur la surface d'un isolateur composite, une présence d'un faible courant capacitif circule, donc crée de très faible valeur de conductivités volumique, on obtient ainsi que répartition électrostatique du potentiel électrostatique et de

notre cas lorsque la couche de pollution est humide elle devient un cadre d'un courant conducteur de valeur importante.

II.9.3. Techniques de lutte contre la pollution

Plusieurs techniques sont employées :

- Rallonger la ligne de fuite par un changement de type d'isolateur: elle est considérée comme une technique coûteuse et difficile à réaliser au terrain.
- L'utilisation de matériaux polymères au prolonger de ligne de fuite, qui sont collés sur la surface des isolateurs déjà existants [14].
- Utilisation des isolateurs auto-nettoyables:
 - ⇒ L'utilisation d'isolateurs plats conduit à la diminution de la ligne de fuite des isolateurs. En effet, ces derniers sans nervures ont la propriété d'accumuler moins de pollution que les isolateurs traditionnels et s'auto nettoient très bien sous l'effet du vent. Ils sont principalement
- Graissage des isolateurs : Grâce à ses propriétés hydrophobes, le graissage protège temporairement les isolateurs. La longévité du graissage dépend à la fois de l'environnement (pollution, conditions climatiques) et de la qualité intrinsèque du produit. Elle est généralement comprise entre 1 et 4 ans. l'utilisation de graissage est très utilisée dans le monde, mais le processus de nettoyage puis de graissage est pénible, longue et coûteuse. Elle nécessite, par ailleurs, une interruption de service [15]
- Application de Revêtements à base de silicones

Cette technique est basée sur à l'application d'un caoutchouc de silicone vulcanisant à une température ambiante à la surface de l'isolateur par pulvérisation ou au pinceau. Pareil pour la lubrification, l'application de ce revêtement améliore et protège leur comportement en cas de contamination grâce à leurs propriétés hydrophobes. D'une autre part, sa durée de vie est généralement nettement meilleure que celle des lubrifiants [16].

II.10. Vieillessement des isolateurs polymères

Le vieillissement des isolateurs composites est connu par une dégradation et une détérioration

des propriétés mécaniques et électriques. On cite : la diminution de la résistivité et l'augmentation des pertes diélectriques. [17].

II.10.1. Les types de vieillissements

- Le vieillissement thermique : concerné longue durée de haute température sur le matériel diélectrique.
- Le vieillissement électro-chimique : sa cause est l'apparition de phénomène d'électrolyse qui aura lieu dans le diélectrique.
- Le vieillissement électrique : comme l'ionisation et décharges partielles résultant des décharges sur la surface et dans les cavités gazeuses enfermées dans les diélectriques.



Figure II. 13. Dégradation des isolateurs composite

II.11. Conclusion

Dans ce chapitre on a fait une description des isolateurs composites. Les caractéristiques des surfaces polymériques présentées montre l'intérêt de l'intégration des isolateurs en polymère dans les systèmes de l'énergie électrique. L'hydrophobicité est la principale propriété de ces surfaces et le processus de perte et de recouvrement de l'hydrophobicité reste un problème complexe. Ce processus conduit la plupart du temps au vieillissement prématuré des isolateurs composites, surtout en présence des contraintes environnementales et électriques qui accentuent ce phénomène.

Chapitre III

Modélisation et simulation

tridimensionnelle d'un isolateur recouvert
de gouttes d'eau

Chapitre 03

Modélisation et simulation tridimensionnelle d'un isolateur Recouvert de gouttes d'eau

III.1. Introduction

Les performances d'un diélectrique dépendent fortement de la répartition du champ électrique et de sa contrainte électrique. Pour cette raison, la détermination du champ électrique est importante pour prédire les régions à forte contrainte sur la surface de l'isolateur. Les recherches récentes sur la défaillance de l'isolateur polymère montrent que le vieillissement et la dégradation de l'isolateur ont été causés par une valeur de champ électrique un peu élevé. Le dépôt des gouttelettes de l'eau sur la surface des isolants en silicone peut être l'origine d'interruptions sur les réseaux électriques car, la présence de ces particules peut réduire la fiabilité et les performances électriques des isolateurs et peut même arriver, dans certains cas et en présence de conditions favorables, à l'apparition de phénomène de contournement. On note que l'intensité de contournement des isolateurs recouverts de gouttelettes va être inférieure à celle remarqué sur des isolateurs propres. La mesure des champs électriques autour des isolateurs pratiques est difficile et devient de plus en plus compliquée dans des conditions de surface polluées. Dans ce chapitre, nous combinons la méthode FEM avec la méthode d'analyse ANOVA pour étudier et décrire le comportement des isolateurs POLYM7RES en présence de gouttelettes d'eau polluées. Tout d'abord, un modèle FEM 3D de l'isolateur a été développé via le logiciel Comsol Multiphysics. Ce logiciel se base sur la méthode des éléments finis. Nous simulons plusieurs cas de figures. Après, la géométrie des éléments triangulaires avec un maillage raffiné autour des électrodes et au voisinage des gouttelettes d'eau ont été adopté.

III.2. Procédure de simulation

Pour étudier l'impact d'une goutte d'eau sur la répartition du champ et la tension électrique, un modèle de simulation via la technique des éléments finis (MEF), a été créé utilisant COMSOL Multiphysics. Plusieurs facteurs influençant la répartition du champ et de la tension électrique ont été étudiés. Parmi ces facteurs nous citons:

- Le volume de la goutte.
- Conductivité et permittivité de la goutte.
- Nombre de la goutte.

III.3. Modélisation d'éléments finis

Les modélisations associées aux modèles numériques ont été effectuées en utilisant le logiciel COMSOL Multiphysics qui est basé sur les éléments finis. La simulation est réalisée en trois étapes consécutives à savoir, les étapes de prétraitement, de résolution et de post- traitement (Visualisations des résultats). Les composants du problème physique tels que la structure géométrique, les propriétés matérielles et conditions aux limites, et les critères de maillage sont présentés comme des entrées dans l'étape de prétraitement. Le modèle mathématique, normalement exprimé sous forme d'équations différentielles qui décrivent le problème physique, est exécuté dans l'étape de résolution. Enfin, dans la phase de post-traitement, le logiciel permet aux utilisateurs de générer un graphique des variables ou paramètres de post-traitement souhaités.

III.4. L'outils informatique COMSOL Multiphysics

III.4.1. Définition et utilité

Utilisé le logiciel une approche de modélisation par éléments finis qui permet de discrétiser un domaine en éléments finis et de résoudre les équations mathématiques qui modélisent les phénomènes physiques, le COMSOL multiphysic permet de modéliser des systèmes complexes avec des géométries et des matériaux, des conditions aux limites et des conditions variées [20]. Le logiciel est utilisé dans de plusieurs domaines de la recherche, de l'industrie et bien sûr de enseignement, tels que l'aéronautique, l'automobile, l'énergie, l'électronique, la bio-ingénierie, la médecine...etc.il permet aux ingénieurs et aux scientifiques de recevoir, d'optimiser et de valider des produits, des procédés et des systèmes avant leur mise et leur utilities.

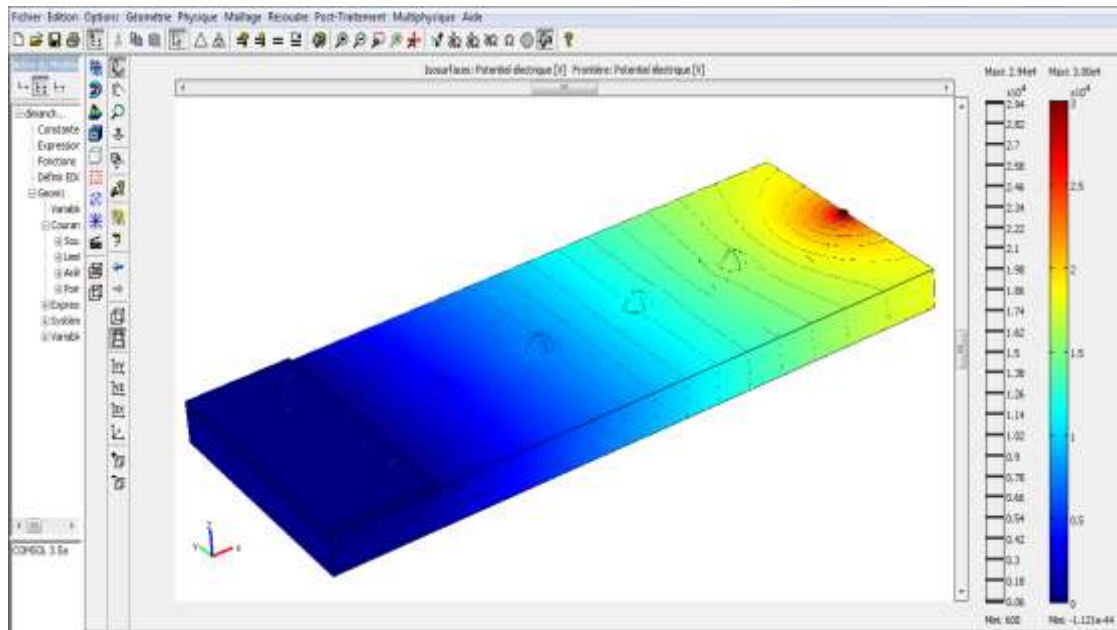


Figure III. 1. L’interface de logiciel Comsol

III.4.2. Historique de COMSOL Multiphysics

L’outil informatique commercial « COMSOL » a été créé par des étudiants de Germund Dahlquist en 1986, dans le cadre de son cours réalisé sur les simulations numériques au niveau de l’Institut royal de technologie en Suède. Il est noté que sa première version est sortie dans l’année 1998 [21].

La modélisation avec COMSOL Multiphysics se résume dans le diagramme suivant :

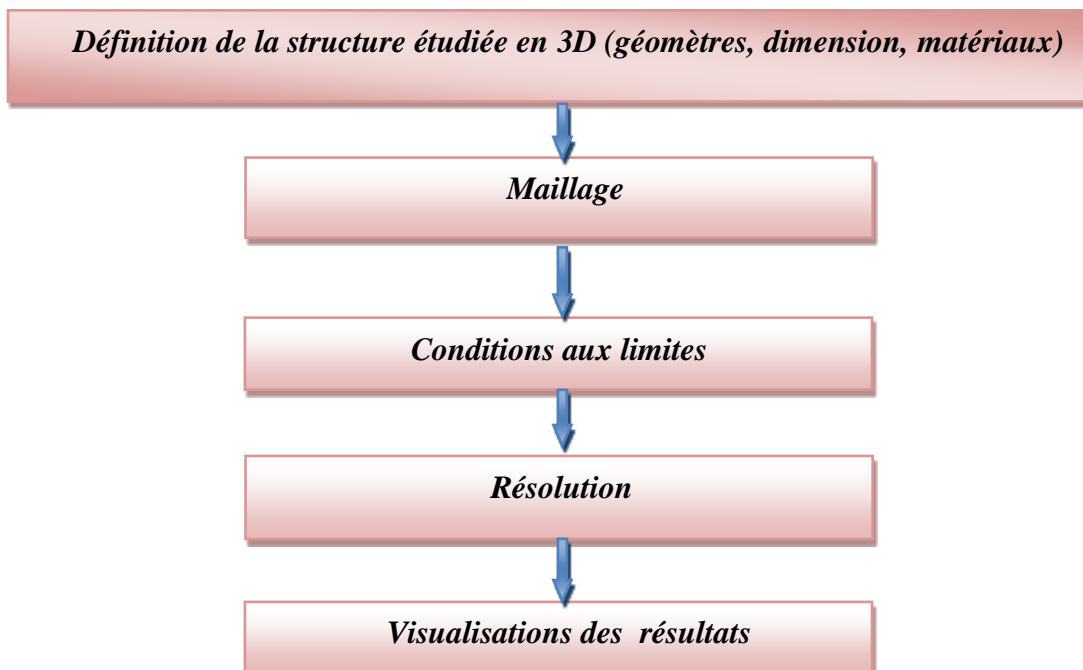


Figure III. 2. Procédures générales pour les simulations FEM

Dans la présente simulation deux cas on a considéré deux cas de figures. Le premier cas concerne les simulations sur un modèle d'une plaque isolante propre sans goutte, et le deuxième concerne les simulations en 3D d'une plaque avec des gouttes.

La figure III.1 montre la structure de simulation, composée d'une plaque en silicone et deux électrodes (pointe - plan) en acier reposant à ses extrémités. Les dimensions de la plaque en silicone et les électrodes sont respectivement de $120 \times 50 \times 6 \text{ mm}^3$. Les permittivités relatives du matériau en silicone et de l'air sont respectivement égales 4.3 et 1. Au milieu de l'isolation est déposée une des gouttes d'eau, comme il est illustré dans la figure suivante :

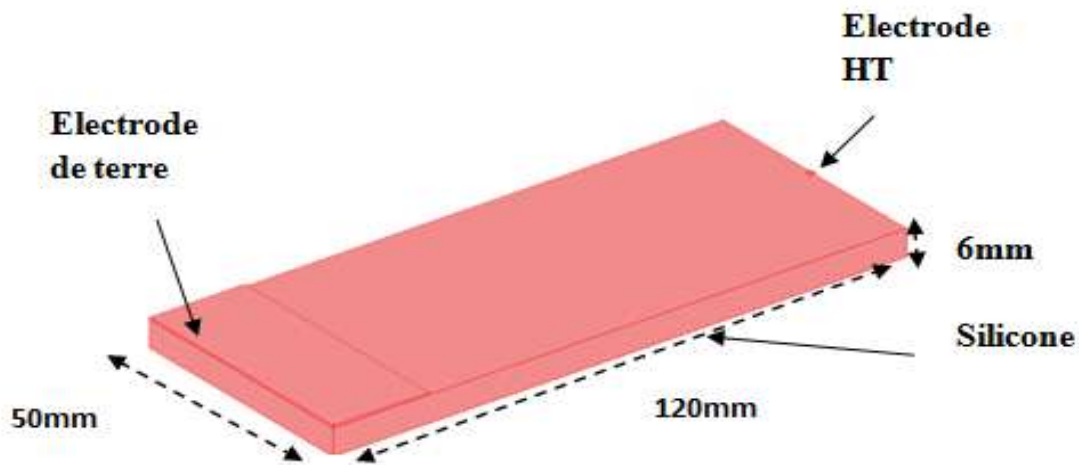


Figure III. 3. Structure de la simulation.

Les différents domaines de l'isolateur étudié sont définis dans COMSOL par l'introduction de la constante diélectrique relative ϵ_r et la conductivité électrique σ pour chaque domaine. Leurs valeurs sont déterminées dans la bibliothèque des matériaux de COSMOL. Quatre domaines peuvent être définis :

- ✓ l'air , défini par une diélectrique constante = 1 et une conductivité électrique 10^{-5} ;
- ✓ le revêtement extérieur (silicone), avec une permittivité relative égale à 4,3 et une conductivité électrique égale à 10^{-12} S/m ;
- ✓ le noyau en fibre de verre, défini par une constante diélectrique égale à 7,1 et une conductivité électrique égale à 10^{-14} S/m ;
- ✓ les électrodes (extrémités métalliques) et l'anneau de garde en acier, avec une permittivité relative égale à 1 et une conductivité électrique égale à $5.9 \cdot 10^7 \text{ S/m}$.

On ajoute à la géométrie trois matériaux qui sont principaux ; l'acier comme conducteurs

(électrodes), silicone comme isolant et l'air c'est l'espace environnant comme le montre dans la figure. III.3.

Les caractéristiques électriques de ces matériaux sont données et présentées dans le tableau III.1:

III.5. Simulation bidimensionnelle du modèle

III.5.1. Détermination des paramètres de la géométrie

Pour faire une modélisation en utilisant l'outil informatique COMSOL, tous les paramètres et les variables qui peuvent être utilisés dans la résolution du problème, comme les constantes de matériaux, les dimensions utilisés pour la géométrie...etc., doivent être défini comme une étape initiale [27,28].

La figure III.4 présente le modèle géométrique d'une plaque en silicone et deux électrodes :

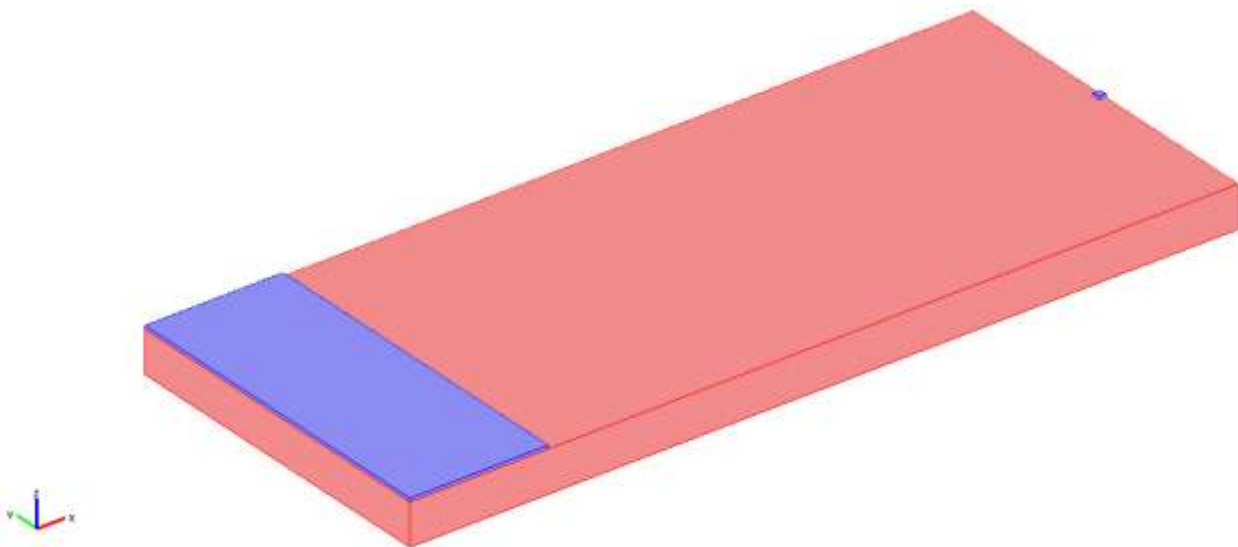


Figure III. 4. Configuration du modèle à simuler

Tableau III. 1. Propriété des matériaux utilisés

Matériaux	Permittivité relative ϵ_r	Conductivité σ (S/cm)
Silicone	4,3	10^{-14}
Fibre de verre	7,1	10^{-14}
Electrodes en acier	1	$5,9 \cdot 10^7$
Gouttes d'eau	81	$(9.44/18.66/27.88) \cdot 10^{-3}$
Air	1	10^{-15}

III.6. Conditions aux limites

Pour déterminer les conditions de limites, l'environnement physique de résolution des équations de notre problème a été précisé. Le modèle électrostatique nous permet de faire résoudre les équations de base de l'électrostatique avec une bonne configuration de conditions initiales [28]. Une tension alternative 0.4 kV à l'électrode HT et 0 volt à l'électrode basse tension (masse) a été appliquée.

III.7. Maillage de la géométrie

Pendant le processus de maillage, le problème de domaine entier est discrétisé en éléments finis sous un type tétraèdre. Cela s'effectuera après la réalisation de notre étape initiale qui concerne la structure du modèle choisi, et même après la spécification des propriétés matériels choisis et des conditions aux limites. Dans le but d'améliorer la précision de nos résultats de simulation, on a effectué un raffinement du maillage (figure III.5) au niveau de région d'intérêt afin d'augmenter le nombre des éléments de maillage le long de l'isolateur et même améliorer la précision de la solution. Un choix de nombre minime d'éléments de maillage peut diminuer la précision des résultats de simulation, donc un choix du nombre élevé d'éléments est nécessaire et doit être bien équilibré, tandis qu'un nombre important d'éléments augmente la taille du problème en entraînant un temps de traitement un peu plus long. Il est nécessaire d'avoir un optimum nombre d'éléments qui va avoir un temps de calcul plus rapide sans influencer sur la précision des résultats.

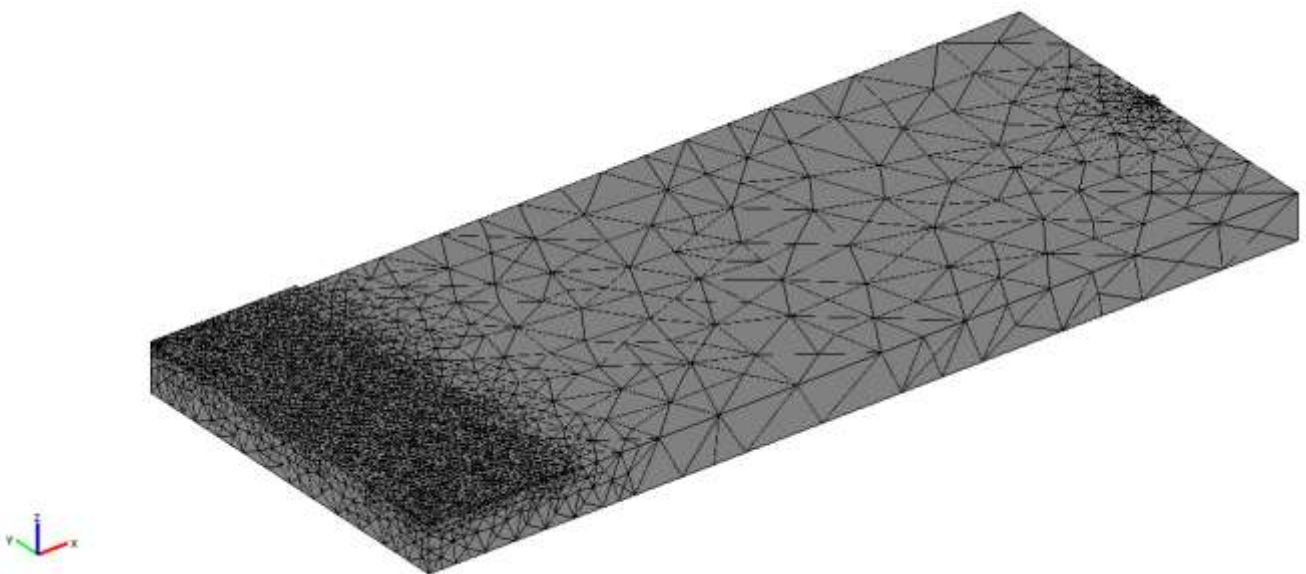


Figure III. 5. Maillage

III.8. Conclusion

Dans le présent chapitre, on a étudié la technique de détermination de la répartition du champ et potentiel électriques. La méthode des éléments Finis (FEM) a été choisie dans l'étude. Le logiciel commercial « COMSOL Multiphysics » peut offrir d'une manière précise et interactive à évaluer et étudier ces deux grandeurs en se basant sur la méthode des éléments finis. Dans le chapitre suivant, on va discuter les résultats de simulations en ce qui concerne la distribution du potentiel et du champ électrique sur l'isolateur étudié.

Chapitre IV

Etude de la Répartition de Champ et du
Potentiel Electrique en Présence de Gouttes
d'Eau Polluées sur l'Isolateur Composite

Chapitre 04

Etude de la Répartition du champ et tension électrique en présence de gouttes d'eau polluées sur l'isolateur composite

IV.1. Introduction

La présence de gouttelettes de l'eau sur les isolateurs peut influencer sur ses performances. Donc elle constitue l'un des paramètres importants à déterminer. L'évaluation de la distribution du champ électrique et du potentiel le long des isolateurs pollués augmente les connaissances sur les phénomènes de contournements électriques des isolateurs haute tension aériens. La répartition du potentiel et surtout du champ électrique le long d'un isolateur est très difficile de mesurer d'une manière bien précise. Pour cela, l'utilisation de l'un des méthodes numériques en utilisant un logiciel commercial est devenue une des bonnes solutions aux difficultés des mesures [22-26]. Divers facteurs d'influence ont été pris en compte à cette étape. Plusieurs facteurs influençant la distribution du champ et la tension électrique ont été étudiés ; volume de la goutte, Conductivité, permittivité de la gouttelette et le nombre de la goutte. Enfin, l'analyse des variances (ANOVA) permet d'évaluer la contribution des facteurs étudiés et leurs interactions sur la variation totale des réponses étudiées.

Le but de ce chapitre est pour identifier les différentes caractéristiques électriques de l'isolateur tel que le potentiel électrique, champ électrique et l'état de surface (sans et avec gouttes d'eau) et la conductivité volumique des gouttes d'eau déposées sur sa surface.

IV.2. Etude de simulation du champ électrique dans un isolateur composite avec la présence de gouttelettes d'eau

Dans le cas notre cas étudié, la répartition des gouttelettes est faite sur la surface de l'isolateur composite. Le choix du nombre (2, 4 et 6) et l'emplacement des gouttelettes comme il est indiqué dans le tableau IV.1 est pris pour recouvrir le maximum de surface de

l'isolateur. Le côté HT est choisi du fait qu'il est le plus critique en termes de distribution de champ électrique. Le diamètre des gouttes d'eau se changera à chaque fois pour comprendre l'effet de ce dernier (1.5, 2.5 et 3.5). Enfin, les gouttelettes d'eau ont une forme hémisphérique avec une constante diélectrique et une conductivité électrique variable (faible, moyenne et forte).

Tableau IV. 1. Les cas étudiés

Les cas étudiés	Cas 1	Cas 2	Cas 3
Nombre	2	4	6
Conductivité (μS)	10/30/50	10/30/50	10/30/50
Volume (Rayon) mm	1.5	2.5	3.5
Tension (kV)	10/20/30	10/20/30	10/20/30

IV.2.1. Isolateur propre (sans gouttes d'eau)

Afin d'évaluer la répartition de la tension et du champ électrique, une simulation a été réalisée sur l'isolateur sans gouttes d'eau entre les électrodes. Les bornes des électrodes de haute tension et de masse sont parallèles, ce qui entraîne des lignes équipotentiels parallèles aux deux bornes et un champ électrique perpendiculaire aux électrodes. La figure IV.1 montre les lignes équipotentiels sur la surface sèche du diélectrique et l'image de maillage de la géométrie. Le champ électrique sur la surface hydrophobe sans goutte est uniforme, avec des valeurs maximales au niveau de l'électrode égales à $2,3 \cdot 10^4$ V/cm et des valeurs minimales entre les électrodes de $0,3 \cdot 10^4$ V/cm. Cependant, la distribution non uniforme du potentiel entre les électrodes figure IV.3 entraîne une forme non linéaire pour le graphique du champ électrique tangentiel (IV.4).

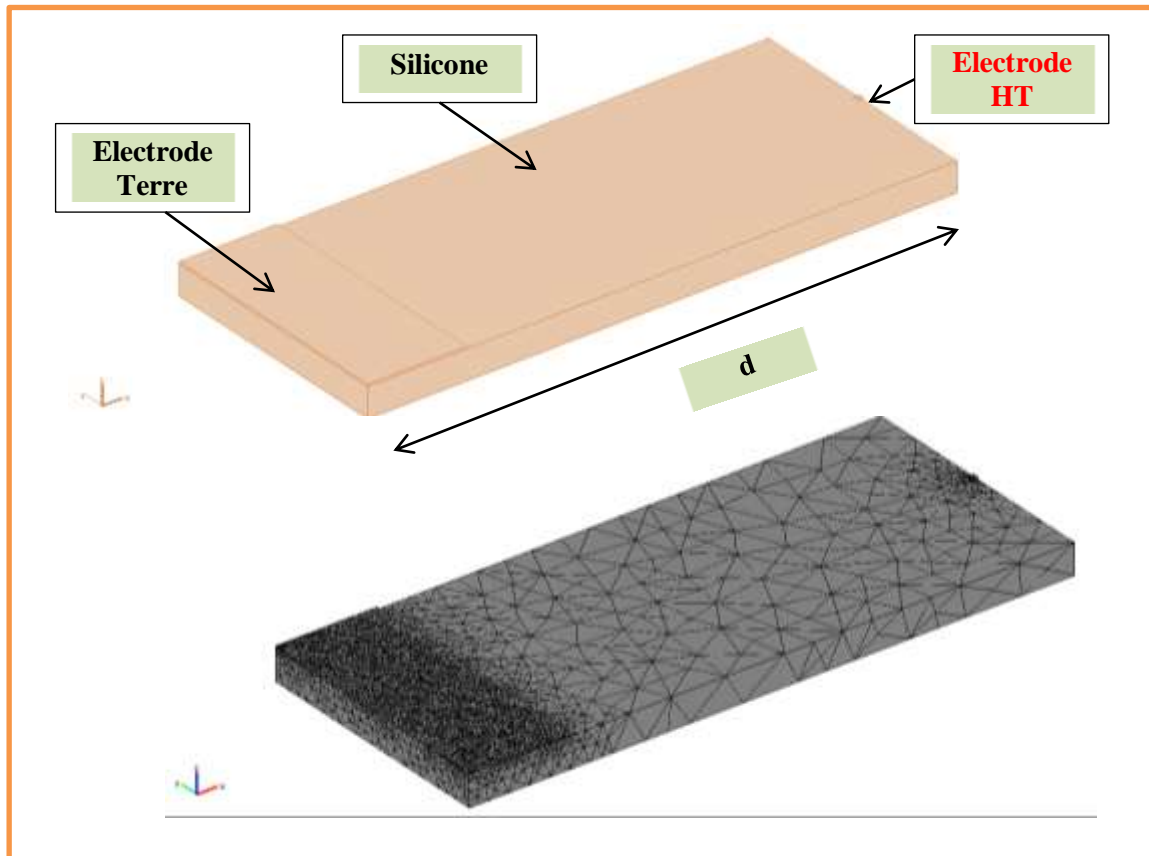


Figure IV. 1. Structure de l'isolateur composite sans gouttes d'eau et maillage

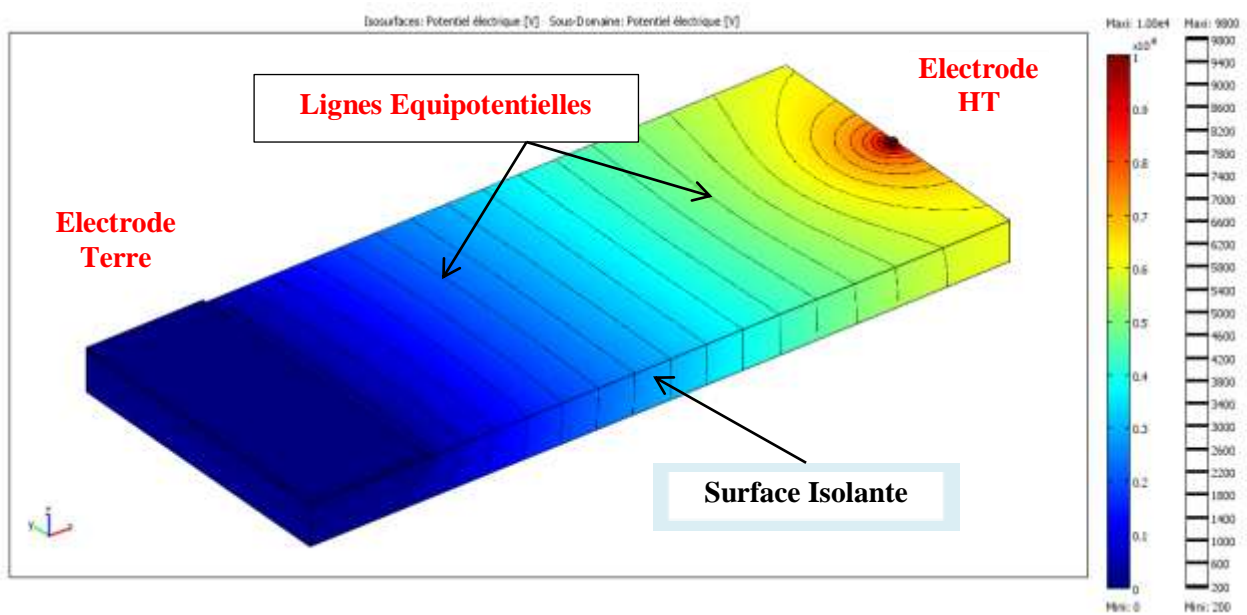


Figure IV. 2. Distribution de lignes équipotentielles le long de l'isolateur composite sans gouttes d'eau

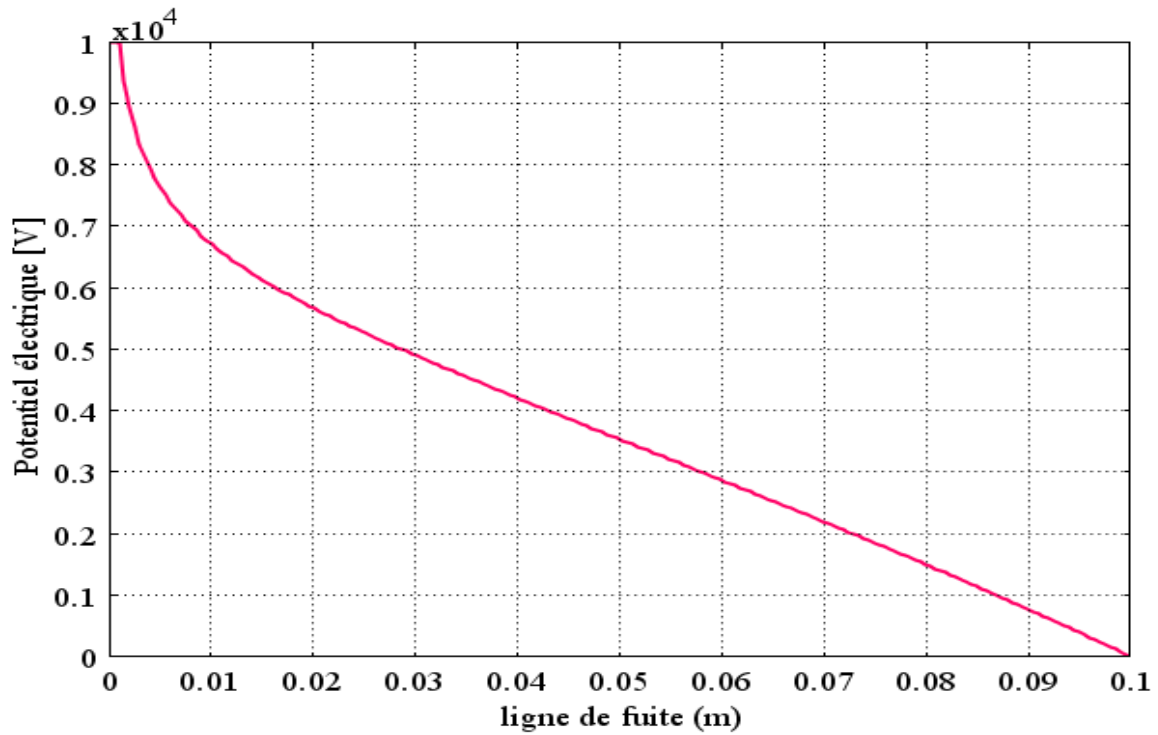


Figure IV. 3. Evolution du potentiel électrique sur la surface d'isolateur sans gouttelettes d'eau.

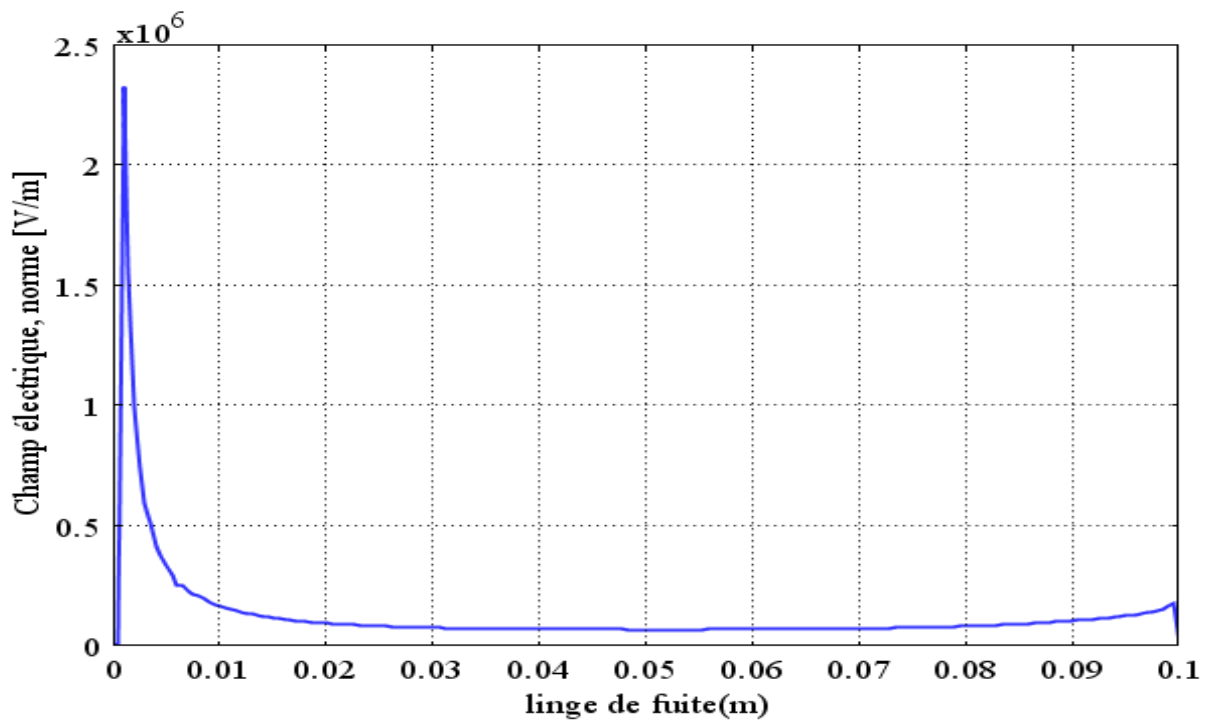


Figure IV. 4. L'intensité du champ électrique sur la surface d'isolateur sans gouttelettes d'eau.

IV.2.2. Isolateur en présence de gouttes d'eau

IV.2.2.1. Cas d'une paire de gouttelettes

Des gouttelettes d'eau hémisphériques sont considérées pour faire nos simulations. La conception de base de l'isolateur est la silicone et une ligne de fuite (100 mm) entre deux supports (électrodes haute tension et terre) en cuivre, avec des gouttes d'eau. Dans ce cas de simulation, deux gouttelettes d'eau de même volume 1.5 mm^2 ont été placées sur la surface de silicone entre deux électrodes, en variant la conductivité. On applique par la suite une en l'augmentant progressivement jusqu'à ce qu'une instabilité soit détectée sur l'une des deux gouttelettes.

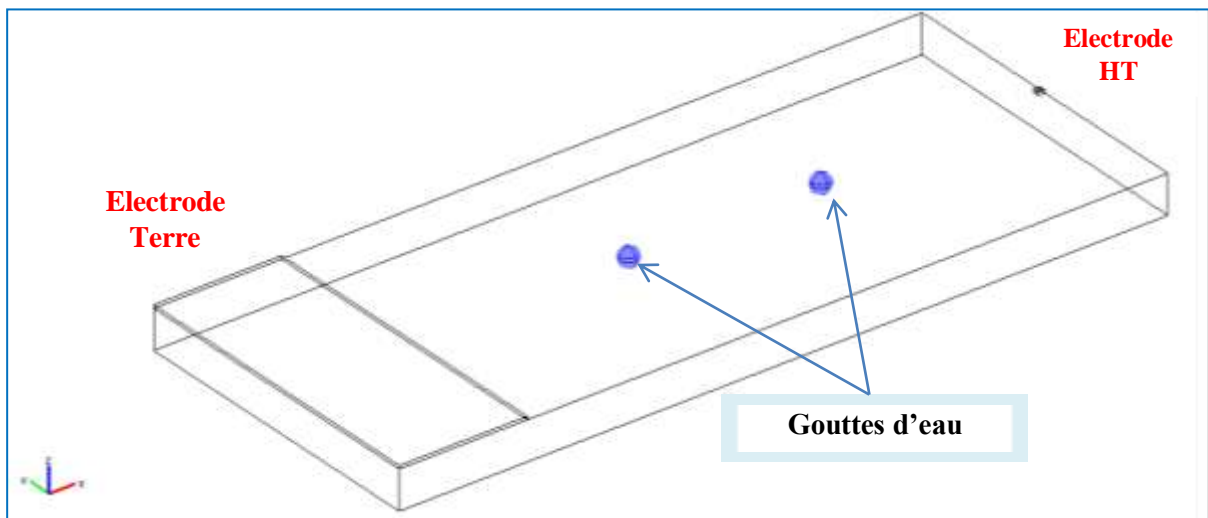


Figure IV. 5. Structure de l'isolateur composite en présence de deux gouttes d'eau

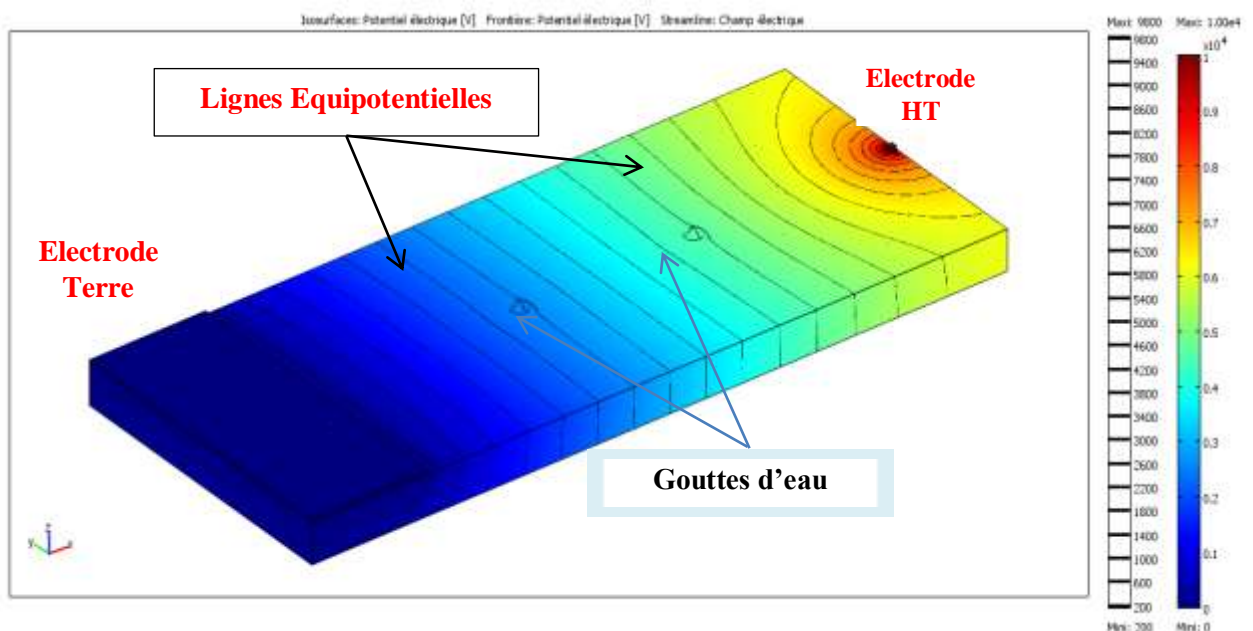


Figure IV. 6. Distribution des lignes équipotentiels en présence de deux gouttelettes d'eau

La figure IV.6 illustre les résultats de la répartition de champ électrique le long de l'isolateur. On note que le dépôt de gouttes de l'eau sur la surface de l'isolateur composite génère contrainte local de champ électrique. Il est clair que l'amplification du champ électrique ne se répartie pas de la même façon sur les deux pôles de la goutte. Ce qui concerne le champ électrique absolu, on trouve que l'amplification se concentre à côté gauche de la gouttelette c'est-à-dire le côté haute tension en comparant par celle apparue au côté terre. A partir de la figure IV.7 qui représente potentiel électrique sur la surface d'isolateur en présence de deux gouttelettes d'eau et avec une tension appliquée égale à 10kV, et la figure IV.8 représentant l'évolution de champ électrique, on peut confirmer l'apparition l'amplification dans les zones ou les gouttelettes sont déposées. De l'autre part, on peut remarquer l'augmentation de valeur champ électrique maximale vers 15 kV/cm par rapport au cas propre.

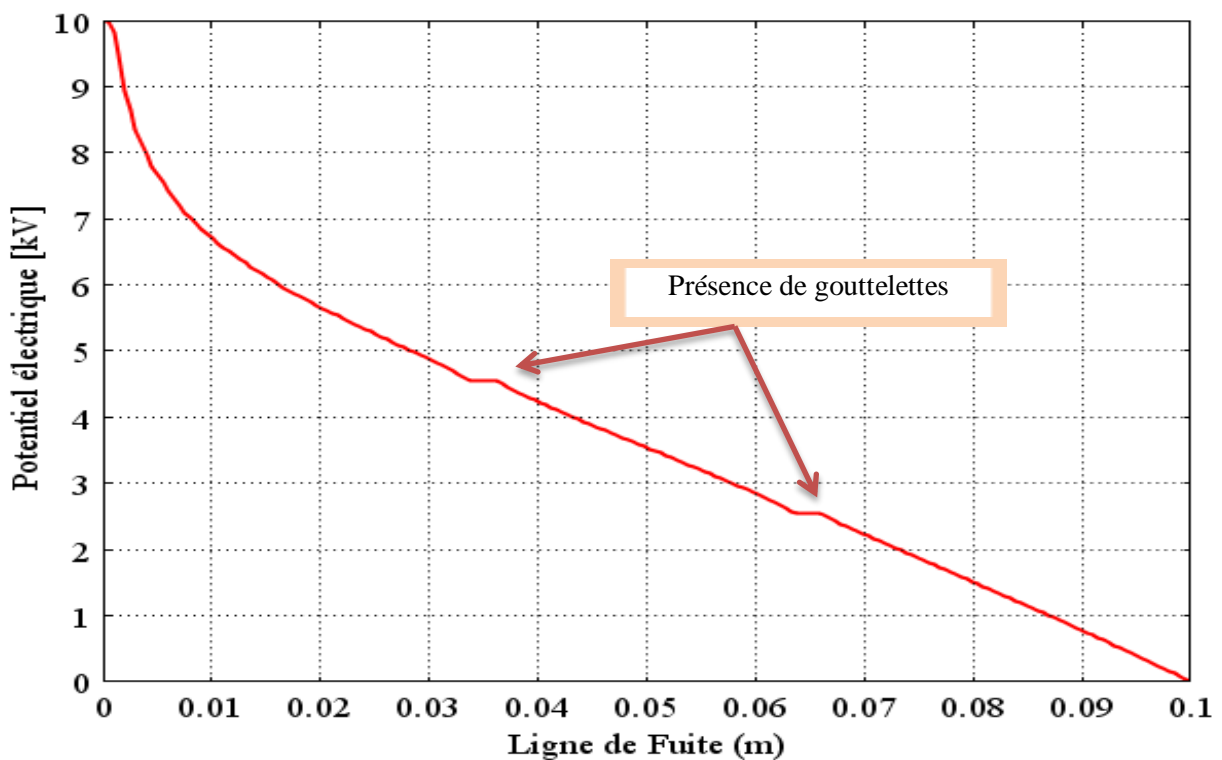


Figure IV. 7. Evolution du potentiel électrique sur la surface d'isolateur en présence de deux gouttes d'eau.

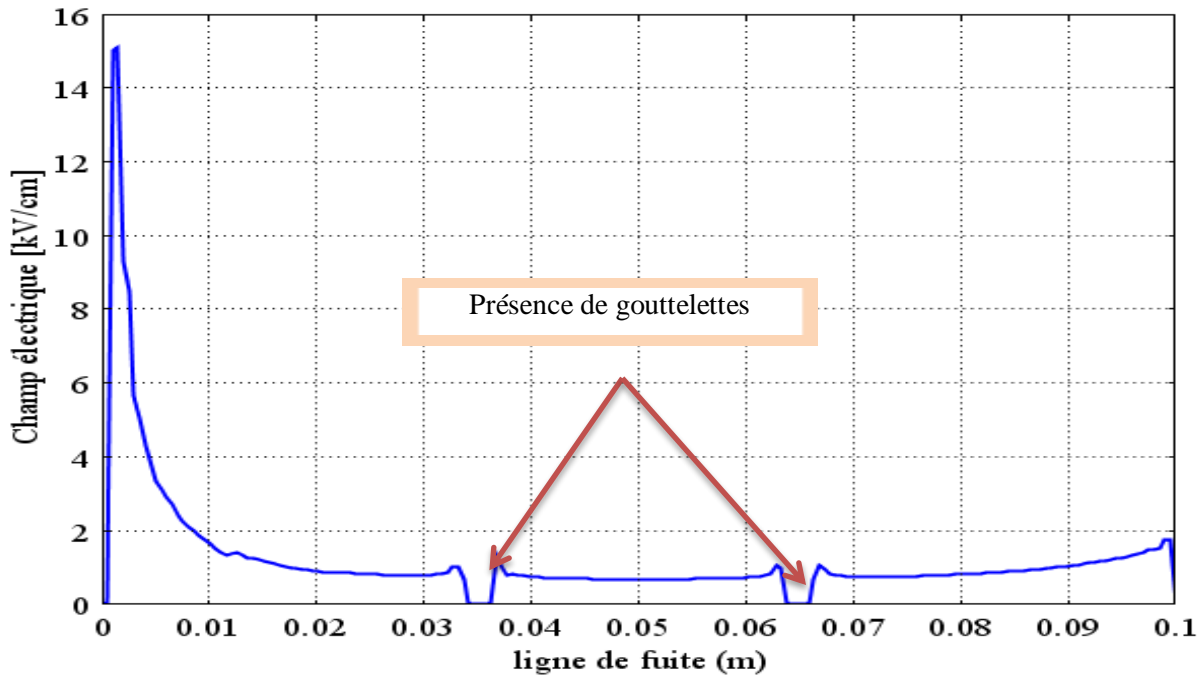


Figure IV. 8. Evolution de l'intensité du champ électrique sur la surface d'isolateur en présence de deux gouttelettes d'eau.

IV.2.2.2. Cas de présence de quatre gouttelettes

L'objectif visé de cette simulation est de voir l'impact de la présence de plusieurs gouttes d'eau sur la répartition du champ et la tension électrique tout au long de l'isolateur composite. La conception de base de l'isolateur est toujours la silicone et une longueur de 100 mm entre deux supports (électrodes haute tension et terre) en cuivre, avec quatre gouttes d'eau (Figure IV.9).

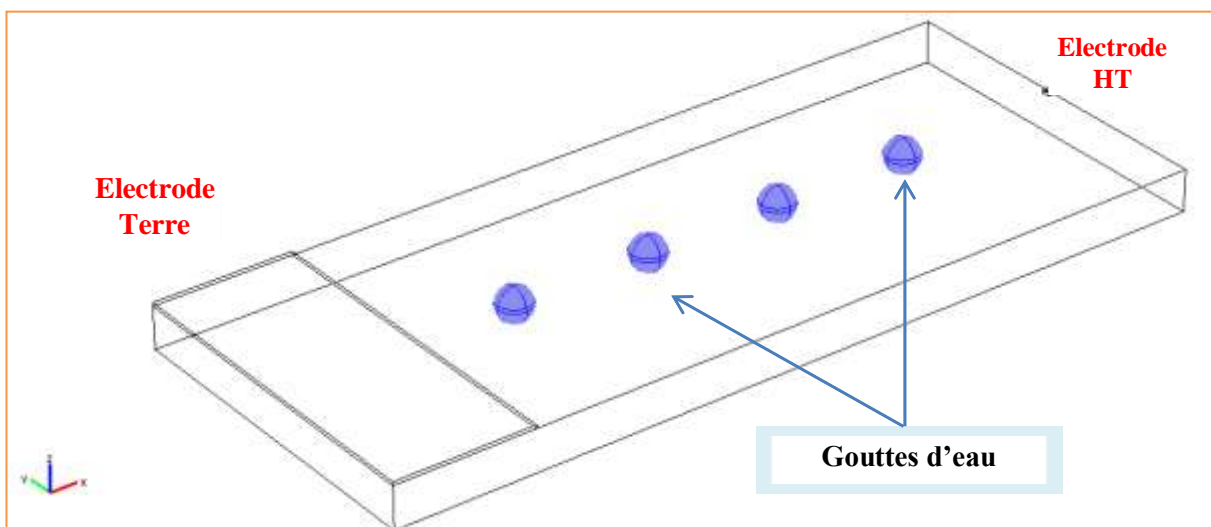


Figure IV. 9. Structure de l'isolateur composite en présence de quatre gouttelettes d'eau

La figure IV.10 illustre la distribution de champ électrique en présence de quatre gouttes d'eau en fonction de ligne de fuite. On peut remarquer que les lignes équipotentielles sont concentrées généralement autour des électrodes métalliques, indiquant des régions de champ élevé sur l'isolateur composite. Les équipotentielles en présence de quatre gouttes d'eau sont plus uniformément répartis que celles de la surface propre, donnant une meilleure répartition du champ le long du profil de l'isolateur.

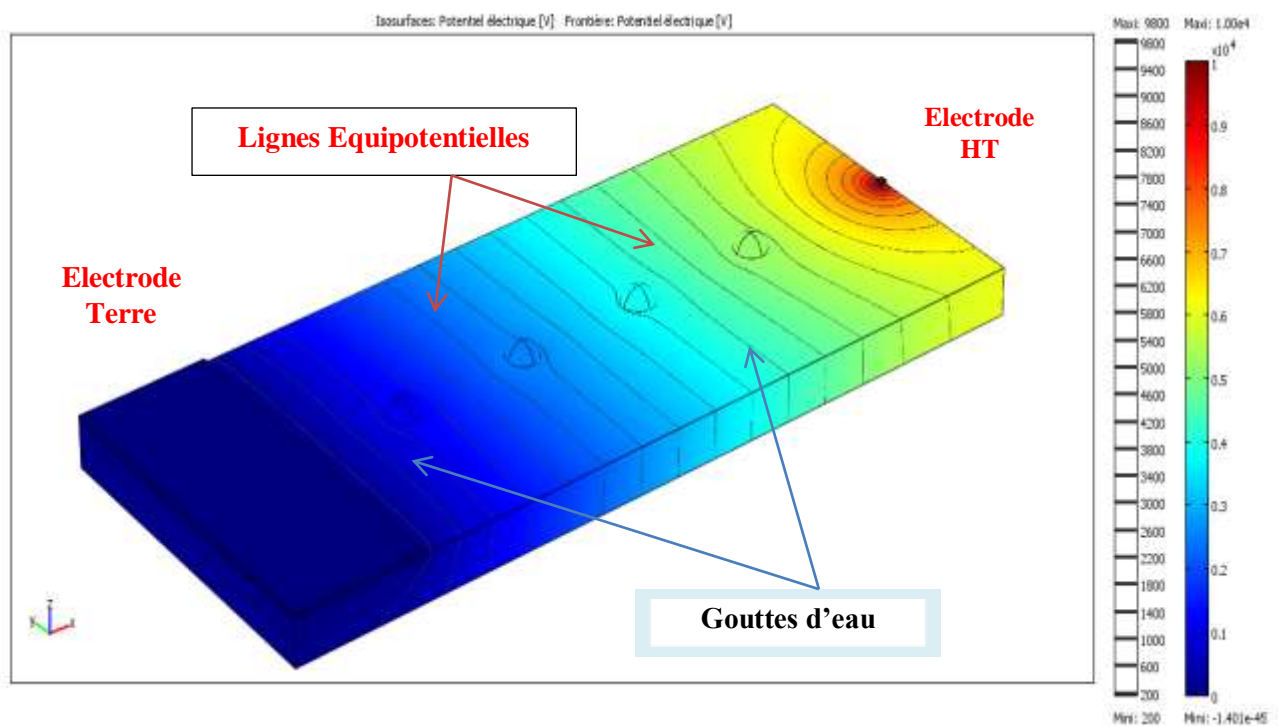


Figure IV. 10. Distribution des lignes équipotentielles en présence de quatre gouttelettes

Les figures IV.11., 12 et 13 représentent l'évolution de l'intensité de champ électrique sur la d'isolateur en présence de quatre gouttes d'eau avec une application de tension de 10, 20 et 30 kV.

On note une élévation des valeurs du champ en présence de quatre gouttelettes d'eau avec l'augmentation de tension appliquée. Une tension appliquée de 30 kV provoquent une augmentation élevée du champ électrique (74,1 kV/cm) par rapport à celle de 10 (24,7 kV/cm) et de 20 kV (49,4 kV/cm).

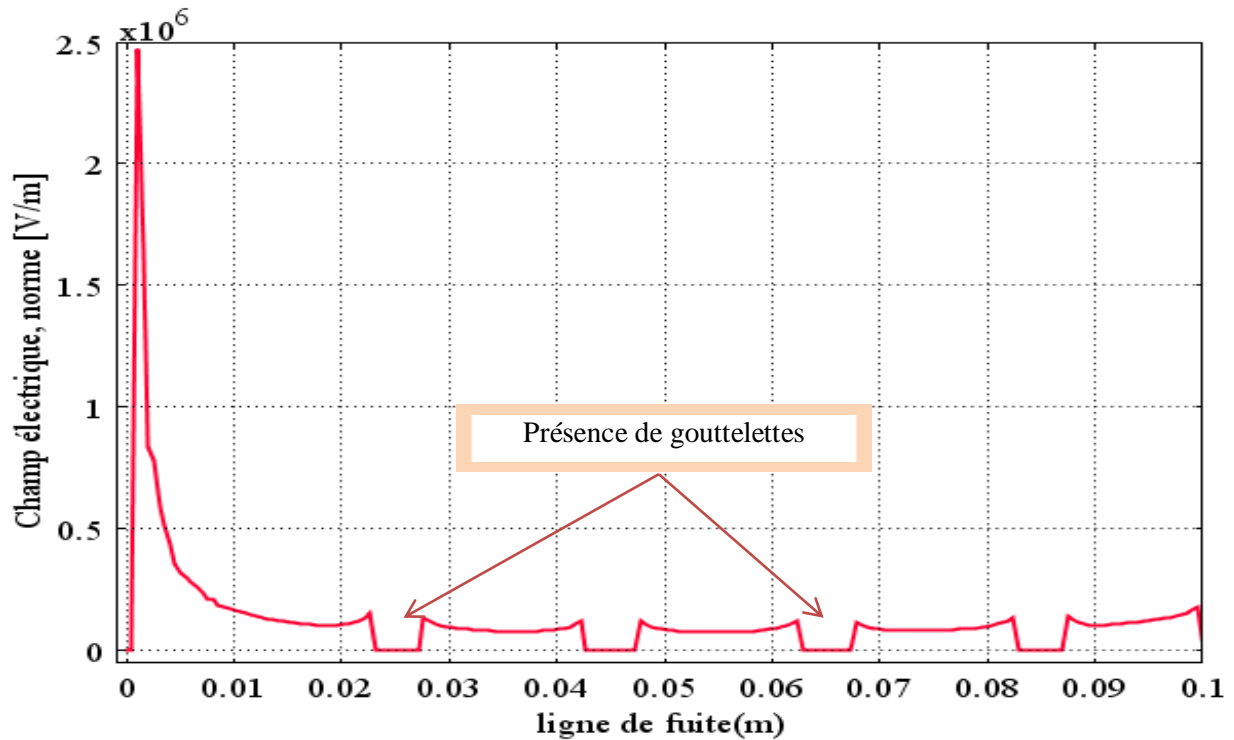


Figure IV. 11. L'intensité du champ électrique sur la surface d'isolateur en présence de quatre gouttelettes d'eau avec une tension appliquée = 10kV.

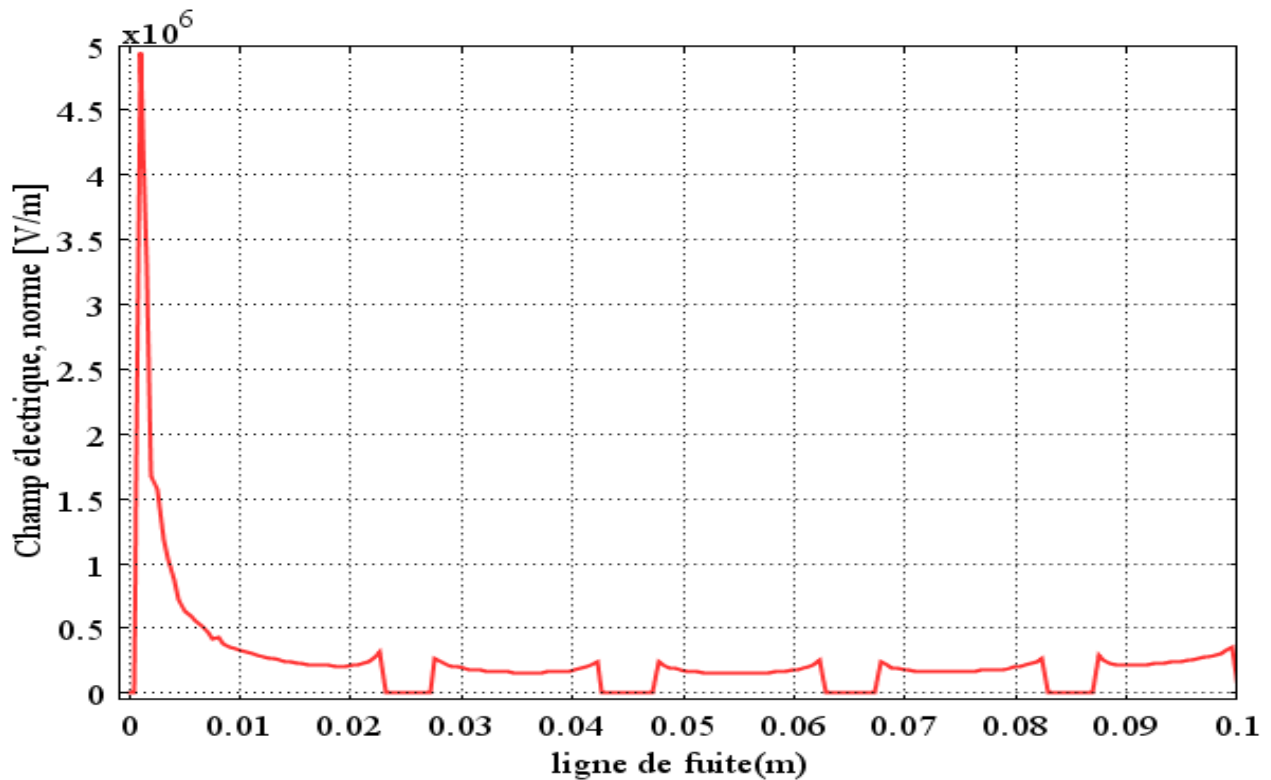


Figure IV. 12. Evolution de l'intensité du champ électrique sur la surface d'isolateur en présence de quatre gouttelettes d'eau avec une tension appliquée = 20kV.

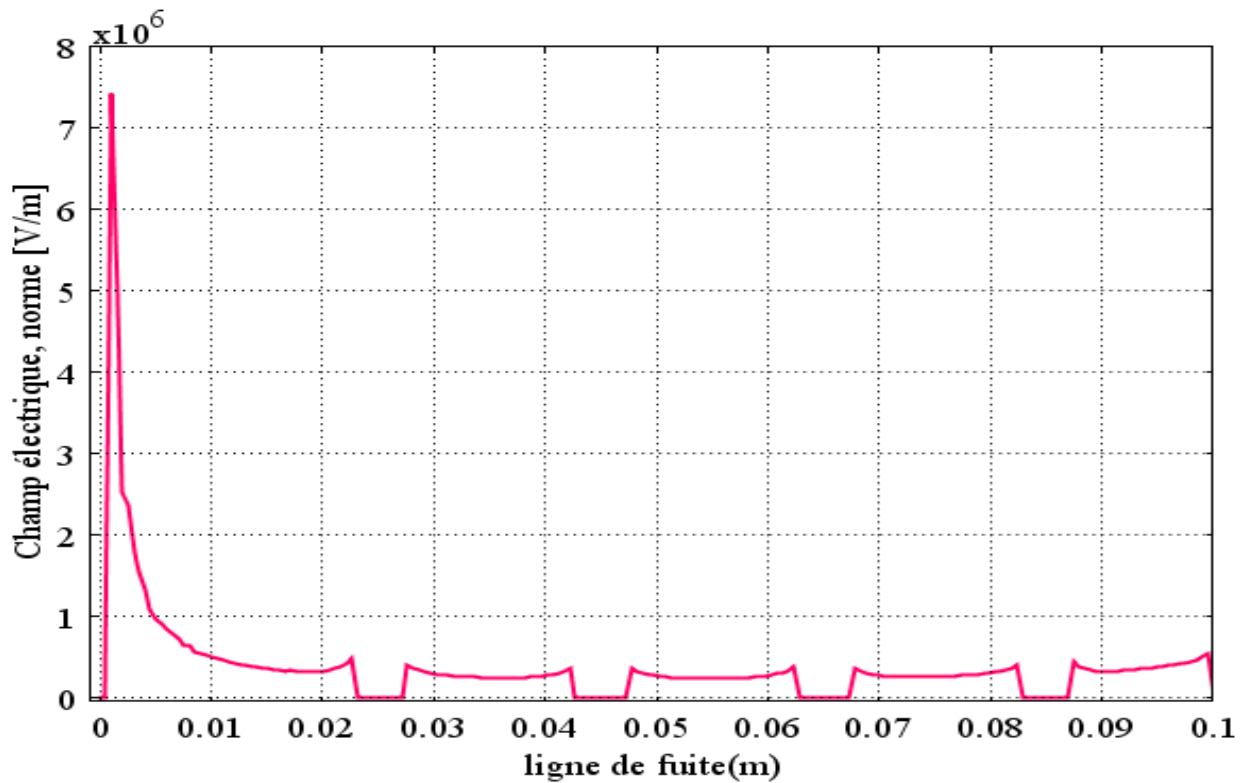


Figure IV. 13. L'intensité du champ électrique sur la surface d'isolateur en présence de quatre gouttelettes d'eau avec une tension appliquée = 30kV

IV.2.2.3. Cas de présence de six gouttelettes

L'impact de nombre de gouttes est pris en considération dans cette étude. Ce nombre est choisi de 6 dans ce cas. La figure IV.14 montre Structure de l'isolateur composite en présence de six gouttes d'eau. Le maillage de la géométrie est représenté dans la figure IV.15.

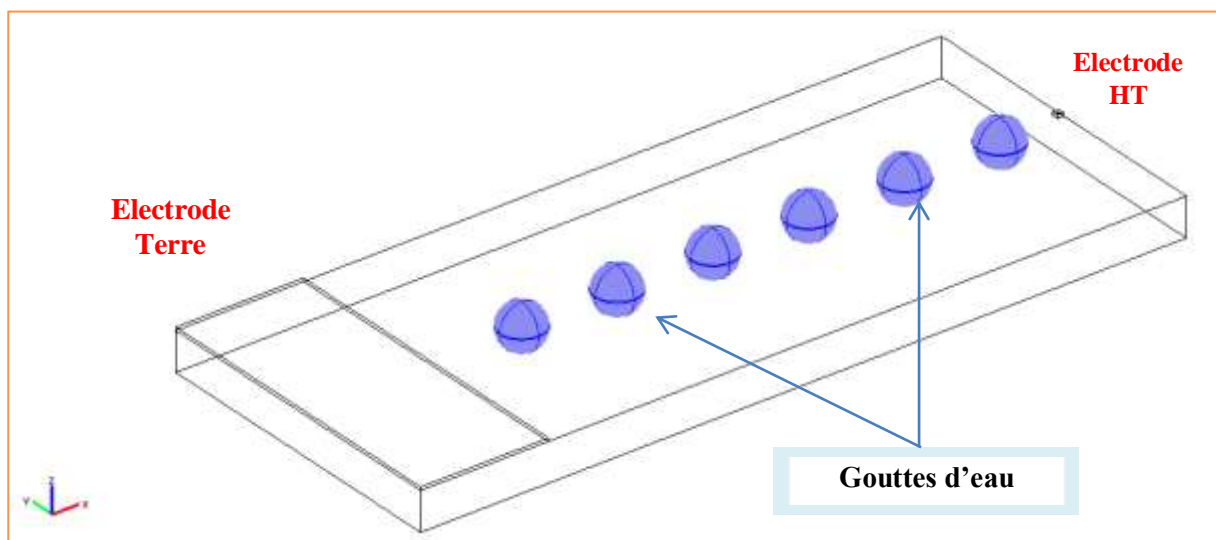


Figure IV. 14. Structure de l'isolateur composite en présence de six gouttes d'eau

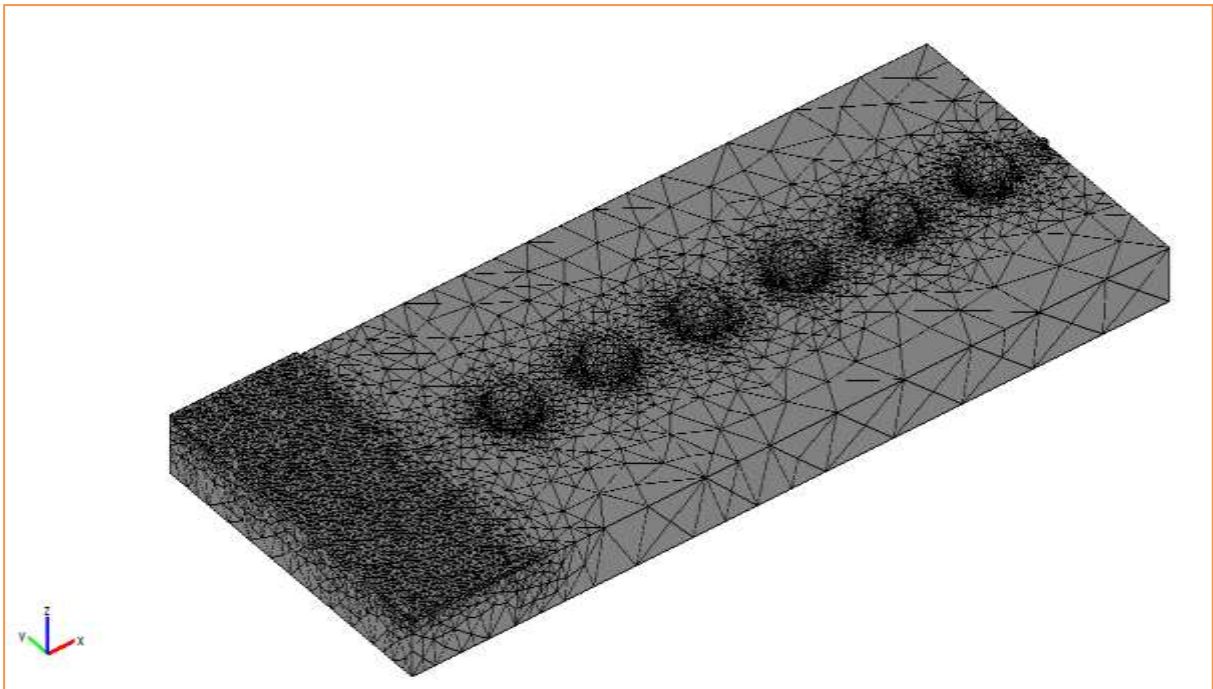


Figure IV. 15. Maillage

La figure IV.16 montre la répartition de champ électrique en présence de six gouttes de l'eau le long de surface de l'isolateur composite. Les simulations ont montré que les six gouttelettes d'eau modifient la répartition du champ électrique dans l'espace avoisinant l'isolateur mais aussi conduisent à des distorsions partielles du champ électrique au niveau de la surface de l'isolateur. La figure IV.17 représente le potentiel électrique sur la surface d'isolateur en présence de six gouttelettes d'eau. On remarque une diminution non uniforme de potentiel à cause de dépôt de gouttes d'eau.

Sur la figure. IV.18 représente l'intensité de champ électrique sur la surface d'isolateur en présence de six gouttelettes d'eau. On peut observer qu'en présence de gouttelettes et l'augmentations de leurs nombre, le champ électrique s'intensifie mais est surtout concentré aux points triples (eau-air-silicone). Néanmoins, le champ électrique au-dessus des gouttelettes reste relativement faible.

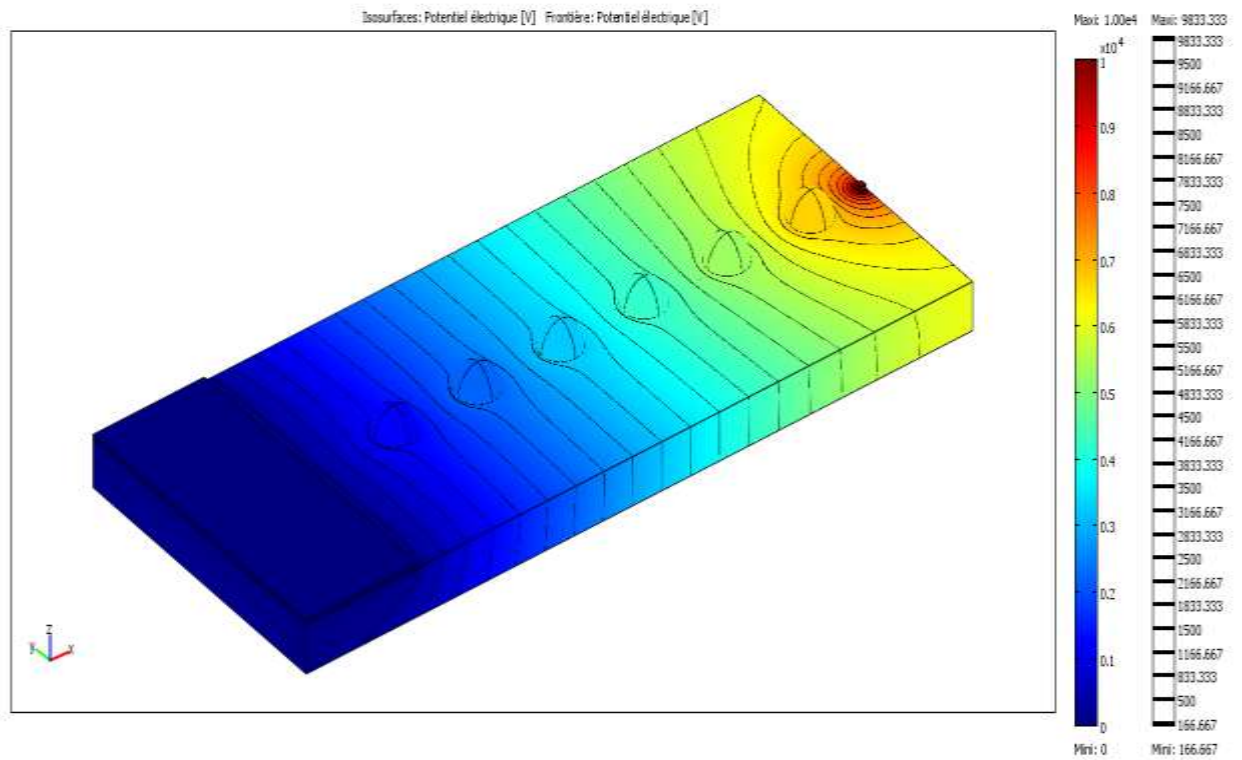


Figure IV. 16. Distribution de champ électrique en présence de six gouttelettes d'eau

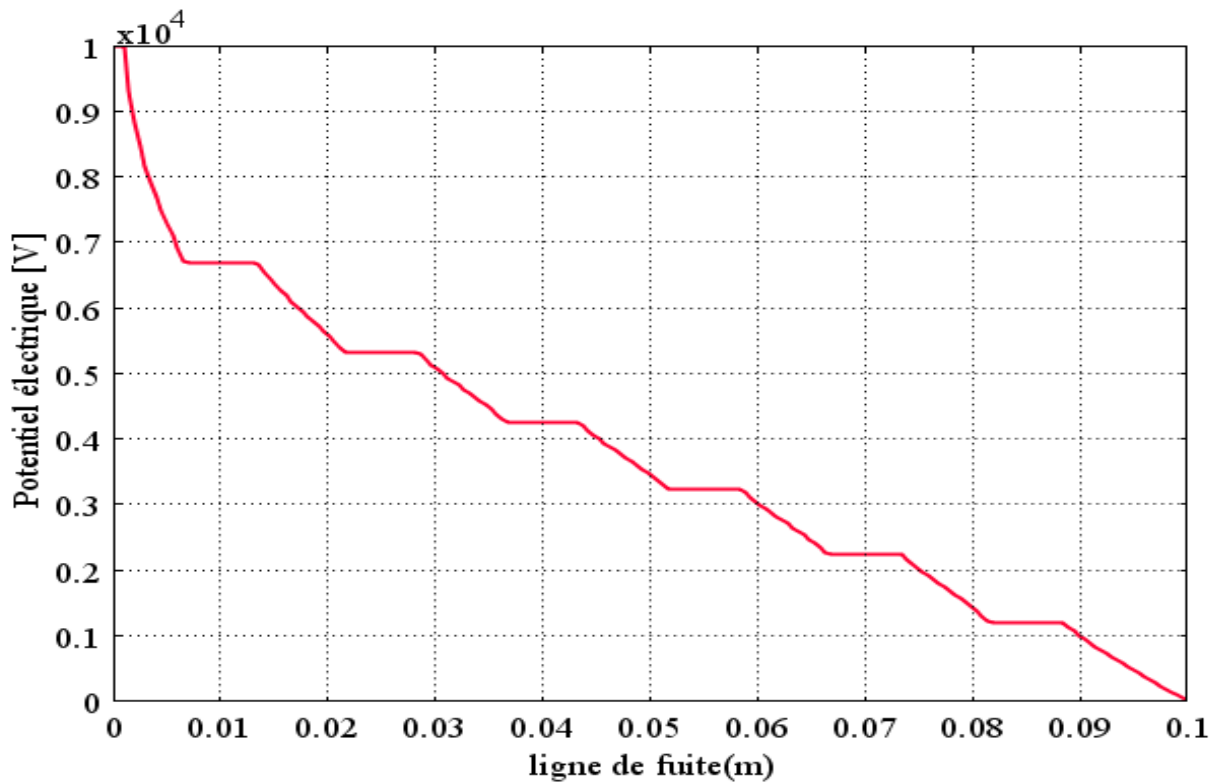


Figure IV. 17. Evolution du potentiel électrique sur la surface d'isolateur en présence de six gouttes d'eau

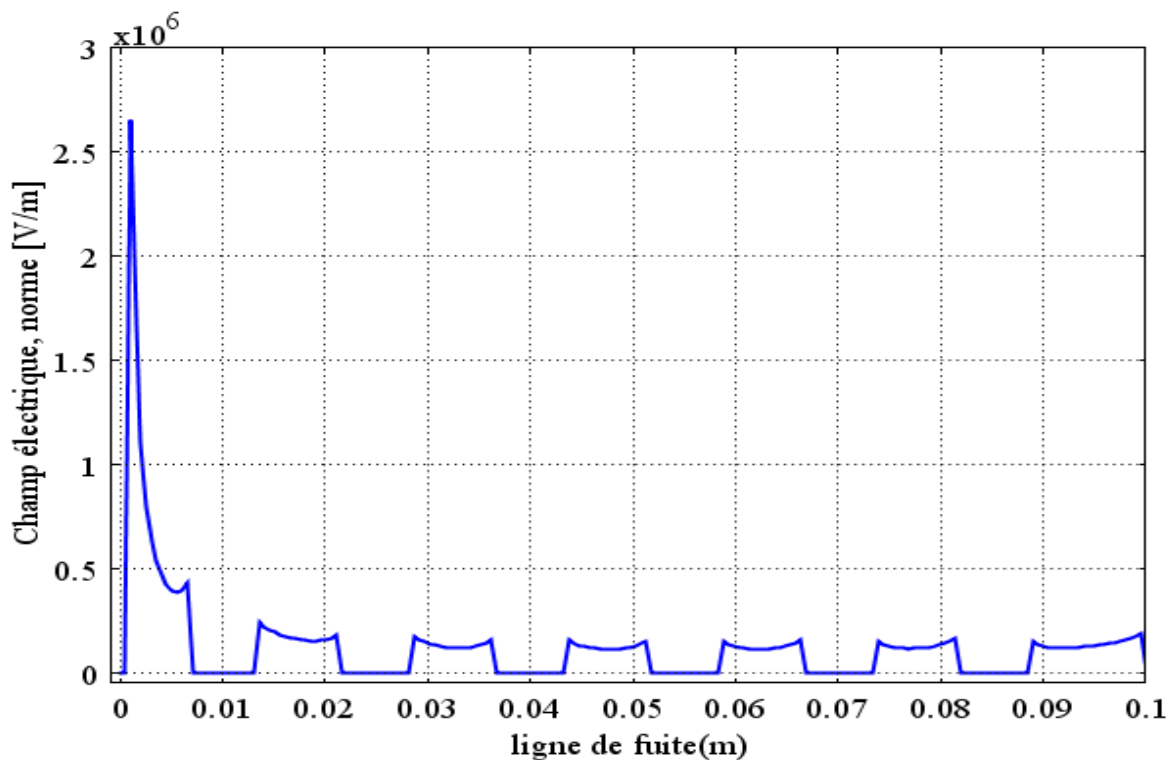


Figure IV. 18. Evolution de l'intensité du champ électrique sur la surface d'isolateur en présence de six gouttes d'eau.

Donc on peut conclure que le nombre de gouttes d'eau, a un effet remarquable sur la répartition du champ électrique de ligne de fuite de l'isolateur composite. On marque une augmentation de champ électrique engendrée par la croissance du nombre de gouttes d'eau sur sa surface. Pour l'impact de conductivité, le développement de la conductivité de faible à moyenne ou élevée, à une faible influence sur l'amplification et distribution de champ électrique.

IV.3. Méthodologie Des Surfaces De Réponse (M.S.R)

D'une manière générale, une surface de réponse c'est la présentation de la géométrie de la réponse correspondante à un processus spatio-temporel physique aléatoire à des variétés simulées. La propriété étudiée, c'est le résultat de transfert à travers une fonction de transfert ou une fonction de réponse explicite, des variables d'entrée du système, faire changer des valeurs de telles variables peut changer la valeur de la fonction de réponse. Le calcul d'erreur, le choix des variables stimuli et la définition des périodes d'observation doivent être pris en considération par les modèles expérimentaux des surfaces de

réponse. On note X_i ($i= 1..... n$) toutes variables d'entrée stimuli qui représentent le phénomène. Elles sont appelées aussi variables de base. Cette méthode peut permettre de faire une lecture et une interprétation rapide et cela fournit un plan expérimental bien précis de notre système étudié. Le déroulement de l'analyse par cette méthode passe par les points suivants : bien définir la réponse du système qu'on peut modéliser ou à connaître, les facteurs capable de modifier cette réponse choisie. Puis, le nombre de facteurs et le nombre de niveaux pour l'étude, ont défini. Dans cette étude, la méthodologie de surface de réponse est utilisée pour modéliser la relation entre les facteurs étudiés et la tension appliquée sur l'isolateur. Dans ce travail, nous avons opté pour la conception de Taguchi, qui permet d'utiliser la modélisation des surfaces de réponse, qui est généralement considérée dans le contexte de la conception expérimentale comme une méthode statistique de modélisation et d'optimisation des problèmes dans lesquels différentes variables affectent une réponse d'intérêt. La première étape de RSM consiste à déterminer une approximation appropriée de la relation fonctionnelle réelle entre la variable de réponse y et un ensemble de variables indépendantes.

IV.3.1.Analyse de Taguchi

La méthode de Taguchi utilise spécifiquement des techniques de conception expérimentales. Le plan d'expériences de Taguchi traite conjointement de la moyenne et de la variabilité des valeurs propres mesurées. Ainsi, la méthode de Taguchi enrichit les méthodes de planification expérimentale en apportant des améliorations considérables aux plans factoriels complets et partiels. Il se caractérise par Réduire significativement le nombre de tests tout en conservant une bonne précision.

IV.3.1.1. Construction du plan d'expérience

Notre modèle comporte 3 facteurs à 3 niveaux et nécessite donc de choisir un plan de expériences de Taguchi L9. La notation L9 indique ce qui suit :

- L (Nombre de tests) = L (Niveaux) facteurs.
- Nombre de tests = (nombre de niveaux pour chaque facteur) nombre de facteurs = $3^3 = 9$.

La première étape est une sélection de la table orthogonale qui correspond au plan d'expériences choisi. Elle constitue une liste des expériences. Enfin, faire une analyse statistique à partir des résultats des expériences. Dans la deuxième série, le tableau orthogonal standard de Taguchi L9 est adopté comme un plan expérimentale, Les niveaux des paramètres ont été choisis dans des intervalles bien déterminer pour s'adapter avec le modèle choisis, Les

paramètres à étudier et l'attribution des niveaux respectifs sont indiqués dans le (tableau IV.2), Trois niveaux pour chaque paramètre sont choisis, Trois conductivité (10us/m,30us/m,50us/m), trois Niveau de tension (10kv, 20kv ,30kv),et trois nombres sont choisis.

Pour trouver une solution aux problèmes de conception par les techniques d'amélioration, il faut formuler une fonction objective. La conception optimale est obtenue en réduisant le champ électrique via cette fonction. La fonction objective consiste en une relation mathématique entre les amplitudes du champ électrique et les paramètres de l'isolateur Il est représenté comme suit:

$$E = -15,60 + 1,335 U + 11,14 N - 580,4 P + 0,000033 U*U - 1,638 N*N + 30801 P*P + 0,3505 U*N - 28,43 U*P$$

Dans ce mémoire; on a étudié et évaluer l'impact de dépôt de gouttes d'eau polluées sur la distribution de champ autour de l'isolateur composite. Les plages de variation de tous les paramètres importants sont illustrées dans le tableau IV.2. La Tension (U), Nombre (N) et Pollution (P).

Tableau IV. 2. Paramètres et leurs niveaux

Paramètres	significations	Variation des ranges
Niveau de tension	U	10kv / 20kv / 30kv
Nombre de gouttes	N	2 / 4 / 6
Pollution	P	Faible/Moyenne/Fort

La conception expérimentale adoptée est un réseau orthogonal standard L9 Taguchi a été réalisée. Les paramètres à étudier et leurs niveaux avec résultats de champ électrique sont indiqués dans le tableau IV.3.

D'après ce tableau, la valeur minimale du champ électrique est de 15,07 kV/cm. Elle correspond à l'interaction des 3 paramètres U, N et P avec les valeurs de : 10 kV, 2 et 0,0094 respectivement. En appliquant cette méthode, on a obtenu une valeur de champ électrique minimale, ce qui lui offre une protection contre les différentes contraintes.

Tableau IV. 3. Les différents paramètres par Taguchi L9

U	N	P	E
10	2	0,00944	15,070
10	4	0,01866	24,700
10	6	0,02788	26,460
20	2	0,01866	30,145
20	4	0,02788	49,400
20	6	0,00944	52,920
30	2	0,02788	45,220
30	4	0,00944	74,100
30	6	0,01866	79,400

IV.3.2. Méthode de ANOVA

L'analyse de la variance, également connue sous le nom d'ANOVA, est une méthode statistique utilisée pour déterminer si les moyennes de différents groupes proviennent de la même population. Les groupes sont définis par les modalités d'une variable qualitative, tandis que les moyennes sont calculées à partir d'une variable continue. Cette méthode est utilisée lorsque l'on mesure une ou plusieurs variables explicatives catégorielles qui ont une influence sur la loi d'une variable continue à expliquer. L'ANOVA peut être à un facteur, deux facteurs ou multifactorielle. Elle permet d'étudier le comportement d'une variable quantitative en fonction de variables qualitatives et peut être utilisée en combinaison avec d'autres méthodes telles que la MANOVA. Dans cette étude, les effets des paramètres de l'isolateur ont été évalués à l'aide de cette technique.

IV.3.2.1 Analyse de ANOVA

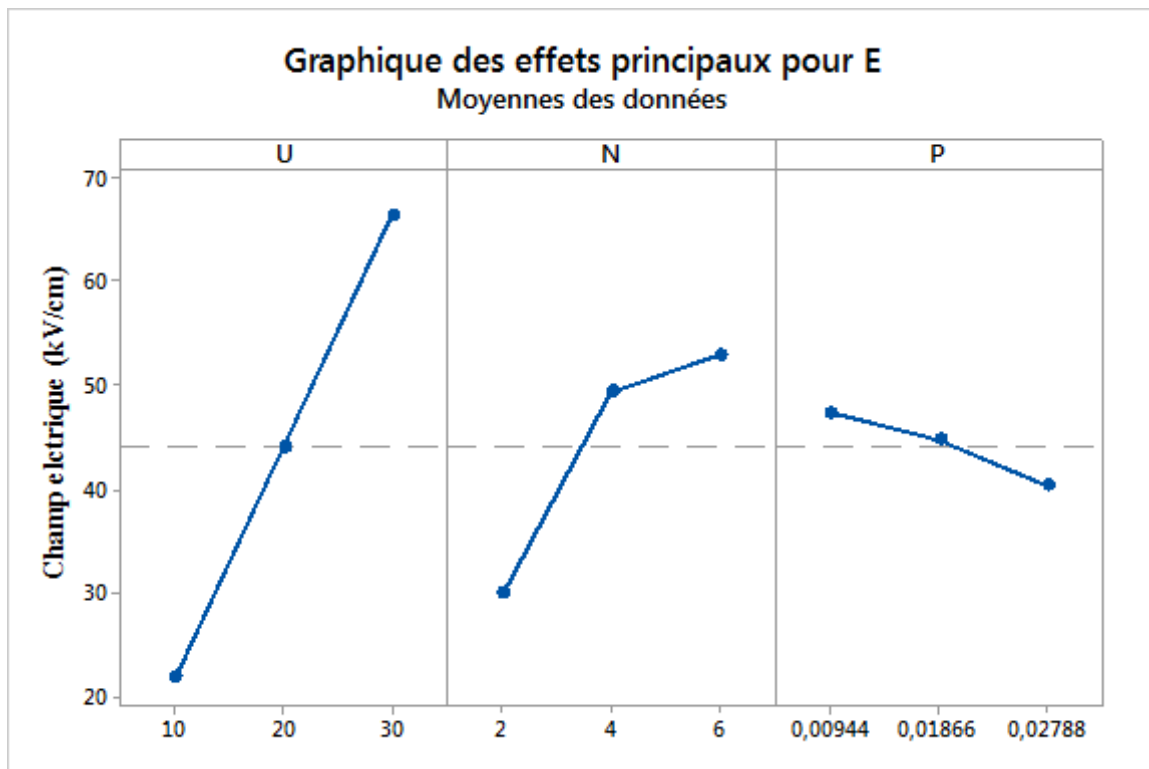


Figure IV. 19. Les effets principaux des paramètres U, N et P sur la valeur maximale du champ E

Les graphiques d'effets principaux et les effets d'interaction des paramètres de gouttelettes de l'eau peuvent être représentés graphiquement comme indiqué ci-dessus. La figure IV.19 présente l'effet de gouttelettes de l'eau sur la valeur maximale du champ E. On constate que le potentiel a un effet croissant sur le champ E maximal. D'un autre côté, nombre de gouttelettes déposées sur l'isolateur à un impact croissant sur le champ électrique maximal et la conductivité à un effet faible décroissant.

La figure IV.20 montre les tracés de contour des paramètres étudiés sur la variation de champ E maximale. Les courbes de niveau sont utilisées pour explorer la relation potentielle entre trois variables. Les tracés de contour affichent la relation tridimensionnelle en deux dimensions, avec des prédicteurs tracés sur les échelles x et y et les valeurs de réponse représentées par les contours, dont les points qui possèdent la même réponse se trouvant connectés pour diminuer des courbes de niveau de réponses apparaissent constantes.

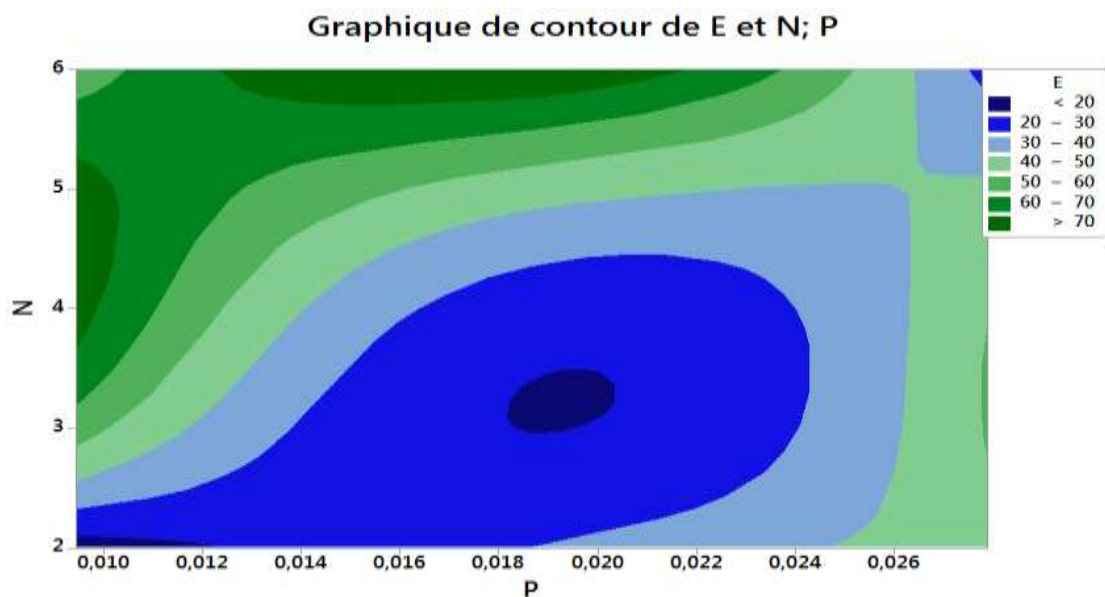
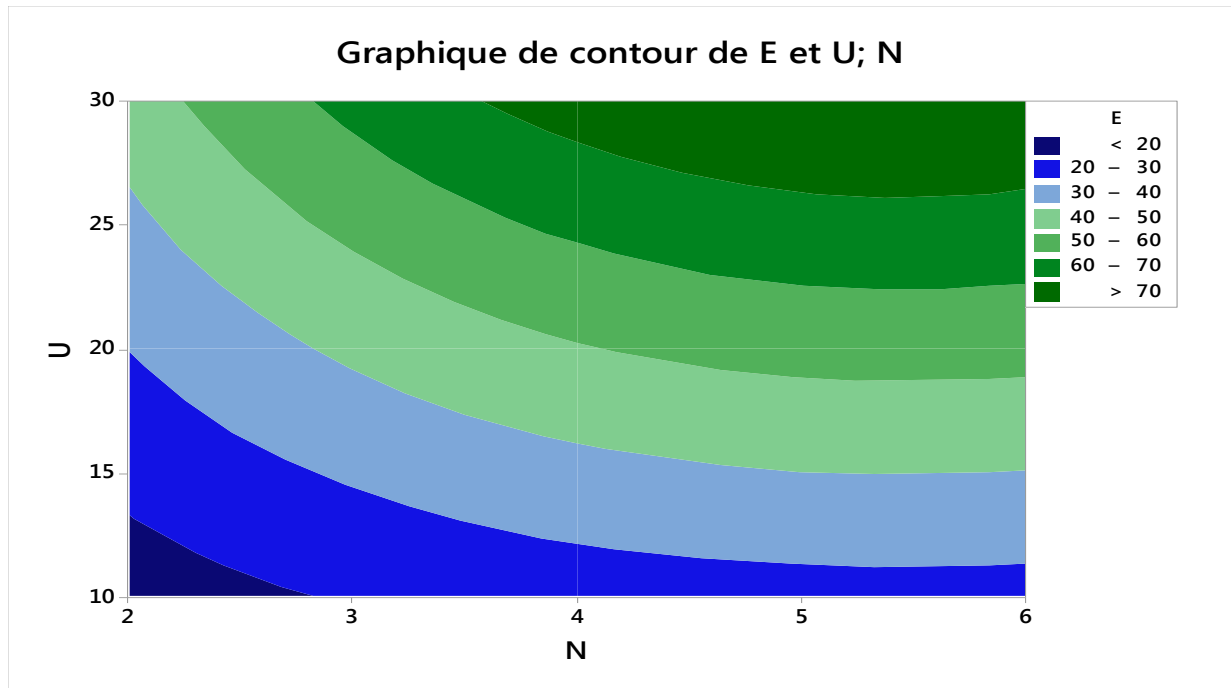


Figure IV. 20. Tracés de contour de la variation du champ E par rapport aux paramètres de N, U et P.

La figure IV.20(a) représente l'impact de tension appliquée en fonction de nombre de gouttelettes et la Figure.IV.20 (b) représente l'influence de nombre de gouttelettes de l'eau en fonction de pollution. On peut distinguer clairement les surfaces qui représentent l'intervalle de variation de champ électrique.

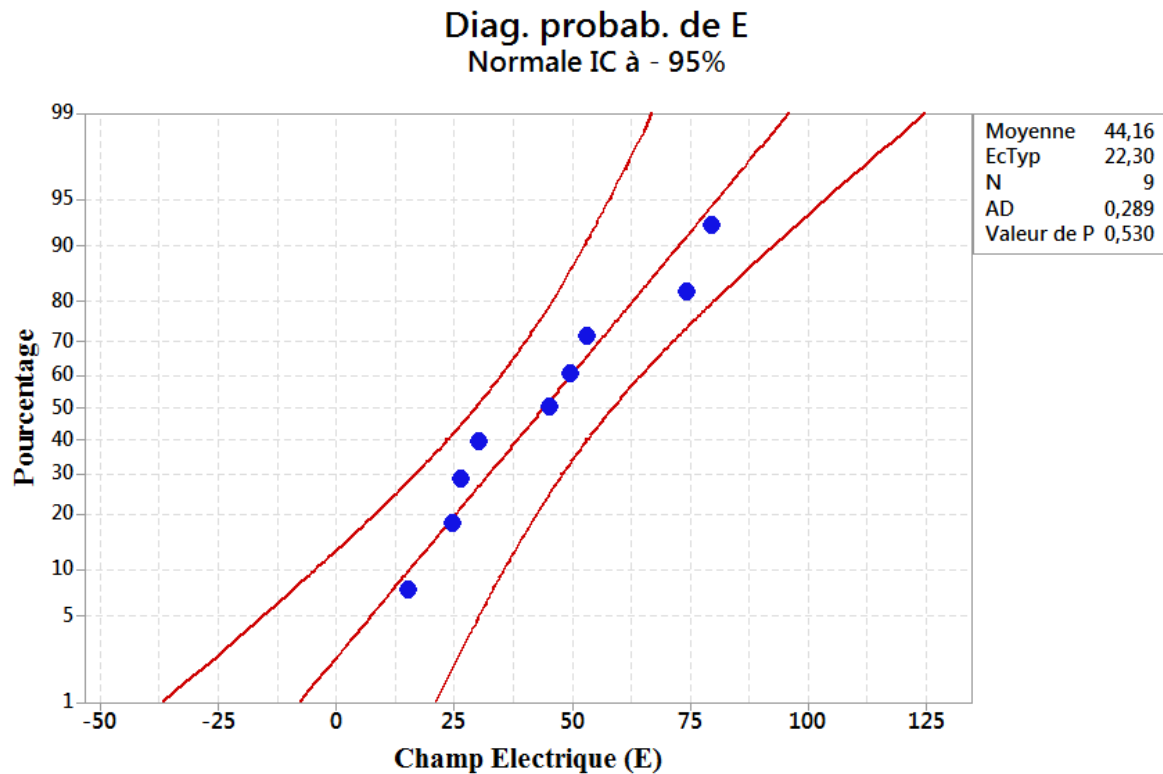


Figure IV. 21. Tracés de normalité avec des intervalles de confiance à 95% du champ E maximal.

Le test d'Anderson – Darling et les diagrammes de probabilité normaux des résidus par rapport à la réponse prévue pour la valeur maximale du champ E sont tracés sur la figure IV.21. Le diagramme de probabilité a été utilisé pour évaluer dans quelle mesure les données de champ électrique suivent une normale distribution. Le champ électrique a des valeurs du suivent de près la ligne de distribution ajustée. Le normal de la distribution semble être un bon ajustement aux données parce que les données suivent de près la ligne droite. Les intervalles de confiance sur un diagramme de probabilité montrent les bornes de confiance à 95 % pour les centiles individuels de la distribution. Ces intervalles forment le solide extérieur de lignes sur le graphique et peut être utilisé pour évaluer la précision du centile individuel estimations. Les intervalles de confiance ne doivent pas être utilisés pour évaluer l'ajustement de la distribution.

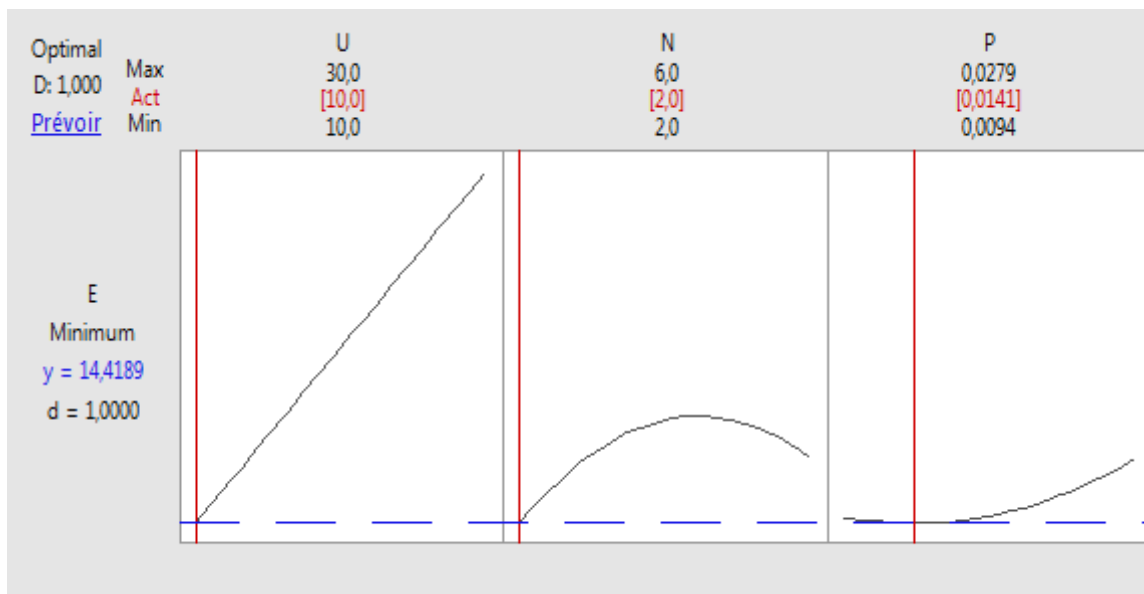


Figure IV. 22. Optimisation de la réponse pour les paramètres étudiés (les valeurs optimales sont en rouge)

La figure IV.22 présente les résultats d'optimisation MSR de la valeur maximale du champ électrique. On peut noter que la Tension 10 kV, la Conductivité faible et nombre de gouttelettes 2 peuvent être considérés comme des paramètres optimisés. Donc le champ E maximal est d'environ 14.4 kV / cm. L'effet de nombre de gouttelettes est le plus observé. Cependant, l'effet de conductivité est faible.

IV.4. Conclusion

La présence de gouttes d'eau au niveau de la surface des isolateurs polymères a une immense importance pour les fournisseurs d'énergie électrique. Ce problème nécessite une résolution en pour garantir et assurer la sécurité des opérateurs et la qualité des réseaux électriques aériens. L'utilisation de modèles numériques proposés ont permis d'évaluer la distribution du champ électrique. Les résultats de simulation montrent que dépôt de gouttes d'eau sur la surface de l'isolateur composite influe sur le champ électrique dont l'effet de nombre de gouttelette est le plus remarquable.

Chapitre IV

Conclusions Générales

Chapitre 05

Conclusions Générales

V.1. Conclusions générales

Les isolateurs polymères des composants sont plus utilisés dans les installations extérieures des réseaux électriques. Leur croissance est liée à leurs avantages par rapport aux isolateurs traditionnels. On citera notamment : la légèreté, une bonne résistance mécanique par rapport au poids, une résistance aux actes de vandalisme, de meilleures performances en présence de la pollution et dans les conditions humides. L'utilisation exagérée des isolateurs composites a encouragé de faire plusieurs recherches dans le but d'améliorer et maîtriser et les performances en service de ce type d'isolateurs. L'objectif de ce mémoire est de comprendre les performances des isolateurs polymères en présence de gouttes de l'eau. Dans ce travail, une étude théorique (simulations) de la distribution de champ électrique le long un isolateur composite en présence de gouttes d'eau déposées sur sa surface. Le champ électrique est étudié en fonction de plusieurs paramètres de gouttelettes de l'eau tels que le nombre de gouttes déposées, potentiel et la conductivité. L'impact de dépôt de gouttes d'eau sur la distribution du champ a été évalué par une méthode numérique. Tous d'abord, un modèle de simulation utilisant la méthode des éléments finis (MEF), a été élaborée sous COMSOL Multiphysics. L'objectif de de simulations réalisées était est de voir l'effet des gouttes d'eau sur la distribution du champ et la potentiel électrique sur long de la ligne de fuite de l'isolation pour de la présence des gouttes d'eau sur sa surface.

Les résultats de simulations montrent que la présence de gouttes d'eau provoque une distorsion considérable dans la configuration des lignes équipotentiels et des lignes de champ électrique auprès de la goutte d'eau et que l'intensité du champ électrique est significativement augmentée. L'analyse ANOVA a confirmé que des facteurs tels que potentiel, nombre de gouttelettes ont une influence notable sur la distribution de champ électrique sur la surface de l'isolateur, par contre, conductivité de la goutte d'eau ne présente pas d'influence significative sur la distribution du champ électrique.

Références

Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] R. Hacckam, "Outdoor HV Composite polymeric Insulators", IEEE Transaction on Diélectric Insulator, vol. 6, pp. 557-585, 1999.
- [2] F. AOUABED, « Contribution à l'étude et à l'évaluation des performances électriques des isolations en silicone polluées sous tension alternative », Thèse de Doctorat en Sciences université Ferhat abbés Sétif en 2018.
- [3] J. Saison, « Etude du phénomène d'humidification des dépôts naturels et artificiels de pollution sur des isolateurs électriques », Thèse de Doctorat En Sciences, Université de Strasbourg, France, 1992.
- [4] G. Talal, « Comportement d'un modèle d'isolateur sous tension i pulsionnelle », Mémoire de magister en génie électrique, laboratoire de haute tension, ENP, Alger 2007
- [5] A.B.D. Cassie, S. Baxter, "Les surfaces super hydrophobes" , Trans. Faraday Soc., 40, 546, 1944
- [6] F.Amir, K.H.Namaoui, « Etude du comportement d'un isolateur pollué soumis à une tension alternative », mémoire d'ingénieur U .de Bejaia, juin 2004.
- [7] Technique De L'ingenieur, « 1S, D4, partie I ».
- [8] T. Egron "Modification d'un pylône de ligne aérienne de transport d'énergie pour le rehaussement des conducteurs," Mémoire de maîtrise Université de Sherbrooke (Québec) Canada. 2014.
- [9] T. Young. "An essay on the cohesion of fluids," Phys. Rev. Lett., ol. 95, pp. 65-87, 1805.
- [10] IEC62073., "Guidance on the measurement of wettability of insulator surfaces," IEC/TS 62073, Ed.1.0, 200.
- [11] Y. Yuan and T. Lee. "Contact angle and wetting properties," Springer Series in Surface Sciences, vol. 51, pp. 1-27, 2013.
- [12] IEC62073., "Guidance on the measurement of wettability of insulator surfaces," IEC/TS 62073, Ed.1.0, 200
- [13] C. Ely, P. J. Lambeth, J. S. T. Loms, D. A. Swift C.E.G.B, " Contournement des polymères humides et pollués l'ailette Booster", CIGRE, Rapport 15 - 02, Paris, France, 1978.
- [14] A. Mekaldi, H. Boujelthia, " Contribution à l'étude de la pollution des isolateurs haute tension dans la région électrique Annaba ", Génie Electrique, ENP 1984.

- [15] Z. Sahli, "Étude de la non uniformité de la pollution sur des caractéristiques de contournement des isolateurs réels pollués sous tension continue", Mémoire de Magister, Génie Electrique, UAM Bejaia.
- [16] F. Aouabed "Contribution à l'étude d'un circuit équivalent des isolateur synthétiques sous pollution en utilisant l'EMTP" Thèse magister Sétif 2010.
- [17] Performance d'un écran en silicone recouvert de gouttes d'eau dans un système à champ non uniforme sous tension continue positive mémoire master 2012 Mr: Tamart Md Tayeb, Mr: Dahdah Mohamed Bejaia
- [18] C. Multiphysics, "COMSOL Multiphysics User Guide (Version 5.0 a)," *COMSOL, AB*, 2014.
- [19] M.Teguar, A.Boubakeur, " Pollution des Isolateurs de Haute Tension ", Laboratoire de Haute Tension, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger (E.N.P.) janvier 2004.
- [20] https://fr.wikipedia.org/wiki/COMSOL_Multiphysics
- [21] Étude comportementale des gouttelettes d'eau déposées sur la surface d'un isolateur composite haute tension en présence du champ électrique » J. F. Hall, « History and bibliography of polymeric insulators for outdoor applications » *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 8, no. 1, pp. 376–385, 1993. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, mars 2014.
- [22] J. F. Hall, « History and bibliography of polymeric insulators for outdoor applications » *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 8, no. 1, pp. 376–385, 1993.
- [23] Jean. NDOUMBE, «Étude comportementale des gouttelettes d'eau déposées sur la surface d'un isolateur composite haute tension en présence du champ électrique » Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, mars 2014
- [24] C. Volât, «Modélisation Physique et Méthode 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 Post 735 KV Recouvert de Glace », Thèse de doctorat, UQAC, juin 2002.
- [25] C. Multiphysics, "COMSOL Multiphysics User Guide (Version 5.0 a)," *COMSOL, AB*, 2014.
- [26] A. Merouchi, « Caractérisation de revêtement anti-effluve à base de carbure de Silicium pour les machines haute tension », Thèse de maîtrise, MONTRÉAL, mars 2016.

يظهر العازل المركب أداءً كهربائيًا أفضل بالمقارنة مع العوازل التقليدية. ومع ذلك، تتمثل العيوب الرئيسية للعوازل المركبة في تدهورها وصعوبة اكتشاف هذه العيوب. في هذا العمل، يتم دراسة تأثير قطرات الماء على توزيع المجال الكهربائي على طول العازل المدروس. قمنا بإجراء دراسة حول توزيع المجال الكهربائي على نموذج بسيط للعازل المركب المطور باستخدام برنامج COMSOL ، مقدمًا تأثير قطرات الماء على توزيع المجال والجهد الكهربائي على سطح العازل المركب. تم إجراء المحاكاة باستخدام طريقة العناصر المحدودة (FEM) باستخدام برنامج COMSOL Multiphysics®. تؤكد نتائج المحاكاة أن وجود قطرات الماء على سطح العازل المركب يزيد من شدة المجال الكهربائي محليًا. يتم دراسة هذا كدالة لعدة عوامل مثل عدد القطرات الموزعة والجهد والناقلية. تظهر نتائج المحاكاة أن وجود قطرات الماء يزيد بشكل كبير من شدة المجال الكهربائي، خاصة في الحالات التي يوجد فيها زيادة في عدد القطرات، مما له تأثير كبير على توزيع المجال الكهربائي والجهد على سطح العازل. بالإضافة إلى ذلك، لا تؤثر ناقلية قطرات الماء بشكل كبير على توزيع المجال الكهربائي على طول العازل المركب. تم إجراء تحليل ANOVA بنجاح وتؤكد نتائج المحاكاة، مما يوفر فهمًا جيدًا حول التفاعل وتأثير العوامل المدروسة.

الكلمات الرئيسية: العازل المركب، المجال الكهربائي، قطرات الماء، COMSOL Multiphysics، ANOVA.

Abstract

The composite insulator exhibits better electrical performance compared to traditional insulators. However, the degradation of composite insulators and the difficulty in detecting defects are the main disadvantages of composite insulators. In this work, the influence of water droplets is studied. We conducted a study on the distribution of electric field on a simple model of composite insulator developed using COMSOL software, presenting the impact of water droplets on the distribution of field and electric potential on the surface of the composite insulator. The simulations were carried out using finite element method (FEM) with COMSOL Multiphysics® software. The simulation results confirm that the presence of droplets on the surface of the composite insulator locally increases the electric field. This is studied as a function of several parameters such as number of deposited droplets, potential, and conductivity. The simulation results show that the presence of water droplets significantly increases the intensity of electric field, especially in cases where there is an increase in number of droplets, which has a considerable influence on the distribution of electric field and potential on the surface of the insulator. Additionally, water droplet conductivity does not have a significant influence on electric field distribution along the insulator. ANOVA analysis was successfully performed and confirms simulation results, providing a good understanding about interaction and impact of studied parameters.

Keywords: Composite Insulator, Electric Field, Water Droplet, Comsol Multiphysics, ANOVA

Résumé

L'isolateur composite présente des meilleures performances électriques par rapport aux isolateurs traditionnels. Cependant, la dégradation des isolateurs composites et la difficulté d'en détecter les défauts constituent les principaux inconvénients des isolateurs composites. Dans ce travail, l'influence de gouttelettes de l'eau est étudiée. Nous avons établi une étude de la distribution du champ électrique sur un modèle simple d'isolateur composite développé à l'aide du logiciel comsol en présentant l'impact de gouttes d'eau sur la distribution de champ et du potentiel électrique sur la surface de l'isolateur composite. Les simulations ont été réalisées en utilisant la méthode des éléments finis (FEM) en utilisant le logiciel COMSOL Multiphysics®. Les résultats de simulation confirment que la présence des gouttelettes à la surface de l'isolateur composite accroît localement le champ électrique. Ce dernier est étudié en fonction de plusieurs paramètres de gouttelettes de l'eau tels que le nombre de gouttes déposées, potentiel et la conductivité. Les résultats de simulations montrent que la présence de gouttes d'eau augmente significativement l'intensité du champ électrique spécialement dans le cas d'augmentation de nombre de gouttelettes, là où on a marqué une influence considérable sur la distribution de champ électrique et du potentiel sur la surface de l'isolateur, en outre, la conductivité de la goutte d'eau ne n'a pas vraiment une influence significative sur la distribution du champ électrique le long de l'isolateur. L'analyse ANOVA a été réalisée avec succès et confirme les résultats obtenus par simulation et elle permet une bonne compréhension sur l'interaction et l'impact des paramètres étudiés.

Mots clés : Isolateur Composite, Champ électrique, Gouttelette d'eau, Comsol Multiphysics, ANOVA