

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université A. MIRA – BEJAIA
Faculté de Technologie
Département de Génie électrique



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Electromécanique

Spécialité : *Maintenance industrielle*

Thème

**Caractérisation de la silicone pour l'évaluation du
champ réactif**

Présenté par :

Mr. BOUMENDJEL Younes

Mr. HOCINE Aymene

Soutenu le 29/06 /2024, Devant le jury composé de :

Président : Dr. N. ZOUGAB

Examineur : Dr. B. YAHIAOUI

Promotrice : Dr. T. BELHOUL

Promotion : Juin 2024

Remerciements

Nous remercions « ALLAH » le tout puissant, pour nous avoir donné la force, et les moyens nécessaires pour mener à bien nos parcours académiques.

Merci à nos parents et nos frères pour leurs soutient et encouragement.

Nous tenons à remercier vivement Dr. Talit BELHOUL notre promotrice qui a fourni des efforts énormes, par ses informations ses conseils et ses encouragements, sa disponibilité, et sa qualité humaine.

Merci aux enseignants qui nous ont suivis durant nos 5 ans d'étude.

Merci à toute l'équipe du laboratoire de génie électrique de l'université de Bejaïa, et particulièrement à M.Z SAHLI.

Nous remercions les membres du jury qui ont accepté l'évaluation de la qualité de ce mémoire.

En dernier, nous exprimons nos remerciements à tous nos collègues de promotion 2024, et nos amis pour le soutien moral durant notre cursus.

Je dédie ce modeste travail

*A mes chers mère et père que Dieu les protège, plus que jamais les
Irremplaçables, pour son amour, ses conseils, ses encouragements et
ses prières.*

A mon frère Yakoub

A ma chère sœur Faiza

A ma famille et mes tous amis

A mon collègue Aymene

YOUNES

Je dédie ce modeste travail

*À mes chers parents, qui m'ont toujours soutenu avec amour et
bienveillance.*

*À mes frères et sœurs, en témoignage de notre lien familial, avec mes
vœux de bonheur, de santé et de réussite.*

À tous les membres de ma famille, pour leur soutien inconditionnel.

À tous mes amis.

À mon collègue Younes,

Aymene

Table de matières

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I

Recherche Bibliographique

I.1 Introduction	3
I.2 Matériaux isolants en électrotechnique	3
I.2.1 Définitions	3
I.2.2 Importance des matériaux isolants.....	4
I.2.3 Caractéristiques diélectriques des matériaux isolants	5
I.2.4 Classification des isolants.....	7
I.2.5 Matériaux isolants utilisés pour la fabrication des isolateurs	8
I.2.6 Différents types d'isolateurs	9
I.2.7 Choix d'isolateur	11
I.2.8 Application des matériaux isolants dans l'électrotechnique.....	11
I.2.9 Avantages et limitations des matériaux isolants.....	13
I.3 Silicone.....	14
I.3.1 Structure moléculaire de la silicone.....	14
I.3.2 Propriétés de la silicone	15
I.3.3 Familles de silicone	17
I.3.4 Domaines d'applications de la silicone	17
I.4 Conclusion.....	18

Chapitre II

Décharge électrique

II.1 Introduction.....	20
II.2 Historique de la décharge électrique	20
II.3 Généralités sur la décharge électrique	21
II.4 Définition d'une décharge électrique.....	21

Table de matières

II.5 Différents types de décharges électriques.....	21
II.5.1 Décharges électriques dans les gaz	22
II.5.2 Processus de décharges électriques dans le gaz	22
II.5.3 Décharge électriques dans les isolants liquides.....	26
II.5.4 Décharges électriques dans les solides.....	27
II.5.5 Mécanisme de claquage des isolants solides.....	27
II.5.6 Contournement	30
II.5.7 Tension de contournement	30
II.5.8 Tenue diélectrique de l'air.....	31
II.6 Conclusion	31

Chapitre III

Résultats Expérimentaux et Numériques

III.1 Introduction	32
III. 2 Circuit de mesure et de visualisation.....	32
III.3 Préparation de surface isolante	34
III.3.1 Préparation de la surface polluante	34
III.3.2 Mode d'application de la solution polluante sur la surface hydrophile	34
III.3.3 Mode d'application des gouttes d'eau sur la surface hydrophobe.....	35
III.3.4 Préparation d'une surface superhydrophobe.....	35
III.4 Modèle des isolateurs étudiés	36
III.4.1 Isolateur en silicone	36
III.4.2 Isolateur en verre (capot et tige)	36
III.5 Mode opératoire.....	37
III.5.1 Isolateur en silicone	37
III.5.2 Isolateur en verre (capot et tige)	37
III.6 Procédure de simulation	38
III.6.1 Identification des domaines dans le logiciel COMSOL Multiphysics.....	38

Table de matières

III.6.2 Présentation de l'interface de COMSOL Multiphysics 6.1	38
III.6.3 Description du modèle de simulation.....	39
III.7 Modélisations des cas étudiés	42
III.7.1 Isolateur en silicone	42
III.7.2 Isolateur en verre (Capot et tige)	42
III.7.3 Maillage	43
III.8 Étude du comportement d'un isolateur hydrophobe.....	44
III.8.1 Résultats pratiques	44
III .8.2 Résultats numériques	45
III.9 Étude du comportement d'un isolateur hydrophile	48
III.9.1 Résultats pratiques	48
III .9.2 Résultats numériques	49
III.10 Comparaison des résultats pratiques avec des résultats numériques	52
III.11 Conclusion	53
Conclusion générale	57
Références bibliographiques	59

Liste de figures

Chapitre I

Recherche Bibliographique

Figure I. 1: Distribution des résistances et des courants dans un isolant électrique	6
Figure I. 2: Surface hydrophobe en silicone	7
Figure I. 3: Isolateur en verre.....	8
Figure I. 4: Isolateur en céramique	9
Figure I. 5: Isolateur en matériau synthétique	9
Figure I. 6: Isolateur support.....	10
Figure I. 7: Schéma montrant l'utilisation d'isolateur traversé	10
Figure I. 8: Isolateur d'extrémité	11
Figure I. 9: Structure moléculaire de la silicone	15
Figure I. 10: Molécule de la silicone	15
Figure I. 11: Isolateur revêtu en silicone	18
Figure I. 12: Isolateur volumique en silicone	18

Chapitre II

Décharge électrique

Figure II. 1: Schéma d'un condensateur.....	22
Figure II. 2: Caractéristiques courant – tension pour différents régimes de la décharge sous tension continue	23
Figure II. 3: Courbe séparant les conditions en air résultant d'un claquage de Townsend (région inférieure) d'un claquage de type streamer (région supérieure)	24
Figure II. 4: Courbe de Paschen	25
Figure II. 5: Modèle de Leader	26
Figure II. 6: Claquage des isolants solide électromécanique.....	28
Figure II. 7: Claquage d'un isolant solide « claquage dans le plexiglas entre deux électrodes pointe-plan ».....	29
Figure II. 8: Développement de la décharge sur la surface	30

Liste de figures

Chapitre III

Résultats Expérimentaux et Numériques

Figure III. 1: Schéma de mesure de tension de contournement et de visualisation de la décharge électrique	33
Figure III. 2: Appareil de Commande manuelle du transformateur (AC)	33
Figure III. 3: Voltmètre de crête (Vc)	33
Figure III. 4: Circuit d'essai au laboratoire de haute tension	34
Figure III. 5: Appareil de mesure de la conductivité volumique (Conductimètre à sonde mobile)	34
Figure III. 6: Photo montrant la micropipette utilisé	35
Figure III. 7: Application des gouttes d'eau et des gouttes polluante	35
Figure III. 8: Réalisation d'une surface superhydrophobe	36
Figure III. 9: Isolateur en silicone utilisé.....	36
Figure III. 10: Isolateur en verre (capot et tige)	37
Figure III. 11: Interface de COMSOL Multiphysics 6.1	39
Figure III. 12: Etat de surface de l'isolateur en silicone.....	42
Figure III. 13: Etat de surface de l'isolateur en verre	43
Figure III. 14: Maillage des trois cas étudiés de l'isolateur en silicone	43
Figure III. 15: Maillage pour les trois cas étudiés de l'isolateur en verre	43
Figure III. 16: Propagation de la décharge électrique le long de la surface d'un isolateur en silicone	44
Figure III. 17: Distribution du potentiel électrique et lignes équipotentielles réparties sur un isolateur en silicone.....	45
Figure III. 18: Lignes du champ électrique aux voisinage d'une ailette d'un isolateur en silicone	46
Figure III. 19: Lignes de référence de fuite et de coupe sur un isolateur en silicone.....	46
Figure III. 20: Distribution de potentiel électrique le long d'un isolateur en silicone	47
Figure III. 21: Distribution de champ électrique le long d'un isolateur en silicone.....	48
Figure III. 22: Visualisation de la décharge électrique propagée sur la surface d'un isolateur en verre propre (a), pollué (b) et revêtu en couche superhydrophobe (c)	49
Figure III. 23: Distribution de potentiel et des lignes équipotentielles sur un isolateur en verre	50
Figure III. 24: Lignes de champ électrique simulé d'un isolateur en verre.....	50

Liste de figures

Figure III. 25: Ligne de référence de potentiel électrique et champ électrique d'isolateur en verre.....	51
Figure III. 26: Distribution de potentiel électrique le long d'un isolateur en verre.....	51
Figure III. 27: Distribution de champ électrique le long d'un isolateur en verre	52

Liste de tableaux

Chapitre III

Résultats Expérimentaux et Numériques

Tableau III. 1: Propriétés de l'isolateur en silicone	40
Tableau III. 2: Propriétés de l'isolateur en verre	40
Tableau III. 3: Propriétés des conditions utilisées.....	40

Liste de symboles

Liste des symboles

Acronymes

HTA : Dispositif de protection contre les surcharges hautes tension

HTB : Dispositif de protection contre les surcharges basses tension

XLPE : Polyéthylène réticulé

PVC : Polychlorure de vinyle

PZT : Matériau ferroélectrique de piézoélectricité

UV : Ultraviolets

R : Groupe de carbone

MEF : Méthode des éléments finis

Tr : Transformateur

AC : Appareille de commande manuelle du transformateur

Vc : Voltmètre crête

HT : Haute tension

AC : Courant alternatif

DC : Courant continu

2D : Bidimensionnel

3D : Tridimensionnel

Symboles

ρ : Résistivité électrique d'un matériau ($\Omega.m$)

R_s : Résistance surfacique (superficielle) (Ω)

R_v : Résistance volumique (Ω)

R_i : Résistance d'isolement (Ω)

s : Surface de l'isolant entre électrodes (m^2)

l : Distance entre deux électrodes (inter électrode) (m)

δ : Angle de dissipation ($^\circ$)

ϵ_a : Permittivité absolue d'un matériau isolant (F/m)

ϵ_0 : Permittivité du vide (F/m)

ϵ_r : Permittivité relative (F/m)

C_x : Capacité entre deux électrode (F)

C_0 : Capacité de la configuration d'électrodes dans le vide (F)

P : Longueur de la chaîne polysiloxanes (m)

α : Nombre d'électrons libre par unité de distance (C)

Liste de symboles

γ : Rapport entre le nombre d'électrons libre et le nombre d'ions positifs

i : Courant (A)

P : Pression de gaz (Pa)

E : Champ électrique (V/m)

U_c : Tension critique de claquage (kV)

Y : Module d'Young (Pa)

W_{el} : Energie électrostatique (Joule)

$W_{méc}$: Energie mécanique (Joule)

f : Fréquence (Hz)

∇ : Opérateur Laplacien, qui représente la divergence du gradient d'un champ (m^{-1})

V : Potentiel électrique (kV)

ρ : Densité de charge (C/m^2)

ϵ : Permittivité électrique de milieu (F/m)

σ : Conductivité électrique (S/m)

H : Champ magnétique auxiliaire (A/m)

J : Densité de courant (A/m^2)

D : Déplacement électrique (C/m^2)

Résumé-

Dans ce présent travail, nous avons étudié le comportement des isolateurs haute tension, en particulier ceux utilisés dans le réseau de transport d'énergie sous conditions environnementales défavorables. Pour cela, dans notre travail nous avons effectué des nombreux essais pratiques au laboratoire de haute tension de l'université de Bejaia, et des essais de simulation en utilisant le logiciel COMSOL Multiphysics 6.1. Les deux types d'isolateurs étudiés sont en silicone et en verre (capot et tige). Pour ce dernier, nous avons rajouté une couche superhydrophobe sur sa surface pour avoir un revêtement protecteur à l'humidité et aux dépôts polluants. Les différents cas d'atmosphère, propre, humide et pollué ont été pris en considération. Les essais pratiques ont pour but d'étudier la tension de tenue et la décharge électrique. L'utilisation du logiciel permet d'étudier le champ et le potentiel électrique aux voisinages de ces isolateurs.

Les résultats pratiques et numériques nous ont permis d'étudier le rôle de la silicone dans le transport d'énergie et pour une meilleure protection, on utilise un revêtement superhydrophobe.

Mots clés : Isolateur haute tension, les gouttes d'eau, la pollution, COMSOL Multiphysics, la conductivité électrique, le contournement, le champ électrique, le potentiel électrique.

Abstract:

In this present work, we have studied the behavior of high-voltage insulators, particularly those used in the power transmission network under adverse environmental conditions. For this purpose, in our work we have carried out numerous practical tests in the high-voltage laboratory of the University of Bejaia, and simulation tests using the COMSOL Multiphysics 6.1 software. The two types of insulators studied are silicone and glass (cap and rod). For the latter, we have added a superhydrophobic layer on its surface to have a protective coating against moisture and polluting deposits. Different cases of clean, humid and polluted atmosphere have been taken into consideration. The practical tests aim to study the withstand voltage and electrical discharge. The use of the software allows to study the electric field and potential in the vicinity of these insulators.

The practical and numerical results have allowed us to study the role of silicone in power transmission and for better protection, we use a superhydrophobic coating.

Keywords: High voltage insulator, water droplets, pollution, COMSOL Multiphysics, electrical conductivity, flashover, electric field, electric potential.

Introduction

Générale

Introduction générale

Les réseaux électriques transportant l'énergie à haute tension étaient principalement composés des lignes électriques suspendues à des pylônes. Les structures et les équipements de ces lignes sont exposés à des conditions météorologiques parfois extrêmes. De multiples aléas naturels comme les éclairs, les rafales de vent puissantes ainsi que la concentration excessive de polluants atmosphériques ont progressivement entraîné des dysfonctionnements dans l'intégralité du réseau. Il est alors devenu impératif de concevoir un dispositif capable d'isoler des conducteurs à différentes potentiels. Cependant, l'élaboration d'un isolant performant dans des conditions humides s'est avérée ardue. Les premières tensions d'essai de fonctionnement ne dépassaient pas 50 à 60 kV. Mais au fil du temps, les besoins en tensions opérationnelles plus élevées se sont fait ressentir, menant au développement d'isolateurs aux contraintes électriques et mécaniques accrues, ainsi qu'à l'avènement de nouvelles conceptions pour les systèmes de transmission [1].

Les conditions météorologiques défavorables, telles que la pluie ou le brouillard, favorisent l'accumulation de particules polluantes sur les isolateurs du réseau électrique. Cette accumulation diminue considérablement la résistance de surface des matériaux isolants, les rendant ainsi vulnérables aux risques de contournement électrique. L'humidité présente dans ces couches de pollution facilite le passage de courants de fuite à leur surface. Par la suite, ces zones surchauffées assèchent la couche polluante, aggravant davantage les problèmes d'isolation. Ceci modifie considérablement la répartition du potentiel, pouvant mener à l'apparition d'arcs partiels, eux-mêmes susceptibles d'évoluer jusqu'au contournement complet de l'isolateur.

L'objectif clé de cette étude réside dans l'analyse approfondie des profils de répartition du potentiel électrostatique et de l'intensité du champ électrique le long de deux types distincts d'isolateurs. Ces derniers ont été soumis à diverses sollicitations, englobant des facteurs électriques et environnementaux. L'étude a permis d'évaluer l'influence de ces multiples contraintes sur le comportement et les performances des isolateurs, offrant ainsi une compréhension détaillée de leur réponse dans des conditions variées. Pour mesurer précisément les distributions du potentiel et du champ électrique, une méthode numérique alternative basée sur le logiciel commercial (COMSOL Multiphysics) a été utilisée en complément des essais expérimentales.

Notre étude se concentre sur l'étude des isolateurs haute tension avec déverse condition pour l'évaluation du champ réactif.

Ce mémoire comprend trois chapitres :

Le premier sera consacré à une recherche bibliographique présentant l'ensemble des types d'isolants utilisés dans le génie électrique, en explicitant leurs propriétés respectives.

Le deuxième abordera les phénomènes de décharges électriques, en détaillant les différents types existants.

Le dernier chapitre exposera et interprétera les résultats obtenus lors des différents essais appliqués à deux types d'isolateurs, en silicone et en verre, sous tension alternative, menées au laboratoire haute tension de l'université de Bejaïa. Nous y présenterons les simulations bidimensionnelles (2D) réalisées à l'aide du logiciel commercial basé sur la méthode des éléments finis (COMSOL Multiphysics), portant sur la répartition du potentiel et du champ électrique le long des isolateurs en silicone et en verre. Et nous comparons les données pratiques avec les résultats numériques

Enfin, une conclusion générale représentera une synthèse globale de notre travail.

Chapitre I :
Recherche
Bibliographique

I.1 Introduction

Les isolateurs jouent un rôle crucial dans le transport de l'énergie électrique en assurant à la fois un support mécanique aux parties sous haute tension et une isolation électrique entre ces dernières et les parties mises à la terre ou énergisées. Historiquement, les premiers isolateurs étaient fabriqués en verre et en céramique, mais récemment, les isolateurs composites ont gagné en importance dans le domaine des réseaux de transport d'énergie haute tension.

Les isolateurs synthétiques, tels que ceux utilisés dans les lignes électriques aériennes, ont connu une popularité croissante en raison de leur résistance exceptionnelle à la contamination, de leur robustesse mécanique et de leur excellente hydrophobicité, généralement attribuée à la silicone. Les propriétés électriques, physiques, mécaniques et chimiques des silicones les rendent particulièrement adaptées aux applications en moyenne et haute tension, offrant ainsi des solutions fiables et durables pour les infrastructures électriques.

I.2 Matériaux isolants en électrotechnique

I.2.1 Définitions

1.2.1.1 Isoler

L'action d'isoler est le moyen d'empêcher la conduction entre conducteurs électriques soumis à des tensions différentes [2].

1.2.1.2 Isolant

On appelle isolant électrique toute matière dont la conductivité électrique est nulle, ou dans la pratique est très faible. A l'échelle atomique une matière est dite isolante si elle ne contient pas d'électrons libres qui permettent le passage du courant électrique [2].

1.2.1.3 Isolation

C'est un système constitué par des matériaux isolants ou un assemblage de matériaux isolants à considérer avec les parties conductrices associées [2].

1.2.1.4 Isolateur

L'isolateur est un composant destiné à maintenir et à isoler une ou plusieurs pièces électriquement conductrices. Ou d'un point de vue électrique, les isolateurs doivent offrir une grande résistance d'isolement afin qu'ils ne soient ni contournés en surface, ni perforés à travers leur masse par les tensions élevées qu'ils ont à supporter normalement [2].

Dans le génie électrique, les isolants sont utilisés pour séparer électriquement des conducteurs à différents potentiels, protéger les personnes et les équipements, d'isoler les lignes de transport électrique des pylônes mise à la terre que ce soit électriquement et mécaniquement. Ils sont également essentiels dans la conception des condensateurs en tant que diélectriques.

I.2.1.5 Diélectrique

Un diélectrique est un matériau qui ne conduit pas facilement le courant électrique lorsqu'il est soumis à un champ électrique, mais qui peut être polarisé par ce champ.

Les matériaux diélectriques peuvent être polarisés lorsqu'ils sont soumis à un champ électrique, ce qui signifie que leurs charges positives et négatives internes sont séparées et que leurs molécules s'alignent dans la direction du champ électrique. Cette polarisation contribue à la capacité du matériau à stocker de l'énergie électrique. Pour une meilleure isolation électrique d'un matériau la constante diélectrique doit être élevée.

I.2.2 Importance des matériaux isolants

Les matériaux isolants jouent un rôle crucial dans le domaine électrique. Ils sont essentiels pour [3] :

1. Assurer la sécurité des personnes et des biens :

- En isolant les conducteurs électriques, les matériaux isolants préviennent les chocs électriques et les courts-circuits qui peuvent causer des blessures, des incendies et des dommages matériels.
- Ils constituent une barrière physique entre les conducteurs électriques et les personnes ou les objets qui pourraient entrer en contact avec eux.
- La résistance électrique élevée des matériaux isolants permet de limiter le courant de fuite et de prévenir les arcs électriques.

2. Gérer le flux d'électricité :

- Les matériaux diélectriques sont essentiels pour guider le flux électrique dans les circuits, orientant ainsi l'électricité vers les composants spécifiques qui en ont besoin.
- Ils permettent de confiner le champ électrique dans les zones où il est utile et de l'empêcher de se propager dans des zones indésirables.
- La permittivité diélectrique des matériaux isolants influence la capacité des circuits électriques à stocker et à restituer l'énergie.

3. Optimiser les performances des systèmes électriques :

- En réduisant les pertes d'énergie dues aux courants de fuite, les matériaux isolants contribuent à améliorer l'efficacité énergétique des systèmes électriques.
- Ils permettent de minimiser les échauffements dus aux courants de Foucault et aux pertes diélectriques.

- Les propriétés thermiques des matériaux isolants contribuent à la dissipation de la chaleur dans les systèmes électriques.

4. Prolonger la durée de vie des équipements électriques :

- En protégeant les conducteurs électriques de la corrosion et de l'usure, les matériaux isolants contribuent à prolonger la durée de vie des équipements électriques.
- Ils constituent une barrière protectrice contre les agents environnementaux tels que l'humidité, les produits chimiques et les contaminants.
- La résistance mécanique des matériaux isolants permet de les utiliser dans des environnements difficiles.

I.2.3 Caractéristiques diélectriques des matériaux isolants

Les caractéristiques diélectriques des matériaux isolants déterminent leur capacité à résister et à isoler contre les flux de courant électrique, ce qui est crucial pour assurer la fiabilité et la sécurité des systèmes électriques et électroniques. Les matériaux isolants sont caractérisés par :

I.2.3.1 Rigidité diélectrique

La rigidité diélectrique d'un isolant désigne la tension nécessaire pour perforer un centimètre d'épaisseur de cet isolant. En d'autres termes, c'est le champ électrique auquel un matériau isolant est exposé avant qu'une perforation ne se produise, l'empêchant ainsi de remplir efficacement sa fonction. De manière pratique, la rigidité diélectrique est calculée en divisant la tension de perforation par la distance entre les électrodes sous tension, selon les conditions d'essai spécifiées.

I.2.3.2 Résistivité électrique

La résistivité d'un matériau, souvent représentée par la lettre grecque rho (ρ), indique sa capacité à entraver le passage du courant électrique. Elle correspond à la résistance d'un segment de matériau d'un mètre de longueur et d'un mètre carré de section, et est mesurée en ohm-mètre ($\Omega \cdot m$). Lorsqu'un champ électrique est appliqué, les charges se mettent en mouvement, générant un courant électrique dans un matériau diélectrique. Ce courant peut se manifester soit à travers le diélectrique lui-même, soit à sa surface, produisant ainsi un courant de fuite volumique et un courant de fuite surfacique. Chacun de ces courants développe une résistance respective, une résistance surfacique (R_s), une résistance volumique (R_v) et une résistance d'isolement (R_i) qui est la somme des deux résistances [4].

$$\rho = R_i * \frac{s}{l} \quad \text{(I.1)}$$

ρ : Résistivité électrique d'un matériau ($\Omega \cdot m$) ;

R_i : Résistance d'isolement (Ω) ;

s : Surface de l'isolant (m^2) ;

l : distance interélectrode (m).

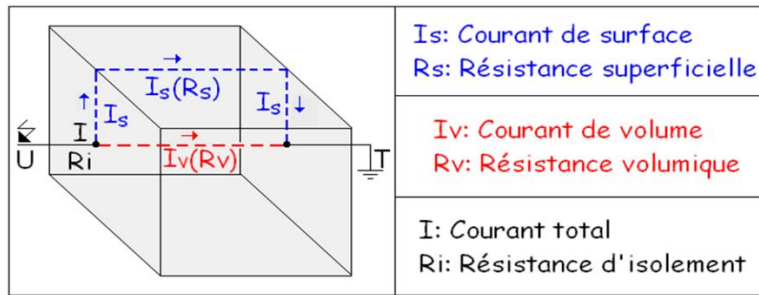


Figure I. 1: Distribution des résistances et des courants dans un isolant électrique

I.2.3.3 Facteur de dissipation

Ce facteur nous renseigne sur la puissance dissipée dans le matériau en réponse à l'application d'un champ électrique variable. Il est représenté par la tangente de l'angle δ , qui mesure le décalage par rapport à la phase idéale entre le courant et la tension dans un condensateur avec le matériau diélectrique considéré.

I.2.3.4 Permittivité

La permittivité est une mesure de la réponse d'un matériau à un champ électrique, exprimée en farads par mètre [F/m]. Dans la plupart des cas, la permittivité relative ϵ_r est préférée, représentant le rapport entre la permittivité absolue ϵ_a et celle du vide ϵ_0 ($8.85 \cdot 10^{-12}$ F /m) [5].

La formule de la permittivité relative est :

$$\epsilon_r = \epsilon_a / \epsilon_0 \tag{I.2}$$

$$\epsilon_r = C_x / C_0 \tag{I.3}$$

Avec :

C_x : Capacité entre deux électrodes ;

C_0 : Capacité de la configuration d'électrodes dans le vide.

I.2.3.5 Conductivité électrique

La conductivité électrique est essentielle dans de nombreux domaines, de l'électronique à la science des matériaux. Elle dépend généralement de la présence et de la mobilité des porteurs de charge, tels que les électrons dans les métaux ou les ions dans les solutions. Les matériaux avec une conductivité élevée sont souvent utilisés dans la fabrication de fils électriques, de composants électroniques et de capteurs.

I.2.3.6 Superhydrophobicité

La superhydrophobicité est la capacité remarquable de certains matériaux à repousser l'eau très efficacement. Les surfaces superhydrophobes ont une très faible attirance pour l'eau, ce qui fait que les gouttes d'eau forment des petites billes presque parfaitement rondes. Ces billes roulent et glissent facilement sur la surface sans y adhérer, entraînant avec elles les saletés et impuretés. Cette propriété confère aux matériaux une excellente résistance à l'humidité et aux liquides. Elle trouve de nombreuses

applications pratiques comme la création de revêtements imperméables, de textiles qui restent propres, d'équipements médicaux protégés des liquides, mais aussi pour réduire la résistance à l'écoulement de l'eau sur les coques de navires et les ailes d'avions.



Figure I. 2: Surface hydrophobe en silicone

I.2.4 Classification des isolants

Les isolants sont classés en trois types : gazeux, liquides et solides. On en trouve dans la nature ou bien synthétisés.

I.2.4.1 Isolants gazeux

Les principaux isolants gazeux sont : l'air atmosphérique, l'azote, les gaz rares, l'hydrogène, l'air et les gaz secs sont de bons isolants, ils ont des propriétés particulières telles que [2] :

- Rigidité diélectrique variable suivant la nature de gaz
- Permittivité faible, les gaz sont auto-régénérateurs
- Phénomène d'ionisation des gaz
- Légers.

I.2.4.2. Isolants liquides

Les liquides diélectriques sont généralement utilisés en association avec des solides (transformateurs, condensateurs, câbles). Leur rôle est de se substituer aux vacuoles qui sont le siège de décharges partielles. L'utilisation des isolants liquides a pour but d'améliorer le pouvoir de coupure de certains appareils électriques par l'amélioration des conditions d'extinction de l'arc électrique, mais aussi d'assurer une bonne isolation électrique et permettre un bon refroidissement [6].

I.2.4.3 Isolants solides

L'origine des isolants solides est minérale, organique ou résineuse. On en trouve un choix très varié répondant à diverses utilisations, telles que [7] :

- le verre, utilisé pour la confection des isolateurs de lignes haute tension.
- la céramique, très utilisée pour les matériels HTB des postes électriques.

-la plupart des plastiques, en particulier polyéthylène sous sa forme réticulée (XLPE) et PVC, tous deux utilisés pour l'isolation des câbles.

-le Polypropylène, utilisé en particulier dans les condensateurs en HTA ou HTB.

-le mica, qui n'est guère plus utilisé de nos jours dans l'industrie électrotechnique.

-la bakélite, autrefois très utilisée pour l'appareillage électrique basse tension.

-le téflon, utilisé pour certaines pièces des disjoncteurs à haute tension.

-certains matériaux sous forme cristalline pérovskite comme le PZT qui sont actuellement en cours de développement pour être utilisés comme condensateur à capacité variable.

I.2.5 Matériaux isolants utilisés pour la fabrication des isolateurs

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

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

I.2.5.1 Verre

Le verre est un alliage dur, fragile (cassant) et transparent à la lumière visible. C'est un corps solide constitué d'oxyde de silicium (silice SiO_2) et de fondants, le constituant principal du sable.



Figure I. 3: Isolateur en verre

Le verre est un matériau amorphe qui présente un désordre structural important et un phénomène de transition vitreuse. En dessous de sa température de transition, qui est très élevée, le verre se présente à l'état vitreux. En génie électrique, il est spécialement utilisé pour la fabrication des isolateurs de lignes haute tension [8].

I.2.5.2 Céramique

Le développement de la fabrication des céramiques datant depuis longtemps à cause de leurs performances. Pour les isolateurs qui vont être utilisés dans des lieux où il y a des contraintes mécaniques très importantes, on utilise de préférence des céramiques à grains très fins. Souvent on

trouve les céramiques dans les postes : isolateurs supports, couverture isolante des sectionneurs, des disjoncteurs, des transformateurs de potentiel, des bornes de traversées des transformateurs de puissance [9].



Figure I. 4: Isolateur en céramique

I.2.5.3 Matériaux synthétiques

Les isolateurs en matériaux synthétiques sont composés d'un centre en fibres de verre imprégnées d'une résinée et d'un revêtement à ailettes de type élastomère. Parmi Leurs avantages, nous pouvons citer qu'ils sont légers et présentent une grande résistance mécanique. Ils ont de bonnes propriétés hydrophobes et peuvent être utilisés dans des conditions de pollution très sévères L'inconvénient de ces isolateurs est le vieillissement sous l'effet des différentes contraintes auxquelles ils sont soumis (électriques, mécanique, atmosphériques...) [9].

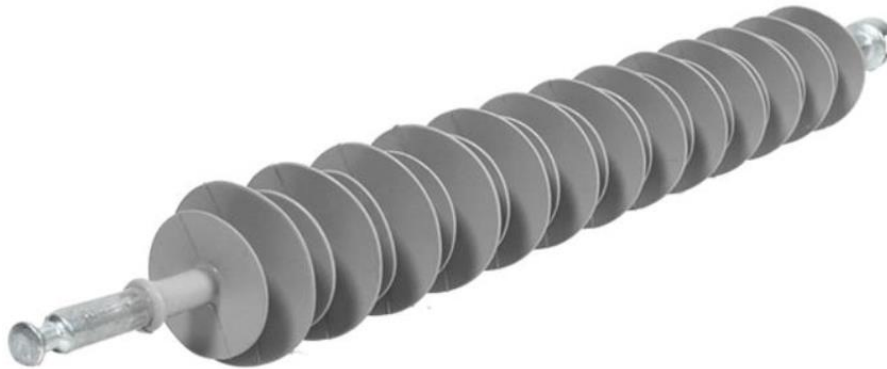


Figure I. 5: Isolateur en matériau synthétique

I.2.6 Différents types d'isolateurs

Les diélectriques solides sont largement adoptés dans les infrastructures électriques, tant dans les lignes aériennes que dans les postes de transformation. Leur utilisation se décline en différentes modalités.

I.2.6.1 Isolateurs supports

Les isolateurs de support sont des composants isolants conçus pour maintenir et isoler les éléments conducteurs lors de traversées. Leur fonction principale est de servir de supports, assurant

l'isolation des éléments conducteurs des structures traversées. Par exemple, dans les postes de transformation, ils sont employés comme supports pour les jeux de barres [10].



Figure I. 6: Isolateur support

I.2.6.2 Isolateurs de traversées

Les isolateurs de traversée sont des composants isolants conçus pour faciliter le cheminement d'un conducteur sous tension à travers un obstacle, tel qu'un mur ou une paroi, qui peut être plus ou moins conducteur. [10] On les retrouve également à l'extrémité des transformateurs.

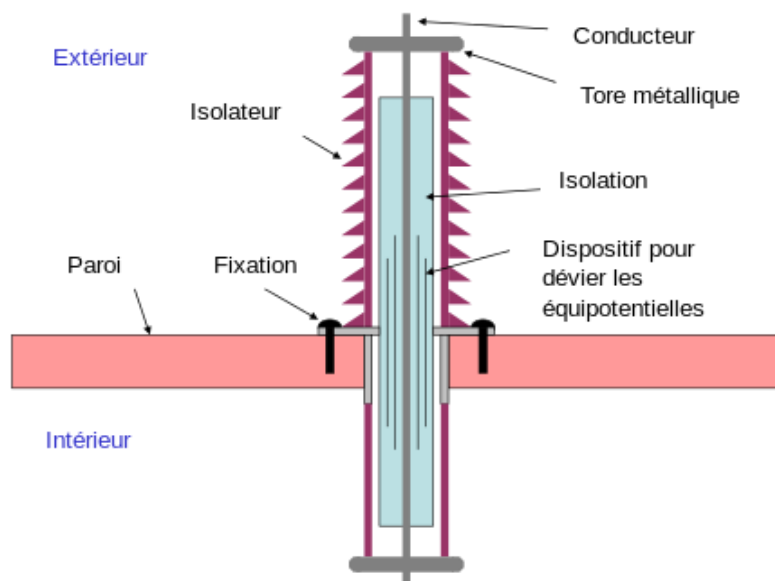


Figure I. 7: Schéma montrant l'utilisation d'isolateur traversé

I.2.6.3 Isolateur d'extrémité

Un isolateur d'extrémité est un dispositif isolant utilisé à chaque extrémité d'une ligne électrique ou d'un circuit pour assurer une séparation électrique entre le conducteur et la structure de support. Son rôle est de maintenir l'isolation électrique, de prévenir les fuites de courant et de garantir la sécurité du système. Ces isolateurs sont souvent utilisés là où les conducteurs entrent ou sortent des postes électriques ou des équipements, assurant ainsi une transition en douceur entre les parties conductrices et non conductrices du circuit électrique [10].

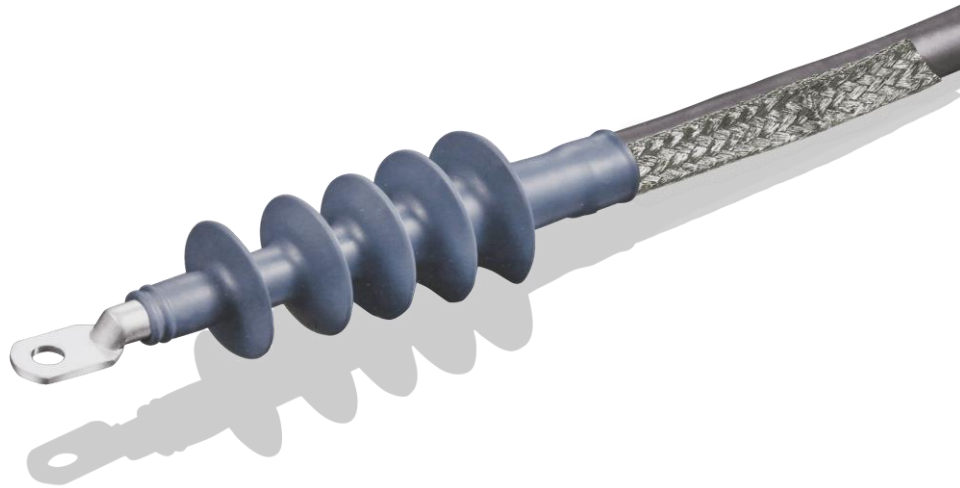


Figure I. 8: Isolateur d'extrémité

I.2.7 Choix d'isolateur

Les isolateurs les mieux adaptés sont ceux qui retiennent le taux de dépôt polluants le moins élevé, c'est-à-dire ceux qui possèdent les meilleures propriétés d'auto nettoyage. L'apparition d'une nouvelle usine à proximité d'un poste, la construction d'un ouvrage routier voisin, ou un événement météorologique exceptionnel peuvent changer la sévérité de pollution d'un site, ce qui peut provoquer des incidents qui influent directement sur l'isolation, pour cela il faut prévoir une protection pour les installations existantes contre les nouvelles sources de pollution ; et le choix des isolateurs se fait en fonction :

- De la tension de service de la ligne.
- Des efforts mécaniques auxquels ils sont soumis.
- Du prix de revient (rigide ou suspendue).
- Du degré de sévérité de la pollution du site d'utilisation.

I.2.8 Application des matériaux isolants dans l'électrotechnique

Les matériaux isolants sont essentiels dans les industries électriques, assurant la sécurité et l'efficacité des équipements tels que les transformateurs, les moteurs, les câbles et les condensateurs, etc. [11] Ces matériaux offrent des propriétés spécifiques telles qu'une haute résistivité électrique, une rigidité diélectrique élevée et une résistance aux conditions environnementales pour prévenir les courts-circuits et assurer le bon fonctionnement des systèmes électriques.

I.2.8.1 Transformateurs

Les matériaux isolants sont utilisés pour séparer les enroulements primaires et secondaires (papier imprégné d'huile, résines époxy, films polymères) afin d'empêcher les courts-circuits. Ils doivent avoir une haute résistivité électrique, une rigidité diélectrique élevée, une faible permittivité diélectrique et de bonnes propriétés thermiques et chimiques.

a- Isolation entre le noyau et les enroulements

Le carton pressé, les vernis isolants et les films polymères sont utilisés pour empêcher le passage du courant entre le noyau magnétique et les enroulements. Ils doivent avoir une haute résistivité électrique, une rigidité diélectrique élevée et de bonnes propriétés thermiques et mécaniques.

b-Isolation des bornes et des connexions

Les gaines thermorétractables, les manchons isolants et les rubans adhésifs protègent les bornes et les connexions contre les contacts accidentels et les arcs électriques. Ils doivent avoir une haute résistivité électrique, une rigidité diélectrique élevée et une résistance à la chaleur et aux produits chimiques.

I.2.8.2 Moteurs

a- Isolation des fils conducteurs

Les vernis émaillés, les fils gainés (polyester, polyamide, polyimide) et les rubans adhésifs enrobent les fils conducteurs pour empêcher les fuites de courant. Ils doivent avoir une haute résistivité électrique, une résistance à la chaleur et aux produits chimiques, et de bonnes propriétés mécaniques.

b- Isolation entre les tôles magnétiques

Le papier kraft et les films polymères (polyester, polypropylène) séparent les tôles magnétiques du stator et du rotor pour réduire les pertes par courants de Foucault. Ils doivent avoir une haute résistivité électrique et de bonnes propriétés diélectriques et mécaniques.

c- Isolation des fentes d'aération

Les mastics et les résines scellent les fentes d'aération pour empêcher la contamination par la poussière et l'humidité. Ils doivent avoir une bonne adhérence et une résistance à la chaleur et aux produits chimiques.

I.2.8.3 Câbles

a- Gaine extérieure

Le polyéthylène réticulé (XLPE), le polychlorure de vinyle (PVC) et le caoutchouc protègent les conducteurs contre les dommages mécaniques et l'environnement extérieur. Ils doivent être résistants à l'abrasion, aux intempéries, aux produits chimiques et aux UV.

b- Isolation entre les conducteurs

Le papier kraft, les rubans adhésifs et les films polymères (polyéthylène, polypropylène) séparent les conducteurs pour empêcher les courts-circuits. Ils doivent avoir une haute résistivité électrique et une rigidité diélectrique élevée.

c- Isolation des terminaisons et des connecteurs

Les gaines thermorétractables, les manchons isolants et les mastics protègent les terminaisons et les connecteurs contre les contacts accidentels et les arcs électriques. Ils doivent avoir une haute

résistivité électrique, une rigidité diélectrique élevée et une résistance à la chaleur et aux produits chimiques.

I.2.8.4 Condensateurs

a- Diélectrique

Les films polymères (polyester, polypropylène), les céramiques et les électrolytes liquides stockent l'énergie électrique entre les armatures du condensateur. Ils doivent avoir une haute permittivité diélectrique, un faible facteur de dissipation et une résistance à la chaleur et aux produits chimiques.

b- Enrobage

Les résines époxy et les vernis protègent le diélectrique et les armatures contre les dommages mécaniques et l'environnement extérieur. Ils doivent avoir une bonne adhérence, une résistance à la chaleur et aux produits chimiques.

I.2.9 Avantages et limitations des matériaux isolants

Avant d'examiner les avantages et les inconvénients des matériaux isolants, il est crucial de reconnaître leur rôle central dans la sécurité, l'efficacité énergétique et la fiabilité des installations électriques. Cependant, il est également nécessaire de prendre en compte les défis potentiels tels que le coût, l'impact environnemental et la complexité d'installation qui peuvent accompagner leur utilisation.

I.2.9.1 Avantages

a- Sécurité électrique : Les matériaux isolants constituent une barrière essentielle contre le passage du courant électrique, réduisant ainsi le risque de chocs électriques et d'incendies. Ils contribuent à la protection des personnes et des installations électriques.

b- Efficacité énergétique : En limitant les pertes d'énergie par conduction et convection, les matériaux isolants jouent un rôle crucial dans la conservation de l'énergie et la réduction des émissions de CO₂. Ils contribuent à la lutte contre le changement climatique et à la transition énergétique.

c- Durabilité : En protégeant les câbles et les composants électriques des agressions extérieures (humidité, produits chimiques, etc.), les matériaux isolants prolongent la durée de vie des installations électriques et réduisent les coûts de maintenance.

d- Fiabilité : En minimisant les risques de court-circuit et de pannes, les matériaux isolants garantissent le bon fonctionnement des installations électriques et contribuent à la sécurité des biens et des personnes.

e- Polyvalence : Une large gamme de matériaux isolants est disponible sur le marché, offrant des propriétés et des caractéristiques variées pour répondre aux exigences spécifiques de chaque application.

I.2.9.2 Inconvénients

a- Coût : Le prix des matériaux isolants peut varier considérablement en fonction de leur type, de leurs performances et de leur complexité. Certains matériaux, notamment les nanomatériaux, peuvent être particulièrement coûteux.

b- Impact environnemental : La production et l'élimination de certains matériaux isolants peuvent avoir un impact négatif sur l'environnement. Il est important de choisir des matériaux écoresponsables et de privilégier les filières de recyclage.

c- Propriétés physiques : Les propriétés des matériaux isolants peuvent varier en fonction de la température, de l'humidité et d'autres facteurs environnementaux. Il est important de prendre en compte ces variations lors de la sélection et de l'installation des matériaux.

d- Complexité d'installation : La mise en place de certains matériaux isolants peut être complexe et nécessite une expertise particulière. Il est important de faire appel à des professionnels qualifiés pour garantir une installation correcte.

I.3 Silicone

Les silicones sont des composés inorganiques constituées d'un mélange de silicium et d'oxygène. Il s'agit de matières plastiques présentes aussi bien sous la forme liquide que solide.

Elles sont produites à hauteur d'environ un million de tonnes par an, avec une croissance constante. Leur méthode de fabrication, mise au point par Müller en Allemagne pendant la seconde guerre mondiale et par la suite industrialisée par E. G. Rochow aux États-Unis, demeure pertinente aujourd'hui après des décennies d'améliorations continues [12].

Parmi eux, les polysiloxanes, ou caoutchoucs de silicone, se distinguent par leur utilisation répandue. Contrairement aux caoutchoucs traditionnels à base de carbone, ils reposent sur une structure silicium-oxygène. Leur remarquable capacité à fonctionner dans une large plage de températures (-85 à +250 °C), tout en conservant leurs propriétés, en fait des matériaux prisés dans des applications telles que l'industrie électrique, électronique, automobile et médicale. Bien qu'ils présentent des propriétés mécaniques relativement faibles, ils se démarquent par leur inertie physiologique, ce qui les rend adaptés à une utilisation médicale, notamment dans la fabrication de prothèses. Leur résistance aux huiles hydrocarbonées est généralement limitée, sauf dans le cas des élastomères silicones fluorés, plus coûteux mais appréciés pour leur performance dans des environnements sévères comme l'aéronautique [12].

I.3.1 Structure moléculaire de la silicone

La structure moléculaire des silicones est basée sur des chaînes de polysiloxane, qui sont constituées d'unités répétitives de siloxane ($-O-Si-O-$). Ces chaînes peuvent varier en longueur et en composition en fonction des groupes fonctionnels attachés [13].

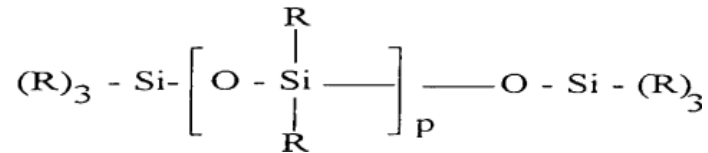


Figure I. 9: Structure moléculaire de la silicone

La structure moléculaire des silicones peut être représentée par les équations suivantes, où P présente un nombre entier de 0 à 150 correspondant à la longueur de la chaîne de polysiloxanes, et R représente chacun un groupe alkyle ou alcoxy de 1 à 10 atomes de carbone, cyclo alkyle de 3 à 10 atomes de carbone, un groupe phényle, un groupe réactif, un halogène ou un hydrogène :

$-\text{Si}-(\text{OR})_2-\text{Si}-(\text{OR})_2-$ (chaîne principale)

$-\text{Si}-(\text{R1})-(\text{OSi}-(\text{R2})_2)-\text{P}-\text{Si}-(\text{R1})-(\text{OSi}-(\text{R2})_2)-\text{P}-$ (chaîne de polysiloxane)

Les silicones présentent plusieurs avantages par rapport à leurs homologues organiques, dont une meilleure résistance à la chaleur, à l'oxydation et aux rayons UV. La nature du groupe R influence les propriétés chimiques des silicones, telles que leur caractère hydrophobe ou hydrophile, leurs propriétés rhéologiques et leur capacité à être lubrifiante ou anti-adhérente.

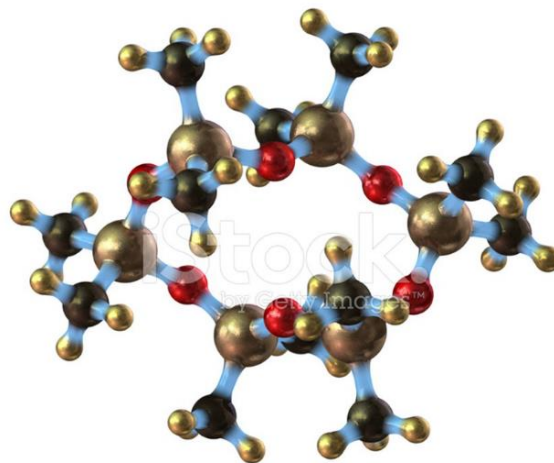


Figure I. 10: Molécule de la silicone

I.3.2 Propriétés de la silicone

Grâce à leur structure chimique spécifique, les silicones se révèlent idéaux pour les applications en moyenne et haute tension, offrant une gamme étendue de propriétés électriques, physiques, mécaniques et chimiques remarquables.

I.3.2.1 Hydrophobicité

Comparativement à d'autres matériaux, les silicones se démarquent par leur exceptionnelle capacité d'imperméabilisation à long terme, connue sous le nom d'hydrophobicité. Cette caractéristique est cruciale pour les isolateurs composites à base d'élastomère silicone. Même après de nombreuses années, ces isolateurs ne laissent pas pénétrer l'eau, mais plutôt la font perler à leur surface. Ils réduisent ainsi les courants de cheminement et préviennent les décharges électriques même en cas de forte

pollution, en transmettant leurs propriétés hydrophobes aux dépôts de surface par un processus de transfert. Ces propriétés uniques des élastomères silicones spécialement formulés garantissent l'hydrophobicité des isolateurs en service [14].

I.3.2.2 Nettoyage

Il est rarement nécessaire de nettoyer les isolateurs, sauf en cas de salissures importantes, telles qu'un encrassement axial par de grands oiseaux ou la prolifération de moisissures. Les moisissures apparaissent généralement en raison d'un stockage inadéquat dans un espace non ventilé, entraînant la condensation sur les isolateurs. Dans de tels cas, l'utilisation d'un solvant volatil comme l'acétone, le toluène, le trichloréthylène ou l'isopropanol peut être nécessaire. Il est essentiel d'appliquer le solvant sur un chiffon non pelucheux pour nettoyer la surface de l'isolateur, en évitant de verser directement le solvant sur celui-ci.

I.3.2.3 Tenue aux UV [15]

La stabilité de la chaîne Si-O confère aux silicones une haute résistance au spectre ultraviolet de la lumière solaire. Par comparaison aux autres matériaux, même les climats agressifs des régions côtières ou désertiques n'entachent pratiquement pas leurs propriétés ; l'élastomère silicone ne présente par exemple qu'une légère altération de ses propriétés mécaniques après un test accéléré d'exposition aux intempéries de 3000 heures.

I.3.2.4 Tenue au feu

Le point d'inflammation des silicones se situe au-delà de 340 °C, d'où leur haute sécurité de fonctionnement. Et en cas d'inflammation, ils ne dégagent pas de gaz toxiques. [15] C'est pourquoi on les utilise principalement dans les applications exigeant une haute protection anti-incendie, comme par exemple. Dans le métro ou dans les tours d'immeubles.

I.3.2.5 Elasticité

Les silicones se distinguent des thermodurcissables par leur élasticité caoutchouteuse, qui leur permet de subir d'importantes déformations réversibles sous contrainte mécanique. Capables d'atteindre des allongements considérables, pouvant aller jusqu'à 500 %, ils peuvent retrouver leur forme initiale en restituant l'énergie absorbée lors de la déformation. Cette haute élasticité facilite leur montage et permet l'adoption de nouvelles techniques telles que la rétraction à froid pour les accessoires de câbles. [16] De plus, les silicones conservent leur élasticité même à des températures aussi basses que -45 °C, ce qui les rend adaptés aux applications en haute altitude ou dans les régions polaires.

I.3.2.6 Propriétés diélectriques

Les silicones se distinguent par leur résistance électrique élevée et leur faible facteur de perte diélectrique, ainsi que par leur très haute résistance électrique et leur rigidité diélectrique durable. Comparativement à d'autres isolants, leur vieillissement électrique est minime.

I.3.3 Familles de silicone

La famille des silicones est constituée de polymères inorganiques qui se distinguent par leur structure moléculaire à base de chaînes silicium-oxygène. [18] Ces polymères présentent une grande variété de groupes fonctionnels attachés, tels que des groupes alkyle, alcoxy, cyclo alkyle, phényle, halogènes ou hydrogène. Cette diversité de groupes fonctionnels confère aux silicones des propriétés uniques et des applications variées.

Les silicones se déclinent généralement en trois principales catégories :

I .3.3.1 Fluides de silicone

Ces fluides ont une viscosité constante sur une large plage de températures et peuvent être hydrophobes. Ils sont utilisés comme lubrifiants, agents déroulants, fluides de transfert de chaleur et dans d'autres applications nécessitant une faible tension superficielle.

I.3.3.2 Résines de silicone

Ces résines sont utilisées dans la fabrication de vernis, d'adhésifs, de revêtements protecteurs et d'autres produits nécessitant une bonne résistance à la chaleur et aux produits chimiques.

I.3.3.3 Élastomères de silicone

Ces matériaux se caractérisent par leur élasticité et leur adhérence nulle sur la plupart des surfaces. Ils sont largement utilisés pour fabriquer des joints d'étanchéité, des moules souples, des pièces d'isolation et d'autres produits nécessitant une flexibilité et une durabilité élevées.

I.3.4 Domaines d'applications de la silicone

Les silicones occupent une place prépondérante dans l'isolation électrique, que ce soit à la surface ou dans le volume des équipements. Leur remarquable hydrophobicité et leur capacité à maintenir leurs propriétés diélectriques dans des conditions extrêmes en font un choix privilégié pour de nombreuses applications. Cependant, leurs caractéristiques mécaniques peuvent parfois nécessiter des adaptations selon les exigences spécifiques de chaque utilisation.

I.3.4.1 Isolation surfacique

Les élastomères silicones sont largement utilisés pour l'isolation extérieure en raison de leur excellente hydrophobicité à la surface. Cette caractéristique les rend efficaces pour protéger les équipements électriques contre l'humidité et les contaminants extérieurs. De plus, leur capacité à retrouver leur hydrophobicité après des décharges couronnes est un avantage crucial pour maintenir leur performance dans des environnements électriques exigeants [19]. Cependant, leur faible dureté peut limiter leur utilisation dans des applications nécessitant une résistance mécanique élevée, d'où l'utilisation fréquente comme revêtement de céramiques plus rigides.



Figure I. 11: Isolateur revêtu en silicone

I.3.4.2 Isolation volumique

Dans le domaine de l'isolation volumique, les élastomères silicones sont de plus en plus utilisés pour des applications moyenne et haute tension, telles que dans les câbles, les terminaisons de câbles et les barres d'alternateurs soumis à des températures élevées.



Figure I. 12: Isolateur volumique en silicone

Leur capacité à résister aux températures élevées et à maintenir leurs propriétés diélectriques en fait un choix attrayant pour ces applications. Cependant, les contraintes mécaniques peuvent limiter la tension maximale qu'ils peuvent supporter, généralement autour de 6 kV pour les générateurs et les câbles moyenne tension [19].

I.4 Conclusion

Dans notre recherche bibliographique, nous avons présenté les matériaux isolants qui ont connus un large domaine d'utilisation, en cas particulier en génie électrique qui sont très intéressants pour l'isolation électrique comme, les revêtements des isolateurs électriques soient en basse tension ou haute tension.

La silicone est un matériau isolant largement utilisé dans le génie électrique, notamment pour les revêtements d'isolateurs électriques. Ses excellentes propriétés électriques et son caractère hydrophobe en font un choix idéal pour assurer une isolation efficace, tant pour les basses tensions que pour les hautes tensions. Sa capacité à repousser l'eau et sa résistance aux températures élevées en font un matériau fiable même dans des environnements difficiles. En résumé, la silicone offre une isolation électrique de haute qualité et une durabilité accrue.

Chapitre II :

Décharge

Électrique

II.1 Introduction

Malgré une recherche active de près de deux siècles, les phénomènes de décharge électrique continuent de susciter l'intérêt des scientifiques. Cette persistance peut sembler surprenante, mais elle s'explique par la complexité extrême de ces phénomènes et des mécanismes qui les sous-tendent. Néanmoins, ces dernières décennies ont vu des progrès significatifs dans l'amélioration des outils de diagnostic des décharges précoces, ce qui a permis une meilleure compréhension de leurs mécanismes d'initiation. Cette avancée a considérablement enrichi nos connaissances sur le sujet et a ouvert la voie à des applications encore plus diversifiées et étendues.

Les décharges électriques dans les solides sont des phénomènes complexes qui surviennent lorsqu'un matériau isolant est soumis à une tension électrique élevée, provoquant une rupture diélectrique. Ces décharges peuvent prendre la forme d'arcs électriques ou de décharges partielles, et sont souvent associées à des défauts ou à une détérioration du matériau isolant. Comprendre ces phénomènes est essentiel pour garantir la sécurité des équipements électriques, optimiser les performances des systèmes et développer de nouveaux matériaux isolants résistants.

II.2 Historique de la décharge électrique

L'exploration scientifique des décharges électriques a pris son envol au XVIIIe siècle, grâce à l'observation expérimentale des étincelles créées par des générateurs électrostatiques et des éclairs naturels [20].

Par la suite, des avancées significatives ont marqué l'histoire de la recherche sur les décharges électriques :

- **Premier arc électrique** : En 1803, V.V. Petrov produisit le premier arc électrique dans l'air en utilisant des piles puissantes. Humphrey Davy poursuivit ces études.
- **Découvertes de Faraday** : Entre 1831 et 1835, Michael Faraday étudia les décharges lumineuses en utilisant des tubes contenant des gaz sous une pression d'environ 100 Pa et soumis à 1000 Volts. Ces expériences ont permis de découvrir le rôle fondamental des électrons dans les décharges.
- **Théorie du plasma** : À la fin du XIXe siècle et au début du XXe siècle, les travaux de William Crookes et de Thomson dans la physique des décharges électriques ont contribué aux progrès de la physique atomique. Irving Langmuir introduisit le concept de plasma.
- **Modélisation et fréquence** : Au XXe siècle, l'étude des décharges électriques s'est étendue à la variation de fréquence, tandis que la modélisation a progressé grâce au développement d'applications de plus en plus nombreuses.

II.3 Généralités sur la décharge électrique

Quand on applique une tension électrique assez élevée à un isolant, cela peut permettre la circulation d'un courant composé de particules chargées grâce à l'ionisation partielle de l'isolant. C'est ce qu'on appelle une décharge électrique. Ce phénomène est particulièrement captivant car, en plus d'être courant dans notre quotidien et d'avoir de multiples usages technologiques, il se manifeste sous diverses formes et son explication nécessite la compréhension de plusieurs domaines de la physique.

Une décharge, c'est une conversion rapide de l'énergie électrique en énergie cinétique, puis en énergie d'excitation et d'ionisation des atomes et des molécules [21].

Le terme décharge électrique désigne des phénomènes variés :

- Un élément ou composant électrique chargé (batterie d'accumulateur, condensateur...) perd sa charge plus ou moins lentement, en transférant sa charge électrique à un consommateur d'électricité (lampe, moteur...).
- Si on établit une tension suffisante entre deux électrodes placées dans un gaz, il se produit une décharge électrique (passage d'un courant électrique). Les manifestations de cette décharge varient avec la pression du gaz (Loi de Paschen). L'étude de ce phénomène relève de la physique des plasmas.

II.4 Définition d'une décharge électrique

La décharge électrique est un phénomène physique complexe qui se produit lorsqu'il y a un brusque transfert des charges électriques entre deux points présentant une différence de potentiel. Ce processus peut se manifester de manières variées selon l'état physique du milieu dans lequel il a lieu. Dans un milieu gazeux, comme l'air atmosphérique, la décharge électrique se caractérise généralement par la formation d'un canal conducteur qui permet le passage soudain d'un courant, se traduisant par des phénomènes visibles tels que des étincelles ou des éclairs. Lorsque la décharge électrique se produit dans un milieu liquide, comme de l'eau ou un autre fluide, elle peut entraîner des phénomènes de claquage diélectrique et la formation de chemins conducteurs au sein même du liquide. Inversement, si la décharge se produit entre un milieu gazeux et un milieu liquide, elle peut prendre la forme d'un arc électrique à la surface de contact entre les deux phases. Quel que soit l'état physique du milieu, le mécanisme fondamental de la décharge électrique repose sur l'ionisation du milieu et la création d'un canal conducteur permettant le transfert rapide de charges [22].

II.5 Différents types de décharges électriques

Les différents types de décharges électriques dépendent de la nature du milieu isolant dans lequel elles se produisent, à savoir les isolateurs solides, les gaz et les liquides.

II.5.1 Décharges électriques dans les gaz

Les gaz sont généralement considérés comme des isolants parfaits en raison de leur faible concentration de porteurs de charge. Sous l'effet d'un champ électrique, même faible, un courant électrique peut être observé, bien que ce courant soit généralement extrêmement faible, de l'ordre du 10^{-15} A, pour des tensions de l'ordre de plusieurs dizaines de kilovolts appliquées sur quelques centimètres d'air. Cependant, lorsqu'un champ électrique d'amplitude suffisante est appliqué, un courant bien plus important peut-être détecté, signalant ainsi une décharge électrique qui peut mener au claquage. Les phénomènes de décharges et de claquage peuvent varier en fonction de divers paramètres expérimentaux tels que la pression, la répartition du champ électrique et le type de tension appliquée, ce qui peut engendrer différents types de comportements, tant dans leur déroulement que dans leur nature [23].

II.5.2 Processus de décharges électriques dans le gaz

En théorie, un gaz est un isolant parfait car il est composé uniquement d'atomes ou de molécules neutres. Cependant, le déclenchement du processus d'ionisation dépend de la présence de certaines particules chargées, appelées germes, dans le gaz. Ces germes sont généralement des électrons, qui peuvent être produits par diverses sources.

La décharge électrique dans un gaz est un phénomène fondamental dans de nombreuses applications technologiques. Lorsqu'un gaz est soumis à une haute tension, des électrons peuvent être éjectés de la cathode par effet photoélectrique. Ces électrons, accélérés par le champ électrique entre les plaques du condensateur, ionisent les molécules de gaz présentes, produisant ainsi des paires d'ions (électrons et ions positifs). Ce processus d'ionisation se poursuit de manière continue, augmentant la concentration d'électrons et d'ions, et transformant le gaz en un plasma conducteur. Le champ électrique maintenu par la haute tension permet à cette décharge électrique de se poursuivre, créant un flux continu de courant entre l'anode et la cathode. Ce mécanisme est crucial pour le fonctionnement de dispositifs tels que les tubes à décharge, les lampes fluorescentes et les détecteurs de particules [24].

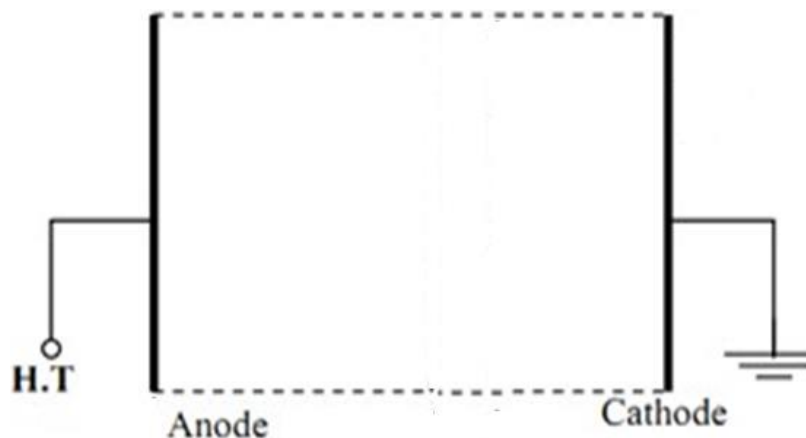


Figure II. 1: Schéma d'un condensateur

II.5.2.1 Caractéristique courant tension

Le graphe décrit les étapes de progression du courant électrique en fonction de l'augmentation de la tension.

- ✚ La région OA : Correspond à un régime d'avalanche initial, dans cette région, le courant augmente avec la tension. C'est là où les électrons libres commencent à ioniser le gaz. La tension augmente lentement car le gaz est encore peu conducteur.
- ✚ La région AB : Signifie que l'ionisation du gaz est suffisamment importante pour maintenir un courant constant malgré l'augmentation de la tension. Le point B marque le début du régime d'avalanche, où les collisions entre électrons libres et molécules neutres sont plus fréquentes.
- ✚ La région BC : Le régime d'avalanche complet, le courant augmente fortement avec la tension. C'est là où les électrons libres génèrent de nouvelles paires d'ions lors des collisions. La tension continue d'augmenter jusqu'à ce que le gaz atteigne sa pleine ionisation.

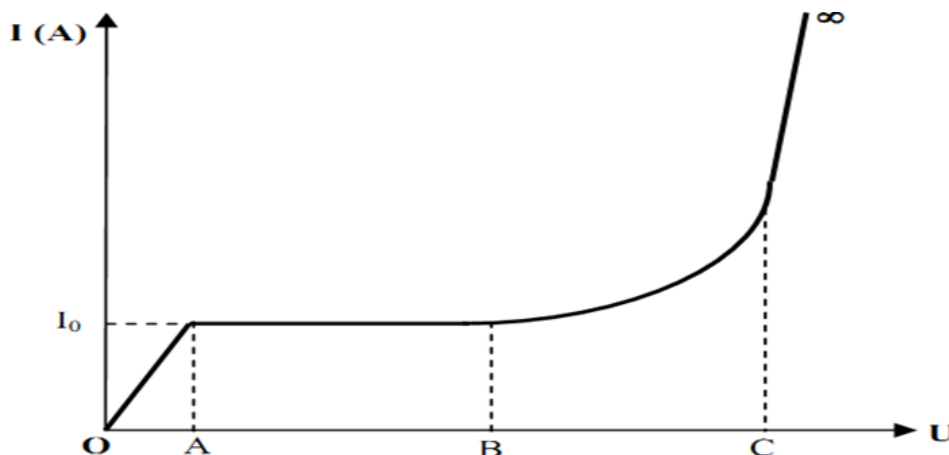


Figure II. 2: Caractéristiques courant – tension pour différents régimes de la décharge sous tension continue [25]

II.5.2.2 Théorie de Townsend

Townsend a établi deux coefficients pour décrire les processus d'ionisation dans l'air : l'un concerne l'ionisation par collision et l'autre concerne l'ionisation de surface, où des électrons sont émis de la cathode. Le premier coefficient (α) représente le nombre d'électrons libres par unité de distance dans la direction du champ électrique généré par l'ionisation par collision. Le deuxième coefficient (γ) représente le rapport entre le nombre d'électrons libérés de la cathode par émission secondaire et le nombre d'ions positifs qui ont bombardé la cathode. Selon Townsend, les ions positifs générés par l'avalanche électronique se dirigent vers la cathode (qui est négative). S'ils ont une énergie suffisante, ces ions peuvent arracher des électrons de la cathode, renforçant ainsi l'avalanche. Lorsque le champ électrique atteint une intensité suffisante, ce phénomène devient significatif. L'avalanche se maintient d'elle-même et peut provoquer un claquage, même lorsque la tension n'est plus appliquée [26].

Le critère de claquage selon Townsend est alors défini comme la tension pour laquelle le courant devient infini

$$i = \frac{i_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (\text{II.1})$$

Où γ est le second coefficient de Townsend, qui dépend du matériau de la cathode, du gaz et qui tient compte de la contribution des ions positifs, des photons et des espèces métastables.

Le claquage aura lieu quand la tension aux bornes des électrodes atteint un seuil V_t tel que l'implication du courant entre les électrodes tende vers l'infini :

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1 \quad (\text{II.2})$$

Et comme

$$e^{\alpha d} \gg 1 \Rightarrow \gamma e^{\alpha d} = 1 \Rightarrow \gamma = \frac{1}{e^{\alpha d}} \quad (\text{II.3})$$

Pour chaque valeur d' E/p , on trouve une valeur de d et une tension de rupture diélectrique en champ uniforme

$$V_c = E \cdot d_c \quad (\text{II.4})$$

Le critère de Townsend ainsi donné peut s'interpréter tout simplement en considérant que $e^{\alpha d}$ représente le nombre d'ions positifs créés par une avalanche primaire à partir d'un seul électron. Ces ions arrivant à la cathode vont produire en moyenne $\gamma e^{\alpha d}$ électrons secondaires [27].

II.5.2.3 Théorie de canal (streamer)

La plupart des décharges observées à la pression atmosphérique sont déclenchées par un phénomène de claquage appelé streamer. Selon le critère établi par Reather en 1940, lorsque le produit de la pression et de la distance entre les électrodes dépasse 1000 Torr.cm dans l'air, on peut anticiper un claquage de type streamer ; tandis qu'il résulte en un claquage de type Townsend s'il est inférieur. Un excès de tension conduit également à un claquage de type streamer. La figure II.3 présente une frontière entre ces deux types de claquage dans l'air, en fonction de la surtension appliquée et du produit $p \cdot d$ [28].

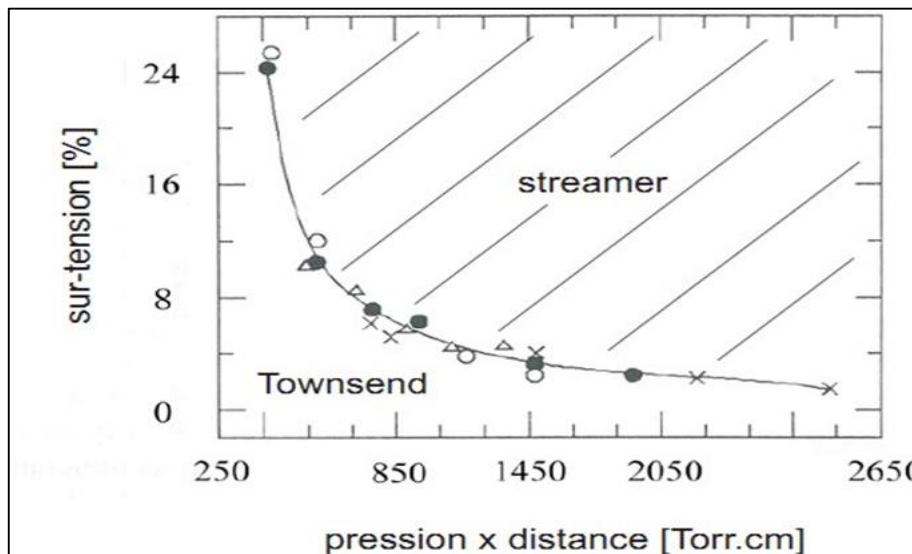


Figure II. 3: Courbe séparant les conditions en air résultant d'un claquage de Townsend (région inférieure) d'un claquage de type streamer (région supérieure) [29]

II.5.2.4 Loi de Paschen

La loi de Paschen décrit comment la tension critique varie en fonction du produit $p \cdot d$. Cette relation est significative du mécanisme d'ionisation en chaîne (ou avalanche de Townsend) qui est responsable du claquage : les électrons doivent gagner suffisamment d'énergie entre deux collisions pour ioniser les molécules du gaz et engendrer ainsi d'autres électrons. Cette analyse se concentre exclusivement sur l'ionisation provoquée par les électrons.

On peut calculer le premier coefficient d'ionisation α dans un champ uniforme selon la relation

$$\alpha = A \cdot P \cdot \exp\left(-B \cdot \frac{P}{E}\right) \quad (\text{II.5})$$

Où A et B sont des constantes ;

E : le champ électrique ;

P : pression de gaz.

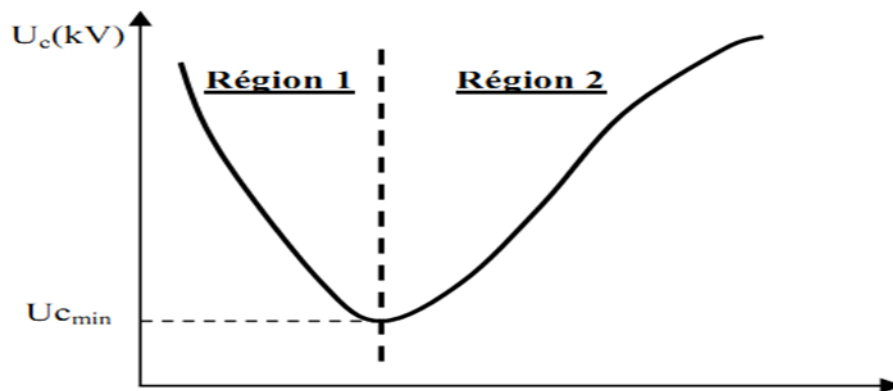


Figure II. 4: Courbe de Paschen [30]

U_c : tension critique de claquage ;

d : distance interélectrode ;

$U_{c_{min}}$: tension critique minimale ;

Si $U < U_{c_{min}} \Rightarrow$ pas de claquage (le minimum de Paschen).

II.5.2.5 Décharge couronne

Une intense photo ionisation se produit au niveau des avalanches primaires ou des streamers primaires qui se forment autour de l'électrode active sous haute tension, donnant naissance à la première couronne en quelques centaines de nanosecondes. Cette phase est suivie d'une période sombre où toute activité lumineuse est absente. Cela est dû au fait que les électrons produits par l'avalanche primaire neutralisent les ions positifs issus des avalanches secondaires. Le champ de charge dans l'espace diminue alors en dessous du seuil disruptif du gaz avant de recommencer à augmenter progressivement avec la tension appliquée. La période durant laquelle aucun autre streamer ne se forme est appelée période sombre. Dans le cas d'une décharge sous tension continue positive, il est supposé qu'un champ électrique de 5 kV.cm^{-1} est suffisant pour maintenir la propagation de ces streamers. [31] En respectant les limites de

champ, la période sombre est suivie d'un régime auto-stabilisé où une forte densité de streamers se forme autour de l'électrode sous haute tension, créant ainsi un canal de streamers qui se propage en direction de l'électrode opposée.

II.5.2.6 Décharge leader

Les observations expérimentales révèlent que le leader prend la forme d'un filament de trajectoire irrégulière, souvent sinueuse, se propageant généralement dans une direction inclinée par rapport au champ électrique appliqué. Sa vitesse de déplacement est influencée par la configuration de l'espace et la tension appliquée. À la pointe du canal du leader, une couronne de streamers se manifeste sous forme d'une décharge volumineuse à structure filamentaire, ionisant l'air à l'avant du canal. Ce processus explique comment le courant circulant dans la décharge en développement, entretient ou modifie la distribution du champ électrique dans l'espace. Les filaments de couronne émergent d'un point commun au niveau de l'électrode d'où émanent tous les streamers, appelé "stem cathodique". L'évolution vers un leader négatif s'explique de manière similaire à celle d'un leader positif, en cas d'une pointe de polarité négative. Les enregistrements stroboscopiques n'ont pas révélé de différences fondamentales entre ces deux types de leader. Sur un plan macroscopique, certaines hypothèses peuvent être avancées. Par exemple, le champ électrique en tête du leader négatif peut être calculé en extrapolant la formule de Peek. De plus, les modèles de leaders établis pour les configurations du type pointe positive - plan peuvent être appliqués en polarité négative lorsque la décharge est dominée par un leader négatif suivi d'une couronne de streamers [30].

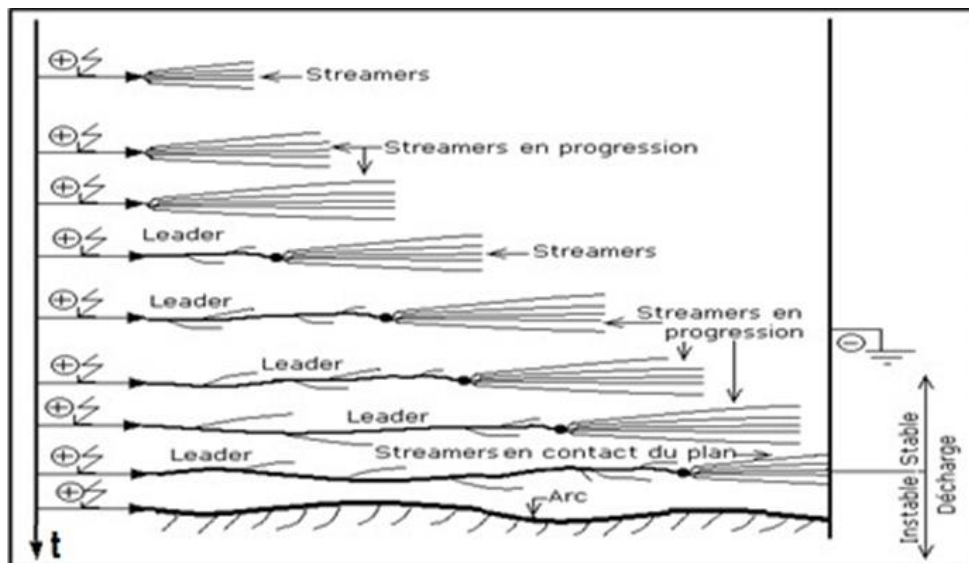


Figure II. 5: Modèle de Leader

II.5.3 Décharge électriques dans les isolants liquides

Dans le cas des isolants liquides, tels que les huiles minérales ou les esters synthétiques utilisés dans les transformateurs électriques, la décharge électrique se produit lorsque le champ électrique appliqué au sein du liquide devient suffisamment intense pour vaincre la rigidité diélectrique du milieu. Ce phénomène, appelé claquage diélectrique.

II.5.4 Décharges électriques dans les solides

Divers processus peuvent conduire au claquage dans un solide. Le claquage thermique dû à l'élévation de la température par effet Joule (à basse fréquence) ou par résonance avec la polarisation par orientation (autour du MHz).

- Claquage électromécanique dû aux forces de compression provoquée par le champ électrique.
- Claquage par streamer dû au déclenchement d'une avalanche électronique.
- Claquage par érosion dû essentiellement à l'effet des décharges partielles sur le long terme.

Dans les isolants solides, la décharge disruptive est appelée [32] :

- Perforation, lorsqu'elle traverse le matériau en y produisant souvent des dégâts irréversibles.
- Contournement, lorsque l'arc ne traverse pas l'isolant mais suit sa surface externe ou un chemin extérieur.

II.5.5 Mécanisme de claquage des isolants solides

Le claquage est l'aboutissement d'une série de processus complexes et interactifs. A la différence des gaz et des liquides, le claquage des isolants solides entraîne la destruction du matériau, et par conséquent, l'arrêt de fonctionnement du composant ou système dont il fait partie. Le claquage d'un matériau résulte de phénomènes complexes apparaissant lors de la phase de pré claquage rendant difficile l'énoncé d'une théorie unifiée pour expliquer le mécanisme de claquage. Cependant, c'est selon les processus de pré claquage, qu'on classe les mécanismes de claquage des diélectriques solides. Cette classification diffère selon les auteurs et n'est que conventionnelle. En général, on distingue quelques types de mécanismes de claquage des isolants solides.

II.5.5.1 Claquage des isolants solide thermique

Lorsqu'un matériau présente une conductivité électrique non nulle, il peut générer de la chaleur par effet Joule. Cette chaleur, à son tour, peut augmenter la conductivité du matériau, entraînant un phénomène d'auto-accélération thermique appelé "emballement". Cependant, à mesure que la température s'élève, la capacité du matériau à résister à la rupture de ses liaisons chimiques, exprimée par sa rigidité diélectrique, diminue significativement.

Dans le cas de courants alternatifs de haute fréquence, typiquement dans la gamme des mégahertz, il est possible qu'une résonance de polarisation par orientation survienne. Cette résonance peut également conduire à un échauffement du matériau et provoquer la rupture des liaisons chimiques.

II.5.5.2 Claquage des isolants solide électromécanique [33]

Selon ce mécanisme, le champ électrique exerce une compression mécanique. La déformation qui en résulte provoque la rupture du matériau. Considérons un échantillon avec une épaisseur initiale D_0 de

constant diélectrique absolu et du module d'Young Y . L'échantillon comprimé sous l'action de la tension U (correspondant au champ électrique E)

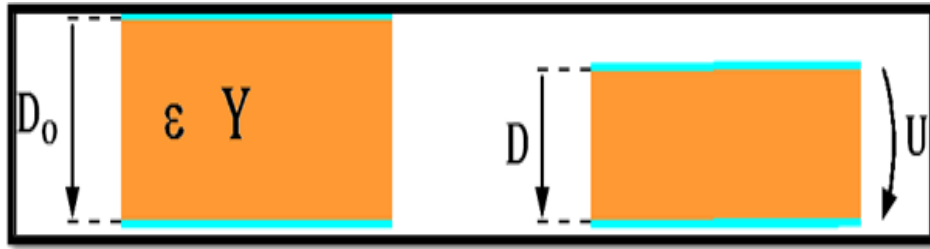


Figure II. 6: Claquage des isolants solide électromécanique

L'énergie électrostatique vaut :

$$w_{el} = \frac{1}{2} \epsilon \cdot E^2 = \frac{1}{2} \epsilon \cdot \frac{U^2}{D^2} \quad (\text{II.6})$$

Et l'énergie mécanique :

$$w_{mec} = Y \ln\left(\frac{D_0}{D}\right) \quad (\text{II.7})$$

A l'équilibre $w_{el} = w_{mec}$

$$U^2 = \frac{2Y}{\epsilon} D^2 \ln\left(\frac{D_0}{D}\right) \quad (\text{II.8})$$

La tension présente un maximum pour une certaine valeur de D :

$$\frac{d}{dD} U^2 = \frac{2Y}{\epsilon} D [2 \ln\left(\frac{D_0}{D}\right) - 1] \quad (\text{II.9})$$

Cette dérivée est nulle pour :

$$\ln\left(\frac{D_0}{D}\right) = \frac{1}{2} \Rightarrow D^2 = \frac{D_0^2}{e}, e = 2.7183$$

En introduisant ces deux relations dans la relation de U^2 , on obtient sa valeur maximale

$$U_{max} = D_0 \sqrt{\frac{Y}{\epsilon e}} \quad (\text{II.10})$$

La relation ci-dessus, appelée relation de Garton, donne en fait la tension destructrice maximale possible. En fait, celle-ci est toujours bien inférieure à la valeur obtenue par ce modèle.

II.5.5.3 Claquage avec streamer

Lorsque des électrons sont accélérés à une vitesse maximale, ils peuvent ioniser les molécules qu'ils rencontrent, ce qui entraîne une réaction en chaîne où d'autres électrons sont également libérés en cascade. Cette réaction est appelée ionisation par électrons et est couramment utilisée dans la spectrométrie de masse pour ioniser des molécules et les analyser. L'énergie d'ionisation est l'énergie qu'il faut fournir à un atome neutre pour arracher un électron et le transformer en ion. Cette énergie peut être utilisée pour ioniser des gaz ou des liquides, ce qui entraîne la formation d'ions positifs et négatifs. Les ions ont une charge électrostatique positive ou négative car ils contiennent un nombre inégal de protons et d'électrons. Des ions peuvent être formés lorsque des électrons sont arrachés d'un atome ou d'une molécule, ce qui nécessite généralement une grande quantité d'énergie.

II.5.5.4 Claquage par avalanche

Lors de la collision ionisante avec un atome du matériau, l'électron incident peut céder à l'atome assez d'énergie pour l'ioniser sans être piégé. L'atome se charge positivement en libérant un nouvel électron, de sorte qu'on a alors 2 électrons libres qui peuvent acquérir dans le champ assez d'énergie pour provoquer chacun une nouvelle collision ionisante donc 2 électrons et ainsi de suite. Pour produire une avalanche, il faut qu'un nombre suffisant d'électrons soit produit. Chaque ionisation produit 2 électrons, une avalanche de m générations donne 2^m électrons. Fournié a montré que la destruction du matériau par avalanche électronique nécessite 40 générations soit 2^{40} électrons ($\approx 10^{12}$) [34].

A ceux-ci, il faut ajouter d'autres phénomènes secondaires liés à des défauts de jeunesse introduits lors de la fabrication, à des défauts apparaissant dans le temps (vieillesse) dans le volume (cavités gazeuses ou impuretés) ou à la surface du matériau, au mode opératoire et aux conditions expérimentales. Dans ces cas, on parle de claquage par ionisation (décharges partielles) et de claquage par vieillissement.

II.5.5.5 Claquage par décharge partielle

Le claquage des isolants est habituellement précédé par une phase de développement d'une anomalie, telle qu'une cavité ou une vacuole, au sein du matériau. Lorsque cette cavité atteint une dimension critique, elle devient le lieu de décharges partielles, dont la répétition endommage progressivement le matériau, aboutissant éventuellement à la formation d'une structure arborescente, culminant avec l'apparition d'un arc électrique.

Les arborescences sont des phénomènes précurseurs du vieillissement des matériaux diélectriques, engendrant une dégradation permanente. Elles se manifestent sous forme de structures filamenteuses ramifiées, constituées de microcanaux creux semblables à des arbres, pouvant se propager sur plusieurs millimètres à la fois en volume et en surface des isolants. Ces arborescences sont étroitement liées au claquage et à la détérioration des équipements électriques. Elles peuvent se développer de manière insidieuse et rester inaperçues dans l'isolation pendant plusieurs années, avant de causer des dommages graves.

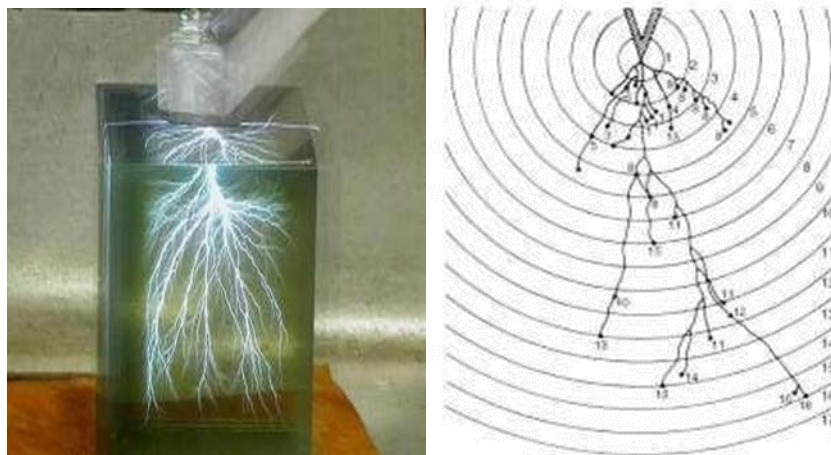


Figure II. 7: Claquage d'un isolant solide « claquage dans le plexiglas entre deux électrodes pointe-plan » [35]

II.5.6 Contournement

Le contournement se produit lorsqu'une décharge disruptive se forme le long d'une surface solide, suivant une trajectoire qui contourne cette surface. Ce terme est également utilisé pour décrire des décharges amorcées dans l'air. L'endommagement résultant est principalement superficiel, résultant de l'énergie thermique libérée par l'arc [36].

La figure II.8 représente trois étapes du processus de contournement sur un isolateur :

- La figure (a) représente l'état initial de l'isolateur avant toute décharge.
- La figure (b) illustre le début du contournement visible, avec une décharge disruptive commençant à se former le long de la surface de l'isolateur.
- La figure (c) montre le contournement complet, avec une décharge bien visible entraînant des dommages principalement superficiels dus à l'énergie thermique libérée par l'arc.

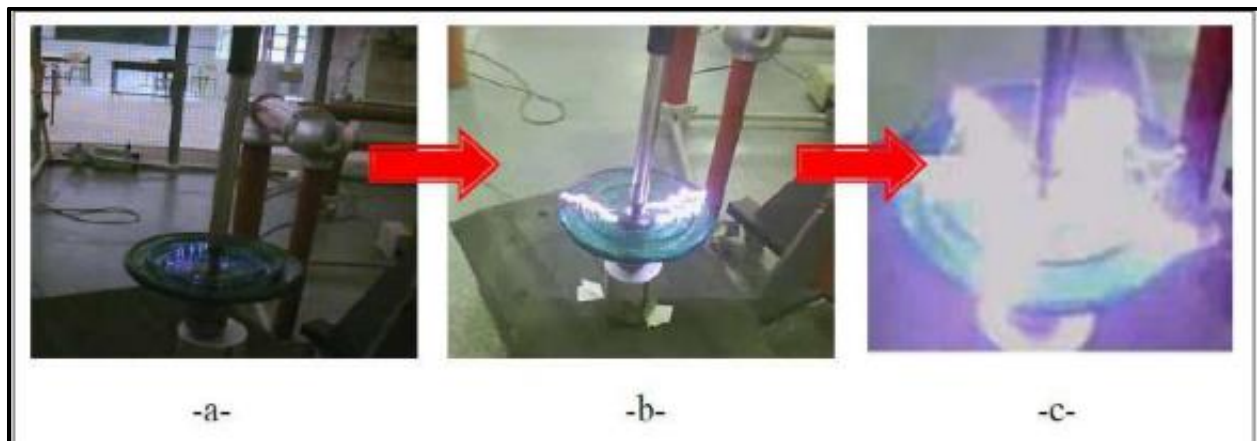


Figure II. 8: Développement de la décharge sur la surface [37]

II.5.7 Tension de contournement

La tension de contournement est le niveau de tension le plus bas à partir duquel tous les arcs joignent les deux électrodes. La tension de contournement dépend [38] :

- De la forme des électrodes (pointe-plan, plan-plan, ...etc.) ;
- De la résistivité volumique moyenne de la pollution ;
- De la répartition de la couche de pollution ;
- Du profil de l'isolateur (largeur de la couche de pollution) ;
- De la longueur de l'isolateur ;
- De la nature de la tension et sa polarité ;
- Des conditions climatiques telles que la pression, l'humidité et la température.

II.5.8 Tenue diélectrique de l'air

La tenue diélectrique de l'air est la capacité à résister à une contrainte de tension sans rupture diélectrique de son milieu isolant. Elle est donnée par la formule suivante

$$U_t = 90\% * U_d \quad (\text{II.11})$$

U_t : Tension de tenue diélectrique ;

U_d : Tension de claquage ou disruptive de l'intervalle d'air.

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les mécanismes de la rupture diélectrique des différents types d'isolants électriques dont la principale contrainte provoquant le claquage. Il ressort de cette analyse bibliographique, que les mécanismes de la décharge électrique dépendent de plusieurs paramètres : la géométrie des électrodes (intervalle inter électrodes et le rayon de courbure), la tension appliquée, la pression et la température.

Nous avons exposé par la suite, les différents phénomènes de polarisation intervenant dans les isolants solides. Cette polarisation induit des pertes d'énergie caractérisées par le facteur de pertes diélectriques. Nous avons constaté que le claquage est un phénomène qui résulte non seulement d'un effort direct du champ électrique sur le matériau, mais de la combinaison des effets d'origine thermique, mécanique, chimique, etc. qui rentrent en jeu dans la dégradation des matériaux.

Chapitre III :

Résultats

Expérimentaux et

Numériques

III.1 Introduction

La mesure des champs électriques autour des isolateurs pratiques est une tâche complexe, surtout dans des environnements humides et pollués. De plus en plus, les chercheurs se tournent vers des simulations numériques à l'aide de logiciels électromagnétiques commerciaux pour éviter les coûts et la complexité des expériences en laboratoire.

Notre étude a impliqué des essais expérimentaux et des simulations numériques sur des isolateurs en silicone et en verre (Capot et tige), réalisés au Laboratoire de haute tension à l'université de Bejaia. Ces tests ont porté sur la tension de contournement et l'apparition des décharges électriques. Les simulations ont été effectuées avec le logiciel COMSOL Multiphysics version 6.1, qui est basé sur la méthode des éléments fini.

Dans ce chapitre nous allons exposer les techniques expérimentales pour la visualisation du chemin de contournement des isolateurs en verre et en silicone et étudier le comportement de ceux-ci sous l'effet de variation de la nature de l'environnement. D'autre part, nous allons étudier le champ et le potentiel électrique au voisinage de ces deux isolateurs à l'aide d'une simulation numérique. Enfin nous allons exposer et discuter tous les résultats obtenus dans les deux cas pratique et numérique.

III. 2 Circuit de mesure et de visualisation

Le système comprend un transformateur d'essai haut tension qui délivre une tension maximale de 135 kV au secondaire pour des circuits à courant alternatif, avec un courant maximal de 0,08 A. Le primaire est connecté à un transformateur de réglage (autotransformateur intégré) pour ajuster la tension. La tension d'essai est mesurée à l'aide d'un diviseur de tension capacitif ($C_1 = 0.1$ nF et $C_2 = 10$ nF), une résistance d'affaiblissement de courant R (106 k Ω), et un voltmètre de crête à affichage numérique pour la lecture de la tension de claquage. Une caméra rapide est utilisée pour enregistrer les différentes étapes du développement de la décharge électrique.

Nous avons choisi cette configuration pour tester la tenue diélectrique des isolateurs haute tension. Le transformateur d'essai permet d'appliquer une tension suffisamment élevée pour simuler les conditions de service réelles. Le diviseur capacitif et la résistance mesurent précisément la tension d'essai, tandis que la caméra enregistre le comportement de l'isolateur sous haute tension, notamment l'apparition éventuelle de décharges partielles ou de contournement.

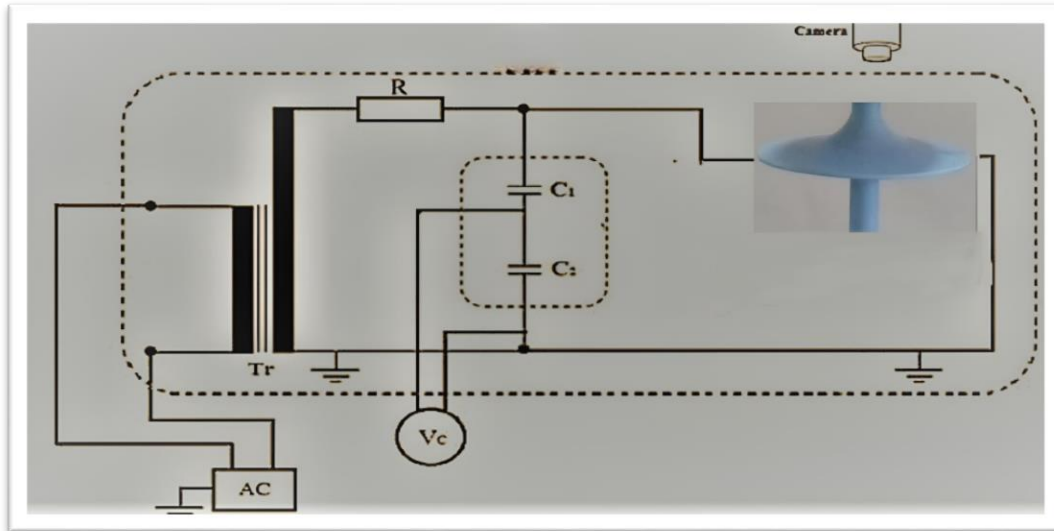


Figure III. 1: Schéma de mesure de tension de contournement et de visualisation de la décharge électrique
Tr : Transformateur.

AC : Appareil de commande manuelle du transformateur.

Vc : Voltmètre de crête.



Figure III. 2: Appareil de Commande manuelle du transformateur (AC)

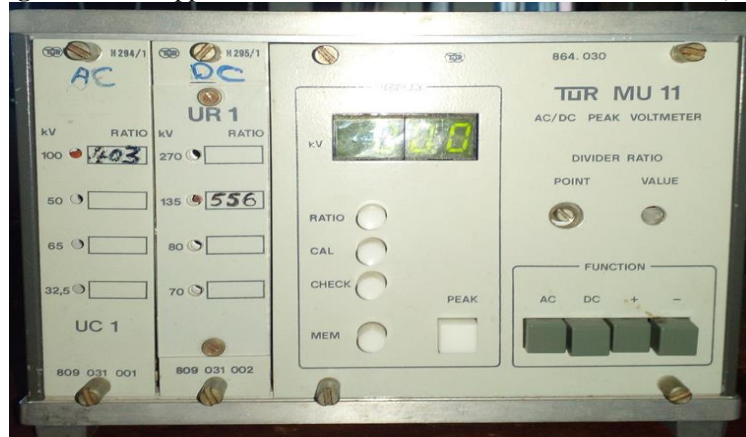


Figure III. 3: Voltmètre de crête (Vc)



Figure III. 4: Circuit d'essai au laboratoire de haute tension

1. Transformateur haute tension (135 kV, 80 mA) ;
2. Résistance (106 k Ω) ;
3. Condensateurs (0.1nF et 10nF) ;
4. Perche relai à la terre ;
5. Grille de protection.

III.3 Préparation de surface isolante

III.3.1 Préparation de la surface polluante

La solution polluante est préparée en mélangeant un litre d'eau distillée avec 40 g de Kaolin. Pour obtenir la conductivité électrique souhaitée, une quantité précise de sel est ajoutée à cette solution. La conductivité est mesurée à l'aide d'un conductimètre à sonde mobile. La valeur de conductivité utilisée dans cette étude 25 mS/cm.



Figure III. 5: Appareil de mesure de la conductivité volumique (Conductimètre à sonde mobile)

III.3.2 Mode d'application de la solution polluante sur la surface hydrophile

Pour garantir des résultats précis lors de notre expérience, nous devons répartir uniformément la pollution sur la surface extérieure des isolateurs. Pour ce faire, nous avons utilisé une éponge propre pour passer une couche très fine sur la surface extérieure de l'isolateur en verre.

Une fois que la pollution est appliquée, nous allons mesurer immédiatement la tension. Après chaque mesure, nous nettoierons soigneusement l'isolateur avec l'eau propre, puis nous le laisserons sécher pendant un certain temps avant de répéter le processus. Cela nous permettra d'obtenir des données fiables.

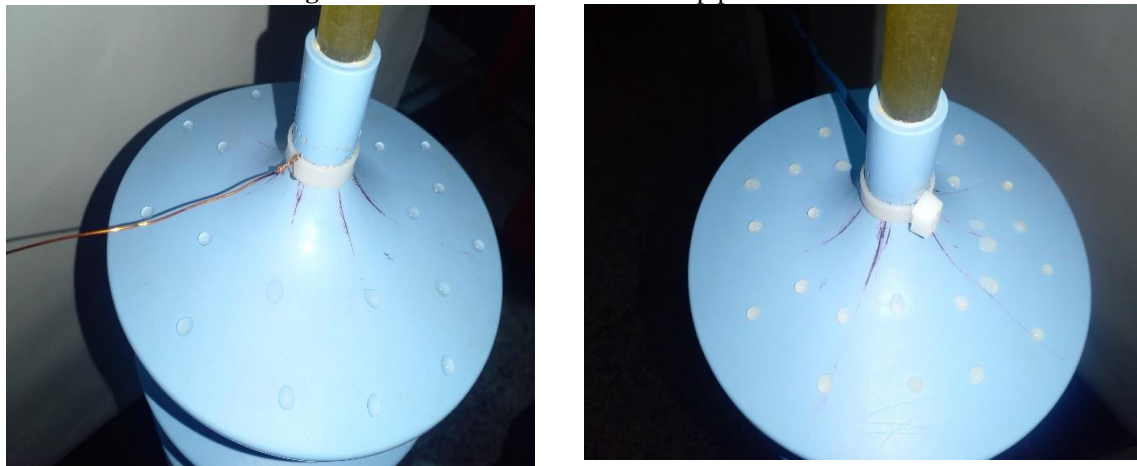
III.3.3 Mode d'application des gouttes d'eau sur la surface hydrophobe

L'application des gouttes d'eau sur la surface isolante en silicone est effectuée à l'aide d'une micropipette propre. Chaque goutte est de 30 μl de volume. Avant chaque opération, il est impératif d'agiter la solution pour assurer son homogénéité.

- Le diamètre des gouttes qui ont un volume de 30 μl est d'environ 4 mm.



Figure III. 6: Photo montrant la micropipette utilisé



a : Répartition aléatoire des gouttes d'eau
à faible conductivité

b : Répartition aléatoire des gouttes
polluante

Figure III. 7: Application des gouttes d'eau et des gouttes polluante

III.3.4 Préparation d'une surface superhydrophobe

Pour réaliser une couche superhydrophobe sur l'isolateur en verre. Il faut :

- Nettoyer soigneusement la surface en verre avec l'eau et du savon liquide à l'aide d'un chiffon propre.
- Laisser sécher pendant un certain temps.
- Entourer les deux surfaces intérieure et extérieure de l'isolateur avec une couche très fine de gèle de silicone. Puis, placer l'isolateur sous un feu jusqu'à l'obtention d'une surface superhydrophobe.

- Après 24 heures, mettre des gouttelettes d'eau sur la surface de l'isolateur, si la forme des gouttes d'eau reste sphérique sans laisser des traces, cela veut dire que la surface est superhydrophobe



Figure III. 8: Réalisation d'une surface superhydrophobe

III.4 Modèle des isolateurs étudiés

Nous avons effectué de nombreux essais sur deux types des isolateurs (Figure III.9, Figure III.10). Pour les besoins de nos investigations, plusieurs séries de tests ont été effectuées au laboratoire des diélectriques (haute tension), à l'université A. MIRA Bejaia. Ils concernent la mesure de la tension de contournement et la visualisation du développement de la décharge électrique sur la surface de ces isolateurs.

III.4.1 Isolateur en silicone

Cet isolateur est fabriqué avec une tige centrale en fibre de verre imprégnée de résine époxy, complétée par des ailettes en silicone, tel qu'illustré dans la Figure III.9

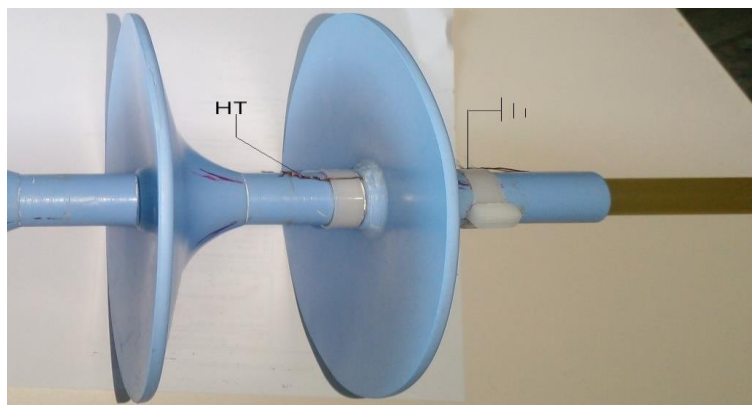


Figure III. 9: Isolateur en silicone utilisé

III.4.2 Isolateur en verre (capot et tige)

L'isolateur capot et tige est constitué d'un bloc isolant portant à sa partie supérieure un capot scellé en fonte malléable et à l'intérieur une tige en acier, avec cannelures et dont la tête

conique est également scellée dans le verre. la partie isolante est en verre trempé et la partie entre le capot et la tige est en ciment alimeneux.



Figure III. 10: Isolateur en verre (capot et tige)

III.5 Mode opératoire

Les conditions atmosphériques telles que la pression, la température et l'humidité, sont pris en considération avant chaque test dans le laboratoire. Avant chaque essai, les isolateurs doivent être bien rincés avec l'eau et essuyés. Ce modèle d'essai est déposé verticalement, et placé à 1.5 m environ du sol et à une longue distance du transformateur d'essai, pour éviter tout phénomène parasite dû au sol et au bobinage du transformateur.

III.5.1 Isolateur en silicone

Notre étude est basée sur l'évaluation du champ réactif, nous avons utilisé le modèle d'isolateur en silicone (Figure III. 9). Pour cela, nous avons réalisé une série de 25 essais pour chaque cas expérimental suivant :

- ✚ Cas propre : La surface de l'isolateur est maintenue propre et sèche le long de tous les essais. Ce cas est considéré comme point de référence de notre étude (Figure III.9).
- ✚ Cas humide : des gouttes de l'eau distillée seront déposées aléatoirement sur toute la surface de l'ailette de l'isolateur hydrophobe (Figure III.7.a).
- ✚ Cas pollué : Pour étudier l'effets de la pollution sur le comportement de notre objet d'essai, des gouttes de solution polluée seront placées sur l'ailette de l'isolateur. (Figure III.7.b).

III.5.2 Isolateur en verre (capot et tige)

Nous avons effectué des séries d'essais en utilisant un isolateur en verre (Figure III.10), Nous avons réalisé une série de 25 essais pour chaque cas expérimental que nous détaillons ci-dessous :

- ✚ Cas propre : nous avons utilisés l'isolateur à l'état de surface propre.
- ✚ Cas pollué : une couche de pollution a été appliquée sur sa surface extérieure.

- ✚ Cas d'un revêtement superhydrophobe : nous avons appliqué une couche superhydrophobe sur toute la surface extérieure et intérieure de l'isolateur pour améliorer les caractéristiques de la surface isolante. Par la suite, nous avons placé une gouttière d'eau salé au-dessus de l'isolateur (simulation de pluie naturelle).

III.6 Procédure de simulation

La modélisation est essentielle pour toute simulation numérique, car elle définit les caractéristiques du problème étudié et propose un modèle simplifié proche de la réalité. La méthode des éléments finis (MEF) est idéale pour cela, avec des logiciels comme COMSOL Multiphysics qui offrent une large couverture pour modéliser une variété de problèmes physiques et d'ingénierie, grâce à sa capacité à traiter différents phénomènes physiques et à gérer des problèmes multiphysiques.

III.6.1 Identification des domaines dans le logiciel COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics est un outil très employé dans des secteurs divers de recherche, car il facilite les étapes de modélisation et de simulation, soit : la définition de la géométrie, des propriétés physiques des matériaux présents et des conditions aux frontières, le maillage, la résolution et l'affichage des résultats (sous forme de courbes, d'équipotentiels, de vecteurs, etc.). Par ailleurs, l'utilisation de ce logiciel ne demande pas de connaissances approfondies dans les mathématiques ou les analyses numériques [39].

III.6.2 Présentation de l'interface de COMSOL Multiphysics 6.1

L'interface de logiciel COMSOL Multiphysics 6.1 peut être divisée en quatre parties principales. À gauche, on trouve le volet "Constructeur de modèle " qui permet de définir des variables, des paramètres du problème (onglet Paramètres), la géométrie (Géométrie), les propriétés des matériaux, les modèles physiques appliqués et les réglages du maillage (Maillage). Ce volet contient également les sections pour configurer le type d'étude, les paramètres du solveur (Etude) et les options d'affichage et de post-traitement des résultats (Résultats). La colonne à droite affiche les options relatives à l'élément sélectionné dans le volet du modèle, comme les dimensions d'un objet géométrique nouvellement créé. C'est aussi là que sont choisis les paramètres initiaux et les modèles physiques nécessaires. En haut à droite, la fenêtre graphique (Graphique) permet de visualiser la géométrie, le maillage ou les résultats de la simulation, La barre d'outils au-dessus offre diverses options pour ajuster le zoom, l'orientation d'objets 3D, sélectionner des entités (objets, domaines, frontières, points), etc. Enfin, sous la fenêtre graphique, une console affiche les messages d'erreur, la progression des

calculs, la liste des opérations effectuées lors de la résolution, ainsi que les résultats numériques une fois la simulation terminée.

Les différents éléments de l'interface sont présentés sur la figure III.11.

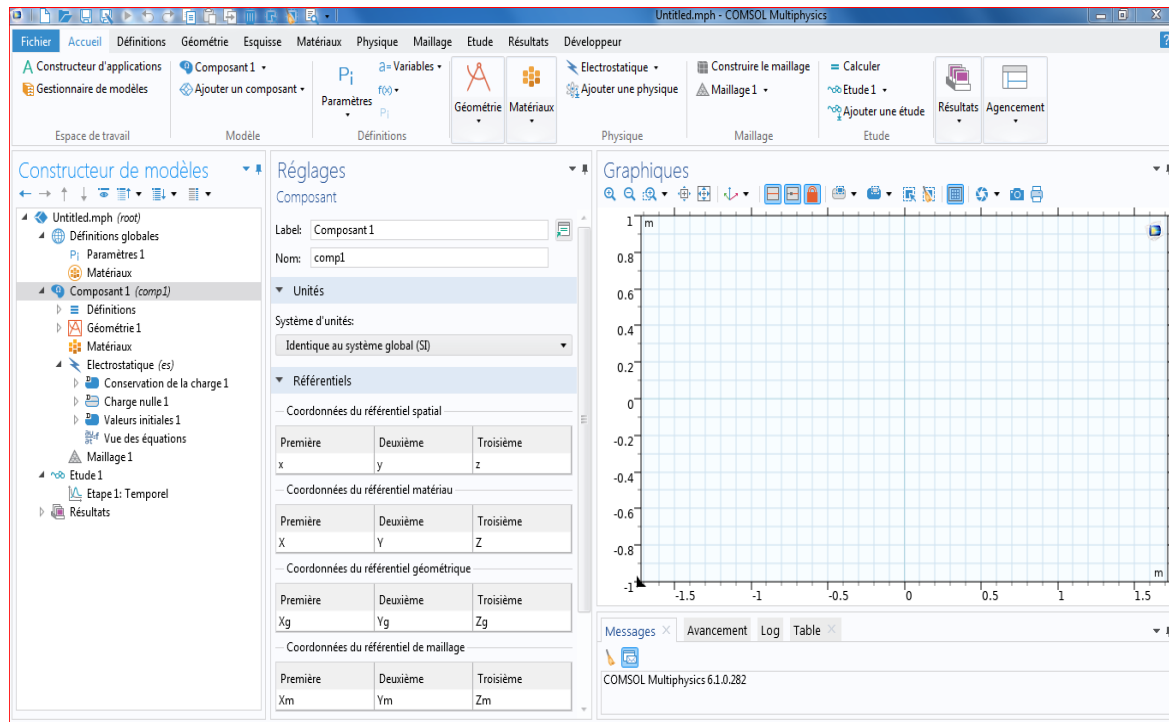


Figure III. 11: Interface de COMSOL Multiphysics 6.1

III.6.3 Description du modèle de simulation

Pour des résultats faibles et bons de simulation, il doit être choisi des modélisations justes. Pour cela nous avons suivi ces étapes qui nous détaillons ci-dessous :

- ✓ Choix du spatial : nous avons utilisé le spatial en 2D.
- ✓ Choix du physique : notre cas est effectué pour le domaine électrostatique sous AC/DC.
- ✓ Choix du domaine d'étude, pour le domaine du courant alternatif (AC) on utilise le domaine temporel ou bien fréquentiel, nous avons utilisé le domaine temporel.
- ✓ La géométrie : il est possible de désigner la géométrie d'un isolateur en utilisant COMSOL, pour cela nous avons mesuré les dimensions des isolateurs réels en utilisant un pied à coulisse.
- ✓ Affectation des propriétés physiques :
 - ❖ Telles que les propriétés électriques des matériaux (tableau III.1, III.2, III.3)

Tableau III. 1: Propriétés de l'isolateur en silicone [40]

Matériaux	Permittivité relative	Conductivité électrique
	ϵ_r	σ [S/m]
Silicone	3.9	10^{-12}
Fibre de verre	4.2	10^{-12}
Cuivre	1	$5.9 \cdot 10^9$
Air	1	10^{-13}

Tableau III. 2: Propriétés de l'isolateur en verre [41]

Matériaux	Permittivité relative	Conductivité électrique
	ϵ_r	σ [S/m]
Verre trempée	4.2	10^{-14}
Fonte malléable	1	$4.03 \cdot 10^6$
Ciment alumineux	5.9	10^{-10}
Acier	1	$4 \cdot 10^6$
Air	1	10^{-13}

Tableau III. 3: Propriétés des conditions utilisées

Matériaux	Permittivité relative	Conductivité électrique
	ϵ_r	σ [S/m]
Eau	81	$18 \cdot 10^{-3}$
Solution polluante	81	2.5
Couche superhydrophobe	2.8	10^{-10}

- ❖ Les conditions aux limites : nous avons pris comme conditions aux limites pour l'électrode inférieure des isolateurs une valeur efficace de la tension simple de tenue, et celui de l'électrode supérieure est effectué au zéro (électrode mise à la terre). Bien que la tension appliquée pour les deux modèles est

$$V = V_0 * \sin(2 * \pi * f * t) \quad (\text{III.1})$$

Avec :

V_0 : Valeur efficace de la tension de tenue ;

f : Fréquence de réseau 50 Hz.

- ✓ Le maillage de différentes parties des modèles étudiés.
- ✓ La résolution du problème : Cette étape implique la résolution du problème par l'application d'une méthode numérique et la mise en place du système d'équations correspondant. En fonction de la taille du problème, il est possible d'opter pour une

résolution directe lorsque le nombre d'inconnues est limité, ou bien de recourir à une approche itérative pour des problèmes de plus grande envergure. L'objectif de ce travail est d'analyser la répartition de la tension et du champ électrique à la surface des isolateurs en utilisant la méthode des éléments finis. Les équations de base employées pour calculer le potentiel et le champ électrique sont les équations de Maxwell [42].

$$\vec{\nabla}^2 V = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (\text{III.2})$$

∇ : Opérateur Laplacien, qui représente la divergence du gradient d'un champ (m^{-1}) ;

V : Potentiel électrique (V) ;

ρ : Densité de charge (C/m^2) ;

ε : Permittivité électrique de milieu (F/m).

Pour le modèle électrostatique en prenant en considération la densité de charge d'espace est nulle on utilise l'équation de Laplace :

$$\vec{\nabla}^2 V = 0 \quad (\text{III.3})$$

Selon la loi d'Ampère Maxwell :

$$\vec{\nabla} * \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{III.4})$$

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E} \quad (\text{III.5})$$

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

$$\vec{E} = -\vec{\nabla} V \quad (\text{III.7})$$

H : Champ magnétique auxiliaire (A/m) ;

J : Densité de courant (A/m^2) ;

D : Déplacement électrique (C/m^2) ;

E : Champ électrique (V/m) ;

ε_0 : permittivité à vide ($8.85 \cdot 10^{-12}$ F/m) ;

ε_r : permittivité relative de milieu (F/m) ;

σ : conductivité électrique de milieu (S/m) ;

D'après l'équation de Poisson :

$$\vec{\nabla} \vec{D} = \rho \quad (\text{III.8})$$

En remplaçant l'expression de D dans l'équation III.7

$$\vec{\nabla} \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E} = \rho \quad (\text{III.9})$$

En dérivant cette équation par rapport au temps et en supposant qu'il n'y a pas de charges ($\rho = 0$)

$$\vec{\nabla}(\varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}) = 0 \quad (\text{III.10})$$

En remplaçant l'équation III.6 et l'expression de D dans l'équation III.4 ont obtenu :

$$\vec{\nabla} * \vec{H} = \sigma \vec{E} + \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (\text{III.11})$$

En prenant la divergence de cette équation et en supposant qu'il n'y a pas de champ magnétique ($H = 0$)

$$\vec{\nabla}(\sigma \vec{E}) + \vec{\nabla}(\varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}) = 0 \quad (\text{III.12})$$

$$-\vec{\nabla}(\vec{\nabla} \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial V}{\partial t}) - \vec{\nabla}(\sigma \vec{\nabla} V) = 0 \quad (\text{III.13})$$

✓ Simulation et discussions des résultats.

III.7 Modélisations des cas étudiés

III.7.1 Isolateur en silicone

Dans notre étude, les dimensions de l'isolateur en silicone sont les suivantes : taille totale d'environ 8 cm, diamètre de la tige centrale en fibre en verre d'environ 2 cm et diamètre des ailettes de 10 cm. La figure III.12 illustre la géométrie complète de l'isolateur pour trois cas : propre et sec, en présence de gouttes d'eau à très faible et à très forte conductivité.

La forme des gouttes d'eau est sphérique de 4 mm de diamètre. Ces dernières sont déposées sur la surface de l'ailette de l'isolateur en silicone. Les propriétés diélectriques spécifiques de ces gouttelettes sont indiquées dans le tableau III.3. Cette simulation vise à comprendre l'impact des gouttes d'eau sur la répartition du champ et du potentiel électrique le long de la ligne de fuite de l'isolateur.

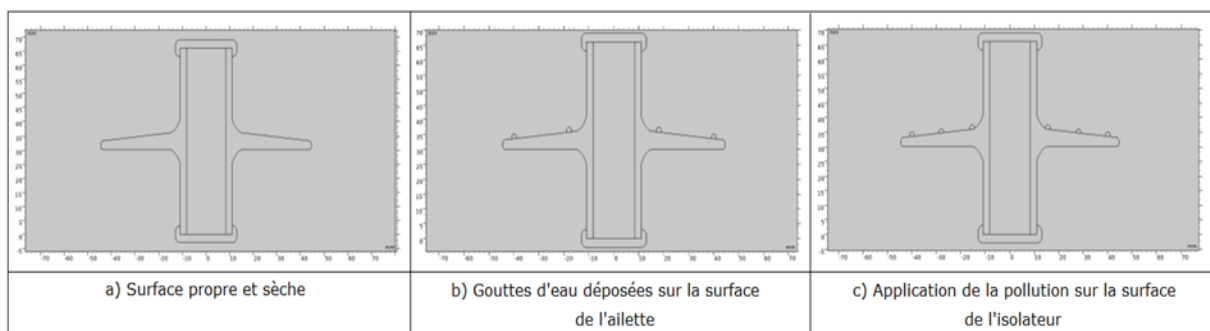


Figure III. 12: Etat de surface de l'isolateur en silicone

III.7.2 Isolateur en verre (Capot et tige)

Pour faire une simulation de ce modèle, il est intéressant de connaître les paramètres de celui-ci. La taille de l'isolateur est de 6.5 cm, et le diamètre extérieur de capot supérieur est d'environ 3 cm, l'ailette en verre est de 10 cm. La géométrie de l'isolateur complet pour les

trois cas propres, avec une couche polluante et avec la couche superhydrophobe est illustrée dans la figure III.13.

La figure III .13. b représente la géométrie d'un isolateur capot et tige dans lesquelles nous avons appliqué une couche de la solution polluante qu'est très fine environ 0.5 mm.

La figure III .13.c représente la géométrie d'un isolateur capot et tige dans lesquelles nous avons appliqué une couche superhydrophobe sur tout la surface en verre de l'isolateur (environ 1.5mm).

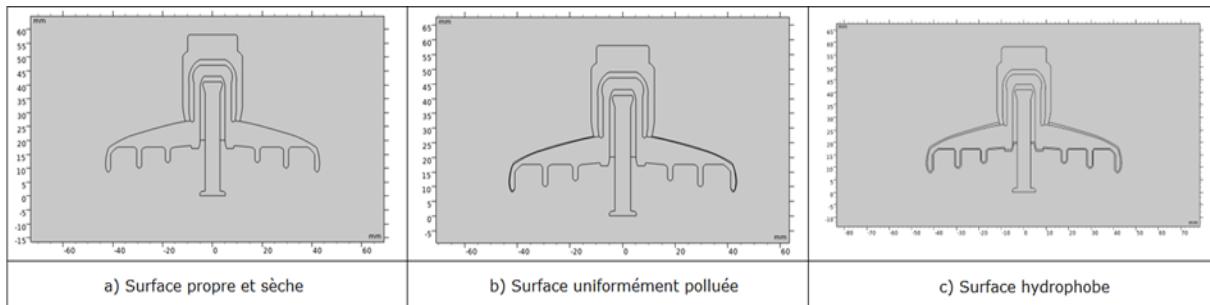


Figure III. 13: Etat de surface de l'isolateur en verre

III.7.3 Maillage

Le logiciel COMSOL Multiphysics offre plusieurs options pour discrétiser le domaine de calcul, notamment des éléments tétraédriques, hexaédriques et prismatiques. Dans notre étude, nous avons choisi d'utiliser un maillage composé d'éléments tétraédriques, correspondant à l'option "Plus Fin" proposée par COMSOL. Un maillage plus fin améliore la précision des résultats et augmente le temps de simulation.

Les résultats du maillage des cas étudiés sont illustrés dans les figures III.14, III .15

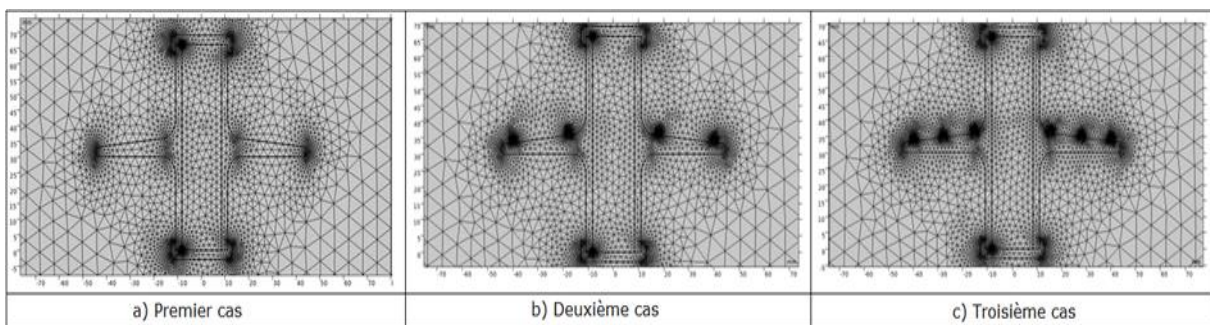


Figure III. 14: Maillage des trois cas étudiés de l'isolateur en silicone

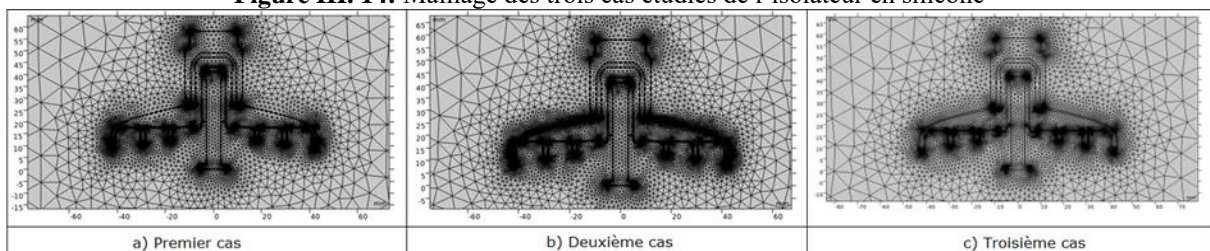


Figure III. 15: Maillage pour les trois cas étudiés de l'isolateur en verre

III.8 Étude du comportement d'un isolateur hydrophobe

III.8.1 Résultats pratiques

Dans cette partie, nous présentons les résultats des tests expérimentaux qui ont servi à déterminer la tension de contournement des isolateurs. Les trois cas de surfaces étudiées seront présentés.

Nous avons effectué des nombreux essais au laboratoire pour la caractérisation des décharges électrique évoluant au long de ligne de fuite d'un isolateur en silicone sous tension alternative, seuls quelques résultats sont présentés dans la figure III.16.

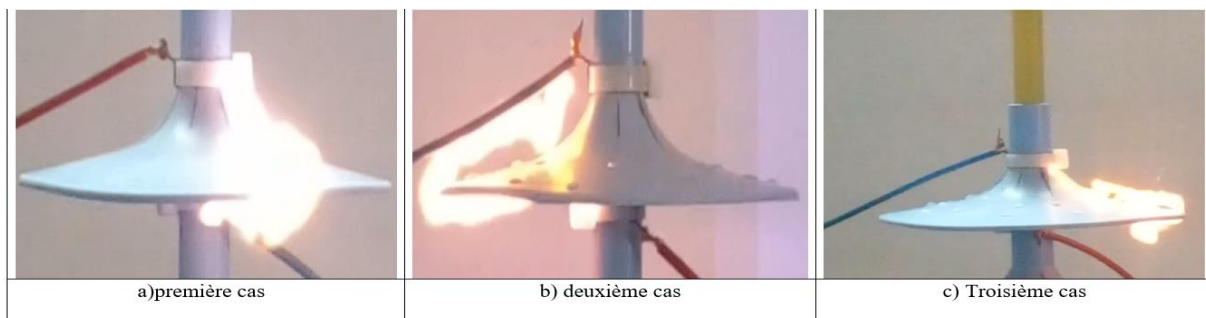


Figure III. 16: Propagation de la décharge électrique le long de la surface d'un isolateur en silicone

Nous remarquons qu'à chaque fois qu'on rapproche de l'état polluée, la tension de claquage diminue, pour la première cas la tension de contournement est 79 kV. Les gouttes d'eau contaminées jouent un rôle négatif sur la performance de cet isolateur et diminue la tension de contournement, dans ce cas la tension est environ 50 kV. L'évolution de la décharge électrique dans le cas propre prend beaucoup de temps pour atteindre le contournement (Figure III.16.a), par rapport aux autres cas. Elle se propage dans l'air et sa couleur est blanche. Par contre la décharge dans le cas où la surface est pulvérisée, elle se propage sur la surface de l'ailette passant par les gouttes d'eau avec une couleur orange.

Les gouttes d'eau présentes sur la surface de l'isolateur hydrophobe jouent le rôle de pointes, ce qui signifie le champ est intense à leurs niveaux. Dans ce cas, le passage du courant est facile et la valeur de la tension de claquage est diminuée environ 59 kV.

Les figures III.16.b et III.16.c montre clairement que lorsque la surface de l'isolateur est pulvérisée par des gouttes d'eau à faible et à forte conductivité, la décharge s'initie à partir de l'électrode de terre, puis apparaît sur l'électrode haute tension après avoir partiellement asséché les gouttes d'eau.

Nous avons conclu que la présence de la pollution sur l'isolant assure peu de protection. Ceci est dû au comportement conducteur des parties contaminées.

III .8.2 Résultats numériques

III .8.2.1 Étude de la distribution du potentiel électrique et de champ

La figure III.17, représentent les résultats de simulation pour la distribution de potentiel électrique pour les trois cas étudiés en 2D. À partir de ceux-ci, nous pouvons conclure que la distribution de potentiel électrique n'est pas uniforme et que sa concentration est obtenue au niveau de la zone proche de l'électrode HT, alors que le niveau du potentiel est presque nul en rapprochant de l'électrode terre. Un changement minime de cette distribution a eu lieu, dans les cas où l'isolateur est humide ou pollué. Cette différence est plus claire en examinant les courbes de la figure III.20 qui donnent la répartition axiale du potentiel en fonction de la longueur d'arc.

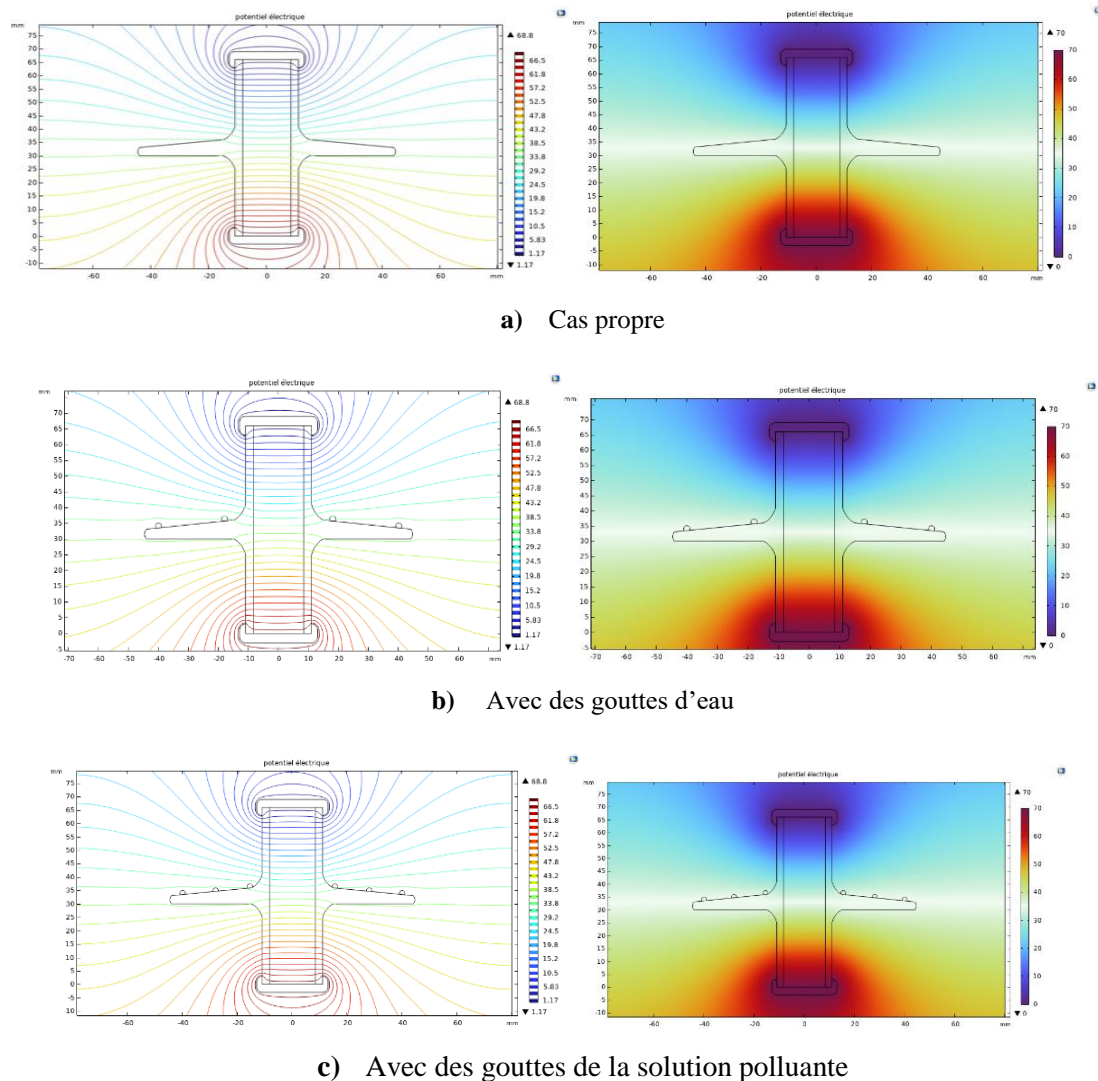


Figure III. 17: Distribution du potentiel électrique et lignes équipotentielles réparties sur un isolateur en silicone

Le figure III.18 représente les résultats de simulation des lignes de champ électrique pour les trois cas différents d'un isolateur en silicone en deux dimensions. D'après les résultats obtenus, le champ électrique généré par ces configurations est élevé au niveau des électrodes, ainsi que dans les gouttes d'eau propres ou contaminées déposées sur la surface de l'isolateur en

silicone. Cette domination du champ électrique à ces extrémités et au niveau des gouttelettes d'eau est due à l'effet de pointe.

Les simulations montrent que lorsqu'un isolateur en silicone est recouvert de gouttes d'eau ou de solution polluantes, cela crée des zones de très forte concentration du champ électrique au niveau de ces impuretés et des électrodes, ce qui peut poser des problèmes d'isolation électrique.

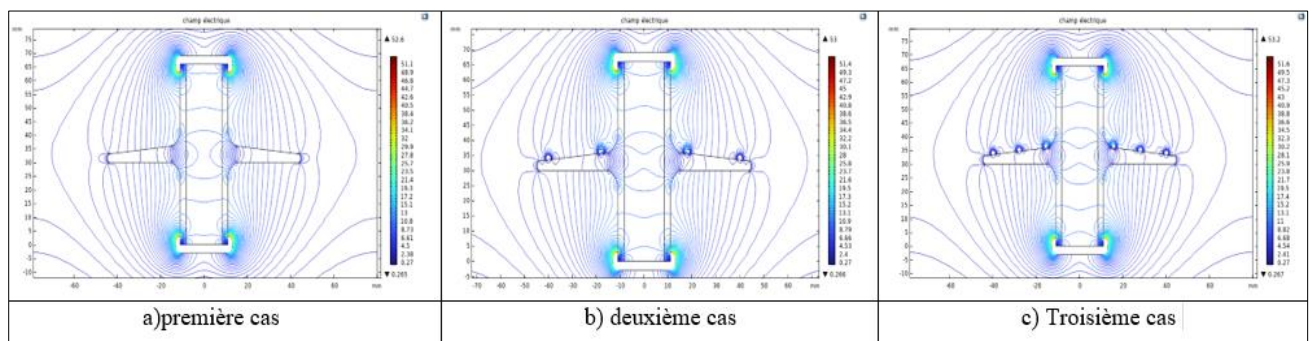


Figure III. 18: Lignes du champ électrique aux voisinage d'une ailette d'un isolateur en silicone
III.8.2.2 Étude de la répartition du potentiel et du champ électrique sur les lignes de coupe d'un isolateur en silicone

Les simulations ont permis d'obtenir les variations du potentiel et du champ électrique en tout point le long d'un axe de référence choisi, ainsi que le long du profil réel de la ligne de fuite de l'isolateur, dont la géométrie est représentée sur la figure III.19.

Pour la simulation de l'isolateur réel en silicone, l'axe vertical parallèle de distance 28 mm par rapport à l'axe d'origines d'isolateur en rouge et la ligne de fuite en bleu, cette dernière occupe une longueur d'environ 120 mm.

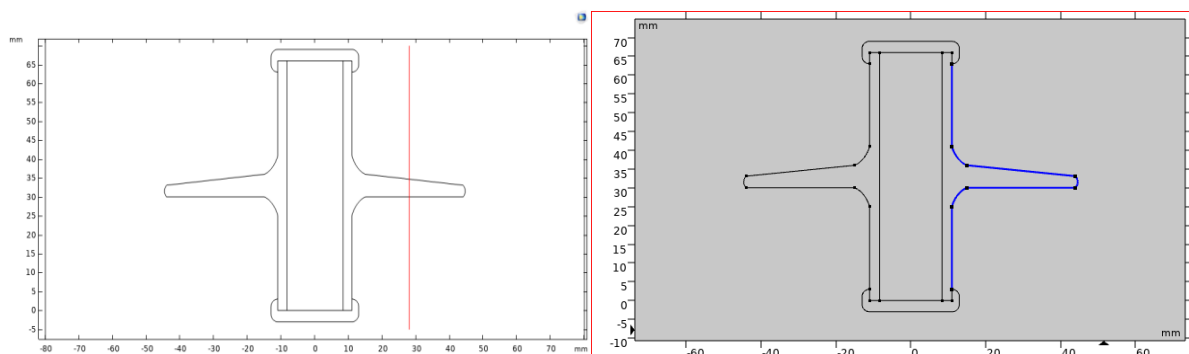
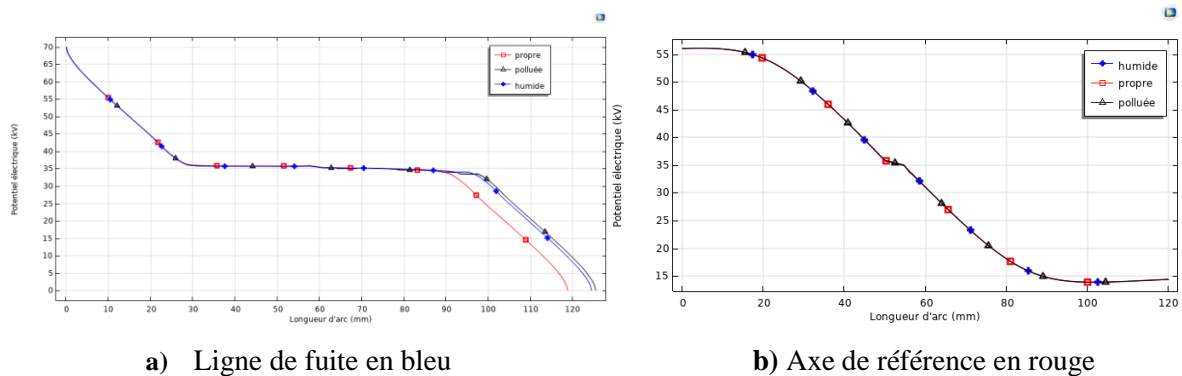


Figure III. 19: Lignes de référence de fuite et de coupe sur un isolateur en silicone

La figure III.20a représente la comparaison des distributions de potentiel électrique le long de la ligne de fuite dans les différentes conditions de surface de l'isolateur. D'après ces allures, les valeurs maximales du potentiel se trouvent près de l'électrode haute tension et diminuent jusqu'à son annulation près de l'électrode de masse. Il est à noter qu'il existe une légère différence entre les distributions avec et sans gouttes d'eau et de pollution. Ainsi, on peut

conclure qu'il n'y a pas d'effet notable des gouttes d'eau et de la pollution sur la distribution du potentiel le long de la surface de l'isolateur.

La figure III.20b donne les distributions de potentiel électrique à partir d'une ligne de référence linéaire dans les trois cas étudiés pour ce modèle d'isolateur. On observe que les valeurs maximales du potentiel se situent dans la zone proche de l'électrode de haute tension, sans différence significative entre les distributions dans les trois cas dans cette zone. Au niveau de l'ailette, on remarque une stabilisation de la valeur du potentiel, au-delà de ce niveau elles commencent à décroître jusqu'à environ 15 kV. Ainsi, on peut affirmer que le potentiel varie en fonction des conditions de surface.



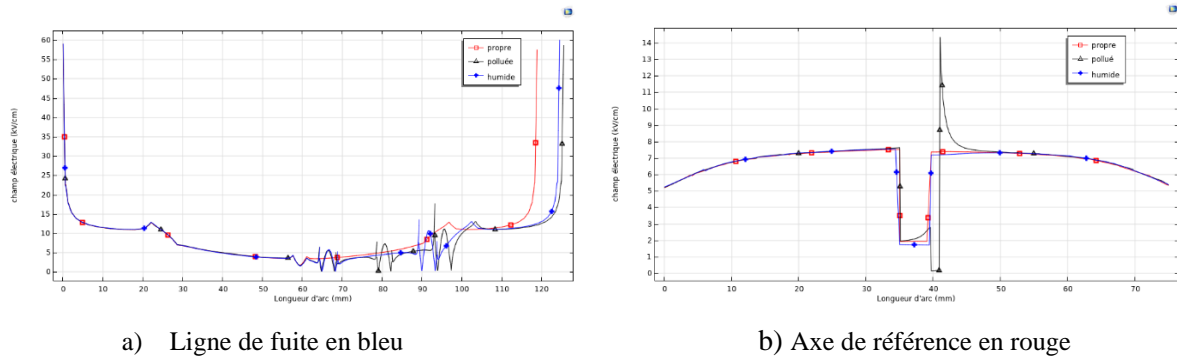
a) Ligne de fuite en bleu

b) Axe de référence en rouge

Figure III. 20: Distribution de potentiel électrique le long d'un isolateur en silicone

À partir de la figure III.21a, on remarque que le champ électrique est maximal aux extrémités de l'isolateur, c'est-à-dire dans les zones proches des électrodes. En l'absence de gouttes d'eau et de pollution, le champ est accentué sur les arrêts de l'ailette de l'isolateur, formant des zones de concentration du champ électrique. Lorsque des gouttes d'eau sont présentes sur la surface de l'isolateur, le champ électrique est également élevé au niveau de ces gouttes. Ce phénomène s'explique par la polarisation des molécules d'eau sous l'effet du champ électrique intense.

Cependant, la situation est encore plus critique en présence de gouttes de pollution sur l'isolateur. En effet, la solution polluante, présente une conductivité élevée. Sous l'effet du champ électrique, les ions de la solution polluante migrent et s'accumulent aux extrémités des gouttes, créant ainsi des zones de très forte concentration du champ électrique. Ce phénomène, peut conduire à l'amorçage d'un arc électrique et, à terme, à la dégradation de l'isolateur.



a) Ligne de fuite en bleu

b) Axe de référence en rouge

Figure III. 21: Distribution de champ électrique le long d'un isolateur en silicone

III.9 Étude du comportement d'un isolateur hydrophile

III.9.1 Résultats pratiques

La caractérisation des décharges électriques évaluant pour un isolateur en verre sous tension alternative a été réalisée au laboratoire des diélectriques pour les cas propre, pollué et avec revêtement de couche superhydrophobe. Les chemins de la décharge sont présentés dans la figure III.22.

La figure III.22.a montre que la décharge électrique suit les chemins de moindre résistance sur la surface de l'isolateur propre, et la tension de contournement obtenue dans ce cas est de 71 kV.

Pour le deuxième cas, la figure III.22.b montre la décharge électrique d'un isolateur recouvert d'une couche de solution polluante. La présence de contaminants augmente la conductivité de la surface (due à la conductivité de la pollution), facilitant ainsi le passage des courants de fuite. La tension de contournement est plus basse par rapport au cas propre qui est d'environ 39 kV, car les chemins de décharge sont plus nombreux et plus conducteurs en raison de la pollution.

La figure III.22.c représente la décharge électrique d'un isolateur recouvert d'une couche superhydrophobe. D'après cette figure, on constate que ce revêtement élimine l'adhérence de l'eau et des contaminants, maintenant ainsi une haute résistance superficielle. La tension nécessaire pour atteindre le contournement est plus élevée que dans les deux cas précédents qui est de l'ordre de 93 kV, car la surface superhydrophobe empêche efficacement la formation de chemins conducteurs, réduisant les courants de fuite.

La comparaison des trois cas montre clairement l'impact des différentes conditions de surface sur le comportement des décharges électriques sur un isolateur en verre. Un isolateur propre a une tension de contournement standard, une surface polluée réduit cette tension en facilitant les courants de fuite, tandis qu'un revêtement superhydrophobe augmente significativement cette tension en empêchant la formation de chemins conducteurs.

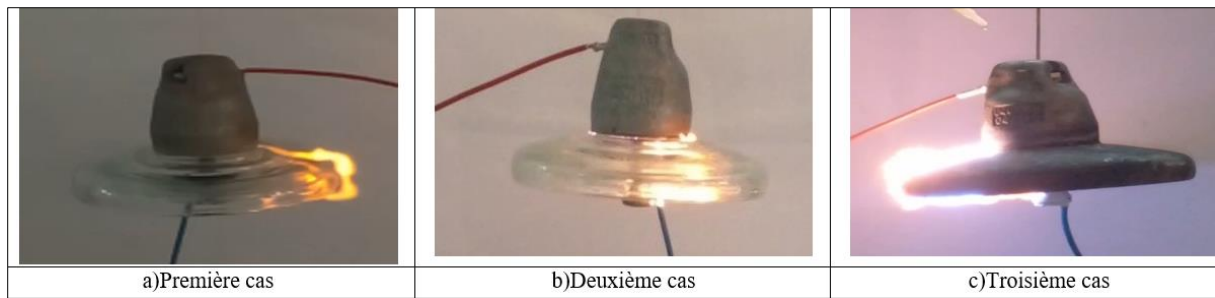
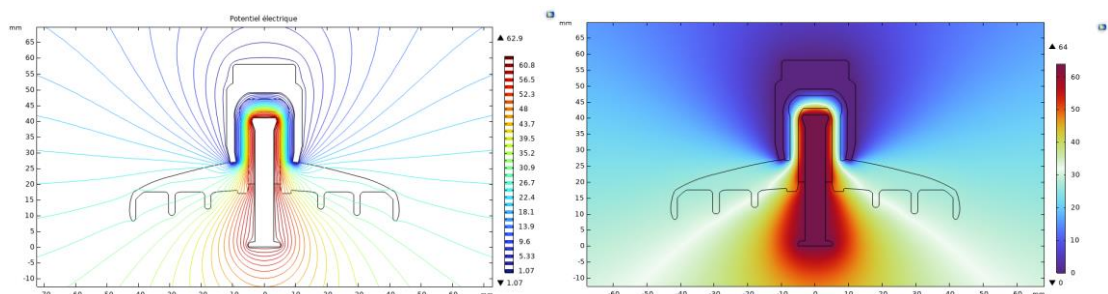


Figure III. 22: Visualisation de la décharge électrique propagée sur la surface d’un isolateur en verre propre (a), pollué (b) et revêtu en couche superhydrophobe (c)

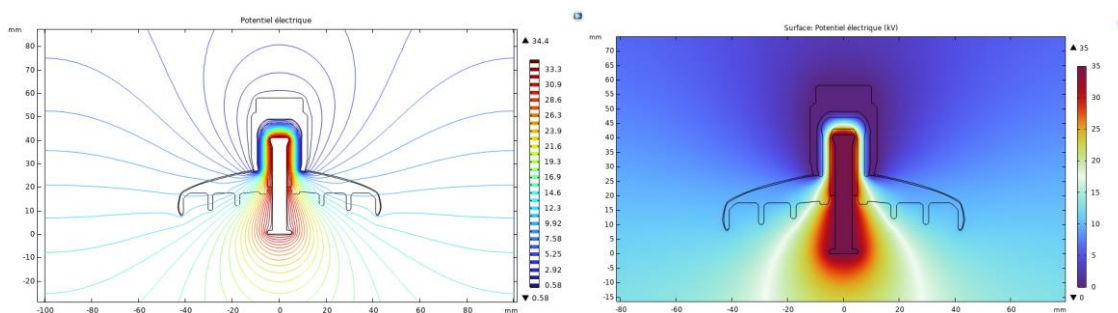
III .9.2 Résultats numériques

III .9.2.1 Étude de la distribution du potentiel électrique et de champ

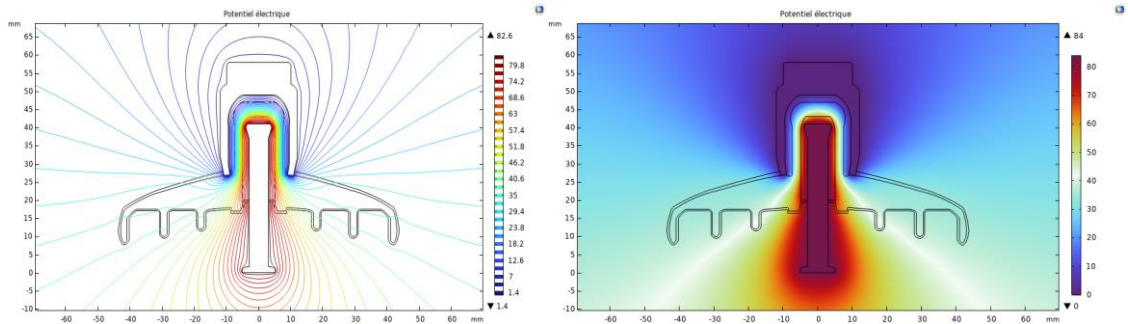
La figure III.23, représente les résultats de simulation pour la distribution de potentiel électrique pour les trois cas propre, revêtu en couche superhydrophobe et pollué de l’isolateur en verre (2D). Ces résultats nous montrent que le potentiel électrique concentré à l’électrode HT et réparti de manière diminuée au l’électrode mise à la terre la tension est presque nul. Mais dans la distribution des potentielles dans les cas où l’isolateurs est revêtu en couche superhydrophobe et pollué nous remarquons que seulement un changement minime qui a eu lieu. Cette différence est plus claire en examinant les courbes dès la figure III.23.b, qui donne la répartition axiale du potentiel.



a) Cas propre



b) Avec une couche polluante



c) Avec revêtu en couche superhydrophobe

Figure III. 23: Distribution de potentiel et des lignes équipotentielles sur un isolateur en verre

La figure III.24 illustre la distribution des lignes de champ électrique le long de l’isolateur dans les trois cas. D’après ces résultats, on se voit que les champs électriques sont élevés aux extrémités de l’isolateur dans le cas où l’isolateur pollué, la concentration est élevé dans certains endroits le long de la surface de l’isolateur.

Les lignes de champ électrique dans un environnement sec sont réparties de manière uniforme, tandis que la pollution sur l’isolateur modifie la distribution du champ. Les lignes de champ sont plus uniformes dans le cas du revêtement en couche superhydrophobe et le dépôts d’une couche polluante crée des points de concentration de champ, qui peuvent provoquer des décharges partielles. Le revêtement en couche super hydrophobe réduit les concentrations de champ ce qui suggère une meilleure performance en termes de résistance aux décharges et à la pollution.

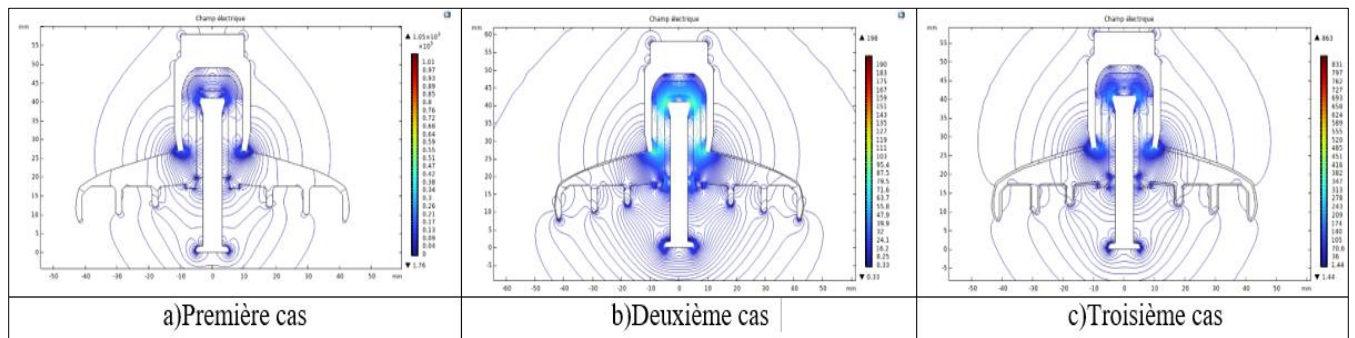


Figure III. 24: Lignes de champ électrique simulé d’un isolateur en verre

III.9.2.2 Étude de la répartition du potentiel et du champ électrique sur les lignes de coupe d’un isolateur en verre

L’objectif principal de cette étude est de déterminer la distribution du potentiel et du champ électrique le long d’un isolateur capot et tige. Cependant, mesurer expérimentalement de manière précise la distribution du potentiel et du champ électrique le long d’un isolateur est très difficile. L’axe vertical parallèle de distance 22 mm à l’axe de l’isolateur est représenté en rouge et la ligne de fuite est en bleu environ 150 mm.

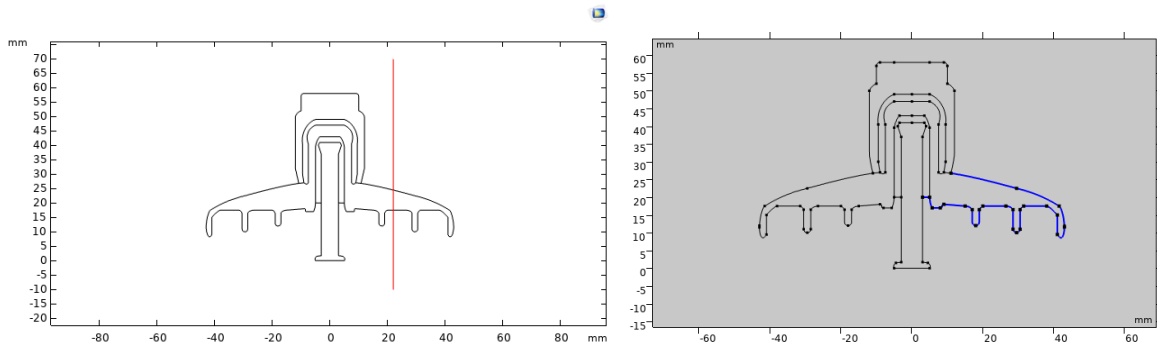
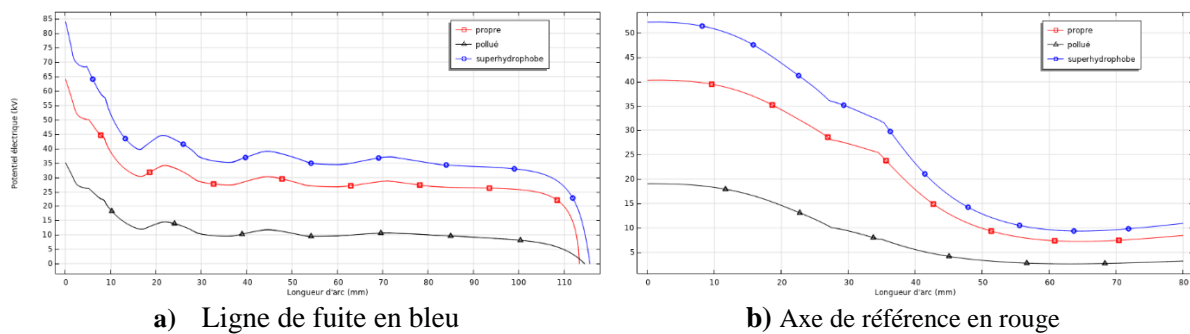


Figure III. 25: Ligne de référence de potentiel électrique et champ électrique d'isolateur en verre

La figure III.26 montre que la distribution du potentiel électrique le long de la ligne de fuite et de la ligne de référence varie de manière significative selon les trois états de surface étudiés (propre, pollué et revêtu de silicone (superhydrophobe)). Dans l'état propre, la distribution du potentiel électrique est plus homogène. Les valeurs maximales du potentiel se situent près de l'électrode haute tension, et elles diminuent progressivement jusqu'à l'annulation près de l'électrode de masse. A la présence d'une couche polluante, la distribution du potentiel électrique le long de la ligne de fuite peut être irrégulière en raison de sa conductivité et sa permittivité élevée. Les valeurs maximales du potentiel peuvent varier en fonction de la nature et de la quantité de contaminants présents sur la surface de l'isolateur.

Le revêtement en couche superhydrophobe sur l'isolateur en verre peut modifier la distribution de potentiel. La couche de silicone agit comme un isolant supplémentaire, répartissant plus uniformément le potentiel le long de la surface. Cela peut améliorer la performance de l'isolateur.



a) Ligne de fuite en bleu

b) Axe de référence en rouge

Figure III. 26: Distribution de potentiel électrique le long d'un isolateur en verre

La figure III.27 illustre le champ électrique le long de l'isolateur. Dans trois conditions : propre, pollué et superhydrophobe.

Pour un isolateur propre (Figure III.27a), on observe une distribution relativement uniforme du champ électrique le long de la ligne de fuite. Cependant, dans le cas d'un isolateur pollué, on remarque des zones de forte concentration du champ électrique, probablement dues à des accumulations de contaminants. À l'opposé, pour un isolateur superhydrophobe conçu

pour repousser l'eau et les contaminants, la distribution du champ électrique est beaucoup plus homogène le long de la ligne de fuite.

En ce qui concerne la figure III.27.b, elle représente une vue plus détaillée de la distribution du champ électrique sur une plage de distance plus restreinte. On y observe des différences significatives entre les trois conditions. Pour l'isolateur propre, le champ électrique augmente progressivement et de manière uniforme. Dans le cas pollué, on note des variations importantes du champ, avec des pics probablement causés par l'accumulation d'ions dans certaines zones. Enfin, pour l'isolateur superhydrophobe, le champ électrique suit une distribution plus lisse, avec une décroissance progressive.

Ces allures nous permettent d'observer visuellement comment le champ électrique est distribué sur un isolateur en verre propre comparativement à un isolateur pollué ou superhydrophobe. Elles mettraient également en évidence les effets potentiels des contaminations sur la distribution spatiale du champ électrique autour de l'isolateur.

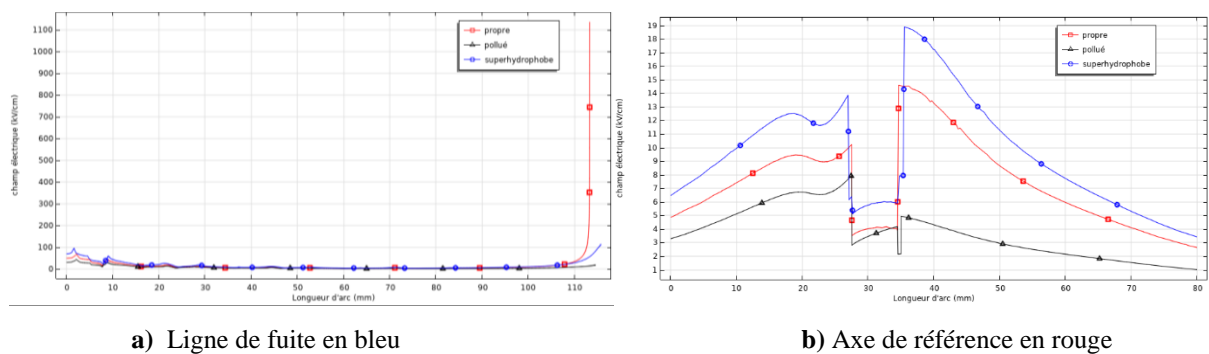


Figure III. 27: Distribution de champ électrique le long d'un isolateur en verre

III.10 Comparaison des résultats pratiques avec des résultats numériques

Pour valider les résultats de simulation obtenus avec le logiciel COMSOL Multiphysics, nous avons comparé les valeurs de la tension de contournement issues des essais expérimentaux avec celles prédites par les simulations numériques.

Dans le cas de l'isolateur en silicone, les simulations ont montré une bonne concordance avec les résultats pratiques. La présence de gouttes d'eau ou de pollution sur la surface de l'isolateur a entraîné une réduction significative de la tension de contournement, à la fois dans les expériences et les simulations. Les zones de forte concentration du champ électrique observées numériquement au niveau des gouttes concordent avec les chemins de décharge électrique visualisés lors des essais.

Pour l'isolateur en verre, on constate également une bonne corrélation entre les simulations et les essais pratiques. Dans le cas propre, la distribution du potentiel et du champ

électrique obtenue par simulation est relativement uniforme, ce qui est cohérent avec la tension de contournement standard mesurée expérimentalement. En présence d'une couche de pollution, les simulations ont révélé des irrégularités dans la répartition du potentiel et du champ, avec des zones de forte concentration similaires aux trajectoires de décharge observées lors des essais. Cette concordance valide l'impact néfaste de la pollution sur les performances des isolateurs en verre.

Enfin, les simulations du revêtement superhydrophobe ont prédit une distribution de potentiel et de champ électrique plus uniforme. Ceci est en accord avec l'augmentation significative de la tension de contournement constatée expérimentalement grâce à ce revêtement, qui empêche l'adhérence de l'eau et des contaminants.

Cette comparaison entre les résultats pratiques et numériques a permis de valider l'approche par simulation sous COMSOL Multiphysics pour l'étude du comportement électrique des isolateurs haute tension dans diverses conditions environnementales. Les simulations ont fourni des résultats cohérents avec les observations expérimentales, confirmant leur capacité à prédire avec précision la distribution du potentiel et du champ électrique ainsi que les performances de tenue diélectrique des isolateurs.

III.11 Conclusion

Cette étude a consisté sur la réalisation d'essais en laboratoire simulant divers scénarios appliqués à deux modèles d'isolateurs (en silicone et en verre) à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics. L'objectif était d'étudier le potentiel électrique et le champ électrique le long de ces isolateurs.

Les résultats des essais avec un isolateur en silicone humide ont montré que les gouttes d'eau se déformaient dans la direction des lignes de champ électrique, provoquant des décharges partielles.

La tension de claquage était légèrement influencée par la conductivité de la pollution, qu'il s'agisse de gouttes sur l'isolateur en silicone ou d'une couche sur l'isolateur capot et tige en verre. Nous avons observé que la présence de pollution réduisait la capacité d'isolation, rendant celle-ci conductrice. Pour une meilleure protection, un revêtement superhydrophobe a été utilisé.

L'utilisation du logiciel COMSOL Multiphysics pour simuler le champ et le potentiel électrique s'est avérée bénéfique pour comprendre les phénomènes électriques comme la distribution du champ et les arcs de décharge des isolateurs haute tension.

Notre étude a mis en évidence une cohérence entre les résultats expérimentaux et ceux issus de simulations numériques dans ce domaine spécifique.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Dans notre mémoire, nous avons commencé par une recherche bibliographique, en expliquant les matériaux et les isolateurs utilisés en électrotechnique. Nous avons parlé aussi sur la silicone en expliquant les propriétés de ce matériau.

L'importance de notre travail est l'étude de la décharge électrique dans les isolateurs hautes tensions, afin d'augmenter la tension et assurer la protection des équipements et les lignes aériennes. Pour cela nous avons donné la définition de la décharge électrique, et nous avons expliqué les types de décharges électriques que ce soit dans l'air, les liquides et dans les solides.

Les conclusions issues de notre enquête sont le produit d'une série de tests, que nous réalisons au laboratoire des diélectriques au bloc haute tension pour étudier les performances des isolateurs haute tension en silicone et en verre, chacun soumis aux conditions que nous avons appliquées sur leur surface. Des études de simulation sont effectuées à l'aide de logiciel commercial COMSOL Multiphysics (version 6.1), permet de nous donner la distribution et la répartition du potentiel et du champ électrique le long des deux modèles d'isolateurs, les résultats que nous obtenues sont détaillés en points essentiels ci-dessous :

- La présence des gouttelettes d'eau sur la surface des isolants augmente la probabilité de contournement de la décharge électrique, grâce à sa propriété conductrice. Pour cela, il est nécessaire de mettre une couche superhydrophobe à sa surface (cas d'un isolateur capot et tige en verre).
- Comparons entre les deux modèles des isolateurs haute tension en silicone et en verre (capot et tige), on peut dire que les isolateurs en silicone ont une bonne résistance aux conditions environnementales le fait que sa tension de claquage est plus élevée.
- Pour comprendre les phénomènes électriques, tel que la distribution et la répartition du champ et du potentiel électrique le long des isolateurs, COMSOL Multiphysics est le meilleur logiciel commercial qui permet d'obtenir des résultats numériques.
- Le changement dans les valeurs du champ et de potentiel électrique lors de nos essais de simulation, remonte à la croissance et décroissance de la tension alternative qui nous avons appliquée sur les deux types d'isolateur.

Conclusion Générale

- Les propriétés diélectriques telles que la conductivité électrique et la permittivité relative des matériaux jouent un rôle sur les courbes de distribution du champ et du potentiel électrique.

D'après notre recherche, nos résultats numériques et pratiques, nous concluons que la silicone est un meilleur matériau qui a une bonne efficacité d'isolement. Et que son utilisation dans les revêtements en couches superhydrophobe permet une obtention d'une meilleure performance des réseaux électriques aériens.

Références Bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] **W. L. Vosloo, R. E. Macey et C. de Turreil**, « The Practical Guide to Outdoor High Voltage Insulators » Crown Publications CC, Johannesburg, Afrique du Sud, 2004.
- [2] **R. Ydjedd**, « Performance d'une surface en silicone recouverte des gouttes d'eau sous tension alternative », mémoire de master, Université de Bejaia, 2013.
- [3] **J P. Hautier, F. Forest, T. Lebey et C. Joubert**, « Matériaux pour l'électronique de puissance », extrait de Dunod, édition 2015.
- [4] **E. Azzag**, « Problèmes de contournement et perforation des isolateurs de haute tension », thèse doctorat d'état, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2007.
- [5] **O. Lamarene**, « Influence d'une barrière isolante sur la tension de claquage et sur le champ électrique », mémoire de magistère, UAM Bejaia septembre 2005.
- [6] **N. Bergere**, « Isolants liquides en électrotechnique présentation général », technique de l'ingénieur, traite D2470 pop, Mai 2002.
- [7] **P. Combette et I. Ernoult**, « Structure, fabrication et emploi », Edition HERMANN, 2005.
- [8] **A. Chabloz**, « technologie des matériaux à l'usage de profession de l'électricité », 5^{ème} édition, Villars Mendraz, 1986.
- [9] **A. Mekhaldi** « Etude des phénomènes de conduction et de décharge électrique sur des surfaces isolantes polluées sous tension alternative 50 Hz », thèse de doctorat d'état de génie électrique, ENPT, Alger 1999.
- [10] **S. Medjahed et M. Iblaiden**, « Etude de l'évolution temporelle de la sévérité de pollution d'un site », mémoire de fin d'étude DEUA en électrotechnique, Université de Bejaia, 2005.
- [11] **A.K. Srivastava et P. Datta**, « Electrical Insulating Materials », CRC Press, Taylor & Francis Group, 2^{ème} édition, 2009.
- [12] **M.J. Hernandez, R. Harley. Hampton et R. Hartline**, « Correlation between tan and diagnostic », IEEE, Trans, oelect, issu, Vol 16 n 01, pages 162-170, février 2009.
- [13] **J. Dunogues et M. Pouchard**, « Silicium », Encyclopaedia Universalis, 2011.
- [14] **F. Aouabed**, « Contribution à l'étude est à l'évaluation des performances électrique des isolations en silicone pollué sous tension alternative », thèse de doctorat université Ferhat Abass Sétif 1, 2018.
- [15] **L. Carette et J.M. Pouchol**, « Les Silicones, Matières Thermodurcissables : Monographie », Les Techniques de l'ingénieur, Plastique et composite, A3475, 2005.
- [16] **J. Verdu**, « Vieillissement des plastiques, AFNOR Technique », Edition Eyroles, Paris 1984.

Références Bibliographiques

- [17] **M. Tegar**, « Etude mathématique des mécanismes de développement des décharges électriques sur des isolateurs installés en régions polluées », mémoire magister, Génie Electrique, ENP 1993.
- [18] **A. Elahouel**, « Synthèse et caractérisation d'une silicone. L'effet de silicone sur la composition d'un Sérum Andrea Dottie », mémoire de master, université de Blida 1, 2020.
- [19] **D. H. Nguyen**, « Etude des propriétés électriques des élastomères silicones utilisés pour l'isolation électrique », thèse de doctorat, université Joseph Fourier Grenoble, 2005.
- [20] **Kh. Hamour et A. Chekri**, « Caractérisation des décharges électrique évoluant dans un intervalle d'air pointe – barrière polluée – pointe sous tension continue », mémoire de master, université de Bejaia, 2015.
- [21] **R.L. Rechtschaffner**, « Stared fractions of $2n$ and 3 factorial designs », *Tehnometrics*, vol.9. (1967).569-575.
- [22] **R. Walker**, « Électromagnétisme », Halliday, 10^{ème} édition, 2020.
- [23] **Discharge Handbook (I)**, « Gas Plasma », Electrical Society of Japan, IEEE, 1998.
- [24] **F.F. Chen** « Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion », edition Third, université de California USA, 2016.
- [25] **E. Kuffel et M. Abdoullah**, « High voltage engineering », Library of Congress Catalog Card N° 72-85501, first edition.1970.
- [26] **Y. Choutri et H. Rebhi** « Etude de la rigidité diélectrique des intervalles d'air pointe-plan avec les différentes formes de tensions », mémoire de master Académique, université Mohamed Boudiaf M'sila, 2017.
- [27] **Y. Zebboudj**, « Technique de haute tension », polycopie de cours, université de Bejaïa, 2021.
- [28] **L. B. Loeb**, « Electrical breakdown of gases with steady or direct current impulse potentials », in *Encyclopedia of Physics*, volume XXII: Gas Discharges II edited by S. Flügge, Springer Verlag, Berlin (1956).
- [29] **N. Ibrahima**, « Initiation et développement des décharges couronnes sur une surface de glace », mémoire de master, université du Québec, 2003.
- [30] **Y. P. Raizer**, « Gas discharge physics », édition Springer-Verlag, 1991.
- [31] **A. Gibert et all**, « Caractéristiques du canal de décharge déduites d'enregistrements », *Electra* N° 74, 1981.
- [32] **N. Bouchenaf et S. Yagoub**, « Etude paramétrique de la décharge électrique avec barrière diélectrique », mémoire de master, université de Tiaret, 2015.

Références Bibliographiques

- [33] **Y. Brahami**, « Technique de la haute tension », support pédagogique, ESG2E Oran, 2020/2021.
- [34] **B. Aladenize et all**, « Les diélectriques, propriétés diélectriques des matériaux isolants », édition Hermes, 1993.
- [35] **N. Lellouche et T. Khan**, « Caractérisation électrique des matériaux isolants soumis à une décharge électrique », mémoire de master, université de Guelma, 2020
- [36] **M. Soufi et M. Zemirline**, « Conception d'un modèle dynamique de contournement d'un isolateur pollué sous tension alternative 50 Hz », mémoire de master, Génie Électrique, ENP 2004.
- [37] **A. Belkebir**, « Etude d'un isolateur à haute tension par l'intelligence artificielle », thèse de doctorat, université Ouargla, 2023.
- [38] **Leroy et Cie**, « Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions », Collection de la direction des études et recherches d'électricité de France, Paris 1984.
- [39] **Comsol Multiphysics User's guide**, version 5.4, Burlington, ma : Comsol, Inc., Octobre 2018
- [40] **A. Kara**, « Contribution à l'étude d'un modèle dynamique de contournement d'un isolateur pollué », mémoire de magister, université Ferhat Abbas, Sétif, 2013.
- [41] **E. Benrahal**, « Etude du comportement des gouttelettes d'eau déposées sur une surface isolante superhydrophobe », mémoire de master, université de Ghardaïa, 2019.
- [42] **F. Aouabed**, « Contribution à l'étude d'un circuit équivalent des isolateurs synthétiques sous pollution en utilisant l'EMTP », mémoire de magister, université Ferhat Abbas, Sétif, 2010.