

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة فرحات عباس – سطيف 1

UNIVERSITE FERHAT ABBAS –SETIF1

Thèse de Doctorat en Sciences

Présentée au département d'Electrotechnique

Faculté de Technologie

Pour obtenir le diplôme de :

Doctorat en Sciences - Electrotechnique

Par

M^{me} AOUABED Fatiha

Thème

Contribution à l'étude et à l'évaluation des performances électriques des isolations en silicone polluées sous tension alternative

Soutenue le 25/09/2018 devant la commission d'examen composée de

Prof. Ahmed GHERBI	Prof. à l'Université Ferhat Abbas Sétif 1	Président
Prof. Abdelhafid BAYADI	Prof. à l'Université Ferhat Abbas Sétif 1	Directeur de thèse
Prof. Rabah BOUDISSA	Prof. à l'Université A. Mira de Bejaia	Co- Directeur de thèse
Prof. Hocine MOULAI	Prof. à l'Université des Sciences et Technologies-USTHB, Alger	Examinateur
Prof. Leila MOKHNACHE	Prof. à l'Université Mustapha Benboulaïd Batna 2	Examinatrice
Prof. Hamou NOURI	Prof. à l'Université Ferhat Abbas Sétif 1	Examinateur

Déclaration

Ce travail n'a pas été déjà accepté et n'est pas soumis en considération pour un diplôme quelconque.

Signé (AOUABED Fatiha)

Déclaration 1

Cette thèse est soumise pour l'obtention du diplôme de DOCTORAT Science.

Signé (AOUABED Fatiha)

Déclaration 2

Cette thèse est le résultat de mes propres investigations, sauf indication contraire.

D'autres sources sont reconnues par des références explicites. Une bibliographie est jointe en annexe.

Signé (AOUABED Fatiha)

Liste des publications

Publication internationales

1. Aouabed .F, Bayadi .A, Boudissa.R, "Flashover voltage of silicone insulating surface covered by water droplets under AC voltage," Electric Power Systems Research 143 (2017) 66–72 <http://www.sciencedirect.com/science/journal/03787796/143>
2. Fatiha Aouabed ; Abdelhafid Bayadi ; Alaa Eddin Rahmani ; Rabah Boudissa, "Finite element modelling of electric field and voltage distribution on a silicone insulating surface covered with water droplets," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 25, pp. 413 – 420, 19 April 2018. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8341632/>

Communication internationales

1. Aouabed .F, Bayadi .A, Satta .S et Boudissa .R, " Développer un circuit de l'isolateur synthétique sous pollution en utilisant l'EMTP," International conférence on systems and processing information May 15-17, 2011, Guelma, Algeria
2. Aouabed .F, Bayadi .A, Boudissa .R, "Study of the Distribution of the voltage and electric field on the surface of synthetic insulation Using COMSOL Multiphysics," International Conference on Electromechanical Engineering (ICEE'2012) Skikda, Algeria 20-22, Novembre 2012.
3. Aouabed .F, Bayadi .A, Boudissa .R, " Conductivity Effect On The Flashover Voltage Of Polluted Polymeric Insulator Under AC Voltage," The 3rd International conference On Information And Electrical Engineering, Tebessa Algeria 2014.
4. Aouabed .F, Bayadi .A, Rahmani .A "Finite Element Modeling for Electric Field and Voltage Distribution on Silicone Insulating Surface Covered by Water Droplets," Société Française d'électrostatique 29-31 août 2016, Poitiers, France.
5. Anane .Z, Aouabed .F, "Modeling and Analysis of Electromagnetic field around and near the OTL", Société Française d'électrostatique 29-31 août 2016, Poitiers, France.

Communication nationales

1. Aouabed .F, Bayadi .A, Boudissa .R, " Performance d'une surface en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau sous tension alternative," 1^{er} workshop sur la pollution des isolateurs des réseaux électrique USTO ORAN 29 avril 2013.
2. Aouabed .F, Bayadi .A, Boudissa .R, "Influence of Water droplets on the Electric Field and Voltage Distributions behavior of polymeric insulators," National Conference On High Voltage will be held in Algiers, Algeria starting on 24th May, 2016.
3. Aouabed .F, Bayadi .A Boudissa .R," Comparison of Conductivity Effect of the Flashover Voltage in Silicone and Porcelain Insulators under AC Voltage," Algerian Large Electrical Network Conference, Hilton, Algiers, Algeria, CAGRE-2015.

Journées des Doctorants

1. Aouabed .F, Bayadi .A, "Participation aux Journées des Doctorants" Université Setif, Avril 2012.
2. Aouabed .F, Bayadi .A, "Participation aux Journées des Doctorants" Université Setif, Avril 2013.

ملخص:

الهدف العام لهذا البحث هو إجراء دراسات تجريبية وعددية حول تأثير قطرات الماء على الجهد الالتفافي لسطح سيليكون كاره للماء (مسعور) مع حقل غير منتظم تحت جهد التيار المتناوب.

الجزء الأول من هذا العمل مخصص للدراسة التجريبية حول أداء عازل السيليكون . يتم دراسة تأثير قطرات الماء وفقا لعدة عوامل على الجهد الالتفافي مثل الحجم، ناقلية الماء، موضع القطرات بالنسبة للأقطاب، عدد قطرات الماء، المسافة بين القطرات على طول العرض و خط التسرب للعزل وكذلك زاوية ميل الأخير بالنسبة الأفقي.

في الجزء الثاني، يتم استخدام طريقة عددية لتحليل تأثير وجود وتشوه قطرات الماء على الحقل الكهربائي، وأنشطة التفريغ الكهربائي والتدهور السطحي للعزل. لتقييم توزيع المجال الكهربائي على طول العازل وتحديد المناطق الرئيسية للحقل الحرج، تم استعمال برنامج COMSOL Multiphysics.

كلمات مفتاحية: سطح السيلكون كاره للماء (مسعور)، منطقة جافة، ناقلين نقطيين، قطرات الماء، زاوية الميل، طريقة الحدود المتناهية.

Résumé

L'objectif général de ce travail de recherche est de mener des études expérimentales et numériques sur l'effet des gouttes d'eau sur la tension de contournement d'une surface en silicone hydrophobe à champ non uniforme mise sous tension alternative.

La première partie de ce travail est consacré sur l'étude expérimentale sur la performance d'une isolation en silicone. L'effet des gouttes d'eau est étudié en fonction de plusieurs paramètres sur la tension de contournement tels que le volume, la conductivité de l'eau, la position des gouttes par rapport aux électrodes, le nombre de gouttes d'eau, la distance entre les gouttes le long de la largeur et de la ligne de fuite de l'isolation ainsi que l'angle d'inclinaison de cette dernière par rapport à l'horizontale.

Dans la deuxième partie, une méthode numérique est utilisée pour analyser l'influence de la présence et la déformation des gouttes d'eau sur le champ électrique, les activités de la décharge électrique et les dégradations de surface de l'isolation. Pour évaluer la distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite de l'isolateur et identifier les principales régions du champ critique, le logiciel COMSOL Multiphysics a été exploité.

Mots Clés : surface en silicone hydrophobe, zone sèche, pointe-pointe, goutte d'eau. Angle d'inclinaison, MEF, COMSOL Multiphysics

Abstract

The main objective of this research is devoted to experimental and numerical study of the effect water droplets on the flashover voltage of a hydrophobic silicon insulating surface with non-uniform field under AC voltage.

The first part of this work is devoted to the experimental study on the performance of silicon insulation. The effect of water droplets on the flashover voltage is investigated according to several parameters such as volume, number and conductivity of the droplets, their positions with respect to the electrodes, the distance between the drops along the width and the creepage distance of the insulation as well as the inclination angle with respect to the horizontal.

In the second part, a numerical method is developed for analyzing the influence of the presence and the deformation of water droplets on the electric field, the electric discharge activities and the surface degradations of the insulation. To evaluate the distribution of the electric field along the insulator's creepage distance and to identify the main regions of the critical field, the COMSOL Multiphysics software has been exploited.

Key Words: silicon surface hydrophobic, dry band, rod-rod, water droplets, angle of inclination, EFM, COMSOL Multiphysics

Dédicaces

A mes très chers parents pour leur sacrifice, leur amour, leur patience, leur soutien, leur encouragement et leurs prières qui ont constitué l'essence de ma réussite, sans oublier les défunt(e)s ; la sœur « *Samira* » et la belle mère « *Djida SEBBANE* » dont l'image et le souvenir resteront à jamais gravés dans ma mémoire. Merci d'être si fiers de moi.

A mon cher mari « *DJOUDI* »

A mon cher fils « *HAMZA* »

A toute ma famille

A tous ceux qui me sont chers

AOUABED. FATIHA

Remerciements

Mes remerciements Avant tout, louange à « *ALLAH* » qui m'a donné la force, le courage et la patience pour réaliser ce modeste travail.

Je tiens, avant tout, à exprimer ma profonde gratitude à mon directeur Prof : A. BAYADI qui a été à l'origine de ce travail, pour sa disponibilité, pour sa confiance qu'il m'a témoigné, ainsi que ses conseils précieux et ses encouragements qui m'ont beaucoup aidé à mener à bien la réalisation de ces travaux. Qu'il trouve ici ma profonde reconnaissance.

Je tiens à remercier mon Co-directeur Prof : R. BOUDISSA pour sa constante présence au sein du laboratoire de Haute Tension de Bejaia ainsi que ses précieux conseils dans le domaine de la recherche scientifique.

J'adresse mes vifs remerciements au professeur Ahmed GHERBI, pour avoir accepté de juger ce travail et m'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance.

Je tiens aussi à remercier Madame Leila MOKHNACHE, Professeur à l'Université de Batna, Monsieur Hocine MOULAI, Professeur à l'USTHB d'Alger et Monsieur NOURI Hamou, Professeur à l'université de Sétif, d'avoir accepté d'être examinateurs de ce travail.

Je tiens à remercier nos parents car ce travail représente un petit fruit de leur souffrance et qui sans eux je ne peux traverser ces longues années d'études et de travail.

Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

AOUABED Fatiha

TABLE DES MATIÈRES

- *Abréviations et symboles*
- *Liste des figures*
- *Liste des tableaux*

CHAPITRE 01

INTRODUCTION GENERALE

1.1. Contexte général.....	1.1
1.2. Problématique.....	1.3
1.3. Objectif.....	1.5
1.4. Contribution du travail actuel.....	1.6
1.5. Originalité du sujet.....	1.6
1.6. Structure de la thèse.....	1.7

CHAPITRE 02

GENERALITES SUR LES ISOLATEURS POLYMERES

2.1. Introduction.....	2.1
2.2. Isolateurs polymériques.....	2.1
2.2.1. Histoire et bibliographie des isolateurs polymères.....	2.1
2.2.2. Evolution d'isolateurs composites en Algérie (en GRTE).....	2.3
2.2.3. Définition.....	2.4
2.2.4. Construction et matériaux.....	2.5
2.2.5. Principaux types d'isolateurs composites.....	2.6
2.2.6. Conditions d'utilisation.....	2.7
2.2.7. Avantages et les inconvénients des isolateurs polymères.....	2.7
2.3. Caractéristiques des surfaces diélectriques polymères.....	2.11
2.3.1. Energie de surface et angle de contact des gouttes d'eau.....	2.11
2.3.2. Hydrophobicité des isolateurs composites.....	2.12
2.3.3. Rigidité diélectrique longitudinal.....	2.15
2.3.4. Résistance aux décharges surfaciques.....	2.15
2.3.5. Tension de contournement.....	2.15
2.4. Pollution des isolateurs.....	2.16
2.4.1. Sources et nature de pollution.....	2.16
2.4.2. Classification des sites pollués.....	2.17
2.4.3. Conséquences de la pollution.....	2.18
2.5. Conclusion.....	2.21

CHAPITRE 03**REVUE DE LITTERATURE**

3.1. Introduction	3.1
3.2. Étude bibliographique	3.2
3.2.1. Les isolateurs composites hydrophiles.....	3.2
3.2.2. Les isolateurs composites hydrophobes	3.6
3.3. Conclusion.....	3.25

CHAPITRE 04**DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX ET TECHNIQUE DE
MESURE**

4.1. Introduction	4.1
4.2. Circuits d'essai et de visualisation.....	4.1
4.3. Systèmes d'électrodes.....	4.2
4.4. Matériau isolant.....	4.3
4.5. Solutions polluante.....	4.4
4.6. Correction des valeurs de tension de contournement	4.4
4.7. Arrangement des gouttes d'eau.....	4.8
4.8. Zone sèche.....	4.9
4.9. Angle d'inclinaison de l'isolation	4.12
4.10. Conclusion.....	4.13

CHAPITRE 05**PERFORMANCE D'UNE SURFACE EN SILICONE
HYDROPHOBE HORIZONTALE RECOUVERTE DE
GOUTTES D'EAU**

5.1. Introduction	5.1
5.2. Résultats et analyse.....	5.1
5.2.1. Système de configuration pointe-pointe en position horizontale.....	5.1
5.2.2. Système de configuration Plan-planen position horizontale.....	5.10
5.3. Conclusion.....	5.19

CHAPITRE 06

PERFORMANCE D'UNE SURFACE EN SILICONE HYDROPHOBE INCLINEE ET RECOUVERTE DE GOUTTES D'EAU

6.1. Introduction	6.1
6.2. Résultats et discussions.....	6.2
6.2.1. Pour les petits volumes.....	6.2
6.2.2. Position de l'électrode sous tension	6.10
6.2.3. Conductivité des gouttes d'eau.....	6.11
6.2.4. Rapport de conductivités	6.12
6.3. Conclusion	6.14

CHAPITRE 07

REPARTITION DU CHAMP ET TENSION ELECTRIQUE EN PRESENCE DES GOUTTES D'EAU SUR LA SURFACE DE L'ISOLATION

7.1. Introduction	7.1
7.2. Procédure de simulation.....	7.2
7.3. Modélisation d'éléments finis	7.3
7.3.1. Simulation d'un modèle d'isolateur	7.4
7.3.2. Propriétés matérielles.....	7.5
7.3.3. Conditions aux limites.....	7.5
7.3.4. Maillage	7.5
7.3.5. Résolution par la méthode d'éléments finis.....	7.6
7.4. Résultats et discussions.....	7.8
7.4.1. Isolation plane.....	7.8
7.4.2. Isolateur réel.....	7.21
7.4.3. Résultats de 3D.....	7.34
7.5. Conclusion	7.39

CHAPITRE 08

CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES

8.1. Conclusion	8.1
8.2. Recommandations.....	8.2

- *Références Bibliographiques*

Liste des figures

Figure 2.1 : Evolution de l'utilisation des chaînes isolateurs composites.....	2.3
Figure 2.2 : Evolution d'installation des chaînes des isolateurs en polymères par rapport à la longueur totale du réseau	2.4
Figure 2.3 : Isolateurs composites sur une ligne électrique	2.5
Figure 2.4 : Coupe transversale d'un isolateur composite.....	2.6
Figure 2.5 : Isolateur de suspension composée	2.6
Figure 2.6 : Isolateur composé de poste de suspension	2.7
Figure 2.7 : Angle de contact d'une goutte d'eau sur une surface solide [2.14].....	2.11
Figure 2.8 : Comportement d'une goutte d'eau sur une surface isolante [2.14].....	2.12
Figure 2.9 : Classe d'hydrophobicité suivant le guide STRI [2.36].....	2.14
Figure 2.10 : Source de pollution.....	2.16
Figure 2.11 : Processus de vieillissement des surfaces composites [2.44]	2.19
Figure 3.1 : Comparaison de la performance en matière de pollution des isolateurs non céramiques et verre [1.19]	3.5
Figure 3.2 : Modèle d'Obenaus.....	3.7
Figure 3.3 : Développement de contournement des isolateurs en silicone	3.9
Figure 3.4 : Variation de l'angle de contact en fonction de la température et du temps [2.16]	3.12
Figure 3.5 : Comportement d'une goutte d'eau et le champ électrique.....	3.13
Figure 3.6 : Tension de contournement en fonction du volume et la conductivité des gouttes	3.13
Figure 3.7 : Champ électrique à la triple jonction des gouttes d'eau [3.50]	3.17
Figure 3.8 : Trace de dégradation sur la surface de l'isolateur polymère [3.52]	3.17
Figure 3.9 : Le courant de fuite entre l'isolateur en hybride et céramique [3.58].....	3.19
Figure 3.10 : Dessin montrant l'emplacement de l'arc lors d'expériences de pluie sur une section d'un isolateur composite SiR	3.21

Figure 3.11 : Relation entre la conductivité et le gradient de contournement pour les surfaces polymères hydrophobes et hydrophiles [3.70]	3.22
Figure 3.12 : Tension de contournement en fonction du nombre de contournement pour une conductivité d'eau de 630 $\mu\text{S}/\text{cm}$ [3.70].....	3.23
Figure 3.13 : Lignes équipotentielles d'un raccord d'extrémité d'un isolateur composite....	3.24
Figure 4.1 : Schéma de mesure de tension de contournement et de visualisation de la décharge électrique	4.2
Figure 4.2 : Différentes configurations d'électrodes et échantillons en silicone	4.3
Figure 4.3 : Appareil de mesure de conductivité volumique (Conductimètre).....	4.4
Figure 4.4 : Tension de contournement en fonction du nombre de ranges	4.6
Figure 4.5 : Photo montrant un dessiccateur en verre	4.7
Figure 4.6 : Facteurs de correction.....	4.7
Figure 4.7 : Arrangement des gouttes d'eau sur une surface en silicone hydrophobe.....	4.9
Figure 4.8 : Scenario [4.2].....	4.10
Figure 4.9 : Position de la zone sèche au voisinage des électrodes HT et terre.....	4.11
Figure 4.10 : Position de la zone sèche au voisinage des bords gauches et droits des électrodes HT et terre.....	4.11
Figure 4.11 : Position de la zone sèche au voisinage des électrodes HT et terre.....	4.11
Figure 4.12 : Différentes positions de l'isolation en silicone.....	4.12
Figure 5.1 : Phases de développement d'une décharge électrique sur une surface en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau selon un arrangement à caractéristiques : $d_g = 2\text{cm}$, $a_r = 1\text{cm}$, $n_r = 11$ rangées.....	5.3
Figure 5.2 : Tension de contournement d'une isolation hydrophobe en fonction du nombre de rangées de gouttes et la distance entre elles	5.4
Figure 5.3 : Réduction relative de la tension de contournement en fonction du nombre de lignes.....	5.4
Figure 5.4 : Tension de contournement en fonction de la distance entre les rangées de gouttes d'eau recouvrant une surface en silicone hydrophobe.....	5.7

Figure 5.5 : Tension de contournement en fonction de la largeur et la position d'une bande sèche parallèle à la droite joignant les électrodes.....	5.7
Figure 5.6 : Phases de décharge de rupture dans le cas d'une zone sèche parallèle à la droite joignant des deux électrodes.....	5.8
Figure 5.7 : Tension de contournement en fonction du nombre de rangées perpendiculaires la droite joignant des deux électrodes	5.9
Figure 5.8 : Phases de contournement d'une surface hydrophobe à une seule rangée de gouttes d'eau en contact avec la pointe sous tension.....	5.9
Figure 5.9 : Tension de contournement en fonction de la conductivité superficielle	5.10
Figure 5.10 : Phases de développement d'une décharge électrique sur une surface en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau.	5.12
Figure 5.11 : Tension de contournement d'une isolation hydrophobe en fonction du nombre de rangées de gouttes	5.12
Figure 5.12 : Tension de contournement en fonction de la position et de la taille d'une zone sèche	5.13
Figure 5.13 : Phases de décharge de rupture dans le cas d'une zone sèche perpendiculaires à la droite joignant les électrodes	5.14
Figure 5.14 : Tension de contournement en fonction de la largeur de la bande sèche	5.15
Figure 5.15 : Phases de contournement à une seule rangée de gouttes d'eau en contact avec la pointe sous tension.....	5.15
Figure 5.16 : Distribution de la pollution non uniforme	5.16
Figure 5.17 : Tension de contournement en fonction de nombre de rangées fortement polluées côté HT	5.17
Figure 5.18 : Tension de contournement en fonction de nombre de rangées fortement polluées côté terre	5.17
Figure 5.19 : Phases de contournement d'une surface non uniformément contaminée (rangées de gouttes d'eau fortement polluées du côté HT).....	5.18
Figure 5.20 : Phases de contournement d'une surface non uniformément contaminée (rangées de gouttes d'eau fortement polluées du côté terre).....	5.19
Figure 6.1 : $\hat{U}_c = f(\alpha^\circ, V_g)$ d'une isolation en silicone hydrophobe, $\sigma = 10 \mu\text{S/cm}$	6.5

Figure 6.2 : Différentes phases de contournement de la surface isolante pour $\alpha_c = 90^\circ$	6.5
Figure 6.3 : Différentes phases de contournement de la surface isolante $\alpha_c = 90^\circ$	6.6
Figure 6.4 : $U_{AC} = f(\alpha, Vg)$ pour une isolation en silicone hydrophobe	6.8
Figure 6.5 : Contournement d'une surface en silicone recouverte de grosses gouttes	6.8
Figure 6.6 : Points d'intersection pour différents volumes	6.9
Figure 6.7 : Phots du point d'intersection pour différents volumes	6.9
Figure 6.8 : Tension de contournement en fonction de la position de l'électrode sous tension pour différents volumes	6.10
Figure 6.9 : Tension de contournement en fonction du volume des gouttes pour différentes conductivités	6.12
Figure 6.10 : Phases de contournement d'une surface pour $\alpha=0^\circ$, $\sigma_v= 2 \text{ mS/cm}$ et $\sigma_v=180 \mu\text{S/cm}$ et $Vg=45\mu\text{l}$	6.13
Figure 6.11 : Tension de contournement en fonction du nombre de rangées fortement polluées	6.13
Figure 7.1 : Structure de la simulation	7.2
Figure 7.2: Isolateur polymère de 18 kV	7.3
Figure 7.3 : Procédures générales pour les simulations FEM	7.4
Figure 7.4 : Maillage	7.6
Figure 7.5 : Les lignes équipotentiels	7.10
Figure 7.6 : Distribution du champ électrique avec et sans goutte	7.10
Figure 7.7 : Lignes équipotentiels et lignes de champ électrique autour d'une goutte d'eau sur la surface de l'isolant	7.11
Figure 7.8 : Lignes équipotentiels et de champ autour d'une goutte d'eau à angle de contact variable	7.12
Figure 7.9 : Champ électrique maximal en fonction des différents angles de contact sur la surface de l'isolant	7.13
Figure 7.10 : Intensification du champ électrique résultant en fonction du volume de la goutte	7.14

Figure 7.11 : Comportement de nombreuses gouttes d'eau	7.15
Figure 7.12 : Champ électrique sur une ligne de gouttes d'eau sans déformation et des gouttes d'eau déformées avant le contournement.....	7.16
Figure 7.13 : Distribution du champ électrique dans la région interélectrode, avant le contournement	7.16
Figure 7.14 : Position des gouttes d'eau par rapport aux électrodes.....	7.17
Figure 7.15 : Champ électrique sur une rangée de gouttes d'eau avec ou sans déformation en fonction de leur position par rapport aux électrodes	7.18
Figure 7.16 : Effet de la distance de séparation des gouttes sur l'amplification du champ électrique	7.19
Figure 7.17 : Distribution du champ avec trois gouttes d'eau de différentes conductivités	7.20
Figure 7.18 : Intensification du champ électrique résultant en fonction de différentes conductivités	7.20
Figure 7.19 : Ligne extérieure créée sur la première ailette.....	7.21
Figure 7.20 : Distributions du champ (a) et de tension électrique (b) sur un isolateur propre	7.21
Figure 7.21 : Distribution du champ électrique le long de la ligne de référence (sans gouttes d'eau).....	7.22
Figure 7.22 : Différentes positions d'une goutte d'eau sur une ailette de l'isolateur	7.23
Figure 7.23 : Répartition du champ électrique le long de l'ailette avec une goutte d'eau...	7.23
Figure 7.24 : Ligne de référence le long de l'ailette d'isolateur avec une goutte d'eau	7.24
Figure 7.25 : Valeurs maximales du champ électrique près de la goutte d'eau à différentes positions en 2D	7.25
Figure 7.26 : Goutte d'eau suspendue.....	7.25
Figure 7.27 : Champ électrique près de la goutte suspendue	7.25
Figure 7.28 : Champ électrique avec et sans goutte d'eau suspendue	7.26
Figure 7.29 : Equipotentiels autour de l'isolateur polymère.....	7.27
Figure 7.30 : Potentiel électrique le long de l'isolateur	7.28
Figure 7.31 : Champ électrique le long d'un isolateur.....	7.28

Figure 7.32 : Distribution du champ dans le cas de deux gouttes de différents volumes ...	7.29
Figure 7.33 : Distribution du champ dans le cas de deux gouttes de différents volumes	7.30
Figure 7.34 : Lignes équipotentielles pour les cas HC1- HC6.....	7.32
Figure 7.35 : Position de la ligne de référence pour le calcul des composantes du champ électrique	7.33
Figure 7.36 : Amplitude de l'intensité du champ électrique le long de la ligne de fuite de l'isolation pour le cas sec et les cas HC1-3.....	7.33
Figure 7.37 : Amplitude de l'intensité du champ électrique le long de la ligne de fuite de l'isolation pour les cas HC4 - 6.....	7.34
Figure 7.38 : Distribution de potentiel électrique sur la ligne de fuite en présence de deux ou sans gouttes.....	7.35
Figure 7.39 : Distribution du champ sur la ligne de fuite en présence de deux ou sans gouttes	7.35
Figure 7.40 : Schéma d'un isolateur réel en 3D et classe d'hydrophobicité.....	7.36
Figure 7.41 : Distribution de la tension.....	7.36
Figure 7.42 : Distribution du champ électrique	7.37
Figure 7.43 : Différent coupes-surfaces en 2D [7.7].....	7.38
Figure 7.44 : Distribution de la tension.....	7.38
Figure 7.45 : Distribution du champ	7.39

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Evolution du nombre des isolateurs en polymères installées à Alger.....	2.4
Tableau 2.2 : Comparaison entre les isolateurs polymères et les autres isolateurs.....	2.10
Tableau 2.3 : Critères de classification de l'hydrophobicité des surfaces [2.36].....	2.14
Tableau 2.4 : Classification de la pollution selon le type d'environnement [2.39]	2.17
Tableau 3.1 : Effets de la température sur l'énergie de surface des échantillons vierges de HTR SiR après immersion dans une solution saline de 1mS / cm pendant 3000 heures [2.16]	3.11
Tableau 4.1 : Correspondance volume/diamètre de gouttes [2.8]	4.5
Tableau 4.2 : Tableau de mesure	4.8
Tableau 5.1 : Réduction relative de la tension de contournement avec le nombre de rangées.....	5.5
Tableau 7.1 : Propriétés du matériau utilisé pour la modélisation de l'isolateur réel et la plaque isolante	7.5
Tableau 7.2 : Valeurs du champ électrique maximal sur la surface de la goutte d'eau avec différents angles de contact	7.12
Tableau 7.3 : Correspondance volume/diamètre de la goutte [2.8]	7.13
Tableau 7.4 : Valeur maximale du champ électrique près de la goutte d'eau selon sa position en 2D.....	7.24

Listes des Acronymes et Symboles

Acronymes

INC	Isolateurs non-céramiques
M.E.F	Méthode éléments finis
DDS	Densité de dépôt de sel
DDNS	Densité de dépôt non soluble
ISR	Isolateur en silicone rubber
DDSE	Densité de dépôt de sel équivalent
AXDE	Analyse par rayons X à dispersion d'énergie
MEB	Microscopie électronique à balayage
CIGRE	Conseil international des grands réseaux électriques
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
EPRI	Electric Power Research Institute
CEI	Comité électrotechnique international
CM	Cellule de mesure
AC	Appareil de Commande manuelle ou automatique du transformateur
SE	Système d'Essai ;
PC	Ecran Ordinateur
NaCl	Chlorure de sodium
BT	Base tension
MT	Moyen tension
HC	Classe d'hydrophobicité
EPDM	Ethylène Propylène Diène Monomère
PDMS	Poly-Di-Méthyl-Siloxane
Cam	Caméscope numérique
PH	Position horizontale
PI	Position inclinée
PV	Position verticale
HT	Haute tension
UV	Ultra violet
T	Terre
THT	Très haute tension

Symboles

Rp	Resistance de pollution
X	Longueur d'arc
μl	Micro litre
V _c	Voltmètre de crête
A, N	des constantes de décharge
DC	Tension contenue
AC	Tension alternative
γ_{ls}	Tension interfaciale solide-liquide
γ_{sv}	Tension interfaciale solide-vapeur
γ_{lv}	Tension interfaciale liquide-vapeur
I	le courant de décharge
μA	Micro-ampère
cm	Centimeter
SR	Silicone Rubber
Tr	Transformateur BT/HT
Oe	Objet d'essai
K Ω	Kilo-ohm
$\mu\text{S/cm}$	Micro-siemens par centimètre
CH	Classification d'hydrophobicités
U	Tension électrique de claquage
E	Champ électrique
d	Distance interélectrode
ϵ_r	Permittivité relative
ϵ_0	Constant électrique du vide
a _r	Distance séparant deux rangées successives de gouttes d'eau sur la largeur de l'isolation
d _g	Distance entre deux gouttes adjacentes sur la même ligne de fuite de l'isolation
L _f	Long de la ligne de fuite
U _m	Tension de contournement mesurée
α	Angle d'inclinaison de l'isolation
N _r	Nombre de rangées
θ	Température
P	Pression

H	Humidité de l'air environnant
U_c	Tension de contournement
K_d	Facteur de correction relatif à la température et à la pression
K_h	Facteur de correction relatif à l'humidité
R	rapport de conductivité
Θ	Angle de contact
∇	nabla
J	densité de courant
D	courant de déplacement
ρ	densité de charge
E_{\max}	Champ maximal
E_{moy}	Champ moyen
B	champ magnétique
H	Excitation magnétique
ZS	Zone sèche
l_{db}	Largeur d'une bande sèche
fP	Faiblement Polluée
FP	Fortement Polluée
σ_{fap}	Conductivité électrique des rangées de gouttes d'eau faiblement polluées
σ_{fop}	Conductivité électrique des rangées de gouttes d'eau fortement polluées
R	Rapport de la conductivité $\sigma_{\text{fap}} / \sigma_{\text{fop}}$
nrfp	Nombre de rangées de gouttes d'eau fortement polluées

Chapitre 01

INTRODUCTION GENERALE

1.1. Contexte général

Lorsque l'électricité à haute tension a été utilisée pour la première fois, les lignes utilisées pour les réseaux électriques - ensemble des infrastructures permettant d'acheminer l'énergie électrique des centres électriques vers les consommateurs d'électricité - sont constituées majoritairement de lignes électriques aériennes. Les structures et les équipements électriques destinés pour ces lignes sont alors soumis à des conditions météorologiques parfois extrêmes. Sans tarder, divers phénomènes tels que la foudre, le vent, l'accumulation de pollution ont commencé à perturber le bon fonctionnement de l'ensemble du réseau. On a vite compris qu'il était nécessaire de concevoir un dispositif qui pourrait isoler les conducteurs du potentiel de masse. Il était difficile de concevoir un isolant efficace pour les conditions humides. Au début, les tensions d'essai de fonctionnement les plus élevées se situaient entre 50kV et 60kV. Cependant, au cours des années, il fallait augmenter les tensions opérationnelles. Cela a conduit au développement d'isolateurs avec des contraintes électriques et mécaniques élevées et l'introduction de nouvelles conceptions de systèmes de transmission [1.1].

Les isolateurs à haute tension sont importants pour l'efficacité opérationnelle de sécurité et d'exploitation des réseaux de transport d'énergie électrique, il n'est donc pas surprenant que ces composants doivent répondre aux exigences particulièrement élevées en matière de fiabilité. On peut distinguer deux principaux types d'isolateurs, isolateurs de conception classique en porcelaine et isolateurs capot à tige en verre. Durant ces dernières années les isolateurs composites ont acquis une grande importance dans le domaine des réseaux de transport d'énergie électrique haute tension.

La performance des isolants utilisés sur des lignes aériennes de distribution et dans les postes extérieurs est un facteur clé dans la détermination de la fiabilité des systèmes de distribution d'électricité. Les isolants doivent non seulement résister à la tension de fonctionnement normale, mais ils doivent aussi supporter des surtensions qui peuvent causer des perturbations, des contournements et des pannes de ligne. La réduction de la performance des isolants extérieurs se fait principalement par la pollution des surfaces isolantes de dépôts

atmosphériques qui peuvent former une couche de surface conductrice ou partiellement conductrice lorsqu'elle est mouillée.

La présence d'une couche conductrice ou partiellement conductrice de la pollution sur la surface de l'isolant va dicter la performance de contournement. Il n'est pas pratique dans de nombreuses situations d'éviter la formation d'une telle couche et par conséquent les isolants doivent être conçus de telle sorte que la performance de contournement reste assez élevée pour supporter tous les types de tensions attendues sous ligne malgré la présence de la couche de pollution.

Il est clair que l'environnement dans lequel l'isolant doit fonctionner, permettra de déterminer la gravité de la couche de pollution sur l'isolant. Traduire l'environnement dans les paramètres qui peuvent être utilisés pour concevoir l'isolation, par conséquent, présente un des problèmes fondamentaux dans la conception de l'isolation extérieure par rapport aux conditions polluées. Cela est dû à la vaste gamme de conditions possibles, telles que celles trouvées dans les zones côtières, industrielles, agricoles et désertique; aussi dans les zones avec glace et neigeuses ou à haute altitude. Des combinaisons de ces conditions peuvent également survenir. Un autre facteur de complication est que les environnements ont un comportement statistique inhérent qui est dans une large mesure imprévisible. En outre, l'augmentation de l'énergie électrique disponible dans une région, à travers la construction d'un nouveau poste, peut déclencher la croissance industrielle qui peut contribuer à la pollution et donc affecter le comportement de l'isolant. Il est donc difficile de quantifier l'effet de l'environnement sur l'isolant.

Le contournement des isolateurs par un arc électrique dû à la pollution atmosphérique est une des causes principales des interruptions de l'alimentation en énergie des réseaux électriques. La maîtrise des conditions optimales du fonctionnement de ces réseaux, vis-à-vis de ce type de défaut d'isolement, commence par le choix d'isolateurs qui présentent les meilleures performances sous pollution. A ce titre, plusieurs solutions comme l'allongement de la ligne de fuite des isolateurs, le graissage, le lavage sous tension, ont été envisagées. Une autre approche du problème consiste à jouer sur la nature du matériau isolant et qui conférerait à ce dernier des meilleures performances isolantes. Nous citerons à titre d'exemple les matériaux à base d'EPDM, de silicone ou encore des isolateurs en céramique dopés avec des semi-conducteurs [1.2-1.3]. Toutefois, ces solutions ne sont pas définitives et présentent elles aussi des inconvénients dont les plus connues sont la sensibilité des matériaux synthétiques aux rayonnements UV et aux attaques acides ou la tendance à l'érosion des isolateurs dopés avec des semi-conducteurs ainsi que les isolateurs en matériaux synthétiques [1.2].

Une combinaison de contaminations et de collecte d'humidité sur les surfaces des isolateurs diminue la résistance de la surface par rapport à l'état sec. Cela a une incidence sur la performance des systèmes d'isolation extérieure et est devenue l'une des principales causes des pannes du système d'énergie [1.4-1.6], ce qui peut être extrêmement coûteux [1.7].

Au cours des dernières décennies, les isolateurs polymères composites ont commencé à être acceptés largement parmi les entreprises d'électricité du monde entier comme remplaçants pour les isolateurs de céramique traditionnels [1.4-1.5, 1.8-1.12]. Les isolateurs polymères composites présentent de nombreux avantages par rapport aux isolateurs traditionnels en porcelaine et céramique tels que: léger de poids, facilité de manipulation, un coût de maintenance faible ainsi qu'une résistance accrue contre le vandalisme et plus important encore, excellente hydrophobicité de surface qui leur donne un meilleur comportement en milieux fortement pollués [1.12-1.13]. Le matériau polymère, comme le silicone, démontre une propriété hydrophobe forte par laquelle l'eau sur la surface polymère tend à former des gouttes d'eau discrètes, qui ont de petites zones de contact sur la surface isolante. Cela implique que sous des conditions sévères de pollution atmosphérique, les isolateurs composites requièrent une longueur de fuite plus faible que leurs homologues en céramique pour le même niveau de tension, ce qui réduit la longueur totale de l'isolateur et ainsi le poids total et le coût.

1.2. Problématique

Suite à l'introduction plus large des isolateurs composites il y a de cela environ 37 ans, il est apparu que ces derniers vieillissaient plus rapidement par rapport aux isolateurs en céramique en raison de la dégradation des UV, de la pollution, du stress mécanique et de la faible résistance aux décharges couronne, ralentissant ainsi leur utilisation à plus grande échelle sur l'ensemble des réseaux électriques aériens à travers le monde [1.14]. Ce vieillissement plus rapide des isolateurs composites constitue le principal désavantage de ces derniers. En effet, pour les isolateurs en céramique, le diagnostic consiste à identifier l'unité défectueuse qui peut être facilement remplacée, permettant ainsi d'assurer l'intégrité du système d'isolation. Dans le cas des isolateurs composites, le problème est plus complexe puisque lorsqu'un défaut est détecté, c'est la fiabilité entière de l'isolateur qui est remise en jeu. Il faut alors un diagnostic fiable afin de décider de son remplacement ou non. Le vieillissement est généralement un problème important, car ils peuvent conduire aux défauts internes formant généralement entre la tige et l'enveloppe de l'isolateur au voisinage de son électrode soumis à la H.T. où l'activité des décharges partielles est la plus grande. Les défauts

internes constituent la deuxième cause de défaillance des isolateurs composites [1.15] provoquant un contournement interaxial créant un court-circuit entre la H.T. et la mise à la terre, ou une rupture de la tige c'est à dire le lien mécanique entre le conducteur nu et le pylône.

Le comportement de vieillissement des matériaux polymères à différentes contraintes de tension est devenu l'un des principaux défis intéressants et un enjeu important pour les concepteurs, les fabricants et les utilisateurs des isolateurs non-céramiques. Dans le cas de surfaces hydrophobes, il ne peut être formée sur la surface aucune couche conductrice de film d'eau et le risque de contournement est réduit; cependant, la décharge corona peut se produire même à la surface d'isolateurs polymères bien conçus. Les gouttes d'eau qui se forment sur la surface hydrophobe donnent lieu à une amélioration significative du champ électrique, en particulier à proximité dans le point triple (les gouttes d'eau, l'air et la surface isolante) [1.16-1.18], ce qui peut entraîner des décharges partielles et même le contournement. Donc la présence des gouttes d'eau sur la surface des isolateurs constitue l'un des principaux facteurs impliqués dans le mécanisme de vieillissement.

Parmi les conditions atmosphériques auxquelles sont soumis les isolateurs, ce sont les variations de température, les pluies, la fonte de la neige sont autant d'éléments qui favorisent le dépôt des gouttes d'eau sur les surfaces des isolateurs extérieurs en polymère des réseaux de transmission pouvant entraîner non seulement des dommages mécaniques sur les pylônes et les conducteurs, mais aussi affecter considérablement les performances électriques de ces derniers et entraîner des contournements électriques et une baisse de la rigidité diélectrique [1.19-1.20]. La contrainte électrique de ces isolations en présence des gouttes d'eau provoque des décharges partielles entraînant une réduction locale de l'hydrophobie de leur surface isolante et l'altération de celle-ci à long terme [1.18-1.22]. La déformation d'une goutte d'eau due au stress du champ électrique affecte le mécanisme de contournement de la surface des isolateurs en polymère et en retour, elle peut perturber le champ électrique à travers la formation d'un champ local de forte intensité dans ses environs immédiats (point triple). Ce champ local intense peut conduire à un allongement des gouttes accompagné d'une réduction de la distance d'isolement entre les électrodes de terre et haute tension [1.23]. Ce qui peut engendrer des décharges partielles pouvant se développer en un arc électrique et conduire au contournement de l'isolateur. Ce problème a motivé les chercheurs à enquêter sur ce phénomène, et de nombreuses études ont été menées sur une longue période, mais il existe encore un manque de compréhension du mécanisme de décharge d'une goutte d'eau sur les surfaces des isolateurs non-céramiques (INC) ou hydrophobes.

Le phénomène de contournement reste à ce jour complexe malgré de nombreuses recherches effectuées pour comprendre le développement de la décharge électrique qui mène au contournement de l'isolateur en présence des gouttes d'eau conductrices. La complexité de ce phénomène impose aux chercheurs d'effectuer plus d'expériences au laboratoire et in situ, sous des conditions de pollution artificielle ou naturelle afin d'en comprendre le mécanisme. Toutefois, les méthodes d'essais sur site sont les plus intéressantes mais nécessitent plusieurs années pour permettre une étude convenable du comportement de l'isolateur. Cependant, l'effet de la distribution des gouttes d'eau sur la performance d'isolation externe n'est pas encore pratiquement traité en raison de l'idée de la combinaison d'un certain arrangement de ces gouttes d'eau avec une zone sèche n'a pas été l'intérêt de plusieurs chercheurs.

1.3. Objectif

La différence dans la performance de la silicone par rapport à d'autres matériaux isolants est due à la façon de l'eau qui mouille leur surface. Elle se présente sous forme de gouttes discrètes sur la silicone rubber, et le mécanisme de contournement est dû à la ventilation de l'air entre les gouttes d'eau et la déformation de ces gouttes dans la direction du champ électrique qui conduisent à la dégradation de l'isolation et l'échec.

L'objectif principal visé à travers cette thèse est l'étude expérimentale et théorique (simulation) sur l'influence des gouttes d'eau sur la tension de contournement d'une surface en silicone hydrophobe à champ non uniforme mise sous tension alternative. L'effet des gouttes d'eau est étudié en fonction de plusieurs paramètres sur la tension de contournement. Cela nécessite des investigations sur plusieurs fronts à savoir:

- Volume des gouttes d'eau, la conductivité de l'eau, la position et le nombre des gouttes sur la tension de contournement;
- Géométrie des électrodes (plan - plan et pointe - pointe);
- Position et largeur de la bande sèche par rapport aux électrodes;
- Angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale de l'isolation recouverte de gouttes d'eau à nombre, volume et conductivité électrique variables;
- Une étude à l'aide d'une méthode numérique de l'influence de la présence et la déformation des gouttes d'eau sur le champ électrique, les activités de la décharge électrique et les dégradations de surface. Pour évaluer la distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite de l'isolateur le logiciel COMSOL Multiphysics a

été utilisé ainsi que pour identifier les principales régions de champ critique.

1.4. Contribution du travail actuel

Les principales réalisations et contributions de cette recherche peuvent être résumées comme suit:

- ✓ une investigation expérimentale sur l'effet de différents types d'arrangements de gouttes d'eau sur la tension de contournement d'une surface en silicone à champ non uniforme, en tenant compte les paramètres suivants : nombre des gouttes d'eau ,la conductivité de polluant, la largeur de la bande sèche et sa position ;
- ✓ Un nouveau montage expérimental a été réalisé pour étudier l'effet de l'angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale d'une surface en silicone hydrophobe sur sa performance électrique lorsque celle-ci est recouverte de gouttes d'eau à volume et conductivité électrique volumique ;
- ✓ Une modélisation de la tension de contournement pour une plaque isolante et isolateur réel sous différentes répartitions des gouttes d'eau ;
- ✓ Étude du champ électrique et de la distribution potentielle des isolateurs composites dans différentes conditions de surface en utilisant des modèles basés sur des éléments finis.

1.5. Originalité du sujet

L'apport scientifique de cette thèse est d'accroître les connaissances sur l'effet de la répartition des gouttes d'eau sur la tension de contournement des isolateurs polymères. Les travaux expérimentaux réalisés ont pour but de déterminer l'influence des gouttes d'eau et leur répartition (nombre, position, largeur des bandes sèches et leur conductivité électrique) ainsi que l'angle d'inclinaison de l'isolation en silicone hydrophobe par rapport à l'horizontale sur sa performance. Cette étude fait ressortir un tas d'informations à fournir à ceux qui s'engagent dans ce travail sur l'optimisation et le développement des nouvelles conceptions d'isolateur, ainsi qu'à ceux qui s'intéressent au mécanisme contournement sur les surfaces isolantes en silicone hydrophobes recouvertes de gouttes d'eau.

L'élaboration de modèles théoriques et expérimentaux sur le contournement des isolations en polymères sous conditions de pollution humide a été aussi envisagée sans pour autant tenir compte de l'effet de l'inclinaison de ces isolations sur leur durée de vie [1.19].

Le type de contaminant et le mode de son humidification a fait aussi l'objet d'investigations de plusieurs chercheurs dont les résultats ont mis en exergue un

vieillesse des isolations en silicone plus accentué sous pluie [1.24-1.27].

Les résultats des essais sous pluie, réalisés au sein de différents laboratoires par certains auteurs sur des isolateurs réels en silicone, à angle d'inclinaison standard de la surface supérieure de leurs ailettes, respectivement égal à 10° ou 30° [1.24] et 5°, 10°, 20°, 30°, 40° ou 55° [1.25], ont mis en évidence la grande importance du rôle joué par ce paramètre d'influence sur leur performance électrique en AC.

Cependant l'intervalle des angles d'inclinaison par rapport à l'horizontale des surfaces supérieures et inférieures des ailettes de plusieurs types d'isolateurs en céramiques recouverts d'un revêtement en silicone ou bien des isolateurs à base de polymères de lignes ou postes électriques est très vaste et s'étend de 0° à 55° [1.25]. La performance électrique sous conditions de pollution humide des isolations en silicone d'extrémité de câbles ou de parafoudres doit être aussi liée au degré d'inclinaison de leurs ailettes. Donc, moyennant ce constat, nous pouvons juger qu'à l'état actuel des connaissances, l'effet sur la performance électrique en DC et AC d'une inclinaison quelconque par rapport à l'horizontale des surfaces supérieures des ailettes de ces isolateurs en polymères, se manifestant ainsi par une action conjuguée des forces de gravitation et électriques de ces perles d'eau, n'a été pratiquement pas du tout investigué par les chercheurs [1.28]. Au meilleur de nos connaissances, il n'existe aucune étude relative à l'idée de la combinaison d'un certain arrangement de ces gouttes d'eau avec une zone sèche et l'étude expérimentale de l'effet de l'angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale sur la tension de contournement. C'est l'une des raisons qui nous a amené à présenter dans ce présent travail l'influence du mode de distribution de gouttes d'eau à conductivité variable sur la tension de contournement d'une surface en silicone hydrophobe inclinée. L'effet de la position et la largeur d'une zone sèche et l'angle d'inclinaison sur la performance de l'isolation sera quantifié.

1.6. Structure de la thèse

Cette thèse traite des sujets en liaison avec la modélisation du phénomène de contournement d'isolateurs couverts de gouttes d'eau, comme suit:

Le chapitre 1 présente le contexte général relatif à la problématique, les objectifs de recherche et offre une brève description de la méthodologie de cette thèse de doctorat.

Le chapitre 2 présente la généralité sur les isolateurs composites, d'abord une revue sur les types et l'historique des applications des matériaux polymères pour les hautes tensions. Ensuite, l'évolution d'isolateurs composites en Algérie. Les phénomènes de vieillissement des isolateurs composites induits par le dépôt des gouttes d'eau sur leurs surfaces y sont décrits.

Le chapitre 3 sera dédié aux mécanismes de contournement des isolateurs en silicone recouverts des gouttes d'eau, effet de la pollution sur le courant de fuite et décharges partielles, ainsi que l'influence des gouttes d'eau sur la performance de la surface hydrophobe.

Dans le chapitre 4, seront présents les modèles expérimentaux les schémas de mesure électrique et visualisation du phénomène électrique en laboratoire et discute les résultats expérimentaux sur la performance d'une surface en silicone. Toutes les techniques de mesure relatives au contournement d'une surface isolantes recouverte de gouttes d'eau y seront décrites.

Le chapitre 5. est consacré à la discussion et interprétation des résultats obtenus sur le contournement d'une surface en silicone horizontale délimitée par deux géométries différentes d'électrodes et recouverte de gouttes d'eau à nombre, volume et conductivité variables.

Le chapitre 6 fera l'objet d'interprétation des résultats obtenus sur l'effet de l'angle d'inclinaison sur la performance électrique d'une surface en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau a volume et conductivité variable.

Le chapitre 7 est consacré aux simulations tridimensionnelles d'un isolateur en silicone recouvert des gouttes d'eau à l'aide d'un logiciel COMSOL Multiphysics basé sur la M.E.F. En particulier, l'influence de plusieurs paramètres sur la distribution du potentiel et du champ électrique a été étudiée.

Le chapitre 8 présente les conclusions générales de ce travail et souligne également plusieurs recommandations pour les recherches futures.

Chapitre 02

GENERALITES SUR LES ISOLATEURS POLYMERES

2.1. Introduction

Les isolateurs sont parmi les composantes les plus importantes des réseaux aériens de transport de l'énergie électrique puisqu'ils assurent à la fois le support mécanique des parties portées à la haute tension et l'isolation électrique de ces dernières avec les parties mises à la terre ou énergisées. A travers les années, les premiers conçus sont en verre et en céramique, durant ces dernières années les isolateurs composites ont acquis une grande importance dans le domaine des réseaux de transport d'énergie électrique haute tension.

Les isolateurs polymères des lignes électriques aériennes ont été largement utilisés durant les dernières années en raison de leur très forte résistance à la contamination, leur résistance mécanique et leur très bonne hydrophobicité.

Dans cette partie, ont été présentés les plus récents travaux concernant la pollution des isolateurs ainsi que l'étude des phénomènes accompagnant la phase du contournement. Ces recherches sont pour la plupart basées sur l'étude du courant de fuite qui procure des informations essentielles sur l'état de surface des isolateurs concernés (en porcelaine ou en polymère).

2.2. Isolateurs polymériques

2.2.1. Histoire et bibliographie des isolateurs polymères

Les matériaux polymères sont des composés de la répétition d'un grand nombre d'unités constitutives appelées monomères. Ces dernières sont des molécules organiques comprenant plusieurs atomes de carbone. L'appellation du polymère est une combinaison de définitions d'un polymère et d'un plastique. En effet, le terme est préférable pour définir le matériau obtenu de façon naturelle ou synthétique. Le terme plastique souligne plus fortement le caractère de matériau de synthèse fini.

Bien que les isolateurs polymères soient considérés comme isolateurs modernes, elles ont une histoire plus d'un demi-siècle. Isolateurs modernes sont nés de la recherche scientifique intensive du XXe siècle. Dès le milieu des années 1940, les bases scientifiques nécessaires à leur développement ultérieur étaient fondées, où ont été utilisés des matériaux isolants organiques pour fabriquer des isolateurs électriques à haute tension [2.1-2.2]. Ces matériaux étaient légers, résistants aux chocs et pourraient être utilisés pour former de grandes pièces complexes [2.3].

Les isolateurs en polymère ont été utilisés pour l'extérieur avant la découverte, dans les années 1950 que la charge de trihydrate d'alumine augmente la résistance au cheminement du matériau polymère et à la corrosion [2.4]. Cependant, les isolateurs en polymère, pour une application en plein air sur les lignes de transmission, ne se développent pas jusqu'à la fin des années 1960 et 1970. Les revêtements en polymères sont finalement entrés en usage général sur les lignes de transmission dans les années 1980.

Dans les années 1960, un isolateur ayant des ailettes en porcelaine supportés par une tige de fibre de verre en résine époxy a été développé. Il n'a pas été largement utilisé puisque il existe l'évolution des matériaux isolants polymères plus légers [2.1-2.5].

Les isolateurs extérieurs polymériques ont été développés pour les lignes de transmission au début de 1964 en Allemagne et par d'autres fabricants en Angleterre, en France, en Italie et aux États-Unis.

En Allemagne, des unités ont été produites pour des essais sur le terrain en 1967. À la fin des années 1960 et au début des années 70, les fabricants ont introduit la première génération commercial d'isolateurs polymères des lignes de transmissions.

Les isolateurs composites ont été largement utilisés à partir des années 1980 et l'utilisation a augmenté rapidement dans les années 1990.

En 1991, les premiers isolateurs composites ont été utilisés en boîtier SIR comme espaceurs entre phases pour un service de 66 kV et en 1994 leur utilisation a été étendue à un service de 275 kV avec une unité de longueur à 7 m. En raison de ses excellentes performances en matière de contamination et de mouillage, des hauts rapports de résistance au poids, résistance au vandalisme, de ses facilité de transport et d'installation et des ses avantages évidents en termes de coût par rapport aux isolateurs classiques, particulièrement dans les lignes HT et THT.

2.2.2. Evolution d'isolateurs composites en Algérie (en GRTE)

L'utilisation des isolateurs polymères sur les lignes transmission haute tension en Algérie ont commencé à partir l'année 2000. Les figures 2.1 et 2.2 représentent respectivement l'évolution d'utilisation des chaînes des isolateurs en composite et l'évolution d'installation des chaînes des isolateurs en polymères par rapport à la longueur totale du réseau. En 2000, a été installé à titre d'essai de 330 chaînes isolantes en silicone de type EPDM sur des tronçons de 4 lignes. En 2002, installation de 4400 chaînes isolantes en EPDM sur des tronçons de 12 lignes (09 lignes 220 kV et 03 lignes 60 kV) soumises à des actes de vandalisme, traversant des zones très polluées et lignes sous isolées. Mais dans les années 2006 et 2007, le montant de l'installation a diminué, atteignant en 2006 à 1704 chaînes isolantes en silicone sur des tronçons de 9 lignes 220 kV pour les mêmes raisons et 1312 chaînes isolantes en siliconé sur des tronçons de 12 lignes (10 lignes 220 kV et 02 lignes 60 kV) en 2007. En 2008, il y eu retour de nouveau à l'augmentions de l'installation, atteignant 3801 chaînes isolantes en silicone sur des tronçons de 29 lignes (26 lignes 220 kV et 3 lignes 60 kV). Dans la figure 2.2 il est à souligner que le pourcentage de l'installation des chaînes isolantes en polymères est très faible (5%) par rapport à la longueur totale du réseau.

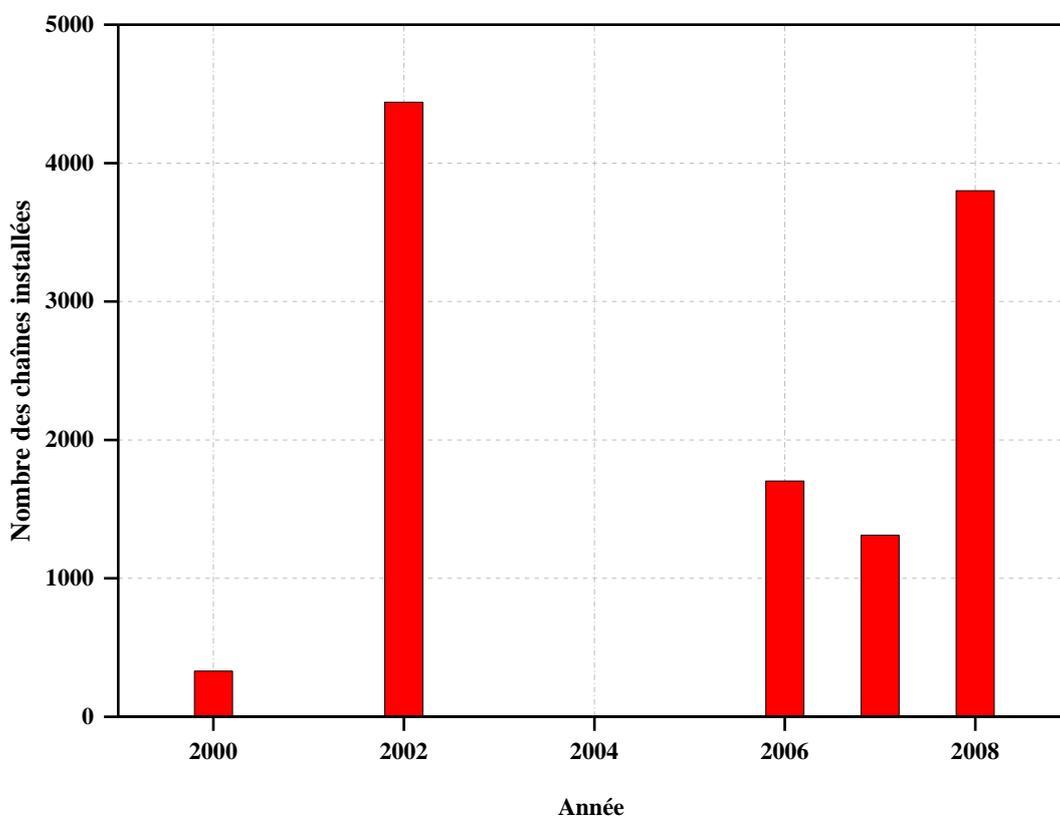


Figure 2.1 : Evolution de l'utilisation des chaînes isolateurs composites [2.5']

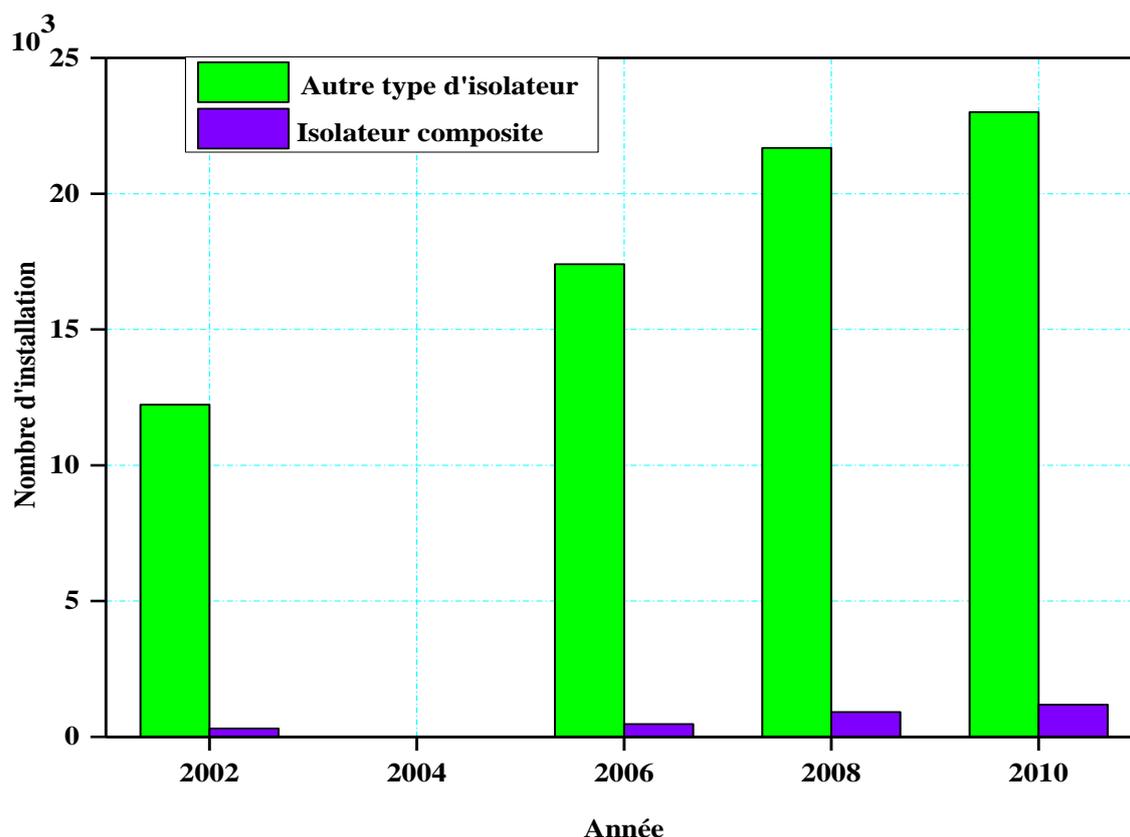


Figure 2.2 : Evolution d'installation des chaînes des isolateurs en polymères par rapport à la longueur totale du réseau [2.5']

Le tableau 2.1 présente les utilisations des isolateurs polymères sur les lignes de transmission haute tension à Alger entre 2012 et 2016. On remarque que l'utilisation d'isolateurs composites en Alger est en développement rapide jusqu'à 2014. Après cette année l'installation diminue en raison d'actes de vandalisme.

2.2.3. Définition

Les matériaux composites (figure 2.3) peuvent être définis comme un assemblage de plusieurs matériaux dotés de caractéristiques physiques, mécaniques ou électriques que ne possèdent pas chacun des constituants pris séparément, ils ont connu une utilisation croissante dans les systèmes et composants haute tension au cours des dernières décennies. En 1963, les isolateurs polymères ont d'abord été développés [2.6]. Puis ils ont été largement utilisés par les services d'électricité depuis le milieu des années 1980.

Tableau 2.1 : Evolution du nombre des isolateurs en polymères installées à Alger [2.6']

Action	2012	2013	2014	2015	2016
Installation des isolateurs en composite	41	264	1420	1130	1067



Figure 2.3 : Isolateurs composites sur une ligne électrique

2.2.4. Construction et matériaux

Un isolateur composite est fondamentalement constitué de trois (3) éléments principaux (figure 2.4) qui sont : le noyau (partie centrale de l'isolateur), une enveloppe entourant la tige qui comporte les ailettes (ou jupes) et deux (2) pièces métalliques aux extrémités.

2.2.4.1. *Le noyau :*

Le noyau est la partie centrale de l'isolateur qui assure à la fois l'isolation électrique et la liaison mécanique entre le conducteur nu et le pylône. Elle est constituée de résine époxy renforcée de fibres de verre pour fournir la résistance mécanique appropriée. Les résines époxy offrent de meilleures propriétés électriques que les résines de polyester qui sont appliquées dans certains cas pour réduire les coûts.

2.2.4.2. *Revêtement et jupes :*

Moulée autour de le noyau, le revêtement (qui comprend des jupes) permet de créer la ligne de fuite nécessaire afin d'assurer l'isolation électrique adéquate entre le conducteur nu et le pylône. Le revêtement permet aussi de protéger le noyau contre les agressions extérieures (infiltration d'eau, rayonnement ultra-violet et décharges partielles), il peut être fabriqué à parti de matériaux variés, y compris des élastomères (par exemple : silicone, éthylène, propylène) des résines (par exemple : époxy cyclo-aliphatique).

2.2.4.3. *Armatures métalliques d'un isolateur composite :*

Elles sont fixées aux deux extrémités de le noyau pour lui transmettre les charges mécaniques. Les matériaux plus communément utilisés sont : la fonte, l'aluminium forgé ou usiné, le fer et l'acier forgé. La forme des pièces d'accrochage constitue un facteur important dans la limitation des décharges couronnes qui entraînent une dégradation prématurée de l'enveloppe de l'isolateur.

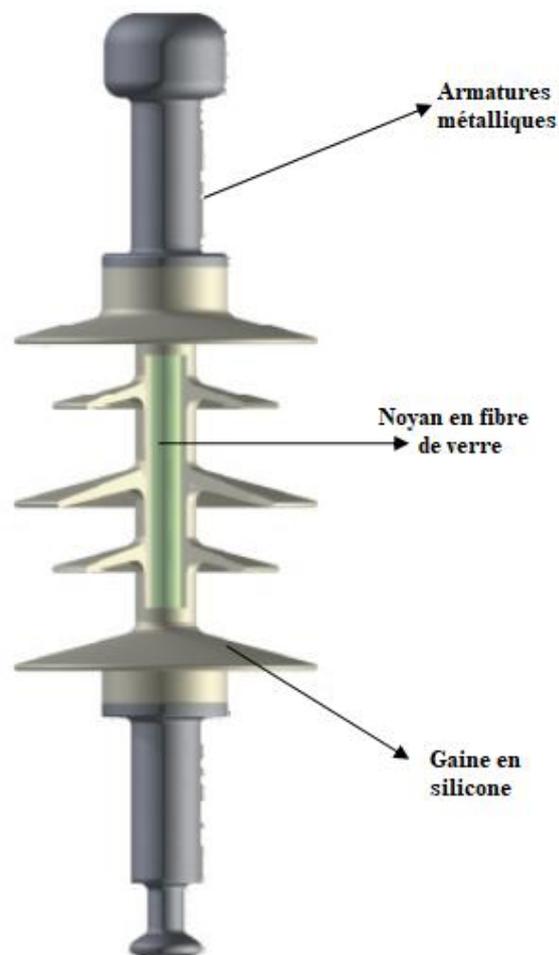


Figure 2.4 : Coupe transversale d'un isolateur composite

2.2.5. Principaux types d'isolateurs composites

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

1. Isolateur de suspension est illustré dans la figure 2.5, il est utilisé dans les lignes de transmission et de distribution haute tension et pour systèmes BT, MT et HT
2. Isolateur composé de poste de suspension est illustré à la figure 2.6, il est utilisé sur les sous-stations et les centrales électriques



Figure 2.5 : Isolateur de suspension composée



Figure 2.6 : Isolateur composé de poste de suspension

Chaque isolateur composite a des caractéristiques parmi lesquelles :

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

2.2.6. Conditions d'utilisation

Les isolateurs doivent être prévus pour être installés à l'extérieur, supporter des températures comprises entre -5°C et $+55^{\circ}\text{C}$ et être insensible aux effets de la condensation, de la pluie, des changements rapides de température et du rayonnement solaire.

2.2.7. Avantages et inconvénients des isolateurs polymères

Les avantages et les inconvénients des isolateurs polymères à haute tension sont importants pour comprendre les applications et les développements des isolateurs électriques et aussi les isolateurs polymères de lignes de transmission offrent des avantages importants par rapport aux isolateurs en porcelaine et en verre spéciaux dans les lignes de transmission ultra haute tension.

Grâce aux nombreux avantages des isolateurs composites par rapport aux isolateurs classiques, l'application des premiers est en augmentation dans le monde entier.

a. *Avantages des isolateurs composites*

Les raisons de l'utilisation massive des isolateurs composites varient considérablement entre les fournisseurs d'énergie électrique, mais les plus courantes peuvent se résumer comme suit [2.7] :

- ❖ Poids réduit (jusqu'à 80% par rapport aux types traditionnels). Cela se traduit par une conception plus économique (plus légère) des pylônes et évite également la nécessité d'utiliser des grues lourdes pour leur installation, économisant ainsi le coût ;
- ❖ L'énergie de surface faible de l'isolateur polymère peut être continuellement hydrofuges (hydrophobe) même en présence de conditions humides telles que le brouillard, la rosée et la pluie. Par conséquent, ils ne sont pas soumis à des courants de fuite élevés qui permettent une réduction de 30% de la distance de fuite équivalente de la porcelaine et du verre. Cette réduction des exigences de distance de fuite peut influencer la hauteur de conception des structures de transmission et également la mise à niveau de la tension des systèmes existants sans changer les dimensions du pylône ;
- ❖ La capacité de tension de tenue de l'isolateur polymère est comparable ou meilleure que celle des isolateurs en porcelaine et en verre. Avec une distance d'arc à sec inférieure de 30% par rapport aux conceptions de porcelaine standard à 230 kV, l'isolateur composite a démontré un amorçage à des niveaux de tension supérieurs de 30% à ceux de la porcelaine au pire niveau de contamination ;
- ❖ Les isolateurs en polymère sont moins susceptibles d'être sérieusement endommagés par le vandalisme, tels que les coups de feu qui provoquent la rupture des isolateurs céramiques ;
- ❖ L'utilisation d'isolateurs composites réduit les coûts d'entretien, comme le lavage de l'isolateur qui est souvent requis pour les isolateurs en céramique et en verre dans les environnements fortement contaminés, moins coûteux par rapport à une chaîne équivalente en verre trempé 36 à 44 %, moins coûteux pendant le transport et moins coûteux pendant l'installation avec un gain de 37% ;
- ❖ Profil des ailettes de forme aérodynamique et présentant une ligne de fuite suffisante : 31 à 68 % supérieure par rapport à une chaîne équivalente en verre trempé ;
- ❖ Pente calculée de manière à éviter l'accumulation de la pollution par une faible prise de vent ;

- ❖ Amélioration du processus de fabrication permet :
 - ✓ Le renforcement de l'étanchéité entre le Jonc et les ferrures métalliques évitant l'infiltration de l'humidité qui risque, sous le champ électrique, provoquant la fragilité et conduit à la rupture de la chaîne isolante;
 - ✓ Une excellente propriété hydrophobe permettant d'empêcher la dissolution des sels solubles contenus dans la pollution et la formation d'un courant de fuite (Absorption de la pollution par le phénomène d'encapsulation permettant la rupture du mécanisme de contournement).
- ❖ Facilité de manutention ;
- ❖ Rapidité d'installation ;
- ❖ Moins vulnérable aux effets de la corrosion (moins de ferrures).

Le tableau 2.2 suivant représente le résumé des caractéristiques des isolateurs polymères par rapport aux autres isolateurs

b. *Inconvénients des isolateurs en composite*

Les principaux inconvénients des isolateurs polymères composites sont:

- Les isolateurs polymères de nature organique sont plus sensibles aux changements chimiques conduisant à l'érosion et au suivi des matériaux ;
- Un autre phénomène qui affecte la performance de l'isolateur polymère est la couronne qui est causée par des champs électriques élevés sur la surface de l'isolateur ;
- Fiabilité à long terme est inconnue, aussi l'espérance et la vie des isolateurs de polymère est difficile à estimer (20 ans dans un milieu très fortement pollués);
- Difficulté de localiser les défauts;
- Les oiseaux picorant le caoutchouc et le rendant inutile sont un gros inconvénient des isolateurs polymères ;
- Remplacement de toute la chaîne d'isolateurs en cas d'anomalie;
- Non possibilité d'intervention en sous tension ;
- Isolateurs en polymère sont constitués de matériaux organiques et la modification chimiques sur la surface en raison aux intempéries crée des problèmes sur la surface [2.8] ;
- Isolateurs en polymère peuvent souffrir de l'érosion et suivent en fin de compte, ce qui peut conduire à l'échec d'isolateurs.

Tableau 2.2 : Comparaison entre les isolateurs polymères et les autres isolateurs [2.8']

Type d'isolateurs Facteur	Polymère	Céramique
Légereté	90% plus léger que les isolateurs en porcelaine, mais offrent un égal à une meilleure résistance. Le poids approximatif de 400 kV est inférieur à 14 kg	Un poids lourd, d'environ 400 kV, est d'environ 135 kg.
Rupture	Pas fragile aux chocs	Très fragile au choc et aux vibrations
Emballage & transport	Facile et économique	Risqué et coûteux
Installation	Facile et économique	Risqué, coûteux
Manipulation	Facile	
Vandalisme	Très résistant	
Ruptures et dommages secondaires	Les isolants composites sont flexibles et donc très résistants aux ruptures.	Très fragile - 10 à 15% de bris sont signalés pendant le transport, le stockage et installation
Résistance au contournement et perfore	Haute	Faible
Anti suivi et résistance à l'érosion	Excellente résistance au traçage évite l'érosion	Très faible - Faible résistance au repérage
Contamination et pollution	Non affecté et a plus de vie	Hautement affecté
Hydrophobicité	Les propriétés d'hydrophobicité d'un isolateur polymère fournissent un isolant excellent et résistent mouillant en formant des gouttes d'eau sans le besoin de lavage ou de graissage même dans des climats humides ou pollués. De ce fait, le faible taux d'échec combiné à des coûts d'exploitation et d'entretien faibles.	Non hydrophobe, surface en porcelaine forme un film d'eau sur la surface faisant chemin facile menant à Plus contournement.
Conception	Isolateur en polymère La conception permet une adaptation adaptée à des besoins spécifiques tels que la distance de fuite. Résultats en termes d'économie d'espace et de coût réduit	La flexibilité du design est limitée. Nécessite des tours plus grandes et plus lourdes pour l'installation et plus d'espace.
Processus de fabrication	Pollution gratuit, coffre-fort, court temps de processus menant à des délais de livraison courts	Les isolateurs en porcelaine nécessitent un long processus de fabrication conduisant à un délai de livraison long. Le processus de fabrication cause des risques pour la santé et la pollution.
Sécurité	Les isolateurs composites offrent un niveau de sécurité très élevé, une souplesse et une résistance supérieure. Non susceptible d'explosion. Aucune cassure due à la pierre Lancer	Isolateurs en porcelaine sont sensibles à l'explosion et les ruptures, en raison de propriétés fragiles, cassure due à la pierre Lancer etc.

2.3. Caractéristiques des surfaces diélectriques polymères

Les polymères sont identifiés par les caractéristiques suivantes :

2.3.1. Energie de surface et angle de contact des gouttes d'eau

Une faible énergie de surface, ou une tension de surface, est une autre caractéristique clef des polysiloxanes [2.9]. Une indication de l'énergie libre de la surface peut être obtenue en mesurant l'angle de contact d'une goutte d'eau sur la surface d'un matériau solide comme le montre la figure 2.7 à partir de [2.10]. La mesure de cet angle permet de déduire le caractère hydrophobe (grand angle, faible énergie de surface) ou hydrophile (petit angle, grande énergie de surface) de la surface [2.11].

Les phénomènes de mouillage se produisent à des endroits où les trois états de "solide", "liquide" et "gazeux" sont en contact. La relation entre les différentes tensions superficielles et l'angle de contact a été donnée par Young en 1805 [2.12] en tant qu'équation 2.1:

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{sv} - \gamma_{ls}}{\gamma_{lv}} \quad (2.1)$$

La tension interfaciale solide-liquide : γ_{ls} ;

La tension interfaciale solide-vapeur : γ_{sv} ;

La tension interfaciale liquide-vapeur : γ_{lv} ;

Angle de contact : θ .

Il est important de mentionner que l'équation de Young n'est valable que pour des surfaces idéales et lisses [2.13]. Un angle de contact inférieur à 90° indique que le fluide se répandra sur une grande surface sur la surface ($\theta \leq 90^\circ$ la surface est hydrophile); alors que les angles de contact supérieurs à 90° signifient généralement que le fluide minimisera son contact avec la surface et formera une goutte liquide compacte ($\theta > 90^\circ$ la surface est hydrophobe) [2.14] figure 2.8.

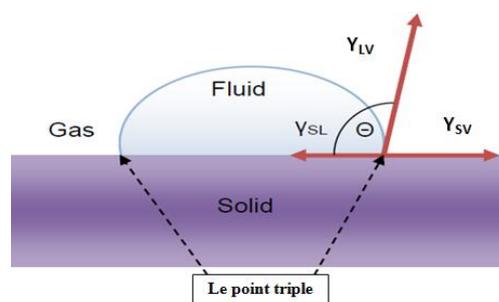


Figure 2.7 : Angle de contact d'une goutte d'eau sur une surface solide [2.14]

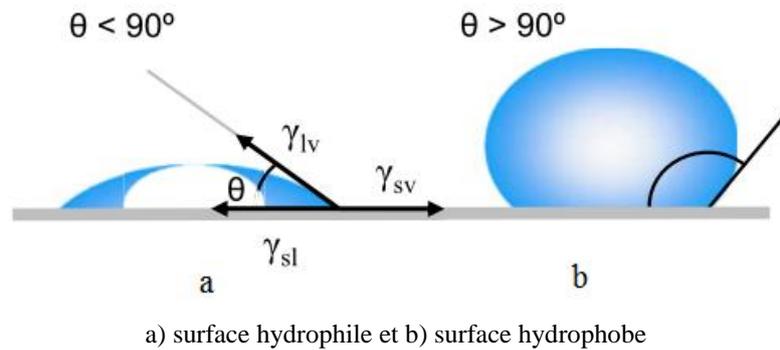


Figure 2.8 : Comportement d'une goutte d'eau sur une surface isolante [2.14]

Aujourd'hui, avec l'utilisation de caméras CCD numériques et de logiciels informatiques avancés, la mesure de l'angle de contact d'une goutte d'eau sur toute surface solide a été automatisée et l'équipement de laboratoire est maintenant disponible dans le commerce [2.10].

2.3.2. Hydrophobicité des isolateurs composites

Une surface hydrophobe est importante pour les isolations hautes tensions. Sur la base de la définition dans IEC62073 [2.13], les mots l'hydrophobie et l'hydrophile sont appelés respectivement à un niveau faible et à un niveau élevé de mouillabilité. En d'autres termes, aucun film d'eau n'est formé sur une surface hydrophobe, tandis qu'une surface hydrophile est mouillée par l'eau sous forme de film. Une surface hydrophobe a une faible tension superficielle, tandis qu'une surface hydrophile a une tension superficielle élevée. La mouillabilité d'une surface isolante peut être mesurée par trois méthodes [2.13]:

- A. La méthode de l'angle de contact ;
- B. La méthode de tension de surface ;
- C. La méthode de pulvérisation.

Les méthodes A et B sont habituellement appliquées dans les laboratoires, tandis que la méthode C convient également aux mesures de laboratoire et aux mesures sur place sur les isolants [2.13, 2.17].

L'hydrophobicité des matériaux polymères peuvent affecter leur performance, spécialement pendant les conditions de l'humidité et de pollution [2.18-2.20].

L'hydrophobicité est influencée par plusieurs facteurs qui n'ont pas été considérés dans l'équation de Young comme la rugosité de la surface, la force de gravité, des inhomogénéités chimiques, la pénétration d'humidité et d'autres. Pendant le service, la surface polymère tend à se détériorer, affectant négativement l'hydrophobie du matériau. Plusieurs

tests expérimentaux en laboratoire ont montré que les surfaces isolantes en Silicone et en EPDM perdent leur hydrophobicité initiale et deviennent hydrophiles quand elles sont soumises aux arcs au niveau des bandes sèches [2.21]. La perte d'hydrophobie influe sur les propriétés électriques de la surface mouillée, de sorte que la tension de claquage et les charges de PD et les courants de fuite plus élevés [2.22]. Mais les surfaces polymères ont une propriété de récupération automatique, qui est présentée dans la section suivante. Plusieurs travaux de recherche ont porté sur la perte et le recouvrement de l'hydrophobicité des matériaux composites [1.18, 2.11, 2.20-2.21, 2.23-2.24].

La perte et le recouvrement de l'hydrophobicité causée par l'exposition en silicone aux décharges partielles (corona ou plasma) a été étudiée par de nombreux chercheurs.

2.3.2.1. Perte et récupération de l'hydrophobicité sur les surfaces polymères

a. Perte de l'hydrophobicité

Les performances électriques des matériaux polymères se sont détériorées rapidement avec le vieillissement. Dans ce contexte, le vieillissement se réfère à la perte progressive des propriétés utiles du matériau en silicone rubber (SiR) avec le temps. Dans ce contexte, le vieillissement et Les décharges surfaciques sont considérées comme les causes principales de réfère à la de l'hydrophobicité par les matériaux composites avec le temps. Les isolateurs polymères vieillis utilisés dans un environnement extérieur peuvent perdre leurs propriétés hydrophobes et revenir à un état hydrophile similaire aux isolateurs en céramique [1.6, 2.25-2.28].

b. Récupération d'hydrophobicité

Il a été constaté que les matériaux en silicone sont capables de récupérer l'hydrophobicité après les dommages causés par les décharges de surface et de transférer l'hydrophobicité aux particules de pollution sur leur surface [2.29-2.31]. Ces propriétés sont très utiles car elles permettent les isolateurs dégradés par des conditions de pollution de récupérer leurs propriétés électriques. La récupération de l'hydrophobicité de la surface est due à la diffusion du polymère mobile à faible poids moléculaire du volume à la surface [2.26, 2.32-2.34]. Un processus de récupération d'hydrophobicité d'importance secondaire est dû à la rotation du squelette de silicone réorientant les groupes méthyle hydrophobes vers la surface [2.35].

c. Classification de l'hydrophobicité

Suite à une proposition de STRI [2.36], l'hydrophobicité (ou la mouillabilité) est classée en six classes, nommées HC1 à HC 6. Cette classification a ensuite été introduite dans [2.13]. Chaque classe est caractérisée par les paramètres donnés dans le tableau 2.3 et une photo de l'apparence de la figure 2.9. L'évaluation de l'état de la surface du matériau isolant est effectuée sur la surface sans stress de champ électrique.

Tableau 2.3 : Critères de classification de l'hydrophobicité des surfaces [2.36]

HC	Description
1	Les gouttes sont formées discrètes $\Theta \approx 80^\circ$ ou plus pour la majorité des gouttes
2	Les gouttes sont formées discrètes $50^\circ < \Theta < 80^\circ$ ou plus pour la majorité des gouttes
3	Habituellement, ils ne sont plus circulaires
4	Sont observées des gouttes discrètes et des traces mouillées provenant des canaux d'eau Zones complètement mouillées $< \text{cm}^2$. Ensemble, ils couvrent $< 90\%$ de la zone d'essai.
5	Certaines zones complètement mouillées $> \text{cm}^2$, qui couvrent $< 90\%$ de la zone d'essai.
6	Les zones mouillées couvrent $> 90\%$
7	Film d'eau continu sur toute la zone testée.

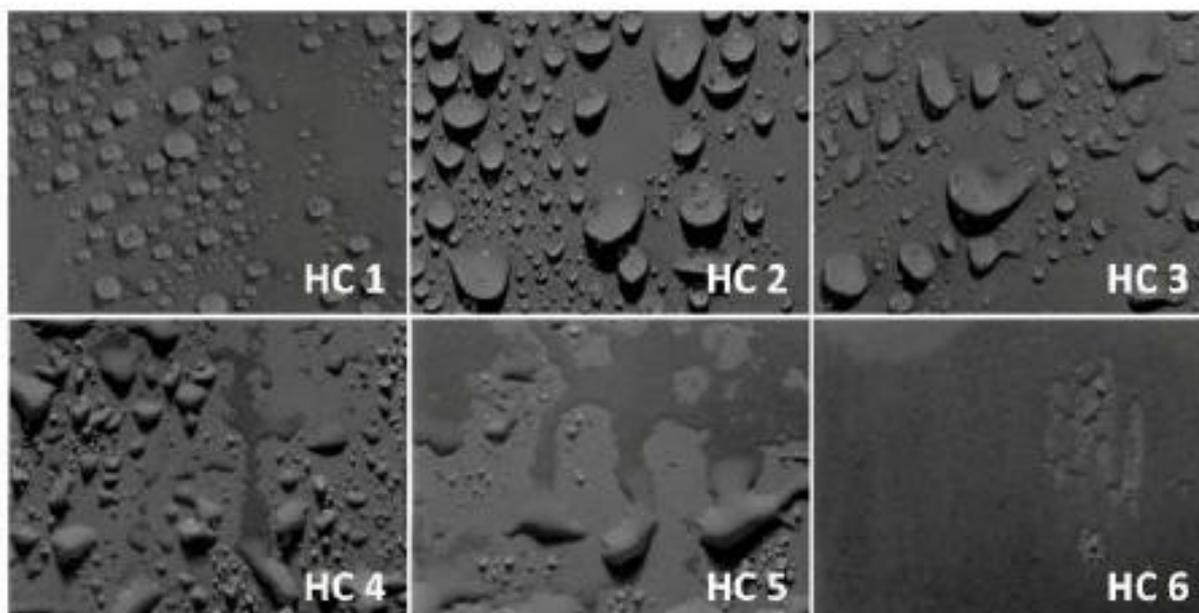


Figure 2.9 : Classe d'hydrophobicité suivant le guide STRI [2.36]

2.3.3. Rigidité diélectrique longitudinale

La rigidité diélectrique d'un matériau est la valeur maximale du champ électrique que l'on peut appliquer sans que se produise une dégradation irréversible nommée claquage, perforation ou rupture, rendant impossible une nouvelle application de la tension.

Selon la norme [2.37], la rigidité diélectrique d'un matériau se définit comme étant le quotient de la tension de claquage par la distance séparant les électrodes entre lesquelles est appliquée la tension dans les conditions d'essai prescrites.

2.3.4. Résistance aux décharges surfaciques

Divers types de dégradations peuvent apparaître suivant les conditions d'environnement et les directions relatives du champ électrique et de la surface du matériau. Des dommages superficiels d'un matériau surviennent surtout lorsque la contrainte électrique est faible et qu'elle est appliquée parallèlement à la surface du matériau et par la présence d'humidité ou l'existence d'étincelles ou d'arcs. Il s'agit des phénomènes dits de cheminement. C'est pour cela que des normes et des méthodes d'essai existent ou sont en voie de développement pour caractériser la résistance des matériaux au cheminement électrique [2.11].

2.3.5. 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.

Plusieurs facteurs peuvent influencer sur la tension de contournement ; on peut citer:

- La nature de la tension et sa polarité;
- La longueur de l'isolateur;
- La forme des électrodes;
- La résistivité volumique moyenne de la couche polluante;
- La répartition de la couche de pollution;
- Le profil de l'isolateur;
- Les conditions climatiques.

2.4. Pollution des isolateurs

La pollution est un phénomène qui constitue un sérieux problème sur l'isolement des ouvrages de haute tension, dont il faut tenir compte lors du dimensionnement de l'isolement des lignes de haute tension. Ceci est dû à la formation de couches plus ou moins conductrices sur la surface des isolateurs. Ces couches peuvent engendrer une diminution considérable de la résistivité superficielle des surfaces isolantes et par suite la diminution de la tension de contournement des isolateurs.

2.4.1. Sources et nature de pollution

Par pollution, on entend les particules solides qui se trouvent dans l'atmosphère et qui se déposent sur la surface de l'isolateur. Cette pollution constitue l'origine du problème. A ce titre, des efforts considérables ont été menés afin de la classifier quantitativement et qualitativement. La nature de la pollution dépend de la situation géographique et climatique. Les divers types de pollution atmosphérique les plus fréquemment observés peuvent être selon leurs origines. D'après la norme CEI 815 [2.38], nous citons les principales sources de pollution comme la figure 2.10.

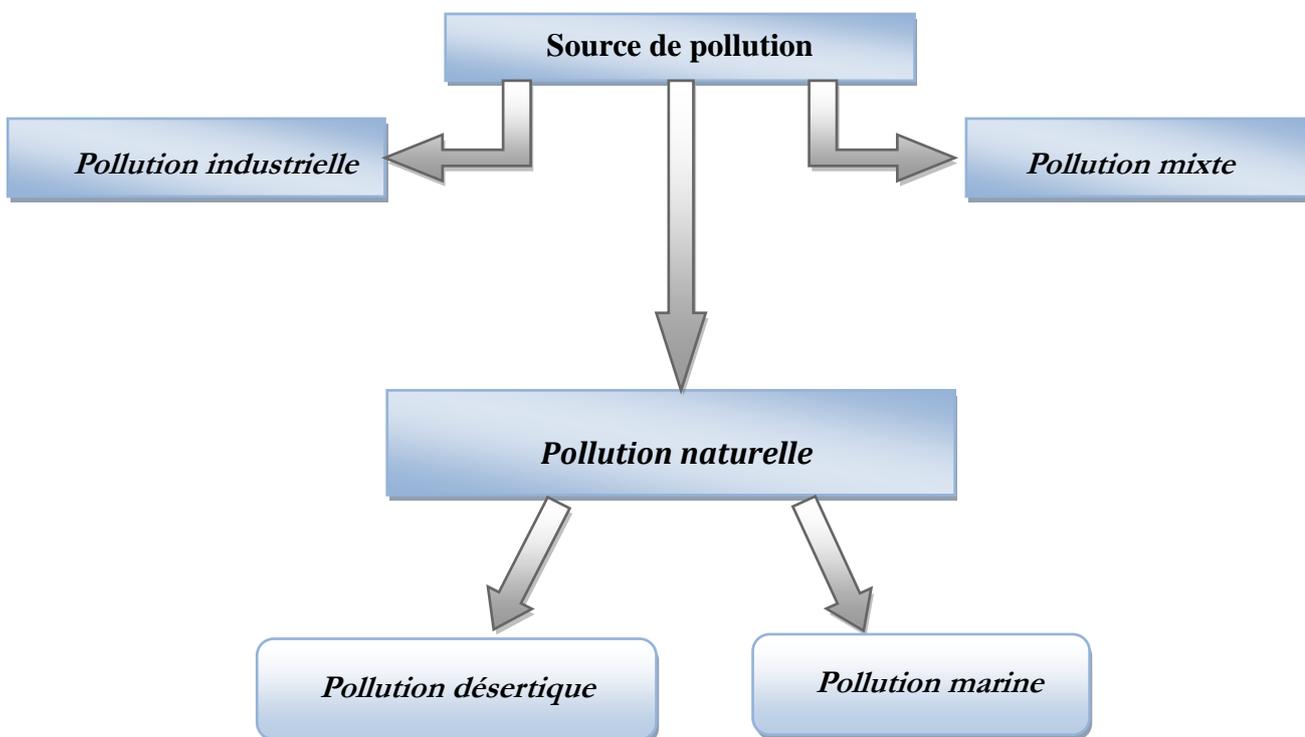


Figure 2.10 : Source de pollution

2.4.2. Classification des sites pollués

La composition de cette pollution est variable suivant les sources de contamination et les conditions auxquelles sont soumis les isolateurs.

On peut classer les degrés de la pollution suivant quatre niveaux selon la CEI815 (Tableau 2.4) qui sont:

- Faible, Moyen, Fort, Très fort.

Tableau 2.4 : Classification de la pollution selon le type d'environnement [2.39]

Niveaux de pollution	Exemples d'environnements typiques
Faible	<ul style="list-style-type: none"> - Zones sans industries et avec faible densité d'habitations équipées d'installations de chauffage. - Zones avec faible densité d'industries u d'habitations mais soumises fréquemment aux vents et/ou pluies. - Régions agricoles. - Régions- montagneuses.
Moyen	<ul style="list-style-type: none"> - Zones avec industries ne produisant pas de fumées particulièrement polluantes et/ou avec une densité moyenne d'habitations équipées d'installations de chauffage. - Zones à forte densité d'habitations et/ou d'industries mais soumises fréquemment aux vents et/ou à des chutes de pluies. - Zones. Exposées au vent de mer, mais pas trop proches de la côte.
Fort	<ul style="list-style-type: none"> - Zones avec forte densité d'industries et banlieues de grandes villes avec forte densité d'installation de chauffage polluantes. - Zones situées près de la mer, ou en tout cas exposées à des vents relativement forts venant de la mer.
Très fort	<ul style="list-style-type: none"> - Zones généralement peu étendues, soumises à des poussières conductrices et à des fumées industrielles- produisant des dépôts conducteurs particulièrement épais. - Zones généralement peu étendues, très proches de la côte et exposées aux embruns eu aux vents très forts et polluants venant de la mer - Zones désertiques caractérisées par de longues périodes sans pluie, exposées aux vents forts transportant du sable et du sel et soumise à une condensation régulier.

2.4.3. Conséquences de la pollution

Lorsque l'isolateur est propre ou recouvert d'une couche de pollution sèche, un très faible courant capacitif circule à sa surface. Ceci est dû aux très faibles valeurs des conductivités volumiques de l'air, de l'isolant solide et de la couche de pollution. On obtient ainsi une répartition électrostatique du potentiel électrique. Par contre, lorsque la couche de pollution est humidifiée, elle devient le siège d'un courant de conduction de valeur relativement importante et la répartition du potentiel électrique diffère de la répartition électrostatique.

La rupture diélectrique de l'air peut être atteinte entre deux points de la surface isolante entraînant l'amorçage d'un arc électrique qui court-circuite une partie de la ligne de fuite. Trois cas peuvent se présenter selon les contraintes auxquelles est soumis l'isolateur [2.17].

2.4.3.1. Vieillessement des isolateurs polymères

Les vieillissements sont caractérisés surtout par une dégradation des propriétés électriques et mécaniques (par exemple : augmentation des pertes diélectriques, diminution de la résistivité). Très souvent différents mécanismes apparaissent en même temps et influent mutuellement l'un sur l'autre [2.40].

Soumis à différentes contraintes durant l'exploitation, les isolants vieillissent. Le vieillissement est caractérisé par une altération partielle des propriétés diélectriques de ces isolants on distingue trois types principale de vieillissement sont :

- ❖ *Le vieillissement thermique* : provoqué par l'action de longue durée de hautes températures, sur le diélectrique.
- ❖ *Le vieillissement électrochimique* : engendré par certains processus dont la cause est le phénomène d'électrolyse ayant lieu dans le diélectrique.
- ❖ *Le vieillissement électrique* : (ionisation – décharges partielles) résultant des décharges à la surface et dans les cavités surtout gazeuses enfermées dans les diélectriques.

a. *Processus de vieillissement des surfaces composites*

Pour l'isolation intérieure, les grands changements de température et d'humidité conduiront à la condensation sur la surface des isolateurs, et l'effet couronne des gouttes d'eau accélérera le processus de vieillissement de la surface. Pour l'isolation extérieure, le brouillard, la pluie, la rosée, la neige et la glace sont considérés comme des paramètres climatiques.

Avant la panne, le processus de vieillissement est décrit par trois périodes [2.41-2.43] :

- ✓ La première est appelée le vieillissement à court terme ;
- ✓ La deuxième est appelée la phase transitoire ;
- ✓ La troisième est appelée le vieillissement long terme.

La figure 2.11 montre le modèle du processus de vieillissement développé des surfaces polymères sous contrainte électrique et environnementale [2.22].

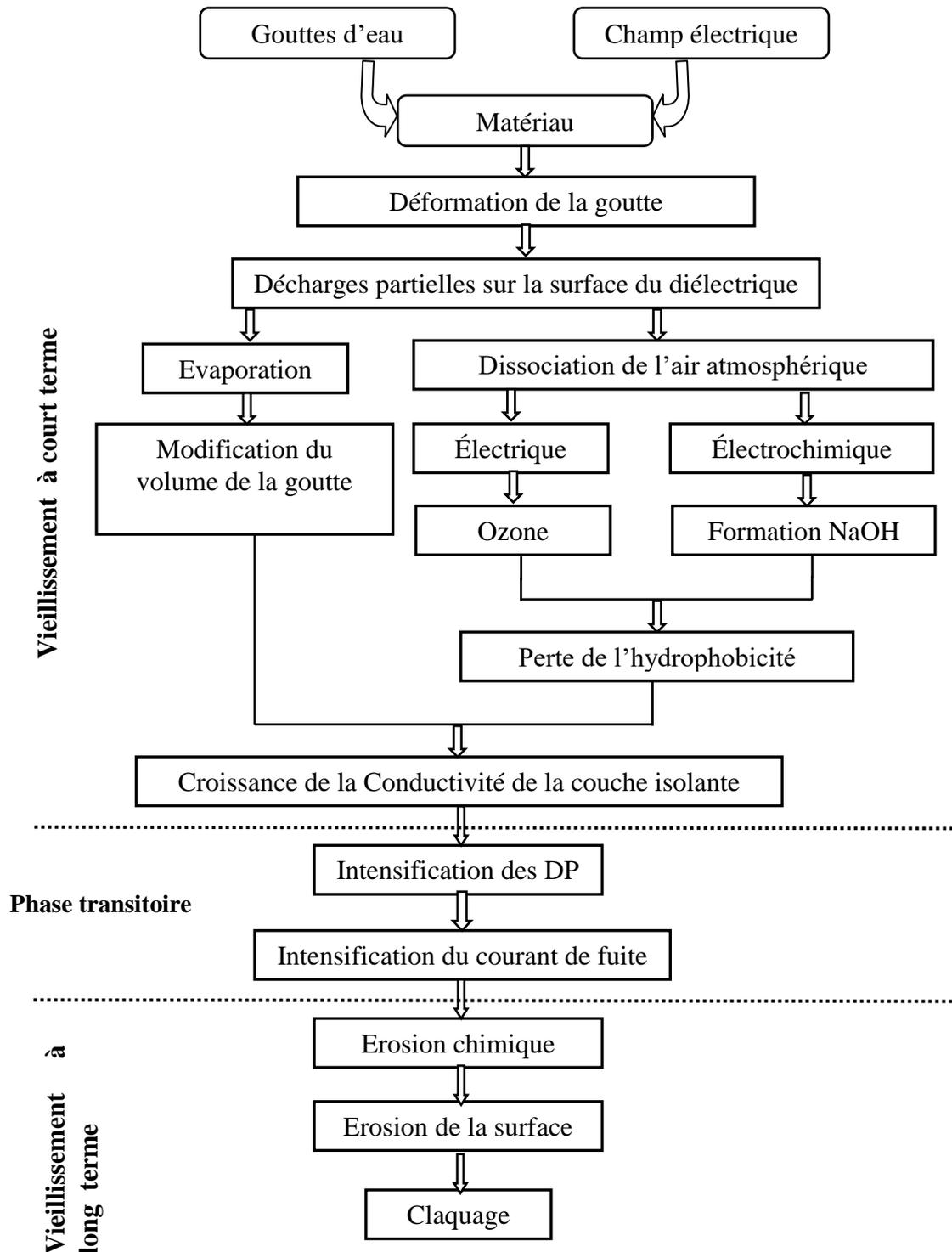


Figure 2.11 : Processus de vieillissement des surfaces composites [2.44]

2.4.3.2. *Arc non localisé*

L'arc électrique s'éteint rapidement, puis se réamorçe aléatoirement à un autre en droit et ainsi de suite. Il y a apparition d'un courant de fuite intermittent entraînant une perte d'énergie relativement faible et généralement supportable par l'installation [2.45].

2.4.3.3. *Arc permanent*

L'arc électrique se fixe à la surface, soit en s'y maintenant (courant continu), soit en se réamorçant au même endroit (courant alternatif). Cet arc peut entraîner, par effet thermique, une dégradation du support isolant nécessitant le remplacement de l'élément défaillant [2.45].

2.4.3.4. *Contournement des isolateurs*

Le contournement d'une surface polluée et humidifiée est le résultat d'une évolution qui comprend quatre phases principales.

Phase1, la formation d'une couche conductrice sur la surface isolante et l'humidification (pluie, brouillard ou rosée) des grains de pollution déposés sur la surface de l'isolateur.

Phase2, Le brouillard et la condensation de la petite pluie modifient graduellement et pratiquement sans délavage la surface de l'isolateur pollué. Ces conditions sont dites critiques. Les sels contenus dans le dépôt se dissolvent et créent un électrolyte conducteur sur la surface de l'isolateur. Un courant de fuite prend alors naissance.

Pendant le cycle d'humidification, le courant de fuite augmente jusqu'à une valeur maximale, mais diminue s'il y a séchage. Le niveau de courant de fuite dépend du temps, de la nature et de la quantité des sels solubles et insolubles. Ces derniers maintiennent par absorption une certaine quantité d'eau à la surface de l'isolateur, entretenant ainsi l'humidification du dépôt.

Phase3, La densité du courant de fuite est beaucoup plus importante près des ferrures de l'isolateur. Par effet Joule, la température s'élève, l'eau s'évapore et le dépôt devient moins conducteur. Le courant est alors très réduit en amplitude par la présence d'une «bande sèche». La répartition de potentiel sur l'isolateur est modifiée par cette bande sèche, car la plus grande portion du potentiel électrique se trouve reportée à ses bornes. Si la largeur de cette bande sèche est insuffisante pour supporter la différence de potentiel correspondante, un arc est créé.

Phase4, La résistance du dépôt humidifié non court-circuité par l'arc limite le courant et la longueur de l'arc. Si le courant est trop faible, l'arc s'éteindra, la bande sèche s'humidifiera à nouveau et le mécanisme se répétera encore. Tant que le courant de fuite n'excède pas ce que l'on appelle le «courant critique» correspondant à une «longueur critique» de l'arc, cette situation reste stable. Dans le cas contraire, le contournement de l'isolateur peut survenir [2.46].

2.5. Conclusion

La présente généralité sur les isolateurs polymères a été consacrée à la présentation des isolateurs polymères dans les systèmes haute tension. Cette synthèse montre l'importance de cette thématique qui continue de faire l'objet de nombreuses études. Les principaux mécanismes intervenant dans la perte et la récupération de l'hydrophobicité sur les surfaces polymères et le vieillissement prématuré des isolateurs composites ont été examinés. L'hydrophobicité est importante pour les isolations hautes tensions. Les performances des isolateurs en silicone de Rubber sous pollution et en présence des gouttes d'eau sont très différentes de celles des isolateurs céramiques ou en verre.

Dans la suite du travail nous allons les aspects importants concernant les contraintes de comportement de la pollution sur l'isolateurs en composites. Le phénomène de pollution provient de diverses origines ; on peut en citer trois ; naturels, industriels et mixtes. Quelle que soit la source de pollution, on observe toujours une formation d'une couche électrolytique due à l'humidification d'un dépôt de pollution accumulé progressivement sur la surface des isolateurs.

Chapitre 03

REVUE DE LITTERATURE

3.1. Introduction

Les isolateurs étant l'un des composants clés du réseau de transport et de distribution d'énergie électrique, l'intégrité du réseau dépend de la qualité mécanique et électrique des isolateurs. Bien que les isolateurs ne représentent que 5% à 8% du coût en capital direct de la ligne, ils sont associés à plus de 70% des pannes de ligne et jusqu'à 50% des coûts d'entretien ligne. La contamination de surface, le vieillissement, les défauts de fabrication et les dommages dus à une mauvaise manipulation sont les principaux facteurs responsables des pannes des isolateurs [3.1].

La conception optimisée des isolateurs externes sous des conditions sévères de pollution est une préoccupation importante, surtout pour la fiabilité des réseaux électriques. Les matériaux céramiques, tels que la porcelaine et le verre, sont utilisés dans les isolateurs de réseau électrique depuis plus de 100 ans. Ces matériaux ont fait leurs preuves contre le vieillissement environnemental, mais leur surface hydrophile offre une performance de pollution médiocre. Actuellement, les isolateurs polymères sont de plus en plus utilisés dans les systèmes de distribution et de transport. Capturent régulièrement une plus grande part du marché grâce à leurs meilleures propriétés diélectriques, leur faible poids, leur maniabilité, leur résistance au vandalisme et leur rentabilité [3.2].

Le domaine de recherche sur le comportement des isolateurs composites dans des conditions de pollution a déjà existé depuis une trentaine d'année. Cependant, une revue de la littérature montre que très peu d'études systématiques traitent de l'influence d'une accumulation de pollution sur la distribution du potentiel et du champ électrique le long d'un isolateur composite pollué. Mais très peu sont consacrées exclusivement aux isolateurs recouverts par les gouttes d'eau.

Ce chapitre a pour objectif de faire le point des connaissances acquises à ce jour sur tout ce qui est relatif au comportement électrique des isolateurs composites pollués. De plus, la présente publication présente des informations collectées au cours d'une période de recherche sur les études relatives à la détermination des effets des gouttes d'eau sur la performance d'une surface en silicone hydrophobe.

3.2. Étude bibliographique

Cette section résume les développements et les études expérimentales et théoriques qui ont eu lieu dans le domaine des isolateurs non-céramiques (polymères) et leur expérience sur les performances de ces isolateurs.

L'expérience de l'utilisation d'isolateurs polymères a été recueillie dans le monde entier depuis plus de 30 ans. Une vaste étude, publiée par le CIGRE en 1989 [1.8], a révélé que le vieillissement des matériaux constitutifs était la cause principale de défaillances enregistrées. Des conclusions similaires ont été présentées dans des rapports du CIGRE et de l'IEEE décrivant l'expérience mondiale [3.3-3.4]. Depuis lors, de nombreuses recherches ont été consacrées à l'amélioration de la qualité des isolateurs non céramiques et le travail effectué a été examiné par Hall [2.1] et Gorur et al. [3.5]

3.2.1. Les isolateurs composites hydrophiles

Afin d'augmenter la fiabilité des réseaux électriques, plusieurs recherches ont porté sur les isolateurs hautes tensions. En effet, les isolateurs extérieurs souffrent d'une pollution naturelle et industrielle avec de sérieux problèmes de contournement. Les polluants naturels sont classés en deux types principaux : à savoir, solubles et non-solubles. Le composant soluble est communément exprimé en termes de densité de dépôt de sel équivalent (DDSE), qui se réfère à la quantité de chlorure de sodium (NaCl) en milligrammes (mg) par unité de surface de l'isolateur (cm^2). Le composant non soluble, tel que le Kaolin, est normalement défini en termes de densité de dépôt non soluble (DDNS) qui correspond au nombre de milligrammes de kaolin prélevés d'une certaine surface de l'isolateur divisé par la surface (cm^2) [3.6].

La DDSE est utilisée pour prédire la tension de contournement et la sévérité de la contamination des isolateurs pour l'extérieur [3.7]. Pour les isolateurs en silicone, le processus d'amorçage et de dépôt de pollution est complètement différent de celui des isolateurs en porcelaine et en verre. L'DDSE seul ne peut donc pas prédire la tension de contournement et la sévérité de la contamination [3.8-3.9].

En outre, les matériaux en silicone sont soumis au vieillissement et à la dégradation dans des environnements contaminés. Le vieillissement des isolateurs en silicone est un phénomène complexe et dépend de divers paramètres tels que la sévérité de la pollution, le matériau et d'autres conditions environnementales. Le vieillissement des isolateurs extérieurs ne peut pas être prédit en mesurant l'DDSE, et par conséquent, une solution alternative est requise. Le groupe de travail IEEE a proposé un rapport sur la contamination de l'isolateur

que la résistance de surface dans des conditions humides puisse être utilisée pour quantifier le vieillissement et la sévérité de la contamination des isolants polymères [3.10]. Ils ont également présenté des lignes directrices sur la façon de mesurer la résistance de surface des isolateurs polymères dans des conditions contaminées.

Outre la sévérité de la pollution, la résistance de surface des isolateurs en silicone est influencée par de nombreux autres paramètres. Les résultats présentés dans [3.5] montrent que la résistance de surface dépend du niveau de contamination et du mode de mouillage. De même, il a été rapporté dans [3.11] que le traitement thermique de la silicone diminue également sa résistivité superficielle dans des conditions propres. Les résultats présentés dans [3.12] montrent que la silicone a la capacité d'interaction avec les polluants et de réduire la conductivité de la couche de pollution conduisant à une résistance de surface élevée. Cette propriété rend le processus de vieillissement et de contamination plus complexe. La littérature précédente sur la mesure de la résistance de surface ne prenait en compte que la sévérité de la contamination [3.5, 3.10-3.14]. Cependant, selon les connaissances des auteurs, la résistance de la surface peut également être affectée par la pollution, les conditions environnementales et la répartition de la pollution sur la surface de l'isolateur. Il existe une documentation très limitée sur l'influence de la pollution inerte, de l'humidité, de la température et de la formation de bandes sèches sur la résistance superficielle des matériaux en silicone.

Arshad et al. [3.15] ont étudié des résultats expérimentaux et mathématiques sur la résistance de surface de plaques en silicone vulcanisée à haute température dans diverses conditions environnementales et contaminées. Des plaques en silicone rectangulaires ont été polluées artificiellement en utilisant une méthode de la couche solide modifiée basée sur la CEI 60507. Les tests ont été réalisés dans une chambre climatique dans laquelle on peut contrôler le taux de brouillard, l'humidité et la température. Ils ont étudié l'effet de la DDNS, l'intensité de la contamination, l'humidité relative, la température ambiante, l'emplacement de la zone sèche, et plusieurs bandes sèches sur la résistance de surface. Les résultats obtenus montrent que la résistance de surface diminue avec l'augmentation de la DDNS, de la sévérité de la pollution et de l'humidité relative. Une augmentation de la résistance de surface a été observée avec la formation de bandes sèches. Bien que la résistance de surface ait été affectée par tous les paramètres, le paramètre le plus dominant était le niveau de sévérité de la pollution et la formation de bandes sèches. Ils avaient conclu que la mesure de résistance de surface peut être standardisée pour évaluer le vieillissement et la sévérité de la pollution des isolateurs en silicone.

Albano et al. [3.16] par exemple, ont étudié l'effet la densité de dépôt de sel (DDS) et la DDNS, la conductance de fuite et la conductance de surface sur des isolateurs en silicone 11kV adoptant des surfaces lisses et texturées. Chaque isolant est pollué artificiellement en utilisant la méthode de la couche solide et ensuite testé dans les 24 heures après l'application de la suspension. Ils ont montré que les isolateurs texturés n'augmentent pas significativement l'accumulation de polluant et le courant de fuite est limité à une croissance significativement plus lente que sur une conception lisse.

El-Hag et al. [3.17] ont suggéré deux méthodes différentes pour calculer la densité de courant le long de l'isolateur en silicone dans des conditions d'essai de brouillard salin. La première méthode basée sur l'approche de la théorie des champs utilise le logiciel commercial COMSOL pour calculer la densité de courant. La conductivité de la couche de contamination utilisée dans les calculs a été extraite de la DDSE mesurée séparément pour différentes sections des surfaces isolateurs. La deuxième méthode est basée sur l'approche de la théorie des circuits. L'isolateur a été divisé en différentes sections pour les calculs de résistance afin de tenir compte des différents niveaux de contamination. Les classements basés sur les densités de courant calculées sur la segmentation de la surface de l'isolateur pour les mesures DDSE correspondent à ceux extraits des courants de fuite mesurés.

George G. Karady [1.19] a étudié le mécanisme de contournement des isolateurs non céramiques, et remarqué que les isolants en silicone sont plus polluants que les isolateurs en porcelaine. Cela révèle que, l'exposition à long terme des isolateurs en silicone rubber produit une fine couche de pollution, qui est un mélange de poussière, de sel et d'huile de silicone. Le brouillard ou la rosée du matin produit des gouttes sur les surfaces planes et forme des régions conductrices, la décharge ponctuelle commence entre les régions, ce qui réduit l'hydrophobicité. Simultanément, un arc à bande sèche commence sur la tige de l'isolateur. Les deux arcs se rejoignent, ce qui conduit à un contournement. La tension de contournement des isolateurs non céramiques pollués est significativement plus élevée que celle des isolateurs en porcelaine (figure 3.1). L'auteur a effectué des mesures sur des isolateurs prélevés sur la côte californienne. Les tests de laboratoire effectués dans une chambre de brouillard salin reproduisent le dépôt uniforme de sel et de mélange d'huile de silicone sur les isolateurs sous tension. Cependant, la même procédure a produit une contamination par points lorsque les isolateurs n'étaient pas sous tension.

La sévérité de la pollution est déterminée en lavant la pollution de la surface par de l'eau distillée et en calculant la DDSE par rapport à la conductivité de la solution. Lorsque le niveau de pollution (DDSE) sur les isolateurs est le même, la résistivité superficielle

d'un isolateur non céramique humidifié est significativement plus élevée qu'un isolateur en porcelaine.

La force du champ électrique est plus grande aux deux extrémités de l'isolateur qu'à la section médiane. On peut voir que la force du champ, malgré les anneaux de gradation, est significativement plus grande à l'extrémité sous tension qu'au milieu de l'isolateur. Le plus grand champ électrique conduit les particules à la surface. Les mesures effectuées sur plusieurs isolateurs montrent que le dépôt de pollution est plus élevé aux extrémités qu'au milieu. La distribution de la pollution est analysée le long d'un isolateur en silicone de 500 kV. Ceci révèle que la DDNS diminue à partir des raccords d'extrémité vers le milieu de l'isolateur. Cet effet est particulièrement important dans le cas de la tension continue, mais une distribution similaire a été observée sur un isolateur en courant alternatif. La variation du niveau de pollution sur les isolateurs à courant alternatif est moindre que dans le cas du courant continu. Certains isolateurs sont construits avec deux diamètres de l'ailette. La plus petite ailette collecte moins de pollution que les plus grandes. La pollution est répartie uniformément sur la surface de l'isolateur mais la quantité de pollution est différente sur la surface supérieure et inférieure de l'ailette. De plus, différents types de pollution ont été observés sur la tige.

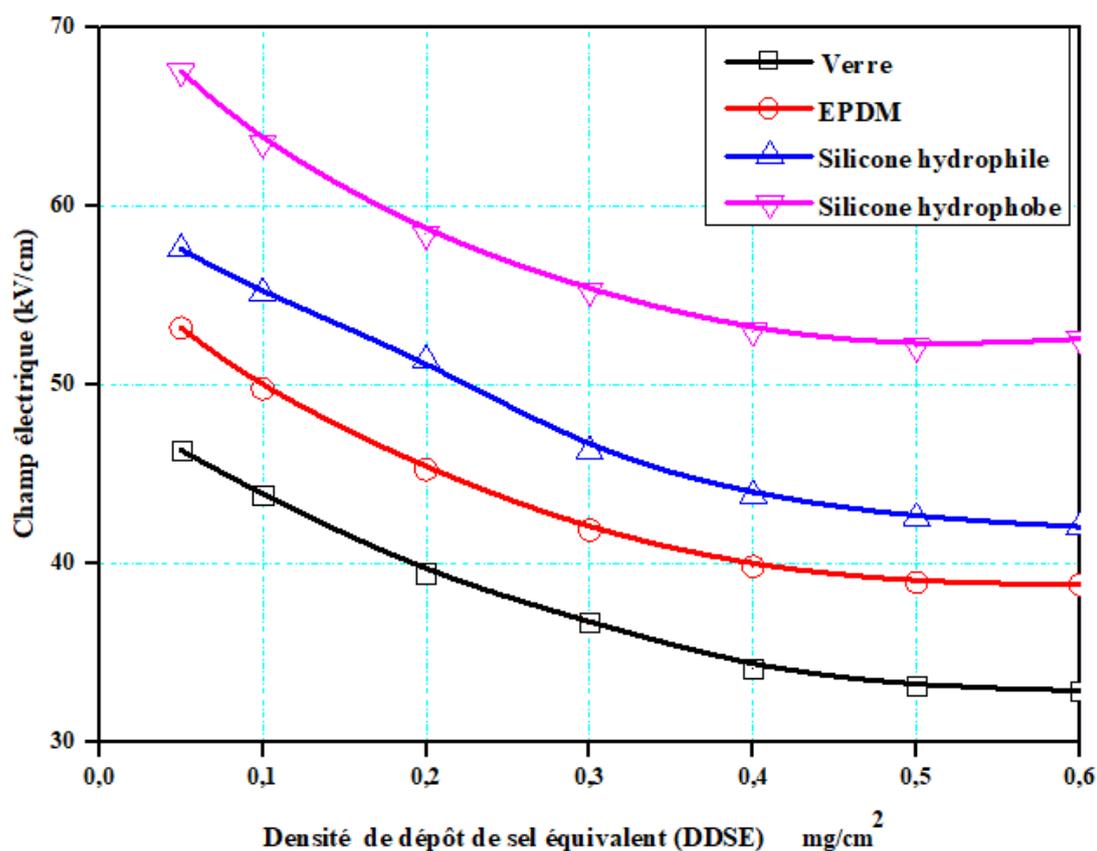


Figure 3.1 : Comparaison de la performance en matière de pollution des isolateurs non céramiques et verre [1.19]

3.2.2. Les isolateurs composites hydrophobes

3.2.2.1. *Effet des gouttes d'eau*

Dans les équipements haute tension extérieurs, par exemple les isolateurs et les conducteurs des lignes aériennes à haute tension, les gouttes d'eau de pluie sont généralement déposées sur les surfaces des pièces d'équipement exposées pendant ou après les précipitations. Donc, les conducteurs des lignes aériennes et des ailettes d'isolateurs extérieurs sont ceux de la plupart des pièces d'équipement, qui peuvent accumuler considérablement de multiples gouttes d'eau sur les surfaces [3.18-3.20]. Plusieurs gouttes d'eau peuvent également fusionner et devenir naturellement des films d'eau sur les surfaces solides humides. Il est connu que des gouttes d'eau peuvent provoquer, sous un champ électrique appliqué, une détérioration de la surface d'un isolateur non céramique même dans des conditions de faible pollution. Ceci est dû au fait que des gouttes d'eau sur une surface de polymère augmentent localement le champ électrique appliqué. Les intensifications de champs locaux conduiront à des décharges partielles et / ou à des arcs localisés. Ces décharges partielles entraînant une réduction locale de l'hydrophobie de leur surface isolante peuvent jouer un rôle important dans la performance à long terme [1.18, 1.21, 3.21-3.22]. Jusqu'à présent, et à notre avis, on se trouve face à une situation d'un manque d'informations sur la performance d'un système électrique avec isolation en silicone recouverte de gouttes d'eau sous tension alternative, à fin de comprendre le comportement de ces dernières sur le phénomène de décharges et d'arc, et l'influence du volume et de la conductivité d'eau sur la tenue électrique.

Un contournement est défini comme une décharge perturbatrice qui se produit sur la surface d'un isolateur en raison de l'accumulation des gouttes d'eau et / ou en raison de la surtension. Le mécanisme de contournement de pollution et la formation de bande sèche d'isolateurs hydrophiles (porcelaine et verre) ont été étudié et sont bien compris [3.12, 3.23].

Plusieurs travaux considérables ont été entrepris en vue d'améliorer les propriétés diélectriques des isolateurs composites et de comprendre le mécanisme de contournement en présence des gouttes d'eau et de la pollution.

En 1958, Obenaus [3.24] a été le premier chercheur à proposer une théorie sur le phénomène de contournement sur les surfaces isolantes planes, recouvertes d'une couche polluante, sous tension continue connue sous le nom de la « théorie d'extinction ». Cette méthode a été complétée plus tard par Neumarker [3.25]. Le modèle utilisé, illustré par la figure 3.2, présente un arc en série avec une résistance. Partant d'un modèle type circuit

électrique équivalent, constitué d'un arc de longueur X en série avec une résistance R_p représentant la résistance de la pollution (figure 3.2), où L représente la longueur de fuite totale. Obenaus a supposé que le contournement se produit si la décharge partielle saute par dessus la zone sèche pour atteindre la résistance.

La relation entre la tension et le courant est donnée par l'équation suivante [3.24] :

$$V_{arc} = \frac{AN}{I^n} \quad (3.1)$$

Où

I = le courant de décharge ;

A , N et n = des constantes de décharge. $0,40 \leq n \leq 1$; $3 \leq N \leq 500$.

Selon Hampton [3.26], le contournement des isolateurs pollués et humides est le résultat de la formation de bandes sèches. Quand l'humidité relative atteint des niveaux très élevés, il en résulte une augmentation considérable du courant de fuite.

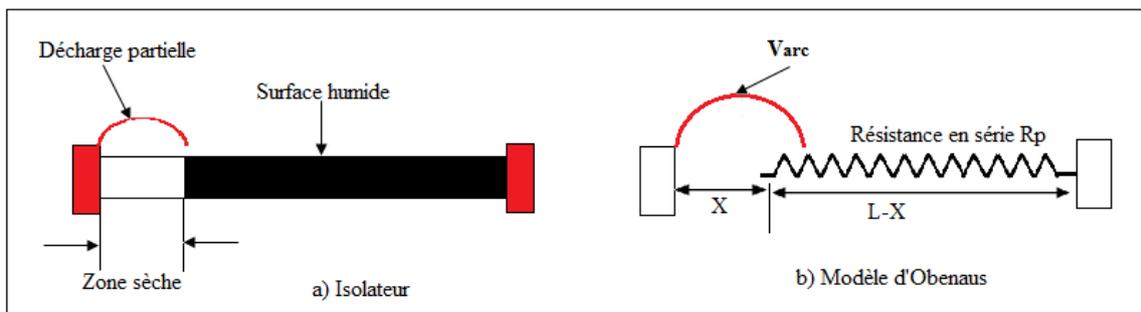


Figure 3.2 : Modèle d'Obenaus

Étant donné qu'il n'y a pas de couche humide continue sur la surface des isolateurs polymères, le mécanisme de contournement de pollution pour ce type d'isolateur est différent des types traditionnels de porcelaine ou de verre. Un mécanisme typique de contournement d'une surface hydrophobe est illustré à la figure 3.3 [3.27]. Le contournement de la pollution est un processus multi-étapes pour un isolateur. Les étapes principales du phénomène de contournement les plus courantes sont expliquées comme suit [3.8, 3.27] :

- ✚ Le dépôt du polluant : le vent transfère des poussières et d'autres polluants industriels sur la surface de l'isolateur sous quelques conditions climatiques (brouillard, la rosée, la bruine ...). L'interaction entre les polluants et l'eau crée une couche de surface solide, et l'isolateur est généralement recouvert d'une couche de pollution uniforme ;
- ✚ Diffusion des chaînes de poids moléculaire faible : la diffusion est le comportement naturel des isolateurs SiR et peut entraîner la migration des chaînes polymères à poids moléculaire faible du matériau de la gaine météorique. Les chaînes à poids moléculaire

faible produisent une fine couche au-dessus de la couche de pollution, ce qui garantit que la surface récupère l'hydrophobie après une période sans arc ;

- ✚ Mouillage de la surface : le brouillard tôt le matin, la rosée, l'humidité élevée ou la pluie légère crée des gouttes d'eau sur la surface hydrophobe de l'isolateur polymère, comme le montre la figure 3.3.a. Le sel du polluant se dissout dans les gouttes d'eau, qui deviennent conductrices. La pollution de surface sèche restante est peu à peu mouillée par la migration des gouttes. Ceci produit une couche résistive autour de chaque goutte, comme illustré à la figure 3.3.b ;
- ✚ Chauffage ohmique : le petit courant de fuite passe par une couche hautement résistive de la surface isolateur. Comme l'électrolyte a un coefficient thermique négatif, la résistance de la surface diminue progressivement et le courant de fuite augmentera en raison du chauffage. En même temps, le séchage et la perte d'humidité augmentent la résistance de la surface. Les deux phénomènes contrastés atteignent l'équilibre à une valeur de niveau inférieure du courant de fuite ;
- ✚ Effet de champ électrique sur les gouttes d'eau : le développement du processus de mouillage augmente la densité des gouttes d'eau et réduit la distance entre elles. Le champ électrique appliqué entraîne une force, qui allonge les gouttes d'eau. Si la distance entre les gouttes est faible, les gouttes adjacentes se rassemblent sans créer des filaments, comme le montre la figure 3.3.c ;
- ✚ Microdécharges : les filets d'eau minimisent la distance entre les électrodes, ce qui peut entraîner une augmentation du champ électrique entre les filets d'eau voisins. Cette force de champ génère des microdécharges entre les filets d'eau, comme illustré par la figure 3.3.d ;
- ✚ Perte d'hydrophobicité : les microdécharges vieillissent la couche polymère autour des gouttes d'eau et réduisent l'hydrophobicité. Cette réduction de l'hydrophobicité regroupe les filets d'eau et augmente la résistance du champ. Le champ électrique élevé autour des électrodes provoque des décharges couronne sur la surface. Ces activités de décharge détruisent l'hydrophobicité, ce qui conduit éventuellement à des formations de formes irrégulières dans la région humide (figure 3.3.e).
- ✚ La formation de bande sèche : A cause de la forme d'isolateurs, la densité du courant sur la surface est généralement non uniforme, l'effet de chauffage du courant va donc apparaître dans ces secteurs. Cette zone sèche locale mènera à la contrainte de courant. La zone sèche locale aura tendance alors latéralement à s'étendre jusqu'à ce qu'une

bande sèche est complètement formée pour résister à la tension appliquée. Les activités de décharge qui en découlent provoquent une érosion superficielle.

- ✚ Contournement : l'augmentation de la longueur des filets d'eau et la formation des régions humides tendent finalement à court-circuiter l'isolateur par un chemin conducteur. Cette surface d'eau d'électrolyte fournit la trace de l'arc, qui se propage le long de la surface de la couche conductrice et provoque un contournement, comme le montre la figure 3.3.f.

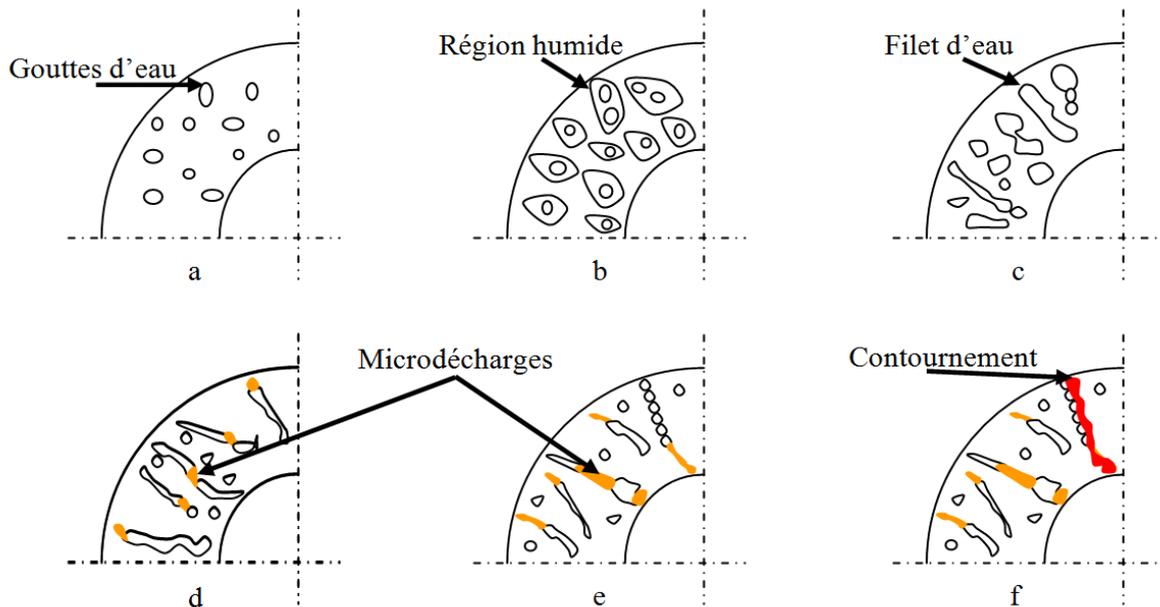


Figure 3.3 : Développement de contournement des isolateurs en silicone

Les investigations sur le mécanisme de contournement des isolateurs polymères ont également été signalées [3.8, 3.27-3.28]. Karady et al. ont présenté les résultats d'une enquête expérimentale qui permet une meilleure compréhension des phénomènes conduisant à un contournement [1.19, 3.27]. Les changements dans la résistance de la surface induite par l'activité de décharge sur la surface humide et contaminée ont été identifiés comme l'une des sources de contournement d'isolateurs en silicone. Leurs études, cependant, mettent l'accent sur le mécanisme de contournement et non sur le vieillissement. Swift [3.29] a effectué des études théoriques et expérimentales de gouttes d'eau à la surface d'un isolateur en silicone Rubber du point de vue de l'eau déclenchant une panne électrique d'une interface diélectrique à l'air. Il a été démontré que, pour des conditions de pertinence pratique, une déformation grossière de la goutte d'eau survient avant que le contournement ne se produise.

Gorur et al. ont étudié le contournement des isolateurs non-céramiques contaminés et humides [3.26, 3.28] et ont discuté d'un phénomène de contournement soudain, qui est un

contournement d'un isolateur contaminé partiellement précédé par peu ou pas de courant de fuite sur la surface isolateur. Le mécanisme de contournement des isolateurs non céramiques contaminés a été comparé à celui des isolateurs en céramique. Des calculs de champs électriques ont été effectués et il a été suggéré qu'une distribution de champs électriques hautement non uniforme pourrait être responsable du phénomène de contournement soudain observé.

Les problèmes associés aux incidents de contournement a encouragé de nombreuses études afin d'obtenir une meilleure compréhension des phénomènes conduisant à un contournement [3.30]. Ces études [3.9, 3.31-3.35] donnaient des observations sur modèles expérimentaux et les modèles mathématiques, ils ont été établis dans le but de trouver un moyen d'éviter le problème de contournement. M. El-A. Slama et al. [3.34] se sont intéressés dans leur étude expérimentale sur les effets des sels non solubles et peu solubles et des mélanges de sels sur la tension de contournement en DC.

En outre, dans [3.36] les auteurs ont développé un modèle d'arc dynamique pour analyser le courant de fuite avant le contournement des isolateurs polymères dans les conditions humides. Le modèle a montré des résultats satisfaisants et le courant de fuite a été facilement prédit avant le contournement. Ce modèle peut être utile pour simuler des isolateurs polymères conçus pour des applications ultra haute tension.

Les gouttes d'eau sur les surfaces d'isolateur polymère fournissent une contrainte de champ électrique à l'interface commune entre les gouttes d'eau, la surface isolante et l'air environnant (point triple), ce qui peut entraîner des décharges partielles, une détérioration de la surface ou même un contournement. L'influence de divers paramètres sur le comportement des gouttes d'eau sur les surfaces polymériques sous des champs électriques élevés a fait l'objet de plusieurs études.

K. Karakoulidis et al. [3.37], ont étudié le comportement des gouttes d'eau sur une surface polymère sous un champ électrique alternatif.

Ils ont choisi des arrangements des gouttes de 1, 2, 3, 5 et 9 et les volumes de ces dernières ont été de 0,2 et 0,3 ml, afin de mieux simuler les conditions réelles. Les électrodes sont positionnées à une distance de 4 cm parallèles les unes des autres de sorte que le positionnement de gouttes d'entre eux serait facile. Les paramètres fondamentaux influençant le comportement des gouttes d'eau sur la surface polymère, à savoir, la conductivité et le volume des gouttes d'eau, la rugosité de surface du polymère, leur positionnement par rapport aux électrodes. L'arrangement et l'augmentation de la conductivité des gouttes avec un volume constant de 0.3 ml entraînent une diminution de la tension de contournement.

Cette conclusion est généralement valable indépendamment du matériau utilisé. L'état de surface influe de façon positive sur la tension de contournement lorsque le nombre de gouttes est important, le positionnement joue un rôle plus important que le volume de la goutte.

En 1990, Gubanski et Vlastos [2.15] ont étudié les mesures de l'angle de contact des gouttes d'eau sur les surfaces d'isolateurs en EPDM et SiR naturellement vieillis qui étaient en service entre 5 et 9 ans. Il a été suggéré que les petites fissures de surface dans les surfaces isolantes peuvent agir comme des capillaires qui semblent aider une goutte d'eau à se propager sur une grande surface. Les échantillons ont prélevés soit directement à partir des isolants, soit traités en les exposant aux rejets couronne et / ou à la pollution saline. On a constaté que les surfaces EPDM subissent une perte permanente d'hydrophobie alors que l'angle de contact des gouttes d'eau sur les surfaces isolantes SiR se rétablit après 10 à 100 heures après l'exposition aux décharges couronne. L'angle de contact des surfaces des isolateurs en silicone était supérieur aux angles de contact du revêtement en caoutchouc EPDM et en particulier dans le cas de la surface vieillie. La mesure des angles de contact pour les nouvelles surfaces isolateurs PDMS / SiR par des chercheurs précédents ont été recueillis par Ali et Hackam [2.16]. Les auteurs [2.16] dans leur étude sur les effets des solutions salines et de la température sur les surfaces des élastomères silicone, ont déterminé l'évolution de l'angle de contact en fonction du temps sous différentes températures. Les résultats de [2.16] pour une solution saline de conductivité volumique à 1 mS/cm sont reproduits au tableau 3.1, ils ont remarqué que l'effet de l'augmentation de la température de la solution saline correspond à une augmentation de l'énergie de surface, le changement le plus significatif étant dans la composante polaire γ_{sh} , appelée modification de la liaison hydrogène.

Tableau 3.1 : Effets de la température sur l'énergie de surface des échantillons vierges de HTR SiR après immersion dans une solution saline de 1mS / cm pendant 3000 heures [2.16]

Température (°C)	γ_{sd}	γ_{sh}	γ_{sv}
Vierge ($\theta= 100^\circ$)	28,4	2,4	30,8
0	29,8	11,4	41,2
22	29,9	14,7	44,6
50	30,4	10,7	41,1
75	30,2	15,1	45,3
98($\theta= 25^\circ$)	43,3	36,6	70,9

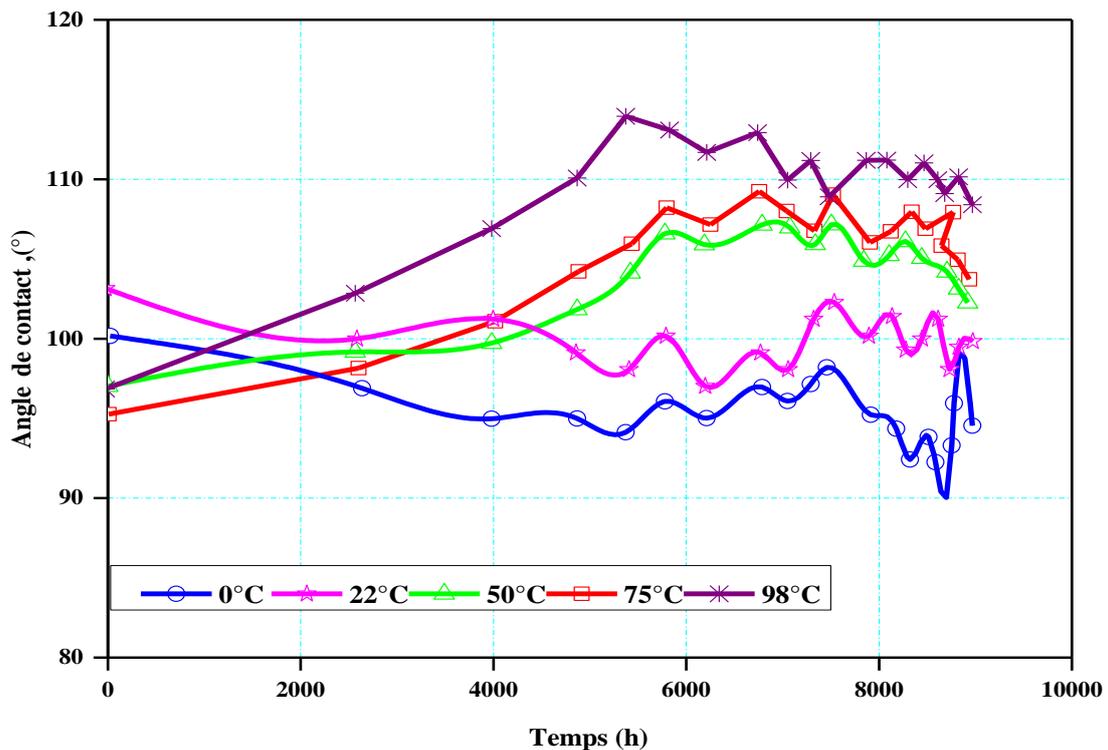


Figure 3.4 : Variation de l'angle de contact en fonction de la température et du temps [2.16]

La figure 3.4 de [2.16] montre les angles de contact en fonction de la température et du temps. Ils ont observé que pour des spécimens conservés dans l'air à des températures allant de 0 à 98° C, l'angle de contact passe de 100° à 94° à 0° C et de 103° à 100° à 22° C ; après 3000 h cet angle augmente pour les températures de 50 à 98°.

Yong Zhu et al. [3.38] ont étudié le comportement d'une goutte d'eau avec des conductivités et des volumes différents à été mise au centre d'une plaque en silicone, et son comportement électrohydrodynamique a été observé à l'aide d'une caméra vidéo à grande vitesse. Un exemple du comportement d'une goutte d'eau (30 μl et 2.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$) sur une surface durant un cycle de tension 10 kV, est illustré par la figure 3.5. Pendant le processus de décharge couronne la goutte d'eau est toujours chargée négativement, par conséquent, la goutte d'eau va vibrer entre les deux électrodes. Elle a été tirée vers l'électrode positive, la goutte déposée se déforme et synchronisée avec la fréquence du champ appliqué. Une fois la déformation devient perceptible, elle augmente rapidement jusqu'à ce que la goutte devient mécaniquement instable et éjecte des filaments d'eau à partir de ses sommets.

Le modèle de simulation dynamique basé sur chaque photo comme le montre la figure 3.5.a, a été mise en place. Au cours de la simulation, la valeur instantanée de la tension alternative appliquée à chaque milliseconde a été précisée ainsi que le potentiel de l'électrode à haute tension. Comme le montre la figure 3.5.b, le champ électrique horizontal à été calculé à la pointe de la goutte pour un seul cycle de tension appliquée.

La conductivité et le volume des gouttes jouent un rôle important sur la tension de contournement comme le montre la figure 3.6. À partir de cette figure, on peut déduire que la tension de contournement diminue avec l'augmentation du volume et de la conductivité des gouttes. En outre, ces deux paramètres ont un effet remarquable sur le mode de décharge couronne et le développement de contournement.

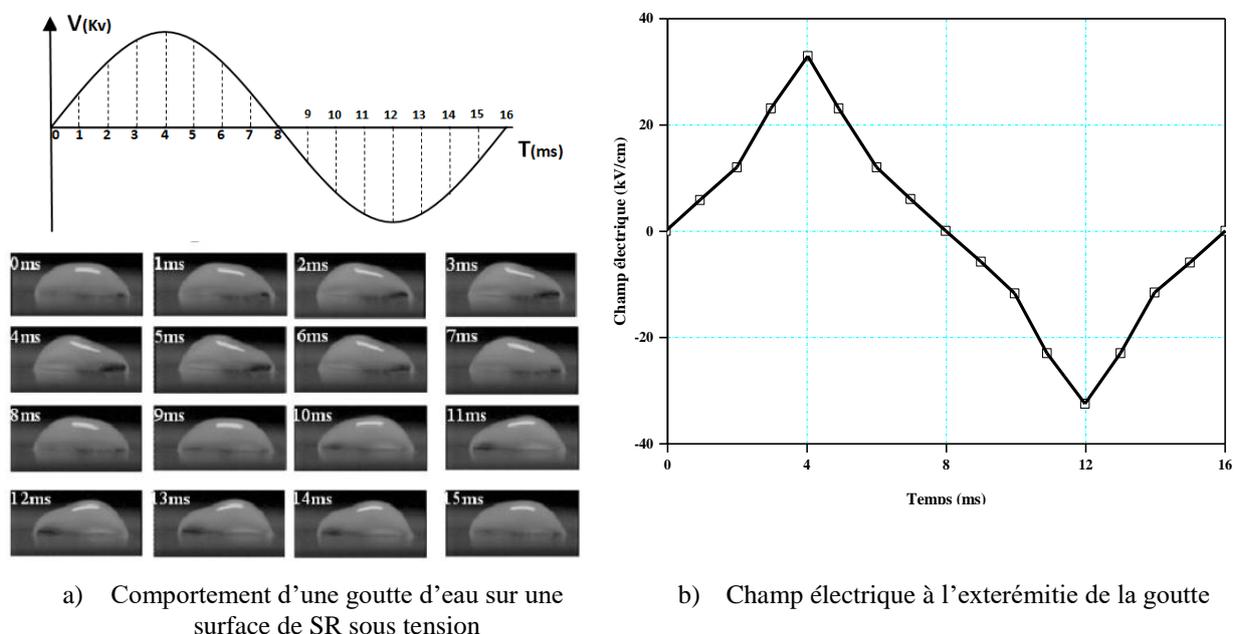


Figure 3.5 : Comportement d'une goutte d'eau et le champ électrique

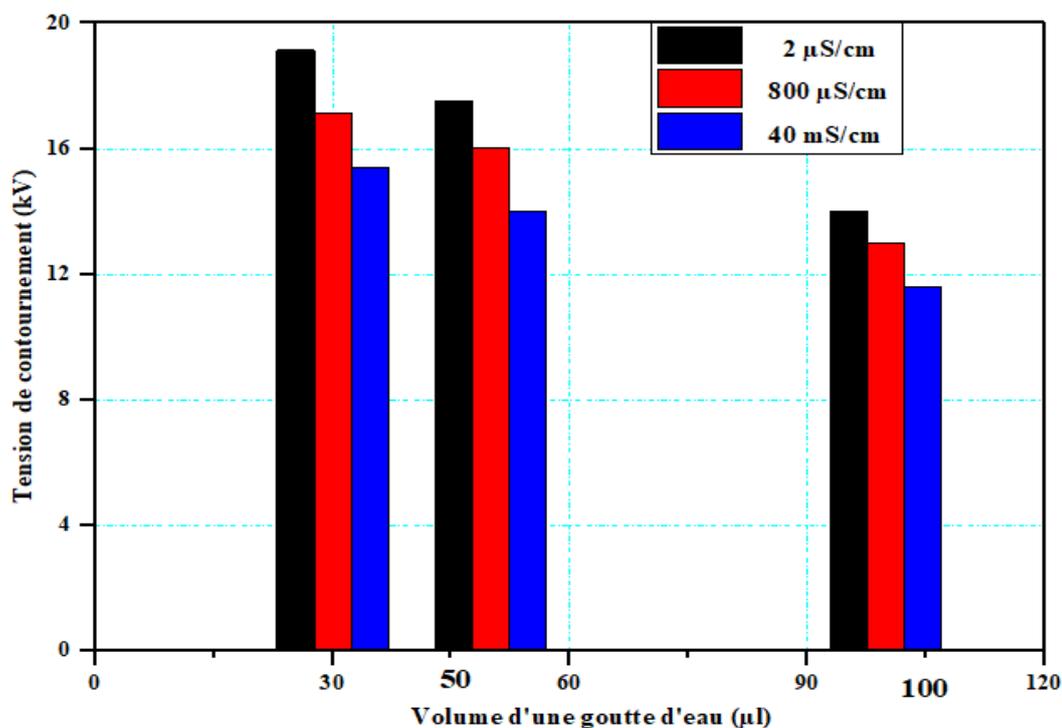


Figure 3.6 : Tension de contournement en fonction du volume et la conductivité des gouttes

D'autre part, A. Krivda et al. [3.39], considèrent que les décharges partielles à la

surface des isolateurs polymères comme l'un des mécanismes de vieillissement responsable de la défaillance de l'isolateur.

Y. Mizuno, et al. [3.40], ont fait des tests aussi sur un spécimen en silicone et ont trouvé que la tension de claquage sur un spécimen de silicone comblé par des gouttes d'eau contaminées devient inférieure juste après la contamination. Ils affirment aussi que la durée et la valeur de la tension de claquage dépend la durée de la contamination. Ils ont trouvé que la tension de contournement après cinq jours de contamination, atteint presque la même valeur que celle obtenue pour le silicone propre.

Wang Jianwu et al. [1.19] ont fait des tests expérimentaux et des simulations, sur des gouttes d'eau de différents volumes pour voir l'effet de ce dernier sur la distribution électrique. Ils remarquent d'après leurs résultats que, avec l'augmentation du volume de la goutte, le champ électrique augmente aussi produisant une décharge par effet couronne au niveau de la zone triple (l'air, la goutte d'eau et la surface isolant), par conséquent, la tension est plus faible au niveau de la goutte (chute de tension).

Windmar [3.41] a étudié le comportement des gouttes d'eau sur des surfaces non céramiques et les décharges électriques associées. Il a été trouvé une relation claire entre l'hydrophobicité de surface, la salinité des gouttes d'eau, le caractère des décharges de surface et le contournement avec la tension du support.

Blackmore [3.42] et Birtwhistle [3.43] ont également observé des décharges entre les gouttes d'eau, ce qui a provoqué une perte d'hydrophobie à la fois sur les surfaces de silicone et de caoutchouc EPDM. La conductivité des gouttes d'eau a eu une réaction négative sur la perte d'hydrophobicité; c'est-à-dire qu'un taux plus élevé de perte d'hydrophobicité correspond à une conductivité inférieure.

Michael et al. [3.44] ont étudié l'influence de différents paramètres sur le polymère isolateurs. Ils ont effectué un test en plan incliné pour comprendre le comportement des gouttes d'eau dans un champ électrique puissant. Des paramètres ont été étudiés tels que la conductivité des gouttes d'eau, le volume des gouttes, la rugosité de la surface polymérique et le positionnement des gouttes par rapport aux électrodes. La tension de contournement est affectée par tous les paramètres susmentionnés. Le positionnement des gouttes d'eau est dans certains cas plus important que le volume des gouttes. Les dommages de surface ont été analysés à l'aide d'études par microscopie électronique à balayage (MEB) et par analyse de rayons X à dispersion d'énergie (EDAX). On a observé que l'amplitude de la décharge avait une influence directe sur la surface endommagée.

Dans leur travail, une étude a été réalisée des paramètres susmentionnés sur le comportement des gouttes d'eau sous l'influence d'un champ uniforme dans la gamme de $1.7\mu\text{S}/\text{cm}$ - $2000\mu\text{S}/\text{cm}$.

Tous les essais ont été préformés avec un arrangement d'essai incliné, afin de simuler le comportement des gouttes d'eau sur la surface d'un isolateur extérieur. L'angle utilisé par rapport à l'horizontale était de 10° . Un tel angle a été choisi en raison de son état intermédiaire pour les isolateurs d'extérieur. La haute tension alternative a été générée en utilisant un transformateur de 20 kV. Les électrodes étaient de forme demi-cylindrique et en matériau de cuivre. Une grande attention a été accordée à la douceur des surfaces des électrodes, de sorte qu'aucune amélioration du champ n'a pu être remarquée dans la zone de fonctionnement. D'après les recherches ci-dessus, les auteurs ont tiré les conclusions suivantes:

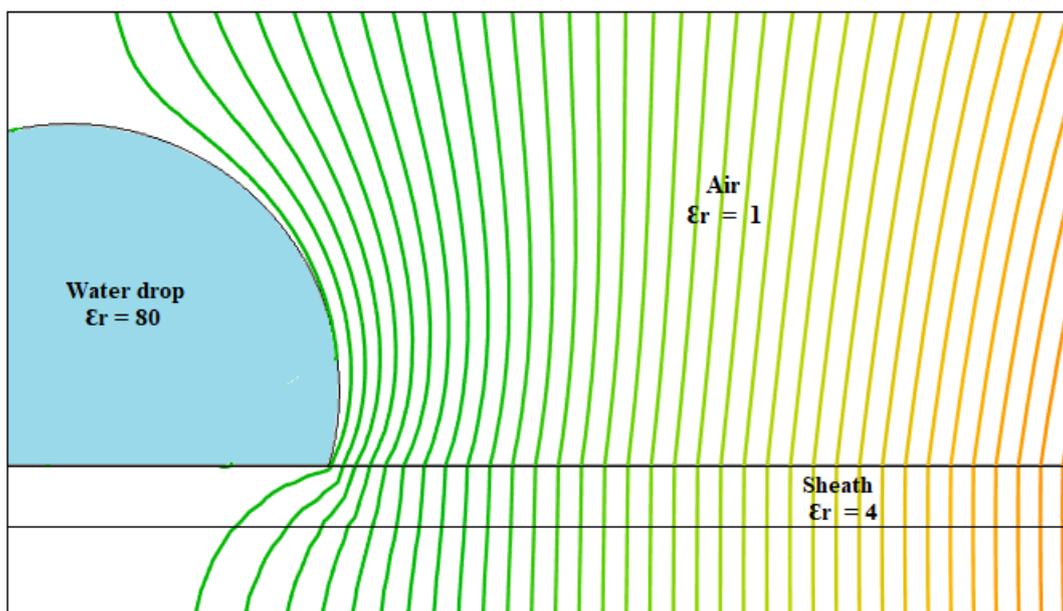
- Une conductivité augmentée, des surfaces polymériques plus lisses et un volume de gouttes d'eau augmenté entraînent une réduction de la tension de contournement.
- Les résultats MEB et EDAX confirment que la variation de la composition de la surface est directement liée à l'amplitude des décharges.

La simulation des contraintes électriques avec et sans gouttes d'eau a été conduite par un certain nombre de chercheurs [3.45-3.47]. On sait que le champ électrique, l'admittance et la perte diélectrique augmentent dans un isolateur défectueux. Lorsque la tension appliquée augmente, l'intensité du champ électrique et la perte de densité de courant augmentent [3.45]. Le suivi est plus sévère dans les échantillons défectueux, car la présence de contamination de surface augmenterait la distorsion du champ électrique autour du défaut [3.47]. Le champ électrique est renforcé au niveau des bords de contact entre les électrodes et la surface du polymère et au point triple du polymère, de l'eau et de l'air lorsque la goutte d'eau est placée au centre de l'interstice [3.46]. Une goutte d'eau sur la surface de l'isolateur déclenchera des décharges corona. La décharge couronne est déclenchée par la présence d'un champ électrique élevé local. La décharge couronne est capable de se propager le long de la surface de l'eau. Sous haute tension appliquée, la couche d'eau est formée en raison de la vibration des gouttes d'eau. Lorsque la couche d'eau recouvre la surface de l'échantillon, la conductivité du courant de fuite peut être détectée. Dans cette région, la densité de courant est observée comme non uniforme. Une densité de courant localement élevée entre les gouttes peut entraîner la formation de bandes sèches [3.48]. Cette densité de courant élevée entre les gouttes peut entraîner la formation de bandes sèches.

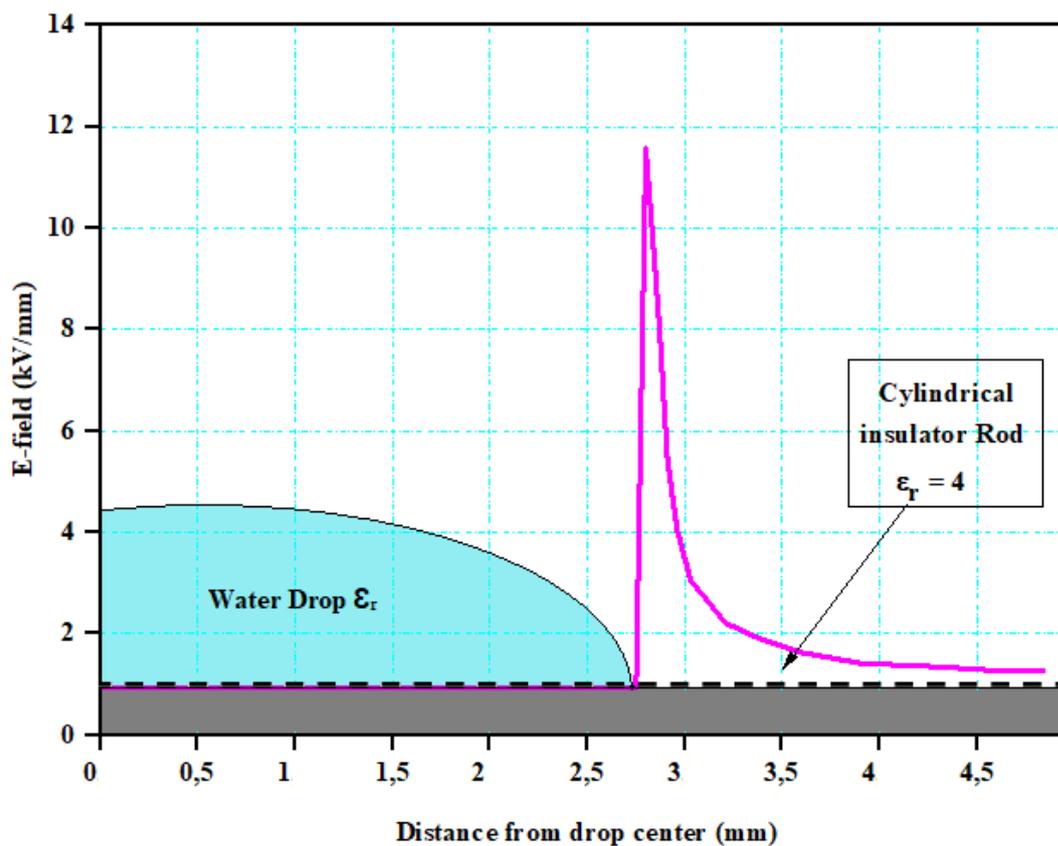
Les gouttes d'eau présentes à la surface d'un isolateur, en raison de leur permittivité élevée, entraîne une augmentation localisée du champ électrique dans le point triple – diélectrique eau-air [3.49, 3.50]. La figure 3.7 montre respectivement des exemples de lignes équipotentielles et de distribution du champ électrique qui mettent en exergue la région où le champ électrique est intense (à la triple diélectrique eau-air). Si le champ électrique est suffisamment élevé, des décharges partielles aléatoires peuvent s'initier sur la surface de l'isolateur. Il a été rapporté [1.18] que le niveau d'apparition de couronne pour les gouttes d'eau varie de 4 à 10kV / cm, en fonction de divers paramètres tels que la forme et le volume des gouttes, l'hydrophobicité et les conditions atmosphériques.

Ces activités intenses et continues de décharge et l'érosion peuvent détruire l'hydrophobicité et consommer progressivement la surface de l'enveloppe et de ses jupes, comme le montre la figure 3.8.

Dans les expériences à petite échelle rapportées dans [3.51], les premiers signes de dégradation des matériaux dus aux décharges électriques ont été des craquelures de la surface (<5µm de profondeur), des fissurations (> 50 µm de profondeur) et de la décoloration. Dans d'autres cas, l'érosion induite par les décharges partielles générées par la présence des gouttes d'eau peut conduire à la perforation de l'enveloppe. Si cette perforation se situe entre les ailettes au niveau de la tige, un chemin conducteur peut ainsi naître entre l'enveloppe de l'isolateur et la tige, donnant ainsi naissance à un défaut interne.



a) Lignes équipotentielles



b) lignes de champ électrique

Figure 3.7 : Champ électrique à la triple jonction des gouttes d'eau [3.50]



Figure 3.8 : Trace de dégradation sur la surface de l'isolateur polymère [3.52]

R.K. Dholey, R. Bose et al. [3.53] ont utilisé la méthode des éléments finis pour calculer le facteur d'amplification du champ électrique pour une goutte d'eau simple ou multiple sur un modèle de gaine d'un isolant polymère. Les calculs ont été faits en tenant compte de l'effet de singularité du point triple. Les résultats ont montré que :

- L'augmentation du champ électrique croît avec l'élévation du volume et décroît avec la croissance des angles de contact ;

- La différence entre le point triple et le point de convergence augmente également avec l'élévation des volumes de gouttes d'eau mais diminue avec leur angle de contact ;
- De plus, dans le cas de multiples configurations de gouttes d'eau, l'amélioration du champ électrique est maximale pour trois gouttes d'eau par rapport à la configuration avec deux de gouttes d'eau ;
- Pour deux gouttes d'eau, le champ électrique maximal est observé entre elles lorsque les ces gouttes sont plus proches des électrodes.

Dans un autre article, Nagaraj et al. [3.54] ont étudié les caractéristiques de surface de l'isolateur polymère en plaçant un nombre différent de gouttes d'eau sur l'isolateur polymère. Ils ont utilisé la gravité pour les tests, ceci est dû au fait que les gouttes d'eau sur la surface peuvent se combiner avec des polluants et peuvent devenir conductrices. Les résultats ont montré que :

- Avec un Arrangement deux de gouttes d'eau, la tension de contournement minimale par unité de longueur peut être atteinte. Celle-ci est utile dans la conception de la longueur de surface de l'isolateur polymère ;
- Les gouttes d'eau s'allongent lors de l'application de la tension, ainsi réduisant la longueur de l'intervalle conduisant à la formation d'arcs et donc le contournement ;
- Des tests avec neuf gouttes d'eau montrent une réduction du contournement ;
- Une fois que le premier contournement a eu lieu, les valeurs de contournement suivantes ont été inférieures. Ce comportement est d'un grand intérêt parce que l'isolateur polymérique réel se comporte de manière similaire sur le terrain et en laboratoire ;

Des recherches sur le terrain ont été effectuées pour étudier le comportement des isolateurs polymériques exposés à la couronne déclenchée par des gouttes d'eau. Pour étudier les effets couronne de goutte d'eau sur des isolateurs polymères à 500 kV à pleine échelle, des observations ont été faites dans une chambre de vieillissement accéléré à grande échelle ainsi qu'en service, rapportées par Phillips et al. [1.17]. Il a été constaté que l'amplitude du champ électrique sur les gaines des isolateurs étudiés, à la fois dans la chambre et dans une tour en treillis d'acier, dépassent les niveaux nécessaires pour les gouttes d'eau couronne. En outre, il a été observé le blanchiment du matériau de surface et produit le blanchiment s'est en corrélation avec l'amplitude du champ électrique de la surface. De plus, a été trouvée une perte de la propriété hydrophobicité permanente dans les régions fortement stress et le degré de perte était proportionnel à l'amplitude du champ électrique appliqué [1.18].

Reynders, et al. [3.55] ont identifié l'influence de couronne et l'arc local comme les principales du vieillissement sur les surfaces en silicone. Cependant, il a été proposé que le vieillissement induit par l'arc électrique à travers les bandes sèches ne fût pas aussi délétère que le vieillissement induit par couronne. De plus, ont été présentées des preuves expérimentales sur le vieillissement couronne et les étapes du processus de vieillissement sur le terrain.

Souza et al. [3.56] ont étudié le début de la couronne et sa relation avec les conditions de surface du polymère. Ils ont conclu que l'association des gouttes d'eau et de la pollution améliore le champ électrique et peut conduire à des décharges corona et éventuellement à des défaillances, dans des régions fortement contaminées.

Phillips et al. [3.57], par exemple, ont résumé les résultats des recherches approfondies menées par ces deux organisations (EPRI et STRI) pour déterminer une limite pratique pour le domaine électronique admissible sur les surfaces isolateurs aux fins de conception.

Simmons et al. [3.58] ont exploré certains aspects de la science matérielle des matériaux en silicone en utilisant une conception d'un isolateur en hybride et comparé avec des isolateurs en céramique. Le courant de fuite dans divers modèles isolateur en hybride et isolateurs en céramique a été surveillé dans des conditions de service différentes. Ils remarquent le courant de fuite moyen sur les isolateurs en céramique était généralement six à huit fois supérieur à celui des isolateurs hybrides comme le montre la figure 3.9.

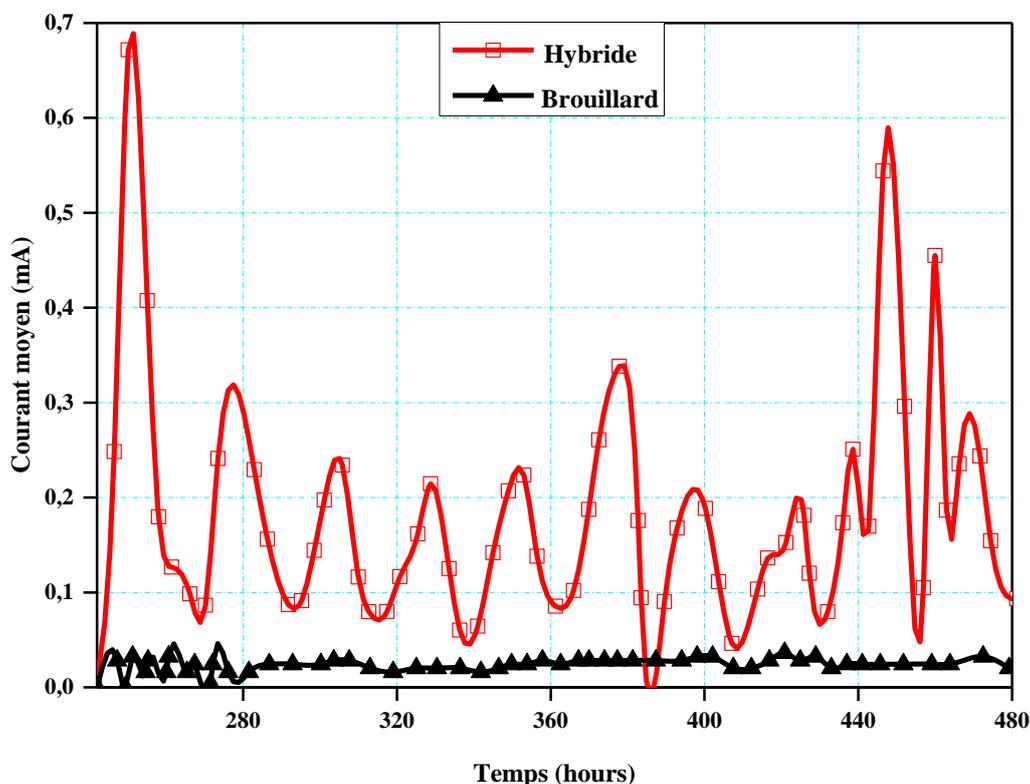


Figure 3.9 : Le courant de fuite entre l'isolateur en hybride et céramique [3.58]

Gorur et al. [2.25] ont étudié la relation entre la perte de poids et la charge cumulative pour une gamme de conditions de brouillard salin et ont trouvé une corrélation médiocre.

Le courant de fuite peut être utilisé comme indicateur de la transition d'une surface isolante d'un état hydrophobe à un état hydrophile. Ceci a été montré dans [2.25] avec des échantillons en silicone dans un brouillard salé. La perte d'hydrophobie a été accompagnée d'une augmentation du courant de fuite moyen de 0,5 mA supérieur à 5 mA. Pour la même distance de fuite, les isolateurs ont montré des courants de fuite inférieurs à moins de 25 mA comparables aux isolateurs EPDM, qui ont atteint une valeur d'environ 70 mA. Ces isolants ont été soumis à une extrême pollution par le sel dans un site d'essai à Anne berg en Suède, comme l'ont signalé les autres auteurs [3.58, 3.59].

Kim et al. [3.60, 3.61] ont étudié le développement du courant de fuite dans les revêtements RTV dans une chambre à sel-brouillard avec différents degrés de contamination, la composition du matériel et les conditions de surface. Le courant de fuite, utilisé comme indicateur de l'efficacité du revêtement, s'est avéré extrêmement dépendant de l'environnement ainsi que des conditions de surface. Dans certains cas, le courant de fuite a été supposé pendant plus de 100 heures, une période suffisamment longue pour une quantité importante de décharges de surface à prendre en considérant les contraintes ; cependant, le modèle de courant de fuite n'a montré aucune information sur cette activité de décharge pendant une telle période. Une autre enquête sur le courant de fuite sur les isolateurs et matériaux non-céramiques a été effectuée par Fernando et al. [3.62-3.64]. Les résultats montrent que les formes d'onde actuelles de fuite fournissent des informations précieuses qui peuvent être utilisées, par exemple, dans les procédures d'évaluation des matériaux, pour déterminer la gravité de la pollution et pour une évaluation générale de la performance de l'isolant dans des conditions de terrain et de laboratoire. Cependant, la corrélation entre les paramètres du courant de fuite, tel que le niveau actuel, le contenu harmonique et la charge accumulée, d'un côté et l'état de la surface de l'autre côté, n'est pas encore terminée et il faut travailler davantage pour élucider ces relations et, par conséquent, de créer une base pour une utilisation plus large des mesures de courant de fuite dans des situations pratiques. Les résultats de [3.65-3.67] ont montré que les formes d'onde de courant de fuite fournissent des informations qui peuvent être utilisées pour une évaluation générale de la performance de l'isolant dans des conditions contaminées par le champ et le laboratoire.

Bruce et al. [3.68] a signalé que l'indication de la dégradation du matériau peut être évaluée en inspectant la nature du modèle de courant de fuite. Cela peut être réalisé en évaluant la répartition temporelle de la grandeur du courant de fuite à l'aide d'un enregistreur

à courant continu de 15 échantillons par seconde, qui est une méthode active utilisée pour observer le comportement de surface à basse fréquence. Ces données peuvent ensuite être illustrées comme une mesure d'intermittence, permettant de calculer le temps de durée total qu'un échantillon passe dans un mode non conducteur pendant le test. Ceci donne des informations précises relatives à l'état de la surface d'un filament conducteur avec ou sans décharge présente. Les résultats de la littérature [3.66, 3.69] confirment que les paramètres des formes d'onde de courant de fuite (par exemple les valeurs de pointe et de RMS) fournissent des informations précieuses qui peuvent être utilisées pour évaluer la performance de l'isolant polymère dans différentes conditions d'essai.

3.2.2.2. *Essais de pluie sur des isolateurs en silicone*

Des essais de pluie menés par Shaowu et al. [3.70] sur des sections représentatives d'isolateurs réels ont révélé que les décharges de surface proviennent toujours d'une faible hydrophobicité et que le canal critique de contournement se compose toujours d'un film d'eau, de bandes d'eau ou de filets d'eau tombant du rebord des ailettes comme il est indiqué sur la figure 3.10 [3.70].

La ligne de fuite de l'isolateur est 320 mm et une longueur est égale à 180 mm. Il a été pulvérisé à l'eau, à conductivité variable, de l'ordre de 100 $\mu\text{S} / \text{cm}$ à 100 000 $\mu\text{S} / \text{cm}$ à la fois horizontalement et verticalement sur la section d'isolateur par l'intermédiaire de soupapes de commande séparées.

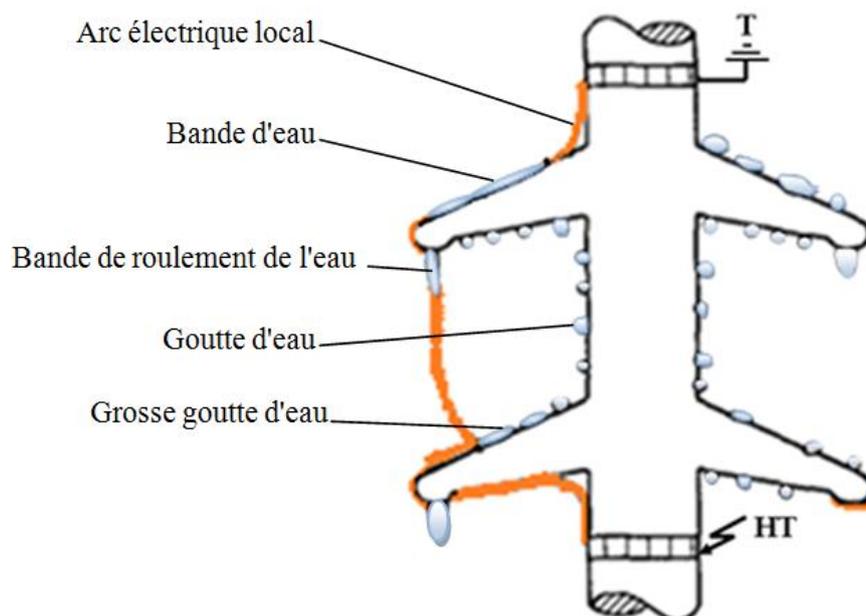


Figure 3.10 : Dessin montrant l'emplacement de l'arc lors d'expériences de pluie sur une section d'un isolateur composite SiR

L'effet de la perte d'hydrophobicité réduit significativement les propriétés de tension de tenue de l'isolateur. Sur la figure 3.11 de [3.70], on peut voir que le champ de contournement, qui a été calculé en divisant la tension appliquée par la longueur d'arc, par exemple un isolateur hydrophobe humide a diminué à environ 32 kV / cm, par contre 13 kV/cm pour une surface isolateur hydrophile propre humide, avec une conductivité de l'eau de 4000 $\mu\text{S} / \text{cm}$.

Il a également été montré qu'après un certain nombre de contournement, la tension de tenue de l'isolateur est réduite après des contournements répétitifs comme le montre la figure 3.12 [3.70]. Pour chaque contournement, la perte d'hydrophobie à la surface a été observée être localisée. Les mesures de courant ont montré un composant capacitif pour de nouvelles surfaces hydrophobes. Pour les surfaces hydrophiles, un composant résistif supplémentaire du courant a été détecté. La figure 3.12 montre qu'une réduction significative (d'environ 25%) des propriétés isolantes semble avoir eu lieu à l'isolant à la suite des premiers contournements. Le temps entre le contournement n'a pas été indiqué dans [3.70].

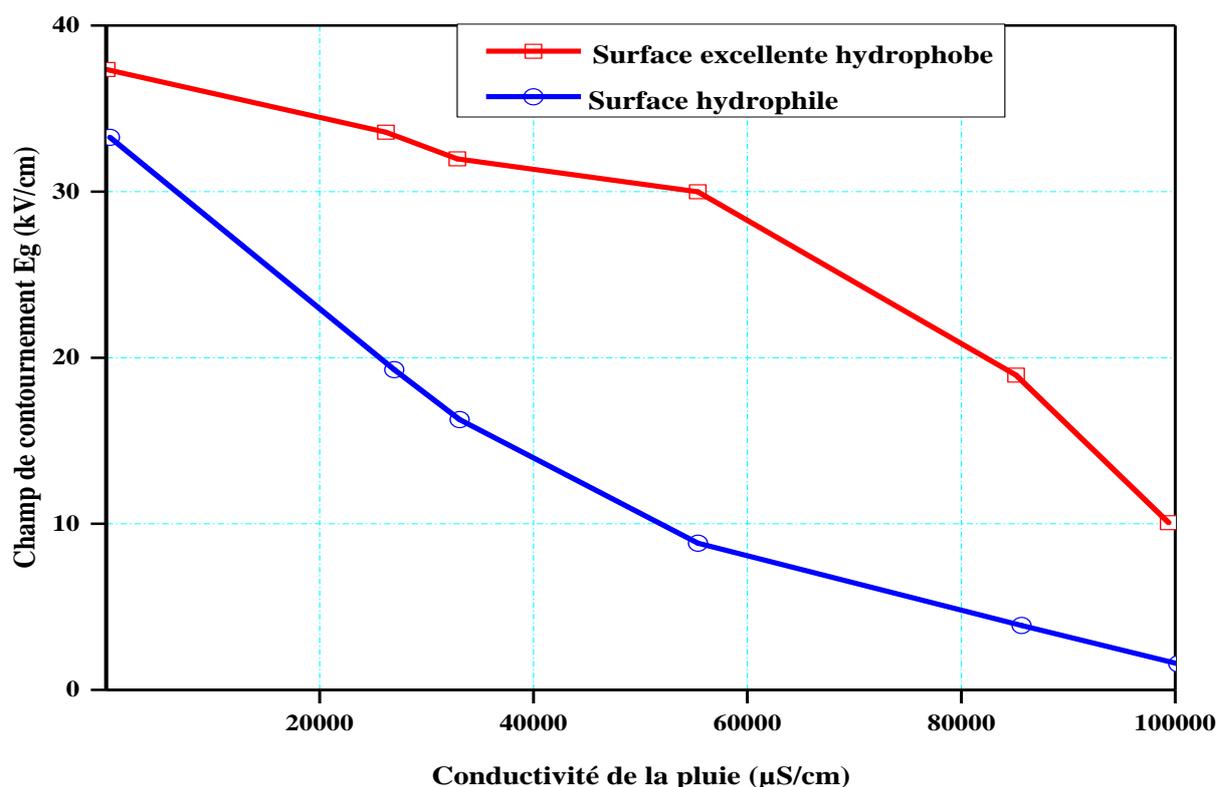


Figure 3.11 : Relation entre la conductivité et le gradient de contournement pour les surfaces polymères hydrophobes et hydrophiles [3.70]

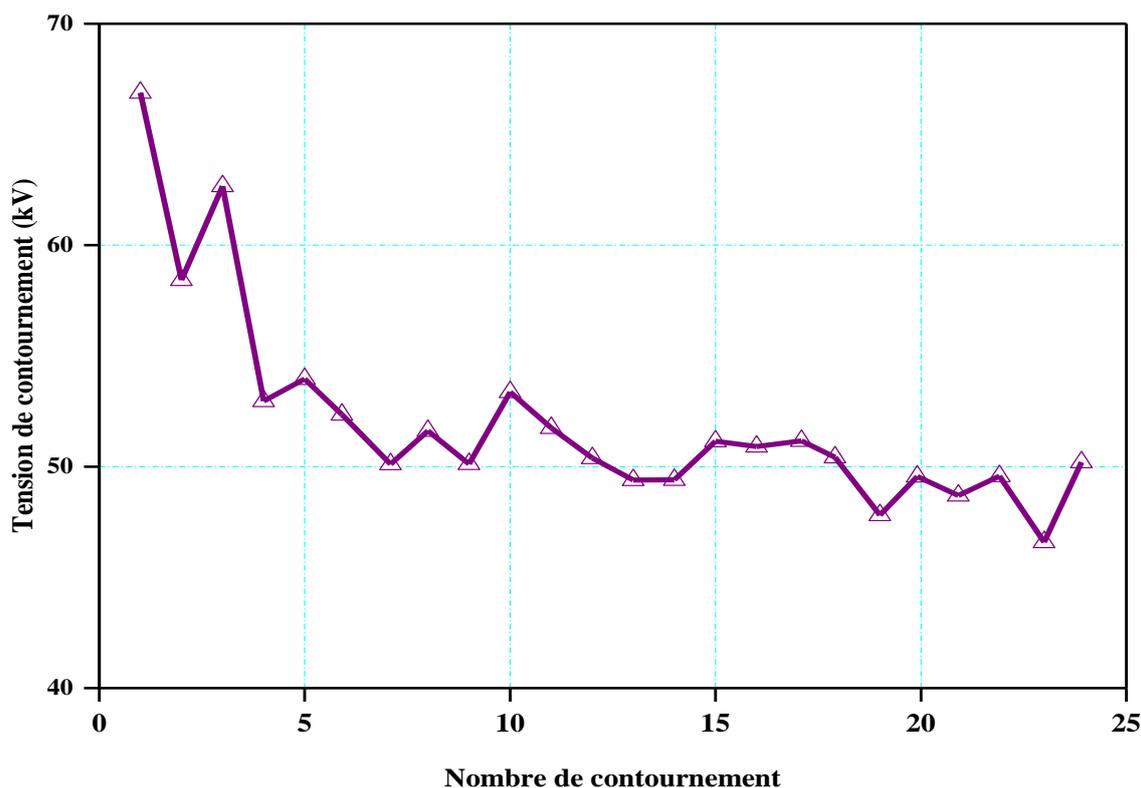


Figure 3.12 : Tension de contournement en fonction du nombre de contournement pour une conductivité d'eau de 630 $\mu\text{S}/\text{cm}$ [3.70]

Xinsheng Wang et Noboru Yoshimura [3.71] ont étudié la résistance au suivi en silicone vulcanisé à haute température sous divers types de précipitations. Il a été évalué par la méthode du plan incliné, en utilisant de l'eau de pluie artificielle comme contaminant. Ils ont étudié les influences de la concentration ionique, de l'acidité et de la conductivité de l'eau de pluie en silicone activé. Des résultats expérimentaux ont montré que la dégradation des matériaux sous tension augmentait avec la concentration ionique de l'eau de pluie, le courant de décharge et l'augmentation de l'érosion du matériau. Les ions connectés dans l'eau de pluie pourraient induire plus de suivi et de décharge sur la surface du matériau sous tension, et l'eau de pluie acide pourrait accélérer le processus électrolytique dans les matériaux et dissoudre la charge inorganique dans silicone. Bien que le silicone se dégrade sous l'effet du vieillissement accéléré en utilisant l'eau de pluie artificielle, la concentration, l'acidité et la conductivité de la précipitation réelle étaient insuffisantes pour exercer un effet de dégradation significatif en silicone. Il a été constaté que en silicone peut résister à l'érosion de l'eau même la plus corrosive et ne manque pas et, en outre, a une forte résistance à divers types de précipitations.

Gorur et al. [1.25] ont effectué des essais en laboratoire sur le comportement de contournement des isolateurs non céramiques et de porcelaine contaminés artificiellement,

les tests ont été réalisés dans des conditions humides. Deux modes de mouillage-brouillard et pluie ont été considérées. Les principaux objectifs de ce travail étaient: (1) d'établir une comparaison des classements obtenus avec les deux méthodes de mouillage - brouillard et pluie, et donc déterminer lequel représente le pire des cas et (2) étudier l'influence du vieillissement, la contamination de la surface et les formes d'isolateurs sur les performances de contournement. Les résultats ont montré que dans les essais de contamination en laboratoire le classement des isolateurs non céramiques est affecté par le mode de mouillage. Ainsi, la sélection des isolateurs par l'utilisateur doit être influencée non seulement par la quantité de contamination attendue mais également par le type de mouillage.

Dans une étude sur les performances de vieillissement dans des conditions de pluie [1.24], il a été observé que les isolateurs avec des ailettes de petit diamètre et une faible inclinaison de l'ailette sont particulièrement sensibles à la dégradation de leurs propriétés sous la pluie. Les gouttes d'eau s'accumulant sur les ailettes de ces isolateurs sont à l'origine des décharges corona et entraînent la formation de canaux d'eau, la collecte d'eau sur les bords des ailettes et le pontage des espaces entre ailette par des cascades de gouttes d'eau. Le mouillage du dessous des ailettes par l'eau qui rebondissait sur la surface des ailettes était très nuisible.

Que et Sebo [3.72] ont développé un modèle informatique du champ électrique autour de l'embout d'un isolateur polymère typique en utilisant le logiciel COULOMB. Leur modèle produit des lignes équipotentielles et montre des distributions de champ électrique comparées sur une extrémité d'une surface isolateur normalement orientée pour les modèles «secs et propres», «pluie» et «brouillard» (Figure 3.13). La différence entre les modèles de pluie et de brouillard est l'hypothèse que le dessous de l'ailette est humide pendant le brouillard.

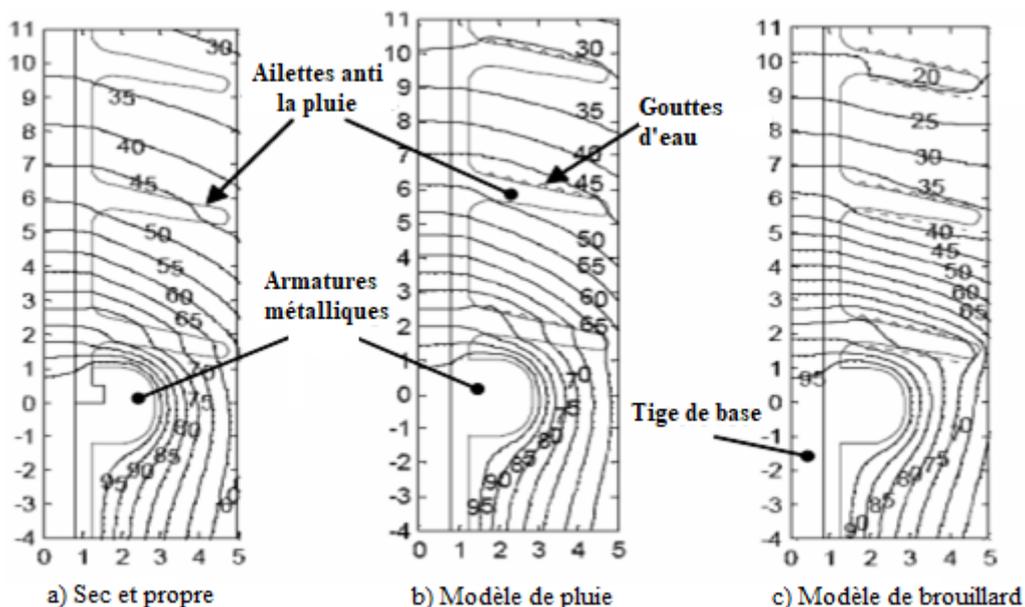


Figure 3.13 : Lignes équipotentielles d'un raccord d'extrémité d'un isolateur composite

Le degré d'amplification du champ électrique déterminé par Que et Sebo est compris entre 2,9 et 3,5 à l'interface de goutte d'eau- air- isolateur dans la région de la gaine, et entre 2,76 et 3,5 pour la région de l'ailette l'isolateur. Dans des conditions humides, la force du champ électrique augmente à environ 3 fois celle de l'isolante sèche dans cette région.

Les auteurs [3.72] concluent que la présence de gouttes d'eau sur la surface hydrophobe des salles de bain tend à uniformiser le champ électrique sur cette surface et que la plus grande partie de la tension sera répartie entre les gouttes le long de la gaine de l'isolateur. Dans un isolateur normalement orienté, cette surface est un cylindre vertical de SiR. Le gradient de tension est le plus élevé à travers la première section cylindrique verticale de la gaine adjacente à la surface de l'embout métallique à la face inférieure de la première girouette. Dans les conditions de brouillard, la région cylindrique entre les premier et second hangars météorologiques semble également avoir un gradient de tension accru.

3.3. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait le point de façon synthétique sur les travaux réalisés par plusieurs chercheurs dans leur étude de la performance d'une isolation en silicone sous tension alternative.

Il existe plusieurs enquêtes sur le terrain qui fournissent des informations utiles et en temps réel sur leur performance, mais les informations sur leurs performance d'une isolation hydrophobe en silicone recouverte de gouttes d'eau déposées manuellement sous tension alternative en fonction de certains paramètres d'influence, à savoir, l'angle d'inclinaison de l'isolation par rapport à l'horizontale, le nombre, le volume et la conductivité électrique sont plutôt limitées. Par conséquent, le travail se concentrera sur l'analyse de la performance des isolateurs polymères recouverts de gouttes d'eau.

Chapitre 04

DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX ET TECHNIQUE DE MESURE

4.1. Introduction

Dans le but de déterminer l'influence des gouttes d'eau sur le comportement électrique des isolations en silicone, nous avons effectué de nombreux essais sur ce type de polymère. Pour les besoins de nos investigations, plusieurs séries de tests ont été effectuées au laboratoire de Génie Electrique, 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 cette isolation recouverte de gouttes d'eau et à inclinaison variable.

Dans cette enquête, des expériences et des processus de laboratoire nécessaires ont été développés pour :

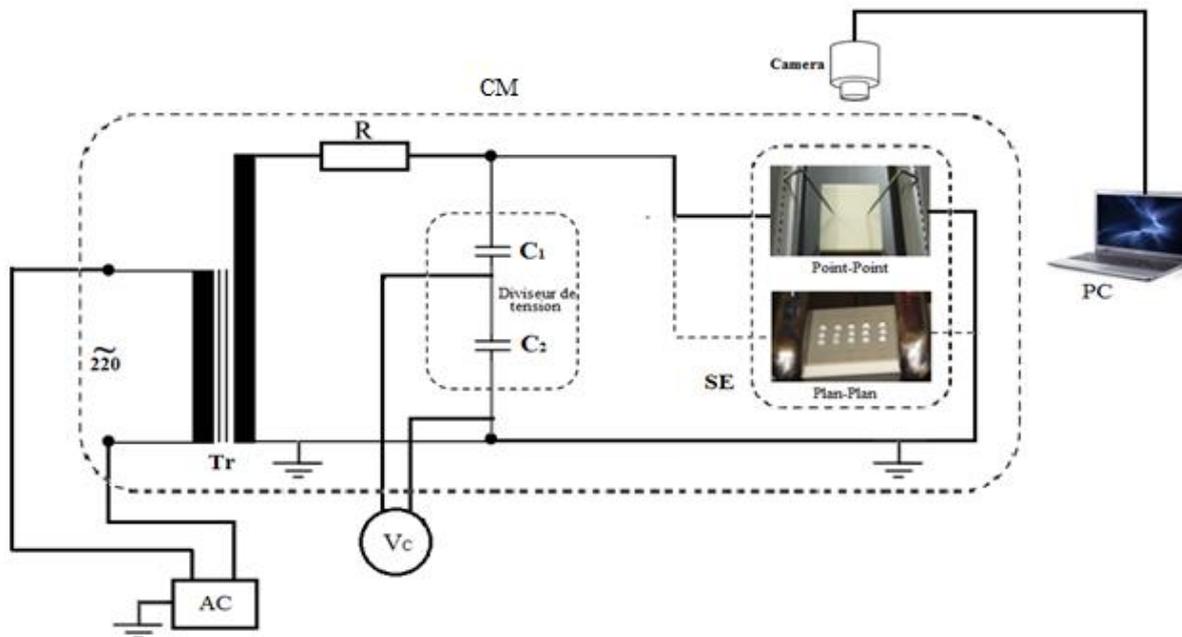
- Conditionner les différents échantillons isolants pour divers tests ;
- Mener les expériences telles qu'elles sont conçues ;
- Mettre en œuvre les conditions d'essai obligatoires ;
- Mesurer les propriétés électriques pertinentes qui peuvent être utilisées comme indicateurs de l'état de l'isolation testée.

Dans ce chapitre nous décrivons les équipements du laboratoire de haute tension utilisés pour étudier les caractéristiques des arcs électriques ainsi que leur développement sur une surface en silicone recouverte de gouttes d'eau, de même que les diverses méthodes de mesure qui ont permis de mener à bien les expérimentations. Il y sera également question des procédures expérimentales qui ont permis de mesurer la tension de contournement, de l'isolation considérée. Pour cela plusieurs essais préliminaires ont été réalisés dans le but de s'assurer du bon fonctionnement du matériel en tenant compte de toutes les contraintes qu'elles soient physiques ou techniques.

4.2. Circuit d'essai et de visualisation

Il est constitué d'un transformateur (Tr) d'essai haute tension qui délivre au secondaire une tension maximale de 135 kV pour des circuits à courant alternatif avec un courant maximal de 0,08 A. La vitesse maximale de la rampe de tension d'essai est fixée à 4kV/s.

Le choix de cette valeur a été fait afin d'empêcher l'évaporation partielle des gouttes d'eau déposées sur la surface du matériau durant la variation de la tension d'essai appliquée, dont le primaire est relié à un transformateur de réglage (autotransformateur intégré dans SG1) permettant ainsi d'ajuster la tension à la valeur désirée. La tension d'essai est mesurée à l'aide d'un diviseur de tension capacitif ($C_1 = 0.1\text{nF}$ et $C_2 = 41\text{nF}$) à travers la résistance d'affaiblissement de courant R ($104\text{k}\Omega$) et relié à un voltmètre de crête (V_c) à affichage numérique qui permet la lecture de la tension de contournement réduite en la mémorisant automatiquement pendant quelques secondes. Un objet (SE) est connecté aux bornes de sorties de la résistance de protection R et du diviseur de tension capacitif. Le circuit de visualisation comprend une camera rapide (Cam) pour l'enregistrement des différentes séquences de développement de la décharge électrique évoluant sur la surface hydrophobe recouverte de gouttes d'eau et un PC pour le traitement d'images à l'aide d'un logiciel Vidéo studio 11.



(Tr : Transformateur ; AC : Appareil de Commande manuelle ou automatique du transformateur ; V_c : Voltmètre de crête ; CM : Cellule de mesure ; SE : Système d'Essai ; PC : Ecran Ordinateur)

Figure 4.1 : Schéma de mesure de tension de contournement et de visualisation de la décharge électrique

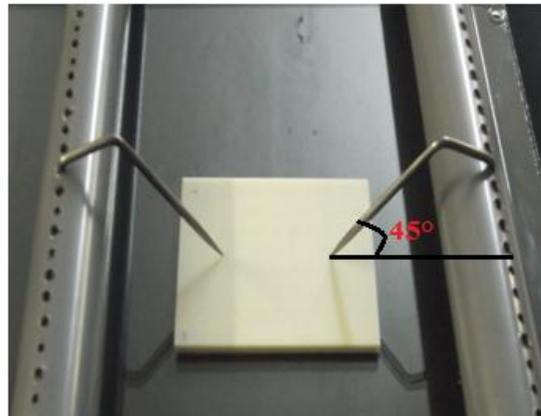
4.3. Systèmes d'électrodes

Pour les besoins de l'étude, il est nécessaire d'avoir recours à deux systèmes d'électrodes pointe-pointe et plan-plan.

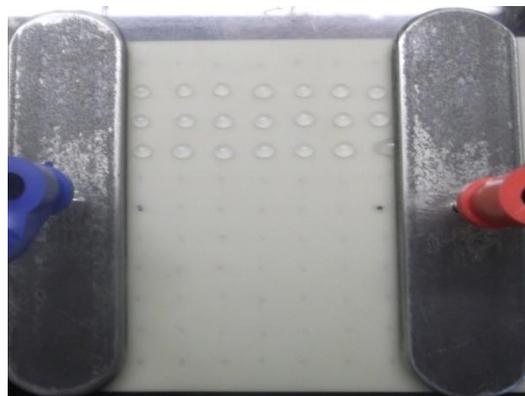
Les deux pointes sont fixées sur deux bras cylindriques en PVC de 35 cm de longueur et de 4 cm de diamètre. Les deux tuyaux sont troués sur leurs longueurs et la distance entre

deux trous successifs est égale à 1 cm. Les deux électrodes sont en métal inoxydable et leur rayon de courbure est égal à 0,5mm. Elles sont inclinées chacune d'un angle de 45° par rapport à l'horizontal afin d'éviter le claquage de l'air entre l'électrode mise à la terre et l'autre sous haute tension (figure 4.2.a).

Pour le système plan-plan, il est constitué des électrodes plan en fer de forme parallélépipédique de 2 cm d'épaisseur, 3 cm de largeur et d'une longueur égale à 10 cm leurs bords sont arrondis afin d'atténuer les renforcements de champ (figure 4.2.b).



a) Système point-point



b) Système Plan-plan

Figure 4.2 : Différentes configurations d'électrodes et échantillons en silicone

4.4. Matériau isolant

Des essais sur des systèmes réels tels que les isolateurs composites sont coûteux et délicats à mettre en œuvre. Dans notre étude nous avons utilisé un modèle d'isolateurs constitué d'échantillons solides en silicone (Si) qui nous ont été fournis par le laboratoire de haute tension de l'école supérieure de Zittau / Goertitz (Allemagne). Ils sont fabriqués sous forme de plaques de taille $100 \times 100 \times 3 \text{ mm}^3$ (Figure 4.2). La distance interélectrode est de 6 cm. Celle-ci est gardée constante tout au long de notre étude.

4.5. Solution polluante

La solution utilisée pour des gouttes d'eau comprend de l'eau distillée et une quantité de chlorure de sodium (NaCl). La conductivité électrique désirée est obtenue en ajoutant une quantité bien déterminée de sel à la solution considérée. Sa valeur est mesurée à l'aide d'un conductimètre à sonde mobile (figure 4.3). Les valeurs utilisées dans cette étude s'étalent entre 180 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 10 mS/cm . Le choix de cet intervalle de la conductivité volumique a été fait de telle sorte que le courant maximal délivré par la source AC ne puisse pas être dépassé. Cette décision a été prise à la suite de plusieurs essais préliminaires.

L'application du dépôt des gouttes d'eau sur la surface isolante est réalisée à l'aide d'une micro-pipette propre. Les volumes des gouttes d'eau utilisés dans les essais varient entre 20 et 120 μl . Les gouttes de tailles plus petites n'ont pas été utilisées compte tenu du problème d'évaporation. En effet, avec des gouttes plus petites, leur évaporation dans l'air serait plus rapide et perturberait davantage nos expériences. La solution doit être toujours agitée avant son application sur l'isolation. Le tableau 4.1 donne la correspondance entre le volume et le diamètre de mouillage des gouttes.



Figure 4.3 : Appareil de mesure de conductivité volumique (Conductimètre)

4.6. Correction des valeurs de tension de contournement

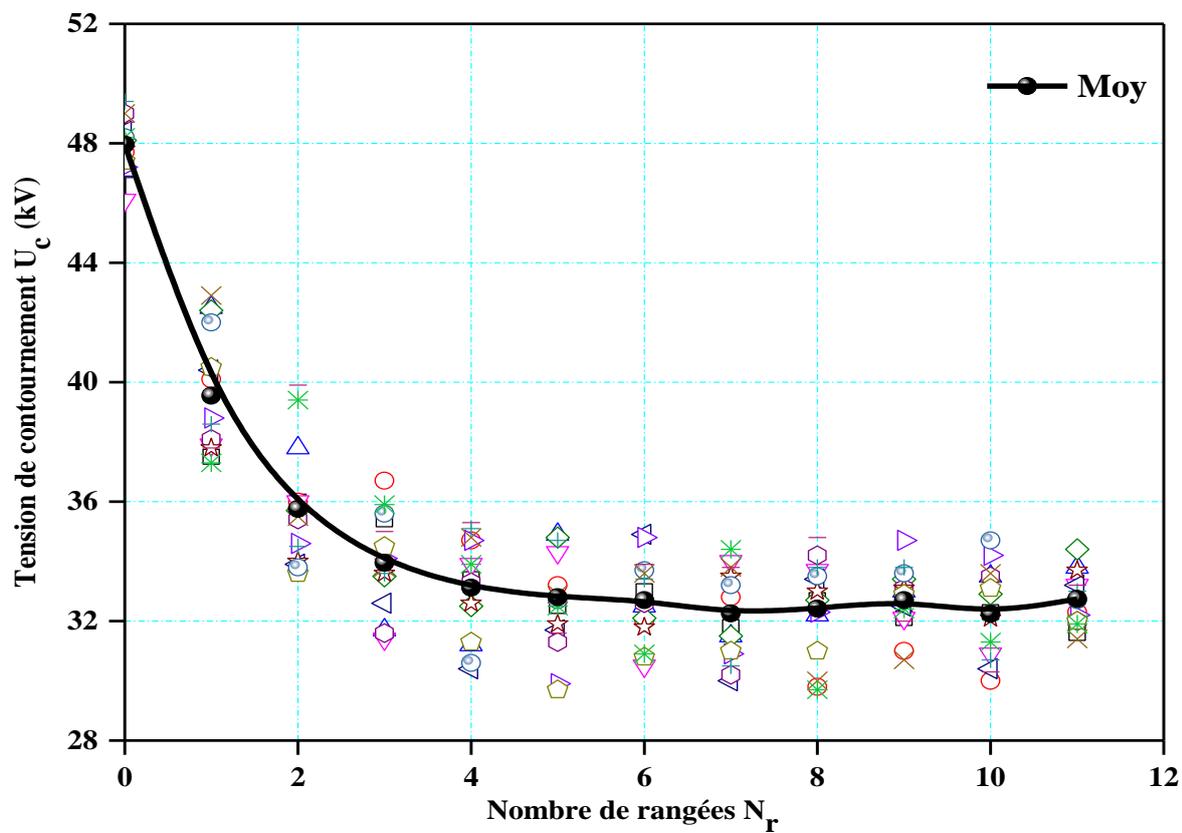
Lors de la mesure, une série de 15 essais de contournement ont été effectués. La valeur retenue de la tension de contournement est la moyenne arithmétique de l'ensemble de celles des tensions de contournement de la même série de mesure comme sui :

$$U_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i \quad (4.1)$$

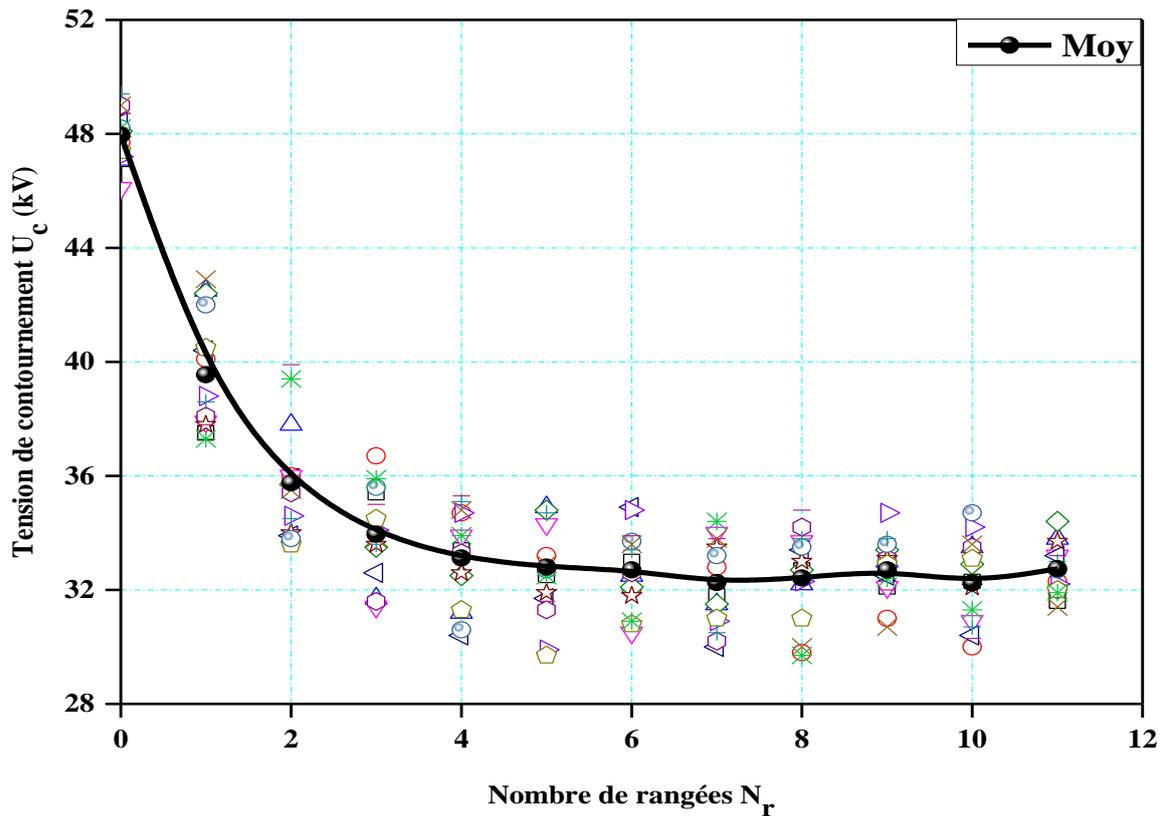
La figure 4.4 représente deux exemples de tensions obtenues pour chaque essai et leurs moyennes pour les deux systèmes pointe – pointe et plan – plan.

Tableau 4.1 : Correspondance volume/diamètre de gouttes [2.8]

Volume de la goutte (μl)	Diamètre correspondant (mm)
20	3,36
30	4,00
40	4,28
50	4,70
60	5,00
70	5,20
80	5,40
90	5,86
100	6,28



a) pointe-pointe



b) système Plan-plan.

Figure 4.4 : Tension de contournement en fonction du nombre de ranges

Avant chaque nouvel essai, l'échantillon est nettoyé et rincé avec de l'eau distillée puis séché à l'aide de papier absorbant [4.1]. A chaque fin de série d'essais, les échantillons en silicone sont nettoyés avec de l'alcool isopropanol ensuite placés sur le disque perforé du dessiccateur afin de les protéger contre l'humidité (figure 4.5). Au préalable, une quantité suffisante de dessiccatif (silicagel) souvent bleu (présence d'indicateur coloré) est déposée au fond de l'appareil. Lorsque le dessiccatif change de couleur (virant souvent au rose), il faut le régénérer par étuvage. Le temps de pause entre deux essais successifs sur une même éprouvette est de 240mn. En effet nous avons remarqué une différence entre les résultats d'un même série de 15 essais, ce qui exige, de tout ramener aux conditions normales de la température, de la pression et de l'humidité ($\theta_0 = 20^\circ\text{C}$, $P_0=100$ kPa, $H_0 = 11\text{g/m}^3$). [4.2]. l'équation est de la forme :

$$U = \frac{K_h}{K_d} U_m \quad (4.2)$$

Avec : U_m : tension de contournement mesurée à la température θ , à la pression P et à l'humidité H ;
 U : tension de contournement ramenée aux conditions normales de température θ_0 , de pression P_0 et d'humidité H_0 ;

K_d : facteur de correction relatif à la température θ et à la pression P ;

$$K_d = \frac{P}{100} \frac{(273+20)}{(273+\theta)} = \frac{2,93P}{(273+\theta)} \quad (4.3)$$

Avec : P en kPa, et θ en $^{\circ}\text{C}$

K_h : facteur de correction relatif à l'humidité

Pour déterminer le facteur de correction K_h , relatif à l'humidité, une transformation de l'humidité relative $H_r(\%)$ vers l'humidité absolue $H(\text{g}/\text{m}^3)$, est nécessaire, car K_h est donné en fonction de cette dernière. L'abaque de la figure 4.6.a, donne la transformation de l'humidité relative en humidité absolue, en fonction de la température.

Pour déduire K_h , la valeur de l'humidité absolue lue sur l'abaque de la figure 4.6.a est reportée sur l'abaque de la figure 4.6.b.



Figure 4.5 : Photo montrant un dessiccateur en verre

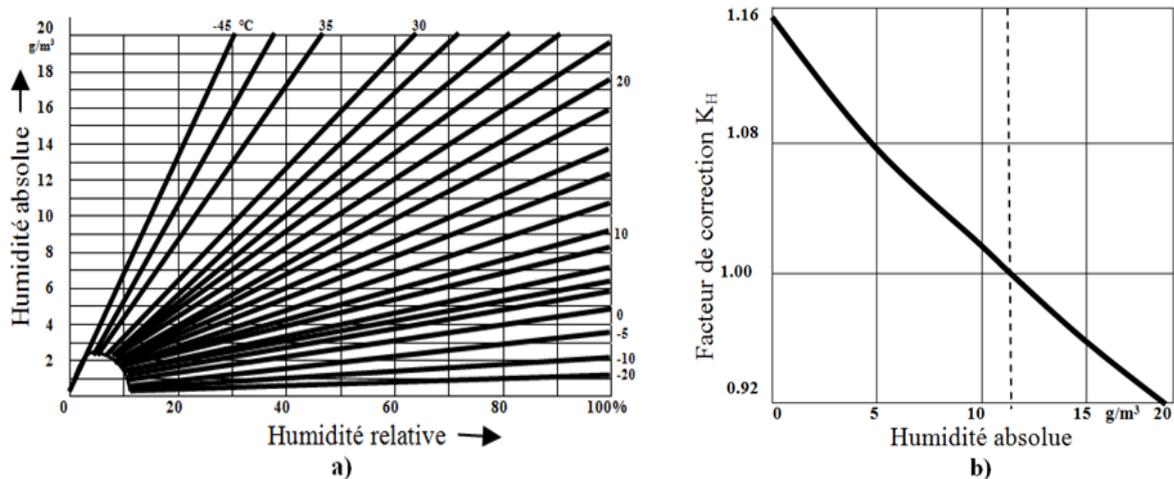


Figure 4.6 : Facteurs de correction

- **Exemple de la mesure**

Le 23/06/2012 à 8H:00, la température ambiante était égale à $\theta = 29\text{ }^{\circ}\text{C}$, la pression était $P=1007\text{ Pa}$ et une humidité de $H_r=54\%$. La surface recouverte de goutte d'eau avec conductivité constante égale à $180\mu\text{S/cm}$, la distance entre les électrodes est égale à $d=6\text{ cm}$ et la distance entre deux gouttes égale à 2 cm . Les résultats des 15 mesures effectués sont résumés dans le tableau 4.2. La moyenne de la tension de contournement est :

$$U_m = \frac{1}{15} \sum_{i=1}^{15} U_i$$

$$= \frac{37,5 + 44,1 + 45,5 + 37,9 + 46,4 + 38,8 + 36,4 + 36,1 + 36,1 + 40,5 + 42 + 34,6 + 42,9 + 37,3 + 37,8}{15} = 39,55$$

En utilisant les formules de correction suscitées et les abaques dans la figure 4.5, on

$$K_d = \frac{P}{100} \left(\frac{273+20}{273+\theta} \right) = \frac{2,93 \cdot 1007}{(273+29)} = 0,97 \text{ Et } K_h = 0,95$$

$$U_c = \frac{K_h}{kd} U_m = \frac{0,95}{0,97} 39,55 = 38,73\text{ kV}$$

Tableau 4.2 : Tableau de mesure de la tension de contournement

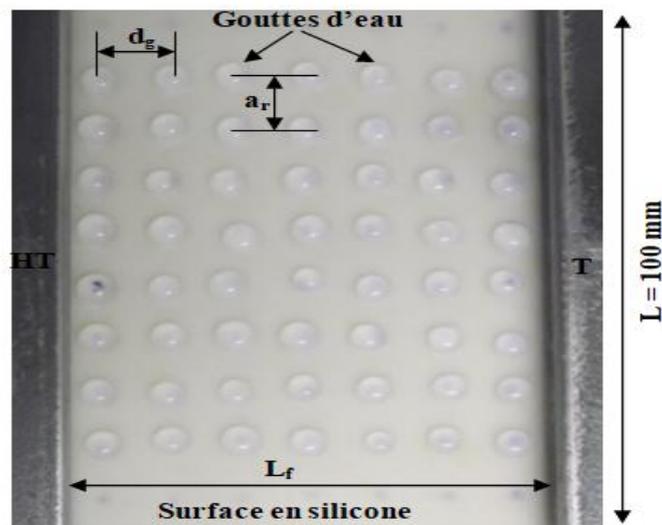
N°	Sans gouttes	1Rangée	2Rangée	3Rangée	4Rangée	5Rangée	6Rangée	7Rangée
01	47,1	37,5	31,8	38,4	42	35,4	38	29,5
02	47,7	44,1	36,0	37,7	34,7	33,2	27,9	29,9
03	47,1	45,5	37,8	31,7	31,2	34,9	32,5	31,5
04	46,1	37,9	41,3	31,4	40,1	34,3	27,5	44,8
05	48,1	46,4	35,7	29,5	27,8	34,8	35,1	31,5
06	48,4	36,4	43,1	28,6	33,9	31,7	29,9	31
07	47,2	38,8	34,6	34,2	32,5	29,9	34,8	30,9
08	49	36,1	35,4	30,6	28,2	35,3	35,6	30,2
09	47,8	36,1	30,6	29,6	30,4	39,5	31,8	33,5
10	47,4	40,5	31,1	34,5	33,3	29,7	30,8	31,0
11	48,2	42,0	32,7	35,6	27,6	35,8	37,4	27,6
12	49,4	34,6	31	33,6	31,3	34,7	46,4	30,5
13	49	42,9	35,5	40,0	35,1	32,9	29,3	34,4
14	48,2	37,3	39,9	38,9	34,8	35,5	30,9	33,8
15	48,7	37,8	39,9	35	33,9	31,6	33,9	33,8
Moyenne	47,96	39,55	35,76	33,95	33	33,92	33,45	32,26
Corrige	47,00	38,75	35,04	33,27	32,34	32,24	32,78	31,61

4.7. Arrangement des gouttes d'eau

Les gouttes d'eau de volume variable sont déposées à l'aide d'une seringue sur la surface en silicone selon des arrangements en lignes droites caractérisées par le couple de grandeurs variables (a_r , d_g) correspondant à la largeur entre deux rangées successives de

gouttes d'eau a_r et la distance entre deux gouttes d'eau déposées sur la ligne de fuite entre les deux électrodes pointues ou planes d_g (figure 4.7).

La solution des gouttes d'eau est composée d'un mélange d'eau distillée ou de robinet et de chlorure de sodium NaCl dont la proportion est déterminée selon la conductivité désirée. Sa valeur est mesurée à l'aide d'un conductimètre à son de mobile. Les valeurs utilisées dans cette étude s'étalent entre $180\mu\text{S}/\text{cm}$ et $10\text{mS}/\text{cm}$ (0,18 ; 0,5 ; 1 ; 3 ; 7 et $10\text{mS}/\text{cm}$). Le choix de cet intervalle de la conductivité volumique a été fait de telle sorte que le courant délivré par la source AC ne puisse pas être dépassé. Ce choix a été pris à la suite de plusieurs essais préliminaires.



a_r : distance entre deux rangées successives, d_g : distance entre deux gouttes d'eau, L_f : ligne de fuite,

Figure 4.7 : Arrangement des gouttes d'eau sur une surface en silicone hydrophobe

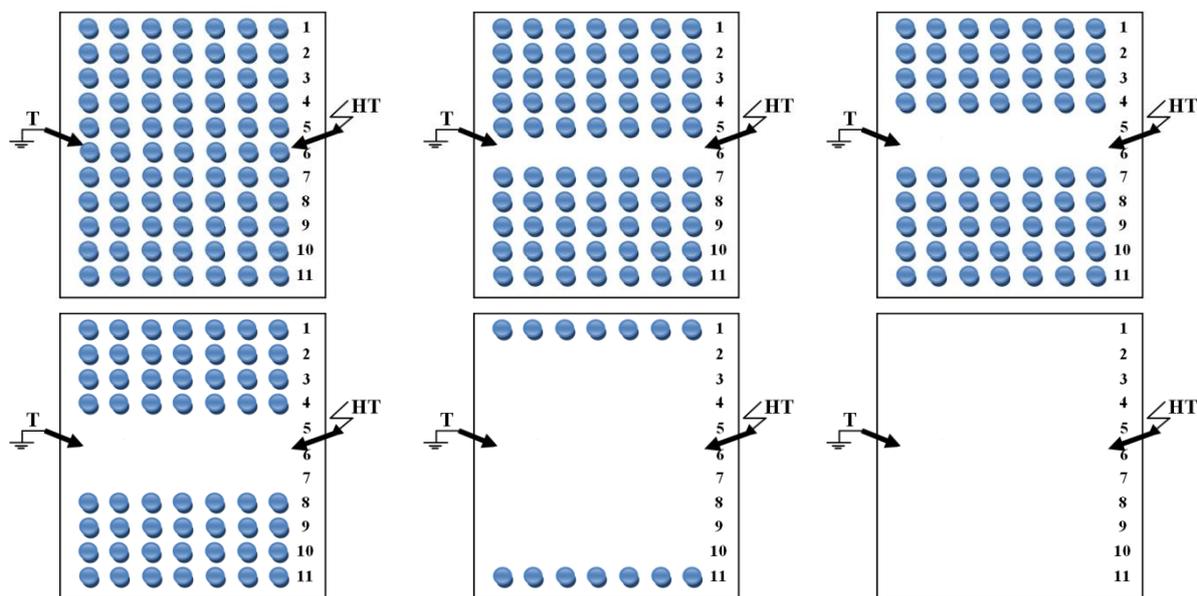
Pour nous assurer de la reproductibilité des résultats, la plaque en silicone est changée afin de limiter l'influence de l'érosion de la surface hydrophobe sur les résultats. L'application de la tension est faite après réglage et ajustement de la distance interélectrode.

4.8. Zone sèche

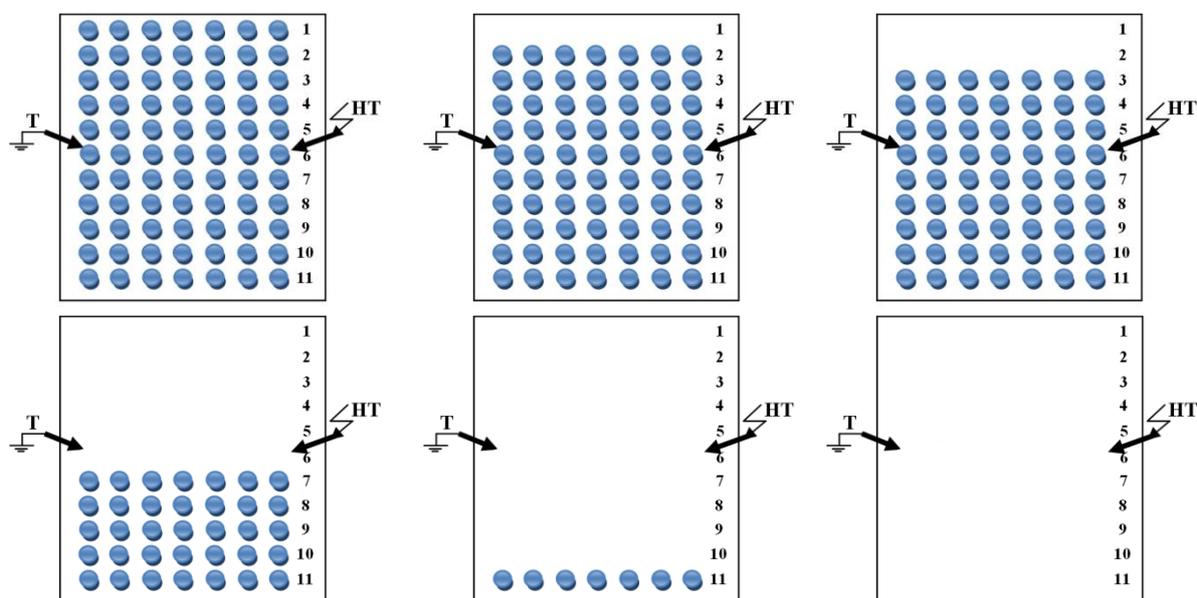
Pour étudier l'effet de la taille de bande sèche, il faut créer cette zone par la méthode suivante : Deux scénarios ont été étudiés et illustrés par la figure 4.8.

- Premier scénario : après avoir recouvert la totalité de la surface de l'échantillon par des gouttes d'eau, la création la zone sèche au milieu est réalisée en commençant par éliminer d'abord la rangée N°6 (figure 4.8.a). une série de 15 essais sera la rangée N°7 suivie d'une série de 15 essais ensuite nous enlevons la rangée N°5. Cette pratique se poursuit jusqu'à ce qu'aucune rangée ne reste sur la surface de l'échantillon.

b. Deuxième scénario : toujours après avoir recouvert la totalité de la surface de l'échantillon par des gouttes d'eau, la création la zone sèche du côté droit ou gauche d'électrodes est réalisée par suppression d'une rangée suivie d'une série de 15 essais. Cette pratique se poursuit jusqu'à élimination de toutes les rangées (figure 4.8.b).

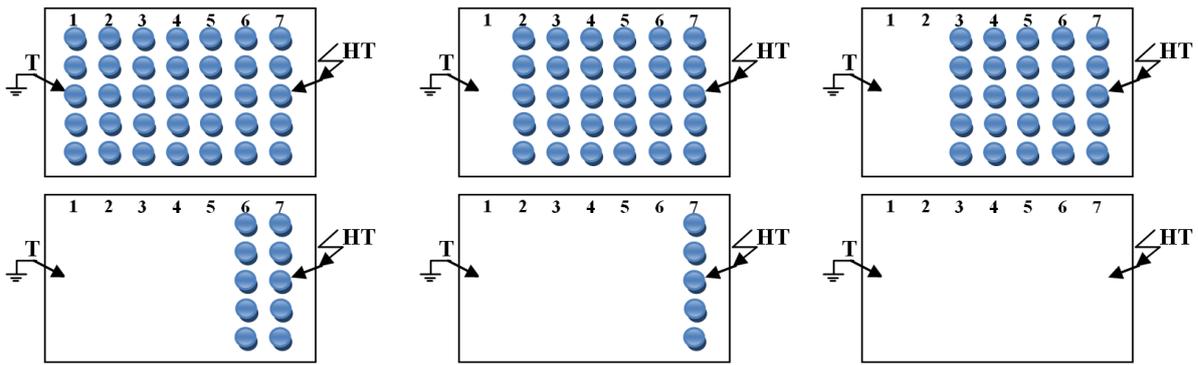


a) Scénario 1

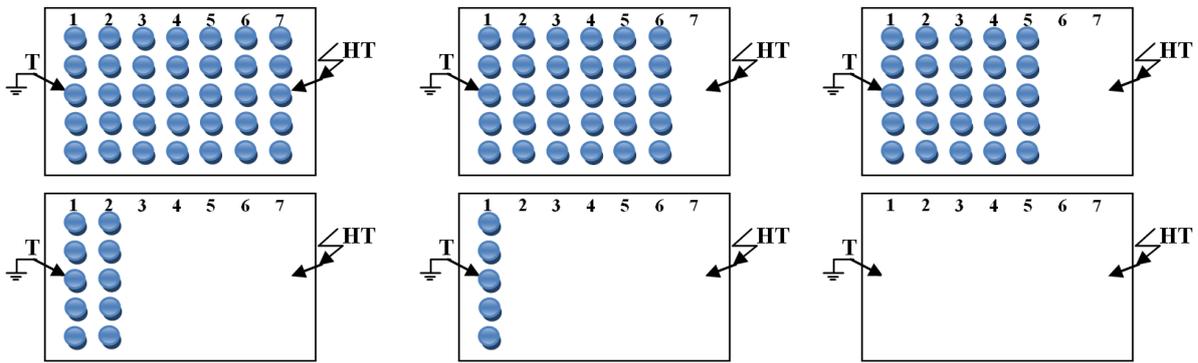


b) Scenario 2

Figure 4.8 : Scenario [4.2]

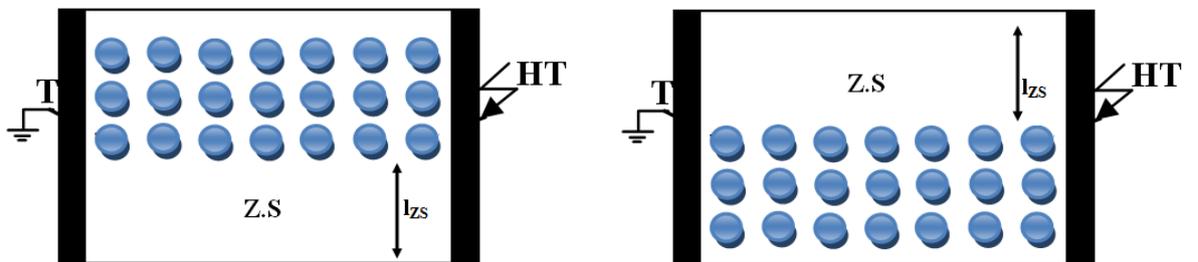


a) Zone sèche côté terre



b) Zone sèche côté HT

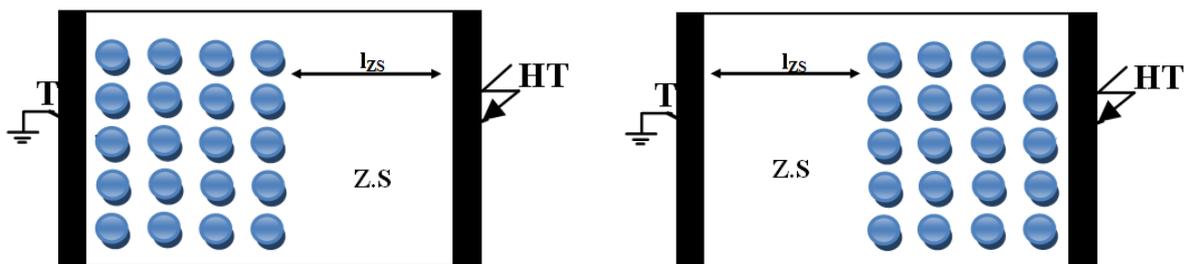
Figure 4.9 : Position de la zone sèche au voisinage des électrodes HT et terre
Pointe-pointe



a) Zone sèche au voisinage des bords gauches des électrodes HT et terre

b) Zone sèche au voisinage des bords droits des électrodes HT et terre

Figure 4.10 : Position de la zone sèche au voisinage des bords gauches et droits des électrodes HT et terre



a) Zone sèche côté HT

b) Zone sèche côté terre

Figure 4.11 : Position de la zone sèche au voisinage des électrodes HT et terre

4.9. Angle d'inclinaison de l'isolation

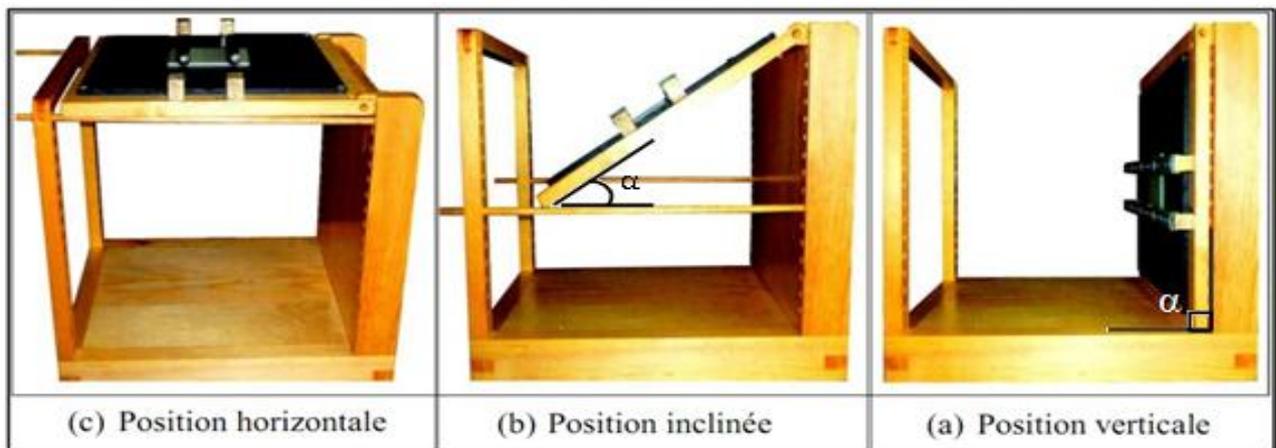


Figure 4.12 : Différentes positions de l'isolation en silicone

La variation de l'angle d'inclinaison de la surface isolante par rapport à l'horizontale α est obtenue au moyen d'un dispositif illustré par la figure 4.12. Un support confectionné en bois, de 500 mm x 500 mm x 400 mm de dimensions, est peint de plusieurs couches de vernis afin de l'empêcher d'absorber les gouttes d'eau atterrissant sur celui-ci à la fin de chaque essai. Sa paroi supérieure est reliée à une rotule lui permettant de passer de la position horizontale ($\alpha = 0^\circ$) à la position verticale ($\alpha = 90^\circ$). La fixation d'un angle d'inclinaison quelconque peut être obtenue au moyen de deux tiges passant par des trous appropriés, réalisés spécialement sur ses deux faces verticales opposées afin de bloquer la paroi à une position correspondant à l'angle suscitité (figure 4.12.b). La figure 4.12.c nous donne par exemple la position correspondant à l'angle α égal à 90° .

Le dépôt des gouttes d'eau sur l'échantillon est effectué tout d'abord en position horizontale de l'isolation. Ensuite, la paroi sur laquelle repose le matériau avec un arrangement de gouttes d'eau bien défini, est tournée manuellement et lentement afin d'être fixée à l'angle d'inclinaison déterminé au préalable. La tension est appliquée à l'isolation à ce moment - là.

Selon la taille choisie des gouttes d'eau, deux cas de figures distincts peuvent se présenter:

- 1) Le poids des gouttes d'eau est insuffisant pour entraîner leur chute, mais celles-ci subissent un allongement sous l'effet de la force de gravitation uniquement;
- 2) Le volume des gouttes d'eau est consistant pour déclencher leur mouvement sous l'action de leur propre poids uniquement. Les diverses collisions résultant entre les gouttes d'eau primaires ou entre gouttes initiales et résidus électrolytiques subséquents donnent naissance à une constellation des nouvelles gouttes à volume et nombre totalement différent

par rapport au premier arrangement des gouttes d'eau effectué avant la rotation de la paroi supportant l'isolation. Ce phénomène est quasiment similaire à celui rencontré sur des isolateurs en silicone à ailettes inclinées des lignes et postes électriques sous l'effet du phénomène de condensation ou de pluie au moment de leur mise sous tension.

4.10. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les éléments constitutifs du dispositif expérimental permettant de faire une caractérisation à la fois mécanique et électrique de la goutte d'eau ainsi que les techniques d'essais de performance des isolations recouvertes de gouttes d'eau pour l'étude de l'effet de la conductivité, la nombre de goutte d'eau et d'angle d'inclinaison de l'isolation sur sa performance électrique. La procédure expérimentale relative à l'étude sur le contournement de l'isolation a été également présentée.

Chapitre 05

PERFORMANCE D'UNE SURFACE EN SILICONE HYDROPHOBE HORIZONTALE RECOUVERTE DE GOUTTES D'EAU

5.1. Introduction

Une compréhension du phénomène de contournement et du comportement des isolateurs composites sous tension alternative dans différentes conditions climatiques présente un intérêt pratique pour les entreprises qui cherchent à mettre en œuvre des isolateurs pour des applications à haute tension.

La contrainte électrique de ces isolations en présence de gouttes d'eau provoque des décharges partielles entraînant une réduction locale de l'hydrophobie de leur surface isolante et l'altération de celle-ci à long terme [1.18, 1.21, 3.21, 3.22, 5.1].

Le but dans cette partie allons étudié expérimentalement l'effet de différents types d'arrangements, le volume, le nombre, la conductivité des gouttes et leurs positions horizontal par rapport aux électrodes sur la tension de contournement d'une surface en silicone hydrophobe à champ non uniforme mise sous tension alternative.

5.2. Résultats et analyse

Dans cette partie expérimentale concernant l'étude du comportement du modèle plan de l'isolateur, nous nous proposons dans un premier temps de mesurer la tension de contournement pour une distance de fuite $d=6$ cm, dans le cas de la pollution uniforme avec les différentes conductivités et dans le cas de la pollution non-uniforme pour les configurations utilisé suivantes :

- Système de configuration Pointe-pointe
- Système de configuration Plan-plan

5.2.1. Système de configuration pointe-pointe en position horizontale

Dans cette partie, l'effet des paramètres sur la performance de la surface en silicone recouverte de ces gouttes d'eau tels que le nombre de rangées de gouttes d'eau (N_r),

les distances séparant deux gouttes successives (d_g) et la distance entre deux rangée de gouttes d'eau (a_r), ainsi que la position et la largeur d'une zone sèche par rapport à l'axe d'électrodes a été quantifiée. La rangée du milieu est confondue avec l'axe des électrodes et ses gouttes extrêmes sont mises en contact avec les pointes de celles-ci. La distance minimale entre deux gouttes successives sur la ligne de fuite est de 1 cm. Celle-ci a été choisie du fait que pour un volume de 40 μl les gouttes puissent à la limite se rejoindre en position horizontale lors de leur dilatation sous l'action du champ électrique de telle sorte à donner naissance à un filet d'eau pouvant relier les deux électrodes. La conductivité électrique de la solution d'eau utilisée est gardée constante. Elle est égale à 180 $\mu\text{S}/\text{cm}$ dans cette étude.

5.2.1.1. *Nombre de rangées de gouttes d'eau*

Dans cette première série d'investigation, des expériences ont été effectuées en absence de gouttes d'eau entre les électrodes. Ceci a été fait afin d'avoir des valeurs de référence de la tension de contournement. Afin de comprendre l'influence du nombre de gouttes de rangées entre les électrodes, celle-ci a été variée de 1 à 11. La conductivité du volume est maintenue constante à environ 180 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les résultats obtenus sont représentés en figure 5.1.a. les observations avec le système de caméra vidéo ont montré que le processus du phénomène de contournement, du début à la fin de contournement, est décrit essentiellement comme suit :

- a) Tout d'abord, la constellation des gouttes d'eau sur la surface en silicone mise hors tension est indiqué sur la figure 5.1.a. La rangée du milieu est confondue avec l'axe des électrodes et ses gouttes extrêmes sont mises en contact avec les pointes de celles-ci figure 5.1.a.
- b) Dans la deuxième phase, lorsqu'est appliqué un champ électrique, il a été observé que la forme des gouttes d'eau changent le long d'axe de l'électrode en diminuant la ligne de fuite sèche figure 5.1.b et le bord tranchant des gouttes d'eau à la ligne triple conjointement avec l'électrode opposée forme une configuration de champ non homogène qui est la cause fondamentale de la création du streamer sur la surface de l'échantillon.
- c) Ensuite, pour la raison où la force du champ électrique près de l'électrode HV est suffisamment forte, une décharge électrique est établie le long de l'axe de l'électrode comme indiqué sur la figure 5.1.c,
- d) Enfin, l'échantillon testé après contournement complet est représenté sur la figure 5.7.d.

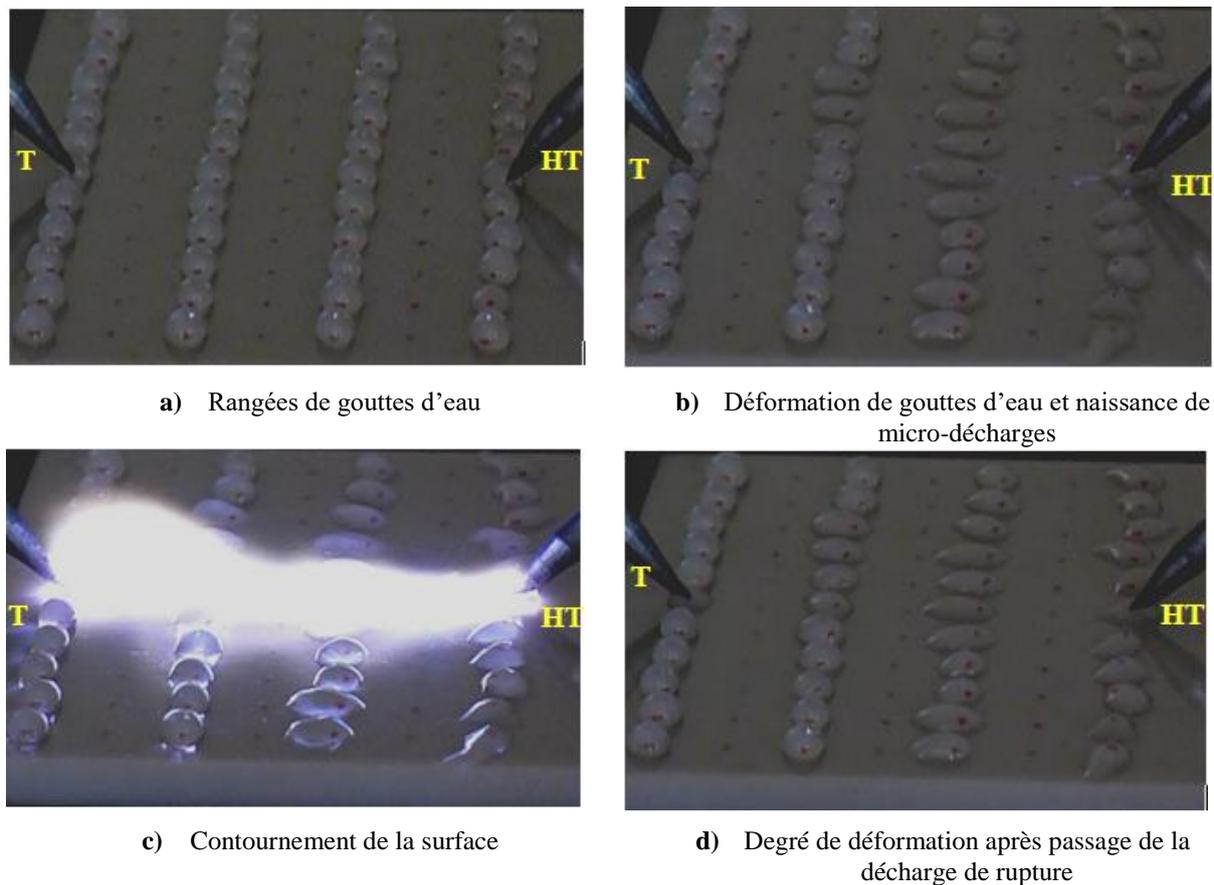


Figure 5.1 : Phases de développement d'une décharge électrique sur une surface en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau selon un arrangement à caractéristiques : $d_g = 2\text{cm}$, $a_r = 1\text{cm}$, $n_r = 11$ rangées

Il en résulte que la présence de gouttes d'eau recouvrant une surface isolante hydrophobe engendre la réduction de la performance de celle-ci [3.70, 5.2-5.3]. Les résultats d'essais pour les différentes rangées sont illustrés par la figure 5.2.

Pour une distance quelconque entre deux rangées successives, nous remarquons une décroissance rapide de la tension de contournement de manière non-linéaire avec l'augmentation des nombres de rangées de goutte d'eau. Ceci peut être expliqué par la diminution de la ligne de fuite sèche par le volume d'occupation des gouttes d'eau avant leur déformation et celui résultant de leur étirement le long du chemin emprunté par la décharge électrique de rupture.

Compte tenu de ces résultats, il a été remarqué que la valeur de la tension de contournement devient constante à partir du nombre de rangée égal à 5 malgré l'augmentation des nombres des rangées, la variation maximale de la performance électrique est estimée à 35%. La valeur de cette limite est fonction de la distance entre deux rangées successives. En outre, lorsque la distance a_r est diminuée le long de la distance de fuite de l'échantillon, une diminution significative de sa performance est également observée.

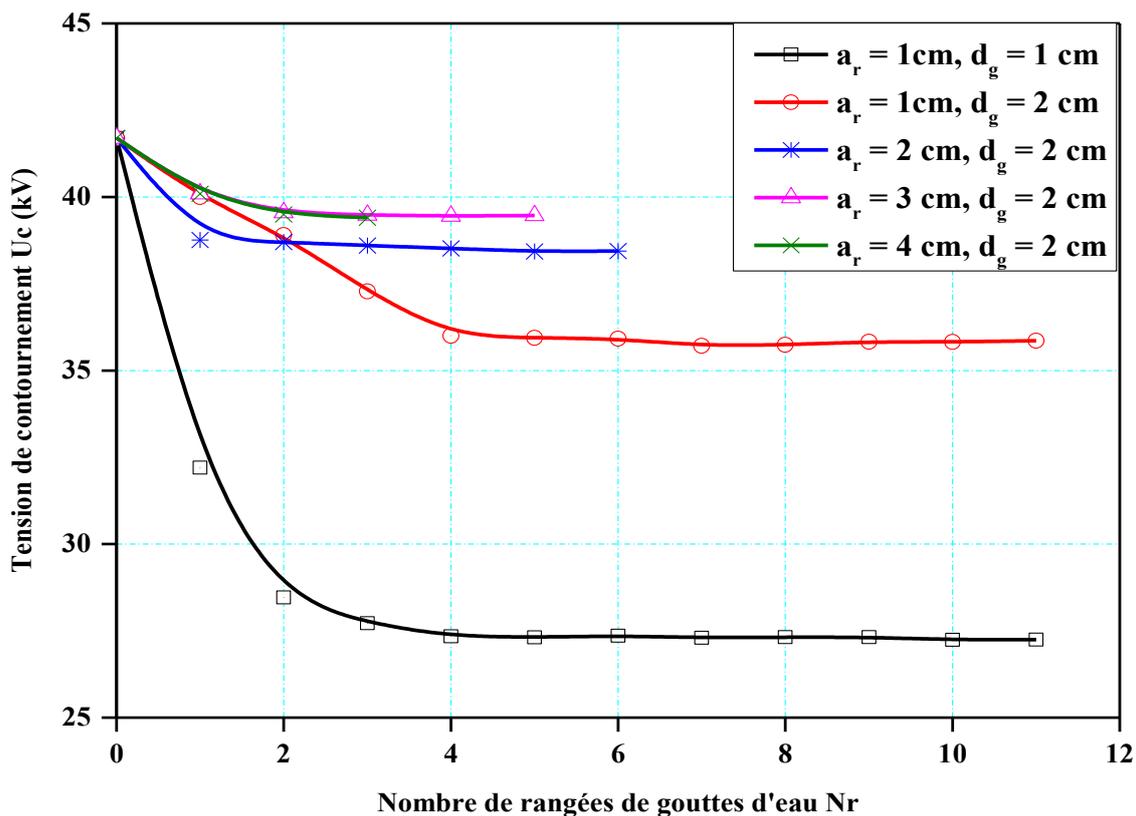


Figure 5.2 : Tension de contournement d'une isolation hydrophobe en fonction du nombre de rangées de gouttes et la distance entre elles

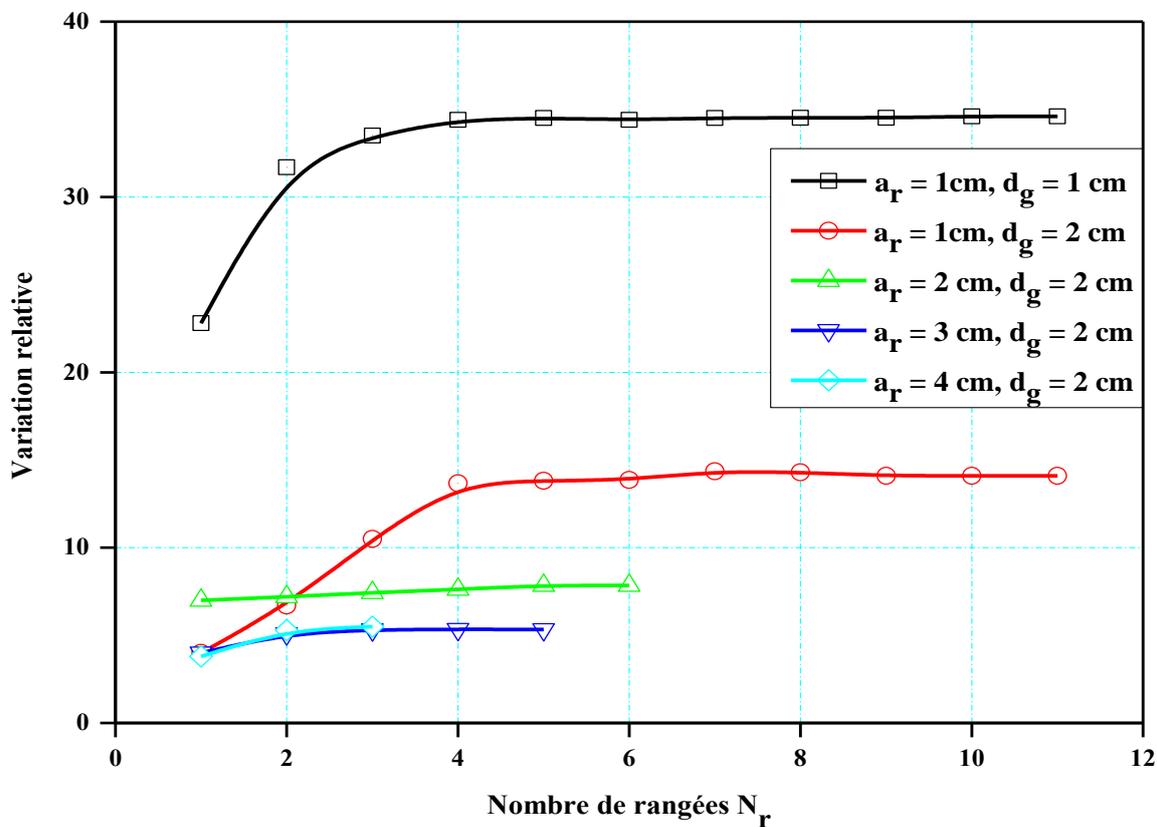


Figure 5.3 : Réduction relative de la tension de contournement en fonction du nombre de lignes

La figure 5.3 illustre la réduction relative de la tension de contournement en fonction du nombre de rangées de gouttes d'eau. Nous pouvons voir que la réduction relative augmente rapidement à une valeur limite (5 rangées) du nombre de rangées qui deviennent valeur relativement constante, ce qui correspond aux résultats obtenus précédemment.

La réduction relative entre la tension de contournement et les rangées de gouttes d'eau peut être obtenue comme suit :

$$\Delta U = 100\% \times \frac{(U_0 - U_i)}{U_i} \quad (5.1)$$

Où

U_0, U_i : sont la tension de contournement correspondant au cas sans et avec des rangées de gouttes d'eau respectivement, i varie de 1 à 11.

Quantitativement, le tableau 5.1 résume les résultats obtenus pour la variation relative maximale de U_C lorsque i est égal à 0 et à 5 respectivement. La tension maximale de contournement de l'isolation avec cinq rangées est environ 35% inférieure à celle obtenue dans le cas d'une atmosphère propre et sèche. Il convient de noter que pour la dernière valeur dans le tableau, seulement 3 lignes ont été utilisées en raison des dimensions de nos échantillons.

Tableau 5.1 : Réduction relative de la tension de contournement avec le nombre de rangées

	Nombre de rangées	U_c (kV)	ΔU (%)
ar = 1cm, dg = 1cm	0	41,7	35%
	5	27,31	
ar = 1cm, dg = 2cm	0	41,7	14%
	5	35,94	
ar = 2cm, dg = 2cm	0	41,7	8%
	5	38,43	
ar = 3cm, dg = 2cm	0	41,7	5,35%
	5	39,47	
ar = 4cm, dg = 2cm	0	41,7	5,5%
	3	39,4	

5.2.1.2. *Distance entre deux rangées successives*

La courbe de la figure 5.4 donne l'allure de la tension de contournement en fonction de la distance séparant deux rangées successives de gouttes d'eau. L'arrangement des gouttes d'eau sur la surface en silicone est conçu de telle sorte qu'il n'y ait pas de rangée sur l'axe des électrodes. Il en résulte que quel que soit le nombre de rangées apportées sur la surface en silicone, la performance du système augmente avec la distance entre deux rangées successives

jusqu'à une valeur limite à partir de laquelle aucune amélioration n'est décelée. Ceci est dû probablement à la largeur effective de la décharge électrique, qui lorsqu'elle est inférieure à celle séparant deux rangées successives de gouttes, se trouve non influencée par ces perles d'eau supplémentaires.

5.2.1.3. *Position et largeur d'une zone sèche parallèle à l'axe des électrodes*

Dans cette section, on étudie l'effet de la distance de la bande sèche l_{db} parallèle à l'axe de l'électrode sur la tension de contournement de l'isolation. Cette investigation a été réalisée en éliminant les rangées de gouttes d'eau provenant de zones sélectionnées de la surface isolante. Les gouttes d'eau sont caractérisées par une conductivité électrique égale à $180\mu\text{S} / \text{cm}$ ayant $a_r = 1\text{cm}$ et $d_g = 2\text{cm}$. Le nombre total initial de lignes est égal à 11.

Les résultats obtenus sont présentés en figure 5.5, celle-ci donne l'évolution de la performance d'une isolation hydrophobe en fonction de la position et la largeur d'une bande sèche l_{db} créée sur sa surface. Dans le cas du scenario 1 (figure 4.8) l'allure de la caractéristique de la tension augmente rapidement entre l'intervalle $\{0, 2\}$, elle diminue largement dans l'intervalle $\{2, 3\}$ et reste pratiquement constante dans l'intervalle $\{3, 10\}$. Dans le cas du scenario 2 (figure 4.8) la tension de contournement reste constante jusqu'à la distance 5 cm après cette valeur elle augmente rapidement jusqu'à 6 cm, seuil au delà duquel l'allure de la tension de contournement est plus ou moins stable malgré l'augmentation de la longueur de la bande sèche.

Il en résulte que l'apport d'une zone sèche sur l'axe des électrodes, par suppression de la seule rangée du milieu (figure 5.6), engendre une élévation de la tenue du système à sa valeur maximale. A partir de cette limite l'enlèvement de toute autre rangée ne produit aucune amélioration de celle-ci, car la décharge de contournement de l'isolation s'effectue sur la zone sèche de celle-ci.

Par contre dans le cas du scenario 2, tant que la rangée du milieu est présente, la tension de contournement de l'isolation est à sa valeur minimale. Dès son enlèvement celle-ci devient maximale malgré la suppression ou d'autres rangées parallèles.

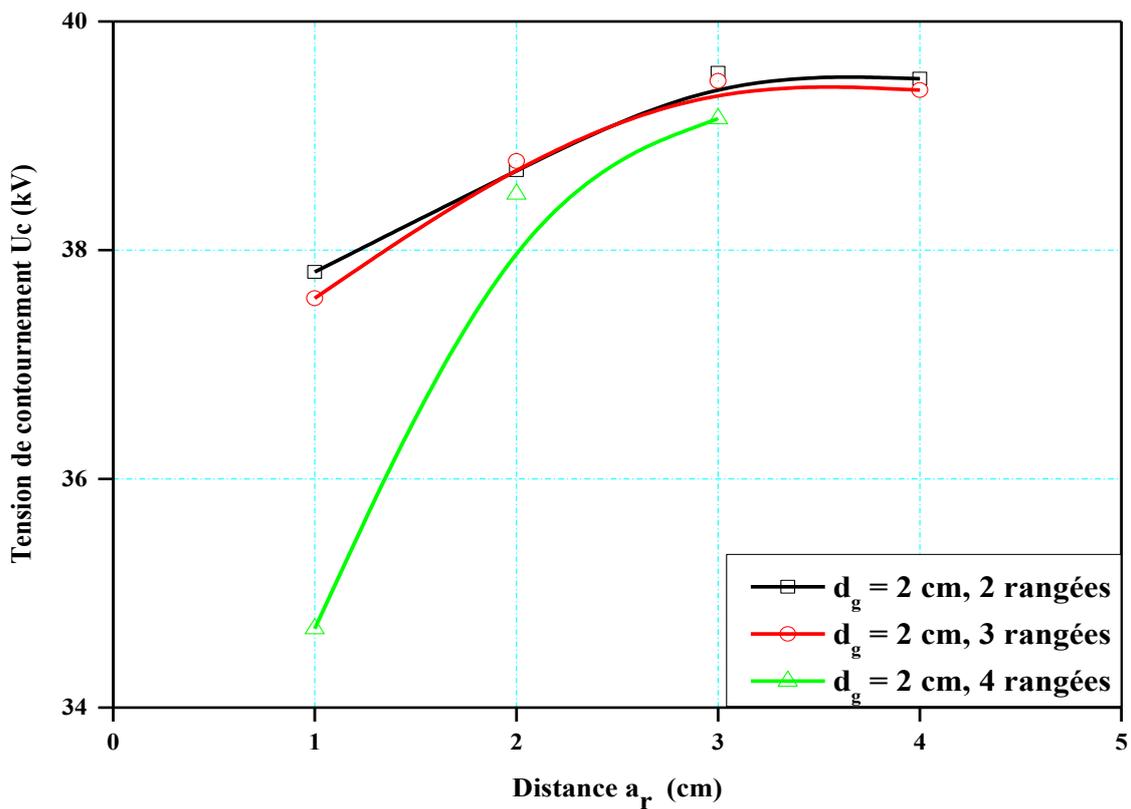


Figure 5.4 : Tension de contournement en fonction de la distance entre les rangées de gouttes d'eau recouvrant une surface en silicone hydrophobe

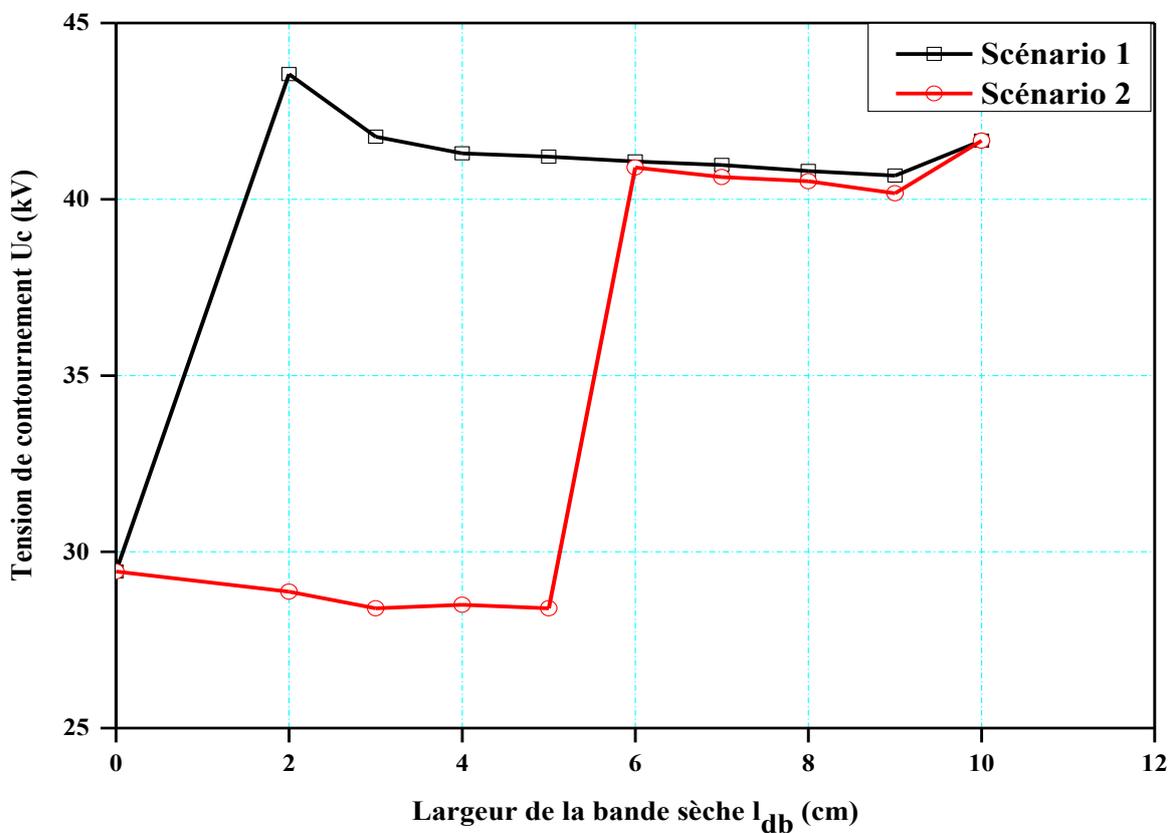


Figure 5.5 : Tension de contournement en fonction de la largeur et la position d'une bande sèche parallèle à la droite joignant les électrodes

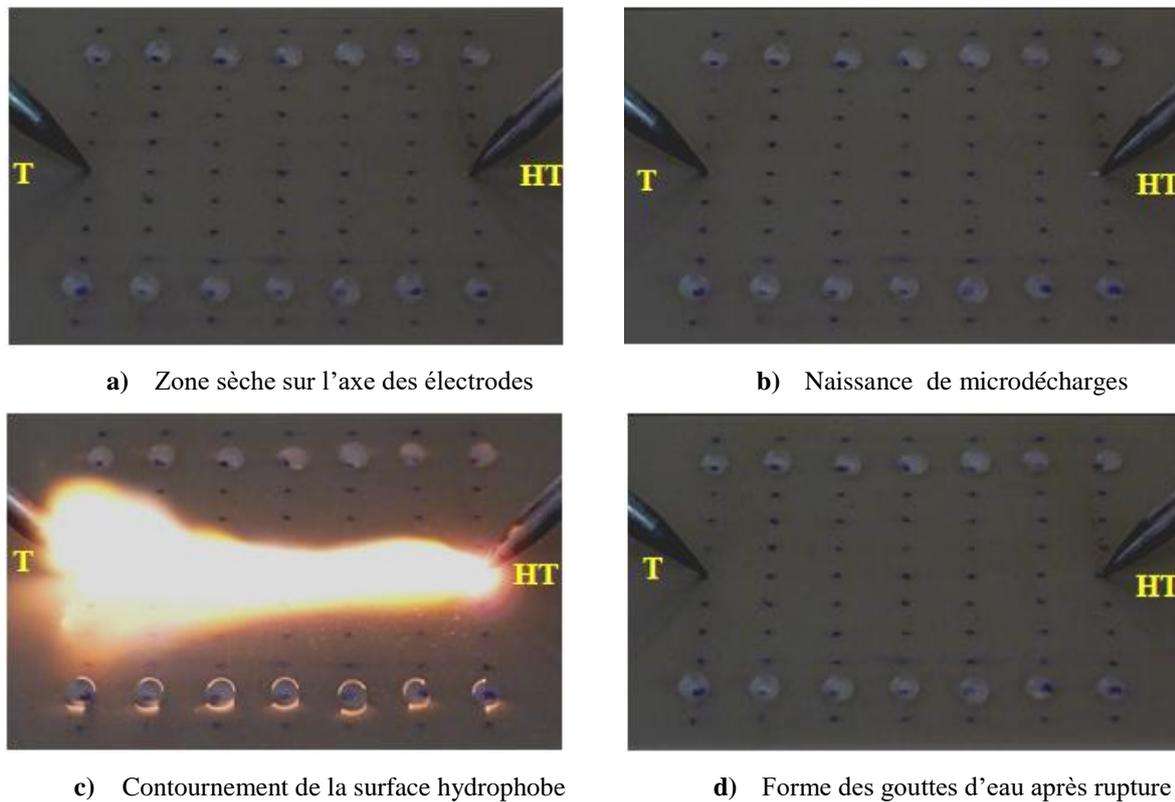


Figure 5.6 : Phases de décharge de rupture dans le cas d'une zone sèche parallèle à la droite joignant des deux électrodes

5.2.1.4. *Position et largeur d'une zone sèche perpendiculaire à l'axe des électrodes*

La figure 5.7 donne l'allure de la performance d'une isolation hydrophobe en fonction du nombre de rangées de gouttes d'eau posées sur sa surface perpendiculairement à l'axe des électrodes situées du côté HT ou terre (figure 4.9).

Il résulte de la figure 5.8 que lors de la création d'une zone sèche variable au voisinage de l'électrode à la terre, la performance du système augmente en fonction de la taille de cette zone sèche et passe par un maximum lorsque une seule rangée de gouttes d'eau est mise en contact avec la pointe sous tension. Cet optimum peut être expliqué par le fait qu'après déformation des gouttes d'eau (figure 5.8.a, 5.8.b, 5.8.d), la décharge de disruption de l'air au-dessus des gouttes d'eau prend naissance plus loin de l'extrémité de l'électrode haute tension en empruntant un chemin marqué par une crête au milieu de son parcours (figure 5.8.c). Cette crête est le lieu de rencontre de deux décharges positive et négative issus respectivement des pointes sous tension à la terre.

Le trajet suscite être plus long que celui séparant les deux pointes sans gouttes d'eau. Le système dans ce cas de figure est plus rigide que lorsque la zone sèche est du côté haute tension.

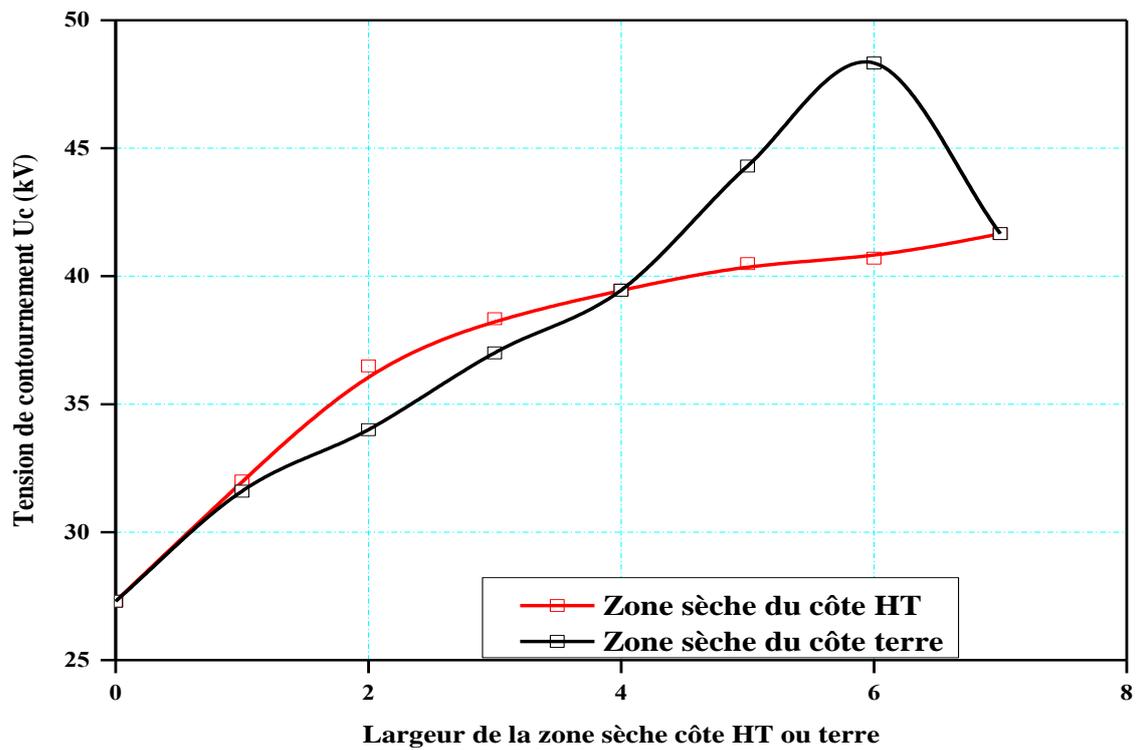


Figure 5.7 : Tension de contournement en fonction du nombre de rangées perpendiculaires la droite joignant des deux électrodes

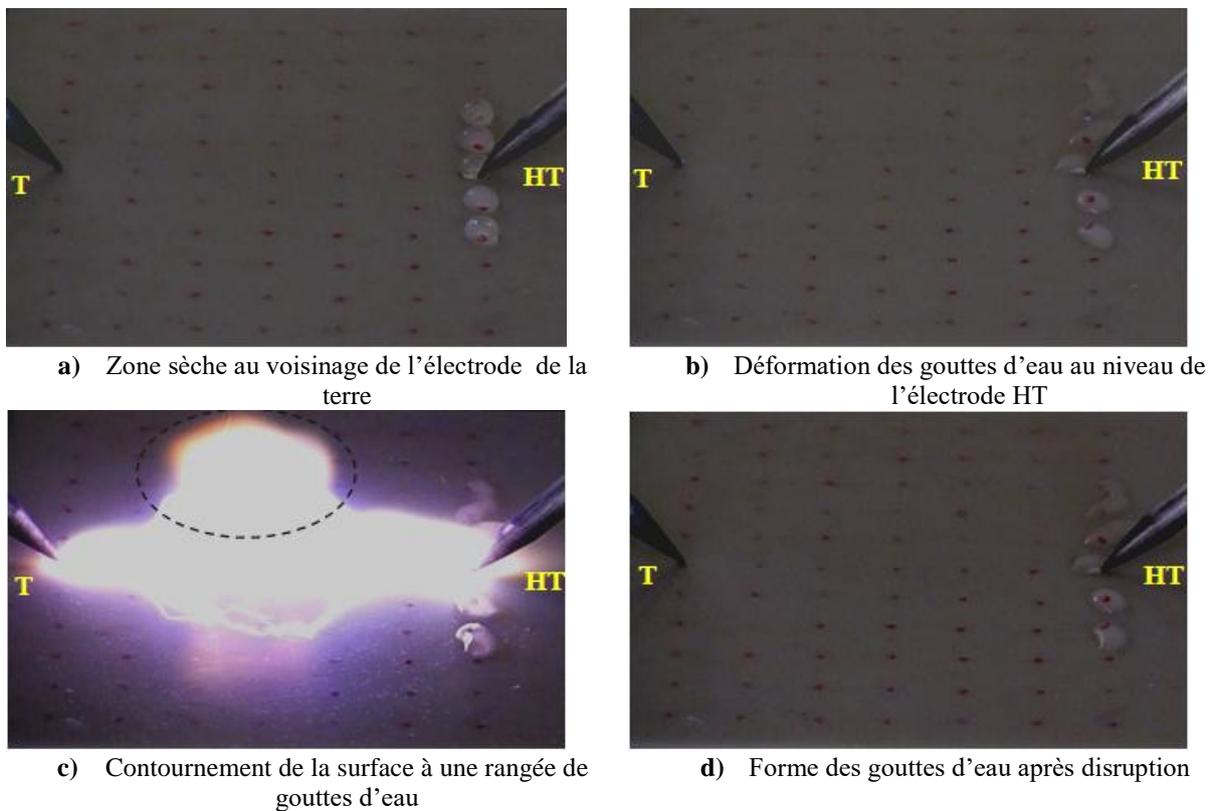


Figure 5.8 : Phases de contournement d'une surface hydrophobe à une seule rangée de gouttes d'eau en contact avec la pointe sous tension

5.2.1.5. Conductivité et nombre de rangées de gouttes d'eau

La figure 5.9 représente l'allure de la tension de contournement en fonction de la conductivité ; il en résulte que la tension de contournement diminue rapidement jusqu'à une valeur de la conductivité électrique égale à 1 mS/cm, seuil au delà duquel l'allure de la tension de contournement est plus ou moins stable malgré l'augmentation de celle-ci.

Cette valeur limite de la conductivité électrique nous renseigne sur le changement du phénomène de contournement de l'isolation qui s'établit entre les électrodes les gouttes adjacentes situées sur la ligne de fuite comme si ces gouttes.

5.2.2. Système de configuration Plan-plan en position horizontale

La tension de contournement est étudiée en fonction de plusieurs paramètres tels que le volume, le nombre et la conductivité des gouttes, la position et la largeur d'une zone sèche par rapport aux électrodes.

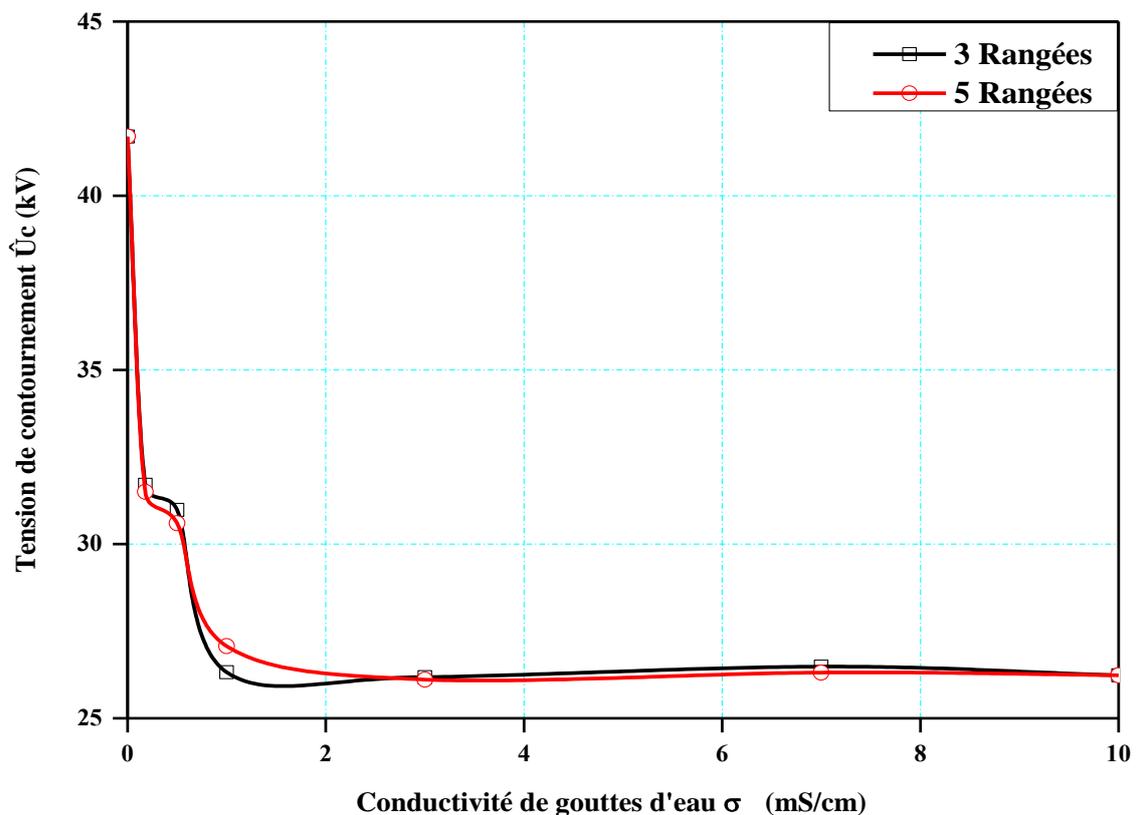


Figure 5.9 : Tension de contournement en fonction de la conductivité superficielle

5.2.2.1. *Nombre de rangées de gouttes d'eau*

Dans cette partie, une analyse des paramètres suscités sur la performance de la surface en silicone recouverte de ces gouttes d'eau à conductivité électrique égale à $180\mu\text{S}/\text{cm}$, a été effectuée. La constellation des gouttes d'eau sur la surface en silicone mise hors tension est indiqué sur la figure 5.10.a. Les résultats obtenus sont illustrés par la figure 5.11. Il en résulte que la présence de gouttes d'eau recouvrant une surface isolante hydrophobe mise sous tension alternative engendre la réduction de la performance de celle-ci [3.70, 5.2-5.3]. Ceci peut être expliqué par la diminution de la ligne de fuite sèche par le volume d'occupation des gouttes d'eau avant leur déformation (figure 5.10.a) et celui résultant de leur étirement le long du chemin emprunté par la décharge électrique de rupture (figure 5.10.b et 5.10.c). Le chemin choisi généralement par la décharge correspond à celui écourté par les gouttes les plus allongées.

Pour une distance quelconque entre deux rangées successives, nous remarquons une décroissance rapide de la tension de contournement jusqu'à une valeur limite du nombre de rangées de gouttes d'eau. A partir de celle-ci, elle devient constante. La valeur de cette limite est fonction de la distance entre deux rangées successives.

Il est à signaler que la valeur de cette limite est fonction de la distance entre deux rangées successives ar Figure 5.11. Celle-ci diminue en fonction de l'élévation de la distance entre deux rangées adjacentes ar. Ce phénomène peut être expliqué par le fait que le nombre maximal de rangées de gouttes d'eau fortement et complètement déformées sur la largeur de la surface isolante n'excède pas la valeur de 4 à 5 rangées.

Par exemple, $a_r = 1\text{ cm}$, $d_g = 1\text{ cm}$ et $N_r = 11$, en effet le recouvrement de la surface de l'isolation avec des gouttes d'eau de $45\text{ }\mu\text{l}$ de volume et de $180\text{ }\mu\text{S}/\text{cm}$ de conductivité électrique, à raison de 7 gouttes par rangée, fait chuter sa performance électrique de 35 % par rapport celle obtenue dans le cas sans gouttes d'eau.

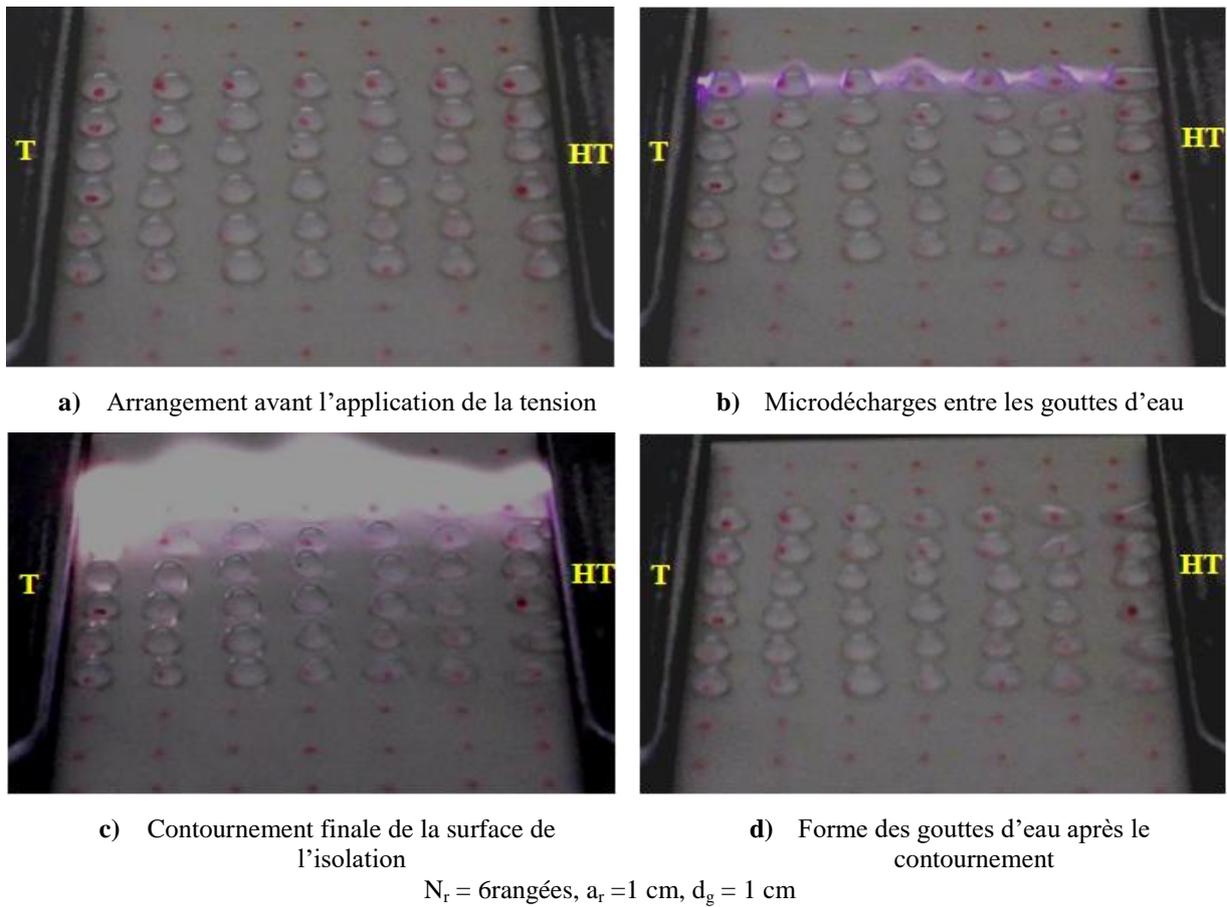


Figure 5.10 : Phases de développement d'une décharge électrique sur une surface en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau.

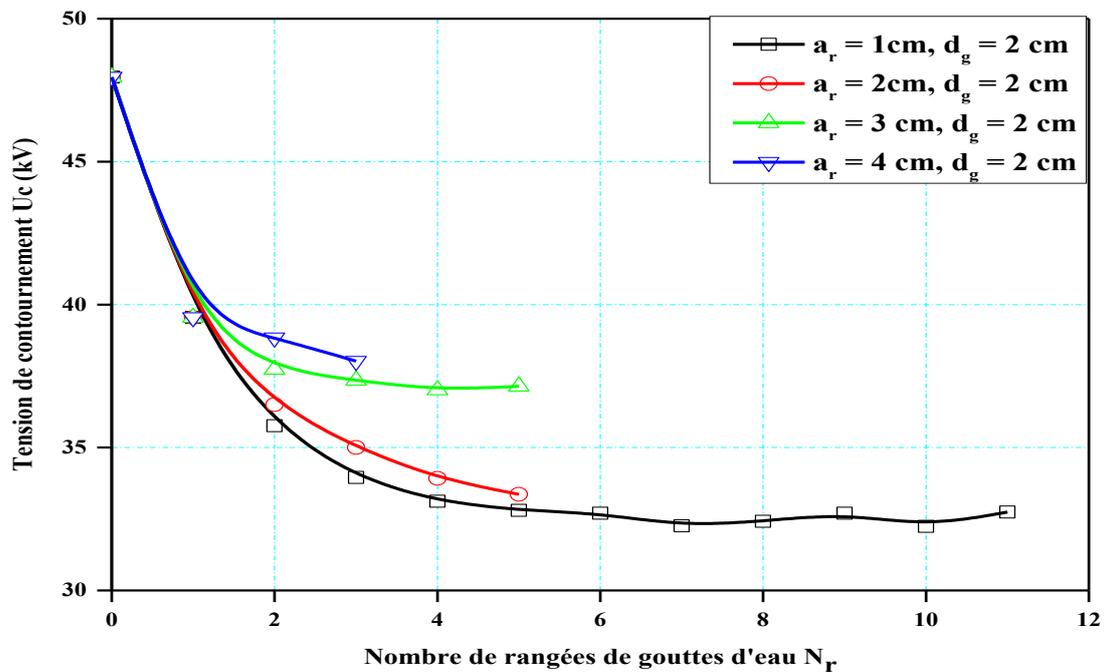


Figure 5.11 : Tension de contournement d'une isolation hydrophobe en fonction du nombre de rangées de gouttes

5.2.2.2. Position et taille d'une zone sèche parallèle à droite l'axe des électrodes

La figure 5.12 donne l'allure de la performance d'une isolation hydrophobe en fonction du nombre de rangées de gouttes d'eau posées sur sa surface délimitée par les deux des électrodes. Le nombre de rangées perpendiculaires aux électrodes est égal à 9. La distance entre deux rangées successives est de 1cm, la conductivité électrique des gouttes d'eau est de l'ordre de $180\mu\text{S}/\text{cm}$ et le volume des gouttes est égal à $45\mu\text{l}$. Le nombre de rangées de gouttes d'eau parallèles aux électrodes est égal à 7. La distance les séparant est prise égale à 1cm.

Lorsque la zone sèche est située au voisinage des bords droits ou gauches des électrodes HT et terre (figure 4.10) la tension de contournement de l'isolation de perpendiculaire constante avec l'élévation de la longueur de la zone sèche quelle que soit sa position. Celle-ci prend sa valeur maximale lorsqu'aucune goutte n'est présente sur la surface de l'isolation. Ce résultat est évident puisque la décharge de contournement s'effectue toujours au dessus d'une rangée de gouttes d'eau la plus déformée expliquant ainsi la valeur faible de celle-ci.

Par contre lorsque la zone sèche se trouve au milieu et s'allonge vers les bords des électrodes HT et terre la tension de contournement augmente continuellement avec la diminution du nombre de rangées de gouttes d'eau et plus on éloigne vers les bords plus l'uniformité du chaque électrique n'est plus assurée, moins déformées les gouttes d'eau se trouvant dans cette zone et plus tension de contournement de l'isolation est croissante.

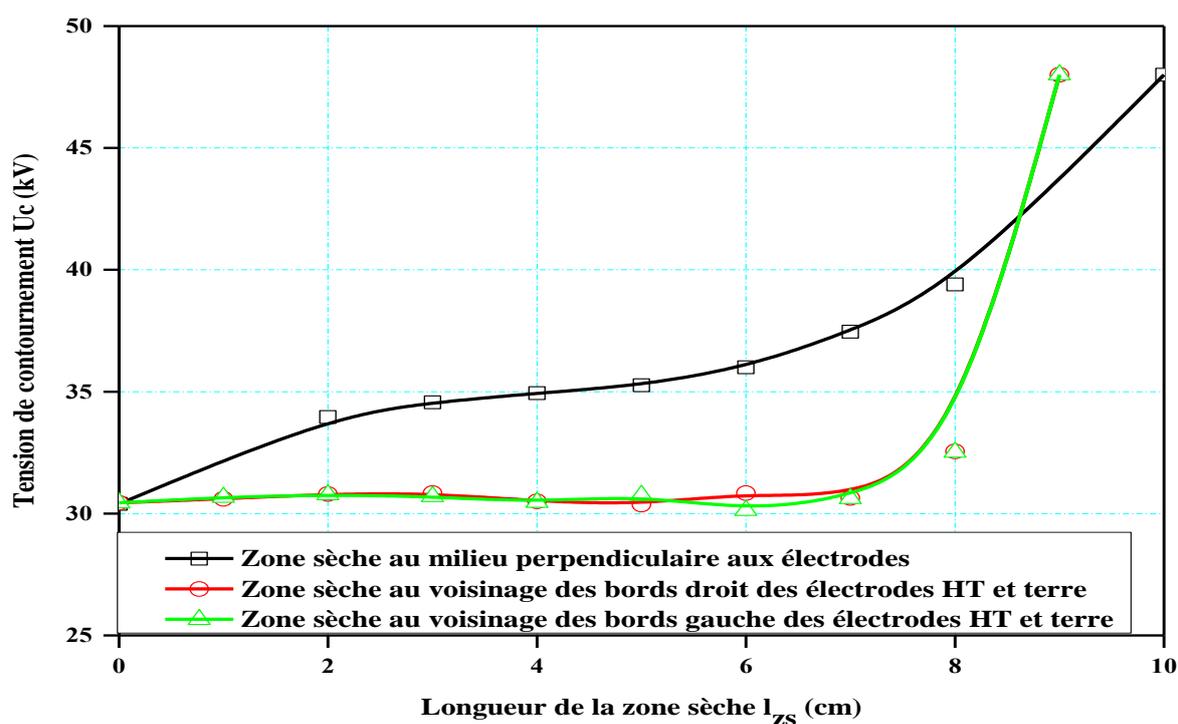


Figure 5.12 : Tension de contournement en fonction de la position et de la taille d'une zone sèche

5.2.2.3. Zone sèche au voisinage des électrodes HT et terre

La figure 5.14 donne l'évolution de la performance d'une isolation hydrophobe en fonction de la position et la largeur d'une bande sèche créée sur sa surface contaminée par 9 rangées de gouttes d'eau à conductivité électrique égale à $180\mu\text{S}/\text{cm}$ et distantes respectivement de $a_r=1\text{cm}$ et $d_g=1\text{cm}$. Il en résulte qu'avec l'apport d'une zone sèche au voisinage des électrodes, la tension électrique augmente avec la croissance du nombre des rangées supprimées. De plus notons que la tension de contournement de l'isolation est la plus élevée lorsque la zone sèche est située de côté haute tension et la plus faible lorsque la zone sèche est au milieu.

Cet écart entre ces trois tensions peut être expliqué par le fait que la ligne de fuite de l'isolation humide est plus élevée lorsque la zone sèche est au milieu entre les deux électrodes, du fait que cette zone sèche est limitée par deux zones avec gouttes et sachent que sous l'effet d'un champ électrique la déformation et l'allongement des gouttes d'eau décroît en allant du voisinage de l'électrodes HT et vers celle mise à la terre.

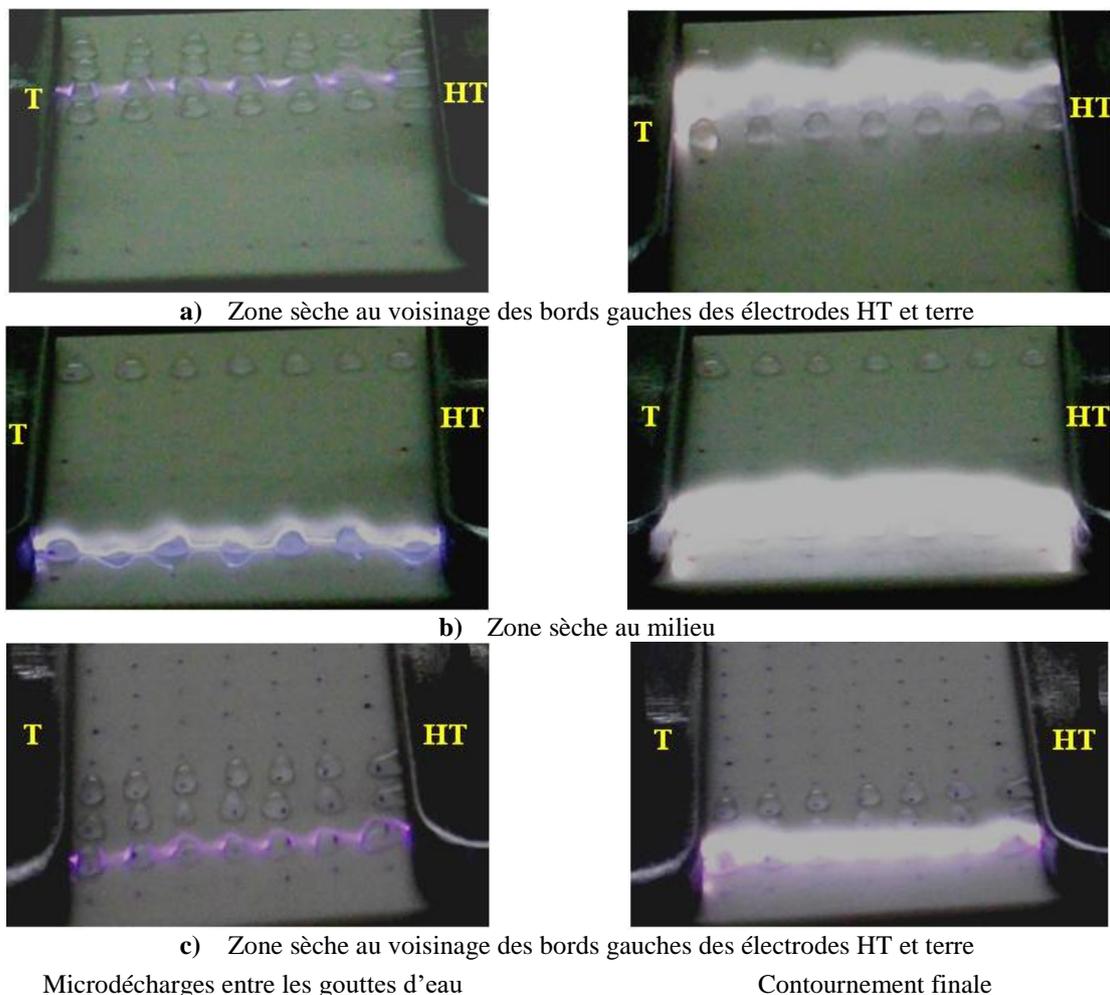


Figure 5.13 : Phases de décharge de rupture dans le cas d'une zone sèche perpendiculaire à la droite joignant les électrodes

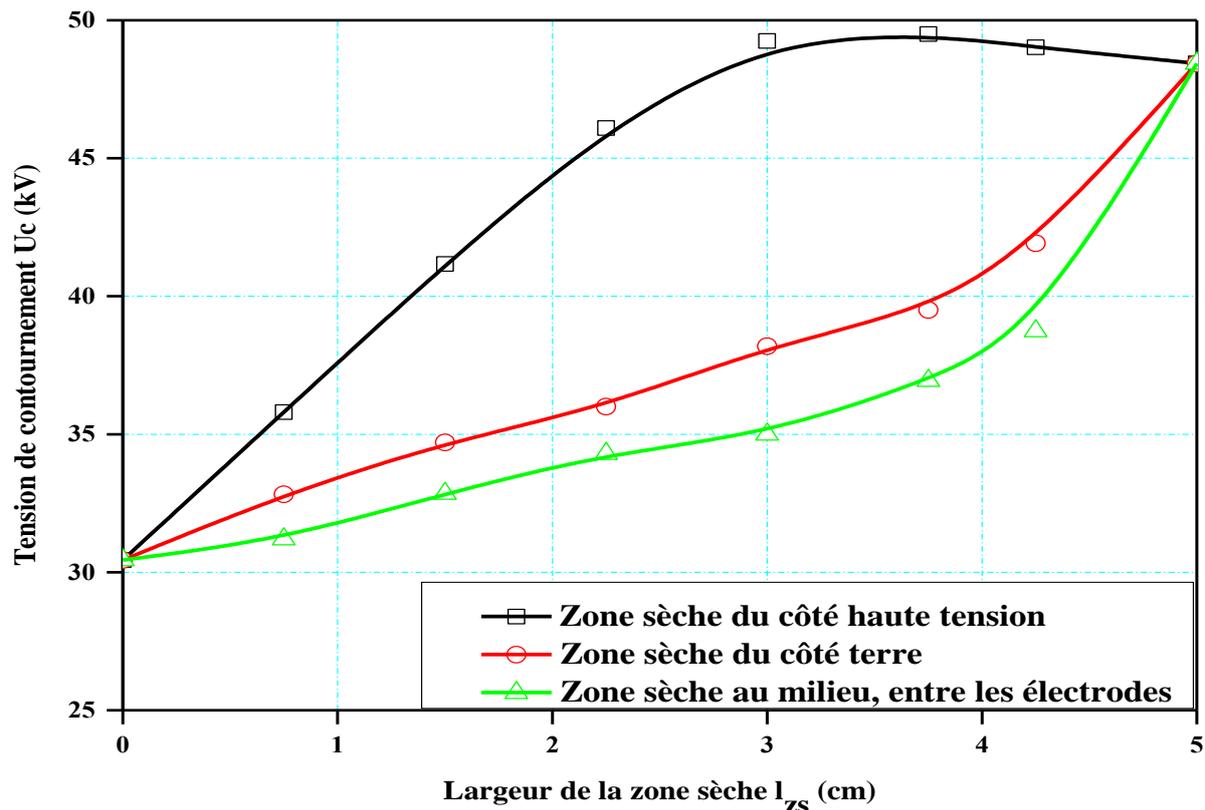


Figure 5.14 : Tension de contournement en fonction de la largeur de la bande sèche

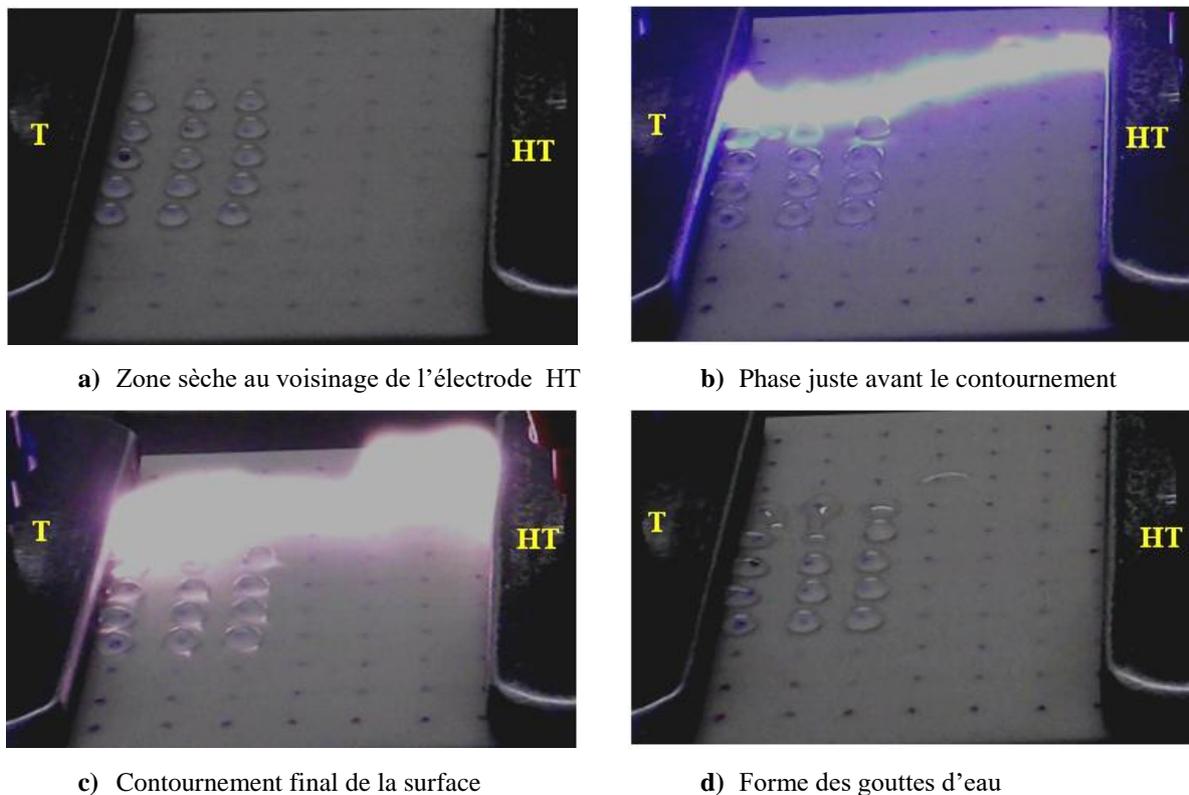


Figure 5.15 : Phases de contournement à une seule rangée de gouttes d'eau en contact avec la pointe sous tension

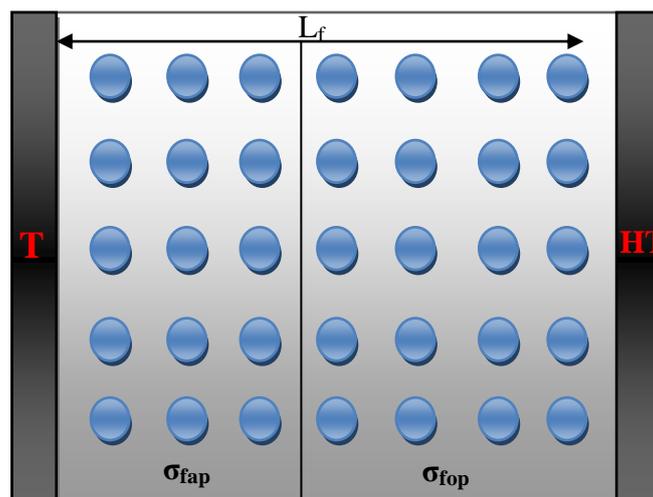
5.2.2.4. *Conductivité et nombre de rangées fortement polluées*

La formation et la répartition de la couche de pollution sur la surface des isolateurs est un facteur très important sur la tension de contournement d'un isolateur. En effet, la couche de pollution recouverte sur la surface d'un isolateur de haute tension et plus particulièrement de la ligne électrique aérienne est généralement non uniforme. La non-uniformité de la pollution peut être classée en trois catégories : transversale, longitudinale périodique et non périodique.

La surface de l'isolation est divisée en deux zones différemment polluées (figure 5.16).

Cette étude a été effectuée pour une distance interélectrode égale à 7 cm. La figure 5.17 illustre justement la caractéristique liant la tension linéique de contournement d'une isolation en silicone recouverte de gouttes d'eau à nombre de rangées de gouttes d'eau fortement polluées (n_{rfp}) et rapport des conductivités électriques des rangées de gouttes d'eau fortement et faiblement polluées variables.

Les résultats portés sur les figures 5.17 et 5.18 montrent que la tension de contournement diminue avec l'augmentation de nombre de rangées fortement polluées. On remarque aussi diminution de la tension de contournement de l'isolation en fonction de l'augmentation du rapport des conductivités des rangées de gouttes d'eau différemment polluées. Ceci est dû au fait qu'une élévation de la salinité de pollution, engendre justement la diminution de la résistivité superficielle de la surface de l'isolation en silicone



σ_{fap} Conductivité électrique des rangées de gouttes d'eau faiblement polluées ; σ_{fop} Conductivité électrique des rangées de gouttes d'eau fortement polluées

Figure 5.16 : Distribution de la pollution non uniforme

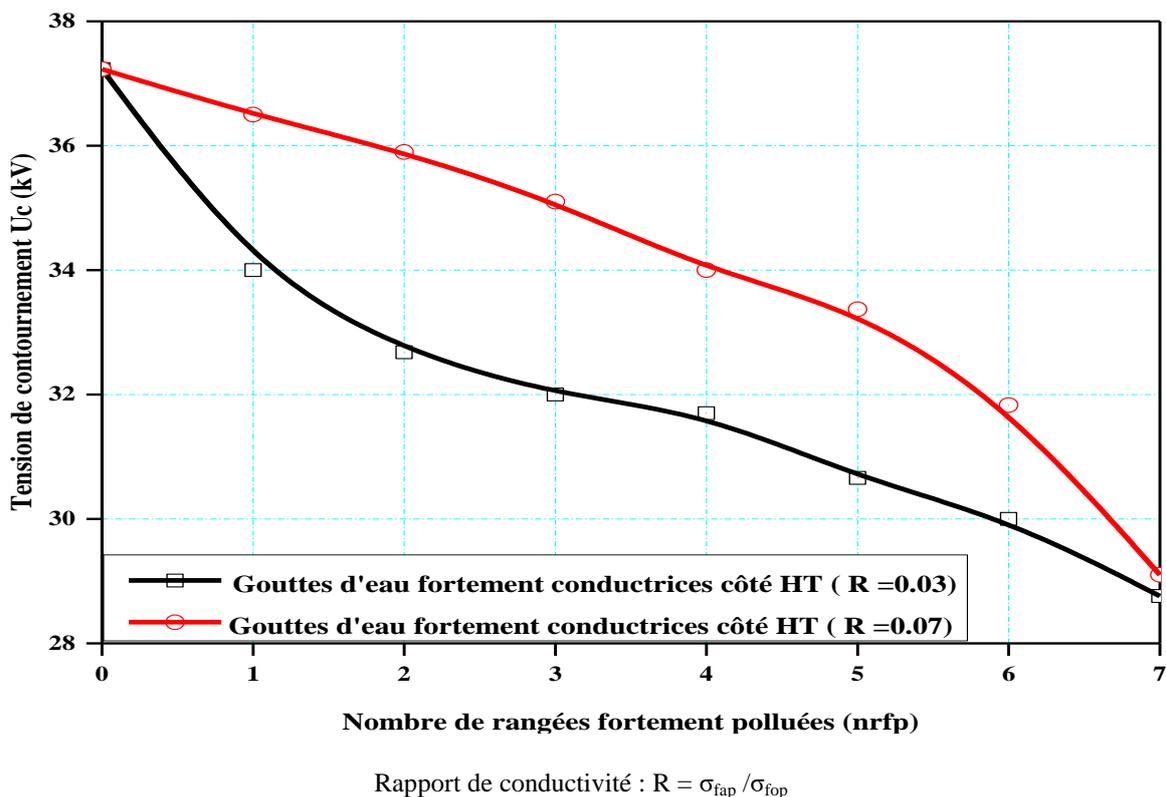


Figure 5.17 : Tension de contournement en fonction de nombre de rangées fortement polluées côté HT

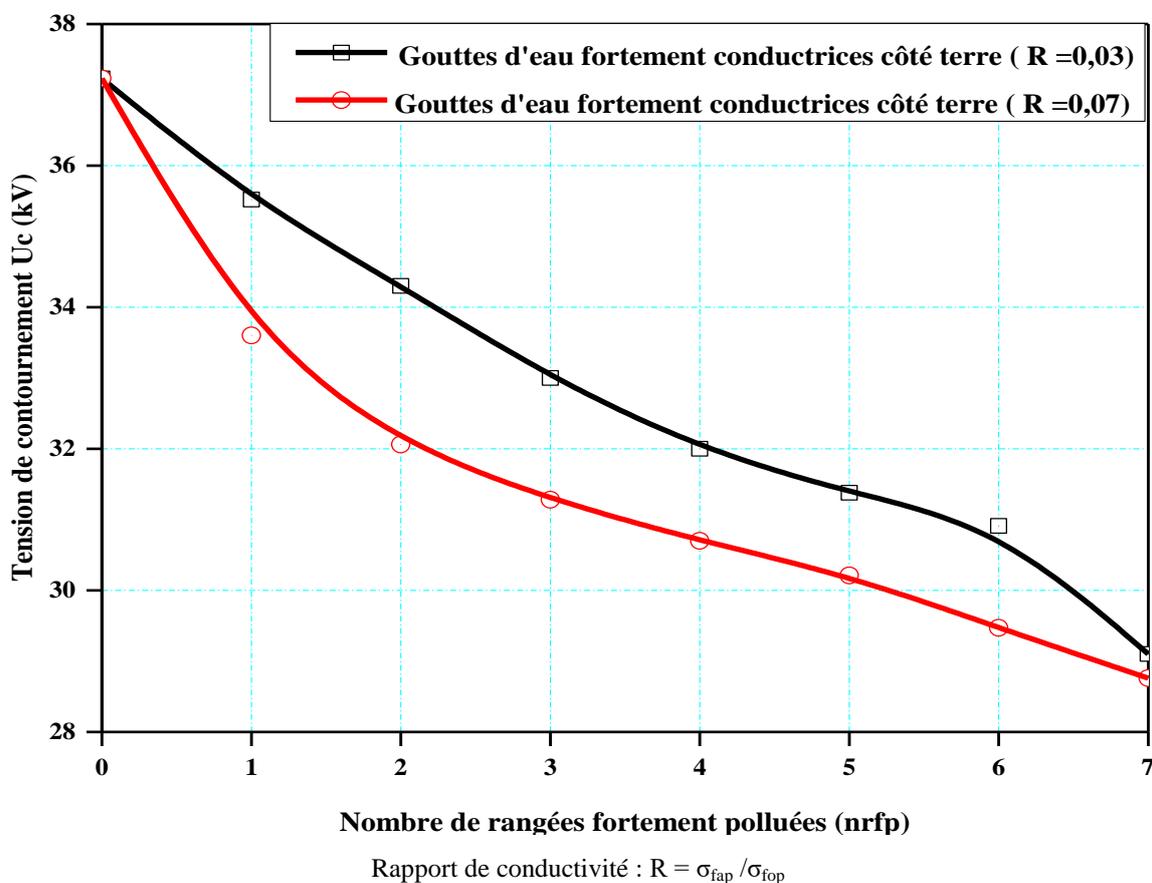
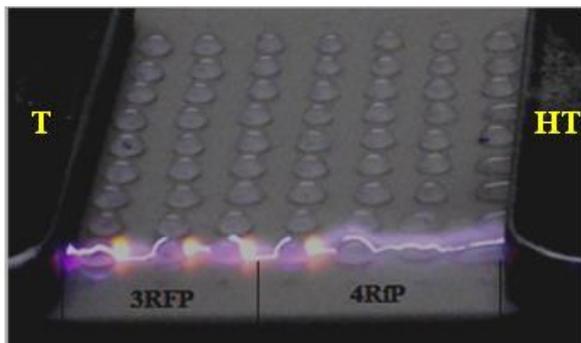
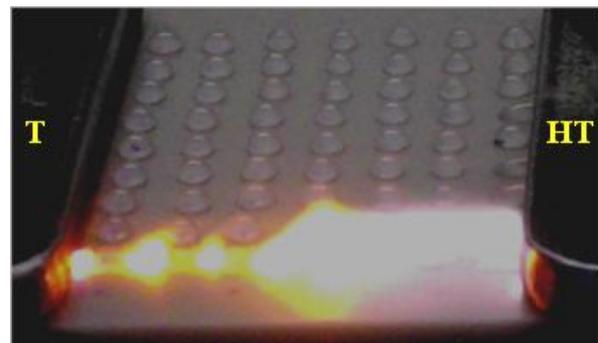


Figure 5.18 : Tension de contournement en fonction de nombre de rangées fortement polluées côté terre

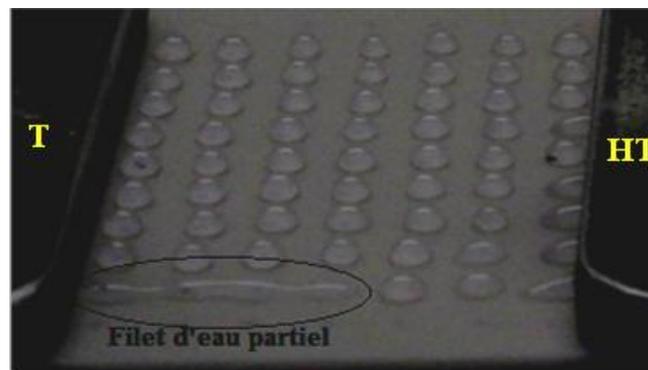
Les figures 5.19 et 5.20 illustrent les différentes phases de contournement d'une surface recouverte des gouttes d'eau pour deux rapports de conductivités volumiques différents. La figure 5.19 correspond au cas où les rangées de gouttes d'eau fortement polluées de conductivité égale 7mS/cm sont situées du côté HT. La figure 5.20 correspond au cas inverse une conductivité égale 2mS/cm. Les figures 5.19.b et 5.20.b indiquent le chemin emprunté par la décharge d'arc électrique. Il est à remarquer tout d'abord que la couleur émise par ces deux décharges est différente. Cela est dû probablement aux différentes longueurs d'ondes émises par les gouttes d'eau à divers degrés de salinité.



a) Décharge entre gouttes fortement polluées et au dessus des gouttes faiblement polluées

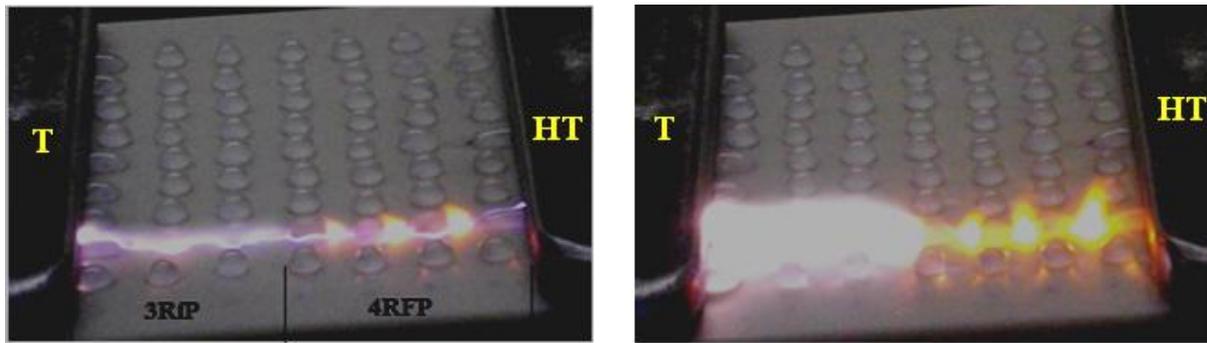


b) Contournement de l'isolation



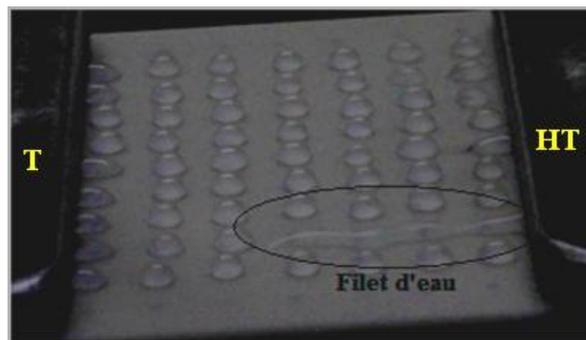
c) Filet d'eau

Figure 5.19 : Phases de contournement d'une surface non uniformément contaminée (rangées de gouttes d'eau fortement polluées du côté HT)



a) Décharge entre gouttes fortement polluées et au dessus des gouttes faiblement polluées

b) Contournement de l'isolation



c) Filet d'eau

Figure 5.20 : Phases de contournement d'une surface non uniformément contaminée (rangées de gouttes d'eau fortement polluées du côté terre)

5.3. Conclusion

L'analyse de l'effet de différents types d'arrangements de gouttes d'eau sur la tension de contournement d'une surface en silicone à champ non uniforme a conduit essentiellement aux conclusions suivantes :

- ✓ Le recouvrement uniforme d'une surface isolante hydrophobe par de gouttes d'eau engendre la réduction de la performance de celle-ci ;
- ✓ Pour une surface interélectrode donnée et recouverte de gouttes d'eau, il existe un nombre de rangées limite au-delà duquel, la performance de l'isolation est minimale et constante. Cette valeur minimale dépend de la distance entre deux rangées successives des gouttes d'eau ;
- ✓ La création d'une zone sèche par élimination de la rangée de gouttes d'eau posée à la droite joignant les électrodes entraîne une élévation de la performance du système ;
- ✓ L'augmentation de la conductivité volumique des gouttes d'eau engendre la décroissance de la tension de contournement. Cela est dû au raccourcissement de la ligne de fuite sèche de l'isolation ;

Chapitre 06

PERFORMANCE D'UNE SURFACE EN SILICONE HYDROPHOBE INCLINEE ET RECOUVERTE DE GOUTTES D'EAU

6.1. Introduction

Les isolateurs à haute tension sont importants pour l'efficacité opérationnelle de sécurité et d'exploitation des réseaux de transport d'énergie électrique, il n'est donc pas surprenant que ces composants doivent répondre aux exigences particulièrement élevées en matière de fiabilité.

La présence des gouttes d'eau à la surface des isolateurs en silicone est parfois à l'origine de perturbations graves sur les réseaux électriques. En effet, la présence de ces gouttes d'eau entraîne la diminution des performances électriques des isolateurs et peut mener, dans certaines circonstances, à l'apparition de l'arc de contournement. La tension de contournement des isolateurs recouverts de ces gouttes d'eau est nettement inférieure à celle des isolateurs propres.

L'effet l'angle d'inclinaison sur la tension de contournement d'une surface en silicone hydrophobe à champ non uniforme mise sous tension alternative sur sa performance a fait l'objet de plusieurs investigations [1.24, 6.1-6.4]

Le comportement électrohydrodynamique d'une goutte d'eau à conductivité électrique quelconque en mouvement le long de la ligne de fuite d'une isolation en silicone inclinée, d'un angle de 45° ou 60° par rapport à l'horizontale et l'impact de la durée de migration de celle-ci vers l'une des électrodes et celui du développement d'une série de décharges électriques résultantes sur l'érosion accélérée de l'isolation à certains de ses endroits particuliers a suscité énormément d'intérêt chez de nombreux auteurs et particulièrement sous AC et DC [3.16, 6.5-6.8].

L'influence de divers arrangements, du nombre, du volume et de la conductivité électrique de ces gouttes d'eau déposées sur plusieurs échantillons de ces isolations de laboratoire, particulièrement en position horizontale et la durée du temps d'application des différentes contraintes de tension sur la conservation de leur hydrophobie et par conséquent

leur performance électrique, a fait l'objet de multiples investigations [1.28, 2.44, 3.39, 6.9].

L'objectif recherché à travers ce chapitre consiste en la quantification de l'effet de l'angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale sur la performance d'une surface en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau lorsque celle-ci est munie de plusieurs gouttes d'eau à arrangement, volume et conductivité électrique variables.

6.2. Résultats et discussions

Dans cette partie toutes les mesures ont été réalisées avec un nombre de rangées de gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation égal à 5 parce que la tension de contournement est constante à partir de cette valeur (figure 4.6). Celle-ci correspond d'une part aux conditions de simulation les plus défavorables sur site et d'autre part cela nous permet de faire des économies du point de vue taille des échantillons et par conséquent réaliser un gain sur le nombre d'éprouvettes à tester au laboratoire. Les couples de grandeurs (a_r , d_g) correspondant à la largeur entre deux rangées successives de gouttes d'eau a_r et la distance entre deux gouttes d'eau déposées sur la distance d'amorçage entre les deux électrodes d_g sont égales à 1 cm et la distance entre les deux électrodes est égale 6 cm.

L'évolution de la tension continue de contournement en fonction de l'angle d'inclinaison d'une surface isolante hydrophobe recouverte de cinq rangées de gouttes d'eau, ayant une conductivité électrique égale à 10 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et une taille variable, est illustrée respectivement par les figures 6.1 et 6.4. Ces figures révèlent que l'effet simultané de ces deux paramètres peut être interprété selon deux cas distincts:

6.2.1. Pour les petits volumes

La caractérisation de la performance en fonction de l'angle d'inclinaison d'une surface isolante en silicone recouverte de gouttes d'eau à volumes variable est illustrée par la figure 6.1

A) Lorsque le volume des gouttes est inférieur ou égal à 35 μl , l'allure de la caractéristique $U_{AC} = f(\alpha)$ est strictement décroissante. Cela signifie tout simplement que pour $\alpha = 0^\circ$, l'écart de performance électrique entre une isolation sans et avec gouttes est estimée à 9 % pour $V_g = 20\mu\text{l}$ et 18 % pour $V_g = 35\mu\text{l}$. Par contre, pour $\alpha = 90^\circ$, celui-ci s'élève à 20% pour 20 μl et 38 % pour 35 μl . L'élévation d'un tel écart peut être justifiée par la persistance de l'adhésion des gouttes d'eau d'une telle taille dans ce dernier cas de figure et leur élévation maximale dans cette position verticale (figure 6.2.a). Certes ces gouttes d'eau sont soumises simultanément à des forces électriques et à leur propre poids croissant avec la

pente de l'isolation ($P_g \cdot \sin\alpha$), mais la résultante de toutes ces forces est, malgré son augmentation avec l'inclinaison, insuffisante pour un tel volume de ces gouttes d'eau les faire tomber.

Par contre, à cause de leur allongement accru sous cette inclinaison, elles engendrent un raccourcissement de sa ligne de fuite sèche et par conséquent une réduction de sa performance électrique.

Donc, une telle situation est favorable pour des ailettes horizontales ou très légèrement inclinées et défavorable pour les troncs des isolateurs polymères sous l'effet du phénomène de très forte condensation car les gouttes d'eau ainsi formées sur leur surface sous tension ne dépassent guère une taille de 20 μl . Cette valeur limite a été vérifiée par Tobias [6.9] lors de la simulation au laboratoire du phénomène de condensation d'une isolation en silicone sous AC.

B) Pour $35 \mu\text{l} < V < 60 \mu\text{l}$, l'allure de la tension de contournement en fonction de l'angle d'inclinaison présente un minimum, Il est à signaler un déplacement de la position de ce minimum vers des angles d'inclinaison plus faibles avec la croissance du volume des gouttes d'eau. Pour un volume d'eau de 60 μl , la chute maximale de performance électrique de l'isolation est évaluée respectivement à 36 % pour 45 μl et 58 % pour 60 μl (figure 6.1).

Les angles critiques d'inclinaison de la surface du matériau correspondants sont estimés à 20°. Une telle diminution de la tension de contournement du polymère peut être justifiée par un grand rétrécissement de l'espace entre gouttes d'eau généré par un allongement de ces dernières, fortement élevé par rapport au cas précédent.

Cet angle critique est caractérisé par le fait que l'élongation des gouttes d'eau plus volumineuses est supérieure à celle obtenue avec un volume de 35 μl . Par contre cette inclinaison critique correspond à une situation où l'adhésion des gouttes d'eau sur l'isolation a atteint sa valeur limite. Au-delà de celle-ci, la résultante des forces électriques et de gravitation peut entraîner le décollage des gouttes d'eau de cette taille.

De part et d'autre de cette position critique, la performance de l'isolation augmente et devient plus accrue particulièrement au voisinage des inclinaisons élevées à cause de la chute des gouttes d'eau avec l'élévation de la pente de l'isolation et leur remplacement par de très fines gouttes résiduelles.

La visualisation du phénomène de contournement d'une surface hydrophobe recouverte de cinq rangées de gouttes d'eau à 20 μl et 45 μl de volume et à conductivité électrique de 10 $\mu\text{S}/\text{cm}$, soumise à une inclinaison critique de 90° et 47° respectivement est illustrée par les figures 6.2 et 6.3.

Celui-ci est subordonné à une évolution successive de la décharge électrique

pratiquement sur la largeur totale occupée par les cinq rangées pour provoquer finalement le court-circuit de l'isolation. Ce phénomène diffère évidemment de celui engendrant le contournement de la même isolation avec gouttes d'eau en position horizontale.

Les photos représentées sur la figure 6.2, illustrent les différentes phases de contournement de l'isolation suscitée. Avant l'application de la tension, la forme des gouttes d'eau est petites sphériques figure 6.2.a. Après application de la tension celles-ci commencent à se déformer et à se mouvoir en direction de l'électrode terre figure 6.2.b. Ensuite, pour la raison où la force du champ électrique près de l'électrode HV est suffisamment forte et leur allongement optimal dans ce cas, une décharge électrique est établie le long de l'axe de l'électrode comme indiqué sur la figure 6.2.c. Enfin, l'échantillon testé après le contournement complet est représenté sur la figure 6.2.d.

Avant l'application de la tension, la première déformation des gouttes d'eau est d'abord engendrée par l'action de leur propre poids. Sous l'effet de la contrainte de tension, celles-ci continuent à se déformer et à se mouvoir en direction de l'électrode mise à la terre (figure 6.3). Pendant ce mouvement, les gouttes proches de l'électrode sous tension, plus rapides, arrivent à joindre celles, lentes et éloignées de l'électrode active. Leur jonction peut donner naissance à un filet d'eau partiel en forme d'un ver de terre à diamètre variable et dont l'extrémité en regard de l'électrode sous tension est de forme conique [6.6].

A ce moment-là une décharge électrique, émanant de l'électrode haute tension, s'amorce dans l'intervalle d'air entre celle-ci et l'extrémité de ce filament et relie celui-ci au suivant (figure 6.3.a). D'autres décharges électriques s'ensuivent en connectant entre eux les filaments d'eau subséquents (figure 6.3.b).

Généralement le filament d'eau partiel créé au voisinage de l'électrode active s'allonge vers ceux formés aux alentours de l'électrode terre.

Parallèlement, la distance dans l'air séparant l'extrémité du premier filament de l'électrode active s'accroît à cause de son déplacement vers l'électrode terre du fait de sa lourdeur. L'arc électrique précurseur, brûlant au-dessus de cette zone, finit par s'éteindre pour se rallumer au niveau d'une seule ou latéralement sur plusieurs rangées parallèles (figures 6.3.b et 6.3.c) lui offrant de par leur déformation avancée des conditions de propagation plus favorables.

Ce scénario se reproduit pratiquement autant de fois qu'il y a de rangées de gouttes d'eau en déformation avancée. Le contournement final se produit au niveau d'une ou plusieurs rangées dont la distance inter-gouttes est la plus fortement raccourcie sous l'action conjuguée des forces électriques et de gravitation agissant sur les gouttes d'eau.

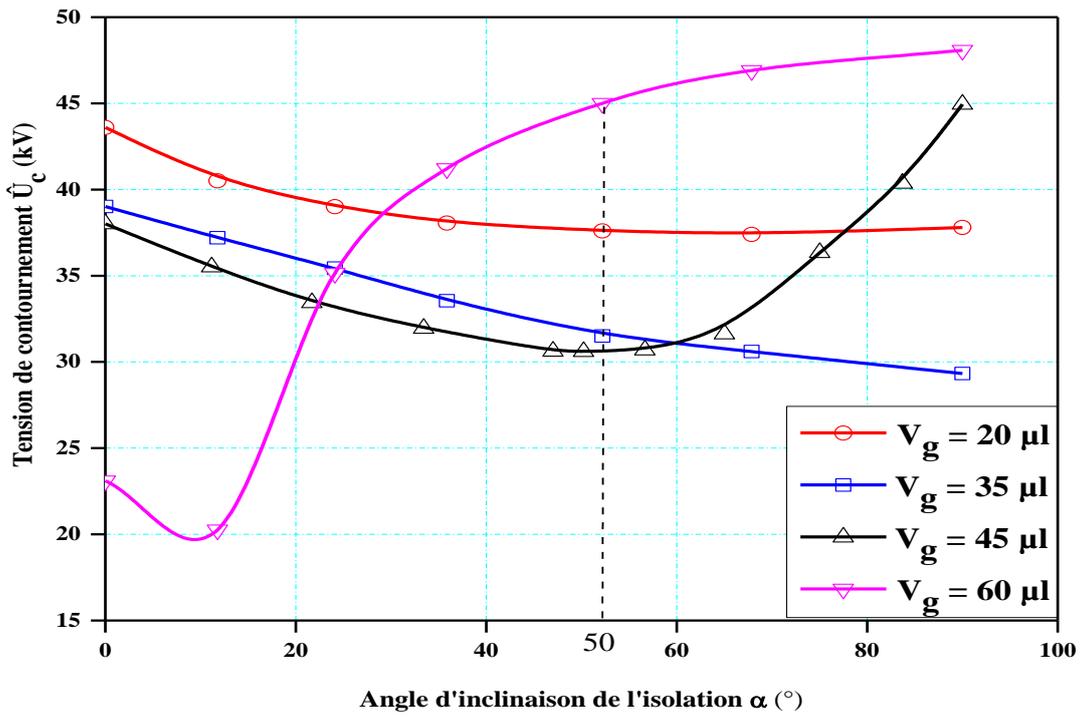
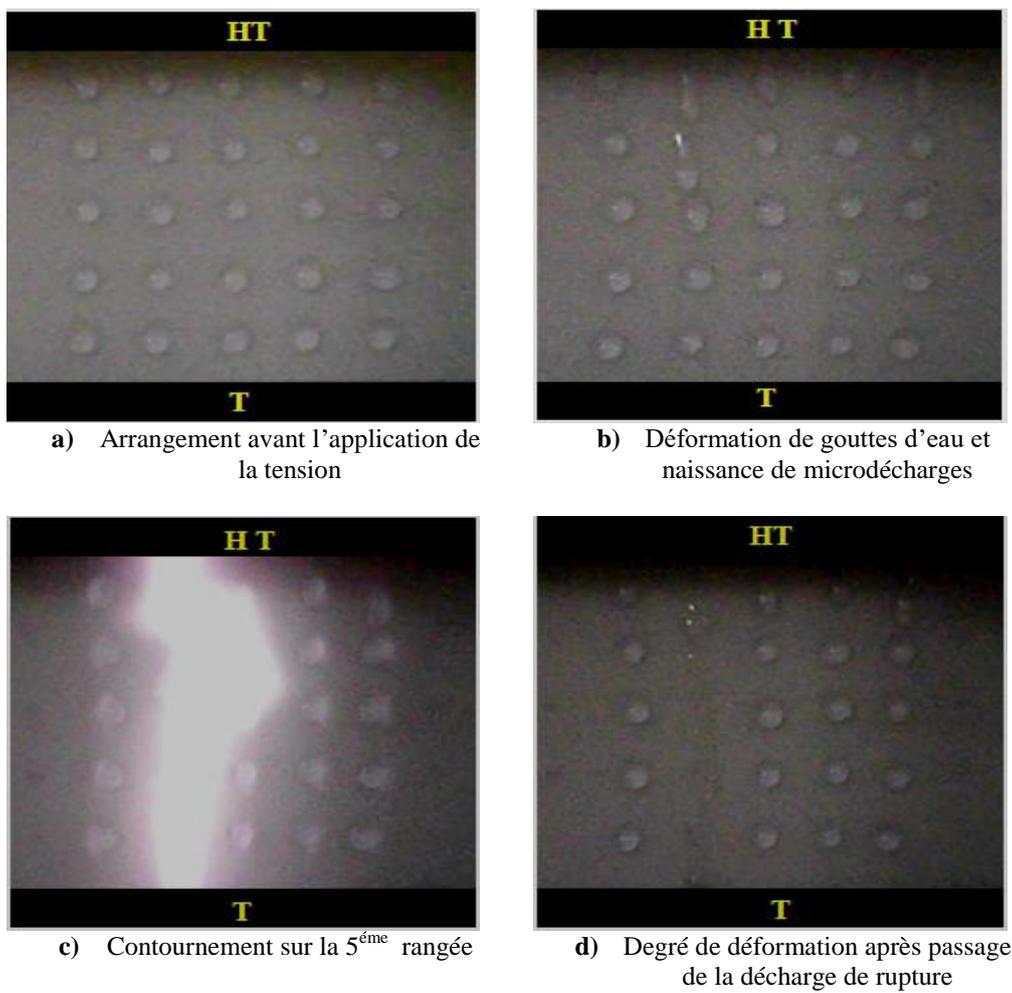


Figure 6.1 : $\hat{U}_c = f(\alpha^\circ, V_g)$ d'une isolation en silicone hydrophobe, $\sigma = 10 \mu\text{S/cm}$



$N_r = 5, V_g = 20 \mu\text{l}$ et $\sigma_v = 10 \mu\text{S/cm}$

Figure 6.2 : Différentes phases de contournement de la surface isolante pour $\alpha_c = 90^\circ$

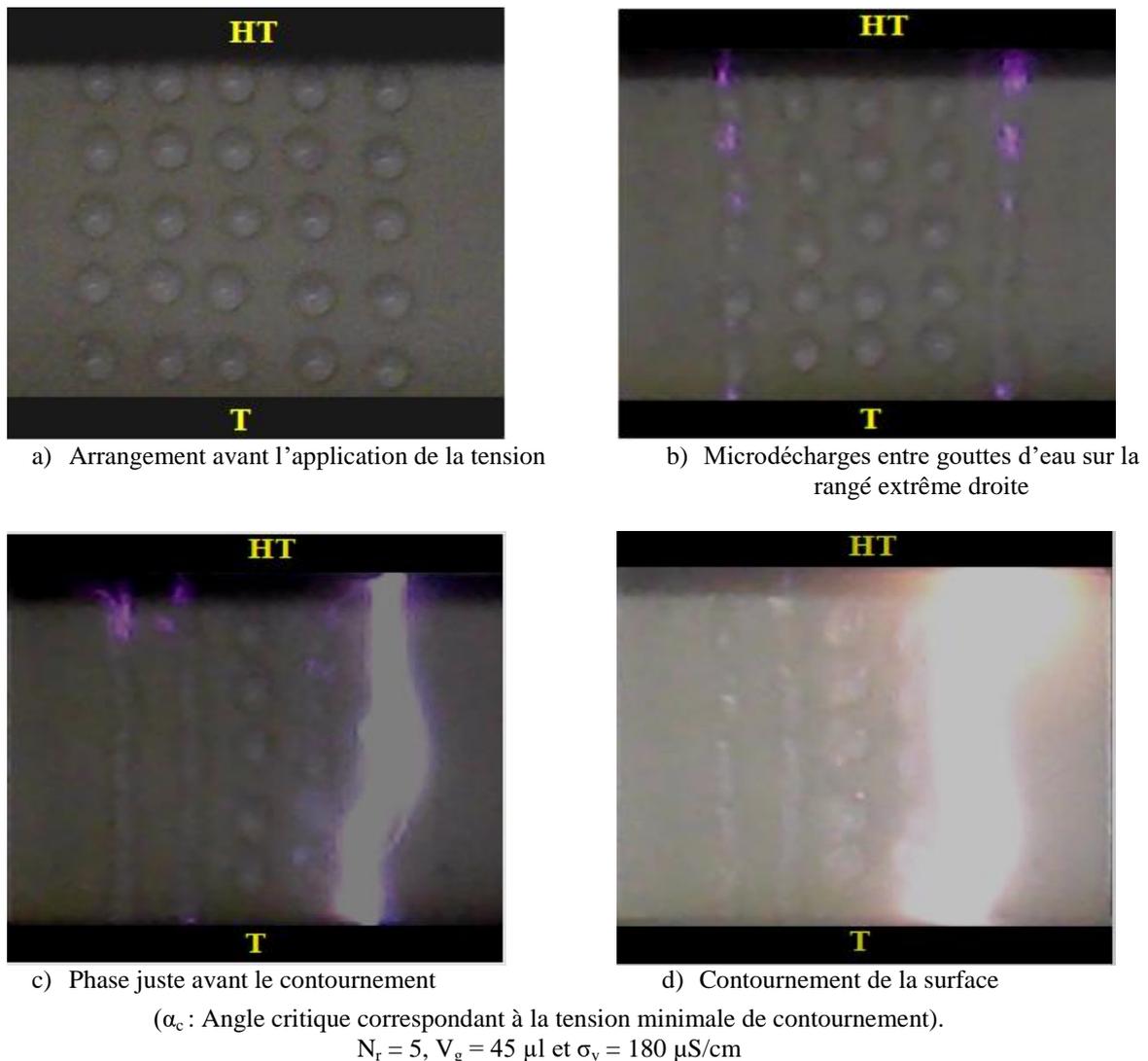


Figure 6.3 : Différentes phases de contournement de la surface isolante $\alpha_c = 90^\circ$

6.2.2. Pour les gros volumes

Pour $V_d \geq 90 \mu\text{l}$, la caractéristique $U = f(\alpha)$ présente une allure croissante contraire à celle obtenue pour $V_d < 35 \mu\text{l}$. Pour $\alpha = 0^\circ$, celle-ci présente une valeur de tension de contournement la plus faible que celles obtenues pour des volumes inférieurs pour des raisons d'un plus grand raccourcissement de la ligne de fuite sèche de l'isolation dans ce cas de figure.

En position verticale de l'isolation ($\alpha = 90^\circ$), les gouttes volumineuses et lourdes ont tendance à quitter la surface bien avant l'arrivée de l'isolation à cette position. Donc, les gouttes de telle envergure ne peuvent pas coexister à ce stade-là. Dans le cas de leur formation sur une surface hydrophobe de l'isolation, celles-ci doivent tomber avant même d'atteindre un tel volume. Sous l'effet de la résultante des forces électriques et de gravitation, celles-ci cèdent leur place à des résidus électrolytiques de taille variable. La variation de celle-ci est en

étroite relation avec le nombre et la fréquence des collisions entre les gouttes d'eau primaires appartenant à l'extrême rangée située au voisinage immédiat de l'électrode sous tension et les gouttes résiduelles des rangées suivantes. Le contournement de l'isolation par arc électrique finit par s'établir au-dessus de ces très minuscules gouttes, ce qui explique l'élévation de la performance de l'isolation puisque la distance séparant ces très infimes gouttes d'eau est plus élevée que celle en présence de gouttes volumineuses et la distorsion du champ électrique résultant est plus faible dans le premier cas de la figure 6.4. Il est à remarquer que la tension de contournement est très proche de celle de l'isolation en absence de ces rejets électrolytiques sans toutefois lui être égale (figure 6.1).

La figure 6.4 montre aussi que pour $\alpha > 50^\circ$, les caractéristiques $U = f(\alpha)$ correspondants aux volumes des gouttes d'eau initiales de 90 et 120 μl ou leurs multiples résidus finaux sont très rapprochées l'une de l'autre. L'explication réside dans le fait que les résidus électrolytiques finaux, formés par suite de la chute et la collision entre gouttes primaires et/ou différents résidus électrolytiques initiaux sont pratiquement identiques.

Cet intervalle d'angle d'inclinaison s'avère très favorable pour les ailettes des isolateurs en silicone, puisque celui-ci permet de maintenir leur performance électrique à un niveau suffisamment élevé. Dans ce cas, la chute de celle-ci ne dépasse pas 12 %. Ces résultats sont conformes à ceux obtenus par certains auteurs en AC sur des isolateurs à ailettes ayant différentes inclinaisons ($\alpha = 5^\circ, 20^\circ, 40^\circ, 50^\circ$ et 55°), contraints sous pluie à intensité variable, où le meilleur comportement électrique est affiché par ceux présentant une inclinaison supérieure ou égale à 50° [1.25].

Plusieurs séries d'images ont été enregistrées par l'intermédiaire de la caméra. Ces images nous ont permis de suivre le développement du contournement d'une surface recouverte de gouttes d'eau à volume égal à 90 μl et une conductivité électrique de $10\mu\text{S/cm}$, et inclinée de 35.9° (figure 6.5). Avant l'application de la tension les gouttes d'eau sont tombées simultanément en raison de leur poids et la poussée due à la force électrique (figure 6.5.a). Celle-ci quittent la surface en laissant d'infimes gouttes d'eau derrière elles (figure 6.5.b). Ensuite, une décharge électrique de contournement s'établit au dessus des petites gouttes d'eau (figure 6.5.c).

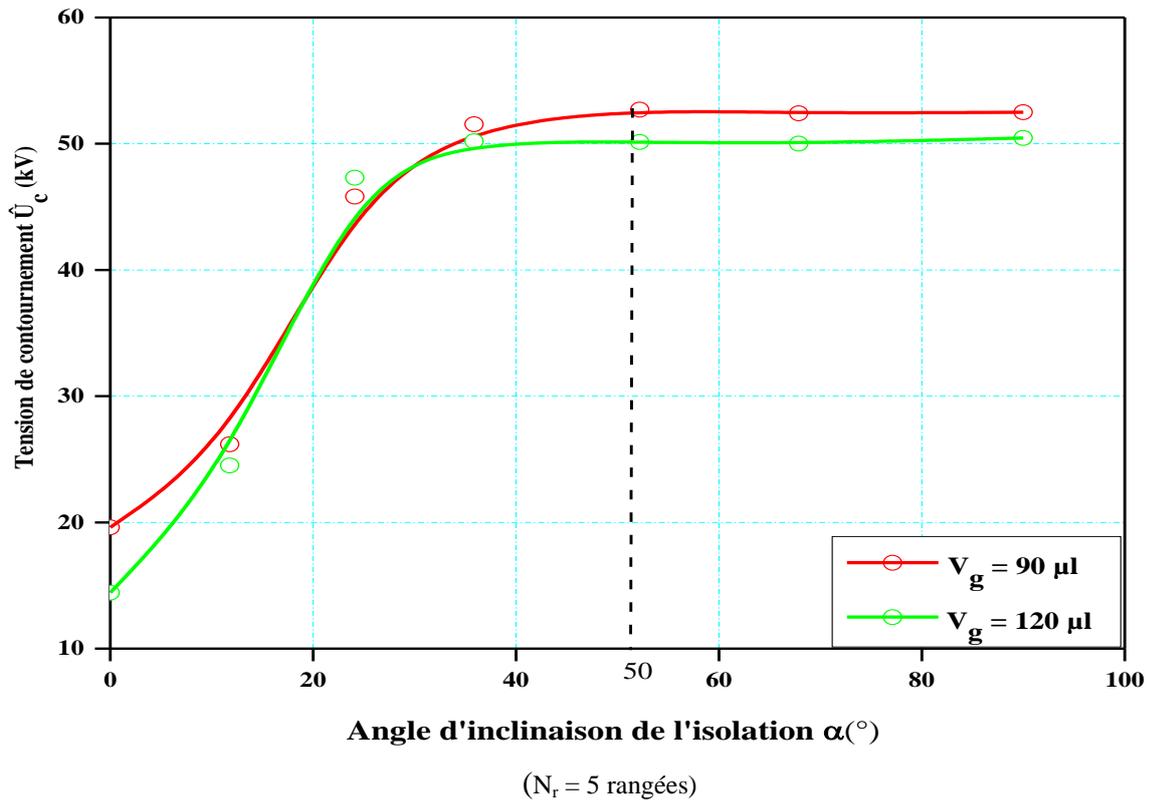


Figure 6.4 : $U_{AC} = f(\alpha, V_g)$ pour une isolation en silicone hydrophobe



a) Arrangement des gouttes avant l'application de la tension



c) Résidus des gouttes d'eau

b)



d) Contournement sur la 5^{ème} rangée ($V_g = 90\mu\text{l}$, $\alpha_c = 35.9^\circ$)

Figure 6.5 : Contournement d'une surface en silicone recouverte de grosses gouttes

Enfin, il est à souligner sur la figure 6.6 un croisement des courbes de performance correspondant aux petites et grandes tailles des gouttes d'eau pour certains angles d'inclinaison de l'isolation. Ces points d'intersection, à performance électrique égale, sont caractérisés généralement par une constellation de minuscules gouttes résiduelles formées suite aux collisions successives entre différents rejets électrolytiques sous l'action conjuguée des forces de gravitation et électriques. La confirmation de ce résultat est obtenue au moyen de la mesure du volume de ces gouttes résiduelles à l'aide d'une seringue graduée [1.28].

Ce croisement est pratiquement équivalent à celui des petites gouttes déposées sur le même isolant. La confirmation de ce résultat est obtenue en utilisant la mesure du volume de ces gouttes résiduelles à l'aide d'une micropipette (figure 6.7).

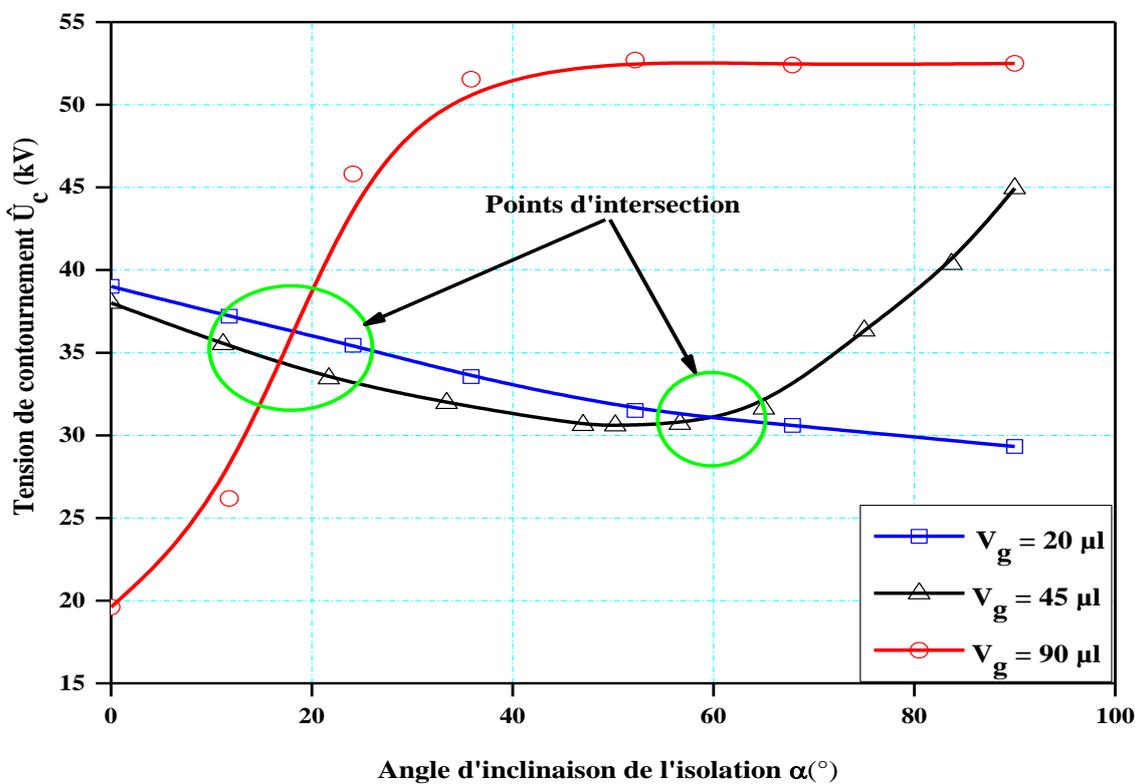
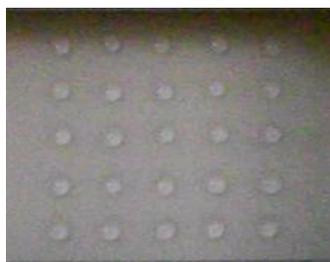


Figure 6.6 : Points d'intersection pour différents volumes



$V_g = 20 \mu\text{l}$, $\alpha = 57.9^\circ$



$V_g = 45 \mu\text{l}$, $\alpha = 57.9^\circ$



$V_g = 90 \mu\text{l}$, $\alpha = 11.9^\circ$

Figure 6.7 : Photos du point d'intersection pour différents volumes

6.2.3. Position de l'électrode sous tension

Etant donnée la position des fils de phase par rapport aux isolateurs des lignes électriques aériennes, nous nous sommes intéressés dans le cadre de cette étude aussi au rôle que pourrait jouer la position de l'électrode mise sous tension sur le plan incliné vis-à-vis de la performance électrique de l'isolation avec gouttes d'eau. Justement, la figure 6.8 illustre la caractéristique $U = f(\alpha)$ pour une isolation recouverte de gouttes d'eau ayant un volume de 20 μl et 45 μl et une conductivité électrique de 180 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Il en découle que la position de l'électrode sur le plan inclinée exerce un effet sur la performance électrique de l'isolation. Il est à remarquer que cette influence est valable quel que soit le volume des gouttes d'eau. Nous observons, pour un volume de gouttes d'eau égal à 45 μl la chute de performance électrique de l'isolation entre les deux positions est égale à 5.34%, mais pour un volume de gouttes d'eau égal à 20 μl et l'écart de tension de contournement est de l'ordre de 5.77% entre les deux positions.

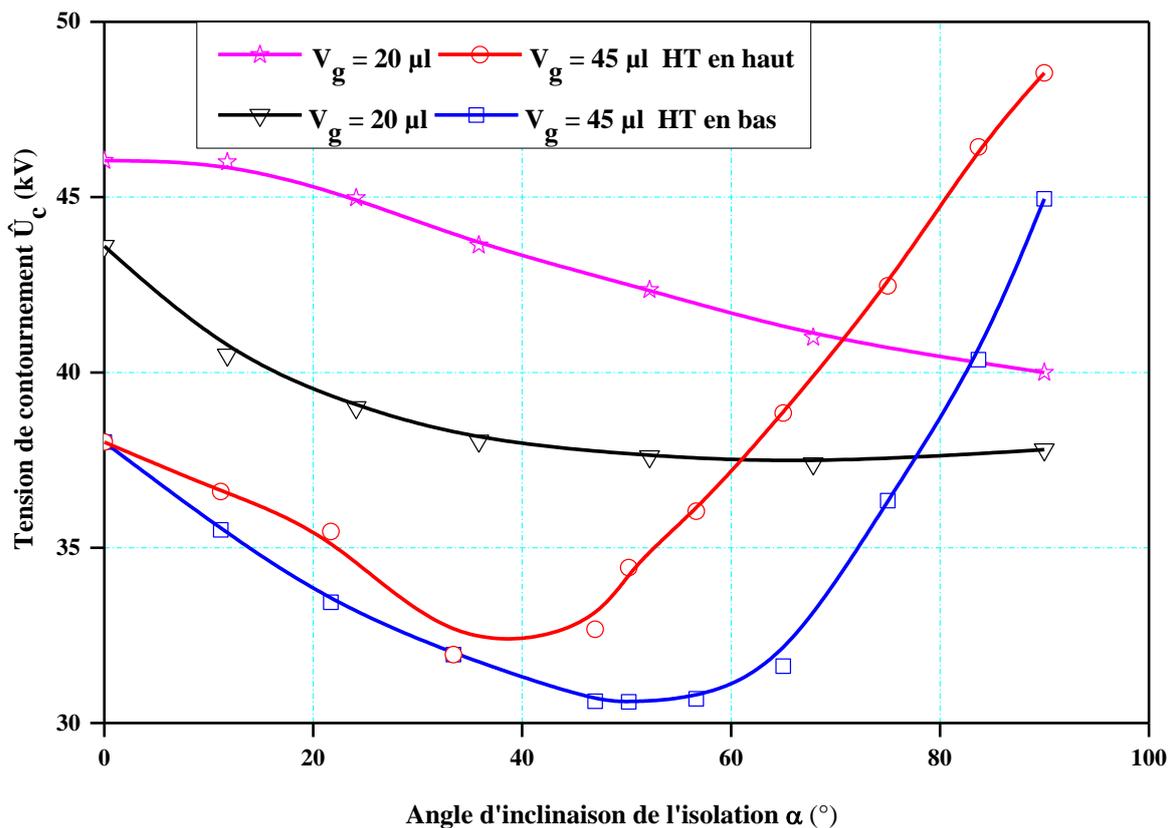


Figure 6.8 : Tension de contournement en fonction de la position de l'électrode sous tension pour différents volumes

6.2.4. Conductivité des gouttes d'eau

Dans cette partie, une analyse a été effectuée pour un angle d'inclinaison α nul sur des paramètres d'influence tels que le volume V_g des gouttes d'eau recouvrant sa surface et leur conductivité électrique σ_v .

Quant à l'effet de la conductivité électrique des gouttes d'eau sur la performance électrique de l'isolation en silicone est mis en évidence par la figure 6.9. Celle-ci résume l'évolution de la tension minimale de contournement de l'isolation en fonction du volume de gouttes d'eau la recouvrant et leur conductivité électrique variable.

Quant aux valeurs de la tension de contournement inhérentes à la conductivité des gouttes d'eau égale à 2 mS/cm, elles ont été obtenues sur la base de la même procédure de mesure que celle employée pour la faible conductivité électrique de celles-ci. Il en ressort une similitude entre l'allure de la performance électrique de l'isolation en fonction du volume des gouttes d'eau la recouvrant sous inclinaison quelconque et celle obtenue en position horizontale.

Les mêmes figures montrent que l'effet de l'élévation de la conductivité électrique de 10 μ S/cm à 2 mS/cm se traduit par un écart de performance de l'isolation croissant avec le volume des gouttes d'eau la recouvrant. L'écart maximal obtenu dans ce cas est de l'ordre de 14.5 %. Un tel écart est conforme à celui trouvé par d'autres auteurs sur des isolateurs réels en silicone sous pluie à conductivité électrique variable [3.70]. Donc, sous conditions de forte pollution, la performance électrique d'une isolation en silicone hydrophobe en position horizontale, recouverte de gouttes d'eau de 90 μ l de volume voit sa performance chuter au total de 81 %. Ceci peut être expliqué par le fait que pour une forte conductivité électrique des gouttes d'eau, ces dernières se comportent comme des électrodes conductrices intermédiaires et déformables (figure 6.10) et la résistance du chemin entre les électrodes de base se trouve diminuée de celles des gouttes conductrices et allongées ce qui entraîne la réduction de la tension de contournement de l'isolation à sa plus faible valeur. De plus, le raccourcissement élevé de la distance séparant les gouttes d'eau effilées le long de la ligne de fuite de l'isolation contribue fortement à la diminution de la performance de celle-ci.

La figure 6.10 illustre le chemin de la décharge électrique de rupture entraînant le contournement de l'isolation recouverte de gouttes d'eau à conductivité électrique variable. Pour $\sigma_v = 10 \mu$ S/cm, le canal de la décharge électrique disruptive court-circuite les deux électrodes dans l'air en effleurant les sommets des gouttes d'eau déformées (figure 6.10.c).

Par contre lorsque la conductivité électrique est égale à 2mS/cm, la longueur totale du chemin de contournement de l'isolation est déduite de la somme de celle des canaux d'amorçage des intervalles d'air compris entre chaque couple de gouttes d'eau adjacentes et conductrices ainsi que ceux reliant les gouttes d'eau conductrices extrêmes et les électrodes haute tension et terre (figure 6.10.d).

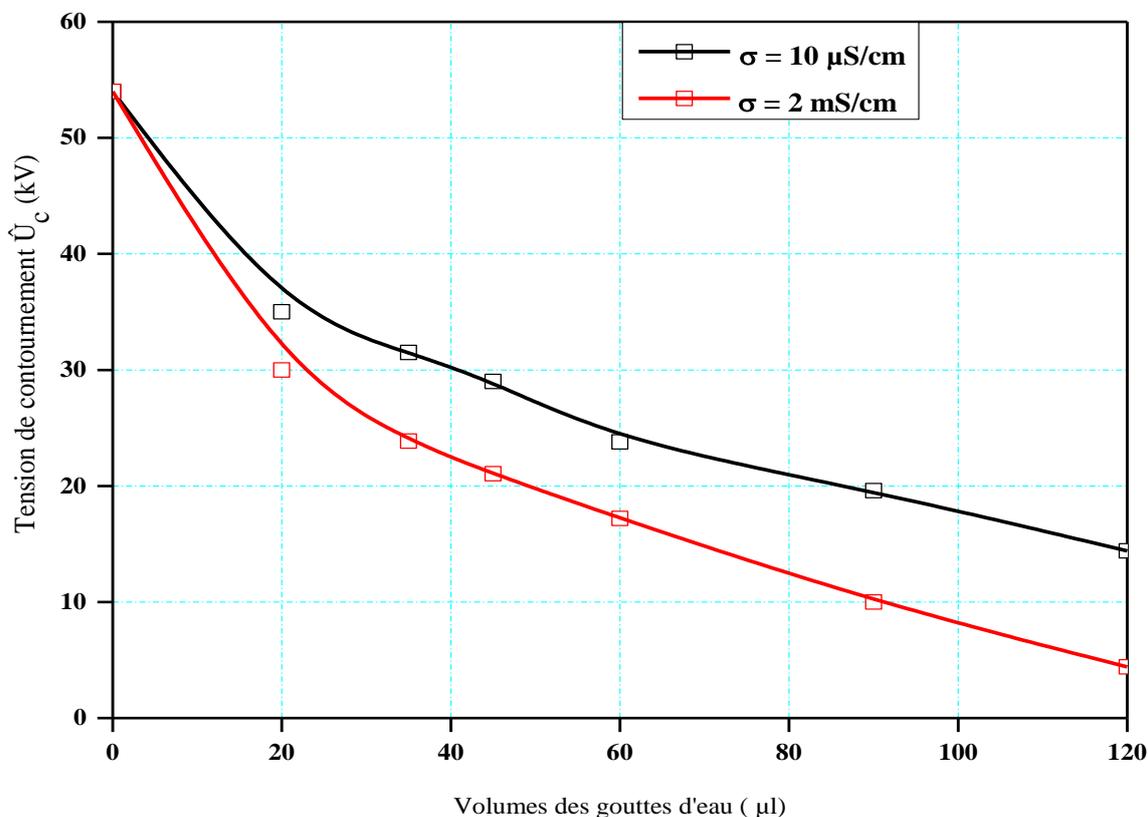


Figure 6.9 : Tension de contournement en fonction du volume des gouttes pour différentes conductivités

6.2.5. Rapport de conductivités

Dans cette partie, nous avons considéré deux positions différentes pour les gouttes d'eau fortement polluée. Le volume des gouttes d'eau est pris égala 45 μl et l'angle d'inclinaison est égal à 0°.

Dans un premier temps, la surface totale de l'isolation est recouverte de gouttes d'eau de même conductivité volumique fortement ou faiblement polluée. Dans un deuxième temps, la surface de l'isolation en silicone est divisée en deux zone partielles, dont l'une d'elles est fortement polluée avec une conductivité volumique est égale à 2 mS/cm. La deuxième zone est faiblement polluée et la valeur de sa conductivité électrique de l'ordre de 10 $\mu\text{S/cm}$. Les résultats de mesure de la tension de contournement de l'isolation sont illustrés par la figure 6.11. Il en ressort que la tension de contournement décroît lorsque le nombre des rangées

fortement polluée des gouttes d'eau augmente et la tension de contournement de l'isolation est la valeur élevée lorsque les gouttes fortement polluées sont déposées du côté HT. Ce résultat s'explique donc par le fait que les gouttes d'eau sont devenues très conductrice à ce niveau d'augmentation de la conductivité.

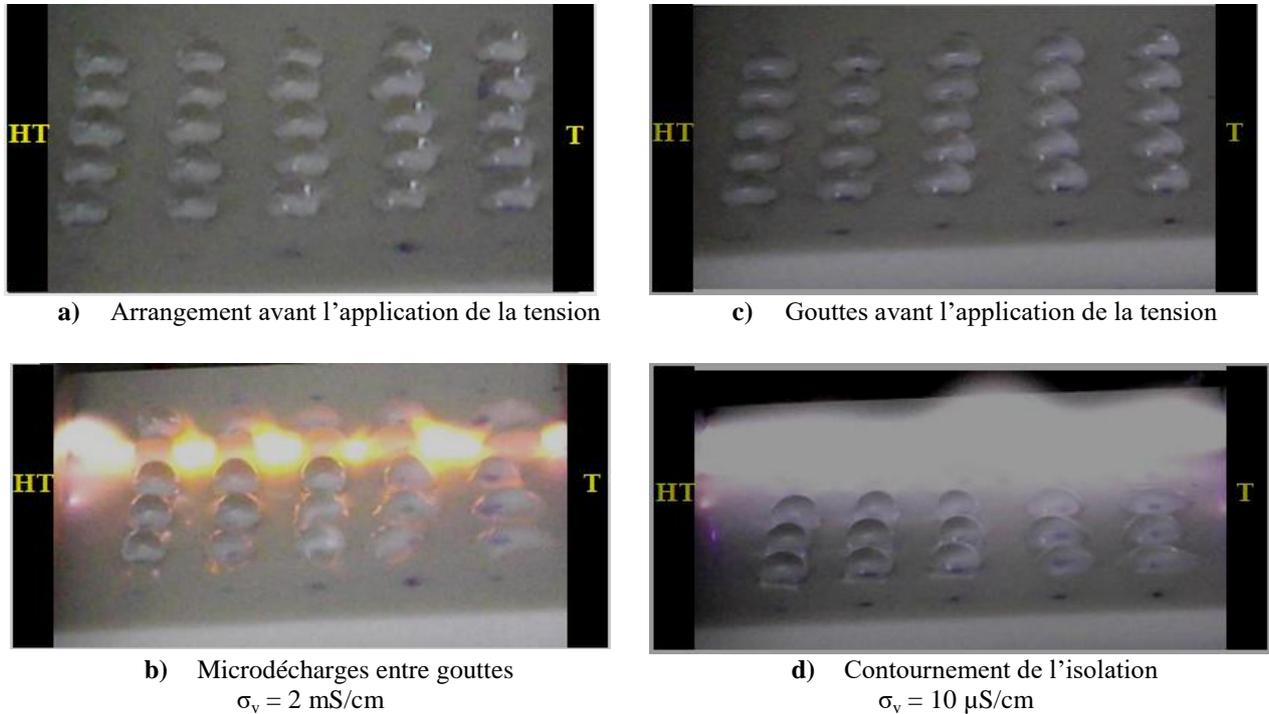


Figure 6.10 : Phases de contournement d'une surface pour $\alpha=0^\circ$, $\sigma_v= 2 \text{ mS/cm}$ et $\sigma_v=180 \text{ uS/cm}$ et $V_g = 45 \mu\text{l}$

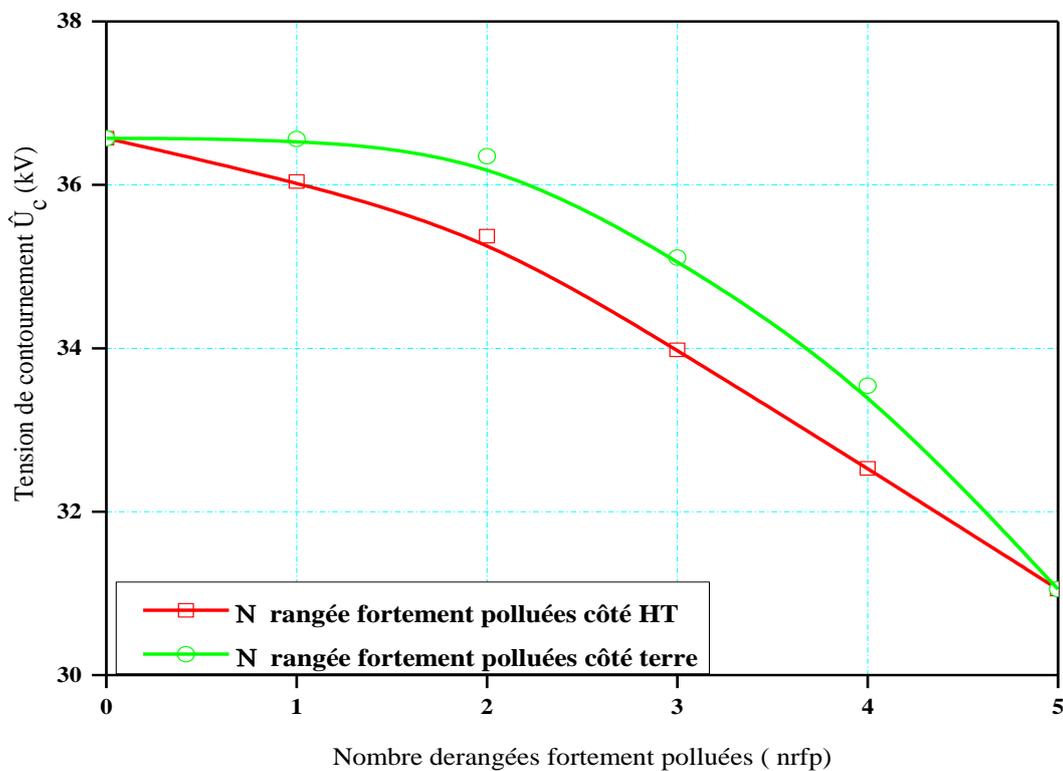


Figure 6.11 : Tension de contournement en fonction du nombre de rangées fortement polluées

6.3. Conclusion

L'effet de l'angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale d'une surface en silicone hydrophobe sur sa performance électrique lorsque celle-ci est recouverte de gouttes d'eau à volume et conductivité électrique volumique variables a mené aux conclusions essentielles suivantes :

- ✓ Pour un angle d'inclinaison $\alpha = 0^\circ$ de la surface isolante, la chute maximale de la performance électrique entre sans et avec les gouttes d'eau est obtenue pour un volume d'eau égal à 120 μ l. celle-ci est de l'ordre de 73% ;
- ✓ Pour un angle d'inclinaison critique compris entre 0 et 90° de la surface du polymère, recouverte de 5 rangées de gouttes d'eau de 45 et 60 μ l de volume, il existe une valeur minimale de performance électrique correspondant à une chute de celle-ci s'élevant au total à 65% pour un volume des gouttes d'eau égal à 60 μ l ;
- ✓ L'augmentation de la conductivité volumique des gouttes d'eau engendre la décroissance de la tension de contournement. Cela est dû au raccourcissement de la ligne de fuite sèche de l'isolation ;
- ✓ La tension de contournement diminue lorsque le volume des gouttes d'eau augmente et/ou la conductivité augmente. la chute de performance électrique de l'isolation est de l'ordre de 92% pour un volume d'eau V_g égal à 120 μ l et une conductivité volumique de l'ordre de 2 mS/cm ;
- ✓ Il existe un intervalle d'angle d'inclinaison de l'isolation ($\alpha \geq 50^\circ$) pour lequel sa performance électrique reste très proche de celle obtenue sans gouttes d'eau. Cet écart est de l'ordre de 18% pour des volumes des gouttes d'eau supérieurs ou égaux à 60 μ l ;
- ✓ Le positionnement des gouttes d'eau par rapport aux électrodes joue un rôle essentiel dans la réduction de la tension de contournement.

Chapitre 07

REPARTITION DU CHAMP ET TENSION ELECTRIQUE EN PRESENCE DES GOUTTES D'EAU SUR LA SURFACE DE L'ISOLATION

7.1. Introduction

Malgré les avantages des isolateurs polymériques par rapport aux systèmes d'isolation en céramique, des préoccupations subsistent quant à leur performance dans des environnements contaminés. Il ne peut être obtenu une compréhension approfondie des problèmes tels que les bandes sèches et les décharges électriques que grâce à une détermination précise de la distribution du champ électrique le long de la surface de l'isolateur et c'est un facteur clé dans le développement d'un bon isolateur pour une performance optimale dans diverses conditions atmosphériques.

La mesure des champs électriques autour des isolateurs pratiques est difficile et devient de plus en plus compliquée dans des conditions de surface polluées. Des configurations expérimentales telles que la sonde électrostatique peuvent être utilisées [7.1], mais elles sont sujettes à des erreurs périodiques, bien que cela puisse être amélioré en utilisant un système de détection de champ plus avancé [7.2]. En variantes, de nombreux chercheurs ont utilisé des techniques de simulation numérique en utilisant un logiciel électromagnétique disponible dans le commerce qui semble plus pratique et moins coûteux, évitant ainsi des expériences de laboratoire coûteuses et complexes souvent difficiles à réaliser. De plus, la croissance rapide de la technologie informatique a mené au développement de progiciels numériques évolués capables de gérer des modèles complexes sans compromettre le temps de traitement et la précision. Les méthodes d'analyse numérique peuvent être utilisées pour calculer le champ E et la distribution de potentiel électrique le long d'isolateurs polymères. Selon l'équation de Maxwell, tous les problèmes de champs électromagnétiques peuvent être exprimés par des équations aux dérivées partielles. Il existe deux types différents de méthodes d'analyse numérique, utilisant des équations différentielles ou des équations intégrales. Le premier est connu sous le nom d'approche de terrain ou de méthode de domaine et le second est connu sous le nom de méthode de distribution de source

ou de méthode de frontière. Les méthodes de domaine incluent la méthode des différences finies (FDM) et la méthode des éléments finis (FEM). La méthode frontière comprend la méthode de simulation de charge (CSM) et la méthode frontière élément (BEM).

Dans ce chapitre, la simulation par ordinateur basée sur la méthode des éléments finis est utilisée pour calculer les distributions de potentiel et de champ électrique le long de la ligne de fuite. Le modèle d'isolateur est développé et simulé dans des conditions de la surface propre et humide (surface recouverte des gouttes d'eau).

7.2. Procédure de simulation

Pour étudier l'influence d'une goutte d'eau sur la distribution du champ et la tension électrique, un modèle de simulation utilisant la méthode des éléments finis (MEF), a été élaborée sous COMSOL Multiphysics. Plusieurs facteurs influençant la distribution du champ et la tension électrique ont été étudiés. Parmi ses facteurs nous citons:

- ✓ Volume et forme de la goutte;
- ✓ Conductivité et permittivité de la goutte;
- ✓ Position des gouttes d'eau par rapport aux électrodes;
- ✓ Déformation des gouttes d'eau.

Dans la présente simulation deux cas ont été considérés. Le premier cas concerne les simulations sur un modèle d'une plaque isolante (figure 7.1) et le deuxième concerne les simulations en 3 D d'un isolateur réel (figure 7.2).

La figure 7.1 montre la structure de simulation, composée d'une plaque en silicone et deux électrodes en cuivre reposant à ses extrémités. Les dimensions de la plaque en silicone et les électrodes sont respectivement de $100 \times 80 \times 5 \text{ mm}^3$ et $80 \times 30 \times 20 \text{ mm}^3$. Les permittivités relatives du matériau en silicone et de l'air sont respectivement égales à 4 et 1 [3.21]. Au milieu de l'isolation est déposée une goutte d'eau, comme le montre la figure suivante :

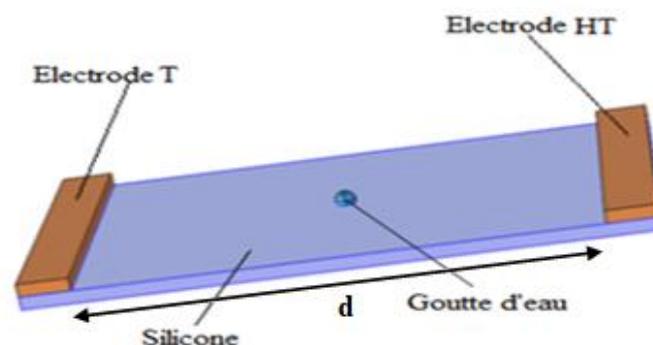


Figure 7.1 : Structure de la simulation

L'isolateur, pris en compte dans cette étude et pour l'ensemble du programme de recherche, est un isolateur polymère extérieur standard de 18 kV.

L'isolateur comporte cinq ailettes différentes avec un diamètre de 90 mm et 50 mm, espacées de 40 mm le long de l'isolateur. L'épaisseur de la gaine est d'environ 5 mm et la ligne de fuite totale le long de la surface de l'isolateur est d'environ 366 mm. La gaine d'isolation est en silicone ayant une permittivité relative $\epsilon_r = 4,3$. Un alliage forgé est utilisé pour les bornes à haute tension et à la terre, qui sont fixées à une tige de diamètre de 18 mm en tant que noyau, à une distance de 160 mm. Le noyau, avec une permittivité relative $\epsilon_r = 7,1$, est un matériau en fibre de verre qui est renforcé avec de la résine époxy pour une meilleure résistance mécanique. Les dimensions détaillées et la structure géométrique de l'isolant sont données sur la figure 7.2 [7.3, 7.4].

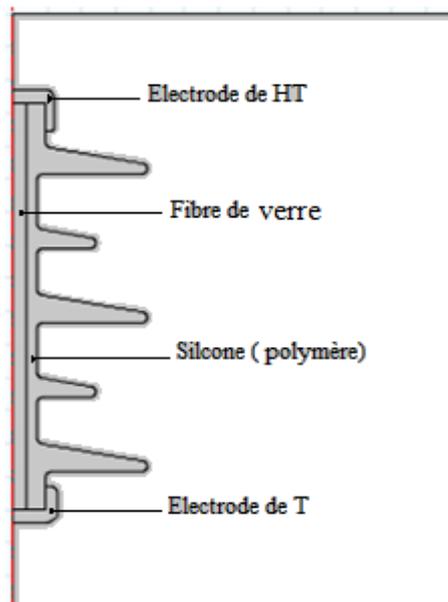


Figure 7. 2: Isolateur polymère de 18 kV

7.3. Modélisation d'éléments finis

Les modèles numériques et les modélisations associées ont été réalisés avec le logiciel commercial d'éléments finis COMSOL Multiphysics version 5.0 a. La simulation est réalisée en trois étapes consécutives à savoir, les étapes de prétraitement, de résolution et de post-traitement (Visualisations des résultats). Les composants du problème physique tels que la structure géométrique, les propriétés matérielles et conditions aux limites, et les critères de maillage sont présentés comme des entrées dans l'étape de prétraitement. Le modèle mathématique, normalement exprimé sous forme d'équations différentielles qui décrivent le problème physique, est exécuté dans l'étape de résolution. Enfin, dans la phase de post-

traitement, le logiciel permet aux utilisateurs de générer un graphique des variables ou paramètres de post-traitement souhaités. Le diagramme de l'organigramme de la figure 7.3 montre les procédures FEM générales pour les travaux de simulation dans cette étude.

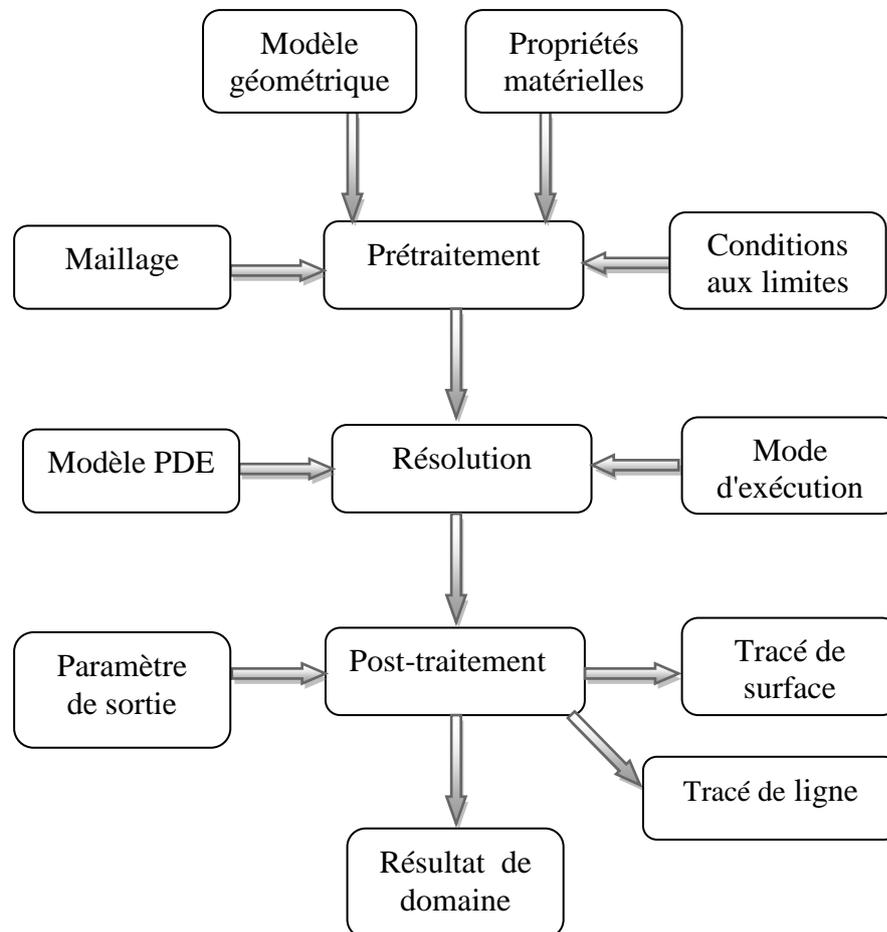


Figure 7.3 : Procédures générales pour les simulations FEM

7.3.1. Simulation d'un modèle d'isolateur

Les modèles de l'isolateur polymère et la plaque isolante décrits dans la section 7.2 ont été créés à l'aide d'outils de dessin Solid Works disponibles dans le progiciel FEM. Le modèle simulé (figure 7.2) et adopté dans ce travail est une configuration idéalisée pour l'isolateur extérieur. On s'attend à ce que cette configuration produise la distribution de champ la plus non uniforme autour des électrodes terminales et, par conséquent, représente le pire des cas. L'application aux nombreuses configurations pratiques d'isolateurs extérieurs avec la présence d'équipements et de structures adjacentes introduirait des distorsions à la fois sur les distributions de potentiel et de champ électrique.

7.3.2. Propriétés matérielles

Chaque région du modèle a été spécifiée avec les propriétés du matériau appropriées décrites dans la section 7.2. Les deux matériaux diélectriques ont été assignés, à savoir la silicone pour la gaine de l'isolateur et la plaque, ainsi que les fibres de verre pour le noyau (FRP) avec une faible conductivité $\sigma = 1,0 \times 10^{-14}$ S/m. La permittivité relative des gouttes d'eau a été estimée à 81. La conductivité de la goutte d'eau a été fixée à $180 \mu\text{S/m}$, une valeur adoptée à partir des mesures de laboratoire rapportées dans. La région de l'air entourant l'isolateur a été spécifiée avec une très faible conductivité, $\sigma = 1,0 \times 10^{-15}$ S/m. Les propriétés des matériaux utilisés pour la modélisation de l'isolant dans cette étude sont résumées dans le tableau 7.1.

Tableau 7.1 : Propriétés du matériau utilisé pour la modélisation de l'isolateur réel et la plaque isolante

Matériaux	Permittivité relative ϵ_r	Conductivité σ (S/cm)
Silicone	4,3	10^{-14}
Fibre de verre	7,1	10^{-14}
Electrodes en Cuivre	1	$5,9 \cdot 10^7$
Gouttes d'eau	81	$180 \cdot 10^{-6}$
Air	1	10^{-15}

7.3.3. Conditions aux limites

Pour toutes les simulations, la tension appliquée aux bornes de l'isolateur composite correspond à la tension de service entre phase et terre en considérant l'isolant soumis à de très fortes pollutions, selon la norme BS EN 60815 [3.6]. L'une des électrodes est soumise à la valeur efficace de la tension simple du réseau tandis que l'autre électrode et les bords extérieurs de la région d'air entourant l'isolateur sont affectés au potentiel zéro (0). L'espace d'air est suffisamment grand pour minimiser l'effet sur la distribution du potentiel à proximité des électrodes et le long du profil de l'isolateur. La tension appliquée pour le modèle de la plaque isolant est égale 45 kV mais pour l'isolateur réel on applique une tension égale à 18 kV.

7.3.4. Maillage

Après avoir terminé l'étape initiale avec la structure du modèle, ainsi que la spécification des propriétés matérielles et des conditions aux limites, le problème de domaine entier est discrétisé en éléments finis de type tétraèdre pendant le processus de maillage.

Pour améliorer la précision des résultats de simulation calculés, un raffinement du maillage (figure 7.4) est effectué dans la région d'intérêt pour augmenter le nombre d'éléments de maillage le long de la surface de l'isolant et ainsi améliorer la précision de la solution. Le choix du nombre d'éléments est important et doit être équilibré, car moins d'éléments de maillage peut réduire la précision des résultats de simulation, tandis qu'un grand nombre d'éléments augmente la taille du problème et entraîne un temps de traitement plus long. Ainsi, il est important de trouver un optimum d'éléments qui facilitera un temps de calcul plus rapide sans compromettre la précision du résultat.

7.3.5. Résolution par la méthode d'éléments finis

Le modèle d'isolateur a été simulé dans un module AC/DC en utilisant un solveur de courant électrique quasi-statique, qui permet à l'utilisateur de spécifier la conductivité ainsi que la permittivité d'un matériau. En quasi-statique, les courants et les champs électromagnétiques varient lentement, ce qui est valable pour de nombreuses applications en haute tension, y compris les isolateurs extérieurs fonctionnant à des fréquences de 50 Hz. Le courant induit par les champs magnétiques, B et les champs électriques, le couplage E est négligé dans le calcul. Cette approximation peut être représentée par une expression mathématique :

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \quad (7.1)$$

Les équations de bases utilisées pour calculer le potentiel et champ électrique sont les équations de Maxwell [5.4].

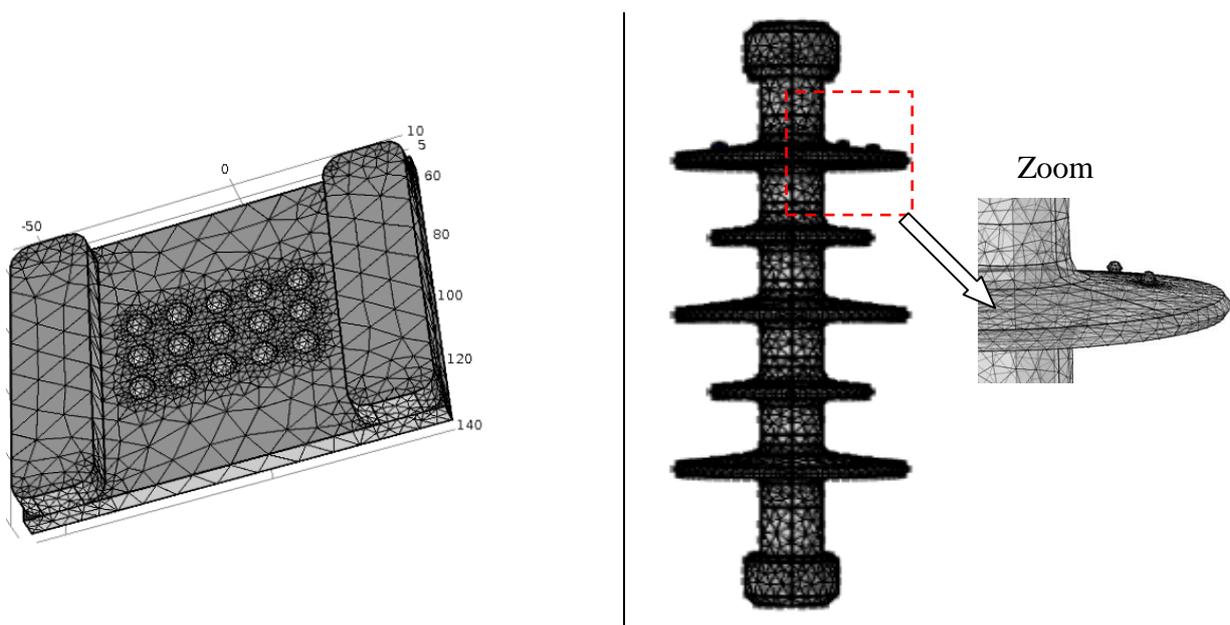


Figure 7.4 : Maillage

Le potentiel électrique crée par le champ électrique s'écrit :

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}V \quad (7.2)$$

En appliquant la divergence à la loi de Maxwell-Ampère :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} \times \vec{H} = \nabla \cdot \left[\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right] \quad (7.3)$$

Où \vec{J} et $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ représentent respectivement la densité de courant de conduction ($\vec{J} = \sigma \vec{E}$) et la densité de courant de déplacement ($D = \epsilon_r \epsilon_0 E$). Avec la loi de Gauss, $\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho$ et l'équation de continuité, le logiciel résout l'équation (7.3) en utilisant le domaine des pas de temps pour obtenir le potentiel électrique et les distributions de champ.

$$\nabla E = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (7.4)$$

Où ρ est la densité de charge, ϵ est la permittivité du matériau diélectrique ($\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$), ϵ_0 la permittivité du vide (8.854×10^{-12} F/m) et ϵ_r est la permittivité relative du matériau diélectrique. L'équation de Poisson peut être obtenue en substituant la relation (7.2) dans l'équation (7.4)

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad (7.5)$$

L'équation de Laplace peut être obtenue en faisant la charge d'espace $\rho = 0$,

$$\nabla^2 V = 0 \quad (7.6)$$

Dans le domaine électrostatique, la conductivité électrique $\sigma = 0$ pour les zones isolantes et $\sigma = \infty$ pour des zones conductrices, donc la distribution du potentiel électrique dans le domaine électrostatique est obtenue de la résolution de l'équation de Laplace, où la charge électrique dans l'espace est nulle.

$$\nabla \epsilon \nabla V = 0 \quad (7.7)$$

$$-\nabla \cdot \frac{\partial}{\partial t} (\epsilon_0 \epsilon_r \nabla V) - \nabla \cdot (\sigma \nabla V) = 0 \quad (7.8)$$

7.4. Résultats et discussions

7.4.1. Isolation plane

Une plaque en silicone de dimension $100 \times 80 \times 5 \text{ mm}^3$ délimitée par deux électrodes planes est utilisée dans cette partie. La distance interélectrode est égale à $d = 6 \text{ cm}$ (figure 7.1). La tension appliquée est de 45 kV, ce qui signifie que l'intensité du champ électrique moyen est de $45/6 = 7.5 \text{ kV/cm}$.

7.4.1.1. Gouttes d'eau

L'objectif de cette simulation est de voir l'effet des gouttes d'eau sur la distribution du champ et la potentiel électrique sur long de la ligne de fuite de l'isolation pour de la présence des gouttes d'eau sur sa surface. Le dessin de l'isolation est obtenu à l'aide Solid Works.

a. Sans gouttes d'eau

Dans ce cas, la simulation a été effectuée en absence de gouttes d'eau entre les électrodes. Ceci a été fait afin d'avoir des valeurs de référence de la distribution de la tension et le champ électrique. Les bornes des électrodes de haute tension et de masse sont parallèles, on remarque que les lignes équipotentielles sont parallèles aux deux bornes et le champ électrique est perpendiculaire aux électrodes.

Afin de prouver l'intensification du champ électrique par la goutte d'eau, une analyse a été effectuée sur un modèle de diélectrique de surface par simulation et investigation de l'interaction entre un champ électrique et une goutte d'eau. La figure 7.5 montre les lignes équipotentielles sur la surface sèche du diélectrique.

Un modèle de surface polymère est connecté à une alimentation haute tension à une extrémité et à la masse à l'autre extrémité. Une tension alternative de 36 kV est fournie pour analyser les lignes équipotentielles distribuées entre les bornes d'électrode HT et la masse.

La répartition des lignes équipotentielles sur la surface diélectrique sèche est uniforme comme le montre la figure 7.5.a. Le champ électrique sur la surface hydrophobe sans goutte est uniforme et on remarque que les valeurs maximales du champ électrique au niveau de l'électrode est égale à $2,45 \cdot 10^5 \text{ V/cm}$. Les valeurs minimales du champ entre les électrodes sont de $0,85 \cdot 10^5 \text{ V/cm}$. La distribution du champ électrique donne la forme non linéaire pour le graphique du champ électrique tangentiel en raison d'une distribution de potentiel non uniforme entre les électrodes (figure 7.6).

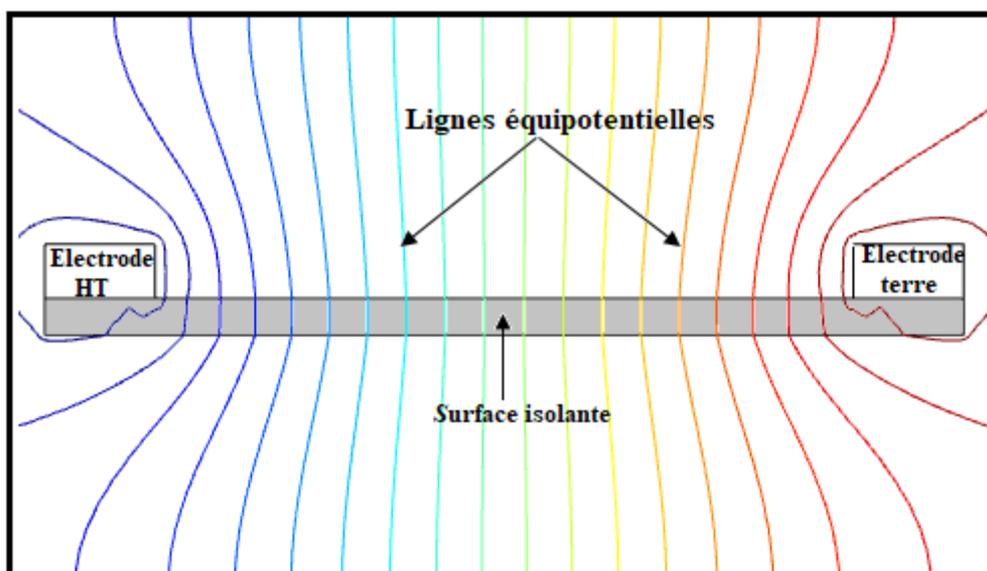
b. Avec goutte d'eau

La forme de la goutte d'eau est supposée sphérique à mi-chemin de l'espacement des électrodes. Le diamètre de la goutte d'eau est de 3 mm. La permittivité relative de la goutte d'eau est de 81 et sa conductivité est égale à $180 \mu\text{S}/\text{cm}$.

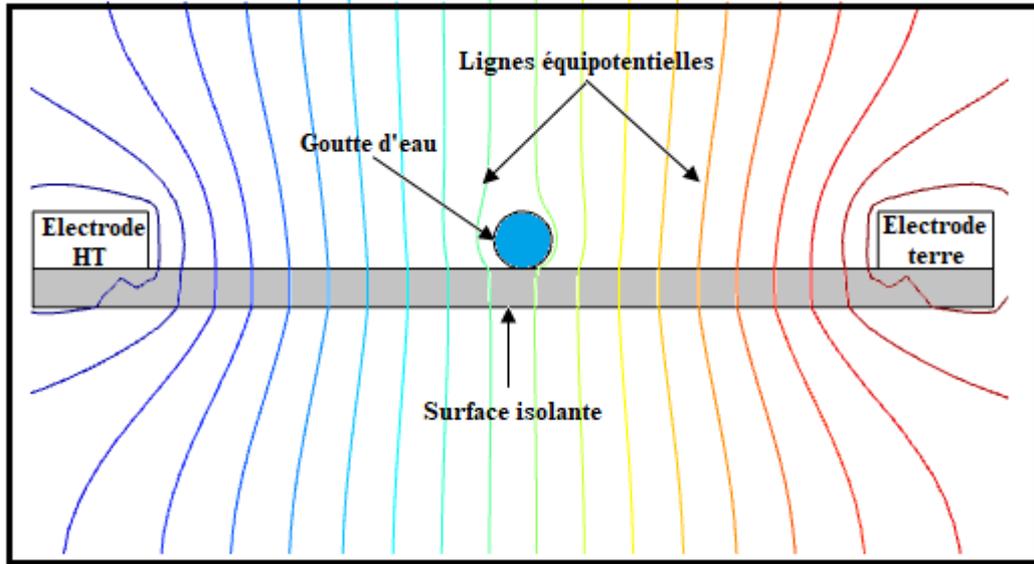
La figure 7.5.b montre les lignes équipotentielles avec une seule goutte d'eau au centre sur la surface. La distribution du champ électrique le long de la surface de la plaque est également calculée et représentée sur la figure 7.6.

Pour une seule goutte d'eau, on remarque que les valeurs maximales du champ électrique au niveau de la goutte d'eau se trouvent à l'extrémité de la goutte au point triple (goutte - plaque - air) [7.5], puisque il y a des décharges dans cette zone et sont plus importantes côté électrode haute tension, le maximum apparaît encore sur les électrodes, avec sa valeur maximale de $2,6 \cdot 10^5 \text{ V}/\text{cm}$. Les valeurs minimales du champ sont à l'intérieur de la goutte et d'environ $0,15 \cdot 10^5 \text{ V}/\text{cm}$;

La figure 7.7 représente la vue agrandie des lignes équipotentielles et des lignes de champ électrique autour de la goutte d'eau sur la surface de l'isolant. Les lignes continues représentent les lignes équipotentielles; les lignes remplies sont utilisées pour les lignes de champ électrique. On peut voir sur la figure 7.7 que la présence de la goutte d'eau provoque une distorsion considérable dans la configuration des lignes équipotentielles et des lignes de champ électrique au voisinage de la goutte d'eau. Pour la simulation de la plaque, l'intensité du champ électrique est significativement augmentée à l'interface de la goutte d'eau, de l'air et de la surface isolante.



a) Sans goutte



b) Avec goutte

Figure 7.5 : Les lignes équipotentiellles

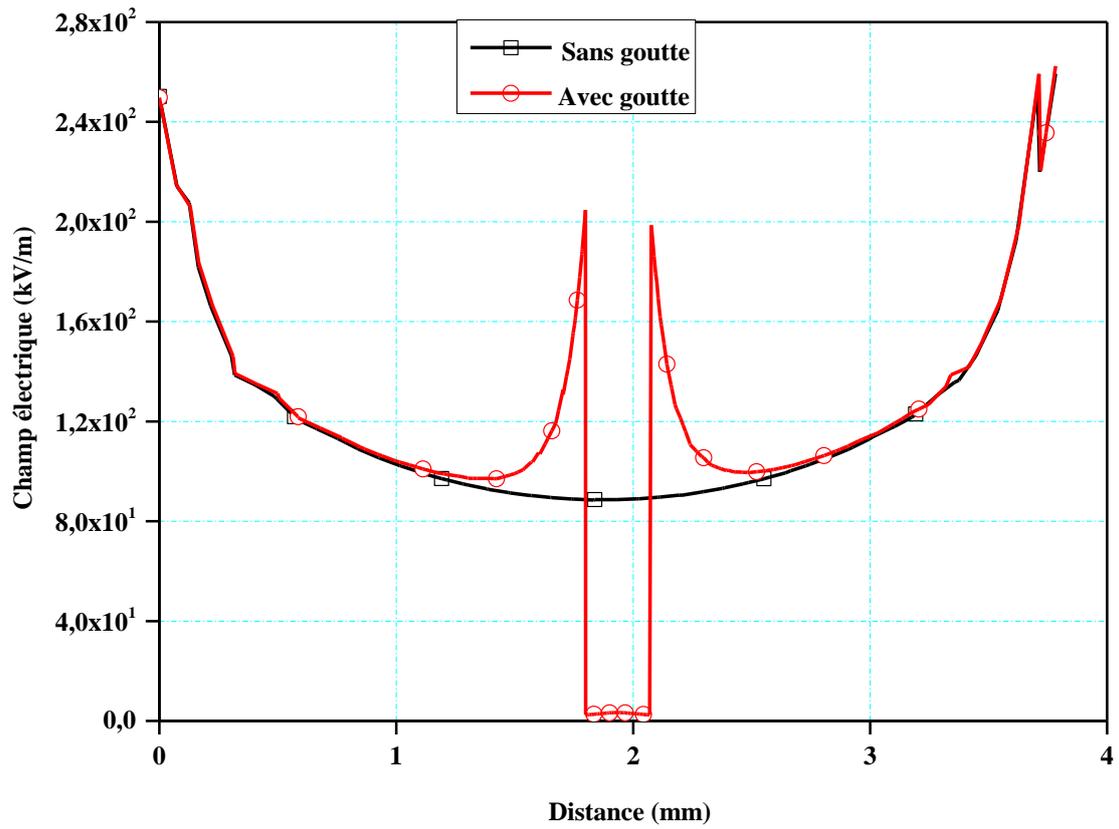


Figure 7.6 : Distribution du champ électrique avec et sans goutte

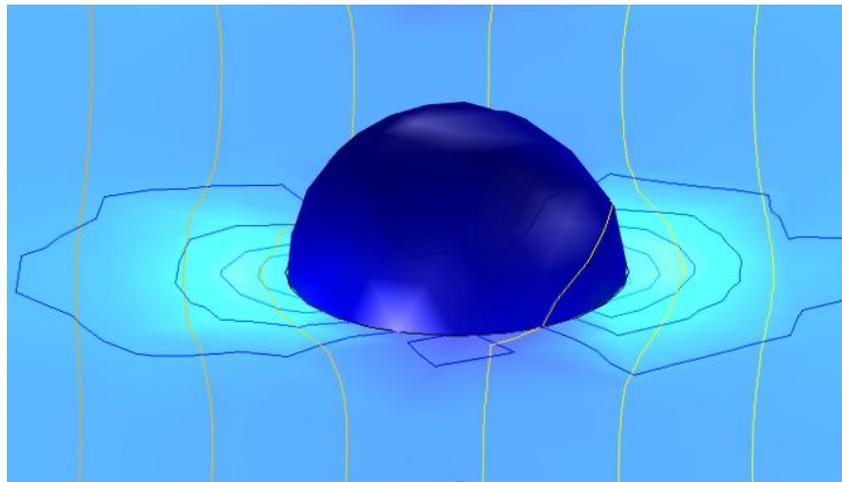


Figure 7.7 : Lignes équipotentielles et lignes de champ électrique autour d'une goutte d'eau sur la surface de l'isolant

7.4.1.2. *Effets de l'angle de contact, de la taille, de la forme, de la distance et de la conductivité des gouttes d'eau*

a. Angle de contact de la goutte

Pour une goutte d'eau sur la plaque isolante, l'intensité du champ électrique la plus élevée est à l'interface entre la goutte d'eau, l'air et la plaque isolante. Il est d'importance pratique de connaître l'amélioration du champ électrique à divers angles de contact de la goutte d'eau.

Sous différentes étapes d'hydrophobicité de la surface de la plaque de SiR, l'angle de contact de la goutte d'eau varie. Quatre valeurs typiques de l'angle de contact sont considérées à des fins de comparaison, qui sont 120, 90, 60 et 30 degrés. La zone de contact dans cette étude est définie comme un cercle de 4 mm de diamètre. La permittivité relative de la goutte d'eau est de 81 et sa conductivité est égale à 180 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

La figure 7.8 montre la vue des lignes équipotentielles et des lignes de champ électrique autour de la goutte d'eau pour ces quatre cas. La goutte d'eau est positionnée sur le centre de plaque de SiR. Les lignes continues représentent les lignes équipotentielles; les lignes remplies sont utilisées pour les lignes de champ électrique. L'angle θ indique l'angle de contact entre la goutte d'eau et la surface diélectrique. L'angle de contact est un facteur important pour décrire la capacité hydrophobe de l'isolateur. On remarque que la goutte d'eau avec un angle de contact plus grand provoque plus de distorsion dans la configuration de lignes équipotentielles. La figure 7.8.a et la figure 7.8.b montrent la goutte sphérique qui donne l'angle de contact de 90° et plus. Cela indique que la surface est hydrophobe et a une faible énergie de surface. La figure 7.8.c et la figure 7.8.d montrent un petit angle de contact

inférieur à 90° entre la surface du diélectrique et une goutte telle qu'une goutte aplatie. Cela signifie que la surface est hydrophile et a une grande énergie de surface.

Les valeurs maximales de l'intensité du champ électrique sur la surface de la goutte d'eau avec différents angles de contact sont données dans le tableau 7.2. La relation entre le facteur d'amplification du champ électrique et l'angle de contact est illustrée par la figure 7.9.

Tableau 7.2 : Valeurs du champ électrique maximal sur la surface de la goutte d'eau avec différents angles de contact

Angle de contact $\Theta(^{\circ})$	30	60	90	120
Champ électrique maximale (kV/m)	6,83e2	7,81e2	1,13e3	1,62e3

Les résultats de la figure 7.9 montrent que de l'amplification du champ électrique augmente avec l'accroissement de l'angle de contact. La relation entre eux est presque linéaire. Bien qu'en réalité, la forme de la goutte d'eau sur l'ailette verticale puisse ne pas être sphérique, les résultats peuvent encore être utilisés pour estimer l'amélioration du champ électrique pour la goutte d'eau avec le même angle de contact.

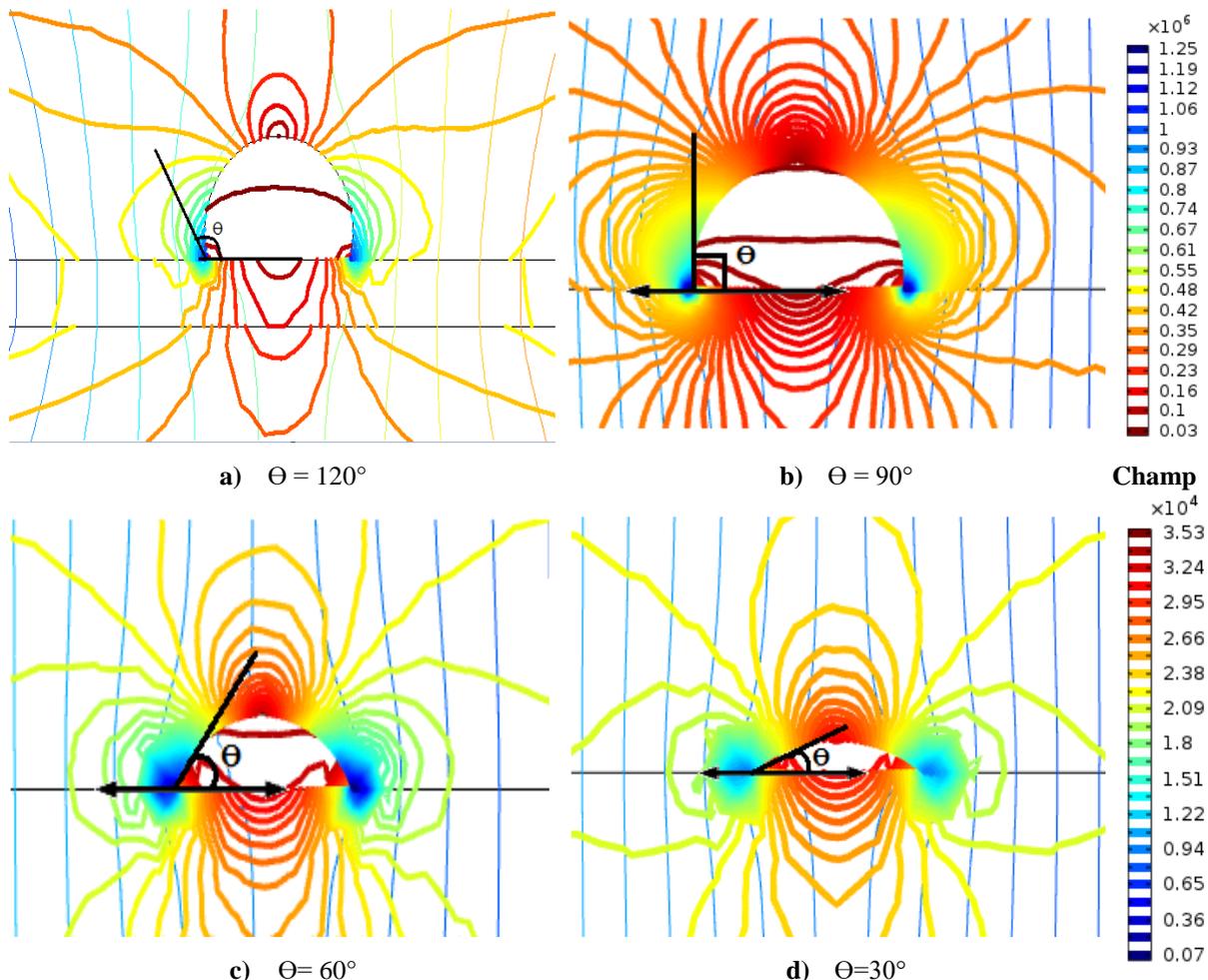


Figure 7.8 : Lignes équipotentielles et de champ autour d'une goutte d'eau à angle de contact variable

Tension

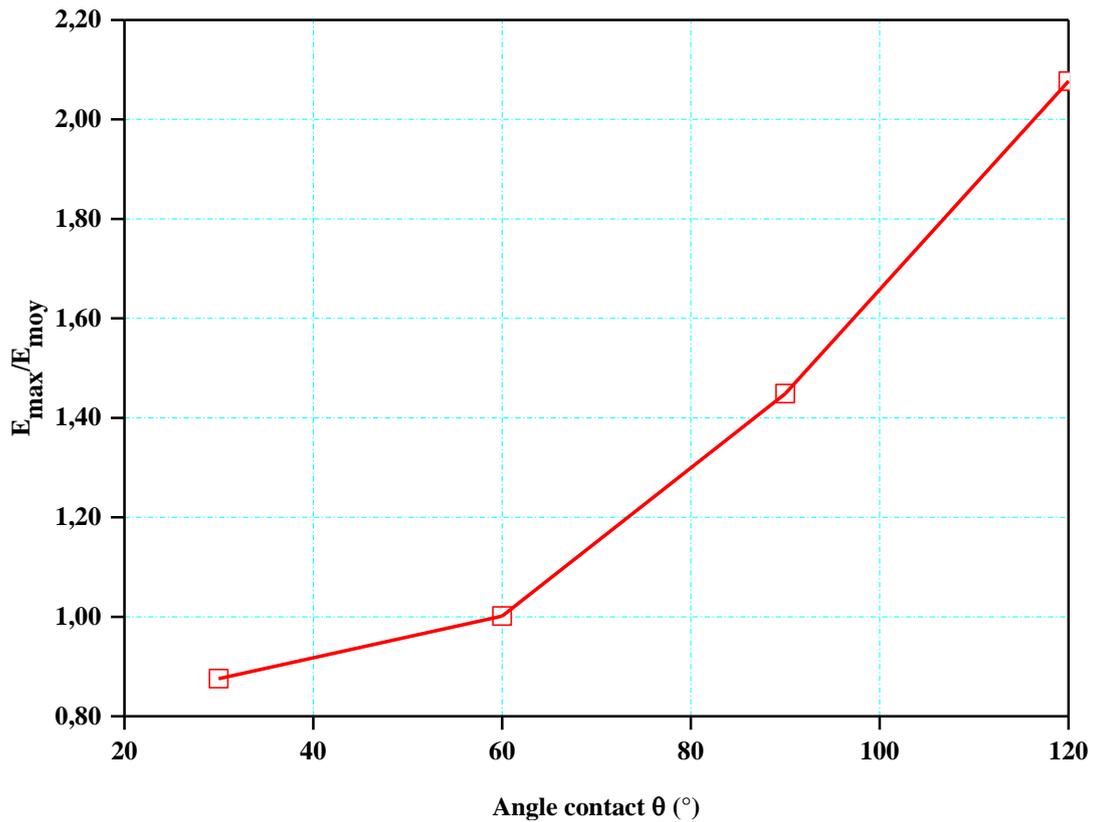


Figure 7.9 : Champ électrique maximal en fonction des différents angles de contact sur la surface de l’isolant

b. Volume de la goutte

Plusieurs cas de simulation ont été effectués pour évaluer l’influence du volume des gouttes d’eau sur la distribution du champ électrique des isolants en silicone. La forme d’une goutte d’eau typique est hémisphérique. Les diamètres de gouttes d’eau typiques dans cette étude sont entre 1.75 à 7.5 mm. Les volumes des gouttes d’eau utilisés dans cette simulation varient entre 5 et 120 μ l. Le tableau 7.3 donne la correspondance entre le volume et le diamètre de mouillage des gouttes.

La figure 7.10 présente les résultats de simulation de la variation de l’amplification du champ électrique pour différents volumes de gouttes, avec la conductivité fixé à 180 μ S/cm. On remarque que le facteur d’amplification augmente lorsque le volume de la goutte croît.

Tableau 7.3 : Correspondance volume/diamètre de la goutte [2.8]

Volume de la goutte d’eau (μl)	5	10	20	30	40	50	60	90	100	120
Diamètre correspondant (mm)	1,75	2,3	3,36	4	4,25	4,7	5	5,86	6,28	7,25

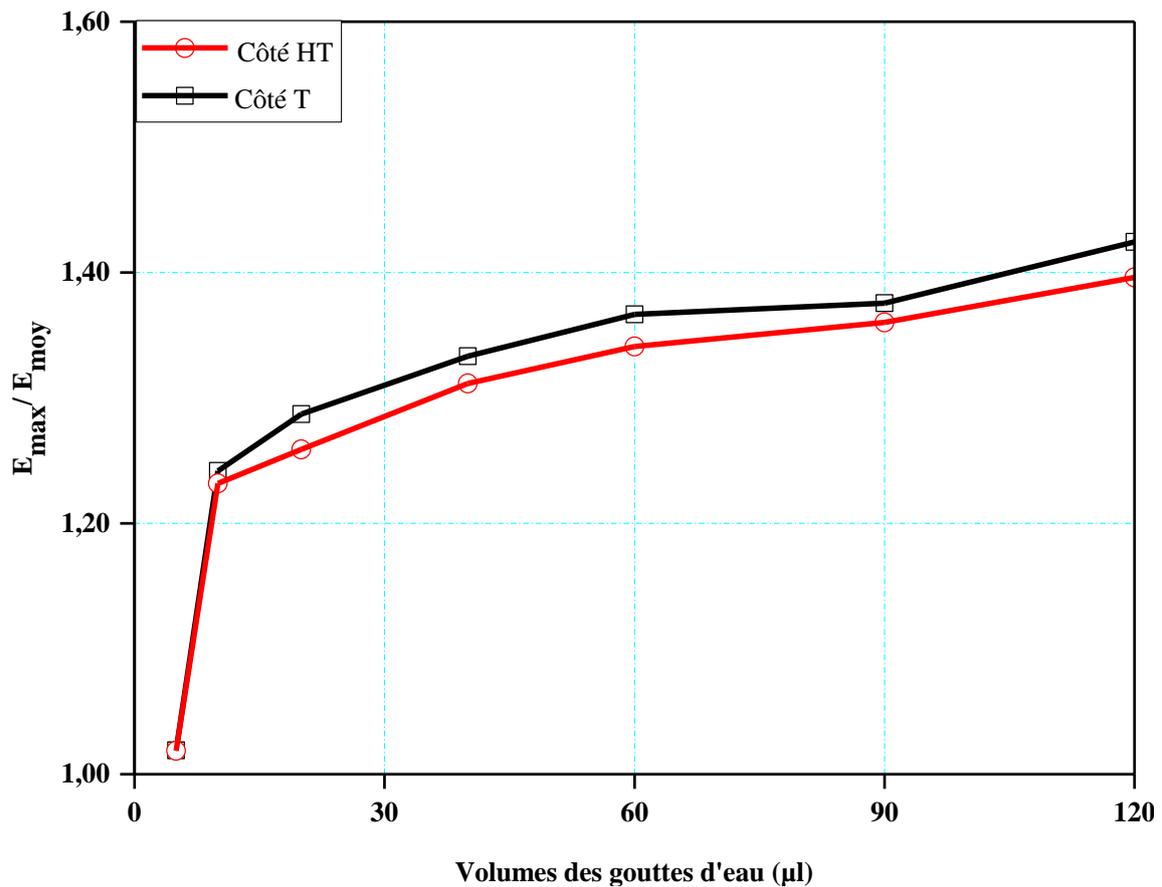


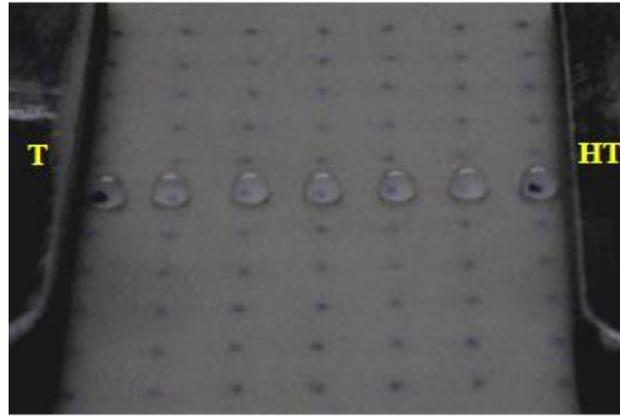
Figure 7.10 : Intensification du champ électrique résultant en fonction du volume de la goutte

c. Déformation d'une goutte

Les figures 7.11 à 7.13 montrent les résultats d'expériences et de simulations analysant le comportement des gouttes d'eau dans un champ électrique et leur effet sur la distribution du champ électrique. Les simulations ont été effectuées avec une distribution variable de gouttes d'eau dans la zone interélectrode.

La figure 7.11 présente une sélection d'images représentant les changements dans la forme des gouttes d'eau distribuées symétriquement dans la zone interélectrode.

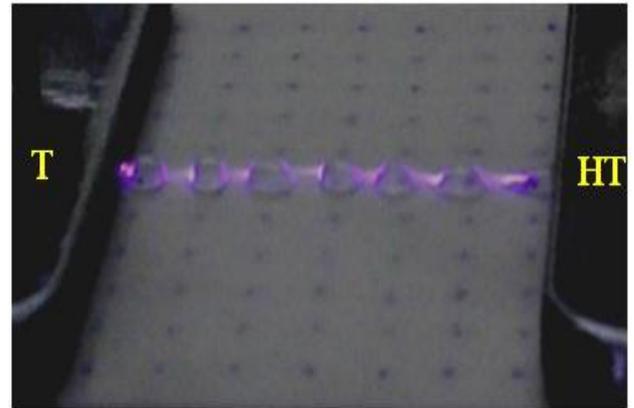
Dans cette partie, des expériences ont été réalisées afin de comprendre l'influence des gouttes d'eau à champ non uniforme mise sous tension alternative. La conductivité électrique de la solution d'eau utilisée est gardée constante et égale à 180 $\mu\text{S}/\text{cm}$ dans cette étude. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 7.11.



a. Sans déformation



b. Avec déformation



c. Microdécharges

Figure 7.11 : Comportement de nombreuses gouttes d'eau

La figure 7.12 montre la distribution de l'intensité du champ électrique sur la ligne de fuite de l'isolation dans le cas de gouttes non déformées et celui où les gouttes d'eau sont déformées. Il en résulte que le champ est fort aux extrémités d'une goutte aux points triples et faible au milieu de la goutte. Il est à souligner que la valeur maximale du champ électrique est atteinte au niveau de la goutte située au milieu de la rangée et diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne de cet endroit. Nous pouvons conclure que ce pic de champ électrique est dû surtout à l'effet simultané du grand nombre de gouttes d'eau se trouvant à cet endroit résultant de l'application de la tension croissante à l'isolation.

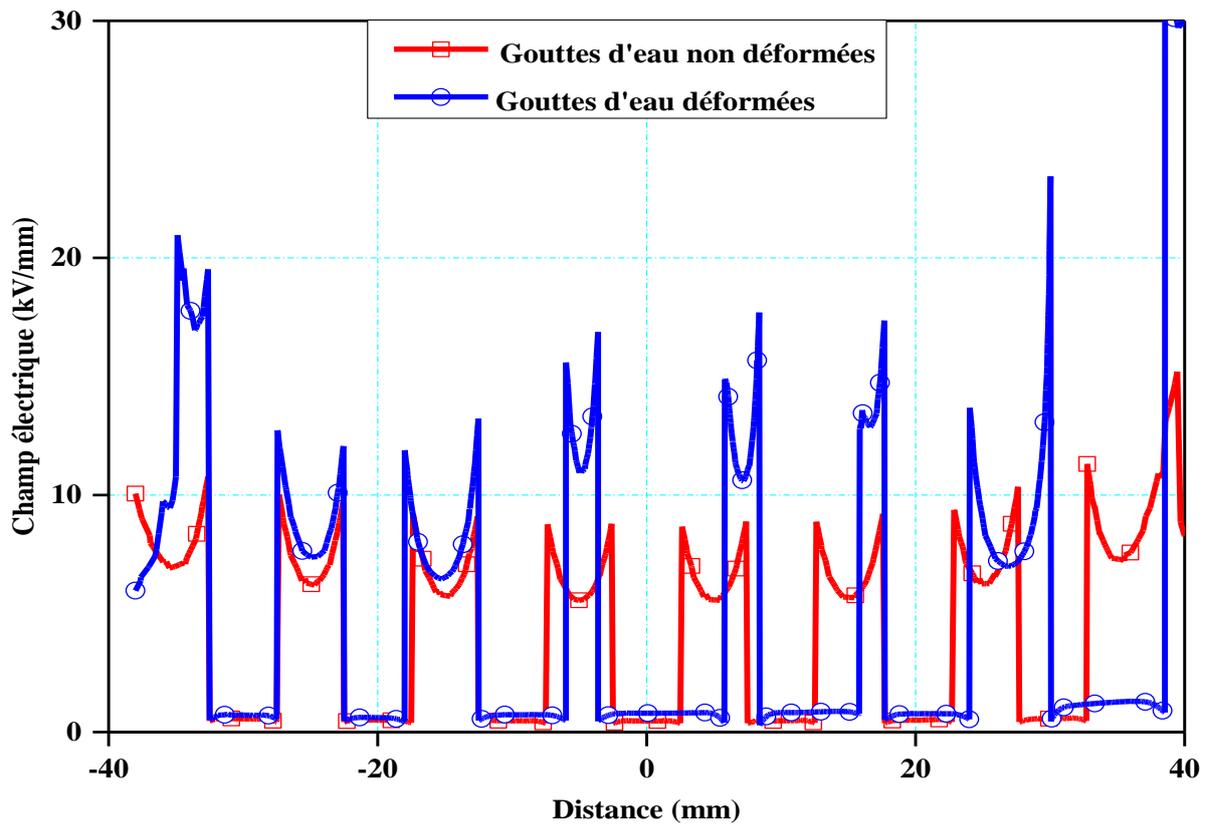


Figure 7.12 : Champ électrique sur une ligne de gouttes d'eau sans déformation et des gouttes d'eau déformées avant le contournement

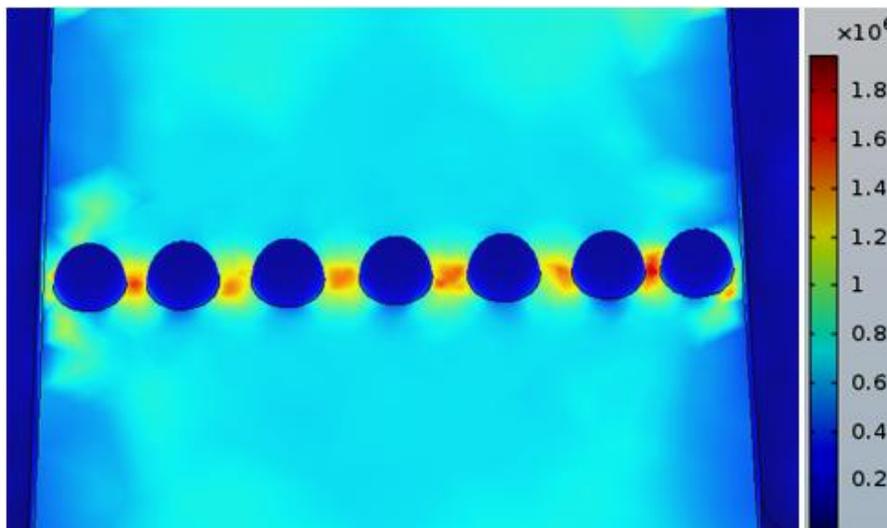
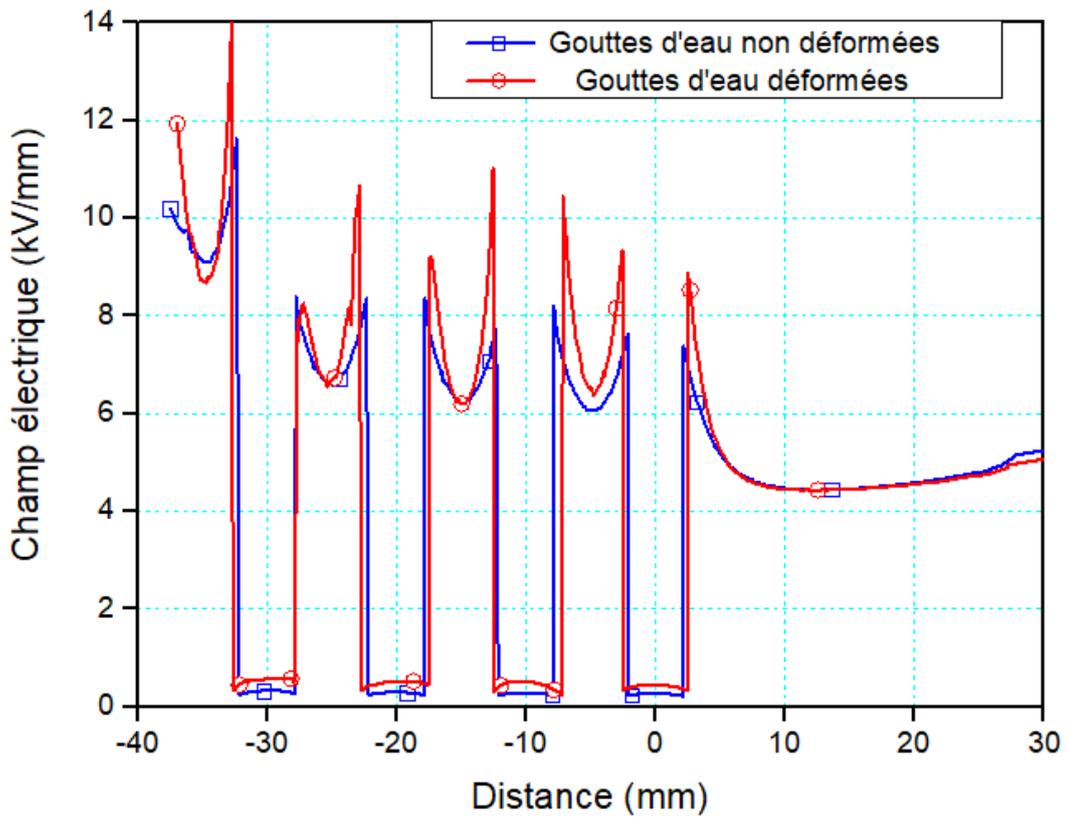


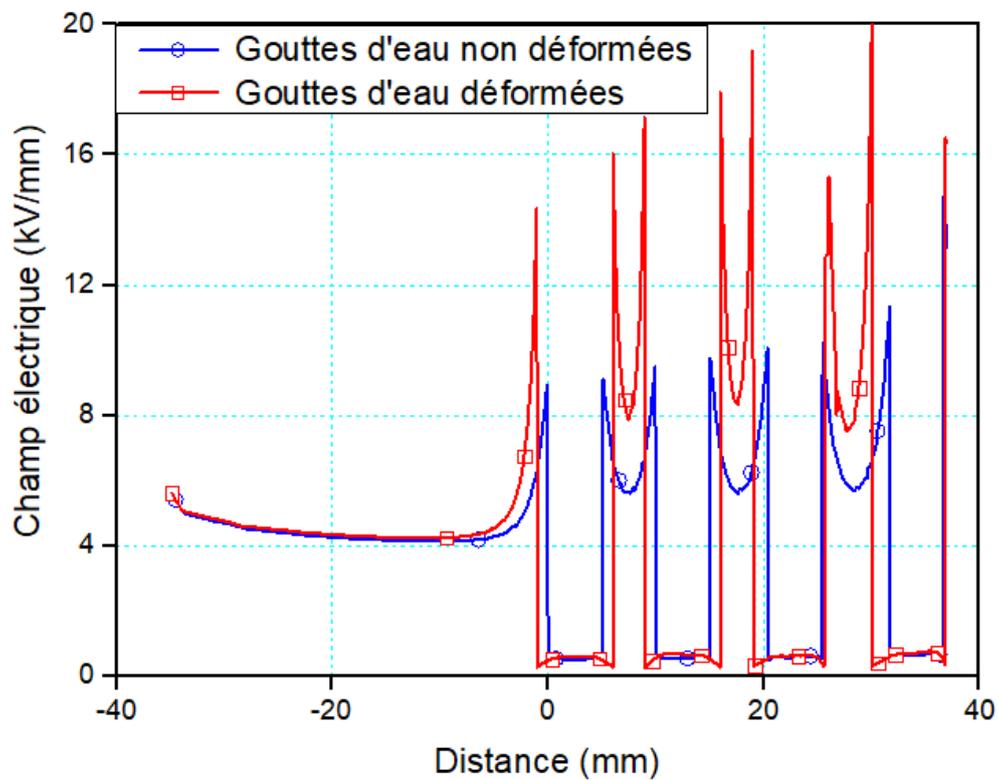
Figure 7.13 : Distribution du champ électrique dans la région interélectrode, avant le contournement

d. Positions des gouttes par rapport des électrodes

Les photographies présentées sur la figure 7.14 illustrent les différentes phases de contournement de l'isolation. La déformation des gouttes croît en fonction de l'élévation de la tension.



a) Près de l'électrode terre



b) Près de l'électrode haute tension

Figure 7.15 : Champ électrique sur une rangée de gouttes d'eau avec ou sans déformation en fonction de leur position par rapport aux électrodes

e. Effet de la distance entre deux gouttes

L'influence de la distance entre les gouttes d'eau sur l'amplification du champ électrique est étudiée pour une paire de gouttes hémisphériques de 5 mm de diamètre. La distance de séparation entre les gouttes varie entre 2 et 8 mm. La figure 7.16 montre le facteur d'amplification du champ électrique en fonction de la distance entre les deux gouttes d'eau.

Il en résulte que plus la distance entre les gouttes d'eau est réduite, plus le facteur d'amplification du champ est élevé. Lorsque la distance entre les deux gouttes d'eau est de 10 mm, le facteur d'amplification du champ électrique est d'environ 1,7, alors que pour une distance de séparation de goutte de 2 mm, le facteur d'amplification est réduit à 2,06.

f. Conductivité de la goutte

La conductivité des gouttes d'eau influe également sur la distribution du champ et de la tension électrique. Nous utilisons une goutte d'eau de forme hémisphérique et de 2,43 mm de diamètre. La permittivité relative est de 81. Trois valeurs différentes de la conductivité électrique (250 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$) ont été prises en considération. Il résulte de la figure 7.17 que la valeur du champ au niveau des extrémités de la goutte diminue avec l'augmentation de la conductivité.

Le facteur d'amplification passe de 6,0 à 6,50 pour une conductivité de 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ceci est illustré par la figure 7.18, l'augmentation de la conductivité de 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ou à 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à une faible influence sur l'amplification du champ électrique.

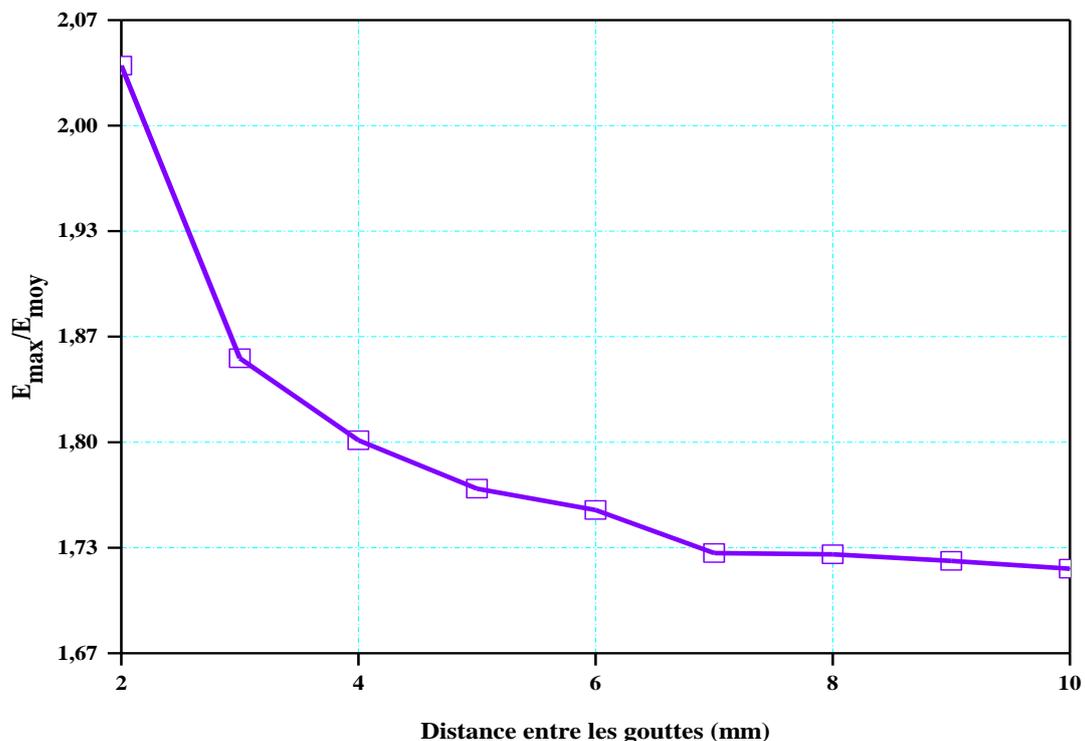


Figure 7.16 : Effet de la distance de séparation des gouttes sur l'amplification du champ électrique

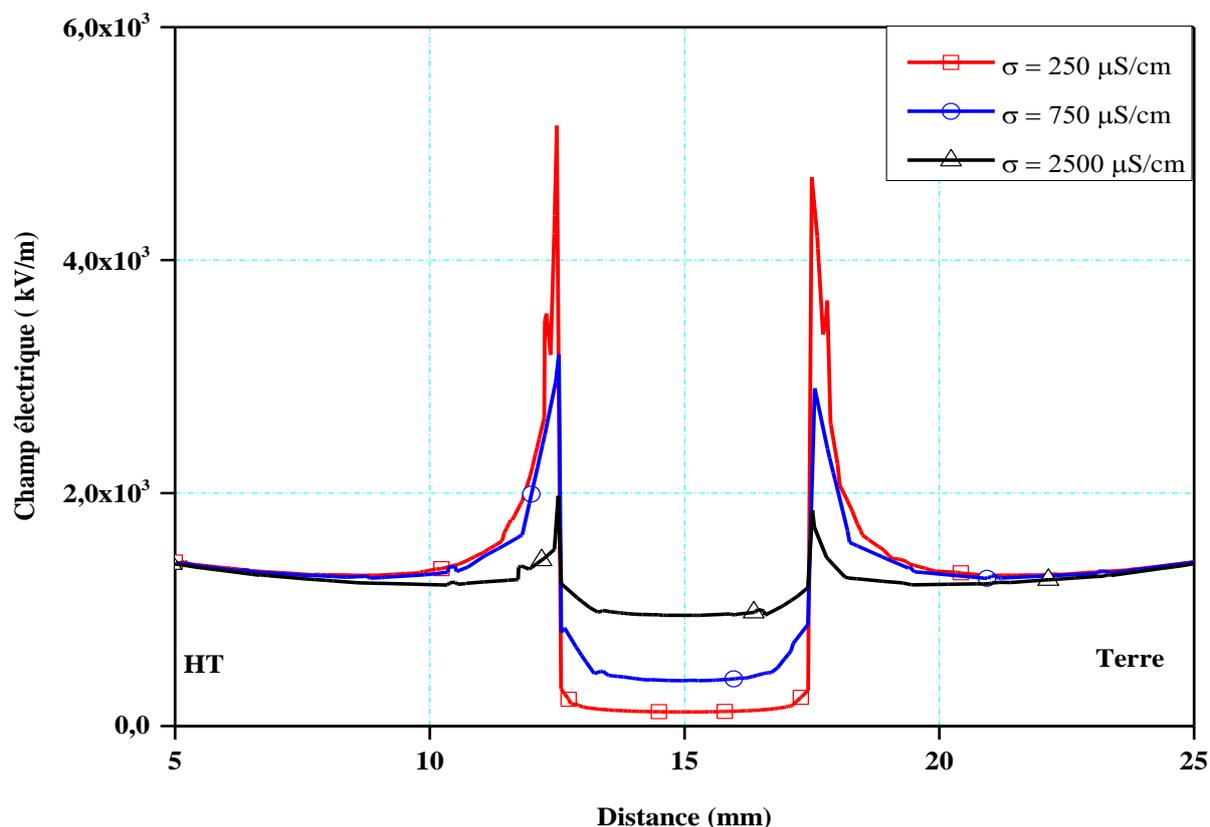


Figure 7.17 : Distribution du champ avec trois gouttes d'eau de différentes conductivités

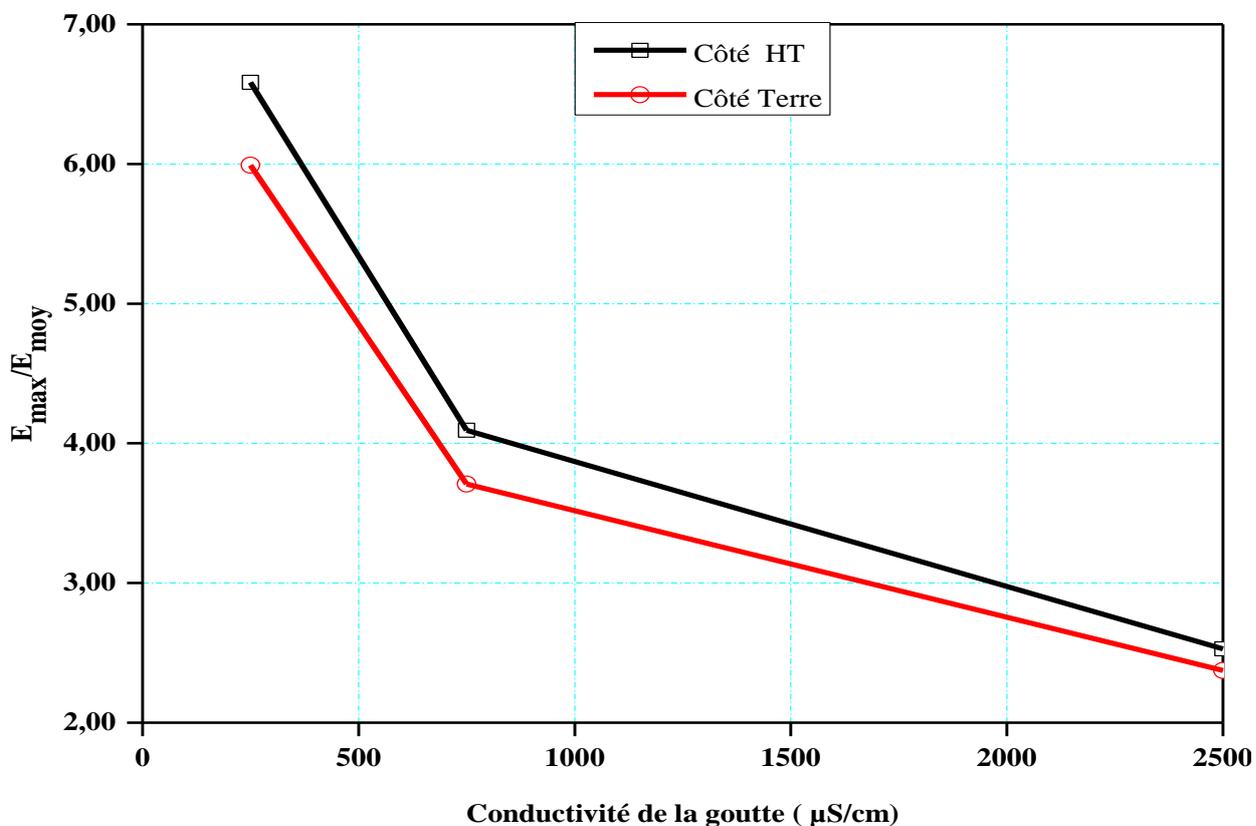


Figure 7.18 : Intensification du champ électrique résultant en fonction de différentes conductivités

7.4.2. Isolateur réel

Le logiciel COMSOL Multiphysics est utilisé pour simuler la chute d'eau sur la surface de l'isolateur. Dans un premier temps, l'isolateur du sectionneur est modélisé dans COMSOL, puis une goutte d'eau est placée sur la première ailette. Ensuite, la goutte est déplacée le long de celle-ci. Le comportement du champ électrique au voisinage d'une goutte d'eau est indiqué dans les sous-titres suivants.

7.4.2.1. Résultats de 2D

Après avoir utilisé le modèle donné en figure 7.4, les résultats de simulation du potentiel et du champ électrique sont résumés en figure 7.20.

Pour une compréhension meilleure et facile, seulement la première ailette a été choisie. Les valeurs du champ électrique ont été déterminées le long de la première ligne au voisinage des points noirs indiqués sur la figure 7.19. Les résultats de mesure sont résumés en figure 7.21.

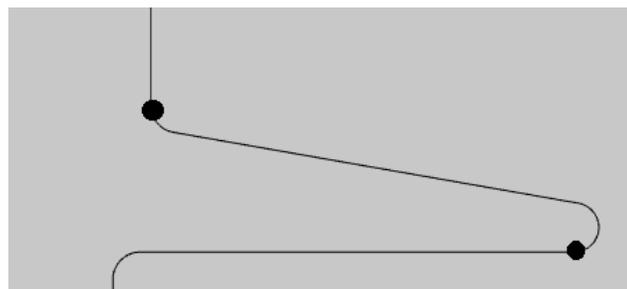


Figure 7.19 : Ligne extérieure créée sur la première ailette

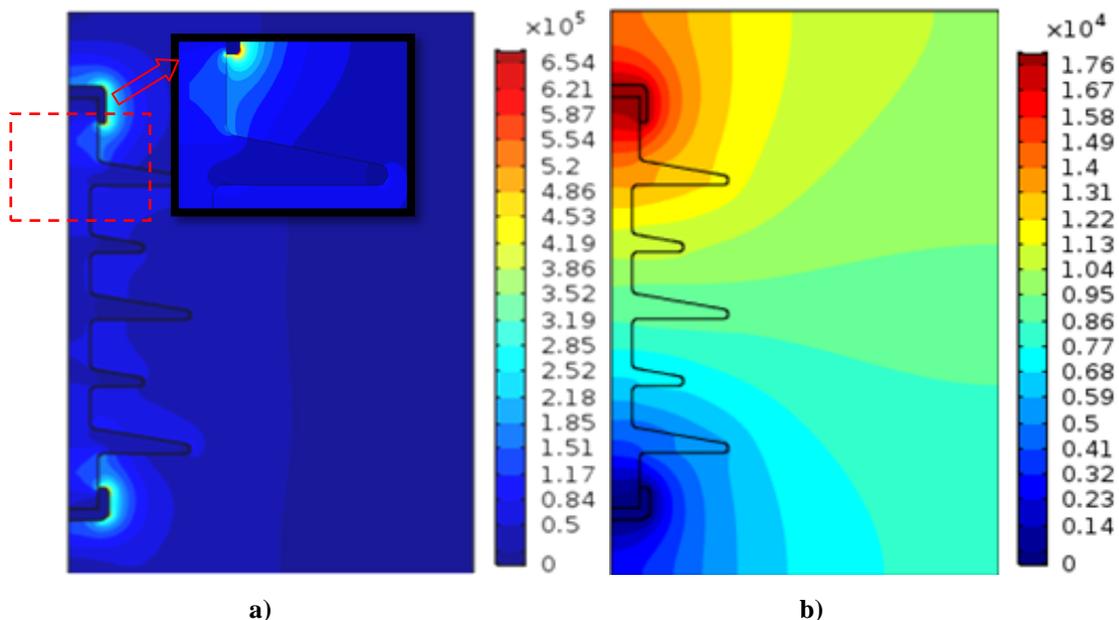


Figure 7.20 : Distributions du champ (a) et de tension électrique (b) sur un isolateur propre

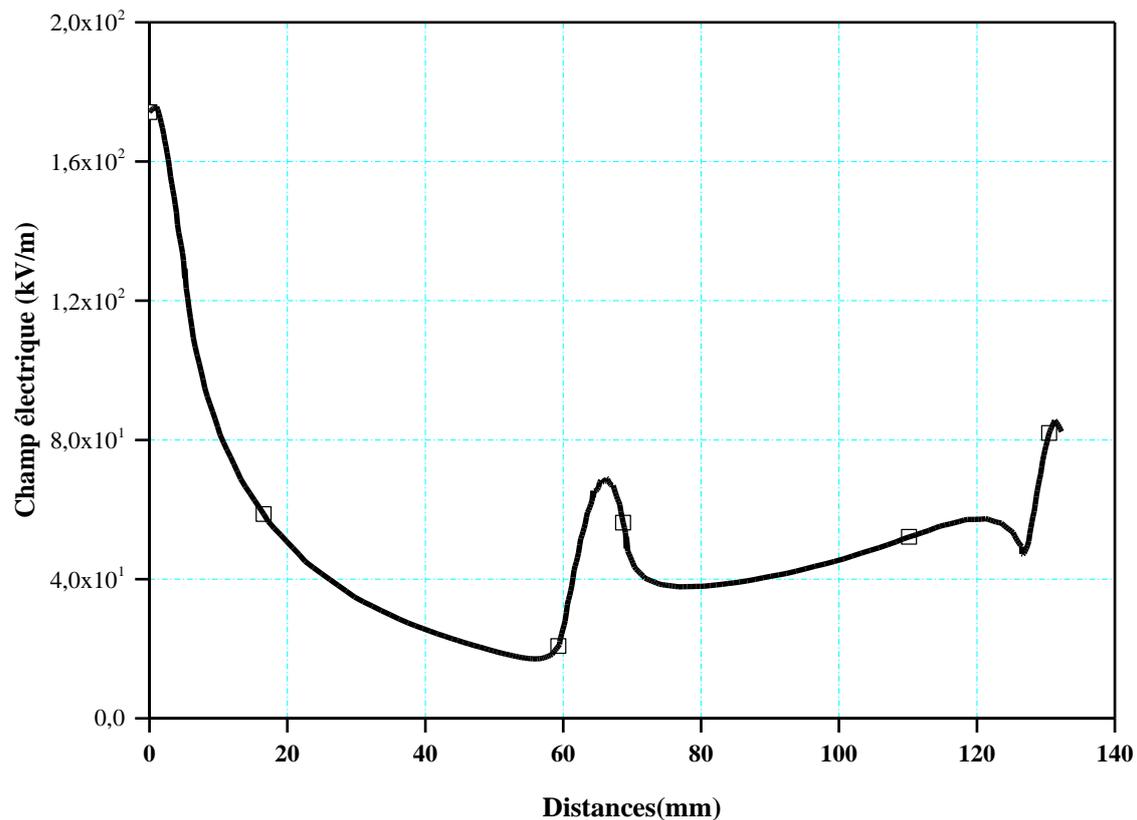


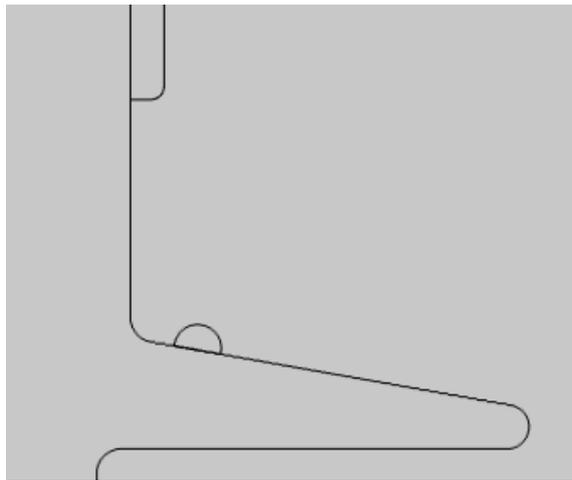
Figure 7.21 : Distribution du champ électrique le long de la ligne de référence (sans gouttes d'eau)

a. Influence de la position de la goutte d'eau

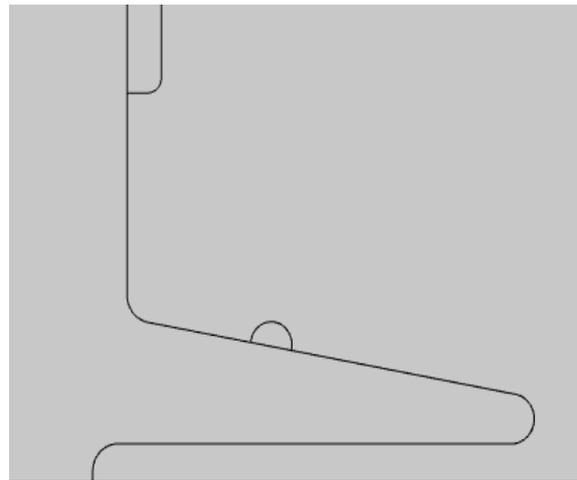
La position de la goutte d'eau sur la première ailette de l'isolateur considéré se fait de manière incontrôlée. Maintenant, une goutte d'eau est placée sur la première ailette de l'isolateur et déplacée vers l'extrémité de l'ailette. Pour simuler cette présence aléatoire de la goutte d'eau, nous allons étudier l'effet de la position de la goutte d'eau sur la première ailette sur la distribution de champ électrique lors de son déplacement. Sur la figure 7.22 sont indiquées ses différentes positions.

La figure 7.23 illustre la distribution du champ électrique le long de la première ailette recouverte de goutte d'eau. On observe que le champ électrique à l'intérieur des gouttes d'eau est nul. Par conséquent, il est important d'étudier le comportement du champ électrique autour de la surface d'une goutte d'eau. La figure 7.24 montre une ligne de référence le long de la surface de la première ailette avec une goutte d'eau.

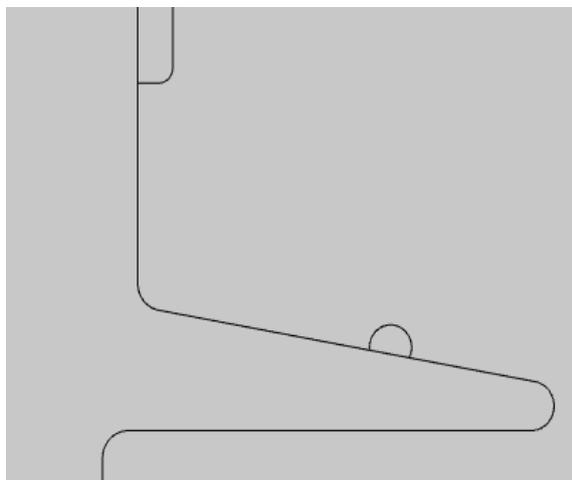
Les valeurs maximales du champ électrique près de la goutte d'eau sont prises en compte pour l'analyse. Il y a des changements significatifs dans la distribution du champ électrique près de la goutte d'eau. Les valeurs maximales du champ électrique à proximité d'une goutte d'eau sont indiquées dans le tableau 7.4.



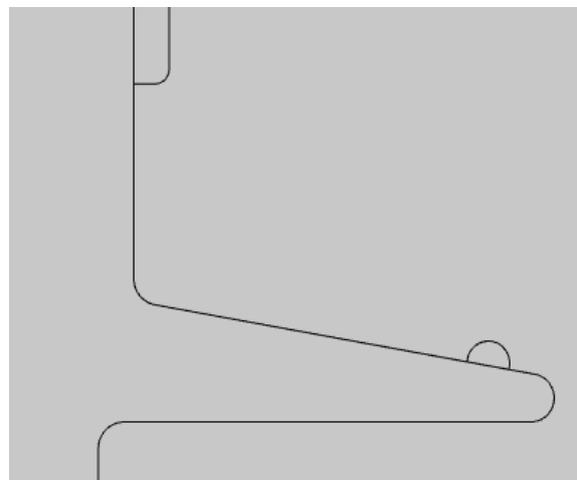
a) Première position



b) Deuxième position



c) Troisième position



d) Quatrième position

Figure 7.22: Différentes positions d'une goutte d'eau sur une ailette de l'isolateur

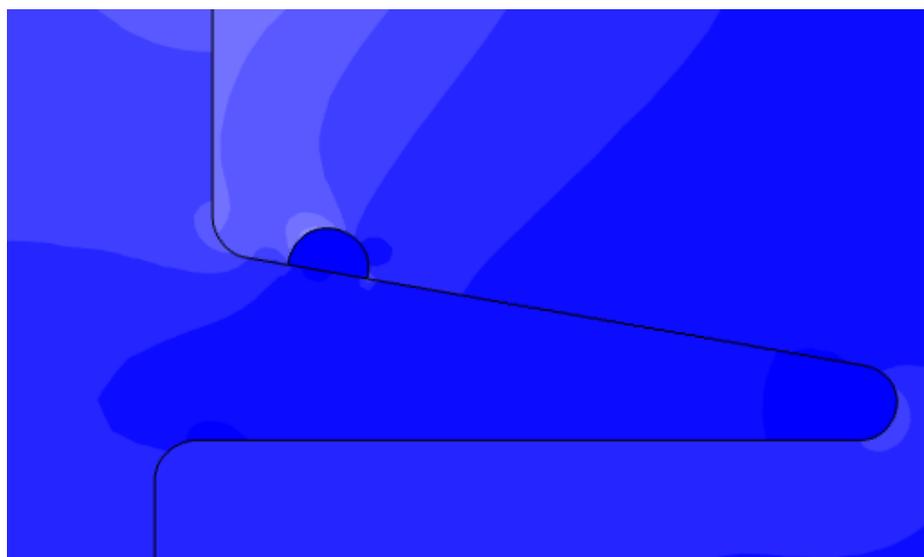


Figure 7.23 : Répartition du champ électrique le long du l'ailette avec une goutte d'eau

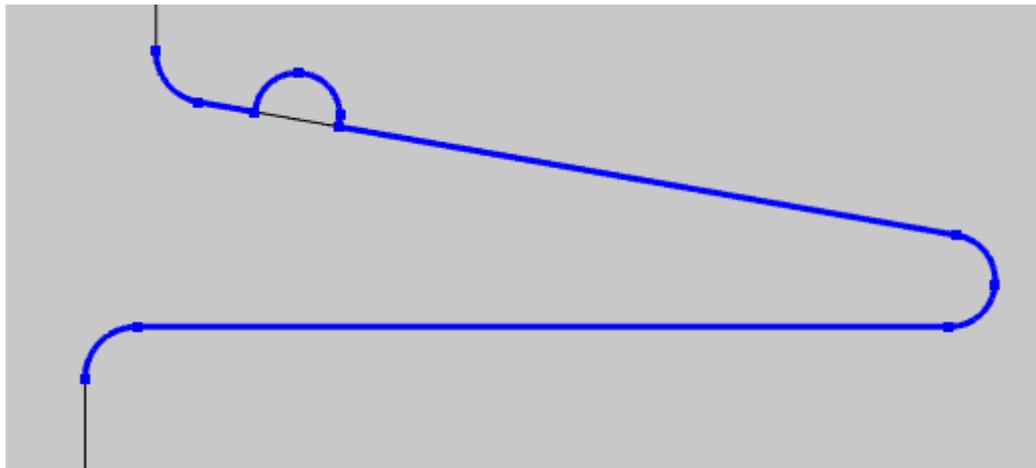


Figure 7.24 : Ligne de référence le long de l'ailette d'isolateur avec une goutte d'eau

Tableau 7.4 : Valeur maximale du champ électrique près de la goutte d'eau selon sa position en 2D

Position de goutte d'eau	Valeur maximale du champ électrique près de la goutte d'eau (kV / cm)
1	3,32
2	2,10
3	1,32
4	0,56

En absence d'une goutte d'eau, le champ électrique est accentué sur les arêtes vives de l'ailette de l'isolateur, en raison de l'accumulation de charges. Ces bords sont les bords extérieurs de l'ailette où l'ailette rejoint le noyau de l'isolateur. La valeur la plus élevée du champ électrique est au bord près de l'électrode sous haute tension. Lorsqu'une goutte d'eau est présente, le champ électrique est également plus élevé à l'angle de contact entre la goutte d'eau, l'isolateur et l'air (point triple). Une seule goutte d'eau a été considérée pour trouver le comportement du champ électrique près de lui. La simulation de la distribution du champ électrique due à la présence d'une goutte d'eau sur une surface isolateur a été réalisée à partir de la méthode des éléments finis (FEM).

Lorsque la goutte d'eau change de position le long de l'ailette, le champ électrique autour de la goutte d'eau change évidemment. Les résultats montrent que la valeur du champ électrique maximal E diminue progressivement le long de l'ailette (figure 7.25). La valeur E maximale est passée de 3,32 kV/cm à 0,56 kV/cm.

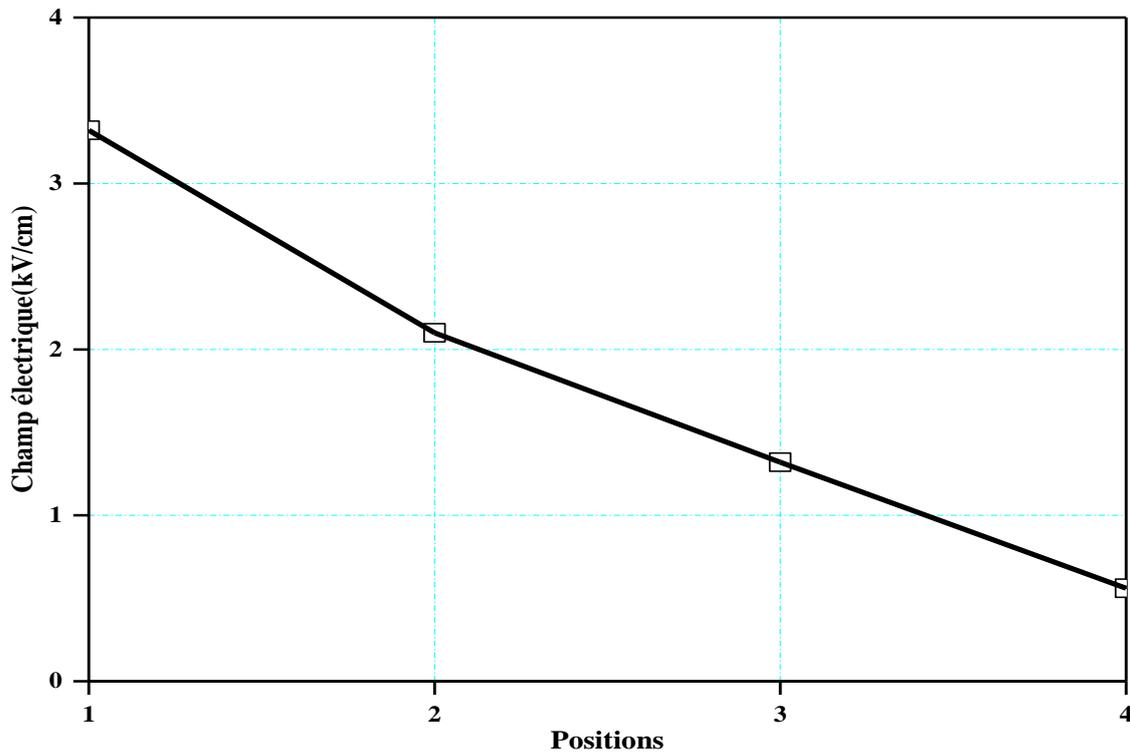


Figure 7.25 : Valeurs maximales du champ électrique près de la goutte d'eau à différentes positions en 2D

b. Goutte d'eau suspendue

Cette partie porte sur l'analyse des distributions du champ électrique obtenues en présence d'une goutte d'eau suspendue au bord de la première l'ailette (figure 7.26), afin de voir si elles permettent d'évaluer l'effet des gouttes d'eau suspendues (pluie) sur l'isolateur.

La figure 7.27 illustre la distribution des lignes de champ électrique le long de la première l'ailette y compris la goutte d'eau suspendue. Les distributions des composantes du champ électrique pour les cas sans goutte d'eau et avec la goutte d'eau suspendue ont été calculées et présentées sur la figure 7.28. Il est à remarquer un changement de la valeur du champ électrique de 6,8 kV/cm (sans pendaison) à 8.05 kV/cm (avec pendaison).

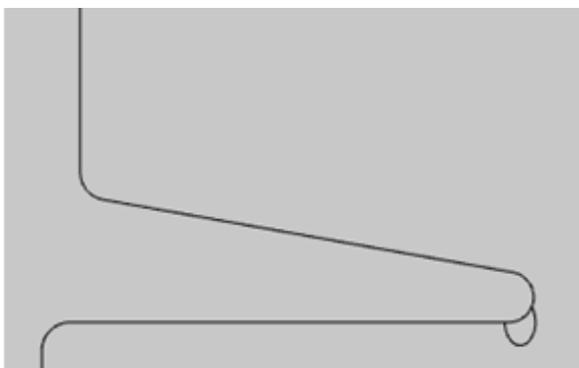


Figure 7.26 : Goutte d'eau suspendue

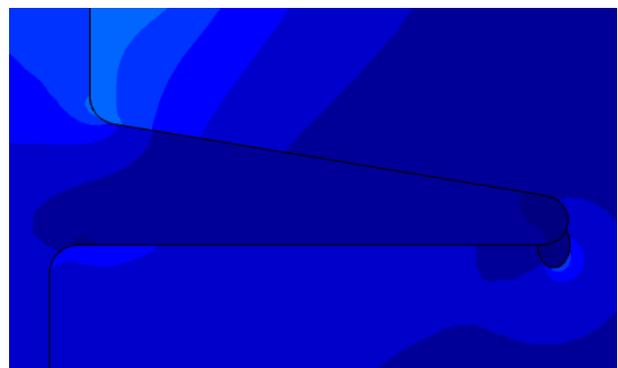


Figure 7.27: Champ électrique près de la goutte suspendue

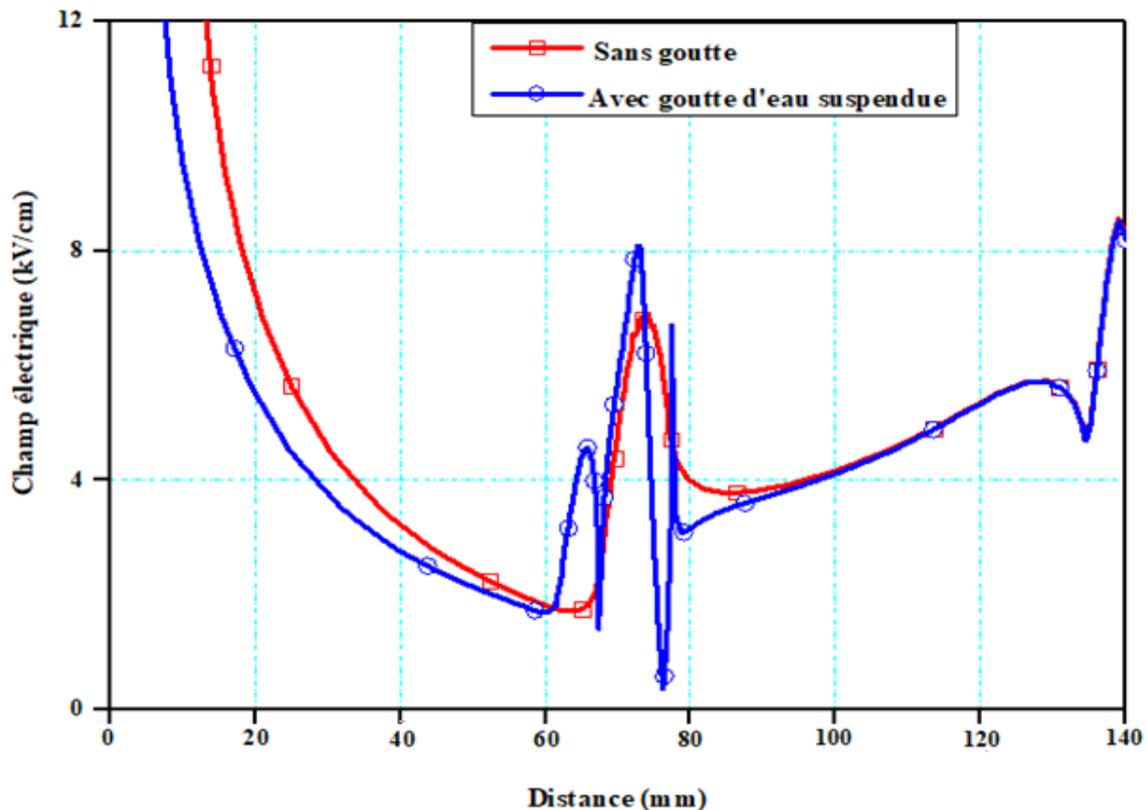


Figure 7.28 : Champ électrique avec et sans goutte d'eau suspendue

7.4.2.2. Effet des plusieurs gouttes d'eau

L'objectif de cette simulation est de voir l'effet de la présence des gouttes d'eau sur la distribution du champ et la tension électrique le long de la ligne de fuite de l'isolateur. La conception de base de l'isolateur est la silicone et une ligne de fuite (750 mm) entre deux supports (électrodes haute tension et terre) en cuivre, avec des gouttes d'eau.

Les figures 7.29.a et 7.29.b montrent les équipotentielles à proximité du modèle d'isolateur polymère dans des conditions de surface sèche et avec gouttes d'eau pour permettre une comparaison directe. Les lignes sont tracées à un intervalle de tension de 6 %, produisant ainsi un total de 25 lignes équipotentielles dans les résultats de simulation. Comme on peut l'observer sur les deux tracés, les lignes de contour sont concentrées généralement autour des électrodes métalliques, indiquant des régions de champ élevé sur l'isolateur polymère. Les équipotentielles sous l'état avec gouttes d'eau sont plus uniformément réparties que celles de la surface propre, donnant une meilleure répartition du champ le long du profil de la ligne de fuite. Ce comportement peut être expliqué par la présence des gouttes d'eau résistives qui aident à redistribuer les contours concentrés sur une plus grande surface.

La figure 7.30 représente la comparaison des distributions de la tension calculées le long de la ligne de fuite dans les deux conditions de surface. Les distances de fuite sont mesurées le long de la surface polymérique, en commençant à la haute tension, et en se déplaçant jusqu'à la borne mise à la terre.

Comme prévu, il était attendu que les valeurs maximales du potentiel se trouvent près de l'électrode haute tension et commencent à décroître jusqu'à son annulation quand on se rapproche de l'électrode de masse. Il est à remarquer l'absence d'écart de tension entre un isolateur sans et avec gouttes d'eau (figure 7.30). On peut donc conclure l'absence d'effet remarquable des gouttes d'eau sur la distribution de la tension le long de la surface de l'isolateur [7.6].

La figure 7.31 présente la variation de distribution du champ électrique pour différents cas (avec gouttes, sans gouttes). On remarque l'élévation des valeurs du champ en présence de gouttes d'eau par rapport au cas sans celles-ci. En outre, les gouttes de grande taille provoquent une augmentation élevée du champ par rapport à celle des gouttes de petite taille. Par contre les valeurs maximales du champ sont remarquables sur les extrémités des gouttes dans le point triple, à cause de la présence de décharges électriques dans cette zone.

Donc nous concluons que les gouttes d'eau, ont un effet évident sur la distribution du champ électrique le long de la surface de l'isolateur, sans oublier l'augmentation de l'intensité du champ électrique engendrée par la croissance du nombre de gouttes d'eau sur sa surface.

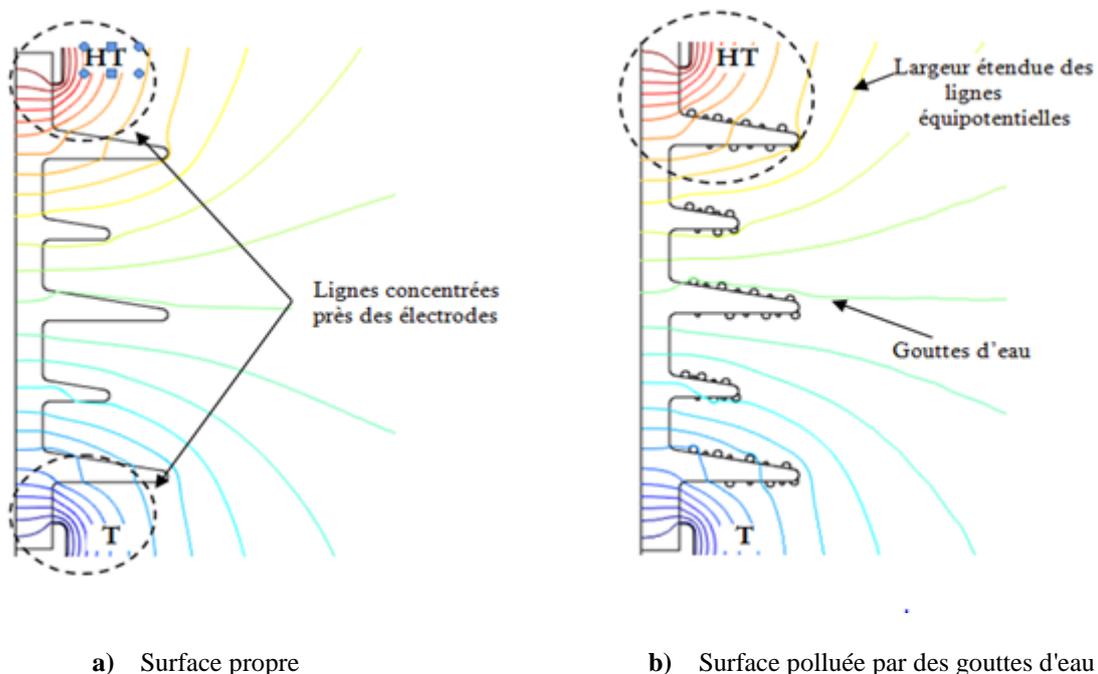


Figure 7.29 : Equipotentiels autour de l'isolateur polymère

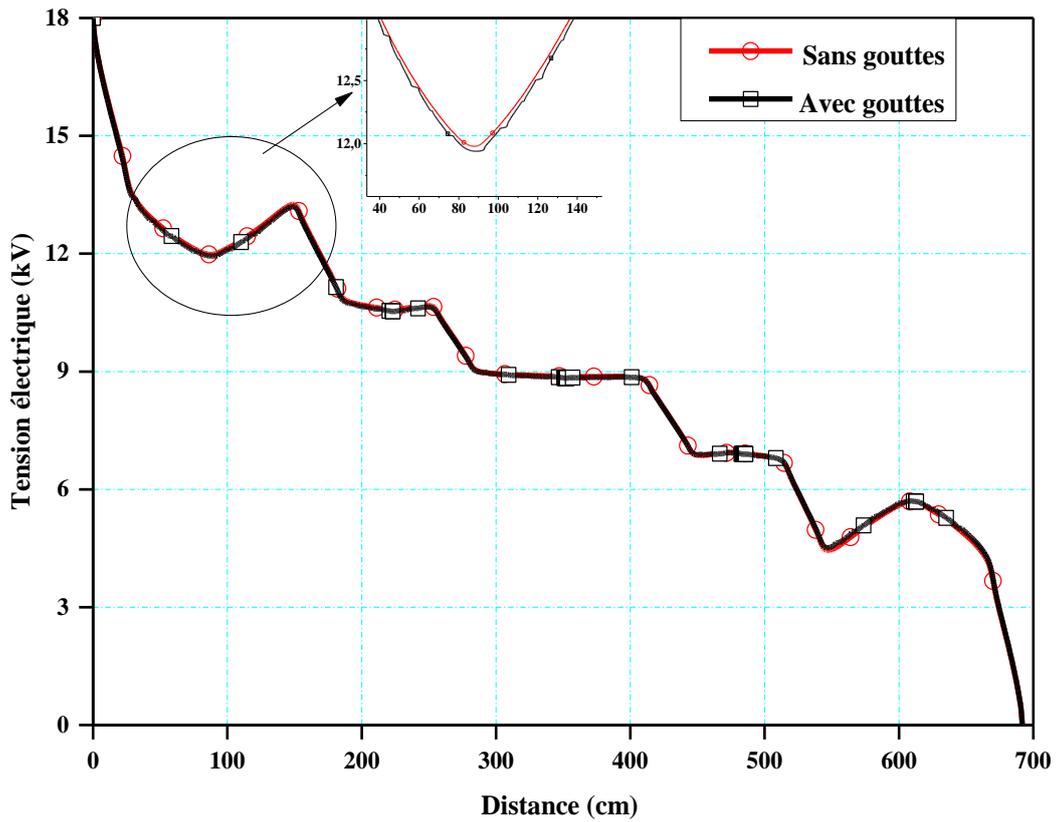


Figure 7.30 : Potentiel électrique le long de l'isolateur

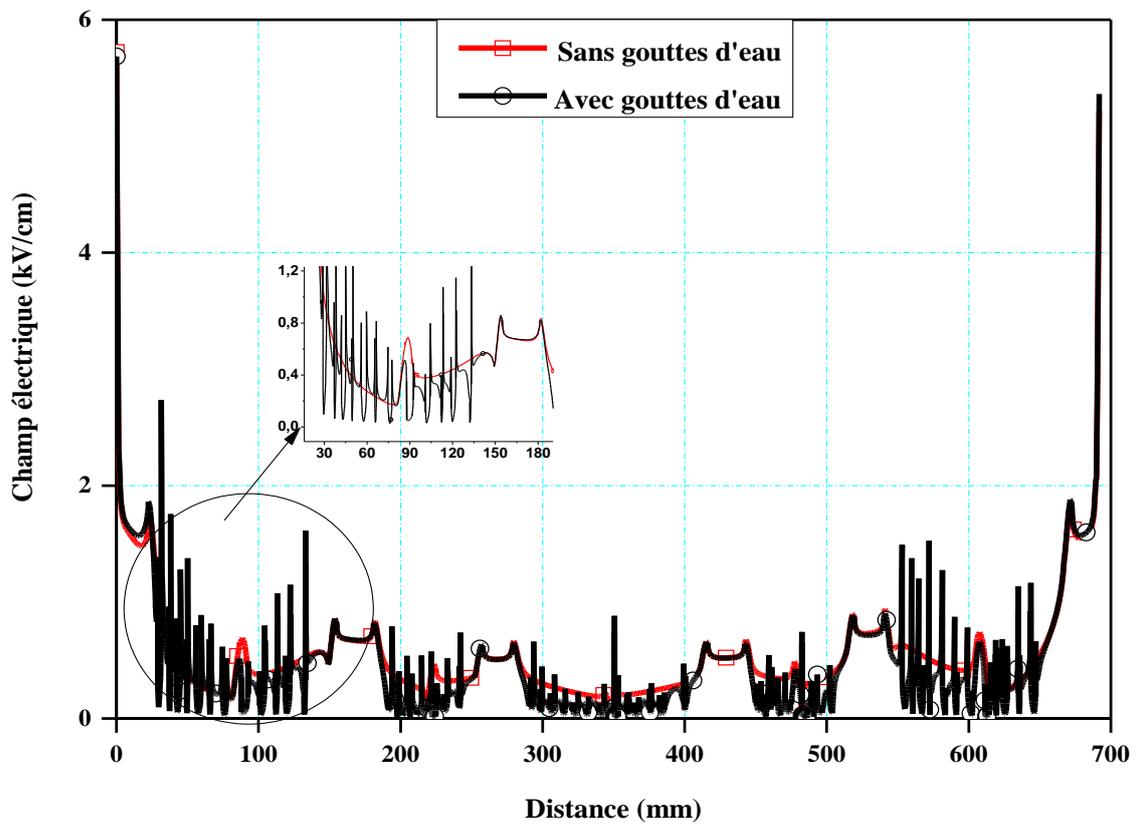


Figure 7.31 : Champ électrique le long d'un isolateur

a. Effet du volume des gouttes d'eau

Une simulation a été aussi réalisée avec le même modèle de l'isolateur afin de voir l'effet du volume de la goutte sur la distribution du champ et de la tension électrique. Deux cas ont été considérés, le premier cas où le rayon de la goutte est de 1.5 mm et le deuxième cas où celui-ci est de 5.5 mm. Quatre gouttes sont posées sur la surface de cet isolateur avec une permittivité d'eau de ($\epsilon_r=81$).

Les figures 7.32 et 7.33 représentent la distribution de la tension et du champ électrique respectivement le long de la ligne de fuite. Il ressort de la figure 7.32 que la forme des deux courbes n'est pas la même. Dans le premier cas, la distribution de la tension ne connaît pas une variation remarquable par contre dans le deuxième cas la variation est remarquable, car il y a une chute de tension au niveau des gouttes. Par exemple la valeur du champ au niveau de la goutte qui est posé à la distance de 250 mm sur la ligne de fuite correspondant au premier cas ($r = 1.5 \text{ mm}$) est de $0,75 \cdot 10^5 \text{ V/m}$ par contre dans le deuxième cas ($r = 5.5 \text{ mm}$) la valeur du champ connaît une augmentation au niveau de la même goutte ($1,5 \cdot 10^5 \text{ V/m}$). Cela signifie que le volume de la goutte affecte la distribution du champ électrique sur la surface de l'isolateur.

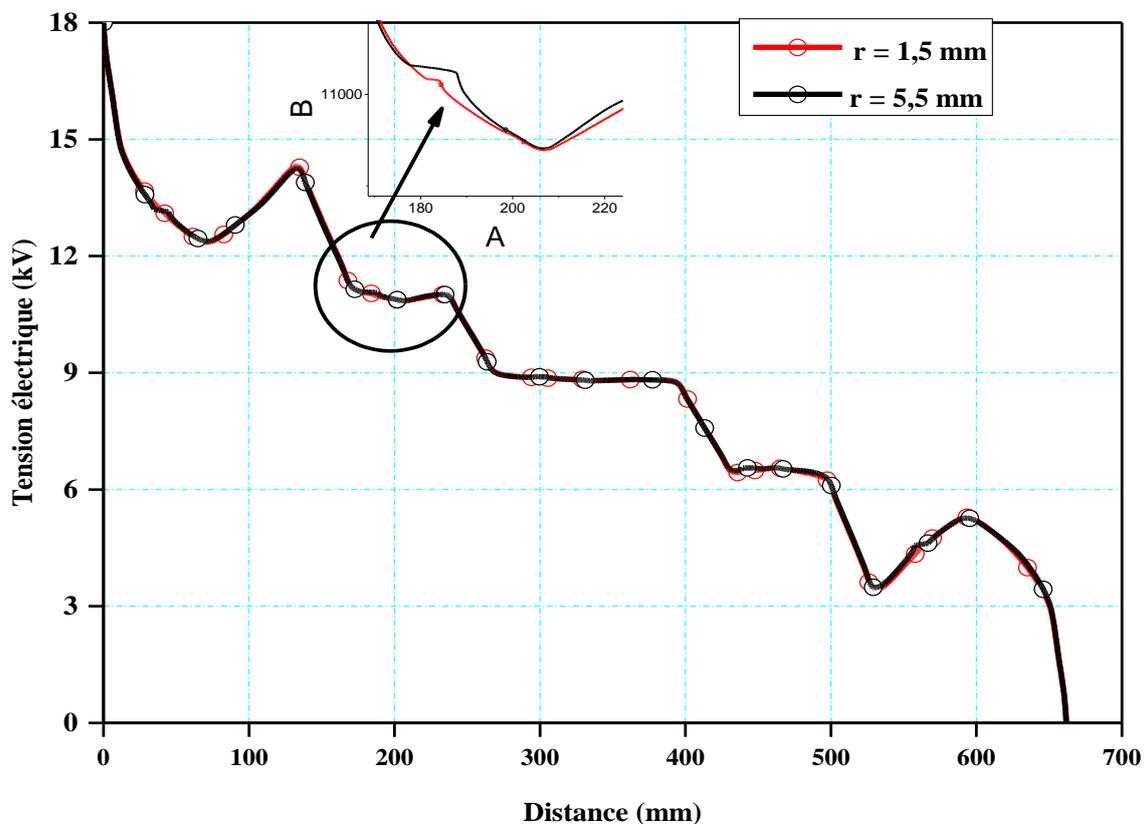


Figure 7.32 : Distribution de potentiel dans le cas de deux gouttes de différents volumes

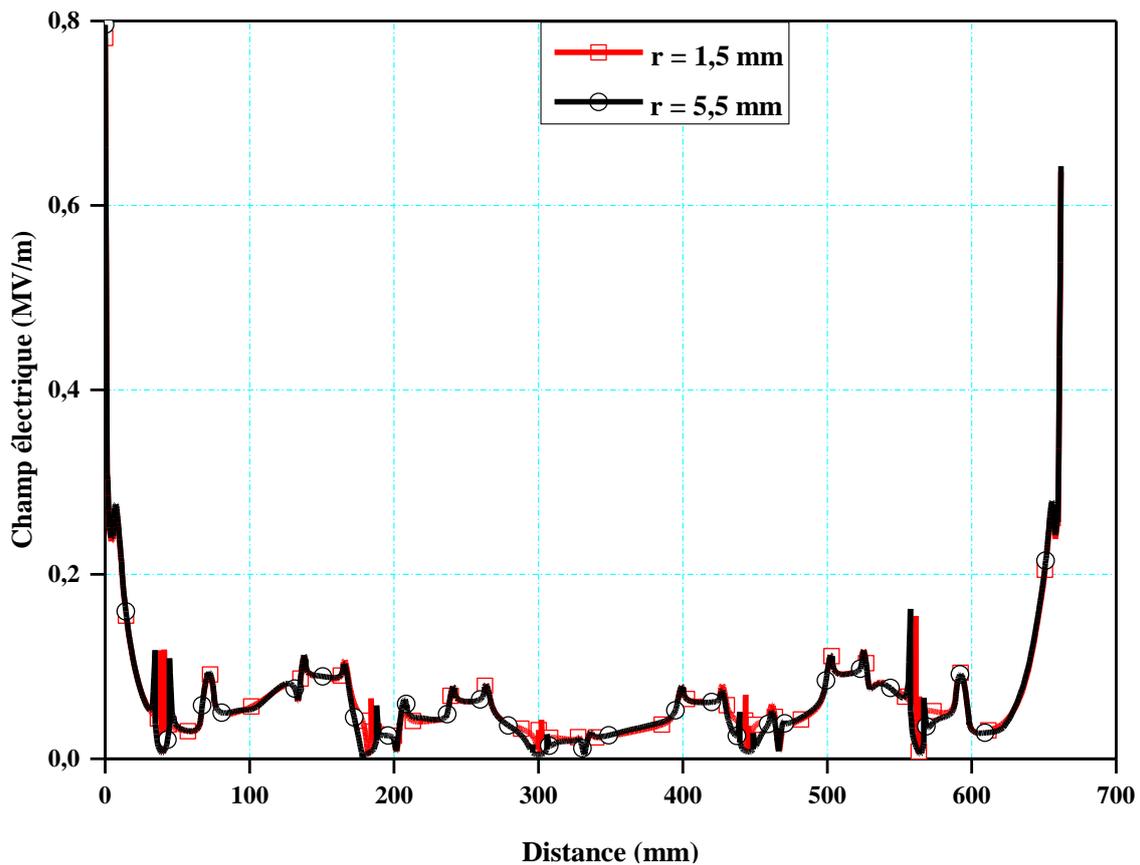


Figure 7.33 : Distribution du champ dans le cas de deux gouttes de différents volumes

7.4.2.3. Modèles d'isolateurs dans des conditions de pluie

Dans des conditions de pluie, les gouttes d'eau sont généralement sur la surface supérieure des ailettes. La surface de la gaine verticale et les dessous des ailettes sont secs.

Six cas typiques d'isolateurs non céramiques ont été étudiés dans des conditions de pluie avec l'hydrophobicité de surface de HC1 à HC6.

Pour le cas HC1, il y a quatre gouttes d'eau de taille moyenne et 3 gouttes d'eau de petite taille sur une ailette. La forme de toutes les gouttes d'eau est hémisphérique, avec un diamètre de 2 mm pour les gouttes d'eau de taille moyenne et de 1 mm pour les gouttes d'eau de petite taille.

Pour le cas HC2, il y a trois gouttes d'eau de grande taille et deux gouttes d'eau de taille moyenne par une ailette. La forme de toutes les gouttes d'eau est hémisphérique, avec un diamètre de 3.2 mm pour les gouttes d'eau de grande taille et de 2.6 mm pour les gouttes d'eau de taille moyenne.

Pour le cas HC3, la forme de certaines gouttes d'eau n'est plus hémisphérique, elles ont une longueur de 5 mm.

Pour le cas HC4, il y a un écoulement d'eau sur la surface de l'isolant.

Pour le cas HC5, plusieurs canaux d'eau sont fusionnés ensemble sur la surface de l'isolateur.

Pour le cas HC6, Environ 60 % de la surface de l'isolateur sont couverts par un film d'eau.

Les lignes équipotentiels le long d'un isolateur non céramique sec sont également calculées puis comparées à celles des isolateurs humides, tels que les cas HC1-6, afin de visualiser les différentes distributions de tension globales des six modèles. Les résultats du calcul sont résumés sur la figure 7.34.

La figure 7.34 montre qu'en supposant les conditions du modèle «pluie», la force du champ électrique autour de la zone de l'ailette par le bas est légèrement inférieure à celle du cas propre. La présence de gouttes d'eau sur la surface supérieure des ailettes rend la répartition globale du champ électrique un peu plus uniforme que celle du cas sec. (Bien sûr, l'intensité du champ électrique local au voisinage de chaque goutte d'eau est augmentée) En conséquence, la force du champ électrique autour de la zone du point triple est plus grande par rapport au cas propre. A partir de ces résultats, on peut voir que si le diamètre de la goutte d'eau est inférieur à 2 mm, l'effet de la goutte d'eau sur la distribution de tension peut être ignoré. C'est la raison pour laquelle de nombreuses gouttes d'eau de petite taille ne sont pas incluses sur la photo dans le modèle de calcul.

Plus la taille des gouttes d'eau est grande, plus son effet est important sur la distribution de tension le long de la surface supérieure de l'ailette. La distribution de tension est significativement déformée par le filet d'eau fusionné (cas HC5). L'existence des filets d'eau fusionnés augmente la différence de tension entre les gouttes d'eau voisines et elles-mêmes. Si l'intensité du champ électrique entre-elles dépasse la valeur seuil, des décharges couronnes peuvent se produire entre les gouttes d'eau et cela peut détruire l'hydrophobicité du matériau de l'ailette.

Sans gouttes d'eau (figure 7.29.a), la valeur la plus élevée du champ électrique au niveau de la première ailette est de 1,2 kV/cm à 18 kV. Par exemple, le champ électrique le plus élevé à la surface des gouttes d'eau sur la première ailette pour le cas HC3 est de 3 kV/cm à 18 kV. Cela montre clairement que la présence des gouttes d'eau améliore la force du champ électrique sur l'ailette.

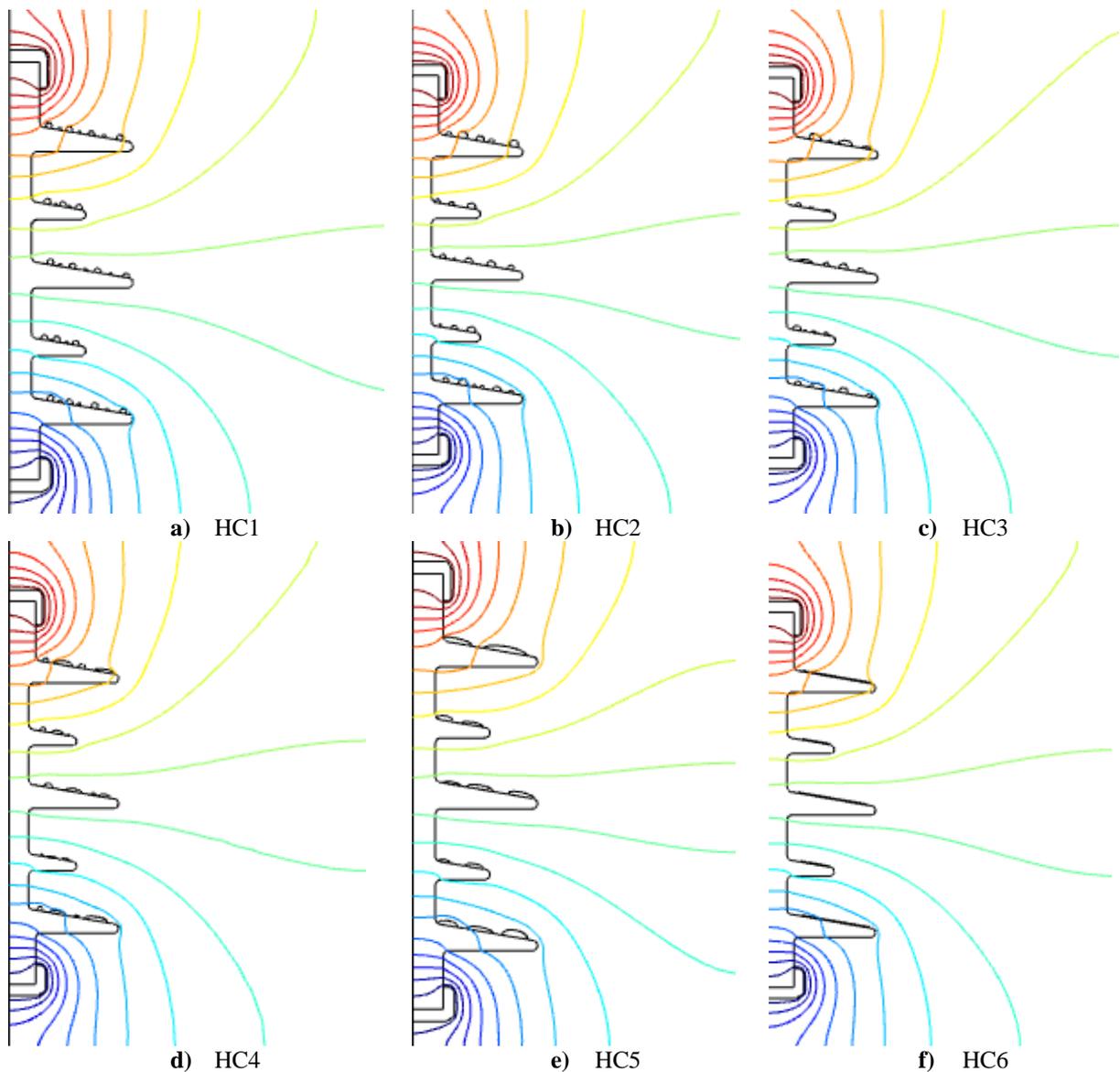


Figure 7.34 : Lignes équipotentielle pour les cas HC1- HC6

a. Calcul des composantes axiale et radiale du champ électrique

Les composantes axiale et radiale du champ électrique ont été calculées le long de l'isolateur suivant une ligne de référence linéaire située à 30 mm de la surface de l'enveloppe (figure 7.35).

Pour montrer plus clairement les résultats, l'intensité du champ électrique le long de l'isolateur suivant une ligne de référence linéaire pour le cas (a) - (f) est représentée sur deux figures.

La figure 7.36 montre le résultat pour le cas (a) - (c) et la figure 7.37 montre le résultat pour le cas (d) - (f).

Les résultats émanant de la figure 7.36 montrent que la distorsion de la composante axiale du champ électrique augmente avec la perte d'hydrophobicité de la surface de

l'isolateur. Si l'hydrophobicité de la surface de l'isolateur est comprise entre HC1-2, le champ électrique et les distributions de tension le long de l'isolateur sous pluie sont presque les mêmes que le long de l'isolateur propre.

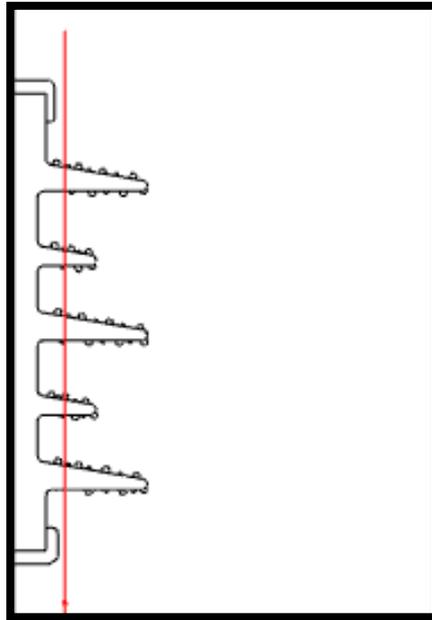


Figure 7.35 : Position de la ligne de référence pour le calcul des composantes du champ électrique à 30 mm de l'enveloppe

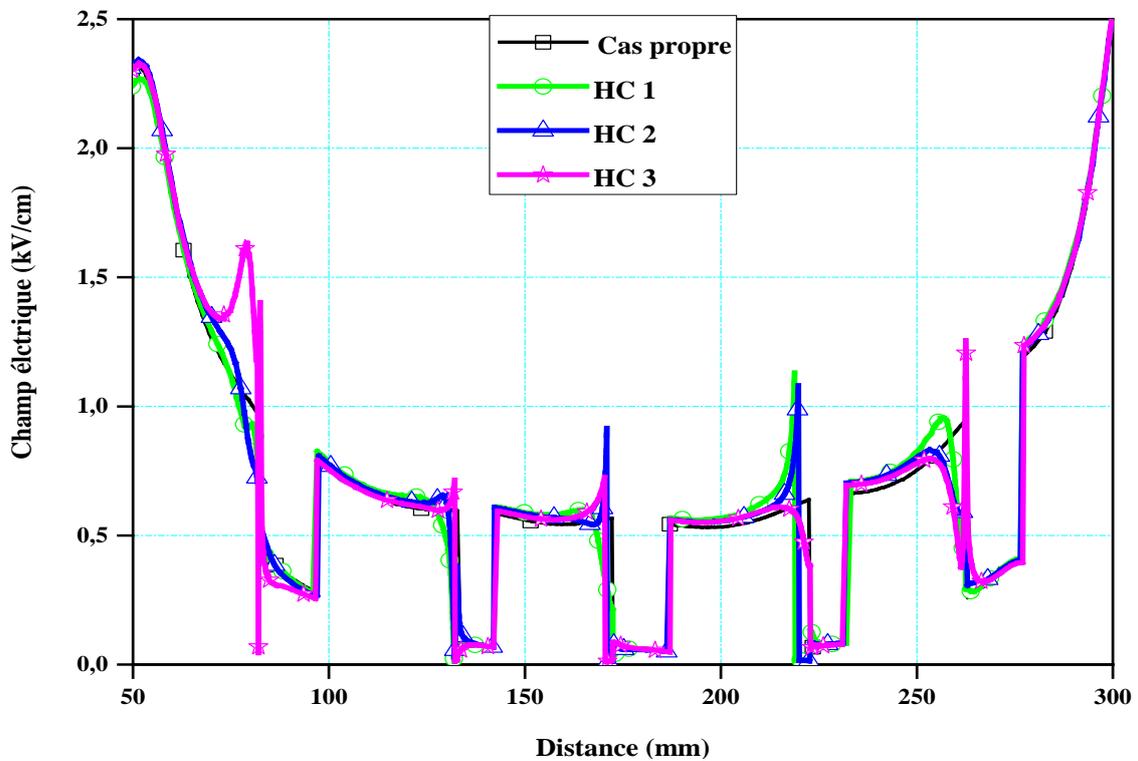


Figure 7.36: Amplitude de l'intensité du champ électrique le long de la ligne de fuite de l'isolation pour le cas sec et les cas HC1-3.

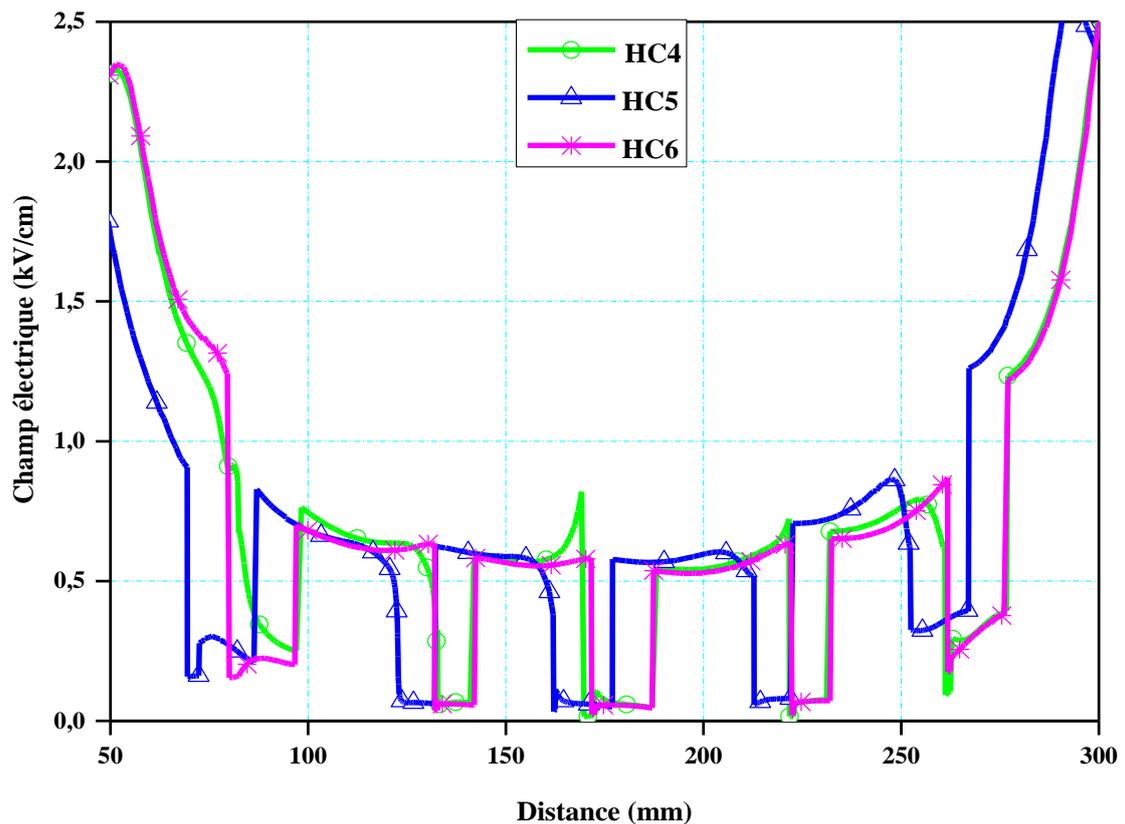


Figure 7.37 : Amplitude de l'intensité du champ électrique le long de la ligne de fuite de l'isolation pour les cas HC4 - 6

7.4.3. Résultats de 3D

7.4.3.1. Effet d'une paire de gouttes sur la distribution électrique

Dans ce cas un modèle de simulation de la distribution du champ et la tension électrique a été appliqué sur un isolateur réel en 3D. Deux cas ont été pris en considération: surface est propre (absence de gouttes d'eau sur la surface) et présence de deux gouttes d'eau sur la surface.

Il est à remarquer sur la figure 7.38 l'absence de différence évidente sur la distribution de tension au niveau d'une distance de l'ordre de 175 mm sur la ligne de distribution, par contre au niveau d'une distance de 275 mm sur la même ligne, il est à souligner une chute de tension en raison de la présence des gouttes sur la surface. Pour ce qui est de la de distribution contre du champ électrique sur la ligne de fuite de l'isolateur, celle-ci est différente dans les deux cas. Pour une distance de 175 mm, le champ augmente jusqu'à $1,0 \cdot 10^5$ V/m et pour 275 mm, sa valeur atteint $2,0 \cdot 10^5$ V/m. Cette différence entre les deux cas est causée par la présence des gouttes d'eau sur la surface dans le deuxième cas. Cela signifie que la présence de ces gouttes sur la surface affecte la distribution du champ et provoque une décharge sur les extrémités de ces gouttes.

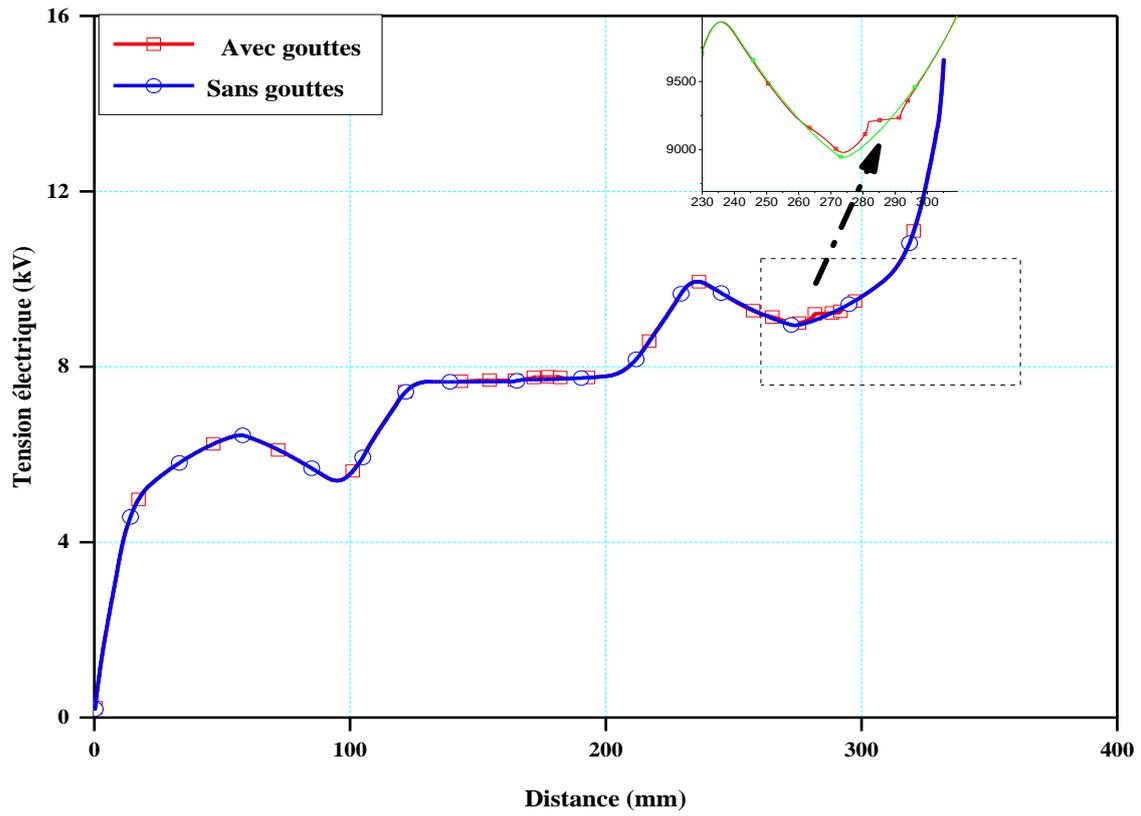


Figure 7.38 : Distribution de potentiel électrique sur la ligne de fuite en présence de deux ou sans gouttes

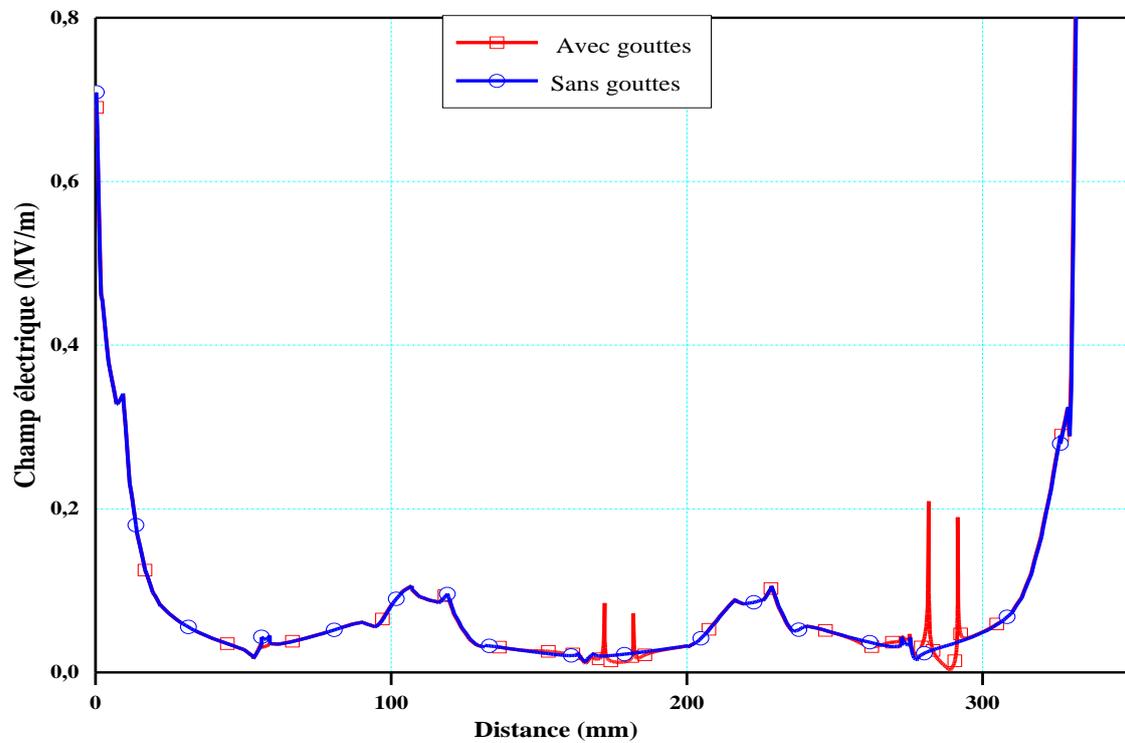


Figure 7.39 : Distribution du champ sur la ligne de fuite en présence de deux ou sans gouttes

7.4.3.2. Effet de plusieurs gouttes sur la distribution électrique

Un modèle de simulation (figure 7.40.a) a été réalisé sur le cas HC2 de la figure 7.40.b, afin de voir l'influence de nombre des gouttes avec différents volumes et formes sur la distribution du champ et la tension électrique.

Les figures 7.41, 7.42 et 7.43 représentent les résultats de distribution de la tension et du champ électrique obtenus. D'après cette simulation, on peut voir sur la figure 7.40.b, la non uniformité de la distribution du champ électrique, en particulier au niveau des bords des électrodes en cuivre. Ceci est dû à la différence de la constante diélectrique des matériaux composant l'isolateur et l'air qui l'entoure [7.7].

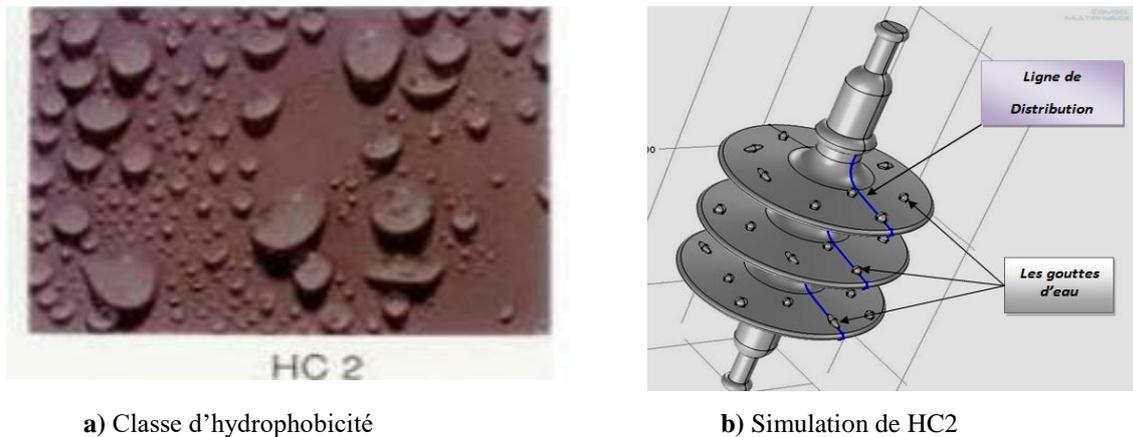


Figure 7.40 : Schéma d'un isolateur réel en 3D et classe d'hydrophobicité

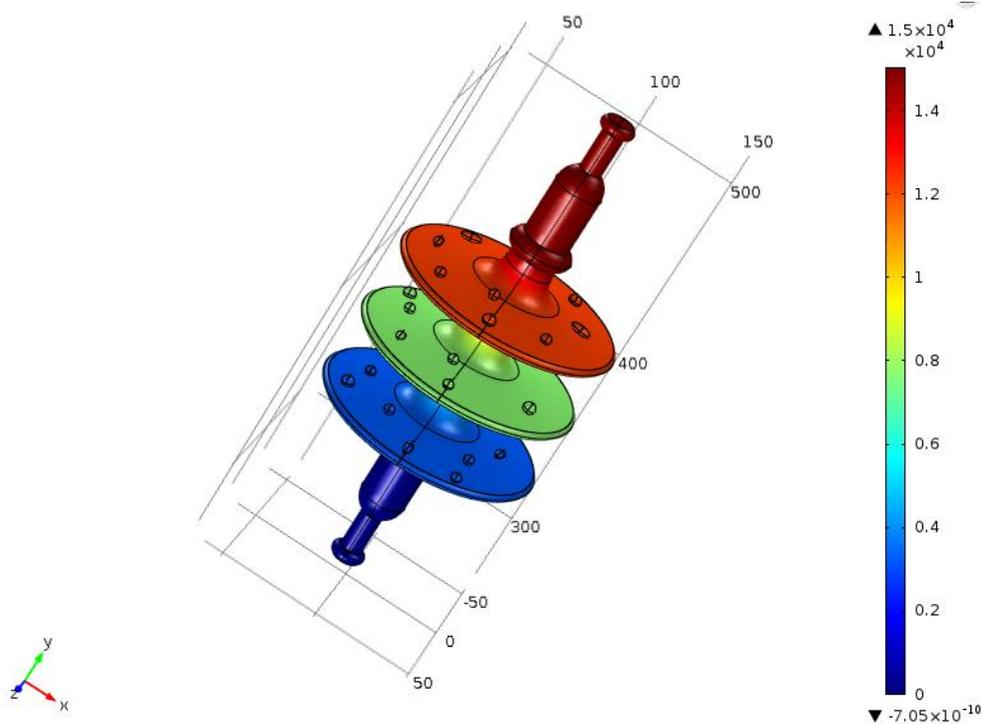


Figure 7.41: Distribution du potentiel

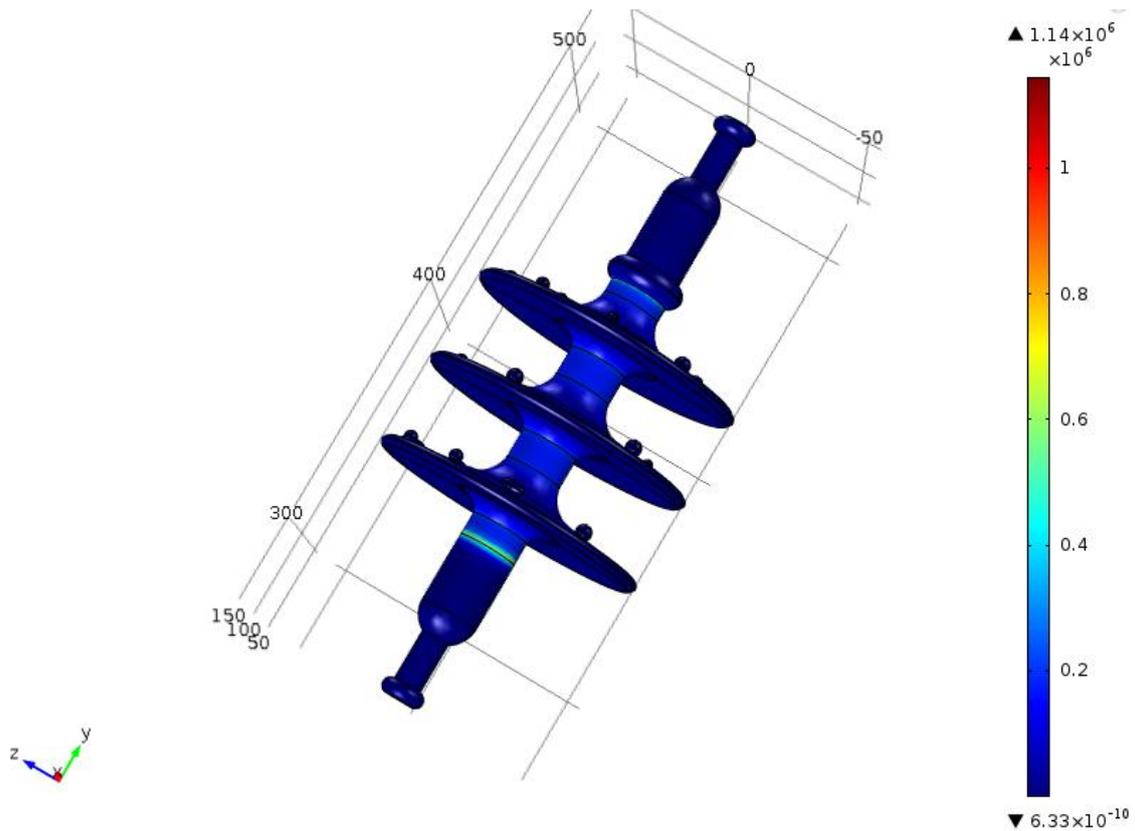
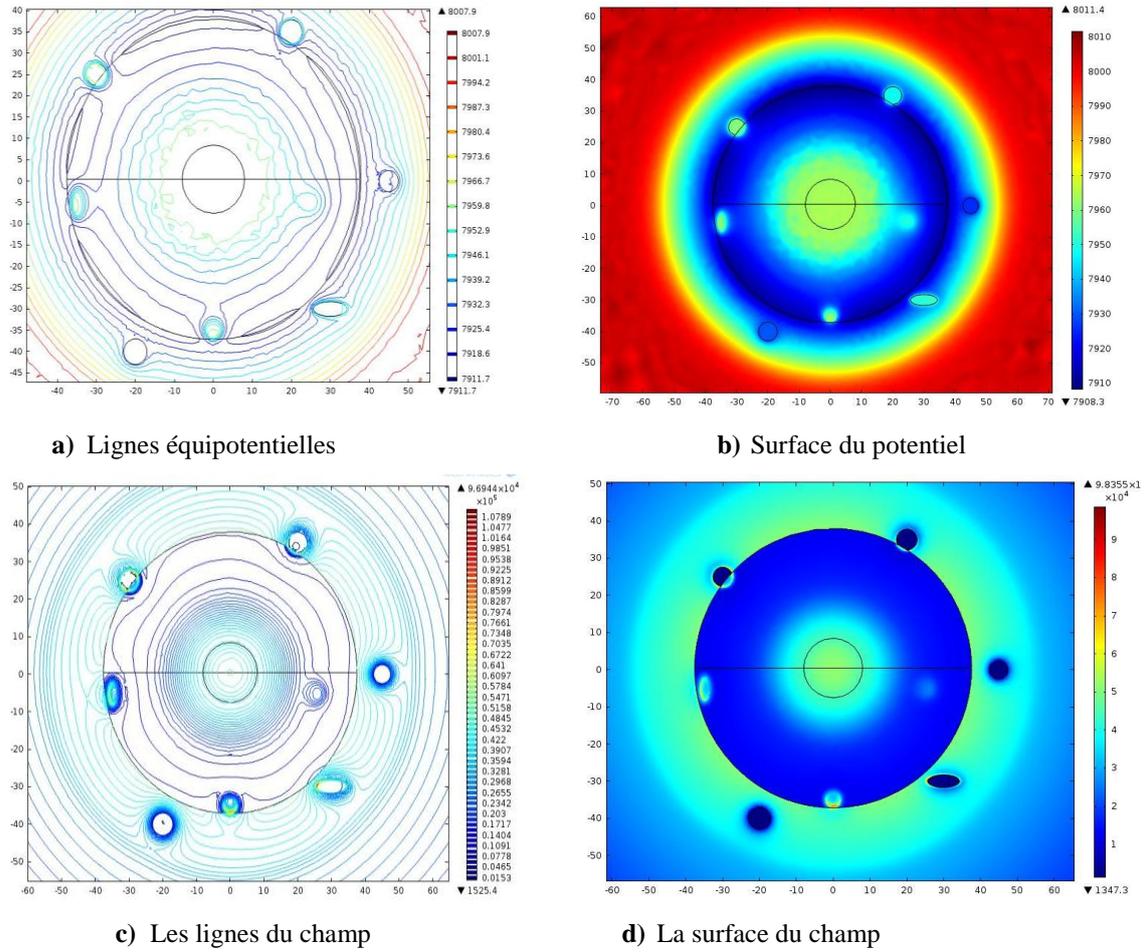


Figure 7.42 : Distribution du champ électrique

La figure 7.43 présente différentes coupes-surfaces en 2D pour les surfaces et les lignes du champ et de la tension électrique pour ce modèle.

À Figure 7.44 montre la répartition de la tension le long de l'isolateur en silicone. Il est à remarquer la non linéarité de la répartition le long de l'isolateur en silicone.

L'amplitude de l'intensité du champ électrique le long de l'isolateur est représentée en figure 7.45. On peut voir que l'intensité du champ électrique est beaucoup plus élevée ($E_{max} = 1.03 \text{ MV/m}$) dans la zone de jonction entre l'électrode et les ailettes.



La distribution (X.Z) : En haute

Figure 7.43 : Différent coupes-surfaces en 2D [7.7]

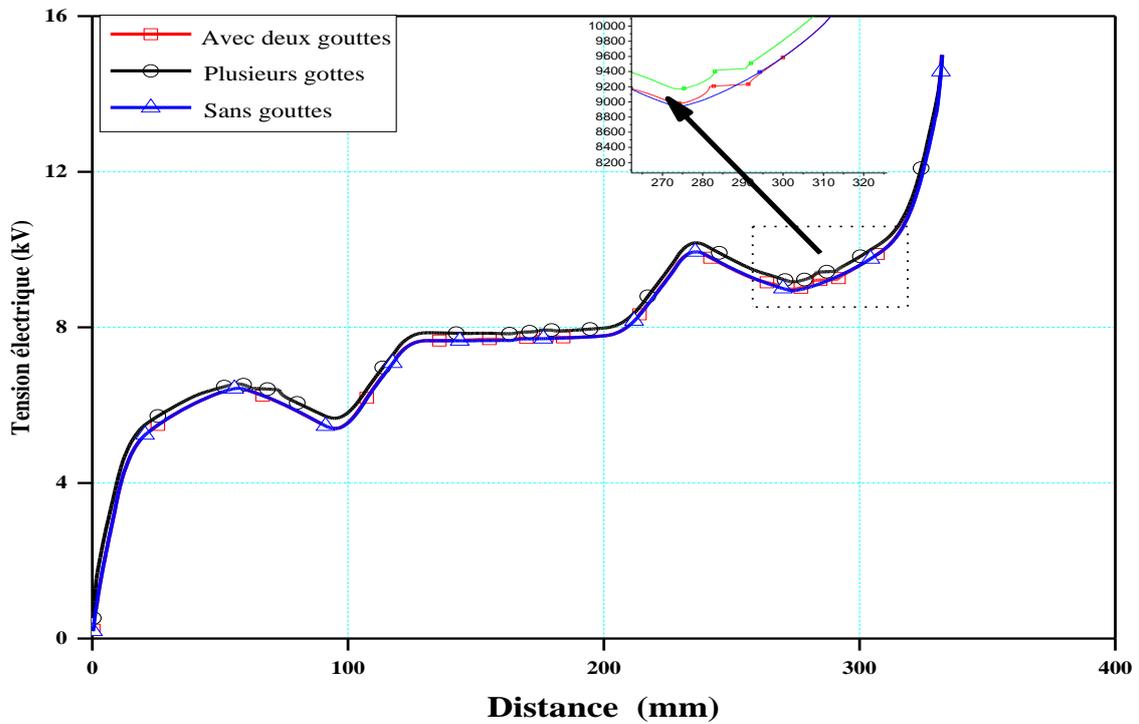


Figure 7.44 : Distribution du potentiel

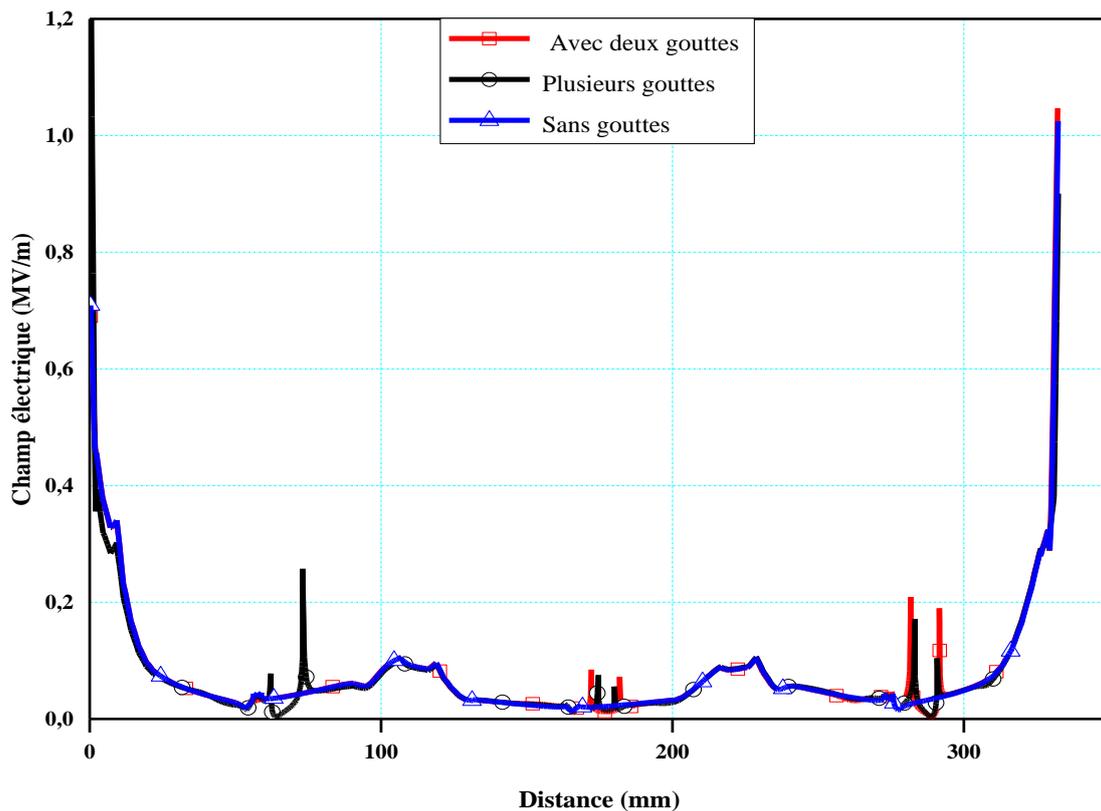


Figure 7.45 : Distribution du champ

7.5. Conclusion

L'objectif dans ce chapitre était d'étudier la caractéristique de la distribution du champ électrique sur la surface en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau.

Pour une goutte d'eau sur la surface de la plaque, l'intensification du champ électrique due à la présence des gouttes d'eau, notamment aux points de jonction des différents milieux (goutte d'eau, air et solide diélectrique) a été confirmée. Le champ électrique peut atteindre trois fois la valeur du champ électrique moyen appliqué.

Des facteurs tels que l'angle de contact, le volume des gouttes, leur nombre et la distance séparant deux gouttes adjacents ont une incidence notable sur l'amplification du champ électrique à la surface de l'isolateur.

Par contre, la forme et la conductivité de la goutte d'eau ne présente pas d'influence significative sur l'amplification du champ électrique.

Nous concluons que la présence de ces gouttes sur la surface de l'isolateur en silicone provoque une augmentation de l'intensité du champ électrique exactement au point triple (air, goutte d'eau et isolateur). Cette augmentation influe sur sa surface et peut lui faire perdre sa propriété hydrophobe et entraîner sa dégradation.

Chapitre 08

CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES

8.1. Conclusion

L'objectif principal visé à travers ce travail est la quantification de l'effet de gouttes d'eau sur la tension de contournement d'une surface en silicone hydrophobe inclinée à champ non uniforme mise sous tension alternative.

Dans la première partie de ce travail nous avons présenté l'étude expérimentale sur l'analyse de l'effet de différents types d'arrangements de gouttes d'eau et l'influence de l'angle d'inclinaison sur la tension de contournement d'une surface d'isolation en silicone à champ non uniforme. Les résultats obtenus peuvent être résumés comme suit :

- ✓ Le recouvrement uniforme d'une surface isolante hydrophobe par de gouttes d'eau engendre la réduction de la performance de celle-ci ;
- ✓ Pour une surface interélectrode donnée et recouverte de gouttes d'eau, il existe un nombre de rangées limite au-delà duquel, la performance de l'isolation est minimale et constante. Cette valeur minimale dépend de la distance entre deux rangées successives des gouttes d'eau ;
- ✓ La création d'une zone sèche par élimination de la rangée de gouttes d'eau posée à la droite joignant les électrodes entraîne une élévation de la performance du système ;
- ✓ Pour un angle d'inclinaison $\alpha = 0^\circ$ de la surface isolante, la chute maximale de la performance électrique entre sans et avec les gouttes d'eau est obtenue pour un volume d'eau égal à 120 μl . celle-ci est de l'ordre de 73% ;
- ✓ Pour un angle d'inclinaison critique compris entre 0 et 90° de la surface du polymère, recouverte de 5 rangées de gouttes d'eau de 45 et 60 μl de volume, il existe une valeur minimale de performance électrique correspondant à une chute de celle-ci s'élevant au total à 65% pour un volume des gouttes d'eau égal à 60 μl ;
- ✓ L'augmentation de la conductivité volumique des gouttes d'eau engendre la décroissance de la tension de contournement. Cela est dû au raccourcissement de la ligne de fuite sèche de l'isolation ;
- ✓ La tension de contournement diminue lorsque le volume des gouttes d'eau augmente et/ou la conductivité augmente. La chute de performance électrique de l'isolation

est de l'ordre de 92% pour un volume d'eau V_g égal à $120\mu\text{l}$ et une conductivité volumique de l'ordre de 2 mS/cm ;

- ✓ Il existe un intervalle d'angle d'inclinaison de l'isolation ($\alpha \geq 50^\circ$) pour lequel sa performance électrique reste très proche de celle obtenue sans gouttes d'eau. Cet écart est de l'ordre de 18% pour des volumes des gouttes d'eau supérieurs ou égaux à $60\mu\text{l}$;
- ✓ Le positionnement des gouttes d'eau par rapport aux électrodes joue un rôle essentiel dans la réduction de la tension de contournement.

La deuxième partie concerne l'étude du comportement des gouttes d'eau sur la surface d'isolant en silicone hydrophobe sous tension alternative. Les résultats obtenus dans la deuxième partie montrent que :

- ✓ Pour une goutte d'eau sur la surface de la plaque, l'intensification du champ électrique due à la présence des gouttes d'eau, notamment aux points de jonction des différents milieux (goutte d'eau, air et solide diélectrique) a été confirmée. Le champ électrique peut atteindre trois fois la valeur du champ électrique moyen appliqué ;
- ✓ Des facteurs tels que l'angle de contact, le volume des gouttes, leur nombre et la distance séparant deux gouttes adjacents ont une incidence notable sur l'amplification du champ électrique à la surface de l'isolateur ;
- ✓ Par contre, la forme et la conductivité de la goutte d'eau ne présente pas d'influence significative sur l'amplification du champ électrique.

8.2. Recommandations

L'étude a offert une perspective évaluative sur les recherches expérimentales et théoriques sur la tension de contournement et la force de champ électrique initial des surfaces isolations polymériques en présence de gouttes d'eau et a été réalisée dans un laboratoire de haute tension par la variation de certains paramètres importants. En outre en conséquence directe de cette méthodologie, l'étude a rencontré un certain nombre de limitations, qui doivent être considérées. Pour générer des stratégies réalisables et des objectifs de développement en ce qui concerne la conception des isolateurs polymères compte tenu de leur fiabilité à long terme, il reste nécessaire d'effectuer davantage d'études pour permettre une évaluation plus poussée de la conception du sujet. Explorer ce qui suit comme de futures stratégies de recherche peuvent faciliter la réalisation de cet objectif :

- Le développement de la modélisation 3D par la méthode des éléments finis pour la dynamique des gouttes d'eau pour un calcul et une analyse du champ électrique plus précise et plus réaliste ;

- Sur le terrain, de nombreux facteurs complexes et conditions environnementales peuvent affecter la performance des isolateurs en SiR. Il est suggéré que d'autres recherches soient effectuées pour simuler des conditions ambiantes sévères, telles que l'accumulation de glace et de poussière ;
- Les essais de la rampe à haute tension doivent être étendus pour étudier les performances de contournement de différentes conceptions d'isolateurs SiR en utilisant l'excitation HVDC ;
- Étude de la densité thermique de surface requise pour modifier la structure chimique du matériau isolant. La modélisation des bandes sèches et des décharges en fonction du nombre de cycles UV pourrait être réalisée à l'aide de COMSOL Multiphysics.

Devrait être prolongé l'essai de la rampe de pluie haute tension par la variation du débit, de la conductivité de l'eau de pluie et de la température. Cette modification permet de simuler la performance des isolateurs en SiR pour différents sites d'installation.

Références Bibliographiques

Chapitre 01

- [1.1] W. L. Vosloo, R. E. Macey and C. de Turreil. "The practical guide to outdoor high voltage insulators," Johannesburg, South Africa, Crown Publications CC, 2004.
- [1.2] S. Melodia "Mesure de la sévérité de la pollution dans le poste électrique 220/60 kV de Marsat El Hadjadj à côté d'Oran, Algérie," Séminaires sur la pollution des isolements des lignes et des postes HT. Casablanca, Maroc, 1989.
- [1.3] M.A. Slama, H. Hadi, S. Flazi, N. Tchouar " Etude du dépôt de pollution responsable du contournement des isolateurs des lignes aériennes du réseau électrique THT national" Sciences & Technologie B – N°25, pp. 43-50. 2007
- [1.4] Looms, J.S.T. "Insulators for high voltages," IEE Power Engineering Series, Peter Peregrinus Ltd., ISBN 9780863411168, vol.7, 1988.
- [1.5] Cherney, E., "Non-Ceramic insulators a simple design that requires careful analysis," IEEE. Electr. Insul. Magaz., N°12, pp. 7-15, 1996.
- [1.6] Gubanski, S., and Hartings, R., "Swedish research on the application of composite insulators in outdoor insulation," IEEE. Electr. Insul. Magaz, N°11, pp.24-31, 1995.
- [1.7] Cherney, E., "RTV silicone a high tech solution for a dirty insulator problem," IEEE Elect. Insul. Magaz., vol.11, N°6, pp. 8-14, 1995.
- [1.8] CIGRE, Working Group 22.03, "World service experience with HV composite insulators," N°130, 1990.
- [1.9] Bauer, E., Karner, H., Muller, K. H. and Verma, P., "Service experience with the German long rod insulator with silicone rubber weathersheds since 1967", Cigre, pp. 11-22, 1980.
- [1.10] Liang X., Wang S., Fan J., and Zhicheng G., "Development of composite insulators in China," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul, vol. 6, pp. 586-594, 1999.
- [1.11] Kikuchi T., Nishimura S., Nagao M., Izumi K., Kubota Y., and Sakata M., "Survey on the use of non-ceramic composite insulators," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul, vol. 6, pp. 548-556, 1999.

- [1.12] Mackevich J. and Shah M., "Polymer outdoor insulating materials. Part I: Comparison of porcelain and polymer electrical insulation," IEEE Electr. Insul. Magaz., vol. 13, pp. 5-12, 1997.
- [1.13] Bauer E. and Dietz H., "Porcelain and composite longrod insulators – a solution for future line requirements," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul, vol. EI-16, pp. 209-219, 1981.
- [1.14] J. M. Volat C, Farzaneh M, and Duvillaret, L., "New method for in live-line detection of small defects in composite insulator based on electro-optic E-field sensor," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul, vol. 20, pp. 194-201, 2013.
- [1.15] EPRI, Palo Alto, CA, "EPRI Survey of Utility Experiences with Composite/Polymer Components in Transmission Class (69- 765 kV class) Substations," 1008817, 2004.
- [1.16] S. Keim, D. König and V. Hinrichsen., "Experimental investigations on Electrohydrodynamic phenomena at single droplets on insulating surfaces, " IEEE. Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenom, pp. 133-136, 2003.
- [1.17] A. J. Philips, D. Childs and H. Schneider. "Water drop corona effects on full-scale 500 kV non-ceramic insulators," IEEE Trans. Power Deliv, vol. 14, pp. 258-265, 1999.
- [1.18] A. J. Phillips, D. J. Childs, and H. M. Schneider, "Aging of non-ceramic insulators due to corona from water drops," IEEE Trans. Power Deliv., vol. 14, N°. 3, pp. 1081–1089, 1999.
- [1.19] G. G. Karady, "Flashover mechanism of non-ceramic insulators," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 6, N°. 5, pp. 718–723, 1999.
- [1.20] T. Pollock, R. Sundararajan, R. Nowlin, K. Thomas, and M. Lynch, "Analysis of polymeric insulators," IEEE. Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenom, vol. 1, pp. 104–107, 1998.
- [1.21] D. A. Swift, C. Spellman and A. Haddad, "Hydrophobicity Transfer from Silicone Rubber to Adhering Pollutants and its Effect on Insulator Performance," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 13, N°. 4, pp. 820- 829, 2006.
- [1.22] T. Braunsberger, M. Kurrat, "Untersuchung zum hydrophobieverhalten zyklisch betauter Silikonoberflächen bei Hochspannungsbeanspruchung," Burghauser Isolierstoffkolloquium, Germany, 2007.

- [1.23] A. Moukengué, S. N. Essiane, and A. Beroual, "Simulation of the shapes of a water droplet on insulated solid surface in an Acelectric field," *Can. J. Phys.*, vol. 85, N°. 9, pp. 911–926, Sep. 2007.
- [1.24] W. Bretuj, J. Fleszynski, A. Tyman, K. Wieczorek, "Effect of Silicone rubber Insulators' profiles on their ageing performance in rain conditions", 15th International Symposium on High Voltage Engineering, University of Ljublijana, Elktroinstitut Milan Widmar, Ljublijana, Slovenia, , T4-258, pp. 1-4, 2007.
- [1.25] A. de la O, R. S. Gorur, J. T. Burnham, "Laboratory wet tests artificially contaminated nonceramic and ceramic insulators", 10th International Symposium on High Voltage Engineering, Montréal, Québec Canada, 1997.
- [1.26] W. Shaowu and al., "Influence of shed profile on the outdoor insulation performance of polymeric insulators", *Proceedings of the 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, Xi'an Jiaotong University, China, pp. 785-789, 2000.
- [1.27] J. Lie, F. Zhang, Z. Guan, L. Wang, " A study on the shed design of dc composite insulator under contamination flashover," *IEEE. Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenom*, vol. 25, N°. 1, pp. 351-357, 2010.
- [1.28] S. Atmani, R. Boudissa, K.D. Haim, "Effet de l'angle d'inclinaison sur le contournement d'une surface en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau sous DC et AC", 9^{ème} Conférence de la Société Française d'Electrostatique, Toulouse, pp. 184-189, 2014.

Chapitre 02

- [2.1] James F. Hall, "History and bibliography of polymeric insulators for outdoor applications," *IEEE Trans on Power Deliv*, vol.8, N°.1, pp. 376-385, January 1993.
- [2.2] R. Hackam, "Outdoor HV Composite polymeric Insulators," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 6, N°. 5, pp. 557-585, 1999.
- [2.3] Bruins, P.R., Editor, "Epoxy Resin Technology," *Journal of polymer science*, vol.7 pp. 2465-2466, 1968.
- [2.4] Hoechst Ceram Tec "History of composite Insulators," *Communique*, Wunsiedel, V/H-Dr.Ki/GO, 05.06.1990.
- [2.5] R.S.Gorur "High voltage outdoor insulation technology," *Control and dynamic*

systems, vol. 44, Part. 4, pp. 131-191, 1991.

- [2.5'] http://www.grte.dz/IMG/pdf/ARELEC_composite_23_02_2012_modifie
- [2.6] Goldstone Power, "Silicone Rubber Polymer Insulators," Goldstone Power Product Construction Brochure, India, 2006.
- [2.6'] Article interne
- [2.7] Muhsin Tunay Gencoglu, "The comparison of ceramic and non-ceramic insulators," e-Journal of New World Sciences Academy, vol. 2, N°. 4, pp. 274-294, 2007.
- [2.8] B. Marungsri, W. Onchantuek, A. Oonsivilai, T. Kulworawanichpong, "Analysis of electric field and potential distributions along surface of silicone rubber insulators under various contamination conditions using finite element method," World Academy of Science, Engineering and Technology 53, 2009.
- [2.8'] Thomas Egron "Modification d'un pylône de ligne aérienne de transport d'énergie pour le rehaussement des conducteurs," Mémoire de maîtrise Université de Sherbrooke (Québec) Canada. 2014.
- [2.9] David Derek Hinde B.Eng., "Corona discharges on the surfaces of High voltage composite insulators," Ph.D. Thesis, TU Darmstadt University of Technology Australia 2009.
- [2.10] Ramé-Hart Instrument Co. "Ramé-hart contact angle goniometers," Standard contact angle goniometer, Netcong, NJ 07857 USA; Available from: <http://www.ramehart.com>, July 2008 .
- [2.11] Vanessa Belaud "Structuration de surfaces au moyen d'un traitement laser femtoseconde : applications à la fonctionnalisation de surface du polypropylène en vue de sa métallisation " Thèse de doctorat, Spécialité Matériaux, Ecole Centrale de Lyon, 2014.
- [2.12] T. Young. "An essay on the cohesion of fluids," Phys. Rev. Lett., vol. 95, pp. 65-87, 1805.
- [2.13] IEC62073., "Guidance on the measurement of wettability of insulator surfaces," IEC/TS 62073, Ed.1.0, 200
- [2.14] Y. Yuan and T. Lee. "Contact angle and wetting properties," Springer Series in Surface Sciences, vol. 51, pp. 1-27, 2013.

- [2.15] Gubanski S., Vlastos E., "Wettability of Naturally aged Silicone and EPDM Composite Insulators," *IEEE Trans. Power Deliv*, vol. 5, N°. 3, pp.1527-1535, 1990.
- [2.16] Ali M., and Hackam R., "Effects of saline water and temperature on surface properties of HTV silicone rubber," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul*, vol.15, N°5. pp. 1368 – 1378, 5 October 2008.
- [2.17] Cigr'e., "Evaluation of dynamic hydrophobicity properties of polymeric materials for non-ceramic outdoor insulation; retention and transfer of hydrophobicity," *Cigr'e WG D1.14 TB442*, 2010.
- [2.18] Y. Zhu, M. Otsubo, C. Honda, and S. Tanaka, "Loss and recovery in hydrophobicity of silicone rubber exposed to corona discharge," *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 91, N°. 7, pp. 1448–1454, juillet 2006.
- [2.19] R. S. Gorur, J. Mishra, R. Tay, and R. McAfee, "Electrical performance of RTV silicone rubber coatings," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul*, vol. 3, N°. 2, pp. 299–306, 1996.
- [2.20] Shabana Khatoun, Asfar Ali Khan, and Sakshi Singh, "A review of the flashover performance of high voltage insulators constructed with modern insulating materials, " *Transactions on electrical and electronic materials*, vol. 18, N°. 5, pp. 246-249, October 25, 2017
- [2.21] Henrik C. Hillborg "loss and recovery of hydrophobicity of polydimethylsiloxane after exposure to electrical discharges," *Ph.D. Thesis*, Sweden 2001.
- [2.22] S. Feier-Iova. "The Behavior of Water Droplet on Insulating Surfaces Stressed by Electric Field,". *Ph.D. Thesis*, TU Darmstadt, 2009.
- [2.23] J. P. Reynders, I. R. Jandrell, and S. M. Reynders, "Review of aging and recovery of silicone rubber insulation for outdoor use," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* vol. 6, N°. 5, pp. 620–631, 1999.
- [2.24] W. Shaowu, L. Xidong, G. Zhicheng, Y. Jun, and S. Qinghe, "Investigation on hydrophobicity and pollution status of composite insulators in contaminated areas," in *Conf. Electr. Insul. Dielectr Phenom*, pp. 628–631, 2001.
- [2.25] Chang, J., and Gorur, R., "Hydrophobicity of silicone rubber used for outdoor insulation," *Properties and Applications of Dielectric Materials*, Proceedings of the 4th International Conference on, 1994.

- [2.26] Gorur, R., Chang, J., and Amburgey, O., "Surface hydrophobicity of polymers used for outdoor insulation," IEEE Trans. Power Deliv. vol.5, N^o.4, pp. 1923-1933, 1990.
- [2.27] Cherney, E., and Stonkus, D., "Non-Ceramic insulators for contaminated environments," IEEE Trans. Power. App. Syst, PAS-100(1), pp.131-142, 1981.
- [2.28] Gorur, R., Cherney, E., Hackam, R., and Orbeck, T., "The electrical performance of polymeric insulating materials under accelerated aging in a fog chamber," IEEE Trans. Power Deliv, vol. 3, N^o. 3, pp. 1157-1164, Jul. 1988.
- [2.29] Gorur, R., "Research into polymeric insulating materials for high voltage outdoor insulators," PhD thesis, University of Windsor, 1986.
- [2.30] Kindersberger, J., Kuhl, M., "Surface conductivity of polluted silicone rubber insulators," 7th international symposium on High Voltage Engineering, Dresden, vol. 4, pp.223-225, Aug., 1991.
- [2.31] Kindersberger, J., Kuhl, M., "Effect of hydrophobicity on insulator performance," Sixth International Symposium on High Voltage Engineering, New Orleans, Aug. 1989.
- [2.32] Gorur, R., Cherney, E., and Hackam, R., "The AC and DC performance of polymeric insulating materials under accelerated aging in a fog chamber," IEEE Trans. Power Deliv, vol. 3, N^o. 4, pp.1892-1902, 1988.
- [2.33] Vlastos, A.E., Gubanski S.M., "Surface structural changes of naturally aged silicone and EPDM composite insulators," IEEE Trans. Power Deliv., vol. 6, N^o. 2, pp.888-900, Apr.1991.
- [2.34] Gorur, R., Karady, G., Jagota, A., Shah, M., and Yates, A., "Aging in silicone rubber used for outdoor insulation," IEEE Trans. Power Deliv. vol. 7, N^o. 2, pp.525-538, 1992.
- [2.35] Chang, J., Gorur, R., "The role of backbone chain rotation in the hydrophobicity recovery of polymeric materials for outdoor insulation," Proceedings of the 4th International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, Sestri Levante, Italy, pp. 270-274, Jun., 1992.
- [2.36] Swedish Transmission Research Institute(STRI); "Hydrophobicity classification guide,"; Guide1, 92/1, 1992.

- [2.37] Norme CEI 60243-1, "Rigidité diélectrique des matériaux isolants. Méthodes d'essai. Partie 1 : essais aux fréquences industrielles," , 1998.
- [2.38] U. Kaltenborn, J. Kindersberger, and J. Speck, "Surface behaviour of epoxy castings during the early ageing period," in Proceedings of the 1998 IEEE 6th International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, 1998. ICSD, pp.269–272, 1998.
- [2.39] M. Amin and M. Salman, "Aging of polymeric insulator (an overview)," Rev. Adv. materials Science, pp. 96–116, 2006.
- [2.40] F. AOUABED "Contribution à l'étude d'un circuit équivalent des isolateurs synthétiques sous pollution en utilisant l'EMTP" thèse magister Sétif 2010.
- [2.41] G. Talal, "Comportement d'un modèle d'isolateur sous tension impulsionnelle", mémoire de magister en génie électrique, laboratoire de haute tension, école nationale polytechnique d'Alger 2007.
- [2.42] M. SLAMA, "Contribution a l'étude de l'influence de la non-uniformité de la pollution basée sur la méthode de la D.D.S.E pour le dimensionnement des isolateurs des lignes T.H.T à courant alternatif, ", Oran: thèse de Magister, 29 juin 2002.
- [2.43] U. Kaltenborn, P. Meier and Y. Dirix. "Loss and recovery of hydrophobicity of novel hydrophobic epoxy resins," IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenom. (CEIDP), pp. 303-306, 2002.
- [2.44] J. Ndoumbe, "Étude comportementale des gouttelettes d'eau déposées sur la surface d'un isolateur composite haute tension en présence d'un champ électrique", thèse de doctorat, Ecole doctorale, Electronique, Electrotechnique, Automatique de Lyon, France,2014.
- [2.45] K. Belhouchet, "Estimation des paramètres de l'arc de contournement des isolateurs pollués en utilisant l'approche génétique, ", Setif: Université Ferhat Abbas, 2011.
- [2.46] W. Taibi, K.Abdeli, "Modèle d'un isolateur pollué sous tension alternative 50 Hz ", Thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Université des Sciences et Technologies Houari Boumediene, Bab Ezzouar, Alger, Algérie, Juin 2002.

Chapitre 03

- [3.1] Ravi Gorur, Dave. Shaffner, Wayne Clark 2005, "Utilities share their field experience," *Trans. Distrib. World Magaz.*, pp. 17-27, 2005.
- [3.2] Gorur, RS, Cherney, EA & Burnham, JT , "Outdoor Insulators," Ravi S. Gorur Inc Phoenix, Arizona 85044, USA 1999.
- [3.3] G.G.Karady, H.M.Schneider and F.A.M.Rizk., "Review of Cigre and IEEE research into pollution performance of non ceramic insulators: field aging effects and laboratory test techniques", *Cigre 1994 Session*, N°.33-103, 1994.
- [3.4] H.M.Schneider, J.F.Hall and G.G.Karady., "Non ceramic insulators for transmission lines", *IEEE Trans. Power Deliv.* vol. 4, N°. 4, pp .2214-2221, 1989.
- [3.5] Gorur RS, Orbeck T "Surface dielectric behavior of polymeric insulation under HV outdoor conditions," *IEEE. Trans. Electr. Insul*, vol. 26, N°. 5:pp.1064–1072, 1991.
- [3.6] IEC 60815-1:2008, "Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions, Part1: definitions, information and general principles," 2008.
- [3.7] Lambeth PJ, Schneider HM, Beausejour Y, Dumora D, Kawamura T, Marrone G, Stearns R "Final report on the clean fog test for HVAC insulators," *IEEE Trans Power Deliv*, vol. 2, N°. 4 ,pp.1317–1326, 1987
- [3.8] M. Shah, G. G. Karady, and R. L. Brown, "Flashover mechanism of silicone rubber insulators used for outdoor insulation-II," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 10, N°. 4, pp.1972–1978, 1995.
- [3.9] S. Venkataraman and R. S. Gorur, "Prediction of flashover voltage of non-ceramic insulators under contaminated conditions," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 13, N°. 4, pp. 862–869, Aug. 2006.
- [3.10] Gorur RS, Schneider HM, Cartwright J, Beausajour Y, Kondo K, Gubanski S, Szilagyi Z "Surface resistance measurements on non ceramic insulators,". *IEEE Trans Power Deliv*, vol. 16, N°. 4, pp.801–805, 2001.
- [3.11] Ehsani M, Borsi H, Gockenbach E, Morshedian J, Bakhshandeh GR (2004) "An investigation of dynamic mechanical, thermal, and electrical properties of housing materials for outdoor polymeric insulators,". *Eur Polym J*, vol. 40, N°. 11, pp.2495–2503, 2004.

- [3.12] A. de la O and R. S. Gorur, "Flashover of contaminated non-ceramic outdoor insulators in a wet atmosphere," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 5, N^o. 6, pp. 814–823, 1998.
- [3.13] Gorur RS, Subramanian K "Use of surface resistance for assessing vulnerability of HV outdoor insulators to contamination flashover," In: *Conf. Electrical. Insul. Dielectr Phenom. Annual Report*, pp. 406–409, 2003.
- [3.14] Gorur RS, Olsen R, Crane J, Adams T, Journey J "Prediction of flashover voltage of insulators using low voltage surface resistance measurement". *Power System Engineering Research Center, Final Project Report, Arizona State University*, pp. 154–163, 2006.
- [3.15] Arshad, A. Nekahi, S. G. McMeekin, M. Farzaneh "Measurement of surface resistance of silicone rubber sheets under polluted and dry band conditions," *Electr Eng* 9 2017.
- [3.16] M. Albano, A.S. Krzma, R.T. Waters, H. Griffiths, A. Haddad " Artificial pollution layer characterization on conventional and textured silicone-rubber insulators," *The 19th International Symposium on High Voltage Engineering, Pilsen, Czech Republic*, pp. 23 – 28, 2015.
- [3.17] Ayman H. El-Hag, S.H.Jayaram and E.A.Chemey., "Calculation of leakage current density of silicone rubber insulators under accelerated aging conditions," *Journal of Electrostatics*, 67, pp. 48-53, 2009.
- [3.18] C. Roero and T. H. Teich, "Water drops on high voltage transmission lines," *Electrostatics Society of America (ESA) Annual Meeting University of Alberta, Edmonton, Canada*, 2005.
- [3.19] U. Straumann and M. Semmler, " About the mechanism of tonal emission from high voltage lines," 15th *Int. Conf. on Gas Discharges and Their Applications, Toulouse, France*, vol. 1, pp. 363-366, 2004.
- [3.20] M. Amin, M. Akbar and S. Amin, "Hydrophobicity of Silicone Rubber used for Outdoor Insulation (an overview) ,"*Rev. Adv. Mater. Sci. Vol. 16*, pp.10-26, 2007.
- [3.21] Y. Zhu, K. Haji, M. Otsubo, C. Honda and N. Hayashi, "Electrohydrodynamic behaviour of water droplet on an electrically stressed hydrophobic surface," *Journal of Applied Physics* 39, pp. 1970-75, 2006.

- [3.22] S. M. Rowland and F. C. Lin "Stability of alternating current discharges between water drops on insulation surfaces," *Journal of Applied Physics* 39, pp.3067-3076, 2006.
- [3.23] E. Nasser, "Some physical properties of electrical discharges on contaminated-surfaces," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-87, N°. 4, pp. 957–963, 1968.
- [3.24] Obenaus F., "Contamination flashover and creepage path length" *Oeutsche, Elektrotechnik*, 12, pp.135-136.
- [3.25] Neumarker G., "Contamination state and creepage path" *Oeutsche Ahad., Berlin*, 1, pp.352-359, 1959.
- [3.26] Hampton B., "Flashover mechanism of polluted insulation" *Proc.IEE*, III, pp. 985-990, 1964.
- [3.27] G. Karaday, M. shaw and R. Brown, "Flashover mechanism of silicone rubber insulators used for outdoor insulation - I" *IEEE Trans. Power. Deliv*, vol. 10, N°. 4, pp.1965-1971, 1995.
- [3.28] Gorur, R., El-kishky, H., Chowdhary, M., Mukherjee, H., Sundaram, R., and Burham, J., "Sudden flashover of non-ceramic insulators in artificial contamination tests," *IEEE. Trans. Dielectr. Electrical. Insul*, vol. 4, N°. 6, pp. 79-87, 1997.
- [3.29] D.A. Swift, "Flashover of an insulator surface in air due to polluted water droplets," *Proceedings of the 4th Int Conf. on Properties and Applications on Dielectric Materials* 2, pp. 550–553, 1994.
- [3.30] P. Claverie, "Predetermination of the Behaviour of Polluted Insulators," *IEEE Trans. Power. App. Syst.*, vol. PAS-90, N°. 4, pp. 1902–1908, Jul. 1971.
- [3.31] M. Farzaneh and J. F. Drapeau, "AC flashover performance of insulators covered with artificial ice," *IEEE Trans. Power Deliv*. vol. 10, N°. 2, pp. 1038–1051, 1995.
- [3.32] D. L. Williams, A. Haddad, A. R. Rowlands, H. M. Young, and R. T. Waters, "Formation and characterization of dry bands in clean fog on polluted insulators," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul*. vol. 6, N°. 5, pp. 724–731, 1999.
- [3.33] P. Dixit, V. Krishnan, and G. R. Nagabhushana, "Mathematical model to predict flashover voltages of polluted polymeric insulators intended for UHV DC," in *2010 International Conference on High Voltage Engineering and Application*, pp. 437–440, 2010.

- [3.34] M. E.-A. Slama, A. Beroual, and H. Hadi, "Experimental and mathematical modeling of the effect of non-soluble and low soluble salts and salts mixture pollution on dc flashover of high voltage insulators," in 2012 Annual Report Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenom, pp. 757–760, 2012.
- [3.35] M. H. Nazemi and V. Hinrichsen, "Experimental investigations on partial discharge characteristics of water droplets on polymeric insulating surfaces at AC, DC and combined AC-DC voltages," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 22, N^o. 4, pp. 2261–2270, 2015.
- [3.36] C. Muniraj and S. Chandrasekar, "Predictive dynamic arc model of the pre-flashover leakage current on polymeric insulators," in 2011 Interna. Conf. Power Energy Syst, pp. 1–5, 2011.
- [3.37] K. Karakoulidis, M. Danikas, P. Rakitzis, "Deterioration phenomena on polymeric insulating surfaces due to water droplets," Journal of Electrical Engineerin, vol. 56, N^o. 7-8, pp.169–175, 2005.
- [3.38] Y. Zhu, K. Haji, M. O. Chikahisa Honda and N. Hayashi, "Electrohydrodynamic behaviour of water droplet on an electrically stressed hydrophobic surface", <http://iopscience.iop.org/0022-3727/39/9/038>) Published 20 2006.
- [3.39] A. Krivda, D. Birtwhistle, "Breakdown between water drops on wet polymer surfaces", Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenom., pp.572-580, 2001
- [3.40] Y. Mizuno, M. Iwatani, M. Nagata K. Naito, K. Kondo, S. Ito, "Behavior of Water Droplets on Silicone Rubber Sheet under AC Voltage Application," IEEE, Trans. Dielectr. Electr. Insul vol. 10, N^o. 1, pp. 7803-503, 1998-1999.
- [3.41] D.Windmar., "Water drop initiated discharges in air", Ph.D. Thesis, Uppsala University of Technology, Uppsala Sweden, 1997.
- [3.42] P.D.Blackmore., "Degradation of polymeric outdoor high voltage insulation: surface discharge phenomena and condition assesment techniques", Ph.D. Thesis, Queens land University, Australia, 1997.
- [3.43] D.Birtwhistle., "Surface discharges on polymeric insulator shed surfaces", IEEE Trans. Dielectr. Electrical Insul., vol. 4, N^o. 2, pp.210-217, April 1997.
- [3.44] Machael G, Danikas, Ramanujam Sarathi, Pavlos Ramnalis and Stefanos L Nalmpantis., " Analysis of polymer surface modifications due to discharges

initiated by water droplet under high electric fields" , International Journal of Materials and Metallurgical Engineering vol. 3, N°. 2, 2009.

- [3.45] Padma V, Raghavan VS, "Analysis of insulation degradation in epoxy insulators using finite element method", in 2012 Third International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation (ISMS), pp. 498-503, 2012.
- [3.46] E. Da Silva SMR, "The dependency of water droplet behaviour and LC pattern on electrode configuration", Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenom. Annual Report, pp. 242-245, 2009.
- [3.47] Andersson J, Guerrero RS, Gubanski SM, Hillborg H, "Tracking behaviour in the presence of conductive interfacial defects", in CEIDP'09 IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenom., pp 230-233, 2009.
- [3.48] Sarang B, Basappa P, Lakdawala V, "Effect of water droplets and water films on the electrical performance of practical outdoor insulators", in Conference Record of the 2010 IEEE Interna. Symp. Electr. Insul (ISEI), pp.1-6, 2010.
- [3.49] El-Kishky H. and Gorur R. S., "Electric field computation on an insulating surface with discrete water droplets," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 3, pp. 450-456, 1996.
- [3.50] I. J. S. Lopes, S.H. Jayaram, E. A. Cherney, "A study of partial discharges from water," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul, vol. 6 N°. 2, pp. 262-267, 2001.
- [3.51] Moreno V. M. and Gorur R. S., "Corona-induced degradation of non-ceramic insulator housing materials," Conf. Electr Insul. Dielectr. Phenom. pp. 640-643, 2001.
- [3.52] Krivda A., Greuter F., Rocks J., Kornmann X., and Meier P., "Chemical analysis of outdoor silicone materials after electrical and environmental testing," in Proceedings of IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr Phenom., pp. 389-392, 2006.
- [3.53] R.K.Dholey, R.Bose and P.Roy, S. Chatterjee, "Electric field computation in presence of water droplets on a polymeric insulating surface," 2nd International Conference on Control, Instrumentation, Energy & Communication (CIEC), 2016.
- [3.54] Nagaraj H p, Vasudev N, Ravi K N, Shivakumara Aradhya, "Behaviour of water droplets on polymer surface," IEEE 10th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials Bangalore, India 2012.

- [3.55] J. P. Reynders, I. R. Jandrell, and S. M. Reynders, "Surface ageing mechanisms and their relationship to service performance of silicone rubber insulation," Proc. Int. Symp. High Voltage Eng. (ISH), pp. 54-58, London, UK, 1999.
- [3.56] B-A. L. Souza, I. J. S. Lopes "Experimental investigation of corona onset in contaminated polymer surfaces" IEEE Trans. Dielectr Electr Insul. vol. 22 N°. 2, pp. 1321-1331, 2015.
- [3.57] C - A. J. Phillips, A. J. Maxwell, C. S. Engelbrecht I. Gutman, "Electric-field limits for the design of grading rings for composite line insulators." IEEE Trans. Power Deliv., vol. 30, N° 3, pp. 1110 – 1118, 2015.
- [3.58] Simmons S., Shah M., Mackevich J., and Chang R. J., "Polymer outdoor insulating materials. Part III-Silicone elastomer considerations," IEEE Magaz. Electr. Insul, vol. 13, pp. 25-32, 1997.
- [3.59] Vlastos, A., "Influence of material and electric stress on the performance of polymeric insulators," Proceedings of the 4th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Brisbane, Australia, pp. 542-545, 1994.
- [3.60] Kim, S. H., Cherney, E. and Hackam, R., "Suppression mechanism of leakage current on RTV coated porcelain and silicone rubber insulators", IEEE Trans. Power Deliv, vol.6, pp. 1549-1556, 1991.
- [3.61] Kim, S., Cherney, E., and Hackam, R., "The loss and recovery of hydrophobicity of RTV silicone rubber insulator coating," IEEE Trans. Power. Deliv, vol. 5, N°. 3, pp.1491-1500, 1990.
- [3.62] Fernando, M., and Gubanski, S., "Analysis of leakage current waveforms for field-aged and new composite insulators," Proceedings of the IEEE Conf. Electr. Insul Dielectr. Phenom, Minneapolis, USA, pp. 350-353, 1997.
- [3.63] Fernando, M., and Gubanski, S., "Leakage current on non-ceramic insulators and materials," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul, vol.6, N°.5, pp.660-667, 1999.
- [3.64] Fernando, M., and Gubanski, S., "Leakage current patterns on contaminated polymeric surfaces," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul, vol.6, N°.5, pp. 688-694, 1999.

- [3.65] Fujishima, T., Yamashita,T., Matsuo,H., Harada,S., "Estimation of Equivalent Salt Deposit Density from Measurement of Leakage Impedance of an Insulator under Saltwater Spray," 10th International Symposium on HV Engineering, 1997.
- [3.66] Kim, J., Song, W., Lee, J., Park, Y., Cho, H., Yoo, Y., Yang, K., "leakage current monitoring and outdoor degradation of silicone rubber," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul, vol. 8, N°. 6, pp. 1108-1115, 2001.
- [3.67] Sorqvist, T., and Gubanski, S., "Leakage current and flashover of field-aged polymeric insulators," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul, vol. 6, N°. 5, pp.744-753, 1999.
- [3.68] G. Bruce, S. Rowland, and A. Krivda, "Performance of silicone rubber in DC inclined plane tracking tests," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 17, N°. 2, pp. 521–532, 2010.
- [3.69] A. De La O, R. S. Gorur, and J. Chang, "AC clean fog tests on non-ceramic insulating materials and a comparison with porcelain," IEEE Trans. Power Deliv., vol. 9, N°. 4, pp. 2000–2008, 1994.
- [3.70] Shaowa W., Xidong L., and Lenceng H., "Experimental Study on the Pollution Flashover Mechanism of Polymer Insulators", IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Tsinghua University, Beijing, China, Vol. 4, pp. 2830-2833, January 2000.
- [3.71] Xinsheng Wang and Noboru Yoshimura, "Resistance to tracking and erosion of silicone rubber material under various types of precipitation," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 38, Part 1, Number 9A.1999.
- [3.72] Que W., and Sebo S., "Electric field and potential distributions along dry and clean non- ceramic insulators of high voltage power lines", IEEE Trans. Power. Deliv, vol. 22, N°. 2, pp. 1070-1078, 2007.

Chapitre 04

- [4.1] F. Aouabed, A. Bayadi, R. Boudissa, "Performance of silicone insulating surface covered by water droplets under ac voltage," Elsevier Power Systems Research 02-2017.
- [4.2] CEI 60060-1 "Techniques des essais à haute tension" ,11-1989.

Chapitre 05

- [5.1] H. Wang, Z. Peng, S. Zhang, P. Liu, "Simulation study on E-field distribution and corona characteristics of composite insulator with water droplets," Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenom. (CEIDP), pp. 422-425, 2013.
- [5.2] D. A. Swift, "Flashover of an insulator surface in air due to polluted water droplets," Proceedings of the 4th International Conference on Properties and Applications on Dielectric Materials, July 3-8, Brisbane Australia, 1994.
- [5.3] M. G. Danikas, R. Sarathi, P. Ramnalis, S. L. Nalmpantis, "Analysis of polymer surface modifications due to discharges initiated by water droplets under high electric fields," International Journal of Electrical and Electronics Engineering 4-5, pp.329-334,2010.

Chapitre 06

- [6.1] M. S. A Rahman , M. Z. A. Ab Kadir, M. Izadi, C. Gomes, J. Jasni, F. A. "Considering the effect of angle on polymer insulator performance under wet condition," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. pp. 385-362, 2015.
- [6.2] F.A Jamaludin, M.S. B Abd Rahman, M. Izadi, M.Z.A Ab Kadir, N. Azis and J.Jasni "Considering the effect of a cross-arm on a contaminated polymer insulator at different angles," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. pp. 263-267, 2015.
- [6.3] Z. Fuzeng, W. Xin, L. Biao, W. Liming, and G. Zhicheng, "Influence of angles of V-strings on DC flashover characteristics of polluted insulators in high altitude areas," IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenom., pp. 449–452, Oct. 2006.
- [6.4] F. A Jamaludin, M. Z. A Ab-Kadir, M. Izadi, N. Azis and J. Jasni, M. S Abd Rahman, "Considering the effects of a RTV coating to improve electrical insulation against lightning," international conference on lightning protection, Estoril – Portugal, 25-30 september 2016.
- [6.5] B. X. Du, Y. Liu, Y. S. Xia, B. X. Yang, B. C. Liu, "Dynamic behavior of water droplet for evaluating outdoor insulator", Proceedings of the 9th International Conference on Properties and Applications on Dielectric Materials, July 19-23, Harbin, China, 2009.

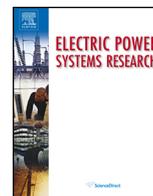
- [6.6] C. Baer, R. Cervinka, R. Baersch, J. Seifert, J. Lambrecht, H. J. Winter, "On a comparative evaluation of the retention of the hydrophobicity and the tracking resistance of silicone elastomer under ac and dc stress", 17th International Symposium on high Voltage Engineering, Hannover, Germany, .E- 028, 2011.
- [6.7] M. Nagao, Y. Murakami, Y. Kurimoto, R. Kim, "dynamic drop test under AC and DC voltage application (effect of charging on hydrophobicity loss of silicone rubber)", CIGRE WG D1-27 056, Paris 2010.
- [6.8] A. Hegert, "Retention of hydrophobicity under DC – preparations for the first dynamic drop-RRT", CIGRE WG D1-27073, Prague, Czech Republic, 2011.
- [6.9] T. Braunsberger, M. Kurrat, "Cyclic water drop corona on silicone rubber samples", 15th International Symposium on High Voltage Engineering, University of Ljubljana, Elktroinstitut Milan Widmar, Ljubljana, Slovenia, T4-280, pp.1-5, 2007

Chapitre 07

- [7.1] Wei H. J., Jayaram S., and Cherney E. A., "A study of electrical stress grading of composite bushings by means of a resistive silicone rubber coating," Journal of Electrostatics, vol. 63, pp. 273-283, 2005.
- [7.2] Rong Z., Yun Z., Wei-Yuan C., and Bo Zhang, "Measurement of electric field distribution along composite insulators by integrated optical electric field sensor," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul, vol. 15, pp.302-310, 2008.
- [7.3] R. Abd-Rahman. A. Haddad. M.S. Kamarudin. M. F. M. Yousof. N.A.M. Jamail "Dynamic modelling of polluted outdoor insulator under wet weather conditions," IEEE Conf. Power. Energy (PECon), pp.610-614, 2016.
- [7.4] R. Abd-Rahman, A. Haddad, N. Harid and H. Griffiths "Stress control on polymeric outdoor insulators using zinc oxide microvaristor composites," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul, vol. 19, pp. 705-713, 2012.
- [7.5] Klaus-Jurgen Bathe., "Finite element procedures," New Jersey: Prentice Hall, 2nd edition. 2014.
- [7.6] B. Marungsri, W. Onchantuek, A. Oonsivilai, T. Kulworawanichpong, "Analysis of electric field and potential distributions along surface of silicone rubber

insulators under various contamination conditions using finite element method,"
World Academy of Science, Engineering and Technology 53, 2009

- [7.7] F. Aouabed, A. Bayadi, A. Rahmani, "Finite element modeling for electric field and voltage distribution on silicone insulating surface covered by water droplets," Société Française d'Électrostatique, Poitiers, France, 29-31 août 2016.



Flashover voltage of silicone insulating surface covered by water droplets under AC voltage



F. Aouabed^a, A. Bayadi^{a,*}, R. Boudissa^b

^a Département Electrotechnique, Université Ferhat Abbas de Sétif 1, Sétif, Algeria

^b Labo Génie Electrique, Université A. Mira, Béjaïa, Algeria

ARTICLE INFO

Article history:

Received 26 May 2015

Received in revised form

13 September 2016

Accepted 10 October 2016

Keywords:

Contamination

Flashover

Testing

Silicone rubber insulators

Surface wettability

Water droplets

ABSTRACT

Discharges caused by water droplets on the surface of polymeric insulators can affect the long-term reliability of the component by lowering the surface hydrophobicity boosting surface discharges. The main objective of this work is to quantify the effect of different types of water drops arrangements, their position and dry bands width on the flashover voltage of the silicone insulating surface with non-uniform electric field systems. The tests were done on a rectangular sample under AC voltage. Water droplets with different conductivities and volumes were placed on the silicone rubber surface with a micropipette. A rod-rod electrode system is used.

The findings of this work indicate that the performance of the samples decreases with the presence of water drops on their surfaces. Further, these experimental findings show that there is a limiting number of rows from which the flashover voltage of the insulation is minimal and constant. This minimum is a function of the distance between two successive rows.

Finally, it is concluded that the system withstand voltage increases when the row of droplets on the electrode axis is removed.

© 2016 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Nowadays, silicone rubber insulation materials are widely used in high voltage outdoor insulation systems as they can combat pollution flashover problems.

The difference in pollution flashover performance of silicone rubber and other insulating materials is due to the way that water wets their surfaces. It resides as discrete drops on silicone rubber, and the mechanism of flashover is due to the breakdown of the air between the water drops and the deformation of these drops in the direction of the electric field which brings the insulation to degradation and failure.

During the past 25 years polymeric materials have emerged as a viable option to porcelain and/or glass for outdoor insulation [1,2]. Polymeric insulators are increasingly being used in both the distribution and transmission systems because of their very strong resistance to the contamination, their lightness, their mechanical resistance and their very good wettability. The deterioration of

insulator surface is one of main problems to the safety and reliability of electric systems. This is due to environmental conditions (light rain, morning dew), which significantly affect its performance. It is known that water droplets may cause, under applied electric field, deterioration of the surface of a non-ceramic insulator even in conditions of low pollution. This is due to the fact that water droplets on a polymer surface locally increase the applied electric field. Local field intensifications will lead to partial discharges and/or localized arcs. These partial discharges destroy the hydrophobicity and cause the degradation of the insulators which can play an important role in long-term performance [9–13]. The influence of various parameters on the behavior of water droplets on polymeric surfaces under high electric fields has been the subject of several investigations [3–13]. The main objective was to increase the alternating electric field. Karady [5], for example, presented the results of an experimental investigation which provides a better understanding of the phenomena leading to flashover. It was shown that the hydrophobic nature of silicone rubber surface results in a flashover mechanism different from that of porcelain insulators. Changes in surface resistance induced by discharge activity on wet and contaminated surface have been identified as one of the sources of flashover of silicone insulators. Phillips et al. [10] published the results of a research that correlates the insulators aging with corona activities from water droplets. Using small-scale experiment, it was shown that Water drops on the sheath surfaces of SiR insulator can

* Corresponding author at: Département d'Electrotechnique, Faculté de Technologie, Université Ferhat Abbas Sétif 1, Algeria. Tel.: +213 665 303 202; fax: +213 36 611 211.

E-mail addresses: fatiha.ess@yahoo.fr (F. Aouabed), a.bayadi@yahoo.fr, a.bayadi@univ-setif.dz (A. Bayadi), raboudissa@yahoo.fr (R. Boudissa).

produce corona, and the field necessary to produce corona depends on the droplets size and the surface hydrophobicity.

Swift [14] studied theoretical and experimental investigation of droplets on the surface insulator from the viewpoint of water triggered electrical breakdown of an air-dielectric interface. It was shown that greatly reducing the hydrophobicity of the surface by sparking the flashover voltage, but recovery to the fully-hydrophobic value takes only a few minutes, and that for the fully hydrophobic case, flashover is triggered by gross distortion of the water droplet.

In Ref. [15], the authors have presented an experimental study on the problems arising from the application of uniform ac electric fields on water droplets deposited on polymer surfaces.

Different polymeric materials were used. It was shown that various parameters such as water conductivity, droplet volume, droplet positioning and polymer surface roughness affect the flashover voltage. It was also reported that the positioning of the droplets plays a greater role in determining the flashover voltage than the droplet volume.

In Ref. [16], tests have been done on water droplets of different conductivities and volumes deposited on the surface of silicone rubber. Factors affecting the corona discharge of water droplets were analyzed by calculating the electric field. The authors reported that water droplets increase the electric field and can cause corona discharge. They also observed that the droplet vibrates and lie down to the positive electrode in a wave synchronism with the applied voltage frequency.

Fernando et al. [17] studied the behavior of leakage current on composite insulators of different materials. They concluded that the leakage current is capacitive in nature and often has a sinusoidal shape. When the hydrophobicity is lost, the leakage current becomes more resistive, with peaks due to discharges in dry bands.

Lopes et al. [20] measured partial discharge (PD) from water droplets on a silicone rubber insulating surface in an ac field. They have shown that the presence of water droplets on a silicone rubber surface produces an electric field enhancement. The field enhancement factor depends on the size and number of droplets. They also observed that the electrostatic forces change the droplet shapes and spread them in the field direction.

Souza et al. [21] investigated the corona inception and its relation with polymer surface conditions. They concluded that the association water droplets and pollution, enhance the electric field and can lead to corona discharges and eventually to failures, under heavy contaminated regions.

Phillips et al. [22], for example, presented summarized the findings of the extensive research carried out by these two organizations (EPRI and STRI) to determine a practical limit for the permissible e-field on insulator surfaces for design purposes.

However, to the authors' best knowledge, A few theoretical and experimental works studying the influence of the combination the droplets arrangements with dry bands on polymeric surface have been done [18].

To form a better view of the behavior of water droplets under a non-uniform electric field, we carried out several experimental tests in the high voltage laboratory. We investigated the influence of the number of water droplets rows and the distance between them. This paper summarizes findings of experiments which allow quantifying these effects on the flashover voltage.

2. Experimental setup and test procedure

The withstand voltage measurement and visualization of the air gap disruption phenomenon were conducted using equipments depicted in Fig. 1. The test circuit consists of a HV transformer (Tr) having a maximum secondary voltage of 140 kV. A control unit (CU)

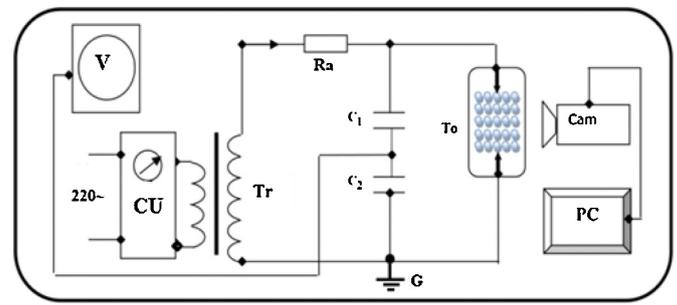


Fig. 1. Laboratory test setup.

(CU: transformer control unit; Tr: HV transformer; Cam: came scope; PC: personal computer; To: test object; C1, C2: capacitive divider; Ra: resistance; V: digital peak voltmeter).

for automatic or manual speed ramp control. A digital peak voltmeter (V) at the low-voltage arm of a capacitive divider (C_1 , C_2) was used for voltage measurements. A current-limiting resistance (R_a) was connected in series with test object (To). The development of the electrical discharge along the sample surface was visualized and recorded from inception to full flashover using a video camera system

The air gap system has two point electrodes. The high-voltage and earth electrodes consist of a cylindrical stainless steel rod 5 mm in diameter. They are terminated by a conical tip having an angle of 60° and radius of curvature of 0.5 mm.

The rods are fixed on the holes of two PVC tubes.

The test specimen is a plate-shaped silicone rubber having 120 mm in length, 80 mm in width and 5 mm in thickness. The pollution solution comprises salt and distilled water. The water droplets have been deposited on the hydrophobic surface using a micropipette. The volume of these droplets can be obtained by tuning the micropipette at the desired size. In this case, the volume of water droplets deposited is $40 \mu\text{l}$. The volume conductivity σ_v of the polluting solution was directly measured by a mobile probe volume conductimeter and was found to be about $180 \mu\text{S/cm}$.

The air gap distance was taken equal to 6 cm. Twenty five tests were carried out and voltage steps ΔV of approximately 5% of U_c were used. These test parameters are well within the recommended values for such statistical measurements where the number of tests n should be between 20 and 60 tests and the voltage step ΔV between 1% and 10% of the flashover voltage. Before each new test, the sample is cleaned and rinsed with water then dried using paper tissue. Then cleaned with the isopropanol alcohol. For each calculated mean value, by applying correction factors, a disruptive discharge voltage measured in given test conditions (temperature T , pressure P , humidity H) is converted to the equivalent value under the standard reference atmospheric conditions ($T_0 = 20^\circ\text{C}$, $P_0 = 101.3 \text{ kPa}$, $H_0 = 11 \text{ g/m}^3$) [19]. The group of water droplets is characterized by a couple of variable (ar , dg). The distance ar is the width between two successive rows and dg is the distance between two successive columns of water droplets as shown in Fig. 2.

3. Results and discussion

To investigate the influence of water droplet on the flashover voltage of a silicone rubber insulating surface a series of experiments have been conducted as follows:

3.1. Effect of water conductivity

Fig. 3 shows the influence of the water droplets conductivity on the mean value of the insulator flashover voltage for two different numbers of rows.

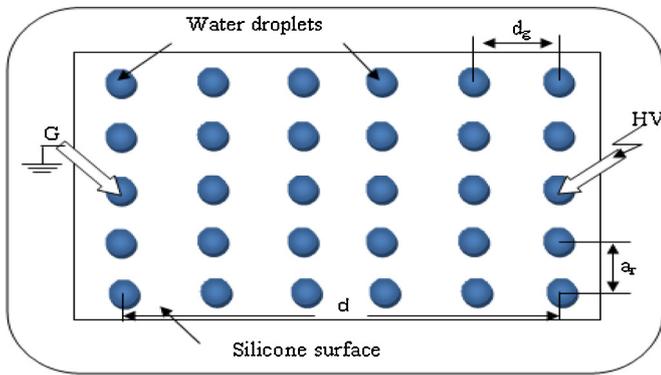


Fig. 2. Distribution of water droplets on the sample.

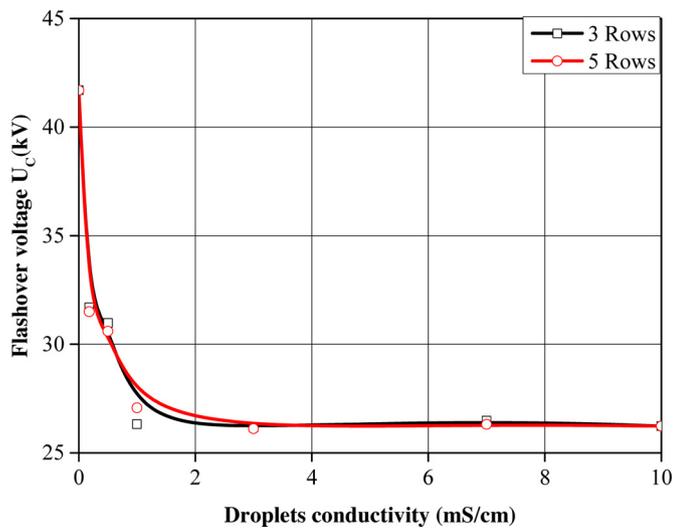


Fig. 3. Influence of the water droplets conductivity on the insulator flashover voltage.

The obtained results show that the chosen values of rows does not significantly affect the characteristic $U_c = f(\sigma_v)$.

Furthermore, as can be seen, the average flashover voltage decreases by approximately 38% with the pollution conductivity until a limit value of about 2.5 mS/cm beyond which the dielectric

strength of the system remains constant. This is mainly due to the fact that from this limit, the water becomes conductive.

3.2. Number of rows of water droplets

In this part of our investigations, experiments were performed without any droplets between the electrodes. This was done in order to have reference values of the flashover voltage. In order to understand the influence of droplets number of rows between the electrodes, the latter is varied from 1 to 11. The volume conductivity is maintained constant at about 180 μ S/cm. The obtained results are shown in Fig. 4. The observations with the video camera system have shown that the flashover process from the inception to full flashover is described essentially as follows:

- First, the group of water droplets deposited on the sample surface, before its energization, is shown in Fig. 4a. The middle row coincides with the electrodes axis and its extreme droplets got in contact with their points.
- In the second phase, When an electric field is applied, It is observed that the water droplets shape change along the electrode axis leading to the decrease of the ignition distance (Fig. 4b) and the sharp edge of the water droplets at the triple line together with the opposite electrode form a non-homogeneous field configuration which is the basic cause to have the streamer inception on the sample surface.
- Next, for the reason that the electric-field strength near the HV electrode is strong enough, electrical discharge is established along the electrode axis as shown in Fig. 4c,
- Finally, the tested sample after the full flashover is shown in Fig. 4d.

The variation of flashover voltage as a function of water droplets number is illustrated in Fig. 5. It can be seen that the presence of water droplets covering the hydrophobic insulating surface energized with alternating voltage causes the reduction of its performance. Indeed, the flashover voltage decreases as the number of rows increases. This can be explained by the decrease of the ignition distance due, in one hand, to the space occupied by volume of water droplets before deformation and in the other hand, to the their stretching along the path followed by the electric discharge.

Taking into account these results it can be seen that the flashover voltage decreases rapidly to a limit value of the number of rows

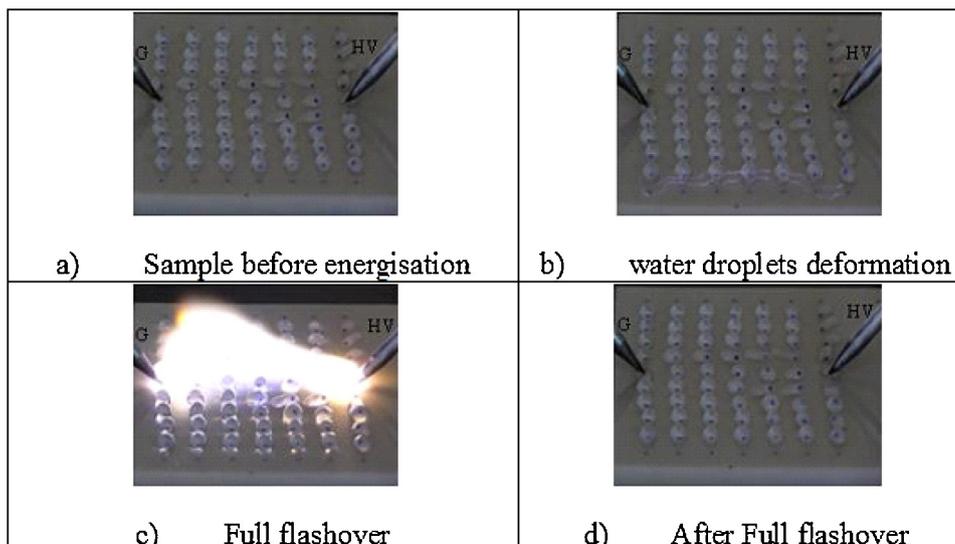


Fig. 4. Discharge development stages on the sample fully covered by water droplets.

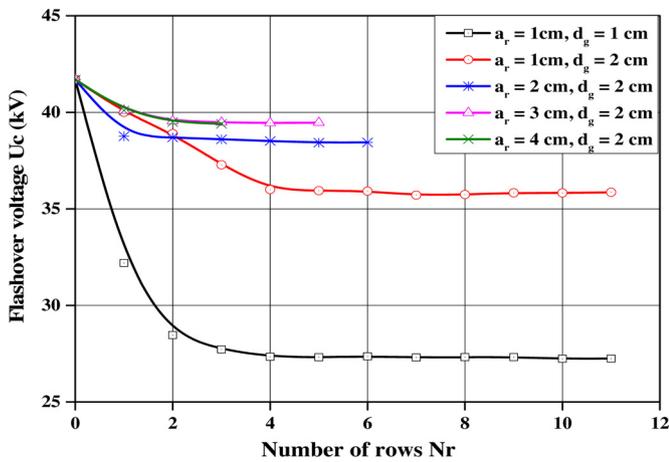


Fig. 5. Flashover voltage vs the number of rows droplets for different distances between them.

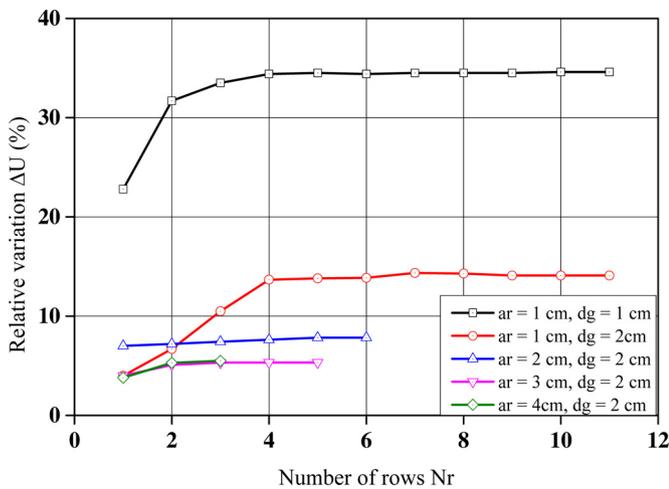


Fig. 6. Relative reduction of flashover voltage as a function of rows number.

from which, it becomes constant, the maximum variation of electric performance is estimated to 35%. The value of this limit is a function of the distance between two successive rows. Furthermore, when the distance a_r is decreased along the creepage distance of the sample, a significant decrease in its performance is observed as well.

Fig. 6 shows the relative reduction of flashover voltage as a function of rows number. We can see that the relative reduction increases rapidly to a limit value (5 rows) of the number of rows from which, it becomes relatively constant, which is in accordance with the results previously obtained.

The relative reduction between flashover voltage and water droplets rows can be obtained as follows:

$$\Delta U = 100\% \times (U_0 - U_i) / U_0 \quad (1)$$

where U_0 , U_i are the flashover voltage corresponding to the case without and with water droplets rows respectively. i is varied from 1 to 11.

Quantitatively, Table 1 summarizes the results obtained for the maximum relative variation of U_C when i is taken equal to 0 and 5 respectively. The maximum flashover voltage of the air gap with five rows is about 35% lower than that obtained in the case of a dry clean atmosphere. It should be noted that for the last value in the table, only 3 rows were used due to the dimensions of our samples.

Table 1
Relative reduction of flashover voltage with number of rows.

	Number of rows	U_c (kV)	ΔU (%)
$a_r = 1$ cm, $d_g = 1$ cm	0	41.7	35%
	5	27.31	
$a_r = 1$ cm, $d_g = 2$ cm	0	41.7	14%
	5	35.94	
$a_r = 2$ cm, $d_g = 2$ cm	0	41.7	8%
	5	38.43	
$a_r = 3$ cm, $d_g = 2$ cm	0	41.7	5.35%
	5	39.47	
$a_r = 4$ cm, $d_g = 2$ cm	0	41.7	5.5%
	3	39.4	

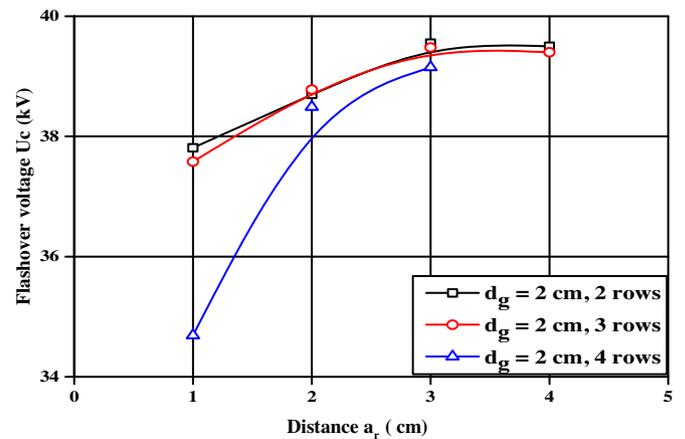


Fig. 7. Effect of the distance a_r on the insulator flashover voltages.

3.3. Distance between two successive rows

In this section the effect of the distance a_r is investigated. The arrangement of water droplets on the surface of the sample is designed such that there is no row along the electrode axis. The obtained results are illustrated in Fig. 7 for three different values of a_r . As can be seen the flashover voltage increases with the distance between two rows. Besides this we can see that the voltage increases rapidly up to a limit from which no improvement is detected.

3.4. Position and width of a dry zone perpendicular to the electrodes axis

Fig. 8 shows the shape of the insulation performance vs the number of rows of water droplets deposited on the surface perpendicular to the electrodes axis. The total number of perpendicular rows is 7. The number of parallel rows in this case is equal to 5. The distance between two successive rows is equal to 1 cm and the water droplets conductivity is about $180 \mu S/cm$.

Results of Fig. 8 show that when creating a dry band in the vicinity of the grounded electrode, the flashover voltage passes through a maximum for an air gap distance equal to approximately 6 cm which corresponds to a single row of water droplets in contact with the high voltage electrode. This optimum can be explained by the fact that after deformation of water droplets (Fig. 9a, b, d), the discharge arc over water droplets arises far away from the end of the high voltage electrode along a path characterized by a peak in its middle (Fig. 9c).

This path is longer than that between the two points without water droplets. The system in this case is more rigid than when the dry band is at the high voltage side. However, when the width of the dry band is equal to half the distance between the electrodes, the withstand voltage of the system with a dry band in the vicinity

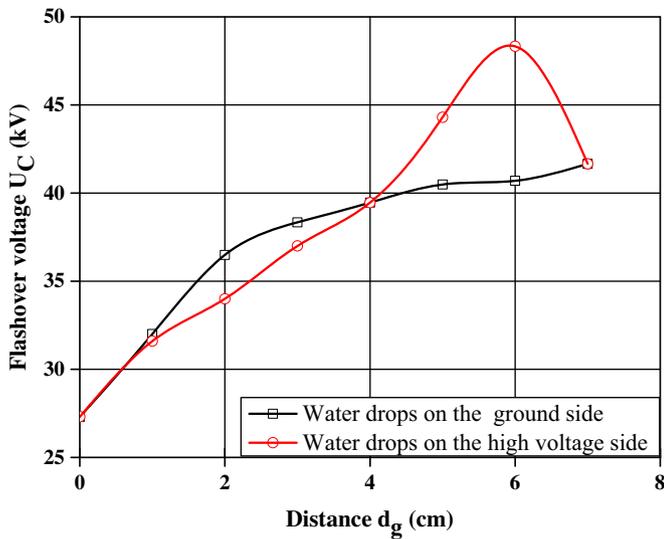


Fig. 8. Relation between the flashover voltage and the distance dg.

of the high voltage electrode is higher than the same system with the dry band in the ground electrode side. This discrepancy is due to the fact that deposited water droplets in the vicinity of the HV electrode shorten the inter-electrode path

3.5. Position and width of a dry band parallel to the electrodes axis

In this section, the effect of the dry band distance l_{db} parallel to the electrode axis on the flashover voltage is investigated. This investigation was achieved by removing droplets rows from selected areas of the insulator surface. The water droplets are characterized by an electric conductivity equal to $180 \mu S/cm$ having $a_r = 1 cm$ and $d_g = 2 cm$. the initial total number of rows is equal to 11.

As shown in Fig. 10, two scenarios were studied:

a) After covering the entire surface of the sample by water droplets, row n°6, by which we mean the row along the electrode axis, was removed first, then row n°5 on its right next comes row n°7 on its left.

This practice continues until only one row remains on the sample surface,

b) In the second scenario, the droplets rows were removed one by one starting from row n°1 until only one row remains on the sample surface as well.

The obtained results are shown in Fig. 11, where the variation of the flashover voltage is plotted as a function of the dry band distance l_{db} position and width.

As can be seen, in the case where water droplets row on the electrode axis was removed, the dry band created causes an increase in the dielectric strength of the system at its maximum value. From this limit removal of any other row does not produce any improvement. This means that the existence of the row along the electrodes axis contributes significantly to the shortening of the arcing path between the two electrodes. This was verified during the tests by obtaining photographic evidence for the discharges following the insulator surface (Fig. 12). Its removal does not automatically change the path of the electric discharge, despite the increase of the ignition distance and partial deformation of water droplets of the adjacent rows.

In addition to this, Fig. 11 indicates that a dry band having a width less than or equal to 5 cm obtained by deleting five rows to the left of the electrode axis (scenario b) does not affect the system performance and the flashover voltage is always at its minimum. However, Not only the removal of the droplets row n°6, which is on the electrode axis, increases the dielectric strength of the system but it produces the highest flashover voltage as well. From this limit no improvement was seen when deleting the rest of the droplets rows.

4. Conclusions

The analysis of the effect of different types of arrangements of water droplets on the flashover voltage of a silicone surface with a non-uniform field electrode system led mainly to the following conclusions:

- The performance of an insulating surface is reduced when it is uniformly covered by water droplets;
- Under the influence of water droplets, there is a limited number of rows for which the insulation performance is minimal (about 35% lower than that obtained in the case of a dry clean atmo-

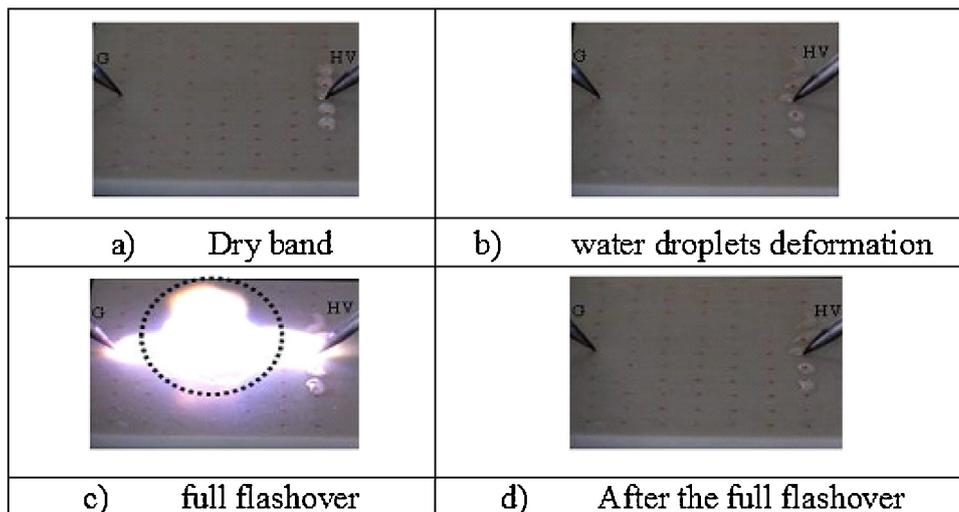


Fig. 9. Flashover process across the insulating surface: case of a single row at the HV electrode.

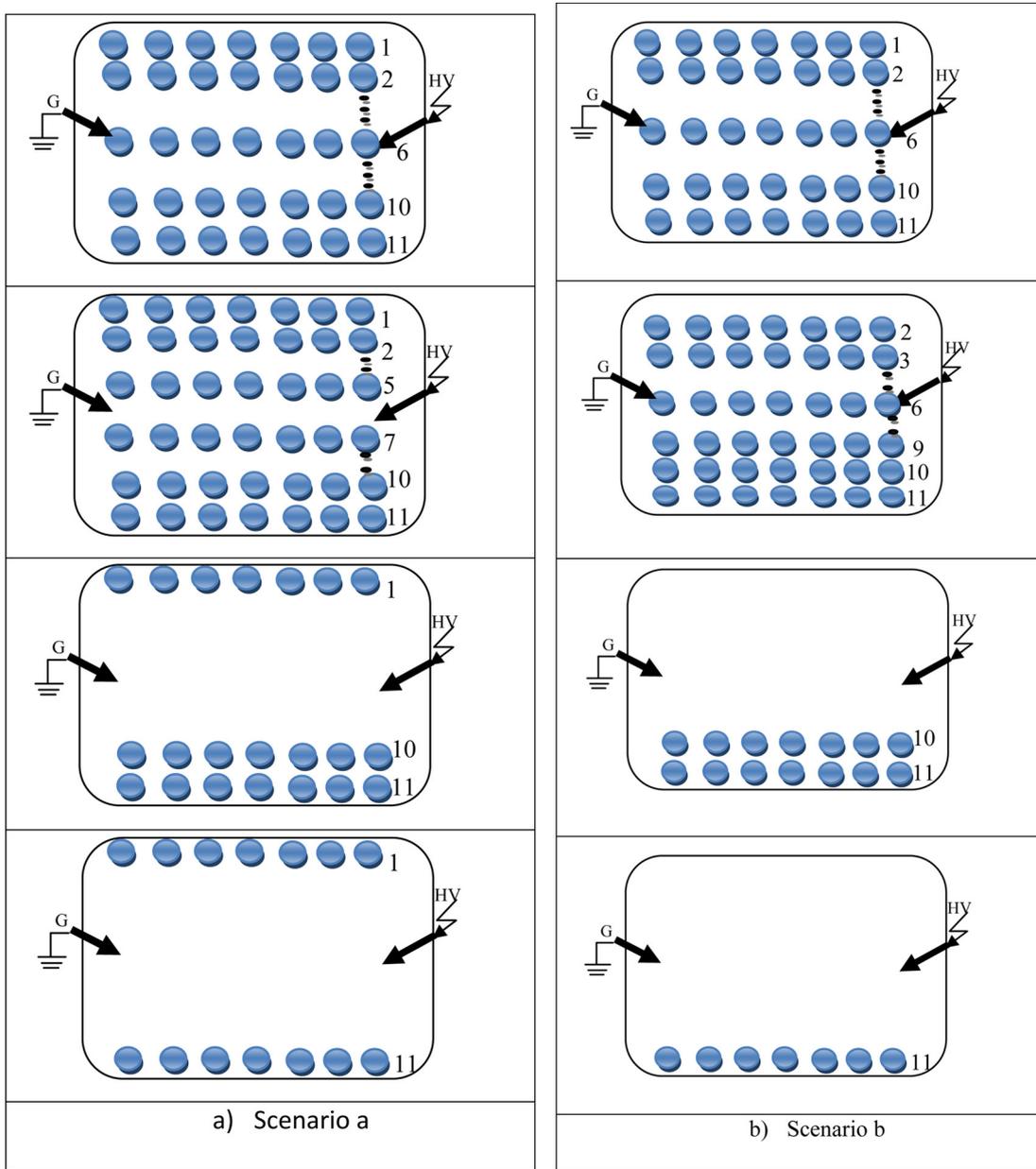


Fig. 10. Considered scenarios of the dry band.

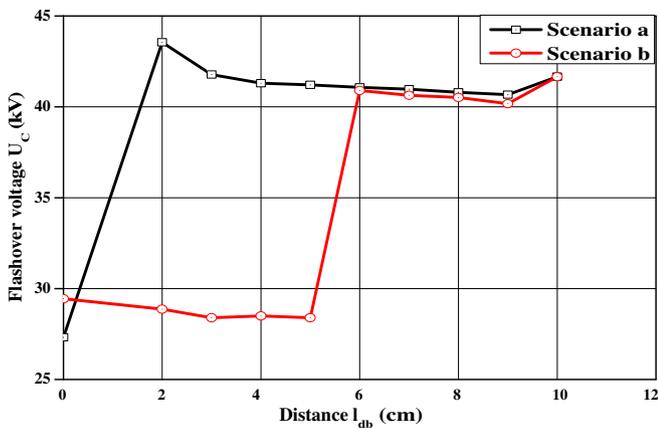


Fig. 11. Variation of the flashover voltage vs the dry band distance l_{db} .

sphere) and is quite constant beyond it. This minimum value depends on the distance between two successive rows of water droplets;

- In the case where water droplets row on the electrode axis does not exist, the created dry band increases the dielectric strength of the system;
- For the case where a dry band is created in the vicinity of the ground electrode such that a single row exist along the line passing through the high voltage electrode, the withstand voltage of the system is higher than that in the case of absence of water droplets on the surface.
- The flashover voltage decreases in a non-linear manner and is slightly affected by the increase of the water conductivity, in high conductivities region. Finally, the effect of the electrical conductivity of water droplets on its performance, erected falling to 38%.

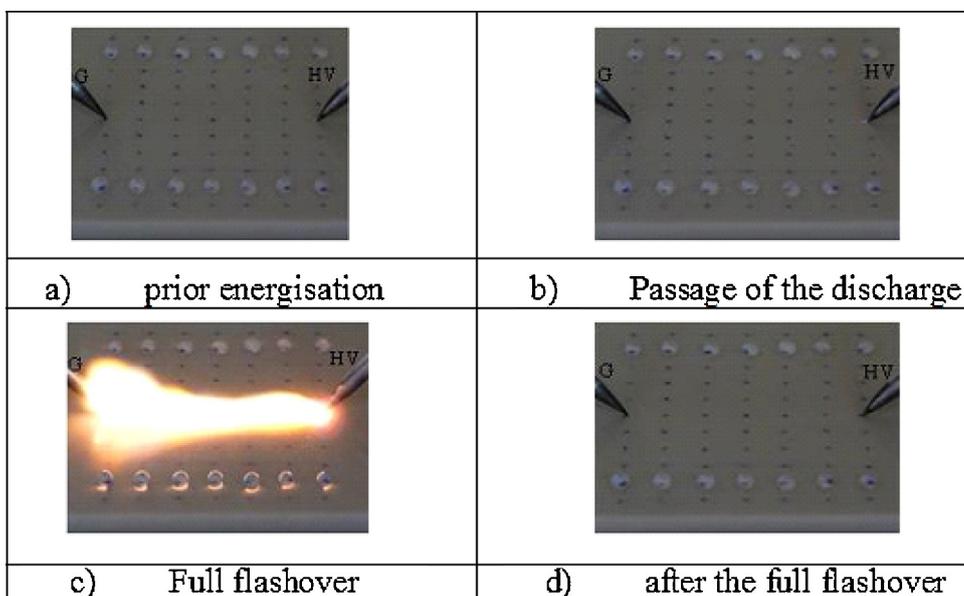


Fig. 12. Discharge stages: case of a dry band parallel to the electrode axis.

Acknowledgements

This work is a part of a research project approved under the number: J0201220120004. The authors would like to thank the Ministry of higher Education and Science Research of Algeria for the financial support of this project.

References

- [1] R. Hackam, Outdoor HV composite polymeric insulators, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 6 (5) (1999) 557–585.
- [2] E.A. Cherney, R.S. Gorur, RTV silicone rubber coatings for outdoor insulators, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 6 (5) (1999) 605–611.
- [3] J. Ndoumbe, A. Beroual, A.M. Imano, Behaviour of water droplets on insulator surfaces submitted to DC voltage – coalescence, *Proceedings of the Annual Report Conference Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)* (2012) 725–728.
- [4] L. Yong, X.D. Boxue, Recurrent plot analysis of leakage current in dynamic drop test for hydrophobicity evaluation of silicone rubber insulator, *IEEE Trans. Power Deliv.* 28 (4) (2013) 1996–2003.
- [5] G.G. Karady, Flashover mechanism of non-ceramic insulators, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 6 (5) (1999) 718–723.
- [6] M.G. Danikas, R. Sarathi, P. Ramnalis, S.L. Nalmpantis, Analysis of polymer surface modifications due to discharges initiated by water droplets under high electric fields, *Int. J. Electr. Electron. Eng.* 4 (5) (2010) 329–334.
- [7] M.H. Nazemi, V. Hinrichsen, Partial discharge inception electric field strength of water droplets on polymeric insulating surfaces, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 22 (2) (2015) 1088–1096.
- [8] H.P. Nagaraj, N. Vasudev, K.N. Ravi, S. Aradhya, Behaviour of water droplets on polymer surface, *Proceedings of the IEEE 10th Intern. Conf. on the Properties and Applications of Dielectric Materials* (2012) 1–4.
- [9] Y. Zhu, K. Haji, M. Otsubo, C. Honda, N. Hayashi, Electrohydrodynamic behaviour of water droplet on an electrically stressed hydrophobic surface, *J. Appl. Phys.* 39 (2006) 1970–1975.
- [10] A.J. Phillips, D.J. Childs, H.M. Schneider, Aging of non-ceramic insulator due to corona from water drops, *IEEE Trans. Power Deliv.* 14 (3) (1999) 258–263.
- [11] S.M. Rowland, F.C. Lin, Stability of alternating current discharges between water drops on insulation surfaces, *J. Appl. Phys.* 39 (2006) 3067–3076.
- [12] D.A. Swift, C. Spellman, A. Haddad, Hydrophobicity transfer from silicone rubber to adhering pollutants and its effect on insulator performance, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 13 (4) (2006) 820–829.
- [13] H. Wang, Z. Peng, S. Zhang, P. Liu, Simulation study on E-field distribution and corona characteristics of composite insulator with water droplets, *Proceedings of the Annual Report Conference Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)* (2013) 422–425.
- [14] D.A. Swift, Flashover of an insulator surface in air due to polluted water droplets, *Proceedings of the 4th Int Conf. on Properties and Applications on Dielectric Materials 2* (1994) 550–553.
- [15] M.G. Danikas, P. Rakitzis, K. Karakoulidis, Study of parameters related to deterioration phenomena due to water droplets on polymeric surfaces, *J. Electr. Eng.* 57 (3) (2006) 130–137.
- [16] S. Zhu, N. Yamashita, M. Anami, C. Otsulbo, Y. Honda, Corona discharge phenomenon and behaviour of water droplets on the surface of polymer in the AC electric field, *Proceedings of the 7th Int. Conf. on Properties and Applications of Dielectric Materials vol. 2* (2003) 637–641.
- [17] M.A.R.M. Fernando, S.M. Gubanski, Leakage current patterns on contaminated polymeric surfaces, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 6 (5) (1999) 660–667.
- [18] M.G. Danikas, P. Ramnalis, R. Sarathi, Experimental results on the behaviour of water droplets on polymeric surfaces under the influence of electric fields: the case of an inclined test arrangement for PVC, rubber and silicone rubber, *Funktechnikplus J.* 1 (2) (2013) 19–39.
- [19] BS EN 60060-1 High-voltage test techniques. Part 1: general definitions and test requirements, (2010).
- [20] Ivan J.S. Lopes, Shesha H. Jayaram, Edward A. Cherney, A study of partial discharges from water droplets on a silicone rubber insulating surface, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 8 (April (2)) (2001) 262–268.
- [21] B.-A.L. Souza, I.J.S. Lopes, Experimental investigation of corona onset in contaminated polymer surfaces, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 22 (2) (2015) 1321–1331.
- [22] C.-A.J. Phillips, A.J. Maxwell, I. Engelbrecht, Electric-field limits for the design of grading rings for composite line insulators, *IEEE Trans. Power Deliv.* 30 (3) (2015) 1110–1118.

Finite Element Modelling of Electric Field and Voltage Distribution on a Silicone Insulating Surface Covered with Water Droplets

Fatiha Aouabed, Abdelhafid Bayadi and Alaa eddin Rahmani

Department of Electrical Engineering,
University Ferhat ABBAS SETIF – 1, Algeria

and Rabah Boudissa

Department of Electrical Engineering,
University A. MIRA BEJAIA, Algeria

ABSTRACT

The main objective of this work is to study the behaviour of water droplets placed on a silicone surface in the presence of an electric field. We observed the effect of the water droplets on the distribution of the electric field and the voltage generated. A geometric model of the insulator was designed and studied using the finite element method as implemented in COMSOL Multiphysics. The results of the simulations showed that numerous parameters, such as the volume, number, and conductivity of the droplets, as well as their position with respect to the electrodes, affected the potential and electric field distribution. Furthermore, the simulations show that discharges caused by water droplets on the surface of polymeric insulators affect the long-term reliability of the component by lowering the surface hydrophobicity, boosting surface discharges.

Index Terms — Electric field, high voltage, silicone insulating, water droplets, COMSOL Multiphysics, FEM.

1 INTRODUCTION

HIGH voltage lines are an important component of electric power transportation networks because of the role they play in conveying energy from power plants to consumption centres through distances exceeding thousands of kilometres. These electric lines also include elements called insulators, which are factors of significant importance because of their reliability in transporting energy. These insulators must support conductors, insulate them from pylons, and maintain a sufficient air gap between the cable and the pylon, such that electric current does not pass through the pylon.

In the last 25 years, polymeric materials have emerged as a viable option for outdoor insulation. Insulators of this kind are increasingly used in outdoor applications because of their improved characteristics and efficiency over those of porcelain and glass. They also have better contamination performance because of their hydrophobic surfaces [1-2].

In this context, a number of investigations have been conducted in order to show the effects of coating a hydrophobic silicone surface with water droplets, on the performance of an insulator [3-12].

Of these investigations, the results of Karady's [5] experimental inquiry offer a good comprehension of phenomena leading to flashover. This inquiry showed that the flashover mechanism of a silicone surface is different to that of a porcelain insulator, and that in polluted conditions, the flashover voltage of a silicone surface is superior to that of a porcelain insulator.

Krivda and Birtwhistle [13] note that partial discharges on the surface of polymeric insulators are considered one of the aging mechanisms responsible for the failure of an insulator. According to tests dealing with this phenomenon, Karoulidas et al showed in [14] that droplet volume and conductivity are conditions that affect the value and the duration of breakdown voltage.

Mizuno et al [15] also performed tests on a silicone rubber specimen, and found that the breakdown voltage of a sample filled with droplets of contaminated water becomes inferior just after contamination. They noted that the duration and magnitude of the breakdown voltage depends on the duration of contamination. They also discovered that after five days of contamination, the breakdown voltage was almost the same as that obtained with clean silicone rubber.

Jianwu et al [16] carried out experimental tests and simulations with water droplets of different volumes to observe their effect on electrical distribution. They note that

with the increase in the volume of the droplets, the electric field also increases, and a corona discharge is produced at the triple point (the position where the water droplets, the insulating surface, and air coincide). As a result, the electric potential is lower at the location of the electric voltage drop.

A triple junction is essentially a contact between three materials: vacuum, dielectric and metal. The electric field behaviour at the zero-angle contact point (triple junction) has been extensively studied. High intensity electric fields have been observed at the vicinity of metal and vacuum contacts and can be magnified significantly with increasing the dielectric constant of the dielectric solid [17–18]. Research has shown that this field enhancement occurs due to the presence of dielectrics at the interface, creating a region of triple junctions [19].

This work presents the results of 3D and 2D simulations of the behaviour of droplets in an electric field, performed in the COMSOL Multiphysics 5.0 software package.

2 METHODOLOGY OF RESEARCH

Tests were conducted with a high alternating voltage, using the experimental model presented in Figure 1. The model consisted of a rectangular silicone rubber sheet, 12 cm in length, 8 cm in width, and 5 mm in thickness. Iron electrodes arranged in a plane–plane configuration were used in this system. The electrodes had round edges, with a parallelepiped form, 1 cm in thickness, 2 cm in width, and 8 cm in length. An adjustable pipette was used to distribute water drops with a defined volume of 45 μl , and a conductivity of 180 $\mu\text{S}/\text{cm}$, on the surface of the sample.

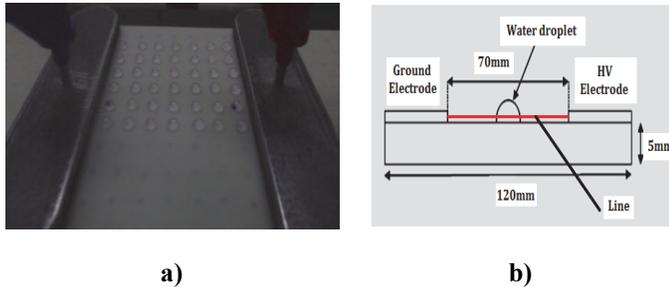


Figure 1. Electrodes arranged in a plane–plane configuration. a) Photograph of electrodes. b) Diagram of electrodes.

There is a risk of thermal energy radiating in the area of the electrode, created by electric flashover, because of the temporary degradation of the surface properties of silicone rubber. Samples were allowed to regenerate for 24 h between successive tests to enable the recovery of their surface properties [20].

Changes in the shapes of water droplets were visualized using a fast camera with a variable shutter speed (Auto mode: 1/4 s to 1/1800 s, all other modes: 8 s to 1/1800 s). Selected pictures were used to simulate the normalized electric field on the surface of the sample in COMSOL Multiphysics.

3 SIMULATION PROCEDURES

In the simulations presented, two cases were considered: the first concerns the plane–plane electrode system (Figure 1), and the second concerns a real insulator (Figure 2).

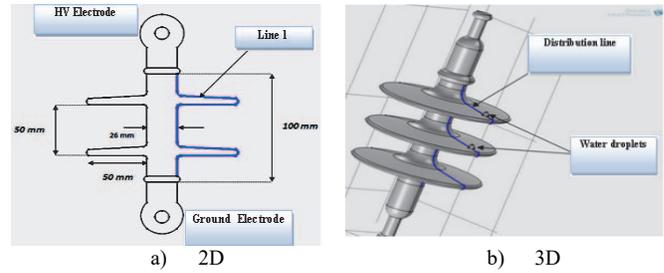


Figure 2. Models of insulator used in simulation.

3.1 EQUATIONS FOR ELECTRIC FIELD AND POTENTIAL

Our experiments aim to study the distribution of voltage on the chains of the insulators. Maxwell's equations were used to calculate the potential and electric field. Using these, the electric potential created by an electric field is written as follows:

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

By using Maxwell's theorem defined as:

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

Where ρ is the charge density, ε is the permittivity of dielectric material ($\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$), ε_0 is the permittivity of vacuum ($8.854 \times 10^{-12} \text{F}/\text{m}$), and ε_r is the relative permittivity of the dielectric material.

The **Poisson** equation can be obtained by substituting equation (1) into (2) as

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (3)$$

The Laplace equation can be obtained by making the space charge, $\rho = 0$.

$$\nabla^2 V = 0 \quad (4)$$

In the field of electrostatics, the electrical conductivity, σ , is 0 for ideal insulating regions, and $\sigma = \infty$ for ideal conducting regions.

3.1. CHARACTERISTICS OF AN INSULATOR IN COMSOL MULTIPHYSICS

We defined the different regions of the insulator studied in COMSOL Multiphysics by introducing their respective relative permittivities, ε_r , and electrical conductivities, σ . The characteristics of the materials used in the insulator are defined in Table 1. A 36-kV voltage was applied to the high-voltage electrode.

Table 1. Summary of components in COMSOL simulation.

Material	Relative Permittivity, ε_r	Conductivity, σ (S/m)
Silicone	3.9	1×10^{-12}
Glass Fibre	4.2	1×10^{-12}
Forged steel	1	5.9×10^7
Water droplets	81	180×10^{-6}

4 RESULTS AND DISCUSSIONS

4.1 PLANE-PLANE SYSTEM

A. EFFECT OF WATER DROPS

The principal objective of this simulation is to determine the effect of water droplets on the distribution of the electrical field along the creepage line (labelled in Figure 1b as line) on the surface of the silicone insulator. Illustrations of the insulator were drawn in Auto-CAD (Figures 1 and 2).

Figures 3 and 5 show the results of experiments and simulations analysing the behaviour of water droplets in an electric field and their effect on electric field distribution. The simulations were performed with a varying distribution of water droplets in the interelectrode area.

Figure 3 presents a selection of pictures depicting the changes in the form of the water droplets that were distributed symmetrically in the interelectrode area.

In this part, experiments were performed in order to understand the influence of water drops under AC electric field stress to the discharge inception phenomena. Its volume conductivity is maintained constant at about $180\mu\text{S}/\text{cm}$. The obtained results are shown in Figure 3. The observations with the video camera system have shown that the flashover process from the inception to full flashover is described essentially as follows:

- First, the group of water droplets deposited on the sample surface, before its energisation, is shown in Figure 3a.
- In the second phase, When an electric field is applied, It is observed that the water droplets shape change along the electrode axis leading to the decrease of the ignition distance (Figures 3b and 3c) and the sharp edge of the water droplets at the triple line together with the opposite electrode form a no homogeneous field configuration which is the basic cause to have the streamer inception on the sample surface.
- Next, for the reason that the electric-field strength near the HV electrode is strong enough, electrical discharge is established along the electrode axis

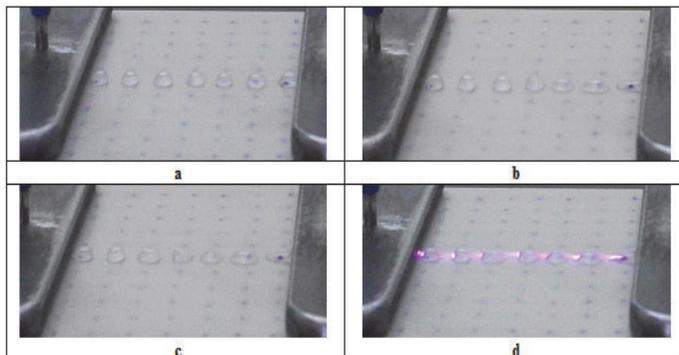


Figure 3. Behaviour of many water drops.

Figure 4 shows the distribution of the electric field intensity on the line of the leak for drops that were not deformed and for drops deformed prior to flashover. We observe a more than

twofold increase in the intensity of the local electric field between the results measured with drops in their original state, and those that were deformed prior to flashover. This increase is caused by stretching and shape changes of the droplets. The maximum values of the electric field are at the extremities of the drops at the triple point because of the existence of discharges in this zone, as shown in Figure 5.

We also conclude that the increase in the electric field intensity is caused by the increase in the number of deformed water droplets on the surface.

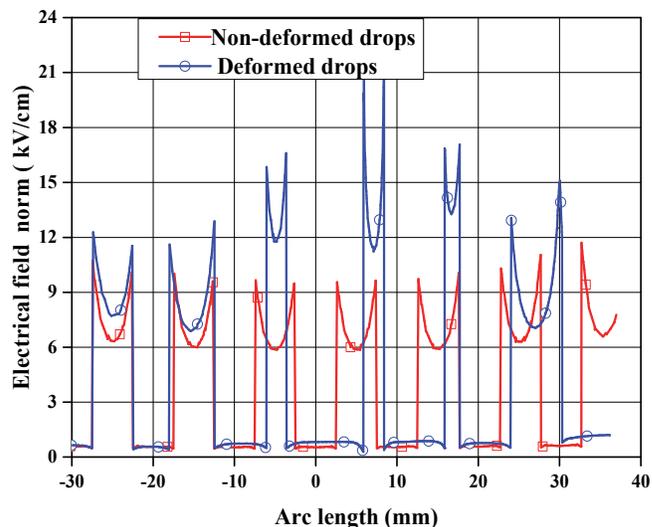


Figure 4. Electric field stresses on a line of water droplets with no deformation and on water droplets deformed prior to flashover.

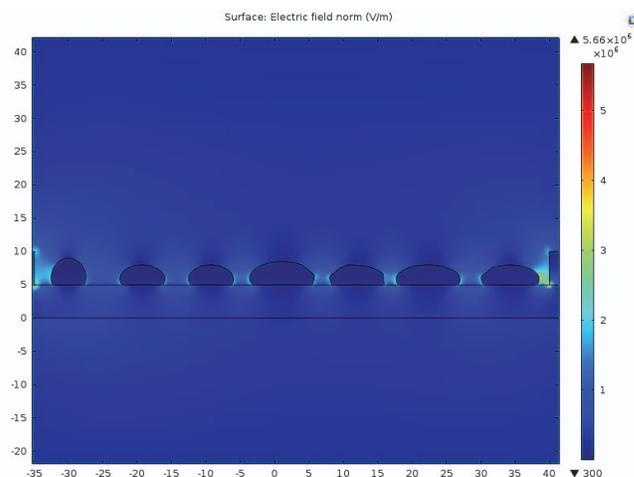


Figure 5. Simulated electric field distribution in the inter-electrode region, prior to flashover.

B. POSITION OF WATER DROPLETS WITH RESPECT TO ELECTRODES

The photographs presented in Figure 6 illustrate the various flashover phases of the insulator. The water droplets gradually increase in length because of the electric field, a distortion that increases considerably with the increase in the magnitude of the electric field. The photographs in Figure 6b show that the shape of the water droplets changed before flashover in the

first case (ground side). The shape of the water droplets and their position with respect to the electrodes constitute important parameters affecting the behaviour of droplets under the influence of an electric field.

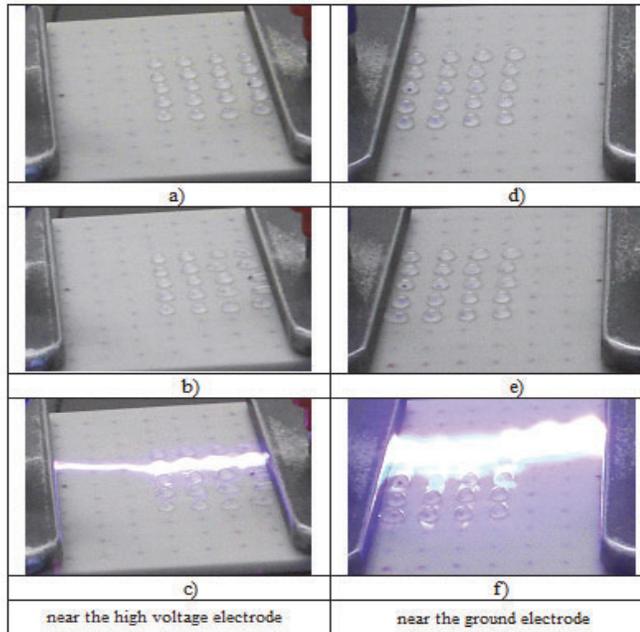


Figure 6. Response of an array of water droplets to an applied electric field.

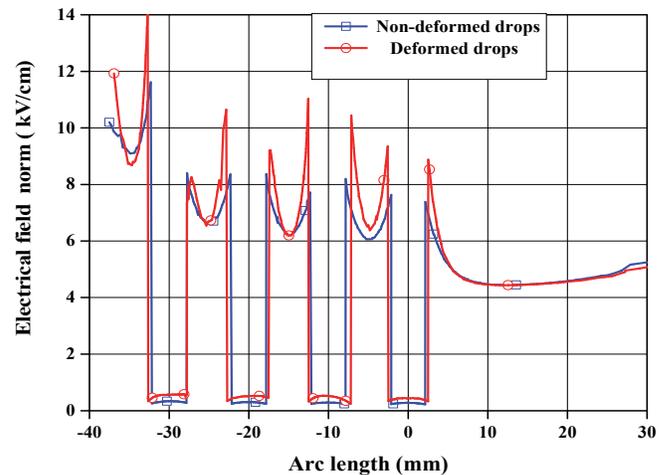
Figure 7 shows the distribution of the electric field along a hydrophobic surface coated with drops that are not deformed and drops that are deformed. Two cases were considered; in the first, the water droplets were positioned close to the ground electrode, and in the second, the water droplets were placed close to the high-voltage electrode. According to the calculated result, the following can be observed:

- The maximum electric field intensity appears at the water-gas-solid triple point. With a value of 20 kV/cm, the maximum electric field intensity is greater in the second case than in the first case. The magnitude of the electric field is weakest on the surface of the water droplet, where it is about 0.25 kV/cm.
- The increase in the local electric field, caused by droplet deformation before flashover, depends on the position of the droplets with respect to the electrodes.

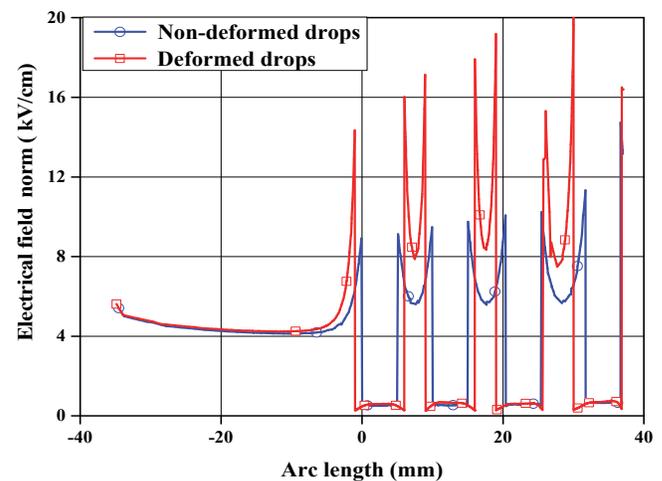
4.1. ELECTRIC FIELD AND VOLTAGE CALCULATION OF A COMPOSITE INSULATOR

A. EFFECT OF WATER DROPLET FORM ON ELECTRICAL DISTRIBUTION

To analyse the effect of droplet form on electric field distribution and voltage, we studied three cases: without droplets, with uniform droplets, and with non-uniform water droplets on the surface of the insulator. A 15 kV voltage was applied to the high-voltage electrode. Figures 8–11 illustrate the obtained results. We note a small drop in voltage in Figure 9. In comparison to the first case, the magnitude of the drop levels in both cases where there were water droplets on the surface of the insulator. The water droplets induce a low voltage



a) Close to the ground electrode.



b) Near the high voltage electrode

Figure 7. Electric field stresses on an array of water droplets with no deformation and on deformed water droplets.

because their permittivities are $\epsilon_r = 81$. No major differences were noted between the last two cases.

The conclusion is that the drops have no remarkable effect on the distribution of voltage along the surface of the insulator [21].

Figure 11 presents the variation in the distribution of the electrical field for the different cases considered. From these figures, we note that the shapes of the electric field differ in all three cases; the magnitude of the electric field is high in the second as well as in the third case. Non-uniform water droplets (third case) cause a larger increase to the magnitude of the electric field than uniform droplets (second case). In the last two cases, the maximum values of the field were located at the extremities of the drops at the triple point (air, insulator surface, and the water droplets) because of the existence of discharges in this zone.

Thus, we conclude that uniform and non-uniform drops have a noticeable effect on the distribution of the electric field along the surface of the insulator. We also conclude that the increase in the intensity of the electric field is caused by the increase in the number of water droplets on the surface of the insulator.

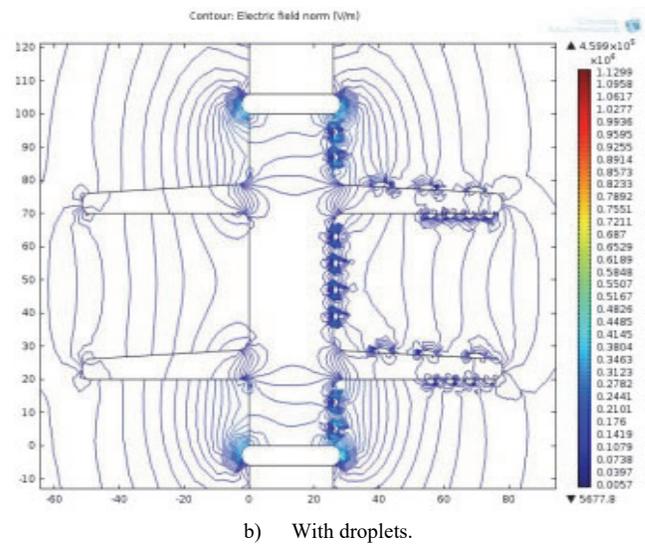
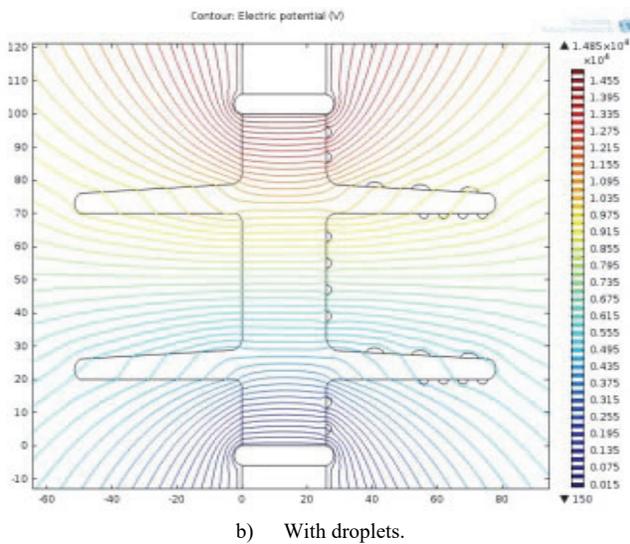
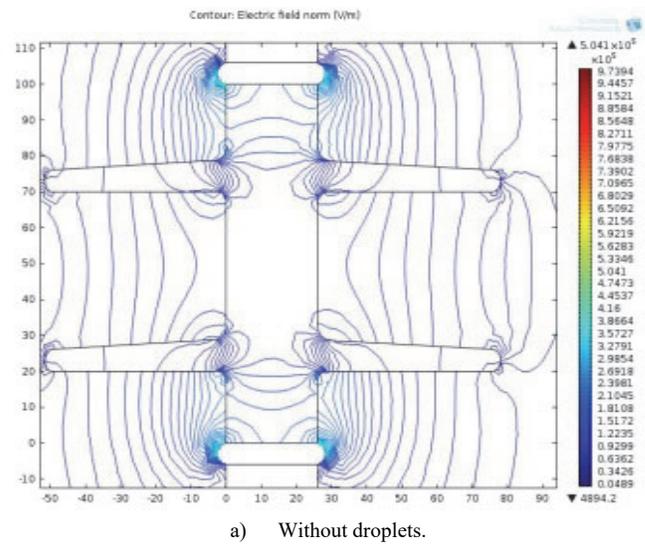
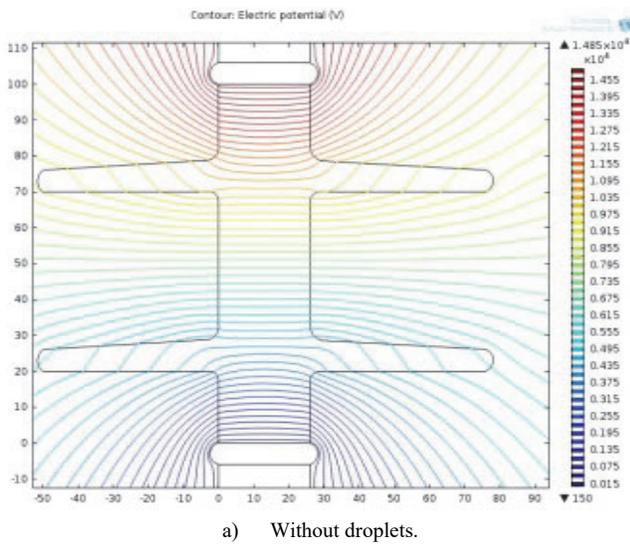


Figure 8. Simulated equipotential lines at a cross-section of an insulator.

Figure 10. Simulated electric field lines at a cross-section of an insulator.

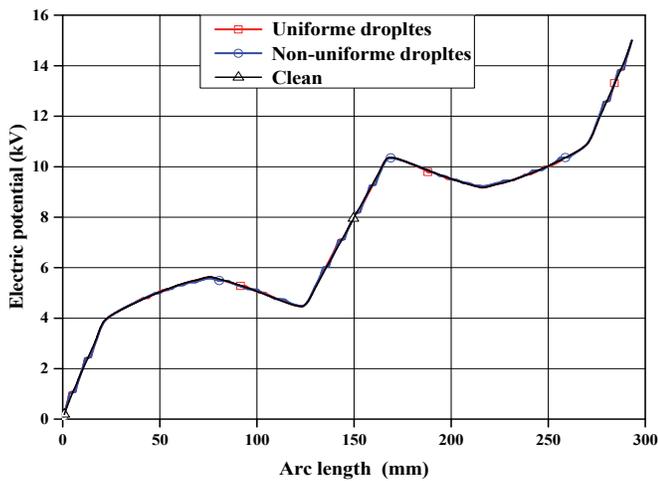


Figure 9. Comparison of the distribution of the electric potential along the surface of an insulator, with droplets and without droplets.

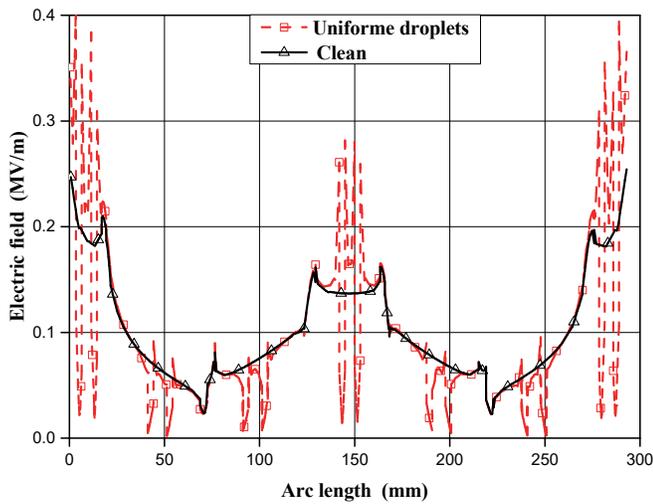
B. EFFECT OF A PAIR OF DROPLETS ON ELECTRICAL DISTRIBUTION

We created a model to simulate the behaviour of a real insulator in 3D (Figure 2b). Two scenarios were considered in this simulation. The first concerns a clean surface (no droplets on the surface), and the second concerns the case when there are a pair of drops on the surface of the insulator. These scenarios were designed to observe the effects of these drops on the distribution of the electric field and the electric potential.

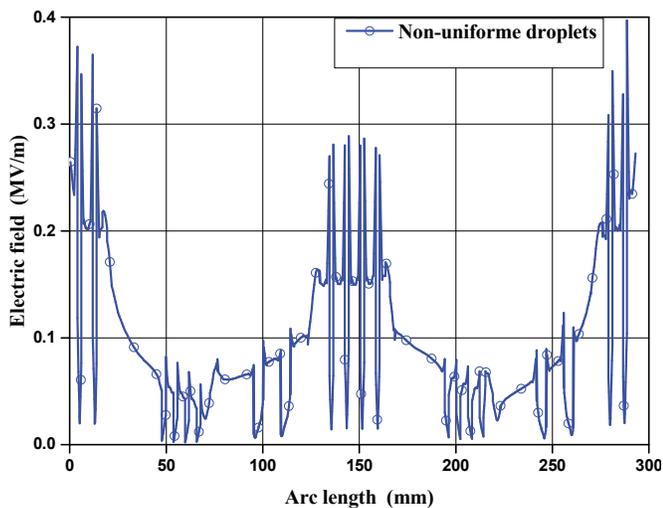
A comparison of the results of the two scenarios simulated is illustrated in Figures 12 and 13. In Figure 12, we note that there is no evident difference in the electrical potential at a distance of 175 mm on the distribution line (Figure 14b). In contrast, a voltage drop is observed at a distance of 275 mm on the same line because of the presence of the water drops on the surface of the insulator. This reduction in voltage confirms the effect of the droplets on the distribution of electric potential.

The electric field on the distribution line is different in both cases considered. In the second case, the magnitude of the electric field increases to 1.0×10^5 V/m at the first distance

(175 mm), and to 2.0×10^5 V/m at the second (275 mm) since this point is close to the high-voltage electrode.



a) With uniform droplets and without droplets



b) With non-uniform droplets

Figure 11. Comparison of electric field distribution along the surface of an insulator, with droplets and without droplets.

The discrepancy between the two cases is caused by the presence of droplets on the surface of the insulator, which exemplifies the effects of contamination on the distribution of a real electric field, such as electric discharges at the extremities of these droplets.

C. EFFECT OF MULTIPLE DROPLETS ON ELECTRICAL DISTRIBUTION

We created a model using the hydrophobic material HC 2, as seen in Figure 14a, to simulate the behaviour of the 3D insulator shown in Figure 14b to see the influence of multiple droplets with different volumes and shapes on the distribution of the electric field as well as electric potential.

Figures 15, 16, and 17 show the resulting electric potential and electric field distributions. The electric field distribution is non-uniform, particularly at the extremities of the copper electrodes. This is due to the difference between the air around the insulator and the dielectric material.

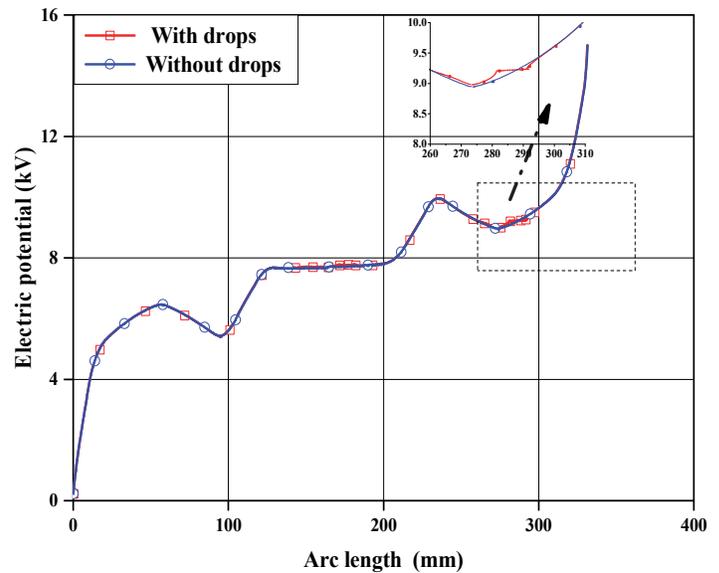


Figure 12. Distribution of electrical potential on the line of the leak, with and without water droplets.

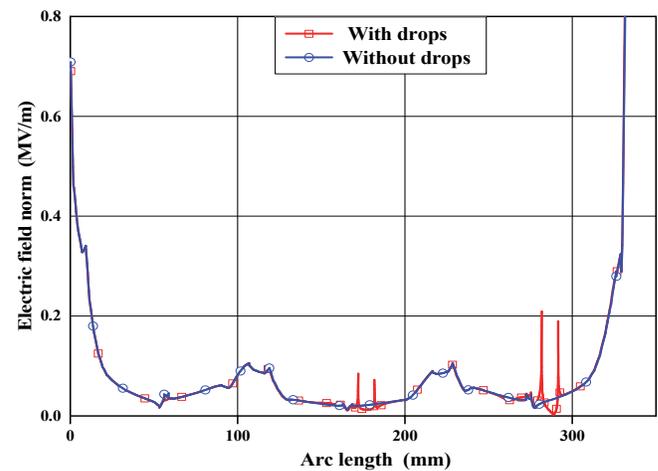


Figure 13. Electric field distribution on the line of the leak, with and without water droplets.

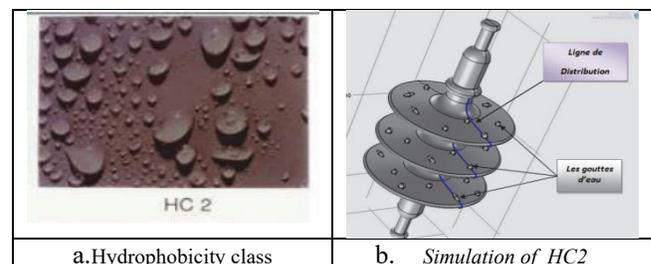


Figure 14. Diagram of a real insulator in 3D, including an illustration of a hydrophobic material.

Figure 17 presents different plots in 2D for visualising the electric field and electric potential calculated with this model.

Figure 18 shows the distribution of the electric potential along the surface of the silicone insulator. We observe that this distribution is non-linear.

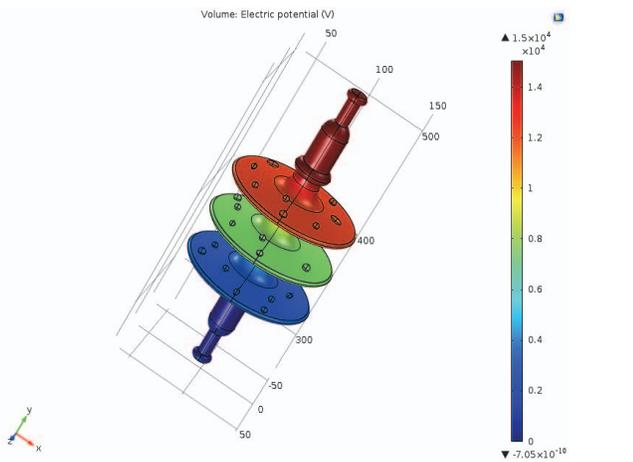


Figure 15. Three-dimensional voltage distribution in the insulator.

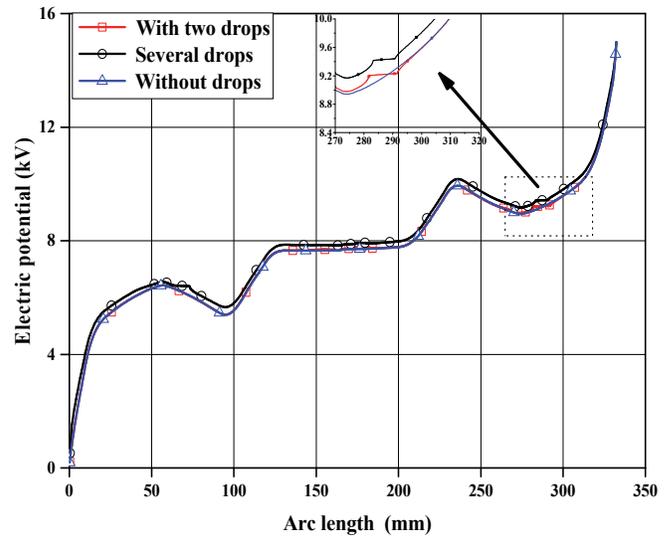


Figure 18. Distribution of voltage on the surface of the insulator.

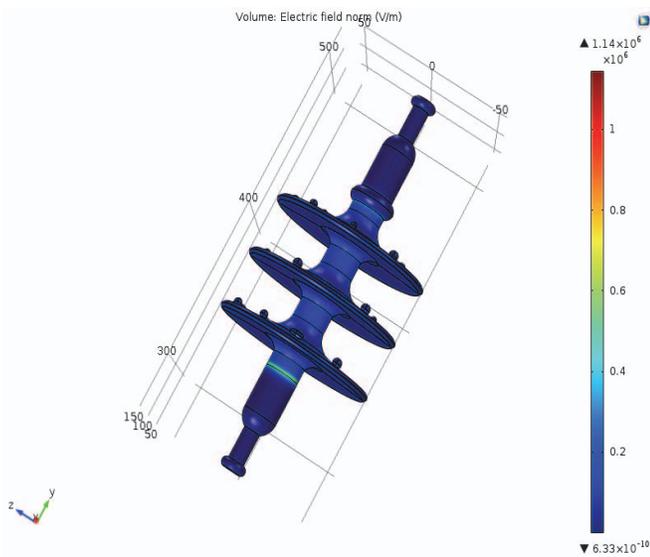


Figure 16. Three-dimensional electric field distribution in the insulator.

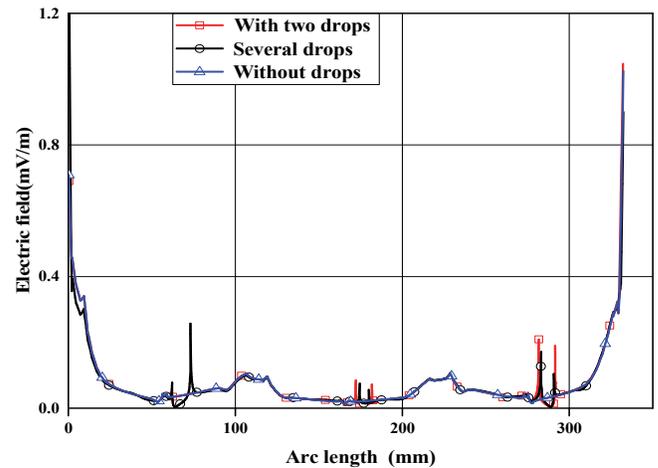


Figure 19. Distribution of electric field on the surface of the insulator.

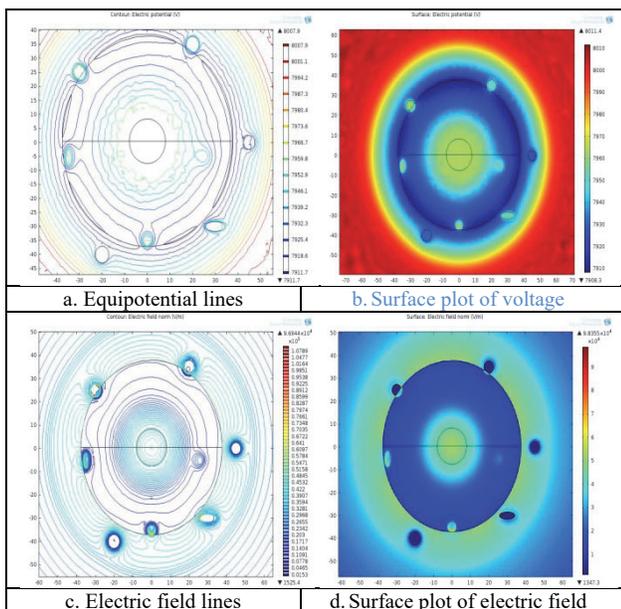


Figure 17. 2D plots of electrical properties of the insulator in the x-z plane.

5 CONCLUSION

In this study, we simulated a real insulator in 2D and 3D, using COMSOL Multiphysics 5.0. This software uses the finite element method to calculate the electric field and electric potential along the silicone insulator.

We have shown that several properties of water droplets on a dielectric surface, such as their volume, number, and shape, can influence the distribution of both electric field and electric potential.

We also conclude that the existence of these drops on the surface of an insulator increases the field intensity at the triple point (the location where air, water droplets, and the surface of the insulator coincide). The increase in the local value of the electric field caused by droplet deformation before flashover

depends on the position of the droplets with respect to the electrodes.

Finally we consider the water droplets will be deformed and elongated along the direction of the electric field lines. The deformations will cause local electric field intensifications; the critical point will be the triple point between the water drop, air and the insulating material. This will be a starting point for partial discharges, finally leading to material deterioration.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to express their deepest gratitude to Sir Bensafia Kamel for his help. The authors would like to thank the Ministry of higher Education and Science Research of Algeria for the financial support of this project.

REFERENCES

- [1] R. Hackam, "Outdoor HV Composite polymeric Insulators", IEEE Trans. on Dielectr. Electr. Insul., vol. 6, pp. 557-585, 1999.
- [2] E. A. Cherney and R.S. Gorur, "RTV Silicone Rubber Coatings for outdoor Insulators", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 6, pp. 605-611, 1999.
- [3] D.A. Swift, "Flashover of an Insulator Surface in Air Due to polluted Water Droplets", in *Proceedings of the IEEE International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, 1994, pp. 550-553.
- [4] C. Yuan, G. Zhichang and L. Xidong, "Analysis of Flashover on the contaminated Silicone Rubber Composite Insulator", in *Proceedings of the IEEE Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, 1997, pp. 914-917.
- [5] G. G. Karady, "Flashover mechanism of Non-ceramic Insulators", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 6, pp.718-723, 1999.
- [6] M. G. Danikas, R. Sarathi, P. Ramnalis and S. L. Nalmpantis, "Analysis of Polymer Surface Modifications due to Discharges Initiated by water Droplets under High Electric Fields", Int'l. J. Electr. Electronics Eng., vol. 4-5, pp. 329-334, 2010.
- [7] W. Shaowu, L. Xidong and H. Lengceng, "Experimental Study on the Pollution Flashover Mechanism of Polymer Insulators" in *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, 2000, pp. 2830 - 2833.
- [8] I. J. S. Lopes, S.H. Jayaram and E. A. Cherney, "A Study of Partial Discharges from Water", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 6, pp. 262-267, 2001.
- [9] Y. Zhu, K. Haji, M. Otsubo, C. Honda and N. Hayashi, "Electrohydrodynamic behaviour of water droplet on an electrically stressed hydrophobic surface", J. Appl. Phys., vol. 39, pp. 1970-1975, 2006.
- [10] A. J. Phillips, D. J. Childs and H. M. Schneider, "Aging of non-ceramic Insulator due to corona from water drops", IEEE Trans. Power Delivery, vol. 14, pp. 258-263, 1999.
- [11] S. M. Rowland and F. C. Lin, "Stability of alternating current discharges between water drops on insulation surfaces", J. Appl. Phys., vol. 39, pp. 3067-3076, 2006.
- [12] D. A. Swift, C. Spellman and A. Haddad, "Hydrophobicity Transfer from Silicone Rubber to Adhering Pollutants and its Effect on Insulator Performance", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 13, pp. 820-829, 2006.
- [13] A. Krivda and D. Birtwhistle, "Breakdown between water drops on wet polymer surfaces", in *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena Annual Report*, 2001, pp. 572-580.
- [14] K. Karakoulidis, M. Danikas and P. Rakitzis, "Deterioration phenomena on polymeric insulating surfaces due to water droplets", J. Electr. Eng., vol. 56, pp.169-175, 2005.
- [15] Y. Mizuno, M. Iwatani, M. Nagata K. Naito, K. Kondo and S. Ito, "Behavior of Water Droplets on Silicone Rubber Sheet under AC Voltage Application", in *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena Annual Report*, 1998, pp. 96-99.
- [16] W. Jianwu, W. Xishan, L. Lei and L. Haiyan, "Study of Discharge Process and Characteristics of Discrete Water Droplets on the RTV

Hydrophobic Surface in the Non-uniform Electric Field", in *Proceedings of the IEEE Conference on Power System Technology*, 2006, pp. 1-6.

- [17] T. Takuma, "Field behavior at a triple junction in composite dielectric arrangements," IEEE Trans. Electr. Insul., vol. 26, pp. 500-509, 1991.
- [18] T. Takuma and B. Techaumnat, *Electric Field in Composite Dielectrics*, Springer, 2010.
- [19] T. Takuma, T. Kawamoto, "Field intensification near various points of contact with a zero contact angle between a solid dielectric and an electrode", IEEE Trans. Pwr Appar. Syst., vol 103, pp. 2486-2494, 1984.
- [20] B. Marungsri, W. Onchantuek, A. Oonsivilai and T. Kulworawanichpong, "Analysis of Electric Field and Potential Distributions along Surface of Silicone Rubber Insulators under Various Contamination Conditions Using Finite Element Method", World Academy Sci., Eng. Technology, vol. 53, pp.1055-1060. 2009.
- [21] W Bretuj and A Pelesz, "The behaviour of water droplets on the silicone rubber surface in an electric field", IOP Conf. Series: Materials Sci. Eng., vol. 113, 012005, 2016.



Fatiha Aouabed was born in El-eulma (Setif), Algeria, in 1982 and obtained the degree of Ingénieur d'Etat in Electrical Engineering in 2006. She received the degree of Magister in electrical engineering in 2010 from the Electrotechnics Institute of Setif. She is currently studying for a Ph.D. degree in the University of Setif, in insulation techniques. She joined the University of Bordj Bou Arreridj in 2014 as an assistant professor.



Abdelhafid Bayadi obtained the degree of Ingénieur d'Etat in electrical engineering in 1991, and the degree of Magister in electrical engineering in 1996 from the Electrotechnics Institute of Setif. He joined the same institute in 1998 as an assistant professor. He obtained a Ph.D. degree in high voltage engineering in 2005. In the same year, he was appointed a senior lecturer. In 2010, he was appointed a professor in electrical engineering at Setif University. His research interests are in power system modelling and simulation, power system transients, high voltage engineering, insulation systems, and power system overvoltage protection. He has co-authored over 30 publications. He is a member of the Steering Committee of the National Conference on High voltage (CNHT).



Ala eddine Rahmani was born in Setif, Algeria, in 1992 and obtained a master's degree in electrical engineering in 2015. He is currently studying for a Ph.D. degree in the University of Setif, in insulation techniques.



Rabah Boudissa was born in Boghni, Algeria, in 1956. In 1982, he obtained a degree in electrical engineering from the Ecole National Polytechnique of Algiers. In 1992, he obtained a Ph.D. in high voltage engineering from T. H. Zittau, Germany. In 1983, he was appointed a lecturer in high voltage engineering and materials, at both undergraduate and post-graduate levels, at the University of Béjaïa, Algeria. His main research interests are the effects of pollution and lightning on power systems and equipment. He has co-authored over 40 publications. He is a member of the Steering Committee of the National Conference on High voltage (CNHT).