



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



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية

N° d'enregistrement

Université de Ghardaïa

.../.../...

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم الآلية والكهروميكانيك

Département d'automatique et d'électromécanique

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

Master

Domaine: Sciences et Technologie

Filière: Electromécanique

Spécialité: Maintenance Industrielle

Thème

Analyse par Simulation de l'Effet du Champ Electrique sur la
Performance des Isolations Contaminées

Présenté par :

BENKOUMAR Hamza

BENRAMDANE Redouane

Soutenu publiquement le : 19/06/2023

Devant le jury composé de:

CHOUIA Fayçal

MCB

Univ. Ghardaïa

Président

MEDOUKALI Hemza

MCB

Univ. Ghardaïa

Examineur

BOUKHARI Hamed

MCB

Univ. Ghardaïa

Examineur

BOUCHELGA Fatma

MCA

Univ. Ghardaïa

Encadreur

Année universitaire 2022/2023

Remerciements

Nous tenons à remercier tout premièrement Allah le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donné durant toutes ces longues années.

Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur « Dr. F. BOUCHELGA », son pour suivi continuel tout le long de la réalisation de ce mémoire et qui n'a pas cessé de nous donner ses conseils.

Et à qui nous exprimons nos gratitude et respects.

Nos remerciements à tous les membres du jury qui ont accepté de juger notre travail.

En fin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis et collègues pour le soutien moral. Que toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail soient assurées de nos plus sincères remerciements.

dédicaces

Chaleureusement je dédie ce modeste

travail:

A la lumière de ma vie, mes chers parents

en témoignage de leur amour et de leur

sacrifices sans limites, je leurs souhaite

une bonne santé, que Dieu me les garde.

A la mémoire de ceux qui nous ont quittés.

A mes frères et mes sœurs.

A toute la famille BENKOUMAR

A tous mes amis ...

A tous mes collègues de la promotion

2023.

HAMZA

dédicaces

Chaleureusement je dédie ce modeste
travail:

A la lumière de ma vie, mes chers parents
en témoignage de leur amour et de leur
sacrifices sans limites, je leurs souhaite
une bonne santé, que Dieu me les garde.

A la mémoire de ceux qui nous ont quittés.

A mes frères et mes sœurs.

A toute la famille BENRAMDANE

A tous mes amis ...

A tous mes collègues de la promotion

2023.

REDOUAN

ملخص

يتعلق هذا العمل بالدراسة العددية في إطار COMSOL Multiphysics ، لسلوك سطح عازل ذو طبيعة مختلفة في ظل ظروف تلوث الغلاف الجوي وتوزيع المجال الكهربائي ، عندما يتم وضع هذا الأخير تحت ضغط التيار المتناوب. تم فحص العديد من العوامل، منها طبيعة المادة العازلة، طريقة ترسب التلوث، موصلية حجم الأخير، وحجم، عدد وزاوية التلامس للقطرات. يترتب عن تحليل توزيع المجال الكهربائي على الأسطح المحبة للماء الكارهة للماء وفائقة المقاومة للماء أن هذا الأخير يقدم أفضل أداء كهربائي. بالإضافة إلى ذلك، تجدر الإشارة إلى أنه بغض النظر عن درجة التلوث، فإن كثافة الحقل على مستوى الرواسب الملوثة تظل دون تغيير. وإبضا وجود الغطاء العازل على السطح شديد المقاومة للماء ليس له تأثير كبير على الأداء الكهربائي للعزل ، ولا يؤثر على اتجاه طرد قطرات الماء خارجها.

الكلمات المفتاحية: العزل ، المجال الكهربائي ، الزجاج ، السيليكون ، مقاوم للماء الخارق ، جهد متناوب ، .Multiphysics COMSOL

Résumé

Ce travail porte sur l'étude numérique sous COMSOL Multiphysics, du comportement d'une surface isolante de différente nature sous conditions de pollution atmosphérique et distribution du champ électrique, lorsque celle-ci est mise sous tension alternatif. Plusieurs paramètres ont été examinés, à savoir, la nature de matériau isolant, le mode de dépôt de pollution la conductivité volumique de celle-ci, le volume, le nombre et l'angle de contact des gouttes. Il en résulte de l'analyse de la distribution du champ électrique sur les surfaces hydrophiles, hydrophobes et superhydrophobes que cette dernière présente la meilleure performance électrique. De plus, Il est à noter qu'indépendamment du degré de pollution, l'intensité du champ au niveau du dépôt polluant reste inchangé. La présence du couvert diélectrique sur la surface superhydrophobe n'as pas un grand effet sur la performance électrique de l'isolation, et il n'affecte pas le sens d'expulsion des gouttes d'eau en dehors de celle-ci.

Mots Clés : Isolation, Champ électrique, Verre, Silicone, Superhydrophobe, tension alternatif, COMSOL Multiphysics

Abstract

This work relates to a numerical study under COMSOL Multiphysics, of the insulating surface's behaviour with different nature under atmospheric pollution's conditions and distribution of the electric field, when this one is put under AC voltage. Several parameters were examined, namely, the nature of insulating material, the mode of pollution's deposition, the volume conductivity of the latter, the volume, the number and the contact angle of the water drops. It follows from the analysis of the electric field's distribution on the hydrophilic, hydrophobic and superhydrophobic surfaces that the latter presents the best electrical performance. In addition, it should be noted that regardless of the pollution's degree, the intensity of the electrical field at the level of the polluting deposit remains unchanged. Also, the presence of the dielectric cover on the superhydrophobic surface does not have a great effect on the electrical performance of the insulation, and it does not affect the direction of the water drops' expulsion outside of it.

Keywords: Insulation, Electric field, Glass, Silicone, Superhydrophobic, AC voltage, COMSOL Multiphysics

Listes des figures et tableaux

Liste des figures

Figure. I. 1. Photo représente un isolateur en verre.....	6
Figure. I. 2. Chaîne de isolateurs.....	7
Figure. I. 3. Résistances volumique, superficielle et d'isolement électrique.....	8
Figure. I. 4. Schéma équivalent série et parallèle du circuit électrique	8
Figure. I. 5. Isolateur long fut en porcelaine.....	10
Figure. I. 6. Schéma d'un isolateur à capot et tige.....	10
Figure. I. 7. Photo d'un isolateur capot et tige de profil standard.. ..	12
Figure. I. 8. Photo d'un isolateur à Profil antibrouillard (forme A).....	12
Figure. I. 9. Photo d'un isolateur à Profil antibrouillard (forme B).....	13
Figure. I. 10. Profil sphérique.....	13
Figure. I. 11. Etapes du contournement d'une couche polluante.....	15
Figure. II. 1. Le comportement d'une goutte déposée sur une surface isolante.	20
Figure. II. 2. Angle de contact d'une goutte d'eau en équilibre sur une surface.....	20
Figure. II. 3. Angle de glissement.....	21
Figure. II. 4. Modèles de Wenzel et de Cassie.....	21
Figure. II. 5 Une goutte d'eau déposée sur une surface hydrophile à superhydrophobe.....	22
Figure II. 6. Exemple d'une surface superhydrophobe naturelle.....	24
Figure. II. 7. Superhydrophobie chez les animaux et insectes.....	24
Figure. II. 8. Béton intelligent bottes sans et avec traitement ultra-ever dry.....	26
Figure. II. 9. Double fonction pour les revêtements de façade avec effet lotus.....	27
Figure. III. 1. Modèle expérimental et de simulation.....	31
Figure. III. 2. Maillage du modèle superhydrophobe avec couvert étudié.....	32
Figure. III. 3. Distribution du champ électrique sur une isolation en verre sans distance ($3\mu\text{S}$, 6mS , 20mS , $U=25\text{ kV}$).....	33
Figure. III. 4. Distribution du champ électrique sur une isolation en verre avec distance ($3\mu\text{S}$, 6mS , 20mS , $U=25\text{ kV}$).....	35

Figure. III. 5. Différentes permittivités relatives dans le modèle.....	37
Figure. III. 6. Distribution du champ électrique sur 5 gouttes d'eau sur une isolation en silicone ($\sigma = 20\text{mS/cm}$, $\epsilon = 3\mu\text{S/cm}$ $U=25\text{ kV}$).....	37
Figure. III. 7. Distribution du champ électrique en fonction du nombre de gouttes d'eau d'une isolation en silicone sans couvert ($r = 20$; $V_d = 100\ \mu\text{l}$; $U_a = 25\text{ kV}$).....	39
Figure. III. 8. Distribution du champ électrique en fonction du volume de gouttes d'eau non-uniform d'une isolation en silicone sans couvert ($r = 20$; $V_d = 100\ \mu\text{l}$; $U_a = 25\text{ kV}$).....	41
Figure. III. 9. Distribution du champ électrique sur 5 gouttes d'eau sur une isolation en silicone Superhydrophobe sans couvert ($\sigma = 20\text{mS/cm}$, $\epsilon = 3\mu\text{S/cm}$ $U=25\text{ kV}$).....	43
Figure. III. 10. Effet de la présence du couvert diélectrique sur la concentration des lignes électriques.....	44
Figure. III. 11. Distribution du champ électrique sur 5 gouttes d'eau sur une isolation en silicone Superhydrophobe sans et avec couvert ($\sigma = 6\text{ mS/cm}$, $U=25\text{ kV}$).....	46
Figure. III. 12. Distribution du champ électrique sur 5 gouttes d'eau sur une isolation en silicone Superhydrophobe uniforme et non uniforme sans couvert ($\sigma = 6\text{ mS/cm}$, $U=25\text{ kV}$).....	47
Figure. III. 13. Distribution du champ électrique sur 5 gouttes d'eau sur une isolation Superhydrophobe ($\sigma = 6\text{ mS/cm}$, $\alpha = 150^\circ$, $\alpha > 150^\circ$, $U=25\text{ kV}$).....	48
Figure. III. 14. Distribution du champ électrique sur des isolations hydrophile, hydrophobe, Superhydrophobe ($\sigma = 6\text{ mS/cm}$, $U=25\text{ kV}$).....	49

Liste des tableaux

Tab. III. 1 : Propriétés physiques des matériaux utilisés dans le modèle.....	32
--	----

**Liste
des abréviations et
des symboles**

SF6 : Gaz de hexafluorure de soufre ;

L_f : Line de fuite ;

L : Ligne de contournement ;

R_v : Résistance transversale ou volumique ;

R_s : Résistance superficielle ;

RDT : Rigidité diélectrique transversale ;

RDL : Rigidité diélectrique longitudinale ;

kV : Kilovolt ;

UV : Ultraviolets ;

γ : Coefficient de tension superficielle ;

γ_{LG} : Tension superficielle liquide-vapeur ;

γ_{SL} : Tension superficielle solide-liquide ;

γ_{SG} : Tension superficielle solide-vapeur ;

θ : Angle de contact sans la rugosité ;

θ^* : Angle de contact avec la rugosité ;

r : Rugosité ;

φ_s : Fraction de surface occupée par le sommet des créneaux sur laquelle la goutte repose;

$(1 - \varphi_s)$: Proportion de surface d'air sur laquelle la goutte est posée ;

MEB : Microscope électronique à balayage ;

MEF : Méthode des éléments finis ;

Cm : Centimètre ;

Cm^2 : Centimètres carrés ;

μl : Microlitre ;

σ : Conductivité électrique ;

S/m : Siemens par mètre ;

μS : Microsiemens ;

U_a : Tension alternatif ;

HT : Haute tension ;

V_d : Volume des gouttes d'eau ;

α : L'angle de contact des gouttes d'eau avec la surface isolant ;

GT : Électrode terre ;

GHT : Électrode haute tension ;

GIT : Goutte intermédiaire ;

GM : Goutte milieu ;

Sommaire

Sommaire

SOMMAIRE	
INTRODUCTION GENERALE.....	2
CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ISOLATEURS	
I.1. Introduction	5
I.2. Définitions sur le fonctionnement des isolateurs	5
I.2.1. Isolateur	5
I.2.2. Ligne de fuite	6
I.2.3. Ligne de contournement	6
I.2.4. Tension de tenue (Tension d'essai)	6
I.2.5. Tension de contournement	6
I.3 Propriétés électriques [12].....	7
I.3.1 Résistance d'isolement	7
I.3.4. Rigidité diélectrique	8
I.4. PRINCIPAUX MODELES D'ISOLATEURS	9
I.4.1. Selon la fonction et le mode de fixation.....	9
I.4.1.3. ISOLATEUR LONG FUT	9
I.4.2. Selon le type de matériau isolant.....	11
I.4.3. Selon les différents profils des isolateurs.....	12
I.5. Choix des isolateurs	14
I.6. Phénomène de Contournement.....	14
I.7. Pollution des isolateurs	15
I.7.1. Pollution naturelle	16
I.7.3. Pollution mixte	16
I.8. Techniques de lutte contre la pollution	16
I.8.1. Allongement de la ligne de fuite	16
I.8.2. Enduction à la graisse silicone.....	17
I.8.4. Élimination des sources de pollution	17
I.9. Conclusion.....	18
CHAPITRE II : MATERIAUX ISOLANTS ET LEURS CARACTERISTIQUES	
II.1 Introduction	20
II.2. Définitions	20
II.2.1 Mouillabilité	20
II.2.2 Angle de contact	20
II.2.3 Surface superhydrophile	23
II.2.4 Surface hydrophile.....	23
II.2.5. Non mouillabilité.....	24
II.3.Différents types de surface superhydrophobe naturelles et artificiels	24
II.3.1. Surfaces superhydrophobes naturelles	24
II.4. Méthodes de préparation de surfaces superhydrophobes	26
II. 4.1 Technique Dépôt par vapeur chimique	26
II.4.2 Technique Dépôt électrochimique	26
II.4.3 Photolithographie.....	26
II.4.4 Techniques par utilisation du plasma	26
II. 5. Applications.....	27
II. 5. 1 Béton intelligent	27

II. 5. 2 Ultra - Ever Dry	27
II. 5. 3 StoLotusan	27
II.6. Conclusion	28

CHAPITRE III : RESULTATS DE SIMULATION D'UN MODELE SUPERHYDROPHOBE PLAN

III. 1. Introduction.....	30
III. 2. Procédure de simulation.....	30
III. 3. Modélisation d'éléments finis.....	30
III.3.1. Simulation d'un modèle d'isolateur plane	31
III.3.2. Propriétés matérielles	32
III .3.3. Maillage	33
III. 4. Résultats et discussions.....	34
III.4.1. Comportement d'une isolation hydrophile	34
III. 4.1.1.Distribution du champ électrique	34
III. 4. 2. Comportement d'une surface isolante hydrophobe	36
III. 4. 2. 1. Effet de la variation de la conductivité de contamination.....	39
III. 4. 2. 2. Effet de la variation du nombre des gouttes d'eau.....	40
III. 4. 2. 3. Influence de la répartition non-uniform des gouttes d'eau.....	41
III. 4. 3 . Comportement d'une surface isolante superhydrophobe	42
III. 4. 3. 1. Effet de la variation de la conductivité électrique.....	43
III. 4. 3. 2. Modèle avec et sans couvert diélectrique.....	45
III. 4. 3. 3. Distribution uniforme et non –uniforme des gouttes d'eau	47
III. 4. 3. 4. Effet de la variation de l'angle de contact des gouttes d'eau	49
III. 4. 4. Comparaison entre les trois matériau isolant examinés	50
III. 5. Conclusion	52
CONCLUSION GENERALE.....	53
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE	55

Introduction Général

Introduction générale

La production, le transport et la distribution d'électricité sont à la base de l'économie d'un pays industriel moderne. Au fur et à mesure que l'industrialisation progresse, des exigences de plus en plus strictes sont imposées à la fourniture de cette énergie. Pour des raisons économiques, l'électricité est généralement transportée et distribuée via des lignes aériennes. Leur fiabilité dépend donc largement du comportement mécanique, électrique et diélectrique des différents éléments de ces lignes. Parmi ces éléments, nous attirons l'attention sur le rôle essentiel joué par les isolateurs, leurs choix est donc très important [1].

Les isolateurs sont essentiels dans la construction des lignes aériennes. Leur rôle est de connecter les conducteurs sous tension aux supports et d'assurer l'isolation électrique entre les deux éléments de la ligne. En effet, le choix du type d'isolateur, les tests de réception et le suivi des performances doivent être effectués avec le plus grand soin pour assurer le bon fonctionnement et la continuité de service de la ligne électrique [2]. Le comportement des isolateurs contaminés suscite un intérêt croissant dans de nombreux pays .Cet intérêt se conjugue avec la volonté de choisir le meilleur matériau isolant face aux nombreuses nuisances causées par la pollution de l'environnement [3].

Encrassement des isolateurs, et le principal facteur affectant la qualité et la fiabilité de la transmission de puissance. La connaissance du degré d'encrassement est donc une condition préalable au dimensionnement correct de l'isolation extérieure. A l'inverse, l'accumulation de couches de contaminants à la surface des isolateurs implique l'élévation de la valeur de la conductivité électrique de surface [4]. Le but de ce travail est d'étudier le comportement d'un matériau isolant pollué sous contrainte de tension alternative, trois types de matériaux seront examinés à savoir, une isolation hydrophile, hydrophobe et superhydrophobe, la distribution du champ électrique et la performance électrique des isolations seront analysées à l'aide du logiciel COMSOL Multiphasiques.

Dans le premier chapitre, nous présentons l'importance des isolateurs, leur utilité et leurs principaux types, profils et matériaux. De plus, un aperçu sur la maintenance préventive des isolateurs sera discuté.

Dans le deuxième chapitre nous présenterons les matériaux superhydrophobes et leurs propriétés.

Dans le troisième chapitre, nous décrivons le logiciel COMSOL Multiphysics et nous présenterons les trois modèles d'isolateur plan de différents types de matériaux celui-ci est examiné lorsque le modèle est délimité par un système d'électrodes mis sous tension alternative, plusieurs paramètres seront testés à savoir ; la conductivité volumique, le type et le mode de pollution, volume et nombre de gouttes d'eau, l'angle de contact de celles-ci, présence d'un couvert isolant.

Chapitre I :
Généralités Sur Les
Isolateurs

I.1. Introduction

Les isolateurs sont des dispositifs électriques utilisés pour empêcher la transmission de courant électrique d'un circuit à un autre. Ils sont généralement fabriqués à partir de matériaux non conducteurs tels que le verre, la porcelaine ou le caoutchouc. Les isolateurs sont utilisés dans de nombreux domaines de l'énergie électrique, notamment pour isoler les lignes électriques des poteaux électriques, les transformateurs électriques et les appareils électroniques. Ils sont également utilisés dans les applications médicales pour éviter les chocs électriques et dans les applications industrielles pour protéger les travailleurs contre les circuits électriques dangereux. Ils doivent être conçus et installés de manière à assurer une protection électrique fiable et efficace. Un aperçu sur les caractéristiques des isolateurs en haute tension sera cité dans ce qui suit.

I.2. Définitions sur le fonctionnement des isolateurs

I.2.1. Isolateur

Les isolateurs sont des éléments essentiels dans la conception de structures à haute tension. Leur tâche principale est de fournir une isolation électrique entre les parties sous tension et mises à la terre [5]. Ces éléments se composent principalement du matériau isolant solide (Figure.I.1) qui a une très haute résistance au passage du courant, et dont la conductivité électrique est pratiquement nulle [6]. Il sert à isoler les fils ou les pièces sous tension pour éviter les courts-circuits, les coupures de courant et les chocs électriques [7].

Les isolateurs sont des éléments essentiels pour la transmission et la distribution de l'électricité. Leur tâche est de créer une connexion mécanique entre les fils à différents potentiels, qui sont attachés aux pylônes de la ligne aérienne. Ils maintiennent les fils dans une certaine position (alignement et ancrage des isolateurs), ils assurent la continuité entre l'isolation interne (huile, SF6) et l'isolation externe (air atmosphérique), ils permettent le raccordement des appareils de raccordement électrique au réseau (passages de transformateurs, extrémités de câbles) et assurent également la protection de certains appareils (interrupteurs, parafoudres, réducteurs de compteurs) [8].

Les isolateurs sont conçus et dimensionnés pour résister aux contraintes environnementales prévisibles [8]. D'un point de vue électrique, l'isolant est considéré comme deux électrodes dont l'espacement couvre trois zones formant trois isolants parallèles aux comportements différents, qui sont [8] :

- L'entrefer

- Matériau diélectrique.
- Interface air - matériau diélectrique. (La longueur de l'interface est la ligne de fuite - la ligne le long de laquelle le courant de fuite circulerait)

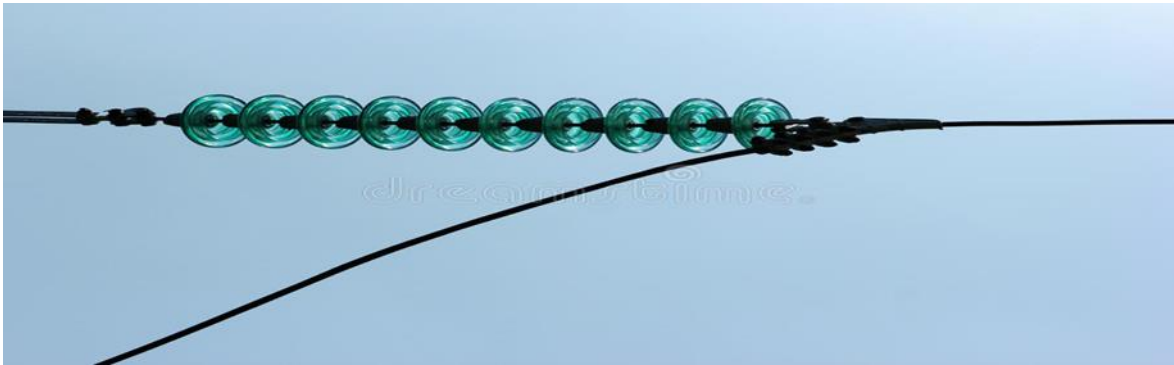


Figure. I .1. Isolateur en verre [9]

I.2.2. Ligne de fuite

Nous considérons la distance la plus courte le long de la distance interélectrode de la surface d'un isolateur comme étant une ligne de fuite (L_f) [10].

I.2.3. Ligne de contournement

La distance la plus courte dans l'espace interélectrode dans un gaz est définie comme étant une ligne de contournement (L) [10].

I.2.4. Tension de tenue (Tension d'essai)

Est le niveau de tension maximal qui peut être supporté par un isolateur sans l'apparition des décharges parasites (court-circuit de l'isolateur) [11]. La tension d'essai ou tension de tenue permet une bonne adaptation de l'isolation.

I.2.5. Tension de contournement

La tension d'amorçage est le niveau de tension minimal à partir duquel nous constatons la formation et la propagation d'arcs en série et en parallèle jusqu'au court-circuit totale de la surface inter électrode. La valeur de la tension de contournement dépend généralement de plusieurs paramètres, parmi lesquels nous citons [11] :

- R_v moyenne de la pollution.
- Mode de distribution de la couche polluante.
- Longueur d'isolation.
- La distance entre les deux électrodes et leur forme.

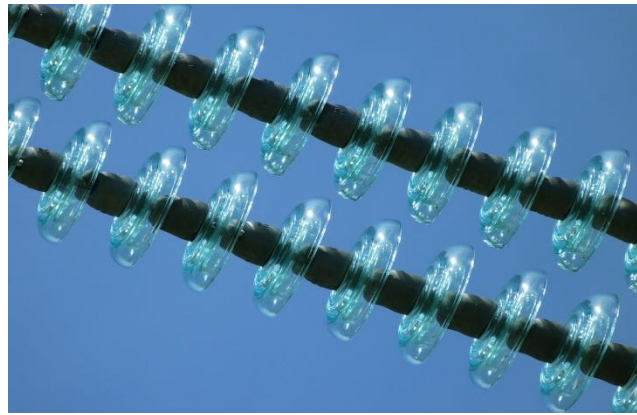


Figure. I. 2. Chaîne d'isolateurs

I.3 Propriétés électriques [12]

I.3.1 Résistance d'isolement

C'est la combinaison de la résistance transversale et la résistance superficielle d'un matériau isolant, d'une façon représentative des conditions pratiques d'emploi des matériaux.

Il existe trois types de résistivités (Fig. I. 3):

I.3.1.1 Résistance transversale ou volumique (R_v)

Nous pouvons déterminer sa valeur par l'application d'un champ perpendiculaire à la surface d'un échantillon puis nous mesurons le courant transversal résultant de l'application de ce champ. La valeur de la résistance est relative aux propriétés internes du matériau.

I.3.1.2 Résistance superficielle (R_s)

Elle correspond à celle qui existe entre deux conducteurs déposés sur la même surface isolante. La résistance est une notion qui fait intervenir, la qualité du matériau, la couche de contamination mince conductrice (humidité ou autre).

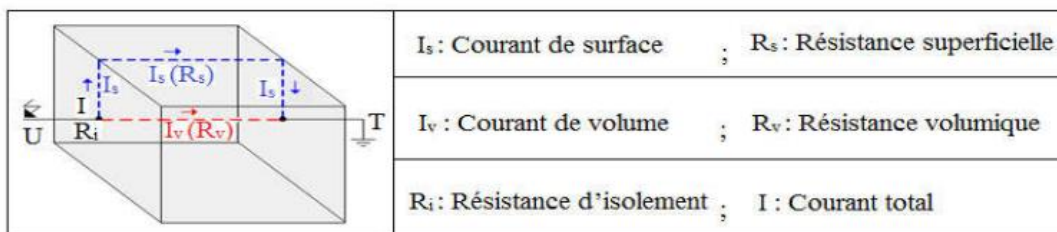


Figure. I. 3. Résistances volumique et superficielle d'isolement électrique

I.3.2 Facteur des pertes

L'application d'un champ électrique alternatif à un isolant implique l'apparition des lignes de courants de conduction et d'absorption ce qui résulte des pertes diélectriques. Dans ce cas le diélectrique réel est représenté par les schémas équivalents ci-dessus (Fig. I. 4).

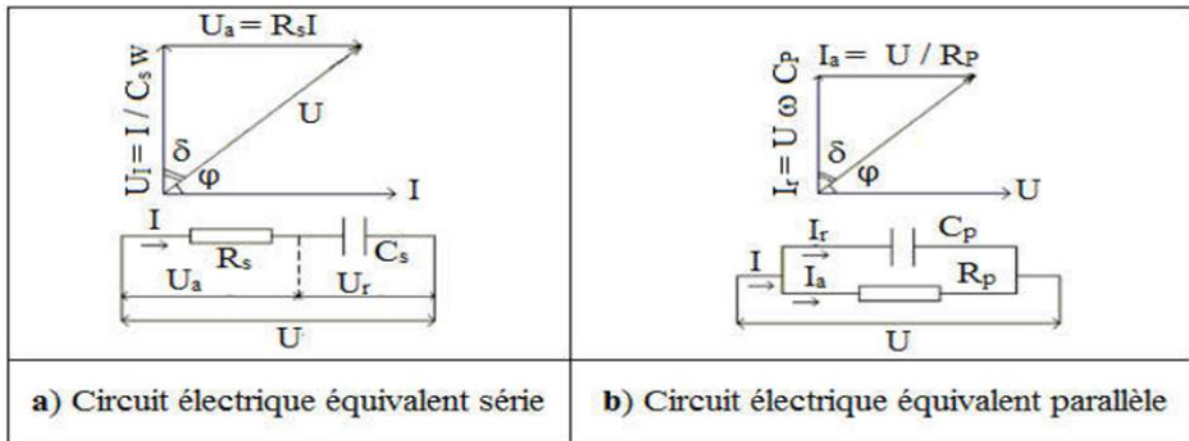


Figure. I. 4. Schéma équivalent série et parallèle du circuit électrique

I.3.3. Résistivité diélectrique

Toutes les charges sont mises en mouvement sous l'effet de l'application d'un champ électrique. Dans le diélectrique, ce mouvement est considéré comme étant un courant électrique, dans ce cas le mouvement des charges libres, plus leur quantité soit très faible, un courant de fuite. Ce dernier a deux chemins de propagation possibles : soit il traverse le diélectrique lui-même ou bien il traverse la surface du diélectrique. Il y a donc une fuite surfacique et une autre volumétrique. Chacun des deux développe une résistance de surface (R_s) et une autre de volume (R_v) différente [13].

I.3.4. Rigidité diélectrique

La propriété du diélectrique est de s'opposer aux décharges parasites. L'élévation progressive de la tension entre les deux armatures du condensateur jusqu'à une valeur quelconque (tension de bruit) ; Entre ces deux ancrs, une décharge se produit avec la naissance d'une étincelle. Exprimée en chiffres, la rigidité diélectrique est considérée comme étant le rapport entre le voltage appliqué et l'écartement des électrodes au moment du claquage [13].

En fonction de la position relative des électrodes et de la surface des matériaux, on trouve:

- **Rigidité diélectrique transversal (RDT):** grâce à ce paramètre le champ électrique appliqué est perpendiculaire aux surfaces du matériau ;
- **Rigidité diélectrique longitudinale (RDL):** est généralement mesurée entre deux électrodes déposées sur la même surface que l'isolation.

I.4. Principaux modèles d'isolateurs

Prenons en considération les différentes conditions de fonctionnement et les variables façons d'utilisations des isolateurs, on trouve des types d'isolateurs. Ceux-ci se différencient par leur fonction (on distingue ; support ou traversée), ou bien par leur matériau isolant de base, ou bien par leur profil ou leur mode de fixation.

I.4.1. Selon la fonction et le mode de fixation

I.4.1.1. Isolateur rigide

Ce modèle d'isolateur assure une connexion rigide entre le support et le câble. Il est constitué d'un certain nombre d'isolateurs noyés et scellés ensemble, fixés aux pôles par des connecteurs de formes diverses (Figure I.2). Ils sont montés surtout verticalement, horizontalement ou en diagonale (en diagonale). Généralement cet isolateur est utilisé dans le cas des lignes aériennes de niveau de tension moins de 60 kV [14].

I.4.1.2. Isolateurs suspendus ou éléments de chaîne

Ils sont constitués par le matériau isolant et d'une pièce métallique qui sert à réaliser la liaison entre deux isolateurs et à donner une certaine flexibilité à la chaîne d'isolateurs [14, 15]. La chaîne d'isolateurs est montée sur le pylône en suspension soit verticalement (chaîne d'alignement), soit d'une façon horizontale (chaîne d'ancrage).

Il existe deux types principaux d'éléments de chaîne : isolateur capot et tige et isolateur long fut

I.4.1.3. Isolateur long fut

Il se compose d'une tige cylindrique solide en céramique, porcelaine ou matériaux synthétiques, qui sont munies de nervures. A chaque extrémité se trouve une pièce métallique pour les connexions [16]. Cette extrémité métallique peut prendre deux formes différentes, soit elle recouvre les extrémités coniques du cylindre (Figure I.5) soit elle se présente sous la forme d'une tige verrouillée dans un évidement prévu à cet effet.

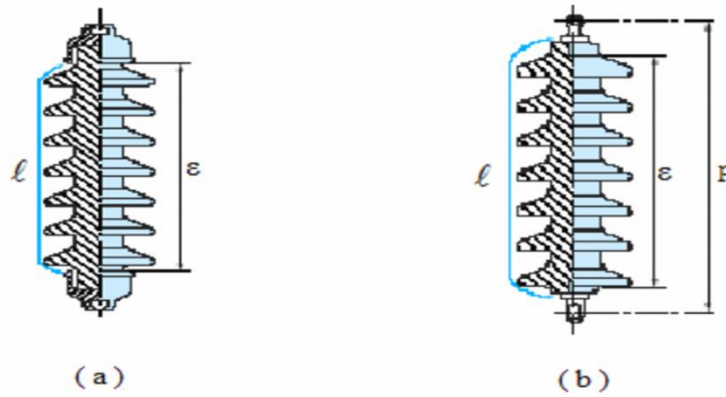


Figure. I.5. Isolateur long fut en porcelaine [17]

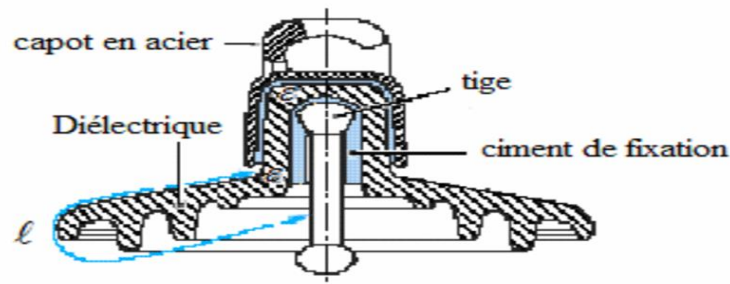
ℓ : Plus courte distance dans l'air extérieure à l'isolateur.

P : Pas nominal.

ε : Longueur de canal de perforation.

I.4.1.4. Isolateur capot et tige

Le couvercle et la tige sont constitués d'un corps isolant renfermant une tige en acier dont la tête conique est coulée dans un matériau isolant, verre ou porcelaine. L'extrémité supérieure de l'isolateur a un couvercle en fonte ductile étanche avec un trou pour l'extrémité inférieure de la tige à insérer dans ce trouet l'étanchéité des composants du couvercle et de la chaîne de tige est réalisée en insérant la partie inférieure du tige partie supérieure dans le logement de la partie inférieure avec du ciment (Fig. I.6) [18].



ℓ : plus courte distance dans l'air, extérieure à l'isolateur

ε : Longueur du canal de perforation,

Figure. I.6. Schéma d'un isolateur à capot et tige [19]

I.4.2. Selon le type de matériau isolant

Selon le type du matériau on distingue 4 types

I.4.2.1. Isolateur super hydrophile

Un isolateur superhydrophile est un matériau qui présente une propriété particulière de repousser l'eau et de ne pas laisser les liquides s'incorporer à la surface. Cette propriété est essentielle pour les applications dans lesquelles la présence d'eau peut nuire à la fonctionnalité de l'isolateur.

I.4.2.2. Isolateur hydrophile

Un isolateur hydrophile est un matériau électrique qui peut être utilisé dans des conditions humides ou mouillées sans perdre ses propriétés isolantes. Les isolateurs hydrophiles sont souvent composés de matériaux tels que le verre, la porcelaine ou la céramique, qui sont résistants à l'humidité et aux blessures électriques. Ces isolateurs sont utilisés dans les lignes électriques aériennes, les transformateurs et les sous-stations pour protéger les travaux électriques des intempéries et de l'eau.

I.4.2.3. Isolateur hydrophobe

Un isolateur hydrophobe est un matériau qui empêche la pénétration de l'eau ou de l'humidité. Les isolateurs hydrophobes sont largement utilisés dans l'industrie électronique pour protéger les pièces sensibles de l'humidité. Certains des matériaux isolants hydrophobes courants sont la mousse de polyuréthane, la laine de roche, le polystyrène expansé et le verre cellulaire.

I.4.2.4. Isolateur superhydrophobe

Un isolateur superhydrophobe est un matériau qui possède une surface extrêmement repoussante à l'eau, ce qui réduit considérablement l'absorption d'eau et les risques de court-circuit. Ces matériaux présentent une texture particulière, avec une structure en forme de petit dôme, qui empêche l'eau de s'accumuler sur leur surface. Ils sont utilisés dans l'isolation électrique, notamment pour protéger les équipements électroniques contre les dégâts causés par l'humidité et supprime la possibilité de formation de décharges électriques. Jusqu'au ce jours des isolateurs superhydrophobe ne sont pas commercialisés, des recherches sont au cours de réalisation dans ce sens.

I.4.3. Selon les différents profils des isolateurs

Vous pouvez trouver différents profils d'isolateurs de capot et de tige pour obtenir de meilleures performances.

I.4.3.1. Profil standard

Ils sont les plus courants et utilisés sur des lignes installées dans des zones à faible pollution [20], (Figure.I.7), la distance entre les anneaux et la ligne de fuite moyenne permet l'exploitation de ce profil dans les zones de pollution modérées [6].



Figure. I.7. Photo d'un isolateur capot et tige de profil standard

I.4.3.2. Profil anti-brouillard

Nous présentons deux types, dans différentes formes A et B, ils sont recommandés pour les zones moyennement et fortement sales.

➤ **Forme A**

Ce type a un diamètre un peu plus grand que le type de profil standard avec deux ou trois rainures profondes, (Figure. I.8). Cette conception facilite le lavage manuel et empêche le de se déchirer entre les rainures adjacentes lorsqu'il est très sale, et tout l'intérieur profil du simplifie la maintenance [4].



Figure. I.8. Photo d'un isolateur à Profil antibrouillard (forme A) [9]

➤ **Forme B**

Dans ce modèle, l'épaisseur de la rainure extérieure agit comme une barrière contre l'action du brouillard et le dépôt de sels minéraux sur la surface isolante, (figure I.9), également il empêche la formation d'un électrolyte de support sur le matériau. Ce type d'isolateur peut être utilisé dans les zones côtières [21].



Figure. I.9. Photo d'un isolateur à profil antibrouillard (forme B) [9]

I.4.3.3. Profil sphérique

L'absence de nervures sur la partie en verre rend difficile le dépôt de particules à la surface du diélectrique (figure I.10), tout en facilitant son nettoyage du vent et de la pluie. De plus, sa forme sphérique le rend plus résistant au vandalisme [22].



Figure. I.10. Profil sphérique

I.5. Choix des isolateurs

Les isolateurs les plus adaptés à un environnement donné sont ceux qui retiennent les dépôts les moins polluants, c'est-à-dire qu'ils ont les meilleures propriétés d'auto-nettoyage. Même une isolation bien choisie n'est jamais à l'abri des accidents. Les niveaux de pollution du site sont sujets à changement. L'arrivée de nouveaux équipements à proximité d'une station, la construction d'un chantier de voirie adjacente ou tout simplement un événement météorologique exceptionnel peuvent augmenter de façon permanente ou temporaire la contamination d'un site alors que la station ou la ligne est déjà en exploitation. Les dimensions initialement correctes des isolateurs peuvent donc s'avérer insuffisantes et il est nécessaire de protéger les installations existantes de toute nouvelle source de contamination.

I.6. Phénomène de Contournement

Le contournement de la surface contaminée et humide est le résultat d'un développement en six phases principales, schématisées à la (Figure I.11). Pour simplifier l'illustration, considérons le cas d'une plaque plane rectangulaire à deux électrodes : Dans la première phase, le courant de fuite traverse l'électrolyte recouvrant l'isolant. Cela chauffe l'électrolyte, ce qui augmente la conductivité du liquide et donc le courant (phase 1)

- L'augmentation de l'échauffement par effet Joule provoqué par le courant de fuite conduit à l'assèchement de la couche de saleté. La zone sèche formée tend à s'étendre latéralement jusqu'à l'interruption complète du flux (phase 2).

- Presque toute la tension appliquée est transmise à travers les « pinces » de la zone sèche et des arcs localisés peuvent se produire. A proximité du sommet d'arc local, un rétrécissement de la ligne de courant se traduit par un élargissement de la zone sèche (phase 3).

- A partir de ce stade, le développement de la décharge peut se faire de manières différentes : l'arc local peut être éteint (phase 4) ou il peut se déplacer latéralement pour trouver une position plus stable correspondant à la longueur d'arc plus courte (phase 5) ou atteindre l'électrode et provoquer ainsi des claquages. Dans ce cas, un prolongement d'arc se produit à la surface de l'électrolyte sans créer de zone sèche (phase 6) .

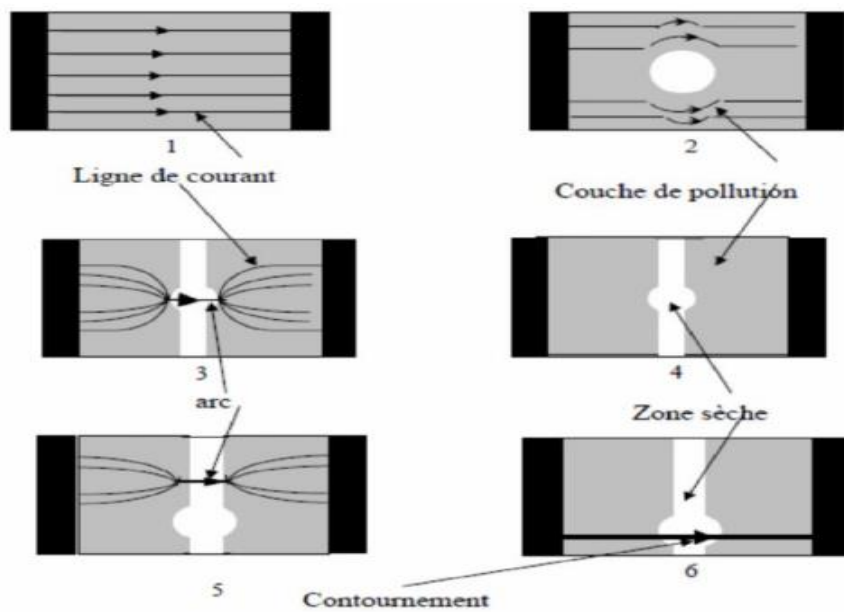


Figure. I .11. Etapes du contournement d'une couche polluante [9]

I.7. Pollution des isolateurs

La pollution est un phénomène qui pose un problème sérieux pour l'isolation des réseaux à haute tension, qui doit être pris en compte lors du dimensionnement de l'isolation des lignes à haute tension, en raison de la formation des couches plus épaisses ou moins conductrices à la surface des isolants.

Ces dépôts peuvent réduire considérablement la résistance des surfaces isolantes et donc réduire la rigidité diélectrique des isolants.

Même une isolation bien choisie n'est jamais à l'épreuve des accidents. Les niveaux de pollution du site sont sujets à changement .Les dimensions initialement correctes des isolateurs peuvent éventuellement devenir insuffisantes et il est nécessaire de pouvoir protéger les systèmes existants de nouvelles sources de contamination. Les différents types de polluants atmosphériques les plus fréquemment observés peuvent être regroupés selon leur origine et classés comme suit :

I.7.1. Pollution naturelle

Ce mode de pollution peut être marin, désertique ou autre, provenant des dépôts de poussières véhiculés par les vents. La pollution marine ü Pollution désertique et Autres sources de pollution naturelle (pluie

I.7.2. Pollution industrielle

Ce type de pollution est fréquent dans les zones industrielles surtout à proximité des usines, entreprises de production éjectant des fumées (raffinerie, cimenterie,). Par ailleurs les gaz d'échappements (centrale thermiques) et les engrais utilisés en agriculture contribuent aussi aux dépôts observés à la surface des isolateurs [23].

I.7.3. Pollution mixte

Ce type de pollution résulte de la combinaison entre deux ou plusieurs pollutions précitées, comme exemple les pollutions marine et industrielle lorsque les installations électriques sont situées en bord de mer [23].

I. 8. Techniques de lutte contre la pollution (La maintenance préventive des isolateurs)

Ces techniques sont considérées comme des solutions à appliquées afin d'assurer la maintenance préventive des isolateurs.

Pour éviter l'effet de la pollution sur les isolateurs à soyez trois solutions de rechange :

- Election correcte du type d'isolateur, entretien des isolateurs et de l'élimination de la source de pollution.
- Effet de la pollution dépendra de la région et dessus.
- Efficacité des plans d'entretien et de la correcte élection du type d'isolateur. Parmi les techniques de lutte contre la pollution des isolateurs nous citons :

I.8.1. Allongement de la ligne de fuite

Afin d'adapter le dimensionnement de l'isolant aux conditions de contamination, par exemple en utilisant des prolongements de ligne de suivi en matériau polymère collés à la surface des isolateurs existants [23].

I.8.2. Enduction à la graisse silicone

Cette technique, souvent utilisée sur les isolateurs de poste, consiste à appliquer dû à la surface des isolateurs avec des graisses silicones qui outre les propriétés hydrophobes du possèdent également des propriétés anti-poussière.

En fait, l'huile libérée recouvre chaque grain de poussière, un processus plus ou moins lent selon la composition du lubrifiant.

Grâce à cette propriété, la graisse conserve ses propriétés d'origine, c'est-à-dire une résistance de surface élevée, jusqu'à ce qu'elle atteigne la saturation d'une part et d'autre part tant que la graisse n'est pas soumise à des fluctuations importantes sous l'influence des rayons UV auxquels ils sont très sensibles.

Cette modification provoque un durcissement qui peut ralentir ou stopper le phénomène d'exsudation et par conséquent détruire la capacité de rétention des poussières. L'isolant se comporte alors comme un isolant sale et la graisse doit être remplacée [24].

I.8.3. Lavage des Isolateurs

Le lavage peut être effectué avec le système allumé ou éteint. Dans ce dernier cas, il faut veiller à éviter les dérivations pendant le rinçage. Les isolateurs sont nettoyés avec un agent de sablage en poudre sous pression.

Pour nettoyer l'isolant recouvert de contaminants collants tels que le ciment et peut également être utilisé pour dégraisser l'isolant [24].

I.8.4. Élimination des sources de pollution

En général, la recherche s'est concentrée sur les moyens de réduire la pollution.

I. 9. Conclusion

Afin de dimensionner de manière optimale les chaînes d'isolateurs, il est nécessaire de connaître la sévérité de la contamination des sites et les différents paramètres qui contribuent à la détérioration de l'état de surface de l'isolateur.

Les isolateurs les mieux adaptés à un environnement donné sont ceux qui retiennent le moins de débris, c'est-à-dire. les isolants qui ont les meilleures propriétés autonettoyantes.

Les isolateurs haute tension ne se comportent pas comme basse ou moyenne tension, dans ce cas une grande importance est attachée au phénomène d'encrassement de l'isolateur, qui présente un danger particulier pour la haute tension pouvant entraîner des pertes d'énergie.

Chapitre II :
Matériaux Isolants Et
Leurs Caractéristiques

II.1 Introduction

Vue l'importance des caractéristiques des matériaux isolants utilisés dans la fabrication des isolateurs, car celles-ci décrivent le comportement et la performance électrique de ces derniers, et facilite la prédiction de leur durée de vie. Dans ce qui suit, nous allons analyser les points importants à retenir sur des matériaux isolants, de plus, nous définirons et caractérisons la superhydrophobie, l'hydrophobie et l'hydrophilie, et par la suite nous présenterons les divers types de matériaux superhydrophobes naturels et artificiels, et spéciaux ainsi que leurs domaines d'application.

II.2. Définitions

II.2.1 Mouillabilité [25]

La mouillabilité caractérise la facilité avec laquelle une goutte de liquide s'étale sur une surface solide. Elle déposée sur cette dernière.

II.2.2 Angle de contact [25]

C'est l'angle formé par la goutte d'eau sur la surface où elle est déposée. La marge de variation de ces valeurs varient de 0 à 180°, cela est en fonction de la nature de matériau de la surface (superhydrophile, hydrophile, hydrophobe, superhydrophobe) avec laquelle elle est en contact.

II.2.2.1 Classification des surfaces par rapport à leur angle de contact

Si l'angle de contact est presque égale a 0°, alors la surface sur laquelle repose la goutte d'eau est dite superhydrophile, elle ne repousse pas l'eau (Fig. II. 1a). Si l'angle de contact est inférieur à 90°, alors la surface sur laquelle repose la goutte d'eau est dite hydrophile, elle ne repousse pas l'eau (Fig.II. 1b).

Si l'angle de contact est entre 90° et 150°, donc la surface est hydrophobe et la perle d'eau sera bombée (Fig.II. 1c).

Si l'angle de contact est compris entre 150° et 180°, on dit que la surface est superhydrophobe et la goutte d'eau sera presque sphérique (Fig. II. 1d) [25].

La forme de la goutte déposée est le résultat de trois tensions différentes (γ_{SL} , γ_{SG} , γ_{LG}) décrites par l'équation de Young [26] comme suit :

$$\gamma_{LG} \cdot \cos\theta + \gamma_{SL} - \gamma_{SG} = 0 \quad (\text{II.1})$$

$$\cos\theta = \frac{(\gamma_{SG} - \gamma_{SL})}{\gamma_{LG}} \quad (II.2)$$

Avec :

γ : Coefficient de tension superficielle;

γ_{SL} : La tension de l'interface Solide Liquide;

γ_{SG} : La tension de l'interface Solide Gaz;

γ_{LG} : La tension de l'interface Liquide Gaz;

La tension superficielle est une propriété des liquides permettant de maintenir en équilibre leur surface libre. Cette grandeur intervient principalement dans la formation des gouttes, ainsi que dans les propriétés de mouillabilité des surfaces par les liquides.

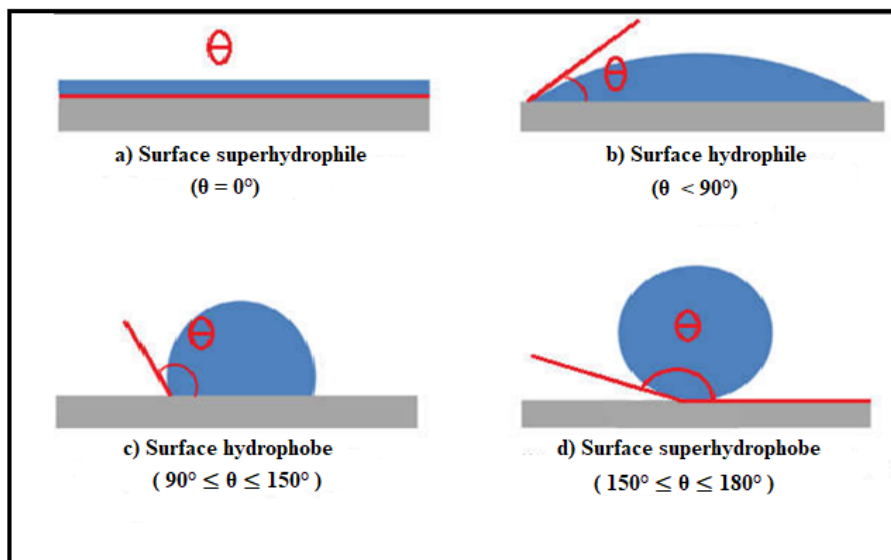


Figure. II. 1. Le comportement d'une goutte déposée sur une surface isolante [27]

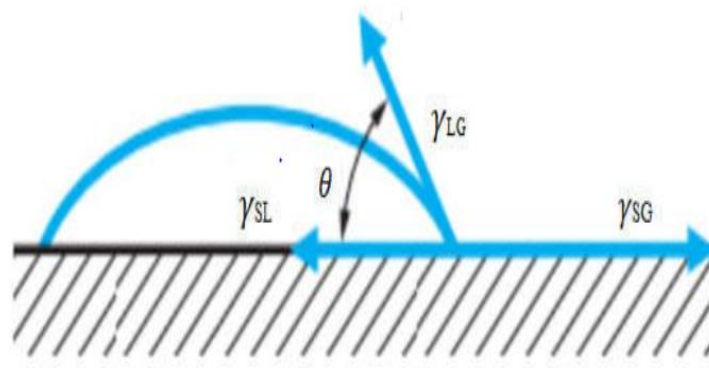


Figure. II. 2. Angle de contact d'une goutte d'eau en équilibre sur une surface[28]

Sur la figure II. 2, sont présentés les deux cas, qui peuvent se différencier grâce à l'angle de glissement (A), illustré par la figure II. 3. C'est l'angle limite (cas de superhydrophobie), avant que la goutte ne se mette en mouvement. Si cet angle est inférieur à 10 degrés, on est dans le cas Cassie Baxter et s'il est supérieur à 20 degrés c'est le cas de Wenzel [25].

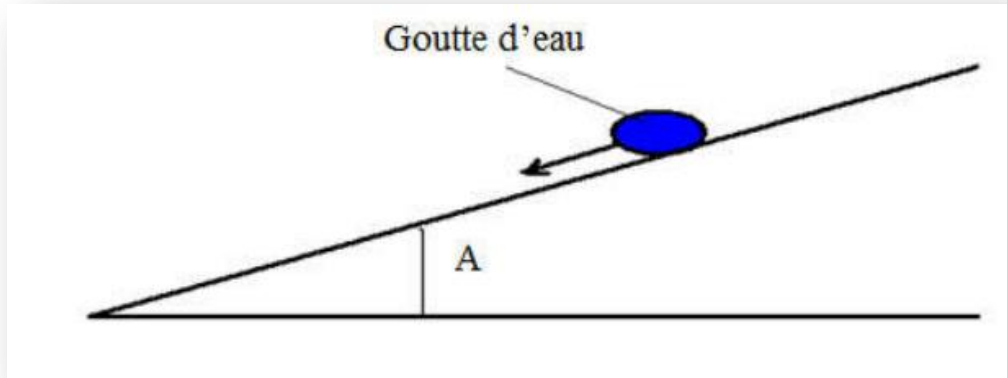


Figure. II. 3. Angle de glissement [25]

➤ Effet Wenzel [29]

En 1936, Wenzel affirme que lorsque la goutte est posée sur une surface avec une faible densité d'aspérités, l'épouse, vu que la rugosité s'imprègne et elle retient la goutte sur son support, Donc le mouillage sera partiel.

La relation de Wenzel est la suivante (Figure II.4a):

$$\cos\theta^* = r \cos\theta \quad (II.3)$$

r: La rugosité ($r > 1$);

θ : L'angle de contact sans la rugosité;

θ^* : L'angle de contact avec la rugosité;

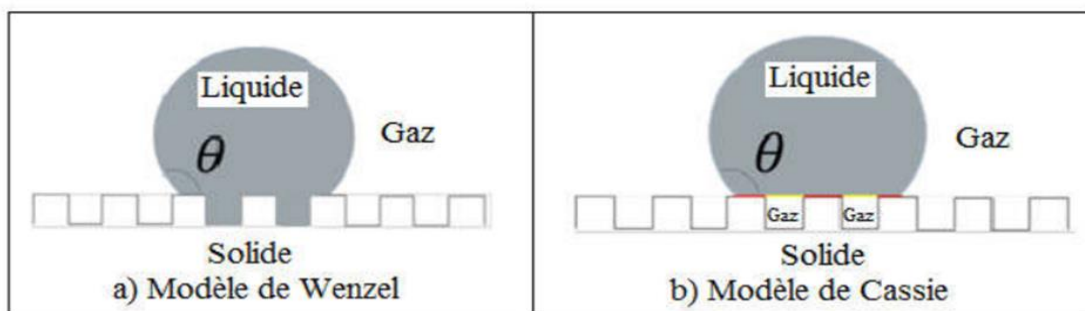


Figure. II. 4. Modèles de Wenzel et de Cassie

➤ **Effet Cassis [30]**

Huit ans plus tard, contrairement à Wenzel, Monsieur Cassis Baxter affirme qu'une goutte posée sur une surface ayant un grand nombre d'aspérités n'est en contact qu'avec leurs sommets. Dans ce cas, la goutte ne s'accroche pas voir pas du tout à son support, ce qui crée, des poches d'air entre le solide et le liquide, donc, l'hydrophobie du matériau augmente

Si non, dans le cas où la surface ne contient pas beaucoup d'aspérités, la goutte d'eau s'empalera sur son support comme l'a affirmé Wenzel.

Equation de Cassis est la suivante :

$$\cos\theta^* = \varphi_s \cos\theta - (1 - \varphi_s) \quad (\text{II.4})$$

Avec :

θ : Angle de contact sans la rugosité ;

θ^* : L'angle de contact avec la rugosité ;

φ_s : La fraction de surface occupée par le sommet des créneaux sur laquelle la goutte repose;

$(1 - \varphi_s)$: La proportion de surface d'air sur laquelle la goutte est posée.

II.2.3 Surface superhydrophile

Dans le cas où l'angle de contact avec une goutte d'eau est de l'ordre de 0° , donc la surface est de type superhydrophile [31].

II.2.4 Surface hydrophile

Une surface hydrophile ($\theta < 90^\circ$) [25] est caractérisée par son aptitude à créer des liaisons d'hydrogène avec des gouttes d'eau déposées sur la surface, s'étalent, donc, le contact entre la surface et les gouttes est maximal (Fig. II. 5a) [32].

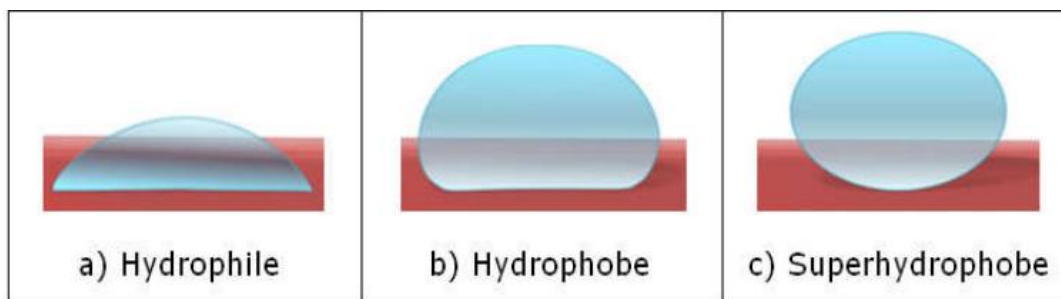


Figure. II. 5. Une goutte d'eau déposée sur une surface hydrophile à superhydrophobe [33]

II.2.5. Non mouillabilité

Est la capacité d'une surface d'un matériau à ne pas créer des liaisons d'hydrogènes avec une goutte, cela empêche la goutte de s'étaler sur la surface [34].

II.2.5.1. Surface hydrophobe

Les surfaces hydrophobes ont généralement du mal à créer des liaisons d'hydrogène avec les gouttes d'eau, déposées sur le matériau, se rassemblent afin de minimiser la surface de contact avec le matériau (Fig. II. 5b) [35]

II.2.5.2. Surface Superhydrophobe

Les matériaux superhydrophobes sont des matériaux hydrophobes avec un angle de contact plus de 150° . Lorsqu'on dépose une goutte d'eau, elle aura tendance à se rassembler en gardant une forme sphérique (Fig. II. 1d et II. 5c) [25].

La caléfaction est généralement le degré extrême de la superhydrophobicité, on l'atteint en déposant une goutte d'eau sur une plaque chauffante à 300° .

La goutte ne s'évapore pas, ceci est à cause d'un film de vapeur créé entre la goutte et la plaque chauffante, ce qui explique sa mobilité, longévité et son angle de contact qui est proche de 180° [36].

II.3. Différents types de surface superhydrophobe naturelles et artificielles

II.3.1. Surfaces superhydrophobes naturelles

La nature est une source de nombreuses espèces superhydrophobes : insectes, animaux et Végétaux. Parmi ces espèces, on citera : Le gerris, le canard, le lotus, La salvinia molesta.

II.3.1.1. Exemples de la nature

Dans ce cas la surface est alors très faible, ce qui permet à la goutte d'être ultra-mobile. C'est donc une texture couverte d'une chimie hydrophobe qui confère à la feuille de lotus, cette propriété remarquable qu'on appelle la super hydrophobie. Et la double texture est responsable d'une superhydrophobie particulièrement robuste.

Certaines plantes, comme la Salvinia Molesta, sont superhydrophobes. Récemment, les coques de quelques bateaux ont été couvertes de cette plante. Son aspect superhydrophobe permet de réduire les frottements avec l'eau et d'améliorer les glissements entraînant ainsi une baisse de la consommation de carburant. Il existe aussi certains animaux et insectes qui ont la propriété superhydrophobe.

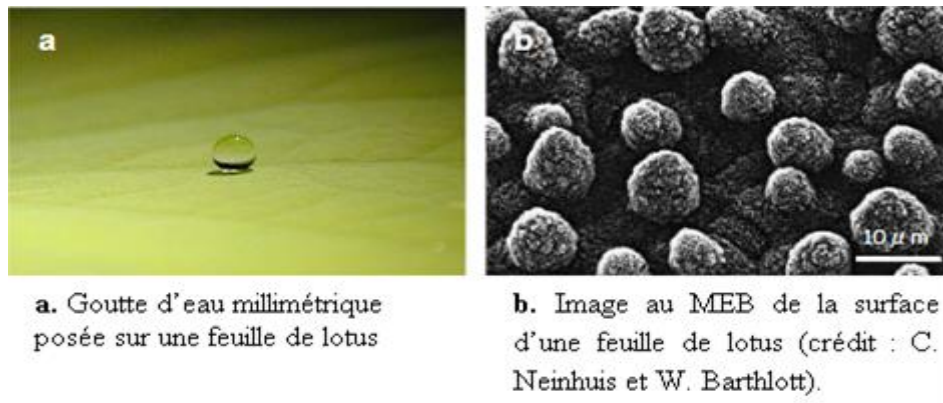


Figure II. 6 . Exemple d'une surface superhydrophobe naturelle [37]

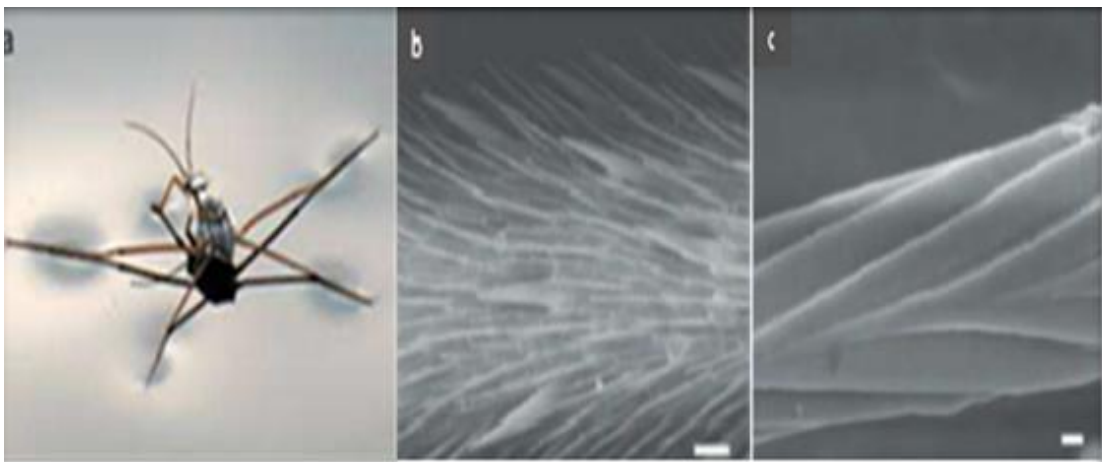


Figure.II.7. Superhydrophobie chez les animaux et insectes [37]

a Gerris sur l'eau

b et c. Images au MEB d'une patte de gerris, montrant ses microsites orientés (b) et la nanostructure faite de cannelures sur un set.

II.3.2. Matériaux artificiels [38]

Afin d'obtenir un type de surface superhydrophobe, il doit être hydrophobe, et il a une basse énergie de surface, de plus il doit être rugueux, dans les échelles micrométriques et nanométriques, en favorisant l'emprisonnement d'air dans la topographie. Durant les années 1990 et 2000, plusieurs techniques ont été proposées. Le procédé pour l'obtention de surface peut se faire en deux étapes : en premier lieu est de rendre un substrat rugueux dans le mode nano-micro et minimiser l'énergie de surface. Donc, il y a une possibilité d'obtenir des rugosités lorsqu'on réduit l'énergie de la surface en une seule étape. Les techniques les plus communes sont citées dans cette partie, à savoir, le dépôt par bain chimique, le dépôt électrochimique ou encore les revêtements au plasma.

II. 4. Méthodes de préparation de surfaces superhydrophobes

II. 4.1 Technique Dépôt par vapeur chimique [39]

Le dépôt chimique en phase vapeur est considéré comme une technique puissante et d'un niveau de pureté élevé pour le dépôt des films solides. Le matériel utilisé est coûteux et nécessite une chambre contrôlée (pression et température), d'où une petite taille de substrat. Dans ce processus, le substrat est exposé à des vapeurs chimiques qui peuvent réagir ou se décomposer sur la surface pour produire les dépôts souhaités.

II.4.2 Technique Dépôt électrochimique [40]

Le dépôt électrochimique (électrodéposition) est la technique d'application de couches minces sur des métaux. La technologie est rapide, peu coûteuse et le processus peut être exécuté à température ambiante. Dans ce processus, deux substrats sont placés dans des liquides (des produits chimiques basiques ou acides). l'un est la cathode et l'autre est l'anode. Lors de l'utilisation de courants continus de tensions différentes, certains composés chimiques se déposent à la surface. Il est possible de modifier la taille et la quantité de connexions sur la surface. Le type de composé déposé et sa forme dépendent du fait que la pièce est une anode ou une cathode.

II.4.3 Photolithographie [31]

Ce procédé permet d'obtenir des topographies continues. Il consiste à enduire une surface d'un film mince de photo résine ou de polymère, puis la radier avec un faisceau lumineux de haute précision. Cette méthode est utilisée en électronique.

II.4.4 Techniques par utilisation du plasma [42]

Le plasma peut être utilisé comme étant une technique de déposition (les ions déposent ceux pris dans un bain de vapeurs chimiques sur la surface) ou d'arrachement de matière, ce dernier est généralement utilisé en nano-fabrication des surfaces.

II.4.5. Gravure chimique

La gravure chimique est le processus d'élimination des couches microscopiques de métal à l'aide de bases ou d'acides. Le procédé utilisé est simple. Un substrat métallique est placé dans la solution pour attaquer la surface. La technique est peu coûteuse et permet de modifier plusieurs paramètres tels que le temps d'exposition, la concentration d'acide et la température de traitement, modifiant ainsi la forme et la texture de la surface.

II. 5. Applications

Le phénomène de superhydrophobicité suscite un intérêt croissant pour les entreprises, car il répond à de nombreux besoins et problèmes des entreprises et des consommateurs.

II. 5. 1 Béton intelligent [43]

Des chercheurs américains ont mis au point un type de béton résistant à l'eau et aux fissures. Grâce à sa composition moléculaire (surface « pointue »), ce béton est intelligent et donc quasiment étanche. Lorsque de l'eau est versée sur ce type de béton, des gouttelettes se forment et roulent sur la surface.

II. 5. 2 Ultra - Ever Dry [44]

Ultra - Ever Dry (Figure. II. 8), est un revêtement super hydrophobe qui, en le pulvérisant sur une surface d'un objet, il crée une barrière d'air sur celle-ci. Comme applications de ce type de revêtement, on peut citer: Anti humidité, anti corrosion, anti gel, anti contamination, anti nettoyant.



Figure. II. 8. Béton intelligent bottes sans et avec traitement ultra-ever dry

II. 5. 3 StoLotusan [45]

On peut l'utiliser sous forme de revêtement de façade avec effet lotus (en béton, en ciment).

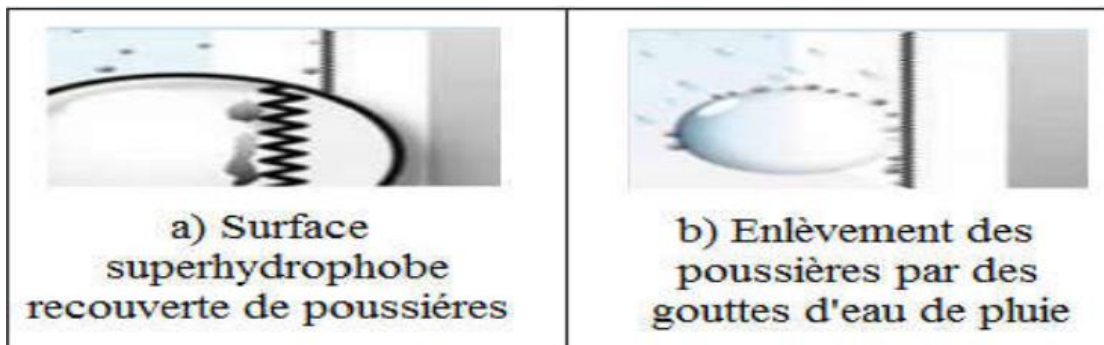


Figure. II. 9. Double fonction pour les revêtements de façade avec effet lotus

II.6. Conclusion

Le but recherché par ce chapitre était une caractérisation de la superhydrophobicité des surfaces et sa comparaison à l'hydrophobicité et l'hydrophilité.

Les diverses techniques de fabrication de matériaux artificielles à caractère superhydrophobe ont été décrites. De plus leurs propriétés ainsi que leurs domaines d'applications ont été passés en revue.

Il résulte des applications données dans ce chapitre que la superhydrophobie n'a pas été introduite dans le domaine électrique. Il serait très intéressant d'investir dans ce domaine si l'on désire améliorer la performance électrique des surfaces isolantes de protection des équipements électrique.

Chapitre III :
Résultats de
simulation d'un
modèle
superhydrophobe
plan

III. 1. Introduction

Ce chapitre est dédié à la simulation sous COMSOL multiphysics de trois différents modèles d'isolateur plan, afin de comprendre le comportement de chaque type d'isolation en présence de pollution à degré de sévérité variable. De plus, nous allons analyser les mécanismes électriques qui implique la réduction de la performance électrique des matériaux isolants.

Une étude des propriétés surfaciques sera présentée en fonction de la distribution du champ électrique, par la suite nous analyserons les résultats numériques et confirmer la meilleure rigidité diélectrique obtenus après l'application d'une contrainte de tension alternative.

Nous avons proposé trois matériaux de nature variable, à savoir, le verre comme un exemple d'un matériau hydrophile avec une couche de pollution, une isolation hydrophobe et autre superhydrophobe avec un dépôt de gouttes d'eau.

III. 2. Procédure de simulation

Pour étudier l'effet de présence d'une pollution sur la distribution du champ et de 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 de la tension électrique ont été étudiés. Parmi ses facteurs nous citons:

- Nombre des gouttes d'eau dans le cas des surfaces hydrophobe et superhydrophobe;
- Présence d'un couvert isolant ;
- Permittivité relative du couvert diélectrique ;
- Conductivité électrique de la solution polluante ;
- L'angle de contact de la goutte d'eau ;
- Mode de distribution de pollution (uniforme et non-uniforme) ;
- Volume des gouttes d'eau.

III. 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 5.5. La simulation est réalisée en trois étapes consécutives à savoir, les étapes de prétraitement, de résolution et de posttraitement (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 posttraitement, le logiciel permet aux utilisateurs de générer un graphique des variables ou paramètres de post-traitement souhaités.

III.3.1. Simulation d'un modèle d'isolateur plane

Le modèle simulé (figure III.1) 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 homogène autour des électrodes. Le modèle géométrique utilisé est composée d'une plaque en verre comme une isolation de base dans le cas d'étude hydrophile, et une plaque en silicone dans le cas hydrophobe, une plaque en verre sur laquelle est déposée une couche superhydrophobe dans la troisième étude, de plus, deux électrodes planes en cuivre reposant aux extrémités de la surface isolante dans chaque modèle. La figure III.1 (a, b) présente le modèle de simulation. La distance entre les électrodes HT et terre est égale à 10 cm, celle-ci est maintenue fixe durant toute l'étude. La surface de la plaque en verre a pour dimensions ($16 \times 0,5 \text{ cm}^2$), la couche superhydrophobe a ($16 \times 0,01 \text{ cm}^2$) et les dimensions du couvert isolant sont: ($16 \times 0,5 \text{ cm}^2$). Concernant les électrodes, leurs dimensions sont : ($3 \times 1,2 \text{ cm}^2$), elles sont séparées par 1 cm au-dessus de la surface superhydrophobe afin de faciliter la collecte des gouttes dans un récipient après leurs éjection de la surface isolante. Le volume des gouttes est varié entre 10 et 100 μl .

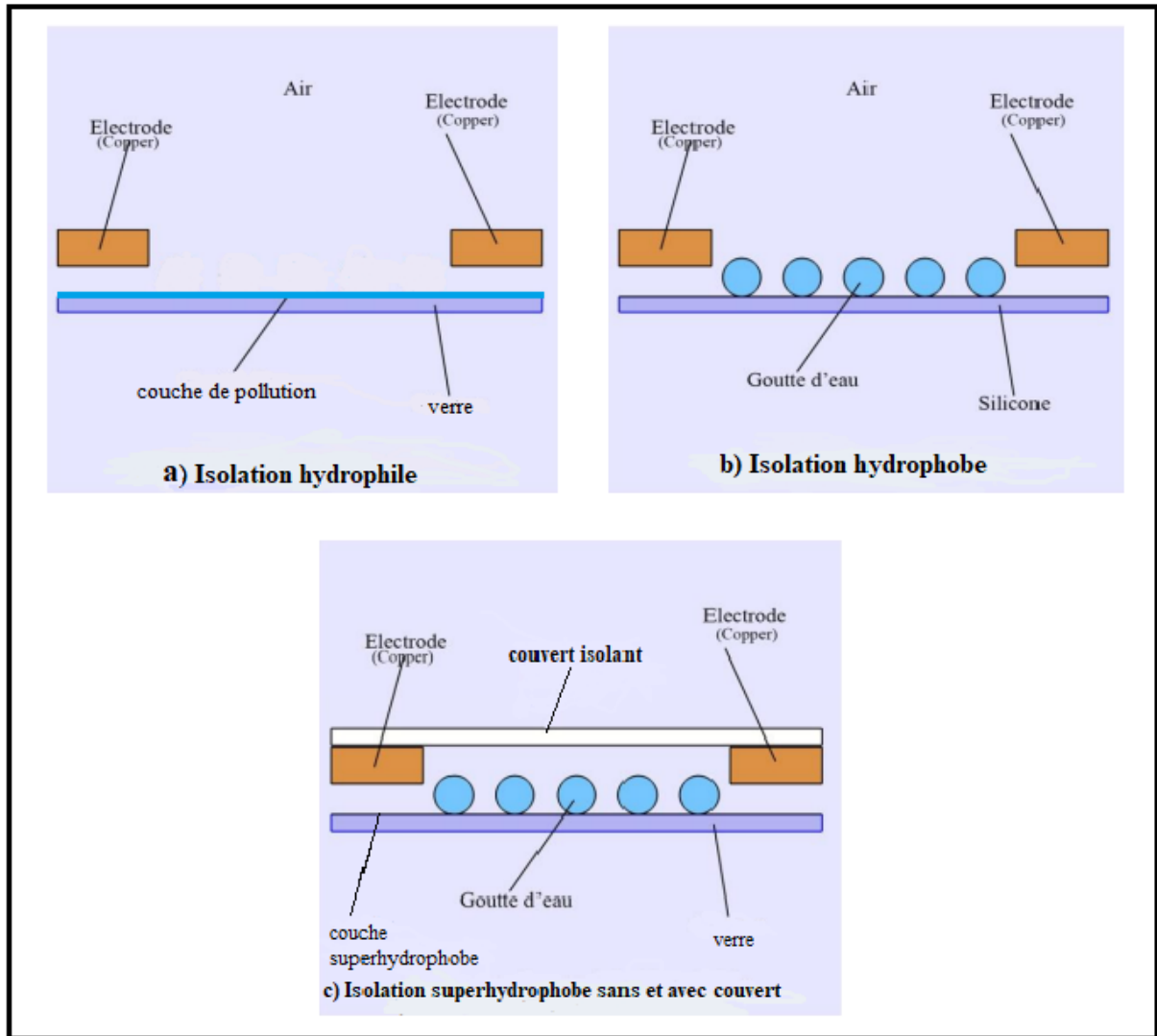


Figure III. 1. Modèle expérimental et de simulation

III.3.2. Propriétés matérielles

Chaque domaine du modèle a été spécifié avec les propriétés du matériau approprié décrit. La permittivité relative des gouttes d'eau a été estimée à 81. La conductivité de la goutte d'eau est entre 3×10^{-6} à 20×10^{-3} S/m, une valeur adoptée à partir des mesures de laboratoire. La région de l'air entourant l'isolateur a été spécifiée avec une très faible conductivité $\sigma = 1,0 \times 10^{-14}$ S/m. Les propriétés des matériaux utilisés pour la modélisation de l'isolant dans cette étude sont résumées dans le tableau suivant :

Tab. III. 1 : Propriétés physiques des matériaux utilisés dans le modèle

Les matériaux	La permittivité relative	La conductivité électrique (S/m)
L'air	1	10^{-14}
Le cuivre	1	5.99×10^7
Le verre	5.5	10^{-14}
La couche superhydrophobe	1	10^3
L'eau	81	20×10^{-6}
Le Couvert diélectrique	20 à 160	10^{-12}

III .3.3. 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 III.2) est effectuée dans la région d'intérêt pour augmenter le nombre d'éléments de maillage le long de la surface de l'isolant et ainsi d'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.

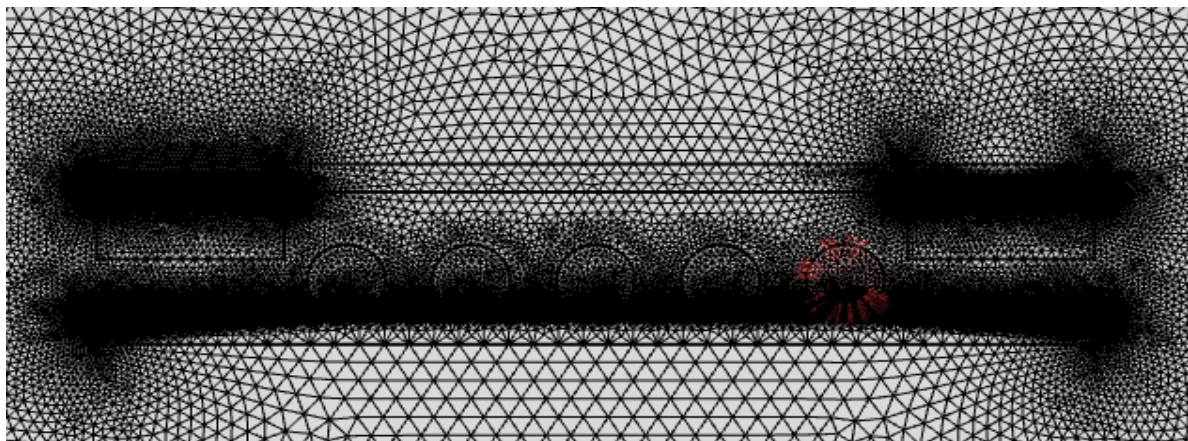


Figure III. 2. Maillage du modèle superhydrophobe avec couvert étudié

III. 4. Résultats et discussions

III.4.1. Comportement d'une isolation hydrophile

III. 4. 1. 1. Distribution du champ électrique

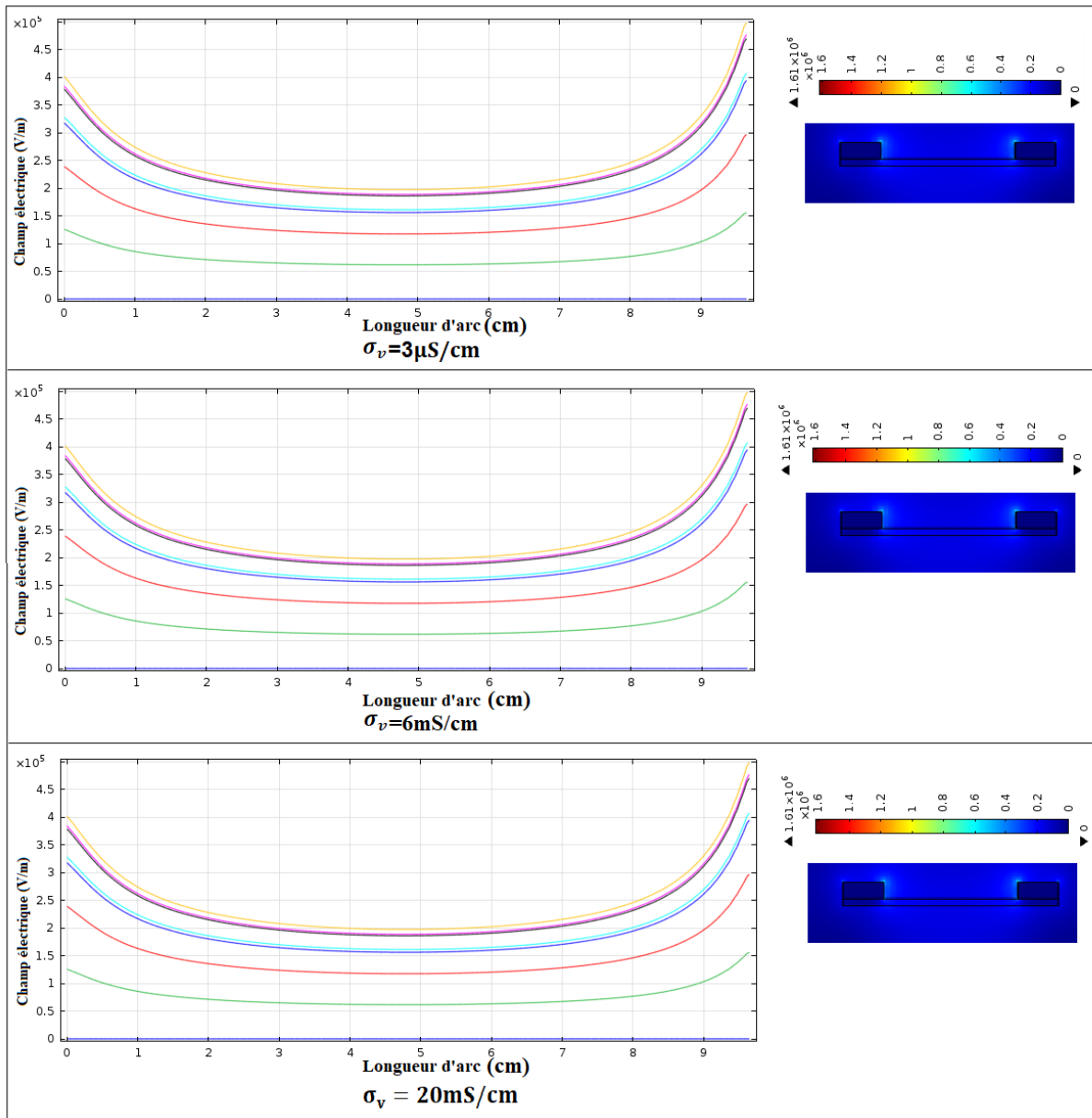


Figure III. 3. Distribution du champ électrique sur une isolation en verre sans distance ($\sigma_v=3\mu\text{S}$, 6mS , 20mS , $U_a=25\text{ kV}$)

Les figures III.3 et 4, illustrent la distribution du champ électrique sur une isolation hydrophile en verre, sans distance entre la surface et les électrodes et par la suite avec distance entre les deux, pour trois niveaux de conductivité volumique. Il est à constater que l'intensité du champ électrique est maximale au niveau des électrodes de base puis elle diminue au niveau

de la surface isolante indépendamment de la valeur de la conductivité volumique de la couche de pollution, l'effet de celle-ci est négligeable dans les résultats numériques (Figure III. 3 et 4) ce qui n'est pas le cas dans la réalité, où nous remarquons la diminution de la tension de contournement en fonction de l'élévation de la conductivité volumique de la couche de contamination, puisque la conductivité élevée favorise le développement des décharges électriques et par la suite facilite le court-circuit totale de la surface isolante dans un temps réduit [9].

De plus, il est à signaler l'élévation de l'intensité du champ électrique au niveau des électrodes de base lorsqu'elles sont séparées à celle-ci. Ce qui peut être traduit par le changement dans le point de naissance du décharge électrique, dans le cas où les électrodes sont collées sur la surface nous remarquons la naissance des décharges électriques au niveau des électrodes et elles se développent sur la couche de pollution après l'assèchement de cette dernière, à la rencontre des décharges électriques parallèles du côté terre. Leur taille augmente en fonction de la réduction de leur nombre au fur et à mesure de leur propagation dans le sens de l'arc négatif, le contournement de l'isolation est généré par la jonction d'un arc négatif avec l'un des arcs positifs connectés en série au dernier.

Les mêmes phases de contournement seront remarquée dans le cas des électrodes séparées de la surface de l'isolation, la seule différence réside au niveau du point d'initiation de la décharge électrique à proximité de l'électrode HT, qui prend naissance dans l'air en formant un canal lumineux dans la distance entre l'électrode et la couche de pollution.

Il est à signaler dans ce cas d'étude, que lorsqu'un champ électrique est appliqué à un matériau isolant tel que le verre, la distribution du champ dépend généralement de la conductivité du matériau. Le verre est un isolant de haute qualité avec une conductivité extrêmement faible, ce qui signifie qu'il est relativement difficile pour le champ électrique de se propager à travers le matériau. De plus, lorsqu'un champ électrique est appliqué à un matériau en verre, la distribution de ce champ sera fortement concentrée autour des points de contact entre le matériau et les conducteurs externes (électrodes). Cette concentration du champ peut être modélisée mathématiquement en utilisant des équations de champ électrique pour le matériau en question.

En général, plus la distance à partir du point de contact est grande, plus la distribution du champ électrique sera uniforme. Cela est dû à la faible valeur de la conductivité du matériau sous étude, qui limite la propagation du champ électrique à travers celui-ci. Cependant, si la

conductivité du matériau est augmentée (par exemple, en ajoutant des impuretés ou bien de pollution), cela peut entraîner une modification de la distribution du champ électrique et une augmentation de l'effet de "proximité" autour des points de contact.

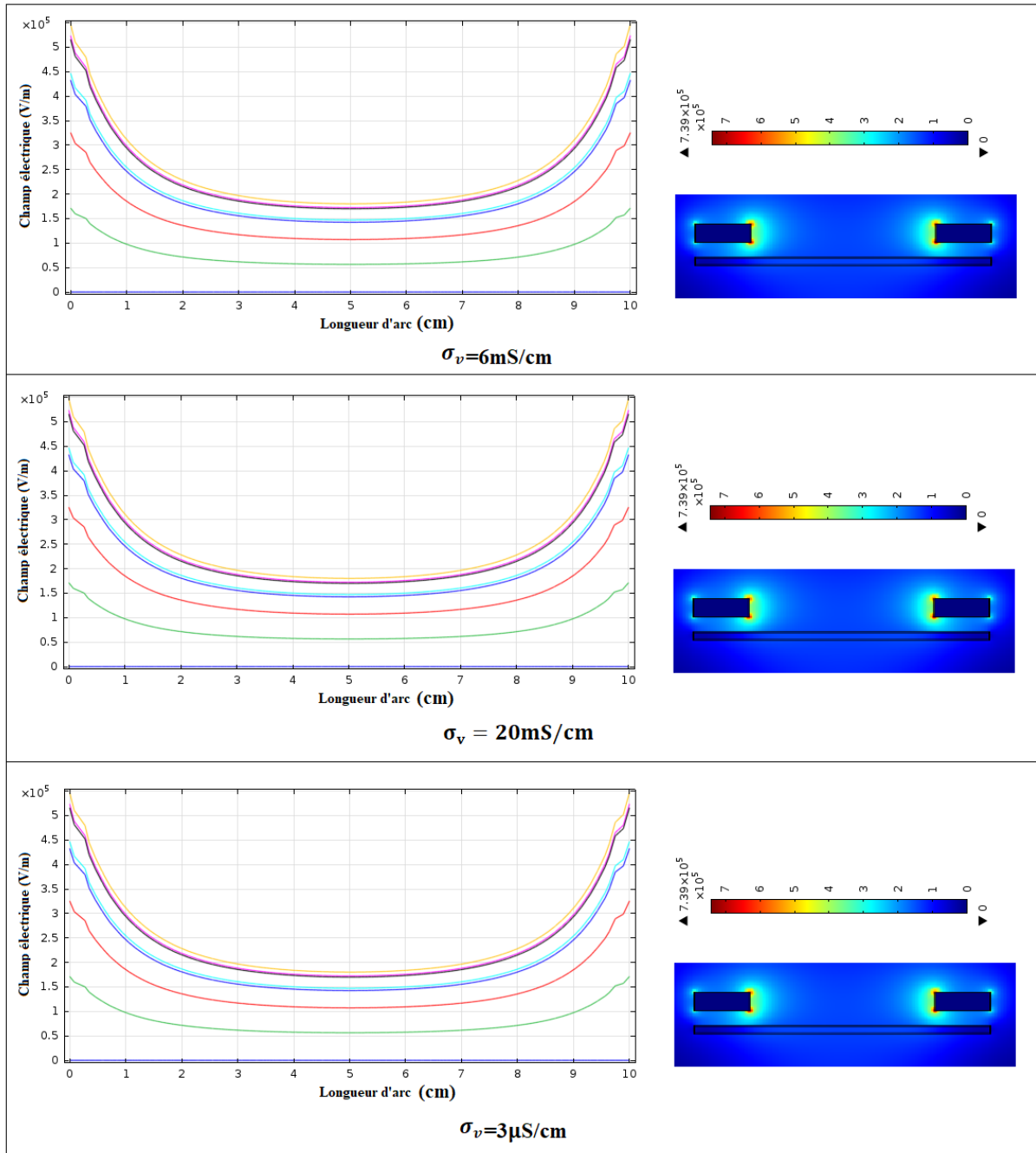


Figure III. 4. Distribution du champ électrique sur une isolation en verre avec distance ($\sigma_v=3\mu S, 6mS, 20mS, U_a=25\text{ kV}$)

III. 4. 2. Comportement d'une surface isolante hydrophobe

Contrairement aux surfaces hydrophiles, dans ce cas nous allons changer la manière de présentation de la couche de pollution, ce type de matériau collecte la pollution sous forme de

gouttes d'eau. Le format des gouttes d'eau sur une surface hydrophobe dépend de plusieurs facteurs, tels que la tension superficielle de l'eau, la nature de la surface hydrophobe et l'angle de contact entre la goutte d'eau et la surface.

Lorsqu'une goutte d'eau est déposée sur une surface hydrophobe, elle tend à former une sphère, car la tension superficielle de l'eau tend à minimiser la surface en contact avec la surface hydrophobe. Plus la tension superficielle de l'eau est élevée, plus la goutte d'eau aura tendance à conserver une forme sphérique.

Le format de la goutte d'eau peut également être influencé par l'angle de contact entre la goutte d'eau et la surface hydrophobe. Si l'angle de contact est très faible, la goutte d'eau aura tendance à s'étaler sur la surface hydrophobe et à former une couche plate plutôt qu'une goutte sphérique.

Les figures III.5 et 6 présentent la distribution du champ électrique sur une surface hydrophobe, nous avons déposé cinq gouttes d'eau de même volume (100 μ l) sur la ligne de fuite de l'isolation, la distance entre les gouttes est de l'ordre de 2 cm, et celle entre la goutte et les deux électrodes est fixée à 1 cm.

D'après les photographies du comportement des gouttes d'eau sous contrainte de la tension appliquée, nous constatons que le champ électrique critique est plus intense au niveau des gouttes d'eau à proximité des électrodes HT et terre par rapport à celles dans les autres positions, ce qui est traduit par le fait que les forces attractives et répulsives dipolaire sont égales. Dans ce cas la goutte est dans un équilibre électrique. De plus, il en résulte de cette étude que la goutte au niveau de l'électrode HT est plus déstabilisé par rapport à celle du côté terre.

Des travaux expérimentaux antérieurs ont montré la déformation d'une goutte d'eau après l'application de la tension lorsque le champ électrique auquel elle est soumise atteint une certaine valeur. En effet, la gouttelette se déforme pour compenser les forces de surface et les forces électriques s'exerçant sur elle. Pour la goutte située à côté de l'électrode HT, ils ont remarqué que cette dernière se déplace vers le milieu de la distance interélectrode par la suite elle subit une élongation en formant un filet d'eau avec les autres gouttes ce qui facilite la formation d'une décharge électrique et par conséquent le contournement de l'isolation [47].

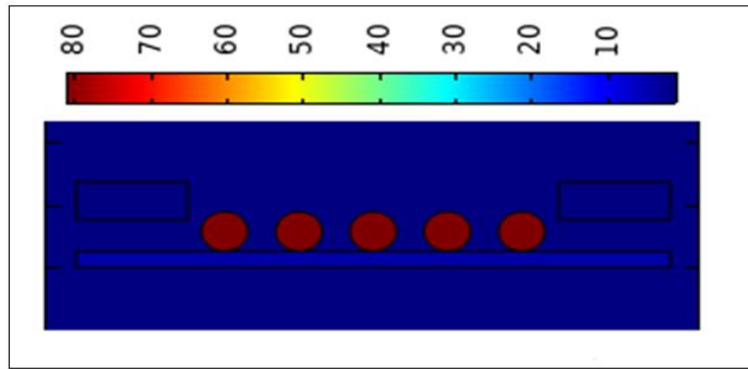


Figure III. 5. Différentes permittivités relatives dans le modèle

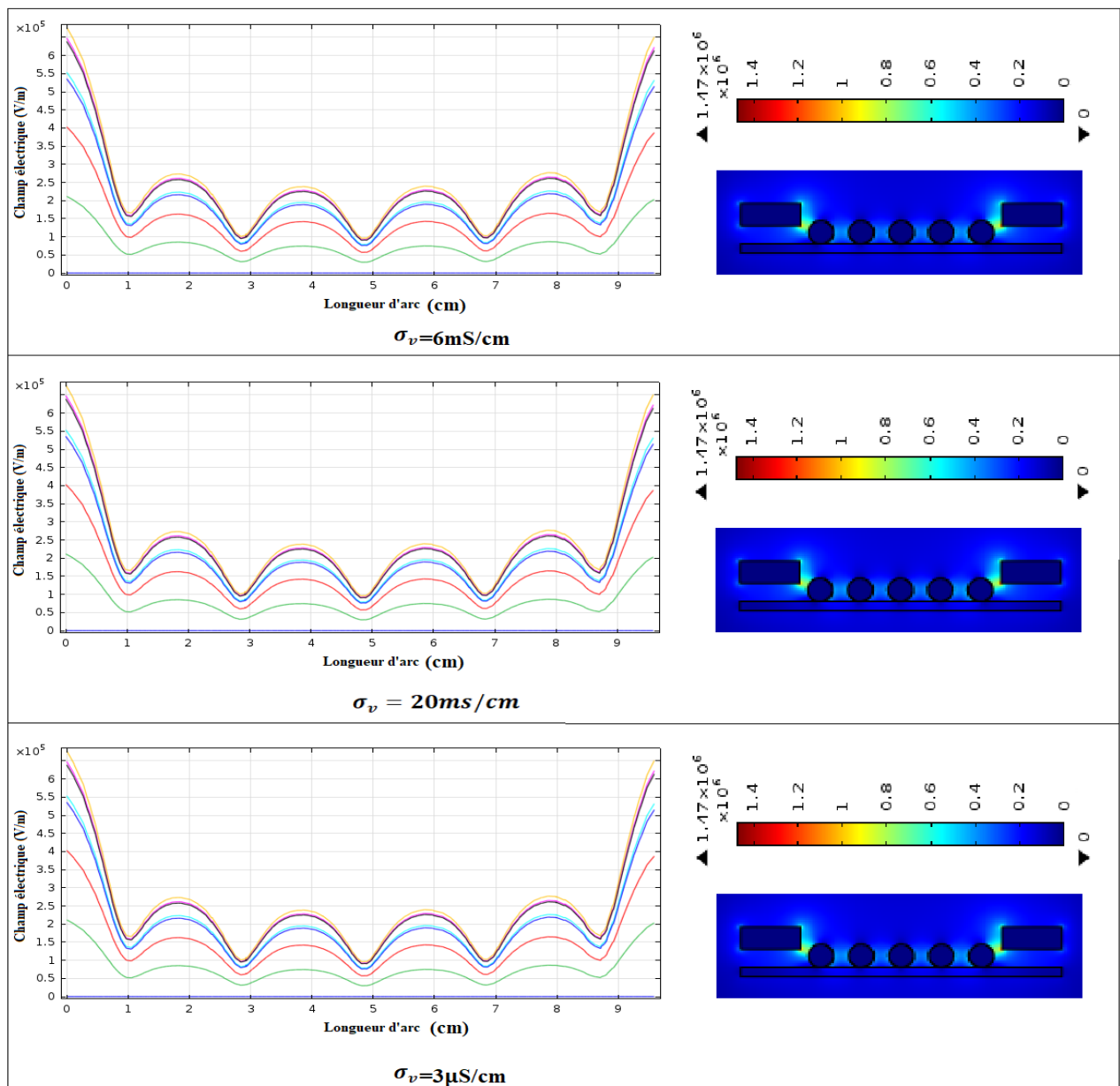


Figure III. 6. Distribution du champ électrique sur 5 gouttes d'eau sur une isolation en silicone ($\sigma_v = 6, 20\text{mS/cm}, 3\mu\text{S/cm}$ $U_a = 25\text{ kV}$)

Il existe deux forces importantes qui s'exercent sur la goutte d'eau, à savoir, la force électrique qui est le résultat de la combinaison de l'effet de la différence de permittivité relative des milieux (Figure III.5) ; au niveau de la goutte, l'air et la silicone sans oublier l'effet du champ. Cette première force est influencée par l'intensité du potentiel. La deuxième force est celle de gravité, qui est généralement décrite par la forme de la goutte. D'après les autres chercheurs, plus la tension appliquée est faible, plus la force de gravité est plus élevée que la force électrique, ce qui implique l'absence du phénomène de déformation.

Sur une isolation en silicone hydrophobe, la distribution du champ électrique peut être influencée par plusieurs facteurs, tels que les propriétés diélectriques du silicone et la géométrie de la surface.

III. 4. 2. 1. Effet de la variation de la conductivité de contamination

En réalité la conductivité de l'eau est très faible, mais elle peut être légèrement augmentée en présence de sels dissous dans l'eau. Si la conductivité de l'eau varie, cela aura un impact sur la distribution du champ électrique autour des gouttes d'eau [47].

Selon les résultats de simulation présentés dans la figure III.6, la variation de conductivité n'entraîne aucun changement dans la distribution du champ électrique, ce qui n'est pas logique puisque en réalité plus la valeur de conductivité est grande plus la morphologie de la goutte elle-même est affectée ce qui facilite la déformation de celle-ci ou même une rupture diélectrique si les forces électriques sont trop fortes.

D'après les tests expérimentaux, lorsque la conductivité de l'eau est faible, la distribution du champ électrique sera principalement déterminée par la charge électrique sur les gouttes d'eau. Le champ électrique sera plus intense au niveau de la goutte lorsqu'elle est de grande conductivité que lorsqu'elle est faible valeur [47].

Pour une conductivité de l'eau plus élevée, les charges électriques peuvent se déplacer plus facilement dans l'eau et cela peut donner lieu à des phénomènes plus complexes de redistribution du champ électrique. Par exemple, il peut y avoir des courants électriques qui se forment à la surface des gouttes d'eau, ce qui modifiera la distribution du champ électrique autour des gouttes.

En particulier, les gouttes de grande conductivité pourront accumuler davantage de charge électrique par rapport aux gouttes de plus faible conductivité. Cela pourrait conduire à une

distribution asymétrique du champ électrique sur la goutte, avec une réduction de la tension de contournement de l'isolation hydrophobe.

III. 4. 2. 2. Effet de la variation du nombre des gouttes d'eau

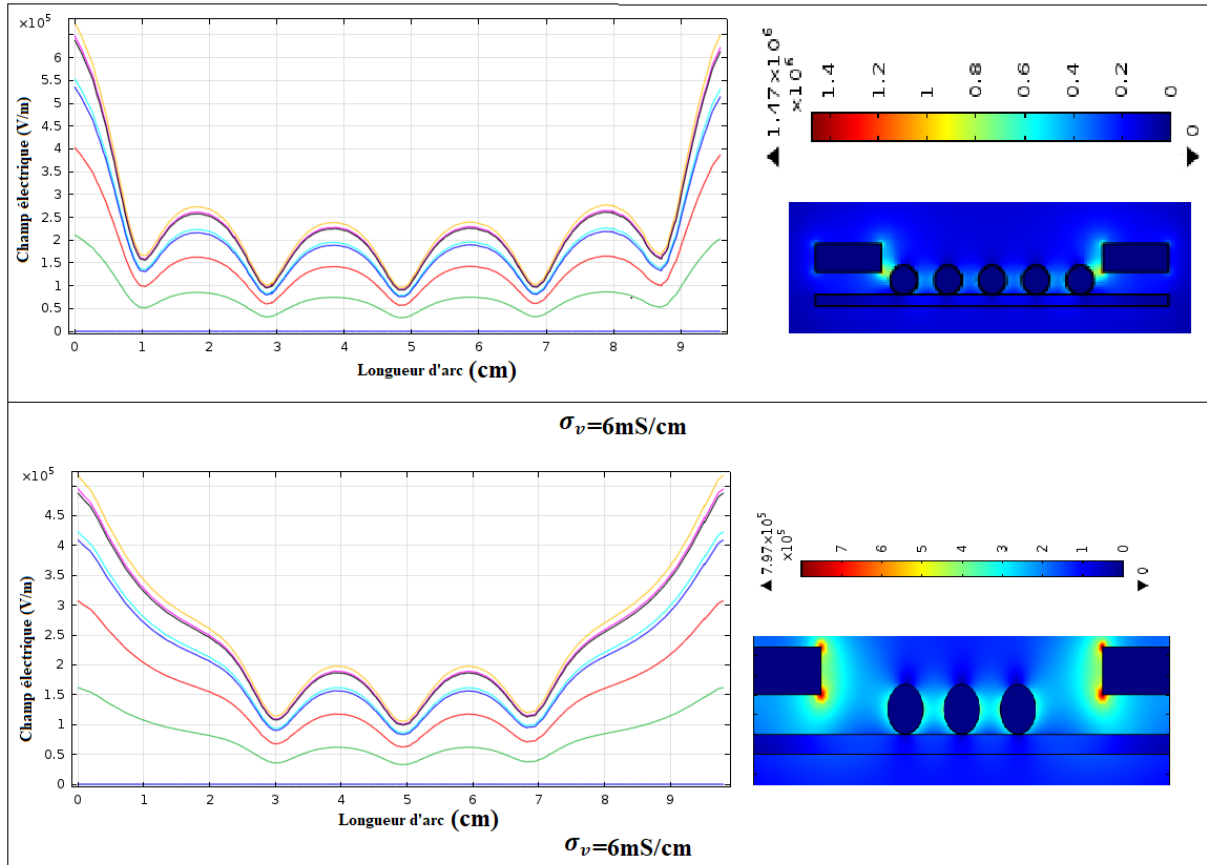


Figure III. 7. Distribution du champ électrique en fonction du nombre de gouttes d'eau d'une isolation en silicone sans couvert ($r = 20$; $V_d = 100 \mu\text{l}$; $U_a = 25 \text{ kV}$)

La figure III.7 représente l'influence de la variation du nombre de gouttes d'eau sur la distribution du champ électrique au niveau de la surface isolante en silicone. Il est à remarquer que quoique ce soit le nombre de gouttes d'eau distribué sur la surface isolante, l'intensité du champ électrique au niveau de gouttes d'eau proches aux électrodes est plus intense qu'au niveau des gouttes d'eau au milieu de la surface. La valeur du champ électrique reste constante au niveau des gouttes déposées au milieu de la distance interélectrique.

La seule différence réside dans une seule observation, bien que les gouttes sont uniformément réparties sur la surface de l'isolation, donc le champ électrique peut être considérablement diminué en raison de l'absorption et de la dispersion de charges par les gouttes. Cela peut entraîner une réduction de la densité de charge et limiter la propagation du courant dans ce cas.

Par contre, si les gouttes sont concentrées dans certaines zones de l'isolation, cela peut causer une augmentation locale du champ électrique. Cela est dû à l'effet de concentration de charges le long de la direction de la goutte, qui peut induire un champ électrique plus élevé dans cette zone et augmente le risque de contournement électrique.

En outre, un grand nombre de gouttes peuvent également affecter la capacité d'isolation de la surface en augmentant la permittivité effective du matériau. De plus, une concentration élevée de gouttes peut affecter la propagation des charges électriques.

III. 4. 2. 3. Influence de la répartition non-uniform des gouttes d'eau

Dans cette partie nous avons pensé à la simulation de l'effet de la distribution non-uniforme des gouttes d'eau sur une isolation hydrophobe. Nous avons pris trois volumes différents de gouttes à savoir, 10, 30 et 100 μl .

Les caractéristiques du champ électrique présentées dans la figure III.8 illustre le développement du champ électrique en fonction du mode de distribution des gouttes d'eau uniforme et non –uniforme.

Il est à signaler que l'intensité du champ électrique est plus faible au niveau des gouttes de petit volume par rapport à celle de grand volume. Cela peut être expliqué par le fait que si une goutte d'eau est très petite, elle ne peut pas contenir de nombreuses charges électriques, tandis qu'une grande goutte peut en contenir beaucoup plus. Les gouttes les plus grandes peuvent également exercer une force plus importante sur les charges électriques dans leur voisinage, ce qui pourrait potentiellement influencer la distribution du champ électrique. Il est à mentionner également que dans le cas de distribution uniforme de gouttes d'eau (de même volume) l'intensité du champ électrique est presque similaire au niveau des cinq gouttes, ce qui n'est pas le cas dans la distribution non-uniforme des gouttes ou nous observons que la variation de volume des gouttes peut créer des zones où le champ électrique est plus intense et d'autres zones où il est plus faible.

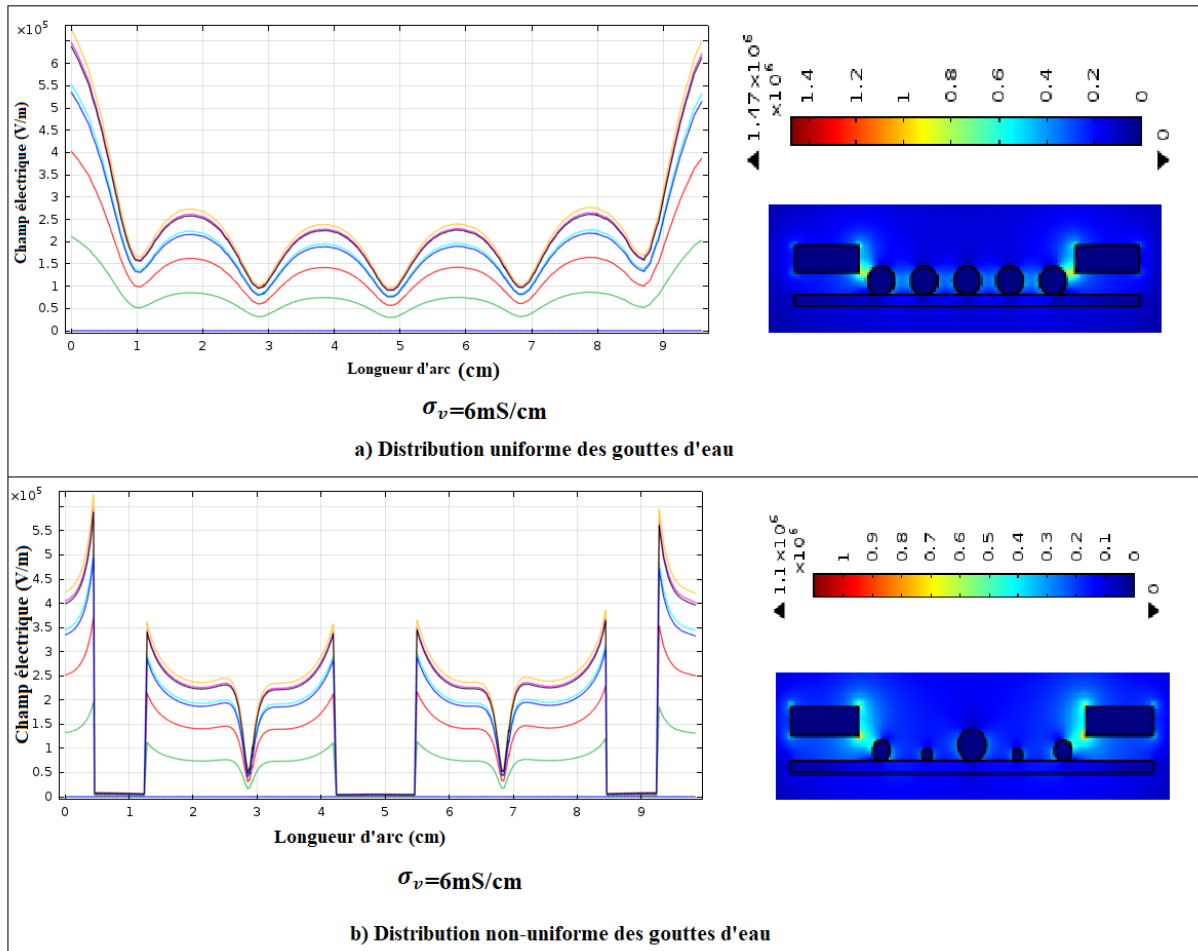


Figure III. 8. Distribution du champ électrique en fonction du volume de gouttes d'eau uniforme et non-uniforme d'une isolation en silicone sans couvert ($r = 20$; $V_d = 100 \mu\text{l}$; $U_a = 25 \text{ kV}$)

III. 4. 3 . Comportement d'une surface isolante superhydrophobe

En raison de la nature superhydrophobe de la surface isolante, la distribution du champ électrique peut être affectée de différentes manières.

Tout d'abord, il convient de souligner que la surface superhydrophobe est un matériau isolant, ce qui signifie qu'il ne permet pas le passage du courant électrique. Par conséquent, il n'y aura pas de flux de courant à travers la surface elle-même. Cependant, si une charge électrique est appliquée à la surface, cela peut affecter la distribution du champ électrique en fonction de la répartition spatiale de la charge. Plus précisément, la charge électrique peut conduire à la formation d'un champ électrique localisé, qui peut affecter la configuration générale du champ électrique de la zone environnante.

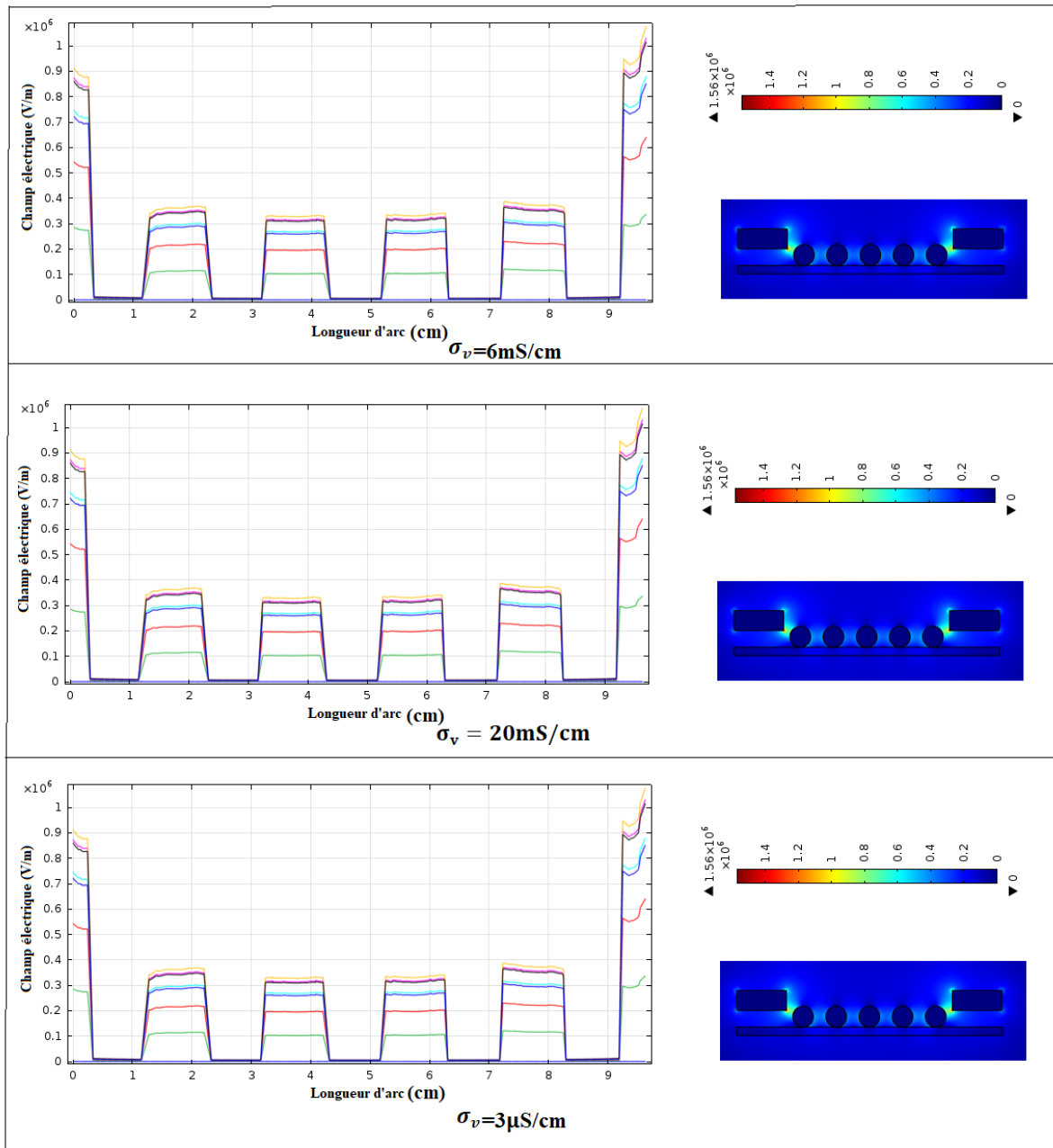
Dans cette partie, la simulation du modèle avec une isolation superhydrophobe est réalisée, le type de contamination dans ce cas est comme celui mentionné auparavant dans la

partie de l'étude de matériau hydrophobe, plusieurs paramètres d'influence sont pris en considération.

III. 4. 3. 1. Effet de la variation de la conductivité électrique

La figure III. 9 illustre la distribution du champ électrique sur la surface isolante en fonction de la variation du degré de la sévérité de la contamination, trois niveaux de conductivités électriques sont examinés. Il est à constater qu'indépendamment de la valeur de la conductivité volumique de la solution polluante, l'intensité du champ reste inchangée ce qui veut dire que la distribution du champ est la même, cela implique l'obtention du même scénario d'éjection de gouttes d'eau hors de la surface. Comme il a été déjà discuté auparavant, la concentration du champ électrique est très accentuée au niveau des électrodes qu'au milieu de la ligne de fuite. Donc, l'évacuation des gouttes d'eau déposées du côté HT et terre est effectuée en premier lieu, par la suite nous observons l'éjection des gouttes déposées au centre de la surface.

Le résultat de simulation est en contradiction avec celle expérimentale, ou il a été prouvé qu'en absence de toute variation de conductivité, la distribution du champ électrique sur les gouttes d'eau sera uniforme, avec une valeur maximale au niveau du point le plus proche des électrodes. Cependant, si la conductivité des gouttes est variable, cela peut affecter la distribution du champ électrique sur les sommets des gouttes.



. **Figure III. 9.** Distribution du champ électrique sur 5 gouttes d'eau sur une isolation en silicone Superhydrophobe sans couvert ($\sigma_v= 6, 20\text{mS/cm}$ et $3\mu\text{S/cm}$ $U_a=25\text{ kV}$)

La conductivité volumique des gouttes d'eau peut avoir un effet significatif sur la distribution du champ électrique à la surface superhydrophobe. Lorsqu'une tension est appliquée à la surface superhydrophobe, les charges électriques se répartissent dans les gouttes d'eau en fonction de leur conductivité. Si les gouttes d'eau ont une conductivité volumique élevée, cela signifie qu'elles contiennent une grande quantité d'ions, qui peuvent se déplacer sous l'influence d'un champ électrique facilement ce qui accélère leur éjection. Par contre, si les

gouttes d'eau ont une conductivité volumique relativement faible, l'éjection des gouttes sera moins rapide que le premier cas [48].

III. 4. 3. 2. Modèle avec et sans couvert diélectrique

Les allures des champs électriques présentés dans la figure III.11 sont en fonction de la présence du couvert isolant sur le modèle étudié. D'après l'analyse des résultats, nous remarquons que l'insertion du couvert diélectrique d'une permittivité relative de l'ordre de 20 n'as pas vraiment un grand effet sur l'intensité du champ électrique, malgré que celui-ci assure le renforcement des lignes du champ sur les sommets des gouttes d'eau (Figure III. 12) ce qui normalement facilite l'éjection de cette dernières.

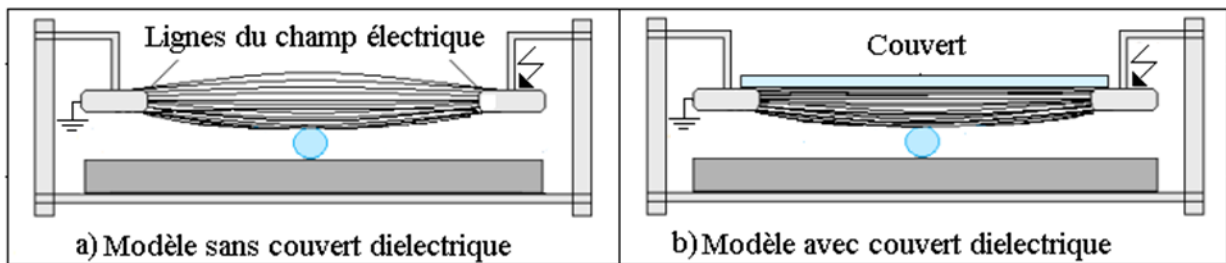


Figure III. 10. Effet de la présence du couvert diélectrique sur la concentration des lignes électriques

Concernant la prédiction de l'ordre d'évacuation des gouttes d'eau, il est à signaler l'éjection des gouttes déposées au voisinage de l'électrode terre (GT) premièrement avec une intensité du champ électrique de l'ordre de 0.9×10^6 kV/cm, puis nous remarquons l'expulsion de la goutte du côté HT (GHT) avec un champ un peu plus faible (0.85×10^6 kV/cm), par la suite les deux gouttes intermédiaires (GIT) et milieu (GM) avec des intensités presque proches entre 0.3 et 0.4×10^6 kV/cm.

D'après ces résultats, nous pouvons dire que le couvert diélectrique peut affecter affect l'ordre du mouvement des gouttes à cause du renforcement des lignes électriques, mais l'évacuation se réalise toujours dans le même sens.

Les résultats numériques confirment celle expérimentales réalisées auparavant par [48]. Ils ont constaté que l'expulsion des gouttes d'eau est effectuée en trois modes, quoique ce soit le nombre de rangées déposées dans l'espace interélectrode :

- Le mode Grupo-individuelle : l'éjection des gouttes d'eau se réalise par ensemble séparément et successivement en dehors la surface superhydrophobe, et il y a une possibilité d'évacuation des gouttes individuellement.
- Le mode par groupes : L'éjection est réalisée en groupe des gouttes au même temps.
- Le mode individuelle : L'évacuation est effectuée par l'expulsion des gouttes une après l'autre, chacune dans un sens.

Concernant le sens d'éjection, il a été signalé le mouvement des gouttes soit du côté HT vers la terre, du côté terre vers HT ou bien dans les deux sens vers la terre et l'électrode HT. Cela est effectué après l'application de la contrainte de tension alternative, il en résulte une force électrique au niveau de l'interface liquide/air. Le sens des forces électriques pointaient vers le centre des perles d'eau. Dans ce cas la force électrique dépend du temps agissant sur l'interface air / liquide des gouttes est plus grande que celle sur l'interface solide / liquide, ce qui implique l'attraction horizontale des gouttes en suivant la direction du champ électrique. Dans ce cas, deux scénarios sont possibles :

- Soit l'évacuation directe de la goutte ;
- Ou bien, par la minimisation de la distance entre les gouttes, un minuscule pont liquide est apparu entre les gouttes. L'augmentation du pont liquide est tirée par la force de tension superficielle et la force électrique. Entre-temps, l'air emprisonné sous le pont liquide a été expulsé dans la direction perpendiculaire au modèle à deux dimensions jusqu'à la fusion des petites perles d'eau en une plus grande, la force électrique à la jonction triphasée était la plus élevée. Selon la formule de la force électrique, le point maximum du champ électrique était à la jonction triphasée. Comme la direction de la force électrique en ce point vers le centre du pont liquide, la composante de la force électrique le long de la surface superhydrophobe pourrait favoriser la coalescence des gouttelettes, Le nouvelle goutte d'eau générée était étirée verticalement et instable [49].

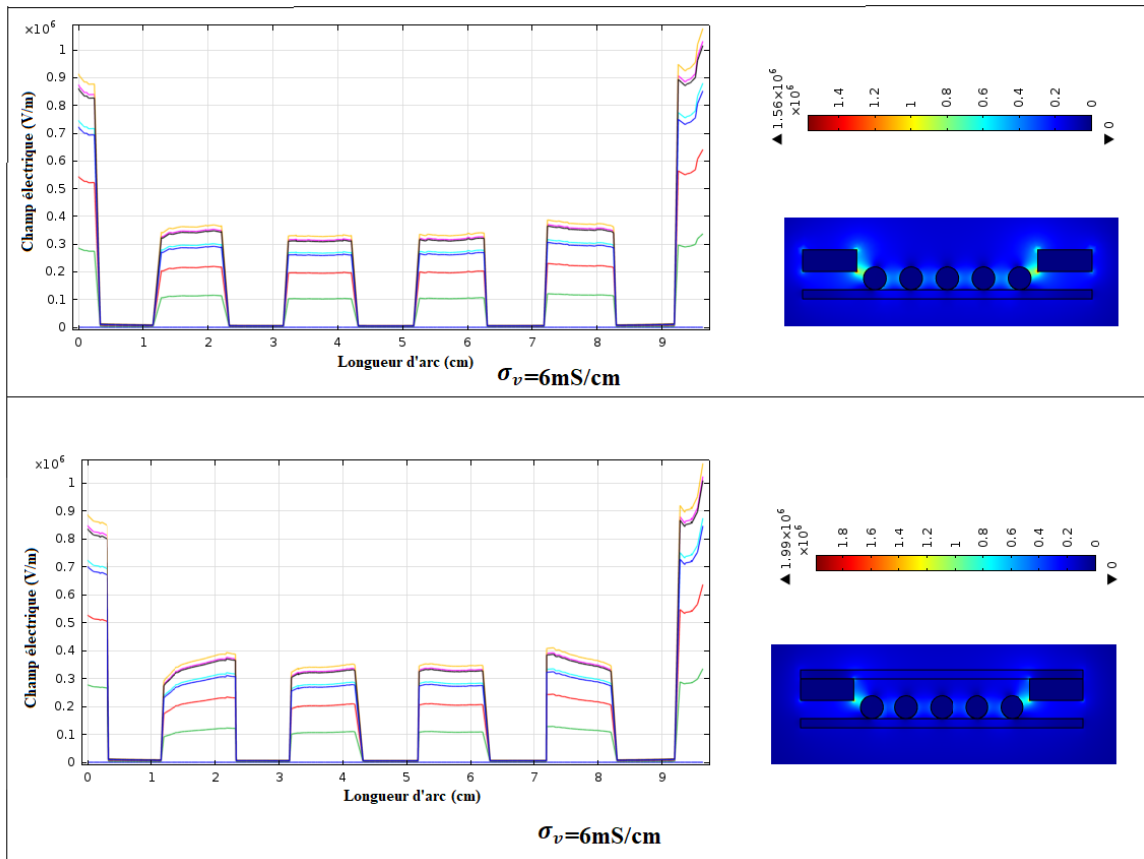


Figure III. 11. Distribution du champ électrique sur 5 gouttes d'eau sur une isolation en silicone Superhydrophobe sans et avec couvert ($\sigma_v = 6 \text{ mS/cm}$, $U_a = 25 \text{ kV}$)

III. 4. 3. 3. Distribution uniforme et non –uniforme des gouttes d'eau

Dans cette partie, nous avons pensé à tester l'effet du mode de distribution des gouttes d'eau sur la concentration du champ électrique au niveau des gouttes d'eau déposées sur l'isolation superhydrophobe.

La figure III.12 illustre d'un côté la distribution uniforme de cinq gouttes d'eau de même volume ($100 \mu\text{l}$) et d'un autre côté la répartition de cinq gouttes de volume variable (100 , 30 et $10 \mu\text{l}$).

L'effet de variation de volume de gouttes sur une surface superhydrophobe peut dépendre de plusieurs facteurs, tels que la taille de la goutte, la rugosité de la surface, la tension superficielle du liquide et la présence de revêtements hydrophobes.

Nous savons tous que la surface superhydrophobe présente une faible énergie de surface, ce qui signifie qu'elle repousse l'eau de manière très efficace. Cela se produit en raison de la présence de microstructures sur la surface, qui piègent de l'air entre les aspérités, créant ainsi un

effet de coussin d'air qui empêche l'eau de mouiller la surface. Lorsque des gouttes d'eau sont déposées sur une surface superhydrophobe, elles ont tendance à former des sphères compactes qui rebondissent facilement. Cependant, si le volume de la goutte est très faible, il se peut qu'elle ne puisse pas former une sphère complète, ce qui peut entraîner une diminution de la capacité de rebondissement de la goutte. De plus, si la surface superhydrophobe présente des défauts, des fissures ou des zones rugueuses, cela peut perturber l'effet de coussin d'air et rendre la surface moins hydrophobe. Dans l'ensemble, les surfaces superhydrophobes sont très efficaces pour repousser l'eau, quelle que soit la taille des gouttes, mais des défauts ou des irrégularités peuvent altérer leur efficacité.

De plus, la distribution non-uniforme affecte l'ordre d'éjection de gouttes d'eau puisque d'après la concentration du champ au niveau des gouttes, nous constatons que l'évacuation des grande gouttes est plus rapide que celle des gouttes fines.

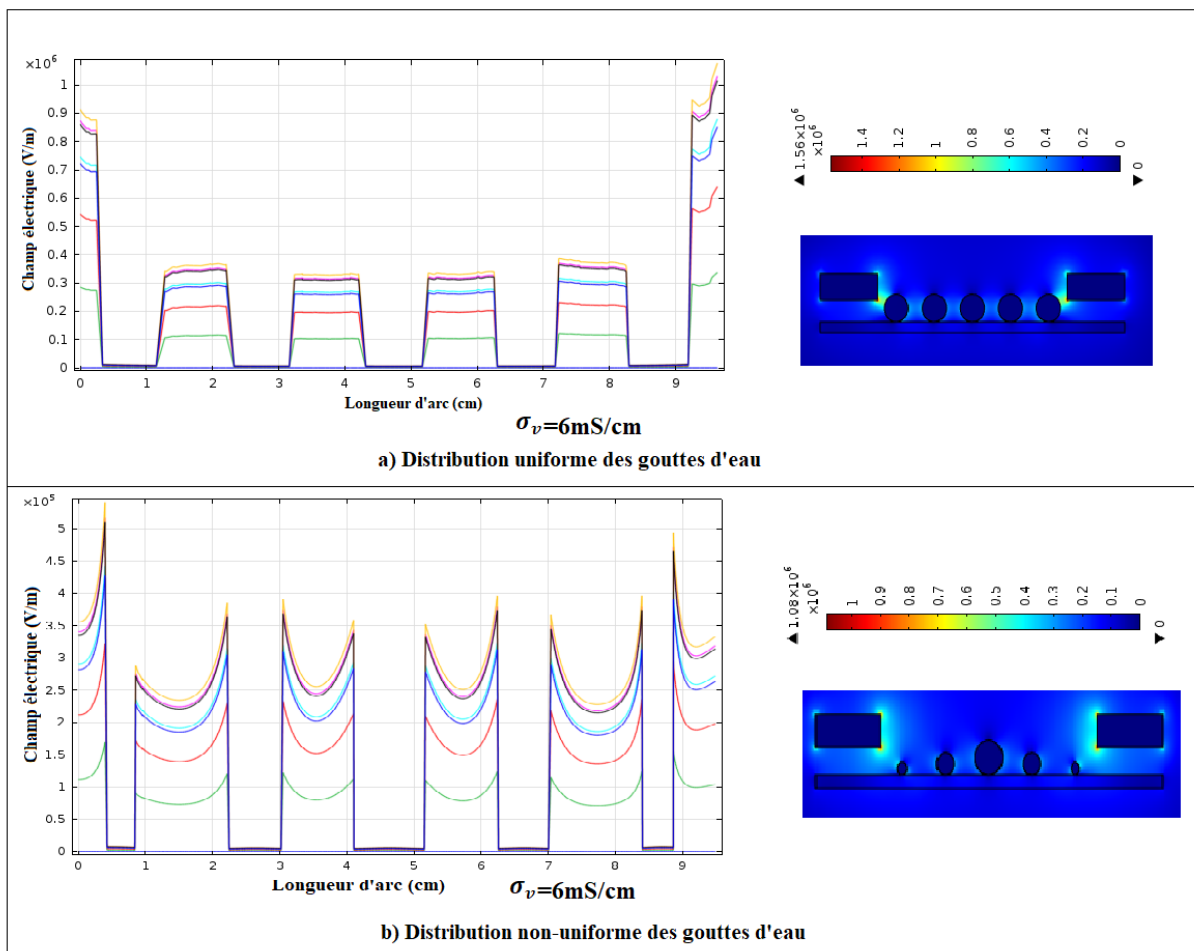


Figure III. 12. Distribution du champ électrique sur 5 gouttes d'eau sur une isolation en silicone Superhydrophobe uniforme et non uniforme sans couvert ($\sigma_v=6\text{ mS/cm}$, $U_a=25\text{ kV}$)

III. 4. 3. 4. Effet de la variation de l'angle de contact des gouttes d'eau

L'angle de contact est défini comme l'angle formé entre la surface solide et la ligne tangente à la surface du liquide au point de contact. Afin de simuler l'effet du début de perte de superhydrophobie sur la distribution du champ électrique, nous avons pensé à changer la valeur de l'angle de contact des gouttes d'eau déposées au niveau de la surface isolante sous étude, deux valeurs d'angle sont examinées, à savoir, $\theta = 150^\circ$ et $\theta > 150^\circ$. Sachant que le nombre, le volume et la conductivité volumique des gouttes d'eau restent constantes.

Il est à constater que l'élargissement du point de contact entre la goutte et la surface superhydrophobe n'influe pas la distribution du champ électrique à proximité des gouttes d'eau, cela peut être expliqué par le fait que malgré la diminution de l'angle de contact de la goutte, la surface n'a pas perdu complètement son pouvoir d'hydrophobicité.

Généralement plus l'angle de contact est faible, la surface du liquide adhère fortement à la surface solide, ce qui entraîne une répartition uniforme du champ électrique. Cependant, lorsque l'angle de contact est élevé, la surface du liquide ne peut pas adhérer fortement à la surface solide, entraînant une distribution non uniforme du champ électrique.

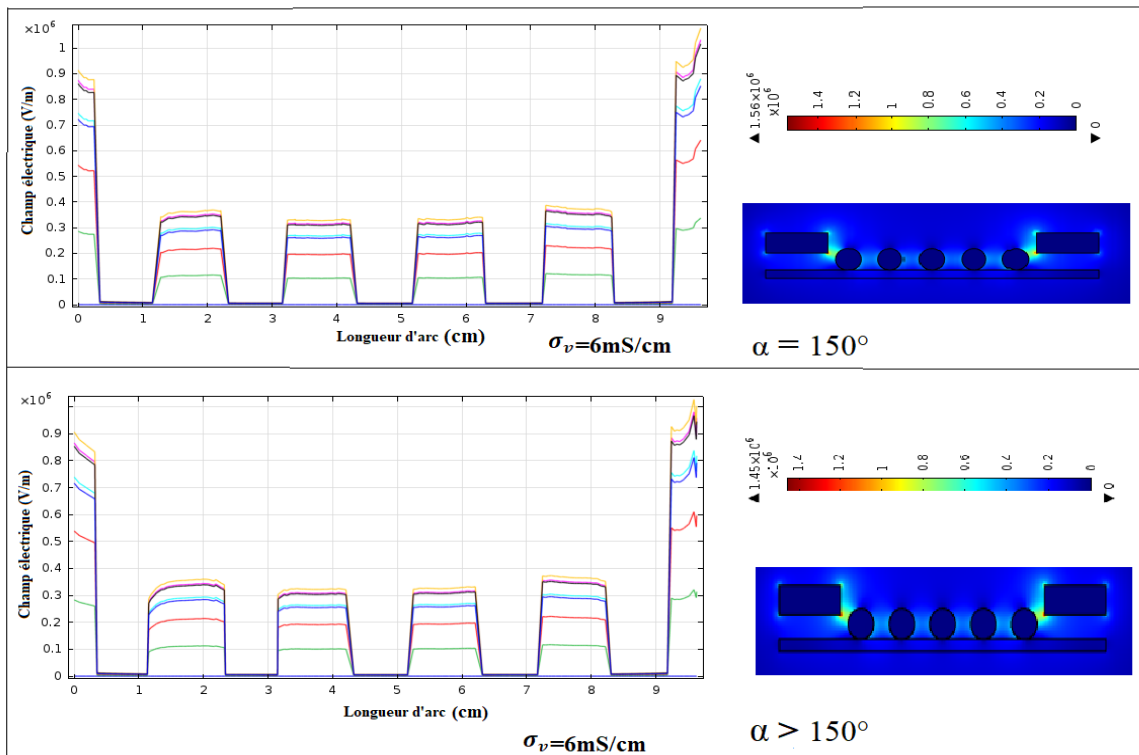


Figure III.13 . Distribution du champ électrique sur 5 gouttes d'eau sur une isolation Superhydrophobe (6 mS/cm , $\alpha = 150^\circ$, $\alpha > 150^\circ$, $U=25 \text{ kV}$)

III. 4. 4. Comparaison entre les trois matériaux isolants examinés

D'après l'étude du comportement des trois surfaces isolantes, il en résulte que le champ électrique est plus intense sur la surface hydrophile en verre que dans le cas des deux autres surfaces hydrophobe et superhydrophobe, cela est expliqué par le fait de présence d'une forte activité de décharges électrique au niveau de la surface en verre et celle en silicone, ce qui n'est pas constaté au niveau de la surface superhydrophobe. Cette dernière présente une meilleure performance électrique par rapport aux deux autres, puisque aucune décharge électrique n'est formée au niveau de celle-ci [48].

De plus, elle a une caractéristique d'auto-nettoyage, par contre la surface hydrophobe présente l'inconvénient de collage des gouttes de forme semi-sphérique sur la surface après leur désintégration à des gouttelettes plus fines et la formation d'un filet d'eau qui facilite la formation d'un canal lumineux de décharge électrique. Après le court-circuit, cette surface présente un autre inconvénient qui est la perte d'hydrophobicité, qui peut être expliquée par le fait que les charges électriques s'accumulent et restent à la surface polymérique après le vieillissement électrique de l'isolation.

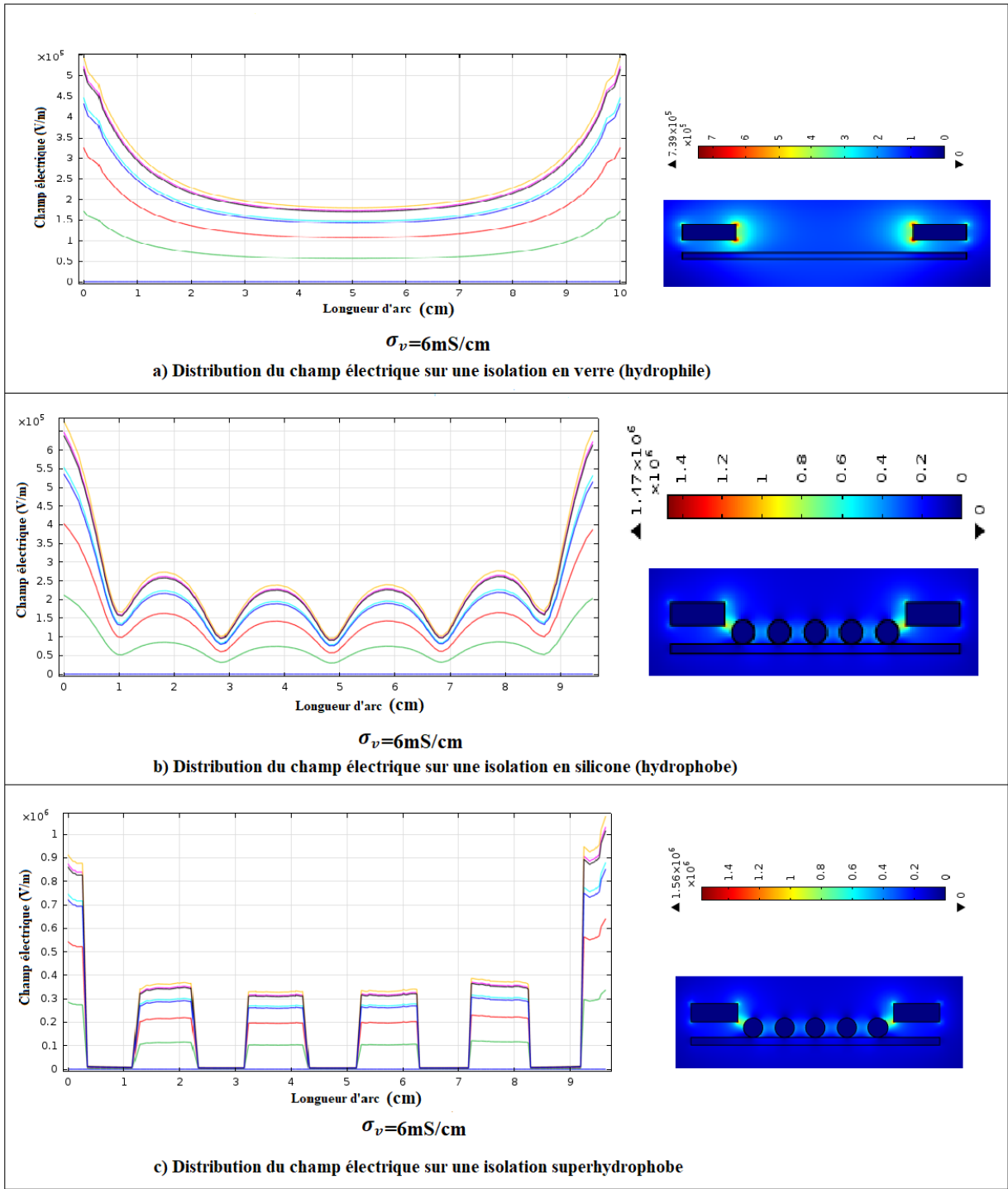


Figure III. 14. Distribution du champ électrique sur des isolations hydrophile, hydrophobe, Superhydrophobe ($\sigma_v = 6 \text{ mS/cm}$, $U_a = 25 \text{ kV}$)

III. 5. Conclusion

Le champ électrique présente un facteur principal qui influence le comportement des gouttes d'eau, dans ce chapitre nous avons analysé la distribution du champ électrique sur la surface des isolations hydrophile avec une couche uniforme de pollution, hydrophobe et superhydrophobe en présence de cinq gouttes d'eau.

Cette analyse nous a amené aux résultats suivant :

- Le champ électrique est très intense au niveau des électrodes de base, cela favorise la formation des zones sèches au voisinage de celles-ci après le passage du courant et facilite la formation des arcs électriques.
- La variation du champ électrique est remarquée beaucoup plus aux extrémités des gouttes d'eau et la surface diélectrique dans le cas des isolations hydrophobe et superhydrophobe.
- La présence des gouttes sur la surface hydrophobe ou superhydrophobe produit un renforcement local du champ électrique, l'intensité de celui-ci n'est pas la même sur les deux pôles de la goutte, l'intensité est plus importante du côté HT que du côté terre.
- La variation de la conductivité électrique n'a pas un effet significatif sur l'intensité du champ électrique au niveau des surfaces, ce résultat n'est pas le même obtenu expérimentalement.
- La présence du couvert isolant, dans le modèle d'une isolation superhydrophobe n'affecte pas le sens et l'ordre d'éjection des gouttes d'eau de la surface isolante.
- La séparation des électrodes de la surface isolante affect la formation des arcs électrique dans le cas des isolations hydrophile et hydrophobe, et facilite l'éjection des gouttes dans le cas des surfaces superhydrophobes.
- Les surfaces superhydrophobes présentent une meilleure fiabilité par rapport aux deux autres surfaces.

Conclusion Générale

Conclusion générale

D'après les résultats d'expériences précédemment menées par des chercheurs du réseau électrique, il a été constaté que la présence de pollution sur les surfaces isolantes peut déterminer la fiabilité du système d'isolation du réseau électrique et le seuil de champ sur les surfaces des isolants affectent négativement le comportement le polluant (couche uniforme ou bien gouttes d'eau) qui présentent certaines réactions. A savoir leurs déformations, distorsions et mouvements, ce qui facilité le contournement de l'isolation.

Le modèle numérique développé dans ce travail nous a permis d'analyser la distribution du champ électrique sur les surfaces hydrophile, hydrophobe et superhydrophobe en présence de différents types de pollution. Une comparaison entre la performance électrique des trois types de matériau a été effectuée.

Les résultats ont révélé des zones sur la surface isolante où les contraintes électriques sont très élevées, notamment au niveau des électrodes, l'intensification du champ électrique due à la présence de gouttelettes d'eau, notamment aux points de contact des trois domaines (gouttelettes d'eau, air et surface superhydrophobe) dont la surface est maximale. Cela fournit des informations utiles pour prédire la direction et l'ordre des gouttelettes d'eau évacuées de la ligne de fuite.

L'effet de variation du nombre de gouttes sur la distribution du champ électrique sur une isolation hydrophobe ou bien superhydrophobe, est un problème complexe qui peut dépendre de nombreux variables. Les fabricants d'isolations électriques doivent donc prendre en compte toutes ces variables pour s'assurer que leur produit offre un niveau d'isolation suffisamment élevé et cohérent.

D'après les résultats obtenus nous constatons que les surfaces superhydrophobes présentent un meilleur comportement par rapport aux deux autres, ce résultat a été déjà confirmé expérimentalement.

Enfin, nous recommandons de simuler la coalescence des gouttelettes d'eau pour mieux comprendre l'effet du champ électrique sur leur dynamique.

Références

Bibliographique

- [1] A. Kara, “Contribution à l’étude d’un modèle dynamique de contournement d’un isolateur pollué”, Mémoire de magister, Université de Sétif, 2013.
- [2] S. M. Béllah, “Prédiction Du Contournement D’une Chaîne D’isolateur Mt 175 Ctv-Sonelgaz Polluée Artificiellement Par La Logique Floue”, Mémoire de Master, Université Mohamed Khider Biskra, 2014.
- [3] S. Tounsi, F. Chikh, “Influence Du Sol Sur Le Comportement D’un Modèle d’Isolateur Sous Tension”, Mémoire d’ingénieur d’Etat, Ecole Nationale Polytechnique, 2008.
- [4] Beriala, Agal, “Détection Des Phénomènes De Conductions Des Isolateurs Polluent De Haute Tension”, Mémoire de Master Professionnel, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2017.
- [5] S. Tounsi, F. Chikh, “Influence du Sol sur le Comportement d’un Modèle d’Isolateur sous Tension”, Mémoire du projet de fin d’études, Ecole nationale polytechnique d’Alger. Juin 2008.
- [6] S, SATTI, “contribution à l’étude de l’influence de la pollution discontinue Sur le comportement des isolateurs : expérimentation et simulation”, Thèse de magister en Génie Electrique, Université Ferhat Abbas- Setif, 2018.
- [7] J.Y. Saison, “Etude du phénomène d’humidification des dépôts naturels et artificiels de pollution sur des isolateurs électriques”, Thèse de Doctorat Sciences, Université de Strasbourg, France, 1992.
- [8] M. A. BOUDJAMAA, R. SEBTI, “Modélisation des phénomènes de pollution des isolateurs de haute tension”, Diplôme de Master en Génie Electrique, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2012.
- [9] F. Bouchelga, “Etude du développement des décharges électriques parallèles sur une surface isolante large et polluée sous tension continue”, Thèse de doctorat, université de Bejaia, Algérie, 2016.
- [10] M. Slama, “contribution à 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 THT a courant alternatif”, mémoire de magister, université Mohamed Boudiaf, Oran, 2002.
- [11] K. Belhouchet, “ Estimation des paramètres de l’arc de contournement des isolateurs pollués en utilisant l’approche génétique”, Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas Setif, 2018.
- [12] A. Kuechler, “Hochspannungstechnik: Grundlagen – Technologie – Anwendungen”, 3^{ème} édition, Springer Dordrecht Heidelberg London New York, avril 2009, Germany.
- [13] E. Azzag, “problèmes de contournement et perforation des isolateurs de haute tension”, thèse doctorat d’état, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2007.

- [14] M. TERKMANI, M. BABOUAMER, " Contournement des Isolateurs des Lignes de Haute Tension ", PFE, USTO, juin 2005.
- [15] A. J. Phillips, J. Kuffel, A. Baker, J. Burnham, A. Carreira, E. Cherney, W. Chisholm, M. Farzaneh, R. Gemignani, A. Gillespie, T. Grisham, R. Hill, T. Saha, B. Vancia, and J. Yu, "Electric Fields on AC Composite Transmission Line Insulators", IEEE Trans. Power Deliv., vol. 23, no. 2, pp. 823–830, Apr. 2008.
- [16] L.ARRABIY, " Visualisation et Traitement de Signal de Courant de Fuite sur une Surface Isolante Polluée ", PFE, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger (E.N.P.), 1999.
- [17] M. Benakouche, R.Timghellette, "Comportement d'un modèle d'isolateur sous tensionimpulsionnelle", PFE, ENP, Alger, Juin 2005.
- [18] M. TEGUAR, A. BOUBAKEUR, "Pollution des Isolateurs de Haute Tension", Laboratoire de Haute Tension, Ecole Nationale Polytechniqued'Alger(E.N.P.), 2009.
- [19] A. Bouleghlem, F. Taleb, "Comportement de l'isolateur capot et tige 1512L artificiellement pollué sous tension alternative 50Hz", PFE, ENP, Alger, Juin 2009.
- [20] <http://www.hydroquebec.com/comprendre/notions-de-base/vocabulaire.html>.
- [21] H. Slamet, "Contribution à l'étude du modèle développé d'un isolateur Pollué ", Mémoire de Magister en électrotechnique, université d'Oran, 2013.
- [22] INSULATORS, Glass insulators, isolateurs en verre.
- [23] N. Khairoun, E. Abderrahmane, D. Zellouta, "Essais sur isolateurs pollues et modélisation", Mémoire du projet de fin d'études laboratoire de haute tension, école nationale polytechnique d'Alger, Juin 2007/2008.
- [24] R. Bouzeroura " Etude du développement d'arcs électriques parallèles sur une surface isolante non uniformément polluée sous tension continue ", Mémoire de magister, Université de Bejaia, 2009.
- [25] C. Neinhuis, W. Barthlott, "Characterization and Distribution of Water-repellent, Self-cleaning Plant Surfaces", Ann. Botan, 79, 667-677, 1997.
- [26] T. Young, "An essay on the cohesion of fluids" ,Philos. Trans. R. Soc. London, vol. 95, pp. 65–87, 1805.
- [27] D. Quéré, " Lois du mouillage et de l'imprégnation, " Tech. Ing, vol. Principe de formulation, no j2140, 2003.
- [28] G. Béranger, H. Mazille, " Approche scientifique des surfaces. Caractérisation et propriétés, " Tech. Ing. vol. Traitement de surface des matériaux : contexte et gestion environnementale, no. M1425, 2005.

- [29] R. N. Wenzel, "Resistance of solid surfaces to wetting by water," *Ind. Eng. Chem.*, vol. 28, no. 8, pp. 988–994, 1936.
- [30] A. B. D. Cassie, S. Baxter, "Wettability of porous surfaces", *Trans. Faraday Soc*, 40, 546-51, 1944.
- [31] E. Guerret, E. Moncada-Potignon, "Super-hydrophobie", Lycée Clément Marot CAHORS, Olympiades de physique, pp .15-16, 2014-2015
- [32] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Hydrophile>.
- [33] S. S. Latthe, C. Terashima, K. Nakata and A. Fujishima "Superhydrophobic Surfaces Developed by Mimicking Hierarchical Surface Morphology of Lotus Leaf", , 19, 4256-4283, doi: 10.3390/molecules19044256, pp. 4256-4283, 2014.
- [34] http://www.mineralogie.fr/Structure_Matiere.html
- [35] IEEE Std 957«IEEE guide for cleaning isolators», 1995
- [36] <http://hydrophobie.moonfruit.fr/superhydrophobie-naturelle/4422516>
- [37] R. Thévenin, " Super hydrophobie Active ", thèse de doctorat, l'école polytechnique polytechnique, Français, 2014.
- [38] B.Asma, K. Roumaissa " étude du comportement électrique d'une isolation superhydrophobe sous l'impact de gouttes d'eau et tension continue positive ", Mémoire de master, Université Abderrahmane MIRA- BEJAIA, 2018.
- [39] K. K. S. Lau, J. Bico, K. B. K. Teo, M. Chhowalla, G. A. J. Amaratunga, W. I. Milne , G. H. McKinley, K. K. Gleason, "Superhydrophobic Carbon Nanotube Forests", *NanoLett*, 3, 1701-1705, 2003.
- [40] Y. Huang, D. K. Sarkar, X. G. Chen, "A one-step process to engineer superhydrophobic copper surfaces", *Mater. Lett*, 64, 2722-2724, 2010.
- [41] L. Chen, Z. Xiao, P. C. H. Chan, Y. K. Lee, "Dual-scaled stable superhydrophobic nano-flower surfaces", *TRANSDUCERS 2009 - 15th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems*, 441-444, 2009.
- [42] H. Jung, D.H. Noh, J.H. Choi, G.R., Kim, W.D., Lim, "Simple nanofabrication of a superhydrophobic and transparent biomimetic surface", *Chinese Science Bulletin*, 54, 3613-3616, 2009.
- [43] <https://www.industrie-techno.com/du-beton-intelligent-qui-dure-plus-d-un-siecle.29538>
- [44] <http://ultraeverdry-tap.com/>.
- [45] STO, | Façades | Revêtements de façade |, Rev.nr. 02/08.2013 Printed in Belgium.
- [46] J.D. Brassard, "revêtements nanostructures superhydrophobes en vue d'application en aérodynamique", mémoire (M. Sc. A.), université du Québec à Chicoutimi, Canada, 2011.

- [47] R. Boudissa, F. Bouchelga, S. Kornhuber, K. D. Haim, “Constellation of Condensation and Raindrops and Its Effect on the DC Flashover Voltage of Inclined Silicone Insulation”, *Energies* MPDI, 12, 3549, doi: 10.3390/en12183549, 2019.
- [48] K. Hamour, F. Bouchelga, R. Boudissaa, S. Kornhuber, K.D. Haim, “Optimization of the superhydrophobic insulation longevity by expulsion of any wet deposit with a weak alternating electrical field”, *journal of electrostatics* 105, 103451, doi.org/10.1016/j.elstat.2020.10345, 2020.
- [49] S. Wei, H. Jin, H. Zhou, K. Yang, N. Gao, and W. Li , “Dynamic behavior of water droplets on wetted superhydrophobic surfaces under a high AC electric field”, *AIP Advances* 9, 065307, doi.org/10.1063/1.5098303. 2019.

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

Ministère de L'enseignement Supérieur et de La recherche Scientifique

Université de Ghardaïa
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département automatique et électromécanique



جامعة غرداية
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم الآلية والكهروميكانيك

إذن بالطباعة (مذكرة ماستر)

بعد الاطلاع على التصحيحات المطلوبة على محتوى المذكرة المنجزة من طرف الطلبة التالية أسماؤهم:

1. الطالب (ة): بن قورمان حمنة
2. الطالب (ة): بن رمضان رجنوان
3. الطالب (ة):

تخصص: ميكانيك صناعية

نمنح نحن الأستاذ (ة):

الاسم واللقب	الرتبة - الجامعة الأصلية	الصفة	الامضاء
هنري صولاني	أ.م.ب. - جامعة غرداية	مصحح (1)	
هواري حامد	أ.م.ب. جامعة غرداية	مصحح (2)	
خوشة قلام	أ.م.أ. جامعة غرداية	مؤطر	

الإذن بطباعة النسخة النهائية لمذكرة ماستر الموسومة بعنوان

Analyse par simulation de l'effet du champ électrique
sur la performance des isolations contaminées

امضاء رئيس القسم
مساعد رئيس الآلية والكهروميكانيك
مكلف بالتدريس والتعليم في التدرج
العالي عبد الطيف

