



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université A.MIRA-BEJAIA
Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique

Réalisé par :

M^{elle} Lynda MADI

M^{elle} Sihem LAZLA

Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme master en électrotechnique
Option : Réseaux électriques

Thème

**Simulation d'un système à champ électrique
alternatif non-uniforme protégé par une
barrière hydrophobe**

Promotrice: Dr. T. BELHOUL

CO-Promotrice: Dr. F. BOUCHELGA

Promotion: 2020/2021

Remerciements

Ce travail est le fruit d'un labeur que nous avons arrosé d'un mélange de patience, d'ambition, d'assiduité, de sincérité et de nombreuses nuits blanches. Il n'aurait pas été achevé sans l'aide de Dieu le Tout-Puissant que je remercie de m'avoir donné la santé, la force, le courage et qui m'a entouré de nombreuses personnes dont je dois remercier de m'avoir aidé à réaliser ce modeste travail.

*Tout d'abord je tiens à remercier monsieur **Rabah BOUDISSA** qui nous a récemment quitté Et qui a toujours été une source de force avec son énergie positive et d'inspiration avec son parcours plein de réussite. Merci monsieur pour tout le soutien que vous nous avez apporté, merci pour chaque seconde vous avez passé avec nous et pour chaque mot d'encouragement. Repose en paix professeur, que dieu vous accueille dans son vaste paradis.*

*Un grand merci pour ma promotrice madame **Talit BELHOUL** pour son encadrement sans faille, son soutien moral, sa rigueur au travail ses multiples conseils, ses orientations, sa disponibilité, ses compétences et sa clairvoyance m'ont été d'une aide inestimable*

*Mes remerciements s'adressent aussi à Madame **Fatma BOUCHELGA** pour ses contrôles, ses orientations et son soutien inconditionnel.*

*Je souhaite remercier Monsieur **Adel BEKAKRIA** qui a contribué à l'accomplissement de ce travail et pour tous l'aide qu'il nous a apporté.*

Mes remerciements les plus chaleureux vont aux membres de jury qui me font le grand honneur d'évaluer ce travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Celui qui a toujours sacrifié pour me voir réussir mon cher père et celle qui m'a mise au monde ma chère mère, pour leur amour estimable leur sacrifice leur confiance leur soutien et tous les valeurs qu'ils ont su m'inculquer, je leur dois un grand merci et je leur éprouve un sentiment de gratitude et d'amour

À mes chères sœurs et mon cher petit frère pour leur tendresse, leur complicité et leur présence.

A mon Grand-père, mes tantes et mes oncles de la famille Madi ainsi que la famille Heraz, pour leurs mots d'encouragement et leur gentillesse.

À la mémoire de mes grands-mères et mon grand-père, que Dieu le Tout-Puissant les accueille dans son vaste paradis.

À tout mais aimable amis et connaissances plus particulièrement ryma, naima, Lynda, Meriem, aicha, sabiha, sara, et khaled.

À ma binôme qui a été courageuse et assidue pendant l'élaboration de ce travail.

Et à tous ceux qui sont chers, de près ou de loin.

Lynda

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Ma très chère maman et cher papa pour tous les sacrifices qu'ils ont fait pour m'offrir le climat idéal de travail et qui m'ont apporté leur soutien depuis toujours, leurs encouragements et leurs conseils dans les soucis de ma réussite

À mes chères sœurs et cher frère pour leur tendresse, leur complicité et leur présence.

À mes nièces et neveux.

À mes chers copines Souhila et Lynda.

À ma binôme qui a été courageuse et assidue pendant l'élaboration de ce travail.

À toute la famille LAZLA , GHERNAIA et HAMOUMOU.

A tous ceux qui m'aiment et que j'aime.

Sihem

Table de matière

INTRODUCTION GENERALE	1
-----------------------------	---

Chapitre I : Généralité sur la silicone et les travaux antérieure sur les barrières tubulaires

I.1 Introduction.....	3
I. 2 Silicone.....	3
I. 2. 1 Structure chimique de la Silicone	4
I. 2. 2 Grandes familles de silicones	5
I. 2. 3 Propriétés de la silicone	5
I. 2. 3. 1 Energie de surface et angle de contact des gouttes d'eau	5
I.2. 3. 2 Hydrophobicité.....	7
I. 2. 3. 2. 1 Perte et récupération de l'hydrophobicité sur les surfaces polymères	8
I. 2. 3. 3 Tenue aux UV	9
I. 2. 3. 4 Tenue au feu	10
I. 2. 3. 5 Elasticité.....	10
I. 2. 4 Propriétés diélectrique de la silicone	10
I. 2. 5 Applications de la silicone.....	10
I. 2. 5. 1 Isolation surfacique.....	10
I. 2. 5. 2 Isolation volumique	11
I. 3 Travaux antérieur au tant que barrière	12
I. 3. 1. T Mizuno 2003	12
I. 3. 2 P. N. Mavroidis 2012	14
I. 3. 3 E. Foruzan 2015	18
I. 3. 4 T. Belhoul 2021	19
I. 4. Conclusion	22

Chapitre II : Pollution des isolations intérieures et extérieures

II. 1 Introduction	23
II. 2 Définitions et significations	23
II. 2.1 Pollution atmosphérique.....	23
II. 2. 2 Salinité	23
II. 2. 3 Couche de pollution	24

II. 2. 4 Degré de pollution	24
II. 3 Différents types de polluants	24
II. 3. 1 Polluants naturels	24
II. 3. 2 Polluants dus aux activités humaines	24
II. 4 Classification et origine de la pollution	26
II. 4. 1 Pollution naturelle	26
II. 4. 1. 1 Pollution marine	26
II. 4. 1. 2 Pollution désertique.....	26
II. 4. 1. 3 Pollution du sol et zones agricoles	27
II. 4. 2 Pollution industrielle.....	27
II. 4. 3 Pollution mixte.....	27
II. 5 Mesure de la sévérité de pollution d'un site.....	27
II. 5. 1 Conductance superficielle	28
II. 5. 2 Mesure de la pollution de l'air	28
II. 5. 3 Densité du dépôt non soluble (DDNS).....	28
II. 5. 4 Densité du dépôt de sel équivalent (DDSE).....	29
II. 6 Mode de distribution de la pollution	30
II. 6. 1 Isolations extérieures	30
II. 6. 1. 1 Répartition non uniforme longitudinale non périodique.....	30
II. 6. 1. 2 Répartition non uniforme par secteurs	30
II. 6. 1. 3 Répartition non uniforme longitudinale périodique	30
II. 6. 2 Barrières isolantes.....	31
II. 7 Classifications du niveau de pollution d'un site	32
II. 7. 1 Site extérieur	32
II. 7. 2 Site intérieur	33
II. 8 Influence des facteurs climatiques sur les isolations polluées	34
II. 8. 1 Vent	34
II. 8. 2 Température	34
II. 8. 3 Humidité	35
II. 8. 4 Pluie	35
II. 9 Conséquences de la pollution	35
II. 9. 1 Vieillissement des isolations polymères	35
II. 9. 1. 1 Processus de vieillissement des surfaces composites.....	36

II. 9. 1. 2 Processus du contournement d'une surface isolante polluée.....	36
II. 10 Méthodes d'essais sous pollution.....	39
II. 10. 1 Essai sous pollution naturelle.....	39
II. 10. 2 Essais sous pollution artificielle.....	39
II. 10. 2. 1 Méthode des couches solides.....	39
II. 10. 2. 2 Méthode de brouillard salin	40
II. 10. 2. 3 Méthode de brouillard tenu.....	40
II. 11 Techniques de lutte contre la pollution.....	40
II. 11. 1 Allongement de la ligne de fuite	40
II. 11. 2 Graissage périodique	40
II. 11. 3 Revêtement silicone.....	41
II. 11. 4 Isolation composite.....	41
II. 11. 5 Nettoyage de l'isolation	41
II.12 Conclusion.....	41

Chapitre III : Distribution du champ dans un système pointe - plan

III.1 Introduction.....	42
III. 2 Modèles expérimentaux et techniques de mesure	42
III. 2. 1 Modelés expérimentaux.....	42
III. 2. 2 Pollution d'une surface isolante	44
III. 2. 3 Circuit de mesure.....	46
III. 2. 4 Correction des résultats de tension en fonction des conditions atmosphériques.....	46
III. 3 Logiciel de simulation	47
III. 3. 1 Présentation du modèle mathématique	47
III. 3. 2 Résolution par la méthode d'éléments finis.....	48
III. 3. 3 Présentation et propriété de model géométrique utilisé	49
III. 4 Résultats et discussion	50
III. 4. 1 Barriere plane	50
III. 4. 1. 1. Système pointe – plan	50
III. 4. 1 .2. Système pointe – barrière plane – plan.....	54
III. 4. 2. Barrière tubulaire	57
III. 4. 2. 1. Système pointe nue - plan	57

TABLE DE MATIERE

III. 4. 2. 2. Barrière tubulaire propre et sèche	58
III. 4. 2. 3. Barriere tubulaire polluée	61
III. 4. 3. Comparaison de la performance des barrières planes et tubulaires	65
III. 5. Conclusion	67
CONCLUSION GENERALE	69

Liste des figures

Chapitre I : Généralité sur la silicone et les travaux antérieure sur les barrières tubulaires

Fig. I. 1: Structure chimique de la silicone	4
Fig. I. 2: Angle de contact d'une goutte d'eau sur une surface solide	6
Fig. I. 3: Comportement d'une goutte d'eau sur une surface isolante.....	6
Fig. I. 4: Hydrophobicité d'une surface en silicone	7
Fig. I. 5: Classe d'hydrophobicité suivant le guide STRI.....	9
Fig. I. 6: Différent types d'isolateurs	11
Fig. I. 7: Isolateur avec revêtement en silicone	11
Fig. I. 8: Prototype de l'isolation d'une connexion moyenne tension	12
Fig. I. 9: Configuration de l'électrode.....	13
Fig. I. 10: PDV et BDV en fonction la longueur de la couche isolante dans l'espace d'air...	13
Fig. I. 11: Photos de la décharge partielle pour L = 300 mm	14
Fig. I. 12: Tension impulsionnelle positive en fonction de la distance interélectrode.....	14
Fig. I. 13: Schéma du système, les valeurs numériques sont données en mm	15
Fig. I. 14: 50% de la tension de claquage en fonction de la distance interélectrode.....	15
Fig. I. 15: Schéma du système d'électrodes	16
Fig. I. 16: Photographies de la décharge, longueur d'espace inter - électrodes est de 0.125 m, PTFE	16
Fig. I. 17: Trajectoires de la décharge dans l'intervalle d'air pointe – plan	17
Fig. I. 18: Distribution du champ électrique de préclaquage d'une configuration d'électrode en forme de U recouverte d'une barrière en PVC.....	18
Fig. I. 19: Distribution du champ électrique durant le claquage dans le cas d'insertion d'une barrière plate en PTFE entre les deux électrodes	19
Fig. I. 20: Schéma et photo du dispositif avec barrières isolantes en forme de tubes	19
Fig. I. 21: Trajet de la décharge électrique disruptive des systèmes pointe - pointe et pointe - plan sous atmosphère propre et sèche	20
Fig. I. 22: $\hat{U}_{AC} = f(d, l_t)$ pour les différents systèmes sous atmosphère propre	21
Fig. I. 23: Trajet de la décharge électrique disruptive des systèmes pointe - pointe et pointe - plan sous atmosphère polluée.....	21

Fig. I. 24: $\hat{U}_{AC} = f(d, l_t)$ pour les différents systèmes sous atmosphère 22

Chapitre II : Pollution des isolations intérieures et extérieures

Fig. II. 1: Schéma et procédé de mesure de la DDNS 29

Fig. II. 2: Variantes d'uniformité et de non uniformité de distribution de pollution sur la barrière isolante 31

Fig. II. 3: Différentes étapes du processus de contournement d'une surface isolante polluée 38

Chapitre III : Distribution du champ dans un système pointe - plan

Fig. III. 1: Configurations pointe – plan sans et avec barrières plane et tubulaire 42

Fig. III. 2: Photos des éléments du circuit électrique de l'unité de commande et de la cellule de mesure 43

Fig. III. 3: Barrière plane en silicone, tubulaire en silicone et photo du dispositif 44

Fig. III. 4: Dessiccateur avec silicagel et conductimètre électronique 45

Fig. III. 5: Moyens de pollution de la barrière plane hydrophile ou tubulaire hydrophobe 45

Fig. III. 6: Schéma de mesure et de visualisation. (U_{AC} : Appareil de Commande manuelle ou automatique du transformateur, Tr: Transformateur BT/HT, Cam: Caméscope numérique, PC: Ecran de PC, Oe: Objet d'essai) 46

Fig. III. 7: Différents types de barrière et modèle de simulation 50

Fig. III. 8: Représentation du champ électrique et chemin de la décharge dans le cas de la configuration pointe – plan grand ($L_p = 40$ cm, $L_b = 10$ cm) 52

Fig. III. 9: Représentation du champ électrique et chemin de la décharge dans le cas de la configuration pointe – plan petit ($L_p = 10$ cm, $L_b = 10$ cm) 53

Fig. III. 10: Représentation du champ électrique et chemin de la décharge dans le cas de la configuration pointe – barrière plane – plan grand ($L_p = 40$ cm, $L_b = 10$ cm) 55

Fig. III. 11: Représentation du champ électrique et chemin de la décharge dans le cas de la configuration pointe – barrière plane – plan petit ($L_p = 10$ cm, $L_b = 10$ cm) 56

Fig. III. 12: Distribution des lignes du champ électrique de la configuration pointe – barrière plane – plan grand ($L_p = 40$ cm, $L_b = 20$ cm) 57

Fig. III. 13: Distribution des lignes équipotentielles et de champ électrique d'un système pointe – plan 58

Fig. III. 14: Tension disruptive de l'espace d'air du système avec ou sans barrière tubulaire en fonction de la distance interélectrode dans une atmosphère propre et sèche ($L_t = 10$ cm) 58

Fig. III. 15: Chemin de contournement d'un système point – barrière tubulaire en silicone – plan sous atmosphère propre et sèche.....	59
Fig. III. 16: Représentation du champ électrique et chemin de la décharge dans le cas de la configuration pointe – barrière tubulaire en silicone – plan sous atmosphère propre (d = 14 cm et $L_t = 10$ cm).....	61
Fig. III. 17: Représentation du champ électrique et chemin de la décharge dans le cas de la configuration pointe – barrière tubulaire en silicone – plan sous atmosphère propre (d = 04 cm $L_t = 10$ cm).....	61
Fig. III. 18: Tension disruptive de l'espace d'air du système avec ou sans barrière en fonction de la nature de son revêtement et la distance interélectrode sous atmosphère fortement polluée ($\sigma_v = 25$ mS/cm).....	62
Fig. III. 19: Propagation des lignes du champ sur le modèle géométrique de la barrière en silicone recouverte de gouttes d'eau et son chemin de contournement.....	63
Fig. III. 20: Représentation du champ électrique et chemin de la décharge dans le cas de la configuration pointe – barrière tubulaire en silicone – plan sous atmosphère polluée (d = 14 cm $L_t = 10$ cm).....	64
Fig. III. 21: Représentation du champ électrique et chemin de la décharge dans le cas de la configuration pointe – barrière tubulaire en silicone – plan sous atmosphère pollué (d = 14 cm $L_t = 10$ cm).....	64
Fig. III. 22: Comparaison de la performance électrique d'un système pointe - plan avec barrières tubulaires et planes en verre et en silicone sous atmosphère polluée	66
Fig. III. 23: Chemin de contournement de la barrière en verre plane et tubulaire dans des conditions de pollution sévères	66

Liste des tableaux

Tab. I. 1: Critères de classification de l'hydrophobicité des surfaces	9
Tab. II. 1: Dimensions des particules de pollution	25
Tab. II. 2: Constitution chimique de la poussière émise par une centrale électrique en Pologne	27
Tab. II. 3: Classification de la pollution selon le type d'environnement	32
Tab. II. 4: Niveaux de pollution pour l'isolation intérieure.....	34
Tab. III. 1: Propriétés physiques des matériaux utilisés dans le logiciel COMSOL.....	50

Liste des abréviations

AC : Tension alternative.

BDV : Tension de claquage impulsionnelle.

C : Carbone.

CaCl₂ : Chlorure de calcium.

CaCO₃ : Carbonate de calcium.

Cam: Caméscope numérique.

CaO: Oxyde de calcium.

CaSO₄: Sulfate de calcium.

CEI 815 : Norme Commission Electrotechnique Internationale, vocabulaire électrotechnique sur la supraconductivité IEC 60050-815.

CH₄ : Méthane.

CO₂ : Dioxyde de carbone.

DC : Tension continue.

DDNS : Densité de dépôt non soluble en mg/cm².

DDSE : Densité de dépôt de sel équivalent.

EPDM: Ethylène Propylène diène Monomère.

Fe₂O₃ : Oxyde de fer.

HC : Classes d'hydrophobicité.

HT : Haute tension.

IEC 62271-304 : Norme pour appareillage à haute tension – Partie 304 : classes de construction pour l'appareillage d'intérieur sous enveloppe pour tensions assignées à partir de 1 kV pour usage sous conditions climatiques sévères.

KNO₃: Nitrate de potassium.

K₂O: Oxyde de potassium.

LI : Tension impulsionnelle de foudre.

MgO: Oxyde de magnésium.

MT : Moyenne tension.

N : Le total des temps du test valide.

NaCl : Chlorure de sodium.

Na₂SO₄: Sulfate de sodium.

Na₂O: Oxyde de sodium.

NSDD : Densité de dépôt de matière non-soluble.

NO₂ : Dioxyde d'azote.

N₂O : Protoxyde d'azote.

O : Oxygène.

O₃ : Ozone.

Pc: Ecran Ordinateur.

PDMS : Poly-Di-Méthyl-Siloxane.

PDV : Tension d'amorçage des décharges partielles.

PET : Polyethylene-terephthalate.

PTFE: Polytetrafluoroéthylène.

PVC : Clorure polyvinylique.

RSD : L'écart type relatif du résultat du test.

SI: Tension de choc de manœuvre

STRI : Swedish Transmission Research Institute ; "Guide de classification d'hydrophobicité".

SO₂ : Dioxyde de soufre.

Si : Silicium.

SIR : Silicone rubber (SiR).

SO₃: Trioxyde de soufre.

Liste des symboles

- I : Courant.
- V : Tension d'alimentation de l'isolateur.
- H_r : Humidité.
- H_0 : Humidité aux conditions normales.
- γ_{ls} : Tension interfaciale solide liquide.
- γ_{sv} : Tension interfaciale solide vapeur.
- γ_{lv} : Tension interfaciale liquide-vapeur.
- θ_0 : Température aux conditions normales (°C).
- θ : Angle de contact.
- m : Masse de la particule.
- g : Accélération de la gravité.
- η : Frottement interne de l'air.
- d : Diamètre des particules.
- E : Champ électrique.
- v : Vitesse du vent.
- ϵ_r : Permittivité relative.
- f : Facteur de forme.
- E_q : Force électrostatique.
- l_f : Ligne de fuite entre les deux électrodes.
- dx : Élément de chemin de contournement.
- $d(x)$: Diamètre de l'isolateur en fonction de x .
- m_f : Masse du papier filtre contenant la pollution après séchage en mg.
- m_i : Masse initiale du papier filtre en mg.
- A : Surface lavée de la barrière en cm^2 .
- G : Conductance.
- σ_s : Conductivité superficielle (μS).
- σ_v : Conductivité volumique ($\mu\text{S}/\text{cm}$).
- E : Champ électrique.
- a : Distance entre l'électrode sous tension et la barrière carré (cm).
- d : Distance interélectrode (cm).
- D_r : Diamètre des électrodes.

- L_r : Longueur des électrodes.
 e_b : Épaisseur de la barrière isolante carrée (mm).
 e_t : Épaisseur de la barrière isolante tubulaire (mm).
 L_b : Longueur de la barrière isolante carrée (mm).
 l_b : Largeur de la barrière isolante carrée (mm).
 L_t : Longueur de la barrière isolante tubulaire (mm).
 ϵ_r : Permittivité relative.
 a/d : Position relative de la barrière dans l'intervalle d'air (%).
 \hat{U}_{AC} : Tension disruptive (kV).
 θ : Température en °C.
 P : Pression en kPa.
 ϵ : La permittivité du matériau diélectrique.
 ϵ_0 : La permittivité du vide.
 σ_F : Conductivité fortement pollués
 σ_f : Conductivité faiblement pollués
 D_p : Diamètre de la tige.
 e_p : Épaisseur de la barrière.
 D_p : Diamètre du plan.
 e_p : Épaisseur du plan.
 D_t : Diamètre extérieur de la barrière tubulaire.
 Tr : transformateur.
 U_{AC} : Appareil de commande.
 C_1/C_2 : Diviseur capacitif.
 V_{cr} : Voltmètre de crête.
 R_a : Résistance de protection.
 O_e : Objet d'essai.
 U_{ACSi} : une tension de contournement de la barrière en silicone.
 U_{em} : Moyenne de la tension disruptive mesurée (kV).
 U_{iem} : Tension appliquée obtenue à partir du test dans le temps de i (kV).
 U_e : Tension disruptive dans l'intervalle d'air dans des conditions normales (θ_0 , P_0 et Hr_0).
 K_d : Facteur de correction.
 K_H : Facteur de correction relatif à l'humidité.
 ∇ : Nabla.

- J : Densité de courant.
- D : Courant de déplacement.
- P : Densité de charge.
- U_{cb} : Tension de contournement.
- U_{tp} : Tension de claquage.
- U_{rp} : Tension d'amorçage.
- U_s : Tension disruptive du système (kV).
- ϵ_{rsi} : Permittivité relative de silicone.

Introduction
Générale

Introduction générale

L'électricité est indissociable des activités quotidiennes des êtres humains car elle rend leur pratique plus facile et plus spontanée. Cependant, quelle que soit sa qualité, l'électricité doit prendre les précautions d'usage pour éviter les dangers liés aux arcs, qui peuvent causer des dommages aux personnes et aux biens, notamment en cas de fortes ou moyennes tensions sur des conducteurs de faible rayon de courbure. D'où l'un des moyens de prévenir son danger est d'installer un système d'isolation. Le monde a connu des progrès significatifs dans la technologie diélectrique dans les équipements haute tension. La fonction d'isolation est cruciale car elle est l'une des conditions de base pour le fonctionnement normal des équipements de production, de transport et de distribution d'énergie électrique. A cet effet, plus le potentiel est élevé, plus le niveau d'isolement requis est élevé.

Cependant, les bases de la compréhension de la technique de haute tension reposent sur la connaissance du comportement de ces diélectriques, soumis à des contraintes électriques élevées dans le but d'assurer un fonctionnement durable et satisfaisant. Le rôle de ces isolations est d'assurer un isolement électrique entre les parties HT elles-mêmes ou bien entre celles-ci et les parties mises à la terre, ces dernières sont nommées barrières.

Plusieurs investigations ont été faites dans l'objectif de prouver l'apport technique des barrières isolantes sur les systèmes d'isolation qui ont commencé en 1920 [1]. Ces recherches ont été dirigées par plusieurs chercheurs, qui les ont diversifiées par les géométries des barrières utilisées, les matériaux choisis, ainsi que la configuration des électrodes formant les systèmes étudiés étant donné que c'est cette configuration des électrodes qui particularise la nature de champ qui règne dans l'espace interélectrode. Certains d'entre eux ont simulé des cas d'une atmosphère polluée et humidifiée afin d'étudier l'influence de la pollution sur la barrière isolante ainsi que les mesures à entreprendre dans telles conditions pour éviter les problèmes de contournement électriques.

Comme type de matériau de la barrière insérée dans le système pointe-plan, il est utilisé très souvent le polychlorure de vinyle, le papier dur ou la bakélite [2]. Cependant, lorsque ces barrières hydrophiles sont installées dans des sites fermés à l'intérieur desquels règne une très forte pollution, leur surface peut être recouverte par des dépôts polluants qui provoquent la dissolution des sels et la formation de couches électrolytiques conductrices de courant électrique sur les surfaces de ces barrières quasi-uniformément contaminées, cela influe sur sa performance électrique ou elle agit comme un système sans barrières, ce qui rend leur présence

inutile ou même défavorable [3, 4]. Donc le remplacement de ces matériaux hydrophiles par d'autres à degré de mouillabilité très faible, s'avère très indispensable. Pour cette raison, certains chercheurs ont orienté leurs investigations vers des matériaux isolants des barrières à caractère hydrophobe sous conditions de pollution sévères [5, 6].

En effet, la performance électrique de la barrière en silicone hydrophobe a fait déjà l'objet de quelques investigations sous tension alternative et continue [5, 6], tandis qu'elle est le sujet de notre étude aussi. L'hydrophobicité de la surface en particulier, est l'un des facteurs importants qui contribue à la performance supérieure des polymères de silicone pour résister au mouillage en raison de leur faible énergie libre de surface. Malgré qu'elle offre un meilleur pouvoir d'isolement vis-à-vis de son homologue hydrophile, son emploi en tant que barrière de protection des intervalles d'air à champ électrique non uniforme n'a pas encore vu le jour [7]. La complexité de ce phénomène nous impose à chercher une meilleure solution afin de construire des équipements plus fiables.

La présente étude est focalisée sur la simulation de distribution de champ électrique et le développement de la décharge électrique dans le chemin de disruption d'un intervalle d'air à champ électrique non uniforme avec barrière isolante en silicone à géométrie variable sous atmosphère quelconque.

Le premier chapitre définira la silicone avec sa structure chimique ainsi ses classifications, ses propriétés diélectrique, ses application puis des différents travaux antérieur au tant que barrière.

Le deuxième chapitre est dédié à la pollution intérieure et extérieure. Nous présentons les différentes sources et classes de pollution, les conséquences et les techniques de lutte contre ce fléau.

Le troisième et le dernier chapitre est consacré à la présentation et l'interprétation des résultats obtenus des différents essais menés dans le laboratoire et la simulation sous COMSOL. L'objectif visé à travers ce présent chapitre consiste en la prédiction du chemin de disruption de l'intervalle d'air à champ électrique non uniforme au moyen de la distribution du champ et du potentiel électrique alternatif résultant au niveau de cet espace à l'aide du logiciel COMSOL multiphysics version 5.4.

Enfin, nous concluons par un bref rappel des principaux résultats obtenus et nous évoquons d'éventuelles perspectives pouvant être envisagées dans le sillage du présent travail.

Chapitre I :
Généralité sur la silicone et le
travaux antérieure sur
les barrières tubulaires

I. 1 Introduction

Le développement des systèmes de haute tension a donné une grande impulsion à la recherche sur les barrières électriques dans les intervalles d'air. Le domaine d'emploi de celles-ci est très large et concerne divers équipements électriques en AC et DC. Parmi leurs premières utilisations nous distinguons particulièrement, les disjoncteurs à gaz, les interrupteurs en haute tension, les bornes de traversées, les transformateurs, les armoires de distribution basse tension et les postes électriques en moyenne tension [2, 8].

En effet, la performance électrique de la barrière en silicone hydrophobe a fait déjà l'objet de quelques investigations sous tension alternative et continue [5, 6]. Malgré qu'elle offre un meilleur pouvoir d'isolement vis-à-vis de son homologue hydrophile, son emploi en tant que barrière de protection des intervalles d'air à champ électrique non uniforme n'a pas encore vu le jour [7]. Par contre, ce type de matériau a été utilisé dans l'industrie électrique en tant qu'isolateur, enveloppe ou revêtement pour les parafoudres et aussi comme gaine pour les câbles électriques [9].

L'objectif de ce chapitre est consacré à l'étude des notions de base concernant la structure, la composition chimique, les différents domaines d'usage, types de la silicone et ses divers propriétés, avec les différents travaux en tant que barrière tubulaire étudiée par plusieurs chercheurs.

I. 2 Silicone

La silicone est une substance synthétique à base de silicium et d'oxygène formant une classe particulière de plastique. Les silicones, ou polysiloxanes, sont des polymères inorganiques formés d'une chaîne silicium oxygène (...-Si-O-Si-O-Si-O- ...) sur laquelle des groupes se fixent sur les atomes de silicium. Certains groupes organiques peuvent être utilisés pour relier entre elles plusieurs de ces chaînes Si-O. Le type le plus courant est le polydiméthylsiloxane linéaire ou PDMS. Le silicium étant présent en proportion suffisante pour affecter les propriétés du produit de façon sensible [10].

Les silicones sont des excellents isolants pour les applications haute et moyenne tension en raison de leur structure moléculaire. Par exemple, les isolateurs en silicone recouverts d'une couche de pollution ont une résistance aux courants de cheminement plus élevée que les modèles en porcelaine, en verre ou en EPDM [10].

Les décharges électriques sont évitées même dans des conditions de pollution extrêmes.

Mais leurs avantages ne se limitent pas aux isolateurs.

Aujourd'hui, on utilise les silicones isolants dans toutes les applications MT et HT exigeant une haute sécurité de fonctionnement et une grande longévité, par ex. dans les transformateurs, sous forme d'huile, ou dans les extrémités de câbles haute tension [11].

I. 2. 1 Structure chimique de la Silicone

La structure des silicones, ou chimiquement parlant, des polyorganosiloxanes, est analogue à la structure organique du quartz modifié. Leur motif de base se compose d'une alternance d'atomes de silicium et d'oxygène (Fig. I. 1). La haute énergie de liaison du chaîne de base silicium oxygène (Si-O-Si-O) confère aux silicones une haute stabilité minérale, nettement supérieure à celle des polymères à motif carbone (C-C), comme par exemple l'EPDM. À titre de comparaison, l'énergie des liaisons (C-C) est de 348 kJ/mol et celle d'une liaison (Si-O) de 444 kJ/mol. La lumière solaire de courtes longueurs d'ondes (300 nm), a une énergie de $6,2 \times 10^{-22}$ kJ (= 398 kJ/mol), peut entraîner la rupture des liaisons (C-C) tandis que la liaison (Si-O) reste stable.

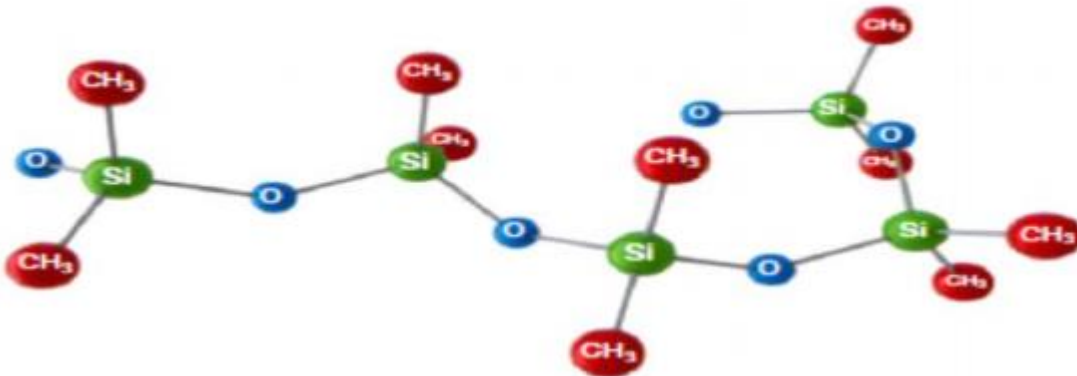


Fig. I. 1: Structure chimique de la silicone [11]

Les élastomères silicones sont principalement constitués de chaînes PDMS linéaires avec des bloqueurs réactifs aux extrémités des chaînes. Les chaînes s'associent entre elles ou à des réticulant ajoutés pour former des réseaux élastométriques. Des charges minérales, telle que la silice, sont aussi incorporées dans le but de conférer au matériau de bonnes propriétés mécaniques telles que l'élasticité, l'amortissement, la résistance au déchirement. Les propriétés générales des élastomères silicones, comme celles des PDMS, présentent des avantages par rapport aux élastomères organiques traditionnels [11], par exemple une décroissance plus faible de leurs propriétés mécaniques avec la température. Un domaine de température d'utilisation plus large (- 50 à + 220°C) et une faible température de transition vitreuse (150 Kelvin ou - 123°C). Dans ce domaine de température d'utilisation, compte tenu de l'absence de changement

d'état, les silicones manifestent une évolution très faible de leurs principales propriétés physiques (mécanique, diélectriques, capacité thermique...). Une bonne stabilité au vieillissement thermique qui résulte de leur inertie chimique.

I. 2. 2 Grandes familles de silicones [11]

Généralement l'ensemble de ces produits peuvent être classées en trois grandes familles :

- Les fluides;
- Les résines;
- Les élastomères.

Les fluides sont des systèmes linéaires de PDMS, dans lesquels, le nombre d'atomes de silicium dans la chaîne peut être supérieur à 1 000. Par rapport aux huiles minérales, ils ont une viscosité constante dans une large plage de températures. Les fluides se caractérisent par une structure hélicoïdale et un pouvoir d'étalement élevé, accompagnées de la possibilité de développer des propriétés spéciales, telles que l'hydrophobie. De même, les groupements méthyle étant apolaires et non associables, les chaînes glissent les unes sur les autres pour s'étaler en couches extrêmement minces. Leur inertie peut être modifiée en introduisant des groupes réactifs.

Les résines sont des chaînes siloxanes s'étendant des produits intermédiaires aux résines de poids moléculaire élevé et de structure forte variable. Mais toutes les résines ont un point commun : leur haut degré de réticulation. Les produits intermédiaires ouvrent de multiples possibilités de combinaison avec des résines organiques pour former des copolymères. La réticulation se déroule à températures élevées pendant une période de temps considérable, pendant laquelle la résine passe à travers la phase thermoplastique.

Les élastomères sont des produits qui présentent de bonnes propriétés élastiques par une faible vulcanisation des divers composants de la formulation.

I. 2. 3 Propriétés de la silicone

I. 2. 3. 1 Energie de surface et angle de contact des gouttes d'eau

Une faible énergie de surface, ou une tension de surface, est une autre caractéristique clef des polysiloxanes [12]. Une indication de l'énergie libre de la surface peut être obtenue en mesurant l'angle de contact d'une goutte d'eau sur la surface d'un matériau solide comme le montre la figure I. 2 [13]. La mesure de cet angle permet de déduire le caractère hydrophobe (grand angle, faible énergie de surface) ou hydrophile (petit angle, grande énergie de surface) de la surface [14]. Les phénomènes de mouillage se produisent à des endroits où les trois états de "solide", "liquide" et "gazeux" sont en contact. La relation entre les différentes tensions

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LA SILICONE ET TRAVAUX ANTERIEURS SUR LES BARRIERES TUBULAIRES

superficielles et l'angle de contact a été donnée par Young en 1805 [15] en tant qu'équation I. 1 :

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{sv} - \gamma_{ls}}{\gamma_{lv}} \quad (\text{I. 1})$$

La tension interfaciale solide liquide : γ_{ls} ;

La tension interfaciale solide vapeur : γ_{sv} ;

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

Angle de contact : θ .

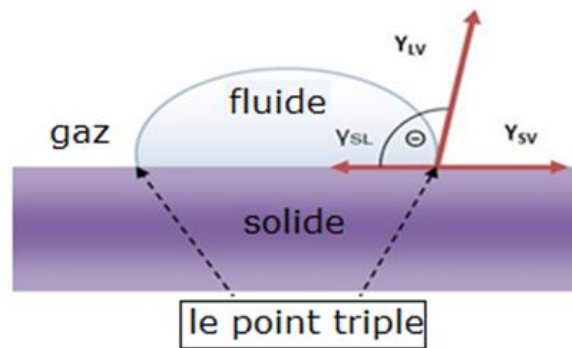


Fig. I. 2 : Angle de contact d'une goutte d'eau sur une surface solide [16]

Il est important de mentionner que l'équation de Young n'est valable que pour des surfaces idéales et lisses [17]. Un angle de contact inférieur à 90° indique que le fluide se répandra sur une grande surface sur la surface ($\theta \leq 90^\circ$ la surface est hydrophile), alors que les angles de contact supérieurs à 90° signifient généralement que le fluide minimisera son contact avec la surface et formera une goutte liquide compacte ($\theta > 90^\circ$ la surface est hydrophobe) Fig. I. 3 [16].

Aujourd'hui, avec l'utilisation de caméras CCD numériques et de logiciels (Dataphysics), la mesure de l'angle de contact d'une goutte d'eau sur toute surface solide a été automatisée et l'équipement de laboratoire est maintenant disponible dans le commerce [13].

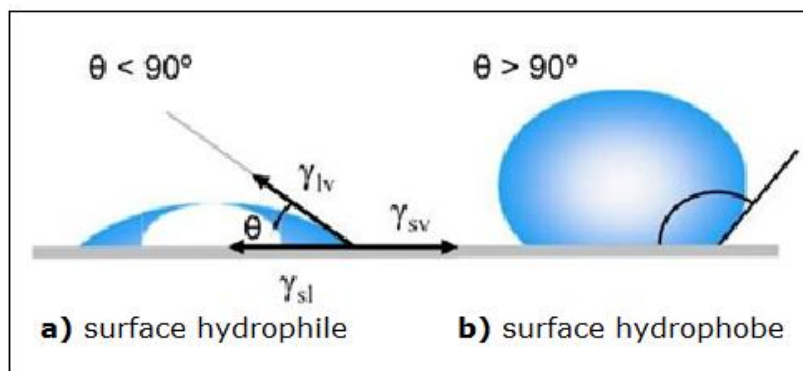


Fig. I. 3 : Comportement d'une goutte d'eau sur une surface isolante [16]

I. 2. 3. 2 Hydrophobicité

Une surface hydrophobe est importante pour les isolations hautes tensions. Sur la base de la définition dans IEC62073 [17], les mots l'hydrophobie et l'hydrophile sont appelés respectivement à un niveau faible et à un niveau élevé de mouillabilité. En d'autres termes, aucun film d'eau n'est formé sur une surface hydrophobe (Fig. I. 4), tandis qu'une surface hydrophile est mouillée par l'eau sous forme de film. Une surface hydrophobe a une faible tension superficielle, tandis qu'une surface hydrophile a une tension superficielle élevée. La mouillabilité d'une surface isolante peut être mesurée par trois méthodes [17] :

- a) La méthode de l'angle de contact ;
- b) La méthode de tension de surface ;
- c) La méthode de pulvérisation.

Les méthodes a et b sont habituellement appliquées dans les laboratoires, tandis que la méthode c convient également aux mesures de laboratoire et aux mesures sur place sur les isolants [18].

L'hydrophobicité des matériaux polymères peuvent affecter leur performance, spécialement pendant les conditions de l'humidité et de pollution [18].

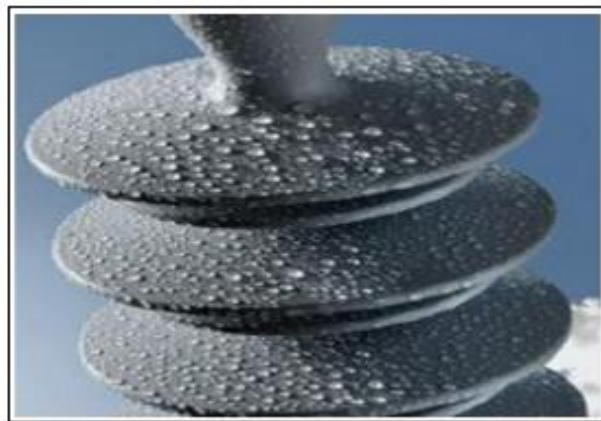


Fig. I. 4 : Hydrophobicité d'une surface en silicone

L'hydrophobicité est influencée par plusieurs facteurs qui n'ont pas été considérés dans l'équation de Young [15] comme la rugosité de la surface, la force de gravité, des inhomogénéités chimiques, la pénétration d'humidité et d'autres. Pendant le service, la surface polymère tend à se détériorer, affectant négativement l'hydrophobie du matériau. Plusieurs tests expérimentaux en laboratoire ont montré que les surfaces isolantes en Silicone et en EPDM perdent leur hydrophobicité initiale et deviennent hydrophiles quand elles sont soumises aux arcs au niveau des bandes sèches [18]. La perte d'hydrophobie influe sur les propriétés électriques de la surface mouillée, de sorte que la tension de claquage et les charges de PD et

les courants de fuite plus élevés [18]. Mais les surfaces polymères ont une propriété de récupération automatique, qui est présentée dans la section suivante. Plusieurs travaux de recherche ont porté sur la perte et le recouvrement de l'hydrophobicité [18] La perte et le recouvrement de l'hydrophobicité causée par l'exposition en silicone aux décharges partielles (corona ou plasma) a été étudié par de nombreux chercheurs.

I. 2. 3. 2. 1 Perte et récupération de l'hydrophobicité sur les surfaces polymères

a) Perte de l'hydrophobicité [18]

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

b) Récupération d'hydrophobicité [18]

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

c) Classification de l'hydrophobicité

Suite à une proposition de STRI [18], l'hydrophobicité (ou la mouillabilité) est classée en six classes, nommées HC1 à HC 6. Cette classification a ensuite été introduite dans [17]. Chaque classe est caractérisée par les paramètres donnés dans le tableau 2.3 et une photo de l'apparence de la figure I. 5. L'évaluation de l'état de la surface du matériau isolant est effectuée sur la surface sans stress de champ électrique.

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LA SILICONE ET TRAVAUX ANTERIEURS SUR LES BARRIERES TUBULAIRES

Tab. I. 1 : Critères de classification de l'hydrophobicité des surfaces [18]

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

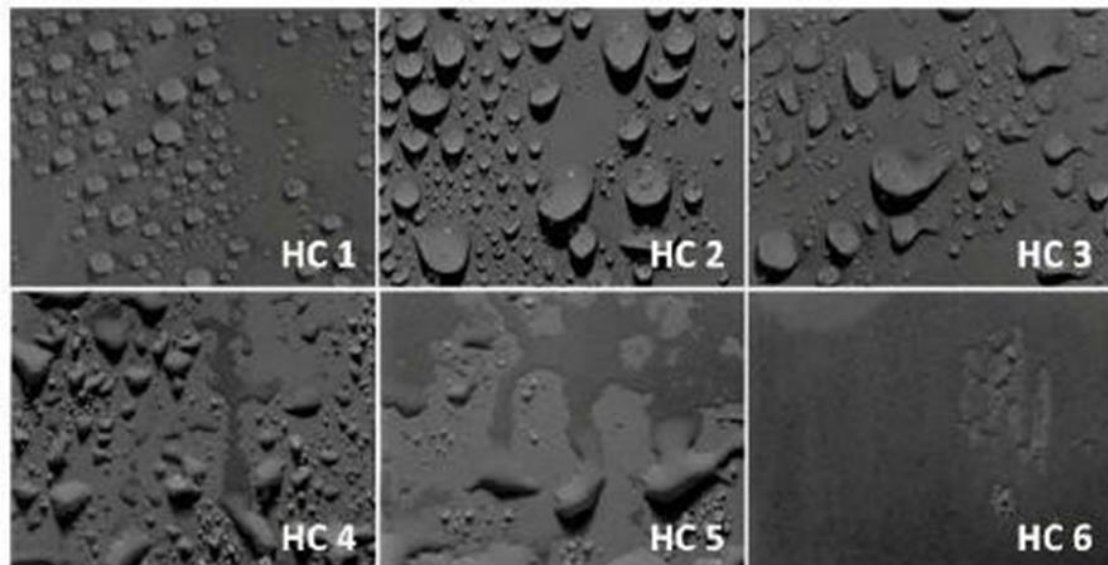


Fig. I. 5 : Classe d'hydrophobicité suivant le guide STRI [18]

I. 2. 3. 3 Tenue aux UV

La stabilité de la chaîne Si-O confère aux silicones une haute résistance au spectre ultraviolet de la lumière solaire. Par comparaison aux autres matériaux, même les climats agressifs des régions côtières ou désertiques n'entachent pratiquement pas leurs propriétés ; l'élastomère silicone POWERSILR 310 ne présente par exemple qu'une légère altération de ses propriétés mécaniques après un test accéléré d'exposition aux intempéries de 3000 heures [19].

I. 2. 3. 4 Tenue au feu

Le point d'inflammation des silicones se situe au-delà de 340°, d'où leur haute sécurité de fonctionnement. Et en cas d'inflammation, ils ne dégagent pas de gaz toxiques. C'est pourquoi on les utilise principalement dans les applications exigeant une haute protection anti-incendie, comme, par exemple, dans le métro ou dans les tours d'immeubles [19].

I. 2. 3. 5 Elasticité

La très haute élasticité des isolants en silicones facilite le montage et permet l'utilisation de nouvelles techniques de montage, comme, par exemple, la rétraction à froid pour les accessoires de câbles. Par ailleurs, les silicones conservent leur élasticité jusqu'à -45 °C et conviennent, de ce fait, aux applications en haute altitude ou dans les régions polaires [19].

I. 2. 4 Autres propriétés de la silicone [20]

Les silicones se distinguent par quelques propriétés fondamentales :

- Liaison Si-O 'forte' et grande inertie chimique ;
- Bonne stabilité thermique (de - 80 à + 250 °C) ;
- Bonne stabilité chimique et tenue au vieillissement naturel ;
- Propriétés modulables d'anti adhérence ou d'adhésion ;
- Bonne tenue au feu sans dégagement de fumées toxiques ;
- Isolation électrique ;
- Bonne tenue aux UV par rapport aux autres polymères ;
- Flexibilité à froid de la chaîne polymérique ;
- Faible dépendance des propriétés mécaniques (viscosité, ...);
- Rigidité diélectrique 15 kV/mm ;
- Permittivité relative à 25 °C et de 5,4 ;
- Facture de dissipation diélectrique à 25 °C et 10 kHz ; $\text{tg } \delta$ de 4 à $5 \cdot 10^{-3}$;
- Conductivité thermique : 0,41 à 0,62 W/m.K;
- Température d'auto-inflammation est supérieure à 300 °C ;
- Masse volumique de 2300 à 2800 kg/m³.

I. 2. 5 Applications de la silicone

I. 2. 5. 1 Isolation surfacique

Grâce à une excellente hydrophobicité à la surface, et retour d'hydrophobicité à la suite de décharges couronnes qui occasionnent un comportement hydrophile, du fait de leur faible poids

et de leur flexibilité, les élastomères silicones sont largement utilisés dans l'isolation extérieure depuis une dizaine d'années [21].

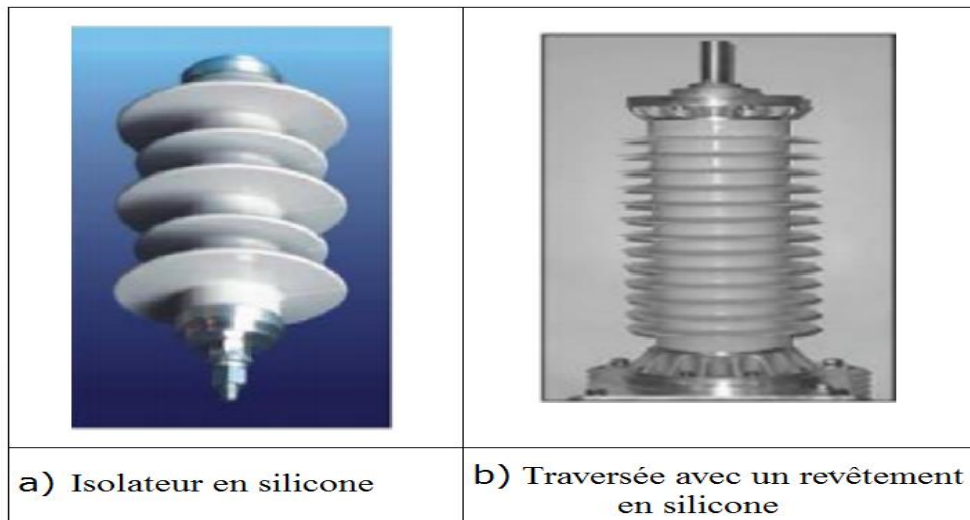


Fig. I. 6 : Différent types d'isolateurs [21]

Nous présentons quelques exemples d'utilisation de l'élastomère silicone pour l'isolation électrique haute tension. On les trouve dans des isolateurs et des traversées (Fig. I. 6), mais également dans des disjoncteurs et des transformateurs de mesure.

On les trouve dans des isolateurs et des traversées (Fig. I. 6) mais également dans des disjoncteurs et des transformateurs de mesure (Fig. I. 7)

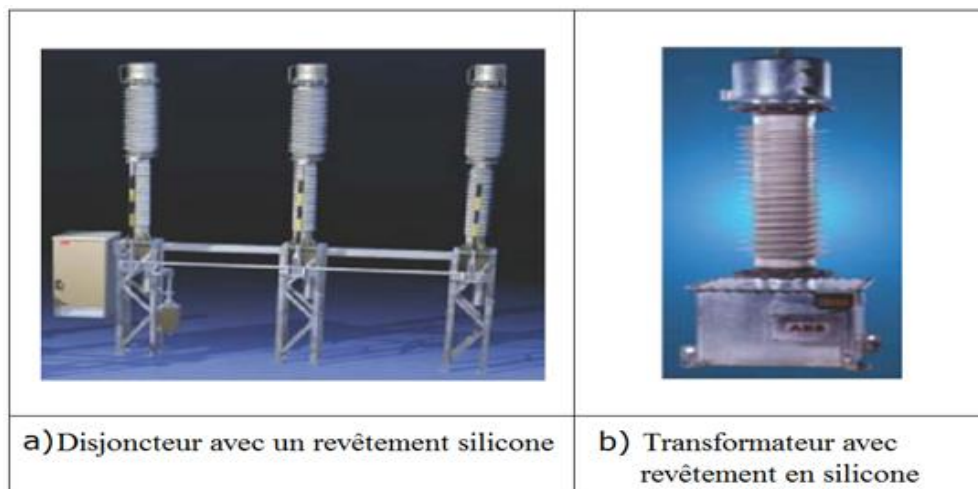


Fig. I. 7 : Isolateur avec revêtement en silicone [21]

I. 2. 5. 2 Isolation volumique [21]

Ces dernières années, on a pu constater que les élastomères silicones étaient de plus en plus utilisés dans l'isolation volumique moyenne et haute tension comme par exemple dans les câbles ou les terminaisons des câbles et les barres d'alternateurs qui doivent résister aux températures élevées.

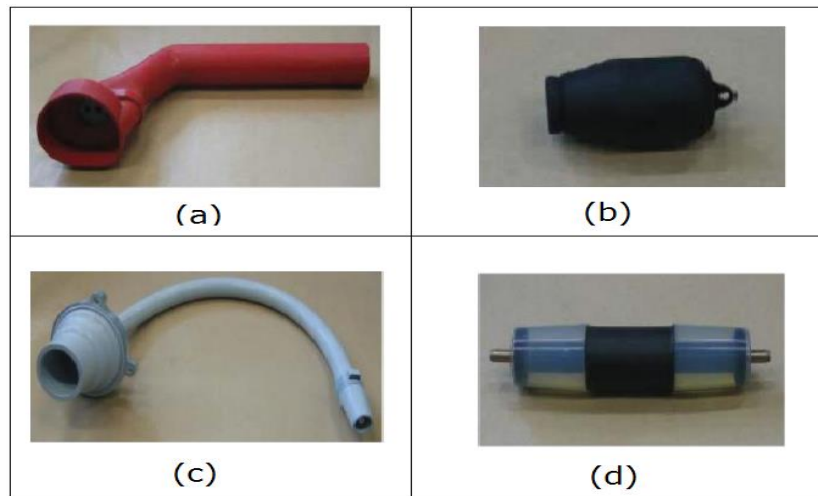


Fig. I. 8 : Prototype de l'isolation d'une connexion moyenne tension (a: Prototype d'isolation moyenne tension d'un jeu de barres, b: Bouchon d'isolation volumique moyenne tension, c: Prototype de l'isolation d'une connexion moyenne tension souple en bout de câble, d: Prototype de l'isolation d'une connexion moyenne tension souple) [21]

Cependant, les contraintes mécaniques limitent souvent la tension à 6 kV pour les générateurs et les câbles moyenne tension.

Les figures I. 8 (a, b, c, d) présentent quelques prototypes et produits d'élastomères silicones utilisés dans l'isolation volumique moyenne tension. Ils sont utilisés comme isolants dans des jeux de barres à moyenne tension (Fig. I. 8 a et b) ou des connexions souples (Fig. I. 8 c et d).

I. 3 Travaux antérieurs au tant que barrière

I. 3. 1 T. Mizuno 2003

L'étude de T. **Mizuno** [22], est basé sur la longueur et l'épaisseur d'une isolation, d'un système d'électrodes constitué d'une coupôle recouverte du matériau isolant mise sous tension de choc de foudre et d'un plan mis à la terre puis il a constaté que la performance électrique d'un système d'isolation va être améliorée par une composition (gaz / polymère), la polarité de la tension appliquée influe sur le processus de la décharge électrique.

Pour une épaisseur de la couche isolante $e_b = 10$ mm, la tension de claquage croît linéairement en fonction de la longueur de la couverture déposée sur la tige à cause de l'allongement du chemin de décharge électrique.

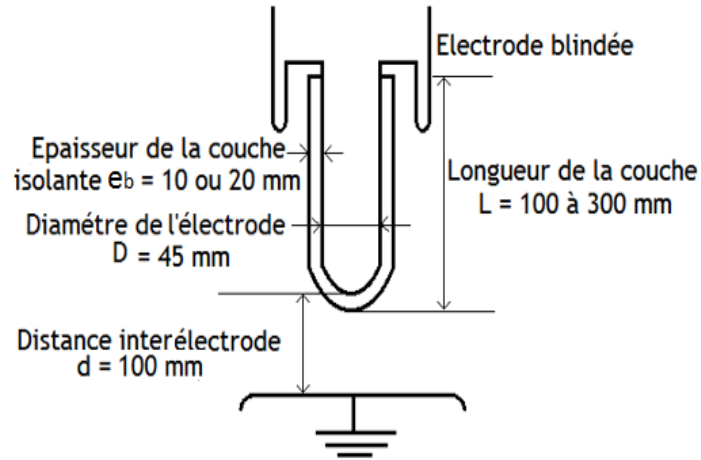


Fig. I. 9 : Configuration de l'électrode [22]

Il a étudié ainsi la tension d'amorçage des décharges partielles (PDV) et la tension de claquage impulsionnelle (BDV). Il a constaté que les deux grandeurs sont pratiquement constantes (Fig. I. 10b) [22].

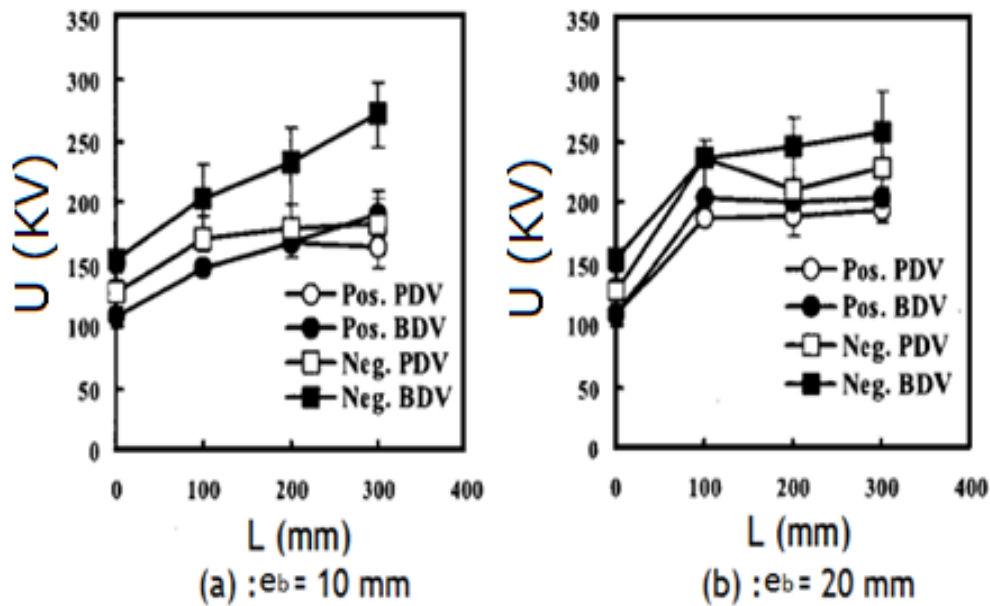


Fig. I. 10 : PDV et BDV en fonction la longueur de la couche isolante dans l'espace d'air ($D = 45$ mm, $d = 100$ mm, $P = 0.1$ MPa) [22]

La décharge d'une électrode nue aura lieu entre la pointe de la tige et l'électrode plane, et la décharge partielle d'une électrode couverte aura lieu à l'extrémité de la tige pointue vers le plan.

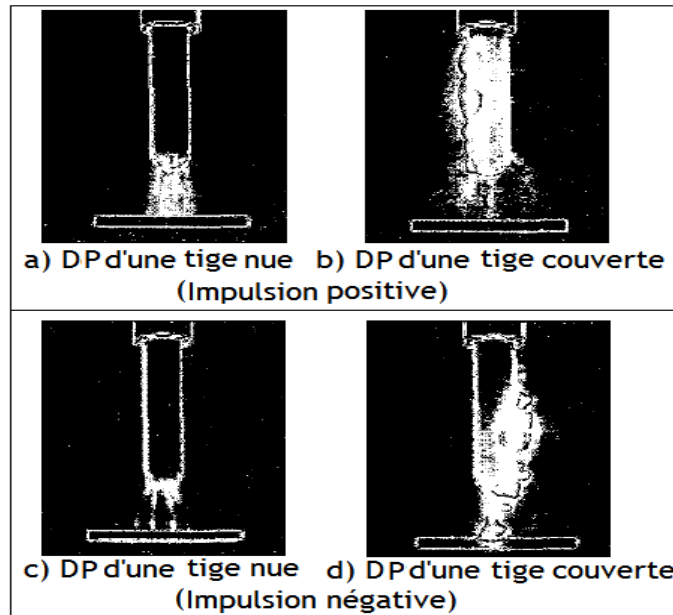


Fig. I. 11 : Photos de la décharge partielle pour L = 300 mm [22]

La tension du système obtenue avec une électrode nue est moins élevée que celui avec électrode couverte (Fig. I. 12).

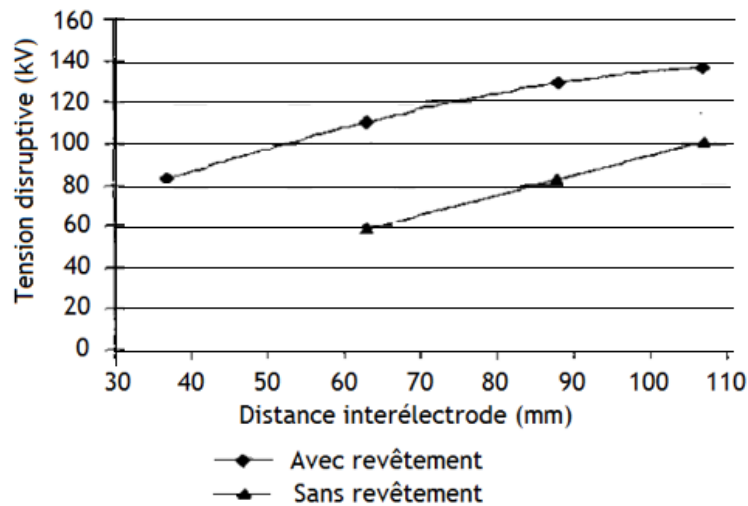


Fig. I. 12 : Tension impulsionnelle positive en fonction de la distance interélectrode [22]

I. 3. 2 P. N. Mavroidis 2012

L'étude de **P. N. Mavroidis** [23] est basé sur le phénomène et le mécanisme du claquage dans les petits intervalles d'air pointe - plan avec une couverture diélectrique de la pointe mise sous tension de choc de foudre et tension de manœuvre impulsionnelle positive (Fig. I. 13).

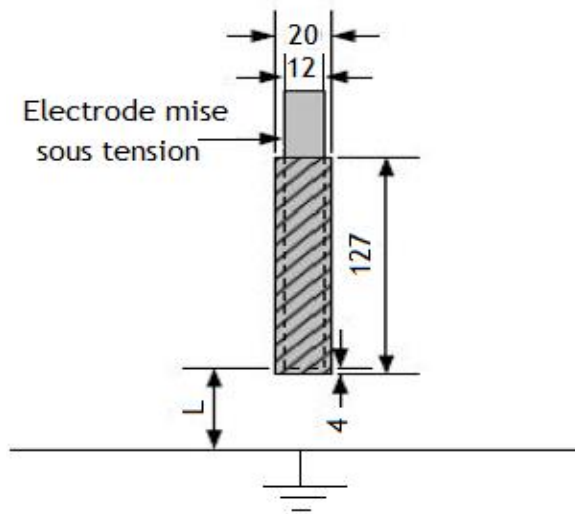


Fig. I. 13 : Schéma du système, les valeurs numériques sont données en mm [23]

La distance inter-électrode a été considérée comme paramètre d'influence sur la tension de claquage. Le système d'électrodes sans barrières est utilisé comme cas de référence. Une augmentation de la performance électrique est due à l'introduction de la couverture isolante en PTFE (Fig. I. 14) surtout dans le cas de la tension impulsionnelle de foudre.

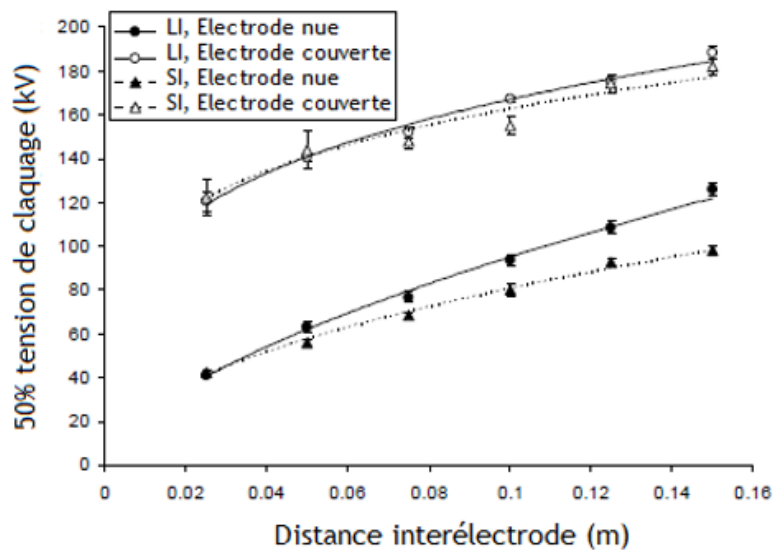


Fig. I. 14 : 50% de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrode [23]

Lors de l'étude de **P. N. Mavroidis** [23], il a utilisé une sonde de Meek et de Collins [24], positionnée au centre du plan mis à la terre (Fig. I. 15), et un oscilloscope digital de 400 MHz permet la surveillance de l'intensité du champ électrique au niveau du plan mis à la terre.

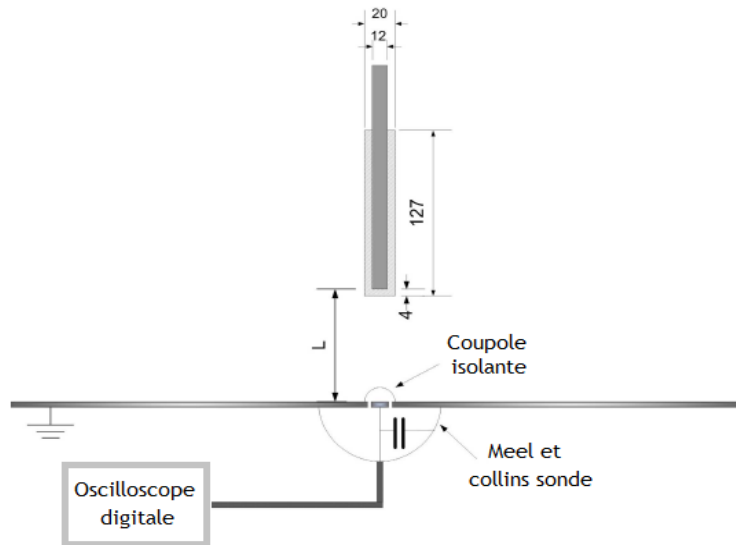


Fig. I. 15 : Schéma du système d'électrodes [23]

L'effet de la couverture isolante sur la rigidité diélectrique peut être expliqué par l'influence de la variation temporelle du champ électrique qui est due à l'accumulation de charges sur la surface de la barrière et aux décharges surfaciques et dans l'intervalle d'air. D'avantage, ce travail a montré que pour faire une étude sur le claquage d'un système en présence des couvertures diélectriques [23], il est nécessaire d'utiliser une technique de mesure de charges de surface.

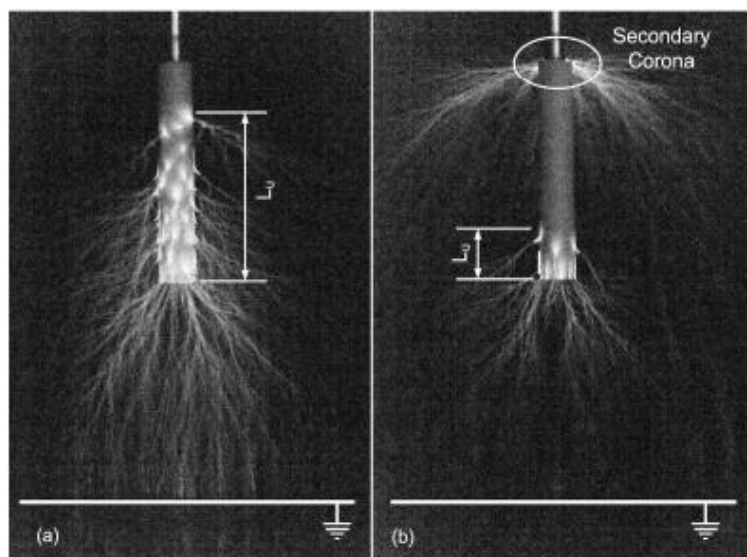


Fig. I. 16 : Photographies de la décharge, longueur d'espace inter - électrodes est de 0.125 m, PTFE, (a) 160 kV pour LI, (b) 173 kV pour SI. Lu : longueur extérieure du développement de la décharge [23]

La variation temporelle du champ électrique due à l'accumulation de charges sur la surface de la barrière et aux décharges surfaciques et dans l'intervalle d'air, ainsi elle influe sur l'effet de la couverture isolante sur la rigidité diélectrique. Ce travail a montré qu'il est nécessaire

d'utiliser une technique de mesure de charges de surface pour pouvoir faire une étude sur le claquage d'un système en présence des couvertures diélectriques.

Lorsque la tige est couverte, sa tension est plus élevée que celle obtenue avec une tige nue. Cela est expressément liée aux décharges couronnes, la décharge couronne initiale est au voisinage de l'extrémité de la couverture isolante, d'autres décharges couronnes émergeant se développant principalement dans l'air, et la décharge couronne secondaire au voisinage de l'extrémité supérieure de la couverture. Les répartitions couronne et les probabilités de claquage sous tension de choc de foudre positive sont dérivées pour des intervalles d'air pointe - plan avec une couverture diélectrique de l'électrode pointe, tout en variant sa longueur [23]. La première et la deuxième décharge couronne ainsi que la tension de claquage sont significativement plus élevée par rapport à celles qui se rapportent au simple intervalle pointe - plan, qui a été considéré comme une référence.

La première décharge couronne de streamers n'est pas un critère suffisant pour la disruption du système. La deuxième décharge couronne et la tension de claquage de l'intervalle d'air pointe - plan avec la couche diélectrique recouverte est significativement plus élevée que celle obtenue dans le cas d'un système pointe - plan en fonction de la distance interélectrode, à cause de l'effet de la longueur de la couverture diélectrique. Cela a été discuté sur la base du modèle de la progression de la décharge jusqu'au claquage (Fig. I.17).

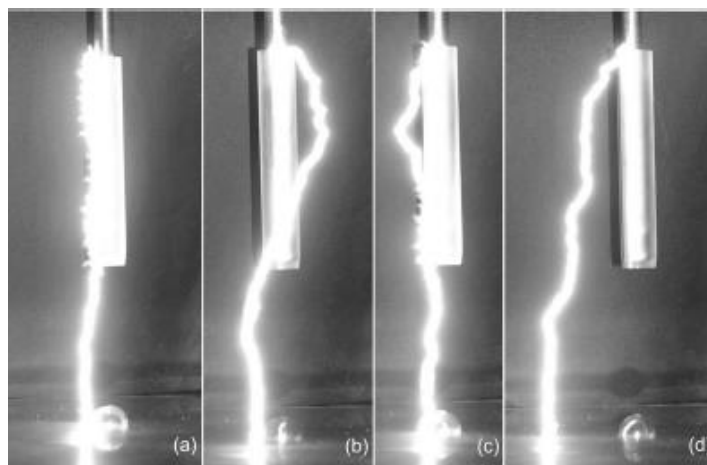


Fig. I. 17 : Trajectoires de la décharge dans l'intervalle d'air pointe - plan. (a: contournement avec tension de choc de foudre, b, c et d: contournements avec tension de choc de manœuvre) [23]

Pour une isolation en PTEF, une décharge couronne secondaire à l'extrémité supérieure de la couverture a été observé. Le claquage se fait sans perforation de la barrière isolante. Elle se produit par une étincelle développant le long de la surface de la couverture (Fig. I. 16a) ou en partie (Fig. I. 17b et I. 17c) ou seulement en air libre (Fig. I. 17d), elle se développe dans l'air et elle fait une jonction avec le plan mis à la terre.

I. 3. 3 E. Foruzan 2015

L'étude de **E. Foruzan** [25] est basé sur l'impact des barrières diélectriques en polytétrafluoroéthylène (PTFE) et chlorure polyvinylique (PVC) sur la tension de claquage sous tensions AC et DC avec le développement de deux modèles géométriques. Dans le premier modèle, il a supposé que l'électrode sous tension a été recouverte du matériau diélectrique PVC. Dans le deuxième modèle, il a inséré une barrière diélectrique en PTFE dans l'espace d'air entre l'électrode sous tension en forme U recouverte du PTFE et le plan mis à la terre. L'auteur [25] a montré qu'un écran diélectrique en PTFE ou en PVC se comporte comme un obstacle mécanique, et il allonge le chemin de la décharge électrique.

La simulation représentée en figure I.18, montre la distribution du champ électrique de la tension de pré-claquage. Les streamers sortent du point A (Fig. I. 18), puis ils se propagent le long de la surface de la barrière traversant une ligne L vers l'électrode mise à la terre.

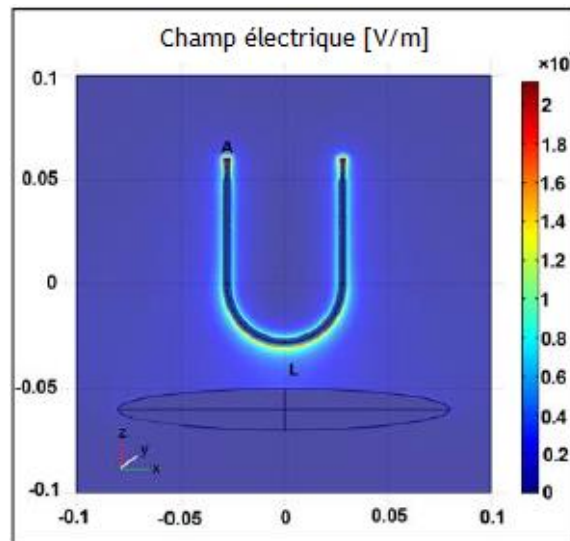


Fig. I. 18 : Distribution du champ électrique de pré-claquage d'une configuration d'électrode en forme de U recouverte d'une barrière en PVC [25]

Lorsqu'une barrière diélectrique rectangulaire plate en PTFE est insérée dans un espace d'air entre les deux électrodes, le chemin critique des streamers vient du point plus bas de l'électrode HT (Fig. I. 19) et se propage directement au centre de la barrière, puis aux bords de la barrière. La figure I. 19 montre que le champ électrique est plus intense au point A.

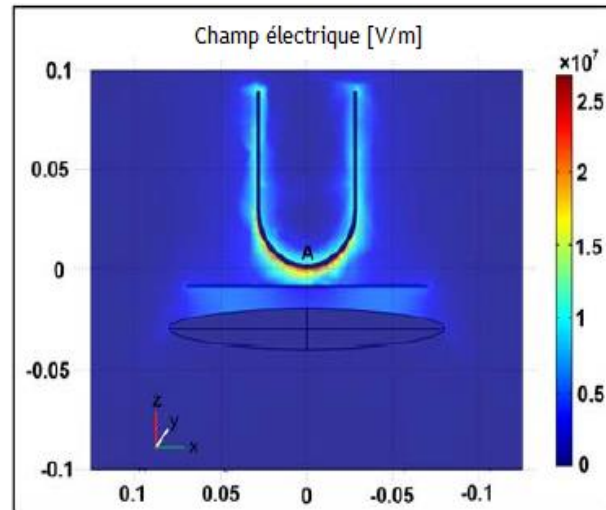


Fig. I. 19 : Distribution du champ électrique durant le claquage dans le cas d'insertion d'une barrière plate en PTFE entre les deux électrodes [25]

I. 3. 4 T. Belhoul 2021

T. Belhoul [26] a étudié la comparaison de la performance électrique d'une barrière tubulaire en silicone et en verre protégeant un intervalle d'air à champ électrique alternatif. Notre investigation est portée sur les systèmes d'électrodes pointe - pointe en figure (I. 20 a et b) et pointe - plan en figure (I. 20 c et d) à distance inter-électrode variable. Un dispositif expérimental, constitué d'un support en bois sous forme de U, a été confectionné.

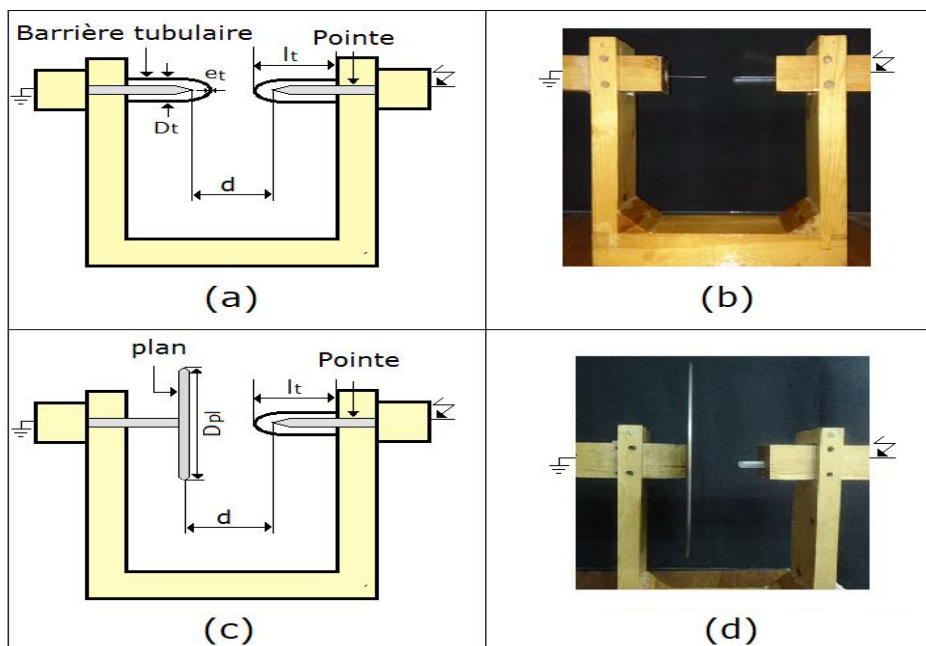


Fig. I. 20 : Schéma et photo du dispositif avec barrières isolantes en forme de tubes. (a: Support de deux points enveloppées par des barrières tubulaires, b: Photo du dispositif avec un tube en verre, c: Configuration pointe-barrière tubulaire-plan, d: Photo du dispositif pointe-plan avec un tube en verre) [26]

Les essais de disruption de l'espace d'air des deux systèmes avec barrières tubulaires ont été appuyés par une visualisation du chemin de leur rupture électrique.

Un modèle de disruption d'un intervalle d'air à champ électrique non uniforme a été développé dans cette étude. Moyennant les résultats expérimentaux de rupture diélectrique des systèmes considérés, ce modèle caractérise la tension de contournement en fonction de la nature de l'isolation de la barrière. De plus, il permet une comparaison aisée de son pouvoir d'isolement électrique dans ces conditions.

Dans le cas propre, T. Belhoul a réalisé des essais sur les différents systèmes montrés sur la figure I. 21.

[26] a constaté que sous une atmosphère propre, le pouvoir d'isolement électrique est plus performant pour la barrière en silicone hydrophobe que celle en verre hydrophile dans les deux systèmes figure I. 22. Ceci est dû à la possession d'une tension de contournement très élevée grâce à ses propriétés diélectriques plus avantageuses sans oublier sa légèreté par rapport au verre.

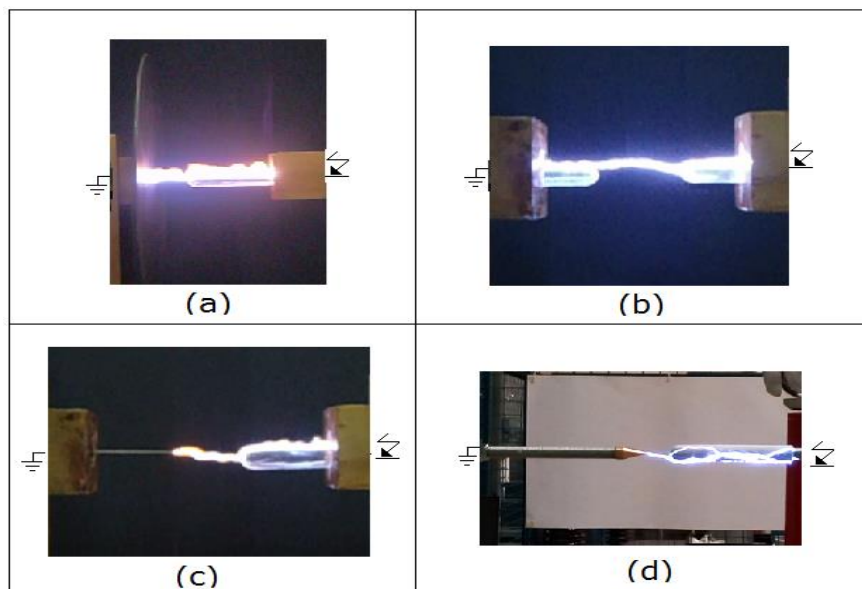


Fig I. 21 : Trajet de la décharge électrique disruptive des systèmes pointe - pointe et pointe - plan sous atmosphère propre et sèche (a: système pointe – barrière tubulaire en verre - plan, b: système pointe – deux barrière tubulaire en verre – pointe, c: système pointe – barrière tubulaire en verre – pointe, d: système pointe – barrière tubulaire en silicone – pointe) [26]

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LA SILICONE ET TRAVAUX ANTERIEURS SUR LES BARRIERES TUBULAIRES

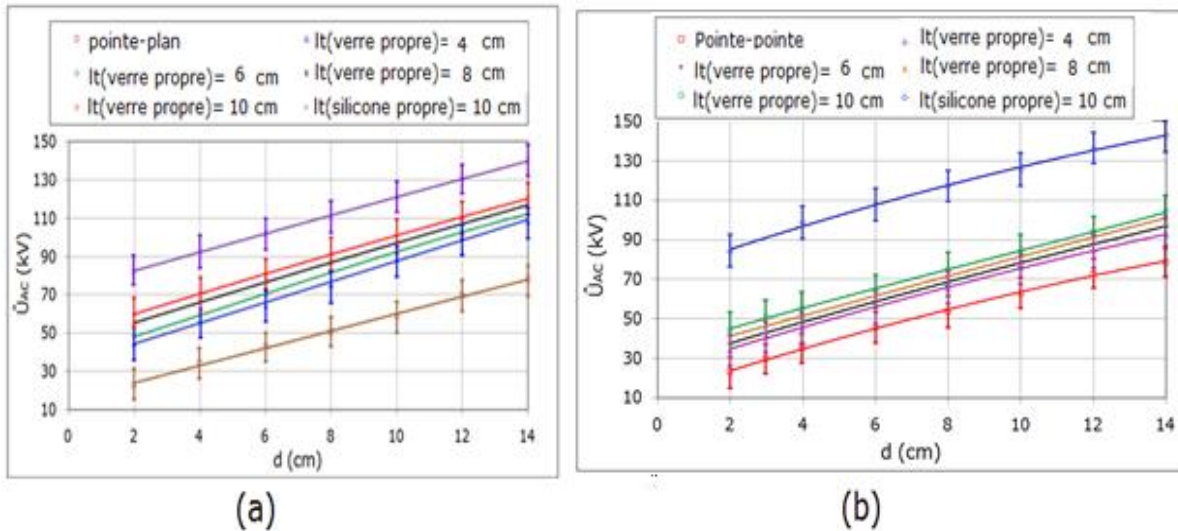


Fig I. 22: $\hat{U}_{AC} = f(d, l_i)$ pour les différents systèmes sous atmosphère propre (a: système pointe-barrière tubulaire propre-plan ($\epsilon_i = 1$ mm), b: système pointe-pointe avec barrière propre et sèche enveloppant l'électrode HT) [26]

Dans le cas pollué T. Belhoual a aussi réalisé des essais sur les différents systèmes montrés sur la figure I. 23.

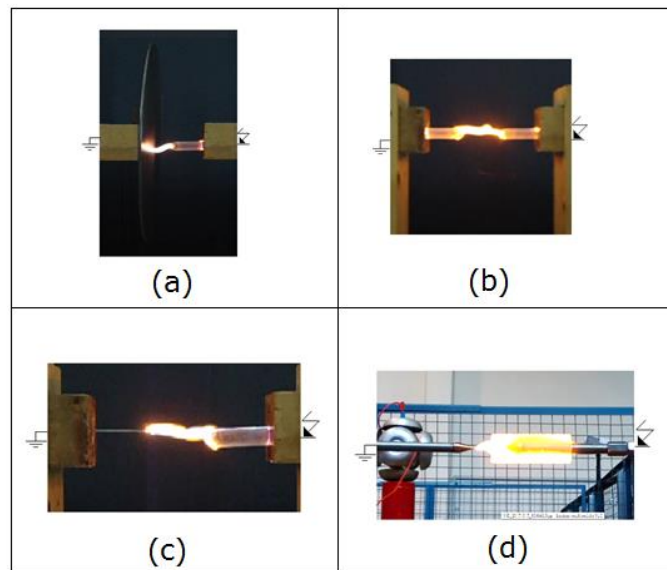


Fig. I. 23 : Trajet de la décharge électrique disruptive des systèmes pointe – pointe et pointe – plan sous atmosphère polluée (a: système pointe – barrière tubulaire en verre – plan, b: système pointe – deux barrière tubulaire en verre – pointe, c: système pointe – barrière tubulaire en verre – pointe, d: système pointe – barrière tubulaire en silicone – pointe)

[26] a aussi constaté que sous conditions très sévères de pollution, aucune protection n'est assurée par une barrière en verre aux deux systèmes et par deux barrières au système pointe-pointe à cause de l'absence de la décharge de leur contournement. Ceci est dû au comportement très conducteur de la couche de pollution recouvrant leur surface.

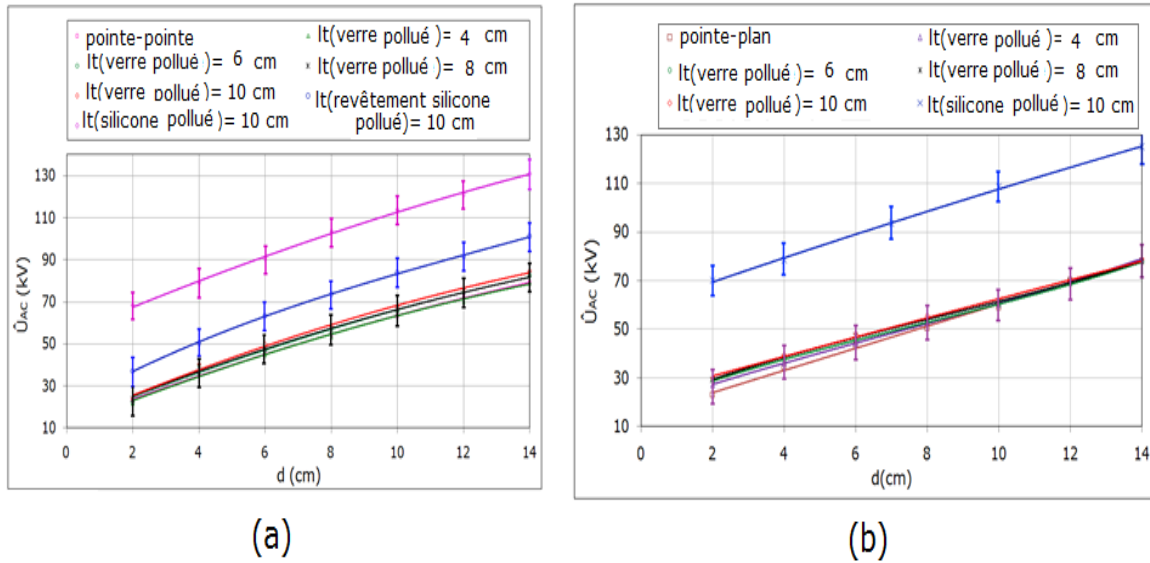


Fig I. 24 : $\hat{U}_{AC} = f(d, l)$ pour les différents systèmes sous atmosphère polluée (a: système pointe-barrière tubulaire fortement polluée-pointe ($\epsilon_t = 1 \text{ mm}$, $\sigma_v = 25 \text{ mS/cm}$), b: système pointe-barrière tubulaire en verre polluée-plan en fonction de la distance interélectrode) [26]

Par contre, la protection offerte à ces systèmes par une barrière en silicone est de loin la meilleure, grâce à la présence de la décharge de contournement de sa surface sous pollution très forte figure I. 24.

I. 4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons basé sur la présentation du matériau en silicone tel que ses larges utilisations. Ce dernier est appliqué dans l'isolation extérieure dans les lignes de haute tension, revêtement en silicone dans le domaine de fabrication des câbles à isolation en silicone.

En dehors des applications suscitées, ce type de matériau est employé comme barrières isolantes. Dans ce cas, la connaissance de ses propriétés spécifiques est indispensable pour le bon choix du milieu de son exploitation et la caractérisation des performances de ce matériau hydrophobe multicouche trouvé dans la littérature a été donnée.

Des travaux réalisés par plusieurs chercheurs sur la performance électrique d'une isolation en silicone sous tension quelconque et l'influence de divers facteurs tels que la position de la barrière dans l'espace d'air, le type du matériau, la nature de la tension, la conductivité, la configuration des électrodes et la distance inter électrode, la charge d'espace et la polarisation inhomogène sont démontrés dans cette combinaison de travaux de recherches.

Chapitre II :
Pollution des isolations
intérieures et extérieures

II. 1 Introduction

La pollution est un phénomène qui pose un sérieux problème lors de l'isolement des structures hautes tension. Ces dernières sont exposées à différents types de polluants en fonction de leur situation géographique et de leurs environs, tels que la poussière et le sable dans les zones minières et désertiques, les métaux et produits chimiques dans les zones industrielles et agricoles, et les molécules de sel aux frontières maritimes. Ce problème doit être pris en compte lors de la détermination de l'isolement de ces structures.

En effet, des couches plus ou moins conductrices sont formées à la surface d'une isolation. Ces couches peuvent entraîner une réduction significative de la résistivité de sa surface, et donc conduire à une diminution de la tension de tenue. Cela peut conduire à un contournement complet et sa dégradation, ce qui est le cas indésirable.

La connaissance des différentes sources de pollution et le degré de pollution, est par conséquent une condition préalable et indispensable pour apprécier le niveau de l'isolement des ouvrages installés, en vue de dimensionner convenablement leur isolement.

II. 2 Définitions et significations

II. 2. 1 Pollution atmosphérique

La pollution est un changement défavorable de l'environnement naturel, qui affecte directement ou indirectement le mode de distribution du flux d'énergie, le niveau de rayonnement, la composition physico-chimique du milieu naturel, et de l'abondance des espèces vivantes, de sorte que tout ou partie de celui-ci apparaît comme un sous-produit du comportement humain dans l'environnement.

Ces modifications peuvent être directement affectées par les humains ou par des ressources de produits agricoles, d'eau, et d'autres produits biologiques. Elles peuvent également l'affecter en altérant les objets physiques qu'il détient, les possibilités récréatives du milieu ou encore en enlaidissant la nature [27].

Les niveaux de concentration des substances dans l'air sont significatifs de l'état de l'environnement [28]. Ils dépendent de l'importance des rejets dans l'atmosphère liés aux activités anthropiques (chauffage, transport, activité industrielle...) et aux phénomènes naturels (volcan, foudre...) qui constituent des indicateurs de pression sur l'environnement

II. 2. 2 Salinité

La salinité désigne la quantité de sel dans un liquide. Elle correspond à la masse de sel divisée par volume de la solution, généralement exprimée en kg / m^3 .

II. 2. 3 Couche de pollution

C'est une couche conductrice électrolytique placée à la surface d'un isolant. Elle est constituée du sel et des matériaux inertes. Cette couche de pollution, réduiront considérablement la résistivité surfacique des isolateurs lorsqu'elle est mouillée, ce qui conduit à la diminution de leur tenue diélectrique.

II. 2. 4 Degré de pollution

C'est la valeur qui caractérise la pollution artificielle appliquée sur l'isolateur, telle que la quantité (salinité, conductivité de la couche et densité du dépôt de sel) [29].

On peut classer les degrés de la pollution suivant quatre niveaux selon la CEI 81-5 qui sont: faible, moyen, fort et très fort.

II. 3 Différents types de polluants

Les polluants atmosphériques peuvent être des sources naturelles ou des activités humaines (industries, transports). Ils sont présents en quantité extrêmement faible [10].

II. 3. 1 Polluants naturels

Les polluants naturels sont principalement le dioxyde de soufre (SO_2) et le dioxyde d'azote (NO_2). Ils peuvent être :

- Les conséquences directes ou indirectes de catastrophes naturelles, tels que le volcanisme et les feux de forêts;
- Liés à des phénomènes naturels, tels que les éruptions solaires;
- Le siège d'un captage d'eau potable par un animal qui fera ses besoins à proximité, ou qui serait mort et en décomposition dans l'eau.

Ces polluants naturels ne sont pas très dangereux car ils ne restent pas très longtemps dans l'air.

II. 3. 2 Polluants dus aux activités humaines

Les principaux polluants rejetés par l'homme dans l'atmosphère sont: Le dioxyde de carbone (CO_2), méthane (CH_4), le dioxyde de soufre (SO_2), le dioxyde d'azote (NO_2), protoxyde d'azote (N_2O), l'ozone (O_3) et des particules en suspension. Ces polluants proviennent de la combustion des énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel), des industries (usines métallurgiques et sidérurgiques, incinérateurs de déchets, raffineries de pétrole, etc.) et des transports routiers.

Cette pollution entraîne de graves problèmes de santé chez les êtres humains, elle est plus forte les jours où la température est élevée (forte chaleur) et lorsqu'il n'y a pas de vent.

CHAPITRE II : POLLUTION DES ISOLATION INTÉRIEURES ET EXTÉRIEURES

La variété et la distribution granulométrique des particules de pollution suspendues dans l'air ont été décrites par Thompson [30] et sont résumées dans le tableau II. 1.

Tab. II. 1: Dimensions des particules de pollution

Nature des matières en suspension		Diamètre (µm)
Inorganique	fumée	0.001-0.3
	vapeur	0.01-1.0
	poussière	1.0-100.0
Organique	bactéries	1.0-10.0
	spores de plantes	10.0-20.0
	pollens	15.0-50.0
Eau	brouillard	10-50.0
	bruine	50.0-400.0
	pluie	400.0-4000.0

Considérons une particule non magnétique au repos dans l'atmosphère, les principales forces qui agissent sur elle sont :

- La gravité, sachant que la pesanteur ($m * g$, où m est la masse de la particule et g est l'accélération de la gravité) ;
- La vitesse du vent ($3\pi\eta d\nu$, où η est le frottement interne de l'air, d le diamètre des particules et ν la vitesse du vent) ;
- Les forces électriques (force électrostatique E_q sur une particule chargée, où E est le champ électrique et q la charge sur la particule). La force due à la divergence du champ :

$$E_q = \frac{d^3 \epsilon_r - 1}{16 \epsilon_r + 2} \text{grad} E^2 \quad (\text{II.1})$$

Où ϵ_r : est la permittivité relative

La force exercée sur une particule chargée est oscillante dans un champ alternatif, mais la force due à la divergence du champ est transitoire pour les tensions alternative et continue et dirigée vers la région soumise à de fortes contraintes.

Une couche conductrice électrolytique mise sur la surface d'une isolation qui est composée du sel et des matériaux inertes peut influencer négativement sur sa performance électrique.

Pratiquement, il existe plusieurs types de contaminants qui ont tendance à se déposer sur les surfaces isolantes suivant certains mécanismes. Ils sont classés en deux catégories, solubles ou insolubles. Les isolations installées au bord de mer sont généralement polluées par des

contaminants solubles, en particulier NaCl (chlorure de sodium) ou bien Na₂SO₄, CaSO₄, KNO₃, CaCl₂, CaCO₃ [30]. Afin de quantifier les contaminants sur la surface des isolateurs, le contaminant soluble est exprimé en termes de densité de dépôt de sel équivalent (DDSE), qui est en corrélation avec 1 mg de NaCl par unité de surface (cm²) [31]. Les contaminants non-solubles sont mesurés par la méthode (NSDD) qui signifie la densité de dépôt de matière non-soluble, qui est exprimé en mg de kaolin par unité de surface (cm²).

II. 4 Classification et origine de la pollution [30]

La variation des agents constituant la pollution dépend des sources de contamination et des conditions auxquelles sont soumises les isolations. D'après la norme CEI 815, nous citons les principales sources de pollution suivantes:

II. 4. 1 Pollution naturelle

La pollution d'origine naturelle peut affecter d'importantes parties isolantes. Elle dépend du climat et des facteurs météorologiques des régions. Elle est constituée des dépôts de poussières véhiculées par les vents tels que : le sable, les embruns marins, etc. Elle se répartit en trois types :

II. 4. 1. 1 Pollution marine

Ce type de pollution touche les installations électriques à proximité de la mer. Elle est constituée d'embruns marins formant une couche de sel qui à plus ou moins longue échéance, recouvre toute la surface de l'isolant y compris les parties les mieux protégées et forme une couche de sels. Cette dernière devient conductrice lorsqu'elle est humidifiée par les embruns eux-mêmes, par un brouillard ou simplement par condensation. La particularité de cette pollution est qu'elle est exclusivement constituée de sels ioniques, notamment le NaCl, et de peu des matières insolubles.

II. 4. 1. 2 Pollution désertique

Ce genre de pollution est constitué par les particules de sable, terre, poussière. Elle est accentuée surtout par les facteurs climatiques suivants:

- Le vent, en assurant le transport de ces particules arides, finit par les déposer sur l'isolation en formant une couche qui recouvre toute sa surface.
- La température, par ses variations entre le jour et la nuit implique le phénomène de condensation donnant au dépôt une certaine conductivité.

Les régions désertiques sont caractérisées par un type de pollution extrêmement sévère.

L'accumulation de ce type de pollution se fait par une interaction entre l'écoulement d'un air riche en poussière et l'obstacle formé par l'isolation.

II. 4. 1. 3 Pollution du sol et zones agricoles

Les poussières du sol engendrent des agents de pollution dans les régions à climat aride. Une couche de pollution sera formée à la surface d'une isolation placée dans ces régions où l'engrais par pulvérisation est utilisé, aussi le labourage des terres conduit à ce problème. Dans ces zones, la pollution peut être d'origine agricole (pollen, insectes, engrais).

II. 4. 2 Pollution industrielle

Cette pollution est observée au voisinage des usines métallurgiques, chimiques ou même au bord des centrales thermiques où les isolateurs se recouvrent de poussière faiblement conductrice, mais très hygroscopique.

Le dépôt de pollution peut se constituer par la fixation de particules solides telles que les dépôts ferromagnétiques issus des usines métallurgiques et de l'absorption de gaz présent dans les fumées. Dans des conditions de forte humidité, la dissolution des sels contenus dans la poussière provoque la formation d'une couche conductrice.

Le tableau II. 2 résume quelques composants d'une couche de pollution déposée sur isolateurs installés près d'une centrale électrique.

Tab. II. 2: Constitution chimique de la poussière émise par une centrale électrique en Pologne

Constituants	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
Poids %	48,5	26	12,7	4,7	4,7	1,3	0,7	1,6

II. 4. 3 Pollution mixte

C'est une combinaison des pollutions précédentes. La pollution mixte présente le cas le plus nocif pour l'exploitation des ouvrages électriques. La couche électrolytique formée par le processus d'humidification des dépôts solides accumulés progressivement sur la surface des isolations, engendre une diminution considérable de la rigidité diélectrique.

II. 5 Mesure de la sévérité de pollution d'un site

Pour assurer un service sans défaillance dans un site pollué, il est nécessaire d'évaluer la sévérité de pollution de ce site pour dimensionner convenablement les isolateurs.

La sévérité est généralement caractérisée par l'intensité de précipitation, ainsi que par la conductivité des dépôts polluants [32].

II. 5. 1 Conductance superficielle

La conductance superficielle des isolateurs témoins, installés sur site, est obtenue à partir du rapport du courant électrique qui traverse l'isolateur, à la tension d'alimentation de l'isolateur témoin (tension de service) [33, 34].

$$G = \frac{I}{V} \quad (\text{II. 2})$$

$$\delta = G \cdot f \quad (\text{II. 3})$$

f : facteur de forme, avec:

$$f = \int_0^{l_f} \frac{dx}{\pi - d(x)} \quad (\text{II. 4})$$

l_f : ligne de fuite entre les deux électrodes;

dx : élément de chemin de contournement;

$d(x)$: diamètre de l'isolateur en fonction de x .

La conductivité superficielle est obtenue en multipliant la conductance G par un facteur de forme de l'isolateur [35]. Cette méthode est donc un paramètre qui caractérise l'état global de la surface isolante (niveau de pollution et degré d'humidification de la couche), laquelle détermine la performance d'une surface isolante. Ainsi, la mesure de la conductance superficielle est une méthode satisfaisante pour évaluer le degré de pollution d'un site. Elle peut être représentative d'un type de site étudié, mais en général elle présente des résultats dispersés [36].

II. 5. 2 Mesure de la pollution de l'air

Les mesures de la pollution atmosphérique s'effectuent sur une période de temps donnée et permettent d'évaluer l'intensité et les caractéristiques de la pollution de l'air dans un site. Les méthodes de mesures adoptées partent du principe qu'en ce qui concerne le phénomène de contournement, une corrélation peut être établie entre l'analyse physico-chimique de l'air d'un site donné et la sévérité de la pollution de ce même site [36].

II. 5. 3 Densité du dépôt non soluble (DDNS)

La densité de dépôt non soluble correspond à la quantité de produits non solubles présents dans une couche de pollution. La détermination de la DDNS (**Fig. II. 1**) s'effectue comme suit:

La solution obtenue par la méthode de la DDSE (densité du dépôt de sel équivalent) est filtrée à l'aide d'un papier filtre. Le dépôt non soluble restant après filtrage est séché puis pesé. La DDNS peut être calculée par la formule suivante.

$$DDNS = 1000 \frac{m_f - m_i}{A} \quad (\text{II. 5})$$

Où: DDNS : est la densité de dépôt non soluble en mg/cm^2 ;

m_f : Masse du papier filtre contenant la pollution après séchage en mg ;

m_i : Masse initiale du papier filtre en mg ;

A : Surface lavée de la barrière en cm^2 ;

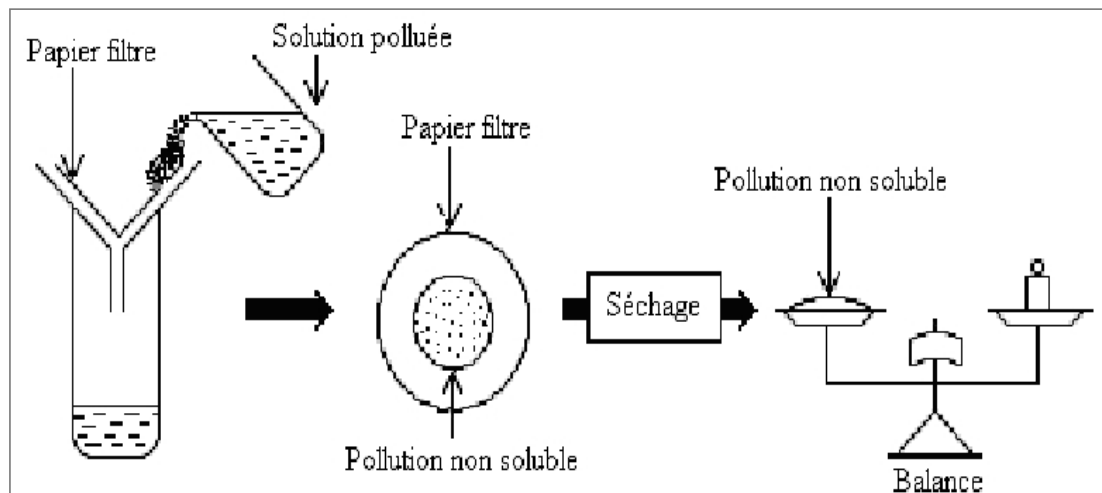


Fig. II. 1: Schéma et procédé de mesure de la DDNS

II. 5. 4 Densité du dépôt de sel équivalent (DDSE)

La DDSE est le dépôt équivalent exprimé en mg de sel par cm^2 de la surface d'un isolateur, qui a une conductivité électrique égale à celle du dépôt réel lorsqu'il est dissous dans la même quantité d'eau. Des échantillons de pollution sont prélevés à la surface de l'isolateur ou d'autres collecteurs. Le dépôt est récupéré par lavage, en utilisant un matériau absorbant (coton, mouchoir en papier,...) et de l'eau distillée. A partir de la conductivité de la solution obtenue de la surface utilisée de l'isolateur, du volume d'eau et de sa température, on peut calculer la DDSE.

Pour déterminer la sévérité du site, les mesures doivent être répétées avec une fréquence suffisante pour obtenir les niveaux entre les périodes de lavage naturelle. Cette méthode permet d'établir une relation avec les méthodes d'essais sous pollution artificielle, ce qui est un avantage à prendre en considération. Elle présente en outre certains inconvénients tels que les fréquences de prélèvements, les fluctuations de l'humidité et l'amorçage des arcs électriques qui ne sont pas pris en compte [36].

II. 6 Mode de distribution de la pollution

II. 6. 1 Isolations extérieures

La répartition d'une couche de pollution dépend du profil, la hauteur et la disposition (verticale, horizontale ou inclinée) d'une surface isolante et du niveau de la tension qui lui est appliquée [30].

La non uniformité de répartition de pollution sur des isolations externes peut être classée en trois catégories :

- Non uniformité longitudinale non périodique.
- Non uniformité transversale ou par secteurs.
- Non uniformité longitudinale périodique.

II. 6. 1. 1 Répartition non uniforme longitudinale non périodique

La cause principale de cette géométrie est le lavage sous tension et l'effet du champ électrique. Elle se présente en bandes de pollution de conductivité différente dont la valeur est constante dans chaque bande le long de la largeur de l'isolateur mais elle peut être variable le long de la ligne de fuite de l'isolation [30].

II. 6. 1. 2 Répartition non uniforme par secteurs

L'existence d'une direction privilégiée des vents et des pluies fait que cette répartition soit ainsi, c'est à dire on trouve des secteurs aux bandes de pollution de différentes largeurs dont la conductivité superficielle est variable d'un secteur à l'autre le long du périmètre de l'isolateur, mais elle reste constante dans le même secteur le long de la ligne de fuite [30].

II. 6. 1. 3 Répartition non uniforme longitudinale périodique

Ce type de pollution est peu fréquent. Il est caractérisé par la variation périodique de la conductivité de la couche de pollution le long de la ligne de fuite de l'isolation et constante le long du périmètre. Ses principales spécifications sont :

- La face inférieure de l'isolateur présente une conductivité plus forte que la face supérieure ;
- La concentration de la pollution augmente de la zone périphérique vers la zone centrale ;
- La pollution est plus accentuée entre les nervures.

Ce type de regroupement concerne une accumulation progressive de la pollution et ne peut pas rendre compte des accumulations aléatoires en cas de conditions atmosphériques exceptionnelles [30].

II. 6. 2 Barrières isolantes

Quelques travaux antérieurs ont été réalisés au niveau de notre laboratoire pour mettre en évidence les différents modes de distribution de la pollution sur la surface des barrières isolantes [30].

Deux différents modes de répartition de la pollution sur la surface de la barrière isolante, à savoir les répartitions uniforme et non uniforme de dépôts polluants, ont été expérimentées (Fig.II.2).

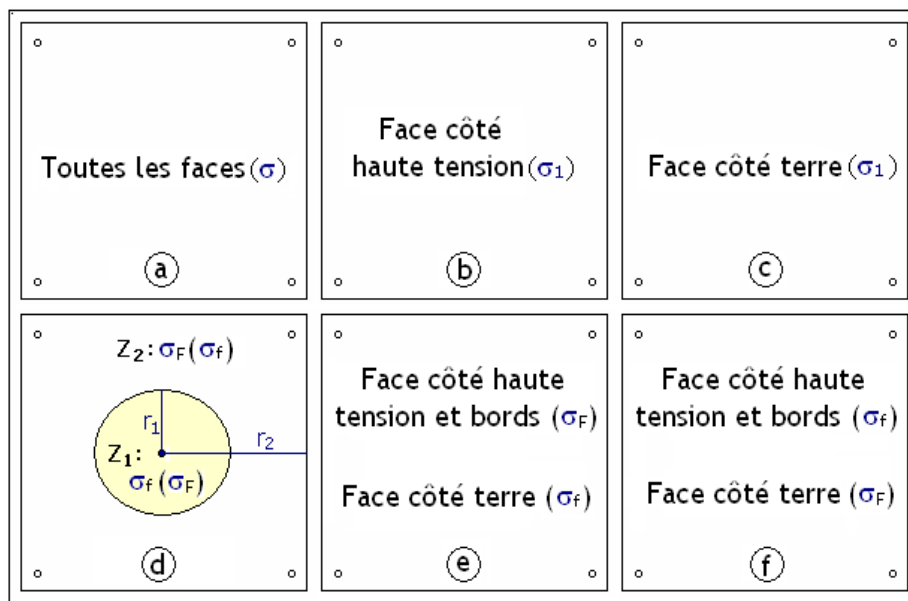


Fig. II. 2: Variantes d'uniformité et de non uniformité de distribution de pollution sur la barrière isolante [37]

La barrière est dite uniformément polluée, lorsqu'un dépôt polluant de conductivité électrique quelconque est appliqué de manière uniforme sur toutes les six faces de celle-ci selon la variante 2a (Fig. II. 2a). L'application de la couche de pollution sur la barrière est réalisée à l'aide d'une éponge maintenue toujours propre et sur laquelle est apportée, au moyen d'une seringue, une quantité de pollution constante de 2 ml et cela après avoir bien remué celle-ci avant la prise, pour pouvoir évidemment la garder homogène tout au long de nos essais. Cinq variantes de distribution non uniforme de pollution ont été exploitées dans ce chapitre (Fig. II. 2 (b, c, d, e, f)):

- Dans la variante 2b, la surface de la barrière en face de l'électrode sous haute tension est polluée, les autres sont maintenues propres et sèches ;
- La variante 2c est caractérisée par le fait que la surface de l'écran en face de l'électrode mise à la terre est polluée, les autres sont gardées propres et sèches ;

CHAPITRE II : POLLUTION DES ISOLATION INTÉRIEURES ET EXTÉRIEURES

- Dans la variante 2d, la surface de la barrière en face de la haute tension est subdivisée en deux zones circulaires variables et différemment polluées z_1, z_2 (σ_f, σ_F) ou l'inverse, les autres faces sont maintenues propres et sèches ;
- La variante 2e est caractérisée par le fait que la surface vis-à-vis de la haute tension et les bords sont fortement pollués avec une conductivité $\sigma_F = 14 \mu S$, celle en face de la terre faiblement polluée de conductivité plus faible et variable ;
- La variante 2f correspond exactement à l'inverse de la variante 2e.

II. 7 Classifications du niveau de pollution d'un site

II. 7. 1 Site extérieur

La pollution naturelle, que l'on retrouve à la surface des isolations extérieures, est simulée au laboratoire par l'application du sel (NaCl) à leur surface. La norme CEI 81-5 définit quatre niveaux de pollution, depuis une pollution faible jusqu'à une très forte pollution [30].

Le tableau II. 3 présente l'équivalence entre ces niveaux de pollution et la densité du dépôt de sel équivalent, appliqué sur la surface de ces isolations. Cela permet d'identifier les substances de la pollution pour effectuer un bon choix de celle-ci.

Tab. II. 3: Classification de la pollution selon le type d'environnement [30, 18]

Niveau de pollution d'un site extérieur	Densité de dépôt de sel équivalent, DDSE (mg/cm^2)	Exemples d'environnements typiques
I : Faible	0,03 à 0,06	<ul style="list-style-type: none">- Zones sans industries avec faible densité d'habitations équipées d'installation de chauffage.- Zones avec faible densité d'industries ou d'habitations mais soumise fréquemment aux vents et / ou pluies.- Régions agricoles.- Régions montagneuses.

CHAPITRE II : POLLUTION DES ISOLATION INTÉRIEURES ET EXTÉRIEURES

II : Moyen	0,10 à 0,20	<ul style="list-style-type: none">- Zones avec industries ne produisant pas de fumées particulièrement polluantes et / ou avec une densité moyenne d'habitations équipées d'installations de chauffage.- Zone à forte densité d'habitations et / ou d'industries mais soumises fréquemment aux vents et / ou à des chutes de pluies.- Zones exposées aux vents de mer, mais trop proches de la côte.
III : Fort	0,30 à 0,60	<ul style="list-style-type: none">- Zones avec forte densité d'industries et banlieues de grandes villes avec forte densité d'installations de chauffage polluantes.- Zones situées près de la mer, ou en tout cas exposées à des vents relativement forts venant de la mer.
IV : Très fort	0,60 à 1,10	<ul style="list-style-type: none">- Zones généralement peu étendues, soumises à des poussières conductrices et à des fumées industrielles produisant des dépôts conducteurs particulièrement épais.- Zones généralement peu étendues, très proches de la côte et exposées aux embruns ou au vent très fort et polluant venant de la mer.- Zones désertiques caractérisées par de longues périodes sans pluie, exposées aux vents forts transportant du sable et du sel et soumises à une condensation régulière.

II. 7. 2 Site intérieur

De même, la pollution naturelle, que l'on retrouve sur la surface des isolations intérieures, est simulée au laboratoire par l'application du sel (NaCl) à leur surface, selon la norme IEC 62271-304 [38], il existe trois niveaux de pollution dans une isolation intérieure.

Pour assurer un bon fonctionnement d'un appareillage électrique, l'état de surface du matériau isolant dont il est formé doit être libéré de ces dépôts polluants.

Tab. II. 4: Niveaux de pollution pour l'isolation intérieure [39]

Niveau de pollution d'un site intérieur	Fréquence de condensation	Pollution / Conductivité de la couche
0	Normalement aucune, au maximum deux fois par année	Légère 1 ... 5 μ S
1	Rarement, au maximum deux fois par mois	Légère 1 ... 5 μ S
	Normalement aucune, au maximum deux fois par année	Forte 10 μ S
2	Rarement, au maximum deux fois par mois	Forte 10 μ S
	Souvent, plus de deux fois par mois	Légère 1 ... 5 μ S

II. 8 Influence des facteurs climatiques sur les isolations polluées

Quelques facteurs climatiques et météorologiques peuvent influencer l'état de surface des isolations installées dans les systèmes électriques :

II. 8. 1 Vent

Il est considéré comme un agent responsable du transport des particules fines comme les poussières et des sels marins. Dans le cas où sa vitesse est faible, il joue un rôle important sur la distribution des dépôts polluants formés sur les surfaces des isolateurs. Par contre si sa vitesse est forte, il peut être considéré comme un agent d'auto nettoyage.

II. 8. 2 Température

Elle joue un double rôle, tout dépend de son degré. Ce facteur peut provoquer le phénomène de condensation et l'humidification de la couche de pollution à cause de la différence de température entre le jour et la nuit. Cependant, les hautes températures ont une influence positive sur le comportement des surfaces polluées, car elles sèchent les dépôts et augmentent leur résistivité.

II. 8. 3 Humidité

Ce phénomène est obtenu pendant les premières heures du matin, il joue un rôle très néfaste sur la performance d'un système électrique. Elle a une influence négative sur la surface contaminée des matériaux isolants car elle facilite son humidification et engendre la conductivité de la couche de pollution.

II. 8. 4 Pluie

Les fines pluies jouent le même rôle que l'humidité. Elles arrosent les surfaces polluées, donc favorisent l'adhérence de pollution, ce qui augmente le risque de rétablissement d'un arc électrique [30]. Cependant, les fortes pluies permettent le nettoyage des surfaces polluées.

II. 9 Conséquences de la pollution

Quand la surface d'une isolation est légèrement polluée, un très faible courant capacitif en résultera. Ceci est dû à l'existence de très faibles valeurs des conductivités électriques de l'air, du matériau isolant solide et de la couche de pollution. Dans ce cas, une répartition électrostatique du potentiel électrique est obtenue. Par contre, avec l'humidification de la couche de pollution, elle devient le siège d'un courant de conduction de valeur élevée et la répartition du potentiel électrique diffère de la répartition électrostatique [18]. Le champ électrique obtenu en chaque point sur la surface isolante est très faible par rapport à la rigidité diélectrique de l'atmosphère ambiante. La conductivité superficielle, créée par la couche de pollution, modifie la répartition de la tension selon les contraintes en présence [40].

La disruption de l'air peut être atteinte entre deux points de la surface isolante causée par l'amorçage d'un arc électrique qui court-circuite une partie de la ligne de fuite [30].

La non uniformité de la distribution des dépôts polluants sur la surface isolante peut conduire à une diminution des performances de l'isolation sous pollution. Ce problème a toujours entraîné et engendre encore des défauts d'isolation au niveau des équipements électriques ou des installations des consommateurs d'énergie électrique.

II. 9. 1 Vieillissement des isolations polymères

Le vieillissement est une dégradation des propriétés électriques et mécaniques comme l'augmentation des pertes diélectriques et la diminution de la résistivité. Très souvent différents mécanismes apparaissent en même temps et influent mutuellement l'un sur l'autre et les isolants vieillissent [41].

Le vieillissement est caractérisé par une altération partielle des propriétés diélectriques des isolants. Il existe trois types principaux de vieillissement :

- Vieillissement thermique : provoqué par l'action de longue durée de hautes températures sur le matériau isolant.
- Vieillissement électrochimique : engendré par certains processus dont la cause est le phénomène d'électrolyse ayant lieu dans le diélectrique.
- Vieillissement électrique : causé par l'ionisation et les décharges partielles résultant des décharges à la surface et dans les cavités surtout gazeuses enfermées dans les diélectriques.

II. 9. 1. 1 Processus de vieillissement des surfaces composites

Le changement climatique a une grande influence sur l'état de surface d'une isolation. Dans le cas d'une isolation intérieure, les grandes variations de température et d'humidité conduiront à la condensation sur la surface des isolations, et l'effet couronne des gouttes d'eau déposées sur la surface isolante accélérera le processus de son vieillissement [18]. Pour l'isolation extérieure, le brouillard, la pluie, la rosée, la neige et la glace sont considérés comme des paramètres climatiques.

Le processus de vieillissement est décrit par trois périodes [30] :

- ✓ Vieillissement à court terme ;
- ✓ Phase transitoire ;
- ✓ Vieillissement à long terme.

II. 9. 1. 2 Processus du contournement d'une surface isolante polluée

Le contournement des surfaces isolantes à cause de la pollution naturelle réduit la performance et la fiabilité des équipements électriques. La pollution déposée sur ces surfaces devient un électrolyte conducteur lorsque celle-ci est mouillée par la pluie ou le brouillard. Cela permet au courant de fuite d'augmenter sur l'isolation et la tension de tenue électrique de l'isolant diminue [30].

Le contournement d'une surface isolante comprend trois phases principales [42] :

a. Formation d'un film de pollution conductrice:

- Recouvrement de la surface isolante par une couche de pollution ;
- Mouillage de la couche de pollution par l'effet d'humidité.

b. Formation de pré-décharge à la surface d'une isolation polluée:

- Formation de bandes sèches.
- Allumage de la pré-décharge le long des bandes sèches.

c. Propagation de la pré-décharge le long de la surface et un court-circuit pourra se produire. [30]

Si l'une de ces phases peut être contrôlée convenablement, le problème du contournement de la surface isolante est très certainement résolu.

En présence des gouttelettes d'eau, les sels contenus dans les dépôts polluants qui recouvrent les surfaces isolantes se dissolvent et créent une couche électrolytique conductrice. De ce fait, la conductivité superficielle résultante de l'isolation provoque une modification de la répartition de potentiel. L'amorçage d'un arc électrique qui court-circuite une partie polluée du matériau isolant peut alors être atteint.

On peut distinguer trois types d'arcs électriques :

a) Arc non localisé :

Il s'agit d'un arc qui s'amorce dans une partie de la surface d'un isolant et il s'éteint rapidement pour se réamorcer en un autre endroit. Il n'a pas d'effet négatif pour l'installation, malgré l'apparition d'un courant de fuite à la surface du matériau isolant.

b) Arc fixe :

Soit l'arc se réamorcer au même endroit sur une surface isolante polluée et crée un courant alternatif ou il se maintient pour avoir un courant continu. Cet arc peut entraîner par effet thermique une dégradation de l'isolation utilisée.

c) Contournement de l'isolant :

Lorsque les conditions appropriées sont remplies, le contournement d'une surface isolante polluée est le résultat d'une évolution que l'on peut décrire comme suit:

Première phase (a)

Une couche uniforme de pollution est déposée sur la surface isolante. Elle est constituée de sels solubles et d'acides ou de bases dilués. Si la pollution a une forme d'une couche électrolytique liquide, les phases (c) à (f) peuvent avoir lieu directement, sinon un processus d'humidification est nécessaire, phase (b) (Fig. II. 3).

Création et écoulement d'un courant de fuite à travers la couche électrolytique qui recouvre l'isolant. Ce courant provoque un échauffement de l'électrolyte, qui a pour effet d'accroître la conductivité du milieu. Cela conduit à l'augmentation du courant de fuite. Le niveau du courant de fuite dépend du temps, de la nature et de la quantité des polluants.

Deuxième phase (b)

La couche de pollution sera conductrice après son humidification.

Troisième phase (c)

Avec la soumission de la surface isolante polluée à une haute tension, il y aura une apparition des courants de fuite sur sa surface contaminée et ils commencent à assécher certaines zones de la couche polluante.

Quatrième phase (d)

Création d'une surface non uniformément asséchée à cause de l'existence des zones sèches qui arrêtent l'écoulement des courants de fuite.

Cinquièmes phase (e)

La mise des zones sèches sous haute tension, provoque un claquage dans l'air. Les zones sèches sont court-circuitées par des arcs électriques en série avec la résistance de la partie non séchée de la couche polluante. A chaque amorçage de la zone sèche, il en résulte une impulsion de courant de fuite.

Sixième phase (f)

La résistance de la partie humide est faible, les arcs qui court-circuitent la zone sèche peuvent s'étendre le long de la surface isolante en court-circuitant ainsi une partie de plus en plus grande de cette surface. Ceci entraîne une réduction de la résistance en série avec les arcs, ce qui accroît le courant et permet aux arcs de court-circuiter une partie plus grande de la surface de l'isolant. Finalement, la surface de l'isolant se trouve complètement court-circuitée et un défaut à la masse est établi.

En clair, lorsque la surface d'une isolation est conductrice en présence d'humidité, la pollution devient un paramètre dimensionnant important.

Le mécanisme de contournement d'une isolation en élastomère silicone est différent de celui d'une isolation en céramique en raison du transfert de l'hydrophobicité aux couches de pollution. Plusieurs travaux de recherche ont porté sur le contournement des isolations en silicone [43].

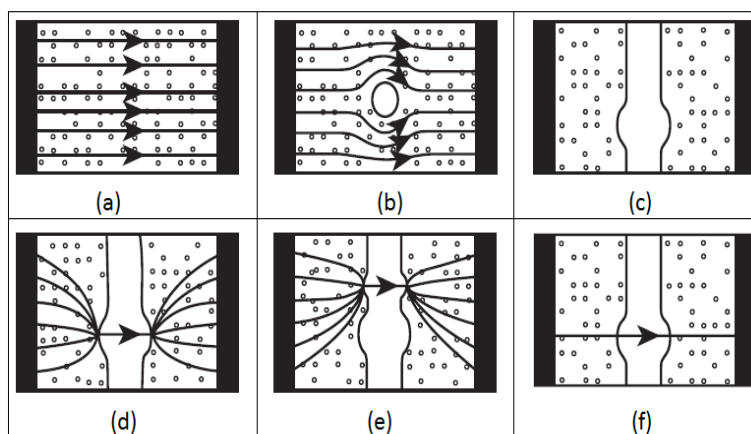


Fig. II. 3: Différentes étapes du processus de contournement d'une surface isolante polluée [31]

II. 10 Méthodes d'essais sous pollution

Afin de comparer les performances de divers types d'isolateurs et de sélectionner ceux qui présentent le meilleur comportement sous pollution, il est nécessaire de les soumettre à des essais. Pour effectuer ces essais, nous distinguons deux principales méthodes d'essai à savoir les essais sous pollution naturelle et les essais sous pollution artificielle. Ces essais peuvent être effectués dans les conditions naturelles (sur site) ou au laboratoire [36].

II. 10. 1 Essai sous pollution naturelle

Ces essais consistent à installer dans différents sites pollués, des stations dans lesquelles on suit le comportement d'un certain nombre de chaînes d'isolateurs. Comme la pollution naturelle est un phénomène à évolution lent, l'essai sous pollution naturelle peut prendre jusqu'à deux ans ou trois

ans. La qualité d'isolement des isolateurs placés sous la même tension est déterminée en fonction de temps au contournement.

La diversité de la nature des agents polluants impose ce type d'essais pour étudier séparément les principales sources de pollution et leurs impacts sur l'isolement des ouvrages.

Cependant, l'inconvénient majeur de ces essais est la durée des expériences qui est relativement longue. C'est pourquoi des méthodes de laboratoire furent proposées et sont largement utilisées [36].

II. 10. 2 Essais sous pollution artificielle

Les essais au laboratoire sont basés sur la reproduction de la couche de pollution par des solutions réparties à la surface de l'isolateur et dont la conductivité peut être modifiée.

Afin d'approuver les essais sous pollution artificielle, il est nécessaire de comparer les performances des isolateurs testés au laboratoire à celles des isolateurs en exploitation dans des conditions naturelles de pollution. Une première approche consiste à trouver une méthode qui simule le mieux possible les conditions naturelles de pollution, en tenant compte de la répartition non uniforme de la pollution. Une deuxième approche consiste à rechercher une méthode de laboratoire susceptible de fournir des résultats reproductibles, afin de faciliter la comparaison des performances des différents types d'isolateurs [36].

II. 10. 2. 1 Méthode des couches solides

L'isolateur est nettoyé puis enduit d'une solution à base de sel, d'eau et d'un absorbant inerte à base de kieselguhr ou de tonoko ou de kaolin. Le mélange est appliqué puis l'ensemble est séché. L'essai consiste à humidifier le dépôt au moyen d'un brouillard propre pendant 15 à 20

minutes pour obtenir la conductivité maximale. La tension peut être appliquée avant ou après l'humidification. Le critère de l'essai est la tension tenue calculée sur 3 de 5 essais en Up and Down. Cette méthode représente assez bien la pollution industrielle avec une couche épaisse [29].

II. 10. 2. 2 Méthode de brouillard salin

Après un nettoyage, l'isolateur est soumis à un brouillard d'eau salée. Ce dernier est produite par deux rangées de pulvérisateurs ; la première délivre l'eau salée et la deuxième atomise et disperse la solution sur l'isolateur. Cette méthode n'utilise aucun agent liant contrairement aux autres. La tension est appliquée dès le début de l'essai et le critère d'essai est la salinité maximale tenue pour 3 essais au moins sur 4. Cette méthode simule bien la pollution marine et la pollution industrielle avec peu de matière insolubles [29].

II. 10. 2. 3 Méthode de brouillard tenu

La couche de pollution est appliquée de la même façon que pour la couche solide. L'isolateur est humidifié indirectement par pulvérisation créant ainsi une atmosphère humidifiée simulant un brouillard. La tension est appliquée dès le début de l'humidification. La grandeur mesurée est la tension de tenue maximale pour 4 essais sans contournement en Up and Down. Cette méthode a pût simuler les pires situations de pollution au Japon.

II. 11 Techniques de lutte contre la pollution

Plusieurs techniques de lutte contre la pollution sont utilisées pour éviter le dysfonctionnement des installations électriques.

II. 11. 1 Allongement de la ligne de fuite

Cette méthode permet d'adapter le dimensionnement aux nouvelles normes de pollution. Deux techniques sont utilisées :

- Changement de type d'isolation : c'est une technique très coûteuse et très difficile à réaliser.
- Rajout d'un matériau polymère à la surface de l'isolation existante dont le but est d'allonger la ligne fuite [44].

II. 11. 2 Graissage périodique

La graisse utilisée est à base de silicone. Grâce à ses propriétés hydrophobes, la graisse protège temporairement l'isolation [30].

II. 11. 3 Revêtement silicone

Il suffit de pulvériser ou teinter par un pinceau la surface des isolations par un caoutchouc silicone qui se vulcanise à température ambiante. Ce revêtement joue le rôle de protection d'isolation et l'amélioration de sa tenue sous pollution.

II. 11. 4 Isolation composite

Elle a de bonnes propriétés hydrophobes et peut être utilisée dans des conditions de pollution très sévères. Cependant, cette isolation revêtue d'un polymère mise en service peut vieillir sous l'effet des différentes contraintes (électriques et climatiques) auxquelles elle est soumise.

II. 11. 5 Nettoyage de l'isolation

Pour éviter la coupure des équipements électriques, un lavage sous tension des isolations est réalisé à l'aide d'installations fixes ou mobiles. Dans les deux cas, il est effectué selon des règles strictes concernant la qualité de l'eau de lavage, le processus de lavage et les distances de sécurité à respecter, afin d'exclure tout risque de contournement pendant le lavage [30].

II.12 Conclusion

La pollution de l'isolation est un facteur important qui doit être pris en compte dans la conception des lignes électriques et des équipements dans le domaine de haute tension. Il est nécessaire de connaître le degré de pollution dans l'environnement intérieur ou extérieur pour assurer une isolation adéquate. Afin de mieux dimensionner l'isolation, il est nécessaire d'étudier le degré de pollution à l'endroit concerné. Cette sévérité de pollution réside dans l'étude de différents paramètres qui définissent l'état de dégradation de l'isolation.

Les méthodes d'essai sous pollution artificielle sont largement utilisées, celle-ci reproduisent au laboratoire les conditions de la pollution naturelle, ainsi qu'elles possèdent l'avantage d'être rapides.

Les technologies de dépollution actuellement connues (lubrification, nettoyage, revêtement hydrophobe, etc.) apportent aujourd'hui des solutions à la plupart des problèmes de pollution rencontrés par les opérateurs dans ce domaine.

Chapitre III :

*Distribution du champ dans
un système pointe - plan*

III.1 Introduction

La recherche des conditions d'exploitation optimales des barrières isolantes est une condition essentielle pour leur utilisation dans l'industrie. L'étude de la distribution du champ dans ce cas est impérative.

Ce chapitre est consacré à la présentation et l'interprétation des résultats obtenus des différents essais menés dans le laboratoire et la simulation sous COMSOL.

L'objectif visé à travers ce présent chapitre consiste en, la prédiction du chemin de disruption de l'intervalle d'air à champ électrique non uniforme au moyen de la distribution du champ et du potentiel électrique alternatif résultant au niveau de cet espace, à l'aide du logiciel COMSOL multiphysics version 5.4. Lors de cette étude, les paramètres d'influence de champ et potentiel électrique, comme la distance interélectrode 'd' et la nature de l'atmosphère (propre et sèche ou polluée) ont été prises en considération. Finalement une comparaison a été réalisée entre les systèmes contenant des barrières en silicone et en verre de forme tubulaire et plane. Ces résultats vont nous permettre de caractériser et d'évaluer le comportement d'une barrière en silicone dans des conditions très défavorables sous AC.

III.2 Modèles expérimentaux et techniques de mesure

III. 2. 1 Modèles expérimentaux

Le système d'électrode et leur support ont été réalisés au niveau du hall technologie et au laboratoire de haute tension de l'université de Bejaia. Les deux électrodes de ce système sont encastrées sur les deux faces opposées d'un support en bois en forme de U (Fig. III. 1a). Les figures III. 1b et III. 1c représentent respectivement le même système avec barrière plane (Fig. III. 3a) et tubulaire (Fig. III. 3c) avec toutes les dimensions de chaque élément constituant ce dernier.

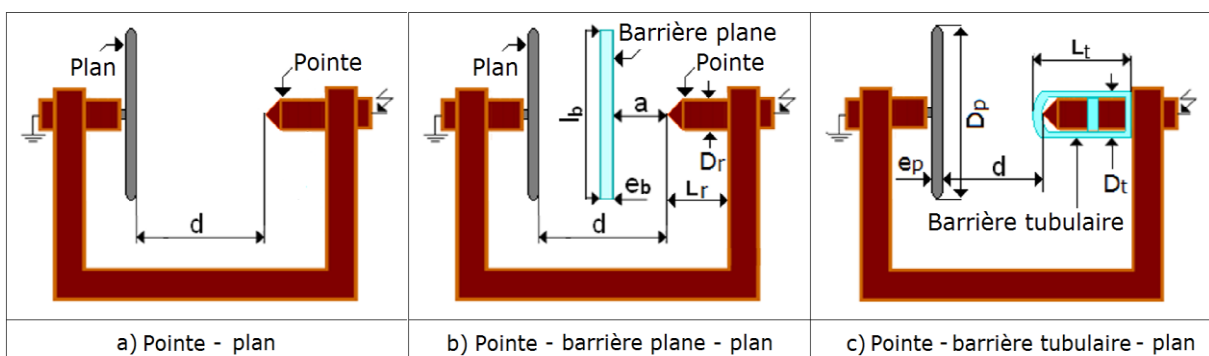


Fig. III. 1: Configurations pointe – plan sans et avec barrières plane et tubulaire

Les électrodes haute tension et terre sont constituées chacune d'une tige cylindrique en acier de 14 mm de diamètre (D_r) et 180 mm de longueur (L_r). La tige située du côté haute tension est terminée par une pointe conique en acier, ayant un angle de 30° et 0.15 mm de rayon de

courbure. Celle du côté terre est terminée par un disque circulaire en acier, de 400 mm de diamètre (D_p) et de 10 mm d'épaisseur (e_p). La taille de l'intervalle d'air d compris entre ces deux électrodes varie entre 0 et 140 mm. Les dimensions de ce modèle expérimental ont été déterminées sur la base du respect des distances de sécurité entre l'appareillage de haute tension et le dispositif d'essai lors de son emplacement dans la cellule de mesure dédiée à ce sujet (Fig. III. 2). Cette dernière est composée: Tr, Vcr, Uc, Ra, C₁/C₂.



Fig. III. 2: Photos des éléments du circuit électrique de l'unité de commande et de la cellule de mesure (a: Circuit de mesure, b: Cellule de mesure, dispositif et appareillage de commande)

La barrière tubulaire en silicone et en verre ont été exploitées dans cette investigation. La barrière plane en silicone (Fig. III. 3b) est une isolation hydrophobe et en verre hydrophile utilisée pour titre de comparaison a été exploitée par d'autres chercheurs [7-9]. Le matériau de la barrière tubulaire en silicone commercialisée sous le produit de marque Powersil 567 par la société Wacker Chemie (Allemagne). Les tubes ont été fabriqué soigneusement au laboratoire de haute tension Zittau en Allemagne.

La barrière en silicone et en verre carrées, de 100 mm de longueur (L_b), 100 mm de largeur (l_b) et 6 mm d'épaisseur (e_b) (Fig. III. 3b). Les tubes ont pour longueur $L_t = (40 \text{ et } 100)$ mm. Leur diamètre intérieur est de 15 mm et extérieur (D_t) de 18 mm. Les barrières tubulaires enveloppent très étroitement l'électrode sous tension au moyen d'un ou plusieurs anneaux en plastique de telle manière qu'elles ne soient pas soufflées par la décharge électrique au moment du contournement de leur surface par celle-ci (Fig. III. 1d).

La surface de la barrière plane est maintenue sur sa longueur perpendiculaire à l'axe des deux électrodes du système grâce à un support en forme d'un U dans lequel elle est encastrée (Fig. III. 3a). Ce dernier coulisse sur la base du dispositif supportant les deux électrodes (Fig. III. 3b et III. 3d). Ainsi, la position relative (a/d) de la barrière par rapport à l'électrode sous tension

peut être aisément variée au moyen de ce modèle expérimental. La figure III. 3c et III. 3d représentent un tube hydrophobe et le dispositif pointe - plan avec barrière tubulaire.

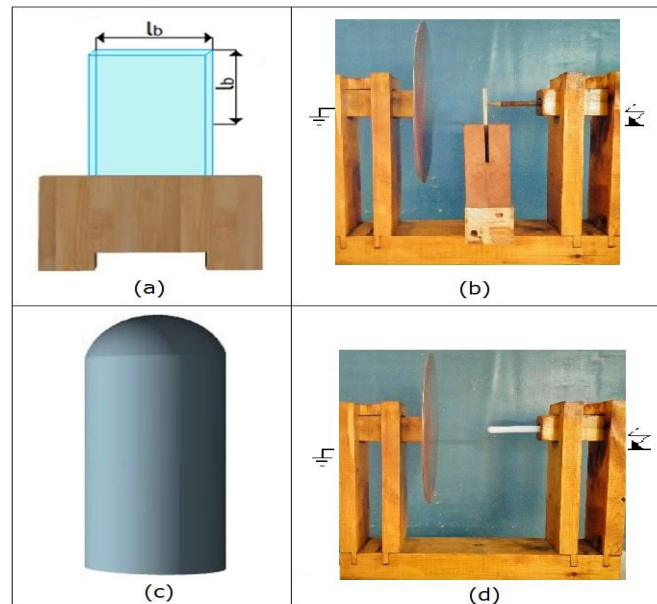


Fig. III. 3: Barrière plane en silicone, tubulaire en silicone et photo du dispositif (a: Barrière en verre plane avec support, b: Système pointe – plan avec barrière plane en silicone, c: Barrière tubulaire en silicone, d: Système pointe – plan avec barrière tubulaire)

III. 2. 2 Pollution d'une surface isolante

La solution polluante utilisée pour la surface hydrophobe contient essentiellement de l'eau distillée, et du chlorure de sodium dont la proportion est déterminée selon la conductivité volumique désirée de la solution. Une quantité de 40g de kaolin est rajoutée à la solution dans le cas de la contamination de la surface hydrophile, cette dernière est mesurée à l'aide d'un conductimètre à sonde mobile (Fig.III.4c). La valeur de la conductivité volumique (σ_v) de la solution utilisée dans le cadre de cette étude est égale à 25 mS/cm. La valeur de la conductivité superficielle équivalente (σ_s) est de l'ordre de 14 μ S [6]. Celle-ci correspond à un niveau de pollution très défavorable d'un site intérieur [9].

Avant que nous procédons à la mesure de la tension de contournement de la surface de l'isolant dans les cas sans et avec dépôt de pollution, les échantillons hydrophobes ont été conditionnés dans un dessiccateur (Fig. III. 4a) contenant du gel de silicone, pendant au moins 24 heures pour éliminer toute présence d'humidité et lui faire récupérer son hydrophobicité. A la fin de chaque essai l'échantillon en silicone est nettoyé à l'aide d'un mouchoir en papier et l'isopropanol. Il est à noter que la valeur mesurée est la moyenne d'une série de 20 essais et la pause entre deux séries consécutives est de 10 heures. La conductivité volumique d'eau est vérifiée et maintenue constante avant chaque série d'essai.

Un dessiccateur désigne un équipement servant à protéger des échantillons en silicone contre l'humidité. Au laboratoire, il est sous forme d'un carré en verre comme il est montré sur la figure III. 4a. Au préalable une quantité suffisante de gel de silice est déposée au fond du dessiccateur. Ce gel permet de vous soutirer l'humidité absorbé par les films de silicone lors du dépôt des gouttes d'eau sur leur surface (Fig. III. 4b).



Fig. III. 4: Dessiccateur avec silicagel et conductimètre électronique

La couche de pollution est appliquée sur la barrière plane en verre par trempage [45] de celle-ci dans un récipient assez profond pour qu'elle soit mouillée complètement et uniformément (Fig. III. 5a). Pour que le verre soit totalement hydrophile, il doit être conditionné avant le début des essais, c'est à dire, trempé plusieurs fois dans la solution polluante jusqu'à ce que sa surface soit complètement mouillée. Cette condition défavorable est nécessaire pour que la surface du verre soit conductrice et sa tension de contournement correspondante soit égale à zéro [5, 6 et 9]. Elle est retirée ensuite du récipient et laissée égoutter au maximum .une minute avant sa mise sous tension.

L'application du dépôt polluant sur la surface de la barrière tubulaire hydrophobe est effectuée à l'aide d'un pulvérisateur (Figs. III. 5b et III. 5c) conformément aux normes données en références [45, 46].

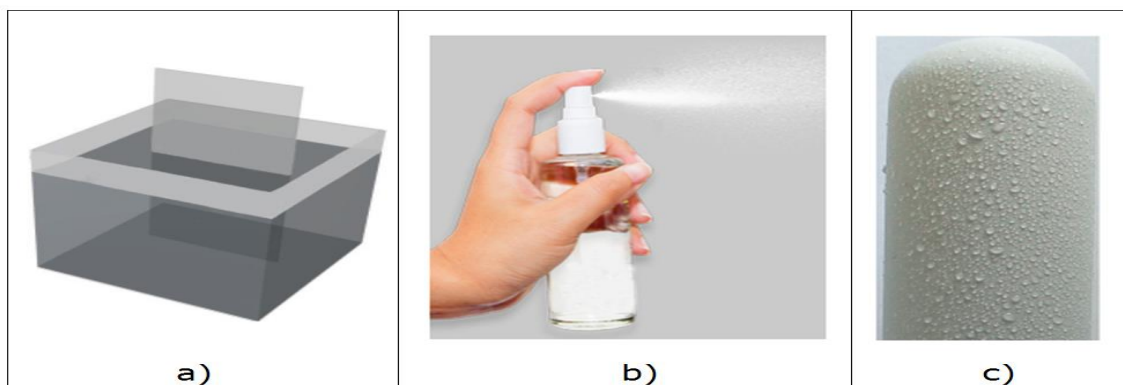


Fig. III. 5: Moyens de pollution de la barrière plane hydrophile ou tubulaire hydrophobe (a: Récipient d'immersion de la barrière plane, b: Pulvérisateur, c: Tube en silicone avec gouttes d'eaux)

La pulvérisation est arrêtée une fois les premières gouttes alourdis commencent à tomber de la surface du tube [45, 46]. La rétention de l'hydrophobicité de la surface de la barrière est vérifiée selon le guide de mesure donné dans la référence normée [46].

III. 2. 3 Circuit de mesure

Le schéma synoptique globale de l'expérimentation réalisé est représenté en figure III. 6. Le circuit de mesure de la tension disruptive du système contient un transformateur Tr, délivrant à son secondaire une tension alternative maximale de 200 kV. La variation temporelle de sa rampe peut être obtenue automatiquement à l'aide de l'appareil de commande manuelle ou automatique U_{AC} . Un diviseur de tension capacitif C_1/C_2 est connecté aux bornes du transformateur par le biais de la résistance de protection R_a . L'objet d'essai O_e est relié aux extrémités du diviseur capacitif C_1/C_2 et le voltmètre de crête V_{cr} à affichage numérique aux bornes de C_2 .

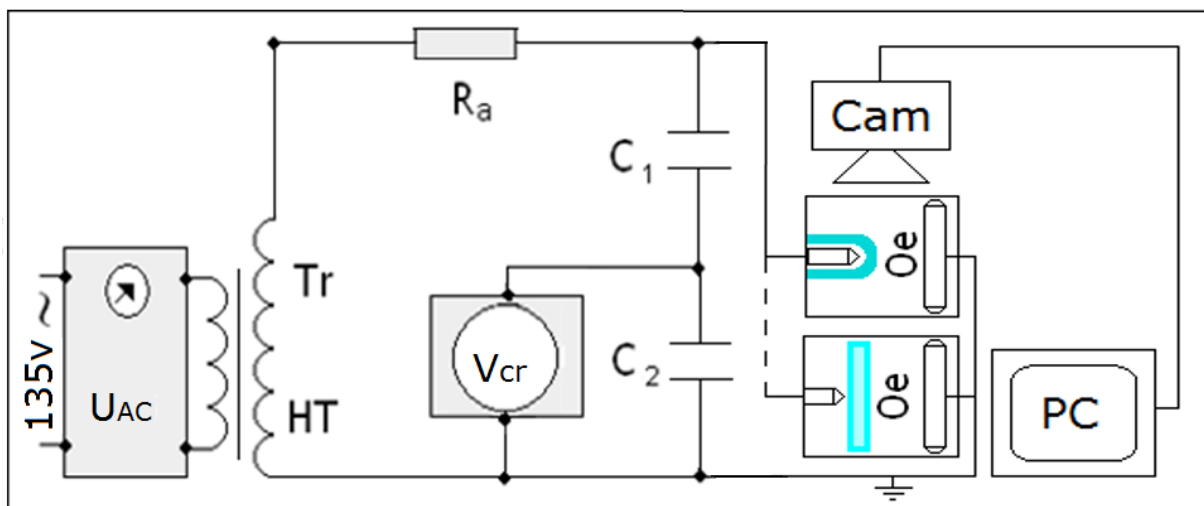


Fig. III. 6: Schéma de mesure et de visualisation. (U_{AC} : Appareil de Commande manuelle ou automatique du transformateur, Tr: Transformateur BT/HT, Cam: Caméscope numérique, PC: Ecran de PC, O_e : Objet d'essai)

III. 2. 4 Correction des résultats de tension en fonction des conditions atmosphériques

Pour chacun des paramètres d'influence investigués dans ce travail, une série de 20 essais a été réalisée. La valeur moyenne arithmétique de la tension disruptive de l'intervalle d'air du système a été déterminée.

La valeur moyenne et l'écart type de la tension de disruption de l'espace d'air du système pointe – barrière – plan sont déterminés par les formules (III. 1 et 2):

$$U_{em} = \sum_{1}^N \frac{U_{iem}}{n} \quad (III.1)$$

$$RSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (U_{iem} - U_{em})^2}{N-1}} \cdot \frac{100\%}{U_{em}} \quad (\text{III. 2})$$

Où U_{em} : Moyenne de la tension disruptive mesurée (kV);

U_{iem} : Tension appliquée obtenue à partir du test dans le temps de i (kV); N est le total des temps du test valide, $N = 20$; RSD est l'écart type relatif du résultat du test.

La tension disruptive de l'intervalle d'air à champ électrique non uniforme avec barrière est liée à la température ambiante, à la pression et à l'humidité de l'air régnant dans le laboratoire et que les différents tests n'ont pas été effectués pendant la même période. Afin de comparer la tension alternative de disruption de l'espace d'air suscitée, tous les résultats obtenus ont été ramenés aux conditions normales de température θ_0 , pression P_0 et humidité H_0 ($\theta_0 = 20^\circ \text{C}$, $P_0 = 100 \text{ kPa}$ et $H_0 = 11 \text{ g/m}^3$) en utilisant les relations données au référence [47].

$$U_e = \frac{K_H}{K_d} U_{em} \quad (\text{III. 3})$$

Avec:

U_{em} : Tension disruptive de l'intervalle d'air à champ électrique non uniforme avec barrière, mesurée à la température θ et à la pression P et à l'humidité H : donnée par la formule (III. 1);

U_e : Tension disruptive de cet intervalle d'air dans des conditions normales (θ_0 , P_0 et H_{r0}).

K_d : Facteur de correction relatif à la température et à la pression dont l'expression a la forme:

$$K_d = \frac{2.93P}{(273 + \theta)} \quad (\text{III. 4})$$

Où P : Pression en kPa et θ : Température en $^\circ \text{C}$.

K_H : Facteur de correction relatif à l'humidité. Sa valeur est déduite des graphiques donnés en référence [47].

La bonne répétition des techniques de mesure utilisée dans ces travaux ont donné une erreur relative maximale égale à 5% de la valeur moyenne arithmétique.

III. 3 Logiciel de simulation

III. 3. 1 Présentation du modèle mathématique

Les modèles numériques et les modélisations associées ont été réalisés avec le logiciel commercial d'éléments finis COMSOL Multiphysics version 5.4. C'est un logiciel conçu par l'entreprise «Comsol » qui est fondée en 1986. Elle se spécialise dans le domaine de

développement de logiciels de support technique et de formation spécialisé et de conseil, développé au Royal Institute of Technology (Suède). Le logiciel est utilisé par plusieurs grandes entreprises à travers le monde. Il est possible de modéliser et simuler tout système basé sur la physique en utilisant un logiciel de COMSOL qui est un outil très employé dans des secteurs divers de recherche, car il facilite amplement les étapes de modélisation et de simulation, soit : la définition de la géométrie, des propriétés physiques des matériaux présents et des conditions aux frontières, le maillage, la résolution et l'affichage des résultats. 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. 2 Résolution par la méthode d'éléments finis

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

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \quad (\text{III. 5})$$

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

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

$$\vec{E} = -\vec{\nabla} \cdot V \quad (\text{III. 6})$$

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

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} \cdot \vec{H} = \vec{\nabla} \cdot \left[\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right] \quad (\text{III. 7})$$

Où \vec{J} et $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ représentent respectivement la densité de courant de conduction ($\vec{J} = \vec{E}$) et la densité de courant de déplacement ($D = \epsilon_r \epsilon_0 E$).

Avec la loi de Gauss, $\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho$ et l'équation de continuité, le logiciel résout l'équation III. 7 en utilisant le domaine des pas de temps pour obtenir le potentiel électrique et les distributions de champ.

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (\text{III. 8})$$

Où ρ est la densité de charge, ϵ est la permittivité du matériau diélectrique ($\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$), ϵ_0 la permittivité du vide (8.854×10^{-12} F/m) et ϵ_r est la permittivité relative du matériau diélectrique. L'équation de Poisson peut être obtenue en substituant la relation III. 6 dans l'équation III. 8.

$$\nabla^2 \cdot V = - \frac{\rho}{\epsilon} \quad (\text{III. 9})$$

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

$$\nabla^2 \cdot V = 0 \quad (\text{III. 10})$$

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

$$\nabla \cdot \epsilon \cdot \nabla V = 0 \quad (\text{III. 11})$$

$$-\nabla \cdot \frac{\partial}{\partial t} (\epsilon_0 \epsilon_r \nabla V) - \nabla \cdot (\sigma \nabla V) = 0 \quad (\text{III. 12})$$

Dans notre étude, on néglige la variation de la densité de charge d'espace.

III. 3. 3 Présentation et propriété du model géométrique utilisé

Le modèle géométrique utilisé est basé sur le modèle expérimental (Fig. III. 1c et III. 3b). La figure III. 7 représente les barrières utilisées comme le modèle de simulation, celui-ci est conçu sous la forme d'un tube en silicone et une barrière plane, carré. Deux électrodes en cuivre sont

placées aux deux extrémités, un plan et une tige pointue, de manière à obtenir un champ E non uniforme dans l'air (Fig III. 7d). La distance séparant les deux électrodes est prise égale à 4 ou 14 cm. Les propriétés physiques des matériaux utilisés dans ce modèle sont résumées dans le tableau III. 1.

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

Matériaux	Permittivité relative	Conductivité électrique (S/m)
Air	1	3.6×10^{-9}
Cuivre	1	5.9×10^7
silicone	3.9	1×10^{-12}
Eau	/	25×10^{-3}

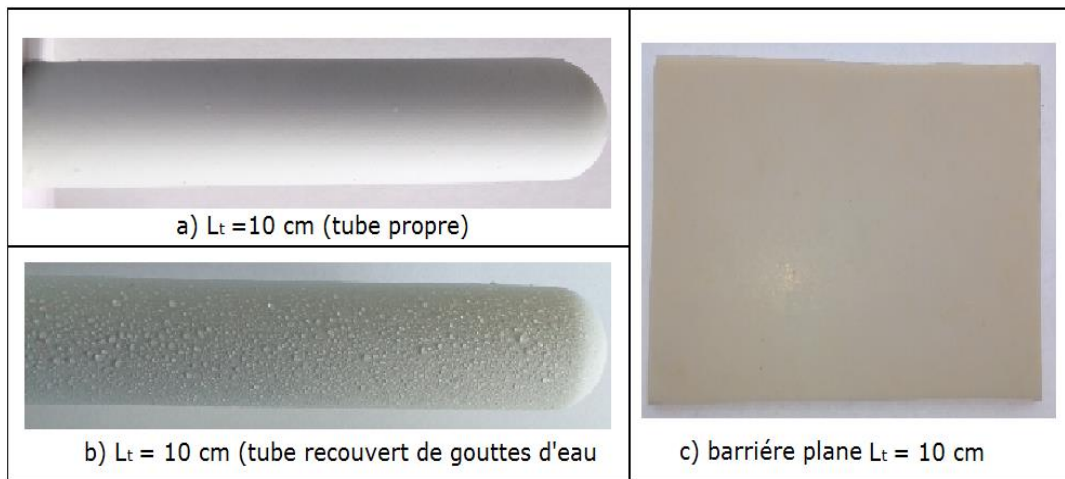


Fig. III. 7: Différents types de barrière

III.4 Résultats et discussion

III. 4. 1 Barrière plane

Dans cette étude, les calculs numériques sont effectués à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics 5.4 basé sur les éléments finis. Notre travail dans cette partie consiste en la visualisation du chemin de la décharge électrique et la simulation de la distribution de champ électrique d'une configuration pointe – plan sans ou avec barrière plane en silicone, tel que les paramètres d'influence sont la longueur du plan (L_p) et la longueur de la barrière (L_b).

III. 4. 1. 1 Système pointe – plan

Les deux figures III. 8 et III. 9 représentent le champ électrique et le chemin de la décharge dans la configuration pointe – plan sans barrière, la différence réside dans la longueur du plan, 40 cm pour la figure III. 8 (plan infini) et 10 cm pour la figure III. 9 (plan fini).

Nous remarquons que dans le cas d'un plan grand de 40 cm (Fig. III. 8), les lignes de champ dans ce système suivent un chemin direct allant de l'électrode haute tension vers toute la surface du plan mis à la terre (Fig. III. 8a). Ceci est confirmé pratiquement par le chemin de la décharge qui part également de l'extrémité de la pointe vers le centre du plan (Fig. III. 8b). Par conséquent, nous remarquons aussi que la concentration du champ est très forte entre l'extrémité de la pointe et le centre du plan (Fig. III. 8c), ce qui est clairement défini sur la figure (Fig. III. 8d), qui montre que le maillage est très serré sur la surface du plan et autour de la tige, mais il est très intense à son extrémité. Par contre, dans le cas d'un plan petit de 10 cm (Fig. III. 9) les lignes de champs suivent un chemin direct de l'électrode haute tension vers les deux extrémités de l'électrode mise à la terre (Fig. III. 9a), ceci est confirmé pratiquement par le chemin de la décharge qui part aussi de la fin de la pointe vers la limite du plan (Fig. III. 9b). De plus, nous remarquons l'intensité de champ est très forte entre la fin de la pointe et les deux extrémités du plan (Fig. III. 9c), ce qui est bien déterminé sur le maillage discrétisé du système qui est très serré sur la surface du plan et autour de la tige, mais il est très intense aux borne de la tige et aux deux extrémités de l'électrode du plan (Fig. III. 9d).

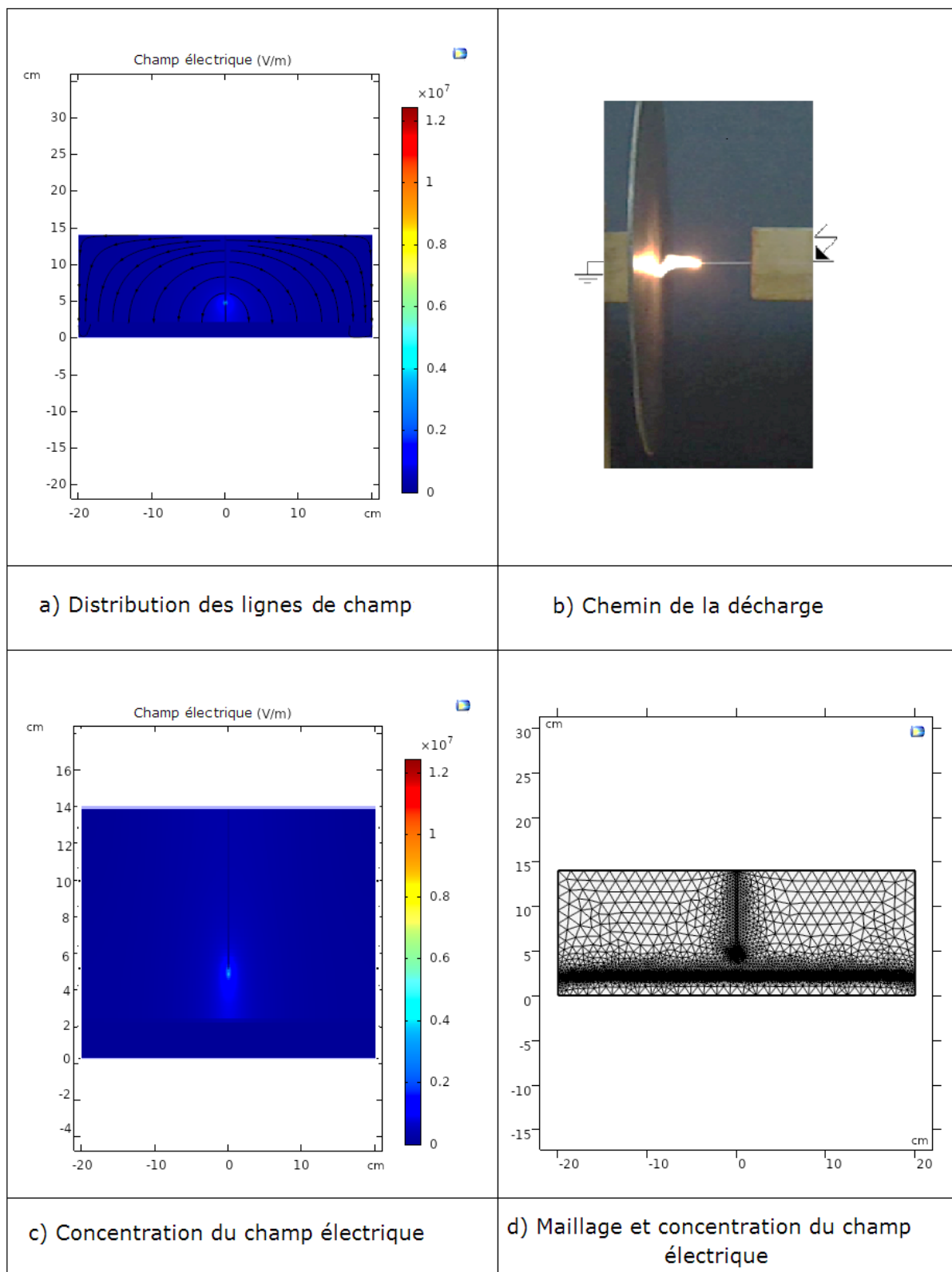


Fig. III. 8: Représentation de champ électrique et chemin de la décharge dans le cas de la configuration pointe – plan grand ($L_p = 40$ cm)

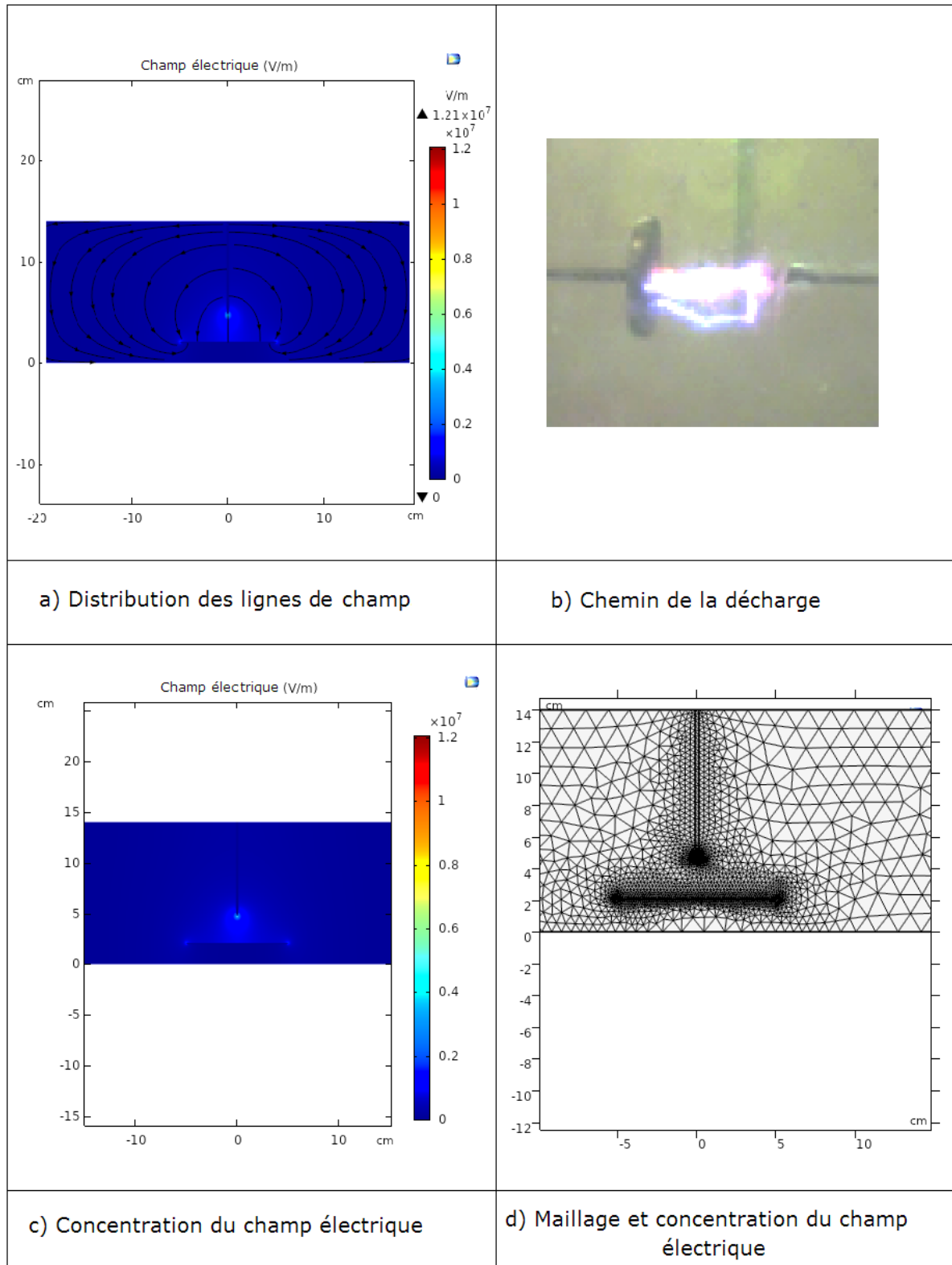


Fig. III. 9: Représentation de champ électrique et chemin de la décharge dans le cas de la configuration pointe – plan petit ($L_p = 10$ cm)

III. 4. 1 .2 Système pointe – barrière plane – plan

Les deux figures III. 10 et III. 11 illustrent le champ électrique le chemin de la décharge dans la configuration pointe – barrière plane en silicone - plan, la différence réside toujours dans la longueur du plan, 40 cm pour la figure III. 8 (plan infini), 10 cm pour la figure III. 9 (plan fini), et la longueur de la barrière est 10 cm pour les deux cas. Les deux figures III. 10 et III. 11 montrent que la présence de la barrière en silicone modifie la distribution de champ électrique entre les deux électrodes par rapport au cas de sans barrière (Fig III. 8 et III. 9).

Nous remarquons que dans le cas d'un plan grand de 40 cm (Fig. III. 10) les lignes de champ qui ne touchent pas la barrière sont incurvées et vont directement de la pointe vers le plan, par contre, celles qui touchent la barrière sortent de l'électrode haute tension et se déforment dès qu'elle touche la barrière puis elles suivent le chemin propageant sur la surface isolante jusqu'au bord, ensuite se dirigent vers l'électrode mise à la terre (Fig. III. 8a). Ce phénomène est bien visualisé en utilisant une barrière de 20 cm sur la Figure ci-dessus (Fig. III. 12). Cette répartition de ligne de champ explique et confirme le chemin de la décharge qui sort de la pointe en glissant sur la surface de la barrière jusqu'au bord puis ce dirige dans l'air vers le plan (Fig. III. 10b). Il est à remarquer aussi que l'intensité de champ est très forte entre l'extrémité de la pointe, la barrière et le centre du plan (Fig. III. 10c), ce qui est clairement défini sur la figure (Fig. III. 10d) qui montre que le maillage est très serré autour de la tige, la barrière et la surface de l'électrode plane. Idem pour le cas d'un plan petit de 10 cm (Fig. III. 11), le même phénomène se reproduit par rapport au plan de 40 cm juste que les lignes de champs se dirigent aux deux extrémités du plan et non pas au centre (Fig. III. 11a). Ceci est confirmé pratiquement par le chemin de la décharge (Fig. III. 11b). De plus, nous remarquons une concentration de champ (Fig. III. 11c), et accumulation de charges (Fig. III. 11d) au niveau des deux bords du plan, de la barrière et autour de la pointe qui est intense à son extrémité.

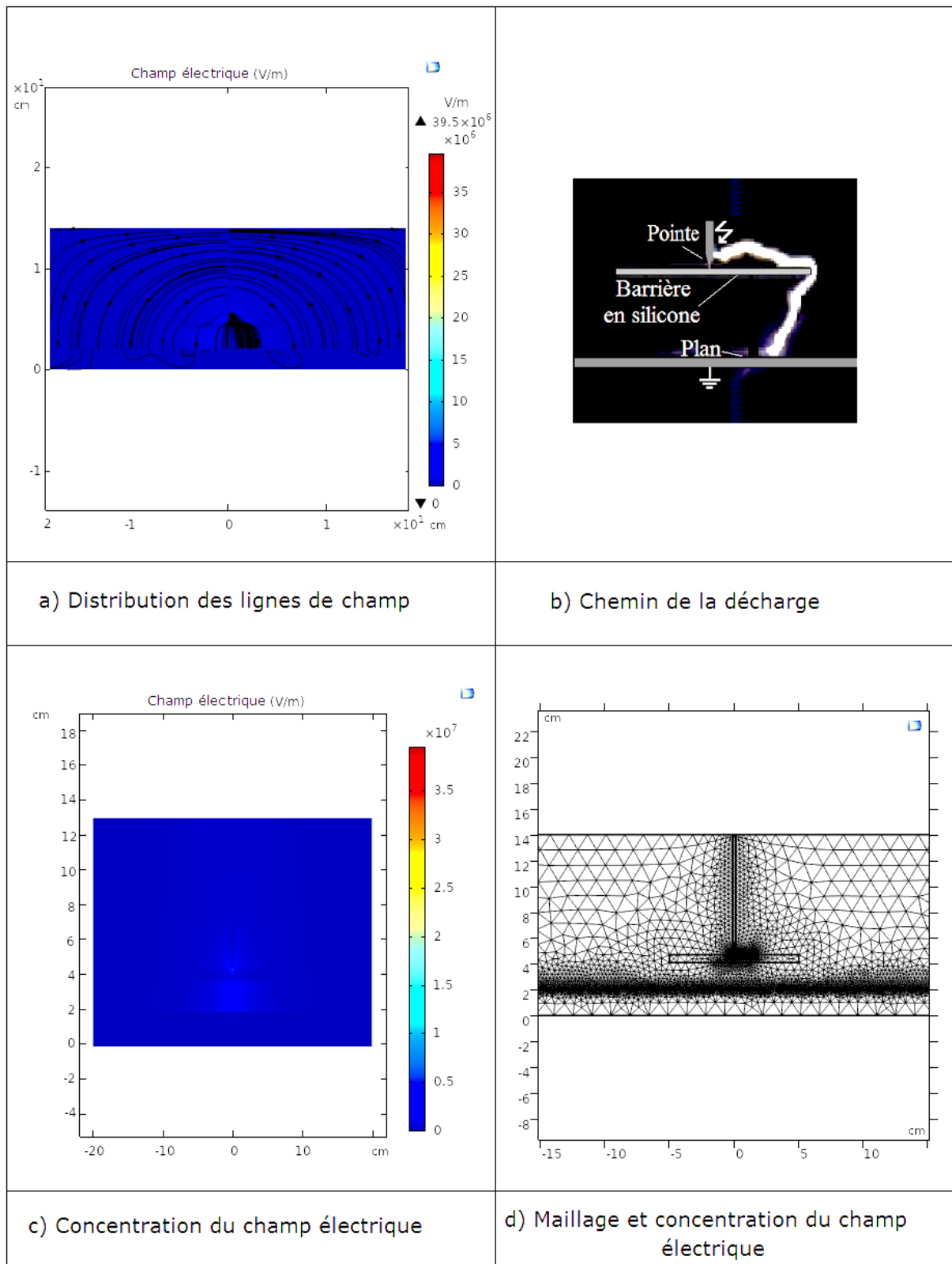


Fig. III. 10: Représentation de champ électrique et chemin de la décharge dans le cas de la configuration pointe – barrière plane – plan grand ($L_p = 40$ cm, $L_b = 10$ cm)

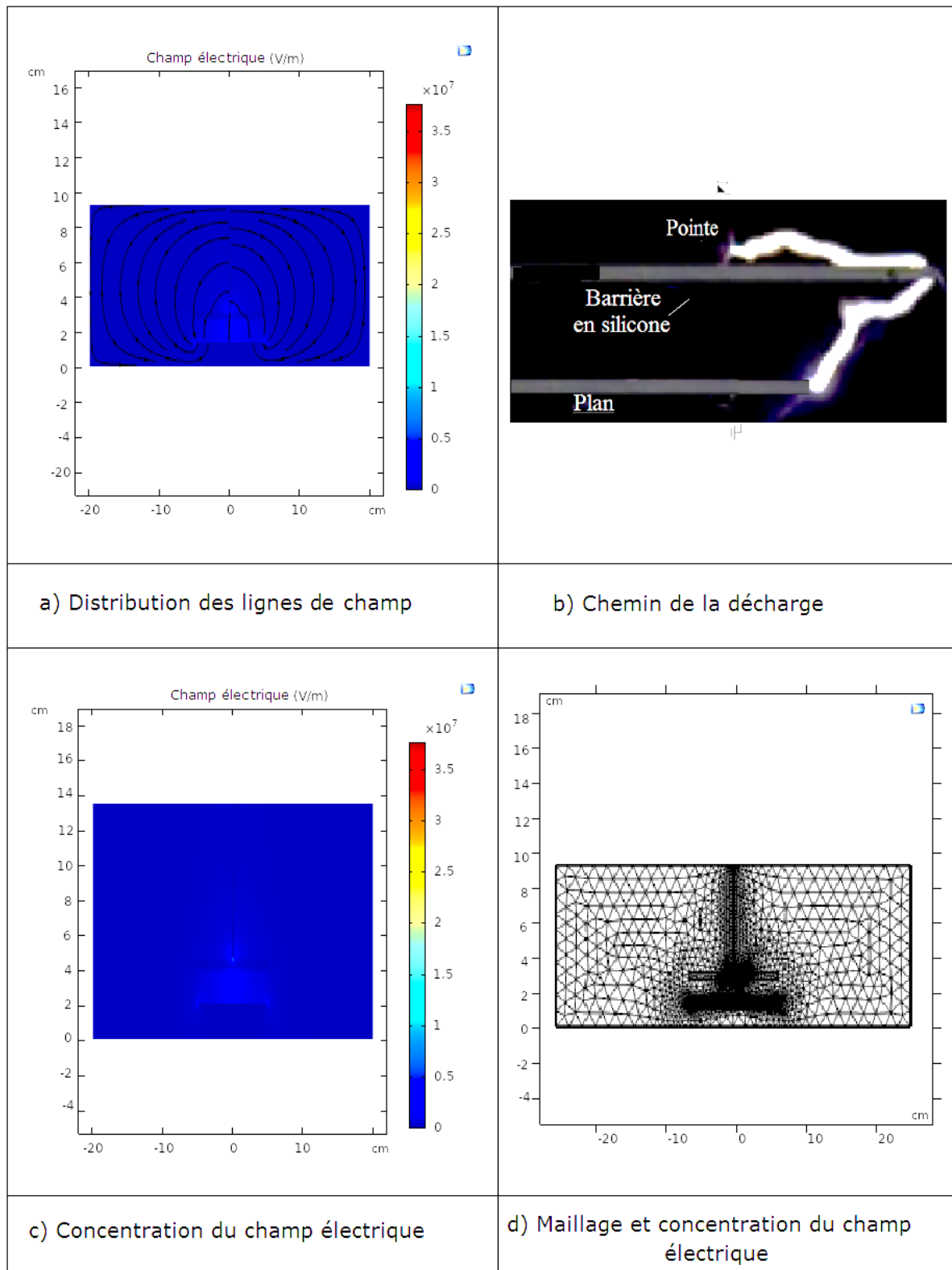


Fig. III. 11: Représentation de champ électrique et chemin de la décharge dans le cas de la configuration pointe – barrière plane – plan petit ($L_p = 10$ cm, $L_b = 10$ cm)

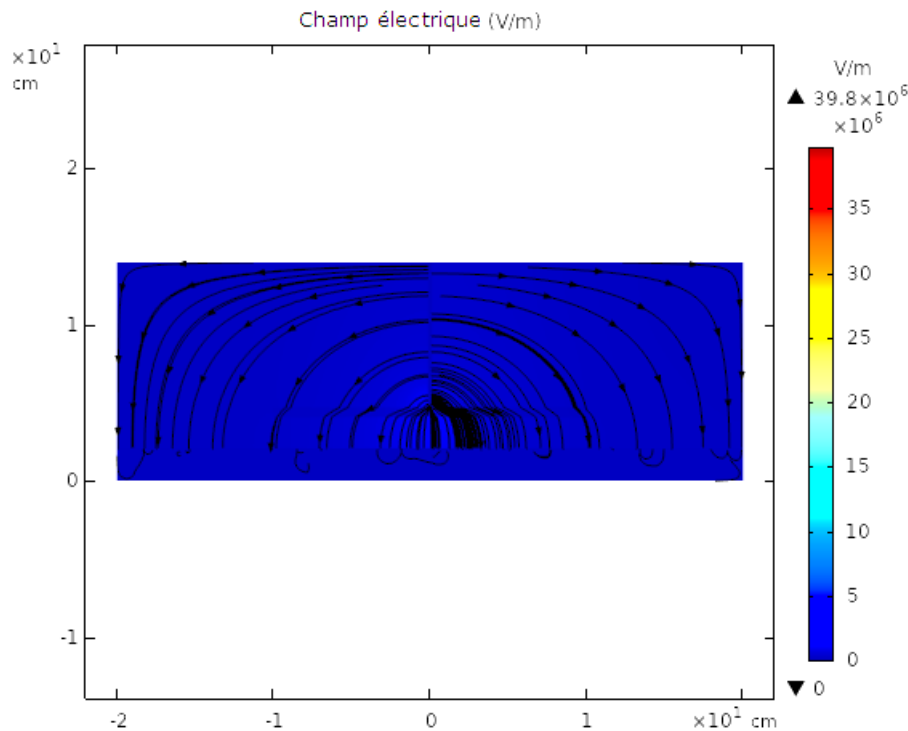


Fig. III. 12: Distribution des lignes de champ électrique de la configuration pointe – barrière plane – plan grand ($L_p = 40$ cm, $L_b = 20$ cm)

III. 4. 2 Barrière tubulaire

Notre travail dans cette partie consiste en la simulation de distribution de champ électrique d'une configuration pointe – plan sans et avec barrière tubulaire en silicone à l'aide de logiciel comsol multiphysics 5.4 basé sur les éléments finis, tel que, les paramètres d'influence sont la distance interélectrode 4 cm et 10 cm, la nature de l'atmosphère propre ou pollué toute en gardant la longueur de tube fixe à 10 cm.

III. 4. 2. 1 Système pointe nue - plan

La figure III. 13 montre la simulation des lignes de champ électrique d'un système pointe – plan sans barrière électrique. Cela va servir comme référence pour la suite du travail. L'étude de la distribution de champ électrique dans cette configuration est très intéressante, vu qu'en haute tension, l'effet de pointe intervient toujours d'une manière ou d'une autre.

Les lignes de champ représentées en noir sur la figure III. 13 représentent l'orientation de champ électrique résultant en électrode sous haute. Ces lignes sont continuées, Elles sont produites par l'électrode pointue et se propagent jusqu'au plan mis à la terre.

Une concentration de ces dernier est remarquable au niveau de l'extrémité de la pointe et elles se dirigent vers le centre du plan. Les lignes bleues expriment les lignes équipotentielles. Elles sont sous forme de courbe et elles sont constamment perpendiculaires à la ligne du champ.

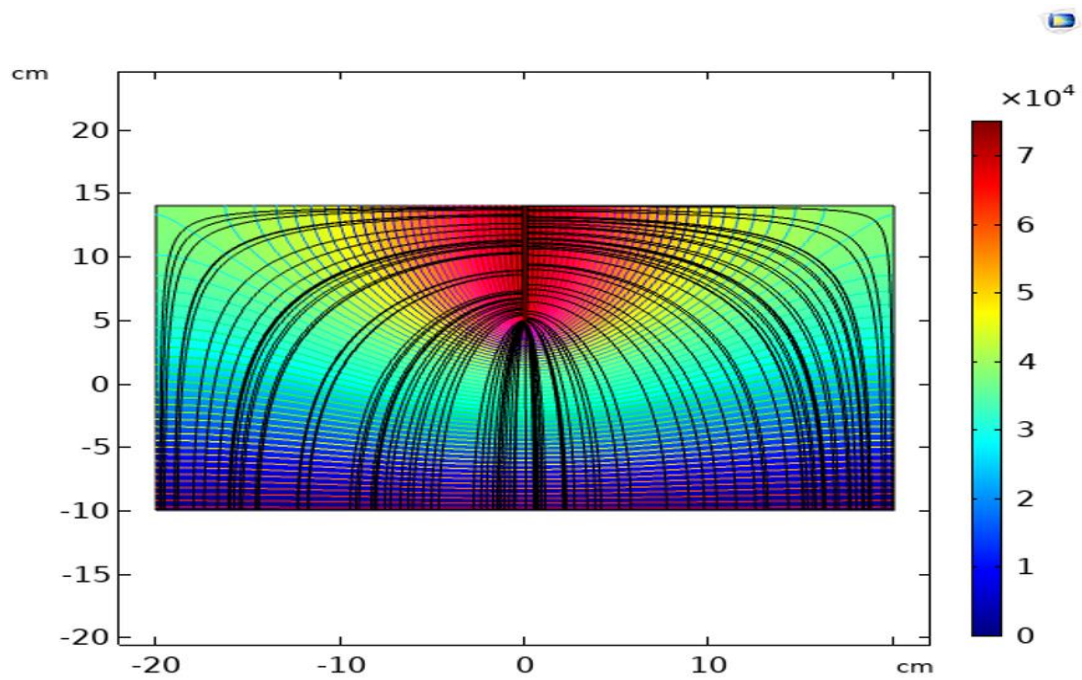


Fig. III. 13: Distribution des lignes équipotentielles et de champ électrique d'un système pointe - plan

III. 4. 2. 2 Barrière tubulaire propre et sèche

La figure III. 14 donne l'allure de la tension de disruption de l'espace d'air du système avec ou sans barrière tubulaire en silicone, de longueur égale à 10 cm, en fonction de la distance interélectrode sous atmosphère propre et sèche. Il en découle un écart considérable entre les tensions disruptives de l'intervalle d'air du système avec ou sans barrière.

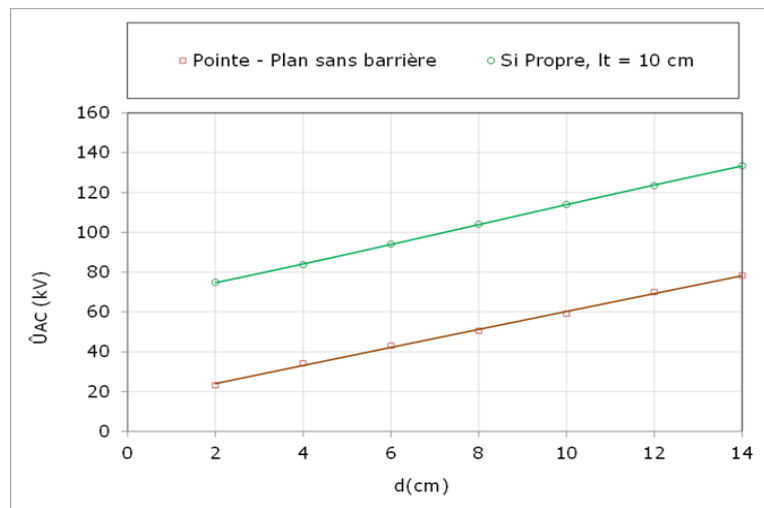


Fig. III. 14: Tension disruptive de l'espace d'air du système avec ou sans barrière tubulaire en fonction de la distance interélectrode dans une atmosphère propre et sèche ($L_t = 10$ cm)

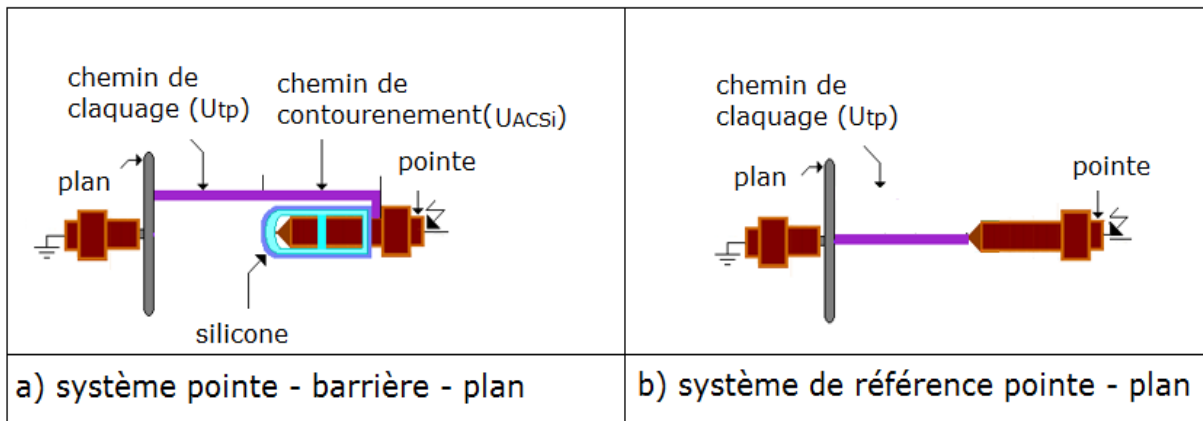


Fig. III. 15: Chemin de contournement d'un système point – barrière tubulaire en silicone – plan sous atmosphère propre et sèche

Sous atmosphère propre et sèche, il résulte de la figure III. 14, une tension de contournement de la barrière en silicone (U_{ACSi}) allant de 47 à 54 kV l'intervalle d'air compris entre 2 et 14 cm. Sa valeur augmente avec l'élévation de la distance interélectrode. Cette augmentation est due probablement au caractère très aléatoire du trajet décrit par la décharge disruptive de l'espace d'air du système pour des grandes distances. En effet, pour de longs intervalles d'air, les charges d'espace nécessaires à la propagation de la décharge électrique vers l'électrode terre ne se trouvent pas toujours sur une ligne droite, mais plutôt sur un chemin sinueux de longueur plus élevée et correspondant à une tension disruptive plus grande. Ce résultat est en très bonne conformité avec celui obtenu en référence [26].

La caractérisation de cet écart est subordonnée à l'utilisation du modèle de disruption d'un espace d'air d'un système pointe - barrière plane - plan, développé en références [6, 9]. En effet, la tension de disruption de l'intervalle d'air point-barrière tubulaire-plan U_b (kV) sous atmosphère propre et sèche est de la forme [6, 9]:

$$U_b = U_{cb} + U_{tp} \quad (\text{III. 11})$$

Avec :

U_{cb} (kV): Tension de contournement de la barrière tubulaire en silicone par la décharge électrique suivant sa longueur totale L_t [91]. Son symbole est U_{ACSi} (Figs. 14a, 15 et 16).

U_{tp} (kV): Tension de claquage de l'intervalle d'air compris entre l'extrémité fermée du tube et le plan mis à la terre (Figs. 15a, 16 et 17).

En absence de la barrière, la tension disruptive du système pointe-plan U_s (kV) a pour expression:

$$U_s = U_{rp} \quad (\text{III. 12})$$

Où :

U_{rp} (kV) est la tension d'amorçage de l'espace d'air compris entre la pointe sous tension et le plan mis à la terre (Fig. III. 15b).

À partir des équations III. 11 et 12, nous pouvons déduire sous atmosphère propre et sèche l'expression III. 13:

$$\Delta U = U_b - U_s = U_{cb} \quad (\text{III. 13})$$

Où :

ΔU est l'écart entre les tensions disruptives de l'intervalle d'air du système pointe – plan avec et sans barrière sous atmosphère propre et sèche

Selon les relations III. 13, cet écart ΔU représente tout simplement la tension de contournement de la barrière tubulaire sous atmosphère propre. Moyennant le modèle de disruption développé dans cette étude et les résultats expérimentaux relatifs à la tension disruptive du système pointe - plan avec barrière isolante sous atmosphère propre, nous pouvons aisément quantifier la tension de contournement d'une barrière isolante en fonction de sa géométrie et du type de revêtement de sa surface sous une atmosphère quelconque et comparer leur performance électrique dans ces conditions.

Les figures III. 16 et 17 représentent le tracé des lignes de champ électrique et chemin de la décharge électrique d'un système pointe – barrière tubulaire en silicone – plan sous atmosphère propre et sèche, tel qu'on a fixé la longueur de tube $L_t = 10$ cm on variant la distance interélectrode $d = 14$ cm (Fig. III. 16) et $d = 04$ cm (Fig. III. 17). Les résultats de la simulation de la distribution du champ dans ce cas (Figs. III. 16a et 17a), montrent que les lignes équipotentielles sont parallèles aux lignes de champ. Ces dernières sortent de l'extrémité ouverte de tube en silicone et se propagent d'une façon non uniforme vers le plan, le même phénomène se reproduit quel que soit la distance interélectrode.

De plus, Nous avons remarqué une concentration des lignes de champ éloignées de la surface de tube hydrophobe. Ceci est confirmé par le chemin de la décharge électrique de rupture du système (Figs. III. 16b et 17b), qui ne sort jamais de la pointe de la tige sous tension. Elle émane toujours d'un point de la tige conductrice se trouvant à l'extrémité ouverte du tube et se propage dans l'air au-dessus de la surface du tube en silicone (Figs. III. 15a, 16b et 17b).

Ce phénomène d'écartement de la décharge électrique de la barrière a été bien observé lors des travaux de recherche effectués sur d'autres matériaux, mis sous tension impulsionnelle et publiés sous la référence [26]. Cet écart est étroitement relié à l'éloignement des lignes de

champ de la barrière en silicone ($\epsilon_{rsi} = 3.9$) et sa résistance électrique élevée. La décharge électrique progresse ensuite dans l'air en se dirigeant vers le plan mis à la terre.

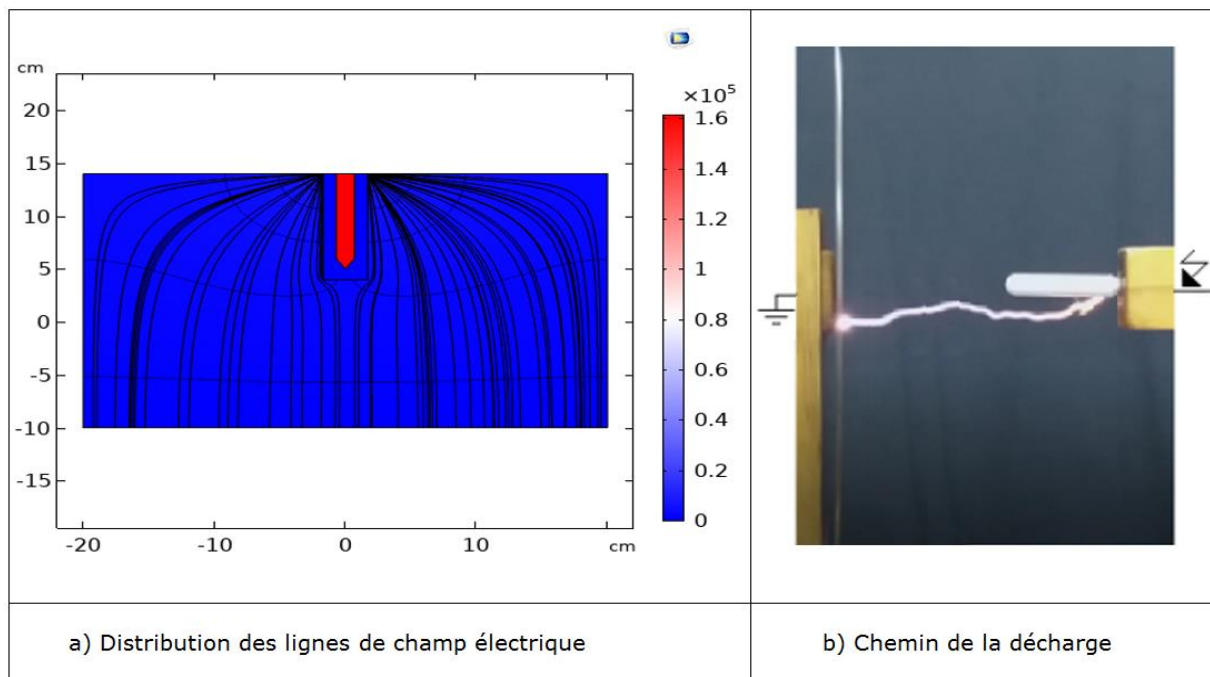


Fig. III. 16: Représentation de champ électrique et chemin de la décharge dans le cas de la configuration pointe – barrière tubulaire en silicone – plan sous atmosphère propre ($d = 14$ cm et $L_t = 10$ cm)

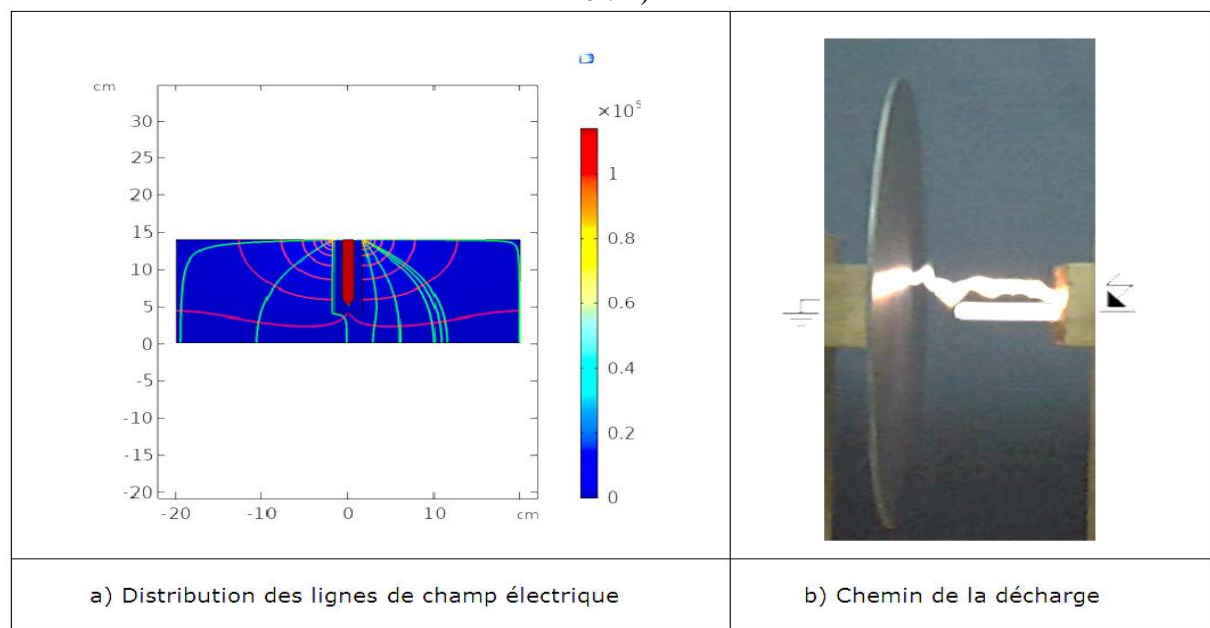


Fig. III. 17: Représentation de champ électrique et chemin de la décharge dans le cas de la configuration pointe – barrière tubulaire en silicone – plan sous atmosphère propre ($d = 04$ cm $L_t = 10$ cm)

III. 4. 2. 3 Barrière tubulaire polluée

La figure III. 18 donne l'allure de la tension disruptive de l'espace d'air du système sans ou avec barrière en silicone de longueur égale à 10 cm, en fonction de la distance interélectrode, sous atmosphère fortement polluée, mais celle-ci reste toujours inférieure à celle obtenue sous

atmosphère propre et sèche, indépendamment de ces paramètres d'influence. Il en résulte une oscillation de la tension de contournement d'une barrière en silicone hydrophobe (U'_{ACSi}) entre 34 et 50 kV dans l'intervalle d'air compris entre 2 et 14 cm.

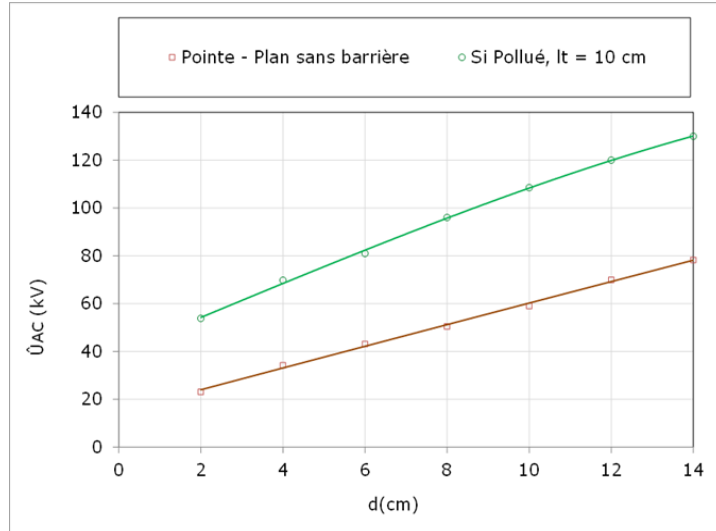


Fig. III. 18: Tension disruptive de l'espace d'air du système avec ou sans barrière en fonction de la nature de son revêtement et la distance interélectrode sous atmosphère fortement polluée ($\sigma_v = 25$ mS/cm)

En effet, la tension de disruption de l'intervalle d'air pointe - barrière tubulaire - plan U'_b (kV) Sous conditions de pollution très sévères est donnée par la relation suivante:

$$U'_b = U'_{cb} + U_{tp} \quad (\text{III. 14})$$

Avec :

U'_{cb} (kV) : Tension de contournement de la barrière tubulaire fortement polluée sur sa longueur totale L_t . Son symbole est U'_{ACSi} .

Sous conditions de pollution humide, nous obtenons l'égalité III. 15 à partir des formules III. 11 et 12:

$$\Delta U' = U'_b - U'_s = U'_{cb} \quad (\text{III. 15})$$

Où :

$\Delta U'$ est l'écart entre les tensions disruptives de l'intervalle d'air du système pointe – plan avec et sans barrière sous conditions de pollution

Selon la relation III. 15, cet écart $\Delta U'$ représente tout simplement la tension de contournement de la barrière tubulaire sous atmosphère polluée.

L'écart de 73 (kv) entre les deux extrémités interélectrode (Fig. III. 18) est dû à l'allongement du chemin de la décharge électrique le long de l'espace d'air (Fig. III. 19b).

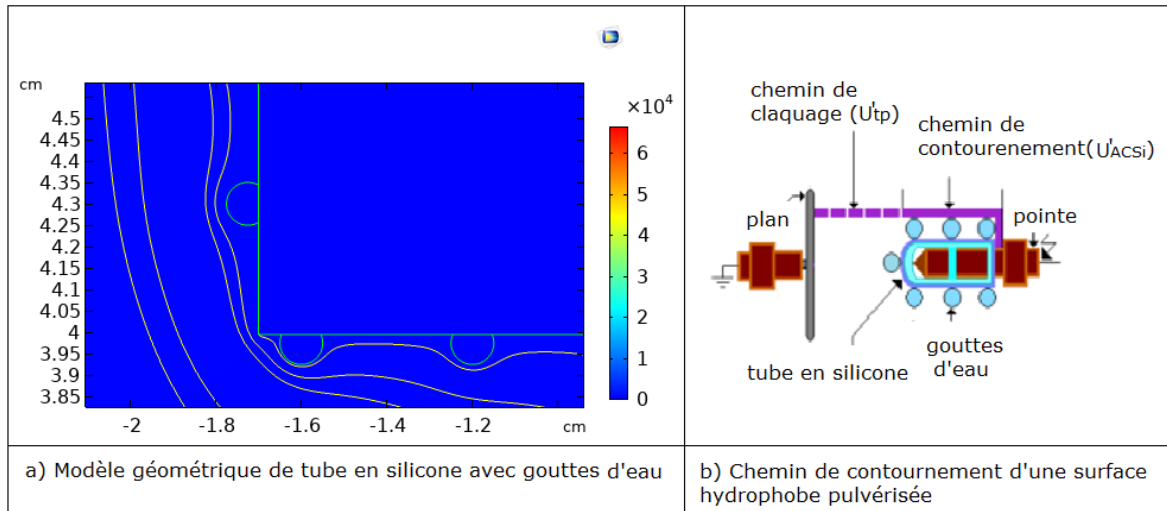


Fig. III. 19 : Propagation des lignes du champ sur le modèle géométrique de la barrière en silicone recouverte de gouttes d'eau et son chemin de contournement

Les figures III. 20 et 21 présentent une simulation des lignes de champ électrique et chemin de la décharge électrique d'un système pointe – barrière tubulaire en silicone – plan sous atmosphère polluée, tel qu'on a fixé la longueur de tube $L_t = 10$ cm et on varie la distance interélectrode $d = 14$ cm (Fig. III. 20) et $d = 04$ cm (Fig. III. 21). Les résultats de la simulation des lignes de champ sous conditions de pollution très sévères avec une conductivité $\sigma_v = 25$ mS/cm (Figs. III. 20a et III.21a), montrent que les lignes équipotentiels sont parallèles aux lignes de champ. Nous constatons que la présence des gouttes d'eau provoquent une distorsion considérable dans la trajectoire des lignes de champ électrique au voisinage de la surface polluée (Fig. III. 19a). Les lignes de champ sortent de l'extrémité ouverte de tube en silicone et se propagent sur toute la longueur de la barrière puis se rassemblent à l'extrémité fermée de tube allant tout droit vers le milieu du plan où l'intensité de champ électrique est significativement augmentée à l'interface des gouttes d'eau, de l'espace d'air entre ces dernières et de la surface isolante, ceci se reproduit quel que soit la distance interélectrode.

Ce phénomène de distribution des lignes de champ a été prouvé par le chemin de la décharge sous conditions de pollution très sévères (Figs. III. 19, 20b et 21b), ces figures montrent le chemin d'une décharge de contournement de la barrière en silicone reliant les différentes gouttes très conductrices se trouvant le long de la longueur du tube.

Ce trajet est plus court que celui décrit par la décharge électrique disruptive de l'espace d'air du même système dans le cas d'une barrière en silicone propre. Ceci justifie l'écart de tension disruptive existant entre ce même système avec barrière en silicone propre et polluée.

Enfin la silicone reste résistante même sous pollution très sévère et elle offre une bonne protection au système.

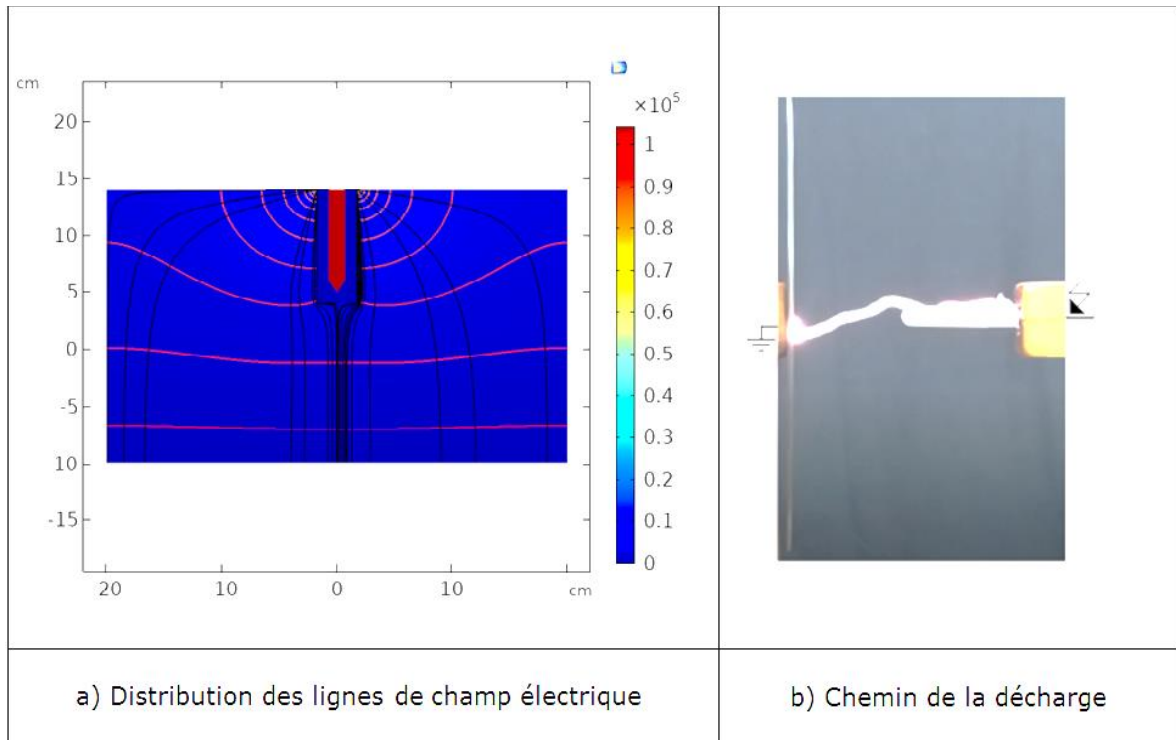


Fig. III. 20: Représentation de champ électrique et chemin de la décharge dans le cas de la configuration pointe – barrière tubulaire en silicone – plan sous atmosphère polluée ($d = 14 \text{ cm}$ $L_t = 10 \text{ cm}$)

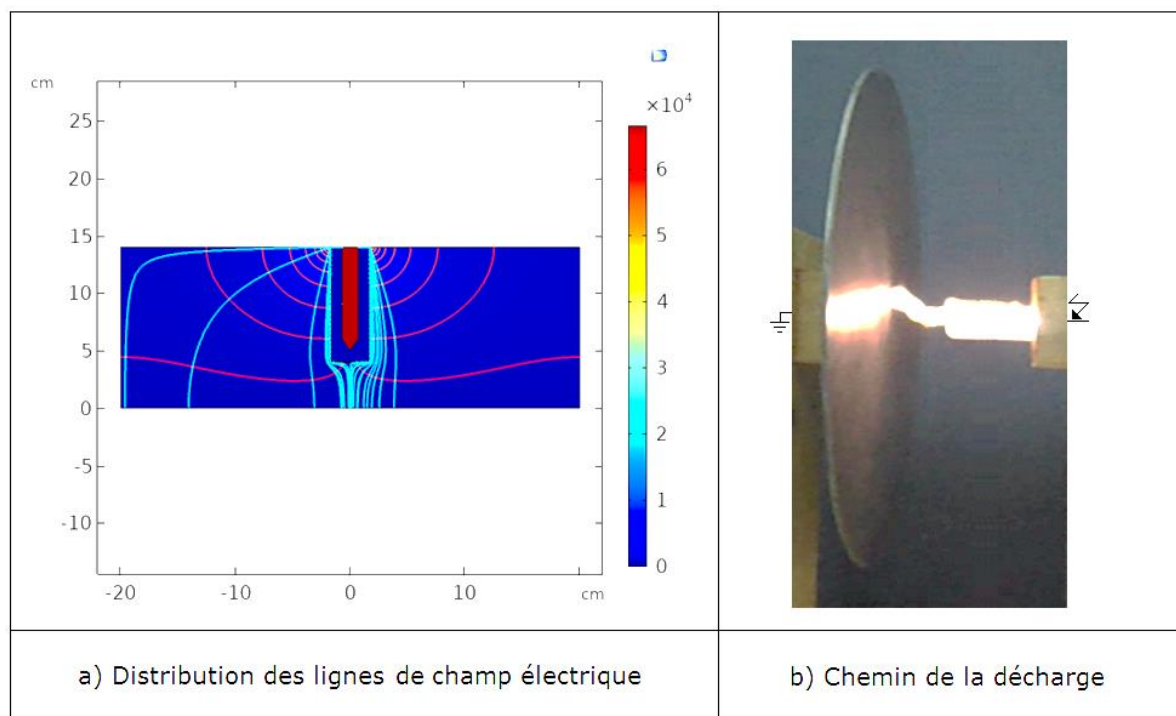


Fig. III. 21: Représentation du champ électrique et chemin de la décharge dans le cas de la configuration pointe – barrière tubulaire en silicone – plan sous atmosphère pollué ($d = 14 \text{ cm}$ $L_t = 10 \text{ cm}$)

III. 4. 3 Comparaison de la performance des barrières planes et tubulaires

La comparaison de la performance électrique des barrières tubulaires et planes sous conditions de pollution très sévères, de mêmes dimensions et tension alternative a été élaborée.

La figure 22 donne l'allure des tensions disruptives d'un système pointe-plan avec barrières planes et tubulaires en verre et en silicone de même largeur 10 cm sous une atmosphère polluée. Nous appuierons cette étude par des travaux déjà réalisés [6, 9, 26].

Il en résulte que pour une barrière carrée, de 10 cm de côtés, la valeur maximale de la rigidité du système est obtenue lorsque celle-ci est en contact avec la pointe sous tension ($a/d = 0\%$).

Le trajet de disruption du même système avec barrière plane propre et sèche est composé du trajet de contournement de la moitié de sa taille et du chemin de claquage de l'intervalle d'air séparant le bord de la barrière et le plan mis à la terre (Fig. III. 23a).

Sous une atmosphère polluée, il résulte de la figure 22 une superposition des courbes de tension disruptive du système obtenues en présence de la barrière fortement polluée ($L_b = 10\text{ cm}$) ou en son absence. Ce déclin très important de la tension disruptive du système est dû tout simplement à l'annulation de la tension de contournement de la barrière hydrophile fortement contaminée à cause de la suppression de la décharge de contournement de la barrière (Fig. III. 23b) du fait de son comportement conducteur sous conditions de pollution très sévères, ceci offre une protection très médiocre au système. Sous atmosphère propre, la décharge de contournement s'établit le long de la longueur totale du tube en silicone, de 10 cm (Fig. III. 19). Par contre dans le cas de la barrière plane, c'est seulement la moitié de sa taille ($l_b/2 = 5\text{ cm}$) qui est contournée, puisque la décharge électrique de son contournement part de la pointe en contact avec le milieu de la barrière vers son bord (Fig. 23a). La tension de contournement de la barrière tubulaire en verre polluée (Fig. III. 23d) est presque nulle. Ceci peut être justifié par le fait que pour $\sigma_v = 25\text{ mS/cm}$, la couche de pollution appliquée sur la surface du tube en verre est tellement conductrice que la décharge disruptive du système sort de l'extrémité fermée du tube en face de la pointe sous tension et se propage dans l'air vers le centre du plan à la terre.

Une amélioration considérable de la performance du système est remarquée avec l'insertion d'une barrière tubulaire carrée en silicone. Ceci peut être expliqué par le fait que le chemin de contournement de la barrière plane en silicone est plus long (Fig. III. 10b) ainsi que la matière de silicone est plus résistante. La tension disruptive de barrière tubulaire en silicone est plus grande que tous les cas précédents (Fig. III. 22). Ceci est mis en évidence par le schéma explicatif illustré par les figures III. 19b, 20b et 21b.

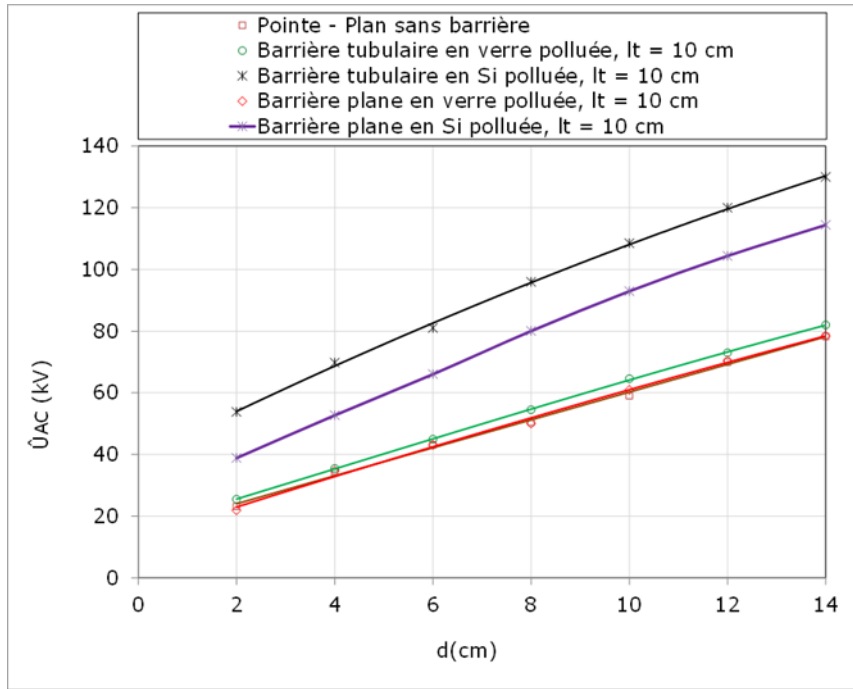


Fig. III. 22: Comparaison de la performance électrique d'un système pointe - plan avec barrières tubulaires et planes en verre et en silicone sous atmosphère polluée

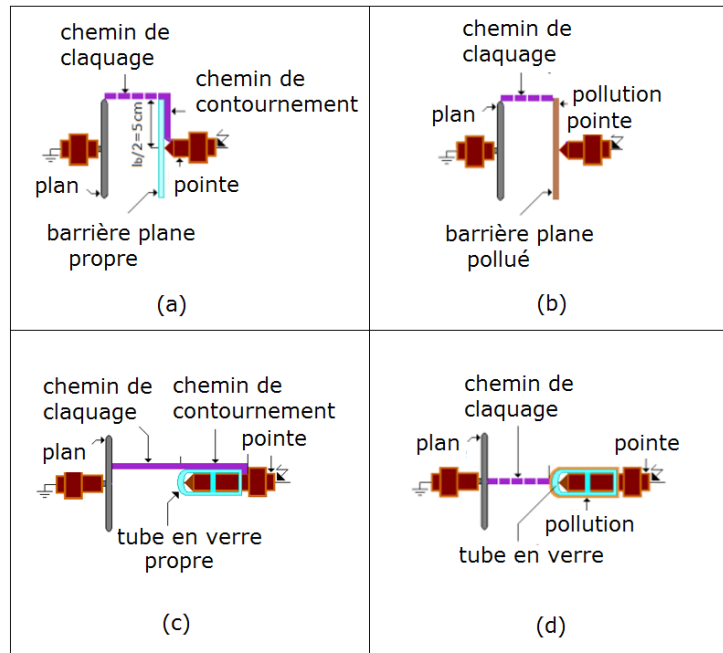


Fig. III. 23: Chemin de contournement de la barrière en verre plane et tubulaire dans des conditions de pollution sévères (a: Chemin de contournement d'une barrière plane en verre et en silicone propre, b: Chemin de disruption d'une barrière plane en verre polluée, c: Chemin de contournement d'une barrière tubulaire en verre propre, d: Chemin de disruption d'une barrière tubulaire en verre polluée)

La différence de la tension disruptive entre les deux profils de barrières est justifiée d'une part par la présence de la décharge de contournement de la barrière tubulaire en silicone propre et/ou polluée dont la tension résultante est différente de zéro (Fig. III. 19b) et d'autre part par l'absence totale de la décharge de contournement de la barrière plane et tubulaire en verre

fortement contaminée du fait de son comportement conducteur dans ce cas et dont la tension résultante est nulle (Fig. III. 23b et 23d). Finalement la barrière tubulaire en silicone offre une protection meilleure pour le système contrairement à la barrière plane, de plus économiquement parlant les moyens de fixation de la barrière plane sont plus coûteux que pour la barrière tubulaire.

III. 5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons utilisé un outil de calcul basé sur la méthode des éléments finis (logiciel COMSOL) pour décrire la distribution des lignes de champ dans un système non uniforme protégé par des barrières tubulaires et planes en silicone de différentes distance interélectrode dans une atmosphère quelconque et mises sous tension alternative ensuite les confirmé avec les résultats pratiques. Les résultats essentiels issus de cette étude sont résumés comme suit:

- Le logiciel COMSOL 5.4 nous permet de prédire la distribution de champ électrique dans un système pointe – plan avec barrière tubulaire et plane propre ou polluée sous tension alternative.
- Avec l'utilisation des barrières planes le champ électrique maximal a été observé autour de la pointe et le centre du plan lorsque ce dernier est grand par contre, quand le plan est petit la concentration du champ était autour de la pointe aussi et aux deux extrémités du plan. D'après ces résultats, nous concluons que lorsque le plan est grand on a la possibilité d'avoir plus de décharge contrairement au cas d'un plan petit.
- La combinaison de l'expérimentation obtenus à partir de l'étude de la tension disruptive du système pointe – plan en fonction de la forme de la barrière, nous a permis à caractériser le pouvoir d'isolement du dit système à partir de la quantification de la tension de contournement de cette barrière sous une atmosphère quelconque.
- Sous atmosphère propre et sèche, la tension disruptive de l'intervalle d'air du système avec barrière tubulaire croît avec l'élévation de la distance interélectrode, et les lignes de champs s'éloignent de la barrière et progressent vers le plan. Cette performance électrique est obtenue à partir de l'allongement du chemin de disruption du système, dû à l'écartement assez important de la décharge de contournement de sa surface.
- Sous conditions très sévères de pollution, les lignes de champ collent sur la surface de la barrière. Ceci est dû au chemin de contournement de la décharge de la barrière en silicone reliant les différentes gouttes très conductrices se trouvant le long de la longueur

du tube. Celle-là reste résistante même en condition de pollution très sévère et offre une bonne protection au système.

- Dans l'intervalle d'air compris entre 2 et 14 cm, la performance électrique d'une barrière tubulaire en silicone est plus élevée que celle d'une barrière plane en verre et silicone. De même la barrière suscitée représente une performance meilleure que la barrière tubulaire en verre de même longueur de 10 cm sous une atmosphère quelconque. Cela est expliqué, par l'infériorisation du chemin de contournement de la barrière plane en verre sous atmosphère propre et sèche, et de l'annulation de la tension de contournement de sa surface, du fait de son comportement très conducteur sous conditions de pollution très sévères. De plus les moyens de fixation de cette dernière sont plus coûteux par rapport à la première. Donc techniquement et économiquement parlant, il est vivement souhaitable de remplacer la barrière plane hydrophile par celle tubulaire hydrophobe.

Conclusion
Générale

Conclusion générale

Les résultats de recherche bibliographique sur les barrières hydrophobe, on fait ressortir de cette étude que malgré leur fort pouvoir d'isolement, l'application de ces dernières est encore à l'état embryonnaire bien que, sur la base de leur profil très adéquat, ils offrent une très grande opportunité à l'exploitation de cet avantage dans le domaine de l'énergie électrique.

Les résultats émanant de notre investigation, sont le fruit d'une étude qualitative par simulation de distribution des ligne du champ dans un système non uniforme protégé par des barrières tubulaires et planes en silicone de différentes distances interélectrodes dans une atmosphère quelconque et mises sous tension alternative ensuite les confirmer avec les résultats pratiques. Les résultats essentiels issus de cette étude sont résumés comme suit:

Le logiciel COMSOL 5.4 est utilisé pour la modélisation et simulation de tout système basé sur la physique. Dans notre cas, ce logiciel nous a permet de prédire la distribution du champ électrique dans un système pointe – plan avec barrière tubulaire et plane propre ou pollué sous tension alternative.

En utilisant une barrière plane, dans une configuration pointe - grand plan est grand, le champ électrique maximal est observé autour de la pointe et le centre du plan, et lorsque le plan est petit, le champ électrique est concentré autour de la pointe et aux deux extrémités du plan, ceci est dû à l'effet de pointe qui apparait dans ce cas.

La combinaison des expériences obtenues à partir de l'étude de la tension disruptive d'un système pointe - plan en fonction de la forme de la barrière nous permet de caractériser la capacité d'isolement du système dans n'importe quelle atmosphère, en quantifiant la tension de contournement de la barrière.

Dans une atmosphère propre et sèche, les lignes de champs s'éloignent de la barrière et progressent vers le plan. La tension de claquage de l'intervalle d'air du système avec barrière tubulaire dans ce cas, augmente avec l'élévation de la distance interélectrode. Cette performance électrique est obtenue à partir de l'allongement du chemin de disruption du système, dû à l'écartement assez important de la décharge de contournement de sa surface.

Dans des conditions de pollution très sévères, les lignes de champ adhèrent à la surface de la

barrière. Ceci est dû au fait que le chemin de contournement de décharge de barrière de silicone relie diverses gouttelettes hautement conductrices le long de la longueur du tube. Même dans des conditions de pollution très sévères, il peut maintenir la résistance et assurer une bonne protection du système.

Dans l'intervalle d'air compris entre 2 et 14 cm, la performance électrique de la barrière tubulaire en gel de silice sous atmosphère quelconque, est supérieure à toutes les barrières de différentes formes et matières étudiées précédemment. De plus, le dispositif de fixation des barrières tubulaire est moins cher que les barrières planes. Par conséquent, techniquement et économiquement, il est très souhaitable de remplacer la barrière plane hydrophile par une barrière tubulaire hydrophobe.

Comme perspectives, des travaux complémentaires pour l'amélioration de la performance du système étudié sont envisagés dans le cadre de la suite à donner à ce thème de recherche. De même, notre travail peut être enrichi dans le futur par l'étude de la variation du champ électrique en fonction de la distance interélectrode à l'aide des lignes de coupe dans un espace d'air à champs électrique non uniforme dans le système susciter, et l'étude des lignes de coupe. Il sera aussi très intéressant de réaliser un modèle pratique dans l'armoire électrique dans le laboratoire haute tension ou dans n'importe quel appareillage dans ce domaine.

Références
bibliographiques

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] .C. P. Steinmetz, "Disruptive strength with transient voltages". 27th Annual Convention of the American Institute of Electrical Engineers, Jefferson, N. H., June 27-30, 1910., 1927, pp. 747.
- [2] J. Pilling, "Luftisolierungen mit Isolierstoffbarrieren und-Verkleidungen bei Wechselfspannung", Dissertation A, Technische Universität Dresden, 1967.
- [3] R. Boudissa, N. Harid, R. Baersch, "Effect of surface condition and isolation mode on the efficiency of a barrier inserted in nonuniform electric field under AC voltage", Proc., 17th ISHVE, 2011, Germany.
- [4] R. Boudissa, S. Merabet, S. Iouknane, "Effect of Isolation Mode and Surface Condition of an Insulating Barrier on the Performance of a Non-uniform Field Electrode System under Positive DC Voltage", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 20, No. 5; pp. 1523-1529, 2013.
- [5] R. Boudissa, A. Bayadi, R. Baersch, Li. "AC Performance of silicone and glass barriers in clean and polluted atmosphere", Electric Power Systems Research 108 (2014), pp.170-177.
- [6] T. Belhoul, R. Boudissa, K. D. Haim, "Comparison of the Performance of Silicone and Glass Barriers under Direct Current and Very Severe Conditions of Pollution", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 24, No.1, pp. 471 - 482, 2017.
- [7] M. Awad, "Durchschlag von inhomogenen Luftfunkenstrecken mit verschmutzten Isolierstoffbarrieren bei Wechsel - und Schaltspannungen", Dissertation A, Technische Universität Dresden, 1975.
- [8] H. Böhme; K. Schwarzer, "Isolierungen von Mittelspannungsschalt-Anlagen", Elektrik 28 (1974) H. 11, S.592-593.
- [9] N. Bouatia, S. Messad, F. Bouchelga, T. Belhoul, R. Boudissa, S. Kornhuber, K.D. Haim, "Comparative study of the electrical performance of superhydrophobic and hydrophilic tubular and plane insulating barriers under DC voltage", Electrical Engineering, 2021.
- [10] A. Mekhaldi, "Etude du développement d'un arc électrique sur des surfaces isolantes contaminées par la pollution désertique", Mémoire de Magister, Génie Electrique, ENP 1990.

- [11] D. Namane, "Effet de la discontinuité de la pollution sur le comportement d'isolateur haute tension, sous la fréquence de 50 Hz", Mémoire de Magister, Génie Electrique, ENP 1998.
- [12] D. Derek, B. Hinde, "Corona discharges on the surfaces of High voltage composite insulators," Ph.D. Thesis, TU Darmstadt University of Technology Australia 2009.
- [14] V. Belaud "Structuration de surfaces au moyen d'un traitement laser fem to seconde : applications à la fonctionnalisation de surface du polypropylène en vue de sa métallisation " Thèse de doctorat, Spécialité Matériaux, Ecole Centrale de Lyon, 2014.
- [15] T. Young. "An essay on the cohesion of fluids," Phys. Rev. Lett., vol. 95, pp. 65-87, 1805.
- [16] Y. Yuan and T. Lee. "Contact angle and wetting properties," Springer Series in Surface Sciences, vol. 51, pp. 1-27, 2013.
- [17] IEC62073., "Guidance on the measurement of wettability of insulator surfaces," "IEC/TS 62073, Ed.1.0, 200.
- [18] F. Aoubed, "Contribution à l'étude est à l'évaluation des performances électrique des isolations en silicone pollué sous tension alternative", thèse de doctorat université Ferhat Abas-Sétif 1, 2018.
- [20] M. Tegar, "Etude mathématique des mécanismes de développement des décharges électriques sur des isolateurs installés en régions polluées", Mémoire Magister, Génie Electrique, ENP 1993.
- [21] D. H. Nguyen, " Etude des propriétés électriques des élastomères silicones utilisés pour l'isolation électrique", Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier Grenoble, 2005.
- [22] T. Mizuno, K. Morita, Y. Kurata, K. Nagatake and H. Saitoh, "Electrical Insulation Performance in Air gap with Covered Electrode". Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, June 1-5 2003 Nagoya P1-6.
- [23] P. N. Mavroidis, P. N. Mikropoulos, C. A. Stassinopoulos, P. Rafailidis et G. Smaragdakis, "Impulse Breakdown of Short Rod - plane Air Gaps with a Dielectric Covered Rod". 1070-9878/12/\$25.00 © 2012 IEEE.
- [24] J. Meek et M. M. Collins, "Measurement of electric fields at electrode surfaces", Electronics Letters, Vol. 1, p. 110, 1965.

- [25] E. Foruzan et H. Vakilzadian, "The Investigation of Dielectric Barrier Impact on the Breakdown Voltage in High Voltage Systems by Modeling and Simulation". 978-1-4673-8040-9/15/\$31.00 ©2015 IEEE.
- [26] T. Belhoul, F. Bouchelga, R. Boudissa, S. Kornhuber, K. D. Haim, "Performance d'un Intervalle d'Air à Champ Electrique non Uniforme avec Barrières Tubulaires en Silicone sous AC", *Electrical Engineering*, 2021.
- [27] S. Loana, "Small air gap's performance under non-uniform electrical field with silicone tubular barriers under AC voltage", Thèse de doctorat, Université de Québec à Chicoutimi, Octobre 1996.
- [28] A. Vincent, "Conception et simulation d'un réacteur fil-cylindre à décharge couronne avec barrière diélectrique adapté au traitement des oxydes d'azote dans des effluents marqués par un isotope", Thèse de doctorat, Université Paris VI, Décembre 2002.
- [29] Z. Adnani, K. Benamara, "performance électrique d'une isolation superhydrophobe avec gouttes d'eau sous tension continue positive", Mémoire de master université A. Mira Bejaia, 2019.
- [30] T. Belhoul, "Performance d'un intervalle d'air à champ électrique non uniforme avec barrière isolante à géométrie variable sous atmosphère quelconque", thèse de doctorat université A. Mira Bejaia, 2018.
- [31] M. Farzaneh and W. A. Chisholm, "Insulators for icing and polluted environments", IEEE Press Editorial Board, 2009.
- [32] T. Guia, "Comportement d'un modèle Isolateur sous à une Tension Impulsionnelle", Mémoire de Magister, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, ENP, Alger, Mai 2010.
- [33] J. Pilling, R. Bärsch, "Zur Berechnung der Schichtleitfähigkeit natürlich verschmutzter Isolatoren. *Elektrie*" 36 (1982), S. 37 – 39.
- [34] J. Pilling, R. Bärsch, L. Berndt, "Zur Berechnung partieller Schichtleitfähigkeitsmessungen natürlich verschmutzter Isolatoren. *Elektrie*" 36(1982), S. 598 – 602.
- [35] K. Amriche, S. Benayad, "Modélisation des principales caractéristiques d'un isolateur pollué sous tension continue", PFE, Génie Electrique, USTHB 2004.

- [36] Y. Radouane, "Performance d'une surface en silicone recouverte des gouttes d'eau sous tension alternative", mémoire de master université A. Mira Bejaia, 2013.
- [37] H. Madi, R. Boudissa et T. Belhoul, "Effet du mode de distribution de pollution sur la performance d'une barrière isolante contaminée sous tension alternative", Communication Internationale JIEMCEM2010, Oran-Algérie, 25 - 26 Mai 2010.
- [38] IEC 62271-304, "Technical Specification of design classes for indoor enclosed switchgear and controlgear from 1 kV and up to and including 52 kV to be used in severe climatic conditions", High Voltage Switchgear and Controlgear-PART 304.
- [39] R. Bärsch, "Elektrisches Verhalten von polymeren Isolierstoffen unter Freiluft- und erschwerten klimatischen Innenraumbedingungen, RCC-Fachtagung", Werkstoffe für Isolatoren, Überspannungsableiter, Kabelgarnituren, Schaltgeräte in der Hochspannungstechnik, 2006, Tagungsband S. 29-47.
- [40] R. Boudissa, S. Mouhoubi et A. Haddad, "Performance des écrans sous tension alternative et continue". 7ème conférence nationale sur la haute tension (CNHT 2009), Sidi Bel Abbés, Algérie 2009.
- [41] F. Aouabed, "Contribution à l'étude d'un circuit équivalent des isolateurs synthétiques sous pollution en utilisant l'EMTP", thèse de magister, Sétif 2010.
- [42] R. S. Gorur, E. A. Cherney et R. Hackam, "Polymer insulator profiles evaluated in a fog chamber", IEEE Trans. Power Deliv., vol. 5, no 2, pp. 1078-1085, 1990.
- [43] J. Ndoumbe, "Etude comportementale des gouttelettes d'eau déposées sur la surface d'un isolateur composite haute tension en présence du champ électrique", Thèse de doctorat, Ecole doctorale électrique, électrotechnique et automatique de Lyon, Mars 2014.
- [44] C. H. A. Ely, P. J. Lambeth, J. S. T. Looms et D. A. Swift, "Contournement des polymères humides et pollués l'ailette Booster", CIGRE, Rapport 15 - 02, Paris, France, 1978.
- [45] IEC TS 61245, "Artificial pollution tests on high-voltage ceramic and glass insulators to be used on dc systems", 2015.
- [46] IEC-TS 62073, "Guidance on the measurement of hydrophobicity of insulator surfaces", 2016.
- [47] E. Phillipow, "Systems of Electrical Power Engineering", Taschenbuch Elektrotechnik, Vol. 6, Hochspannungstechnik, Carl Hanser, VEB Verl, Berlin, Muenchen, Wien, 1982.

Webographie

Webographie

[13] Ramé-Hart Instrument Co. "Ramé-hart contact angle goniometers," Standard contact angle goniometer, Netcong, NJ 07857 USA; Available from: <http://www.ramehart.com>, July 2008.

[19] Wacker Chémie, "Silicones pour applications haute et moyenne tension" www.wacker.com.