

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ ABDERRAHMANE MIRA -BEJAÏA
FACULTÉ DE TECHNOLOGIE

Département génie électrique

Mémoire de fin de cycle

En vue de l'obtention d'un Diplôme de Master II en
Électrotechnique
Option : Réseaux électriques

Thème

*Influence de l'arrangement et de l'accumulation d'un dépôt
de gouttes d'eau sur une isolation en silicone inclinée sur
sa performance électrique sous tension alternative*

Présenté par :
Kerkour Khir-eddine
Ferhane Nassim

Promoteur : Pr. R. Boudissa
Co-Promoteur : Pr. S. Kornhuber

Promotion 2015 / 2016

Remerciement

Nous remercions le dieu pour la volonté, le courage et la patience qui nous ont été utile tout au long de se travail.

Nous exprimons nos profonds remerciements à notre promoteur **Pr. Boudissa Rabah** pour l'aide compétente qu'il nous a apportée, pour sa patience, sa confiance, son encouragement, et son œil critique qui nous a été très précieux pour structurer se travail et pour améliorer la qualité des différentes sections de notre mémoire, nous le remercions vivement. Ainsi que notre Co-promoteur **Pr. S. Kornhuber**.

Nous remercions les membres de jury, Pour l'honneur qu'ils nous ont fait d'avoir acceptés de lire et d'examine ce modeste travail.

Dédicaces

Que ce travail témoigne de mes respects :

A mes parents :

Grâce à leurs tendres encouragements et leurs grands sacrifices, ils ont pu créer le climat affectueux et propice à la poursuite de mes études.

Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma considération et mes profonds sentiments envers eux.

Je prie le bon Dieu de les bénir, de veiller sur eux, en espérant qu'ils seront toujours fiers de moi.

A mes sœurs et à mes frères, surtout Faouzi.

A la famille HAMRAOUB, ABOUSABER et MOUSOUBOS.

Ils vont trouver ici l'expression de mes sentiments de respect et de reconnaissance pour le soutien qu'ils n'ont cessé de me porter.

A tous mes professeurs :

Leur générosité et leur soutien m'oblige de leurs témoigner mon profond respect et ma loyale considération.

A tous mes amis et mes collègues :

Ils vont trouver ici le témoignage d'une fidélité et d'une amitié infinie.

Nassim FERJANE

DÉDICACE

Je dédie ce modeste travail à :

*+ Ma très chère mère et mon très cher père, l'être le plus noble à sacrifier les plus belles années de sa vie pour me voir un jour réussi dans ma vie. Je les remercie pour toute patience, et qui ont voulu
Toujours que je sois heureux.*

+ Mon frère

+ Mes sœurs

+ Toute la famille

+ Tous mes Amis

Khir-eddine

Sommaire

Introduction générale

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

Chapitre I

L'évolution de niveau des recherches sur la performance électrique d'une surface hydrophobe en silicone sous tension alternative

I.1 Introduction.....	3
I.2. Synthèse des recherches sur la performance électrique d'une surface hydrophobe en silicone sous tension alternative	3
I.2.1 G.G. Karaday, H.M. Schneider, 1994	3
I.2.2 S. Gogur et J. Chang, 1994	3
I.2.3 S. Gurbanski et R. Hartings, 1995.....	5
I.2.4 A.de la O, R.S Gorur et J.T.Burnham, 1997	5
I.2.5 S. M. Gubanski et al, 1999.....	8
I.2.6 Y. Zhu, S. Yamashita, 2003	8
I.2.7 K. Karakoulidis, M.G. Danikas, P. Rakitzis, 2005	9
I.2.8. Basanta Kumar Gautam, al, 2006	10
I.2.9 Kenichi Hajji, Yong Zhu, 2006	12
I.2.10 Y. Zhu, K. Haji, H. Yamamoto, 2006	14
I.2.11 Michael G. Danikas, 2006.....	15
I.2.12 W.Betuj, J.Fleszynski, A.Tyman, K.Wieczorek ,2007	17
I.2.13 K. Haji, Y. Zhu, M. Otsubo, T. Sakoda, 2008	20
I.2.14 B. X. Dul, Yong Liul, 2009	22
I.2.15 Rajini , K. Udayakumar ,2009	24
I.2.16 S. Thong-Om, W. Payakcho, 2011	26
I.2.17 Ydjedd Radouane, 2012/2013.....	28
I.3 Conclusion	32

Chapitre II

Isolants et propriétés diélectriques

II.1. Introduction	33
II.2. Définitions	33
II.2.1. Isolants	33
II.2.2. Isoler	33
II.2.3. Isolations	33
II.2.4. Isolateur	33
II.2.5. Diélectrique.....	34
II.3. Propriétés diélectriques des matériaux isolants	34
II.3.1. Résistance et résistivité	34
II.3.1.1. Résistance et résistivité transversale	34
II.3.1.2. Résistance et résistivité superficielle	34
II.3.2. Rigidité diélectrique.....	35
II.3.2.1. Rigidité diélectrique longitudinale.....	35
II.3.2.2. Rigidité diélectrique transversale.....	36
II.3.3. Permittivité.....	36
II.3.3.1. Permittivité relative	36
II.3.3.2. Permittivité absolue.....	36
II.3.4. Conductivité électrique	37
II.3.5. Angle de pertes et facteur de dissipation	37
II.3.6. Influence du vieillissement sur la conductivité et le facteur de dissipation.....	38
II.4. Facteurs climatiques influençant sur les isolants.....	38
II.4.1. Température	38
II.4.2. Humidité	38
II.5. Différents types d'isolants	38
II.5.1. Isolant gazeux	38
II.5.2. Isolants liquides	39
II.5.3. Isolants solides	39
II.6. Matériaux utilisés pour les isolants solides	39
II.6.1. Porcelaine.....	40

II.6.2. Verre	40
II.6.2.1. Verre trempés	40
II.6.2.2. Verres recuits	41
II.6.3. Bakélite	41
II.6.4. Silicone	41
II.6.4.1. Généralités	41
II.6.4.2. Propriétés de la silicone	43
II.6.4.3. Caractéristiques des propriétés fondamentales dans diverses applications	43
II.6.4.4. Structure moléculaire de la silicone	45
II.6.4.5. Élastomères silicones	45
II.7. Technique de caractérisation des surfaces	46
II.7.1. Energie de surface et angle de contact	46
II.7.2. Principe	46
II.7.3. Caractère hydrophile/hydrophobe d'une surface	46
II.7.4. Energie libre totale des surfaces et ses composantes	47
II.7.5. Propriété de la surface	47
II.7.6. Hydrophobicité	47
II.8. Applications des élastomères silicones dans l'isolation électrique	48
II.8.1. Isolation volumique	48
II.8.2. Isolation surfacique	48
II.8.3. Isolateurs à long fût	49
II.9. Conclusion	50

Chapitre III

Pollution atmosphérique et phénomène de décharges

III .1. Introduction	51
III .2. Définitions	51
III .2.1 . Pollution	51
III .2.2 . Contournement	51
III .2.3. Contrainte de contournement	51
III .2.4. Ligne de contournement	52

III .2.5. Tension de contournement.....	52
III .2.6. Tension de tenue.....	52
III .2.7. Ligne de fuite.....	52
III .2.8. Courant de fuite.....	52
III .3. Formation et répartition des couches polluantes	52
III .3.1. Non-uniformité longitudinale par groupe	53
III .3.2. Non-uniformité transversale	53
III .3.3. Non- uniformité longitudinale périodique	53
III .4. Humidification de la pollution.....	54
III .5. Sources de pollution	54
III .5.1. Pollution naturelle.....	54
III .5.1.1. Pollution marine	54
III .5.1.2. Pollution désertique.....	54
III .5.1.3. Autre type de Pollution naturelle	54
III .5.2. Pollution industrielle.....	55
III .5.3. Pollution mixte.....	55
III .6. Sévérité de pollution	55
III .6.1. Mesure de la sévérité de pollution d'un site	55
III .6.1.1. Méthode de la densité de dépôt de sel équivalent (DDSE).....	55
III .6.1.2. Conductance superficielle	56
III .6.1.3. Méthode du courant de fuite	56
III .6.1.4. Méthode de la densité de dépôt non soluble (DDNS).....	56
III .6.1.5. Mesure de la pollution de l'air	57
III .7. Impact de la pollution	57
III .8. Effet de la pollution sur la rigidité diélectrique de l'air.....	57
III .9. Classification des sites pollués	57
III .10. Méthodes d'essais sous pollution	58
III .10.1. Essais sous pollution naturelle	59
III .10.2. Essais sous pollution artificielle.....	59
III .10.2.1. Méthode des couches solides.....	59
III .10.2.2. Méthode du brouillard salin.....	59
III .10.2.3. Méthode de la pollution liquide.....	60
III .11. Techniques de lutte contre la pollution	60

III .11.1. Allongement de la ligne de fuite.....	60
III .11.2. Utilisation des isolateurs plats (auto-nettoyables).....	60
III .11.3. Graissage des isolateurs (couches hydrophobes).....	60
III .11.4. Revêtements à base de silicones.....	61
III .11.5. Nettoyage des isolateurs.....	61
III .12. Décharges électriques.....	61
III .13. Décharge disruptive.....	62
III .13.1 Décharge thermique.....	62
III .13.2 Décharge partielle.....	62
III .13.3. Décharge intrinsèque.....	62
III .14. Décharge dans l'air.....	63
III .14.1. Décharges de type leader.....	63
III .14.2. Décharges de type streamers.....	64
III .15. Conséquences de la pollution.....	66
III .15.1. Arc non localisé.....	66
III .15.2. Arc fixe.....	66
III .15.3. Court-circuit.....	66
III .16. Conclusion.....	66

Chapitre IV

Partie expérimentale

IV.1. Introduction.....	68
IV.2. Modèle expérimental et techniques de mesure.....	68
IV.3 Pollution d'une surface isolante.....	70
IV.4. Procédé d'essai.....	71
IV.5. Dessiccateur.....	71
IV.6 Correction des résultats de tension en fonction des conditions atmosphériques.....	73
IV.7. Propriétés diélectriques de l'isolation en silicone.....	74
IV.8. Paramètres d'influence de la tension de contournement d'une surface en silicone hydrophobe.....	75
IV.8.1. Nombre de rangées de gouttes d'eau.....	75
IV.8.2. Accumulation d'eau sur la surface du bas de l'isolation du côté de l'électrode à la terre pour $V_g = 65 \mu\text{l}$	78

IV.8.3. Accumulation d'eau au dessus de l'électrode terre pour $V_g = 90 \mu\text{l}$	80
IV.8.4. Accumulation d'eau au dessus de l'électrode terre pour $V_g = 20\mu\text{l}$	83
IV.9. Conclusion	84
Conclusion générale	86

Introduction générale

Introduction générale

Les lignes à haute tension est le composant principal des grands réseaux de transport de l'énergie électrique. Elles permettent l'acheminement de l'énergie des centres électriques de production vers les consommateurs d'électricité (charge). Ces lignes sont aériennes, souterraines ou sous-marines. En dehors des conducteurs, les lignes électriques comportent d'autres éléments parmi lesquels les isolateurs. Ces derniers jouent un rôle à la fois mécanique et électrique dans la sécurité du transport et la distribution de l'énergie [1].

Sous haute tension, les isolateurs doivent supporter aussi bien les contraintes électriques dans les conditions normales d'exploitation que les surtensions transitoires dans les conditions anormales imposées par la foudre et les chocs de manœuvre. Par conséquent, un bon choix et un bon dimensionnement des isolateurs s'avèrent indispensable pour assurer la fiabilité et la qualité de l'isolement. Les isolateurs sont également soumis à plusieurs contraintes environnementales pouvant conduire à leur vieillissement. Deux phénomènes entraînent le vieillissement des isolateurs et conduisent à deux phénomènes différents ; la perforation de l'isolateur par un arc électrique dans son volume et le contournement de l'isolateur à sa surface par un arc électrique.

En l'absence de surtensions de foudre ou de manœuvre, de nombreux défauts sont enregistrés sur les lignes aériennes, particulièrement par temps humide (rosée, brouillard, pluie fine). Ces défauts sont dus à la pollution des isolateurs. Leur présence peut provoquer une décroissance de la rigidité diélectrique de ces isolateurs. Dans les ouvrages (lignes ou postes) installés en bordure de mer, les embruns portés par le vent déposent progressivement sur les isolateurs une couche de sel qui, à plus ou moins longue échéance, recouvre toute la surface de l'isolant. Cette couche de sel, humidifiée par les embruns eux-mêmes, par un brouillard ou simplement par condensation, devient conductrice. Un courant de fuite s'établit alors à travers la couche superficielle et des arcs peuvent prendre naissance dans certaines conditions, et se développer jusqu'à provoquer le contournement total de l'isolateur. Depuis la fin du XX^e siècle, l'utilisation des isolateurs en silicone remplacent de plus en plus les isolateurs en porcelaine et en verre dans les réseaux de transport de l'énergie électrique. Ils présentent de nombreux avantages par rapport aux isolateurs traditionnels en porcelaine et céramique (grande résistance à la contamination, légèreté, bonne résistance mécanique, etc.) [2].

L'hydrophobicité de la surface en particulier, est l'un des facteurs importants qui contribuent à la performance supérieure des isolants en silicone pour résister au mouillage en raison de leur faible énergie libre de surface. Cette propriété participe à la réduction des

courants de fuite et à la minimisation de la probabilité de l'apparition des bandes sèches. En service, la surface en silicone tend à se détériorer, affectant négativement l'hydrophobicité du matériau.

Les multiples raisons susmentionnées justifient le but principal visé par ce travail et consiste à savoir si l'utilisation de la silicone comme isolation extérieure peut améliorer la performance d'un système sous tension alternative en fonction des contraintes atmosphériques humides, polluées ou propres, et dans le cas du phénomène de condensation (c.à.d. lors de la formation des gouttelettes d'eau sur la surface hydrophobe) sous divers paramètres suscités.

Dans ce présent mémoire qui s'est inspiré de plusieurs expériences, nous étudions les paramètres d'influence de la décharge électrique et la tension de contournement d'une surface isolante hydrophobe plane polluée sous tension alternative.

Le premier chapitre, sera consacré à la synthèse des travaux de recherche effectués sur la performance de surface hydrophobe des systèmes à champ uniforme avec des feuilles en silicone sous contraintes climatiques et tension alternative. Le deuxième chapitre est dédié à la description des différentes matières isolantes et leurs propriétés essentielles rencontrées généralement en haute tension. Le troisième est divisé en deux parties. La première traite les problèmes de la pollution atmosphérique, les sources de pollution, les méthodes techniques de mesure du degré de pollution et de lutte contre la pollution. La deuxième partie traite les différents phénomènes de décharges (partielle, d'espace, ... etc.) et les décharges évoluant dans un intervalle d'air. Le quatrième, sera réservé à l'étude expérimentale et l'interprétation des résultats obtenus. Enfin, nous terminerons par une conclusion générale permettant une synthèse du travail réalisé.

Fig. I.1: Isolateur composite en silicone trempé dans le sel (NaCl) et de kaolin.....	4
Fig. I.2: Deux isolateurs préalablement recouverts d'une mince couche de kaolin sec.....	4
Fig. I.3: Schéma de la forme d'isolant en silicone (s: distance entre les ailettes, p: longueur des ailettes et β : inclinaison de l'ailette par rapport à l'horizontale).....	6
Fig. I.4: Schéma du dispositif utilisé.....	7
Fig. I.5: Arrangements de gouttelettes par rapport aux électrodes	9
Fig. I.6: Tension de contournement en fonction de la conductivité.....	10
Fig. I.7: Isolateur en silicone.....	10
Fig. I.8: Arrangement de l'étude sous les quatre densités de brouillard (0.3-0.4 ; 3-4 ; 7-8 et 13-15) g/ cm ³	11
Fig. I.9: Rapport entre la densité de brouillard et la tension de contournement	11
Fig. I.10: Schéma du dispositif utilisé.....	12
Fig. I.11: Comportement d'une gouttelette d'eau mise sous champ électrique alternatif	13
Fig. I.12: Tension de contournement en fonction du volume et la conductivité des gouttelettes.....	13
Fig. I.13: Modèle électrodes en forme aiguilles-plan.....	14
Fig. I.14: Images de l'échantillon par SEM, (a) avant et (b) après la décharge couronne...	15
Fig. I.15: Arrangements de gouttelettes d'eau sur les différents plans	15
Fig. I.16: Tension de contournement pour différentes conductivités de gouttelettes d'eau	16
Fig. I.17: Photo de deux isolateurs en silicone avec l'angle d'inclinaison des ailettes 30° (gauche) et 10° (droite).....	17
Fig. I.18: Dispositif expérimental de la chambre de la pluie artificielle.....	18
Fig. I.19: Image de l'isolateur 6s10 au 6 ^{ème} jour de son vieillissement	18
Fig. I.20: Courant de fuite enregistré au 7 ^{ème} jour de vieillissement sur l'isolateurs en silicone.....	19
Fig. I.21: Etat de l'isolateur après une longue durée de son vieillissement.....	19
Fig. I.22: Courant de fuite enregistré au 65 ^{ème} jour de vieillissement sur l'isolant 6s30 sous application de tension alternitave de 40 kV.....	20
Fig. I.23: Dispositif expérimental	20
Fig. I.24: Formes d'ondes du courant de fuite et de la tension pour une conductivité de 0.8 mS/cm.....	21
Fig. I.25: Performance de gouttelette d'eau sur une surface de l'isolateur de caoutchouc en silicone.....	22
Fig. I.26: Phénomènes de décharge pendant la chute de la gouttelette d'eau	23

Fig. I.27: Dispositif expérimental de l'essai sur l'isolant plan incliné avec la variation de l'angle de contact α	24
Fig. I.28: Temps de contournement sur l'isolant en silicone en fonction du différent degré de rayon gamma.....	25
Fig. I.29: Temps de contournement en fonction de la conductivité.....	25
Fig. I.30: Angle de la profondeur de l'érosion maximale et le contact affecté par le rayonnement gamma.....	26
Fig. I.31: Activités des décharges sur un isolateur en silicone	27
Fig. I.32: Classification d'hydrophobicité (HC1-HC6)	27
Fig. I.33: (a) schéma de mesure et de visualisation; (b) différentes positions de l'objet d'essai	28
Fig. I.34: Positionnement des gouttes sur une surface en silicone limitée par 2 électrodes	29
Fig. I.35: $\hat{U}_c = f(\sigma_v, N_r)$ d'une surface en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau avec un volume de 45 μ l.....	30
Fig. I.36: $\hat{U}_c = f(\sigma_v)$ de gouttes d'eau en position horizontale ($N_r = 5$)	30
Fig. I.37: $\hat{U}_c = f(\alpha^\circ)$ d'une surface en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau ($V_g = 45 \mu$ l, $\sigma_v = 180 \mu$ S/cm)	31
Fig. I.38: $\hat{U}_c = f(A_r)$ des gouttes d'eau à volume différent sur une surface en silicone hydrophobe ($\alpha_{cr} = 65^\circ$)	31
Fig. II.1: Rigidité diélectrique.....	35
Fig. II.2: Circuit équivalent série et parallèle	37
Fig. II.3 : Motif unitaire de la silicone	42
Fig. II.4 : Structure des polydiméthylsiloxanes	42
Fig. II.5: Structure chimique de la silicone.....	45
Fig. II.6: Positions possibles de l'angle de contact.....	46
Fig. II.7 : Comportement d'une surface hydrophobe ou hydrophile	47
Fig. II.8 : Hydrophobicité d'une surface en silicone	48
Fig. II.9: (a) Isolateur en silicone ; (b) Traversée avec un revêtement en silicone.....	49
Fig. II.10 : Principe d'un isolateur à long fût.....	49
Fig. III.1: Développement d'un leader	63
Fig. III. 2: Avalanche électronique dans un champ $\varphi \neq 0$ homogène	64
Fig. III.3: Développement d'un streamer	65
Fig. IV.1: (a) schéma de mesure et de visualisation; (b) différentes positions de l'objet d'essai	68

Fig. IV.2: Différentes positions du dispositif.....	69
Fig. IV.3 : Caractéristiques de l'arrangement de gouttes d'eau sur la surface en silicone ..	70
Fig. IV.4 : Conductimètre (appareil de mesure de conductivité volumique).....	71
Fig. IV.5: Dessiccateur en PVC	72
Fig. IV.6: Dessiccateur en verre.....	72
Fig. IV.7: Gel de silice (silicagel)	73
Fig. IV.8: Abaques de corrections en fonction de l'humidité et de la température	74
Fig. IV.9: $\hat{U}_c = f(N_r)$ d'une surface en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau ($V_g = 65 \mu\text{l}$; $\sigma_v = 180 \mu\text{S/cm}$).....	75
Fig. IV.10: Phases de contournement d'une surface en silicone hydrophobe ($\alpha = 0^\circ$, $N_r = 6$)	76
Fig. IV.11: Phases de contournement d'une surface en silicone hydrophobe ($\alpha = 0^\circ$, $N_r = 2$)	77
Fig. IV.12: $\hat{U}_c = f(\alpha^\circ)$ d'une surface isolante en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau ; ($\sigma_v = 180 \mu\text{S/cm}$).....	78
Fig. IV.13: Contournement d'une surface isolante en silicone recouverte de gouttes d'eau avec ou sans accumulation de ces dernières pour ($\alpha_{cr} = 35,86^\circ$, $V_g = 65 \mu\text{l}$, $N_r = 5$, $\sigma_v = 180 \mu\text{S/cm}$)	79
Fig. IV.14: Surface isolante en silicone recouverte de gouttes d'eau avec ou sans accumulation de ces dernières pour ($\alpha = 90^\circ$, $V_g = 65 \mu\text{l}$, $N_r = 5$, $\sigma_v = 180 \mu\text{S/cm}$).....	80
Fig. IV. 15: $\hat{U}_c = f(\alpha)$ d'une surface en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau ($\sigma_v = 180 \mu\text{S/cm}$).....	81
Fig. IV.16 : Surface isolante recouverte de gouttes d'eau avec ou sans accumulation de ces dernières ($V_g = 90 \mu\text{l}$, $\alpha = 24.12^\circ$, $\sigma_v = 180 \mu\text{S/cm}$)	82
Fig. IV.17: $\hat{U}_c = f(\alpha)$ d'une surface en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau ($\sigma_v = 180 \mu\text{S/cm}$ et $V_g = 20 \mu\text{l}$).....	83
Fig. IV.18: Contournement d'une surface en silicone recouverte de petites gouttelettes ($V_g = 20 \mu\text{l}$, $\alpha = 90^\circ$)	84

Tab. I.1: Paramètres des isolants en silicone qui étudiés.....	6
Tab. I.2: Classement des isolants (4 = mieux ,1= plus mauvais)	7
Tab. I.3: Caractéristiques des isolateurs en silicone	17
Tab. I.4: Classification d'hydrophobicité	28
Tab. II.1 : Estimation de la durée de vie d'un élastomère de silicone.....	43
Tab. III.1: Classification de la pollution selon le type d'environnement.....	58
Tab. IV. 1: Valeurs de quelques paramètres électriques de l'isolation en silicone	75

Chapitre I

L'évolution de niveau des recherches sur la performance électrique d'une surface hydrophobe en silicone sous tension alternative

I.1 Introduction

Au cours des dernières années, l'utilisation des isolateurs en silicone a été massive dans les réseaux de transport et de distribution de l'énergie électrique [1]. Ils présentent de nombreux avantages par rapport aux isolateurs traditionnels en porcelaine et céramique, en raison de multiples avantages qu'ils offrent, comparé aux traditionnels isolateurs (bonne stabilité thermique (de - 80 à + 250 °C) ; bonne stabilité chimique et tenue au vieillissement naturel ; très grande innocuité ; bonne tenue au feu sans dégagement de fumées toxiques [2].

L'hydrophobicité de sa surface en particulier, est l'un des facteurs importants qui contribuent à sa performance supérieure pour résister au mouillage en raison de leur faible énergie libre de sa surface. Cette propriété participe à la réduction des courants de fuite [3].

Face au manque d'informations sur le comportement de gouttes d'eaux sur la surface de ces isolateurs sous tension alternative, quelques travaux sont réalisés pour comprendre leur vieillissement ainsi que les mécanismes de leur dégradation.

Dans ce qui suit, des investigations essentielles sur la performance d'une surface isolante hydrophobe recouverte de gouttes d'eau sous tension alternative, effectuées par différents chercheurs, seront passées en revue.

I.2 Synthèse des recherches sur la performance électrique d'une surface hydrophobe en silicone sous tension alternative

I.2.1 G.G. Karaday, H.M. Schneider 1994 [4]

D'après les chercheurs, les isolateurs composites possèdent une proportion de poids/ tenue mécanique très faible et ils sont un peu fragiles, et l'isolateur en céramique est lourd et fragile. La surface des isolateurs composites est superhydrophobe lorsque ces derniers sont nouveaux.

Les chercheurs ont exécuté leurs travaux sur deux types d'isolants composites EPDM et silicone. Lorsqu'ils ont exposé ces derniers aux rayons ultra violets (UV), ils ont remarqué que l'isolant en silicone testé recouvrait son hydrophobicité après une période de 6 à 8 heures, tandis que l'isolant en EPDM ne recouvrait son hydrophobicité qu'après une période de 12 à 15 heures. En plus de la possibilité de perdre leur hydrophobicité, les isolateurs composites paraissent plus sensibles au vieillissement électrique que les isolateurs en céramique.

I.2.2 S. Gogur et J. Chang 1994 [5]

La surface des deux isolateurs composites en EPDM et en silicone est habituellement hydrophobe . Leur trempage régulier dans une solution aqueuse de sel et de kaolin produit une distribution inégale de la solution de contamination à leur surface. Ce resultat est

présenté sur la figure.I.1. Cela nous permet de bien voir à quel point la solution de contamination se distribue de façon non uniforme à leur surface.



Fig. I.1: Isolateur composite en silicone trempé dans le sel (NaCl) et de kaolin

Cette solution adhère plus uniformément à la surface d'isolateur composite à la fin du dépôt. Avant d'effectuer leur trempage, ils ont appliqué une couche fine de kaolin sec à leur surface.

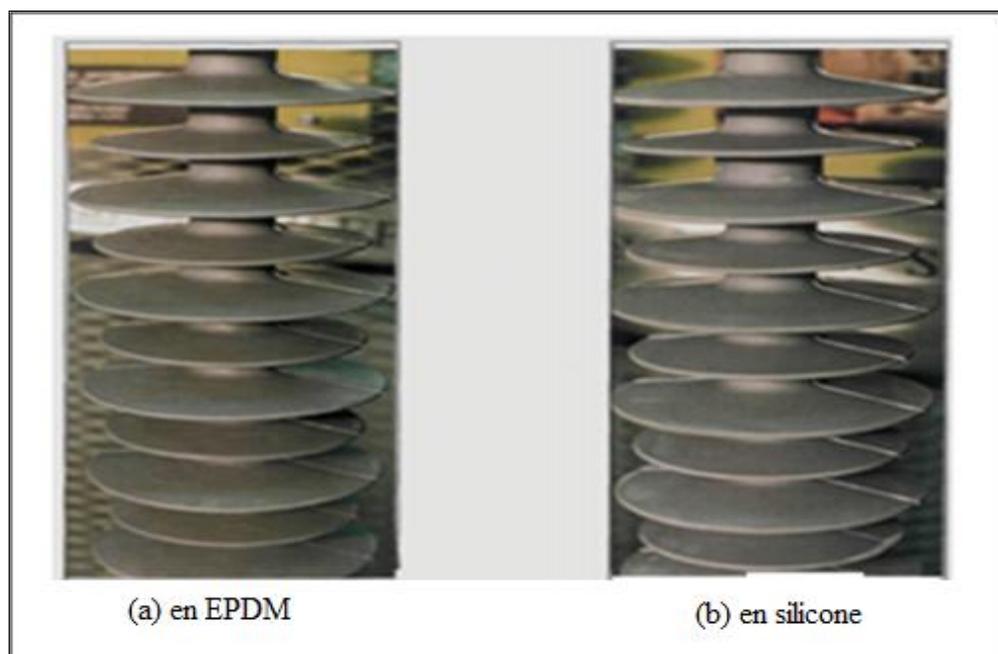


Fig. I.2: Deux isolateurs préalablement recouverts d'une mince couche de kaolin sec

La figure I.2, présente deux isolateurs composites (EPDM et silicone), trempés dans une solution aqueuse de sel et de kaolin. D'après les photos présentées à la figure I.2, ils ont constaté que le dépôt de cette solution est nettement plus uniforme lorsque les isolateurs composites sont préalablement recouverts d'une couche de kaolin sec.

Les étapes de la contamination sont comme suit:

- Appliquer une couche fine et uniforme de kaolin sec à la surface de l'isolateur à l'aide d'un pinceau ;
- Humidifier la surface recouverte de kaolin avec un pulvérisateur d'eau ;
- Tremper l'isolateur dans la solution aqueuse de sel (NaCl) et de kaolin ;
- Secouer l'isolateur en position horizontale pour éviter la formation de tâches causées par un excédent de solution à la surface de l'isolateur ;
- Sécher l'isolateur, en l'inclinant un peu par rapport à la verticale, durant une période de 12 heures pour l'isolateur en EPDM et de 3 heures pour l'isolateur en silicone. Cette inclination permet une meilleure redistribution de la contamination à la surface des isolateurs. En ce qui concerne la durée de la période de séchage, elle est nécessaire pour que isolateurs recouvrent leur hydrophobicité.

I.2.3 S. Gurbanski et R. Hartings 1995 [6]

La surface des isolateurs composites est superhydrophobe lorsque ces derniers sont nouveaux, donc l'eau adhère difficilement à leur surface. Ainsi, les impuretés qui se trouvent à la surface d'isolant composite sont dissoutes difficilement que celles qui se trouvent à la surface d'isolant en céramique.

Tous les isolants en silicone qu'ils ont testé recouvraient leur hydrophobicité rapidement, contrairement aux isolants en EPDM. Et pourtant, l'hydrophobicité n'est pas permanente, elle peut être perdue temporairement ou de façon permanente. Il en résulte que, l'isolation en silicone possède un meilleur comportement à cette considération que l'isolant en EPDM.

I.2.4 A.de la O, R.S Gorur et J.T.Burnham 1997 [7]

Les chercheurs ont donné un aperçu sur le comportement de la tension de contournement d'un isolant en silicone pollué artificiellement sous conditions de mouillage (brouillard et pluie).

Tous les isolateurs en silicone étaient initialement hydrophobes. Les paramètres de la forme et les dimensions réelles des isolateurs sont indiqués sur la figure I.3 et dans le tableau I.1.

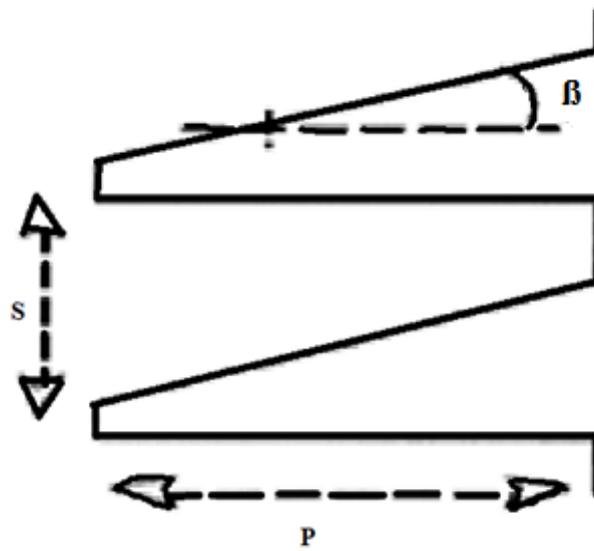


Fig. I.3: Schéma de la forme d'isolant en silicone (s : distance entre les ailettes, p : longueur des ailettes et β : inclinaison de l'ailette par rapport à l'horizontale)

Isolants	P (cm)	S (cm)	β (°)
Silicone 1	3.4	3.5	20
Silicone 2	3.8/5.3	4.0	20
Silicone 3	3.8	4.2	55
Silicone 4	5.5	5.2	40/20
Silicone 5	5	4.7	5

Tab. I.1: Paramètres des isolants en silicone étudiés

Les essais sous la pluie ont été étudiés avec les mêmes installations utilisées pour les essais sous le brouillard propre, mais le générateur de la vapeur a été remplacé par une lance de la pluie avec une conductivité de $100 \mu\text{S}/\text{cm}$. Un dispositif constitué d'une caméra et un PC, ont permis de suivre le comportement des décharges de la tension appliquée, comme le montre la figure I.4.

Une valeur de la densité du dépôt non-soluble (DDNS) de $0.7 \text{ mg}/\text{cm}^2$ a été utilisée, l'augmentation de sel (NaCl) a été variée pour obtenir la valeur de la densité du dépôt de sel équivalent (DDSE).

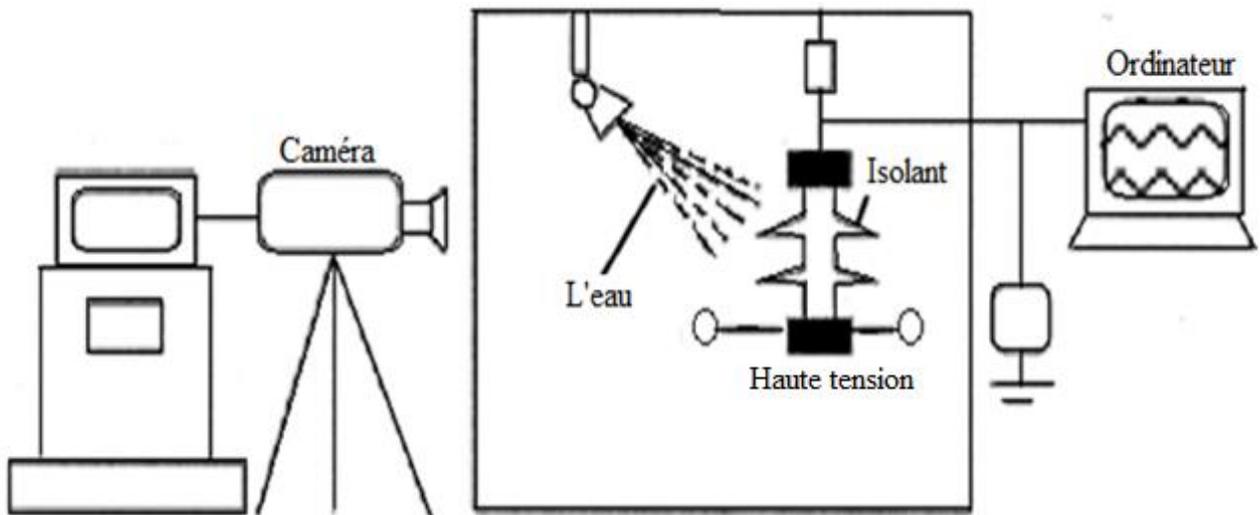


Fig. I.4: Schéma du dispositif utilisé

Les résultats obtenus ont été mentionnés dans le tableau I.2, qui montre la contamination critique pour le brouillard propre et la pluie, et le classement des isolants respectifs en enfin la plus grande valeur de densité du dépôt de sel équivalent (DDSE) au-dessus de laquelle le contournement se produit pour les conditions expérimentales dans cette étude.

Isolateur	La quantité de DDSE sous le brouillard propre	La quantité de DDSE sous la pluie	Classement sous le brouillard	Classement sous la pluie
Silicone 1	0.45	0.18	2	3
Silicone 2	0.30	0.18	3	3
Silicone 3	0.30	0.25	3	1
Silicone 4	0.90	0.22	1	2
Silicone 5	0.30	0.15	2	4

Tab. I.2: Classement des isolants (4 = mieux ,1= plus mauvais)

Plusieurs observations importantes peuvent être faites à partir du tableau I .2:

- Classement des isolateurs en silicone dans les essais de contamination de laboratoire est affecté par le mode de mouillage;
- Le classement des isolants en silicone sous la pluie peut être plus critique qu'une combinaison correspondante au brouillard propre, puisque sous la pluie la quantité de DDSE est grande.

I.2.5 S. M. Gubanski et al 1999 [8]

Gubanski and al, ont réalisé leurs travaux sur les isolateurs en silicone. Leurs recherches et études ont été fondées sur le comportement du courant de fuite.

D'après leurs études ils ont trouvé que le courant de fuite a souvent un caractère capacitif et une forme sinusoïdale. Le courant de fuite devient de plus en plus résistif, avec des pics dûs aux décharges dans les zones sèches, lorsque l'hydrophobicité est perdue.

- le courant de fuite est capacitif, sinusoïdal et de l'ordre du μA , pour les isolateurs qui gardent leur hydrophobicité ;
- le courant de fuite est sinusoïdal à caractère résistif d'ordre relativement élevé, pour les isolateurs dont la surface est complètement mouillée (hydrophile) ;
- le courant de fuite a une forme non linéaire avec une amplitude dont l'ordre de grandeur est relativement élevé, pour les isolateurs ayant perdu totalement ou partiellement leur hydrophobicité.

Ils ont découvert que le temps de repos influe sur le comportement du courant de fuite ainsi sur l'état de surface de certains isolateurs.

Le temps de repos a une influence importante sur les isolateurs composites, car il permet de réacquérir leurs propriétés hydrophobes, par contre cette influence est moins importante pour les isolateurs en céramique.

I.2.6 Y. Zhu, S. Yamashita 2003 [9]

Leurs travaux sont basés sur le comportement des gouttelettes d'eau posées sur la surface en silicone sous tension alternative. Ils ont fait des essais sur la surface en silicone pour étudier l'influence de différentes conductivités et des volumes de gouttelettes d'eau sur cette surface.

Au moyen du calcul de champ électrique et quelques expériences, ils ont analysé les facteurs qui affectent la décharge couronne. Ils ont conclu que les gouttelettes d'eau sur le polymère ont une capacité de faire augmenter le champ électrique et peuvent entraîner la décharge couronne.

D'après ces essais, ils ont constaté que la gouttelette vibrait et s'allongeait vers l'électrode positive (terre) dans un synchronisme de vague avec la fréquence de la tension.

- La gouttelette d'eau perd sa forme en allant de gauche à droite, dans le sens de phase de la tension alternative ;

➤ Pour le perfectionnement du champ électrique, il faut avoir deux facteurs importants : le volume et la conductivité. La décharge couronne se produit à l'extrémité de la gouttelette, ce qui peut causer la perte locale de l'hydrophobicité.

I.2.7 K. Karakoulidis, M.G. Danikas, P. Rakitzis 2005 [10]

Les chercheurs ont étudié le comportement des gouttelettes d'eau sur une surface en silicone sous un champ électrique alternatif. Ils ont choisi des arrangements des gouttes de 1, 2, 3, 5 et 9 et les volumes de ces dernières ont été de 0,2 et 0,3 ml, afin de mieux simuler les conditions réelles. Les électrodes sont positionnées à une distance de 4 cm comme le montre la figure .I.5. Les paramètres fondamentaux influençant l'état de surface en silicone, à savoir, la conductivité, le volume des gouttelettes d'eau et leur positionnement par rapport aux électrodes, ont été pris en considération dans cette étude.

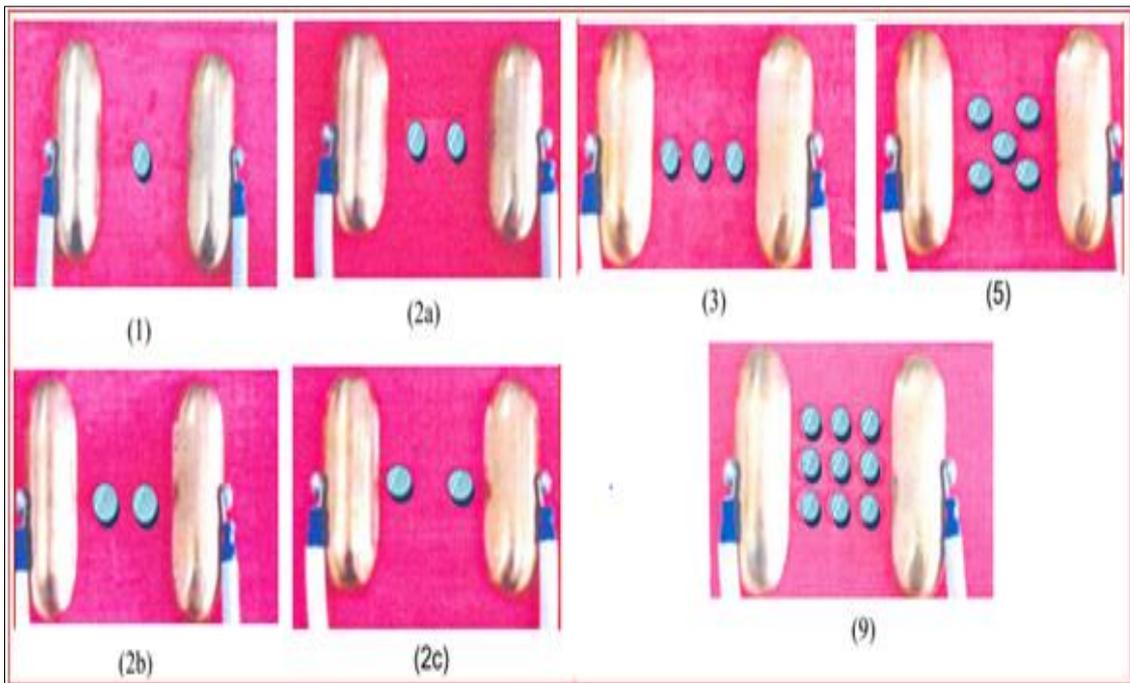


Fig. I.5: Arrangements de gouttelettes par rapport aux électrodes

L'arrangement et l'augmentation de la conductivité de gouttes d'eau avec un volume constant de 0.3 ml entraînent une diminution de la tension de contournement comme le montre la figure I.6, conformément à la figure I.5. Cette conclusion est généralement valable indépendamment du matériau utilisé. L'état de surface influe de façon positive sur la tension de contournement lorsque le nombre de gouttelettes est important, le positionnement joue un rôle plus important que le volume de la goutte.

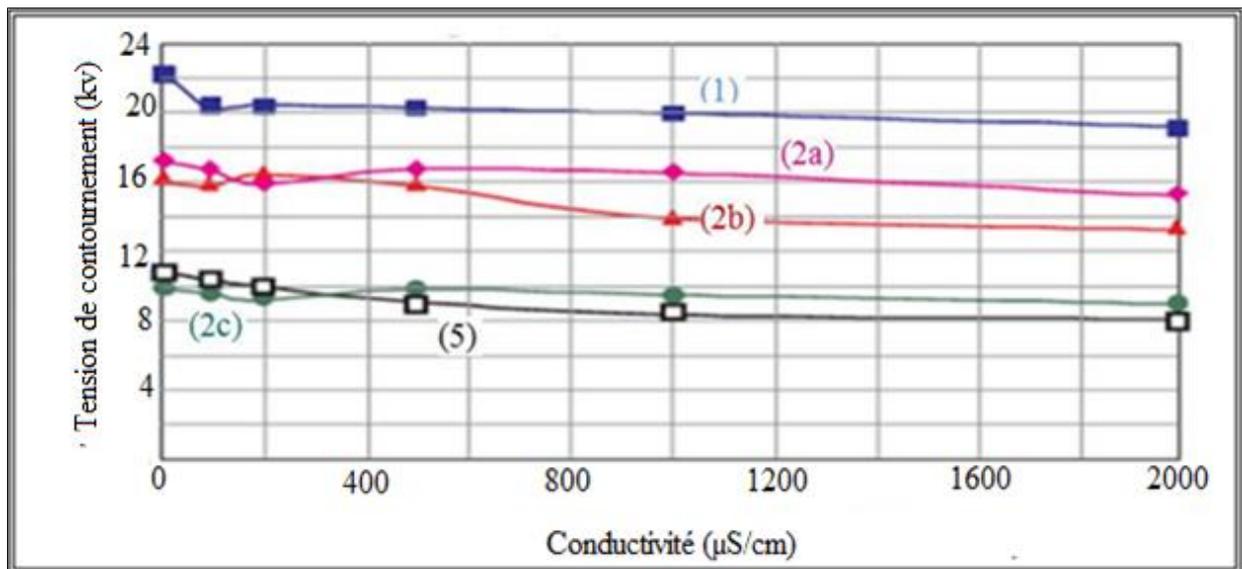


Fig. I.6: Tension de contournement en fonction de la conductivité

I.2.8. Basanta Kumar Gautam, al 2006 [11]

Les chercheurs ont étudié l'effet de mouillage sur la tension de contournement d'un isolateur en silicone pollué sous densités de brouillard variées. L'isolant utilisé dans cette étude est montré sur la figure. I.7.

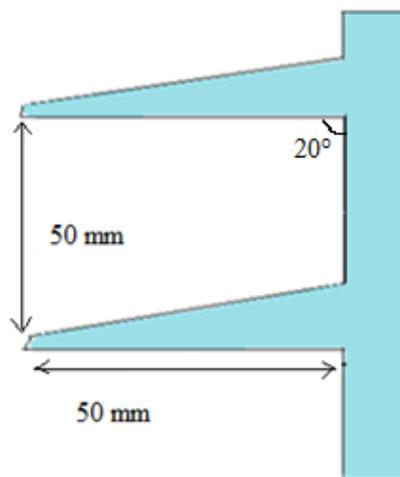


Fig. I.7: Isolateur en silicone

L'étude de la tension de contournement a été effectuée sur l'isolateur en silicone pollué sous tension alternatif. La densité du dépôt de sel équivalente (DDSE) et la densité du dépôt non-soluble (DDNS) appliquées aux isolants respectivement étaient de 0.12 et 0.1 mg/cm².

L'isolant est installé au centre de la chambre, l'arrangement dans cette étude est montré sur la figure. I.8. Une chaudière a été utilisée pour produire de la vapeur.

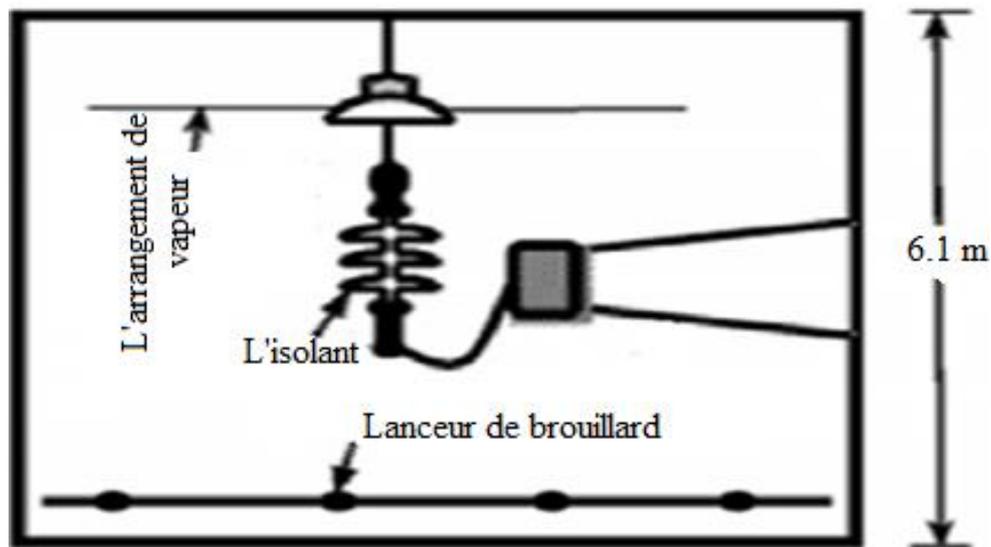


Fig. I.8: Arrangement de l'étude sous les quatre densités de brouillard (0.3-0.4 ; 3-4 ; 7-8 et 13-15) g/cm^3

Les résultats de l'étude sont montrés sur la figure I.9.

La tension de contournement diminue progressivement avec l'augmentation de la densité de brouillard, mais il n'y a aucune différence visible dans la tension de contournement entre les deux densités du brouillard de (8 et 15) g/cm^3 . La densité du brouillard de 8 g/cm^3 peut être adoptée comme le mouillage le plus sévère pour évaluer la tension de contournement d'un isolant en silicone pollué.

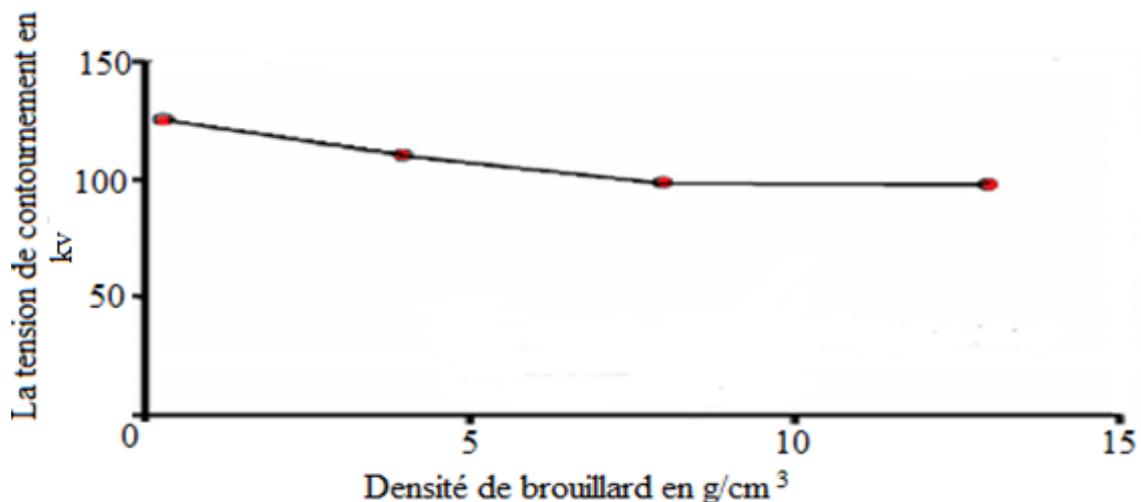


Fig. I.9: Rapport entre la densité de brouillard et la tension de contournement

I.2.9 Kenichi Hajji, Yong Zhu 2006 [12]

Cette partie expérimentale qui est réalisée par ces chercheurs montre les caractéristiques d'électrification d'une gouttelette d'eau sur une surface hydrophobe et son influence sur la décharge induite sous un champ électrique alternatif haute tension de fréquence 60 Hz. Puis ils ont étudié le comportement de cette gouttelette d'eau avec un volume et une conductivité différente. Cette dernière a été mise sur une surface en silicone électriquement chargée avec deux électrodes (électrode HT, électrode terre) et son comportement électro-hydrodynamique a été observé à l'aide d'une caméra vidéo comme il est montré sur la figure I.10.

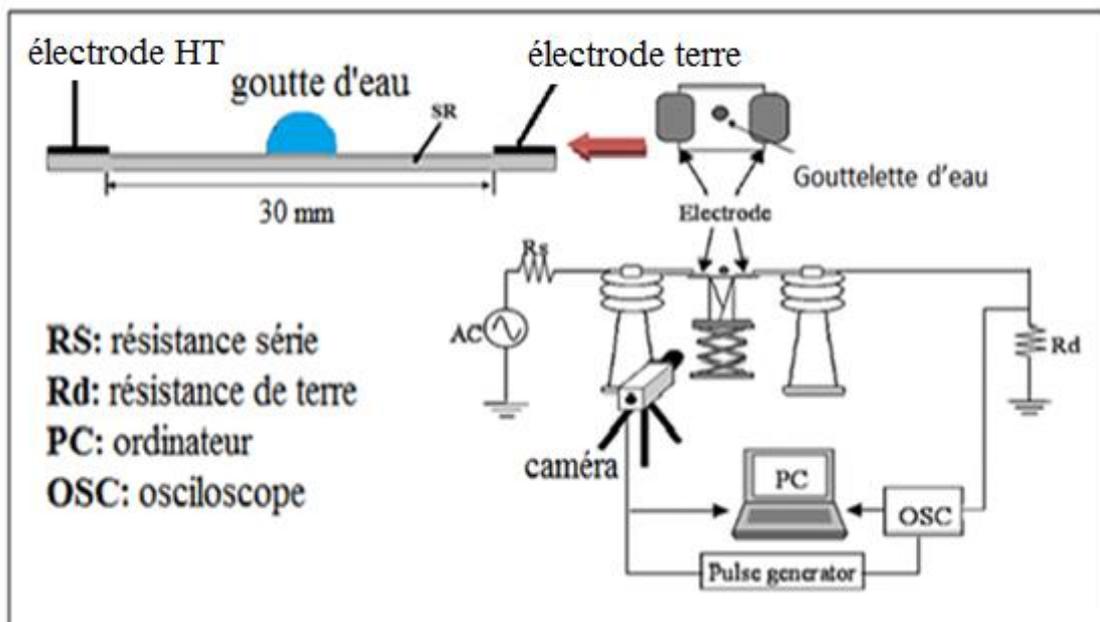


Fig. I.10: Schéma du dispositif utilisé

Le comportement de la gouttelette d'eau avec un volume de $30 \mu\text{l}$ et une conductivité de $2,0 \mu\text{S/cm}$ sur une surface en silicone mise sous tension alternative, dans un cycle de 10 kV, est illustrée par la figure I.11. Au cours du processus de décharge couronne, la gouttelette d'eau va vibrer entre les deux électrodes. Elle sera tirée vers l'électrode terre, puis elle sera déformée et synchronisée. Une fois la déformation devient perceptible, elle augmente rapidement jusqu'à ce qu'elle soit mécaniquement instable et injecte des filaments d'eau à partir de ses extrémités.

Le modèle de la simulation dynamique basé sur chaque photo, comme le montre la figure I.11.a, a été mis en place. Au cours de la simulation, la valeur instantanée de la tension alternative appliquée à chaque milliseconde a été précisée ainsi que le potentiel de l'électrode

à haute tension comme le montre la figure I.11.b. Le champ électrique horizontal a été calculé à la pointe de la gouttelette d'eau dans un cycle de tension de 10 kV.

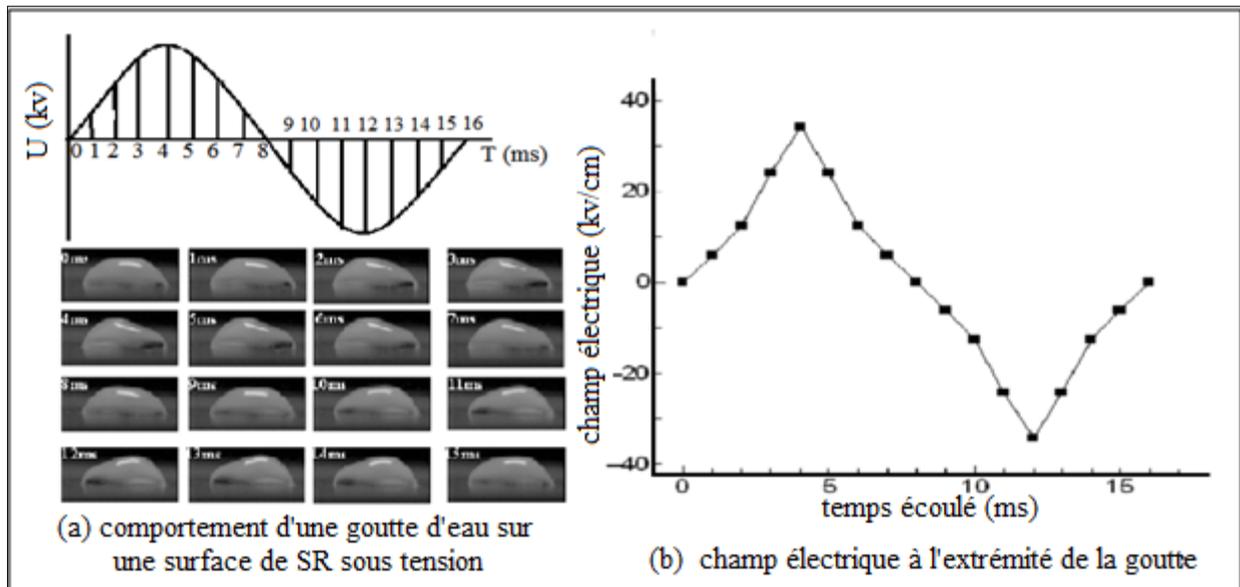


Fig. I.11: Comportement d'une gouttelette d'eau mise sous champ électrique alternatif

La conductivité et le volume des gouttelettes d'eau jouent un rôle important sur la tension de contournement comme le montre la figure I.12. Lorsque le volume des gouttelettes augmente peut combler l'écart entre les électrodes et provoque un embrasement général. En outre, ces deux paramètres ont un effet remarquable sur le mode de décharge couronne et le développement de contournement électrique.

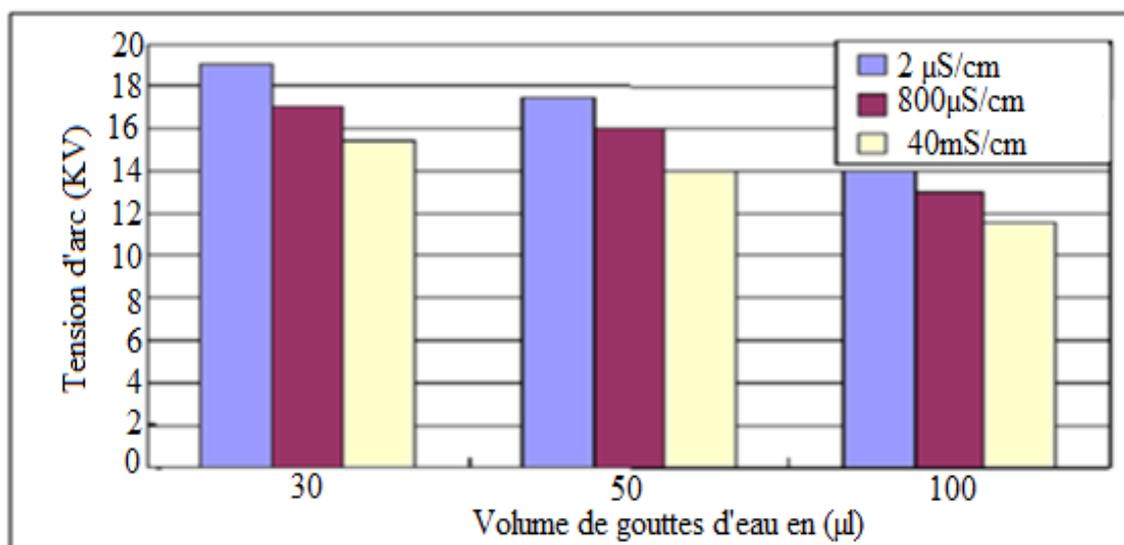


Fig. I.12: Tension de contournement en fonction du volume et la conductivité des gouttelettes

I.2.10 Y. Zhu, K. Haji, H. Yamamoto 2006[13]

A l'importance d'examiner le mécanisme de dégradation de l'hydrophobicité de l'un des types de silicone, une étude a été réalisée par des chercheurs. Ils ont utilisé un modèle comme il est illustré sur la figure I.13. Ce dernier est constitué d'une plaque de silicone des dimensions $(60 \times 50 \times 2) \text{ mm}^3$, avec deux électrodes en forme aiguilles-plan en acier inoxydable, dont l'une est branchée en série avec une résistance ($5 \text{ k}\Omega$) à une source de tension alternative de (60Hz) et l'autre est connectée à la terre. Puis ils ont choisi une distance de 1 cm entre les deux électrodes. Une tension de 16 kV a été appliquée pour produire la décharge couronne. Le temps d'essai de ce modèle était de 24 heures.

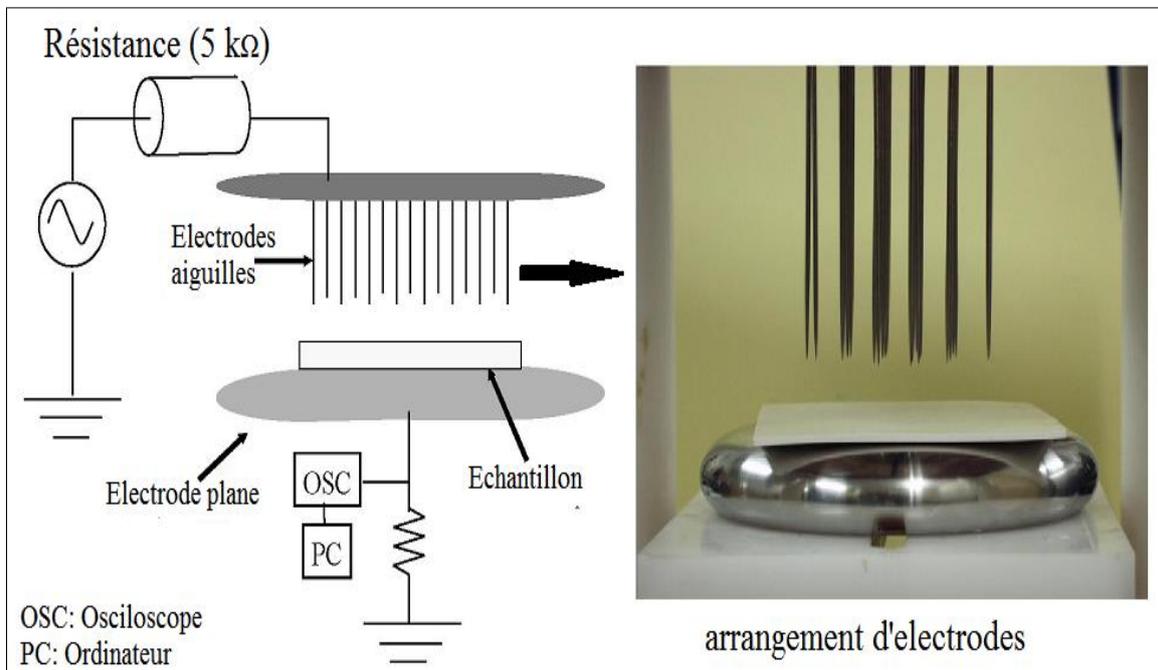


Fig. I.13: Modèle électrodes en forme aiguilles-plan

Ensuite ils ont mesuré la tension et le courant de fuite, puis une analyse chimique et morphologique de la plaque a été réalisée par l'utilisation des techniques SEM et FT-IR. L'une de ces techniques comme la SEM est illustrée par la figure I.14. Celle-ci montre des micrographies de l'échantillon avant et après la décharge couronne, sa surface était extrêmement régulière avant l'essai (Fig. I.14a). Cependant, la surface de l'échantillon vieilli par effet couronne est indiquée sur la figure I.14b.

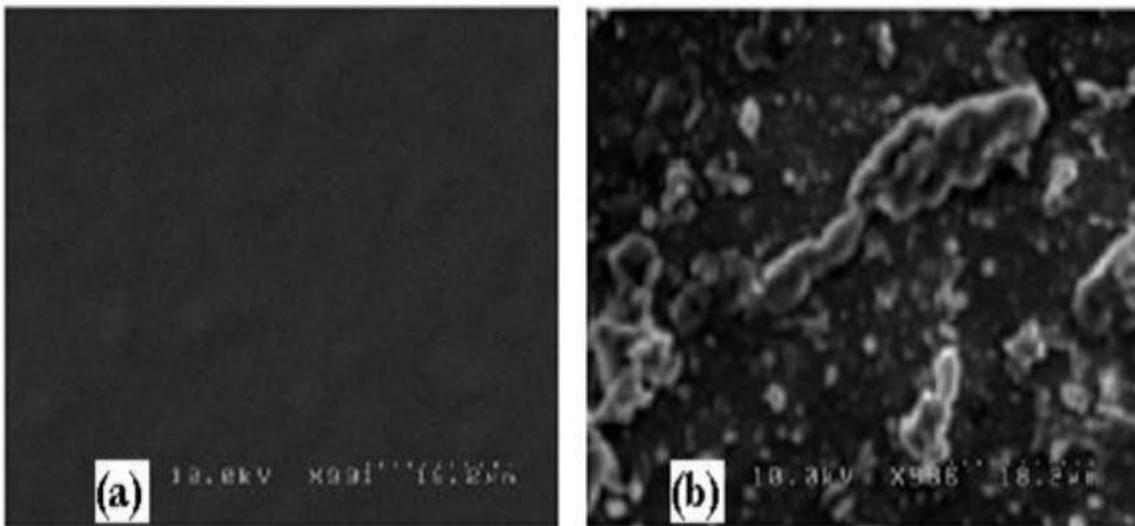


Fig. I.14: Images de l'échantillon par SEM, (a) avant et (b) après la décharge couronne

Le changement des caractéristiques physiques qui sont mentionnées ci-dessus permet à la propriété mécanique du matériel d'être réduite. Ils ont montré qu'il existe des groupes hydrophiles OH qui se présentent comme les sous-produits du vieillissement, pouvant être formés sur la surface de silicone au lieu des groupes CH₃. D'après cette étude la décharge couronne joue un rôle majeur sur la perte temporaire de l'hydrophobicité de la plaque en silicone.

I.2.11 Michael G. Danikas 2006 [14]

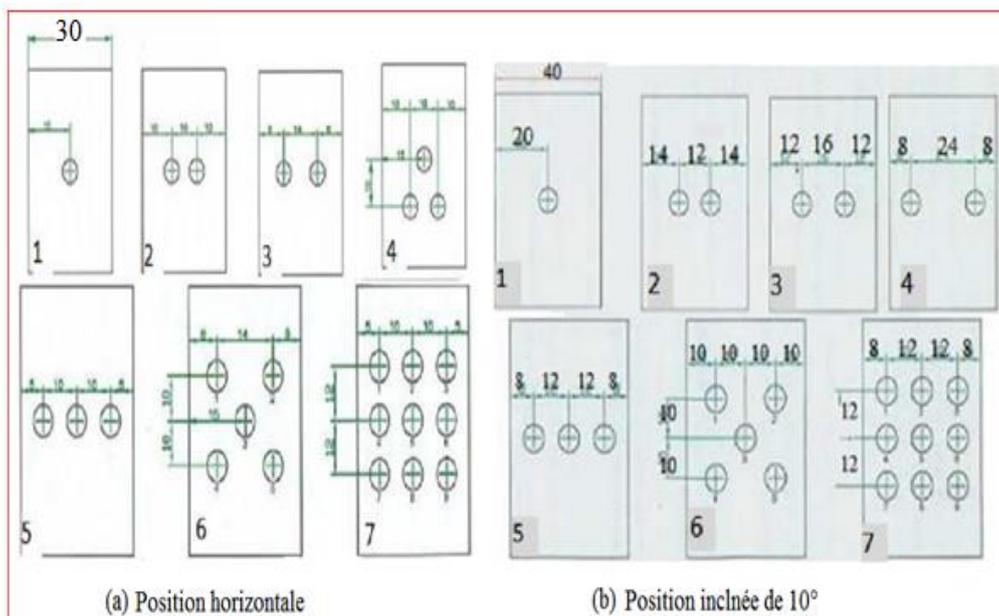


Fig. I.15: Arrangements de gouttelettes d'eau sur les différents plans

Un champ électrique alternatif AC homogène a été appliqué sur les gouttelettes d'eau posées sur une surface en silicone se présentant sous deux positions horizontale et inclinée (figure I.15). Les phénomènes de décharge et d'arcs localisés ont été étudiés en termes de la conductivité des gouttelettes d'eau variable de 1,7 $\mu\text{S}/\text{cm}$ jusqu'à 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ce choix peut être expliqué par la prise en considération de la conductivité de la pluie naturelle qui se situe entre 50 et 150 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Le volume choisi est de 0.1ml pour un arrangement des gouttelettes en position horizontale (Fig. I.15a), et 0.2 ml pour un angle d'inclinaison de 10° par rapport à l'horizontale (Fig. I.15b).

Les tests ont été effectués avec des conductivités de gouttelettes d'eau variable couvrant une large gamme des valeurs.

Tous les paramètres mentionnés affectent la tension de contournement. Cependant, le degré d'importance de chacun d'entre eux varie à la fois pour les deux positions horizontale et inclinée, le positionnement et le volume de gouttelettes d'eau dans certains cas jouent un grand rôle dans la détermination de la tension de contournement.

L'augmentation de la conductivité de gouttelettes d'eau entraîne la diminution de la tension de contournement comme indiqué sur la figure I.16, conformément à la position inclinée.

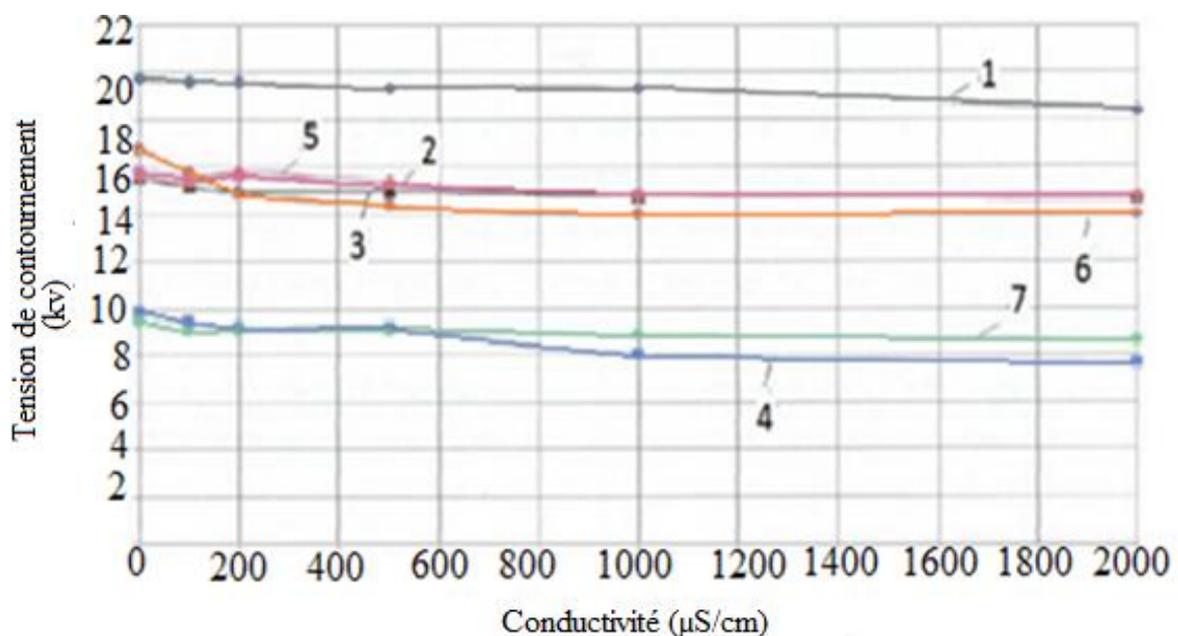


Fig. I.16: Tension de contournement pour différentes conductivités de gouttelettes d'eau

Ils ont conclu que la conductivité de gouttelettes d'eau, la rugosité de la surface de silicone et le volume des gouttelettes jouent un rôle important pour la détermination de la

tension de contournement qui est dû au déplacement des charges libres accélérées par le champ électrique appliqué par une tension alternative. Il se manifeste par un arc électrique dans l'air environnant entre deux électrodes conductrices. L'endommagement est superficiel à cause de l'énergie thermique dégagée par l'arc. Le positionnement de gouttelettes par rapport aux électrodes est également un facteur à ne pas négliger.

I.2.12 W. Betuj, J. Fleszynski, A. Tyman, K. Wieczorek 2007[15]

Les chercheurs ont étudié les effets de la pluie et de brouillard sur les caractéristiques des isolateurs en silicone. Pour réaliser cette étude ils ont utilisé deux types des isolateurs en silicone avec l'angle d'inclinaison (θ) différent comme il est mentionné dans le tableau qui suivant :

Isolants	n (nombre des ailettes)	d (distances entre les ailettes)	s (section des ailettes)	θ (angle d'inclinaison)
	-	mm	mm	°
6s10	6	105	30	10
6s30	6	105	30	30

Tab. I.3: Caractéristiques des isolateurs en silicone

La figure I.17 montre l'image de deux isolateurs en silicone et leur angle d'inclinaison (θ).

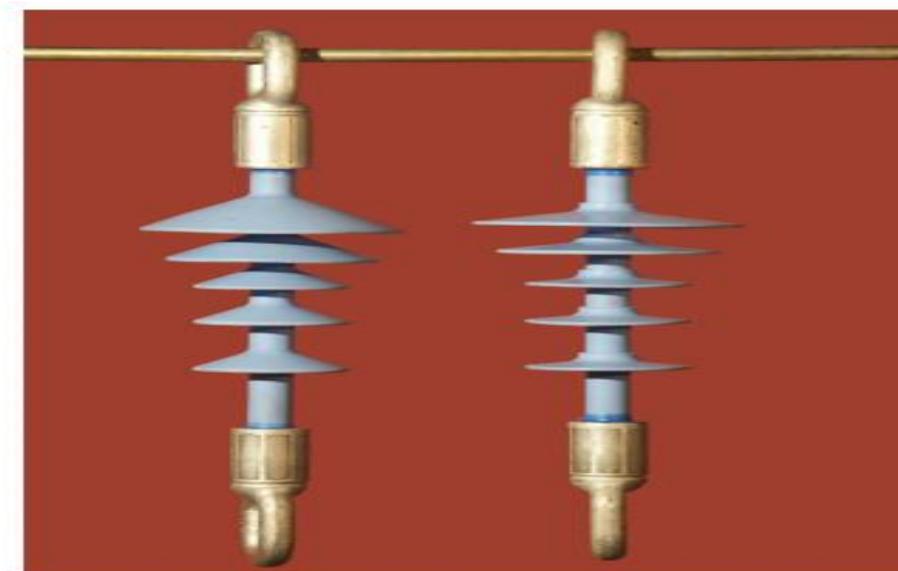


Fig. I.17: Photo de deux isolateurs en silicone avec l'angle d'inclinaison des ailettes 30° (gauche) et 10° (droite)

Pour étudier le processus de vieillissement des isolateurs en silicone, ils ont utilisé un dispositif tel que la chambre de pluie artificielle qui contient un isolant en silicone à l'intérieur. Une de ses bornes est mise sous tension alternative (HT), avec injection de la pluie ou de brouillard sur les ailettes de cet isolant comme il est indiqué sur la figure I.18.

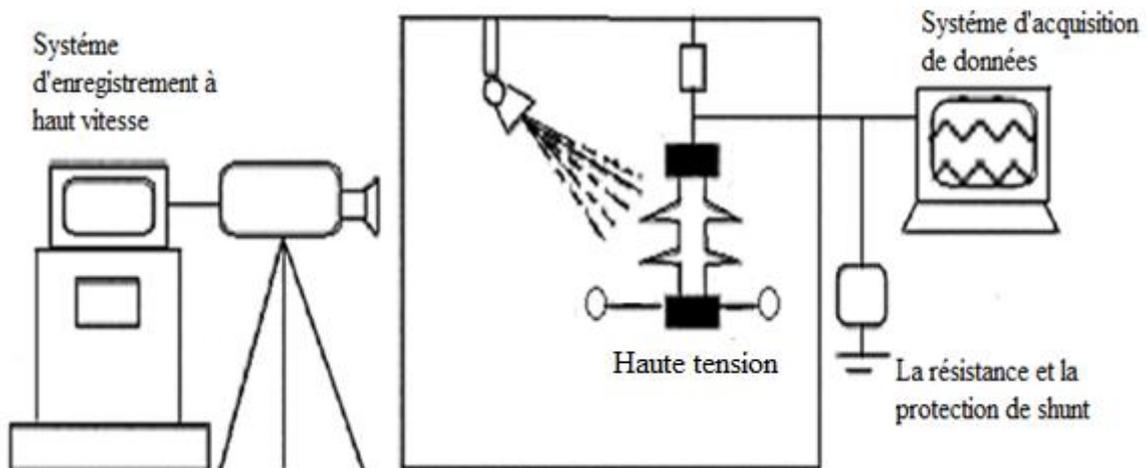


Fig. I.18: Dispositif expérimental de la chambre de la pluie artificielle

L'intensité de la pluie était 0,1 l/mn et sa conductivité est égale à 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$, la tension a été gardée fixe à un niveau de 24 kv pour l'isolateur en silicone 6s10 et de 40 kV pour 6s30 (50 Hz).

Les résultats de vieillissement visualisés sur cet échantillon en silicone avec leurs courants de fuite sont présentés sur les figures suivantes :

Dans la chambre de la pluie avec $V = 24 \text{ kv}$ sous tension (AC).



Fig. I.19: Image de l'isolant 6s10 au 6^{ème} jour de son vieillissement

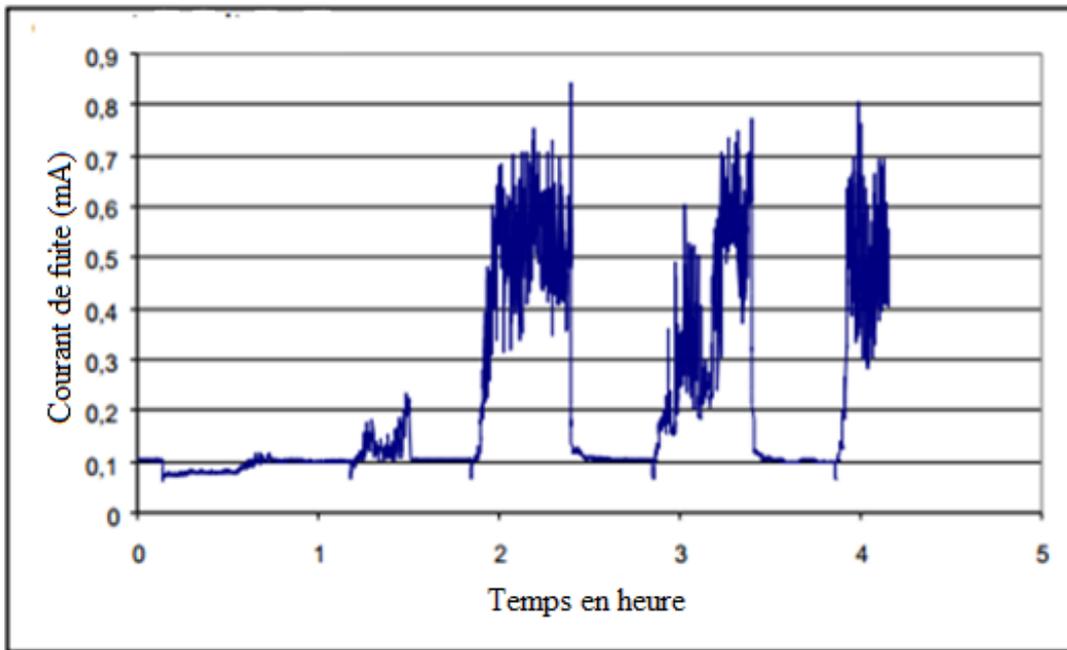


Fig. I.20: Courant de fuite enregistré au 7^{ème} jour de vieillissement sur l'isolateur en silicone



Fig. I.21: Etat de l'isolateur après une longue durée de son vieillissement

D'après cette étude ils ont conclu que l'isolant avec les ailettes de petit diamètre espacées d'un angle d'inclinaison (θ) petit ont une résistance de vieillissement faible. Le vieillissement des isolants avec le profil de l'ailette escarpée ($\theta = 30^\circ$) est clairement meilleure que celle des isolants avec la petite inclinaison ($\theta = 10^\circ$).

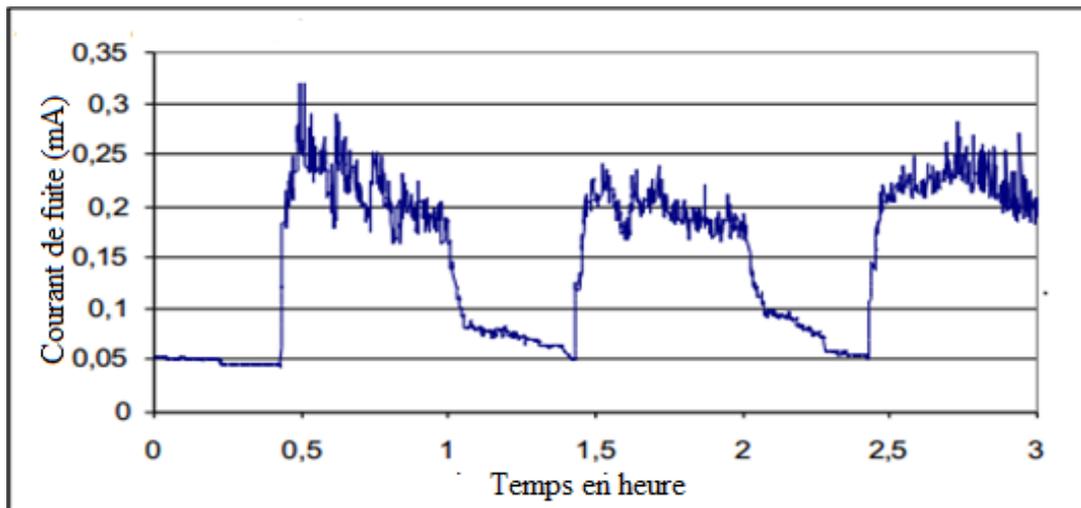


Fig. I.22: Courant de fuite enregistré au le 65^{ème} jour de vieillissement sur l'isolant 6s30 sous application de tension alternative de 40 kv

I.2.13 K. Haji, Y. Zhu, M. Otsubo, T. Sakoda 2008 [16].

Les chercheurs ont donné de l'importance à une étude sur un dispositif expérimental pour voir les effets des décharges partielles sous différentes conductivités, sur l'érosion, ainsi que la perte de poids sur des isolateurs en silicone, comme il est montré sur la figure I.23. Le modèle d'isolateur est équipé de deux électrodes en cuivre, l'une connectée à une source haute tension de fréquence 60 Hz à travers une résistance en série $R_s = 1.4 \text{ M}\Omega$ et l'autre connectée à la terre.

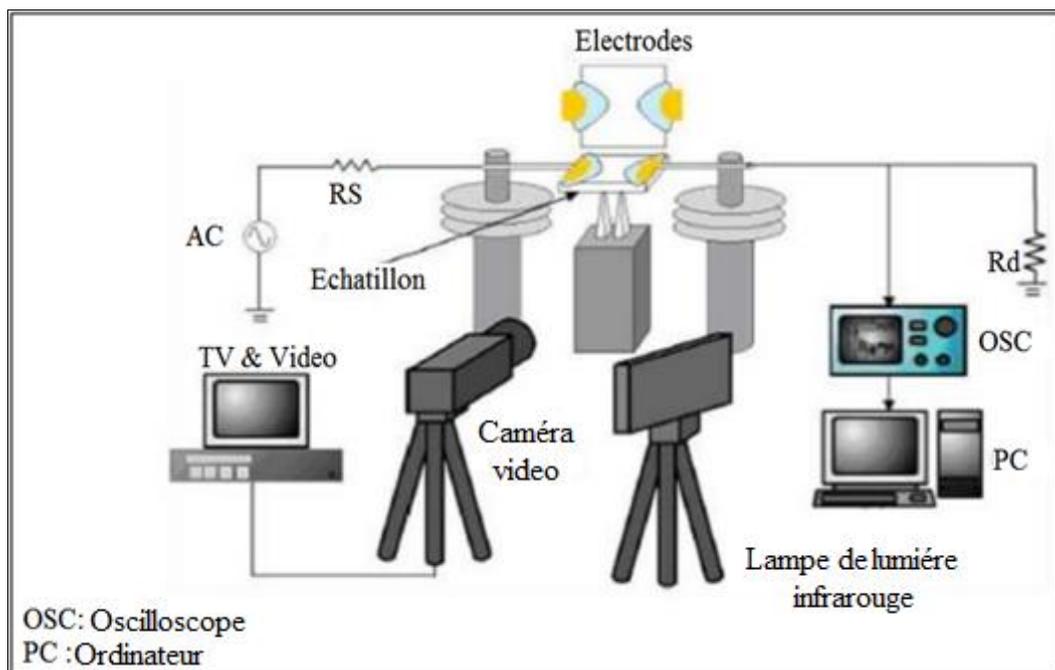


Fig. I.23: Dispositif expérimental

La pollution de la surface est simulée avec quatre solutions contenant du sel (NaCl) de conductivités égales à 0,8, 4, 8 et 16 mS/cm. La distance interélectrode est de 10 mm. Un dispositif constitué d'une caméra et d'un oscilloscope reliés à un PC, a permis de suivre le comportement des décharges et d'enregistrer les signaux de la tension et du courant de fuite. Un thermographe a enregistré l'évolution de la température et une balance électronique mesure le poids du modèle après chaque essai de décharge. Une simulation du champ électrique avec la méthode des éléments finis a permis d'évaluer sa distribution durant la propagation des décharges partielles.

Les résultats obtenus montrent qu'après 140 s d'exposition aux décharges partielles, les pertes de poids molaire sont plus importantes pour les basses conductivités (0,8 et 4 mS/cm). Les relevés du courant de fuite et de la tension envisagée ont permis de suivre l'évolution des décharges. Cela est confirmé par la présence de pics au sein de l'onde de tension et celle du courant de fuite comme le montre la figure I.24.

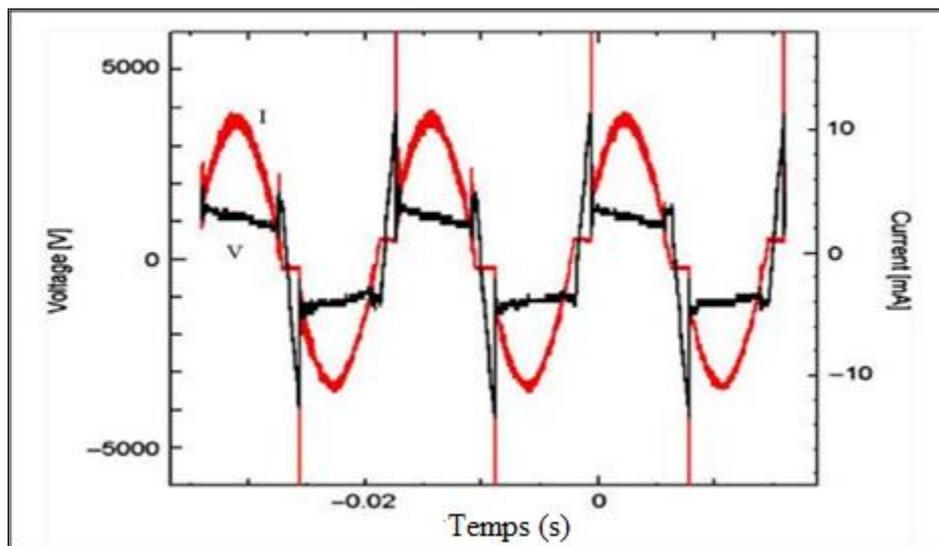


Fig. I.24: Formes d'ondes du courant de fuite et de la tension pour une conductivité de 0,8 mS/cm

Les chercheurs constatent finalement que pour les faibles conductivités, les décharges se propagent sur la surface de l'isolateur avec l'apparition des particules de silice, ceci signifie que l'érosion est très sévère. Pour les conductivités élevées (8 et 16 mS/cm), l'arc électrique a tendance à se former dans l'air ce qui peut expliquer l'absence quasi-totale de trace d'érosion. Ces résultats correspondent parfaitement avec d'autres investigations. Les résultats du thermographe obtenus après 20 s du début de la décharge, montrent que la température augmente proportionnellement avec la conductivité jusqu'à 1073 °K pour 16 mS/cm.

Ce phénomène physique est le résultat de l'augmentation de la densité de courant pour les grandes conductivités, qui donne naissance à un dégagement de chaleur par effet joule.

I.2.14 B. X. Dul, Yong Liul 2009 [17]

Une étude sur les caractéristiques de décharges produites par le comportement dynamique de gouttelettes d'eau pour évaluer l'hydrophobicité de l'isolateur en silicone a été réalisée. La distribution du champ électrique juste à la chute de la gouttelette a été calculée pour indiquer le rapport entre les décharges et l'hydrophobicité, ils ont constaté qu'avec la diminution de l'hydrophobicité, le nombre et la durée de décharges montrent la tendance croissante. L'augmentation de l'intensité de décharge et de l'intensité de la lumière reliée indique la diminution de l'hydrophobicité.

Les méthodes courantes pour évaluer l'hydrophobicité extérieure sont la méthode de l'angle de contact (CA), la méthode de la tension superficielle et le procédé de pulvérisation. Bien que ces méthodes aient favorisé des effets sur l'évaluation de cette l'hydrophobicité, elles ont toujours quelques limitations. Pour la méthode de (CA), elle peut exactement refléter l'état de gouttelette d'eau sur la surface d'isolateur, Pour la méthode de la tension superficielle, on l'établit de la définition de l'hydrophobicité, Pour la méthode de pulvérisation, elle est la plus appliquée au laboratoire et sur le site, mais les données peuvent avoir la dispersion due à l'évaluation grossière.

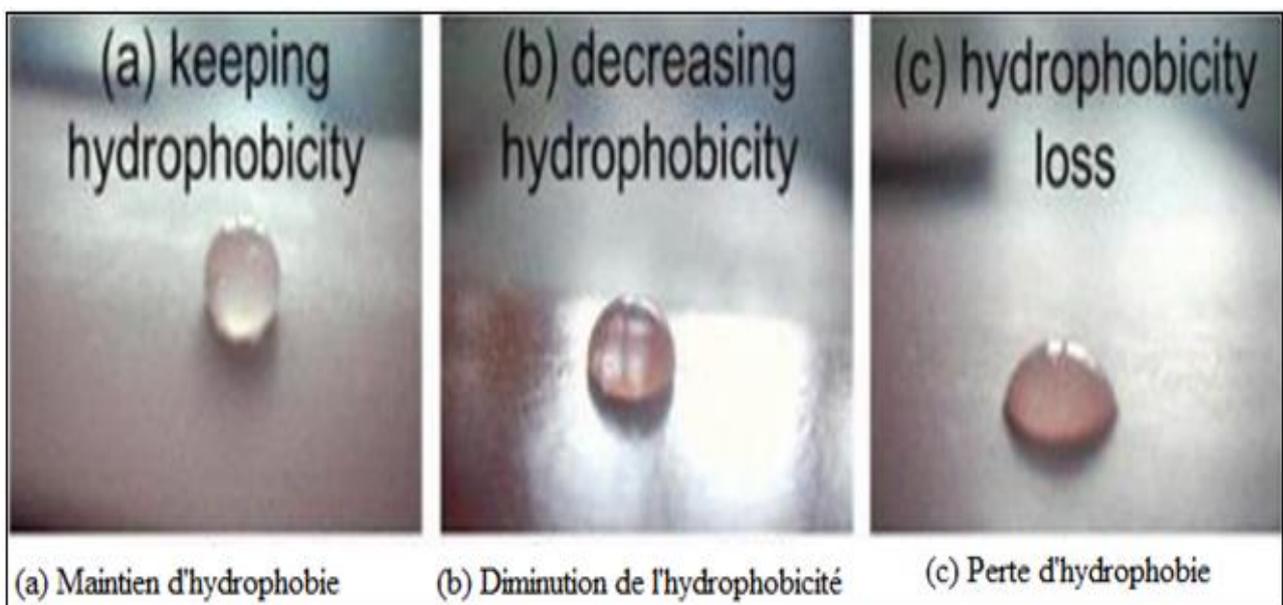


Fig. I.25: Performance de gouttelette d'eau sur une surface de l'isolateur de caoutchouc en silicone

Un test dynamique des gouttelettes (DDT; dynamic drop test) a été proposé comme méthode d'évaluation du comportement dynamique d'une gouttelette d'eau. Trois échantillons de l'isolateur en silicone ont été choisis, basée sur la méthode de l'angle de contact d'une gouttelette qui est posée sur la surface de silicone comme le montre la figure I.25.

Les chercheurs ont étudié les trois cas de la figure I.25, représentant les phénomènes de décharge pendant le processus de chute de la gouttelette d'eau (Figure. I.26).

1^{er} cas: Silicone hydrophobe :

La décharge s'est produite à la période la plus tôt de la gouttelette chutant, observation d'une lumière violette émise par les décharges sur le côté de l'électrode HT, qui indique l'endroit de la décharge et de faibles décharges de la bande sèche (Fig. I.26.a).

2^{ème} cas: hydrophobicité décroissante :

Lors de l'observation des décharges jusqu'à la période moyenne du processus chutant, la lumière jaune lumineuse est apparue juste à la chute de la gouttelette, ce qui indique l'occurrence des décharges intensives. Alors juste après, les tâches de la lumière jaune donnent la distribution et l'intensité des décharges de bande sèche (Fig. I.26.b).

3^{ème} cas: perte d'hydrophobicité :

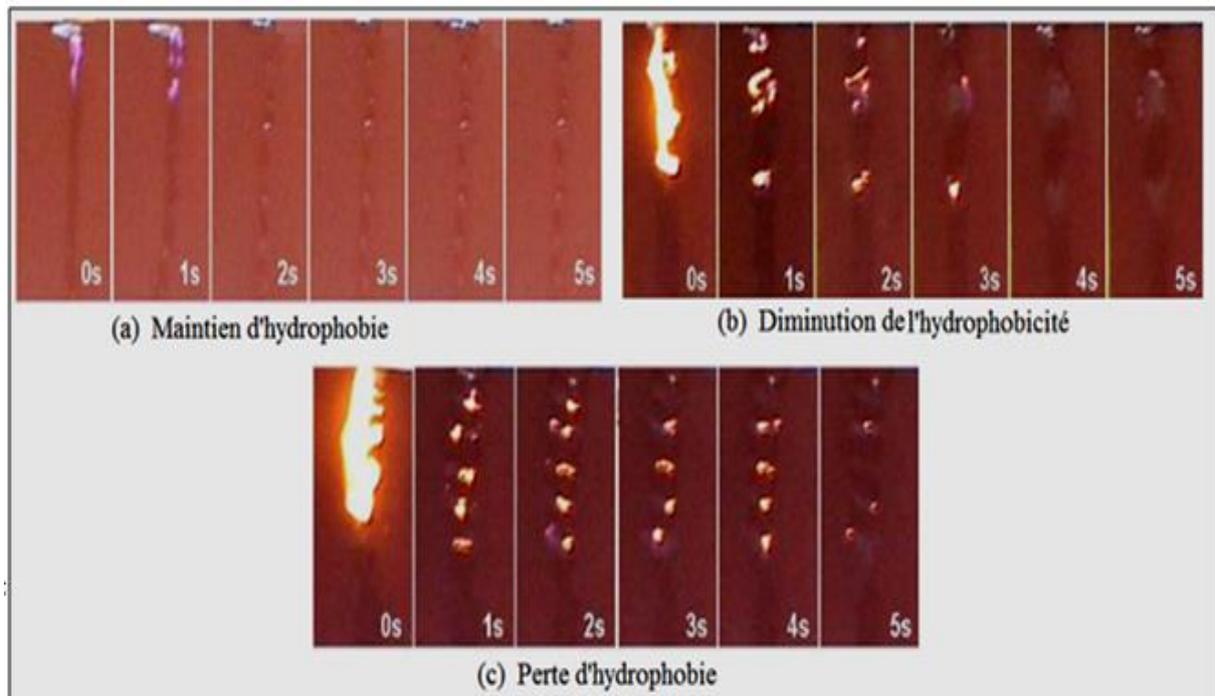


Fig. I.26: Phénomènes de décharge pendant la chute de la gouttelette d'eau

Ils ont observé les activités de décharge pendant le processus complet de la chute de gouttelette. La lumière jaune la plus lumineuse est apparue à la chute initiale de la gouttelette d'eau, alors les tâches de lumière jaune distribuées le long de l'échantillon apparaissent en raison de la formation des activités de bande sèche. La distribution de couleur légère est conforme à la morphologie de décharge (Fig. I.26.c).

Les différents phénomènes de décharge sont dus à la variation de l'hydrophobicité qui a comme conséquence l'interaction entre la gouttelette et la surface de l'échantillon.

Avec la diminution de l'hydrophobicité, la gouttelette cause la formation d'un film d'eau après la formation de petites gouttelettes sur la surface, qui cause la déformation de la distribution de champ électrique et de la formation des décharges glissantes supplémentaires.

Avec la diminution de l'hydrophobicité, plusieurs petites gouttelette ont adhéré à la surface lesquelles entraînant la déformation et l'intensification de la distribution de champ électrique, le flux des pulsations lumineuses peuvent indiquer la diminution du l'hydrophobicité.

I.2.15 Rajini , K. Udayakumar 2009 [18]

Les auteurs ont étudié la dégradation ou le vieillissement de l'isolant en silicone par effet des radiations gamma , pour cette raison ils ont utilisé un dispositif à plan incliné avec la variation de l'angle d'inclinaison(α). comme illustré sur la figure.I.27.

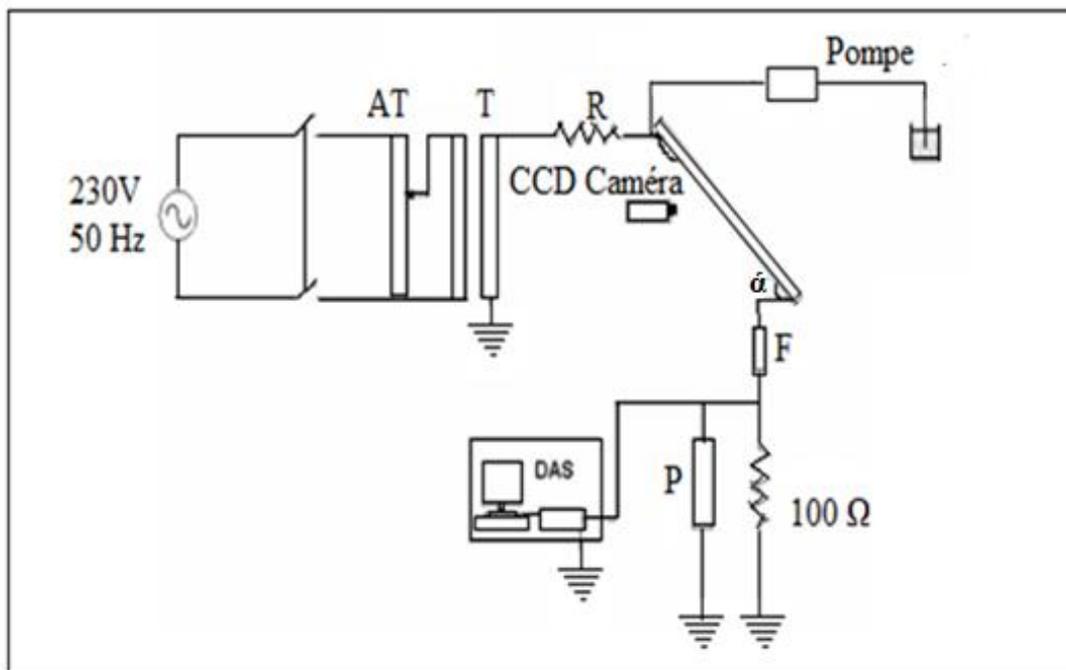


Fig. I.27: Dispositif expérimental de l'essai sur l'isolant plan incliné avec la variation de l'angle de contact α

Pour leurs essais ils ont utilisé trois degrés différents de rayon gamma sur l'échantillon en silicone, pour la tension alternative ils ont remarqué que le temps de contournement resté constant à la valeur de 370 mn quel que soit le degré de rayon gamma utilisé (figure. I.28).

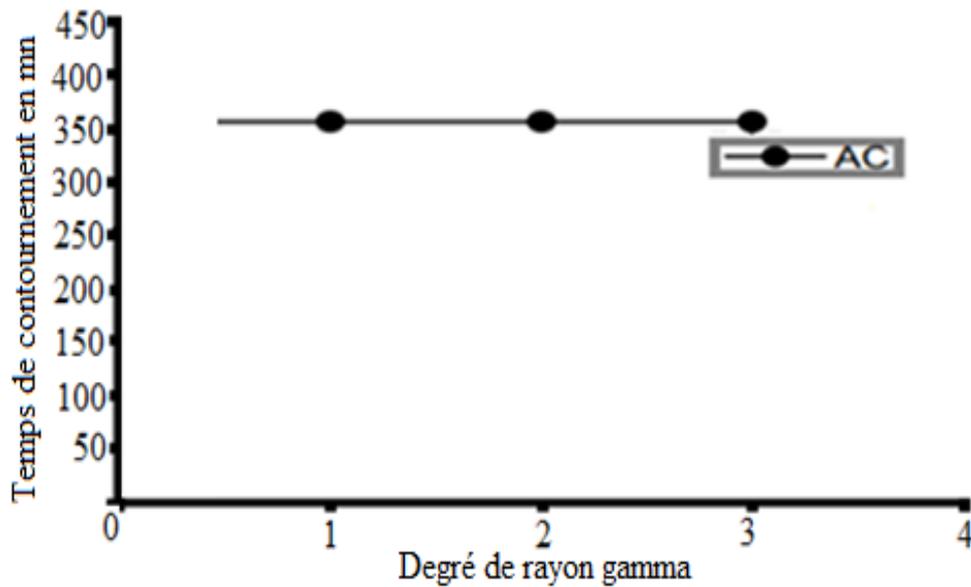


Fig. I.28: Temps de contournement sur l'isolant en silicone en fonction du différent degré de rayon gamma

Ils ont conclu que la variation de degré de rayon gamma n'a pas influencé la performance de l'isolant en silicone lorsque une tension alternative est appliquée ainsi que son vieillissement.

Ils ont aussi remarqué que le temps de contournement reste constant quelle que soit la variation de la conductivité du contaminant (figure I. 29).

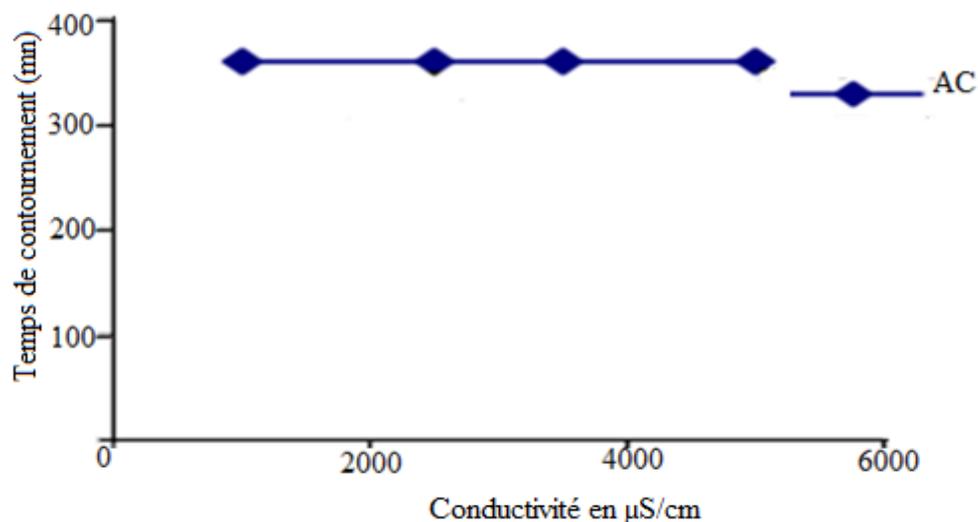


Fig. I.29: Temps de contournement en fonction de la conductivité

Cela indique que l'isolation en silicone est un matériau isolant idéal pour les tensions alternatives.

Absence total de la profondeur d'érosion maximale sur l'échantillon en silicone avec la variation de rayon gamma sous tension alternative (AC) appliqué (figure I.30).

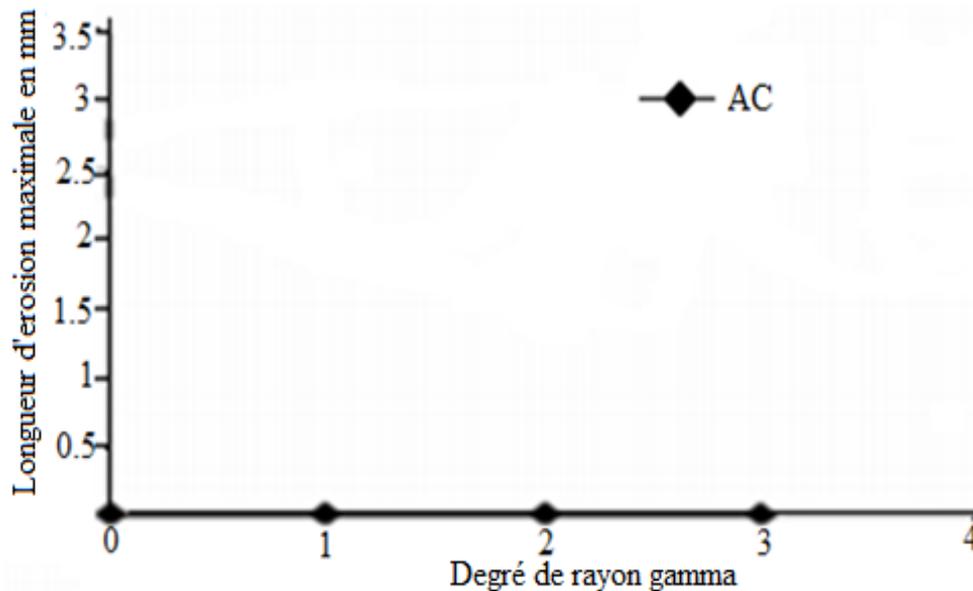


Fig. I.30: Angle de la profondeur de l'érosion maximale et le contact affecté par le rayonnement gamma

I.2.16 S. Thong-Om, W. Payakcho 2011 [19]

L'essai de vieillissement sous le brouillard salin a été effectué sur les isolateurs en silicone. Ces derniers ayant trois configurations différentes (ailettes droites, ailettes alternées, et ailettes inclinées et alternées), ont été testés sans interruption pendant 1000 heures, dans une chambre de brouillard salin artificiel. Le degré de contamination, la réduction de l'hydrophobicité et mesure de la dureté, ont été employés comme techniques d'analyse des dommages physiques, pour évaluer le degré de détérioration de la surface.

- L'humidification de la surface en silicone ayant la conductivité élevée. Ceci induit des décharges couronnes et d'arcs de bande sèche sur la surface d'isolant en silicone ;
- La diminution d'hydrophobicité d'échantillon testé comparé avec un échantillon neuf indique le degré de détérioration de la surface.

Ils ont observé l'arc de la bande sèche et les décharges couronne sur la surface extérieure du tronc dans tous type d'échantillons (figure. I.31).

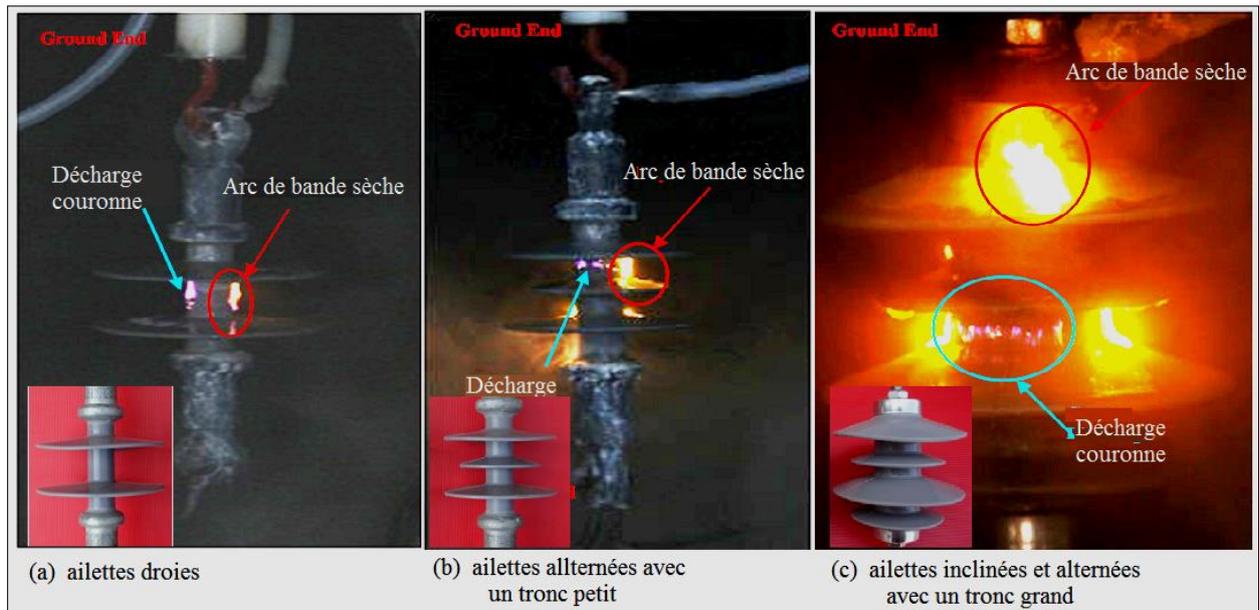


Fig. I.31: Activités des décharges sur un isolateur en silicone

- Une plus grande réduction d'hydrophobicité a été mesurée sur la surface du tronc comparée avec la surface des ailettes de tous types d'échantillons.

L'évaluation du niveau d'hydrophobicité de la surface des échantillons testés a été basée sur la classification faite selon la figure I.32. Les résultats de mesure de l'hydrophobicité sont affichés dans le tableau I.4.

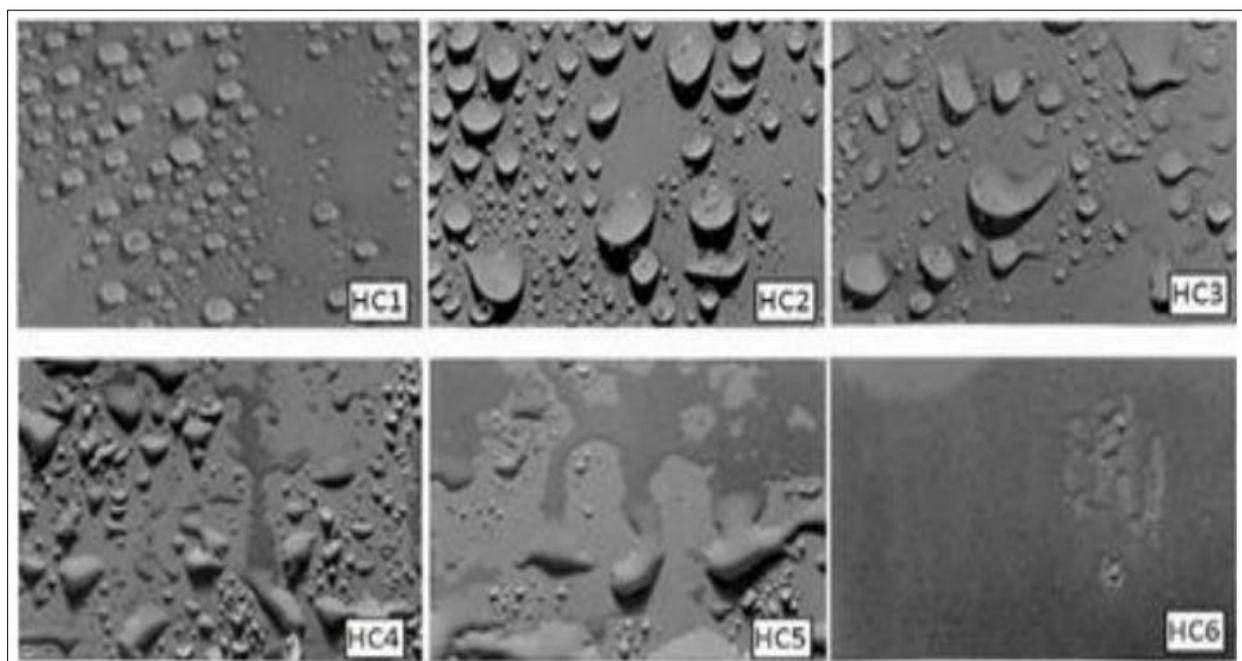


Fig. I.32: Classification d'hydrophobicité (HC1-HC6) [20]

ailettes droites			ailettes alternées			ailettes à pente et alternées		
Position	HC	Position	Position	HC	Position	Position	HC	Position
1	HC 5	Ground End	1	HC 4	Ground End	1	HC 2	Ground End
2	HC 5		2	HC 5		2	HC 1	
3	HC 2		3	HC 2		3	HC 3	
4	HC 4		4	HC 4		4	HC 2	
5	HC 5		5	HC 5		5	HC 1	
6	HC 2	Energized End	6	HC 3		6	HC 3	
7	HC 5		7	HC 4		7	HC 2	
			8	HC 4		8	HC 2	
			9	HC 2	Energized End	9	HC 3	
			10	HC 4		10	HC 4	
						11	HC 4	Energized End

Tab. I.4: Classification d'hydrophobicité

I.2.17 Ydjedd Radouane 2012/2013 [20]

L'objectif principal de son travail était d'étudier l'effet du degré de l'angle d'inclinaison (α) par rapport à l'horizontale d'une isolation en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau, leur volume et leur conductivité électrique sur sa performance. Pour cette étude il a utilisé un dispositif expérimental comme illustré dans la figure I.33.

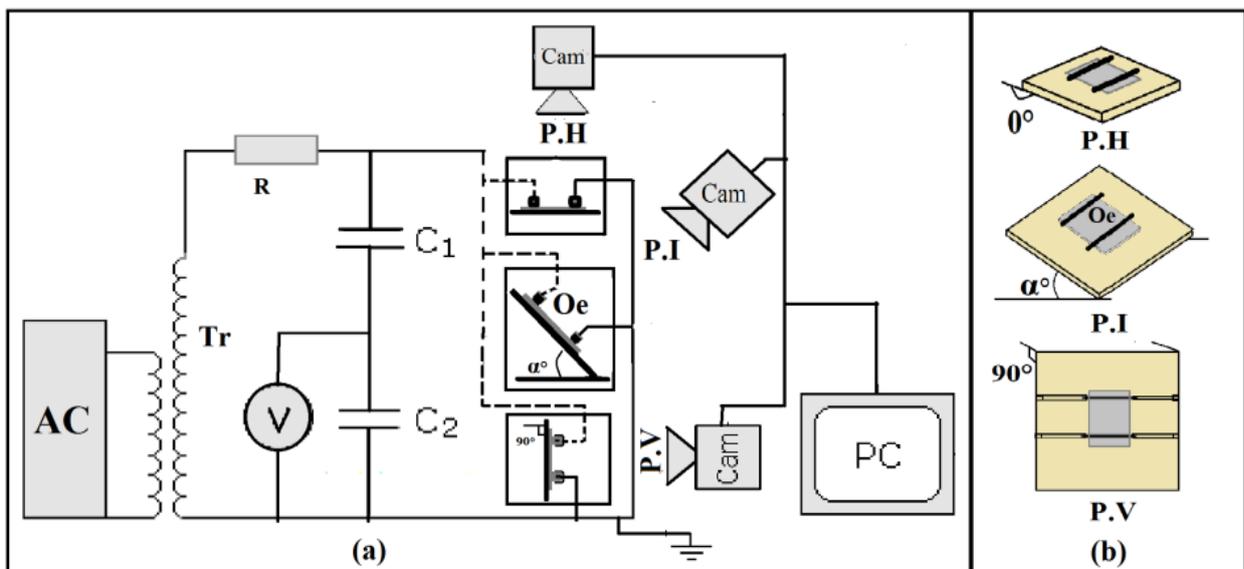


Fig. I.33: (a) schéma de mesure et de visualisation; (b) différentes positions de l'objet d'essai

PH: Position horizontale ; PI: Position inclinée ; PV: Position verticale

L'arrangement de gouttes d'eau utilisé est montré dans la figure I.34

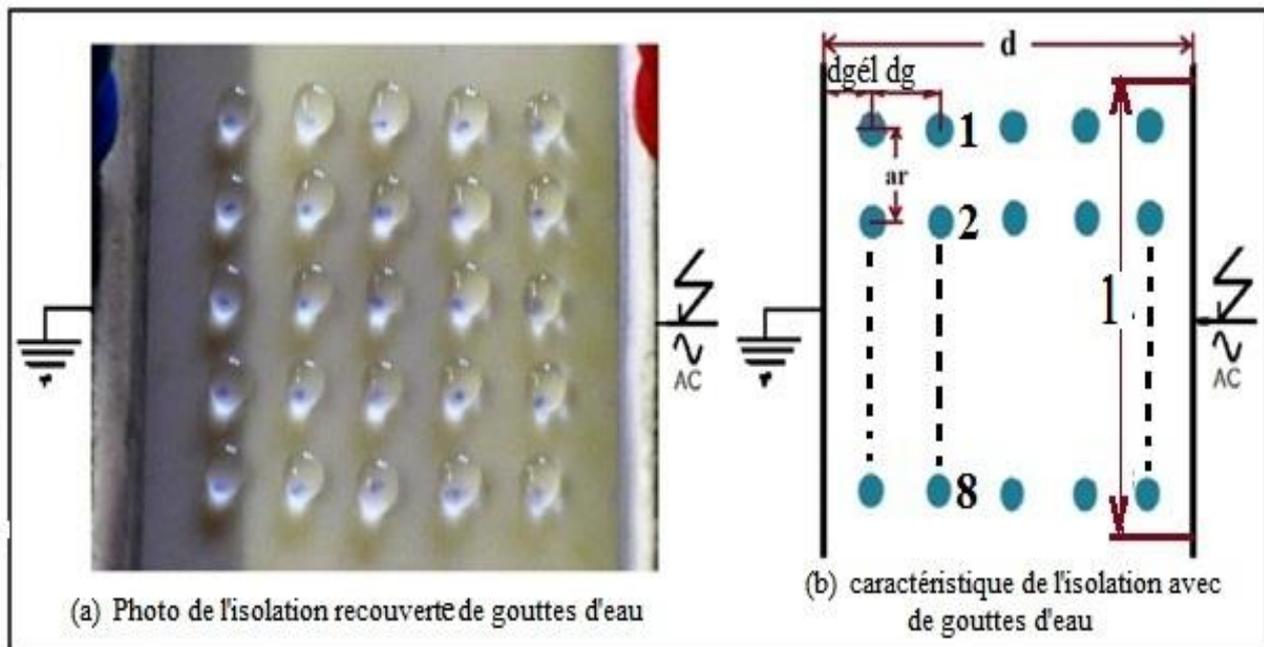


Fig. I.34: Positionnement des gouttes sur une surface en silicone limitée par 2 électrodes

d : Distance interélectrode; l : Largeur du film en silicone;

a_r : Distance séparant deux rangées successives de gouttes d'eau sur la largeur de l'isolation;

d_g : Distance entre deux gouttes adjacentes sur la même ligne de fuite de l'isolation;

$d_{gél}$: Distance entre l'électrode (soit du côté HT ou côté terre) et la première goutte se trouvant sur la ligne de fuite de l'isolation;

N_r : Nombre de rangées de 1, 2, ..., 8;

Les résultats essentiels de cette analyse peuvent être résumés comme suit:

- La rigidité diélectrique longitudinale optimale de l'isolation en silicone est obtenue en absence de gouttes d'eau ;
- L'analyse des différents arrangements de gouttes d'eau sur l'effet de la tension de contournement de la surface isolante hydrophobe engendre la réduction de la performance de celle-ci. Cette dernière est en fonction de la distance entre les gouttes le long de la ligne de fuite et de la largeur de l'isolation, comme le montre la figure I.34.

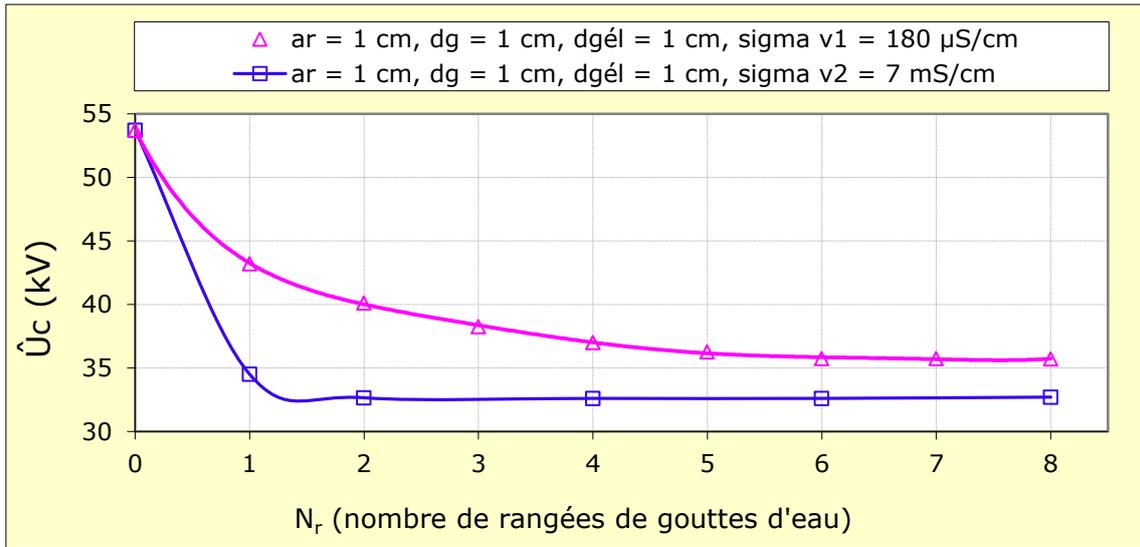


Fig. I.35: $\hat{U}_c = f(\sigma_v, N_r)$ d'une surface en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau avec un volume de $45 \mu\text{l}$

- ✓ La croissance de la conductivité des gouttes d'eau entraîne la diminution de la tension de contournement de l'isolation jusqu'à une valeur $\sigma_v = 1 \text{ mS/cm}$ (figure. I.35).

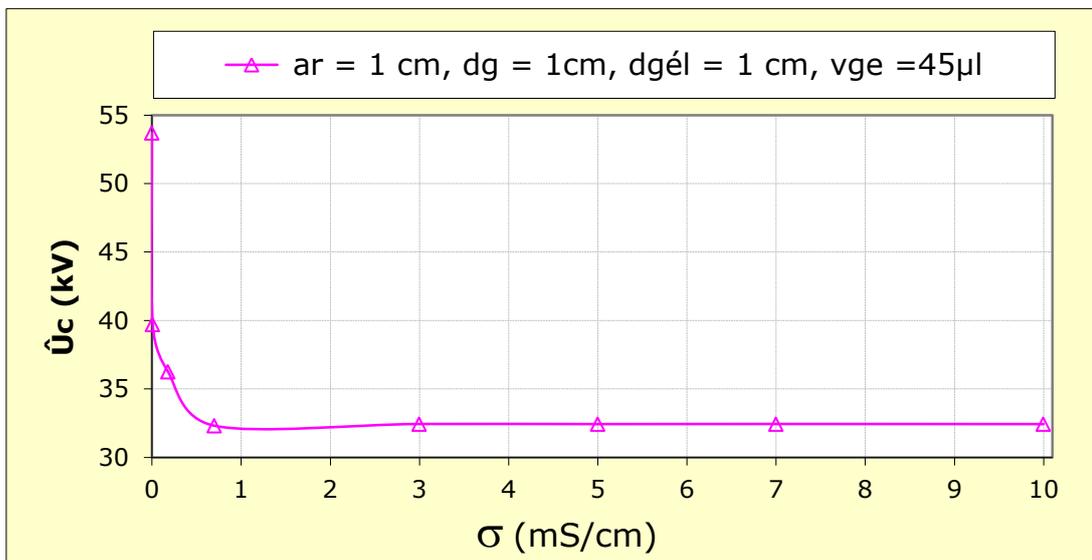


Fig. I.36: $\hat{U}_c = f(\sigma_v)$ de gouttes d'eau en position horizontale ($N_r = 5$)

- ✓ La tension de contournement de la surface hydrophobe est plus faible en présence de grandes gouttes que petites. La performance d'une surface hydrophobe, recouverte de grandes gouttes, en fonction de l'angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale,

présente un minimum pour un angle α égal à 65° . Par contre sous l'action de petites gouttes, ce minimum est obtenu pour un angle α de l'ordre de 90° (figure. I.36).

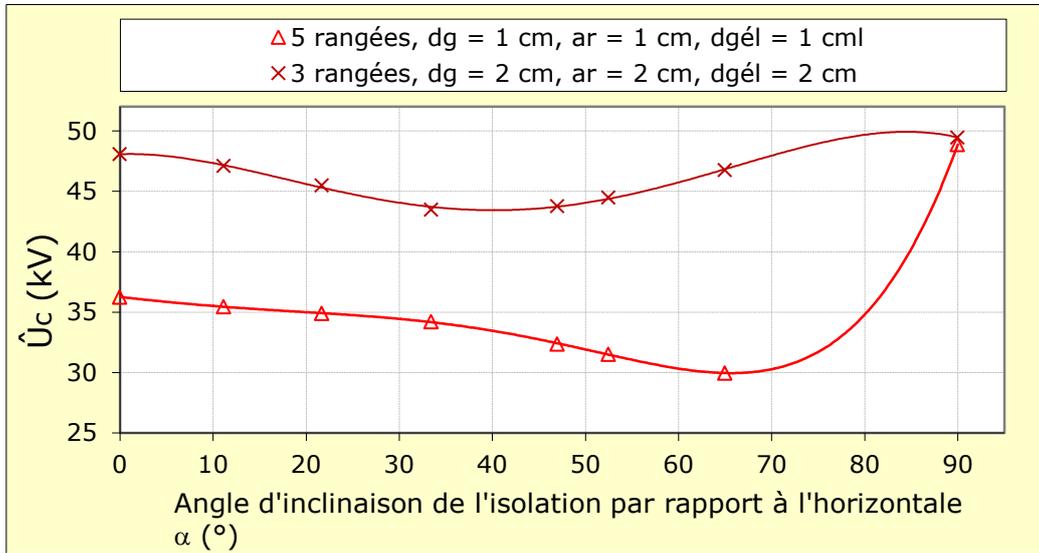


Fig. I.37: $\hat{U}_c = f(\alpha^\circ)$ d'une surface en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau ($V_g = 45 \mu\text{l}$, $\sigma_v = 180 \mu\text{S/cm}$)

Dans les 14 divers arrangements des gouttes d'eau à volume différent sur une surface en silicone hydrophobe inclinée d'un angle critique $\alpha_{cr} = 65^\circ$. Les petites gouttes ont un volume de $20 \mu\text{l}$ celui des grandes est de $45 \mu\text{l}$. la conductivité électrique de ces gouttes est de $180 \mu\text{S/cm}$. Il découle de la figure.1.38. que la rigidité diélectrique de l'isolation est la plus faible lorsque le volume de gouttes d'eau est de $45 \mu\text{l}$.

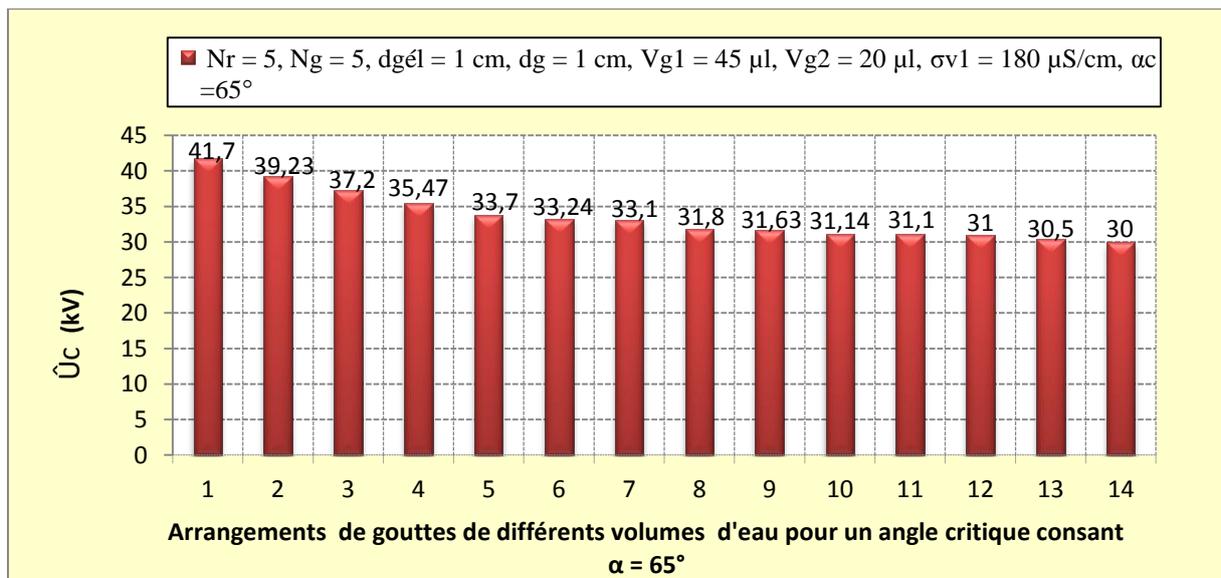


Fig. I.38: $\hat{U}_c = f(A_r)$ des gouttes d'eau à volume différent sur une surface en silicone hydrophobe ($\alpha_{cr} = 65^\circ$)

I.3 Conclusion

Dans cette recherche les auteurs sont basés sur les matériaux polymères tel que leur large utilisation comme isolation extérieure pour les lignes haute tension (HT) comme revêtement en silicone dans le domaine de fabrication des câbles à isolation en silicone.

Dans cette partie, nous avons donné une importance aux travaux réalisés par plusieurs chercheurs sur la performance électrique d'une isolation en silicone sous tension alternative.

Leurs recherches sont faites sur l'isolation en silicone à savoir la modification de ses caractéristiques par apport au changement climatique (pluie, brouillard, pollution, ...) et leur influence sur le vieillissement de l'isolant ainsi que sur les conditions qui doivent être favorables pour le transport d'énergie électrique.

Le but de notre apport était la spécification de la performance électrique d'une isolation hydrophobe en silicone recouverte de gouttes d'eau sous tension alternative en fonction de certains paramètres d'influence. Parmi ces derniers on été cités : l'angle d'inclinaison α de l'isolation par rapport à l'horizontale, le nombre de rangées de gouttes d'eau, la position des gouttes, le volume et la conductivité électrique des gouttelettes déposées sur le matériau étudié.

Chapitre II

Isolants et propriétés diélectriques

II.1. Introduction

La connaissance des propriétés électriques des matériaux pour les concepteurs des systèmes électriques ou autres est impérative. En effet, la considération des propriétés électriques est souvent très importante, particulièrement lors du choix des matériaux pour la conception d'un système donné. Le comportement électrique, pour un grand nombre de matériaux, est varié selon l'application et l'environnement de travail auquel il est destiné.

Certains matériaux doivent être de très bons conducteurs par contre d'autres, doivent être de très bons isolants.

Il existe une grande variété d'isolants solides, liquides, gazeux. En plus des isolants naturels, on trouve sur le marché de nombreux isolants synthétiques qui ont été développés pour différentes applications.

II.2. Définitions

II.2.1. Isolants [21]

Les isolants sont des matériaux ayant une résistivité très élevée : 10^8 à 10^{16} $\Omega.m$, car ils contiennent très peu d'électrons libres. Un isolant est caractérisé par ses propriétés électriques, mécaniques, chimiques et thermiques.

Les isolants sont utilisés pour :

- assurer une séparation électrique entre les conducteurs portés à des potentiels différents, afin de diriger l'écoulement du courant dans les conducteurs désirés (Protection des personnes et des équipements);
- supporter les éléments d'un réseau électrique et les isoler les uns par rapport aux autres et par rapport à la terre ;
- remplir les fonctions de diélectrique d'un condensateur.

II.2.2 Isoler [22]

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

II.2.3. Isolations [23]

Ensemble d'éléments constitués de matériaux isolants et servant à isoler les unes des autres les parties conductrices d'un dispositif.

II.2.4. Isolateur

L'isolateur est un composant destiné à maintenir et à isoler une ou plusieurs pièces électriquement conductrices.

D'un point de vue électrique, les isolateurs doivent offrir une grande résistance d'isolement afin qu'ils ne soient ni contournés en surface, ni perforés à travers leur masse par les tensions élevées qu'ils ont à supporter normalement.

D'un point vu mécanique, ils doivent être assez résistants pour supporter les tensions énormes dues au poids des conducteurs.

II.2.5. Diélectrique [24]

Un diélectrique est un matériau plus ou moins isolant (résistivité élevée, bande d'énergie interdite de quelques eV), polarisable, c'est-à-dire dans lequel des dipôles électrostatiques existent (diélectrique polaire) ou se forment sous l'effet d'un champ électrique (dipôles induits). En d'autres termes un diélectrique peut être défini comme un milieu matériel dans lequel la bande de conduction est séparée de la bande de valence par une énergie supérieure à (5 eV).

II.3. Propriétés diélectriques des matériaux isolants

II.3.1. Résistance et résistivité

II.3.1.1. Résistance et résistivité transversale

La résistance d'isolement fait intervenir à la fois la résistance transversale et la résistance superficielle d'un matériau, d'une façon représentative des conditions pratiques d'emploi des matériaux. La résistance transversale ou volumique est déterminée en appliquant un champ perpendiculaire à la surface d'une éprouvette et en mesurant le courant transversal qui résulte de l'application de ce champ. Elle est relative à la propriété interne du matériau.

II.3.1.2. Résistance et résistivité superficielle

La résistance superficielle est celle qui intervient entre deux conducteurs sur une même surface isolante. C'est une notion qui fait intervenir outre la qualité des matériaux, le dépôt d'une mince couche conductrice (humidité ou autre) à travers laquelle s'effectue en tout ou en partie la conduction. Dans les matériels électroniques (cartes imprimées) l'isolement principal entre deux conducteurs est assuré par la surface de l'isolant, d'où l'importance pratique de la détermination de la résistance longitudinale. Cette résistance comporte d'une part la résistance purement superficielle, mais aussi une certaine fraction de la résistance interne du matériau.

Les valeurs relatives de ces deux composantes de la résistance sont en fonction de divers paramètres et notamment de la largeur et de l'écartement entre conducteurs ainsi que de l'état d'humidification respectif des couches superficielles et interne du matériau.

Par définition, la résistance superficielle est le quotient de la tension continue appliquée entre les deux électrodes disposées à la surface de l'isolant par le courant qui en résulte. La résistivité superficielle est le quotient du gradient de potentiel en surface et le courant par unité de largeur.

II.3.2. Rigidité diélectrique

On appelle la rigidité diélectrique d'un isolant est la tension qui provoque sous champ uniforme la perforation d'un centimètre d'épaisseur de l'isolant [25].

La rigidité diélectrique d'un matériau isolant s'évalue par l'intensité du champ électrique, auquel il faut le soumettre pour qu'il en résulte une perforation qui le rende inapte à remplir ultérieurement sa fonction. De façon pratique, la rigidité diélectrique est définie comme étant le rapport entre la tension à la quelle se produit une perforation dans les conditions d'essais spécifiées et la distance entre les deux électrodes aux quelles est appliquée la tension la figure II.1, montre les positions relatives des conducteurs et de la surface des matériaux.

La mesure de la rigidité diélectrique est effectuée selon :

$$E_d = \frac{U_m}{d} = \frac{\sqrt{2}}{d} U_{eff} \dots\dots\dots II. 1$$

U_m : tension électrique crête à laquelle se produit une perforation (claquage) ;

d : distance interélectrode ;

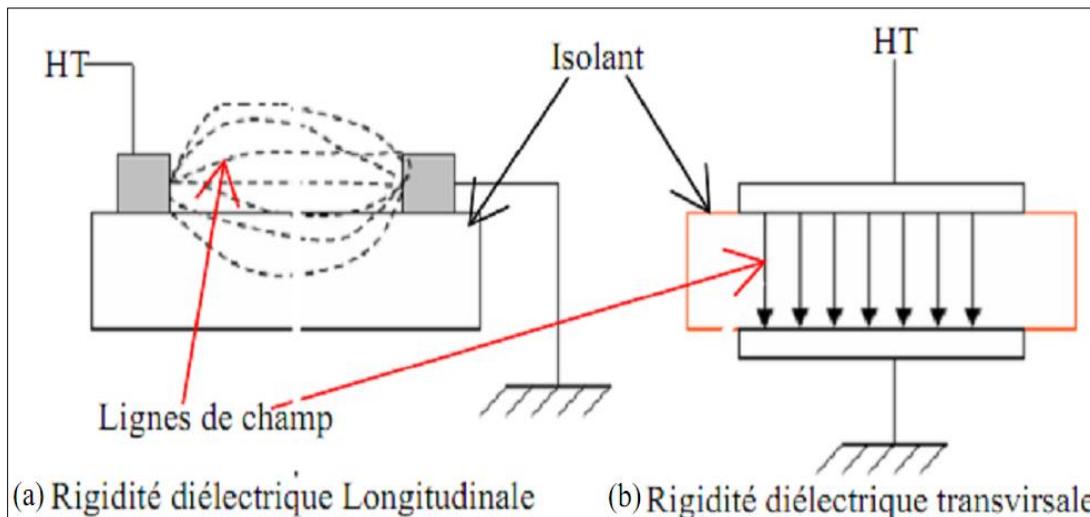


Fig. II.1: Rigidité diélectrique

Il faut noter que la rigidité diélectrique dépend de :

- la fréquence, la forme et la durée d'application de la tension ;
- la température, la pression et l'humidité de l'atmosphère ;
- la présence d'impuretés dans l'isolant (bulles d'air, humidité,...).

II.3.2.1. Rigidité diélectrique longitudinale

Elle dépend de peu de la nature de l'isolant mais beaucoup plus de son état sec et propre. En effet dans la plus part des cas, l'amorçage ou décharge entre deux conducteurs se produit d'abord dans le milieu ambiant ou voisinage de la surface du solide. Elle est obtenue entre deux conducteurs situés sur une même surface (**Fig. II.1a**).

II.3.2.2. Rigidité diélectrique transversale

Pour laquelle le champ électrique appliqué est perpendiculaire à la surface principale du matériau (**Fig. II.1b**). Dans les conditions pratiques cette rigidité elle est en fonction de nombreux paramètres expérimentaux et particulièrement des phénomènes qui prennent naissance dans le milieu extérieur au solide. Cette valeur est qualifiée de rigidité diélectrique pratique.

Lorsqu'il est possible de s'affranchir de l'effet des facteurs externes, on parle alors de rigidité diélectrique intrinsèque. Le rapport rigidité intrinsèque E_{di} sur la rigidité pratique E_{dp} dépend de la nature de l'isolant. La rigidité diélectrique transversale est calculée d'après la mesure de la tension nominale, pour une vitesse de montée, en tension donnée, la rupture de rigidité diélectrique de l'isolant se trouvant entre deux électrodes selon sa plus faible épaisseur.

II.3.3. Permittivité [26]

Lorsqu'un diélectrique est soumis à l'action d'un champ électrique E , il se produit à l'échelle moléculaire diverses modifications qui ont pour effet de créer un champ électrique propre (E_p), à l'intérieur de la substance. Ce dernier est en opposé au champ électrique extérieur (E_e) appliqué.

II.3.3.1. Permittivité relative [27]

La permittivité est une propriété caractéristique du point de vue électrique des matériaux diélectriques, elle reflète l'intensité des mécanismes de polarisation dans le matériau.

La permittivité relative (ϵ_r) d'un matériau est définie comme le rapport entre la capacité C_p d'un condensateur rempli de ce matériau et la capacité du même condensateur vide C_0 :

$$\epsilon_r = \frac{C_p}{C_0} \dots\dots\dots \text{II. 2}$$

II.3.3.2. Permittivité absolue

La permittivité absolue (ϵ_a) est le produit de la permittivité relative par la constante électrique du vide.

$$\epsilon_a = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \dots\dots\dots \text{II.3}$$

$$\epsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$$

Dans le cas des diélectriques non parfaits, on définit de façon analogue une permittivité complexe relative qui tient compte de la dissipation d'énergie dans le diélectrique. Elle s'écrit:

$$\epsilon_r^* = \epsilon_r' \cdot \epsilon_r'' \dots\dots\dots \text{II. 4}$$

Ou ϵ_r' est la partie réelle de la permittivité complexe, jouant le même rôle que ϵ_r dans les cas du diélectrique parfait.

$$\epsilon_a^* = \epsilon_r^* \cdot \epsilon_0 \dots \dots \dots \text{II.5}$$

II.3.4. Conductivité électrique

Un liquide ou un solide, pour être isolant électrique, doit conduire le moins possible l'électricité lorsqu'une tension lui est appliquée. Sa conductivité doit donc être la plus faible possible.

La conductivité d'un isolant est due à la présence de charges libres positives et négatives (des ions) en quantités égales. Sous l'effet d'un champ électrique, ces ions se déplacent provoquant ainsi un courant de conduction.

La conductivité s'exprime en S/m (Siemens par mètre).

La résistivité ρ est définie comme l'inverse de la conductivité σ :

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \dots \dots \dots \text{II.6}$$

Elle s'exprime en Ohmmètre (Ωm).

II.3.5. Angle de pertes et facteur de dissipation

Tout isolant soumis à un champ électrique alternatif est traversé par des courants de conduction et d'absorption qui donnent lieu à des pertes diélectriques. Le diélectrique réel peut être représenté par les schémas équivalents séries et parallèles (**Fig. II.2**).

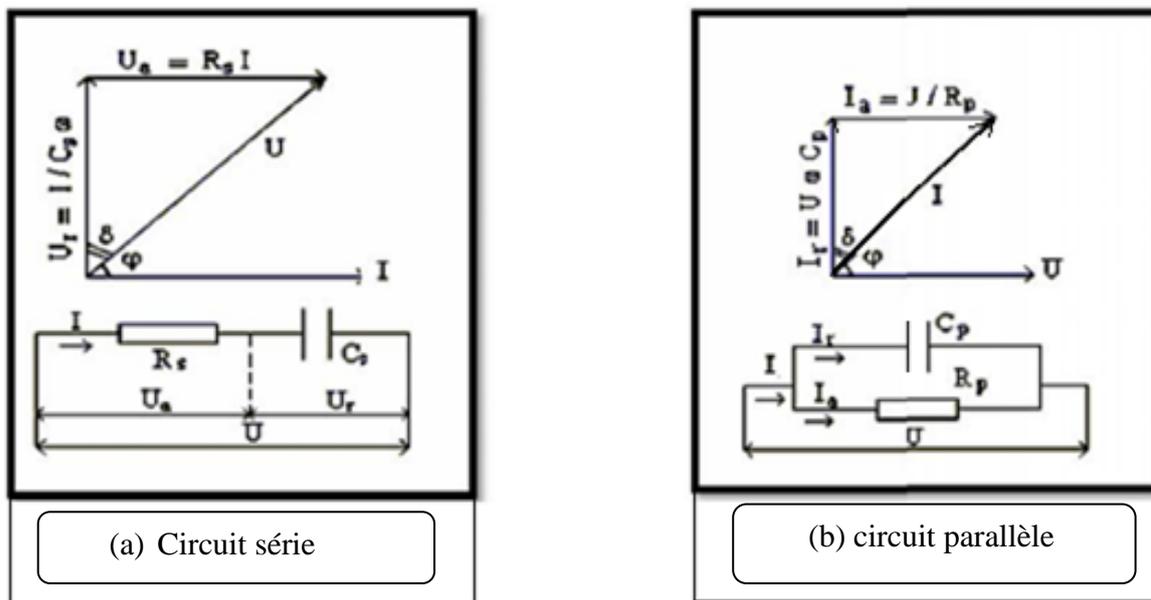


Fig. II.2: Circuit équivalent série et parallèle

Dans le cas des diélectriques réels (donc imparfaits), on définit la permittivité relative complexe ϵ_r^* . Cette notion permet d'analyser le défaut de quadrature entre le courant et la tension aux bornes d'un condensateur, et donc d'introduire des pertes diélectriques :

$$\epsilon_r^* = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \dots \dots \dots \text{II.7}$$

Le facteur de dissipation diélectrique est égal au quotient $\varepsilon_r''/\varepsilon_r'$.

Ce quotient est également appelé tangente de l'angle de pertes ou $\text{tg}\delta$. δ est l'angle complémentaire du déphasage entre la tension appliquée au diélectrique et le courant qui en résulte.

Le courant total traversant l'ensemble du circuit est déphasé en avance sur la tension d'un angle $\varphi < \pi/2$. Son complément δ est appelé angle de pertes. La tangente de cet angle est appelée facteur de dissipation (ou de pertes) et s'obtient de la façon suivante :

$$\text{tg}\delta = \frac{I_r}{I_a} = \frac{U_a}{U_r} = \frac{P_a}{P_r} \dots\dots\dots \text{II.8}$$

Dans le cas où la conduction est négligée le produit $\varepsilon_r' * \tan \delta = \varepsilon_r''$ est appelé indice de pertes, car il caractérise l'énergie dissipée dans le diélectrique.

II.3.6 Influence du vieillissement sur la conductivité et le facteur de dissipation

La conductivité d'un produit neuf est en général beaucoup plus faible que celle d'un produit en service, puisque celui-ci récupère des impuretés au contact des matériaux solides contenus dans l'équipement. De même, le vieillissement du produit, qu'il soit thermique, dû à une oxydation, à une hydrolyse, ou à tout autre processus, conduit systématiquement à la formation de sous produits qui contribuent également à l'augmentation de la conductivité [27].

II.4. Facteurs climatiques influençant sur les isolants

Parmi les facteurs climatiques essentiels on distingue:

II.4.1. Température

Lorsque la température croît la rigidité diélectrique est soit constante, soit légèrement décroissante puis à partir d'une certaine température limite appelée température de transition une décroissance très rapide est amorcée.

II.4.2. Humidité

L'influence de l'humidité par la résistivité transversale des isolants dépend de la teneur en eau à la saturation du matériau considéré et de son état présent d'humidité (l'état d'humidification).

II.5. Différents types d'isolants

On peut classer les isolants en trois catégories suivantes :

II.5.1. Isolant gazeux

L'air et les gaz secs sont des bons isolants, ils ont des propriétés particulières :

- Rigidité diélectrique variable suivants la nature de gaz ;
- Permittivité très faible, les gaz sont auto-générateurs ;
- Phénomène d'ionisation des gaz ;

- Légers et inflammables.

Les principaux isolants gazeux sont : l'air atmosphérique, l'azote, gaz rares, l'hydrogène, l'hexafluorure de soufre (SF_6).

L'air est un élément isolant naturel utilisé dans la plus part des installations, appareils dont il assume également le refroidissement par circulation naturelle ou forcée. Après claquage, l'air reprend rapidement son pouvoir isolant initial, il est auto-régénérateur.

L'hexafluorure de soufre est un composant chimique de soufre et de fluor, de formule chimique SF_6 . C'est un gaz inerte, sans odeur, incolore. Ce gaz est un excellent isolant électrique. Sa rigidité diélectrique est 2,5 fois supérieure à celle de l'air.

II.5.2. Isolants liquides

Les liquides diélectriques sont souvent utilisés en association avec des solides (transformateurs, condensateurs et câbles). Ils ont pour rôle de se substituer aux vacuoles qui sont sources de décharges partielles.

Les liquides sont utilisés pour :

- améliorer le pouvoir de coupure de certains appareils électriques par l'amélioration des conditions d'extinction de l'arc électrique ;
- Assurer une bonne isolation électrique et permettre un bon refroidissement.

II.5.3. Isolants solides [28]

Les isolants sont d'origines minérales, organiques et résineuses.

- Les isolants d'origine minérale: sont des substances siliceuses et calcaires, solides à la température ordinaires, incombustibles et supportant des températures élevées, à l'exception des hydrocarbures (verre, produits céramiques) ;
- Les isolants d'origine organique sont généralement des substances fibreuses à base de cellulose. Ces matériaux ont une bonne résistance mécanique, ils sont combustibles et ne supportent pas des températures supérieures à 100°C sans perdre leurs propriétés mécaniques et diélectriques (cellulose, silicone) ;
- Les isolants d'origine résineuse sont généralement des matières organiques naturelles ou synthétiques qui peuvent se présenter à l'état solide, thermoplastique ou plastique.

II.6. Matériaux utilisés pour les isolants solides

Les isolants solides les plus utilisés sont essentiellement le verre trempé et la porcelaine. Mais les résines synthétiques commencent aussi à être utilisées.

II.6.1. Porcelaine

La porcelaine est constituée par du kaolin et du quartz de première qualité. Ils sont cuits à 1400°C, puis recouverts d'émail au silicate et recuits au four pour obtenir une glaçure à chaud qui le rend imperméable à l'eau.

Les propriétés électriques, mécaniques et thermiques sont les suivantes :

- Rigidité diélectrique élevée, 25 à 35 kV/mm ;
- permittivité relative $\epsilon_r = 6$ à 7 ;
- grande résistivité, environ $10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ à 20°C ;
- Faibles pertes électriques en basse fréquence et en haute tension ;
- résistance mécanique 2500 à 4000 N/mm.

En plus de ces bonnes caractéristiques, elle est d'une grande résistance aux agents atmosphériques et chimiques, elle n'absorbe pas l'humidité. Elle présente aussi une grande résistance aux températures élevées sauf qu'au-delà de 300°C ; ses propriétés diélectriques diminuent rapidement.

II.6.2. Verre [28]

Il est fabriqué en fondant dans des creusets chauffés au rouge vif à une température 900°C, un mélange de sable, de chaux et de carbonate de sodium. Le liquide peu fluide est coulé dans des moules en acier ayant en creux la forme des isolateurs. Chimiquement, le verre est un mélange de silicate alcalin et de calcium ou de Plomb.

Les isolateurs en verre, un peu moins chers, mais plus fragiles que ceux en porcelaine, sont employés jusqu'à environ 30 kV.

- Sa rigidité du verre est excellente à froid, de l'ordre de 50 à 100 kV/mm, tandis qu'elle se trouve divisée par 100 à 400 °C ;
- Sa permittivité relative environ 5 à 8 ;
- Sa résistivité à 20 °C ; 10^{10} à $10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$;
- Son facteur de pertes diélectriques $\text{tg } \delta = 5 \times 10^{-2}$.

Les principales variétés des verres utilisées dans l'industrie électrique sont les suivantes :

II.6.2.1. Verre trempés

Ils consistent à porter la pièce à une température voisine de son point de ramollissement 700°C et à la refroidir brusquement au moyen de jets d'air froid sous pression, ce traitement améliore les qualités mécaniques du verre ainsi que sa tenue aux chocs thermiques en traction environ 5 à 6 fois plus grande que celle du verre recuit et peut supporter une variation brusque de température pouvant atteindre 100°C.

L'avantage du verre trempé est de rendre visible tout isolateur perforé, ce qui n'est pas le cas des isolateurs à capot et tige en céramique, sous les efforts d'une contrainte électrique trop forte ou même lors d'une défektivité de l'isolateur.

II.6.2.2. Verres recuits

Ont surtout été utilisés pour faire des isolateurs rigides, mais on s'est aperçu que les isolateurs un peu épais ne résistaient pas aux variations brusques de température. De plus, le verre recuit ne supporte que des tensions mécaniques relativement faibles, ce qui interdit son emploi pour les isolateurs de suspension. On cite aussi les verres sodiques, borosilicate et les polyamides.

II.6.3. Bakélite

C'est une résine artificielle inventée vers 1909 par le chimiste Bakeland. On l'obtient sous trois états [29].

- La Bakélite A : produite par un chauffage modéré vers 50°C, et une résine jaunâtre, fondant facilement et soluble dans l'alcool méthylique.
- La Bakélite B : C'est de la bakélite A transformée par un chauffage prolongé vers 110°C ; elle est solide, friable, insoluble dans les dissolvants usuels ;
- La Bakélite C : s'obtient vers 180° C ; elle est insoluble, dure infusible et supporte sans se décomposer une température de 300°C ; elle n'est pas attaquée par l'oxygène, l'ozone et les acides usuels.

Leurs caractéristiques principales sont comme suit [30].

- Faible poids spécifique ;
- Forte résistance à l'usure (faible coefficient de frottement) ;
- Amortissement des vibrations (matériaux silencieux) ;
- Bonne résistance aux hydrocarbures, solvants et eau ;
- Très faible reprise d'humidité ;
- Usinage facile ;
- Bonne poinçonnabilité ;
- Isolant électrique basse tension ;
- Bonne stabilité.

II.6.4. Silicone

II.6.4.1. Généralités

Les silicones constituent la branche la plus importante de la famille des organosiliciques. Ces polymères se caractérisent par la présence dans leur molécule, en plus d'une liaison silicium – carbone, de la liaison silicium – oxygène.

L'architecture moléculaire peut être présentée par la répétition de motif unitaire de formule :

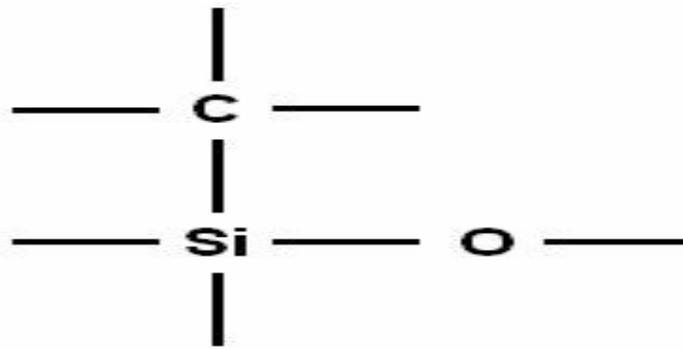


Fig. II.3 : Motif unitaire de la silicone

Le plus couramment employé reste le poly (diméthylsiloxane) linéaire ou PDMS suivi des résines silicones, formées par des oligosiloxanes ramifiés ou en forme de cage.

Le point faible des silicones réside dans leurs propriétés mécaniques inférieures à celles des polymères organiques. On les renforce donc, comme tout élastomère, par des charges minérales comme la silice par exemple [31].

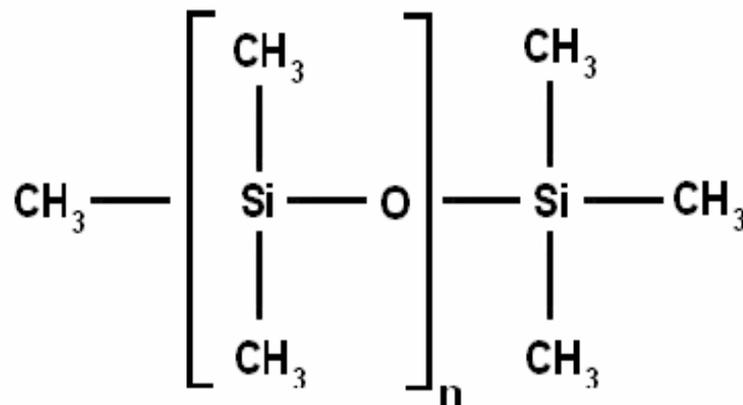


Fig. II.4 : Structure des polydiméthylsiloxanes

Sur ce type de structure, le nombre de groupe (n) peut varier d'un composé à l'autre. En effet, ce type de silicone peut comprendre entre 200 et 2000 groupes formant ainsi la macromolécule. Certains groupes méthyle qui sont généralement liés à un atome de silicium peuvent être remplacés par des atomes d'hydrogène. La longueur de la molécule influence fortement les propriétés mécaniques de la silicone. En effet, plus la chaîne est longue et plus le matériau devient "dur".

Il est possible d'obtenir une grande variété de matériaux en faisant varier les chaînes (Si-O-), les groupes fixés et les liaisons entre chaînes. Suivant la nature des fonctions organiques rattachées au silicium et suivant les conditions de fabrication, les produits obtenus sont extrêmement variés : (huile, gommages, pâtes et graisses, élastomère, résines).

A l'intérieur de chacune de ces familles, les produits sont différents suivant leur composition, leurs degrés de polycondensation, de ramification et de réticulation, ce qui rend difficile une description exhaustive de leurs propriétés.

L'enchaînement (Si – O – Si) offre une très bonne stabilité thermique et une excellente inertie chimique dues à la solidité de la liaison (Si – O).

II.6.4.2. Propriétés de la silicone

Les silicones se distinguent par quelques propriétés fondamentales :

- Isolation électrique ;
- Stabilité thermique ;
- Stabilité chimique ;
- Propriétés modulables d'anti adhérence ou d'adhésion, selon le cas ;
- Hydrophobie ou organophobie ;
- Bonne tenue au feu sans dégagement de fumées toxique ;
- Propriétés lubrifiantes et adoucissantes, en relation avec leur faible tension superficielle.

Ils possèdent une stabilité remarquable aux intempéries et au vieillissement. À titre d'exemple on peut citer l'estimation qui est figurée dans le tableau suivant :

Température (°C)	Durée de vie (année)
90	40
150	5-10
200	2-5
250	0,25
315	0.04

Tab. II.1 : Estimation de la durée de vie d'un élastomère de silicone

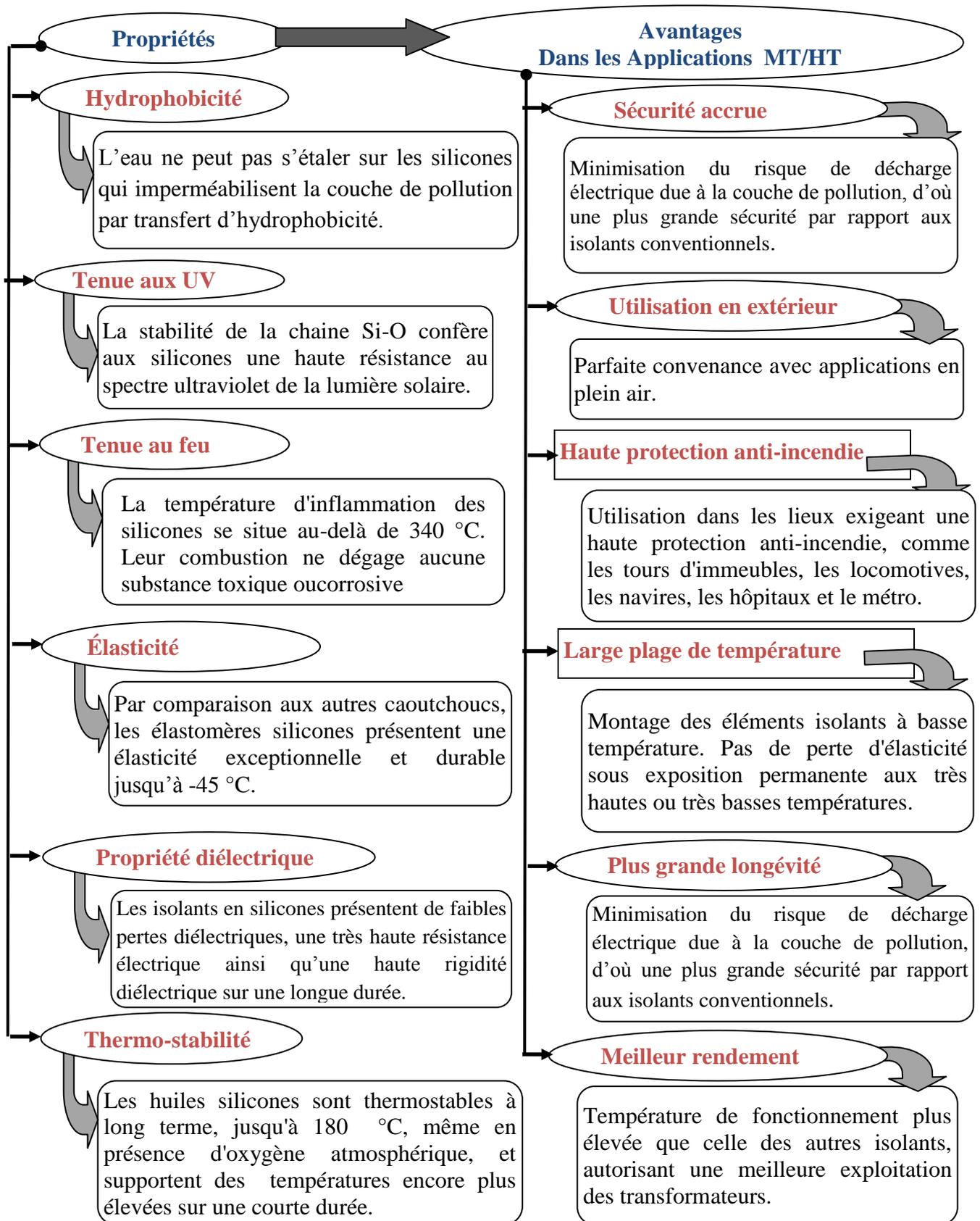
Les valeurs des propriétés suscitées ont été tirées de la littérature

- Rigidité diélectrique 15 kV/mm ;
- Permittivité relative à 25 °C et de 5,4 ;
- Facteur de dissipation diélectrique à 25 °C et 10 kHz ; $\text{tg } \delta = 4 \text{ à } 5 \cdot 10^{-3}$;
- 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.

II.6.4.3. Caractéristiques des propriétés fondamentales dans diverses applications

Les caractéristiques des propriétés de la silicone et leurs avantages dans les applications [31]

MT/HT sont représentées sur le schéma suivant:



II.6.4.4. Structure moléculaire 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. II.5**). La haute énergie de liaison du chaînon 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), renfermant une énergie d'environ $6,2 \cdot 10^{-22}$ kJ (= 398 kJ/mol), peut entraîner la rupture des liaisons (C-C) tandis que la liaison (Si-O) reste stable.

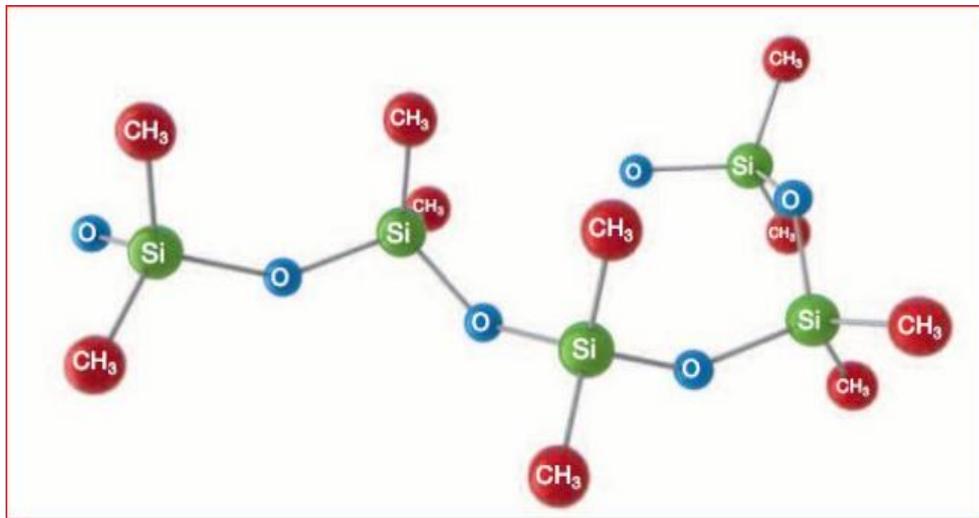


Fig. II.5: Structure chimique de la silicone [31]

II.6.4.5. Élastomères silicones

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 [32].

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 (150K 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.

II.7. Technique de caractérisation des surfaces

II.7.1. Energie de surface et angle de contact

La mesure de l'angle de contact et le calcul de l'énergie de surface permettent l'évaluation du degré de la mouillabilité de la surface d'un matériau. Ces deux procédés permettent d'obtenir des informations sur les transformations physiques et chimiques des premières couches atomiques de la surface du matériau étudié [33].

II.7.2. Principe

L'angle de contact représente en fait l'angle formé par la tangente à l'extrémité de la goutte d'un liquide avec la surface plane de l'échantillon sur laquelle la goutte du liquide a été déposée. Cette technique permet de déterminer :

- le caractère hydrophile/hydrophobe des différentes surfaces ;
- l'énergie libre totale des surfaces étudiées et ses composantes.

II.7.3 Caractère hydrophile/hydrophobe d'une surface

La nature hydrophile/hydrophobe d'une surface est généralement décrite en termes de mouillabilité avec l'eau. Cette dernière peut être considérée comme un phénomène d'étalement. La surface est considérée hydrophile lorsque l'eau s'étale spontanément sur celle-ci, ce qui conduit à l'obtention d'un angle de contact inférieure à 90° .

Lorsque la valeur de l'angle de contact est plus importante que 90° , on dit que la surface est hydrophobe (**Fig. II.6**).

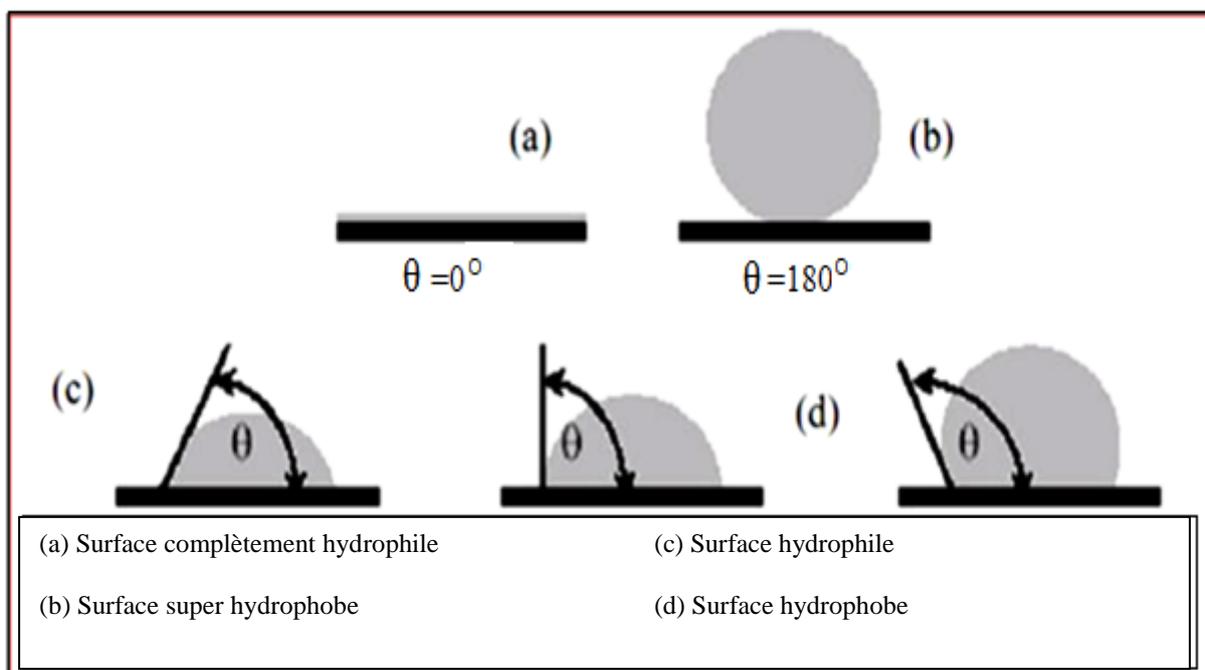


Fig. II.6: Positions possibles de l'angle de contact

II.7.4 Énergie libre totale des surfaces et ses composantes

L'énergie de surface résulte des forces d'attraction et de répulsion existantes entre les matériaux présents au voisinage de la zone de séparation de chacune des phases. Cette énergie est représentée par la tension superficielle, dans le cas d'un liquide en équilibre avec sa phase vapeur ou par la tension inter faciale pour des systèmes solide-liquide ou liquide-liquide non miscibles. La mesure de l'énergie libre de la surface d'un solide est déduite de la mesure de l'angle de contact de liquides sondes ou de tension superficielle connue sur le solide. La mesure de l'angle de contact se fait à la jonction de trois phases mises en jeu lorsque le liquide sonde est déposé sur le solide. Ces phases sont liquides, solide et gazeuse. En somme, la détermination de l'angle de contact permet d'évaluer l'affinité d'une surface vis-à-vis d'un liquide.

II.7.5. Propriété de la surface [34]

La géométrie spécifique et la surface préférablement non mouillante (hydrophobe) de ces isolateurs composites leur confèrent une fiabilité en service supérieure à celle des isolateurs conventionnels lorsqu'ils sont encrassés. Une « surface mouillante » est une surface sur laquelle l'eau a tendance s'étendre, les deux extrêmes de cette propriété sont représentés sur la figure .II.7. Une surface hydrophile (**Fig. II.7a**) et une surface hydrophobe (**Fig. II.7b**).

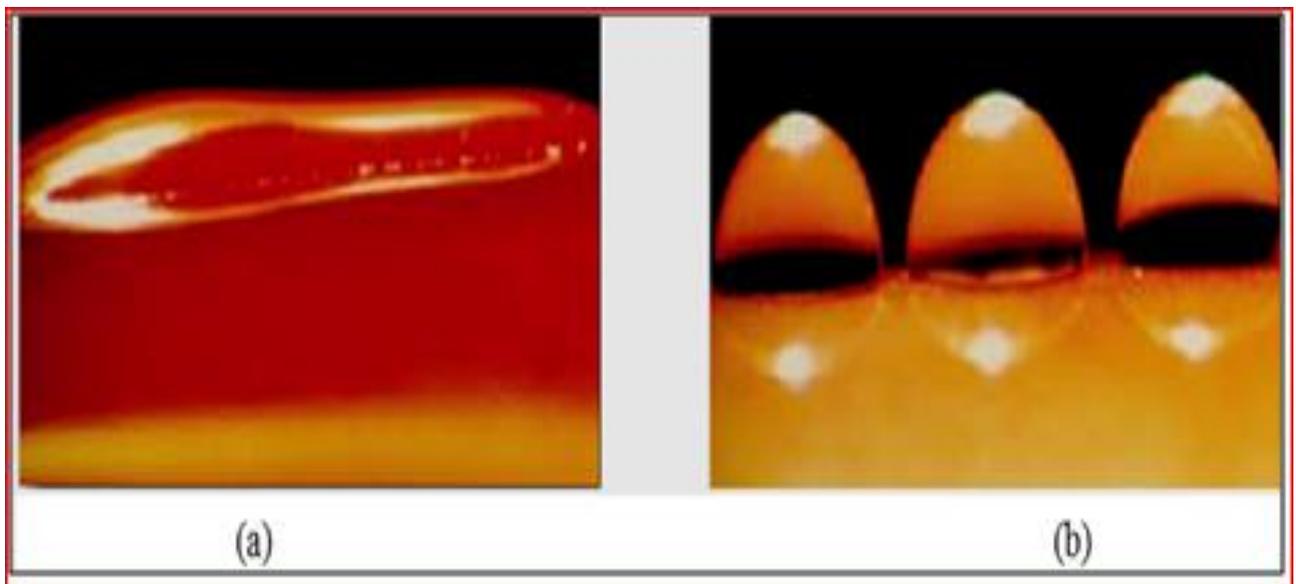


Fig. II.7 : Comportement d'une surface hydrophobe ou hydrophile

II.7.6 Hydrophobicité [35]

Par rapport aux autres matériaux, les silicones se distinguent par un très haut pouvoir imperméabilisant à long terme, appelé hydrophobicité : l'eau ne pénètre pas dans les pièces d'isolation en élastomères silicones, mais perle à la surface (**Fig. II.8**), même au bout de

nombreuses années. Ils minimisent les courants de cheminement et évitent les décharges dues au contournement électrique, même si la surface est fortement polluée, car ils transmettent leurs propriétés hydrophobes à la couche de dépôts par transfert d'hydrophobie.

L'application d'un revêtement silicone à posteriori sur les isolateurs en verre ou en porcelaine permet d'obtenir le même effet et supprime les opérations de nettoyage difficiles jusqu'à, présent nécessaires.



Fig. II.8 : Hydrophobicité d'une surface en silicone

II.8. Applications des élastomères silicones dans l'isolation électrique

Les silicones sont utilisées pour l'isolation des conducteurs et des câbles. Ils servent à isoler divers composants haute tension (revêtement).

II.8.1. Isolation volumique

Ces dernières années, les silicones étaient de plus en plus utilisées 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 [36].

II.8.2. Isolation surfacique

Grâce à une excellente hydrophobicité à la surface et retour d'hydrophobie 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 [36].

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. II.9**), mais également dans des disjoncteurs et des transformateurs de mesure.

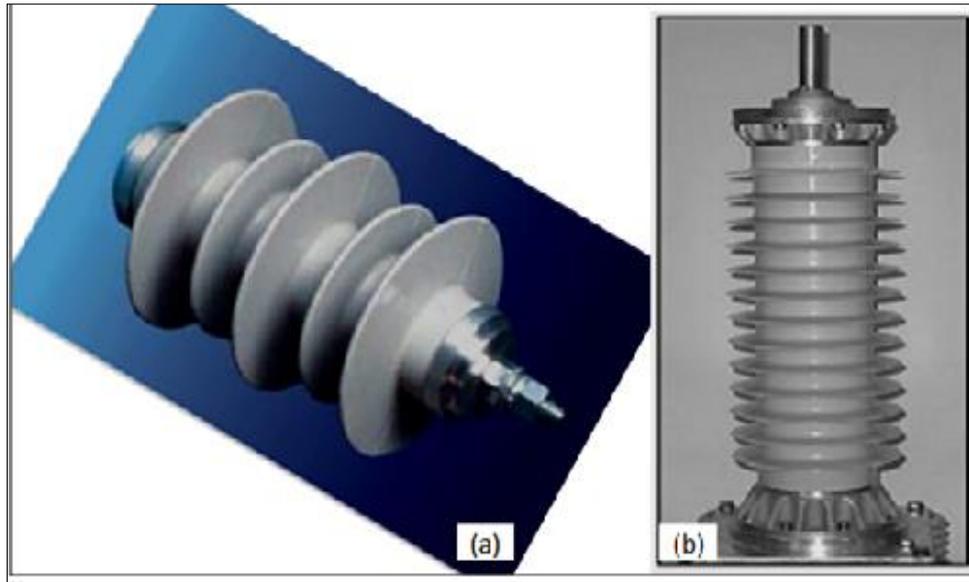


Fig. II.9: (a) Isolateur en silicone ; (b) Traversée avec un revêtement en silicone

Comme nous l'avons déjà évoqué, le point faible de ces matériaux est leur faible dureté, ce qui fait que certaines applications où les contraintes mécaniques doivent être fortes.

Dans ce cas, il est souvent utilisé comme revêtement des céramiques qui, elles, peuvent supporter les contraintes mécaniques. Quand les contraintes mécaniques ne sont pas trop importantes (ce qui correspond généralement aux dispositifs à moyenne et basse tension), on peut utiliser entièrement l'élastomère silicone comme indiqué sur la figure II. 9a.

II.8.3. Isolateurs à long fût

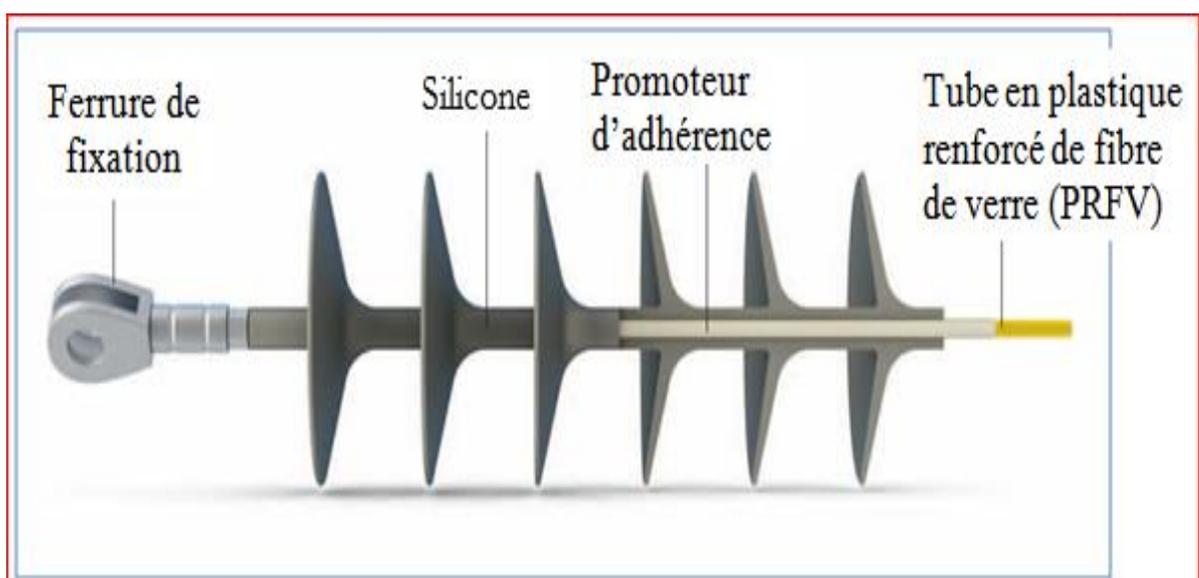


Fig. II.10 : Principe d'un isolateur à long fût

On a recours aux isolateurs à long fût en silicone depuis plus de 40 ans figure. II.10, en raison de la haute tenue aux intempéries et à l'érosion de ce matériau. Comme autres avantages on distingue :

- Grande longévité ; faible poids ;
- Haute résistance au contournement de la couche de pollution ;
- Faibles coûts de maintenance.

II.9. Conclusion

D'après l'étude des caractéristiques des matériaux isolants et leur utilisation nous pouvons conclure que :

Un matériau isolant ne peut être caractérisé électriquement que par sa rigidité et sa permittivité diélectrique, son facteur de pertes et sa résistivité transversale et/ou longitudinale.

Un matériau isolant ne peut être considéré comme un bon isolant que lorsque celui-ci possède une permittivité moins élevée, des pertes électriques les plus faibles, une rigidité diélectrique et une résistance d'isolement très grande.

Les isolants solides, notamment les polymères sont très demandés dans le domaine industriel à l'importance de leurs excellentes propriétés électriques, thermiques et mécaniques mais surtout pour leurs coûts raisonnables. La fiabilité des matériaux isolants reste toujours un des soucis majeurs de l'électrotechnique, surtout que ces matériaux sont constamment soumis à des contraintes électriques sévères.

Chapitre III

*Pollution atmosphérique et phénomène de
décharges*

III .1. Introduction

Les lignes aériennes et les postes des réseaux de transport d'énergie électrique sont exposés à diverses contraintes. Parmi celles-ci, la pollution des isolateurs constitue un sérieux problème pour l'exploitation des réseaux de haute tension. En effet, au moment de pluie ou de brouillard ou de la rosée, les dépôts polluants se fixant sur les surfaces isolantes réduisent considérablement la résistivité superficielle et le contournement peut alors survenir. L'humidification des couches polluantes facilite en fait, la circulation d'un courant de fuite sur les surfaces isolantes provoquant des échauffements locaux et par la suite l'assèchement de la couche de pollution. Ainsi, la répartition du potentiel est modifiée d'une façon significative et des arcs partiels peuvent apparaître. Ces derniers peuvent évoluer jusqu'au contournement total de l'isolateur, ce qui constitue la situation la plus grave. 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 l'isolation.

III .2. Définitions

III .2.1 . Pollution

Le phénomène de pollution des isolateurs est un sujet d'actualité important; car il présente un sérieux problème pour l'exploitation des réseaux de transport et de distribution de l'énergie électrique. Une couche de pollution se forme sur les surfaces des isolateurs suite à une interaction entre l'air transportant des grains de poussières et ces dernières. Une fois cette couche est humidifiée, la tension de tenue diminue et provoque des incidents graves. Cela est dû à plusieurs facteurs dont les plus importants sont la nature de l'agent polluant, le profil de l'isolateur ainsi que les facteurs climatiques et météorologiques [37].

III .2.2 . Contournement

Le contournement est représenté par une décharge disruptive le long d'une surface solide dont la trajectoire contourne cette dernière. Aussi le terme contournement est employé pour des décharges par amorçage dans l'air. L'endommagement est superficiel à cause de l'énergie thermique dégagée par l'arc [38].

III .2.3. Contrainte de contournement

La contrainte de contournement d'un isolateur est le rapport de tension contournement à la longueur totale de l'isolateur.

III .2.4. Ligne de contournement

La ligne de contournement (L_c) est la distance la plus courte dans un gaz entre deux parties conductrices [39].

III .2.5. Tension de contournement

La tension de contournement est le niveau de tension le plus bas à partir duquel tous les arcs joignent les deux électrodes. La tension de contournement dépend [40] :

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

III .2.6. Tension de tenue

C'est le niveau de tension le plus important, que peut supporter une isolation sans provoquer de décharge disruptive (contournement dans le cas des isolateurs) [41].

III .2.7. Ligne de fuite

La ligne de fuite est la distance la plus courte le long de la surface d'un isolant entre deux parties conductrices [42].

III .2.8. Courant de fuite

C'est un courant de faible amplitude, circulant à travers la couche polluante le long de la surface de l'isolateur, son intensité devient importante lorsqu'on s'approche de la tension de contournement. Il dépend de plusieurs facteurs tels que la nature de la couche polluante et de la longueur de la ligne de fuite.

Dans les conditions de forte humidité, la dissolution des sels contenus dans la couche polluante, provoque la formation d'une couche électrolytique.

III .3. Formation et répartition des couches polluantes

Suite à l'écoulement d'un air transportant des poussières diverses, une couche de pollution se forme à la surface des isolateurs. La répartition non-uniforme et non-homogène de cette couche dépend du profil de l'isolateur, de la position de la chaîne par rapport au sol (verticale, horizontale, inclinée), du niveau de tension ainsi que du degré de pollution du site où est situé l'isolateur.

Plusieurs travaux d'observation ont montré qu'il existe toujours une distinction nette entre les couches formées à la surface supérieure et celles formées à la surface inférieure d'un

isolateur soumis à la pollution naturelle. Cela veut dire que la répartition de la pollution le long de l'isolateur est très peu uniforme; le vent, par exemple, impose des orientations préférentielles pour les dépôts. Elle dépend :

- du profil de l'isolateur,
- de la position de l'isolateur,
- du niveau de tension appliqué [43].

La non-uniformité de la pollution peut être classée en trois catégories:

III .3.1. Non-uniformité longitudinale par groupe

Elle est caractérisée par un ensemble de groupes d'isolateurs, soumis à différentes conductivités de la couche de pollution, dont la valeur est constante dans chaque groupe. Nous retrouvons ce type de pollution dans les cas suivants :

- temporairement pendant le lavage sous tension.
- dans les chaînes d'isolateurs en forme de « T ».
- par effet du champ électrique où la concentration de la pollution est accentuée sur les isolateurs les plus proches de la borne haute tension.

III .3.2. Non-uniformité transversale

Ce type est le plus fréquent. Il est caractérisé par une variation périodique de la conductivité de la couche de pollution le long de la ligne de fuite, mais elle garde une symétrie circulaire. Ces principales spécifications sont :

- la face inférieure de l'isolateur présente une conductivité plus grande que la face supérieure.
- la concentration de la pollution augmente de la zone périphérique vers la zone centrale.

III .3.3. Non- uniformité longitudinale périodique

Ce type est le plus fréquent. Il est caractérisé par une variation périodique de la conductivité de la couche de pollution le long de la ligne de fuite, mais elle garde une symétrie circulaire. Ces principales spécifications sont :

- la face inférieure de l'isolateur présente une conductivité plus grande 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.

III .4. Humidification de la pollution

Le brouillard, la condensation et la petite pluie humidifient graduellement et pratiquement sans délavage de la surface de l'isolateur. Ces conditions correspondent à des conditions dites critiques. Les sels contenus dans le dépôt polluant se dissolvent et créent un électrolyte conducteur sur la surface de l'isolateur. Un courant de fuite prend alors naissance dès qu'un film conducteur se forme sur la surface de l'isolateur. Pendant le cycle d'humidification, le courant de fuite augmente jusqu'à la valeur maximale mais diminue s'il y a délavage ou séchage. Le niveau de ce courant de fuite dépend du temps, de la nature et de la quantité des sels solubles et des produits insolubles contenus dans le dépôt. Les produits insolubles maintiennent par absorption une certaine quantité d'eau à la surface de l'isolateur, entretenant ainsi l'humidification du dépôt [44].

III .5. Sources de pollution

La nature de la pollution dépend des facteurs géographiques et climatiques. Dans ce cas, les diverses sources de pollution peuvent être regroupées selon leurs origines en trois catégories; pollution naturelle, pollution industrielle, et pollution mixte qui est la forme la plus sévère de pollution car elle résulte de l'association d'une pollution naturelle et d'une ou plusieurs pollutions industrielles.

III .5.1. Pollution naturelle

Elle dépend du climat et des facteurs météorologiques des régions .Elle est constituée de dépôts de poussières véhiculées par les vents tels que: sable, embruns marins,...etc. Ces dépôts, et selon leur nature, se présentent comme suit :

III .5.1.1. Pollution marine

Dans les installations au voisinage de la mer, les embruns portés par le vent se déposent progressivement sur les isolateurs, formant ainsi, une couche de sel qui recouvre toute leur surface. Cette couche, qui humidifiée par les embruns eux-mêmes, devient de plus en plus conductrice. Ce qui donne naissance à des courants de fuite encore plus intenses, et des arcs pouvant se développer jusqu'à provoquer le contournement total de l'isolateur.

III .5.1.2. Pollution désertique

Dans les régions désertiques, la pollution est due surtout aux tempêtes de sable. La densité de sel dans le sable est très élevée, et la rosée matinale est la seule source d'humidification dans ces régions. Cette humidification favorise la conduction sur la surface.

III .5.1.3. Autre type de Pollution naturelle

La pluie est un phénomène naturel. Dans certaines conditions de pluie violente, un film continu d'eau peut s'établir d'une extrémité à l'autre de la chaîne d'isolateur. Comme l'eau n'est

jamais parfaitement isolante, ce phénomène peut conduire au contournement; c'est le contournement sous pluie.

III .5.2. Pollution industrielle

Dans des zones à forte concentration industrielle, au voisinage des usines de pétrochimie, de cimenteries, ...etc., les isolateurs se recouvrent peu à peu de poussières résultant des fumées dégagées par ces dernières, et qui sont faiblement conductrices, mais hygroscopique, à la présence d'une humidité intense. Le sel contenu dans ces poussières abaisse considérablement la résistivité superficielle des isolateurs. De plus, dans les régions agricoles, les agents polluants peuvent être insecticides, engrais, grains de pollens, Cette pollution peut aussi être d'origine domestique, quant il s'agit des facteurs tels: fumées et gaz résultant des moyens de réchauffement des habitations ou de moyens de transport.

III .5.3. Pollution mixte

La pollution mixte est la plus sévère pour l'exploitation des ouvrages électriques. Car elle résulte de la combinaison entre deux ou plusieurs pollutions précitées. La couche électrolytique formée par le processus d'humidification des dépôts solides accumulés progressivement sur la surface des isolateurs, engendre une diminution considérable de la rigidité diélectrique.

III .6. Sévérité de pollution

Le choix des isolateurs à installer sur le réseau ne peut se faire que si la sévérité de la pollution est connue.

III .6.1. Mesure de la sévérité de pollution d'un site

Le dimensionnement de l'isolation externe vis-à-vis de la pollution pose un certain nombre de problèmes spécifiques. L'un des plus fondamentaux est la détermination de la sévérité de la pollution là où l'isolation doit être installée. La mesure de la sévérité est généralement basée sur la détermination expérimentale de la conductance superficielle de la couche polluante ou la détermination au laboratoire du courant de fuite d'un isolant pollué artificiellement La mesure de cette sévérité est indispensable pour assurer un service sans défaillance dans un site pollué.

Dans ce qui suit, nous passerons en revue différentes méthodes de mesure largement employées, basées sur des théories et des données expérimentales. Dans ce cas, les principales méthodes qui ont été proposées pour mesurer la sévérité d'un site sont [45]:

III .6.1.1. Méthode de la densité de dépôt de sel équivalent (DDSE)

La DDSE est utilisée comme un paramètre de base pour l'évaluation du comportement d'isolateurs et des parafoudres sur site. Elle est le dépôt équivalent exprimé en mg de NaCl

par cm^2 de la surface d'un isolateur ou de l'enveloppe de l'isolant, qui a une conductivité électrique égale à celle du dépôt réel, lorsqu'il est dissous dans la même quantité d'eau [46]. Des échantillons de pollution sont prélevés à la surface des isolateurs. 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, on peut donc calculer la DDSE.

III .6.1.2. Conductance superficielle

A l'aide de mesure de courant de fuite d'un isolateur pollué dans un site donnée, nous mesurons le rapport : $G = I / V$ III. 1

La conductivité superficielle est obtenue en multipliant la conductance G par un facteur de forme de l'isolateur, généralement la tension est appliquée aux électrodes terminales, ce qui fournit la conductivité superficielle globale de l'isolateur [47].

III .6.1.3. Méthode du courant de fuite

C'est un courant de faible amplitude, circulant à travers la couche polluante le long de la surface de l'enveloppe du l'isolateur, son intensité devient importante lorsqu'on s'approche de la tension de contournement. Il dépend de plusieurs facteurs tels que la nature de la couche polluante et de la longueur de fuite [48]. Par la mesure du courant de fuite à la surface d'un isolateur donné, on peut déterminer la sévérité du site qui donne le même courant de fuite sur la surface du même isolateur soumis à la même tension au laboratoire. La mesure du courant de fuite s'effectue de deux manières : par le comptage du nombre d'impulsions et par l'amplitude des ces dernières.

III .6.1.4. Méthode de la densité de dépôt non soluble (DDNS)

Elle correspond à la quantité de dépôts polluants non solubles présents dans une couche de pollution. Elle s'exprime en mg/cm^2 . La mesure de la DDNS s'accompagne souvent d'une analyse physico-chimique de la pollution, au terme de laquelle les sources polluantes peuvent être identifiées. La détermination de la DDNS s'effectue comme suit: La solution polluée obtenue est filtrée à l'aide d'un papier filtre. Le dépôt non soluble restant après filtrage est séché puis pesé.

La détermination de la DDNS s'effectue comme suit [49] :

$$DDNS = \frac{m_f - m_i}{s} \text{ III. 2}$$

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

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

m_i : est la masse initiale du papier filtre en mg ;

S : est la surface lavée de la barrière en cm^2 .

III .6.1.5. Mesure de la pollution de l'air

Les mesures de la pollution de l'air 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.

III .7. Impact de la pollution

Les sels contenus dans les dépôts polluants qui recouvrent les surfaces isolantes se dissolvent et créent une couche électrolytique conductrice, ce qui engendre une conductivité superficielle et provoque une modification de la répartition de potentiel. La tension de rupture diélectrique peut alors être atteinte entre deux points de la surface isolante entraînant ainsi l'amorçage d'un arc électrique qui court-circuite une partie de la ligne de fuite [50].

III .8. Effet de la pollution sur la rigidité diélectrique de l'air

Les études menées par A. J. Kaluzny [51] sous un champ uniforme et non uniforme, permettent de noter les constatations suivantes :

- La rigidité diélectrique de l'intervalle d'air dépend de la concentration des impuretés de l'air (impuretés industrielles), comme elle dépend largement de l'humidité. La rigidité diélectrique augmente en présence d'impuretés pour des valeurs de l'humidité comprises entre 11 g/m^3 et 13.1 g/m^3 et décroît si l'humidité est supérieure à 13.1 g/m^3 .
- La rigidité diélectrique de l'air polluée diminue en augmentant la distance interélectrode.

III .9. Classification des sites pollués

Par pollution, on entend les particules solides qui se trouvent dans l'atmosphère et qui se déposent sur la surface de l'isolateur. Cette pollution constitue l'origine du problème. A ce titre, des efforts considérables ont été menés afin de la classer quantitativement et qualitativement.

La composition de cette pollution est variable suivant les sources de contamination et les conditions auxquels sont soumis les isolateurs. La norme CET 815 donne le classement de la pollution suivant son origine (Tableau III.1). Essentiellement, les types de pollution qui existent sont: la pollution naturelle, la pollution industrielle et la pollution mixte [52].

Niveau de pollution	Origines et sources de pollution
Faible 0,06 mg/cm ²	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Elle concerne généralement des zones non industrielles ayant une faible densité d'habitations, situées loin de la mer. ➤ Zones avec faible densité d'industries ou d'habitations mais soumise fréquemment aux vents et/ou pluies. ➤ Régions montagneuses. Toutes ces zones doivent être situées à des distances d'au moins 10 à 20 km de la mer et ne doivent pas être exposées aux vents venant directement de la mer.
Moyenne 0,20 mg/cm ²	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Zones avec industries ne produisant pas de fumées particulièrement polluantes et/ou ayant une densité moyenne d'habitation équipées d'installations de chauffage et situées loin de la mer. ➤ Zones à forte densité d'habitation et/ou d'industries mais soumises fréquemment à des chutes de pluies. ➤ Zones exposées au vent de mer, mais pas trop proches de la côte (distantes d'au moins quelques kilomètres).
Forte 0,60 mg/cm ²	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Zones avec forte densité d'industries et banlieues de grandes villes à forte densité d'installations de chauffage polluantes. ➤ Zones à forte densité d'habitation et près de la mer. ➤ Zones situées près de la mer, ou en tout cas exposées à des vents relativement forts venant de la mer.
Très forte >0,60 mg/cm ²	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Zones généralement peu étendues, soumises à des fumées industrielles produisant des poussières conductrices. ➤ Zones généralement peu étendues, très proches de la côte et exposées aux embruns ou au vent fort et polluant venant de la mer. ➤ Zones désertiques caractérisées par de longues périodes sans pluie, exposées aux vents forts transportant de sable et du sel soumis à une condensation régulière.

Tab. III.1: Classification de la pollution selon le type d'environnement

III .10. Méthodes d'essais sous pollution

Avant de mettre en service un isolant quelconque, il faut bien comparer les performances de divers types d'enveloppes et sélectionner ceux qui présentent le meilleur comportement sous pollution pour chaque site. Pour cela, il est nécessaire de les soumettre à des essais. Ces derniers peuvent être réalisés sous conditions naturelles (sur site) ou au laboratoire. D'où on distingue deux types d'essais sur les isolants pollués [53]:

- Essais sous pollution naturelle.
- Essais sous pollution artificielle.

III .10.1. Essai sous pollution naturelle

Ils consistent à installer, dans les différents sites pollués, des stations dans lesquelles on observe le comportement d'un certain nombre d'isolateurs de longueurs ou de profils différents. Les qualités respectives de ces isolateurs, placés sous la même tension, sont appréciées en fonction du courant de fuite, de la conductivité superficielle ainsi qu'en fonction du temps au contournement. Ces essais ont l'avantage de tenir en compte de l'effet de toutes les contraintes, dans toutes leurs complexités sur un site donné [54].

L'inconvénient majeur de ces essais est la durée des expériences qui est relativement longue (l'essai sous pollution naturelle peut prendre jusqu'à deux ans ou trois ans), pour pouvoir étudier valablement les performances des isolateurs.

III .10.2. Essais sous pollution artificielle

Les essais au laboratoire sont basés sur la reproduction de la couche de pollution par des solutions réparties une surface isolante et dont la conductivité est différente. Afin de valider les essais sous pollution artificielle, il a été nécessaire de comparer les performances des isolateurs testés au laboratoire à celles des isolateurs en exploitation dans des conditions naturelles. Une première approche consiste à rechercher 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 [55].

III .10.2.1. Méthode des couches solides

Dans ces méthodes la surface isolante est recouverte par pulvérisation d'une couche de pollution solide constituée de chlorure de sodium et d'un agent liant inerte, généralement le kaolin. La conductivité de cette suspension est ajustée par réglage de la concentration de chlorure de sodium (par addition d'une certaine quantité de chlorure de sodium). Les isolateurs sont alors séchés afin que la couche polluante se stabilise.

Si l'humidification s'effectue après application de la tension (méthode du brouillard à vapeur), le paramètre de sévérité est défini comme étant la densité de dépôt de sel en mg/cm². Par ailleurs, si l'humidification a lieu avant l'application de la tension, le paramètre de sévérité est défini comme étant la conductivité de la couche polluante [56].

III .10.2.2. Méthode du brouillard salin

L'isolateur est alimenté par une tension de service, maintenue constante durant tous

les essais et soumis à un brouillard salin. La solution saline utilisée dans la méthode du brouillard salin représente assez bien la pollution marine contenant un peu de matière insoluble. Elle est également valable pour représenter de nombreux dépôts de pollution industrielle ayant une couche de pollution relativement mince.

III .10.2.3. Méthode de la pollution liquide

Cette méthode s'apparente à la méthode de la couche solide lorsqu'un mélange liquide est déposé sur l'isolateur avant l'essai ; cependant, la pollution reste humide durant l'essai. Elle est constituée d'eau, de craie et de méthylcellulose ou de kaolin. La conductivité désirée est obtenue par addition de chlorure de sodium. Après quelques minutes d'égouttages, on applique la tension d'essai au parafoudre. Il est important de signaler que la couche polluante n'est pas humidifiée en cours d'essai. Ainsi, après quelques minutes d'essai, les courants de fuite assèchent la couche et la probabilité de contournement décroît rapidement.

III .11. Techniques de lutte contre la pollution

L'augmentation du degré de pollution représente un risque immense pour les installations électriques. Pour cela, plusieurs techniques de lutte contre la pollution sont utilisées.

III .11.1. Allongement de la ligne de fuite

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

- Le changement de type d'isolateur (pour rallonger la ligne de fuite) : c'est une technique très coûteuse et souvent impossible à réaliser en poste.
- L'utilisation de prolonger de ligne de fuite en matériaux polymères, qui sont collés sur la surface des isolateurs existants.

III .11.2. Utilisation des isolateurs plats (auto-nettoyables)

L'utilisation d'isolateurs plats conduit à la diminution de la ligne de fuite des isolateurs. En effet, ces derniers sans nervures ont la propriété d'accumuler moins de pollution que les isolateurs traditionnels et s'auto nettoient très bien sous l'effet du vent. Ils sont principalement utilisés dans les régions désertiques [57].

III .11.3. Graissage des isolateurs (couches hydrophobes)

Grâce à ses propriétés hydrophobes, le graissage protège temporairement les isolateurs. La longévité du graissage dépend à la fois de l'environnement (pollution, conditions climatiques) et de la qualité intrinsèque du produit. Elle est généralement

comprise entre 1 et 4 ans. Le graissage est largement utilisé dans le monde, mais l'opération de nettoyage puis de graissage est pénible, longue et coûteuse. Elle nécessite, par ailleurs, une interruption de service [58].

III .11.4. Revêtements à base de silicones

Cette méthode consiste à appliquer, par pulvérisation ou au pinceau, un caoutchouc silicone qui se vulcanise à température ambiante à la surface des isolateurs. Comme pour le graissage, grâce à ses propriétés hydrophobes, ce revêtement protège et améliore leur tenue sous pollution. Par contre sa longévité est, en général, nettement supérieure à celle du graissage.

III .11.5. Nettoyage des isolateurs

Le nettoyage manuel et le lavage périodique hors tension sont fréquemment utilisés à travers le monde. Néanmoins, l'application de ces méthodes pose des problèmes majeurs à cause des interruptions de service, parfois assez longues. Pour éviter ces coupures, un lavage sous tension des isolateurs 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 du lavage, le processus du lavage et les distances de sécurité, et ce afin d'éliminer tout risque de contournement pendant le lavage [59].

III .12. Décharges électriques

Les phénomènes de décharges électriques présentent de l'intérêt d'un point de vue industriel pour les problèmes liés à l'isolement et à la protection des réseaux de transport et de distribution d'énergie (ligne à haute tension, transformateurs, générateurs....) ainsi plusieurs études et ouvrages se sont intéressés à leur compréhension.

La décharge électrique (ou étincelle) est instantanée pour l'œil humain et s'accompagne d'un claquement sec et violent. Mais en réalité, cette étincelle, qui correspond au passage de l'état isolant à l'état conducteur de l'air, ne se produit pas de façon instantané mais avec un retard qui dépend essentiellement de la valeur de la distribution et de l'évolution temporelle du champ électrique ainsi que d'autres facteurs qui sont liés à l'environnement où elle se produit. Le développement de la décharge disruptive (ou perforation diélectrique) à l'intérieur des matériaux isolants solides est généralement lié à un ou une association des phénomènes suivants : décharges thermiques, décharges partielles, et la décharges intrinsèques.

Une décharge partielle (DP) est définie par la CEI comme une décharge qui ne court-circuite que partiellement l'isolant entre deux conducteurs [60].

III .13. Décharge disruptive

III .13.1 Décharge thermique

Les pertes diélectriques dues à la conductivité non nulle des diélectriques génèrent une énergie thermique inférieure, égale ou supérieure aux possibilités d'évacuation thermique par conduction ou convection thermique du diélectrique. Si l'énergie produite est supérieure à la dissipation du diélectrique dans les conditions de refroidissement données, la température du diélectrique va augmenter entraînant sa dégradation thermique progressive par décomposition chimique et fusion. La décharge thermique se distingue de la décharge diélectrique ou partielle par le fait que sa durée est supérieure.

III .13.2. Décharge partielle

Les matériaux isolants de qualité technique comportent toujours des inclusions de particules étrangères et des vacuoles gazeuses. Lorsque ces isolants sont soumis à une certaine tension alternative à fréquence industrielle on ne constate que le champ électrique plus élevé dans les vacuoles gazeuses E_g que dans l'isolant E_i . Étant donné la continuité de vecteur induction électrique dans un milieu non ionisé à l'état initial, on trouve :

$$\frac{E_g}{E_i} = \frac{\epsilon_{ri}}{\epsilon_{rg}} \dots\dots\dots\text{III. 3}$$

ϵ_{ri} : est la permittivité relative de l'isolant ;

ϵ_{rg} : est la permittivité relative du gaz ;

Deux facteurs contribuent à faire apparaître des décharges partielles dans les isolants :

- La rigidité diélectrique des gaz est nettement plus basse (environ 10 fois) que celle des solides ;
- La permittivité relative des isolants solides étant toujours plus élevée (2 à 6 fois) que celle de gaz ($\epsilon_{rg} = 1$), le champ électrique dans les vacuoles est proportionnellement plus élevé ;

Ces deux constatations, allant dans le même sens, font que des décharges dites partielles apparaissent dans les vacuoles des isolants pour des tensions 20 à 60 fois plus faibles que celle qui entraineraient la perforation du diélectrique solide.

III .13.3. Décharge intrinsèque

Cette décharge est due à la présence d'électrons libres, aptes à se déplacer dans l'isolant. Il existe deux types de décharges intrinsèques : l'une dite à haute température, l'autre dite à basse température. Frohlich [61] s'appuyant sur la structure des bandes

d'énergie a établi les relations théoriques liées à ces types de décharge intrinsèque.

Le phénomène de décharge disruptive intrinsèque se manifeste préalablement par une caractéristique du courant à travers l'isolant présentant une saturation très nette à partir d'une certaine valeur de la tension. Ce phénomène de saturation s'explique par le fait que le courant à travers l'isolant ne dépend pratiquement (décharge dépendante ou non autonome) que du nombre, bien déterminé et invariant, d'électrons libres dans l'isolant.

III .14. Décharge dans l'air

III .14.1. Décharges de type leader [62]

La tenue diélectrique des grands intervalles d'air diminue avec la distance Interélectrode. Si le champ électrique moyen à l'amorçage est encore de 4,5kV/cm pour 30cm. Ceci est dû à l'influence d'un nouveau phénomène physique dénommé leader. Il est matérialisé par un canal de quelques millimètres de diamètre qui est observé dès que l'espace interélectrode dépasse une valeur comprise entre 40 cm et 80 cm selon les conditions expérimentales.

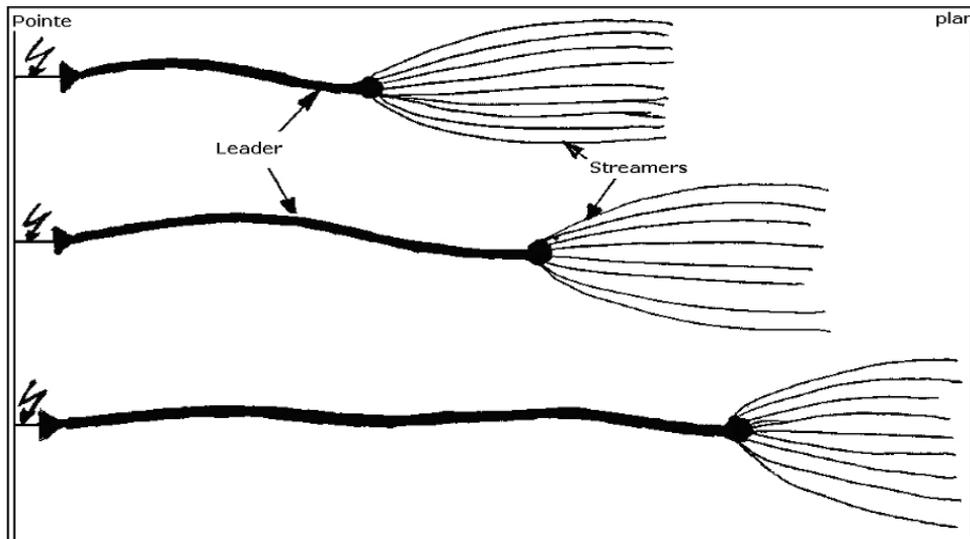


Fig. III.1: Développement d'un leader

Lorsque les streamers qui participent à l'apparition de l'effet couronne sont suffisamment développés, le gaz contenu dans le tronc commun de la décharge s'échauffe sous l'action du courant électronique, sa conductivité, se met à croître, si bien que tout se passe comme si l'électrode s'était allongée. L'effet couronne se trouve donc déplacé plus en avant dans l'intervalle (**Fig. III.1**) et de proche en proche, ce canal s'allonge jusqu'à traverser complètement l'intervalle interélectrode.

III .14.2. Décharge de type streamers [62]

Si l'on considère que la mobilité des ions positifs est 104 fois plus faible de celle des électrons, la répartition des porteurs de charges ainsi que celle du champ électrique résultant peut-être estimée qualitativement (**Fig. III.2**).

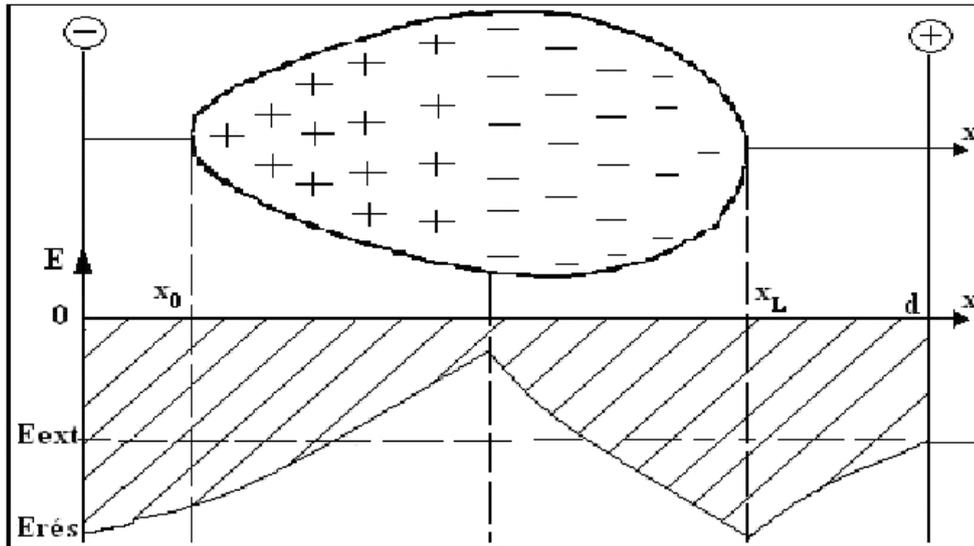


Fig. III. 2: Avalanche électronique dans un champ $\varphi \neq 0$ homogène

Il en résulte que:

- Le champ résultant à la tête et à la queue de l’avalanche électronique est plus grand que le champ appliqué ;
- Le champ résultant à l’intérieur de l’avalanche est plus petit que le champ extérieur.

Le mécanisme de l’avalanche décrit par Townsend ne conserve sa validité que pour des produits dp inférieur à 200 cm. Torr. Au-delà, l’expérimentation montre qu’il se produit des phénomènes peu compatibles avec le mécanisme d’avalanche de Townsend:

1) La densité de courant de décharge croît avec la tension. La faible mobilité des ions positifs crée une concentration de charges d’espace qui modifie le champ appliqué initialement et donc la valeur du coefficient γ . Le critère s’écrit sous sa forme générale:

$$\gamma \left(e^{\int_0^1 \alpha dx} - 1 \right) = 1 \dots\dots\dots \text{III. 4}$$

2) Le phénomène de streamers est caractérisé par un temps de retard de l’ordre de 10^{-8} s, alors que la décharge de Townsend nécessite des temps de 10^{-5} s pour entraîner un claquage. Il se produit dans des gaz soumis à des pressions élevées. Plus le produit dp est

grand plus petite est la probabilité pour qu'une avalanche puisse parcourir la distance d. Sachant que le nombre d'électrons en tête de l'avalanche ainsi que celui d'ions positifs en queue de l'avalanche augmente exponentiellement avec α et x, Reather a établi un critère simple basé sur le fait que l'avalanche doit atteindre une taille critique pour que le streamer puisse se développer.

Il s'écrit simplement avec x_c distance critique et N_c nombre critique d'électrons, égal à environ 10^8 électrons.

$$\int_0^{x_c} \alpha dx = \ln N_c. \dots\dots\dots \text{III. 5}$$

La formation d'un streamer s'explique par des mécanismes de photo-ionisation (Modèle de Meek) se produisant à l'intérieur de l'avalanche primaire. Les électrons accélérés par le champ électrique excitent par collision des molécules neutres qui reviennent à leur état fondamental avec émission de photons. La tête et la queue sont aussi les sièges d'une importante émission de photons qui sont absorbés par les gaz environnant. Si l'électron produit se trouve au voisinage de l'avalanche primaire, il va créer une nouvelle avalanche, dite avalanche secondaire selon le mécanisme de multiplication électronique (Fig. III.3).

Les avalanches secondaires et subséquentes prennent naissance à la tête et à la queue de l'avalanche et se développent par pas dans la direction de l'anode et de la cathode. La vitesse de propagation du streamer peut atteindre 1000 cm/ μ s.

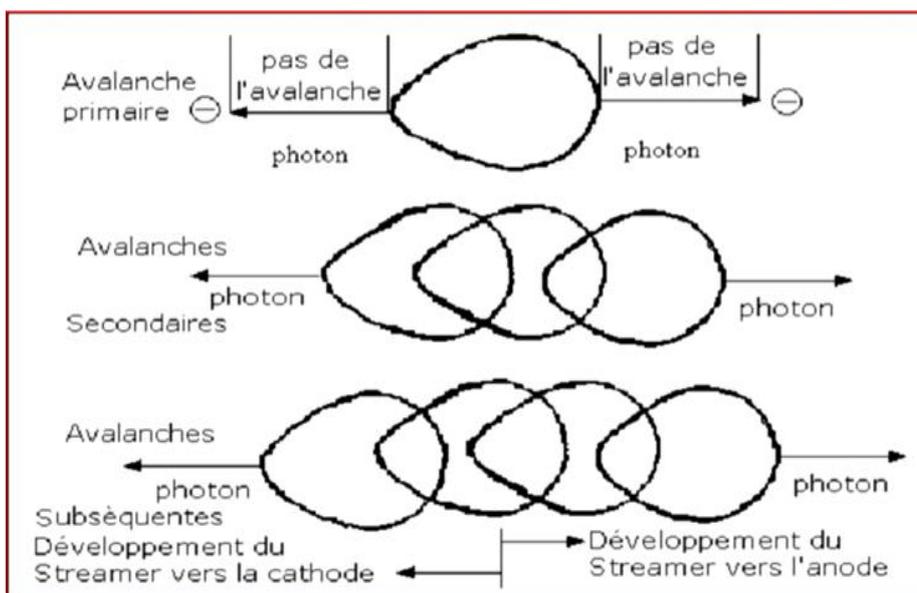


Fig. III.3: Développement d'un streamer

III .15. Conséquences de la pollution

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

La rupture diélectrique de l'air peut être atteinte entre deux points de la surface isolante entraînant l'amorçage d'un arc électrique qui court-circuite une partie de la ligne de fuite. Trois cas peuvent se présenter selon les contraintes auxquelles est soumis l'isolateur [63].

III .15.1. Arc non localisé

L'arc électrique s'éteint rapidement, puis se réamorce à un autre endroit et ainsi de suite. Il y a apparition de courant de fuite entraînant une petite perte d'énergie, généralement supportable par l'installation.

III .15.2. Arc fixe

L'arc électrique se fixe sur la surface, se réamorçant au même endroit (courant alternatif). Cet arc peut entraîner, par effet thermique, une dégradation du support isolant nécessitant le remplacement de l'élément défailant.

III .15.3. Court-circuit

Dans ce cas, l'arc électrique atteint l'électrode opposée. Ainsi, la formation d'un pont conducteur sur la surface isolante polluée favorise le passage d'un fort courant, ce cas engendre la rupture totale de l'isolation [64].

III .16. Conclusion

La pollution des isolateurs est un facteur essentiel dont il faut tenir compte dans la conception des lignes électriques de haute tension.

Les méthodes d'essai sous pollution artificielle sont largement utilisées. Elle consiste à reproduire au laboratoire les conditions de la pollution naturelle, ainsi qu'elle possède l'avantage d'être rapide.

Pour mieux dimensionner l'isolateur, il est indispensable de connaître la sévérité de la pollution des sites concernés. La connaissance de cette sévérité consiste à étudier les différents paramètres qui définissent l'état de dégradation de l'isolation. Il n'en demeure

pas moins que trois années sont au minimum nécessaires pour déterminer la sévérité d'un site.

Les techniques de lutte contre la pollution actuellement connues (graissage, lavage, revêtements hydrophobes...), permettent de disposer aujourd'hui des solutions curatives à la plupart des problèmes de pollution rencontrés par les exploitants sur le terrain.

La tension de contournement d'un isolateur pollué dépend essentiellement de la conductivité du dépôt polluant (degré de pollution) ainsi que de la répartition de la couche de pollution sur la surface isolante. La connaissance de ce degré de pollution est par conséquent, une condition préalable et indispensable pour apprécier le niveau de l'isolement des ouvrages installés sur site, en vue de dimensionner convenablement l'isolation.

Chapitre IV

Partie expérimentale

IV.1. Introduction

Notre objectif dans ce chapitre, est d'étudier le contournement d'une surface isolante en silicone hydrophobe, recouverte de gouttes d'eau sous tension alternative. Au début de notre étude, nous avons déterminé la tension de contournement de cette surface sans gouttes d'eau correspondant à une performance idéale pour une distance interélectrode d fixe et égale à 6 cm. Après nous avons étudié l'influence de certains paramètres sur la tension de contournement de cette surface hydrophobe, à savoir le nombre de rangées 1 à 6, le volume des gouttes d'eau déposées sur cette surface (20, 65 et 90) μl , de conductivité électrique égale à 180 $\mu\text{S}/\text{cm}$, l'accumulation et sans accumulation (électrode percée) de la quantité d'eau sur la surface de l'isolation située du côté de l'électrode mise à la terre, ainsi que le degré d'inclinaison α° de la surface isolante par rapport à l'horizontale.

IV.2. Modèle expérimental et techniques de mesure

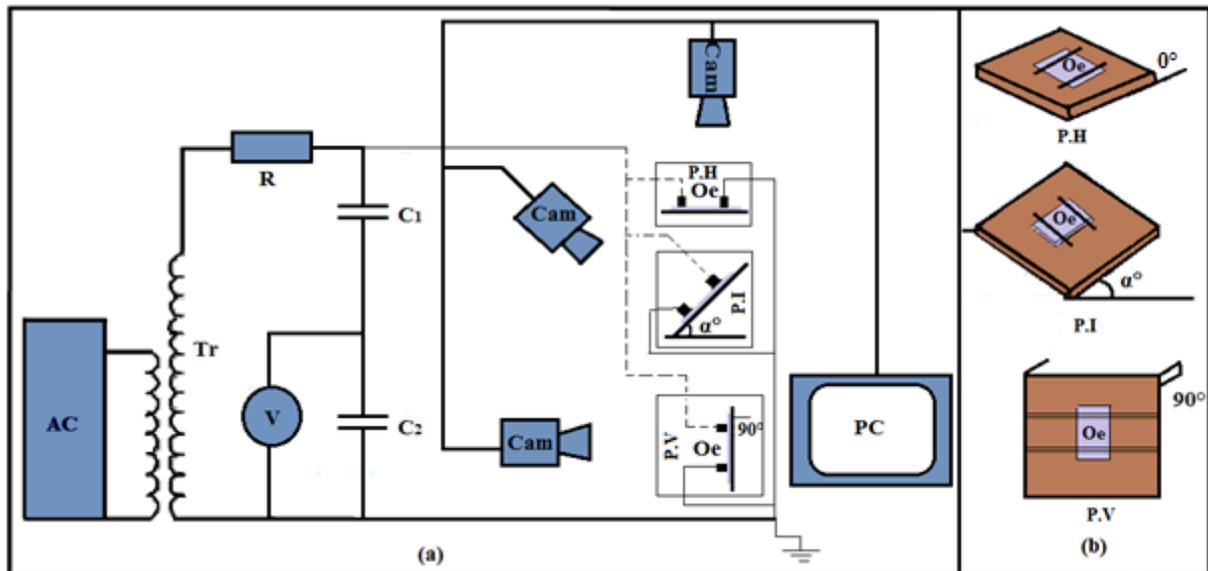


Fig. IV. 1: (a) schéma de mesure et de visualisation; (b) différentes positions de l'objet d'essai

AC: Appareil de Commande manuelle ou automatique du transformateur;

Tr: Transformateur BT/HT ; Cam: Caméscope numérique; PC: Ordinateur ;

Oe: Objet d'essai ; PH: Position horizontale ; PI: Position inclinée ; PV: Position verticale.

À l'aide du schéma électrique montré sur la figure IV.1 (laboratoire de haute tension, cellule des diélectriques de l'université Abderrahmane Mira de Bejaia), nous avons évalué la performance électrique d'une surface isolante hydrophobe en silicone recouverte de gouttes d'eau et la visualisation du contournement électrique de celle-ci.

Le dispositif expérimental que nous avons utilisé est constitué d'un voltmètre de crête V à affichage numérique, une résistance de protection R , un diviseur de tension capacitif C_1/C_2 auquel est connecté l'objet d'essai O_e et un transformateur Tr qui peut délivrer à son secondaire une tension alternative maximale de 135 kV, dont la variation temporelle de sa rampe peut être obtenue à l'aide de l'appareil SG, de commande manuelle ou automatique AC (Fig. IV.1a), et les différentes positions du dispositif sont illustrées par la figure IV.1b.

Le circuit de visualisation est constitué d'un caméscope Cam pour l'enregistrement des différentes phases de contournement se développant sur la surface de l'isolant hydrophobe en silicone limitée par deux électrodes et un micro ordinateur PC pour une meilleure observation et l'analyse de ce phénomène.

En plus, nous avons disposé d'un baromètre, d'un thermomètre et d'un hygromètre à cheveux pour mesurer la pression, la température et l'humidité.

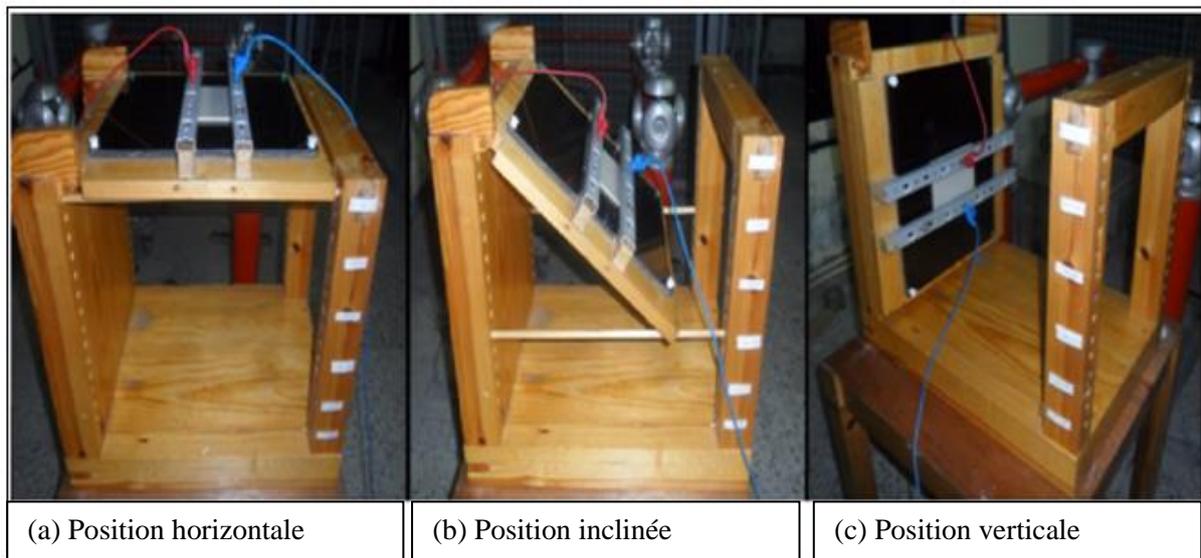


Fig. IV. 2: Différentes positions du dispositif

Le dispositif expérimental utilisé est représenté sur la figure IV.2. Il est constitué de deux types échantillons en silicone de dimensions $13 \times 9,3 \times 0,5 \text{ cm}^3$ et $9,3 \times 8,4 \times 0,5 \text{ cm}^3$ sur lesquels reposent deux électrodes en fer de forme identique et de taille $13,5 \times 2 \times 2 \text{ cm}^3$ arrondies aux extrémités. L'électrode supérieure est portée à la HT et l'autre est mise à la terre. La surface en silicone est posée sur une plaque en plexiglas de dimensions $35 \times 30 \times 1 \text{ cm}^3$. Cet ensemble est déposé sur un support en bois cubique, de 56 cm de longueur, 40 cm de largeur et 48 cm de hauteur. L'inclinaison par rapport à l'horizontale de la surface isolante est assurée par sa paroi supérieure, cette dernière peut faire un mouvement rotatif de 0° à 90° par

rapport à l'horizontale. Le support repose sur une table en bois mise à la terre et située à 65 cm du sol.

La distance séparant les deux électrodes planes et parallèles est fixée à 6 cm tout au long de notre étude. L'arrangement des gouttes d'eau sur la surface hydrophobe en silicone est en zigzag. Le volume des gouttes d'eau déposées sur cette surface est de 20, 65 et 90 μl . La goutte d'eau est prélevée avec une micropipette. La figure IV.3, représente les caractéristiques de l'arrangement des gouttes d'eau sur la surface en silicone hydrophobe.

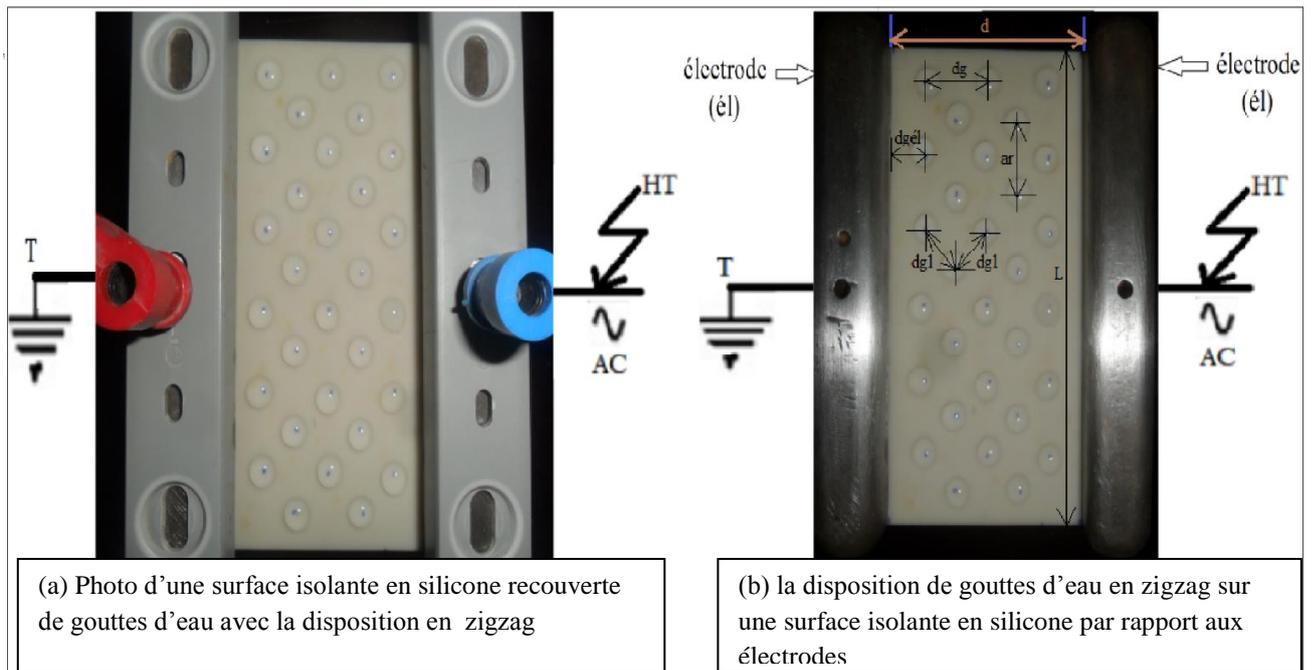


Fig. IV.3 : Caractéristiques de l'arrangement de gouttes d'eau sur la surface en silicone

d: Distance interélectrode;

L: Longueur de l'isolation;

a_r : Distance séparant deux rangées successives de gouttes d'eau sur la longueur de l'isolation;

d_g : Distance entre deux gouttes adjacentes sur la même ligne de fuite de l'isolation;

d_{g1} : Distance entre les gouttes en diagonale;

$d_{gél}$: Distance entre l'électrode (soit du côté HT soit de côté terre) et de la première goutte se trouvant sur la ligne de fuite de l'isolation;

$a_r = 2 \text{ cm}$; $d_{gél} = 1 \text{ cm}$; $d_g = 2 \text{ cm}$; $d_{g1} = \sqrt{2} \text{ cm}$; $d = 6 \text{ cm}$.

IV.3 Pollution d'une surface isolante

La solution polluante est composée d'un mélange du sel et de l'eau distillée. Selon la conductivité volumique souhaitée, à laquelle on ajoute de petites quantités de sel. Ensuite

nous fixons la conductivité de la solution ionique à la valeur désirée 180 $\mu\text{S}/\text{cm}$, grâce à un conductimètre à sonde mobile (Fig. IV. 4).



Fig. IV.4 : Conductimètre (appareil de mesure de conductivité volumique)

IV.4. Procédé d'essai

Avant d'appliquer la tension alternative sur notre isolant, nous le mettons dans un dessiccateur pour éliminer l'humidité, et recouvrir son hydrophobicité. Après chaque essai, l'isolant en silicone doit être bien nettoyé à l'aide du papier mouchoir et de l'isopropanol. Le point d'application de chaque goutte d'eau sur la surface en silicone est repéré à l'aide d'une teinte bleu isolante. Les volumes prélevés à l'aide de la micropipette sont de l'ordre 20, 65 et 90 μl .

Pour chaque série de mesure, 20 essais ont été effectués. La valeur retenue est la moyenne arithmétique de ces mesures. Après chaque série réalisée, les échantillons doivent être mis au repos pendant plus de sept heures pour récupérer leur hydrophobicité.

IV.5. Dessiccateur

Un dessiccateur désigne un équipement servant à éliminer l'humidité sur des échantillons en silicone. Dans cette étude nous avons utilisé deux types de dessiccateur, l'un est sous forme d'un rectangle en PVC comme il est montré sur la figure IV.5.

Et l'autre est constitué d'une cuve circulaire surmontée d'un couvercle, l'ensemble est en verre épais. Le diamètre intérieur de ce dessiccateur varie généralement de 10 à 30 cm. La liaison des deux parties peut être réalisée par un rodage en verre ou un joint torique en élastomère comme le montre la figure IV.6.



Fig. IV.5: Dessiccateur en PVC



Fig. IV.6: Dessiccateur en verre

A chaque fin de série d'essais, les échantillons en silicone sont nettoyés ensuite placés dans le dessiccateur pour éliminer l'humidité. Au préalable, une quantité suffisante de dessicatif (silicagel) de couleur orange est déposée au fond du dessiccateur. Lorsque le gel de

silice (silicagel) change de couleur et devient transparent, il faut le régénérer par étuvage. Le gel de silice peut être régénéré par chauffage à 170 °C environ (Fig. IV.7).



Fig. IV.7: Gel de silice (silicagel)

IV.6 Correction des résultats de tension en fonction des conditions atmosphériques

La tension de contournement de surface isolante est étroitement liée aux conditions climatiques, à savoir, la température, la pression et l'humidité de l'air environnant. La valeur de la tension de contournement, dans les conditions normales de température ambiante, pression et d'humidité ($\theta = 20^\circ\text{C}$, $P = 100 \text{ kPa}$ et $H = 11 \text{ g/m}^3$), est donnée par la relation suivante :

$$\hat{U}_{c0} = \frac{K_h}{K_d} \cdot \hat{U}_c \dots\dots\dots \text{IV. 1}$$

\hat{U}_c : Tension de contournement à la température θ , à la pression P et à l'humidité H ;

\hat{U}_{c0} : Tension de contournement dans les conditions normales de température θ , pression P et d'humidité H ;

K_d : Facteur de correction relatif à la température et à la pression;

K_h : Facteur de correction relatif à l'humidité;

$$K_d = \frac{2,93.P}{(273+\theta)} \dots\dots\dots \text{IV. 2}$$

P : Pression en kPa;

θ : Température en °C.

Pour calculer le facteur de correction K_h , relatif à l'humidité, une transformation de l'humidité relative exprimée en % vers l'humidité absolue exprimée en g/m^3 , est nécessaire, car K_h est donnée en fonction de cette dernière. L'abaque de la figure IV.8a, donne la

transformation de l'humidité relative à l'humidité absolue en fonction de la température. La valeur de l'humidité absolue lue directement sur cette dernière, est reportée sur l'abaque de la figure IV. 8b, pour déduire le facteur de correction K_h .

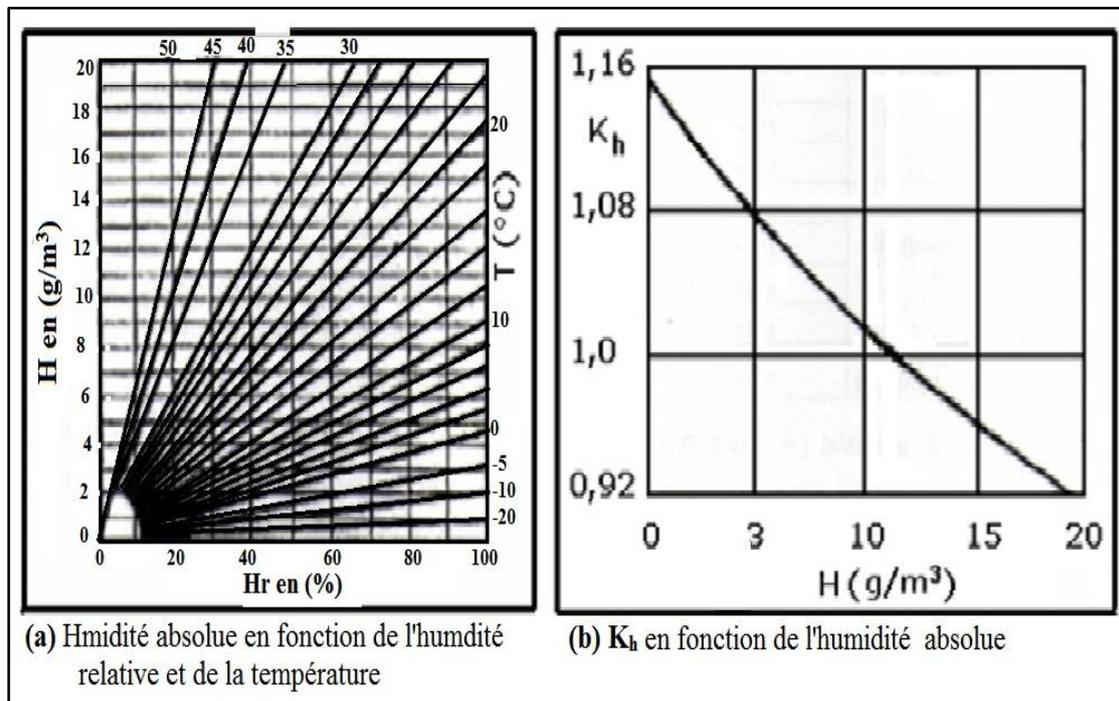


Fig. IV.8: Abaqués de corrections en fonction de l'humidité et de la température

Exemple de calcul:

Soit un système de deux électrodes planes placées sur la surface de l'isolant distant de 6 cm. Pour les conditions de température, de pression et d'humidité suivantes:

$T = 18 \text{ }^\circ\text{C}$, $P = 100,8 \text{ kPa}$, $H_r = 67 \%$, la tension de contournement mesurée a pour valeur : $\hat{U}_c = 43,03 \text{ kV}$. En utilisant les formules de correction et les abaques suscités ci-dessus nous trouvons:

$$K_h = 1,001$$

$$K_d = \frac{2,93 \cdot 100,8}{273+18} = 1,015$$

$$U_{c0} = 42,43 \text{ kV}.$$

IV.7. Propriétés diélectriques de l'isolation en silicone

Le tableau IV.1 donne les valeurs de quelques propriétés diélectriques de la silicone. Celles-ci ont été mesurées à l'aide du pont de Schering au laboratoire de haute tension de l'université A. Mira de Bejaia dans le cadre des travaux antérieurs sur ces mêmes échantillons [20].

Isolation	Silicone
Propriétés diélectrique	
ϵ_r	3,96
ρ_{cct} ($\Omega \cdot m$)	$6,8 \cdot 10^{10}$
ρ_{ccs} (Ω)	$4 \cdot 10^9$
Tg δ	0,0099

Tab. IV. 1: Valeurs de quelques paramètres électriques de l'isolation en silicone [20]

IV.8. Paramètres d'influence de la tension de contournement d'une surface en silicone hydrophobe

Dans notre travail les paramètres d'influence de la tension de contournement du système pris en considération sont :

- Volume et nombre de rangées de gouttes d'eau déposées sur sa surface ;
- Accumulation de la quantité d'eau sur la surface du côté bas de l'isolation située au voisinage de l'électrode mise à la terre ;
- Angle d'inclinaison de l'isolation par rapport à l'horizontale ;
- Degré de pollution des gouttes d'eau recouvrant sa surface.

IV.8.1. Nombre de rangées de gouttes d'eau

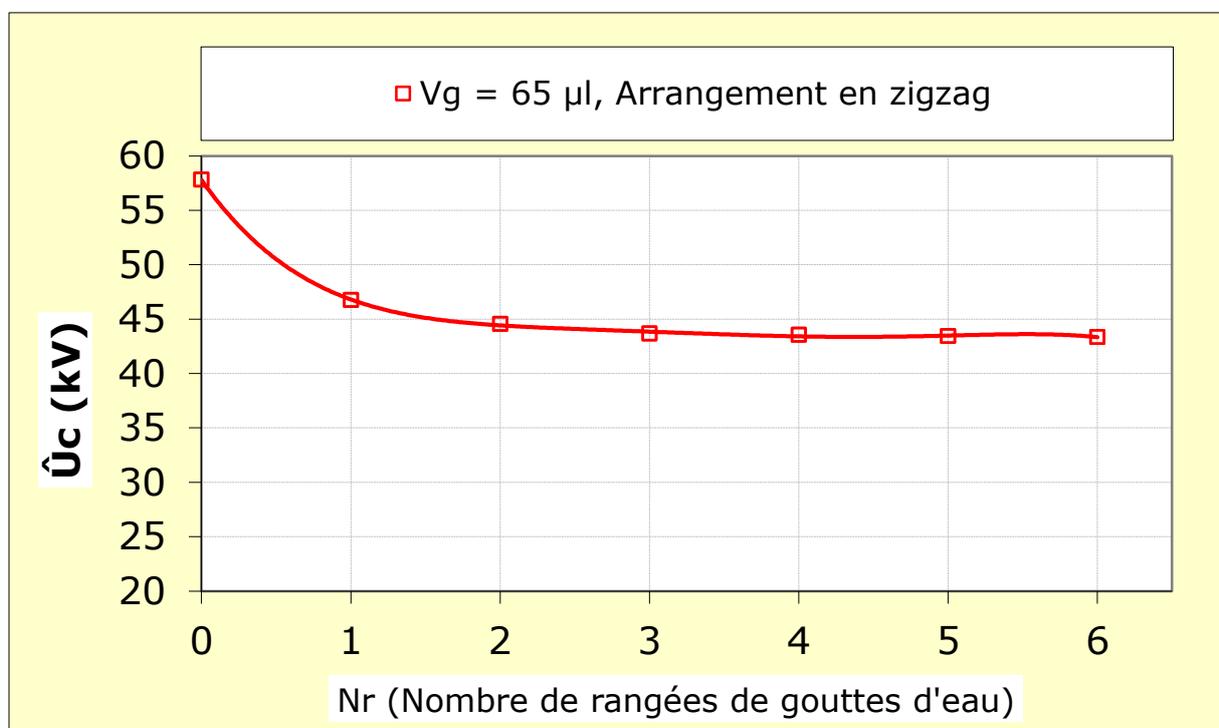


Fig. IV. 9: $\hat{U}_c = f(N_r)$ d'une surface en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau ($V_g = 65 \mu l$; $\sigma_v = 180 \mu S/cm$)

L'influence de l'arrangement de gouttes d'eau sur la performance électrique d'une surface isolante en silicone mise sous tension alternative est illustrée par la figure IV.9. Dans cette étude nous avons varié le nombre de rangées de 0 à 6, en gardant la conductivité électrique égale à $\sigma_v = 180 \mu\text{S}/\text{cm}$, et le volume de goutte d'eau $V_g = 65 \mu\text{l}$ pour tous les essais, avec un angle d'inclinaison α égal à zéro. Le dépôt de gouttes est réalisé en ordre zigzag. La valeur maximale de la tension de contournement de cette surface isolante est égale à 57,8 kV, celle-ci est mesurée sans gouttes d'eau. Ensuite nous avons remarqué que l'augmentation du nombre de rangées de gouttes d'eau, entraîne une décroissance de la tension de contournement jusqu'à atteindre une valeur constante, pour un nombre de rangées de l'ordre de 4 à 5. La performance électrique de l'isolation chute de 25 % par rapport au cas de l'isolation sans gouttes d'eau.

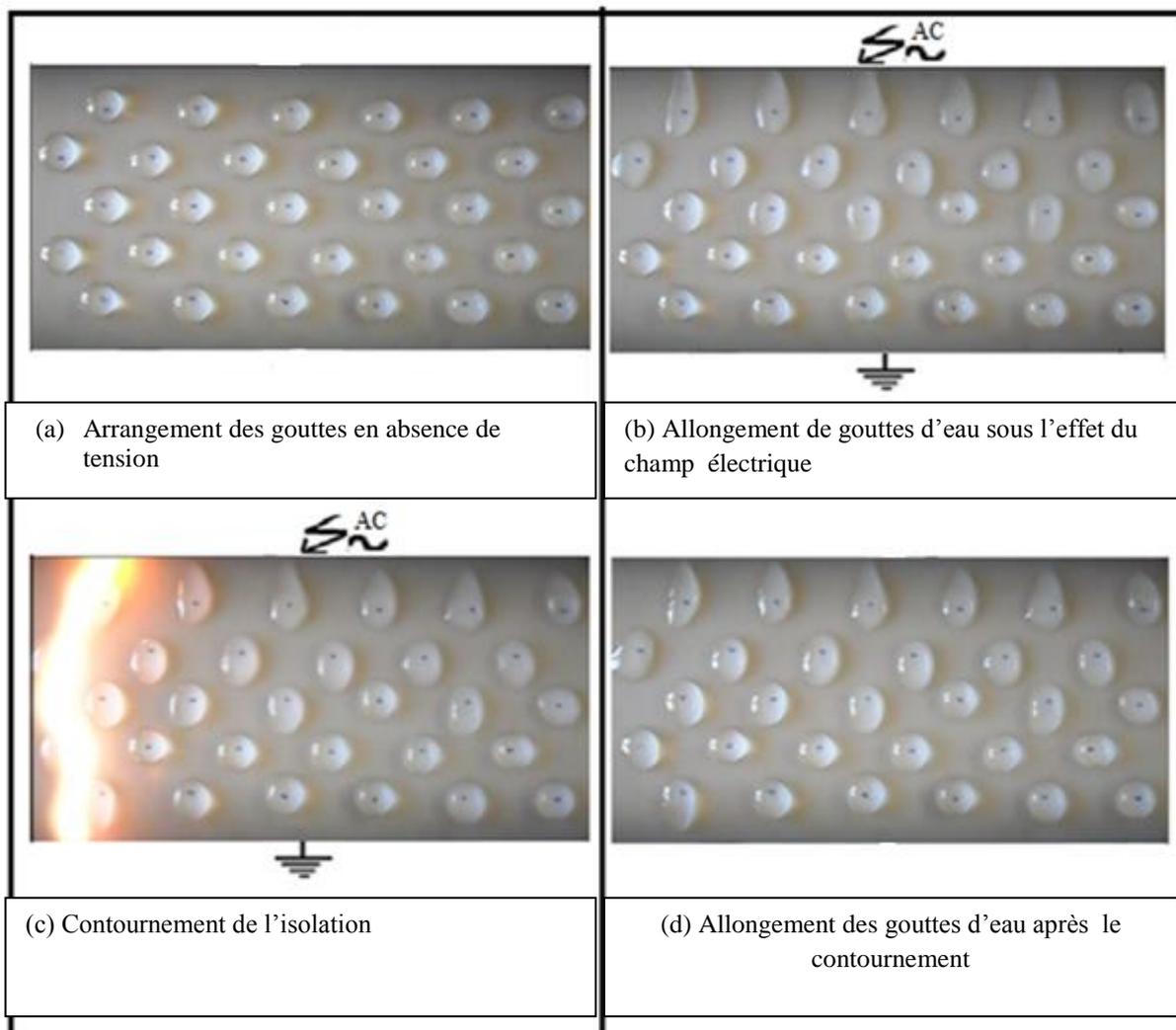


Fig. IV.10: Phases de contournement d'une surface en silicone hydrophobe ($\alpha = 0^\circ$, $N_r = 6$)

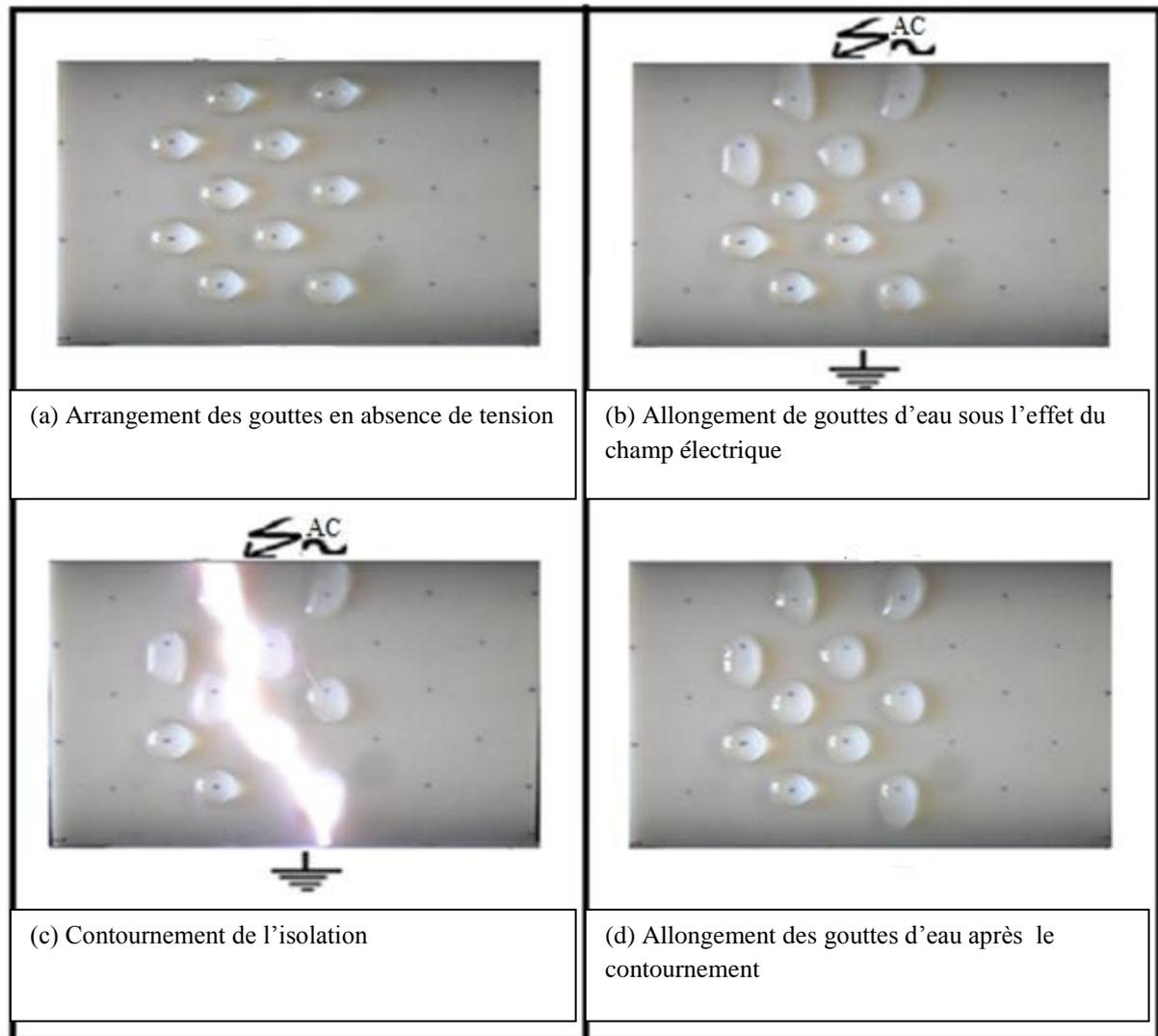


Fig. IV.11: Phases de contournement d'une surface en silicone hydrophobe ($\alpha = 0^\circ$, $Nr = 2$)

Les photos représentées sur les deux figures IV.10 et IV.11, expliquent les principales phases de contournement d'une surface isolante en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau de $65 \mu\text{l}$ de volume, pour une conductivité volumique fixe et égale à $180 \mu\text{S}/\text{cm}$ et un angle d'inclinaison α égal à zéro. Les figures IV.10a et IV.11a nous montrent la forme de gouttes en absence de tension alternative et les figures IV.10b et IV.11b nous montrent l'allongement de gouttes d'eau vers l'électrode mise à la terre à cause de leur vibration sous l'effet de champ électrique alternatif. Les figures IV.10c et IV.11c indiquent le chemin emprunté par la décharge électrique. On remarque tout d'abord que la couleur émise par ces deux décharges est différente (pour une valeur faible de tension de contournement, la couleur du canal de la décharge est orange). Les figures IV.10d et IV.11d montrent la forme des gouttes d'eau après le passage de la décharge électrique.

IV.8.2. Accumulation d'eau sur la surface du bas de l'isolation du côté de l'électrode à la terre pour $V_g = 65 \mu\text{l}$

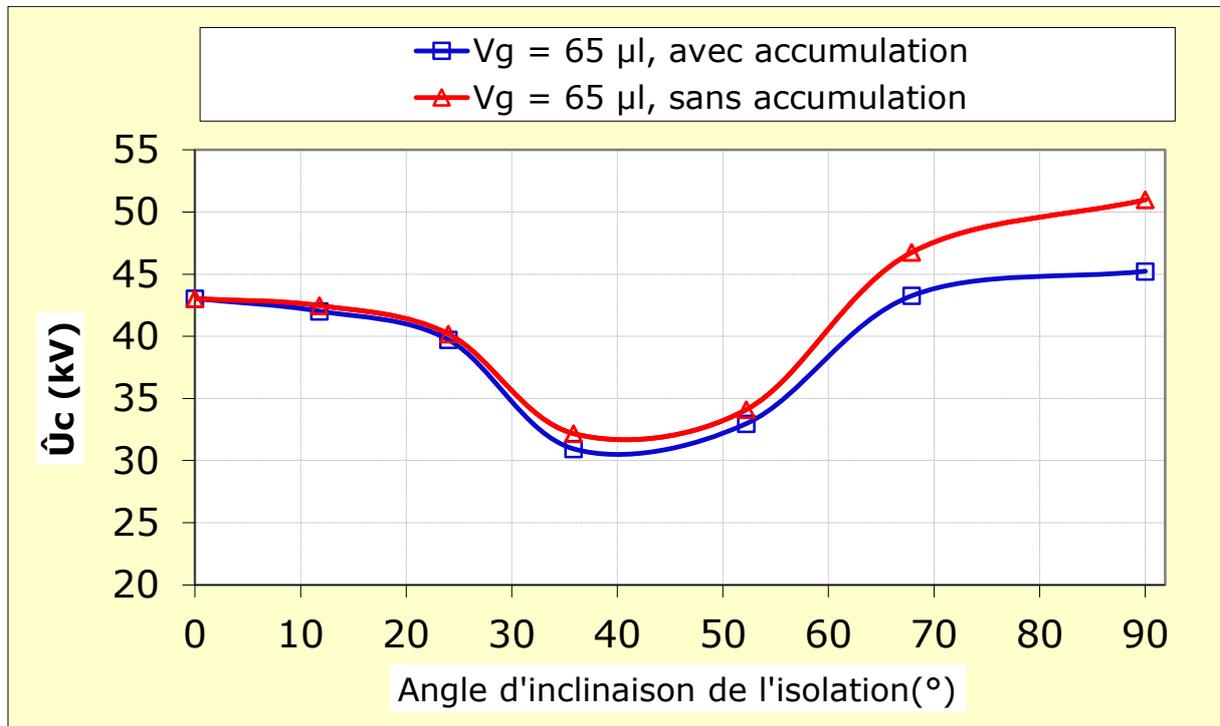


Fig. IV.12 : $\hat{U}_c = f(\alpha^\circ)$ d'une surface isolante en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau ; ($\sigma_v = 180 \mu\text{S/cm}$)

La figure IV.12 donne l'évolution de la tension de contournement en fonction de l'angle d'inclinaison variable $\alpha = 0^\circ, 11.79^\circ, 24.12^\circ, 35.86^\circ, 52.20^\circ, 67.88^\circ, 90^\circ$ par rapport à l'horizontale de la surface isolante en silicone hydrophobe recouvertes de gouttes d'eau, avec accumulation ou sans accumulation (électrode percée) de la quantité d'eau sur cette surface isolante située du côté de l'électrode mise à la terre. Les gouttes d'eau ont pour volume égal à $65 \mu\text{l}$, avec une conductivité volumique $\sigma_v = 180 \mu\text{S/cm}$ et le nombre de rangées $N_r = 5$ restent fixe pendant tous les essais effectués durant cette partie. Il en résulte qu'une différence de valeur de la tension de contournement entre les deux cas (avec ou sans accumulation), qui est plus faible dans le cas où il y a l'accumulation de la quantité d'eau. Cet écart est évalué à 13,86 %. Ce dernier est dû à la diminution de la distance interélectrode sèche ou bien l'augmentation de la ligne de fuite humide dans le cas de l'accumulation de ces gouttes, qui engendre la réduction de la tension de contournement. Les deux courbes présentent l'existence d'une valeur minimale de la tension de contournement après sa décroissance, cette valeur est de 30,94 kV pour l'accumulation de gouttes d'eau et de 32,17 kV dans le cas sans accumulation de ces dernières. L'existence de cette tension minimale de contournement de

cette surface isolante hydrophobe est justifiée par une diminution maximale de la distance entre les gouttes d'eau par l'allongement optimal de ces dernières pour un angle d'inclinaison de l'isolant égal à $35,86^\circ$. Au delà de ces deux valeurs minimales de la tension de contournement, nous observons l'augmentation de la valeur de cette dernière avec l'agrandissement de l'angle d'inclinaison α , puisque dans ce cas les gouttes d'eau tombent et laissent derrière elles des petites gouttelettes, ce qui entraîne de nouveau l'élévation de la ligne de fuite sèche de l'isolation.

La figure IV.13 illustre les différentes phases de la tension de contournement d'une surface isolante en silicone recouverte de gouttes d'eau de volume $65 \mu\text{l}$, avec accumulation de ces dernières au niveau de l'électrode terre dont l'angle critique $\alpha_{cr} = 35.86^\circ$ et le nombre de rangées $N_r = 5$. L'évolution de la décharge électrique dans ce cas s'étale sur plusieurs rangées afin de provoquer le contournement final.

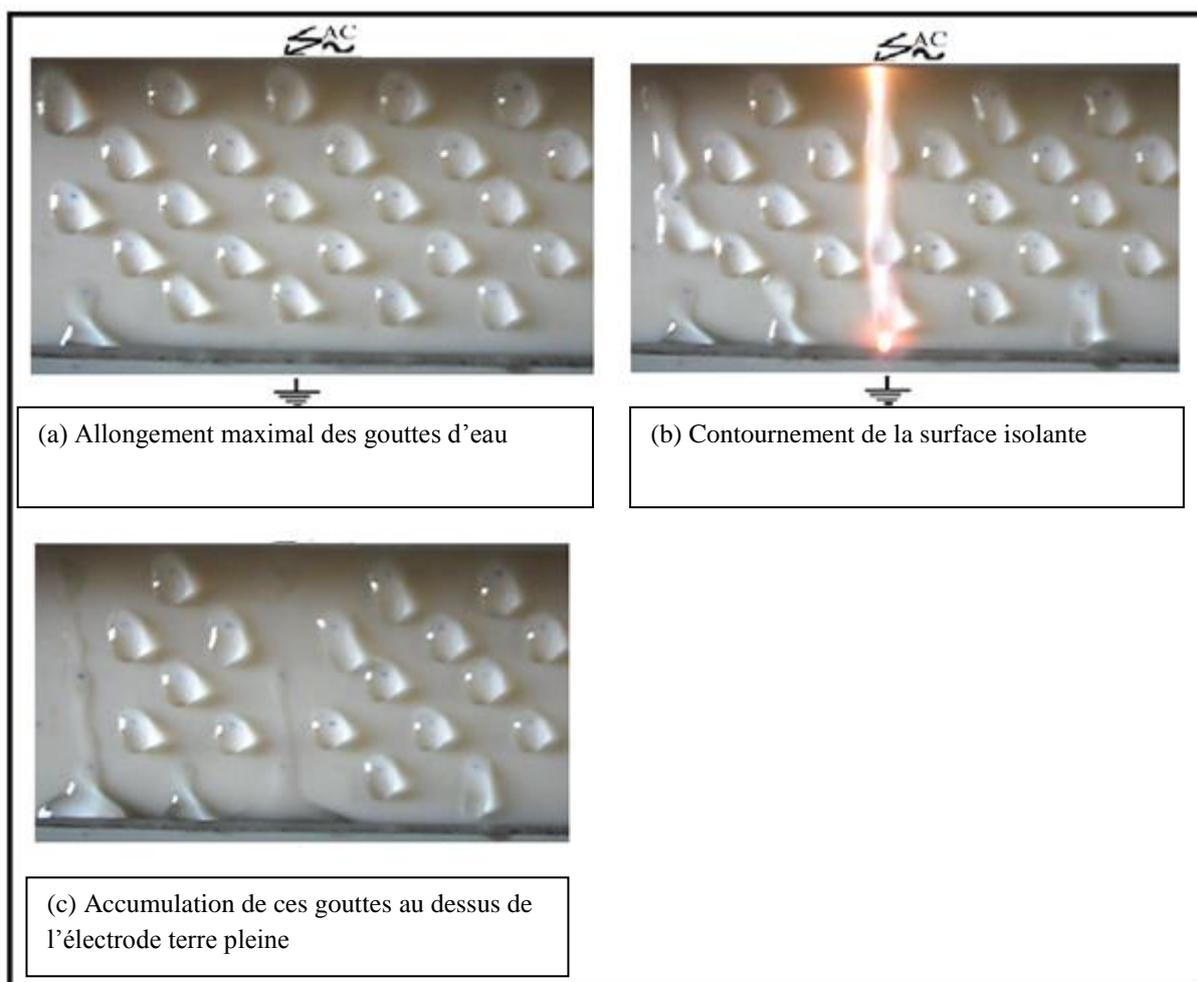


Fig. IV.13: Contournement d'une surface isolante en silicone recouverte de gouttes d'eau avec ou sans accumulation de ces dernières pour ($\alpha_{cr} = 35,86^\circ$, $V_g = 65 \mu\text{l}$, $N_r = 5$, $\sigma_v = 180 \mu\text{S/cm}$)

La figure IV.13a montre l'allongement optimale des gouttes d'eau résiduelles avec un angle d'inclinaison critique $\alpha_{cr} = 35.86^\circ$. La figure IV.13b illustre le passage de la décharge électrique, par contre la figure IV.13c indique accumulation de ces gouttes au dessus de l'électrode terre pleine.

La figure IV.14a montre accumulation des gouttes d'eau et la formation d'une flaque d'eau mince étalée sur toute la largeur de l'électrode terre pleine, contrairement à la figure IV.14b qu'elle indique l'absence de l'accumulation de ces gouttes au dessus de l'électrode terre percée.

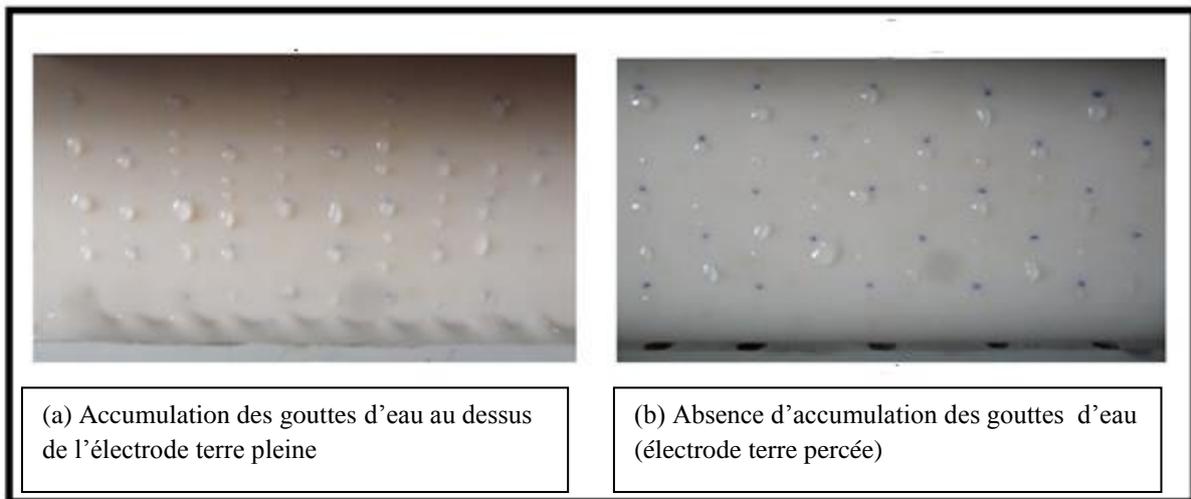


Fig. IV.14: Surface isolante en silicone recouverte de gouttes d'eau avec ou sans accumulation de ces dernières pour ($\alpha = 90^\circ$, $V_g = 65 \mu\text{l}$, $N_r = 5$, $\sigma_v = 180 \mu\text{S/cm}$)

IV.8.3. Accumulation d'eau au dessus de l'électrode terre pour $V_g = 90 \mu\text{l}$

La figure IV.15 illustre l'évolution de la tension de contournement d'une surface isolante en silicone sous tension alternative, et l'effet de l'accumulation d'un dépôt de gouttes d'eau sur sa surface d'inclinaison variable. Le volume des gouttes d'eau pris dans ces essais est de $90 \mu\text{l}$, leur conductivité électrique de $180 \mu\text{S/cm}$ et le nombre de rangées $N_r = 5$. Il en résulte une allure strictement croissante et similaire pour les deux courbes obtenues avec ou sans accumulation d'eau, et quelle que soit la valeur de l'angle d'inclinaison de cette surface hydrophobe. Par contre la tension de contournement de la même surface sans accumulation, est plus élevée que celle obtenue avec accumulation de la quantité d'eau sur celle-ci. Cette différence peut être expliquée par la diminution de la taille de la ligne de fuite sèche de l'isolation, à cause de la stagnation d'une certaine quantité d'eau au dessus de l'électrode mise à la terre, humidifiant ainsi partiellement la ligne de fuite de l'isolation. L'écart maximal entre ces deux courbes de performance est évalué à 19.51 %.

De plus il est à remarquer l'accroissement de la tension de contournement en fonction de l'augmentation de l'angle d'inclinaison α , la plus faible valeur est estimée à 25.01 kV, celle-ci est obtenue pour un angle horizontal d'une isolation étudiée. Néanmoins, la valeur maximale est mesurée avec l'angle vertical, puisque la performance de l'isolation est plus grande pour cet angle, car les grosses gouttes quittent la surface de l'isolation en cédant leur place à des petites gouttelettes d'eau engendrant l'élévation de la ligne de fuite de l'isolation comme il est expliqué précédemment.

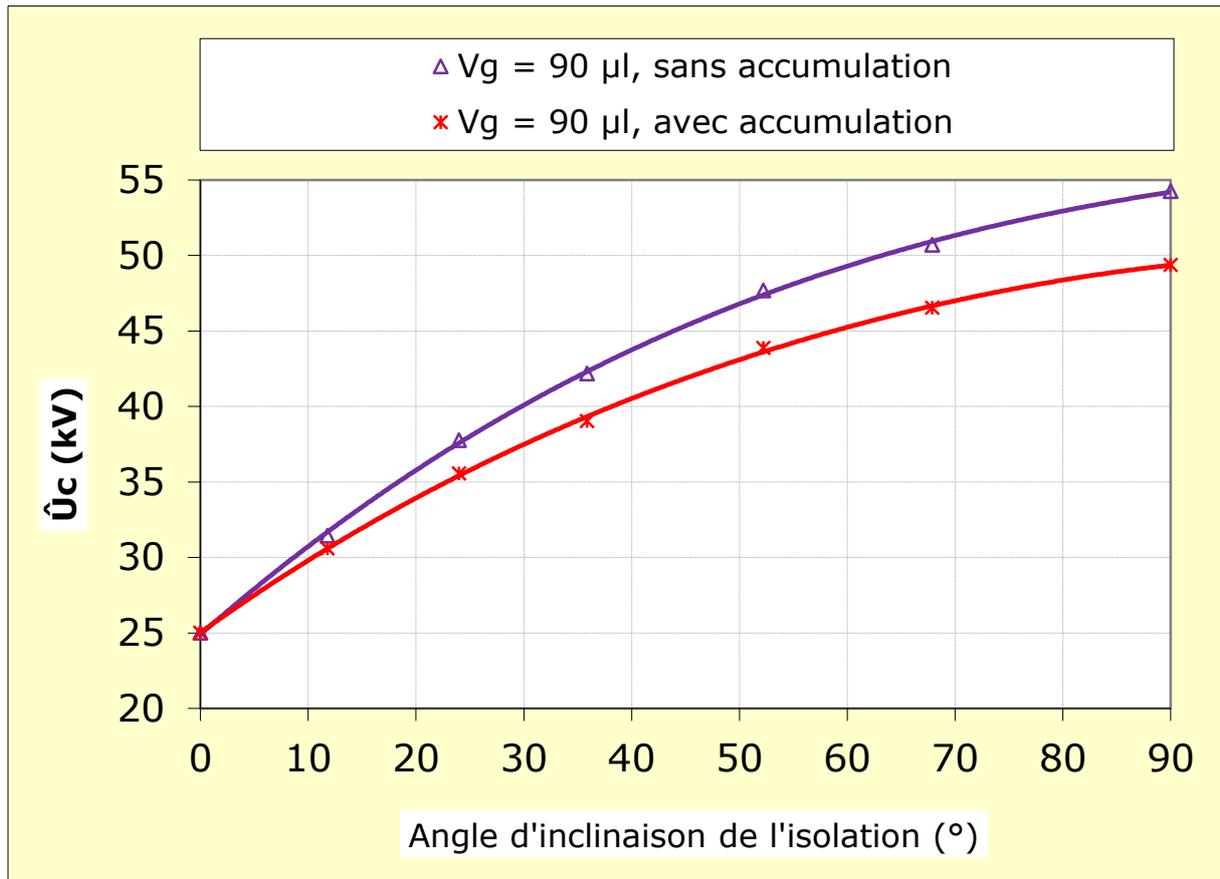


Fig. IV. 15: $\hat{U}_c = f(\alpha)$ d'une surface en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau ($\sigma_v = 180 \mu\text{S}/\text{cm}$)

La figure IV.16 montre une surface en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau $V_g = 90 \mu\text{l}$ et $N_r = 5$, pour un angle d'inclinaison α égal à 24.12° .

Les figures IV.16a et IV.16d présentent la forme et la disposition de gouttes d'eau avant l'inclinaison de cette surface isolante, et le passage de la décharge électrique sur cette dernière. Les photos illustrées par les figures IV.16b et IV.16, nous indiquent allongement de ces gouttes sur cette surface isolante inclinée. En suite elles s'accumulent au niveau de l'électrode terre pleine, donnant ainsi naissance à un filet d'eau au dessus de celle-ci comme le montre la figure IV.16c. Par contre la figure IV.16f indique l'absence de l'accumulation de

ces gouttes au niveau de l'électrode terre percée. Après avoir quitté leur place, on arrivant au niveau de l'électrode terre percée, celle-ci passe à travers les trous et tombent vers le sol. Par conséquent la ligne de fuite sèche dans ce cas de figure est plus grande que celle où les gouttes se sont accumulées.

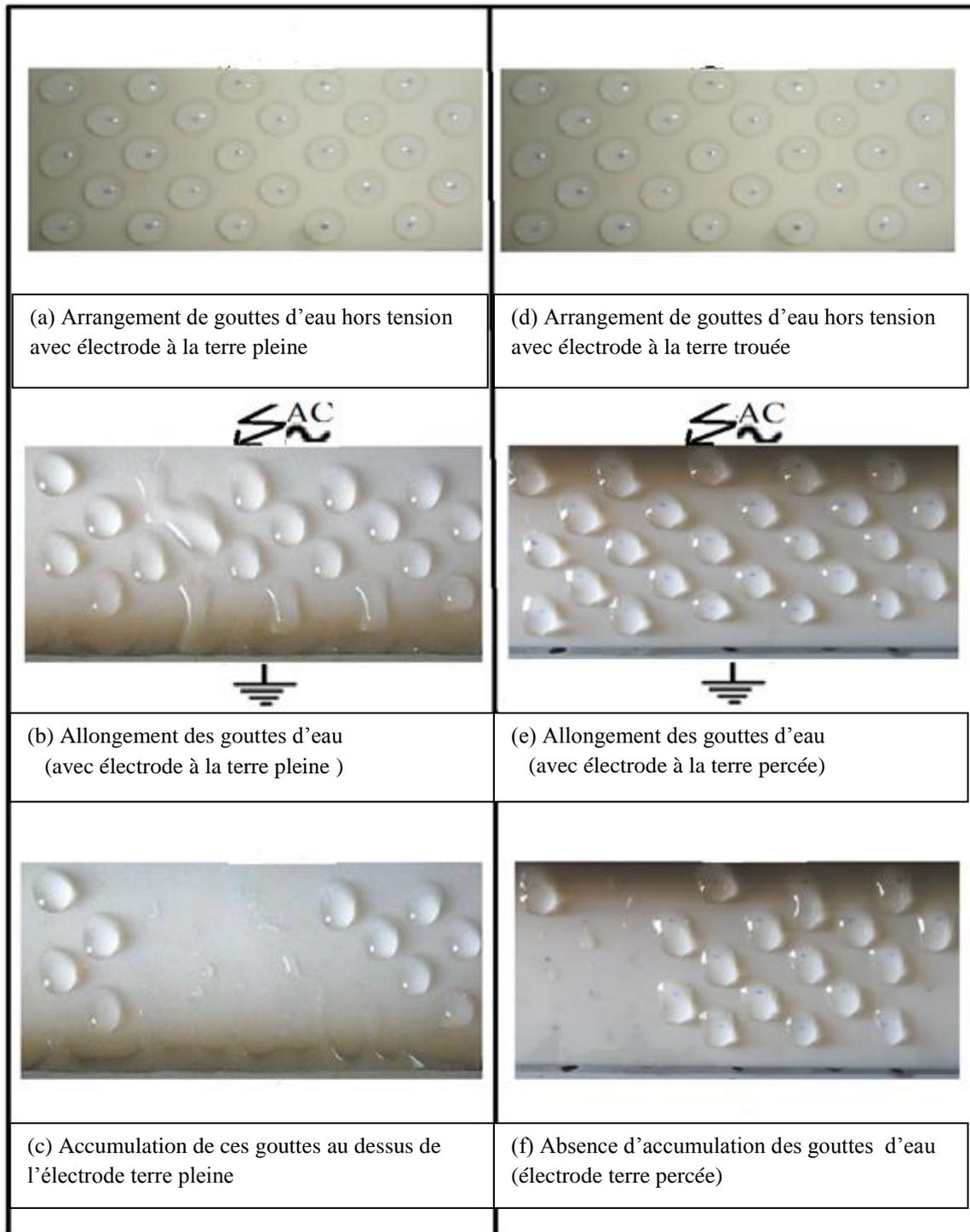


Fig. IV.16 : Surface isolante recouverte de gouttes d'eau avec ou sans accumulation de ces dernières ($V_g = 90 \mu\text{l}$, $\alpha = 24.12^\circ$, $\sigma_v = 180 \mu\text{S/cm}$)

IV.8.4. Accumulation d'eau au dessus de l'électrode terre pour $V_g = 20 \mu\text{l}$

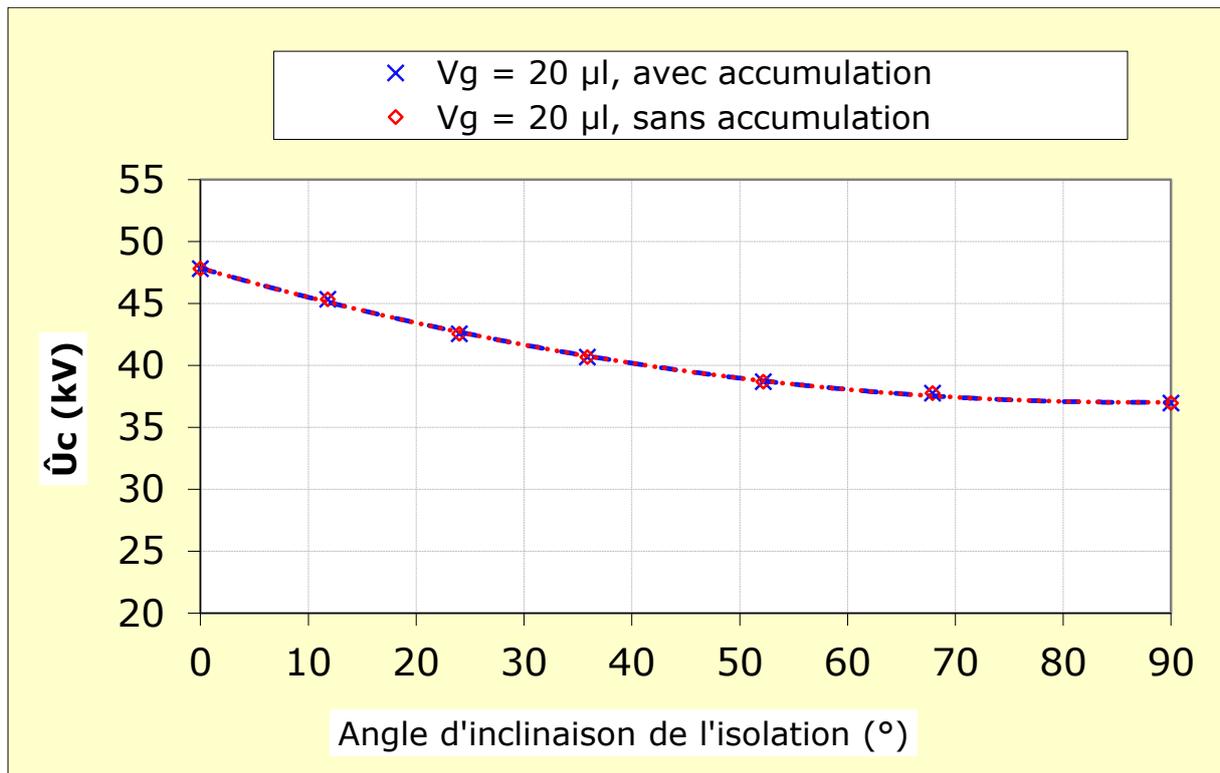


Fig. IV. 17: $\hat{U}_c = f(\alpha)$ d'une surface en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau ($\sigma_v = 180 \mu\text{S/cm}$ et $V_g = 20 \mu\text{l}$)

La figure IV.17 illustre l'allure de la tension de contournement d'une surface isolante hydrophobe, recouverte de gouttes d'eau en fonction de l'angle d'inclinaison α par rapport à l'horizontale. Il en résulte une caractéristique $\hat{U}_c = f(\alpha)$ strictement décroissante, avec ou sans accumulation d'eau au niveau de l'électrode mise à la terre. De plus les deux courbes sont parfaitement confondues du fait que les gouttes d'eau d'un tel volume $V_g = 20 \mu\text{l}$ ne quittent pas leur place. La résultante des deux forces de gravitation et électrique est insuffisante pour faire chuter les gouttes d'eau de tel volume.

Ceci peut être confirmé par la figure IV.18, montrant l'allongement maximal des gouttes d'eau de volume égal à $20 \mu\text{l}$, recouvrant une isolation en silicone inclinée de 90° par rapport à l'horizontale (figure IV.18b), juste avant son contournement où les gouttes d'eau adhèrent encore à la surface. Leur chute intervient après le passage de la décharge, qui entraîne avec elle certaines d'entre elles (figure IV.18d).

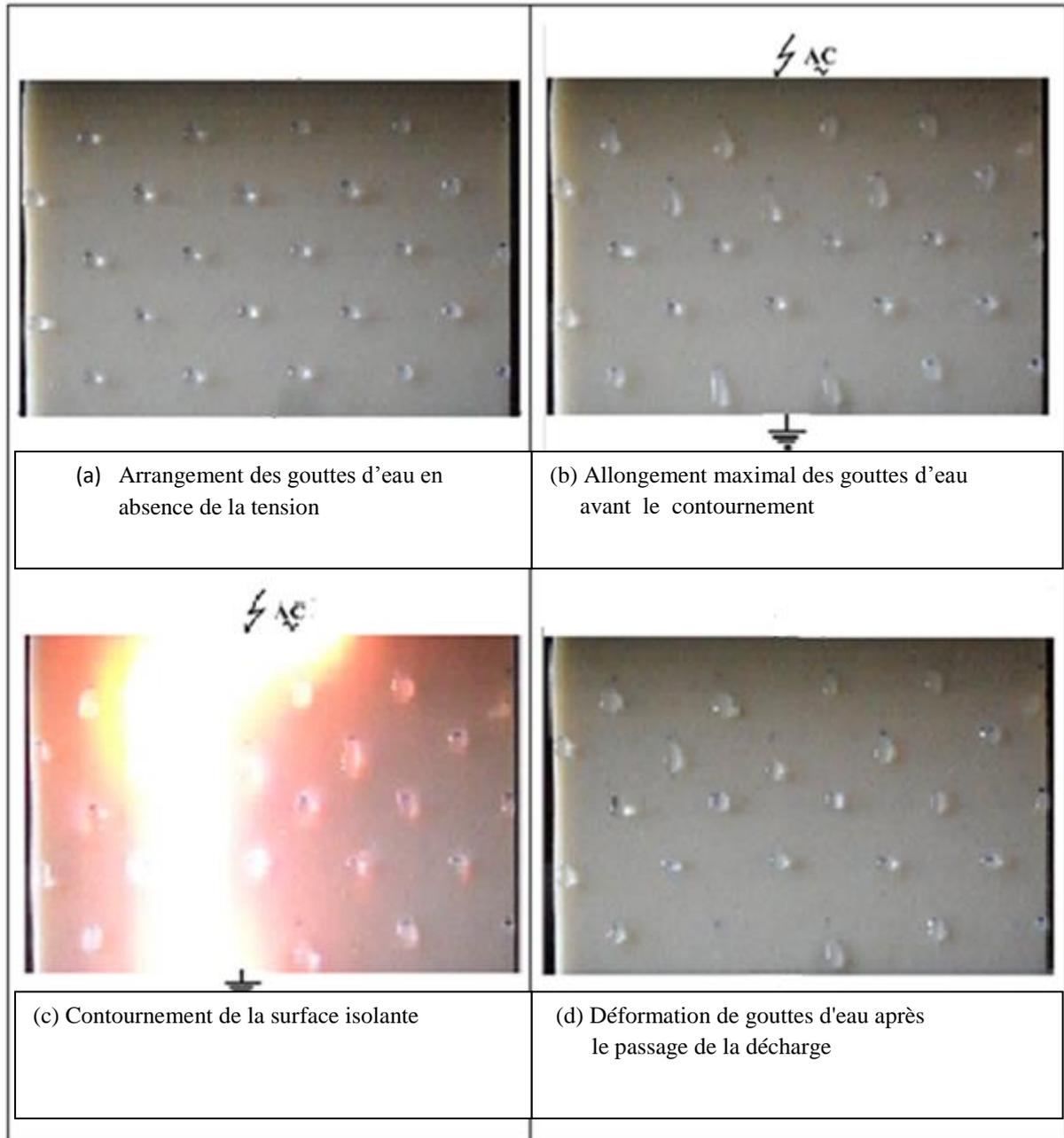


Fig. IV.18: Contournement d'une surface en silicone recouverte de petites gouttelettes ($V_g = 20 \mu\text{l}$, $\alpha = 90^\circ$)

IV.9. Conclusion

Les résultats issus de cette étude, nous ont permis de quantifier expérimentalement la performance électrique d'une surface isolante hydrophobe en silicone à inclinaison variable, et recouverte de gouttes d'eau sous tension alternative, avec ou sans accumulation de gouttes d'eau à conductivité électrique égale à $180 \mu\text{S}/\text{cm}$, ainsi qu'à nombre et volume variables.

Nous avons tiré les conclusions suivantes:

- La rigidité diélectrique la plus élevée est obtenue lorsque l'isolation en silicone est propre (sans gouttes d'eau sur sa surface).
- l'augmentation du nombre de rangées de gouttes d'eau disposées en zigzag le long de sa ligne de fuite, implique la diminution de la tension de contournement de l'isolation en position horizontale, jusqu'à une valeur limite à partir de laquelle la tension devienne minimale et constante, pour un nombre de rangées de l'ordre de 4 à 5. Pour un volume de gouttes d'eau $V_g = 65 \mu\text{l}$, la chute de sa performance par rapport au cas sans gouttes est de l'ordre de 25 %.
- L'accumulation de gouttes d'eau sur sa surface lors de son inclinaison, entraîne une diminution de la tension de contournement, par conséquent le raccourcissement de la ligne de fuite sèche de l'isolation. L'écart maximal de 20 % est obtenu pour $V_g = 90 \mu\text{l}$ et $\alpha = 90^\circ$.
- Le dépôt de gouttes d'eau sur la surface en silicone peut entraîner la perte locale de l'hydrophobicité de celle-ci, après développement de micro-décharges électriques entre celle-ci et leur transition en un arc électrique de contournement de l'isolation. C'est pour cette raison que les échantillons en silicone sont remis dans le dessiccateur juste après tests pour la faire revenir.
- Des valeurs minimales de la tension de contournement sont obtenues pour un volume des gouttes d'eau de $65 \mu\text{l}$, et pour une inclinaison critique $\alpha_{cr} = 35,86^\circ$, quel que soit le degré d'accumulation de gouttes d'eau sur la surface de l'isolation. La chute de performance électrique de l'isolation est d'environ 47 % dans ce cas de figure.
- Pour un volume de $90 \mu\text{l}$, il en résulte l'accroissement de la tension de contournement en fonction de l'augmentation de l'angle d'inclinaison, sa valeur maximale est obtenue lorsque l'angle d'inclinaison est égal à 90° .
- Pour un volume de $20 \mu\text{l}$, il en résulte une diminution de la tension de contournement en fonction de l'augmentation de l'angle d'inclinaison. Dans ce cas de figure, l'eau ne s'accumule pas au bas de la surface de l'isolation du fait l'adhésion des gouttes à leur place d'origine.
- La chute maximale de performance électrique d'une isolation recouverte de 5 rangées de gouttes d'eau en zigzag, est de l'ordre 57 % pour un volume des gouttes d'eau égal à $90 \mu\text{l}$, et pour un angle d'inclinaison nul de l'isolation en silicone.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif principal de notre travail était d'étudier l'influence de l'arrangement et de l'accumulation d'un dépôt de gouttes d'eau sur une isolation en silicone inclinée sur sa performance électrique sous tension alternative. Les résultats essentiels issus de cette investigation peuvent être résumés comme suit:

- La rigidité diélectrique longitudinale optimale d'une isolation en silicone est obtenue sans gouttes d'eau sur sa surface.
- L'augmentation de nombre de rangées de gouttes d'eau déposées en zigzag entre les électrodes engendre la réduction de la performance électrique de l'isolation en silicone jusqu'à un nombre limite de rangées de l'ordre 4 à 5 et à partir duquel elle demeure minimale et constante quel que soit le nombre de rangées ajoutées.
- L'accumulation d'un dépôt de gouttes d'eau sur sa surface côté de l'électrode terre prend effet à partir du volume des gouttes égal à 65 μl et se traduit par une chute maximale de 20 % de la tension de contournement de l'isolation en silicone obtenue dans le cas d'une inclinaison de 90° et pour un volume des gouttes d'eau égale à 90 μl de conductivité électrique inférieure ou égale à 180 $\mu\text{S}/\text{cm}$.
- La tension de contournement de la surface hydrophobe en silicone est plus faible en présence de gouttes d'eau de volume élevé que de gouttes de volume inférieure.
- La performance d'une surface hydrophobe, recouverte de gouttes d'eau de volume de 65 μl , en fonction de l'angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale, présente un minimum pour un angle α égal à 35,86°. Par contre sous l'action de gouttes de volume égal à 20 μl , sa faible valeur est obtenue pour un angle α de l'ordre de 90°. Contrairement à l'influence des volumes cités avant, pour un volume de 90 μl , la valeur la plus faible de la tension de contournement est mesurée pour l'isolation en silicone en position horizontale.

Références

Bibliographiques

- [1] Wacker, “silicones pour applications haute et moyenne tension” www.wacker.com.
- [2] J. F. Hall, “History and bibliography of polymeric insulators for outdoor applications,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 8, no. 1, pp. 376–385, 1993.
- [3] Y. Zhu, M. Otsubo, C. Honda, and S. Tanaka, “Loss and recovery in hydrophobicity of silicone rubber exposed to corona discharge,” *Polym. Degrad. Stab.* vol. 91, no. 7, pp. 1448–1454, juillet 2006.
- [4] G.G. Karady, H. M. Schneider et F.A.M. Rizk, “Review of CIGRE and IEEE Research into Pollution Performance of Nonceramic Insulators: Field aging Effects and Laboratory Test Techniques”, CIGRE 33-103, Août/Septembre 1994.
- [5] De La O, R. S. Gogur et J. Chang, “AC Clean Fog on Non-Ceramic Insulating Materials and a Comparison with Porcelain”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 9, No. 4, pp. 2000-2008, October 1994.
- [6] S. Gubanski et R. Hartings, “Swedish Research on The Application of Composite Insulators in Outdoor Insulation”, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol.11, No.5, Septembre /Octobre 1995.
- [7] A.de la O,R,S. Gorur and J.T.Burnham “Laboratory Wet Test on Artificially Contaminated Nonceramic and Ceramic Insulators”,29.1997
- [8] M.A.R.M. Fernando and S. M. Gubanski, “Leakage Current Patterns on Contaminated Polymeric Surfaces”, *IEEE Transaction on Dielectric and Electrical Insulation* Vol.6 No.5, October 1999.
- [9] Y. Zhu, S. Yamashita, N. Anami, M. Otsulbo, C. Honda, and Y. Hashimoto, “Corona Discharge Phenomenon and Behavior of Water Droplets on the Surface of Polymer in the AC Electric Field”, the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, June 1-5 2003 Nagoya.
- [10] K. Karakoulidis, M. G. Danikas, P. Rakitzis, “deterioration phenomena on polymeric insulating surfaces due to water droplets”, *Journal of electrical engineering*, vol. 56, no. 7-8, 2005.
- [11] Basanta Kumar Gautam, Yusuke Mizuno, Go Matsubayashi, Kenji Sakanishi, Toshiyuki Kawaguchi and Ryosuke Matsuoka’Effect of Wetting Conditions on The Contamination Flashover Voltages of Polymer Insulators’2006 IEEE.
- [12] Y. Zhu, K. Haji,M. O. Chikahisa Honda and N. Hayashi, “Electrohydrodynamic behaviour of water droplet on an electrically stressed hydrophobic surface”, (<http://iopscience.iop.org/0022-3727/39/9/038>) Published 20 April 2006.
- [13] Y. Zhu, K.Haji, H. Yamamoto, T. Miyake, M. Otsubo, C. Honda, K. Kaikake and K.

- Sugamoto, "A Study on Hydrophobicity of Silicone Rubber Exposed to Corona Discharge", 1-4244-0189-5/06, 2006 IEEE.
- [14] Michael G. Danikas, "Water Droplets on Polymeric Surfaces under the Influence of Uniform Electric Fields: An Investigation with Horizontal and Inclined Test Electrode Arrangements d'essai", IEEE 2006.
- [15] W. Bretuj, J. Fleszynski, A. Tyman, K. Wierzchowski "Effect of silicone rubber insulators' profiles on their ageing performance in rain conditions" 27-31, 2007.
- [16] K. Haji, Y. Zhu, M. Otsubo, T. Sakoda, "Studies on erosion of silicone rubber exposed to partial arc discharges", Polymer Degradation and Stability, pp 2214–2221, 2008.
- [17] B. X. Dul, Yong Liul, Y. S. Xia, B. X. Yangl and B. C. Liu2, "Dynamic Behavior of Water Droplet for Evaluating Outdoor Insulator", the 9th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials July 19-23, 2009, Harbin, China.
- [18] V. Rajini and K. Udayakumar "Degradation of Silicone Rubber under AC or DC Voltages in Radiation Environment" 2009 IEEE.
- [19] S. Thong-Om, W. Payakcho, J. Grasaesom, A. Oonsivilai and B. Marungsri, "Comparison Ageing Deterioration of Silicone Rubber Outdoor Polymer Insulators in Artificial Accelerated Salt Fog Ageing Test", World Academy of Science, Engineering and Technology 60, 2011.
- [20] R. Ydjedd "Performance d'une surface en silicone recouverte des gouttes d'eau sous tension alternative" 2012, 2013.
- [21] Matériaux diélectriques Chapitre 7, Amar Tilmatine.
- [22] M. Nemamcha, "cours sur le claquage des isolants haute tensions" .2001 Haute tension – Définition des termes et des concepts.
- [23] Haute tension – Définition des termes et des concepts.
- [24] F. Amir et KH. Namaoui: "étude du comportement d'un isolateur pollué soumis à une tension alternative" PFE, UAM Béjaïa, juin 2004.
- [25] O. Lamarene, "influence d'une barrière isolante sur la tension de claquage et sur le champ électrique", PFE, UAM Béjaïa septembre 2005.
- [26] P. Choquet, "Les traitements plasmas pour les aciers laminés à froid : état de la technique, objectifs pour le futur", Échange and Coordination Recherche-Industrie-09/2003-Numéro 10.
- [27] T. Ebke, A. Khaddour, D. Peier, "Degradation of Silicone Gel by partial.
- [28] A. Chabloz, "Technologie des matériaux", 1986.
- [29] Simuila, L. dascalescu et R. Tabazeon, "breakdown on ionized air gaps in the presence

- of spherical conductive particle” session 2143. 9th ISH, Graz 1995, pp. 1-4. Discharges Due to different Defects”, Dielectric Materials Measurements and Applications, n°473, pp 202-207, 2000.
- [30] www.plastiservice.com Toile imprégnée de résine phénolique (Hgw) Conforme aux normes : NEMA LI1 C-DIN 7735 Hgw 2082.
- [31] L. Carette, J.M.Pouchol “Les Silicones, Matières Thermodurcissables: Monographie”, Les Techniques de l’ingénieur, Plastiques et composites, A3475, 2005.
- [32] M. Rafik, A. Mas, A. Elharfi, F. Schue, “ Modification de membrane PVDF par plasma d’acide acrylique et de nonafluorobutyléthylène" EuropeanPolymer Journal 36 (2000) 1911-1919.
- [33] Descriptif Technique, “isolateurs composites au silicone silcosil”, www.pfisterer.com.
- [34] Philippe Plateau, “Glass insulators in polluted environment: design, test, experiences and benchmarking with other materials”, Javier GARCIA Technical Manager SGD La Granja.
- [35] Nguyen Duc Hoang, “Etude des propriétés électriques des élastomères silicones utilisés pour l’isolation électrique”, Thèse Doctorale, UJ Fourier Grenoble 1, 28/11/ 2005.
- [36] C. Menguy. Mesures des caractéristiques des matériaux isolants solides D 2 310. Les Techniques de l’ingénieur.
- [37] Mlle S. Samia, «contribution a l’étude de l’influence de la pollution discontinue sur le comportement des isolateurs: expérimentation et simulation », thèse de magister en Génie Électrique, Faculté de technologie, Université Ferhat Abbas- Sétif.
- [38] M. Soufi, M. Zemirline, “Conception d’un modèle dynamique de contournement d’un isolateur pollué sous tension alternative 50 Hz”, PFE, Génie Électrique, ENP 2004.
- [39] F. Aouabed, "Contribution à l'étude d'un circuit équivalent des isolateurs synthétiques sous pollution en utilisant l'EMTP", Mémoire magistère en électrotechnique, Université Ferhat Abbas Sétif.
- [40] Leroy et Cie, «Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions», Collection de la direction des études et recherches d'électricité de France, Paris 1984.
- [41] R. Coello, B. Aladenize : "Les diélectriques", livre, Edition Hermès, Paris.1986.
- [42] K. Ouerdane, Les effets de la pollution sur les ouvrages électriques à 30kV en régions littorales, alger: projet de fin d’études, département d’électrotechnique, université des sciences et technologies houari boumediene, bab Ezzouar, juin 1998.
- [43] T. Aissa, M. Riadh et K. Hamza « Étude du phénomène de contournement des isolateurs pollues sous tension continue »La thèse d’ingénieur d’état En Génie Electrique

- Universite de M'sila 2009/2010.
- [44] R. Bouzeroura « Étude du développement d'arcs électriques parallèles sur une surface isolante non uniformément polluée sous tension continue », Mémoire de magister, promotion 2009, Université de Bejaia.
- [45] CEI 1991, " Essais sous pollution artificielle des isolateurs pour haute tension destinés à courant alternatif", norme internationale CEI 507. Deuxième édition, 1991.
- [46] N. Khairoune E and A. D. Zellote, "Essais sur isolateurs pollués et modélisation," école nationale polytechnique d'Alger Mémoire du projet de fin d'étude, 2008.
- [47] X. Ducouvert, " lignes aériennes; matériels," technique de l'ingénieur, p. D4423, 2009.
- [48] M. Ben alia, "modélisation d'un isolateur naturellement pollué sous tension impulsionnelle utilisant des circuits électriques équivalents" laboratoire de haute tension, école nationale polytechnique d'Alger mémoire de magister en génie électrique, 2008.
- [49] G. G. Karraday, "Electric transmission line flashover prediction system," Arizona State University, Arrizona 2, Final Project Report, May 2001.
- [50] F. V. Topalis, I. A. Stathopoulos, "Barrier effect on electrical breakdown air gaps: a theoretical approach", International Symposium on High Voltage Engineering (9th ISH), session 2147, pp.1-4, Graz 1995.
- [51] A. J. Kaluzny, U. Kluzna, "Electric strength of high voltage insulating gap in polluted air", Session 2155, 9th ISH, pp.1-3, Graz 1995.
- [52] M. Slama "Contribution a l'étude de l'influence de la non-uniformite de la pollution basee sur la methode de la DDSE pour le dimensionnement des isolateurs des lignes très haut tension à courant alternatif" Oran: thèse de Magister, 29 juin 2002.
- [53] S. Vitet, M. Louis, A. Schei, L. Tenstom, and J. Lundquist, "Thermal Behaviour of Zno Surge Arresters in polluted conditions," cigre rapport scientifique, 1992.
- [54] CEI 1991, " Essais sous pollution artificielle des isolateurs pour haute tension destinés à courant alternatif", norme internationale CEI 507. Deuxième édition, 1991.
- [55] K. Chrzan, P. Zbigniew, and S. Grzybowski, "Pollution performance of 110 kV metal oxide arresters," *IEEE*, vol. 12, no. 02, pp. 728-733, 1997.
- [56] F. Maciela, "Parafoudres à moyenne tension HT et à haute tension HTB," Technique de l'ingénieur, vol. 2, pp. D4755-1-D4755-11, 2009.
- [57] 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.

Références Bibliographiques

- [58] A. Mekhaldi, H. Boudjelthia, "Contribution à l'étude de la pollution des isolateurs de haute tension dans la région électrique de Annaba", PFE, Génie Electrique, ENP 1984.
- [59] A. Cimador, S. Vitet, "La Pollution des Isolateurs", EDF-Epure, No. 27, Juillet 1990.
- [60] CEI 60270-2, "Partial discharge measurement", 2000.
- [61] Froehlich, "theory of dielectrics", oxford Univ. press, 1949.
- [62] R. Boudissa, "Performance des écrans sous tensions alternative et continue", CNHT 2009, Sidi Bel Abbés Algérie.
- [63] P. S. Ravindra and T. V. P. Singh, "Influence of pollution on the performance of metal oxide surge arresters," in Conference on Electrical & Computer Engineering, Canadian, 2002.
- [64] W. Heise, G.F. Luxa, G.Revrery , M. P. Verma, " Estimation de la méthode d'essais sous pollution artificielle par couche solide " CIGRE , rapport 33-09 1972.

Résumé : L'objectif principal dans ce mémoire est basé sur l'évaluation de la performance électrique d'une isolation en silicone hydrophobe mise sous tension alternative. Ce travail consiste justement à la contribution à l'optimisation de la rigidité diélectrique longitudinale de cette isolation lorsque d'un dépôt de gouttes d'eau sur sa surface, par la variation du volume avec une conductivité volumique fixe, l'accumulation et sans accumulation de la quantité d'eau sur la surface du côté bas de l'isolation située au voisinage de l'électrode mise à la terre , ainsi que l'angle d'inclinaison de cette isolation par rapport à l'horizontale. Les résultats obtenus sur les paramètres d'influence suscités peuvent être résumés comme suit:

La rigidité diélectrique longitudinale optimale d'une isolation en silicone est obtenue sans gouttes d'eau sur sa surface.

La rigidité diélectrique d'une isolation en silicone recouverte de gouttes d'eau décroît rapidement avec l'élévation de nombre de rangées de celle-ci pour atteindre une valeur minimale et constante à partir d'un certain nombre de rangées de gouttes d'eau.

La rigidité diélectrique d'une isolation en silicone hydrophobe diminue plus lorsqu'il ya accumulation d'un dépôt de gouttes d'eau sur sa surface.

Les gouttes d'eau de volume 65 μl appliquées sur une surface isolante en silicone hydrophobe sur un plan inclinée de α variable donnent une allure décroissante de la tension de contournement jusqu'à un angle critique, au delà duquel l'isolation reprend pratiquement sa performance pour un angle égal à 90 °. Mais par contre pour un volume de 20 μl , la plus faible valeur de la tension de contournement est obtenue pour un angle d'inclinaison égal à 90 °, puisque les gouttes d'eau ne quittent pas la surface et leur allongement est optimal pour cet ongle. Contrairement à l'influence des volumes cités avant, pour un volume de 90 μl , la valeur maximale de la tension de contournement est mesurée avec un l'angle 90°, celle-ci est pratiquement très proche de celle obtenue sans gouttes d'eau sur sa surface.