

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A.MIRA-BEJAIA



Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique
Laboratoire de Génie Electrique

THÈSE

Présentée par
Samia SLIMANI
Pour l'obtention du grade de

DOCTEUR EN SCIENCES

Filière : Génie Electrique

Option : Haute Tension

Thème

Performance électrique d'une isolation en silicone à angle d'inclinaison variable sous pluie et tension alternative

Soutenue le 12 Juin 2024

devant le Jury composé de :

Nom et Prénom	Grade		
Mr BOUZIDI Athmane	Professeur	Univ. de Bejaia	Président
Mr MEDJDOUB Abdellah	Professeur	Univ. de Bejaia	Rapporteur
Mr KORNHUBER Stefan	Professeur	Univ. de Zittau, Allemagne	Co- Rapporteur
Mr MOUDOUD Mustapha	Professeur	Univ. de Tizi-Ouzou	Examineur
Mr HEDIR Abdallah	MCA	Univ. de Tizi-Ouzou	Examineur

2023 / 2024

Remerciement

Je ne saurais suffisamment exprimer ma profonde gratitude à mon ancien et défunt directeur de thèse, le professeur **Rabah Boudissa**. Il a été l'inspirateur généreux, le soutien assidu et le catalyseur tout au long de ce parcours de recherche que j'ai eu l'honneur d'effectuer sous sa précieuse direction, et qui est resté malheureusement inachevé. J'aurais tant aimé qu'il soit là aujourd'hui pour partager ce moment d'aboutissement ; qu'il reçoive, là où il se trouve, mes plus profonds sentiments de reconnaissance.

Mes plus chaleureux remerciements vont également au professeur **Abdellah Medjdoub** qui a bien voulu reprendre le témoin et me permettre de poursuivre le chemin et de le mener jusqu'au bout, par sa précieuse contribution et sa grande disponibilité. J'ai eu la chance, dans la phase "allemande" de mon parcours de recherche, d'être accueillie et dérivée par la forte sympathique équipe du laboratoire de Haute tension de l'université de Zittau, à sa tête le professeur **Stefan Kornhuber**, le co-directeur de thèse à qui je tiens à rendre un hommage particulier. Tous n'ont ménagé aucun effort pour mettre à ma disposition les conditions morales et matériels d'un bon séjour académique.

Séjour riche également grâce à l'appui et aux orientations de **Dr. Lucie Koutkova**, la directrice des études et des affaires d'étudiants internationaux, directrice du bureau international à l'université de Zittau.

Que Les membres du jury trouvent également ici, l'expression de mes remerciements les plus appuyés pour l'intérêt qu'ils ont bien voulu accorder à la somme de mes efforts, ainsi que pour les remarques qu'ils pourraient apporter pour l'enrichir à l'occasion de la présentation.

En ces moments importants de mon parcours universitaire et de ma vie, ma gratitude va par ailleurs à ma famille, qui ne m'a jamais fait manquer de soutien et d'écoute.

Mes remerciements vont à mon mari Sidali, pour sa patience et son appui, ainsi qu'à toute ma belle-famille.

En faisant aboutir ces plusieurs années de recherches et en mettant entre vos mains la thèse qui en est le produit, je réalise le rêve de mon défunt père, parti malheureusement trop tôt pour que je puisse goûter au bonheur de partager avec lui l'émotion de ces moments particuliers de mon existence. Mes pensées les plus émues vont vers lui aujourd'hui, ainsi que ma gratitude éternelle. Je ne peux qu'être tout aussi reconnaissante également envers ma tendre mère pour son engagement inspirant auprès de moi toutes ces longues années.

Résumé :

Le présent travail porte sur l'étude de l'effet des différentes conditions environnementales telles que la pluie naturelle et le brouillard sur la performance électrique d'une isolation en silicone hydrophobe. L'investigation est portée sur la caractérisation de la quantité d'eau de pluie récoltée et l'évolution du volume de gouttes d'eau d'impact sur une surface isolante en silicone hydrophobe en fonction de son angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale lorsqu'elle est hors tension. Ensuite, la reproduction de ce phénomène naturel a été réalisée en laboratoire, en déterminant le volume et la constellation des gouttes d'eau de pluie obtenues sur site afin d'évaluer l'effet du volume des gouttes de pluie sur l'humidification de l'isolation inclinée, et donc sur sa performance électrique sous un niveau variable de tension alternative. De plus, l'effet de l'angle d'inclinaison de cette isolation par rapport à l'horizontale sur sa performance au cours du vieillissement sous brouillard salin et haute tension alternative a été déterminé, en quantifiant le courant de fuite circulant sur sa surface durant son exposition au brouillard salin, en examinant l'état de sa surface et en déterminant son angle de contact statique. Les résultats des mesures sur site et en laboratoire indiquent une diminution de la taille de la surface humide et de la longueur de la ligne de fuite de l'isolation mouillée avec l'augmentation de son angle d'inclinaison. Ces résultats mettent en évidence deux intervalles d'angles d'inclinaison critiques pour l'isolation, défavorables et favorables pour le dimensionnement des ailettes des isolateurs correspondant respectivement à leur performance électrique minimale et maximale. Les résultats émanant des tests de vieillissement de l'isolation montrent une excellente résistance au vieillissement et une conservation efficace de ses propriétés hydrophobes sur une longue période d'exposition au brouillard avec des angles d'inclinaisons élevés. Ce qui signifie que la performance de l'isolation s'améliore à mesure que son angle d'inclinaison augmente.

Mots clés – Isolation en silicone, Pluie, Angle d'inclinaison, Volume de gouttes d'eau, Microdécharge, Tension alternative, Brouillard salin, Courant de fuite, Rugosité, Angle de contact statique, Contournement.

Abstract:

This work focuses on the study of the different environmental conditions effect such as rain and fog on the electrical performance of a hydrophobic silicone insulation. The investigation is focused on characterizing the amount of rainwater collected and the evolution of the water droplets volume on a hydrophobic silicone insulating surface depending on its angle of inclination with respect to the horizontal when it is de-energized out of voltage. Then, the reproduction of this natural phenomenon was carried out in the laboratory, by determining the volume and constellation of rainwater droplets obtained on site in order to evaluate the effect of the volume of raindrops on the humidification of the inclined insulation, and therefore on its electrical performance under a variable level of alternating tension. In addition, the effect of the angle of inclination of this insulation relative to the horizontal on its performance during aging under saline fog and high alternating tension was determined, by quantifying the leakage current flowing on its surface during its exposure to saline fog, by examining the state of its surface and by determining its static contact angle. The measurements result on site and in the laboratory indicate a decrease in the size of the wet surface and the length of the leakage line of the wet insulation with the increase of its angle of inclination. These results highlight two critical intervals of inclination angles for the insulation, unfavorable and favorable for the sizing of the fins of the insulators corresponding respectively to their minimum and maximum electrical performance. The results from the aging tests of the insulation show excellent resistance to aging and effective conservation of its hydrophobic properties over a long period of exposure to fog with high inclination angles. This means that the performance of the insulation improves as its angle of inclination increases.

Keywords – Silicone insulation, Rain, Inclination angle, water droplets volume, Microdischarge, AC voltage, Fog, Leakage current, Roughness, Static contact angle, Flashover.

ملخص:

هذا العمل يتعلق بدراسة تأثير الظروف البيئية المختلفة مثل الأمطار الطبيعية والضباب على الأداء الكهربائي لعازل من السيليكون المائل. البحث يركز على توصيف كمية الماء المتجمع من الأمطار وتطور حجم قطرات الماء المتأثرة على سطح العازل المائل من السيليكون بناءً على زاويتها المائلة بالنسبة للأفق عندما تكون خارج التوتر. ثم تم تكرار هذه الظاهرة الطبيعية في المختبر، بتحديد حجم وتجمع قطرات الماء المتجمعة من الأمطار على الموقع لتقييم تأثير حجم قطرات المطر على ترطيب العازل المائل، وبالتالي على أدائه الكهربائي تحت مستوى متغير من التوتر المتناوب. بالإضافة إلى ذلك، تم تحديد تأثير زاوية الميل لهذا العازل بالنسبة للأفق على أدائه خلال الشبخوخة تحت الضباب المالح والتوتر المتناوب العالي، بتحديد التيار التسرب الذي يتدفق على سطحه أثناء تعرضه للضباب المالح، وفحص حالة سطحه وتحديد زاويته الاتصال الثابتة. تشير نتائج القياسات في الموقع والمختبر إلى انخفاض حجم السطح الرطب وطول خط التسرب للعازل المائل مع زيادة زاويته المائلة. هذه النتائج تسلط الضوء على فترتين حرجيتين من زوايا الميل للعازل، غير مواتية ومواتية لتصميم أجنحة العوازل المتوافقة على التوالي مع أدائها الكهربائي الأدنى والأقصى. تظهر النتائج الناتجة عن اختبارات شبخوخة العازل مقاومة ممتازة للشبخوخة والحفاظ الفعال على خصائصه المقاومة لماء على مدى فترة طويلة من التعرض للضباب مع زوايا الميل العالية.

كلمات مفتاحية: : عازل السيليكون -المطر-حجم قطرات الماء-الجهد المتناوب-الضباب المالح-الشخونة-زاوية الميل-الوميض .

Liste des productions scientifiques

Publication internationale

- S. Slimani, A. Medjdoub, S. Kornhuber." Humidification Degree Effect under Rain of Inclined Silicone Insulation on its Electric Performance " Journal of Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science journal, Vol 68(1), pp. 94–106, 2024.

Communications nationales et internationales

- S. Slimani, S. Kornhuber, A. Medjdoub, A. Bouzidi « Impact de l'angle d'inclinaison d'une isolation en silicone sur sa résistance au vieillissement en présence de brouillard salin et d'une tension alternative » 12^{ème} Conférence de la Société Française d'Electrotechnique (SFE). Cherbourg en Cotentin (France). 2023
- S. Slimani, R. Boudissa, S. Kornhuber, K.D. Haim « Einfluss der Neigung einer Silikonisolation auf den Befeuchtungsgrad ihrer Kriechstrecke bei Wechselspannung » 2. Fachtagung Polymere Isolierstoffe in der Elektrotechnik. Zittau (Deutschland), 2021
- S. Slimani, R. Boudissa, S. Kornhuber, K.D. Haim « Effect of natural rain on the electrical performance of inclined silicone insulation putting out of voltage » The Electrical Engineering International Conference (EEIC'2019), University of Bejaia, Algeria 2019
- T. Belhoul, N. Bouatia, S. Slimani, F. Bouchelga, S. Messad, R. Boudissa, S. Kornhuber, K.D. Haim « Effet d'insertion des barrières fortement contaminées sur la tenue d'un intervalle d'air à champ électrique non uniforme et son assimilation à celui d'un plan - plan sous tension alternative » 11^{ème} Conférence nationale sur la haute tension (CNHT19). Oran/Algérie 2019
- S. Slimani, N. Bouatia, T. Belhoul, R. Boudissa, S. Kornhuber, K.D. Haim « Effet de l'angle d'inclinaison sur le nombre et le volume des gouttes d'eau résiduelle recouvrant la surface d'une isolation mise hors ou sous tension alternative » 11^{ème} Conférence de la Société Française d'Electrotechnique (SFE). Grenoble (France), 2018

- N. Bouatia, T. Belhoul, S. Slimani, R. Boudissa, S. Kornhuber, K.D. Haim « Equivalence de performance électrique entre le système pointe -plan avec barrière polluée et le système plan – plan sous tension continue négative » 11^{ème} Conférence de la Société Française d'Electrotechnique (SFE). Grenoble (France), 2018
- T. Belhoul, N. Bouatia, S. Slimani, R. Boudissa, S. Kornhuber, K.D. Haim « Comparaison de la performance électrique d'un système plan - plan et pointe - pointe avec barrières sous conditions de pollution très sévères et AC » 11^{ème} Conférence de la Société Française d'Electrotechnique (SFE). Grenoble (France), 2018
- S. Slimani, N. Bouatia, R. Boudissa, S. Kornhuber, K.D. Haim « Evolution du volume des gouttes d'eau de pluie naturelle sur une isolation en silicone inclinée et mise hors tension » 2ème Conférence internationale en sciences et technologies électriques au Maghreb (CISTEM'2018). Alger (Algérie), 2018
- N. Bouatia, S. Slimani, R. Boudissa, S. Kornhuber, K.D. Haim « Equivalence de performance électrique entre le système pointe - pointe avec barrière polluée et le système plan - plan sous tension continue négative » 2ème Conférence internationale en sciences et technologies électriques au Maghreb (CISTEM'2018). Alger (Algérie), 2018

Table des matières

Table des matières	2
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : ETAT DE L'ART SUR LES ISOLATIONS ELECTRIQUES POLYMERES ET LEUR VIEILLISSEMENT	4
I. 1 Introduction	4
I. 2 Comportement de la gouttelette sous champs électrique	4
I. 2. 1 Désintégration de la goutte d'eau	4
I. 2. 2 Coalescence des gouttelettes d'eau	5
I. 2. 3 La goutte sous un champ alternatif	7
I. 2. 4 La goutte sous un champ continu	11
I. 3 Performance électrique des surfaces isolantes hydrophobes recouvertes de gouttes d'eau	15
I. 4 Vieillissement des surfaces isolantes hydrophobes recouvertes de gouttes d'eau	21
I. 5 Conclusion	28
CHAPITRE II : ISOLATEURS POLYMERIQUES ET LEUR VIEILLISSEMENT	29
II. 1 Introduction	29
II. 2 Les isolateurs polymériques	29
II. 2. 1 Développement à travers le temps	29
II. 2. 2 Définition	30
II. 2. 3 Structure des isolateurs composites	30
II. 2. 3. 1 Le noyau	31
II. 2. 3. 2 Le revêtement	31
II. 2. 3. 3 Les armatures métalliques	31
II. 2. 4 Avantages et inconvénients des isolateurs composites	31
II. 2. 4. 1 Avantages	32
II. 2. 4. 2 Inconvénients	32
II. 3 Caractéristiques des surfaces isolantes polymères	33
II. 3. 1 Energie de surface et angle de contact des gouttes d'eau	33
II. 3. 2 hydrophobicités des isolateurs composites	34
II. 3. 2. 1 Classification de l'hydrophobicité des surfaces	34
II. 3. 2. 2 Perte et récupération de l'hydrophobicité des surfaces polymères	35
II. 3. 2. 2. 1 Perte de l'hydrophobicité	36
II. 3. 2. 2. 2 Récupération de l'hydrophobicité	36
II. 3. 3 Rigidité diélectrique	36
II. 3. 3. 1 Rigidité diélectrique transversale	36
II. 3. 3. 2 Rigidité diélectrique longitudinale	36

II. 3. 4 Résistance d'isolement	37
II. 3. 4. 1 Résistance transversale ou volumique (R_v)	37
II. 3. 4. 2 Résistance superficielle (R_s)	37
II. 3. 4. 3 Résistance d'isolement (R_i)	37
II. 3. 5 Tension de contournement	37
II. 4 Pollution	37
II. 4. 1 Sources et nature de pollution	38
II. 4. 1. 1 Pollution naturelle	38
II. 4. 1. 1. 1 Pollution marine	38
II. 4. 1. 1. 2 Pollution désertique	38
II. 4. 1. 2 Pollution industrielle	38
II. 4. 1. 3 Pollution mixte	38
II. 4. 2 Pollution des isolateurs composites	38
II. 4. 2. 1 Formation et répartition des couches polluantes sur les isolateurs	39
II. 4. 2. 2 Comportement des surfaces isolantes polymères sous pollution	39
II. 4. 3 Classification des sites pollués	40
II. 4. 4 Facteurs climatiques Influençant la pollution des isolations	41
II. 4. 5 Conséquences de la pollution	41
II. 5 Vieillissement des isolations polymères	42
II. 5. 1 Mécanisme de vieillissement des isolateurs composites	42
II. 5. 1. 1 Vieillissement chimique	43
II. 5. 1. 2 Vieillissement Biologique	43
II. 5. 1. 3 Vieillissement électrique	43
II. 5. 1. 3. 1 Phase de vieillissement à court terme	45
II. 5. 1. 3. 2 Phase transitoire	45
II. 5. 1. 3. 3 Phase tardive du vieillissement	45
II. 5. 1. 4 Vieillissement mécanique	45
II. 5. 3 Méthodes de vieillissement des isolateurs composites	45
II. 5. 3. 1 Vieillissement naturel	46
II. 5. 3. 2 Vieillissement artificiel.....	46
II. 5. 3. 2. 1 Test de résistance à l'acidité	47
II. 5. 3. 2. 2 Test de l'hydrolyse.....	47
II. 5. 3. 2. 3 Vieillissement aux rayons ultraviolets	47
II. 5. 3. 2. 4 Test de résistance à l'ozone	47
II. 5. 3. 2. 5 Vieillissement thermique	48
II. 5. 3. 2. 6 Vieillissement en chambres climatique a contraintes variables.....	48
CHAPITRE III : DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX ET TECHNIQUES DE MESURE	49

III.1 Introduction	49
III. 2 Isolation sous pluie	49
III. 2. 1 Dispositifs expérimentaux sur site et au laboratoire et techniques de mesure	49
III. 2. 2 Isolation sous brouillard salin	56
III. 2. 2. 1 Préparation des échantillons.....	56
III.2. 2. 2 Mesure des propriétés diélectriques et mécaniques de l'isolation	57
a) Propriétés diélectriques	57
b) Propriétés mécaniques	59
III.2. 2. 3 Chambre de brouillard.....	63
III. 2. 2. 4 Mesure de courant de fuite	65
III. 2. 2. 5 Mesure de l'hydrophobie	66
III. 2. 2. 5. 1 Le système optique de mesure d'angle de contact et d'analyse de contour.....	66
III. 2. 2. 5. 2 Comparaison entre la méthode des volumes et de l'angle incliné pour la mesure de l'angle de contact par goniomètre	68
III. 2. 2. 5. 3 Méthode des volumes	68
III. 2. 2. 5. 4 Méthode de plan incliné	69
III. 2. 2. 6 Mesure de la rugosité	71
III. 3 Conclusion	73
CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION	74
IV. 1 Introduction	74
IV. 2 Degré d'humidification sous pluie naturelle d'une isolation à angle d'inclinaison variable	74
IV. 3 Effet du taux d'humidification d'une isolation inclinée sur ses performances électriques en laboratoire	83
IV. 4 Impact de l'angle d'inclinaison d'une isolation en silicone sur sa résistance au vieillessement sous brouillard salin	91
IV. 4. 1 Constellation des gouttes d'eau sur les surfaces isolantes hydrophobes et leur érosion	92
IV. 4. 2 Hydrophobie de l'isolation après vieillissement	93
IV. 4. 3 Rugosité des surfaces isolantes après vieillissement	99
IV. 4. 4 Courant de fuite circulant sur les surfaces isolantes	102
IV. 5 Conclusion	110
CONCLUSION GENERALE	113
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	115

Liste des figures

Fig. I.1 : Mécanisme de coalescence de deux gouttelettes sous un champ électrique : (a) polarisation des gouttelettes ; (b) attraction entre les hémisphères portant des charges positives et négatives ; (c) expulsion du film d'air et création d'un pont capillaire ; (d) fusion complète en une gouttelette polarisée.....	6
Fig. I. 2 : Dispositif expérimental.....	10
Fig. I. 3 : Phénomènes de décharges pendant la chute d'une goutte d'eau.....	10
Fig. I. 4 : schéma électrique du dispositif expérimental.....	11
Fig. I. 5 : Formation d'un canal d'eau sur : (a) PTFE, et (b) SR, lorsque la tension négative (à gauche) et positive (à droite) sont appliquées aux électrodes.....	12
Fig.I.6 : Comparaison de la déformation d'une gouttelette individuelle sous AC et DC.....	12
Fig. I. 7 : Dispositif expérimental.....	13
Fig. I. 8 : Abaissement temporel de l'hydrophobicité.....	14
Fig. I. 9 : Arrangement des gouttes d'eau sur une surface polymère.....	16
Fig. I. 10 : Schéma du dispositif expérimental.....	17
Fig. I. 11 : Isolateurs testés.....	19
Fig. I. 12 : Isolateurs testés sous pluie artificielle.....	20
Fig. I. 13 : Longueur maximale de la goutte pendante.....	20
Fig. I. 14 : Schéma du dispositif expérimental.....	23
Fig.I.15 : Comparaison d'une dégradation de la silicone sous champ continu positif et négatif.....	25
Fig. I. 16 : Activité des décharges sur un isolateur en silicone.....	26
.....	
Fig. II. 1 : Structure d'un isolateur composite, 1 : Gaine en silicone, 2 : Epaisseur de la gaine > 3mm, uniforme a la norme CEI, 3 : Noyau en fibre de verre époxy, 4 : Armature métallique.....	30
Fig. II. 2 : Angle de contact d'une goutte d'eau sur une surface solide.....	34
Fig. II. 3 : Comportements d'une goutte d'eau sur (a) une surface hydrophile ($\theta < 90^\circ$), (b) une surface hydrophobe ($\theta > 90^\circ$), (c) une surface superhydrophobe ($\theta > 150^\circ$)	34
Fig. II. 4 : Classes d'hydrophobicité suivant le guide STRI.....	35
Fig. II.5 : Résistances volumique, superficielle et d'isolement électrique d'un matériau isolant.....	37

Fig. II. 6 : Processus de vieillissement des isolateurs composites.....	42
Fig. II. 7 : Processus de vieillissement des surfaces polymères.....	44
.....	
Fig. III. 1 : Emplacement de quatre secteurs (S_1, S_2) et (S_3, S_4) sur deux lignes de fuite d'une demi-ailette en silicone recouverte de gouttes d'eau de pluie naturelle.....	49
Fig. III. 2 : Mesure du volume des gouttes d'eau de pluie naturelle à l'aide d'une seringue graduée en microlitre.....	50
Fig. III. 3 : Dispositif à cinq tiges cylindriques rotatives assurant la variation de l'angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale de l'isolation en silicone.....	51
Fig. III. 4 : Arrangement en zigzag de gouttes d'eau sur un échantillon de silicone délimité par deux électrodes ; a) Dispositif expérimental, b) Électrodes HV et de masse dentées, c) Pipette graduée, d) Ajustement du volume de 10 à 100 μl	52
Fig. III. 5 : Dispositif à paroi supérieure rotative assurant la variation de l'angle d'inclinaison (α) de l'isolation par rapport à l'horizontale a) $\alpha = 0^\circ$, b) $0^\circ < \alpha < 90^\circ$, c) $\alpha = 90^\circ$	53
Fig. III. 6 : Schéma de mesure de niveau de tension appliquée à l'isolation et de visualisation de la décharge électrique évoluant sur sa surface (Tr : Transformateur ; AC : Appareil de commande de la tension d'essai ; V_{cr} : Voltmètre de crête, O_e : Objet d'essai ; Cam : Caméscope ; PC : Ecran Ordinateur.....	54
Fig. III. 7 : Echantillon XLR600 fixé à un dispositif.....	56
Fig. III. 8 : Angle de contact statique de XLR600 incliné de 30° par rapport à l'horizontal..	56
Fig. III. 9 : SPECTANO 100.....	57
Fig. III. 10 : Porte échantillon avec anneau de garde.....	57
Fig. III. 11 : Echantillon avec surface non uniforme.....	57
Fig. III. 12 : Raccordement du SPECTANO 100 au porte échantillon avec anneau de garde.....	58
Fig. III. 13 : Effet de la force de traction sur l'échantillon XLR600 et son allongement jusqu'à sa rupture.....	59
Fig. III. 14 : Eprouvette de traction XLR600, $A = 75 \text{ mm}$; $B = 12.5 \pm 1 \text{ mm}$; $C = 25 \pm 1 \text{ mm}$; $D = 4 \pm 0.1 \text{ mm}$; $E = 8 \pm 0.5 \text{ mm}$; $F = 12.5 \pm 1 \text{ mm}$	60
Fig. III. 15 : Courbe nominale de traction.....	61
Fig. III. 16 : Mesure de la résistance à la déchirure de l'échantillon XLR60.....	62
Fig. III. 17 : Eprouvette de pantalon ; dimensions en millimètres.....	62
Fig. III. 18 : Mesure de résistance à la déchirure de XLR 600.....	63

Fig. III. 19 : Chambre de brouillard.....	64
Fig. III. 20 : Dispositif d'essai pour l'essai au brouillard salin.....	64
Fig. III. 21 : Schéma de mesure de courant de fuite circulant sur les surfaces isolantes de l'isolation (Tr : Transformateur ; AC : Appareil de commande de la tension d'essai ; V_{cr} : Voltmètre de crête ; D : Diviseur capacitif ; R : résistance d'affaiblissement de courant ; D505 : Atomiseur.....	65
Fig. III. 22 : Système optique de mesure d'angle de contact et d'analyse de contour OCA35 ; 1) Table d'échantillonnage (X, Y, Z) ; 2) Objectif zoom ; 3) Echantillon ; 4) Seringue micro graduée ; 5 LED éclairage avec intensité contrôlée ; 6) Micro-ordinateur ; 7) Eau désionisée.....	67
Fig. III. 23 : Mesure de l'angle d'avancé (à gauche) et de l'angle de recul (à droite) par variation de volume.....	69
Fig. III. 24 : Mesure de l'angle de contact dynamique avec goniomètre a plan incliné.....	69
Fig. III. 25 : Mesure de l'angle d'avancement et de recul par plan incliné.....	70
Fig. III. 26 : Mesure par la méthode de plan incliné de : a) l'angle de contact statique, b) angle d'avancé $\Theta_a(t)$ et de recul $\Theta_r(t)$ a l'instant t et c) l'angle d'avancé $\Theta_a(t+\Delta t)$ et de recul $\Theta_r(t+\Delta t)$ apes déplacement de la goutte.....	71
Fig. III. 27 : Microscope numérique, séries VHX-950F.....	71
Fig. III. 28 : Mesure de la rugosité d'un échantillon après 1000 h d'exposition au brouillard salin, $\alpha = 90^\circ$	72
.....	
Fig. IV. 1 : Volume résiduel des gouttes d'eau récoltées sur le secteur S_1 en fonction de leur taille et du temps d'exposition de l'isolation à la pluie naturelle ($\alpha = 0^\circ$, P1 : 10/02/2018)...	76
Fig. IV. 2 : $V_{rd} = f(t)$ pour les quatre secteurs S_1, S_2, S_3 et S_4 de l'isolation en silicone ($\alpha = (45^\circ, 90^\circ)$, P1 : 10/02/2018)	77
Fig. IV. 3 : $V_{rd} = f(t)$ pour les quatre secteurs S_1, S_2, S_3 et S_4 de l'isolation en silicone ($\alpha = 0^\circ$, P1 : 10/02/2018).....	78
Fig. IV. 4 : Largeur du canal de l'arc de contournement de la surface d'une isolation en silicone recouverte de gouttes d'eau à angle d'inclinaison variable. a) $\alpha = 0^\circ$, b) $\alpha = 45^\circ$...78	
Fig. IV. 5 $V_{rd} = f(t, P)$ des gouttes d'eau résiduelles de pluie naturelle recueillies sur le secteur S_1 de l'isolation en silicone ($\alpha = 0^\circ$).....	79
Fig. IV. 6 : Volume des gouttes d'eau résiduelles de pluie recueillies sur le secteur S_1 en fonction de l'angle d'inclinaison de l'isolation et de la période de son exposition.....	80

Fig. IV.7 : Nombre de gouttes d'eau résiduelles de pluie récoltées sur le secteur S_1 de l'isolation en fonction de l'angle de son inclinaison et la période de son exposition.....	83
Fig. IV. 8 : Taille et nombre de gouttes résiduelles d'eau de pluie recueillies sur la surface du secteur S_1 de l'isolation en fonction de l'angle de son inclinaison. a) $\alpha = 0^\circ$, b) $\alpha = 90^\circ$	83
Fig. IV. 9 : $V_{rd} = f(\alpha, V_{di})$ d'une isolation en silicone hors tension.....	84
Fig. IV.10 : $V_{rd} = f(\alpha, V_{di})$ d'une isolation en silicone sous une contrainte de tension alternative égale à 10 Kv	84
Fig. IV.11 : $V_{rd} = f(\alpha, V_{di})$ d'une isolation en silicone sous une contrainte de tension alternative égale à 28 Kv.	85
Fig. IV. 12 : Comparaison des volumes des gouttes d'eau résiduelles recouvrant la même isolation hors ($U_a = 0$ kV) et sous tension ($U_a = 28$ kV).....	85
Fig. IV. 13 : $N_{rd} = f(\alpha, V_{di})$ d'une isolation en silicone hors tension.....	88
Fig. IV.14 : $N_{rd} = f(\alpha, V_{di})$ d'une isolation en silicone hors tension.....	88
Fig. IV. 15 : Comparaison des nombres des gouttes d'eau résiduelles recouvrant la même isolation hors ($U_a = 0$ kV) et sous tension ($U_a = 28$ kV).....	89
Fig. IV. 16 : $U_f = f(\alpha, V_{di})$ d'une isolation en silicone (5 rangées x 5 gouttes d'eau en zigzag, $\sigma_v = 30 \mu\text{S/cm}$, $L_c = 6$ cm, $L_{dd} = L_{de} = 1$ cm et $l_{rr} = 2$ cm).....	90
Fig. IV. 17 : Allongement maximal des gouttes d'eau en fonction de leur volume lorsque l'isolation est court-circuitée ($0^\circ \leq \alpha \leq 25^\circ$) a) $V_{di} = 60 \mu\text{l}$, b) $V_{di} = 90 \mu\text{l}$, c) $V_{di} = 120 \mu\text{l}$	91
Fig. IV. 18 : Constellation des gouttes d'eau résiduelles en fonction du volume initial, V_{di} dans l'intervalle d'inclinaison $50^\circ \leq \alpha < 90^\circ$, a) $V_{di} = 60 \mu\text{l}$, b) $V_{di} = 90 \mu\text{l}$, c) $V_{di} = 120 \mu\text{l}$	91
Fig. IV. 19 Constellation des gouttes d'eau résiduelles sur les surfaces isolantes en fonction de leur inclinaison α par rapport à l'horizontale.....	92
Fig. IV. 20 : Angle de contact statique avant et après exposition de l'échantillon Sa_4 au brouillard salin, a) $\alpha = 90^\circ$; b) $\alpha = 0^\circ$	93
Fig. IV. 21 : Angle de contact statique après exposition de l'isolation au brouillard salin, $\alpha = 90^\circ$	94
Fig. IV. 22 : Angle de contact d'hystérésis après exposition de l'isolation au brouillard salin, $\alpha = 90^\circ$	95
Fig. IV. 23 : Mesure d'angle de contact : a) statique, b) d'avancé et c) de recul sur la surface d'un échantillon après vieillissement, $\alpha = 90^\circ$	96
Fig. IV. 24 : Angle de contact statique après exposition de l'isolation au brouillard salin, $\alpha =$	

0°.....	96
Fig. IV. 25 : Angle de contact statique après exposition de l'isolation au brouillard salin, $\alpha = 30^\circ$	97
Fig. IV. 26 : Angle de contact statique après exposition de l'isolation au brouillard salin, $\alpha = 45^\circ$	97
Fig. IV. 27 : Rugosité de surface des échantillons inclinée avec différents angles d'inclinaison par rapport à l'horizontale.....	99
Fig. IV. 28 : Morphologie de surface avant et après vieillissement représenté en image 2D prise par microscope (à gauche) et 3D réalisée avec Image J (à droite) ; a) $S_{a_{virg}}$, b) $\alpha = 0^\circ$, c) $\alpha = 30^\circ$, d) $\alpha = 45^\circ$, e) $\alpha = 90^\circ$	101
Fig. IV. 29 : Courant de fuite circulant sur $S_{a_1}, S_{a_2}, S_{a_3}, S_{a_4}$, $\alpha = 0^\circ$ pendant 192 h.....	103
Fig. IV. 30 : Courant de fuite circulant sur $S_{a_1}, S_{a_2}, S_{a_3}, S_{a_4}$, $\alpha = 30^\circ$, pendant 963h.....	103
Fig. IV. 31 : Courant de fuite circulant sur $S_{a_1}, S_{a_2}, S_{a_3}, S_{a_4}$, $\alpha = 45^\circ$, pendant 987h.....	104
Fig. IV. 32 : Courant de fuite circulant sur $S_{a_1}, S_{a_2}, S_{a_3}, S_{a_4}$, $\alpha = 90^\circ$, pendant 1000h.....	104
Fig. IV. 33 : Courant de fuite circulant sur la surface des échantillons $S_{a_1}, S_{a_2}, S_{a_3}, S_{a_4}$ séparément durant l'exposition au brouillard salin, $\alpha = 45^\circ$	108
Fig. IV. 34 : Courants de fuites circulants sur $S_{a_1}, S_{a_2}, S_{a_3}, S_{a_4}$ pendant les premières 24 h d'exposition au brouillard salin, $\alpha = 0^\circ$	109
Fig. IV. 35 : Courants de fuites circulants sur $S_{a_1}, S_{a_2}, S_{a_3}, S_{a_4}$ pendant les premières 24 h d'exposition au brouillard salin, $\alpha = 30^\circ$	109
Fig. IV. 36 : Courants de fuites circulants sur $S_{a_1}, S_{a_2}, S_{a_3}, S_{a_4}$ pendant les premières 24 h d'exposition au brouillard salin, $\alpha = 45^\circ$	110
Fig. IV. 37 : Courants de fuites circulants sur $S_{a_1}, S_{a_2}, S_{a_3}, S_{a_4}$ pendant les premières 24 h d'exposition au brouillard salin, $\alpha = 90^\circ$	110

Liste des Tableaux

Tab II. 1 : Critères de classification de l'hydrophobicité des surfaces	35
Tab II. 2 : Classification de la pollution selon le type d'environnement	40
.....	
Tab III. 1 : Résultats de mesure des propriétés diélectriques.....	59
Tab III. 2 : Résultats de mesure de traction.....	60
.....	
Tab IV. 1 : Conditions climatiques pendant les périodes de pluie naturelles	78

Liste des abréviations et symboles

S : Solide

L : Liquide

γ_{SL} : Tension interfaciale solide-liquide

γ_{SV} : Tension interfaciale solide-vapeur

γ_{LV} : Tension interfaciale liquide-vapeur

θ : Angle de contact

θ_Y : Angle de Young

θ_a : Angle d'avancée

θ_r : Angle de recul

t_c : Epaisseur critique de la rupture du film entre les gouttes

A : Constante de Hamaker

a : Rayon des gouttes.

π : Constante mathématique pi

γ : Tension superficielle du liquide

E_{krit} : Champ électrique critique

SR : Caoutchouc de silicone

PTFE : Polytétrafluoroéthylène

PGF : Fluoropolymère greffé au polydiméthylsiloxane

EPDM : Caoutchouc éthylène-propylène

HTV : Caoutchouc de silicone vulcanisé à haute température

ATH : Trihydrate d'alumine

MEB : Microscope électronique à balayage

DDSE : Densité de dépôt de sel équivalent

DDNS : Densité de dépôt de sel non solubles

DC: Tension continue

AC: Tension alternative

DDT: Dynamic drop test

STRI: Swedish Transmission Research Institute

SEAC : Spectroscopie électronique pour analyse chimique

FTIR : Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier

TG-DTA : Analyse thermique différentielle

GC / MS : Chromatographie Gazeuse couplée Spectromètre de Masse

NaCl : Chlorure de sodium

HVDC : Haute tension continue

PVC : PolyChlorure de Vinyle

DP : Décharges partielles

$\mu\text{S/cm}$: microsiemens/centimètre

L_{max} : Longueur critique d'une goutte pendante

CE : Epoxy cycloaliphatiques

CIGRE : Conseil international des grands réseaux électriques

R_v : Résistance transversale ou volumique

R_i : Résistance d'isolement

HNO_3 : Acide nitrique

UV : Rayons Ultras Violet

H : Angle de contact s'hystérésis

(S_1, S_2) : Secteurs sur une ligne de fuite d'une demi-ailette en silicone recouverte de gouttes d'eau de pluie naturelle

L_{da} : Distance entre deux gouttes d'eau adjacente

L_{de} : Distance séparant une goutte d'eau de l'électrode sous tension ou mise à la terre

l_{rr} : Distance comprise entre deux rangées successives sur la largeur de l'isolation

L_c : Ligne de fuite de l'isolation

α : Angle d'inclinaison de l'isolation par rapport à l'horizontale

C_1/C_2 : Diviseur capacitif

T_r : Transformateur haute tension

R_a : Résistance d'affaiblissement de courant

V_{cr} : Voltmètre de crête

O_e : L'objet d'essai

C_2 : Capacité basse tension

Cam : Caméra rapide

U_{fm} : Tension moyenne de contournement mesurée de l'isolation

RSD : Ecart-type relatif du résultat de l'essai

K_H : Facteur de correction relatif à l'humidité

K_d : Facteur de correction relative à la température et pression

Sa_1, Sa_2, Sa_3, Sa_4 : Echantillons en silicone

ACS : Angle de contact statique

ACD : Angle de contact dynamique

FDS : Spectroscopie dans le domaine des fréquences

ϵ_r : Permittivité relative

$tg \delta$: Facteur de pertes

T : Contrainte de traction

e : Déformation relative

T_s : Résistance à la déchirure moyenne

OCA35 : Système optique de mesure d'angle de contact et d'analyse de contour

R_a : Rugosité moyenne de la surface

R_z : Somme de la hauteur maximale du pic et de la profondeur maximale du creux

V_{rd} : Volume des gouttes d'eau résiduelles

ρ : Densité du fluide

V_f : Vitesse du fluide

μ : Viscosité du fluide

F : Force électrostatique

F_{ad} : Forces d'adhérence

F_s : Forces de cisaillement

F_d : Forces de traînée

N_{rd} : Nombre de gouttes d'eau résiduelles

V_{di} : Volume de goutte d'eau initial

T_{exp} : Temps d'exposition au brouillard salin

S_{avirg} : Echantillon vierge

$\Delta\theta$: Angle de contact d'hysteresis

I_{eff} : Courant efficace

I_{max} : Courant de fuite maximal

I_{min} : Courant de fuite minimal

INTRODUCTION GENERALE

La très bonne qualité du transport de l'énergie électrique est principalement assurée grâce à la fiabilité des isolateurs de protection des lignes de transmission contre toute fuite de courant électrique des phases vers la terre.

Pour garantir une exploitation optimale de leur efficacité, il est essentiel de dimensionner et de choisir correctement ces isolateurs selon les critères de base en tenant compte des contraintes environnementales telles que la pollution [1, 2]. En effet, les rejets atmosphériques qui se déposent sur un isolateur peuvent s'humidifier au contact de gouttelettes de rosée, de pluie ou de brouillard, ce qui peut entraîner une fuite de courant vers la terre et endommager le matériel connecté au réseau électrique [1, 2].

Le contournement d'un isolateur est étroitement lié non seulement à ses paramètres physiques (matériau, taille, nombre et inclinaison de ses ailettes, position, nombre d'isolateurs, leur branchement et la hauteur de leur suspension, ...), mais aussi électriques (rigidité diélectrique transversale et longitudinale ainsi que sa résistance électrique superficielle et volumique). Le degré de l'effet individuel ou combiné de ces paramètres sur leur pouvoir d'isolement a fait l'objet de plusieurs investigations non seulement sur site mais aussi au laboratoire afin d'aboutir à un profil d'isolateur présentant la meilleure performance électrique [3-5].

Grâce à leur surface hydrophobe, des gouttelettes d'eau discrètes se forment sur celle-ci sous la pluie ou le brouillard. Ainsi, le dépôt polluant conducteur dissout dans le liquide se répartit de manière discontinue, créant des zones sèches sur leur surface le long de leur ligne de fuite qui limitent les courants de fuite et évitent les décharges électriques même dans des conditions de pollution extrêmes. Leur légèreté, leur résistance à la contamination et aux efforts mécaniques en font des matériaux excellents pour les applications en haute et moyenne tension [6-8].

Cependant, les chercheurs soulignent principalement que ce type de matériau perd son hydrophobie et se détériore à long terme en raison de l'exposition répétée et persistante à des conditions climatiques extrêmes sous tension de service. Il est probable que ce phénomène soit causé par le développement de décharges électriques partielles, qui sont générées lorsque les gouttes d'eau se déforment sous l'effet du champ électrique appliqué au polymère soumis à une tension de service [9, 10]. La répétition de ces décharges et leur durée de séjour sur la surface de l'isolation contribuent également à son vieillissement et sa défaillance à long terme.

Sous pluie naturelle, il existe très peu de travaux publiés sur la performance électrique en AC et DC des isolateurs en silicone en fonction de l'angle d'inclinaison de leurs ailettes [44-46]. Sous pluie artificielle, les essais existants sont ceux réalisés en AC sur des isolateurs réels en silicone, à angle

INTRODUCTION GENERALE

d'inclinaison standard de leurs ailettes [47-49]. Dans ces essais, le processus d'humidification des isolateurs a été décrit comme étant un phénomène de collision de gouttes d'eau avec la surface d'un isolateur et de leur diffusion sur celle-ci.

Jusqu'à présent, l'influence du brouillard salin sur les isolateurs en silicone a beaucoup attiré l'attention des chercheurs scientifiques et des experts de l'industrie. Les investigations sont focalisées sur l'étude de la corrosion des isolations et leurs dégradations causées par la circulation des courants de fuites sur leurs surfaces sous l'effet des conditions atmosphériques agressives accélérées telles que, le brouillard salin simulé au laboratoire [52-56]. En revanche, l'effet d'une inclinaison quelconque des ailettes de tels isolateurs sur leur vieillissement sous brouillard salin et sur le degré d'humidification de leur ligne de fuite n'a pas été suffisamment investigué et nécessite encore d'autres recherches. Ceci constitue l'une des raisons évidentes qui nous a amené à quantifier ce paramètre dans cette investigation. Cela consiste en premier lieu, en l'étude de l'influence de la variation de l'angle d'inclinaison de la surface d'une isolation en silicone hydrophobe sur le taux d'humidification de sa surface sous une pluie naturelle. La constellation obtenue des gouttes d'eau de pluie naturelle est ensuite reproduite au laboratoire en vue de la quantification de l'effet de l'angle d'inclinaison d'une isolation en silicone hydrophobe sur le volume et le nombre des gouttes d'eau résiduelles recueillies sur sa surface, hors ou sous tension alternative variable. De plus la tension de contournement de l'isolation en fonction du volume initialement déposé et l'angle d'inclinaison de l'isolation a été quantifiée. Par la suite, une étude a été réalisée pour évaluer l'effet de l'angle d'inclinaison de l'isolation en silicone sur son vieillissement lorsqu'elle est exposée à un brouillard salin.

La présente étude est focalisée sur la performance d'une isolation en silicone à angle d'inclinaison variable sous pluie et tension alternative.

Le premier chapitre constitue une synthèse des principales investigations antérieures élaborées au cours de ces dernières années sur la performance des surfaces isolantes hydrophobes recouvertes de gouttes d'eau sous contrainte électrique et les mécanismes de leur vieillissement.

Le deuxième chapitre est dédié à la détermination des principales caractéristiques des surfaces polymères et la description de leur comportement sous pollution et de leurs mécanismes de vieillissement.

Dans le troisième chapitre, nous présentons les méthodes expérimentales et les divers outils de manipulation utilisés pour réaliser les expériences sur site et en laboratoire.

Le quatrième chapitre est porté sur l'étude de l'effet de l'angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale d'une isolation en silicone hydrophobe sur le taux d'humidification de sa ligne de fuite par une pluie naturelle. La constellation des gouttes d'eau de pluie obtenue sur site hors tension est ensuite reproduite au laboratoire en vue de la quantification de l'effet de leur volume sur l'intensité d'humidification de

la ligne de fuite de l'isolation inclinée et par conséquent sa performance électrique sous un niveau variable de tension alternative. Ensuite la résistance au vieillissement sous brouillard salin et haute tension alternative d'une isolation en silicone hydrophobe en fonction de son inclinaison par rapport à l'horizontale est évaluée, en quantifiant le courant de fuite circulant sur sa surface durant son exposition au brouillard salin.

Après vieillissement, l'isolation est caractérisée par la mesure de la rugosité, l'examen de l'état de surface et la détermination de son angle de contact statique.

Enfin, nous résumons les principaux résultats obtenus et discutons des possibles orientations futures qui pourraient découler de ce présent travail.

CHAPITRE I : ETAT DE L'ART SUR LES ISOLATIONS ELECTRIQUES POLYMERES ET LEUR VIEILLISSEMENT

I.1 Introduction

Les isolateurs polymères sont largement utilisés durant ces dernières décennies pour l'isolation externe des lignes de distribution et de transmission d'énergie électrique, car ils assurent une très bonne qualité du transport de celle-ci. Des propriétés physicochimiques et électriques telles que leur légèreté associée à des propriétés mécaniques et électriques remarquables ajoutée à leur très bonne hydrophobie, font ces isolants contribuer à améliorer la fiabilité des systèmes électriques. Cependant, lorsque ces isolations sont recouvertes de gouttelettes d'eau conductrices, cela génère une tension qui peut provoquer des décharges électriques partielles pouvant entraîner une diminution ou une détérioration de l'hydrophobie de leurs surfaces, ce qui accélère leur vieillissement et l'altération de leurs propriétés d'isolation à long terme.

Dans ce qui suit, des investigations essentielles sur le comportement des gouttelettes d'eau sur la surface des isolateurs polymères sous l'influence du champ électrique, la performance des surfaces isolantes hydrophobes recouvertes de gouttes d'eau sous contrainte électrique et les mécanismes de vieillissement de ces surfaces sont passées en revue. Ceci mettra en évidence, les principaux défis et les avancées récentes dans ce domaine, et servira de base pour les recherches futures visant à améliorer la durabilité et la fiabilité des isolations polymères.

I. 2 Comportement de la gouttelette sous champs électrique

I. 2. 1 Désintégration de la goutte d'eau

G. Taylor [11] était parmi les premiers chercheurs à décrire le comportement de la goutte lorsqu'elle est soumise à un champ électrique et sa déformation avec l'augmentation de la tension électrique appliquée jusqu'à la formation d'une forme de cône aux côtés convexes et bout arrondi. Ce phénomène est appelé cône de Taylor et décrit pour la première fois par Sir Geoffrey Ingram Taylor en 1964 avant que l'électron nébuleux ne soit découvert. Cette investigation constitue la continuation de ceux de Zélény [12], qui était parvenu à photographier un cône-jet de glycérine dans un fort champ électrique, et de ceux de Wilson et Taylor en 1925 [13], Nolan en 1926 [14] et Macky en 1931 [15]. Taylor était principalement intéressé par le comportement de gouttes d'eau dans de forts champs électriques, tels que dans les orages. Il a examiné l'instabilité hydrodynamique et la désintégration des gouttes d'eau et

des gouttes d'huile dans un champ électrique. L'auteur a utilisé des expériences en laboratoire pour déterminer les conditions sous lesquelles les gouttes se déforment et se désintègrent en présence d'un champ électrique suffisamment fort. G. Taylor a démontré qu'en présence d'un champ électrique, la répartition des charges au sein de la goutte d'eau et autour d'elle est modifiée. Les charges positives s'orientent dans le sens du champ électrique, tandis que les charges négatives se déplacent dans le sens opposé, formant ainsi un dipôle électrique. Cela entraîne la déformation et la polarisation de la goutte d'eau. L'analyse a été effectuée sur des gouttes d'eau et des gouttes d'huile parce que ces deux liquides ont des propriétés physico-chimiques différentes, telles que la densité, la viscosité et la conductivité électrique, qui ont un impact sur leur comportement en présence d'un champ électrique. Ceci a permis de mieux étudier et de comprendre les mécanismes physiques qui y sont associés et de développer des modèles théoriques plus précis pour prédire la désintégration de gouttes dans des environnements complexes, tels que dans les nuages électrisés pendant les orages. Il a observé qu'une goutte, allongée par un champ électrique, devient instable lorsque sa longueur est 1,9 fois son diamètre équatorial et lorsque la goutte devient instable, les extrémités développent des pointes coniques à angles obtus à partir desquelles des jets axiaux sont projetés, mais il a constaté que les calculs de stabilité ne donnent aucune indication sur la mécanique de ce processus. En revanche, il a démontré que la désintégration de gouttes dans un champ électrique se réfère à un phénomène physique où une goutte d'eau en présence d'un champ électrique fort se déforme et éclate en morceaux. Ce phénomène est dû à une instabilité hydrodynamique initiée par l'application d'un champ électrique à la surface de la goutte, ce qui engendre sa déformation et qui peut conduire finalement à sa rupture. Taylor a également développé un facteur appelé facteur de Taylor, qui dépend de plusieurs paramètres, tels que le rayon de la goutte, sa conductivité électrique, la tension superficielle du liquide et le champ électrique appliqué. Ce facteur détermine la stabilité d'une goutte dans un champ électrique. Au-delà de ce facteur, la goutte se brise. Cependant, les chercheurs J. Latham et I. W. Roxburgh [16] et P. R. Brazier-Smith [17] dans leurs études, ont démontré qu'il dépend également de la distance de séparation entre les gouttes.

I. 2. 2 Coalescence des gouttelettes d'eau

La coalescence est par définition, la collision suivie de la fusion de deux ou plusieurs gouttelettes en une seule gouttelette. L'électrocoalescence est la coalescence des gouttes sous l'effet du champ électrique. Elle joue un rôle crucial dans des processus économiquement significatifs tels que l'industrie pétrolière, minière et chimique pour le traitement des eaux usées et la récupération de l'huile. Ceci a conduit à des recherches intensives pour comprendre les mécanismes fondamentaux de ce phénomène [18]. Eow et al [19], Chen [20] et Atten [21] ont bien décrit le mécanisme de la coalescence

des gouttelettes d'eau dans un champ électrique et son déroulement en trois étapes (Fig. I.1) :

- Rapprochement de deux particules par déformation ou par déplacement ;
- Amincissement du film d'air entre les deux gouttes ;
- Rupture de ce film, création d'un pont capillaire et coalescence des gouttelettes.

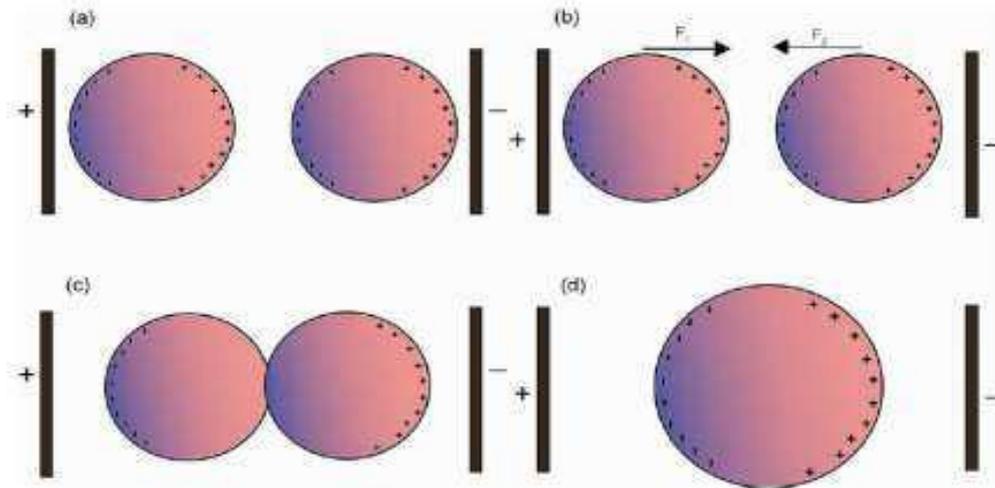


Fig. I. 1 : Mécanisme de coalescence de deux gouttelettes sous un champ électrique : (a) polarisation des gouttelettes ; (b) attraction entre les hémisphères portant des charges positives et négatives ; (c) expulsion du film d'air et création d'un pont capillaire ; (d) fusion complète en une gouttelette polarisée [21].

Les gouttes non chargées soumises au champ électrique se polarisent et peuvent être considérées comme des dipôles (Fig.I.1). Lorsqu'elles sont alignées correctement, l'interaction dipolaire entre les gouttes voisines crée une force d'attraction qui les rapproche (Fig.I.1b). Ce rapprochement est accéléré par la non uniformité du champ électrique entre deux gouttes dans un système à gouttes multiples, étant donné que la présence d'une autre goutte dans le voisinage perturbe le champ électrique subi par une goutte. Ainsi, le champ électrique entre deux gouttes est toujours plus fort que le champ lointain, ce qui entraîne des interactions dipolaires induites significatives. Le rapprochement progressif des gouttes sous l'influence du champ électrique provoque l'amincissement du film d'air qui les sépare jusqu'à sa rupture complète. Cela conduit à la création d'un pont capillaire entre les gouttes, les fusionnant finalement.

Dans une des premières études sur l'électro coalescence, Berg et al [22] ont observé que le taux de coalescence entre deux gouttes ancrées était proportionnel à l'intensité du champ électrique (E_0) à faibles champs appliqués, tandis qu'à des champs élevés, il était proportionnel à E_0^2 , ce qui mène à dire que le champ électrique joue un rôle amplificateur dans le processus de la coalescence.

En plus de l'intensité du champ électrique, les auteurs ont démontré que de nombreux autres paramètres peuvent influencer le taux de coalescence. Ces paramètres incluent la distance entre les gouttes, la taille des gouttes, le type de champ électrique appliqué, la déformation de la forme de la goutte, ainsi

que les propriétés physiques et électriques comme la conductivité, la permittivité, la viscosité et la tension interfaciale. C. P. Galvin [23] et G. M. Panchenkov [24] ont effectué des recherches ultérieures sur l'électrocoalescence qui ont visé à améliorer ces paramètres dans le but de rendre le processus plus rapide.

K. E. T. Giljarhus et al [25] ont constaté que lorsque le film mince entre deux gouttes atteint une certaine épaisseur critique après le contact goutte à goutte, il se rompt et entraîne la coalescence des gouttes. L'épaisseur critique de la rupture du film est déterminée par :

$$t_c = \left(\frac{Aa}{8\pi\gamma} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

Où :

- t_c : l'épaisseur critique de la rupture du film entre les gouttes.
- A : la constante de Hamaker, elle dépend des propriétés des liquides en présence.
- a : le rayon des gouttes.
- π : la constante mathématique pi, qui représente le rapport entre la circonférence d'un cercle et son diamètre.
- γ : la tension superficielle du liquide.

Dans la littérature, différents mécanismes de rupture du film et de fusion des gouttes ont été proposés. R. S. Allan et al [26] et D. Sartor [27] ont proposé une hypothèse qui suggère que la rupture du film mince entre les gouttes se produit lorsque le champ électrique à travers le film atteint la résistance à la rupture diélectrique de la phase du milieu. Cependant, cette hypothèse a été repoussée par Priest et al [18] lors de leur étude sur la coalescence sélective des gouttes dans un canal microfluidique. Leur analyse a révélé que ce n'est pas la rupture diélectrique, mais plutôt l'instabilité dynamique induite par le champ électrique de la phase huile-eau qui engendre la coalescence.

I. 2. 3 La goutte sous un champ alternatif

Des phénomènes électrohydrodynamiques des gouttes d'eau ont été étudiés par les chercheurs S. Keim [29], J. Hofmann [30], S. Feier-Iova [31], T. Schütte et al [32] et Y. Mizuno [33], sur des surfaces planes, horizontales et sous des champs électriques continus ou alternatifs. Ces études servent à clarifier les phénomènes de vieillissement causant une perte d'hydrophobie. Pour ce faire, des gouttes d'eau de taille et de conductivité définies sont placées au centre du champ électrique sur la surface testée afin d'analyser leur forme géométrique. T. Schütte et S. Hörnfeldt [32], ont étudié l'électrohydrodynamique des gouttes d'eau individuelles sur des surfaces isolantes hydrophobes. Leurs

expériences ont montré que sans champ électrique, les gouttes adoptent une forme sphérique sur ces surfaces, en raison de la répulsion de l'eau par celles-ci. Cette forme sphérique permet de minimiser l'énergie de surface de la goutte, tout comme une goutte en suspension dans l'air, adopte également une forme sphérique. Cela est dû à la tension de surface de l'eau, qui agit pour minimiser la surface de contact de la goutte avec l'air. Les chercheurs ont remarqué que moins la surface de l'isolant est hydrophobe, plus le comportement électrique des gouttes déposées s'écarte de celui de l'air. S. Keim [29] a étudié le comportement des gouttes individuelles dans le champ électrique alternatif et continu sur les surfaces isolantes polymères sous haute tension. Les expériences analysent les changements de surface et les déformations des gouttes, la formation de traces de liquide entre les gouttes et la coalescence de plusieurs gouttes individuelles. Il a constaté que les forces électriques qui se produisent sont opposées aux forces de rappel de la viscosité. C'est pourquoi la goutte singulière sur la surface de l'isolant est un système mécaniquement vibrant. L'auteur a observé qu'entre des gouttes instables voisines, le champ électrique provoque, à partir d'une certaine distance critique, une coalescence spontanée des gouttes et la formation des films d'eau sur la surface. Cette coalescence de gouttes entraîne une énergie de surface plus faible de la nouvelle goutte formée. J. Hofmann [30] a démontré qu'avec l'augmentation du champ électrique aux points triples, il se produit une déformation de la goutte aux pôles avec une augmentation de l'angle de bord jusqu'à l'angle d'avancement. Si la goutte n'a toujours pas atteint l'équilibre mécanique, elle se dilate dans le sens des lignes de champ. Cette dilatation de la goutte entraîne un raccourcissement de la distance d'isolation. L'auteur a observé qu'à partir d'un seuil critique de l'intensité de champ, la goutte d'eau atteint le cas limite de la déformation stable. Pour un champ appliqué homogène, il a déterminé une relation empirique pour l'intensité de champ critique E_{krit} des gouttes libres qui est donnée par :

$$E_{krit} = \sqrt{\frac{\chi_{H_2O}}{\varepsilon_0 \cdot r}} \cdot C \quad (2)$$

On constate d'après l'équation 2, que l'intensité de champ critique E_{krit} augmente avec la tension de surface de la goutte d'eau et la diminution de son rayon r . La constante C est déterminée par différentes approches de modélisation et prend des valeurs entre $C = 0,452$ et $C = 0,462$. Ainsi, une goutte est plus stable dans un champ électrique lorsque sa taille, à la fois en rayon et en volume, est réduite. Feier-Iova [31] a constaté, que l'intensité du champ au niveau des gouttes déformées, peut être jusqu'à 8 fois supérieure à celle du champ électrique appliqué et que le degré de déformation de ces gouttes augmente avec l'intensité du champ électrique. L'auteur a remarqué l'apparition des gouttes appelées "gouttes satellites", résultant de la division des gouttes, de la répulsion entre gouttes et de la formation de

nouvelles gouttes très petites à partir d'un film d'eau. Il a constaté qu'une goutte soumise à un champ électrique alternatif, vibre et fait des mouvements autour de sa position d'équilibre et présente des mouvements oscillatoires. Il a démontré que les mouvements des gouttes dépendent de la valeur crête de la tension appliquée contrairement à T. Schütte et al, qui ont trouvé que c'est la valeur efficace de la tension qui est responsable de la déformation des gouttes et que chaque volume de goutte présente un comportement caractéristique pour un niveau de tension et une fréquence donnée. Y. Mizuno et al [33], ont mené des études sur l'instabilité des gouttes en fonction de la fréquence du champ électrique alternatif appliqué. Avec l'augmentation de la tension appliquée, les gouttelettes ont d'abord vibré, puis elles se sont étendues dans la direction du champ électrique appliqué et, enfin, une coalescence des gouttelettes d'eau s'est produite. Leur étude révèle que, dans une plage de fréquence de (30 - 500) Hz, l'instabilité des gouttes augmente avec la fréquence, car les vibrations des gouttes qui se produisent sont plus fortes à des fréquences plus élevées qu'à des fréquences plus basses. T. Yamada et al [24], les chercheurs ont mené une étude expérimentale sur la vibration d'une gouttelette d'eau sur une plaque hydrophobe soumise à un champ électrique alternatif. Afin d'évaluer l'effet de la propriété de surface des matériaux hydrophobes sur les phénomènes de résonance d'une gouttelette d'eau, trois types de matériaux hydrophobes, le caoutchouc de silicone (SR), le polytétrafluoroéthylène (PTFE) et la feuille de fluoropolymère greffé au polydiméthylsiloxane (PGF) ont été utilisés. Ils ont observé qu'une goutte d'eau placée sous le champ AC ne vibre fortement que dans une plage de fréquences spécifique, appelée fréquence de résonance. Cette fréquence diminue lorsque le volume de la goutte d'eau augmente. Les chercheurs ont constaté que la fréquence de résonance était plus basse sur la feuille SR que sur les feuilles PTFE et PGF. Cela suggère que la fréquence de résonance et l'amplitude de la déformation de la goutte d'eau dépendent des propriétés de surface du matériau hydrophobe.

B. X. Dul et Yong Liul [35] ont étudié les caractéristiques de décharges électriques générés par le comportement dynamique de la gouttelette d'eau pour évaluer l'hydrophobicité d'un isolateur en caoutchouc de silicone (SiR). De ce fait, un test dynamique des gouttes d'eau (DDT ; Dynamic Drop Test) (Fig.I.2) sous tension alternative a été effectué pour évaluer le comportement dynamique d'une goutte d'eau sur trois échantillons en SiR.

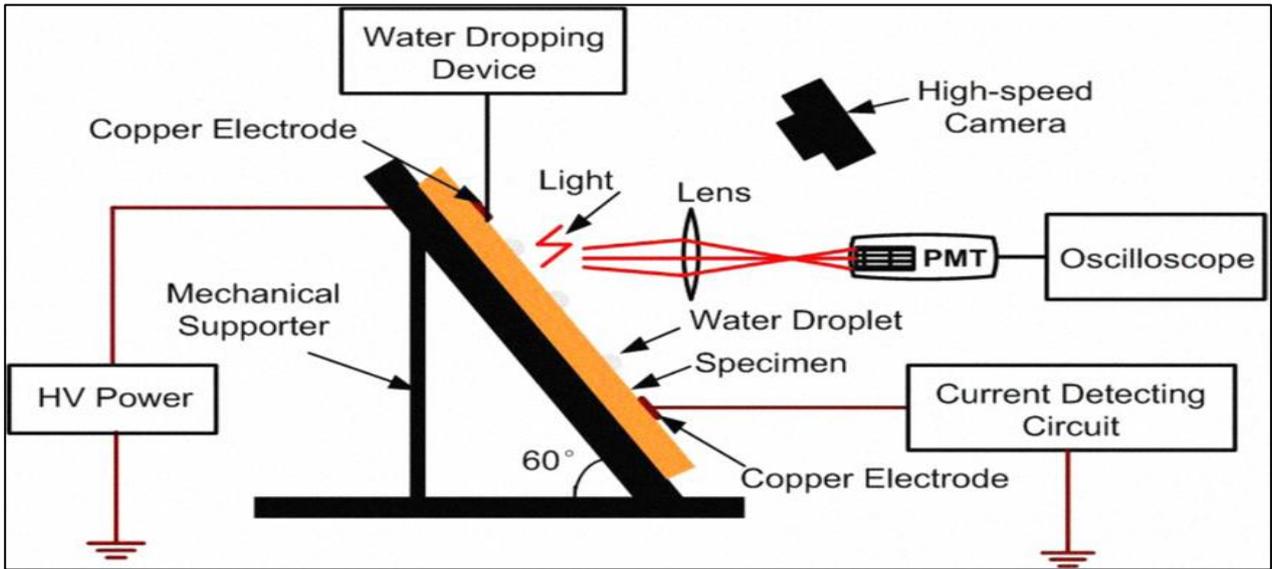


Fig. I. 2 : Dispositif expérimental [35]

Les phénomènes de décharge ont été capturés à l'aide d'une caméra à grande vitesse et l'intensité lumineuse des décharges a été mesurée (Fig. I. 3).

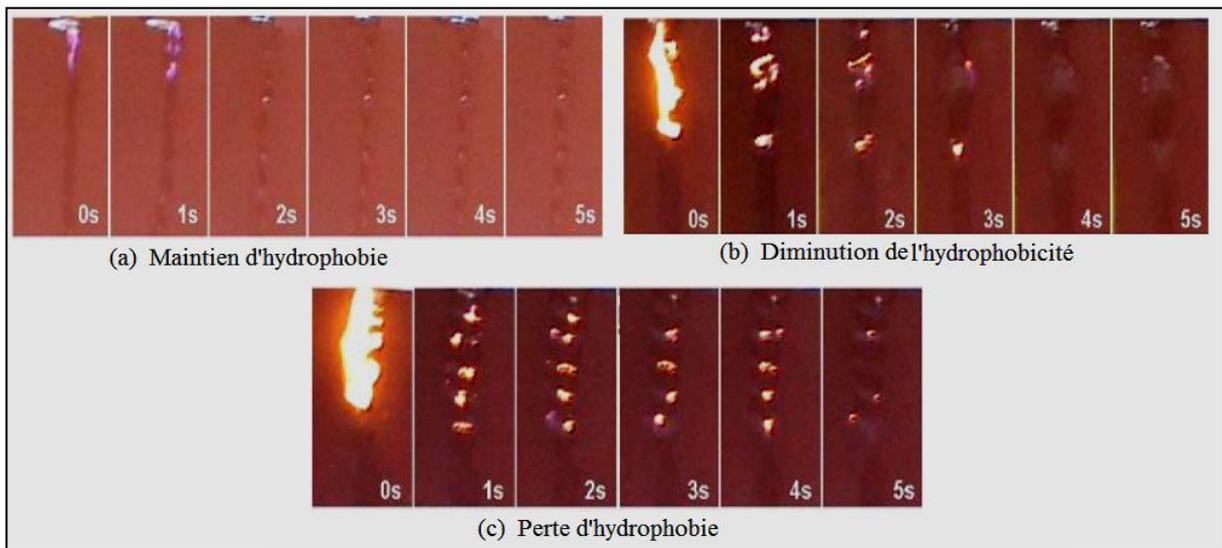


Fig. I. 3 : Phénomènes de décharges pendant la chute d'une goutte d'eau [35]

En même temps, la distribution du champ électrique au moment de la chute de la gouttelette a été calculée pour déterminer la relation entre les décharges électriques et l'hydrophobie. Les chercheurs ont remarqué que la couleur, la luminosité et l'intensité de la lumière de décharge correspondent bien à la variation de l'hydrophobie et avec la diminution du caractère hydrophobe de la surface des échantillons, le nombre et la durée des décharges présentent une tendance à l'augmentation. Les chercheurs ont constaté que l'augmentation de l'intensité de décharge et de l'intensité lumineuse associée indique une diminution de l'hydrophobie.

I.2. 4 La goutte sous un champ continu

Y. Higashiyama et al [36] ont étudié expérimentalement le comportement des gouttelettes d'eau placées à la surface d'une plaque de polymère hydrophobe sous un champ DC. Trois matériaux isolants hydrophobes, à savoir le PTFE, le caoutchouc de silicone (SR) et le caoutchouc éthylène-propylène (EPDM), ont été utilisés pour confirmer l'impact de l'hydrophobie sur le mouvement des gouttelettes d'eau. Ils ont observé que l'angle de contact apparent variait avec le temps pour une tension appliquée constante et certaines quantités de charge étaient émises par microdécharge ou par éjection de petites gouttelettes. Les auteurs ont constaté que le comportement des gouttelettes sous champ DC dépend fortement non seulement de l'hydrophobie mais également de la propriété de surface plane de l'isolant. Y. Higashiyama, S. Yanase, et T. Sugimoto [37] ont étudié plus tard, la décharge couronne qui se produit au niveau des gouttelettes d'eau déposées sur la surface du polymère soumis à un champ électrique continu (Fig. I. 4). Le comportement de ces gouttelettes d'eau a été expérimentalement étudié sur deux matériaux isolants hydrophobes : le PTFE et le caoutchouc de silicone SR. L'hydrophobie de ces deux matériaux a été aussi évalué en mesurant l'angle de contact d'une gouttelette d'eau de 4 ml sur leurs surfaces isolantes.

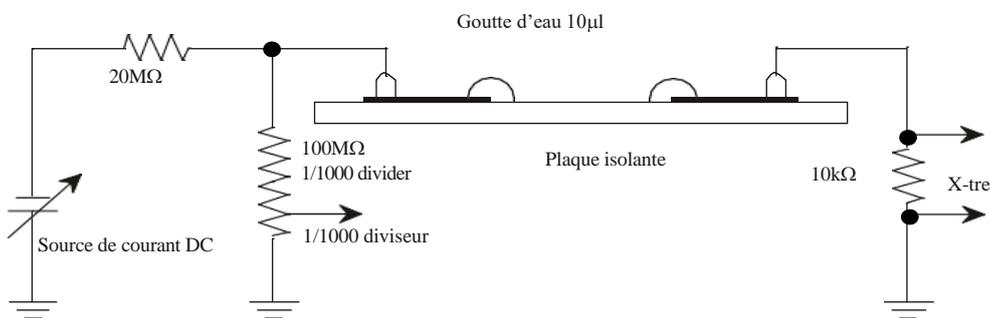


Fig. I. 4 : schéma électrique du dispositif expérimental [37]

Des séquences vidéo montrant le comportement de deux gouttes d'eau placées sur les plaques isolantes de PTFE et SR, mises sous une tension continue positive et négative ont été prises (Fig. I. 5). Les chercheurs ont observé l'apparition d'une décharge couronne qui s'est produite à la pointe des gouttelettes d'eau allongées et déformées avant juste la formation du filament d'eau qui s'étend le long de la surface sous l'effet de la force électrostatique. Ils ont conclu que la polarité de la tension appliquée influence fortement l'aspect de la décharge et le comportement des gouttelettes d'eau, ce qui pourrait affecter la tension de contournement de la surface à travers ces gouttelettes.

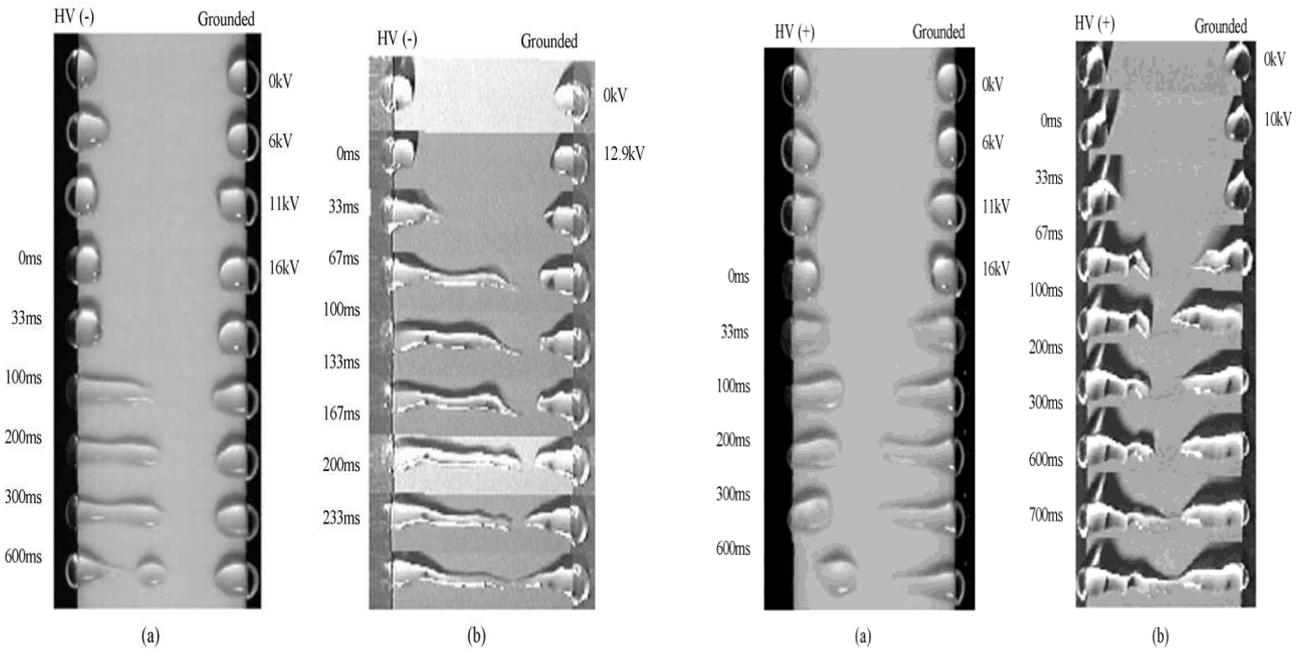


Fig. I. 5 : Formation d'un canal d'eau sur : (a) PTFE, et(b) SR, lorsque la tension négative (à gauche) et positive (à droite) sont appliquées aux électrodes [37]

C. Bär et al [38], ont mené une étude comparative du phénomène hydrodynamique des gouttelettes d'eau sur un plan incliné (DDT), en appliquant les contraintes AC et DC, sur des matériaux isolants HCR et LSR fabriqués à partir d'élastomères de silicones pendant six heures. Ils ont observé que la gouttelette se déplace en fréquence avec le champ électrique alternatif appliqué. Cette observation conduit à supposer que la valeur du courant et par conséquent le pic de la tension appliquée sont responsables de la déformation des gouttelettes dans le champ électrique, tandis qu'une gouttelette singulière positionnée au niveau de l'électrode supérieure sous contrainte DC ne montre aucune oscillation (Fig. I.6).

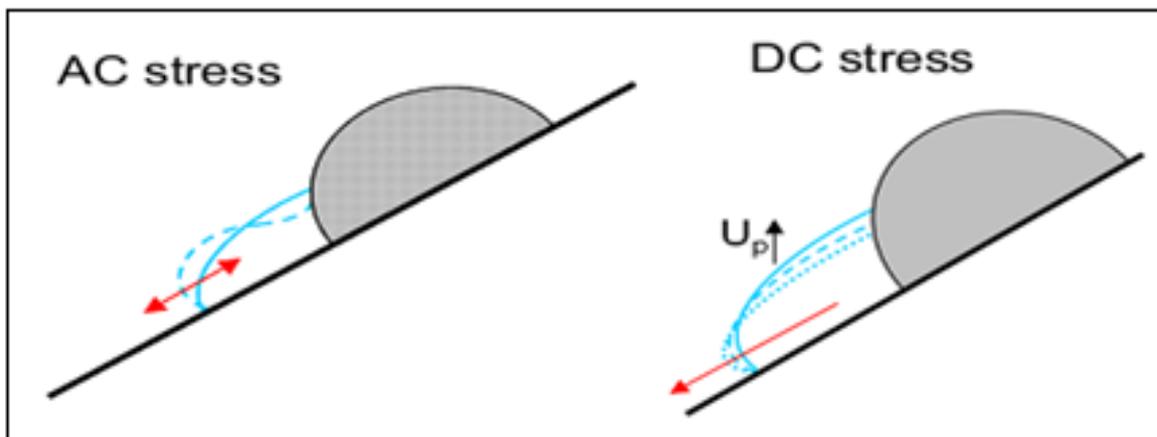


Fig. I. 6 : Comparaison de la déformation d'une gouttelette individuelle sous AC et DC [38]

L'évaluation statistique de la conservation de l'hydrophobicité de ces matériaux a révélé que les échantillons soumis à une contrainte en courant alternatif ont atteint un temps de rupture de 123 minutes en moyenne, tandis que ceux qui sont soumis à une contrainte DC avec la même valeur

efficace de tension ont passé la durée de test (six heures), et aucune perte d'hydrophobicité n'a été constatée. Ils ont pu conclure aussi que des amplitudes de tension de rupture sont très élevées en courant continu qu'en courant alternatif. D'après les auteurs, ceci est dû à la forte vibration des gouttelettes d'eau en courant alternatif qu'en courant continu. De ce fait, la goutte prend moins de temps en AC pour tomber du haut vers le bas qu'en DC. Celle-ci se transforme en un filet d'eau qui est poursuivi d'un courant de fuite. Les résultats de mesures obtenus de l'évaluation de la résistance au cheminement et à l'érosion sous contrainte en courant alternatif et continu ont montré, des profondeurs d'érosion plus élevées sous contrainte en courant continu qu'en courant alternatif pour les HCR et LSR utilisés. Les chercheurs ont expliqué le phénomène, par le temps de brûlure local plus élevé des pré arcs sous contrainte DC, ce qui entraîne un apport d'énergie local plus élevé et une érosion plus intense. Yuya Seo et al [39] ont étudié les caractéristiques de la perte d'hydrophobie sur une surface en caoutchouc de silicone lors d'un essai de goutte dynamique avec l'application d'une tension continue. L'électrolyte à différentes conductivités électriques a été préparé avec du chlorure de sodium NaCl. Une tension continue de 3 kV a été appliquée à l'électrode supérieure (Fig. I. 7).

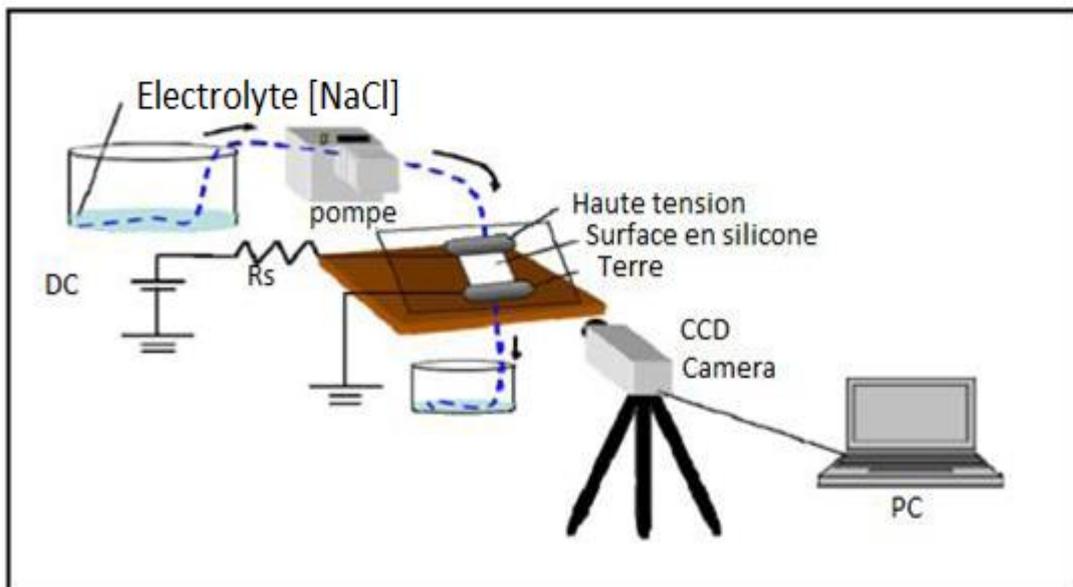


Fig. I. 7 : Dispositif expérimental [39]

Les auteurs ont effectué des observations à l'aide d'une caméra CCD sur les changements d'hydrophobie et les décharges générées à la surface de l'échantillon testé (Fig. I.8), suite à l'évaluation de l'abaissement temporel de l'hydrophobicité dans différentes conditions de conductivité et de vitesse de chute. Ils ont constaté à la fin que le changement de l'hydrophobicité peut être classé en trois phases. Ils ont décrit ces trois phases, en expliquant que la première se caractérise par l'apparition des petites gouttelettes résiduelles sur la surface de l'échantillon après la chute de la gouttelette d'eau (Fig. I. 8a). Ensuite, avec l'évolution de l'abaissement de l'hydrophobicité, de petites décharges sont observées

(Fig. I. 8b). Enfin, dans la phase suivante illustrée par (Fig. I. 8c), un canal d'eau se forme, marquant la fin de l'abaissement temporel de l'hydrophobicité, ou la surface perd temporellement son hydrophobicité. Dans le but d'étudier l'impact de la conductivité et le taux chutant de l'électrolyte sur l'abaissement temporel de l'hydrophobicité, une analyse a été menée en variant ces paramètres. Les chercheurs ont conclu que la perte d'hydrophobicité des surfaces des échantillons a été très influencée par la conductivité et le taux chutant de l'électrolyte.

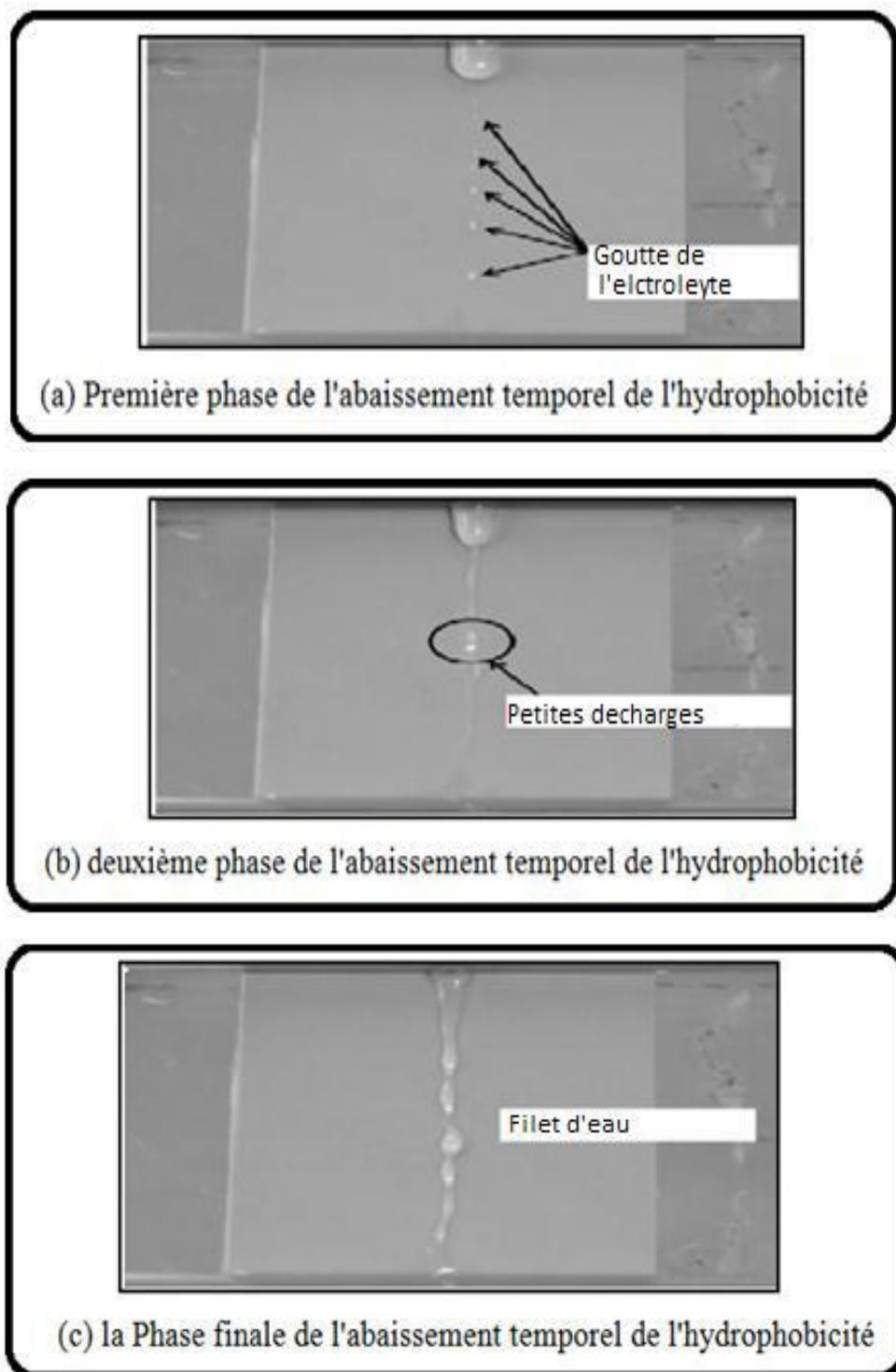


Fig. I. 8 : Abaissement temporel de l'hydrophobicité [39]

I. 3 Performance électrique des surfaces isolantes hydrophobes recouvertes de gouttes d'eau

D.K. Das Gupta et al [40] dans leur investigation, ont démontré l'importance de l'eau dans la conductibilité des isolateurs. La plupart de leurs résultats sont interprétés en termes de quantité d'eau absorbée ou adsorbée par le polymère. Par contre, les mécanismes de conduction et le rôle précis de l'eau n'ont pas pu être déterminés. Il est cependant d'après les chercheurs, essentiel de noter que la conductivité en elle-même n'est pas un danger réel pour la durée de vie du matériau, mais l'effet joule généré peut entraîner la formation de zones sèches et donc l'apparition de décharges partielles.

N. M. Ijumba et al [41] ont étudié l'hydrophobie des isolants en caoutchouc de silicone soumis à l'effet couronne de gouttelettes d'eau sous un potentiel HVDC. Ils ont suivi une méthodologie en se basant sur l'approche des éléments finis, qui consiste à modéliser la goutte d'eau afin de déterminer son impact sur une distribution uniforme du champ électrique. Des tests en laboratoire ont également été effectués pour vérifier les résultats de la simulation et identifier les facteurs entraînant la perte de l'hydrophobie d'un matériau en caoutchouc de silicone en présence de gouttelettes d'eau, dans des conditions HVDC, tel que la durée de l'exposition à l'effet couronne, la polarité, la taille des gouttelettes d'eau et leur conductivité. D'après les résultats obtenus, les auteurs ont conclu que l'intensification du champ électrique due à la forme sphérique de la goutte, sa taille et sa forte permittivité relative amène le champ électrique à dépasser le gradient de création de la couronne et des décharges électriques se produisent à la surface de l'isolant. Ceci engendre une perte temporaire d'hydrophobie de la surface de l'échantillon en silicone. Ils ont observé aussi que plus le temps d'exposition (3, 6 et 9 m) est long, plus la perte d'hydrophobie mesurée directement à la fin du test est faible. Le matériau est donc plus hydrophobe à la fin d'une période d'essai longue qu'à la fin d'une période d'essai courte, ce qui va à l'encontre de ce qui était attendu. Ils ont constaté que la couronne positive et négative entraîne une perte temporelle d'hydrophobicité, en fonction de la taille et de la conductivité des gouttelettes d'eau. Il a été observé que les gouttelettes les plus grosses ont tendance à se répandre sur une plus grande surface. En conséquence, elles présentent une surface conductrice plus proche des électrodes que les gouttelettes les plus petites, ce qui se traduit par une augmentation de l'intensité du champ, qui conduit à une plus grande perte d'hydrophobie et l'augmentation de la conductivité de la gouttelette d'eau devrait avoir un effet plus néfaste sur les propriétés hydrophobes de la surface isolante. K. Karakoulidis et al [42] ont étudié le comportement des gouttelettes d'eau sur une surface polymère (caoutchouc de silicone, PVC, et le caoutchouc) sous un champ alternatif. Ils ont choisi des arrangements de 1, 2, 3, 5 et 9 gouttes d'eau. Les volumes de ces dernières ont été de 0,2 et 0,3 ml, afin de mieux simuler les conditions réelles. Les électrodes sont en cuivre et positionnées à une distance de 4 cm parallèles entre

elles de sorte que le positionnement de gouttelettes d'eau serait plus facile comme le montre la figure I. 9.

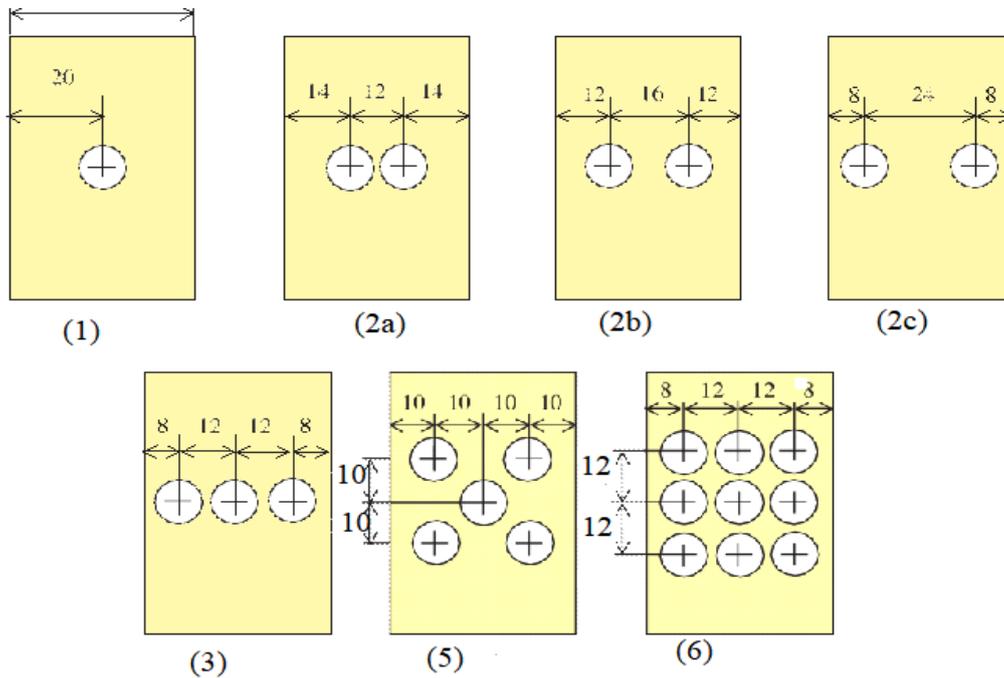


Fig. I. 9 : Arrangement des gouttes d'eau sur une surface polymère [42]

Les auteurs ont évalué le phénomène de détérioration du matériau dus aux décharges partielles (DP) et aux arcs localisés en fonction de la conductivité de l'eau, de la rugosité de la surface du polymère, du volume des gouttelettes et de la position des gouttelettes par rapport aux électrodes. Les résultats obtenus montrent que l'augmentation de la conductivité entraîne une diminution de la tension de contournement, ceci est généralement valable, indépendamment du matériau utilisé. La rugosité de surface influe de façon positive sur la tension de contournement lorsque le nombre de gouttelettes est grand. Cependant, le résultat le plus inattendu est que le positionnement des gouttelettes par rapport aux électrodes joue un rôle plus important que leur volume, tel que la tension de contournement diminue significativement lorsque les gouttelettes d'eau sont proches des électrodes. J. Ndoumbo et al [43], ont étudié le comportement des gouttes d'eau déposées sur des surfaces isolantes diélectriques composites sous l'effet de la tension DC. Ils ont mené des expériences pour observer la coalescence de paires de gouttes d'eau sessiles. L'objectif était d'analyser comment leur taille, leur conductivité et leur position par rapport aux électrodes, ainsi que l'hydrophobie de l'isolant, influencent leur comportement. Les chercheurs ont également étudié les conditions dans lesquelles la coalescence se produit et l'activité des décharges électriques, en utilisant un système d'électrodes cylindriques inclinées en acier à extrémité sphérique (Fig. I. 10). L'observation optique de la dynamique des gouttelettes d'eau est faite par une caméra CCD placée au-dessus de la cellule d'essai. Différents

paramètres des gouttes d'eau ont été varié au cours des expériences à savoir :

- La conductivité, en mélangeant de l'eau distillée avec du chlorure de sodium (NaCl), formant ainsi des solutions dont la conductivité varie de $3\mu\text{S}/\text{cm}$ à $1000\mu\text{S}/\text{cm}$.
- Le volume des gouttelettes d'eau varie de 40 à 60 μl .
- La distance de séparation entre les gouttelettes est de 4 mm et 6 mm.

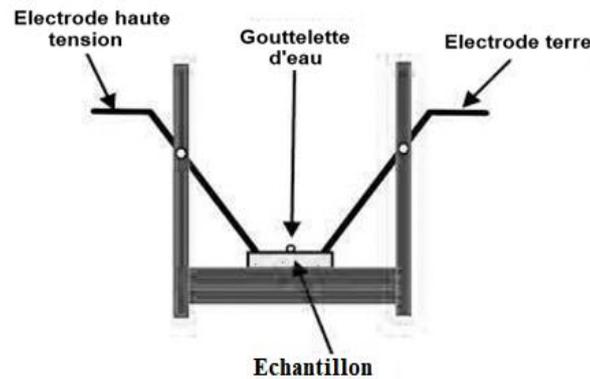


Fig. I. 10 : Schéma du dispositif expérimental [43]

Les résultats obtenus, montrent que le taux de coalescence dépend principalement de trois paramètres tel que, l'emplacement des gouttelettes sur la surface isolante, le volume des gouttelettes et la distance de séparation entre les gouttelettes. Les chercheurs ont observé que l'augmentation du taux de coalescence est enregistrée lorsque le volume des gouttelettes augmente et que la coalescence des gouttelettes d'eau est facile à obtenir lorsqu'il y a un angle de 45° entre la ligne joignant les centres des deux gouttelettes et le champ électrique par rapport aux celles qui sont alignées normalement avec la direction du champ électrique. Ils ont constaté que la coalescence goutte à goutte produit des gouttelettes plus grosses qui sont plus sensibles au champ électrique car les grosses gouttelettes se déforment facilement, permettant au courant électrique de circuler entre les deux électrodes. L'intensité du courant pendant le processus de coalescence augmente lorsque les gouttelettes se rapprochent les unes des autres. Cependant, la conductivité de l'eau a un faible effet sur la coalescence des gouttelettes d'eau. R. Boudissa et al [44], ont quantifié l'effet de l'angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale sur la performance d'une isolation en silicone hydrophobe lorsqu'elle est mise sous tension continue et recouverte de gouttes d'eau dont le nombre de rangées, le volume et la conductivité électrique sont variables. D'après les résultats obtenus dans cette investigation, Il a été constaté qu'un nombre limité de rangées de gouttes d'eau en ligne droite, avec un angle d'inclinaison nul, peut entraîner une réduction des performances électriques d'une isolation hydrophobe d'environ 44 %. Ce nombre critique de rangées de gouttes d'eau donne des informations spécifiques sur le nombre maximum de décharges électriques parallèles qui peuvent se produire sur la largeur de l'isolation avant qu'elle ne soit

contournée définitivement. L'influence simultanée de l'angle d'inclinaison de l'isolant hydrophobe ($0^\circ \leq \alpha \leq 50^\circ$) et du volume des gouttes d'eau ($45 \mu\text{l} \leq V_d \leq 90 \mu\text{l}$) recouvrant sa surface peut provoquer une chute totale de ses performances électriques d'environ 69 %. De plus, si la conductivité électrique des gouttes d'eau augmente, cela peut entraîner une baisse supplémentaire de la performance de l'isolation électrique de 13 %. Par conséquent, dans des conditions de forte pollution, la performance d'isolation peut diminuer jusqu'à 82 %. Les chercheurs ont démontré que pour un angle d'inclinaison supérieur ou égal à 50° de l'isolant en silicone recouvert de gouttes d'eau, la baisse maximale de ses performances électriques par rapport au cas d'une atmosphère propre et sèche, ne dépasse pas 15%. Par conséquent, un tel profil des ailettes d'un véritable isolateur en silicone est fortement recommandé dans les régions à plus forte pluviométrie. R. Boudissa et al [45] ont également étudié ensuite l'arrangement des gouttes d'eau de pluie et de condensation naturelle sur une surface isolante en silicone hydrophobe inclinée, ainsi que son effet sur la tension continue de contournement. Ils ont conçu un dispositif spécifique pour exposer les échantillons d'isolations en silicone à la pluie et à la condensation sur site, ainsi qu'un dispositif au laboratoire permettant de fixer ces isolations et de varier leur angle d'inclinaison. Les résultats de l'étude sur site ont permis de déterminer le type d'arrangement des gouttes d'eau le plus reproductible et de distinguer leur volume dans ces conditions. Les résultats obtenus en reproduisant cet arrangement de gouttes d'eau en laboratoire ont montré qu'il existe un intervalle d'angle d'inclinaison spécifique de l'isolation qui permet de maintenir sa performance électrique proche de celle en l'absence de gouttes. De plus, les résultats obtenus en combinant le volume des gouttes d'eau et l'angle d'inclinaison de l'isolation fournissent des informations claires sur certaines situations très critiques à faire éviter à l'isolation par un choix judicieux de son angle d'inclinaison. Z. Jiang et al [46] ont examiné comment une pluie intense (5 mm par jour) pouvait nettoyer la surface des isolateurs et réduire la contamination. Ils ont constaté que la pluie intense était plus efficace que la rosée, le brouillard et d'autres formes de pluie légère, qui peuvent en réalité aggraver la situation en humidifiant les contaminants. Cela peut entraîner des courants de fuite et augmenter le risque de contournement des surfaces isolantes. En revanche, les pluies intenses peuvent éliminer la contamination de la surface des isolateurs haute tension, réduisant ainsi le risque de contournement dû à la pollution. L'étude a été réalisée dans la province de Hunan, en Chine, pour évaluer l'effet du nettoyage naturel sur les isolateurs HT de quatre lignes de transmission de 500 kV. En utilisant des données météorologiques historiques, les chercheurs ont analysé les mesures mensuelles de la densité équivalente des dépôts de sel (ESDD) et de la densité des dépôts non solubles (NSDD) sur une période de cinq ans. L'objectif était d'étudier la relation entre l'intensité des précipitations et le nettoyage des isolateurs. Les résultats obtenus d'après des mesures mensuelles de

la densité équivalente des dépôts de sel (DDES) et de la densité des dépôts non solubles (DDNS) effectuées sur une période de cinq ans, montrent que la contamination à la surface des isolateurs s'accumule pendant la saison sèche (janvier-avril) et elle est éliminée pendant la saison des pluies (juin-octobre). Etant donné que les principaux composants de l'DDES sont des polluants solubles et ceux de la DDNS sont des polluants insolubles, l'effet de la pluie sur leur rinçage diffère considérablement. Les résultats de cette étude ont également révélé une contamination plus grave dans les zones industrielles par rapport aux autres sites d'essai, les mesures de DDES et DDNS résiduelles diminuent avec l'augmentation de l'intensité des précipitations et l'effet de lavage de la contamination des isolateurs est principalement observé pendant la période initiale des précipitations. Les auteurs ont développé un modèle basé sur les données de DDES et DDNS pour le nettoyage des isolateurs. Ce modèle peut aider les opérateurs à prendre des décisions concernant le nettoyage des isolateurs contaminés, notamment en déterminant le moment opportun pour le faire. W. Bretuj et al [47], dans leur étude, ont examiné l'impact de différents profils d'isolateurs en caoutchouc de silicone sur leur performance lorsqu'ils sont exposés à des conditions de pluie. Ils ont réalisé une étude comparative en utilisant des isolateurs composites en caoutchouc de silicone HTV avec des ailettes inclinées à des angles différents (0° , 10° , 30°), comme illustré en figure I. 11.

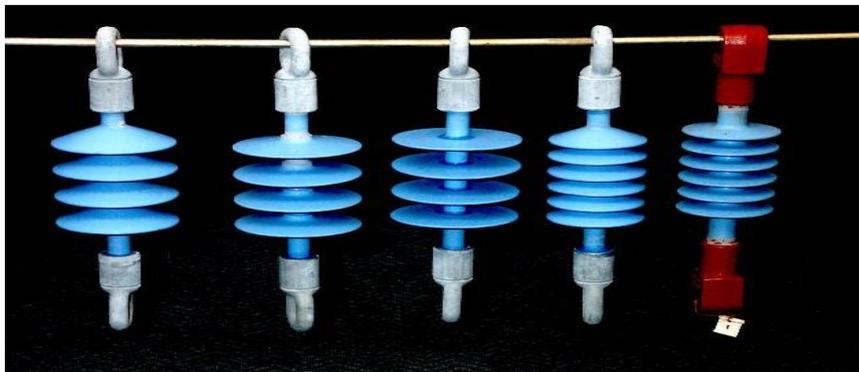


Fig. I. 11 : Isolateurs testés [47]

L'objectif principal de ces essais était de collecter des données expérimentales afin de caractériser l'impact de l'angle d'inclinaison des ailettes sur la dégradation des isolateurs composites sous haute tension, en présence de pluie artificielle et de brouillard. Les isolateurs ont été soumis à des tensions alternatives de 24 kV et 40 kV, ainsi qu'à des précipitations d'eau ayant une conductivité de $200 \mu\text{l}$, dans une chambre de pluie et une chambre de brouillard. Les résultats ont révélé des différences évidentes dans les temps de vieillissement des isolateurs, entraînant une augmentation du courant de fuite et des décharges électriques sur leurs surfaces. Il a été constaté que les isolateurs dotés d'un angle d'inclinaison de l'ailette plus important (30°) présentent une résistance accrue au vieillissement, notamment en cas de pluie. Pour cette raison, l'angle d'inclinaison de l'ailette est un paramètre de

conception distinctif des isolateurs composites, de sorte que les isolateurs dotés d'ailettes fortement inclinées ont une résistance relativement élevée au vieillissement sous haute tension dans des conditions de brouillard et de pluie. A. De La O et al [48] ont étudié le mécanisme de contournement et la performance des isolateurs extérieurs en polymères contaminés dans des conditions humides. Deux types de mouillage ont été pris en compte, à savoir le brouillard et la pluie. Différents profils d'isolateurs de ligne avec des couches de protection contre les intempéries ont été évalués. Les résultats obtenus ont montré que le mouillage par la pluie peut être plus critique que la condensation par brouillard propre pour ce type d'isolateurs contaminés car la pluie peut provoquer leur contournement. Le mécanisme de contournement lorsqu'il est dû à la pluie est différent de celui engendré par la condensation du brouillard. Les auteurs ont observé que le passage des décharges entre les ailettes par des arcs et des gouttelettes d'eau joue un rôle majeur pendant la pluie, contrairement à l'humidification par condensation où les décharges se produisent le long de la surface de l'isolateur. Ils ont identifié aussi les facteurs favorisant la formation de cascades d'eau sur les isolateurs polymériques, tel que les ailettes à faible angle d'inclinaison et les ailettes peu espacées qui influencent négativement sur leur performance et conduisent à leur contournement sous pluie. Une investigation approfondie de phénomène de cascades d'eau a été menée par L. Yang et al [49] en réalisant une étude sur la déformation dynamique des gouttes d'eau pendantes sur le bord des ailettes d'un isolateur en porcelaine à haute tension en cas de pluie extrême. Les chercheurs ont évalué numériquement par simulation l'effet simultané du champ électrique et des paramètres des gouttes d'eau (le diamètre initial et le débit massique initial) sur leur déformation dynamique sous une pluie extrême. Les résultats de la simulation ont été vérifiés ensuite par des tests sous pluie artificielle (Fig. I. 12).

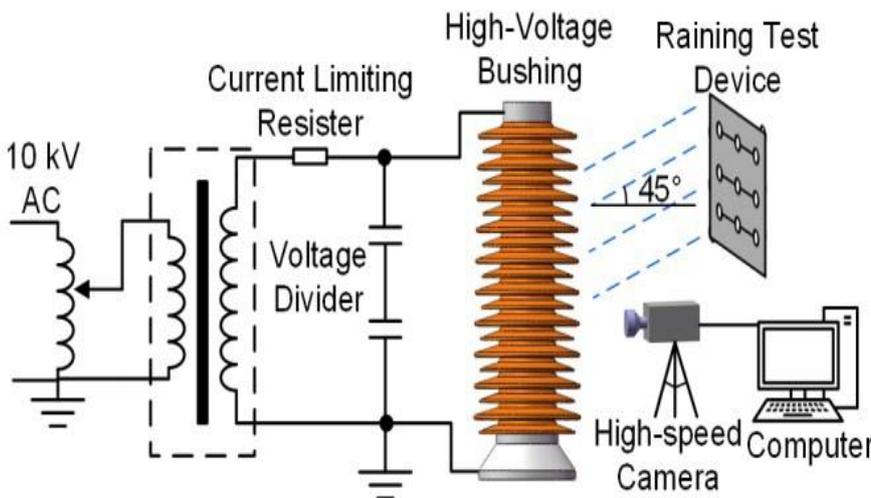


Fig. I. 12 : Isolateurs testés sous pluie artificielle [49]



Fig. I. 13 : Longueur maximale de la goutte pendante [49]

Les tensions appliquées lors de l'expérience étaient 0 kV et 318 kV, ce qui correspond respectivement à un fonctionnement de l'isolateur hors ou sous tension alternative. L'angle des précipitations

artificielles a été fixé à 45° afin de simuler des pluies avec des vents forts. La longueur critique L_{max} d'une goutte pendante avant qu'elle ne se brise a été mesuré, comme le montre la figure I. 13 et sa déformation dynamique est décrite en résolvant les équations de Navier-Stokes. Les résultats émanant de cette étude indiquent que la longueur maximale de la goutte pendante augmente lorsque le diamètre initial et le débit massique initial augmentent en l'absence de champ électrique, mais diminue en présence d'un champ électrique. L'augmentation de diamètre initial et de débit massique initial, engendre un élargissement du col de la goutte d'eau pendante, ce qui conduit à la réduction de l'instabilité de la goutte. De plus, les chercheurs ont démontré que les variations de la longueur maximale et du temps de rupture de la goutte pendante sont liées à l'instabilité de la goutte pendante.

I.4 Vieillissement des surfaces isolantes hydrophobes recouvertes de gouttes d'eau

Parr, D. J et Scarisbrick, R. M [50] étaient parmi les premiers chercheurs à évaluer les matériaux polymères, en se basant sur des méthodes d'essai, tels que l'essai de poussière/brouillard et l'essai de cheminement de la CEI. Ces tests évaluent les modes de défaillance catastrophiques tels que l'érosion canalisée et le cheminement dans des conditions polluées qui conduisent à la défaillance totale du matériau. Les analyses et les tests ont été effectués sur des échantillons en résine synthétique. Les auteurs ont observé que le test de poussière/brouillard est meilleur que le test CEI pour classer les matériaux en fonction de leur résistance au cheminement et à l'érosion dans des conditions polluées. Il a été démontré que la tendance d'une résine au cheminement peut être déduite de sa structure moléculaire lorsque celle-ci est connue. Ils ont constaté qu'il est possible d'améliorer la résistance au cheminement en utilisant des charges. Cependant, l'utilisation de telles charges peut avoir un effet néfaste sur d'autres propriétés électriques et mécaniques du matériau. Kurtz, M [51] dans le but de compléter l'investigation précédente, il a utilisé la technique de la roue de cheminement comme une première tentative pour simuler des processus cycliques environnementaux afin de mieux comprendre les performances des matériaux polymères sous différentes conditions environnementales, et pour bien évaluer les dynamiques de leurs surfaces et leur impact sur les performances électriques en fonction des changements environnementaux cycliques et de la sévérité de l'environnement. En revanche, cette étude a eu tendance à masquer les processus dynamiques de la surface des polymères. Gorur, R.S et al [52] en 1988, ils ont commencé à concevoir de petites chambres à brouillard salin afin d'évaluer les performances des matériaux et le profil des isolateurs. Une étude comparative du vieillissement de surface a été menée sous tension alternative dans ces chambres, en utilisant des échantillons de tiges cylindriques en caoutchouc de silicone vulcanisé à haute température (HTV) et en caoutchouc d'éthylène propylène diène monomère (EPDM) contenant diverses quantités de trihydrate d'alumine (ATH) et/ou des charges de silice. Cette étude a révélé que dans un brouillard à faible conductivité

(250 $\mu\text{S/cm}$), le caoutchouc de silicone a obtenu de meilleurs résultats que les échantillons EPDM, tandis que dans un brouillard à haute conductivité (1000 $\mu\text{S/cm}$), l'ordre des performances a été inversé. D'après les résultats de test de surface réalisées par l'ESCA (spectroscopie électronique pour analyse chimique), les auteurs ont démontré que l'hydrophobie du caoutchouc de silicone, malgré l'accumulation de contamination en surface, peut être attribuée à la migration de chaînes polymères de faible poids moléculaire et/ou de fluides mobiles, tels que l'huile de silicone. Les chercheurs ont fait d'énormes progrès en simulant des conditions environnementales sévères pour étudier l'impact du vieillissement des matériaux isolants. Cependant, il est essentiel d'inclure des cycles environnementaux pour se rapprocher davantage des conditions réelles auxquelles les isolateurs des lignes aériennes sont confrontés. Van Der Huir et al [53] ainsi que Fini, G.P et al [54] ont pris en compte le cyclage dans leurs tests dans la chambre à brouillard pour améliorer encore cette analyse et permettre de fournir des informations supplémentaires sur les performances des isolateurs polymères dans des conditions environnementales différentes. Malgré leur utilité, ces tests n'ont pas été adéquats pour évaluer pleinement les performances des isolateurs polymères ni pour prédire leur comportement dans des environnements spécifiques sur site. Donc, des recherches supplémentaires sont nécessaires afin d'approfondir cette problématique. Schneider et al [55] ont constaté qu'il était nécessaire de mettre au point une méthode d'essai de vieillissement accéléré afin de caractériser les modes de dégradation et de prédire la durée de vie des isolateurs polymères dans les réseaux de transmission d'énergie électrique. Ils ont donc développé une méthode d'essai utilisant une chambre à brouillard salin pour simuler les conditions de vieillissement auxquelles ces isolateurs sont soumis. L'objectif était de comprendre le mécanisme de vieillissement accéléré de ces isolateurs dans des conditions environnementales extrêmes. Les résultats de cette étude mettent en évidence l'effet du vieillissement accéléré sur les propriétés électriques et mécaniques des isolateurs polymères. Les auteurs ont discuté les implications de ces résultats pour la conception et l'exploitation des réseaux de transmission d'électricité, ainsi que les mesures préventives qui peuvent être prises pour prolonger la durée de vie et améliorer la fiabilité des isolateurs polymères. H. Zhang et R. Hackam [56], se sont intéressés en l'étude de l'influence des paramètres du brouillard sur le vieillissement du caoutchouc de silicone. Des tests ont été réalisés sur des isolateurs en caoutchouc de silicone vulcanisé à haute température (HTV) qui ont été placés dans une chambre de brouillard. L'objectif était d'étudier l'effet de différents paramètres du brouillard, tels que la pression de l'air comprimé, le débit d'eau alimentant les buses pour former le brouillard, ainsi que la taille et la vitesse des gouttelettes de brouillard qui frappent la surface des isolateurs. Ces tests ont permis d'évaluer l'impact de ces paramètres sur la performance électrique de ces isolateurs ainsi que sur leur vieillissement. A la fin de ces tests les isolateurs sont

caractérisés par la mesure de rugosité de la surface, du courant de fuite et de l'hydrophobicité. Les auteurs ont observé que la résistance de la surface des isolateurs est sensible aux paramètres du brouillard, tels que l'air comprimé et le débit d'eau, lorsqu'ils sont élevés, entraînent une diminution de la résistance de surface. Les auteurs ont remarqué que lorsque les isolateurs sont hors tension, la rugosité de la surface ne change pas beaucoup, même si la durée de vieillissement augmente. En revanche, lorsque l'isolateur est soumis à une tension alternative en présence de brouillard salin, la rugosité de la surface augmente régulièrement avec l'augmentation du temps de vieillissement. L'étude sur le développement du courant de fuite sur les isolateurs a révélé que ce courant dépend fortement des paramètres du brouillard. En effet, lorsque la formation de brouillard est modérée, le courant de fuite est faible, tandis qu'il est important dans le cas contraire. Les chercheurs ont également observé que l'angle de contact de la surface de l'isolateur avec l'eau varie en fonction des paramètres du brouillard, que l'isolateur soit sous tension ou hors tension. Ainsi, dans des conditions de brouillard intense, la réduction de l'angle de contact est plus prononcée que dans des conditions de brouillard modéré. Y. Zhu, K. Haji, H. Yamamoto [57] ont étudié le phénomène de vieillissement des isolateurs polymère causé par le champ électrique intensifié entre les gouttes d'eau qui conduit à la décharge par effet couronne sur leurs surfaces. Les auteurs ont adopté un système d'électrodes multiples aiguilles-plan montré à la figure I. 14.

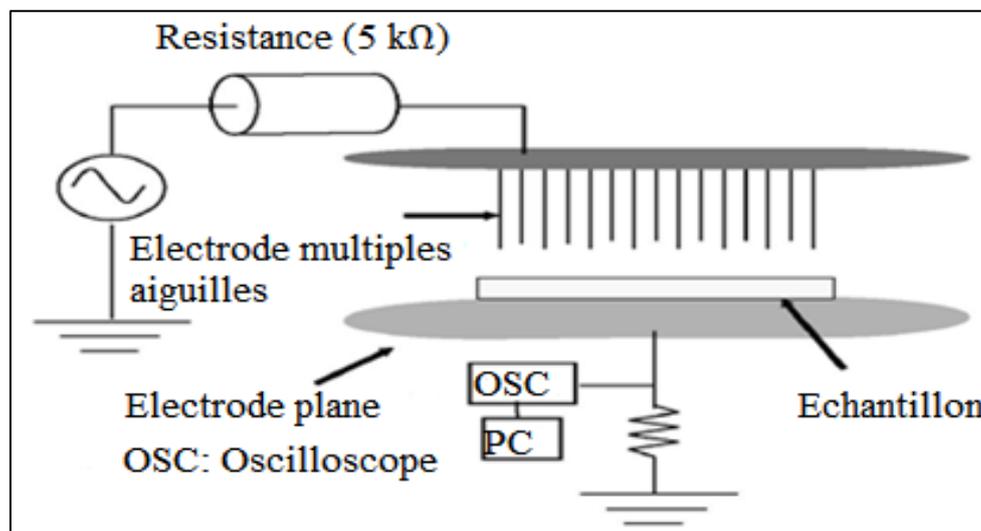


Fig. I. 14 : Schéma du dispositif expérimental [57]

La tension de 16 kV est appliquée pour générer une décharge par effet couronne. Un échantillon de HTV-SR a été utilisé, et la longueur de l'intervalle entre deux électrodes était de 1 cm. La durée du test été de 24 heures. Par la suite, ils ont examiné l'échantillon vieilli en utilisant les techniques suivantes : MEB, FTIR, TG-DTA et GC / MS.

D'après les micrographies de l'échantillon prises par le microscope électronique à balayage (MEB)

avant et après le traitement par décharge couronne, les auteurs ont constaté que la surface était extrêmement lisse avant le test, cependant, la surface de l'échantillon traité par décharge couronne a vieilli et changé pour devenir rugueuse. Cette dégradation physique peut réduire la résistance mécanique du matériau. Les spectres FTIR de caoutchouc de silicone (SR) vieilli et non vieilli ont montré que les liaisons chimiques suivantes peuvent être détectées dans le SR non vieilli : liaisons CH-CH₃, des liaisons Si-CH et des liaisons Si-O-Si. Cependant le spectre de SR vieilli contient des groupes OH hydrophiles et C = O apparus après le traitement par effet couronne. Ceci est attribué au fait que l'énergie des photons de la décharge couronne est plus grande que celle de la liaison Si-O-Si (8,3 eV) et celle de Si-CH₃ (4,5 eV). Ce qui fait, les chaînes latérales et les squelettes siliconés de SR ont été coupés par l'impact des photons émis pendant la décharge couronne. Comme les réactions d'auto-oxydation se produisent généralement sur la surface du polymère en présence d'oxygène, ceci peut être accéléré par la décharge couronne appliquée. Les résultats obtenus de la méthode TG-DTA qui est une technique utilisée pour l'étude des phénomènes chimiques et physiques du matériau en fonction de la température ont révélé une perte de poids de l'échantillon vierge en fonction de la température qui est due essentiellement à l'oxydation et à la décomposition. Cependant, dans le cas de l'échantillon vieilli par la décharge couronne, la perte de poids était attribuable à la présence de OH hydrophiles dans l'échantillon. Les groupes OH qui sont des sous-produits du vieillissement, ont entraîné la déshydratation de l'échantillon vieilli. Les groupes hydrophiles peuvent se former à la place des groupes hydrophobes CH₃ à la surface du SR vieilli, ce qui diminue la propriété hydrophobe des matériaux polymères. De plus, les groupes hydroxyles peuvent se former par auto-oxydation. Ces groupes hydroxyles absorbent l'eau physiquement près de la surface dans l'environnement. Cela est désavantageux pour les performances d'isolation du SR lorsqu'il est utilisé comme matériau isolant dans des conditions humides. Y. Kurimoto et al [58] ont étudié la variation du courant de fuite causée par la perte d'hydrophobicité des échantillons en caoutchouc de silicone inclinés de 60° par rapport à l'horizontale lors d'un essai de chute dynamique (DDT). Les auteurs ont clarifié la relation entre le processus de la détérioration ou la perte de l'hydrophobie de l'isolation et la forme d'onde de courant de fuite circulant le long de sa surface. Ils ont classé les conditions de surface des échantillons en trois catégories depuis le début de l'essai jusqu'à la fin (Perte totale de l'hydrophobie). Ils ont remarqué que la forme d'onde et l'hydrophobie observées dans ces conditions se caractérisaient par des décharges d'impulsions périodiques lorsque l'hydrophobie était maintenue, tandis qu'un seul signal d'impulsion était généralement observé lors de l'écoulement d'une gouttelette, et que des impulsions multiples étaient rarement observées. Cependant, lorsque l'hydrophobie s'est détériorée, de petites gouttelettes d'eau sont adhérentes à la surface des échantillons et la forme d'onde du courant de fuite révèle des

décharges d'impulsion lors de l'écoulement de ces gouttelettes se produisant à plusieurs reprises en un peu de temps. A la fin de l'analyse, la lumière de décharge commence à être observée en continu, quel que soit le moment où les gouttelettes s'écoulent juste avant la perte d'hydrophobie. Les auteurs ont alors considéré qu'une fine couche d'humidité s'était formée sur la surface, ce qui a conduit à une circulation continue de courant de fuite. G. P. Bruce et al [59] ont analysé la performance de différents échantillons en caoutchouc de silicone en les soumettant à des essais de cheminement sur un plan incliné de 45° par rapport à l'horizontale. L'analyse a été réalisée sur des échantillons en silicone provenant de trois formulations différentes disponibles commercialement, soumis à trois niveaux de tension continue pour les deux polarités.

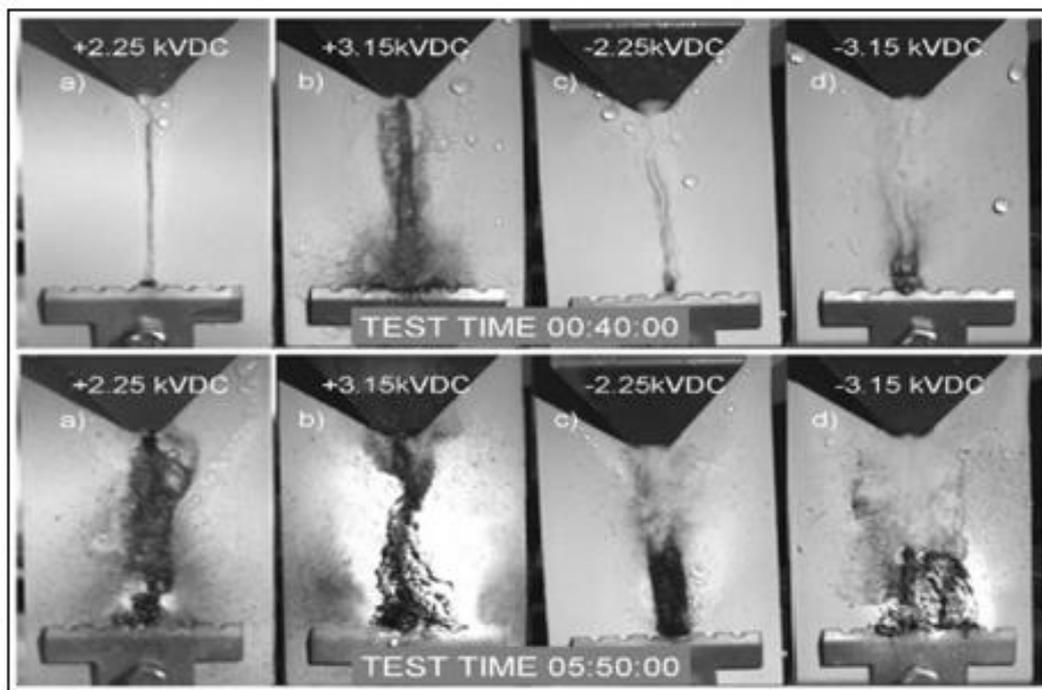


Fig. I. 15 : Comparaison d'une dégradation de la silicone sous champ continu positif et négatif [59]

Les auteurs ont constaté que la dégradation de la surface isolante est fortement dépendante de la polarité de la tension appliquée (Fig. I. 15), tels que les essais en polarité positive présentent des valeurs de courant de fuite et de pics plus élevés par rapport à l'essai négative équivalent, ce qui conduit à un degré plus élevé de dommages de surface. Ils ont remarqué aussi que l'érosion de la surface commence toujours à l'électrode inférieure et se propage vers l'électrode supérieure comme le montre la figure I. 15. Ils ont remarqué que les différentes propriétés des matériaux peuvent affecter la contrainte électrique dans un essai, de sorte que la nature des décharges de surface change.

S. Thong-Om et al [60] ont évalué le degré de détérioration des isolateurs polymères sous brouillard salin et haute tension. Pour cela, ils ont effectué l'essai de vieillissement sous brouillard salin sur des

échantillons en caoutchouc de silicone HTV, ayant trois configurations différentes (ailettes droites, ailettes alternées, et ailettes inclinées et alternées). Les tests ont été effectués dans une chambre de brouillard pendant une période de 1000 heures sans interruption. Le degré de contamination, la réduction de l'hydrophobicité et la mesure de la dureté, ont été utilisés comme techniques d'analyse des dommages physiques, pour évaluer le degré détérioration de surface. Les chercheurs ont observé durant le vieillissement, l'apparition d'arcs électriques sur les bandes sèches et des décharges couronnes sur la surface extérieure du tronc de tous les divers types d'échantillons (Fig. I. 16).

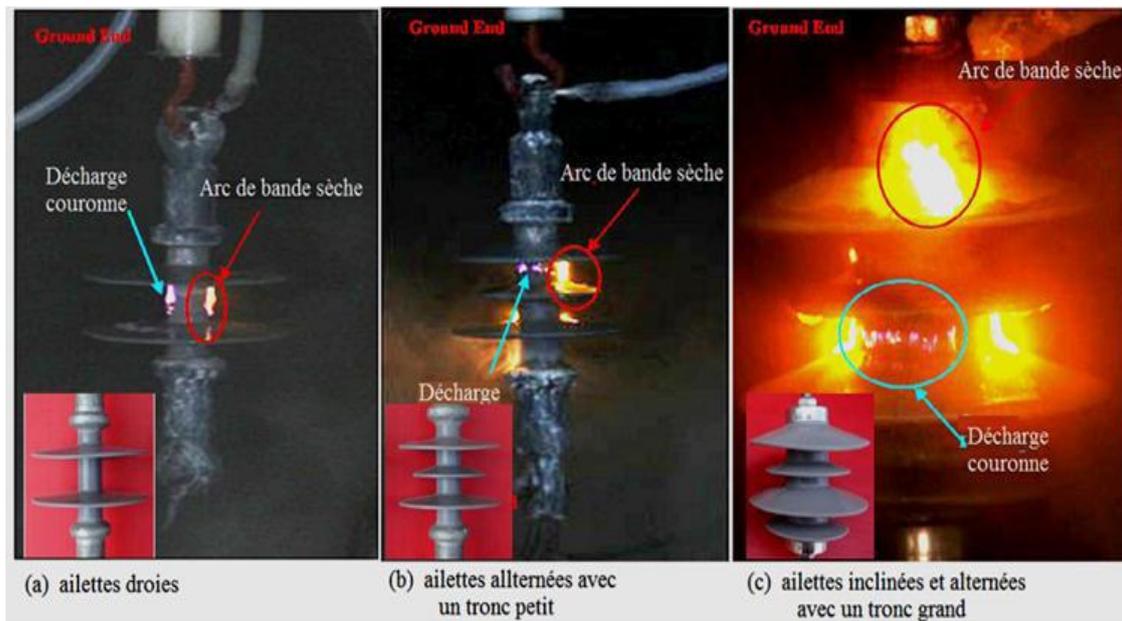


Fig. I. 16 : Activité des décharges sur un isolateur en silicone [60]

De plus, une érosion et un cheminement de surface ont été observés sur la surface du tronc de tous les différents types d'échantillons. Cependant, l'érosion de surface la plus sévère a été observée sur les échantillons ayant des ailettes droites, par rapport aux deux autres types d'échantillons.

Les résultats de l'analyse montrent aussi que les échantillons testés présentent une diminution de leur hydrophobicité par rapport à un échantillon neuf, ce qui indique une dégradation et une détérioration de leur surface après vieillissement. Mais, aucune différence significative dans la réduction de l'hydrophobie de surface n'a été observée lors de la comparaison de trois types d'échantillons. Par contre, les résultats de mesures de la dureté de surface, de l'analyse ATR-FTIR et ceux de mesure du courant de fuite ont confirmé la différence de degré de détérioration de la surface de l'isolant polymère en caoutchouc de silicone lors du test de vieillissement au brouillard salin d'une configuration à une autre des échantillons. Dipankar Ghosh et Dipak Khastgir [61] ont étudié la dégradation des isolateurs polymères à haute tension et l'estimation de leur durée de vie en fonction de processus de vieillissement accéléré. La durée de vie est estimée à partir de l'évolution des propriétés mécaniques

en mesurant l'élongation à la rupture (EB) et la détermination de l'hydrophobicité de la surface des isolateurs polymères en service exposée à un vieillissement naturel pendant une durée allant de 1 à 9 ans. Cette durée de vie a été comparée à celle d'un nouvel isolateur polymère soumis à des tests de vieillissement accélérés tel que le vieillissement aux UV pendant 9h dans une chambre UV avec un rayonnement de haute intensité et un vieillissement thermique effectué jusqu'à 7 jours à des températures de 150, 160 et 170 °C sous chaleur sèche dans un four de vieillissement. D'après leur investigation les auteurs ont remarqué une détérioration lente mais régulière des propriétés des isolateurs pendant le service. A partir de vieillissement naturel, la durée de vie estimée d'après l'EB était de 23 à 24 ans, alors que lorsqu'elle est mesurée à partir du changement d'hydrophobie, la durée de vie moyenne est d'environ 20 ans, avec une valeur limite d'angle de contact de 90°. Ce qui veut dire que ces isolateurs vieillis peuvent encore offrir quelques années de durée de vie supplémentaires. Etant donné que l'estimation de la durée de vie à partir de la mesure de l'angle de contact est très affecté par les décharges électriques, les rayons UV, le vieillissement thermique et les pluies de haute intensité pendant le service, les chercheurs ont constaté que l'estimation de la durée de vie à partir de l'EB est plus fiable que celle à partir de la mesure de l'angle de contact. Ils ont également démontré que la durée de vie probable, estimée à partir de conditions de vieillissement accéléré sous un rayonnement UV et à haute température est considérablement plus courte que celle obtenue à partir d'un vieillissement naturel. Cela est dû aux différents processus de dégradation des isolateurs qui se produisent pendant le vieillissement naturel ou accéléré, qui sont régis par deux mécanismes distincts. Dans leur étude, Rashid A et al [62] ont visé à trouver un moyen pour améliorer les caractéristiques de vieillissement et la durée de vie des isolateurs composites. Les chercheurs ont préparé des échantillons purs de caoutchouc de silicone vulcanisé à haute température (HTV-SiR) et hybrides en y ajoutant des nano/micro-silices avec des pourcentages variables de 2%, 4%, 6% et 8% de nano-silice, ainsi qu'une proportion constante de 20% de micro-silice. Ces échantillons ont été soumis au vieillissement accéléré sous multiple contraintes tels que les radiations UV, la chaleur, la pluie acide, le brouillard et l'humidité dans une chambre de vieillissement pendant 9000 h. Les caractéristiques de vieillissement sont ensuite analysées à l'aide de différentes techniques telles que le microscope électronique à balayage SEM, la détermination du courant de fuite I_c , le FTIR, la classification de l'hydrophobie HC et la résistance à la rupture. Les résultats obtenus ont révélé que l'ajout d'un mélange de micro et nano silices aux échantillons HTV-SiR a permis d'améliorer les propriétés électriques et mécaniques des échantillons hybrides, ainsi que leur résistance au vieillissement sauf dans le cas de l'échantillon avec la concentration 8% de nano-silice. Les auteurs ensuite, ont constaté que l'ajout de nano-silice de plus de 4% ne contribue pas à l'amélioration des caractéristiques de vieillissement. Par conséquent, les

échantillons hybrides avec les concentrations 2% et 4% de nano-silice sont ceux qui présentent des caractéristiques de vieillissement supérieures pour l'application des isolateurs haute tension.

I. 5 Conclusion

La synthèse sur les travaux réalisés par plusieurs investigateurs ont démontré que les isolations en silicone sont des choix de premier ordre pour les applications hautes et moyennes tensions en raison de leur structure moléculaire. Le bon choix du matériau isolant est crucial pour garantir des performances optimales, notamment sous pollution. Les isolateurs en silicone offrent des propriétés électriques, mécaniques et thermiques de haute qualité, ce qui en fait des isolants fiables pour diverses applications.

Il a été constaté que de nombreuses études ont été menées sur l'étude du comportement de gouttelettes d'eau sous l'effet d'un champ électrique. Il apparaît clairement qu'une gouttelette d'eau soumise à un champ électrique peut exhiber plusieurs réponses très complexes. Les théories portant sur la déformation de la gouttelette ont été élaborées dans les deux cas limites de gouttelettes conductrice et purement diélectrique. Les mécanismes qui gouvernent la coalescence des gouttelettes ont été mis en lumière.

L'influence de divers arrangements de ces gouttes d'eau sur des isolations en position horizontale et sous différentes contraintes de tension sur leur performance électrique a fait l'objet de plusieurs investigations.

Le vieillissement des isolateurs en silicone a attiré l'attention de plusieurs chercheurs scientifiques et experts de l'industrie. Cependant, leurs recherches et analyses effectuées au laboratoire se concentrent sur l'étude de la corrosion et de la dégradation des isolateurs causés par la circulation des courants de fuite sur leurs surfaces sous l'effet des conditions atmosphériques agressives tels que le brouillard salin, les rayons UV et la température. En revanche, l'effet de l'inclinaison des plaques en silicone sur leur vieillissement sous l'effet du brouillard salin n'a pas été suffisamment étudié et nécessite d'autres recherches ultérieures.

CHAPITRE II : ISOLATEURS POLYMERIQUES ET LEUR VIEILLISSEMENT

II. 1 Introduction

Les isolateurs composites sont de plus en plus utilisés par les compagnies d'électricité à travers le monde dans les réseaux de transport de l'énergie électrique. L'utilisation massive des isolateurs polymériques est liée à leurs avantages par rapport aux isolateurs traditionnels en porcelaine et céramique. Notamment : la légèreté, une bonne résistance mécanique, une résistance aux actes de vandalisme, de meilleures performances en présence de la pollution et dans les conditions humides et une bonne résistance au vieillissement. Cependant, lorsque ces isolateurs sont soumis à des contraintes telles que la pollution atmosphérique et le vieillissement, leur performance et leur fiabilité sont significativement affectées.

Dans ce chapitre, la première partie est consacrée au développement à travers le temps des isolateurs composites et leur structure. Ensuite, les principales caractéristiques des surfaces composites sont définies et quelques notions sur la mesure de leur caractère hydrophobe sont données pour pouvoir ensuite décrire leur comportement sous pollution. La dernière partie porte sur les mécanismes de vieillissement de ces surfaces.

II. 2 Les isolateurs polymériques

II. 2. 1 Développement à travers le temps

Les résines époxy bisphénol et cycloaliphatiques, ont été les premiers polymères utilisés pour l'isolation électrique. Elles ont été commercialisées à partir du milieu des années 1940 [63].

Ces polymères, qui étaient les premiers à être utilisés pour l'isolation électrique, sont à ce jour utilisés pour la fabrication d'isolateurs électriques pour les applications intérieures. Les époxy cycloaliphatiques (CE) ont fait leur apparition en 1957 et ont été introduits en Angleterre pour l'isolation extérieure en 1963 [64]. Dans les années 1960, les isolateurs de classe de distribution (CE), commercialisés pour la première fois aux États-Unis sous la marque GEPOL, Cependant, ils ont connu un échec en raison de dommages de surface et de perforations après peu de temps de leur mise en place dans des environnements extérieurs [65]. Et depuis, des améliorations significatives de leurs performances électriques ont été réalisées grâce à l'introduction de nouvelles formulations de CE et qui été utilisé plus tard dans des douilles de disjoncteur de station expérimentales de 500 kV, dans des douilles de 115 kV dans les années 1970, et pour des isolateurs de suspension par Transmission Développement Limited (TDL) d'Angleterre. Ces derniers utilisaient des ailettes inclinées pour fournir un lavage naturel de la contamination. À partir du milieu des années 1960, les isolateurs CE ont été

testés jusqu'à une tension de service de 400 kV en tant qu'isolateurs de suspension/contrainte au Royaume-Uni. En raison de divers facteurs, dont une performance médiocre à basse température et une réduction de poids insuffisante, le CE n'a pas été adopté aux États-Unis pour les isolateurs de suspension haute tension extérieurs [66].

Le développement des isolateurs polymères extérieurs pour les lignes de transmission a commencé dès 1964, en Allemagne, suivi par d'autres fabricants en Angleterre, France, Italie et aux États-Unis. Des unités pour les essais sur le terrain ont été mises à disposition en Allemagne en 1967. Entre la fin des années 1960 et le début des années 1970, la première génération d'isolateurs polymères commerciaux pour lignes de transmission a été introduite par les fabricants et l'utilisation des isolateurs polymères sur les lignes de transmission est devenue courante dans les années 1980 [67].

II. 2. 2 Définition

Un isolateur composite, également appelé isolateur polymère, est un dispositif utilisé notamment dans les systèmes électriques à haute tension pour isoler et fournir un support pour les lignes aériennes de transmission et de distribution. Les compagnies d'électricité à travers le monde optent de plus en plus pour ce type d'isolateurs dans leurs installations extérieures, en raison de leurs nombreux avantages par rapport aux isolateurs traditionnels en céramique ou en verre. Ces avantages incluent leur légèreté, leur résistance mécanique élevée par rapport à leur poids, leur capacité à résister aux actes de vandalisme, leurs performances supérieures en cas de pollution et dans des conditions humides. Cette tendance à l'utilisation massive des isolateurs polymériques a conduit à de nombreuses études visant à améliorer et à optimiser leurs performances en service [68].

II. 2. 3 Structure des isolateurs composites

Les isolateurs composites sont conçus en combinant différents matériaux pour répondre aux diverses fonctions requises. Ils sont composés d'un noyau isolant en matériau approprié, d'un revêtement extérieur qui est une enveloppe entourant la tige qui comporte les ailettes (ou jupes) et d'une partie métallique attachée au noyau. La figure II. 1 montre les différentes parties d'un isolateur composite.

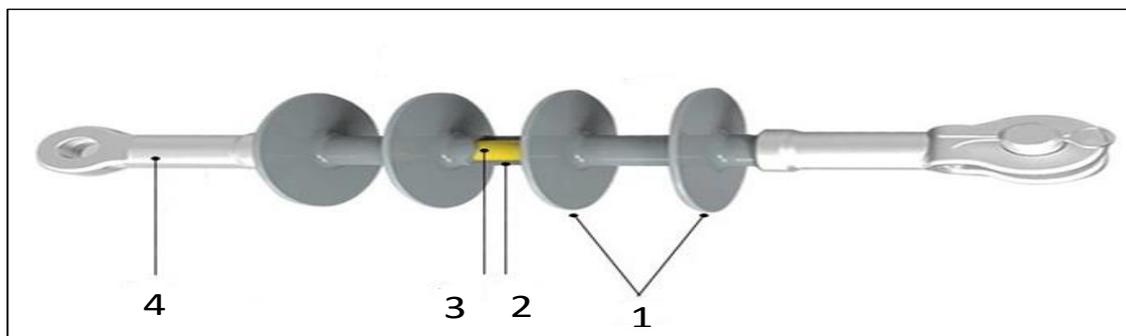


Fig. II. 1 : Structure d'un isolateur composite, 1 : Gaine en silicone, 2 : Epaisseur de la gaine > 3mm, uniforme a la norme CEI, 3 : Noyau en fibre de verre époxy, 4 : Armature métallique.

II. 2. 3. 1 Le noyau

Le noyau d'un isolateur est l'élément mécanique porteur de l'isolateur. Il est composé d'une tige en résine époxy renforcée de 70 à 75% des fibres de verre en poids. Le diamètre des fibres est compris entre 5 à 20 μm . Le noyau est conçu pour remplir deux fonctions principales : il est à la fois la partie isolante principale de l'isolateur et l'élément de support principal contre les contraintes mécaniques telles que les forces de traction, de flexion ou de compression [68].

II. 2. 3. 2 Le revêtement

Le revêtement est la partie isolante extérieure de l'isolateur. Il est généralement en matière synthétique à base de silicone ou en EPDM. Le revêtement assure la ligne de fuite nécessaire et protège le noyau des dommages causés par des éléments extérieurs tels que l'eau, les rayons UV et les décharges partielles. Une extension généralement en forme de disque appelée jupe ou ailette fait partie du revêtement et sert à augmenter la ligne de fuite de l'isolateur et en conséquent l'amélioration de la performance et la fiabilité de l'isolateur en empêchant les décharges électriques et en assurant une isolation efficace. Il peut être fabriqué à partir de divers matériaux, notamment des élastomères silicone, l'éthylène et le propylène, ainsi que des résines comme l'époxy cyclo-aliphatique [68].

Une étude menée par le groupe de travail 22.03 de la CIGRE a révélé que la majorité des isolateurs composites utilisent les élastomères silicones comme matériau de revêtement et ils sont largement préférés dans les systèmes d'isolation extérieurs des réseaux de transmission et que L'EPDM et d'autres matériaux sont utilisés de manière marginale [69]. D'autres recherches ont également montré que les isolateurs en élastomère silicone présentent un comportement diélectrique supérieur à ceux en EPDM. En effet, les surfaces en élastomère de silicone récupèrent plus rapidement leur hydrophobicité que celles en EPDM [70-72].

II. 2. 3. 3 Les armatures métalliques

Elles sont fabriquées généralement en acier forgé galvanisé à chaud et sont reliées par un sertissage coaxial pour garantir une grande résistance mécanique et empêcher toute infiltration d'eau. La conception et la forme des pièces d'accrochage jouent un rôle crucial dans la limitation des décharges couronnes, responsables de l'usure prématurée de l'enveloppe de l'isolateur.

II. 2. 4 Avantages et inconvénients des isolateurs composites

Connaitre les avantages et les inconvénients des isolateurs composites est très essentiel pour prendre une décision éclairée lors de la mise en place d'un système d'isolation électrique.

Les isolateurs polymères utilisés dans les lignes de transmission offrent des avantages significatifs par rapport aux isolateurs en porcelaine et en verre spéciaux, notamment dans les lignes de transmission haute tension. En raison des nombreux avantages des isolateurs composites par rapport aux isolateurs traditionnels, leur utilisation est en constante augmentation à l'échelle mondiale.

II. 2. 4. 1 Avantages

Les avantages de l'utilisation généralisée des isolateurs composites varient considérablement entre les fournisseurs d'énergie électrique. Les raisons les plus fréquentes peuvent se résumer comme suit [73]:

- Poids réduit, pouvant aller jusqu'à 80 % par rapport aux modèles traditionnels, permet une conception plus économique des pylônes. De plus, cela évite le recours à des grues lourdes pour leur installation, ce qui permet des économies de coûts significatives.
- Faible énergie de surface qui le rend hydrophobe en permanence, même en cas de conditions humides telles que le brouillard, la rosée et la pluie. Cela permet d'éviter les courants de fuite élevés, réduisant ainsi la distance de fuite équivalente de 30 % par rapport à la porcelaine et au verre.
- Une capacité de tension de tenue supérieure à celle des isolateurs en porcelaine et en verre. Avec une distance d'arc à sec inférieure de 30 % par rapport aux isolateurs en porcelaine standard à 230 kV, l'isolateur composite a démontré une résistance à l'amorçage à des niveaux de tension supérieurs de 30% par rapport à la porcelaine, même dans des conditions de contamination extrêmes.
- Les coûts d'entretien sont réduits en évitant le lavage fréquent nécessaire pour les isolateurs en céramique et en verre dans les environnements fortement contaminés. Cela représente une économie de 36 à 44 % par rapport à des isolateurs en verre trempé équivalents.
- Une excellente propriété hydrophobe qui empêche la dissolution des sels solubles présents dans la pollution et empêche la formation d'un courant de fuite.
- Moins sensible à la corrosion (moins de pièces métalliques exposées).

II. 2. 4. 2 Inconvénients

Les principaux désavantages d'utilisation des isolateurs polymères composites sont [74] :

- Les isolateurs polymères organiques sont plus susceptibles de subir des changements chimiques entraînant l'érosion et le cheminement du matériau, ce qui peut conduire à l'échec d'isolateurs.

- La difficulté de prédire la durée de vie des isolateurs en polymère à long terme en raison de l'incertitude de leur fiabilité, notamment dans des environnements fortement pollués, où elle peut être d'environ 20 ans.
- Les oiseaux endommageant le caoutchouc en le picorant représentent un sérieux problème pour les isolateurs en polymère.
- Les modifications chimiques des isolateurs composites en polymère causées par les intempéries peuvent entraîner des problèmes de surface.

II. 3 Caractéristiques des surfaces isolantes polymères

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

L'hydrophobicité d'une surface est déterminée par l'angle de contact (θ) [75], qui est l'angle entre la tangente à une goutte de liquide déposée sur la surface et la surface solide. Cet angle permet de déterminer si la surface est hydrophobe (grand angle, faible énergie de surface) ou hydrophile (petit angle, grande énergie de surface) quel que soit la taille de la goutte [76].

Les phénomènes de mouillage se manifestent lorsque les trois phases solide, liquide et gazeuse entrent en contact. En 1805, Young [77] a développé une équation qui définit la relation entre les tensions superficielles et l'angle de contact, tel qu'indiqué dans la figure II. 2 par l'équation II. 1, sous l'hypothèse que la surface isolante est idéale, plate, homogène, inerte et lisse [78].

$$\cos \theta_Y = \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}} \quad (1)$$

Avec :

θ : Angle de contact ;

γ_{ls} : Tension interfaciale liquide - solide ;

γ_{sv} : Tension interfaciale solide - vapeur ;

γ_{lv} : Tension interfaciale liquide - vapeur.

Lorsque l'angle de contact est inférieur à 90° , le fluide s'étale sur une grande surface, indiquant que le matériau est hydrophile (Fig. II. 3a). Un angle de contact supérieur à 90° signifie généralement que le fluide forme une goutte liquide compacte pour minimiser son contact avec la surface, ce qui correspond au phénomène d'hydrophobicité (Fig. II. 3b). En revanche, un angle de contact supérieur à 150° , indique que la surface est superhydrophobe (Fig. II. 3c) [79].

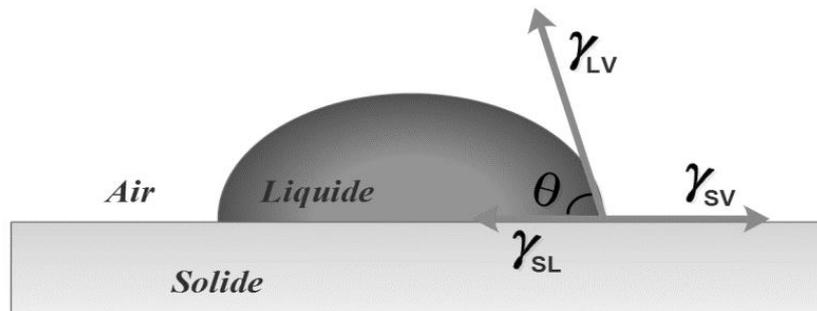


Fig. II. 2 : Angle de contact d'une goutte d'eau sur une surface solide [79]

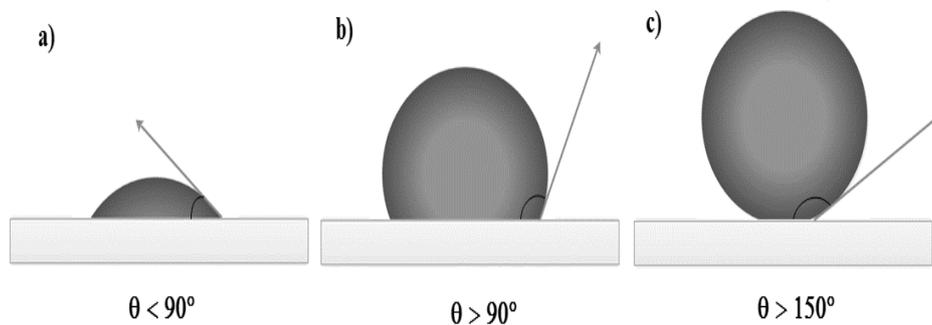


Fig. II. 3 : Comportements d'une goutte d'eau sur (a) une surface hydrophile ($\theta < 90^\circ$), (b) une surface hydrophobe ($\theta > 90^\circ$), (c) une surface superhydrophobe ($\theta > 150^\circ$) [79]

II. 3. 2 hydrophobicités des isolateurs composites

La mouillabilité d'une surface est décrite par son degré d'hydrophobicité. Trois méthodes couramment utilisées pour évaluer ce caractère hydrophobe sur une surface diélectrique composite : l'angle de contact, la tension de surface et la pulvérisation ou la méthode de classification de l'hydrophobicité. Selon la norme IEC 62073 [78], les termes hydrophobie et hydrophilie correspondent respectivement à un faible et un fort niveau de mouillabilité.

La méthode de pulvérisation est appliquée pour la mesure au laboratoire et pour la mesure sur site des isolants [78, 80]. Cependant, les deux autres méthodes sont appliquées uniquement au laboratoire car elles nécessitent des méthodes et des appareils plus sophistiqués.

II. 3. 2. 1 Classification de l'hydrophobicité des surfaces

La méthode de classification de l'hydrophobicité a été développée par Gubanski et Hartings [81]. Pour l'utiliser, il suffit d'avoir un pulvérisateur capable de produire une fine brume. Le pulvérisateur est rempli avec de l'eau du robinet sans aucun produit chimique. La pulvérisation est effectuée pendant 20-30 secondes à une distance de 25 ± 10 cm. La classe d'hydrophobicité est évaluée dans les 10 secondes suivant la pulvérisation en identifiant la présence de mouillage sur l'isolateur, correspondant

à une valeur de 1 à 7. Les critères pour chaque classe sont détaillés dans le tableau II.1 et une photo montrant l'aspect de la surface du polymère est illustrée en figure II. 4.

Tab II. 1 : Critères de classification de l'hydrophobicité des surfaces

CH	Description
1	Les gouttes formées sont discrètes. $\theta \approx 80^\circ$ ou plus pour la majorité des gouttes
2	Les gouttes sont discrètes. $50^\circ < \theta < 80^\circ$ ou plus pour la majorité des gouttes
3	Des gouttelettes discrètes sont formées. $20^\circ < \theta < 50^\circ$ pour la majorité des gouttelettes. Elles ne sont plus circulaires.
4	Zones complètement mouillées $< 2 \text{ cm}^2$. Elles couvrent moins de 90 % de la zone d'essai. Des gouttes discrètes et des traces mouillées sont observées.
5	Certaines surfaces complètement mouillées $> 2 \text{ cm}^2$, qui couvrent $< 90 \%$ de la surface testée.
6	Les zones mouillées couvrent plus de 90 % de la zone d'essai.
7	Film d'eau continu sur toute la zone testée.

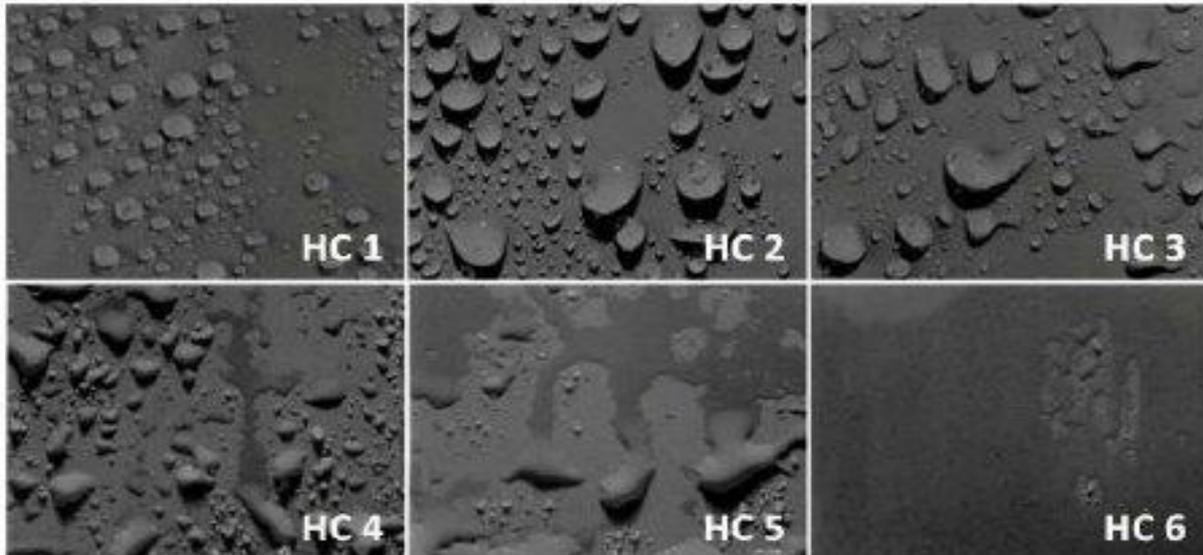


Fig. II. 4 : Classes d'hydrophobicité suivant le guide STRI [82]

II. 3. 2. 2 Perte et récupération de l'hydrophobicité des surfaces polymères

La performance exceptionnelle des isolateurs non-céramiques en cas de pollution est attribuable à la capacité hydrophobe de la surface du polymère en présence d'humidité et de la contamination. Au fil du temps, les contraintes électriques et environnementales combinées accélèrent le vieillissement des isolateurs composites et conduisent à leur altération à long terme, entraînant une perte d'hydrophobie et une transition vers l'hydrophilie sous l'effet des arcs au niveau des bandes sèches. Cette perte

d'hydrophobie affecte les propriétés diélectriques de la surface mouillée, telles que la tension de contournement, les charges superficielles et les courants de fuite. Pour garantir la durabilité des isolateurs polymères et optimiser leurs performances, plusieurs investigations ont été menées sur la perte et la récupération de leur l'hydrophobicité [83 - 85].

II. 3. 2. 2. 1 Perte de l'hydrophobicité

Les performances électriques des matériaux polymères, se dégradent rapidement au fil du temps en raison de la perte progressive de leurs propriétés diélectriques. Le vieillissement et les décharges surfaciques sont identifiés comme les principales causes de la diminution de l'hydrophobicité des matériaux composites. Ainsi, les isolations polymères utilisés dans ces conditions deviennent hydrophiles et se rapprochent des caractéristiques d'une isolation en céramique [86, 87].

II. 3. 2. 2. 2 Récupération de l'hydrophobicité

Après des recherches approfondies en laboratoire, il a été observé que les matériaux polymères peuvent retrouver leur hydrophobicité même après avoir été endommagés par le passage des décharges électriques. De plus, ils sont capables de transférer cette hydrophobicité aux particules de pollution présentes à leur surface et de retrouver leurs propriétés électriques [88, 89]. Ce processus de récupération de l'hydrophobicité est principalement dû à la diffusion de polymères à faible poids moléculaire de l'intérieur vers la surface [87, 90, 91]. Par ailleurs, une autre méthode de récupération d'hydrophobicité consiste en la rotation du squelette de silicone pour réorienter les groupes méthyle hydrophobes vers la surface [92].

II. 3. 3 Rigidité diélectrique

La rigidité diélectrique d'un matériau isolant est la valeur du champ électrique maximale à laquelle il peut être soumis avant de subir un claquage et une perforation, empêchant ainsi toute nouvelle application de tension. Selon la norme [91], la rigidité diélectrique d'un matériau est définie comme le rapport entre la tension de claquage et la distance entre les électrodes sous tension dans les conditions d'essai spécifiées.

II. 3. 3. 1 Rigidité diélectrique transversale

Le champ électrique appliqué est perpendiculaire aux surfaces principales du matériau isolant et dépend de divers paramètres expérimentaux, notamment des phénomènes extérieurs au solide [92]. Cette propriété est appelée rigidité diélectrique pratique. Lorsque l'effet de ces facteurs externes peut être complètement éliminé, on parle de rigidité intrinsèque.

II. 3. 3. 2 Rigidité diélectrique longitudinale

La rigidité de l'isolant dans ce cas dépend fortement de son état de surface tel que, la sécheresse et la propreté [92]. L'amorçage de l'espace entre les électrodes se produit initialement dans le milieu ambiant proche de la surface de l'isolation.

II. 3. 4 Résistance d'isolement

II. 3. 4. 1 Résistance transversale ou volumique (R_v)

Elle 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 aux propriétés internes du matériau.

II. 3. 4. 2 Résistance superficielle (R_s)

Elle correspond à celle qui intervient entre deux conducteurs sur une même surface isolante. C'est une notion qui fait intervenir outre la qualité du matériau, le dépôt d'une mince couche conductrice (humidité ou autre) à travers laquelle s'effectue en tout ou en partie la conduction.

II. 3. 4. 3 Résistance d'isolement (R_i)

Elle combine à la fois la résistance transversale et la résistance superficielle d'un matériau, de manière à refléter les conditions réelles d'utilisation des matériaux [93].

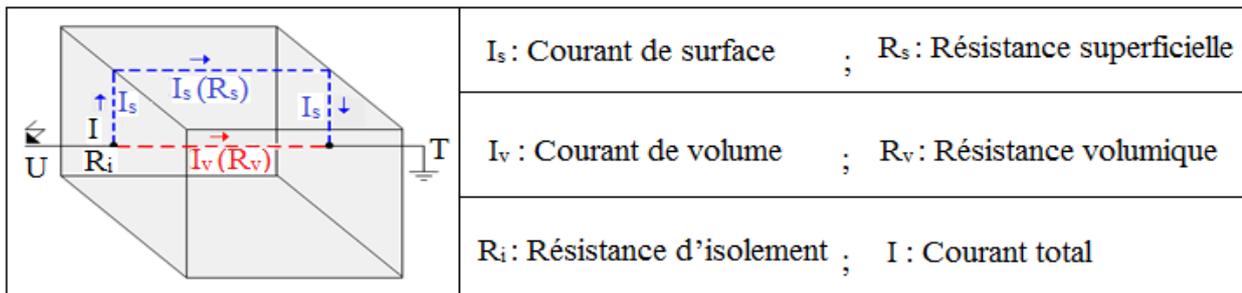


Fig. II. 5 : Résistances volumique, superficielle et d'isolement électrique d'un matériau isolant

II. 3. 5 Tension de contournement

La tension de contournement est le seuil minimum de tension à partir duquel l'arc électrique se forme et joint les deux électrodes.

Plusieurs facteurs peuvent influencer la tension de contournement, dont :

- La nature et la polarité de la tension,
- La longueur de la ligne de fuite de l'isolateur,
- La forme des électrodes,
- La conductivité volumique moyenne de la couche polluante,
- La répartition de la couche de pollution,
- Le profil de l'isolateur et les conditions climatiques.

II. 4 Pollution

La pollution est un problème majeur à prendre en compte lors de la conception de l'isolement des lignes de haute tension en raison de la formation de couches conductrices sur les isolateurs, ce qui peut réduire la résistivité superficielle et la tension de contournement des isolateurs [94].

II. 4. 1 Sources et nature de pollution

II. 4. 1. 1 Pollution naturelle

Il existe deux types de pollution naturelle qui peuvent être identifier [95, 96] :

II. 4. 1. 1. 1 Pollution marine

Les équipements et les installations électriques en bord de mer sont susceptibles d'être affectés par l'accumulation de sel provenant des embruns transportés par le vent. Lorsque cette couche de sel devient conductrice en se mélangeant à l'humidité de l'air, un courant de fuite peut se former, entraînant la possibilité de formation d'arcs électriques et de contournement total des isolateurs.

Cette pollution se distingue par le fait qu'elle est principalement composée de sels ioniques, en particulier le NaCl, et contient peu de matières insolubles [96, 97].

II. 4. 1. 1. 2 Pollution désertique

Dans les régions désertiques, les tempêtes de sable déposent progressivement une couche de pollution sur les isolateurs, contenant des sels humidifiés qui augmentent leur conductivité. Cela peut provoquer l'apparition soudaine d'un courant de fuite et d'arcs partiels, pouvant entraîner un contournement de l'isolateur [98].

II. 4. 1. 2 Pollution industrielle

Cette pollution provient de la dispersion de particules provenant d'usines métallurgiques, chimiques ou fonctionnant avec des combustibles fossiles, ainsi que des émissions des véhicules et des centrales thermiques [98, 99]. Ces particules se déposent sur l'isolateur sous forme de poussières peu conductrices, mais deviennent conductrices une fois humidifiées par la rosée ou la pluie fine, ce qui facilite le contournement de la surface de l'isolateur.

II. 4. 1. 3 Pollution mixte

La pollution mixte, qui est la forme la plus grave de pollution pour les ouvrages électriques, résulte de la combinaison de différentes pollutions précitées. Peu importe l'origine de cette pollution, elle entraîne la formation d'une couche électrolytique due à l'humidification d'un dépôt solide qui s'accumule progressivement à la surface des isolateurs.

II. 4. 2 Pollution des isolateurs composites

Même si une isolation est soigneusement choisie, elle n'est jamais à l'abri d'un incident. La gravité de la pollution d'un site peut varier en raison de l'installation d'une nouvelle usine à proximité, de la construction d'une route à proximité ou même d'événements météorologiques exceptionnels. Dans ces

cas, le dimensionnement initial des isolateurs peut devenir insuffisant et il est nécessaire de protéger les installations existantes contre les nouvelles sources de pollution [100].

II. 4. 2. 1 Formation et répartition des couches polluantes sur les isolateurs

La formation et la répartition de la pollution sur la surface des isolateurs varient en fonction du profil des isolateurs, de leur hauteur, de leur disposition par rapport au sol (verticale, horizontale ou inclinée) et du niveau de tension appliqué. En règle générale, la pollution se concentre sur les éléments de la chaîne d'isolateurs du côté du conducteur de haute tension et dans les parties les mieux protégées contre les facteurs d'auto-nettoyage tels que le vent et la pluie. Ainsi, la répartition de la pollution le long des chaînes d'isolateurs n'est pas uniforme, surtout lorsque la longueur des chaînes d'isolateurs est importante [101, 102].

II. 4. 2. 2 Comportement des surfaces isolantes polymères sous pollution

La pollution est un phénomène qui impacte négativement le fonctionnement des isolateurs haute tension. Lors de la sélection et du dimensionnement des isolateurs ou des chaînes d'isolateurs, Il est très essentiel de tenir compte de la pollution, car elle peut entraîner une diminution de la résistivité surfacique et donc de la tenue diélectrique des isolateurs.

Il est crucial de comprendre le comportement des isolateurs en présence de pollution pour concevoir et exploiter efficacement des lignes électriques dans des zones polluées. En effet, il est donc important de comprendre les différents phénomènes de conduction qui se produisent dans ces conditions.

Le brouillard et la condensation humidifient progressivement et sans délavage la surface de l'isolation contaminée, créant ainsi des conditions critiques. Les sels présents dans le dépôt polluant se dissolvent et forment un électrolyte conducteur qui favorise l'apparition d'un courant de fuite dès qu'un film conducteur se développe sur la surface isolante. Cette conductivité superficielle induite par la pollution modifie la répartition de la tension en fonction des contraintes présentes. Trois scénarios peuvent se produire dans ce contexte [103] :

- Arc non localisé : L'arc électrique s'éteint rapidement pour se réamorcer à un nouvel endroit, et ainsi de suite. Ce phénomène peut être causé par la formation d'une zone sèche après passage d'un courant de fuite, ou par l'état de surface de l'isolateur.
- Arc fixe : L'arc électrique peut rester fixé à la surface en se maintenant ou en se réamorçant au même endroit. Si la valeur du courant est faible, l'arc s'éteindra. En général, ce type d'arc provoque une dégradation du support isolant en raison de l'effet thermique, ce qui nécessite le remplacement de l'élément défaillant.
- L'arc se propage et entraîne un contournement de l'isolation.

Il est très important de noter que les matériaux isolants polymères, même exposés à l'extérieur avec une condensation fréquente et soumis à une contrainte de tension spécifique relativement élevée de 0,7 kV/cm, peuvent être utilisés pendant plus de 20 ans, lorsqu'ils sont traités avec des revêtements de surface adaptés tels que des peintures isolantes électriques [104].

Pour garantir une meilleure performance et fiabilité de l'isolation, Il est très nécessaire de tenir compte du dimensionnement de la ligne de fuite et de pouvoir d'isolement du matériau polymère dans des conditions de pollution très sévères [105 - 106].

II. 4. 3 Classification des sites pollués

La composition de la pollution sur site peut varier en fonction des sources de contamination et des conditions auxquelles les isolateurs sont exposés.

Selon la norme CEI815 (Tableau II. 2), la pollution peut être classée en quatre niveaux différents (Faible, Moyen, Fort, Très fort) en fonction de leur degré.

Tab II. 2 : Classification de la pollution selon le type d'environnement [107]

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

	- Zones désertiques caractérisées par de longues périodes sans pluie, exposées aux vents forts transportant du sable et du sel et soumise à une condensation régulière.
--	---

II. 4. 4 Facteurs climatiques Influençant la pollution des isolations

Certains éléments climatiques et météorologiques peuvent impacter l'état de surface des isolations installées dans les systèmes électriques :

- Le vent : en transportant des particules fines telles que les poussières et les sels marins, peut influencer la formation de dépôts polluants sur les isolateurs. Une faible vitesse de vent peut favoriser cette accumulation, tandis qu'une vitesse élevée peut agir comme un agent de nettoyage.
- La température : joue également un rôle important, pouvant entraîner la condensation et l'humidification de la pollution en raison des variations de température jour/nuit. Cependant, des températures élevées peuvent assécher les dépôts et augmenter leur résistivité, améliorant ainsi le comportement des surfaces polluées.
- L'humidité : elle se forme tôt le matin et a un impact très négatif sur les performances des systèmes électriques en favorisant l'humidification des matériaux isolants contaminés et en augmentant la conductivité de la couche de pollution.
- La pluie : les fines pluies ont un effet similaire à celui de l'humidité en arrosant les surfaces polluées, ce qui favorise l'adhérence de la pollution et l'augmentation de risque de formation d'un arc électrique. En revanche, les fortes pluies permettent de nettoyer les surfaces polluées [108].

II. 4. 5 Conséquences de la pollution

Lorsqu'une isolation est légèrement polluée, un faible courant capacitif se produit en raison des faibles conductivités électriques de l'air, du matériau isolant solide et de la couche de pollution. Cependant, lorsque la couche de pollution est humidifiée, elle devient conductrice et génère un courant de conduction plus élevé, modifiant ainsi la répartition du potentiel électrique. Le champ électrique sur la surface isolante reste faible par rapport à la rigidité diélectrique de l'air. La conductivité superficielle due à la pollution influence la répartition de la tension en fonction des contraintes présentes [109]. Le claquage de l'air peut être atteint entre deux points de la surface isolante en raison de la formation d'un arc électrique qui crée un court-circuit sur une partie de la ligne de fuite de l'isolation [110]. La non uniformité de la répartition des dépôts polluants sur la surface isolante peut entraîner une baisse des performances de l'isolation en cas de pollution. Ce phénomène a toujours provoqué et continue

d'engendrer des défauts d'isolation au niveau des équipements électriques et des installations des consommateurs d'énergie électrique.

II. 5 Vieillissement des isolations polymères

Le processus de vieillissement des isolations polymères se manifeste principalement par une détérioration des propriétés électriques, mécaniques et chimiques du matériau, telles que l'augmentation des pertes diélectriques et la diminution de la résistivité et de l'hydrophobicité. Ces réactions interagissent souvent simultanément et s'influencent mutuellement, ce qui détermine l'état final du matériau [111].

II. 5. 1 Mécanisme de vieillissement des isolateurs composites

En raison des conditions extrêmes dans certaines régions, les isolateurs composites peuvent subir des dégradations qui peuvent entraîner une défaillance de l'équipement électrique. Par conséquent, les performances à court et à long terme des isolateurs composites sont ainsi un sujet de préoccupation.

En effet, les défaillances des isolateurs composites peuvent entraîner divers problèmes qui perturbent la continuité du service des réseaux électriques. Ces problèmes incluent l'augmentation du courant de fuite, la diminution de la tension de contournement et la détérioration des propriétés mécaniques, qui sont des conséquences des processus de vieillissement influençant la durée de vie de l'isolateur.

Chaque type de contrainte entraîne un processus de vieillissement spécifique, se traduisant par la dégradation de certaines caractéristiques du matériau (Fig. II. 6).

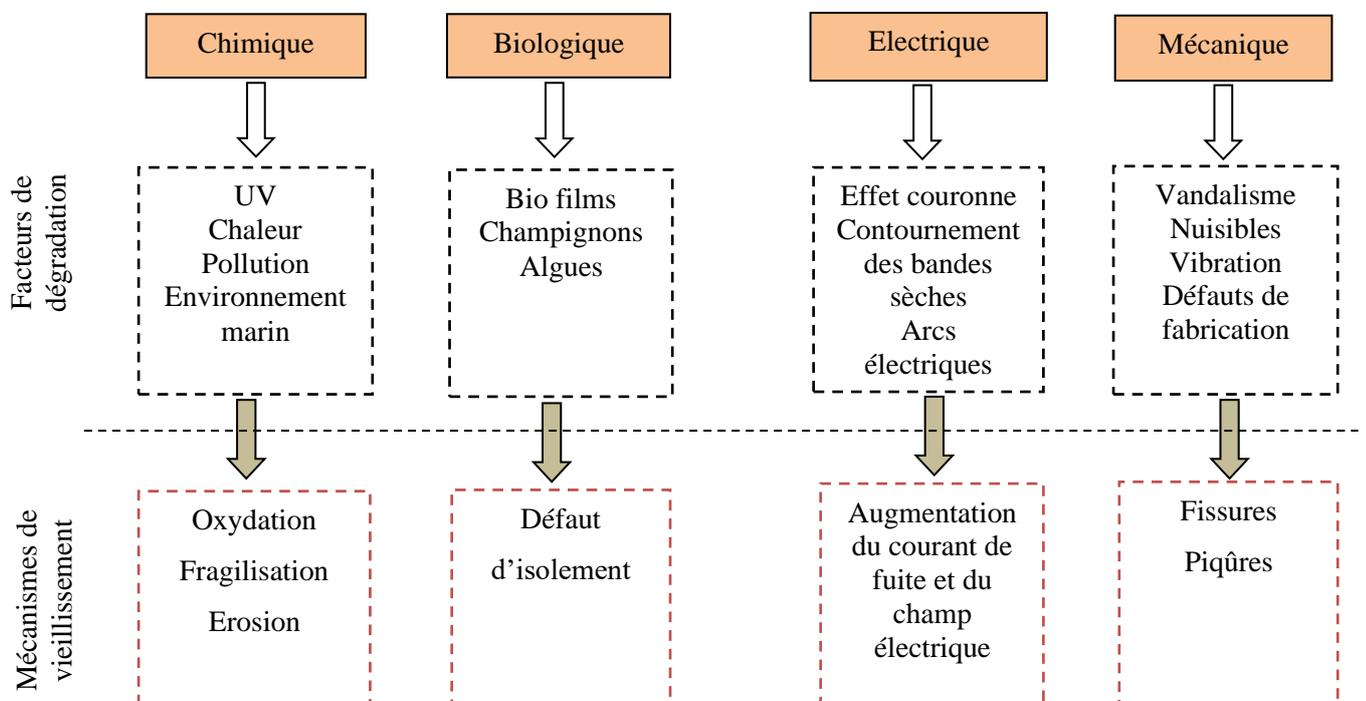


Fig. II. 6 : Processus de vieillissement des isolateurs composites [112]

II. 5. 1. 1 Vieillessement chimique

Les conditions climatiques telles que la chaleur, le rayonnement solaire et l'humidité contribuent à l'érosion de la surface de l'isolateur polymère et à la diminution de son caractère hydrophobe, ce qui entraîne une augmentation des pertes diélectriques, du courant de fuite et de la rugosité de la surface de l'isolateur [113, 114]. La dégradation des polymères dans ce cas est principalement due à l'exposition au rayonnement ultraviolet, qui provoquent la rupture des chaînes moléculaires et altèrent les propriétés du matériau. Ce processus de dégradation, appelé photo-oxydation, est un facteur majeur dans la détérioration des polymères.

Lorsqu'un polymère est exposé à des températures élevées pendant une période prolongée, cela déclenche un processus de dégradation thermo-chimique qui entraîne la rupture des liaisons chimiques de sa structure. Cela peut provoquer diverses réactions telles que la fragmentation des chaînes ou la réticulation. Cependant, la dégradation par hydrolyse se produit lorsque le matériau subit une diffusion d'eau et le processus se déroule lentement à température ambiante. Ce mécanisme commence par l'absorption d'eau par le polymère, suivi de l'hydrolyse qui entraîne une fragmentation moléculaire du matériau.

II. 5. 1. 2 Vieillessement Biologique

Les isolateurs composites comme ils sont composés de matériaux organiques, ils peuvent être vulnérables aux attaques d'organismes biologiques tels que les algues, les champignons et le lichen. Ces micro-organismes provoquent la détérioration de l'isolateur en entraînant des phénomènes tels que l'encrassement, la dégradation du matériau, la bio-corrosion, l'hydratation, la décoloration, l'augmentation du courant de fuite et une diminution pouvant atteindre 30% de la tension de contournement [115].

Pour éviter l'altération des isolateurs, des additifs sont incorporés aux polymères pour les rendre plus résistants à la biodégradation [117]. L'ajout de retardateurs de flamme comme le zincborhydrate permet de prévenir la formation de champignons [116]. Tandis que Gubanski et al [115] ont suggéré d'ajouter des biocides en tant qu'ingrédients actifs.

II. 5. 1. 3 Vieillessement électrique

L'action combinée des contraintes environnementales et électriques sur une isolation entraîne un processus de vieillissement, l'une des principales causes de défaillance du système d'isolation.

Le vieillissement électrique se manifeste par une dégradation des propriétés diélectriques du matériau isolant soumis à une contrainte électrique (champ électrique) relativement élevée sur une longue période lorsque sa surface est recouverte d'une couche de pollution. Cette dégradation se caractérise par une augmentation des pertes diélectriques et une diminution de la résistivité transversale et longitudinale du matériau. Les impuretés, telles que les vacuoles de gaz ou les particules à la surface

du diélectrique, favorisent l'apparition des décharges partielles qui peuvent conduire à l'érosion et à la rupture du matériau à long terme [117].

Plusieurs modèles ont été développés pour décrire le processus de vieillissement des surfaces diélectriques polymériques. Kloes et al [118] ont défini le vieillissement en deux stades : prématuré et avancé. Kaltenborn et al [119] quant à eux, ils ont divisé le processus de vieillissement des matériaux composites en trois périodes : le vieillissement à court terme, le vieillissement transitoire et tardif (Fig. II. 7).

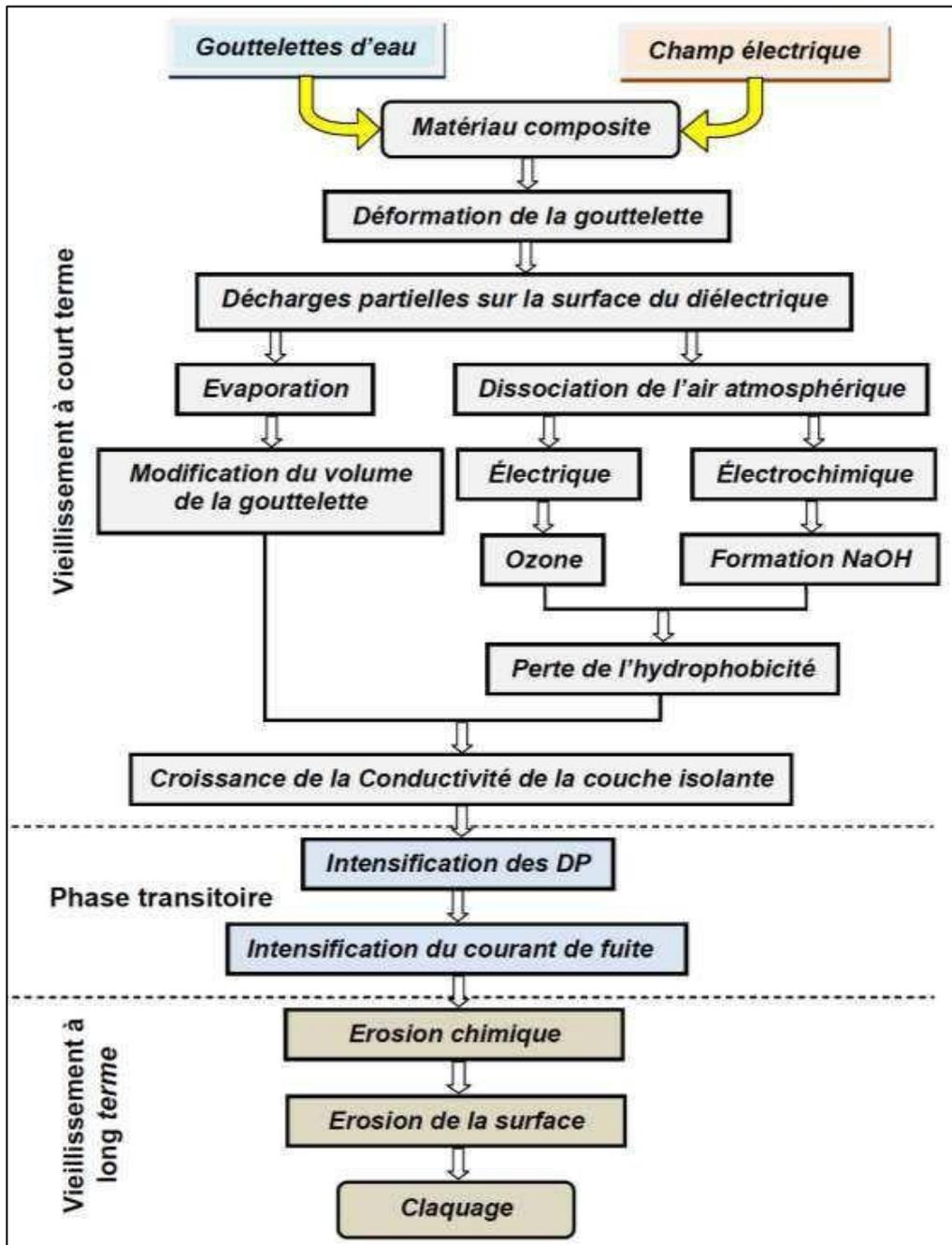


Fig. II. 7 : Processus de vieillissement des surfaces polymères [119]

II. 5. 1. 3. 1 Phase de vieillissement à court terme

La surface polymérique reste fortement hydrophobe à ce stade, ce qui lui confère une grande résistance. Cependant, des décharges électriques peuvent être observées en raison de la déformation des gouttes sous l'effet du champ électrique, entraînant leur coalescence et la formation d'un film d'eau permettant le passage du courant électrique.

II. 5. 1. 3. 2 Phase transitoire

Pendant cette étape, une intensification des décharges partielles et du courant de fuite est observée. La détérioration des propriétés de surface se poursuit tout au long de cette phase.

II. 5. 1. 3. 3 Phase tardive du vieillissement

Pendant cette période, les dommages causés à la surface du matériau augmentent, et le film d'eau en surface devient permanent, étendu et stable. L'effet couronne contribue également à l'altération de l'isolateur en raison de la formation de HNO_3 , qui a comme effet de dissoudre le polymère [107].

Le processus de vieillissement électrochimique est principalement causé par l'application prolongée d'une tension continue et d'une tension alternative à basse fréquence. Le courant de fuite circulant à travers le diélectrique est de nature électrolytique provoque le transfert d'ions, qui peuvent être métalliques ou non. Les ions non métalliques se déchargent au niveau des électrodes et peuvent réagir avec le diélectrique pour former des substances actives. Les ions métalliques, une fois neutralisés, peuvent pénétrer dans le diélectrique et former des chemins conducteurs. Pendant le vieillissement électrochimique, la température du diélectrique augmente, ce qui entraîne une augmentation de sa conductivité et active les réactions chimiques responsables du vieillissement [119].

II. 5. 1. 4 Vieillissement mécanique

Plusieurs études ont révélé que l'accumulation de neige et de glace sur les lignes électriques peut entraîner la formation de microfissures dans les isolateurs, favorisant ainsi le phénomène de cheminement électrique. Ce processus conduit à une détérioration irréversible du matériau en raison de décharges électriques, même en l'absence d'humidité (Etat sec) [120, 121]. D'autres recherches [122] ont montré que la distribution du champ électrique est très impactée par l'effet combiné du vent et de la pluie, ce qui favorise la formation de décharges et contournement de l'isolateur.

II. 5. 3 Méthodes de vieillissement des isolateurs composites

Le vieillissement consiste à soumettre un isolateur à des contraintes similaires à celles qu'il rencontrerait dans son environnement de service réel, afin d'évaluer ses propriétés après une période bien déterminée. Cette période peut être de longue ou de courte durée, définissant ainsi le vieillissement à long ou à court terme.

Il existe diverses approches pour tester le vieillissement des isolateurs. Certaines sont naturelles, impliquant l'exposition de l'équipement à un environnement extérieur pendant une durée de temps pour

évaluer ses propriétés. D'autres méthodes, dites artificielles, consistent à soumettre les isolateurs à un environnement simulé dans une enceinte spécialement conçue à cet effet.

II. 5. 3. 1 Vieillessement naturel

Plusieurs études ont été menées en utilisant des objets d'essai vieillis naturellement. Certaines de ces études ont impliqué la mise en place de stations d'essai où les isolateurs sont soumis à la tension d'exploitation et exposés aux conditions environnementales de la région où l'équipement sera installé [123, 124]. Ces recherches ont révélé que quelques critères de validation des isolateurs composites définis à partir de certaines normes ne sont pas adaptés à tous les environnements d'exploitation.

D'autres recherches ont examiné des isolateurs utilisés dans des conditions réelles pendant plusieurs années pour étudier en détail le comportement de l'équipement tout au long de sa durée de vie [125, 126]. Cette durée de vie a été estimée grâce à des algorithmes spécifiques et diverses méthodes statistiques [127].

II. 5. 3. 2 Vieillessement artificiel

Ce type de vieillissement peut être réalisé de manière non accélérée en recréant les conditions d'exploitation en laboratoire afin de les contrôler plus efficacement et de faciliter les mesures nécessaires pour évaluer l'isolateur. Cette approche présente l'avantage de ne pas dépendre des cycles naturels et les variations saisonnières. Cependant, elle nécessite une mobilisation des ressources et moyens pendant une période importante de temps et n'est donc pas recommandée pour évaluer le comportement à long terme d'un équipement. D'autres méthodes de vieillissement accéléré ont été développées pour réduire le temps du processus de vieillissement. Elles consistent à appliquer des contraintes plus élevées que celles rencontrées naturellement, tout en veillant à ne pas les rendre excessives pour ne pas dénaturer le mécanisme de vieillissement. Plusieurs procédures ont été mises au point par différents auteurs et organismes pour simuler au mieux les contraintes subies par les systèmes d'isolement étudiés. Des organismes internationaux tels que l'IEEE, la CEI, l'ANSI, l'ISO, l'ASTM ou le NEMA ont publié des normes concernant les procédures de vieillissement accéléré, disponibles dans [128, 129].

Perrot [130] a démontré qu'il existe une forte corrélation entre le vieillissement naturel des isolateurs et celui simulé selon la norme CEI. De son côté, Riquel [131] a montré que le vieillissement accéléré provoque des effets similaires à ceux observés lors d'une exposition aux conditions naturelles. Il a introduit le concept de ratio d'accélération, qui correspond au rapport entre le temps de test et le temps équivalent de vieillissement.

Il est possible de mentionner parmi les techniques de vieillissement accéléré :

II. 5. 3. 2. 1 Test de résistance à l'acidité

Lors de cette expérience, les échantillons sont exposés à des solutions acides telles que l'acide sulfurique et l'acide nitrique. Toute modification physico-chimique est observée attentivement tout au long de ce test [107].

II. 5. 3. 2. 2 Test de l'hydrolyse

L'hydrolyse est évaluée en exposant l'échantillon à de l'eau bouillante, puis en surveillant la surface du matériau à l'aide de spectroscopie infrarouge pour détecter tout changement physico-chimique [107].

II. 5. 3. 2. 3 Vieillissement aux rayons ultraviolets

Les enceintes de vieillissement utilisent des sources artificielles de rayons ultraviolets comme les lampes xénon, fluorescentes ou aux halogénures métalliques pour accélérer le processus de vieillissement [132]. Elles permettent de contrôler l'exposition à la condensation, à l'humidité relative et à la température afin de recréer les conditions de vieillissement souhaitées.

Il est possible d'utiliser deux types de lampes présentant des caractéristiques spectrales distinctes. Les lampes UV-B, dont l'irradiance maximale se situe à 313 nm, ont leur énergie concentrée entre 280 nm et 360 nm. Cependant, il a été observé que ces lampes ne reproduisent pas de manière fidèle le processus de vieillissement naturel, car les mécanismes de vieillissement induits par leur exposition diffèrent de ceux observés dans des conditions réelles. En revanche, les lampes UV-A, qui ont un pic d'émission autour de 340 nm, peuvent simuler de manière plus précise les rayonnements solaires directs, avec une irradiation maximale de 1,55 W/m² [133].

Selon la littérature [134 -136], il est estimé que 200 heures de test sont équivalentes à une année de service dans des conditions normales d'utilisation, en tenant compte du vieillissement principalement causé par les rayons UV. Cependant, il est important de prendre en considération la zone géographique où l'isolateur est censé être utilisé lors du calcul de cette équivalence.

II. 5. 3. 2. 4 Test de résistance à l'ozone

Etant donné que l'ozone provoque la création d'acide nitrique qui endommage la surface de l'isolateur, il est indispensable de réaliser un test de résistance à l'ozone pour évaluer l'efficacité du matériau. Pour ce faire, les échantillons sont placés dans une enceinte hermétique reliée à un générateur d'ozone afin de garantir une concentration de gaz adéquate. Les modifications physico-chimiques du matériau sont ensuite surveillées [107].

II. 5. 3. 2. 5 Vieillissement thermique

Ce test consiste à placer les échantillons dans un four Thermo-régulé et à surveiller l'évolution de leurs caractéristiques physico-chimiques tout au long du test [131].

La norme CEI 216 [137] fournit des directives pour identifier les caractéristiques et élaborer les protocoles d'essai de résistance thermique des matériaux isolants électriques. Une approche alternative appelée méthode du processus de vieillissement égalisé (EAP), décrite dans la référence [138], est utilisée pour analyser la résistance thermique des isolants solides.

Ces méthodes demandent un investissement de temps conséquent, généralement de l'ordre de plusieurs milliers d'heures. Afin d'économiser du temps, certains chercheurs ont exploré des techniques de vieillissement très accéléré (VTA) qui permettent de réduire ce temps à 500 heures.

II. 5. 3. 2. 6 Vieillissement en chambres climatique a contraintes variables

Plusieurs études [139-141] ont été menées pour analyser les effets combinés de diverses contraintes sur le comportement des isolateurs composites. Des chambres climatiques ont été utilisées pour reproduire les différentes contraintes environnementales telles que le champ électrique, le rayonnement ultraviolet, le brouillard, la température, la pollution, etc.

II. 6 Conclusion

Les caractéristiques des surfaces polymériques mettent en évidence l'importance de l'intégration des isolateurs composites dans les réseaux de transport et de distribution d'énergie électrique. L'hydrophobicité étant la caractéristique principale de ces surfaces, le processus de perte et de récupération de cette propriété reste un défi complexe.

Les performances des isolateurs composites en cas de pollution ou en présence de gouttelettes d'eau diffèrent considérablement de celles des isolateurs céramiques ou en verre.

La pollution des isolations est un facteur essentiel dont il faut tenir compte dans la conception des lignes électriques et des équipements dans le domaine de haute tension.

L'analyse de l'évolution du comportement des isolateurs au fil du temps en fonction des conditions environnementales est un sujet crucial qui fait l'objet de nombreuses recherches. Des expériences ont été menées pour bien comprendre les mécanismes responsables de la dégradation des propriétés électriques, mécaniques et physico-chimiques des isolateurs composites. Ces études permettent d'estimer la fiabilité et la durée de vie de ces isolateurs.

CHAPITRE III : DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX ET TECHNIQUES DE MESURE

III.1 Introduction

Dans le but d'étudier la performance d'une isolation en silicone sous pluie et brouillard salin et d'établir une relation entre le degré de mouillage de la ligne de fuite d'une isolation et l'angle d'inclinaison de ses ailettes par rapport à l'horizontale, plusieurs travaux et mesures ont été effectués au niveau du laboratoire de haute tension de l'université A. Mira de Bejaia en Algérie et celui de l'université des sciences appliquées de Zittau en Allemagne.

Dans ce chapitre, nous allons décrire les différents dispositifs expérimentaux permettant de simuler les conditions environnementales auxquelles l'isolation sera exposée et les différentes techniques de mesure des propriétés électriques, mécaniques et chimique de l'isolation.

III. 2 Isolation sous pluie

III. 2. 1 Dispositifs expérimentaux sur site et au laboratoire et techniques de mesure

Comme matériau de l'isolation, le choix est porté sur de la silicone [142, 143]. Sa géométrie ressemble à une demi-ailette et la longueur de sa ligne de fuite est égale à 6 cm (Fig. III. 1). Les échantillons de cette isolation ont été découpés d'un isolateur neuf en silicone à 3 ailettes alternées. Cet isolateur a été offert par la Société Algérienne d'Electricité et de Gaz (SONELGAZ) de Sétif au Laboratoire de Génie Electrique de l'Université de Bejaia (LGEB) pour la recherche. Cet isolateur provenait du fabricant et fournisseur allemand Wacker Chemie (Germany).

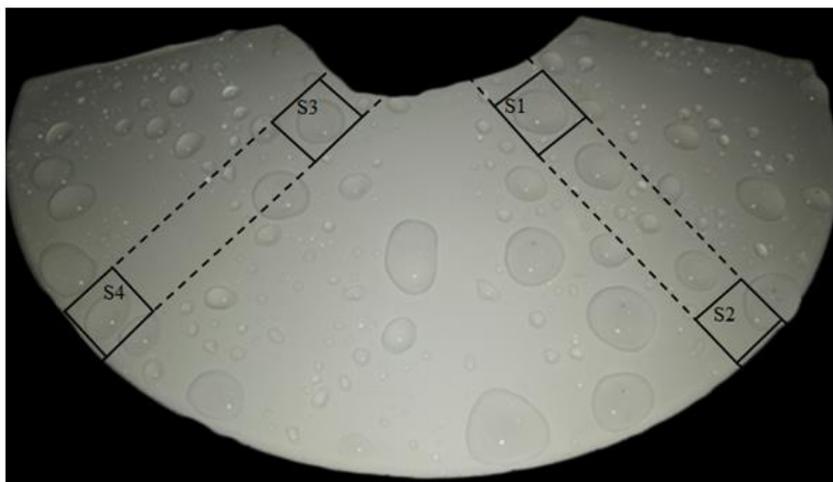


Fig. III. 1 : Emplacement de quatre secteurs (S₁, S₂) et (S₃, S₄) sur deux lignes de fuite d'une demi-ailette en silicone recouverte de gouttes d'eau de pluie naturelle

Afin de permettre la comparaison du taux d'humidification du haut et du bas de deux lignes de fuite distinctes de la même isolation, quatre secteurs de 1 cm^2 de surface chacune ont été choisis et leur localisation sur la surface de l'isolation est illustrée par la figure III. 1. Le choix de leur emplacement a été fait de telle sorte qu'un secteur soit posé à chaque extrémité de la ligne de fuite de l'isolation en allant du centre vers la périphérie de la demi-ailette.

Pour une durée donnée du temps d'exposition des échantillons à la pluie naturelle, des mesures nécessaires ont été effectuées sur les caractéristiques des gouttes d'eau formées sur chacun des quatre secteurs selon leur taille (grande, moyenne et petite) et leur nombre. Afin de s'assurer de la reproductibilité des grandeurs quantifiées, ces mesures ont été effectuées durant trois périodes temporelles distinctes de pluie naturelle. Durant chacune de ces trois périodes temporelles retenues, une quantité d'eau de pluie a été recueillie dans un sceau et sa conductivité électrique a été mesurée à l'aide d'un conductimètre à sonde mobile. Sa valeur est de $30 \mu\text{S}/\text{cm}$. Elle est pratiquement identique pour les trois périodes.

Le volume de toutes les gouttes d'eau recensées sur chacun des quatre secteurs de l'isolation est mesuré à l'aide d'une seringue graduée en microlitre (Fig. III. 2).



Fig. III. 2 : Mesure du volume des gouttes d'eau de pluie naturelle à l'aide d'une seringue graduée en microlitre

L'intervalle du temps de pause entre le prélèvement d'un échantillon et sa nouvelle exposition à la pluie naturelle est supérieur à 12 h. Celui-ci a été choisi afin de permettre à l'échantillon utilisé de retrouver totalement l'hydrophobie de sa surface avant sa nouvelle exposition [144]. Pour accélérer ce retour d'hydrophobie, tous les échantillons sont déposés, après leur nettoyage à l'isopropanol, dans un dessiccateur en fin de chaque série de mesure.

La variation de l'angle d'inclinaison de l'isolation par rapport à l'horizontale (α) est obtenue sur site au moyen d'un dispositif illustré par la figure III. 3. Un support, de $(100 \times 100 \times 80) \text{ cm}^3$ de dimensions,

a été réalisé en bois. Il est peint de plusieurs couches de vernis afin de ne pas absorber les gouttes d'eau de pluie naturelle atterrissant sur celui-ci. Sa base supérieure est munie de 5 tiges cylindriques rotatives. Sur chacune de ces tiges sont placées huit plaquettes en bois de $(12 \times 12) \text{ cm}^2$ et espacées de 10 cm le long de la tige. Sur leur surface supérieure sont fixés les échantillons en silicone.

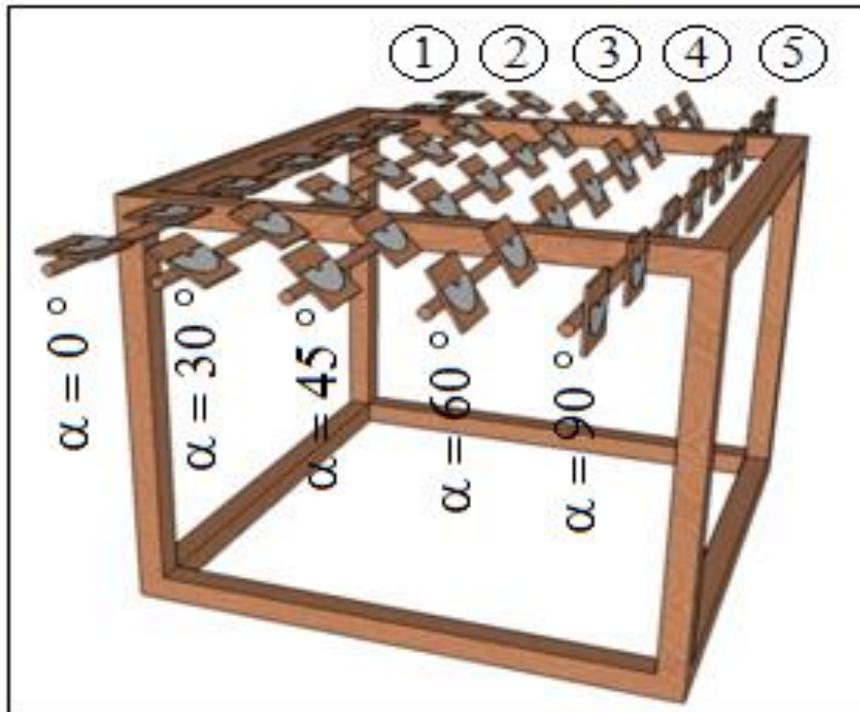


Fig. III. 3 : Dispositif à cinq tiges cylindriques rotatives assurant la variation de l'angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale de l'isolation en silicone

La fixation d'un angle d'inclinaison bien déterminé de l'isolation peut être obtenue en tournant la tige à une position correspondant à l'angle choisi. Les tiges sont numérotées de gauche à droite et les angles d'inclinaison affichés sont illustrés par la figure III. 3. Par exemple, pour la tige 1, $\alpha = 0^\circ$ et pour la tige 5, $\alpha = 90^\circ$. Le phénomène d'impact des gouttes d'eau de pluie naturelle sur la surface des isolations et leur constellation résultante, ont été filmés durant chaque période de pluie à l'aide d'une caméra et enregistré sur PC.

Afin de reproduire au laboratoire la constellation des gouttes d'eau de pluie naturelle et leur volume résultant, des essais ont été effectués sur des isolations en silicone de même nature que celles utilisées sur site. Elles sont parallélépipédiques de dimensions $(11 \times 11 \times 0.6) \text{ cm}^3$ et délimitées par une géométrie d'électrodes planes à champ électrique quasi uniforme (Figs. III. 4a et 4b).

Ces surfaces en silicone sont des produits conçus à base de caoutchouc à haute température de vulcanisation. La substance est mélangée à de l'aluminiumtrihydrat à un taux de 4 à 5 %. L'angle de contact statique d'une goutte d'eau de $5 \mu\text{l}$ de volume reposant sur sa surface est estimé à la 104°

selon l'entreprise allemande Wacker Chemie, fournisseur et fabricant de ces échantillons[142, 143]. Lors de cette étude, le nombre d'éprouvettes est pris égal à 20.

Les électrodes sont en fer, dont l'une est reliée à la terre et l'autre à la haute tension. La largeur (l) des électrodes est de 8 cm, leur diamètre (ϕ_e) est de 2 cm et leur rayon de courbure (r_c) est égal à 1 cm. La base des électrodes est découpée en dents d'épaisseur égale à 0.2 cm. Elles sont espacées de 1.5 cm afin de faciliter l'évacuation à l'extérieur des gouttes d'eau entrant en leur contact (Fig. III. 4b). La ligne de fuite totale de l'isolation (L_c) entre les électrodes est fixée à 6 cm tout au long des essais effectués (Fig. III. 4a). Le point d'impact de chaque goutte d'eau sur la surface de l'isolation a été repéré au préalable à l'aide d'une teinte noire isolante. L'arrangement en zigzag symétrique des gouttes d'eau sur la surface interélectrode de l'isolation est décrit par les paramètres (L_{dd}), (L_{de}) et (l_{rr}) (Fig. III. 4a). La première grandeur correspond à la distance entre deux gouttes d'eau adjacentes reposant sur la ligne de fuite de l'isolation (L_c). La deuxième est définie comme étant la distance séparant une goutte d'eau de l'électrode sous tension ou mise à la terre et la troisième comme étant celle qui est comprise entre deux rangées successives sur la largeur de l'isolation. Elles sont maintenues constantes tout au long des essais effectués dans cette étude. Leurs valeurs sont respectivement : $L_{dd}= 1$ cm, $L_{de}= 1$ cm et $l_{rr}= 2$ cm.

Les résultats de l'effet de la variation de ces paramètres sur la performance électrique en AC et DC de la même isolation en position horizontale ont été déjà publiés sous les références [145, 146].

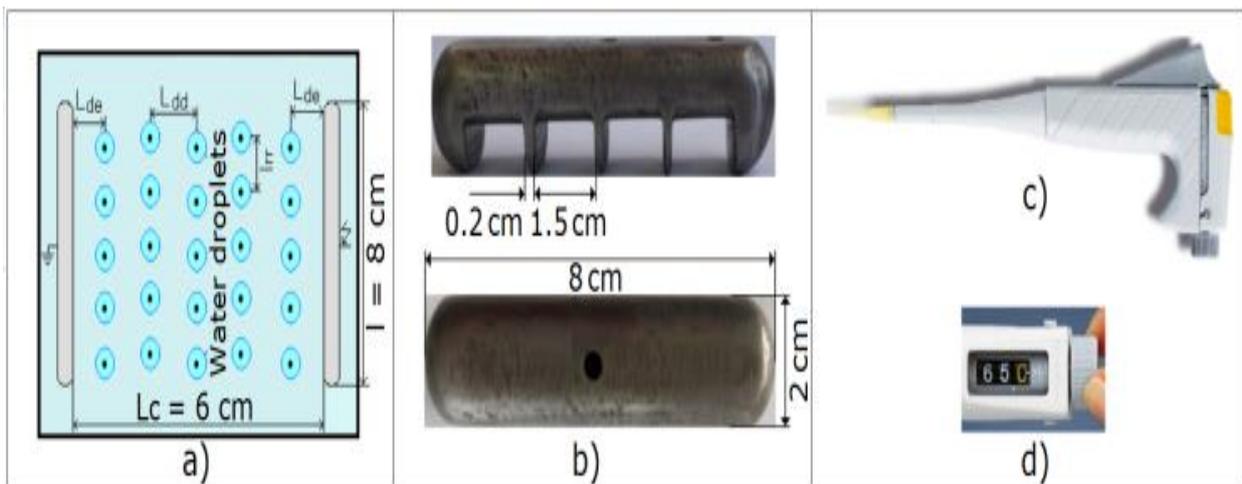


Fig. III. 4 : Arrangement en zigzag de gouttes d'eau sur un échantillon de silicone délimité par deux électrodes ; a) Dispositif expérimental, b) Électrodes HV et de masse dentées, c) Pipette graduée, d) Ajustement du volume de 10 à 100 μ l

Les essais effectués au laboratoire se rapportent aux mesures du volume et du nombre de gouttes d'eau résiduelles le long de la ligne de fuite de l'isolation en fonction de l'angle de son inclinaison hors ou

sous un niveau de tension alternative variable. De plus sa tension résultante de contournement a été quantifiée. Le volume des gouttes d'eau et leur dépôt sur la surface isolante ont été effectués à l'aide d'une micropipette (Fig. III. 4c). Le volume des gouttes d'eau choisi est pris quasiment égal à celui trouvé lors des mesures effectuées sous pluie naturelle (45, 60, 90 et 120) μl . La conductivité électrique des gouttes d'eau est fixée égale à 30 $\mu\text{S}/\text{cm}$ [147]. Pour des raisons de simulation, sa mesure a été réalisée à l'aide du même conductimètre à sonde mobile. Sa valeur est réglée en lui ajoutant du sel de cuisine de telle sorte qu'elle soit la même que celle des gouttes d'eau de pluie naturelle.

Le dispositif permettant la variation de l'angle d'inclinaison (α) de l'isolation par rapport à l'horizontale est illustré par la figure III. 5.

L'isolation est immobilisée sur la paroi de base supérieure du dispositif. Celle-ci est reliée à une rotule lui permettant de décrire un angle (α), compris entre 0 et 90 °. La fixation d'un angle d'inclinaison quelconque peut être obtenue au moyen de deux tiges. Celles-ci passent par des trous réalisés sur ses deux faces verticales opposées afin de bloquer la paroi à une position correspondant respectivement aux angles extrêmes suscités (Figs. III. 5a et 5c). La figure 5b donne la position correspondant à l'angle d'inclinaison quelconque $0^\circ < \alpha < 90^\circ$. Le dépôt des gouttes d'eau sur l'échantillon est effectué au préalable en position horizontale de l'isolation (Fig. III. 5a). Ensuite, la paroi sur laquelle repose le matériau est tournée lentement puis immobilisée au moyen des deux tiges à l'angle d'inclinaison choisi.

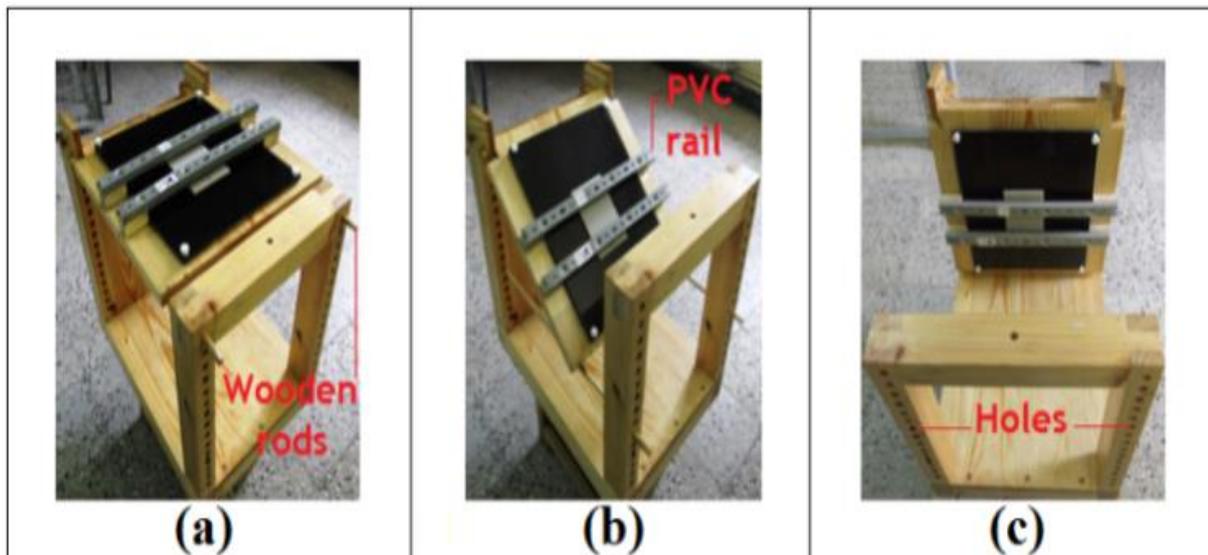


Fig. III. 5 : Dispositif à paroi supérieure rotative assurant la variation de l'angle d'inclinaison (α) de l'isolation par rapport à l'horizontale a) $\alpha = 0^\circ$, b) $0^\circ < \alpha < 90^\circ$, c) $\alpha = 90^\circ$

Le modèle expérimental et les circuits électriques de mesure des différents niveaux de tension appliqués à l'isolation et de visualisation de la décharge électrique évoluant sur sa surface sont illustrés

par la figure III. 6.

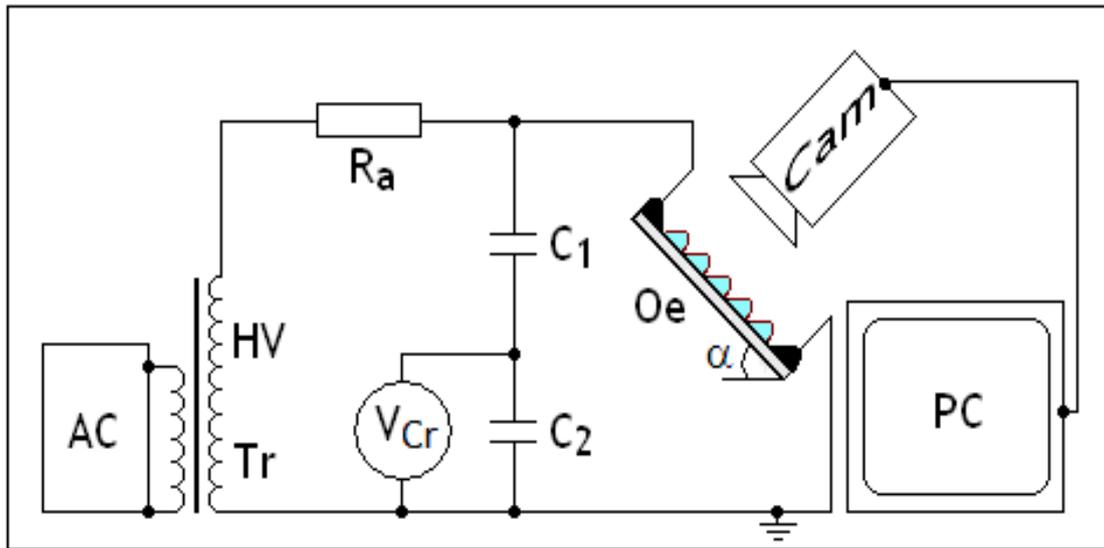


Fig. III. 6 : Schéma de mesure de niveau de tension appliquée à l'isolation et de visualisation de la décharge électrique évoluant sur sa surface (Tr : Transformateur ; AC : Appareil de commande de la tension d'essai ; V_{cr} : Voltmètre de crête, O_e : Objet d'essai ; Cam : Caméscope ; PC : Ecran Ordinateur

Le circuit de mesure de la tension appliquée à l'isolation est connecté aux bornes du secondaire d'un transformateur haute tension (0.08 A/135 kV) (Fig. III. 6). La sortie du transformateur est reliée au diviseur capacitif (C_1/C_2) à travers la résistance d'affaiblissement de courant (R_a). Le voltmètre de crête (V_{cr}), à affichage numérique, est branché aux extrémités de la capacité basse tension (C_2) du diviseur capacitif suscit. L'objet d'essai (O_e) est connecté aux bornes du diviseur capacitif (C_1/C_2). Le circuit de visualisation comprend une caméra rapide (Cam) et un PC. La caméra permet l'enregistrement des phénomènes électrohydrodynamiques des gouttes d'eau et des diverses séquences de développement de la décharge électrique résultante évoluant sur la surface hydrophobe recouverte de ces perles d'eau. Le PC permet le traitement d'images à l'aide d'un logiciel Vidéo studio 11. Afin de déterminer le taux d'humidification de la ligne de fuite de l'isolation, la tension est appliquée à celle-ci par niveaux. La valeur du niveau de tension est obtenue par variation automatique de la rampe de tension à une vitesse constante et égale à 4 kV/s. Ce niveau de tension est amené ensuite sur une sphère de 30 cm de diamètre et reposant sur un support isolant de 100 cm de hauteur. Une fois chargée, cette sphère est connectée à l'objet d'essai par le biais d'un interrupteur approprié. Deux niveaux de tension (10 et 28 kV), inférieurs à celui de son contournement, ont été choisis. Dans le cas de la détermination de la performance électrique de l'isolation, la tension d'essai est augmentée automatiquement à vitesse de la rampe constante (4 kV/s) jusqu'au contournement de sa surface totale. Après chaque essai, le volume des diverses gouttes d'eau résiduelles adhérant encore à la surface du

matériau est mesuré à l'aide d'une seringue micrograduée. Pour chaque paramètre d'influence étudié, une série de 20 essais a été réalisée et la valeur retenue de la tension de contournement de l'isolation est la moyenne arithmétique de toutes celles obtenues sur la même série de mesures. Le calcul de la valeur moyenne et de l'écart type de la tension de contournement de l'isolation en silicone en fonction de chaque paramètre d'influence a été effectué sur la base des équations 1 et 2 [148] :

$$U_{fm} = \sum_1^N \frac{U_{ifm}}{n} \quad (1)$$

$$RSD = \sqrt{\frac{\sum_1^N (U_{ifm} - U_{fm})^2}{N-1}} \cdot \frac{100\%}{U_{fm}} \quad (2)$$

Où U_{fm} est la moyenne de la tension de contournement mesurée de l'isolation (kV) ; U_{ifm} est la tension appliquée obtenue lors de l'essai au temps i (kV) ; N est le nombre total de fois que l'essai est valide, $N = 20$; RSD est l'écart-type relatif du résultat de l'essai.

La tension de contournement des isolateurs est affectée par la température (θ), la pression (P) et l'humidité (H) de l'air environnant [138]. A cause de la dispersion des valeurs de tensions de contournement des échantillons, mesurées sur différentes périodes, celles-ci doivent être ramenées aux mêmes conditions climatiques. Tous les résultats obtenus dans cette étude ont été ramenés aux conditions normales suivantes ($\theta_0 = 20$ °C, $P_0 = 100$ kPa et $H_0 = 11$ g/m³) conformément aux formules et abaques existant dans la littérature [148].

$$U_f = \frac{K_H}{K_d} U_{fm} \quad (3)$$

U_{fm} : Tension de contournement mesuré à température θ , pression P et humidité H ;

U_f : Tension de contournement sous conditions normales (θ_0 , P_0 and H_0) ;

K_H : Facteur de correction relatif à l'humidité. Sa valeur est déduite des abaques donnés dans la référence [148].

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

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

Où P (pression) est en kPa et θ (température) en ° C.

La bonne répétition des techniques de mesure nous a permis d'avoir une erreur relative maximale égale

à 5 % de la valeur moyenne arithmétique.

Une pause d'une durée supérieure à 12 heures est observée entre deux essais successifs sur une même éprouvette dans le but de restaurer l'hydrophobie de la surface de l'échantillon après sa mise sous tension [144]. Afin d'accélérer le processus, les vingt échantillons sont toujours placés dans un dessiccateur après leur nettoyage à l'isopropanol au bout de chaque série d'essais.

III. 2. 2 Isolation sous brouillard salin

III. 2. 2. 1 Préparation des échantillons

Des échantillons en élastomère silicone (POWERSIL XLR 600 A/B), fabriqués et fournis par l'entreprise Allemande Wacker Chemie ont été utilisés dans cette investigation. Pour chaque angle d'inclinaison (0° , 30° , 45° , 90°) de l'isolation par rapport à l'horizontal, l'analyse est effectuée sur 4 éprouvettes plates (Sa_1 , Sa_2 , Sa_3 , Sa_4) de dimensions $(10 * 5 * 0.6) \text{ cm}^3$ (Fig. III. 7). Le choix est porté sur ce type de matériau en raison de sa résistance au vieillissement, aux rayons UV et aux produits chimiques, ce qui le rend adapté à une utilisation dans des environnements difficiles. Le POWERSIL XLR 600 possède aussi des excellentes propriétés hydrophobes et son angle de contact statique (ACS) avec une goutte d'eau de $5 \mu\text{l}$ de volume mesuré au laboratoire à l'aide d'un goniomètre est égale à 108° .

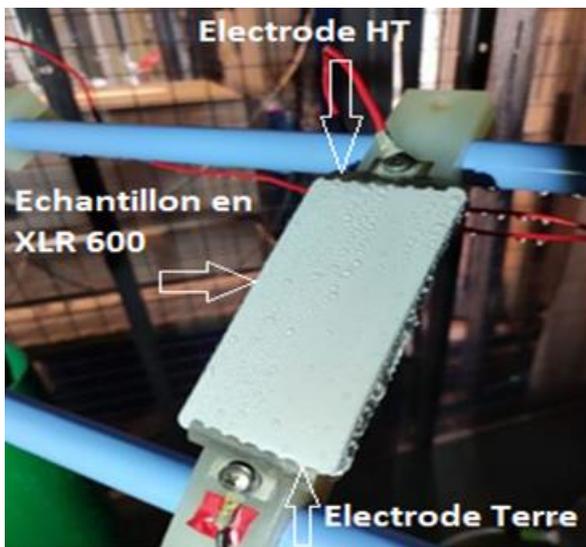


Fig. III. 7 : Echantillon XLR600 fixé à un dispositif incliné de 30° par rapport à l'horizontal

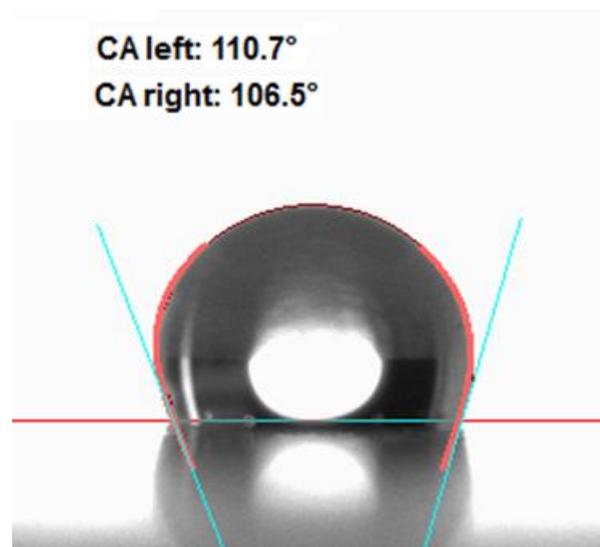


Fig. III. 8 : Angle de contact statique de XLR600

III.2. 2. 2 Mesure des propriétés diélectriques et mécaniques de l’isolation

a) Propriétés diélectriques

La mesure des propriétés diélectriques telles que la permittivité ϵ , la perte diélectrique $\tan\delta$, la capacité et l’impédance de ces échantillons suivant les méthodes de mesures décrites par la norme CEI 62631-2-1 [149], est effectuée sur des éprouvettes de 1 mm d’épaisseur en adoptant la méthode de spectroscopie dans le domaine des fréquences (FDS), à l’aide de l’analyseur de matériaux diélectriques SPECTANO 100 d’OMICRON Lab, illustré en figure III. 9. Cet appareil combine l’analyse dans le domaine temporel et l’analyse dans le domaine fréquentiel dans une large gamme de fréquences de 20 μ Hz à 5 kHz en un seul appareil et fournit une gamme de tension de sortie de 100 mV à 200 V [150].

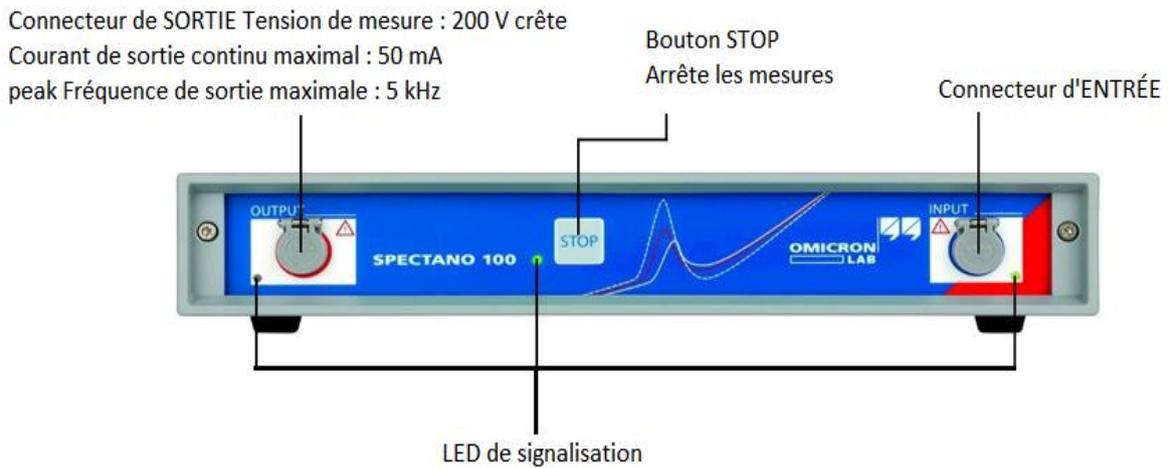


Fig. III. 9 : SPECTANO 100 [150]

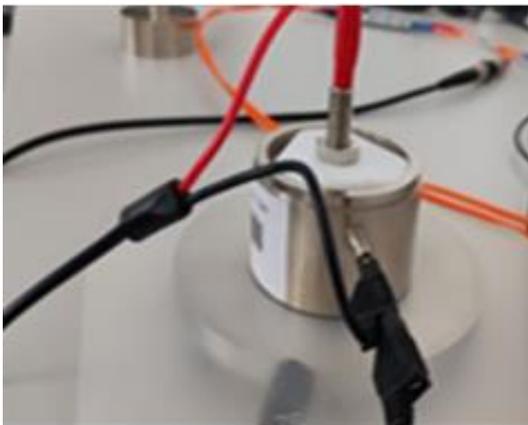


Fig. III. 10 : Porte échantillon avec anneau de garde



Fig. III. 11 : Echantillon avec surface non uniforme [150]

Le porte-échantillon représenté en figure 10, présente une configuration d'électrodes à plaques parallèles avec anneau de garde. Son raccordement au SPECTANO 100 est montré en figure III. 12. L'anneau de garde sert à écarter l'influence des capacités parasites pouvant être créées au bord de l'échantillon lors de la mesure des propriétés diélectriques du matériau sans protection. La présence de contaminations conductrices ou d'humidité sur la surface de l'échantillon ou la cellule d'essai peut affecter significativement les propriétés diélectriques mesurées. Par conséquent, la cellule d'essai et ses électrodes ou surfaces de contact doivent être nettoyées avant la mesure. La taille de l'échantillon doit être suffisamment grande pour permettre sa mesure avec la précision requise. Cependant son épaisseur doit être faible afin de réduire les effets de bord, la polarisation et la dispersion, ce qui permet d'avoir des mesures plus fiables. La surface de l'échantillon doit être plane en tout point. En effet, si la surface du matériau d'essai n'est pas plane (Fig. III. 11), un espace d'air entre l'électrode et la surface de l'échantillon provoque des erreurs de mesure. Les résultats de mesures obtenus en fonction de la fréquence sont donnés dans le tableau III. 1.

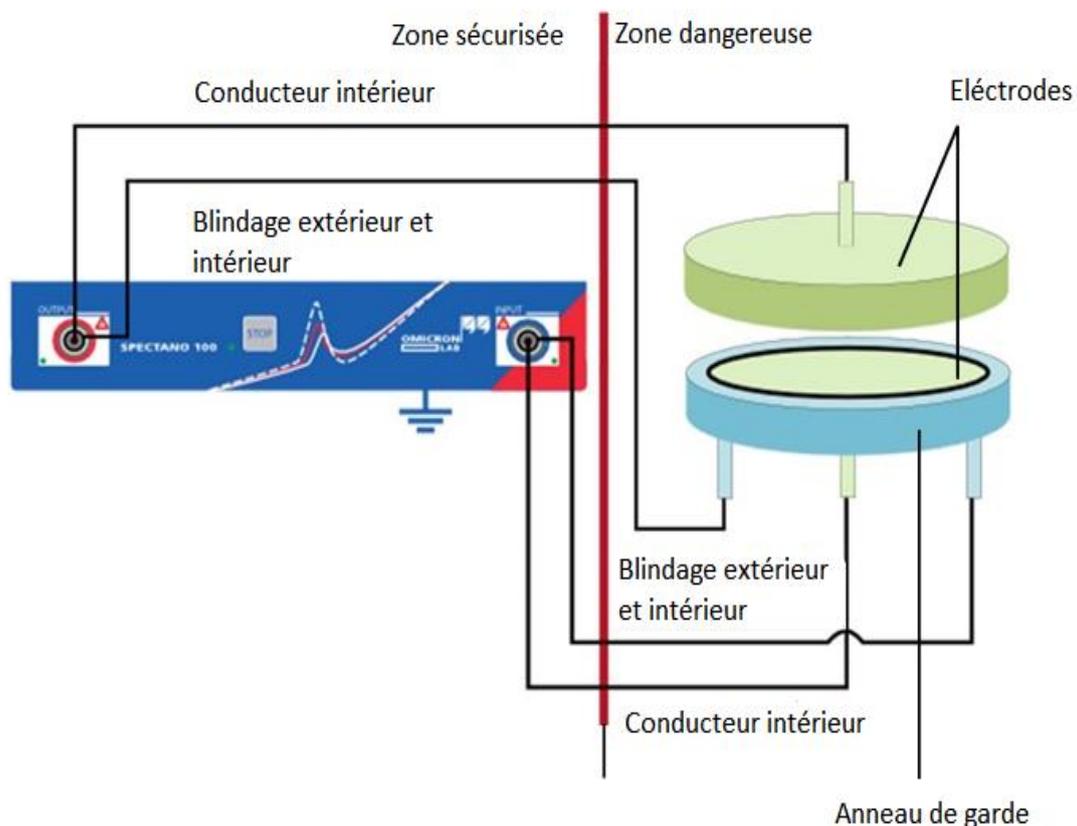


Fig. III. 12 : Raccordement du SPECTANO 100 au porte échantillon avec anneau de garde [150]

Tab. III. 1 : Résultats de mesure des propriétés diélectriques

Fréquence [Hz]	Tanδ	ε'	ε''	Z [Ω]	Phase de Z [°]	Y [S]	Cp [F]	Rp [Ω]	c' [F]	c'' [F]	R [Ω]	X [Ω]
20	6. 10 ⁻⁴	3.032	0.0019	14.10 ⁷	89.96	6.89E-09	5.48E-11	2.238E+11	5.48E-11	-3.56E-14	9.10 ³	-14.10 ⁷
50	15.10 ⁻⁴	3.029	0.0046	6.10 ⁷	89.91	1.72E-08	5.48E-11	3.752E+10	5.48E-11	-8.48E-14	8.10 ³	-5.10 ⁷
1000	3.10 ⁻⁴	3.029	0.0009	0.3.10 ⁷	89.98	3.44E-07	5.48E-11	9.091E+9	5.48E-11	-1.75E-14	9.10 ²	-2.10 ⁶

b) Propriétés mécaniques

Les isolateurs des lignes aériennes sont souvent exposés à des vents forts, des vibrations et des températures extrêmes. Pour assurer la fiabilité et le bon fonctionnement du système dans lequel ils sont employés, la connaissance des propriétés mécaniques du matériau utilisé pour concevoir des isolateurs rigides et capables de supporter des charges mécaniques auxquelles ils sont soumis sans se cassés et se déformés est indispensable.

Pour bien caractériser le comportement de l’isolant, l’effet de traction est déterminé sur des échantillons en Elastomère silicone (XLR 600) en appliquant une force de traction suivant la norme ASTM D412 [151] à l’aide d’une machine d’essais des matériaux statiques de marque Zwick Roell (Fig. III. 13). Dix éprouvettes de 2 mm d’épaisseur ont été découpées en utilisant une coupe haltère ISO 37 Type 2 (Dumbbell Cutter ISO 37 Type 2). La forme et les parties essentielles de l’éprouvette sont illustrées par la figure III. 14.



Fig. III. 13 : Effet de la force de traction sur l’échantillon XLR600 et son allongement jusqu’à sa rupture

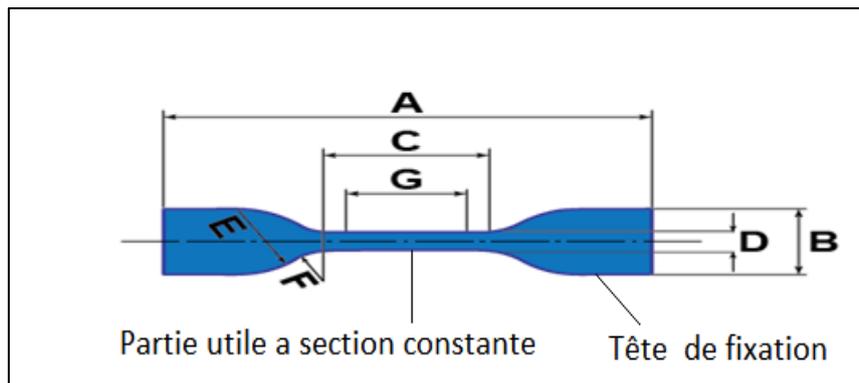


Fig. III. 14 : Eprouvette de traction XLR600, $A = 75 \text{ mm}$; $B = 12.5 \pm 1 \text{ mm}$; $C = 25 \pm 1 \text{ mm}$; $D = 4 \pm 0.1 \text{ mm}$; $E = 8 \pm 0.5 \text{ mm}$; $F = 12.5 \pm 1 \text{ mm}$

L'échantillon est caractérisé par une partie utile centrale, à section constante D , et de longueur initiale C . Sous l'effet d'une force uniaxiale F , le matériau est soumis à une contrainte uniforme dans la partie utile. Pendant l'essai, la machine assurera une déformation ΔL et une élongation de la partie utile à vitesse constante de $500 \pm 50 \text{ mm/min}$, jusqu'à la rupture de l'éprouvette. Les extrémités de l'échantillon servent à la fixation dans les mors de la machine d'essai. Les résultats de mesures fournis par les capteurs de la machine sont donnés sous forme d'une courbe nommée : courbe brute de traction, telle que l'axe des ordonnées est la force de traction F , mesurée en Newtons et l'axe des abscisses est l'allongement absolu ΔL donné en millimètres. Comme les résultats dépendent trop des dimensions de l'échantillon, cela nous conduit à dire que cette courbe n'offre pas beaucoup d'intérêt et sa transformation en courbe nominale ou conventionnelle de traction à partir des résultats obtenus (Tableau III. 2) est nécessaire. La courbe nominale de traction se trace avec :

- En ordonnée la contrainte de traction $T = \frac{F}{A}$ (MPa) ou (N/mm²) (5)

- En abscisse la déformation relative $e = \frac{\Delta L}{L_0}$ (%) (6)

Tab. III. 2 : Résultats de mesure de traction

Légende	Échantillons-Nr.	F N	TM Pa	Allongement à force maximale mm	Allongement à la rupture %	Epaisseur Mm	Largeur mm	A mm ²
	1	41,5	5,2	53	213	2	4	8,00
	2	26,4	3,3	39	156	2	4	8,00
	3	21,0	2,6	34	135	2	4	8,00
	4	31,3	3,9	44	177	2	4	8,00
	5	38,9	4,9	51	206	2	4	8,00
	6	26,6	3,3	39	157	2	4	8,00
	7	25,7	3,2	37	148	2	4	8,00
	8	29,2	3,6	40	160	2	4	8,00
	9	25,4	3,2	36	145	2	4	8,00
	10	21,5	2,7	34	136	2	4	8,00

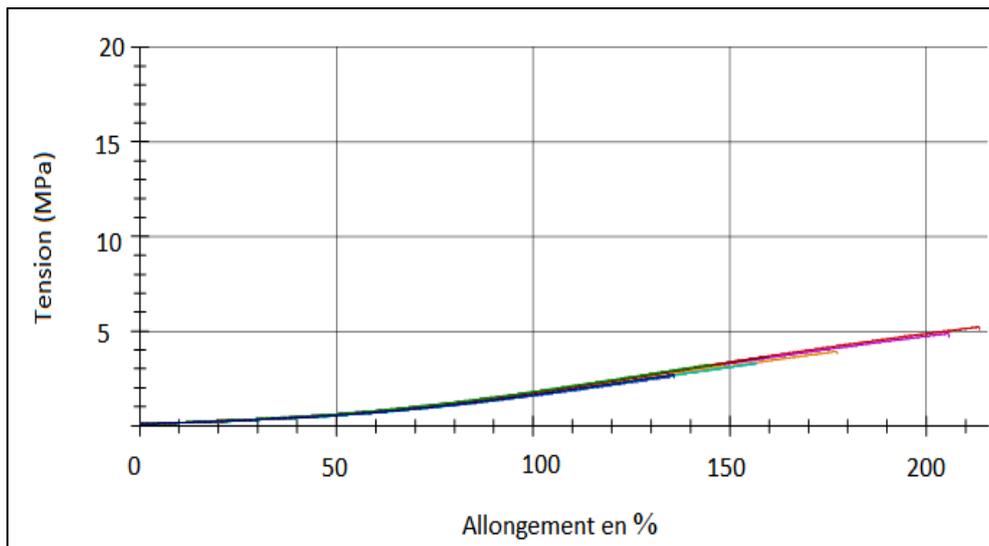


Fig. III. 15 : Courbe nominale de traction

L'allure de la courbe nominale de traction montrée en figure III. 15 peut être subdivisée en trois régions :

- Région élastique : la déformation est proportionnelle à la contrainte appliquée.
- Région plastique : au-delà d'une contrainte limite, limite d'élasticité, l'échantillon commence à se déformer plastiquement de manière permanente. Cette région se caractérise par une augmentation de déformation sans augmentation significative de la contrainte.
- Région de rupture : où le matériau se rompt sous l'effet de la contrainte appliquée. Au-delà d'une contrainte limite, le matériau subit une déformation localisée, dans une partie restreinte de la section. La section se réduit très vite ce qui mène à la rupture de l'échantillon.

En connaissant la courbe de traction d'un matériau, il est possible de choisir le matériau le plus adapté pour une application donnée et de concevoir des structures et des composants qui répondent aux exigences de performance et de sécurité.

Il est très remarquable d'après la figure III. 15 que le XLR 600 procède une grande capacité de déformation plastique avant la rupture. Cela signifie que les isolateurs en élastomère silicone peuvent se déformer sous des charges mécaniques importantes sans se rompre, ce qui réduit le risque de défaillance de l'isolateur et de dommages aux équipements électriques.

La détermination de la résistance à la déchirure de l'élastomère silicone suivant la norme ISO 34 [152] est réalisée avec la même machine d'essais des matériaux statiques (Fig. III. 16).

La norme ISO 34 spécifie trois méthodes d'essai à savoir :

- Méthode A ; à l'aide d'une éprouvette de pantalon ;
- Méthode B ; à l'aide d'une angulaire, avec ou sans entaille d'une profondeur spécifiée

- Méthode C ; à l'aide d'une éprouvette en forme de croissant munie d'une encoche.

La méthode adoptée dans notre investigation est la méthode A car elle n'est pas sensible à la longueur de la coupe.

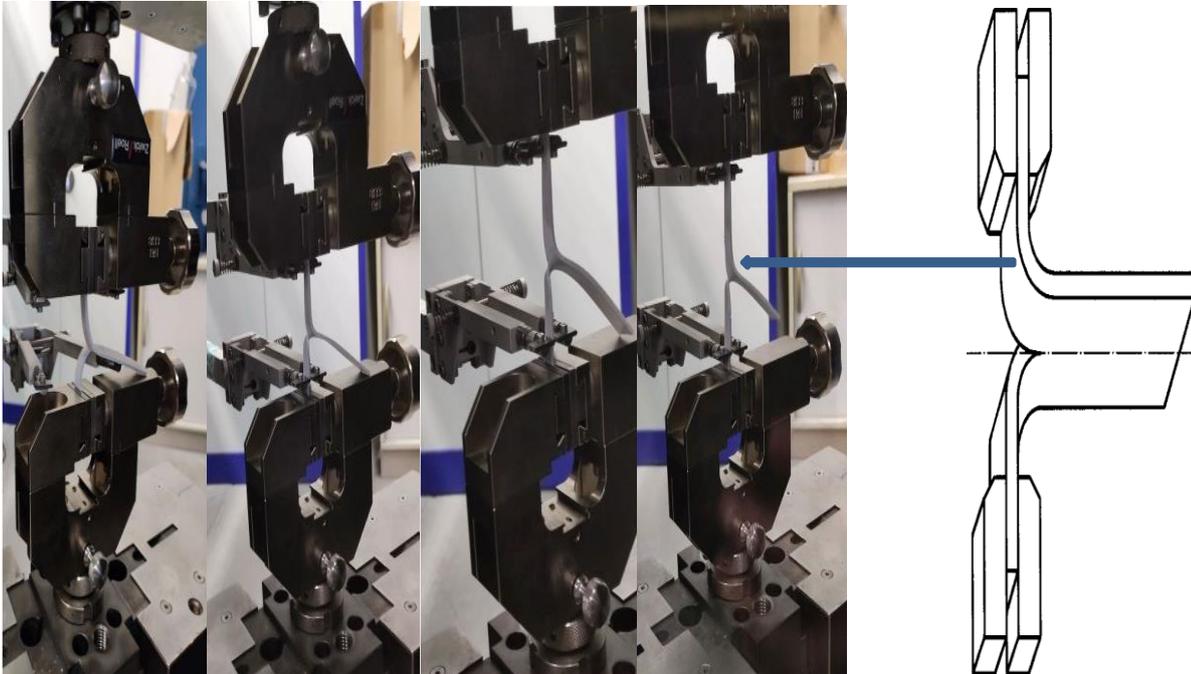


Fig. III. 16 : Mesure de la résistance à la déchirure de l'échantillon XLR60

L'éprouvette est préparée en découpant une bande d'élastomère silicone XLR 600 en forme de pantalon selon les dimensions standards indiquées à la figure III. 17.

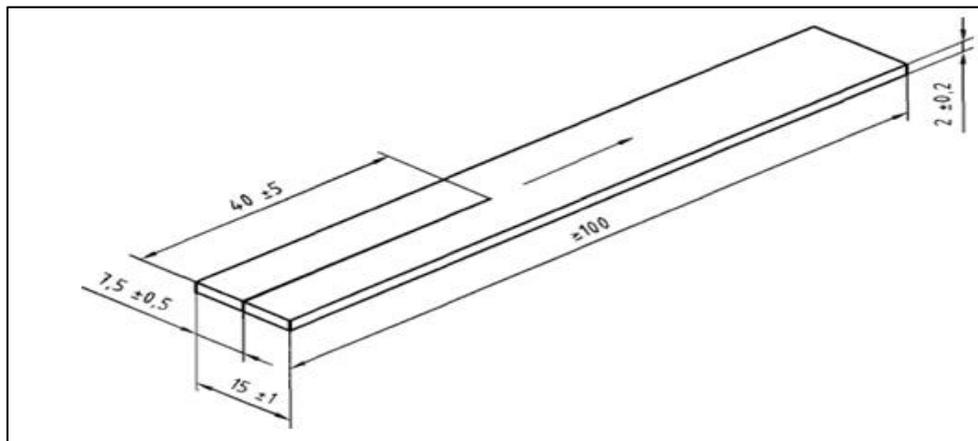


Fig. III. 17 : Epreuve de pantalon ; dimensions en millimètres [152]

L'éprouvette est ensuite fixée dans la pince inférieure de la machine universelle (Fig. III. 16). Après avoir réglé et fixé la vitesse de traction à 100 mm/min, une force de traction sur l'éprouvette de pantalon est appliquée jusqu'à ce qu'elle se déchire.

La force maximale appliquée avant la déchirure de l'éprouvette est ensuite enregistrée et la résistance à la déchirure de l'élastomère silicone est calculée en divisant la force maximale appliquée par l'épaisseur de l'éprouvette.

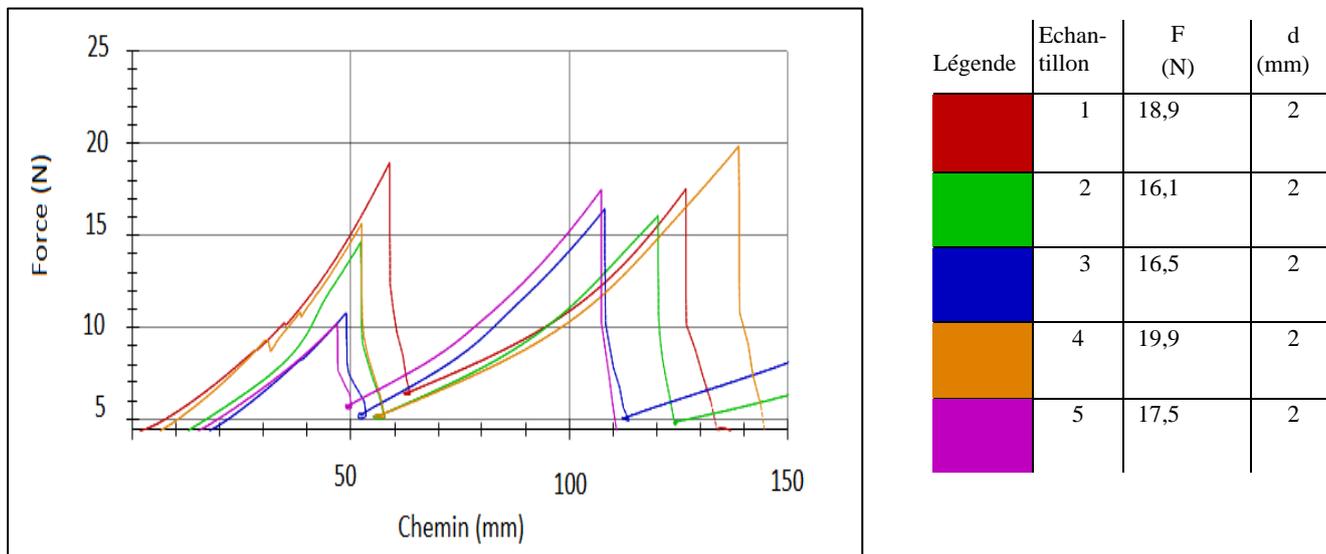


Fig. III. 18 : Mesure de résistance à la déchirure de XLR 600

La courbe de mesure de la résistance à la déchirure de l'élastomère silicone XLR 600 à l'aide de l'éprouvette de pantalon illustrée en figure III. 18 présente des pics et des creux qui sont dues à l'irrégularité de la déchirure. Les pics indiquent où l'élastomère est plus résistant à la déchirure, tandis que les creux peuvent indiquer des zones où l'élastomère est plus faible. La résistance à la déchirure moyenne calculée sur cinq éprouvettes $TS = \frac{F}{d}$ est égale à 8,9 kN/m. L'élastomère silicone XLR 600 avec une résistance à la déchirure de 8,9 kN/m peut être considéré comme un matériau de qualité pour les isolateurs de lignes aériennes en raison de sa résistance à la déchirure élevée. Cela signifie qu'il peut résister à des forces de déchirures importantes sans se rompre ou se déchirer facilement.

III.2. 2. 3 Chambre de brouillard

La chambre de brouillard du laboratoire de haute tension de l'université de Zittau (Allemagne) est de 1,6 m * 1,6 m * 2,5 m de dimensions. Ses parois sont en PVC, elles sont transparentes et permettent l'inspection visuel de loin des échantillons testés à l'intérieur de la chambre à l'aide d'une lampe portative lorsque celle-ci est mise en marche. Elle est munie d'une porte en plexiglace pour accéder à l'intérieur de la chambre lorsque celle-ci est hors fonctionnement pour effectuer tous les réglages nécessaires, fixer ou enlever des échantillons et nettoyer la chambre à la fin de l'analyse. Au milieu de

la chambre, les échantillons sont fixés sur un dispositif qui permet la variation de l'angle d'inclinaison α de l'isolation par rapport à l'horizontal de 0° jusqu'à 90° . Celui-ci est fabriqué en métal et teinté avec plusieurs couches de teinte isolante pour éviter sa corrosion qui pourra être causée par son contact avec la solution saline (Fig. III. 20). La chambre est équipée de 2 atomiseurs de type D 505 (Defensor AG Pfäffikon, CH) placés dans deux coins opposés de la chambre alimentant celle-ci avec un brouillard uniforme. Ils sont contrôlés de telle sorte que le taux de précipitation selon le tableau 2 de la norme IEC 62217 [153] soit atteint. Le taux de pulvérisation est fixé à $1,5 \pm 0,5$ ml/h.

La conductivité électrique de la solution contaminante pulvérisée est $1,78$ mS/cm. Elle est obtenue en ajoutant une quantité du Nitrate de Magnésium ($Mg(NO_3)_2$) à un volume d'eau de robinet avec une concentration de 1Kg/m^3 (1g/L) selon la norme : IEC 62217.



Fig. III. 19 : Chambre de brouillard

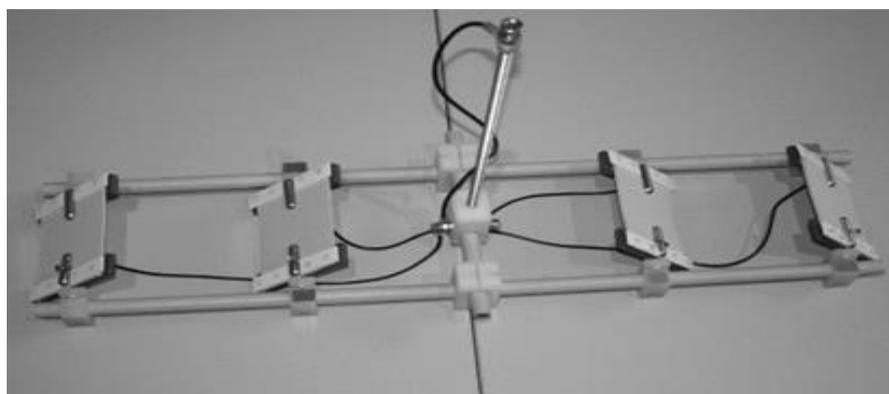


Fig. III. 20 : Dispositif d'essai pour l'essai au brouillard salin

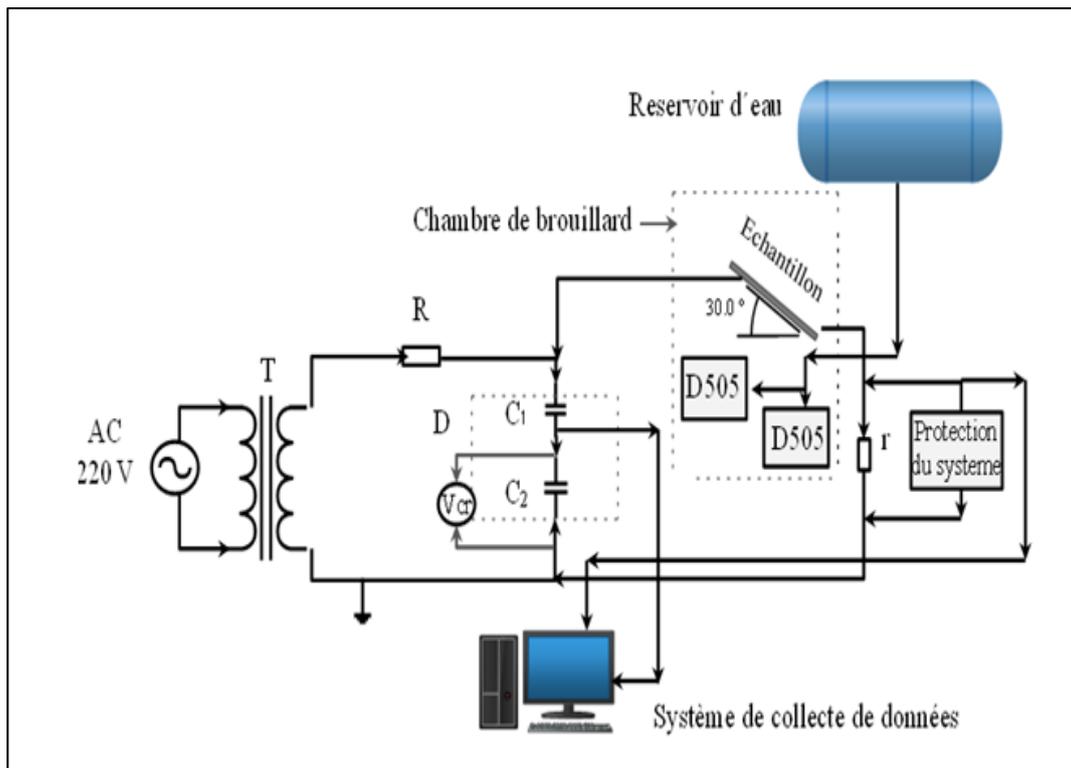


Fig. III. 21 : Schéma de mesure de courant de fuite circulant sur les surfaces isolantes de l'isolation (Tr : Transformateur ; AC : Appareil de commande de la tension d'essai ; V_{cr} : Voltmètre de crête ; D : Diviseur capacitif ; R : résistance d'affaiblissement de courant ; D505 : Atomiseur

III. 2. 2. 4 Mesure de courant de fuite

Le circuit électrique de la chambre de brouillard et de mesure de la tension appliquée à l'échantillon et le courant de fuite circulant sur leurs surfaces est montré en figure III. 21.

Le circuit de mesure de la tension appliquée à l'isolation et le courant circulant sur celle-ci est connecté aux bornes du secondaire d'un transformateur haute tension (0.08 A/135 kV). La sortie du transformateur est reliée au diviseur capacitif (C_1/C_2) à travers la résistance d'affaiblissement de courant (R). Le voltmètre de crête (V_{cr}), à affichage numérique, est branché aux extrémités de la capacité basse tension (C_2). L'échantillon est connecté aux bornes du diviseur capacitif (C_1/C_2). En utilisant des capteurs de courant, le système de collecte de données peut enregistrer les courants de fuites circulants à travers la surface de l'isolation dans la chambre de brouillard pour une analyse ultérieure, comme il peut également être utilisé pour surveiller en temps réel les courants de fuite et déclencher des arrêts d'urgence en cas de dépassement de seuil de courant de fuite effectif fixé à 1 mA pendant 2 secondes.

Pour chaque angle d'inclinaison α (0° , 30° , 45° , 90°), l'isolation mise sous tension alternative de 1 kV, est exposée au brouillard salin pendant une période de 1000 h maximale. Le temps d'exposition de ces

échantillons au brouillard est fonction de leur contournement, tel que le courant de fuite maximal qui pourra circuler et court-circuité leurs surfaces ne doit pas dépasser le seuil de courant de fuite fixé. Au-delà de cette valeur, la chambre de brouillard se met hors tension automatiquement. La mesure de ces courants de fuite durant toute la période d'analyse est obtenue en utilisant le logiciel NextView®4. Ce logiciel permet de réaliser des applications de mesure de toutes sortes, de manière efficace et sans aucun effort de programmation et garantit aussi des temps d'exécution très rapides pour des volumes de données presque illimités. À l'aide d'un système de mesure externe connecté au PC, les données de mesure sont saisies directement, affichées, paramétrées et enregistrées dans le disque dur. Les résultats de mesures de courant de fuite récoltés sont de l'ordre de 176000 valeurs pour chaque une heure d'essai, autrement dit, une mesure de courant de fuite est obtenue chaque $2.00 \cdot 10^{-02}$ s, sur la période d'exposition au brouillard salin estimée à 1000h, ce qui fait, $176 \cdot 10^6$ mesures de courant de fuite sont atteintes à la fin de l'investigation. Le traitement et l'exploitation des données obtenues sont réalisés sous l'environnement MATLAB.

III. 2. 2. 5 Mesure de l'hydrophobie

III. 2. 2. 5. 1 Le système optique de mesure d'angle de contact et d'analyse de contour

L'étude de l'hydrophobicité et la caractérisation des propriétés de mouillage des surfaces des échantillons à différentes inclinaisons α par rapport à l'horizontale (0° , 30° , 45° , 90°) avant et après leur vieillissement par brouillard salin sous tension alternative ont été effectuées en déterminant l'angle de contact statique (ACS) et l'angle de contact dynamique (ACD) à l'aide d'un système optique de mesure d'angle de contact et d'analyse de contour OCA35 (goniomètre) (Fig. III. 22). Ce dernier, combine une optique haute résolution, un dosage exact de liquide et un positionnement précis de l'échantillon dans des systèmes de mesure puissants et fiables.

Le goniomètre OCA35 est construit par un cadre métallique robuste en aluminium et doté d'un éclairage LED avec une intensité contrôlée manuellement ou par logiciel.

Il est composé de :

- Table d'échantillonnage motorisée, contrôlée par logiciel, réglable sur les axes X, Y et Z ;
- Objectif zoom haute performance avec mise au point continue intégrée et un angle d'observation réglable ;
- Système de mesure vidéo avec caméra USB (123 images/s), facilement extensible avec différentes options de vitesse (Jusqu'à 2200 images/s) ;

- Systèmes de dosage direct SD-DM, DD-DM, TD-DE/3 et SD-DE, tel que le volume et le débit de dosage est contrôlé par logiciel (min. 50 nl (0,06 μ l/s....26,4 μ l/s).

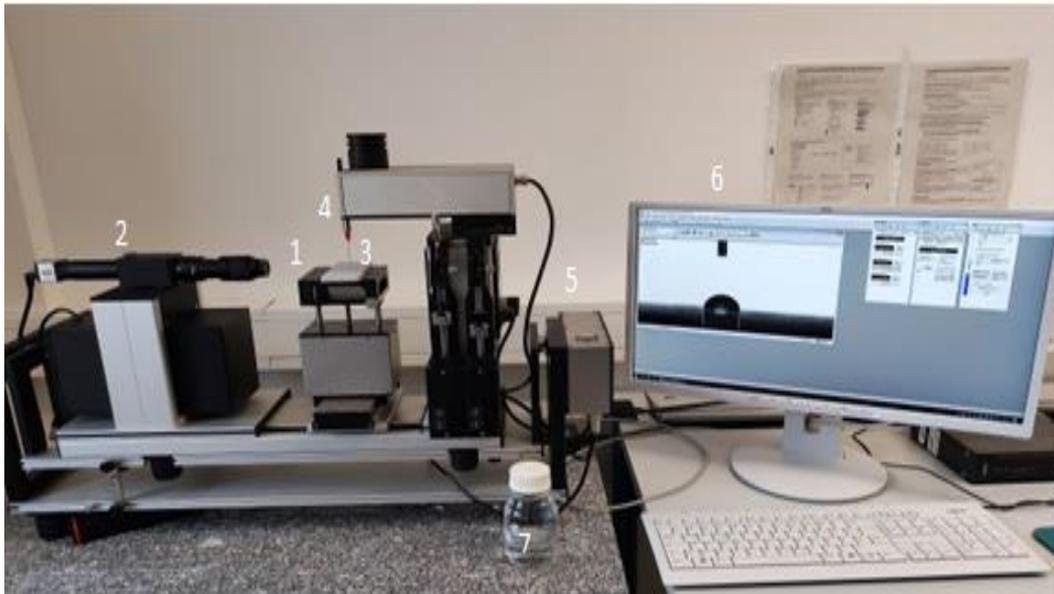


Fig. III. 22 : Système optique de mesure d'angle de contact et d'analyse de contour OCA35 ; 1) Table d'échantillonnage (X, Y, Z) ; 2) Objectif zoom ; 3) Echantillon ; 4) Seringue micro graduée ; 5 LED éclairage avec intensité contrôlée ; 6) Micro-ordinateur ; 7) Eau désionisée

Avant de commencer les mesures, il faut s'assurer que le goniomètre est placé dans un endroit de manière qu'il ne soit pas exposé à des vibrations, à des courants d'airs ou à une lumière extérieure intense et que les essais sont effectués à une température de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ et une humidité relative de $(50 \pm 5) \%$.

La mesure de l'angle de contact statique et dynamique de nos échantillons avant et après exposition au brouillard salin est effectuée selon la norme DIN IEC/TS62073, VDE 0674-276 [78]. Elle consiste à :

- Déposer une goutte d'eau de 5 μ l sur la surface de l'isolant et à mesurer l'angle de contact statique entre la goutte d'eau et la surface de l'isolant. Si l'angle de contact est supérieur à 90° , cela indique que la surface est hydrophobe et si l'angle de contact est inférieur à 90° , cela indique que la surface est hydrophile.
- Déposer une goutte d'eau sur la surface de l'isolation et l'inclinée en inclinant progressivement le goniomètre à un angle donné pour déterminer l'angle de contact dynamique. La goutte d'eau commence alors à se déplacer sur la surface et l'angle de contact est mesuré à différents moments pendant le mouvement de la goutte, c'est la méthode de plan incliné.
- Déposer une petite goutte d'eau (5 μ l) sur la surface de l'isolation. La goutte d'eau est ensuite observée à travers le goniomètre, qui est équipé d'un système de mesure de l'angle dynamique

permettant de mesurer l'angle de contact entre la goutte d'eau et la surface de l'isolation en temps réel. Cette mesure est effectuée en faisant varier le volume de la goutte d'eau déposée sur la surface de l'isolation, tel qu'en rajoutant de l'eau à la goutte jusqu'à elle se gonfle et que la ligne de contact avance et l'angle d'avancée se forme. Ensuite la goutte est absorbée jusqu'à ce que la ligne de contact recule et l'angle de recule se forme. Dans ce cas de mesure, la méthode de détermination de l'angle de contact dynamique est appelée méthode des volumes.

III. 2. 2. 5. 2 Comparaison entre la méthode des volumes et de l'angle incliné pour la mesure de l'angle de contact par goniomètre

Une étude comparative entre la méthode des volumes et de plan incliné pour la mesure d'angle de contact dynamique de la goutte d'eau par goniomètre est réalisée avant de commencer les mesures. Pour se faire, des mesures d'angle de contact dynamique de la goutte d'eau sur la surface des échantillons par les deux méthodes ont été effectuées séparément sur 4 éprouvettes dont cinq points de mesures dans des endroits différents le long de la surface isolante sont pris pour chaque échantillon. La valeur considérée à la fin est la moyenne arithmétique calculée de ces 5 valeurs d'angles de contacts statiques et dynamiques pour chaque échantillon.

III. 2. 2. 5. 3 Méthode des volumes

L'échantillon est placé sur le porte-échantillon. Ce dernier est ajusté de façon que la surface de l'échantillon soit située dans la moitié inférieure de l'image. Le système de dosage est ensuite rempli avec de l'eau désionisée, tout en faisant attention à ce que le remplissage se fasse sans bulles d'air et une représentation d'image suffisante en termes de luminosité et de contraste est définie sur l'écran d'un microordinateur lié directement au goniomètre.

Après avoir réglé tous ces paramètres, une goutte de 5 μl est appliquée sur la surface de l'échantillon en position horizontale, ensuite, la ligne de base figurée sur l'écran est alignée de manière qu'elle passe par les points triphasés de la goutte et la valeur de l'angle de contact statique mesurée est donnée immédiatement. Ensuite, le liquide est ajouté progressivement à la goutte pour augmenter son volume, jusqu'à ce qu'il atteigne une certaine valeur critique où la ligne de contact triphasée entre la surface et la goutte augmente et commence à se déplacer vers l'avant, l'angle de contact avancé (Θ_a) est mesuré (Fig. III. 23 à gauche). Par contre, lorsqu'on aspire lentement le liquide de la goutte à un taux très faible et que la ligne de contact se retire, l'angle de contact de recul est mesuré (Θ_r) (Fig. III. 23 à droite). Il est à noter que le taux d'ajout ou de retrait de liquide doit être suffisamment faible (1.5 $\mu\text{l/s}$)

pour que la gouttelette ait le temps de se détendre et il est nécessaire de filmer une séquence d'images de la goutte pour mesurer son angle de contact dynamique.

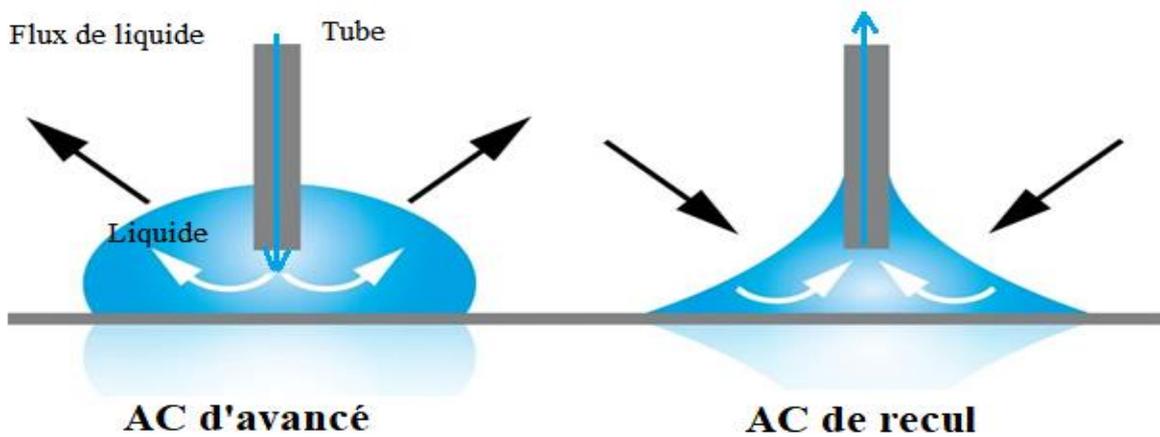


Fig. III. 23 : Mesure de l'angle d'avancé (à gauche) et de l'angle de recul (à droite) par variation de volume

III. 2. 2. 5. 4 Méthode de plan incliné

La méthode de plan incliné pour la mesure de l'angle de contact dynamique consiste à incliner la base du goniomètre (Fig. III. 24) à des positions arbitraires correspondant aux inclinaisons α (30° , 45° , 90°) des isolations étudiées dans notre travail.

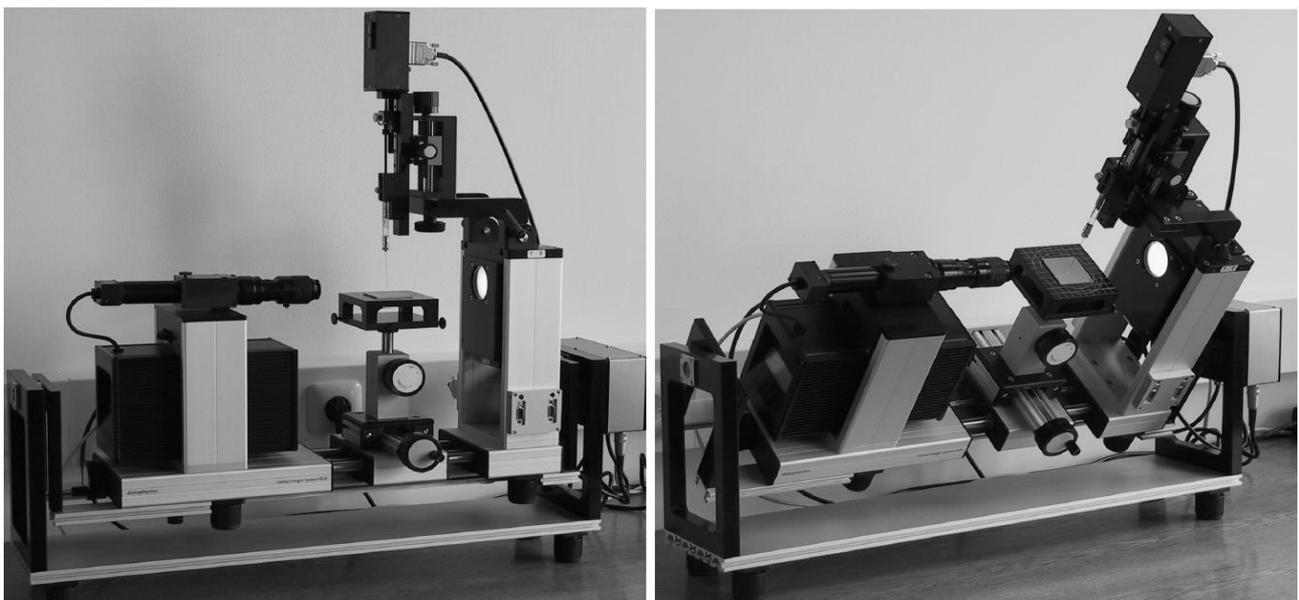


Fig. III. 24 : Mesure de l'angle de contact dynamique avec goniomètre a plan incliné

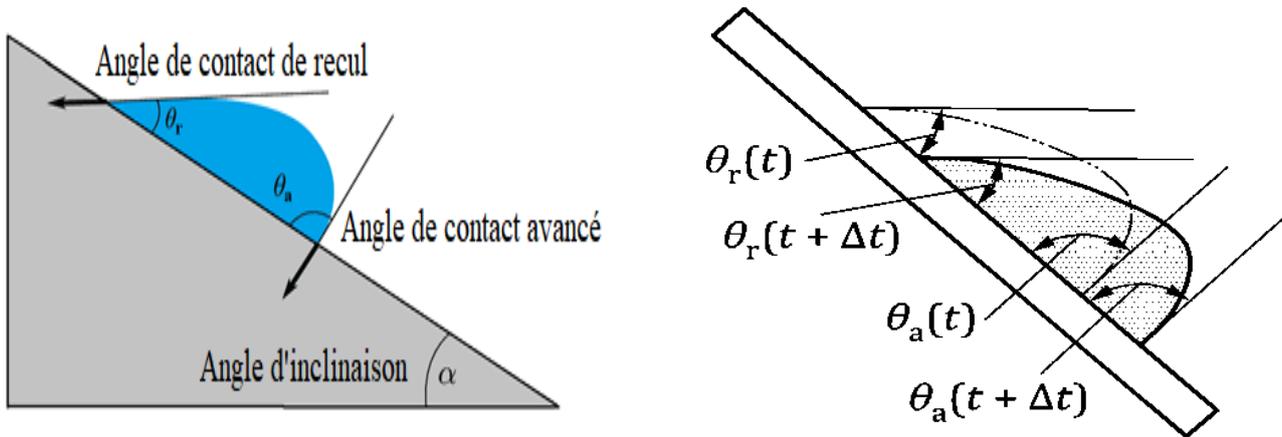


Fig. III. 25 : Mesure de l'angle d'avancement et de recul par plan incliné [154]

Le volume des gouttes déposées sur la surface des échantillons dépend de l'angle de glissement des gouttes le long de ces surfaces inclinées. Cet angle est défini comme l'angle critique auquel une gouttelette de liquide commence à glisser et il est atteint lorsque la goutte a parcouru une distance Δ_s égal à 1 mm minimum le long de la surface. Selon la norme DIN EN ISO 19403-7 [154], les volumes des gouttes d'eau de 50 μl , 30 μl et 18 μl sont utilisés pour les angles de roulement de 30°, 45° et 90° respectivement. Une séquence vidéo est lancée à l'aide du logiciel avant de commencer les mesures, ceci nous permettra d'analyser les images enregistrées par la caméra à différents moments du mouvement de la goutte, afin de déterminer l'angle de contact (Fig. III. 26). Après avoir déposé la goutte d'eau sur la surface de l'échantillon en position horizontale (Fig. III. 24a) avec un taux de dosage de 1.55 $\mu\text{l/s}$, l'angle de contact statique (Θ_0) de la goutte est immédiatement donné. La base de goniomètre est ensuite inclinée progressivement avec une vitesse d'inclinaison de l'ordre de 1°/s jusqu'à atteindre l'angle de glissement prédéterminé (Fig. III. 24b). La gouttelette ne bouge pas au début, mais l'angle de contact à l'avant croît progressivement tandis que celui de l'arrière diminue au fur et à mesure que le liquide se déplace de l'arrière vers l'avant de la goutte immobile. L'angle de contact déterminé à cet instant (t) à son bord avant est l'angle d'avancement $\Theta_a(t)$, tandis que celui déterminé à son bord de recul est l'angle de recul $\Theta_r(t)$ (Fig. III. 25 à gauche). Les deux angles dynamiques d'avancé $\Theta_a(t + \Delta t)$ et de reculs sont mesurés après que la goutte est parcourue une distance Δ_s égale à 1 mm minimum pendant une durée Δt (Fig. III. 25 à droite). Il convient de noter qu'afin d'obtenir des résultats précis et fiables avec cette méthode, l'angle de glissement et le volume du liquide doivent être correctement choisis. Ces mesures ont été effectués sur 5 points différents le long de la surface de chaque échantillon, tandis que 4 échantillons ont été examinés pour chaque angle d'inclinaison α .

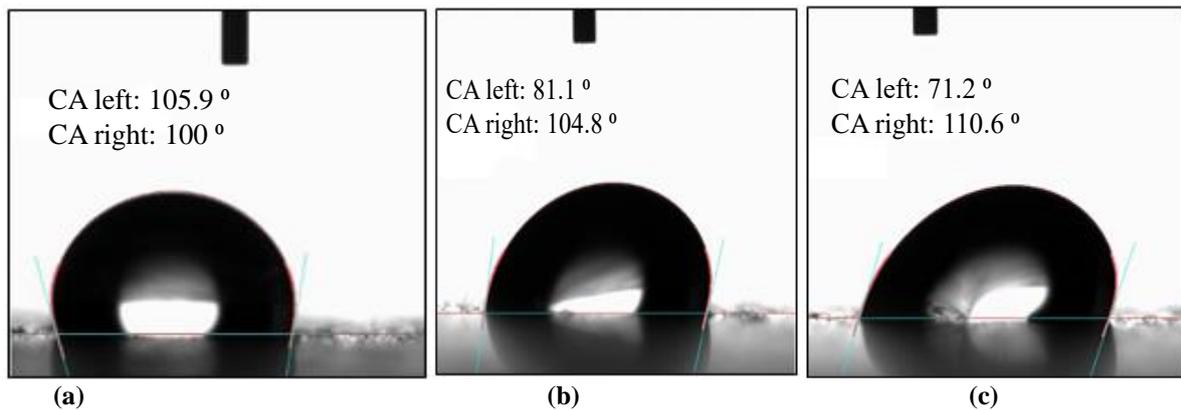


Fig. III. 26 : Mesure par la méthode de plan incliné de : a) l'angle de contact statique, b) angle d'avancé $\Theta_a(t)$ et de recul $\Theta_r(t)$ à l'instant t et c) l'angle d'avancé $\Theta_a(t+\Delta t)$ et de recul $\Theta_r(t+\Delta t)$ après déplacement de la goutte

En conclusion, la méthode des volumes est plus simple à mettre en œuvre et permet une mesure précise de l'angle de contact dynamique, tandis que la méthode du plan incliné offre une visualisation directe de l'angle de contact, mais peut être plus complexe à mettre en œuvre et moins précise. Ceci nous a conduit à choisir la méthode des volumes pour la mesure d'angle de contact statique et dynamique pour déterminer et étudier l'hydrophobie des surfaces de nos échantillons avant et après vieillissement par brouillard salin et tension alternative.

III. 2. 2. 6 Mesure de la rugosité

La mesure de la rugosité et la quantification des différents états de surfaces de nos isolations inclinées avec un angle α variant de 0° jusqu'à 90° avant et après exposition au brouillard salin lorsque celles-ci sont soumises à une tension alternative selon la norme :ISO 4287 [155], est réalisée en utilisant un microscope numérique, séries VHX-950 (Fig. III. 27).



Fig. III. 27 : Microscope numérique, séries VHX-950F

Cette méthode est très précise et fiable, elle permet d'obtenir des résultats rapides et précis.

Le microscope numérique VHX-950F (Fig. III. 27), comprend un écran LCD de 23 pouces, un disque dur de grande capacité, une source lumineuse et un USB. Il est équipé d'un objectif qui est l'élément le plus important dans la contribution à l'obtention d'une haute résolution et d'une grande profondeur de champs. L'objectif est une lentille qui se trouve près de l'échantillon. Cette lentille est responsable de la formation et de la capture de l'image, elle peut agrandir l'image de l'échantillon et permet de visualiser les détails à une résolution élevée. Les objectifs peuvent être interchangeables pour permettre une observation à différents niveaux de grossissement. L'objectif utilisé dans notre étude est l'objectif x2000. Après le nettoyage et le conditionnement des échantillons sous une température de $(23\pm 2)^\circ$ et une humidité de $(45\pm 5)\%$, ils sont immédiatement examinés sous microscope après avoir ajusté et réglé tous ses paramètres, tels que la résolution, le grossissement et la mise au point pour obtenir une image claire et nette de la surface. L'analyse est effectuée par un logiciel d'analyse d'image pour mesurer la rugosité de la surface. Le logiciel peut calculer la rugosité en utilisant des paramètres tels que la hauteur moyenne des aspérités, la profondeur des rainures et des crêtes, la distance entre les sommets et les creux. En effet, les valeurs suivantes : Ra, Rz et RzJIS sont directement affichées et données comme le montre la figure III. 28.

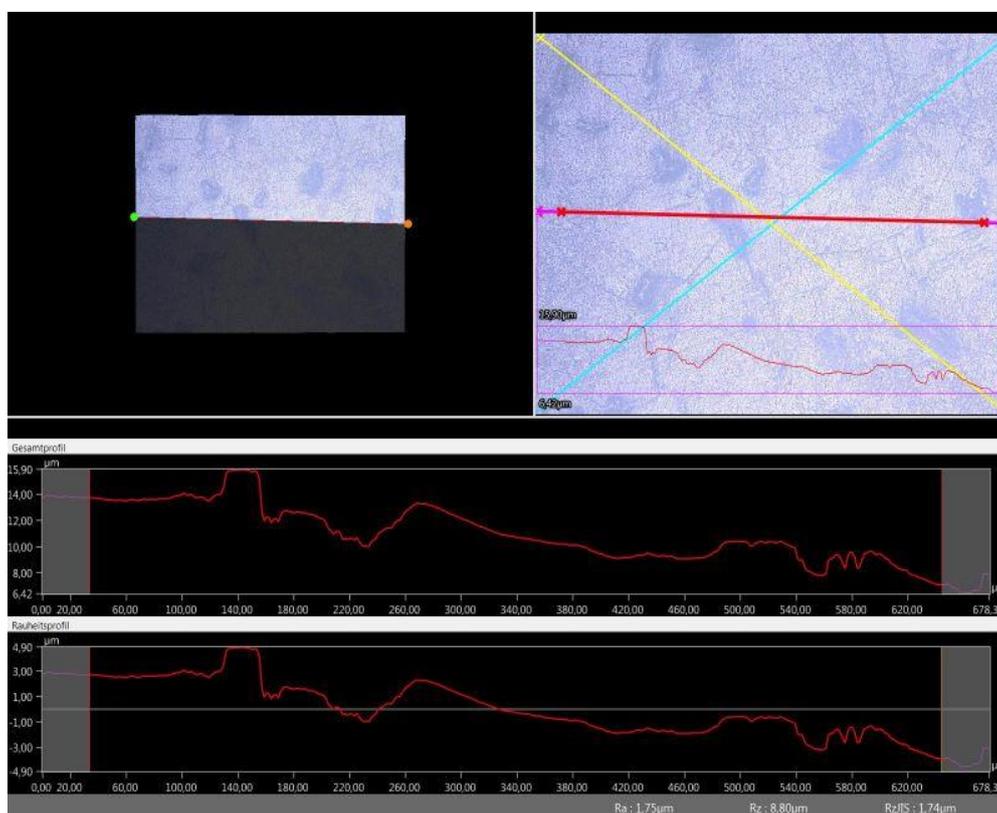


Fig. III. 28 : Mesure de la rugosité d'un échantillon après 1000 h d'exposition au brouillard salin, $\alpha = 90^\circ$

Ra, Rz, RzJIS sont respectivement, la rugosité moyenne de la surface, la somme de la hauteur maximale du pic et de la profondeur maximale du creux et la somme de la valeur moyenne de la hauteur des cinq pics les plus hauts et de la moyenne de la profondeur des cinq creux les plus profonds d'un profil dans la longueur d'échantillonnage. Cinq mesures dans des zones différentes sur la surface de l'échantillon ont été effectuées afin d'obtenir une moyenne représentative de la rugosité de la surface. Bien que la méthode de mesure de la rugosité de surface avec un microscope numérique soit fiable, il est important de noter qu'elle comporte certaines limites à prendre en considération dont, la résolution limitée des microscopes numériques qui peut limiter la capacité à détecter de petites variations de rugosité de surface, l'éclairage utilisé avec le microscope numérique qui influence les mesures, surtout si l'éclairage n'est pas uniforme ou si des reflets sont présents ainsi que la sensibilité des mesures de rugosité de surface avec un microscope numérique aux conditions environnementales telles que la température, l'humidité et les vibrations [155], ce qui peut affecter la précision des mesures.

III. 3 Conclusion

Tous les équipements et dispositifs utilisés dans notre investigation de la pluie sur site et au laboratoire et son effet sur l'humidification des isolations en silicones ainsi que tout le matériel de réalisation et de mesure utilisés lors de l'étude de vieillissement des isolations en élastomère silicone exposés au brouillard salin sous tension alternative sont décrits en détail dans ce chapitre. Ceci est essentiel pour garantir la fiabilité et la précision des résultats obtenus.

Toutes les techniques de variations d'angle d'inclinaison de l'isolation et de mesures du volume de gouttes d'eau, leur arrangement et la constellation des gouttes résiduelles sur les surfaces isolantes ont été présentés. Lors de vieillissement des élastomères silicones sous brouillard salin, les échantillons ont été soumis à des conditions de corrosion accélérées dans une chambre de brouillard, tandis que leur comportement après vieillissement est observé à l'aide de divers instruments de mesure tels que le microscope et le goniomètre. Les résultats obtenus permettent de mieux comprendre les mécanismes de dégradation des isolations et de développer des matériaux plus résistants aux environnements corrosifs. Les résultats des différentes analyses et études sont exposées et discutées dans le chapitre suivant.

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION

IV. 1 Introduction

La recherche des conditions d'exploitation optimales des isolateurs polymères dans les conditions environnementales défavorables est une condition essentielle pour assurer le bon fonctionnement et la meilleure fiabilité des installations et des réseaux de transport de l'énergie électrique. Ce chapitre est consacré à la présentation et l'interprétation des résultats obtenus des différents essais menés sur site et dans les laboratoires de haute tension des universités de Bejaia en Algérie et de Zittau en Allemagne.

Grâce à ces résultats, nous avons pu caractériser et déterminer le degré d'humidification sous pluie naturelle d'une isolation en silicone à angle d'inclinaison variable par rapport à l'horizontale lorsqu'elle est hors tension. Les gouttes d'eau de pluie recensées sur l'isolation sont ensuite reproduites en laboratoire dans le but d'étudier et de quantifier l'impact de leurs volumes sur le taux d'humidification de la ligne de fuite de l'isolation inclinée et par conséquent sur ses performances électriques sous un niveau variable de tension alternative. L'investigation nous a permis aussi d'étudier la performance de l'isolation en silicone inclinée à différents angles d'inclinaison vieillis sous brouillard salin et tension alternative. Ceci, en évaluant après vieillissement, l'hydrophobie et la rugosité de surface des isolations inclinées à différents angles d'inclinaisons, ainsi qu'en quantifiant les courants de fuites circulant à leurs surfaces en fonction du temps d'exposition au brouillard salin et de leur inclinaison.

L'élastomère silicone a été choisi pour des raisons de sa légèreté, de sa résistance mécanique élevée et de sa très bonne hydrophobicité. Cette dernière minimise les courants de cheminement et empêche le développement des décharges électriques dues au contournement, même si elle est fortement contaminée.

IV. 2 Degré d'humidification sous pluie naturelle d'une isolation à angle d'inclinaison variable

L'évolution du volume des gouttes d'eau récoltées sur le secteur S_1 (Fig. III. 1) en fonction de leur taille et du temps d'exposition des divers échantillons de l'isolation sous la pluie naturelle est illustrée par la figure IV.1. Son allure résultante se présente sous forme de dents de scie quelle que soit la taille des gouttes d'eau. Les courbes de la figure IV. 1 présentent des pics de volume de gouttes d'eau. En effet, suite au phénomène de collision de gouttes d'eau de pluie avec la surface de l'isolation, à angle d'inclinaison quelconque et leur diffusion sur celle-ci, la

quantité d'eau récoltée par cm^2 de sa surface augmente jusqu'à atteindre un volume maximal correspondant aux pics suscités. Ce volume maximal est défini comme étant la quantité d'eau pouvant encore adhérer à son point d'impact sur l'isolation hors tension sous l'effet des forces de gravitation et hydrodynamiques. La valeur de ces pics de volume des grosses gouttes d'eau est fonction aussi de l'inclinaison de l'isolation, du vent et de la température. En absence de tension, les grosses gouttes d'eaux alourdies finissent par tomber sous l'effet de la résultante des forces suscitées en laissant derrière elles des résidus de gouttelettes d'eau. Si à ce moment-là, la pluie continue à tomber, le volume d'eau résiduelle se trouve de nouveau rehaussé plus ou moins à sa valeur maximale par celui des gouttes d'eau de pluie naturelle tombant sur le même endroit. Par contre, si la pluie cesse de tomber, le volume d'eau maximal accumulé commencera à décroître à cause de son évaporation jusqu'à assèchement total de la surface d'impact lors d'une température élevée et/ou son éjection complètement du point d'impact par du vent. Mais, au cours de sa décroissance, il peut aussi atteindre une valeur inférieure montrée sur la figure IV.1. Celle-ci est définie comme étant la quantité d'eau enregistrée entre le temps d'arrêt de la première pluie et de reprise de la pluie suivante. Donc si la pluie reprend sa chute sans interruption pendant la décroissance de ce volume d'eau, celui-ci s'accroît de nouveau jusqu'à atteindre sa valeur maximale. Ceci explique bien la géométrie en dents de scie de la caractéristique illustrée par la figure IV. 1.

Quant aux gouttes moyennes et petites, elles sont généralement créées lors des éclats des gouttes d'eau de pluie naturelle suite à leurs impacts successifs sur la surface de l'isolation.

La figure IV. 1 montre aussi que le volume des grosses gouttes d'eau est égal à 93 % du volume total récolté sur le secteur S_1 . Par contre celui des gouttes d'eau moyennes et petites n'est respectivement que de 6.6 % et 0.4 % du volume total. En absence de tension, le volume maximal des grosses gouttes d'eau, pouvant être formé sur la surface d'une isolation en position horizontale ($\alpha = 0^\circ$), est de l'ordre de 140 μl . Celui-ci est atteint au bout de 90 minutes de chute ininterrompue de pluie naturelle et ce pic se reproduit de façon similaire lors de la deuxième pluie (Fig. IV. 1). Donc les grosses gouttes d'eau de pluie naturelle jouent un rôle très déterminant sur le degré d'humidification de la ligne de fuite de l'isolation et par conséquent sur sa performance électrique.

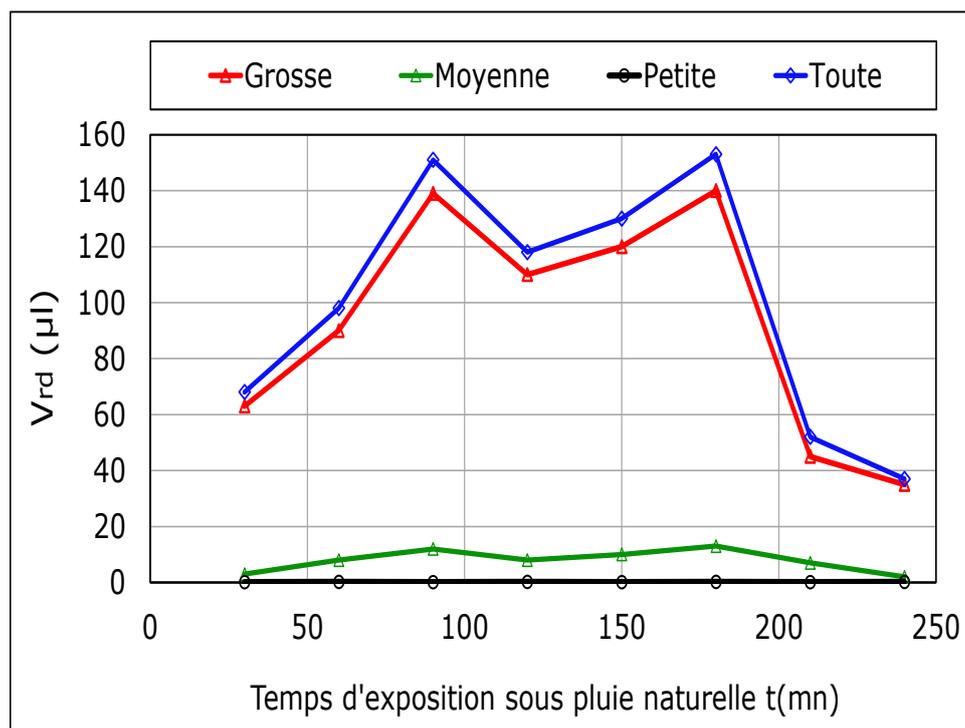


Fig. IV. 1 : Volume résiduel des gouttes d'eau récoltées sur le secteur S_1 en fonction de leur taille et du temps d'exposition de l'isolation à la pluie naturelle ($\alpha = 0^\circ$, $P_1 : 10/02/2018$)

La figure IV. 2 donne l'évolution du volume des gouttes d'eau résiduelles de pluie naturelle (V_{rd}) récoltées sur le secteur S_1 , le 10/02/2018 pour des angles d'inclinaison de l'isolation correspondant respectivement à $\alpha = 45^\circ$ et 90° . Il en résulte des allures en formes de dents de scie, similaires à celles obtenues pour la même isolation en position horizontale ($\alpha = 0^\circ$). Les deux courbes présentent, chacune, deux pics de volume de gouttes d'eau de pluie naturelle, dont leur valeur est fonction de l'angle d'inclinaison de la surface de l'isolation. Celle-ci est atteinte au bout de 90 minutes, lors de chacune des deux pluies successives indépendamment de l'angle d'inclinaison de l'isolation. Pour $\alpha = 45^\circ$, la valeur maximale du volume des gouttes d'eau résiduelles, pouvant adhérer encore à la surface de l'isolation, est de $80 \mu\text{l}$. Ce volume est décroissant et sa valeur maximale est de l'ordre de $20 \mu\text{l}$ pour $\alpha = 90^\circ$. L'allure de ces courbes est similaire à celles obtenues dans le cas d'une isolation en silicone inclinée d'un angle de 20° et exposée à une pluie naturelle [45]. Elle est aussi conforme à celle de la conductivité électrique d'une isolation en silicone exposée sous brouillard propre et mise sous tension alternative [156].

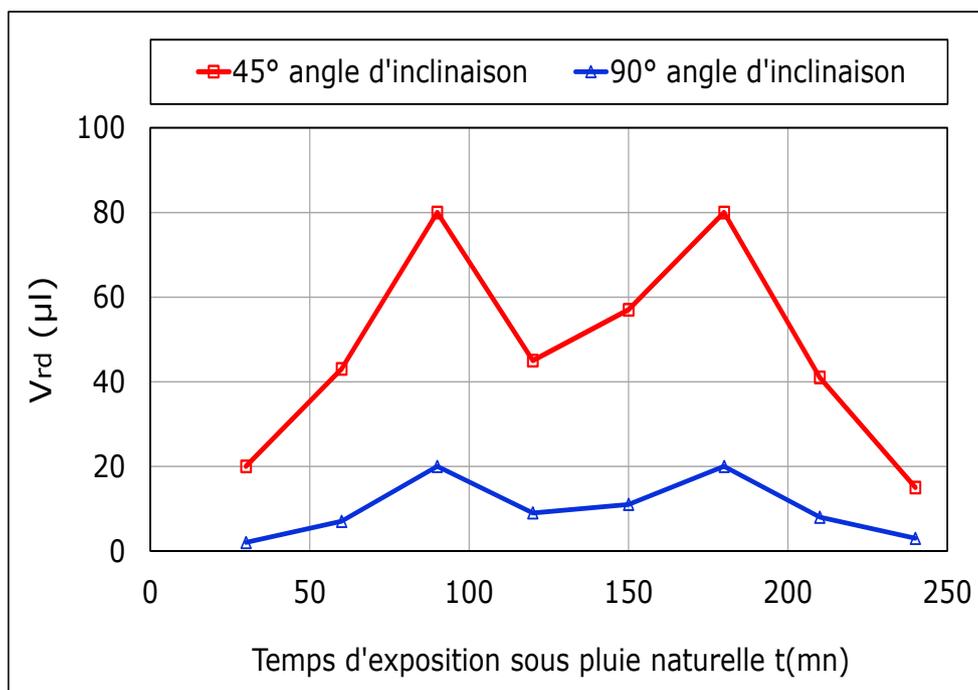


Fig. IV. 2 : $V_{rd} = f(t)$ pour les quatre secteurs S_1, S_2, S_3 et S_4 de l'isolation en silicone ($\alpha = (45^\circ, 90^\circ)$, $P_1 : 10/02/2018$)

La figure IV. 3 illustre l'allure de la caractéristique $V_{rd} = f(t)$ des gouttes d'eau de pluie naturelle récoltées sur quatre secteurs répartis deux à deux sur les extrémités de deux lignes de fuite (S_1, S_2) et (S_3, S_4) (Fig. III. 1). Il en résulte une très légère différence de volume entre les secteurs S_1 et S_2 ainsi que S_3 et S_4 . Le volume des gouttes d'eau résiduelles recouvrant respectivement les secteurs S_1 et S_3 en fonction du temps d'exposition de l'isolation peut être déduit directement de la figure IV. 3. Selon la figure IV. 4, la largeur du canal de l'arc électrique de contournement de la surface de l'isolation avec gouttes d'eau peut être estimée égale à environ 1 cm. La quantité d'eau résiduelle de pluie naturelle recensée sur les deux lignes de fuite (S_1, S_2) et (S_3, S_4) peut être donc déterminée en négligeant l'écart de volume d'eau existant entre les secteurs (S_1, S_3) et (S_2, S_4). Les deux lignes de fuite ont pour surface égale à 6 cm^2 et celle de chacun des secteurs S_1, S_2, S_3 et S_4 est de 1 cm^2 . Le volume maximal des gouttes d'eau récoltées sur la ligne de fuite (S_1, S_2) est de l'ordre de $6 \times 152 \mu\text{l} = 912 \mu\text{l}$ et $696 \mu\text{l}$ pour la ligne de fuite (S_3, S_4). Il en résulte un important écart de volume entre les deux lignes de fuite. Ceci peut être expliqué par un assèchement de la ligne de fuite (S_3, S_4) par un vent venant souvent du côté de la ligne de fuite (S_3, S_4) vers (S_1, S_2) et très rarement du côté (S_2, S_4) vers (S_1, S_3).

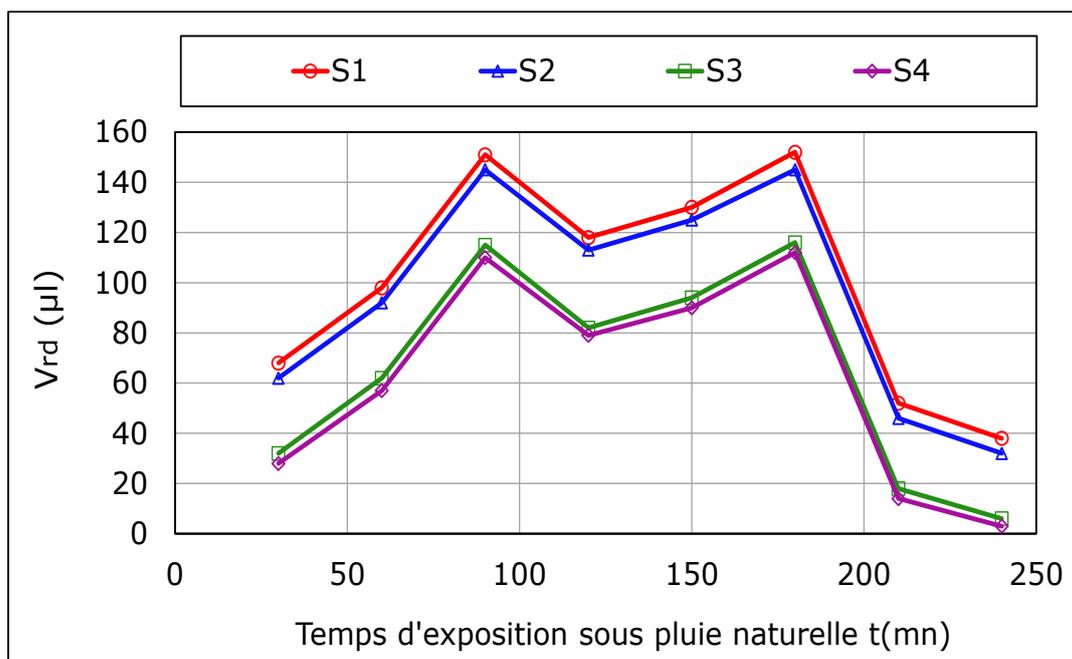


Fig. IV. 3 : $V_{rd} = f(t)$ pour les quatre secteurs S_1 , S_2 , S_3 et S_4 de l'isolation en silicone ($\alpha = 0^\circ$, P_1 : 10/02/2018)

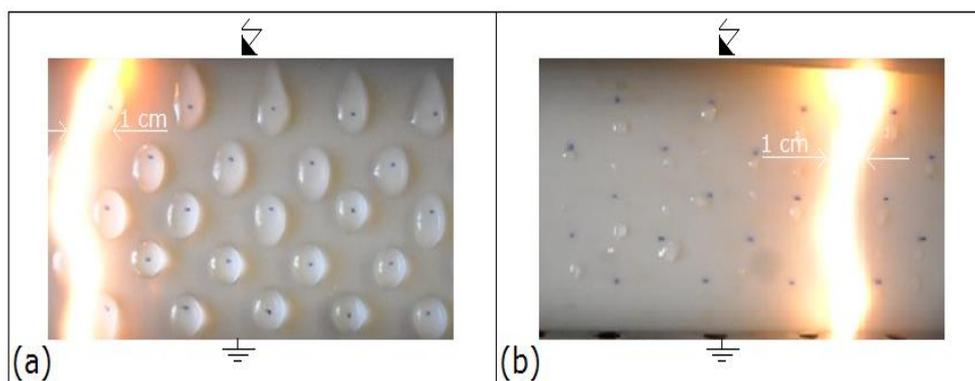


Fig. IV. 4 : Largeur du canal de l'arc de contournement de la surface d'une isolation en silicone recouverte de gouttes d'eau à angle d'inclinaison variable. a) $\alpha = 0^\circ$, b) $\alpha = 45^\circ$

Tab. IV. 1 : Conditions climatiques pendant les périodes de pluie naturelles

Période	10/02/2018	11/01/2019	21/01/2019
Température (°C)	8 à 9	7 à 8	10
Vent (Km/h)	27	25	26
Humidité relative (%)	85 à 90	86 à 92	87 à 92
Volume total de la pluie (ml)	420	350	380

Les valeurs de la vitesse du vent et d'autres grandeurs climatiques régnant sur le site d'exposition des échantillons de l'isolation sont résumées sur le tableau IV. 1 pour les trois périodes.

La répartition des diverses gouttes d'eau résiduelles de pluie naturelle est très aléatoire sur la ligne de fuite de l'isolation et de sa circonférence. Leur disposition le long de sa ligne de fuite et de sa circonférence obéit à un arrangement beaucoup plus rapproché de celui en forme de zigzag qu'en ligne droite (Figs. III. 1 et III. 2). De plus la géométrie de ces courbes en zigzag est très asymétrique. Ce résultat est en totale conformité avec celui obtenu dans le cas d'une isolation en silicone inclinée d'un angle de 20° et exposée au phénomène de condensation et de pluie naturelle [45].

Les résultats de comparaison des volumes des gouttes d'eaux résiduelles de pluie naturelle, recueillis sur le secteur S_1 de l'isolation durant les trois périodes de mesure, sont résumés en figure IV. 5.

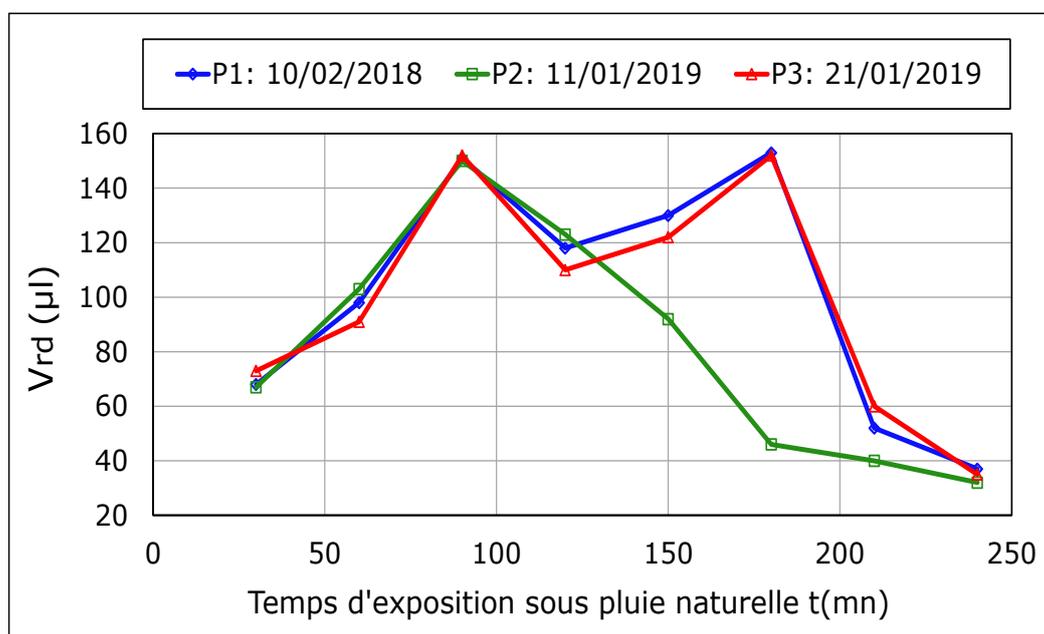


Fig. IV. 5 $V_{rd} = f(t, P)$ des gouttes d'eau résiduelles de pluie naturelle recueillies sur le secteur S_1 de l'isolation en silicone ($\alpha = 0^\circ$)

Il en résulte une allure des courbes en forme de dents de scie quelle que soit la période temporelle considérée. Les deux courbes se rapportant aux périodes : 10/02/2018 et 21/01/2019, présentent chacune deux valeurs maximales séparées par une valeur plus faible et la courbe se rapportant à la période : 11/01/2019 possède une seule. Comme il a été dit précédemment, l'existence de deux pics sur une même courbe séparés par un minimum est expliqué par la chute de deux pluies successives et la présence d'un seul pic correspond à la tombée d'une seule pluie. Sur cette même figure, la reproduction de la valeur maximale de $152 \mu\text{l}$ du pic est constatée d'une pluie à une autre lors de la même période et d'une période de mesure à une autre. La stabilité de ces valeurs est justifiée par celle des valeurs de la température, humidité relative et la vitesse du vent (Tab. IV. 1) soufflant de la ligne de fuite

(S₃, S₄) vers (S₁, S₂).

La figure IV. 6 donne l'évolution du volume des gouttes résiduelles d'eau de pluie naturelle recueilli sur le secteur S₁ de l'isolation en silicone (V_{rd}) en fonction de l'angle d'inclinaison de sa surface par rapport à l'horizontale (α) et la période temporelle (P) de son exposition. Il en résulte, un léger déclin de celui-ci jusqu'à un angle d'inclinaison (α) égal à environ 30°, sa décroissance stricte lorsque 30° < α < 60° et un autre léger déclin de ce volume lorsque 60° ≤ α ≤ 90°, indépendamment de la période temporelle d'exposition considérée.

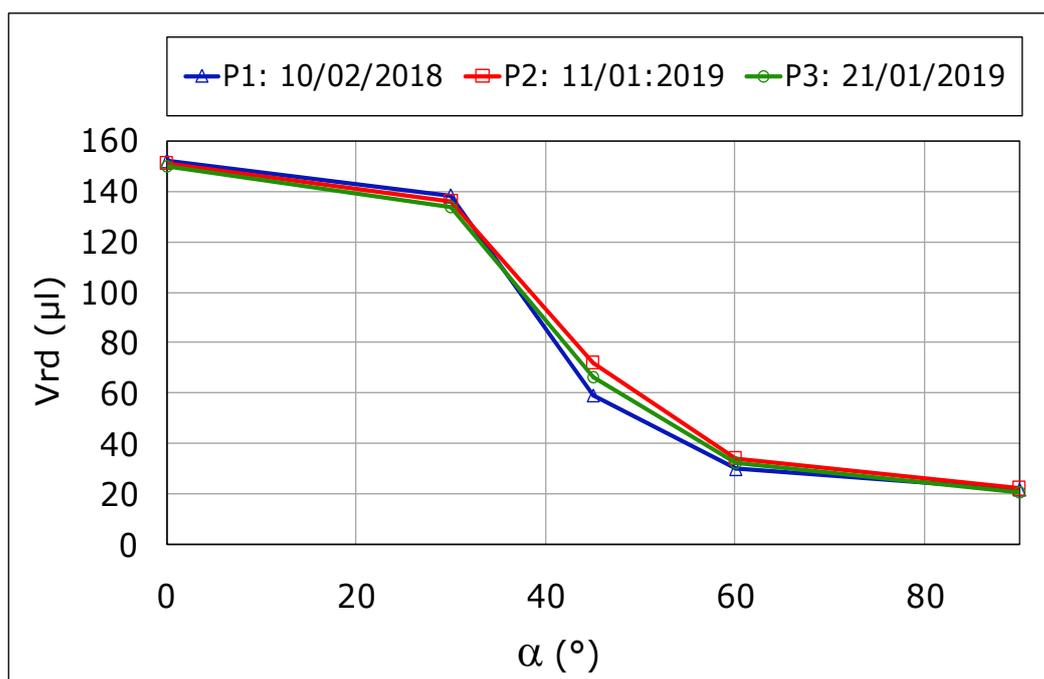


Fig. IV. 6 : Volume des gouttes d'eau résiduelles de pluie recueillies sur le secteur S₁ en fonction de l'angle d'inclinaison de l'isolation et de la période de son exposition

Une goutte d'eau en mouvement sur une surface d'une isolation hydrophobe hors tension et inclinée d'un angle (α) est, selon Navier-Stokes, soumise à l'ensemble des forces données par l'équation suivante [49, 157] :

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{V}_f}{\partial t} + \vec{V}_f \cdot \nabla \vec{V}_f \right) = -\nabla P_\Delta + \mu \nabla^2 \vec{V}_f + \vec{F}_g \quad (1)$$

Où :

- ρ, V_f et μ caractérisent respectivement la densité du fluide, sa vitesse et sa viscosité ;
- Les trois termes : ∇P_Δ, μ∇²V_f et F_g représentent respectivement les effets de forces dues respectivement à la pression, la viscosité et la force de gravitation exercées sur la goutte d'eau :

L'équation 1 peut aussi s'écrire sous la forme suivante [157] :

$$d \left(\frac{\partial \vec{V}_f}{\partial t} + \vec{V}_f \cdot \nabla \vec{V}_f \right) = mg \sin \alpha - F_{ad} - F_s - F_d \quad (2)$$

Où F_{ad} , F_s et F_d sont respectivement les forces d'adhérence, de cisaillement et de traînée aérienne. Ces trois forces sont décrites respectivement par les formules suivantes :

$$F_{ad} = \frac{25}{\pi^3} \gamma_{LV} D (\cos \theta_R - \cos \theta_A) \quad (3)$$

Avec :

D : Diamètre de la goutte,

γ_{LV} : Tension de surface,

θ_R : Angle de recul de la gouttelette,

θ_A : Angle d'avancée de la gouttelette.

Une force de cisaillement est générée lorsque la gouttelette roule sur une surface en raison de la vitesse de déformation du fluide formée le long de la ligne de contact entre la gouttelette d'eau et la surface hydrophobe. Celle-ci peut être écrite de la forme suivante :

$$F_s = A_w \left(\mu \frac{dV}{dy} \right) \quad (4)$$

Où :

A_w est la surface de contact de la goutte, μ est la viscosité du liquide de la gouttelette, V est la vitesse du flux, et y est la distance normale à la surface de contact.

La force de traînée, due à la résistance de l'air lorsque la gouttelette roule sur une surface, est liée à la pression de la traînée et au frottement, dû au glissement. Elle peut être de la forme :

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho_a A_c U_T \quad (5)$$

Où C_d est le coefficient de traînée, ρ_a est la densité de l'air, A_c est la surface de la section transversale de la gouttelette et U_T est la vitesse de translation des gouttelettes le long de la surface inclinée de l'isolation.

Une goutte résiduelle d'eau de pluie restant immobile sur la surface de l'isolation, inclinée d'un angle (α), doit remplir les conditions d'équilibre tel que :

$$mg \sin \alpha - F_{ad} - F_s - F_d = 0 \quad (6)$$

En effet, au moment du prélèvement d'un échantillon, toute goutte résiduelle d'eau de volume (V_d) adhérant encore à la surface de l'isolation est créée suite aux phénomènes de collision et de diffusion des gouttes d'eau de pluie [47, 158]. Sachant que le volume varie dans le même

sens que la masse ($m_d = m_{vd} V_d$), au coefficient près de la masse volumique de la goutte d'eau de pluie (m_{vd}), donc si (α) augmente, le volume (V_d) ou la masse (m_d) de la goutte d'eau résiduelle doit diminuer afin que la conservation de son équilibre soit garantie. Ceci est vérifié puisque l'intensité des trois forces (F_{ad}), (F_S) et (F_d) décroît avec la diminution du volume (V_d) de la goutte du fait de leur liaison par le diamètre de celle-ci. Ceci explique bien la décroissance de l'allure de la caractéristique $V_{rd} = f(\alpha)$, illustrée par la figure IV. 6. Le volume le plus élevé ($V_d = 140$ à $152 \mu\text{l}$) est enregistré pratiquement lorsque la surface de l'échantillon est en position horizontale ($\alpha = 0^\circ$) ou inclinée d'un angle (α) compris entre 0 et 30° , alors que le petit volume ($V_d = 20$ à $30 \mu\text{l}$) est obtenu pour $60^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$. Le rapport de ces deux volumes est au maximum égal à 7.5. Cela veut dire que la ligne de fuite de l'isolation en position horizontale est 7.5 fois plus humide que celle trouvée en position verticale. Donc le contournement le plus probable de l'isolation sous tension de service peut avoir lieu dans cet intervalle d'angle d'inclinaison de sa surface. Par conséquent, lors du dimensionnement des isolateurs en silicone, il est déconseillé d'utiliser cet intervalle d'angle d'inclinaison de leurs ailettes, qui favorisent l'accumulation de beaucoup d'eau sur leur surface dans ce cas. Par contre l'angle d'inclinaison le plus favorable pour ces isolateurs correspond à α supérieur ou égal à 60° (Fig. IV. 6).

L'évolution du nombre de gouttes résiduelles d'eau de pluie naturelle recensées sur la surface du secteur S_1 de l'isolation (N_{rd}) en fonction de son angle d'inclinaison (α) et la période temporelle (P) de son exposition est décrite sur la figure IV. 7. Son allure résultante évolue de façon inverse par rapport à celle de la caractéristique $V_{rd} = f(\alpha)$, c'est-à-dire qu'elle augmente légèrement, lorsque $\alpha \leq 30^\circ$, croît strictement lorsque $30^\circ < \alpha < 60^\circ$ puis s'élève de nouveau légèrement quand l'angle d'inclinaison est compris entre 60 et 90° .

Afin qu'une goutte d'eau résiduelle puisse voir son volume diminuer avec l'élévation de l'angle d'inclinaison de la surface sur laquelle elle repose et remplir les nouvelles conditions d'équilibre, la seule solution possible est que les gouttes d'eau de pluie impactant initialement la surface de l'isolation sous ce nouvel angle de chute doivent se subdiviser en plusieurs parties pouvant rester immobiles sur celle-ci, comme le montre la figure IV. 8.

En résumé, lorsque l'angle d'inclinaison d'une isolation augmente, pendant que le volume des gouttes d'eau de pluie naturelle atterrissant sur sa surface diminue, leur nombre croît quelle que soit la période temporelle de son exposition à celle-ci.

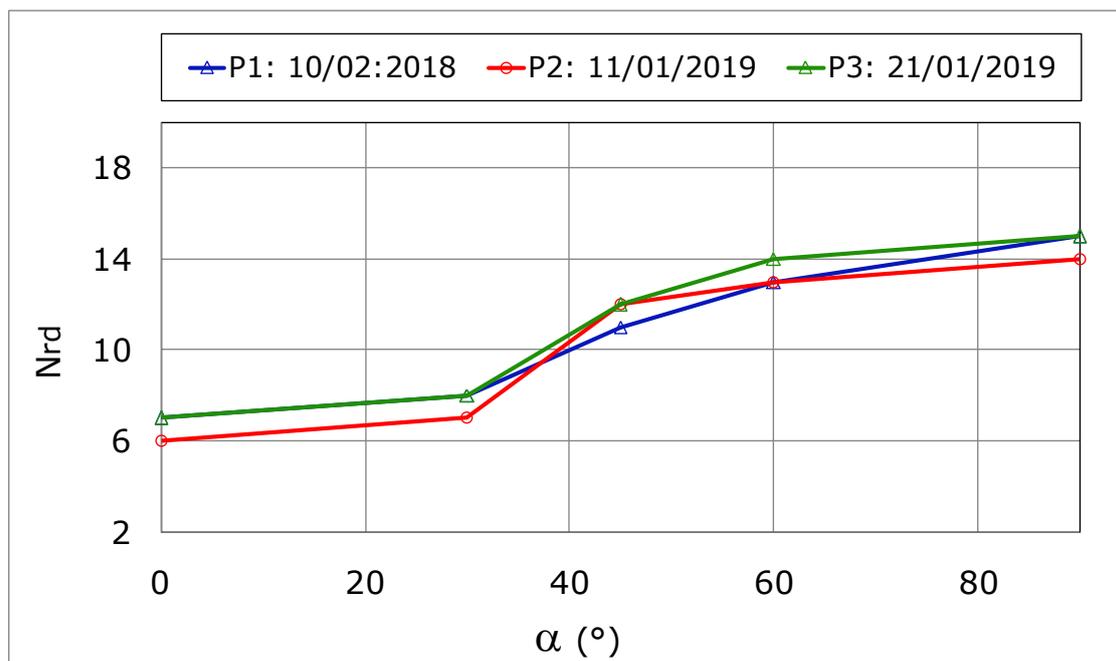


Fig. IV.7 : Nombre de gouttes d'eau résiduelles de pluie récoltées sur le secteur S_1 de l'isolation en fonction de l'angle de son inclinaison et la période de son exposition

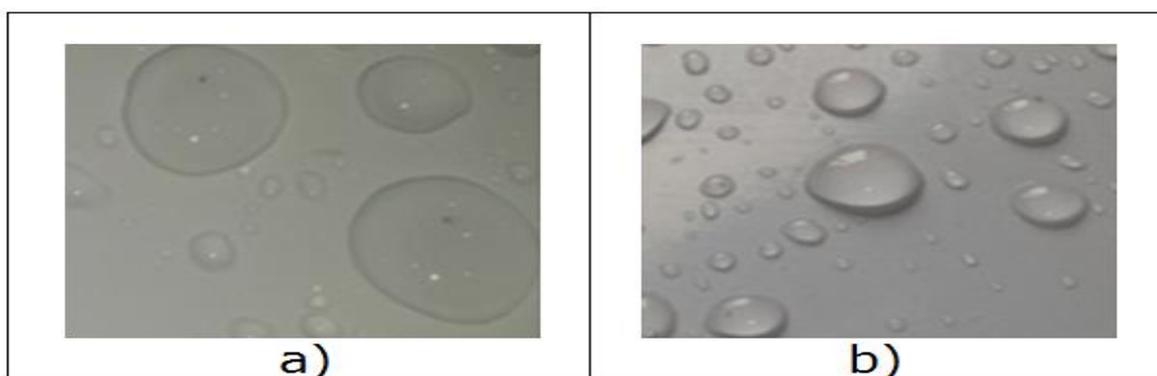


Fig. IV. 8 : Taille et nombre de gouttes résiduelles d'eau de pluie recueillies sur la surface du secteur S_1 de l'isolation en fonction de l'angle de son inclinaison. a) $\alpha = 0^\circ$, b) $\alpha = 90^\circ$

IV. 3 Effet du taux d'humidification d'une isolation inclinée sur ses performances électriques en laboratoire

Au laboratoire, l'humidification de la surface d'une isolation en silicone est obtenue au moyen d'un dépôt manuel de 25 gouttes d'eau à volume variable (V_{di}), selon un arrangement en zigzag symétrique sur toute sa surface (Fig. III. 4a).

Les résultats obtenus sur l'évolution de l'intensité de l'humidification de la surface de l'isolation en fonction de l'angle de son inclinaison, du volume initialement déposé sur celle-ci et le niveau de tension appliquée à l'isolation sont illustrés par les figures IV. 9, IV. 10 et IV. 11. L'allure de la caractéristique $V_{rd} = f(\alpha, V_{di})$, illustrée par ces trois figures, peut être subdivisée en trois zones distinctes. Dans la première zone, la courbe se présente sous forme d'un palier parallèle à l'axe des angles d'inclinaison et s'allonge dans le sens croissant de

l'angle d'inclinaison de la surface de l'isolation jusqu'à $\alpha < 25^\circ$ et dans le sens décroissant du volume des gouttes d'eau déposées initialement (V_{di}). Ce palier correspond à un volume de gouttes d'eau résiduelles constant et il est obtenu uniquement lorsque l'isolation est hors tension. Cela veut dire que sous un angle d'inclinaison inférieur à 25° , Les gouttes d'eau gardent leur volume initial (V_{di}), elles ne tombent pas mais s'allongent seulement sous l'action de l'ensemble des forces auxquelles elles sont soumises.

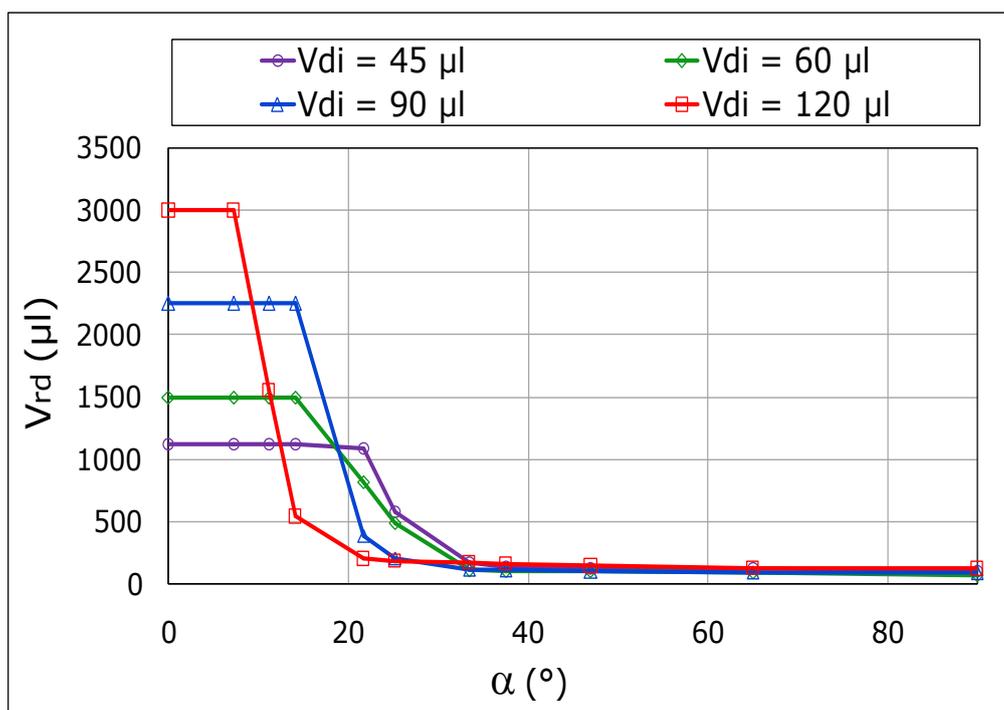


Fig. IV. 9 : $V_{rd} = f(\alpha, V_{di})$ d'une isolation en silicone hors tension

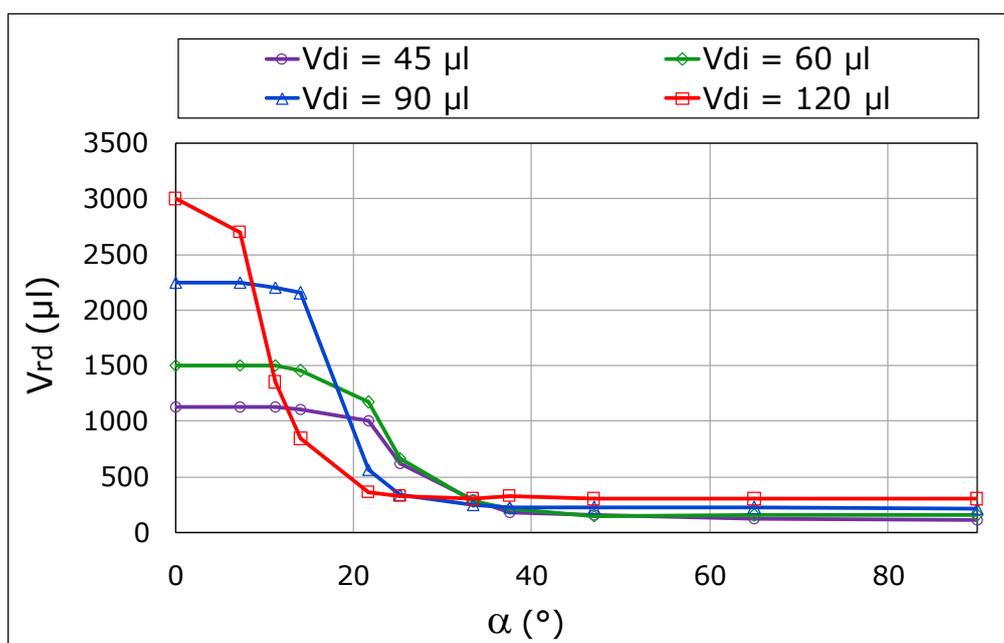


Fig. IV.10 : $V_{rd} = f(\alpha, V_{di})$ d'une isolation en silicone sous une contrainte de tension alternative égale à 10 kV

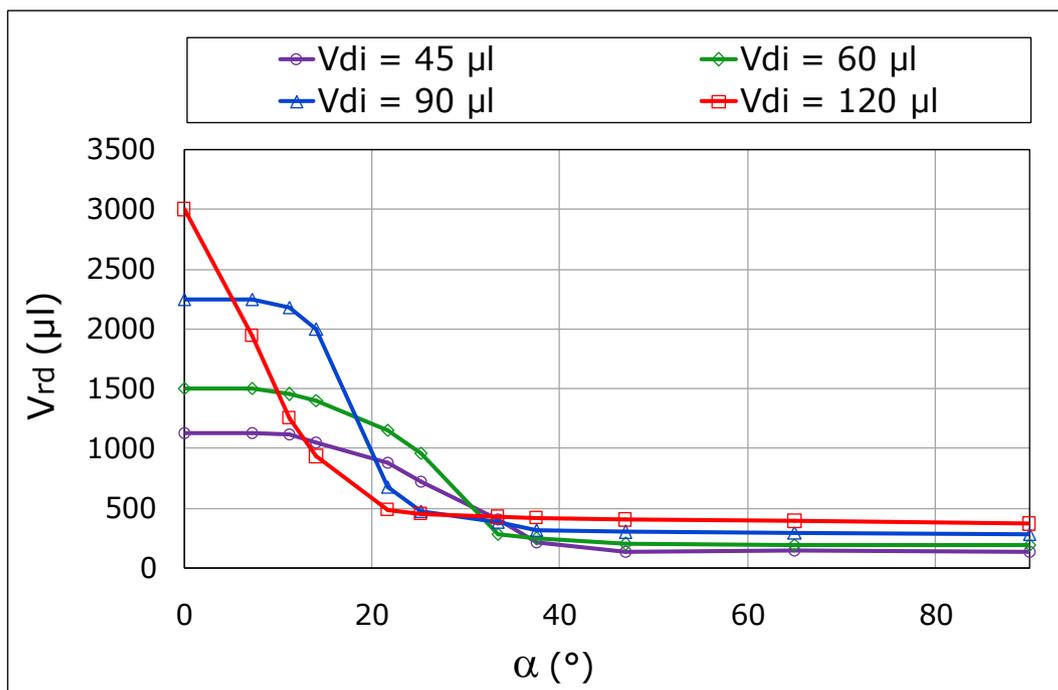


Fig. IV.11 : $V_{rd} = f(\alpha, V_{di})$ d'une isolation en silicone sous une contrainte de tension alternative égale à 28 kV

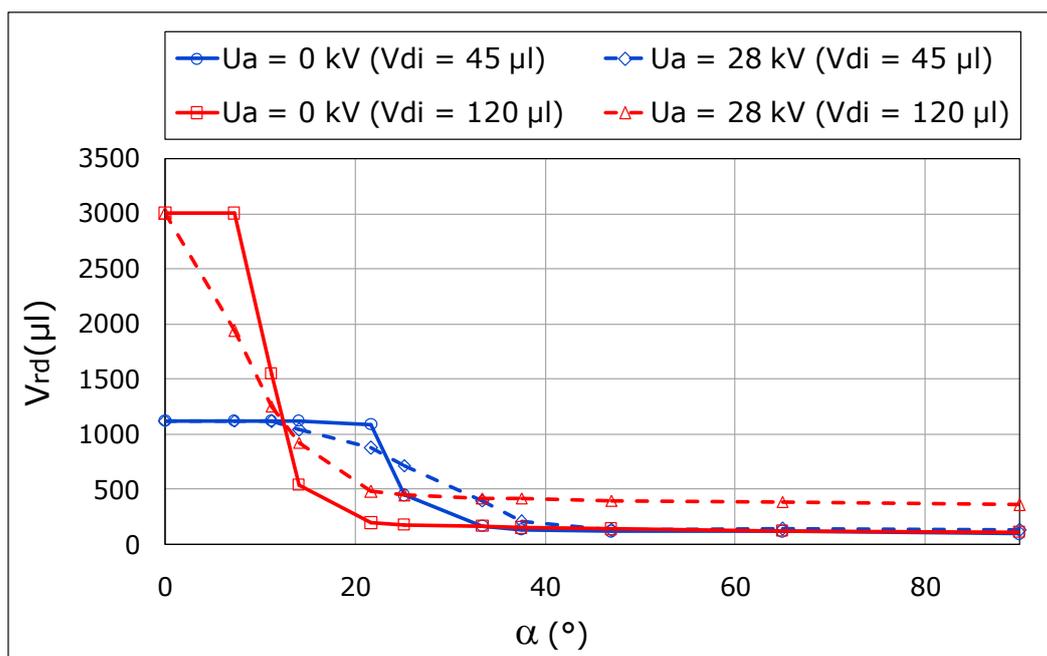


Fig. IV. 12 : Comparaison des volumes des gouttes d'eau résiduelles recouvrant la même isolation hors ($U_a = 0$ kV) et sous tension ($U_a = 28$ kV)

Par contre lorsque l'isolation est mise sous un niveau de tension, un déclin du palier est constaté et celui-ci est accru avec l'élévation du volume de gouttes d'eau initialement déposées et le niveau de tension appliquée à l'isolation comme il est montré par la figure IV. 12, donnée à titre de comparaison. Le déclin du palier sous un niveau de tension de l'isolation signifie que sous un même angle d'inclinaison de l'isolation, le volume résiduel d'une goutte d'eau restant en équilibre sous tension est inférieur à celui de la goutte d'eau conservant son équilibre hors

tension. Ce volume diminue avec l'augmentation du niveau de tension appliquée à l'isolation. Ceci peut être expliqué par le fait que sous l'application d'un champ électrique à l'isolation, les gouttes d'eau se polarisent et une force électrostatique, ainsi créée [159, 160].

Pour une goutte individuelle reposant sur une isolation et mise sous l'action d'un champ électrique non nul, l'expression de cette force électrique est de la forme [161] :

$$F_e = \rho_t E - \frac{1}{2} |E|^2 \nabla \varepsilon + \frac{1}{2} \nabla \left(|E|^2 \frac{d\varepsilon}{d\rho_m} \rho_m \right) \quad (7)$$

Où :

E , ρ_t , ε et ρ_m représentent respectivement le champ électrique, la charge totale, la permittivité absolue de l'eau et la densité volumique.

Les trois termes du membre droit de l'équation 7 représentent respectivement la force de Coulomb, la force diélectrophorétique et la pression d'électrostriction.

Dans le cadre de cette étude, les deux derniers termes sont considérés négligeables du fait de l'uniformité du champ électrique régnant entre les électrodes planes et parallèles. Donc, la force électrostatique agissant sur une goutte d'eau individuelle de l'isolation est réduite à la force de coulomb.

Lorsqu'il s'agit de plusieurs gouttes d'eau (Fig. III. 4a), à la force de coulomb s'ajoutent les forces d'attraction mutuelles entre les gouttes d'une rangée perpendiculaire aux électrodes et de répulsion des gouttes d'eau d'une rangée parallèle à celles-ci [160, 161]. Comme les gouttes d'eau d'une rangée quelconque se meuvent pratiquement parallèlement à la direction du champ appliqué, donc les forces de répulsion sont considérées négligeables dans ce cas [75]. Par conséquent, les forces électrostatiques actives agissant sur une goutte d'eau d'une rangée quelconque sont la force de coulomb et les forces d'attraction mutuelle entre les gouttes adjacentes. Pour une goutte d'eau proche de l'une des électrodes, l'équation 7 peut s'écrire donc sous la forme suivante :

$$F_e = \rho_t E - F_a \quad (8)$$

Dans ce cas, l'équation 2 devient :

$$d \left(\frac{\partial \vec{V}_f}{\partial t} + \vec{V}_f \cdot \nabla \vec{V}_f \right) = mg \sin \alpha + F_e - F_{ad} - F_s - F_d \quad (9)$$

En alternatif, le champ électrique change de sens au bout de chaque alternance, donc la force de coulomb peut être dans le même sens que $mg\sin\alpha$ et dans le sens contraire lors de l'alternance négative. Donc, lorsque la force de gravitation et de coulomb sont dans le même sens, elles peuvent arracher une plus grande quantité d'eau à la goutte initiale que lorsque le poids de la goutte agit seul. Ceci explique l'infériorité du volume résiduel de la goutte reposant en équilibre sur une isolation sous tension par rapport à celle mise hors tension et plus l'intensité de la force de coulomb est grande, plus le volume résiduel devient petit (Figs. IV.10 et IV. 11). Par conséquent, la surface est moins humidifiée lorsque l'isolation est sous tension qu'hors celle-ci. Dans ce cas de figure, une isolation d'une ligne électrique déjà humidifiée peut-être plus facilement contournée lors de sa mise sous tension de service qu'une isolation de la même ligne humidifiée pendant qu'elle est sous tension. Dans la deuxième zone, l'allure de la caractéristique est strictement décroissante, mais le volume résiduel des gouttes d'eau est plus grand lorsque l'isolation est sous tension que dans le cas contraire (Fig. IV. 12). En effet, le champ électrique change de polarité à chaque alternance, donc la force électrique résultante est tantôt de même sens que la force de gravitation, tantôt de sens contraire. Donc, dans cet intervalle d'angle d'inclinaison de l'isolation, lorsque la force de coulomb se trouve opposée au poids et ajoutée aux autres forces, la quantité d'eau cédée sera plus petite et le volume retenu plus grand. Ce phénomène peut se reproduire à chaque alternance de telle sorte que le volume résiduel soit plus élevé sous tension qu'hors celle-ci. Contrairement au cas précédent, il est à constater dans cette zone un taux d'humidification plus élevé pour une isolation sous tension que celle hors tension.

Dans la troisième zone, la caractéristique $V_{rd} = f(\alpha, V_{di})$ présente une allure en forme d'un palier parallèle à l'axe des angles d'inclinaison en s'allongeant dans le sens croissant jusqu'à $\alpha \leq 90^\circ$ et dans le sens décroissant de V_{di} . De plus, il est à remarquer que dans cette zone, la ligne de fuite de l'isolation est aussi plus humidifiée lorsque celle-ci est sous tension qu'en absence de celle-ci. L'explication attribuée à ce phénomène est similaire aussi à celle qui a été donnée dans le cas de la deuxième zone.

Enfin, nous pouvons conclure que la caractéristique $V_{rd} = f(\alpha, P)$ d'une isolation hors tension exposée à une pluie naturelle, est qualitativement similaire à la caractéristique $V_{rd} = f(\alpha, V_{di})$ obtenue au laboratoire en absence ou sous une contrainte de tension alternative.

La caractéristique donnant le nombre de gouttes d'eau résiduelles (N_{rd}), récoltées sur la surface de l'isolation hors et/ou sous tension, en fonction de (α) et de (V_{di}) est illustrée respectivement par les figures IV. 13, IV. 14 et IV. 15.

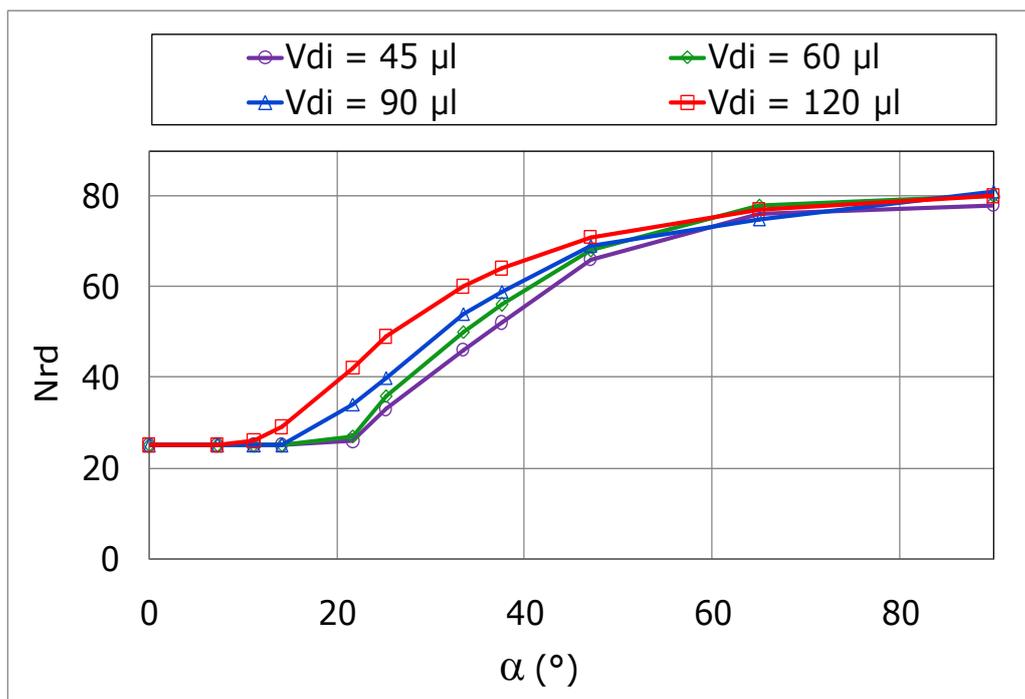


Fig. IV. 13 : $N_{rd} = f(\alpha, V_{di})$ d'une isolation en silicone hors tension

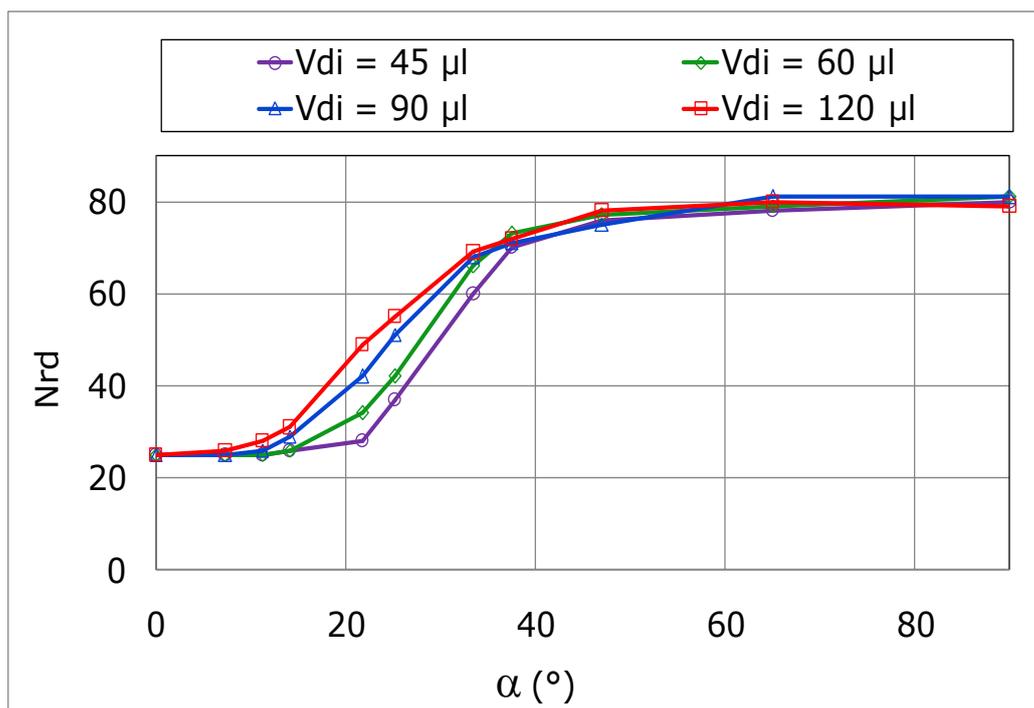


Fig. IV.14 : $N_{rd} = f(\alpha, V_{di})$ d'une isolation en silicone hors tension

Son allure résultante évolue de façon inverse par rapport à celle de la caractéristique $V_{rd} = f(\alpha, V_{di})$, c'est-à-dire qu'elle est pratiquement constante ou augmente très légèrement, lorsque $\alpha < 25^\circ$, croît strictement lorsque $25^\circ < \alpha < 50^\circ$ puis s'élève de nouveau légèrement quand l'angle d'inclinaison de l'isolation est compris entre 50 et 90°.

La diminution du volume d'une goutte d'eau résiduelle avec l'élévation de l'angle (α) est subordonnée à la subdivision de la goutte initiale en plusieurs parties (Fig. IV. 4). Cette subdivision est due, d'une part, aux forces agissant sur la goutte initiale en mouvement sur l'isolation inclinée, hors ou sous tension. D'autre part, les gouttes d'eau résiduelles créées sur l'isolation hors ou sous tension doivent remplir les conditions d'équilibre décrites par l'équation (6) ou (9).

La figure IV. 15 montre que le nombre de gouttes d'eau résiduelles est plus élevé pour une isolation sous tension que celle en absence de celle-ci. En d'autres termes, ceci confirme ce qui a été dit précédemment à ce sujet sur le volume des gouttes d'eau résiduelles.

Enfin, il est à constater la quasi-similitude de l'allure des caractéristiques $N_{rd} = f(\alpha, P)$ et $N_{rd} = f(\alpha, V_{di})$ obtenues respectivement sur site et au laboratoire.

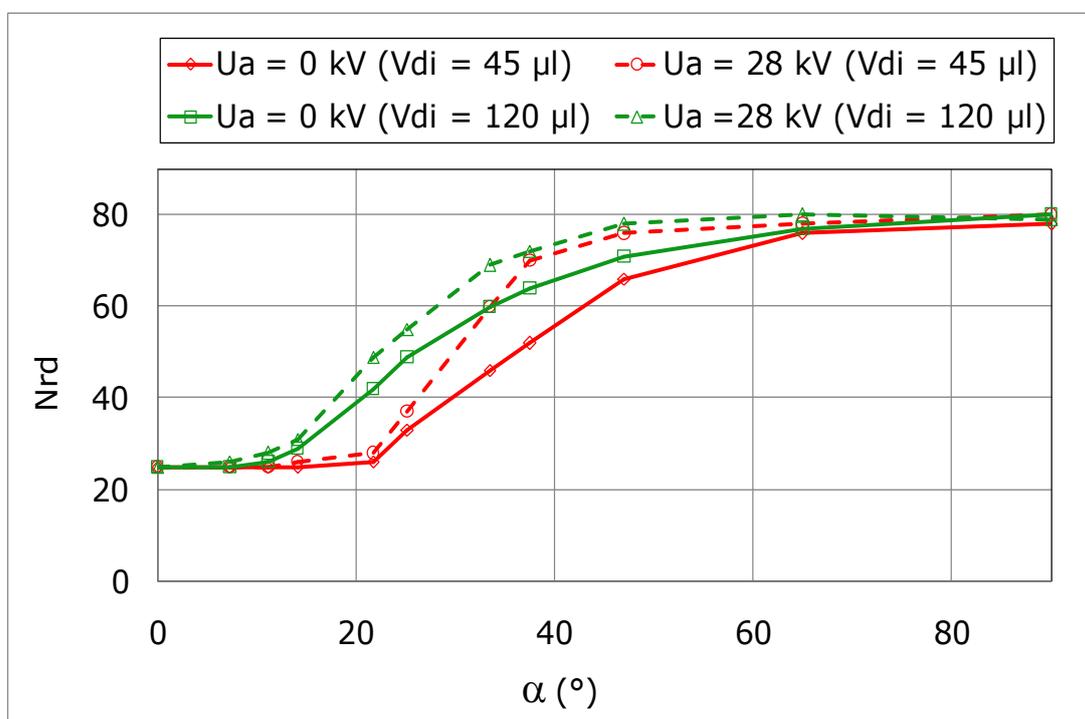


Fig. IV. 15 : Comparaison des nombres des gouttes d'eau résiduelles recouvrant la même isolation hors ($U_a = 0$ kV) et sous tension ($U_a = 28$ kV)

La figure IV. 16 illustre la quantification de l'effet simultané de l'angle d'inclinaison (α) de l'isolation en silicone et du volume d'un arrangement en zigzag de 5 rangées x 5 gouttes d'eau la recouvrant sur sa performance électrique. L'allure résultante de la caractéristique $U_f = f(\alpha, V_{di})$ présente pratiquement une forme en V à extrémité droite aplatie.

Lorsque $45 \mu\text{l} \leq V_d \leq 90 \mu\text{l}$, la courbe de tension de contournement de l'isolation en fonction de l'angle de son inclinaison présente pour un même angle (α) un minimum quel que soit le volume (V_{di}) des gouttes d'eau déposées initialement. La position de ce minimum se trouve

décalée vers des angles d'inclinaison plus faible avec la croissance de la taille des gouttes d'eau ($0^\circ \leq \alpha \leq 25^\circ$). La valeur de la tension minimale de contournement de l'isolation décroît avec le rapprochement de la valeur de l'angle (α) de 0° et l'augmentation de la valeur de (V_{di}). Cet intervalle d'angle est très défavorable pour le dimensionnement des ailettes des isolateurs vu la chute drastique de leur performance électrique par rapport à celle obtenue à l'état sec. Sa plus faible valeur est de l'ordre de 42 %. Cette faible valeur de la performance électrique de l'isolation est expliquée par un allongement maximal des gouttes d'eau le long de sa ligne de fuite jusqu'à un point de former des filets d'eau sous l'action conjuguée des forces de gravitation et électrohydrodynamiques. Ceci entraîne le raccourcissement maximal de la ligne de fuite de l'isolation (Fig. IV. 7). La décharge électrique de contournement de sa surface apparaît pour une plus faible valeur de la tension appliquée à celle-ci. Ces résultats sont similaires à ceux acquis par d'autres chercheurs [47, 158].

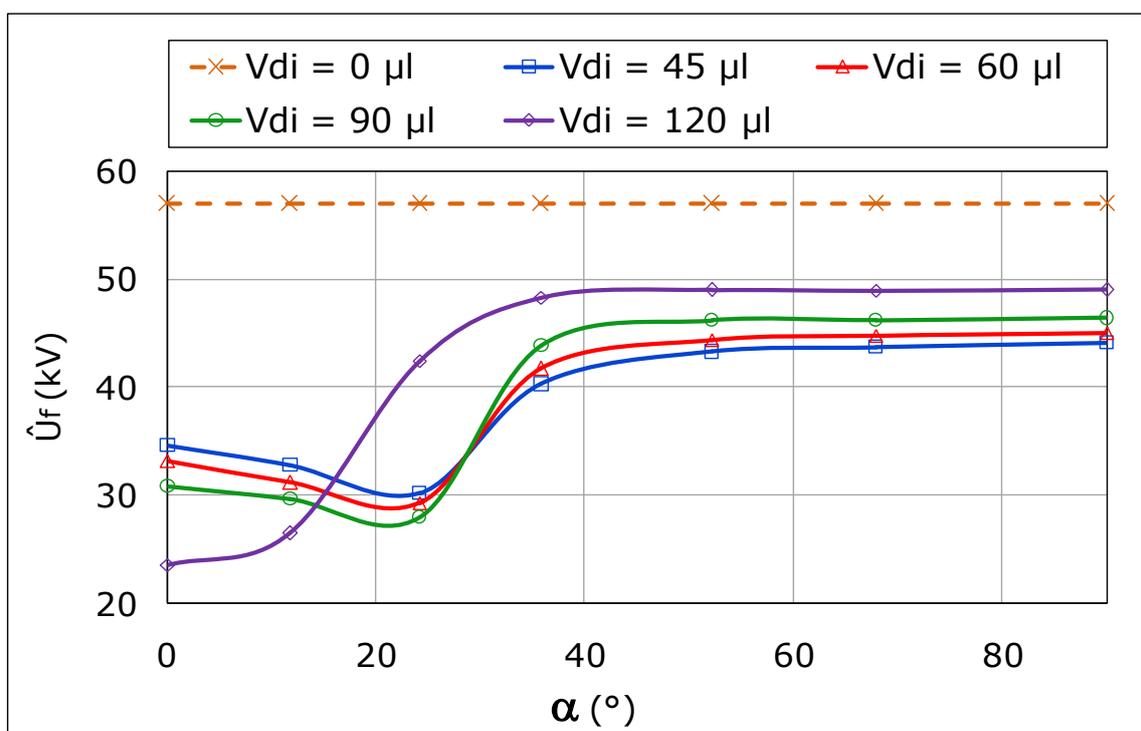


Fig. IV. 16 : $U_f = f(\alpha, V_{di})$ d'une isolation en silicone (5 rangées x 5 gouttes d'eau en zigzag, $\sigma_v = 30 \mu\text{S/cm}$, $L_c = 6 \text{ cm}$, $L_{dd} = L_{de} = 1 \text{ cm}$ et $l_{rr} = 2 \text{ cm}$)

Dans l'intervalle d'angle d'inclinaison de l'isolation compris entre 25 et 50°, à l'état humide est strictement croissante. Sa valeur maximale peut atteindre 86 % de celle obtenue à l'état sec. Dans l'intervalle d'angle le plus favorable ($50^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$) est celui qui correspond à une tension de contournement de l'isolation quasiment constante et égale à 86 % de celle obtenue à l'état sec. Ceci est dû au taux infime d'humidification de la surface de l'isolation par des minuscules gouttelettes d'eau résiduelles la recouvrant (Fig. IV. 18). Ces résultats sont en très

bonne conformité avec ceux obtenus avec les isolateurs standards sous pluie [48]. Par conséquent il est conseillé d'exploiter cet intervalle d'angle d'inclinaison pour le dimensionnement des ailettes des isolateurs, vu leur pouvoir d'isolement fixé à sa valeur optimale dans ce cas.

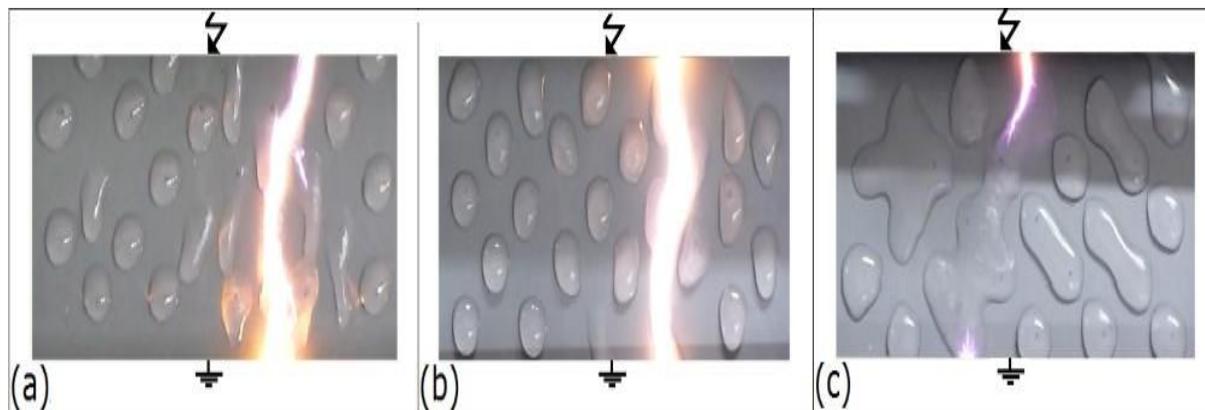


Fig. IV. 17 : Allongement maximal des gouttes d'eau en fonction de leur volume lorsque l'isolation est court-circuitée ($0^\circ \leq \alpha \leq 25^\circ$) a) $V_{di} = 60 \mu\text{l}$, b) $V_{di} = 90 \mu\text{l}$, c) $V_{di} = 120 \mu\text{l}$

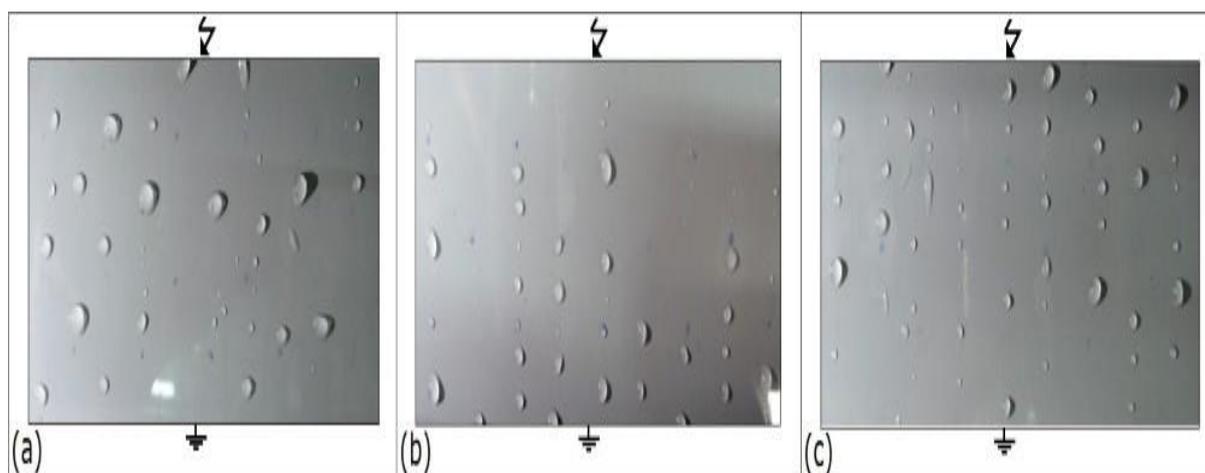


Fig. IV. 18 : Constellation des gouttes d'eau résiduelles en fonction du volume initial, V_{di} dans l'intervalle d'inclinaison $50^\circ \leq \alpha < 90^\circ$, a) $V_{di} = 60 \mu\text{l}$, b) $V_{di} = 90 \mu\text{l}$, c) $V_{di} = 120 \mu\text{l}$

IV. 4 Impact de l'angle d'inclinaison d'une isolation en silicone sur sa résistance au vieillissement sous brouillard salin

La défaillance des isolateurs polymères est principalement causée par la combinaison des contraintes environnementales et électriques auxquelles ils sont soumis. Selon la littérature [107, 119], ce processus se déroule en plusieurs étapes. Tout d'abord, des gouttelettes d'eau s'accumulent sur la surface du revêtement de l'isolateur. Ensuite, les propriétés du matériau isolant se dégradent en raison du passage du courant électrique sur sa surface. Cette dégradation, qui se manifeste par une perte d'hydrophobicité et une érosion, favorise la

formation de décharges partielles et permet ainsi le contournement de l'isolateur.

IV. 4. 1 Constellation des gouttes d'eau sur les surfaces isolantes hydrophobes et leur érosion

Les échantillons vieillis retirés de la chambre de brouillard ont été soumis à une inspection visuelle pour étudier l'état de leurs surfaces après leur exposition au brouillard salin pendant une durée de temps allant jusqu'à 1000 h. Il ressort de cette inspection qu'il n'y a pas eu de dégradations importantes, des brulures ou des fissures sur toutes les surfaces isolantes des échantillons. Une faible décoloration des échantillons a été remarquée (habituel pour les isolateurs polymères après vieillissement). Cette décoloration peut être causée par plusieurs mécanismes tels que l'oxydation, les réactions chimiques et la migration des pigments responsables de la coloration de matériau. Ceci est dû à l'effet de l'humidité et des sels présents dans le brouillard salin qui pénètrent à l'intérieur de la structure de matériau et favorisent son oxydation et l'apparition des réactions chimiques indésirables qui peuvent conduire à la rupture de ses liaisons chimiques et la modification de sa structure. En outre, l'humidité élevée et les sels qui peuvent réagir avec les groupes fonctionnels du matériau créent des composés chimiques qui peuvent dissoudre ou modifier les particules de pigment [162, 163, 164].

La constellation des gouttes d'eau de brouillard résiduelles sur les surfaces isolantes de l'isolation en fonction de leur inclinaison α par rapport à l'horizontale n'est pas la même comme le montre la figure IV. 19.

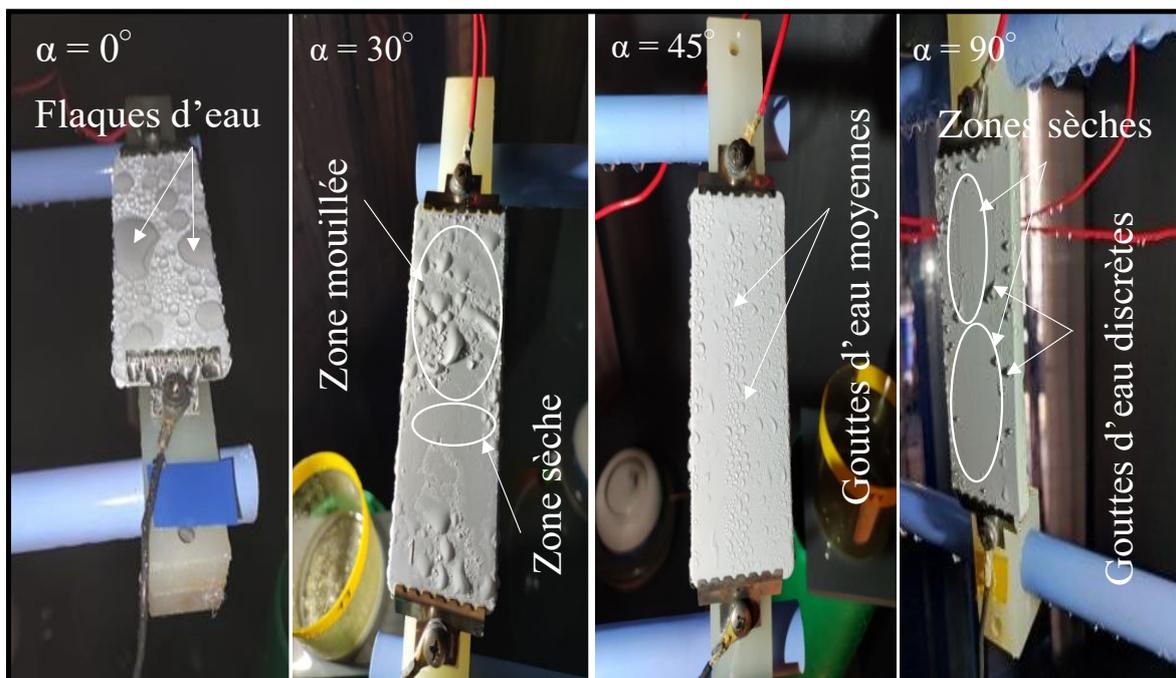


Fig. IV. 19 Constellation des gouttes d'eau résiduelles sur les surfaces isolantes en fonction de leur inclinaison α par rapport à l'horizontale

La présence des zones sèches est très remarquable sur la surface de l'isolation en position verticale ainsi que les gouttelettes d'eau résiduelles recensées sur celle-ci sont minuscules et ne dépassent pas 20 μl . Le contraire a été constaté quand l'isolation est en position horizontale, les gouttes sont volumineuses, des flaques d'eau sont formées et la surface est totalement mouillée (Fig. IV. 19). Cependant, lorsque l'isolation est inclinée par rapport à l'horizontale d'un angle α égale à $30^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$, les gouttes d'eau résiduelles sont moyennement volumineuses par rapport à celles trouvées pour un angle d'inclinaison de l'isolation $\alpha = 90^\circ$. En effet, la surface de l'isolation dans ce cas, est partiellement mouillée.

IV. 4. 2 Hydrophobie de l'isolation après vieillissement

L'hydrophobie et le mouillage des échantillons après vieillissement est définie, en mesurant l'angle de contact statique et dynamique que forment les gouttelettes d'eau sur leurs surfaces une fois la période d'exposition au brouillard salin est achevée.

La figure IV. 20 présente une comparaison de l'angle de contact statique mesuré sur la surface d'un échantillon avant et après son exposition au brouillard salin, pour les deux isolations inclinées à deux différents angles d'inclinaison par rapport à l'horizontale (0° et 90°) et soumises à une tension alternative. Les échantillons sélectionnés pour cette comparaison sont les quatrièmes échantillons (Sa_4) de chaque isolation, car ils montrent une résistance optimale au vieillissement dans le cas de l'isolation horizontale par rapport aux autres échantillons de la même isolation, ainsi que dans le cas de l'isolation verticale.

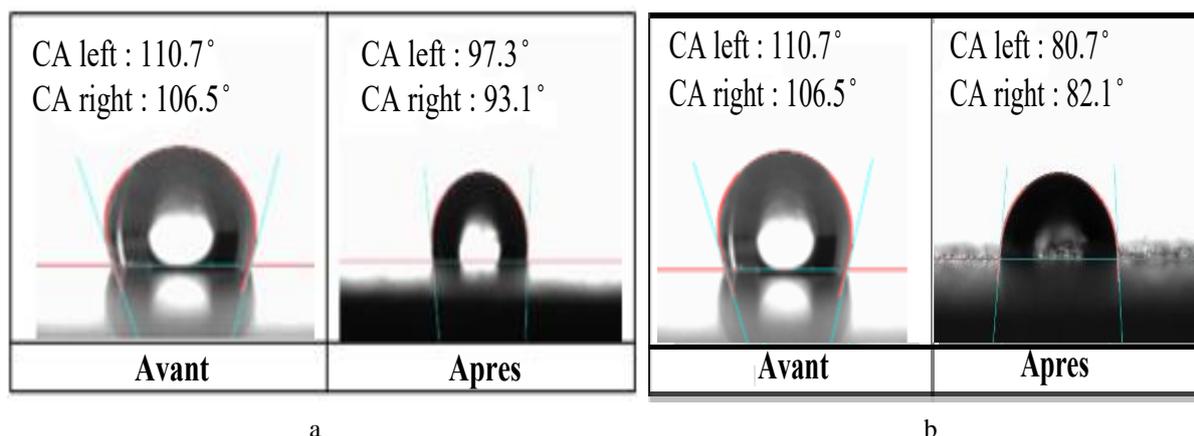


Fig. IV. 20 : Angle de contact statique avant et après exposition de l'échantillon Sa_4 au brouillard salin, a) $\alpha = 90^\circ$; b) $\alpha = 0^\circ$

L'étude comparative révèle que la conservation des propriétés hydrophobes de l'échantillon vieilli incliné de 90° est remarquable malgré une exposition prolongée au brouillard salin ($T_{\text{exp}} = 1000 \text{ h}$). En revanche, celui en position horizontale perd rapidement son hydrophobie après

une courte période d'exposition au brouillard salin ($T_{exp} = 192$ h). Ceci nous conduit à dire que l'hydrophobie des surfaces isolantes de l'isolation après vieillissement augmente à mesure que l'angle d'inclinaison α augmente. En outre, il convient de souligner que l'isolation maintient ses propriétés hydrophobes pendant une période cinq fois plus longue en position verticale qu'en position horizontale. Ceci nous conduit à dire que l'isolation en position verticale est cinq fois plus performante que l'isolation en position horizontale.

Les figures IV. 21 IV. 22 illustrent la valeur de l'angle de contact statique et d'hystérésis et l'écart type correspondant pour quantifier la dispersion des valeurs par rapport à la moyenne des 4 échantillons (Sa_1, Sa_2, Sa_3, Sa_4) placés en position verticale ($\alpha = 90^\circ$) après un vieillissement de 1000 h avec brouillard salin sous tension alternative. L'échantillon 5 (Sa_{virg}) est vierge, il est utilisé comme témoin pour le comparer aux 4 échantillons vieillis.

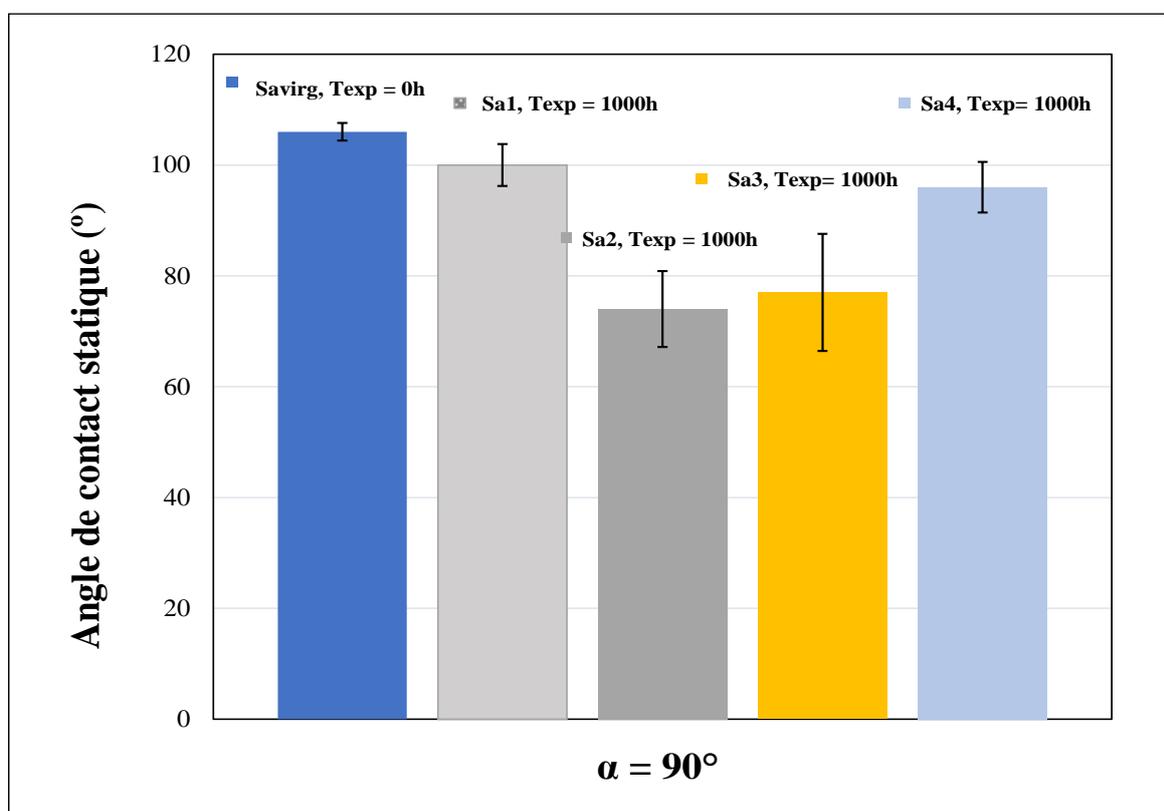


Fig. IV. 21 : Angle de contact statique après exposition de l'isolation au brouillard salin, $\alpha = 90^\circ$

D'après la figure IV. 21, l'angle de contact statique (θ_{stat}) des surfaces isolantes de ces échantillons a diminué après exposition au brouillard salin. La diminution de l'hydrophobicité est principalement due aux décharges électriques qui se produisent à la surface isolante de l'échantillon en présence d'humidité lorsqu'il est soumis à une tension alternative pendant le vieillissement dans un environnement de brouillard salin [165]. Ces décharges électriques libèrent une grande quantité d'énergie, qui peut entraîner la rupture des liaisons chimiques

présentes dans les molécules du polymère. Cela conduit à la diminution des groupes hydrophobes et l'augmentation de la précipitation des groupes hydrophiles par des sels cimentant la surface de l'isolant, ce qui réduit l'angle de contact statique [166] et pourrait augmenter la conductivité électrique de l'isolant et par conséquent la réduction de sa tension de contournement.

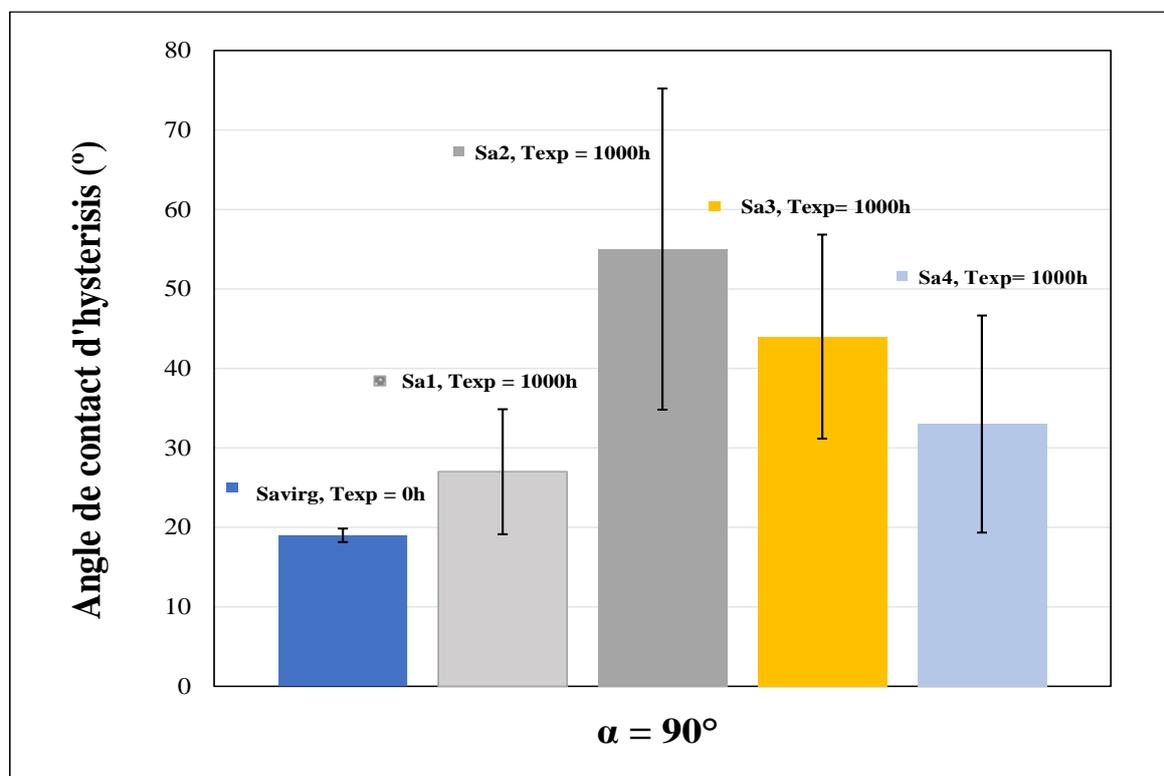


Fig. IV. 22 : Angle de contact d'hystérésis après exposition de l'isolation au brouillard salin, $\alpha = 90^\circ$

Les plus basses valeurs d'angle de contact statique sont enregistrées au niveau de l'échantillon Sa2 et Sa3, ceci peut être justifié par l'inhomogénéité de la distribution du brouillard salin dans la chambre de brouillard, qui est légèrement plus dense au milieu de celle-ci, ce qui conduit à dire que ces deux échantillons ont été plus humidifiés par rapport à Sa1 et Sa4 fixés aux deux extrémités du dispositif d'essai. Cela a accéléré légèrement leur vieillissement marqué par plus de perte d'hydrophobie. La plus grande valeur de l'angle de contact statique mesuré est enregistrée au niveau des échantillons Sa2 et Sa4 est $\theta_{\text{stat}} = 100^\circ$ et 96° respectivement, donc $\theta_{\text{stat}} > 90^\circ$. Ceci montre que malgré la diminution de l'hydrophobie des échantillons vieillissant durant 1000 h par rapport à l'échantillon vierge, ces derniers gardent leurs propriétés hydrophobes.

L'hydrophobie des échantillons n'est pas définie seulement par la mesure de leurs angles de contact statiques, mais aussi avec la détermination de l'angle de contact d'hystérésis ($\Delta\theta$), qui se réfère à la différence entre l'angle de contact lors de l'avancée de la goutte d'eau sur la surface

θ_a (angle de contact d'avancé) et l'angle de contact lors du retrait de la goutte d'eau de la surface θ_r (angle de contact de recul) : $\Delta\theta = \theta_a - \theta_r$. La mesure des deux angles d'avancé et de recule est donné par la figure IV. 23.

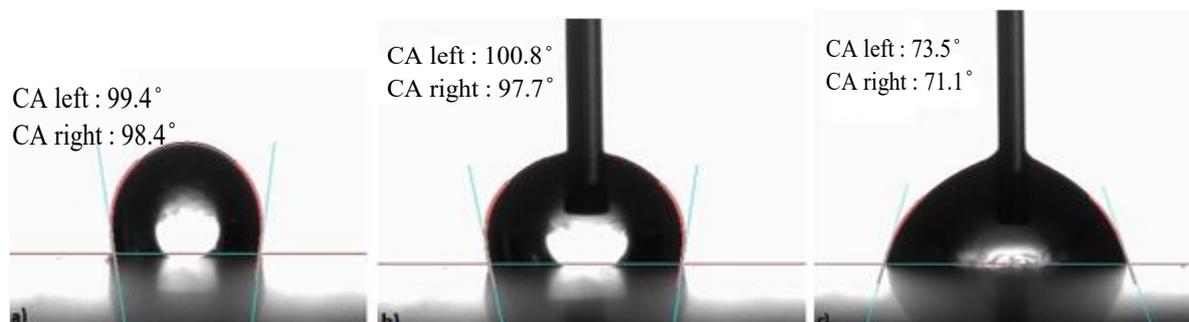


Fig. IV. 23 : Mesure d'angle de contact : a) statique, b) d'avancé et c) de recul sur la surface d'un échantillon après vieillissement, $\alpha = 90^\circ$

La figure IV. 22 montre que l'hystérésis d'angle de contact des échantillons est inversement proportionnelle à son angle de contact statique. Il est à remarquer aussi que l'hystérésis de tous les échantillons vieillis au brouillard salin est supérieure à celle de l'échantillon vierge, propre et sec et sa valeur est plus importante pour l'échantillon Sa₂ et Sa₃ placés au milieu de la chambre de brouillard. Ceci est lié aux caractéristiques de la surface hydrophobe, telle qu'une véritable surface hydrophobe est définie par un angle d'hystérésis faible car la faible hystérésis garantit un glissement facile des gouttes d'eau sur la surface. Dans ce cas, l'angle d'hystérésis est un paramètre crucial pour la caractérisation de la surface hydrophobe [157].

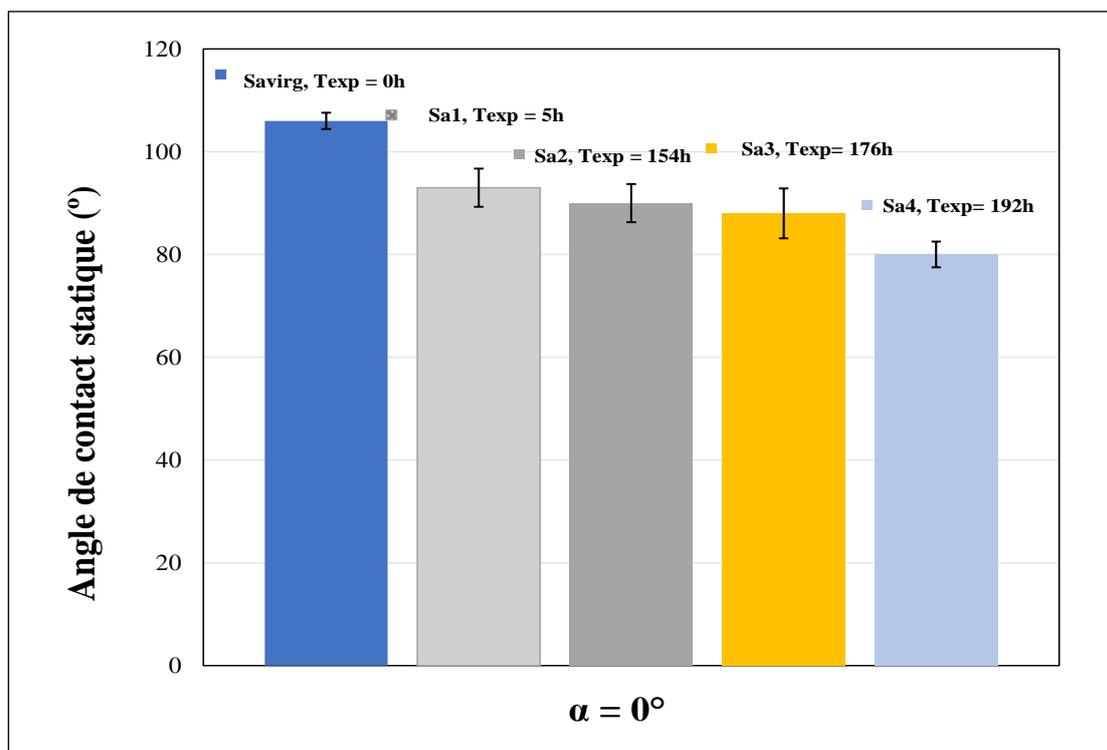


Fig. IV. 24 : Angle de contact statique après exposition de l'isolation au brouillard salin, $\alpha = 0^\circ$

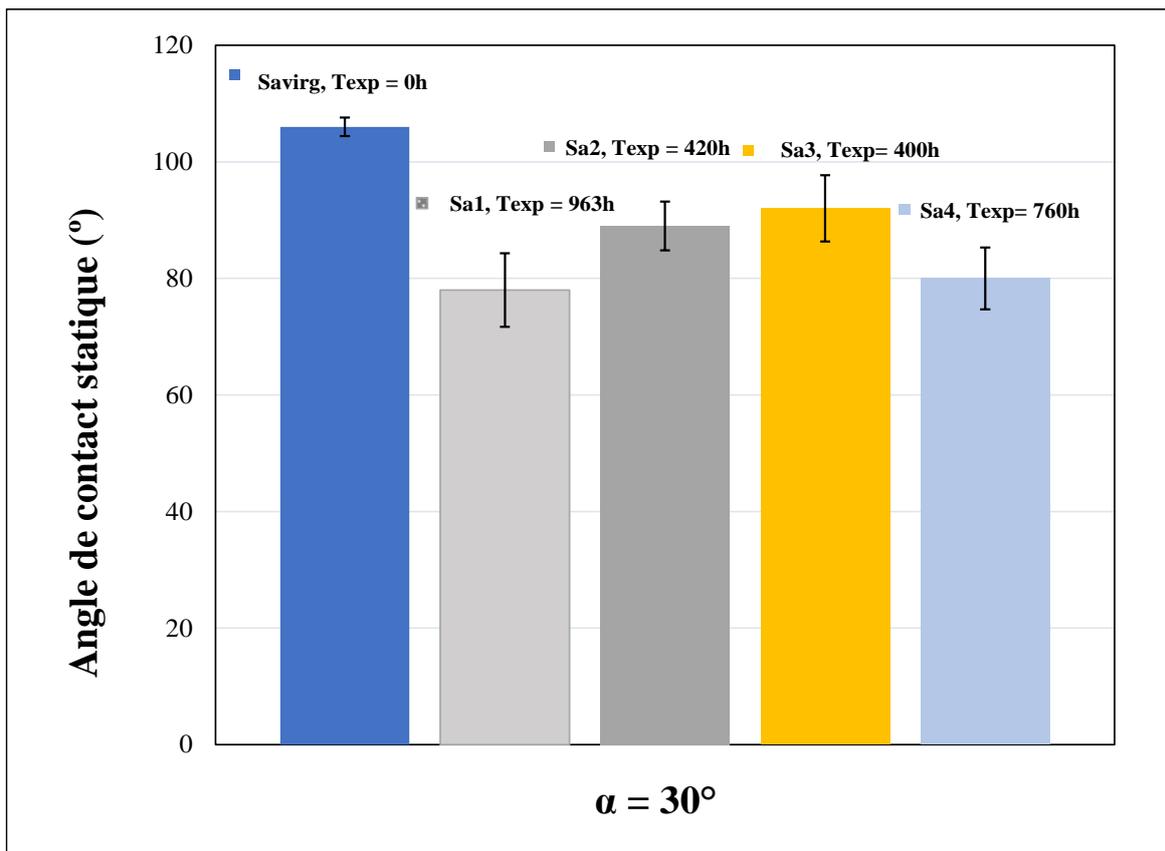


Fig. IV. 25 : Angle de contact statique après exposition de l'isolation au brouillard salin, $\alpha = 30^\circ$

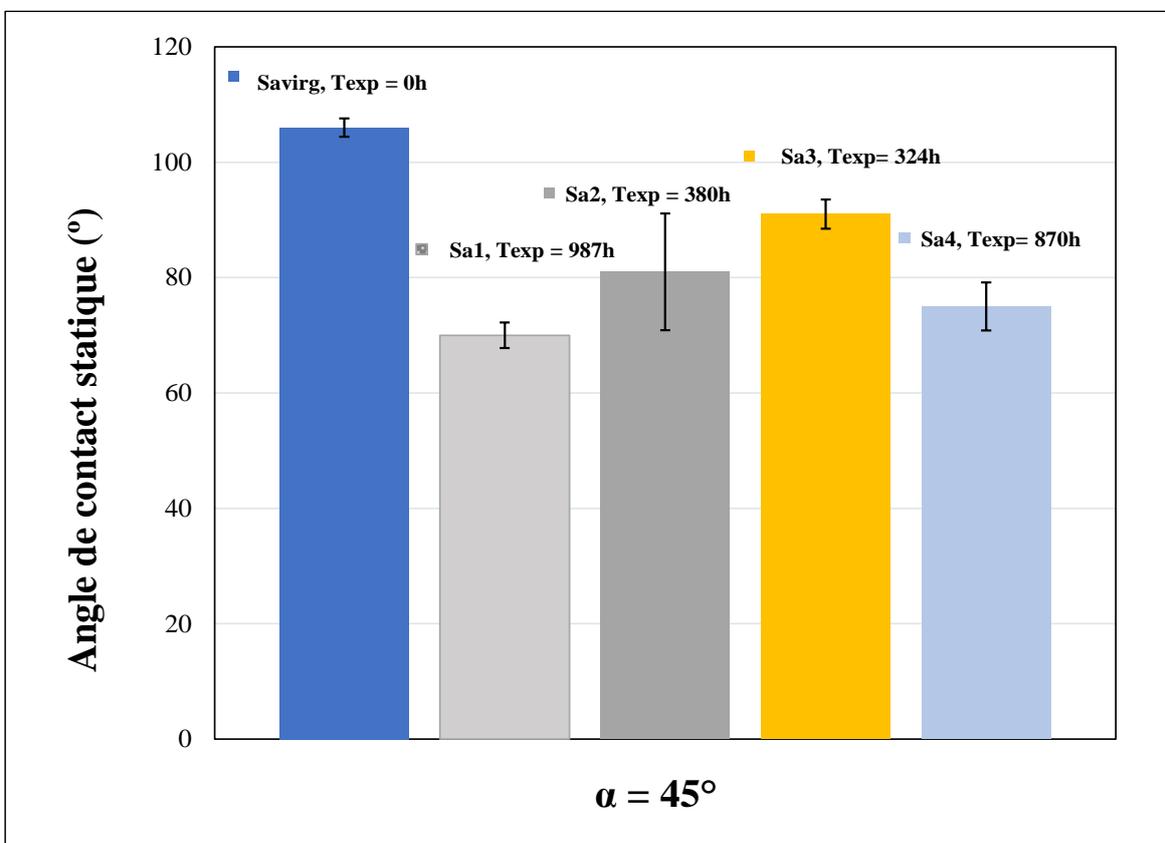


Fig. IV. 26 : Angle de contact statique après exposition de l'isolation au brouillard salin, $\alpha = 45^\circ$

Les figures IV. 24, IV. 25 et IV. 26 représentent les différents angles de contact statiques et d'hystérésis des surfaces des échantillons après leur exposition au brouillard salin, lorsqu'ils sont inclinés respectivement de α (0° , 30° , 45°). Sachant que le temps d'exposition (T_{exp}) au brouillard salin est limité par le critère de désactivation : $I_{\text{eff}} > (1,0 \pm 0,1) \text{ mA}$ sur $(2,0 \pm 0,25) \text{ s}$, fixé suivant la norme DIN EN 62217 :2006. En effet, dès que le courant de fuite maximal circulant le long de la surface d'un échantillon dépasse 1.56 mA pendant 2 s , la chambre de brouillard se mis automatiquement hors fonctionnement et l'échantillon est retiré immédiatement de la chambre de brouillard pour permettre l'enclenchement à nouveau de processus de vieillissement sur les autres échantillons, cette opération est répétée à chaque fois que le courant dépasse sa valeur seuil (le critère de désactivation) et ainsi de suite jusqu'au dernier échantillon. De ce fait, les échantillons n'ont pas été tous soumis à la même durée (T_{exp}) de vieillissement. Il est important de noter que les surfaces isolantes inclinées de 30° et 45° par rapport à l'horizontale (Figs. IV. 25 et IV. 26) ont montré une diminution pratiquement similaire de leur hydrophobie après des durées d'exposition au brouillard salin différentes. Les échantillons inclinés de 45° ont été exposés au brouillard salin pendant une période plus ou moins longue que ceux inclinés à 30° . Cela indique que la tenue diélectrique de l'isolation inclinée de 45° et celle en position $\alpha = 30^\circ$ se rapprochent.

Selon la figure 24, l'échantillon Sa_1 est retiré de la chambre de brouillard après seulement quelques heures de son exposition au brouillard salin. Ceci est dû à la circulation des courants de fuites qui dépassent le seuil prédéterminé à cause de la dégradation de l'hydrophobie de sa surface. Cette dégradation se poursuit sur les autres échantillons et devient de plus en plus importante à mesure que leur durée de vieillissement augmente. La plus grande tenue diélectrique est observée sur l'échantillon Sa_4 qui a conservé ces propriétés d'isolement électrique durant seulement une période d'exposition au brouillard salin qui ne dépasse pas 192 h . Ceci peut être expliquer par le fait qu'en position horizontale de l'isolation, les échantillons sont plus humides que ceux inclinés par α (30° , 45° , 90°), grâce à l'accumulation et à la coalescence des gouttes d'eau sous l'effet de champ électrique qui finissent par créer des films d'eau conducteurs qui favorisent l'apparition d'un grand nombre de décharges électriques successives et répétées sur sa surface durant une courte période de temps et la circulation des courants de fuites le long de sa ligne de fuite jusqu' à son contournement total. Ces décharges électriques et les courants de fuites accélèrent le vieillissement de la surface des échantillons et mènent à la dégradation rapide de son critère hydrophobe, à la défaillance des échantillons et à la minimisation de leur durée de fonctionnement.

Il est à observer d'après les figures IV. 24, IV. 25 et IV. 26 que pour chaque isolation (Sa_1 , Sa_2 ,

Sa₃, Sa₄) inclinée de α (0°, 30°, 45°), la valeur de son angle de contact statique diminue avec l'augmentation de la durée de temps de son exposition (T_{exp}) au brouillard salin. En effet, plus les échantillons sont exposés longtemps au brouillard salin, plus ils risquent de perdre leurs propriétés hydrophobes. L'angle d'inclinaison des échantillons également joue un rôle important dans la diminution de leur hydrophobie, car un angle d'inclinaison de l'isolation plus élevé peut favoriser l'accumulation de sel sur sa surface, ce qui peut altérer ses propriétés hydrophobes. Il est donc très important de prendre en compte à la fois le temps d'exposition au brouillard salin et l'angle d'inclinaison de l'isolation pour comprendre et prévenir la diminution de son hydrophobie.

IV. 4. 3 Rugosité des surfaces isolantes après vieillissement

La performance d'un isolant est fortement influencée par la morphologie de sa surface [167]. Le vieillissement de l'isolation en silicone sous brouillard salin et tension alternative peut entraîner une rugosité de sa surface. Cette dernière peut être causée par la formation de microfissures et de pores qui peuvent accumuler des polluants, des sels, des particules de carbone provenant de l'environnement et de l'eau. Ces matériaux étrangers absorbent également l'humidité, ce qui conduit à la formation d'une fine couche conductrice et provoque des décharges électriques sur la surface de l'isolant.

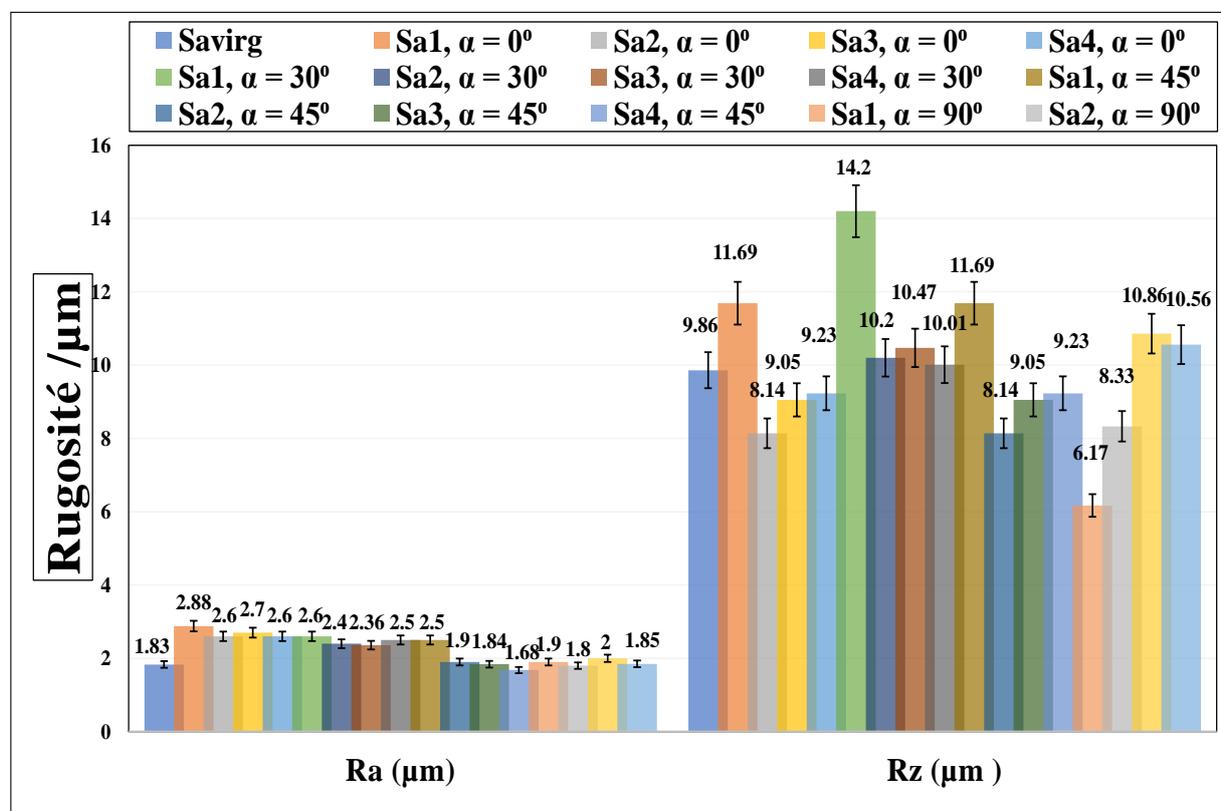


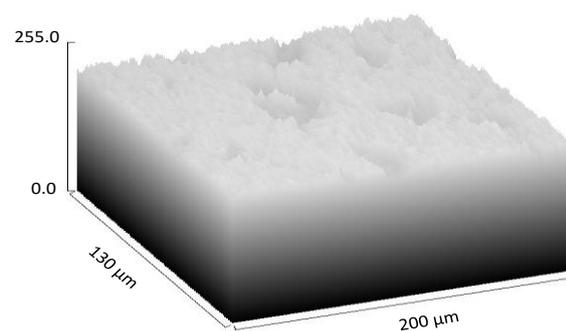
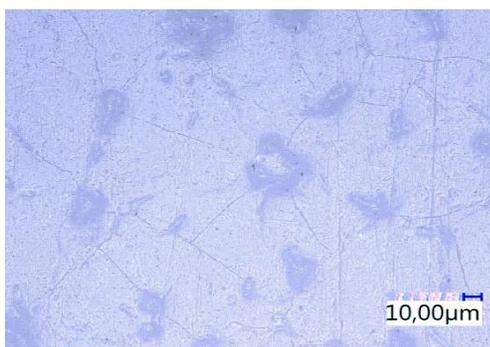
Fig. IV. 27 : Rugosité de surface des échantillons inclinée avec différents angles d'inclinaison par rapport à l'horizontale

La figure IV. 27 montre l'évolution de la morphologie de surface des échantillons Sa₁, Sa₂, Sa₃ et Sa₄ pour chaque angle d'inclinaison α (0°, 30°, 45°, 90), après avoir été vieillis dans un environnement de brouillard salin et tension alternative.

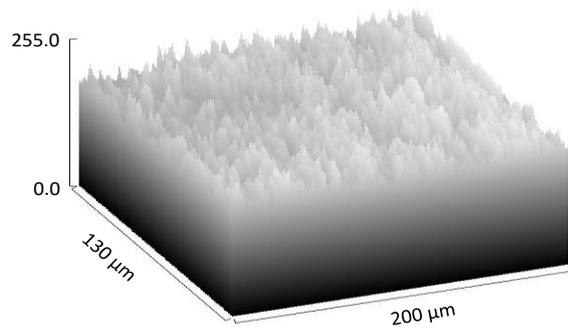
L'étude de la morphologie de ces surfaces est effectuée en mesurant à l'aide d'un microscope numérique les paramètres Ra (μm) et Rz (μm), qui correspondent à la rugosité moyenne et la rugosité maximale de surface respectivement.

Le Sa_{virg}, qui est un échantillon vierge (non vieillis), sert de référence pour comparer les changements qui se produisent après le vieillissement des échantillons.

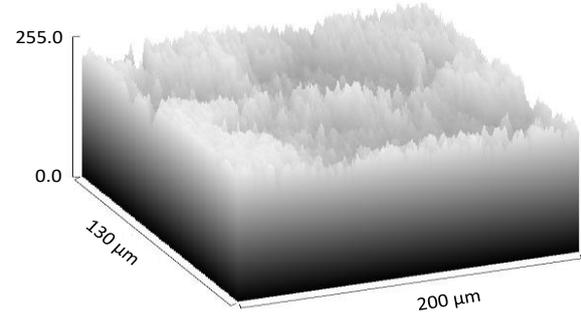
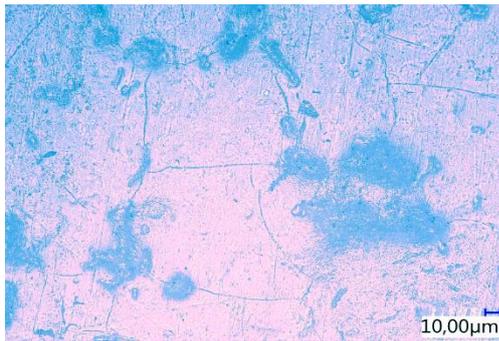
Il en ressort de la figure IV. 27, que tous les échantillons présentent une légère augmentation de la rugosité de surface après avoir été exposés au brouillard salin par rapport à un échantillon vierge (Sa_{virg}), quelle que soit leur inclinaison. Cette petite augmentation est due à la faible tension appliquée aux échantillons lors de vieillissement, étant donné que la rugosité augmente avec l'élévation de la tension appliquée [168] et comme la tension appliquée dans cette étude ne dépasse pas 1 kV donc il n'a été constaté qu'une petite augmentation de la rugosité moyenne et maximale sur la surface des échantillons. Bien que la rugosité de surface ne soit pas directement liée à l'angle d'inclinaison α par rapport à l'horizontale, la variation de α a un impact significatif sur l'humidification de la surface et sa mouillabilité. Un faible angle d'inclinaison entraîne une forte humidification de la surface, ce qui augmente la fréquence d'apparition et de circulation de décharges électriques. Cela conduit à l'apparition de fissures et à une augmentation de la rugosité de la surface (Fig. IV. 28).



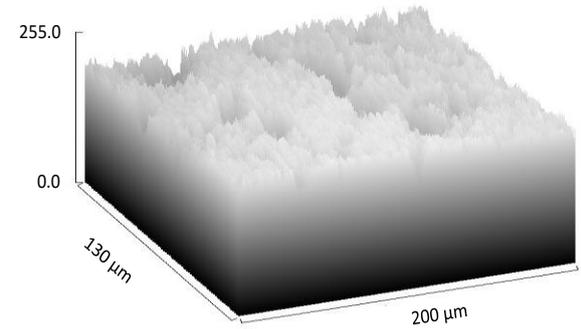
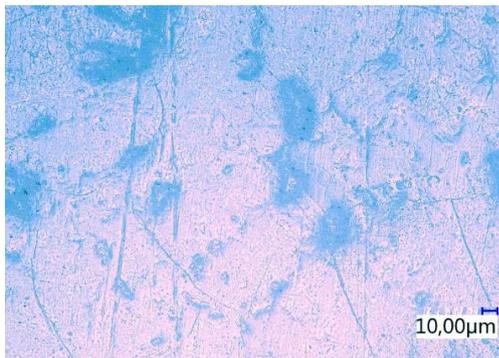
a)



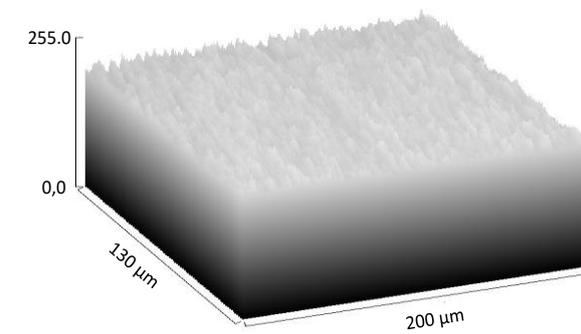
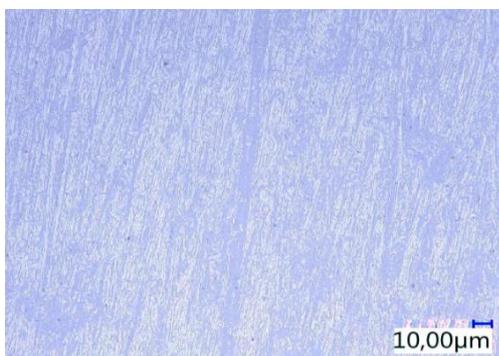
b)



c)



d)



e)

Fig. IV. 28 : Morphologie de surface avant et après vieillissement représenté en image 2D prise par microscope (à gauche) et 3D réalisée avec Image J (à droite) ; a) S_{virg} , b) $\alpha = 0^\circ$, c) $\alpha = 30^\circ$, d) $\alpha = 45^\circ$, e) $\alpha = 90^\circ$

Les images en 2D présentées dans la figure IV. 28 ont été prises à l'aide d'un microscope

numérique sur les surfaces des échantillons après leur vieillissement, à différents angles d'inclinaison α . Pour bien visualiser la morphologie et l'apparence de nos échantillons, nous avons utilisé les propriétés de logiciel Image J pour créer des images en 3D à partir de ces photos en 2D. La figure IV. 28 montre que la surface de l'échantillon vierge est relativement lisse et compacte. Par contre la structure de la surface des échantillons alimentés en tension alternative et exposés au brouillard salin durant une période donnée était dégradée. Toutes les surfaces vieillis au brouillard salin sont devenues rugueuses et poreuses. Avec la diminution de l'angle d'inclinaison α de l'isolation, l'irrégularité et la rugosité de surface deviennent de plus en plus importantes. Il est à remarquer aussi d'après la figure IV. 28, que l'isolation en position verticale a pu résister au vieillissement malgré son exposition au brouillard salin pour une longue période (1000 h) sans affecter significativement la rugosité de sa surface. En revanche, lorsque celle-ci est en position horizontale ($\alpha = 0^\circ$), sa surface est plus mouillée sous brouillard salin et devient plus rugueuse en raison de la formation de dépôts de sel qui peuvent créer des aspérités sur ces surfaces et accélérer l'érosion et la dégradation de l'isolation, ce qui a entraîné leur contournement après une courte période de leur exposition au brouillard salin (maximum 192h) et donc à la réduction de ses performances diélectriques et de sa durée de fonctionnement. Étant donné que les gouttelettes d'eau s'écrasent facilement sur la surface rugueuse, irrégulière et poreuse, elles pénètrent dans ses aspérités, augmentant ainsi la surface de contact entre l'eau et la surface isolante. Cela conduit à la diminution de l'angle de contact statique des échantillons vieillis sous brouillard salin et tension alternative, ce qui entraîne la diminution de leur hydrophobie [169].

IV. 4. 4 Courant de fuite circulant sur les surfaces isolantes

Le courant de fuite circulant le long de la surface des échantillons a été mesuré dans le but d'étudier leur vieillissement en fonction du temps d'exposition au brouillard salin sous l'influence de la tension alternative. Ces mesures concernent tous les échantillons, fixés à différents angles d'inclinaison α variant de 0° jusqu'à 90° . Quatre échantillons (Sa_1 , Sa_2 , Sa_3 , Sa_4) sont utilisés pour chaque inclinaison durant toute la période de vieillissement par brouillard salin. La conductivité électrique du brouillard salin est $\sigma = 1.78$ mS/cm et la tension alternative appliquée est $V = 1$ kV. Pour chaque échantillon, une mesure très précise de courant de fuite maximale (I_{\max}) et minimale (I_{\min}) a été effectuée et enregistrée chaque 0.02 s à l'aide de logiciel NextView durant toute la période de vieillissement. A la fin des tests, les résultats ont été collectés et traités dans l'environnement MATLAB en développant un programme qui nous donne deux valeurs maximales de courant de fuite parmi toutes les valeurs maximales et

deux valeurs minimales parmi toutes les valeurs minimales sur toute la période d'exposition au brouillard salin. Les résultats de mesure du courant de fuite et son évolution le long de la surface de tous les échantillons sous tension alternative en fonction de leurs angles d'inclinaison (α) et du temps de leur exposition au brouillard salin, sont présentés dans les figures IV. 29, IV. 30, IV. 31 et IV. 32.

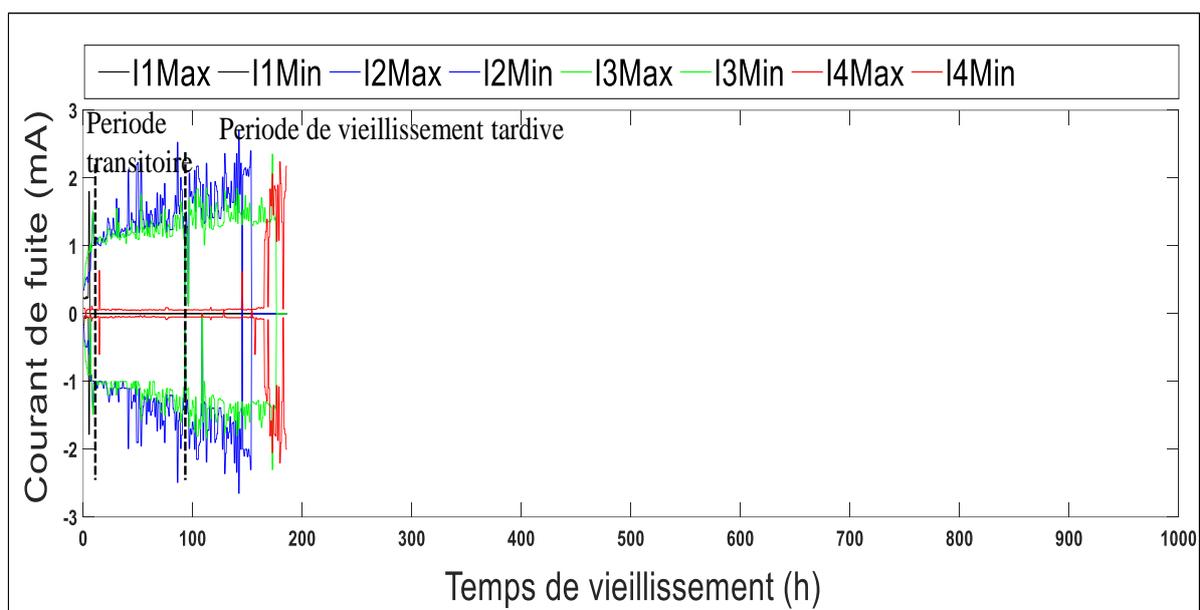


Fig. IV. 29 : Courant de fuite circulant sur Sa₁, Sa₂, Sa₃, Sa₄, $\alpha = 0^\circ$ pendant 190 h

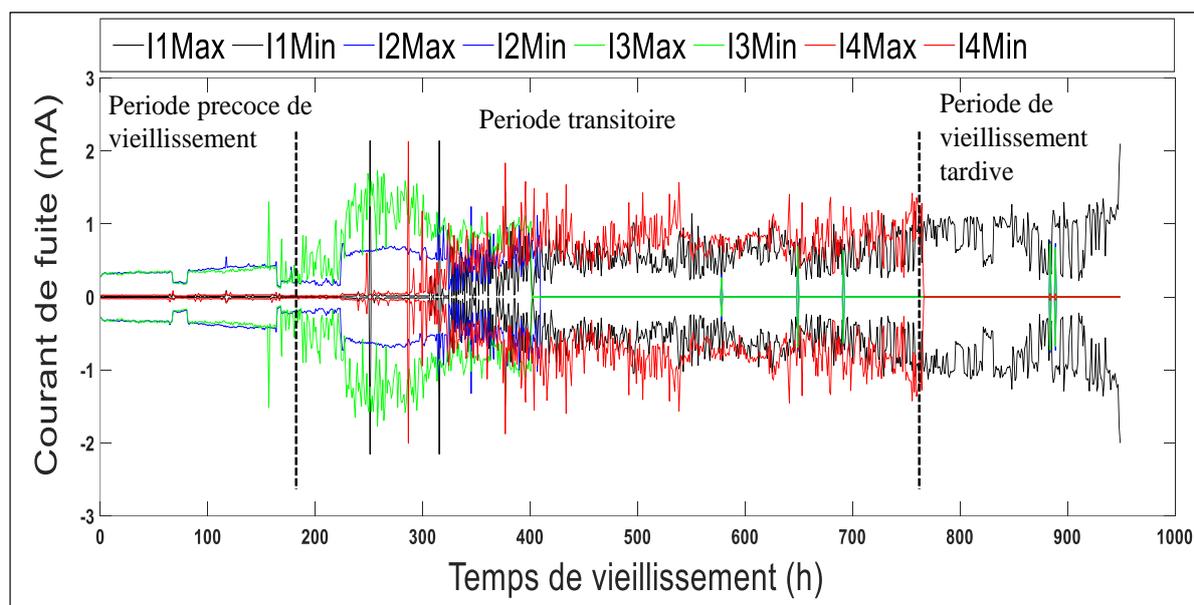


Fig. IV. 30 : Courant de fuite circulant sur Sa₁, Sa₂, Sa₃, Sa₄, $\alpha = 30^\circ$, pendant 963h

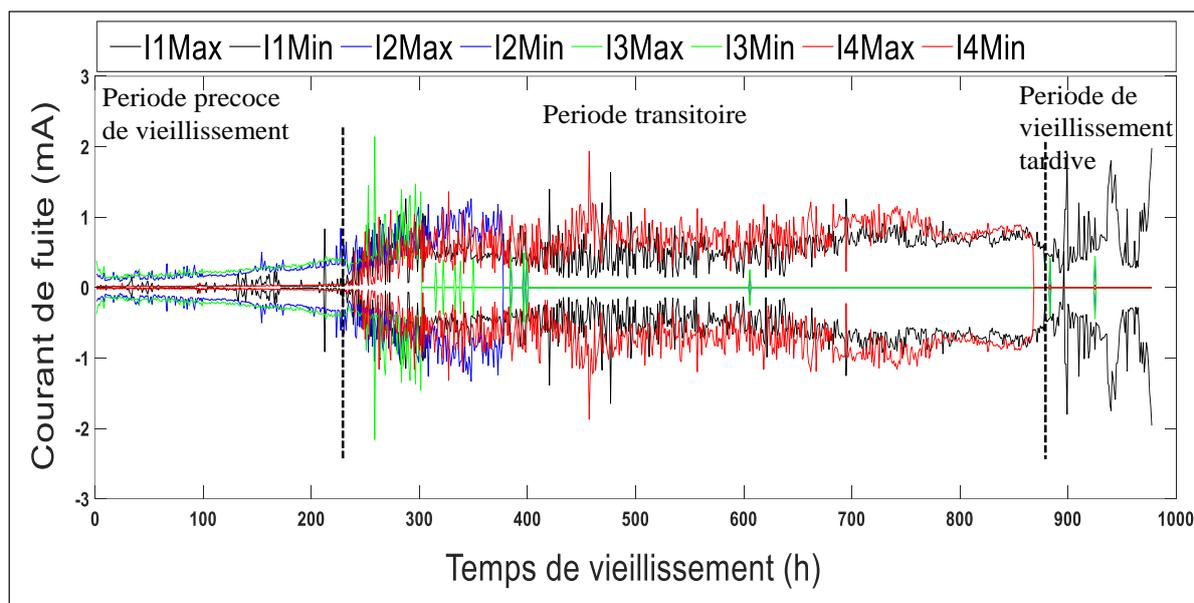


Fig. IV. 31 : Courant de fuite circulant sur Sa₁, Sa₂, Sa₃, Sa₄, $\alpha = 45^\circ$, pendant 987h

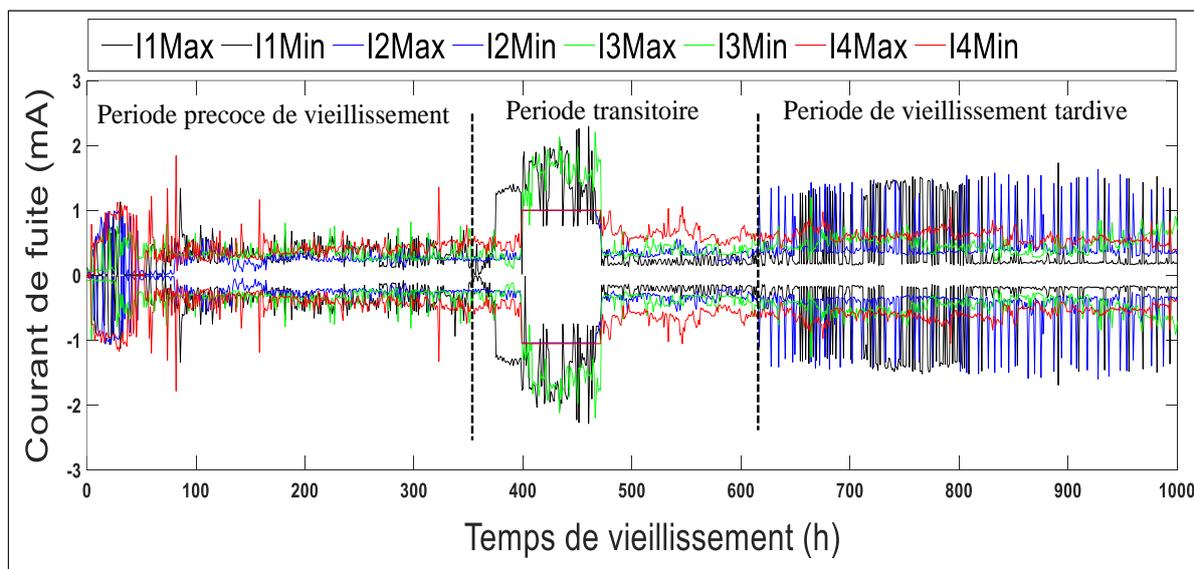


Fig. IV. 32 : Courant de fuite circulant sur Sa₁, Sa₂, Sa₃, Sa₄, $\alpha = 90^\circ$, pendant 1000h

Il en résulte de ces figures, que tous les échantillons montrent une augmentation progressive du courant de fuite avec l'augmentation de leur temps d'exposition au brouillard salin jusqu'à atteindre la valeur seuil du courant prédéterminée qui conduit à leur mise hors service. La durée nécessaire pour atteindre le courant de fuite seuil varie d'un échantillon à l'autre en fonction de son angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale. Pour l'échantillon le plus rigide placé à l'horizontale ($\alpha = 0^\circ$), la valeur seuil prédéterminée du courant de fuite est atteinte après seulement 192 heures d'exposition au brouillard salin. Cette durée augmente à 963 heures et 987 heures pour un angle d'inclinaison compris entre 30° et 45° , et atteint 1000 heures et plus pour un angle d'inclinaison de l'isolation de 90° . Un échantillon qui atteint la valeur seuil de courant de fuite après une courte durée d'exposition au brouillard salin, a une durée de

fonctionnement plus courte. En revanche, celui qui s'oppose au passage des courants de fuites importants pendant une longue durée d'exposition au brouillard salin a une meilleure résistance à l'érosion et une durée de fonctionnement et de vie plus longue.

Lorsque la surface de l'échantillon est inclinée à un angle α faible, l'eau salée peut s'accumuler et former des flaques sur la surface qui peuvent créer des zones de concentration élevée de sel, ce qui peut augmenter le risque d'érosion et de développement des courants de fuites. De plus, l'eau salée s'écoule plus lentement sur les surfaces à faible inclinaison, ce qui peut prolonger le temps de contact entre l'eau salée et la surface, augmentant ainsi les chances d'érosion et de sa dégradation. Par contre, une inclinaison élevée de l'échantillon, permet à l'eau salée de s'écouler plus rapidement sur la surface sous l'effet de la force gravitationnelle, cela peut réduire le temps de contact entre l'eau salée et la surface et minimiser les risques de développement des courants de fuite [170]. Ceci nous conduit à dire que la durée de fonctionnement de l'isolation croît avec l'augmentation de son inclinaison α par rapport à l'horizontale.

Les courbes des courants de fuite illustrées en figures IV. 29, IV. 30, IV. 31 et IV. 32 peuvent être subdiviser en trois zones distinctes [171], dont, la première zone est appelée la période de vieillissement précoce, elle correspond au début des essais, elle est caractérisée par un taux d'augmentation faible et progressive du courant de fuite, indiquant une détérioration progressive des échantillons avec une hydrophobie maintenue, marqué par une forme d'onde du courant de fuite sous forme de décharges périodiques. À mesure que la durée d'exposition au brouillard salin augmente, le courant de fuite peut atteindre une valeur stable, indiquant une stabilisation de la dégradation. La deuxième zone correspond à un courant de fuite plus élevé, où il commence à augmenter de manière significative, indiquant le début de détérioration de l'hydrophobie et la dégradation avancée de l'échantillon, ce qui conduit à l'adhérence des gouttelettes d'eau à la surface des échantillons. A ce stade, la forme d'onde du courant de fuite montre des pics et des décharges d'impulsion qui se rapprochent. Cette zone est appelée la période transitoire de vieillissement. Cependant, dans la troisième zone, le courant de fuite devient encore plus élevé et augmente rapidement jusqu'à atteindre ou dépasser le niveau seuil de courant prédéterminé. Au-delà de cette valeur la chambre de brouillard se met hors tension. Cette zone, est appelée, la période de vieillissement tardive. Les gouttelettes adhèrent encore plus à la surface des échantillons en raison de la détérioration et la perte totale de leur hydrophobie, formant ainsi un pont complet entre les électrodes, ce qui conduit à la formation d'une couche fine d'humidité à leurs surfaces. Cette couche humide va se vaporiser sous l'effet Joule crée par la circulation des courant de fuites, des bandes sèches se forment et des

déchargent se produisent de façon continue à la surface, ce qui peut entraîner une défaillance totale de l'échantillon [172].

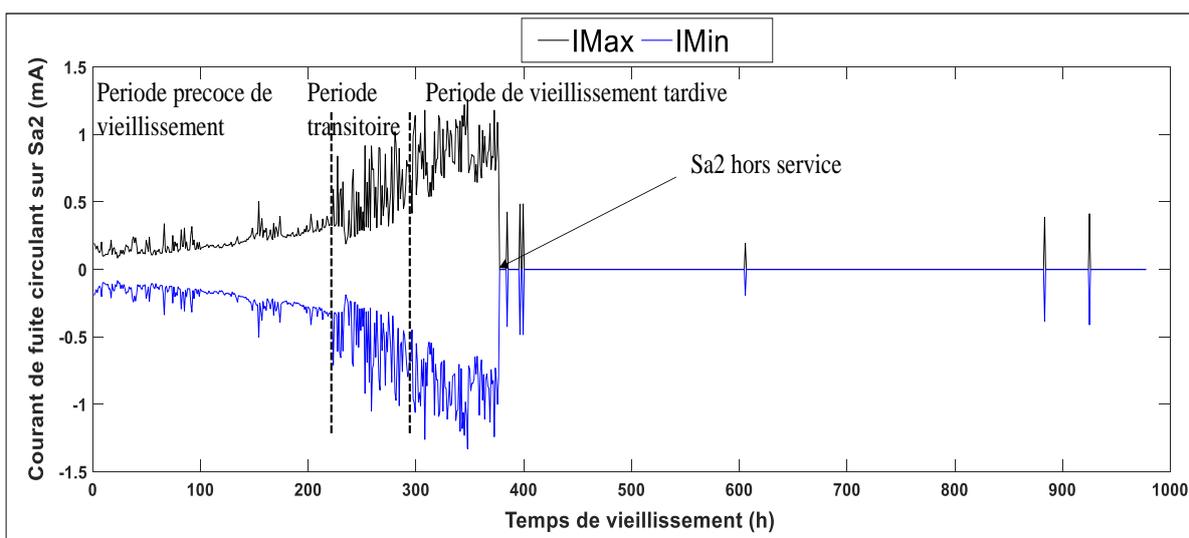
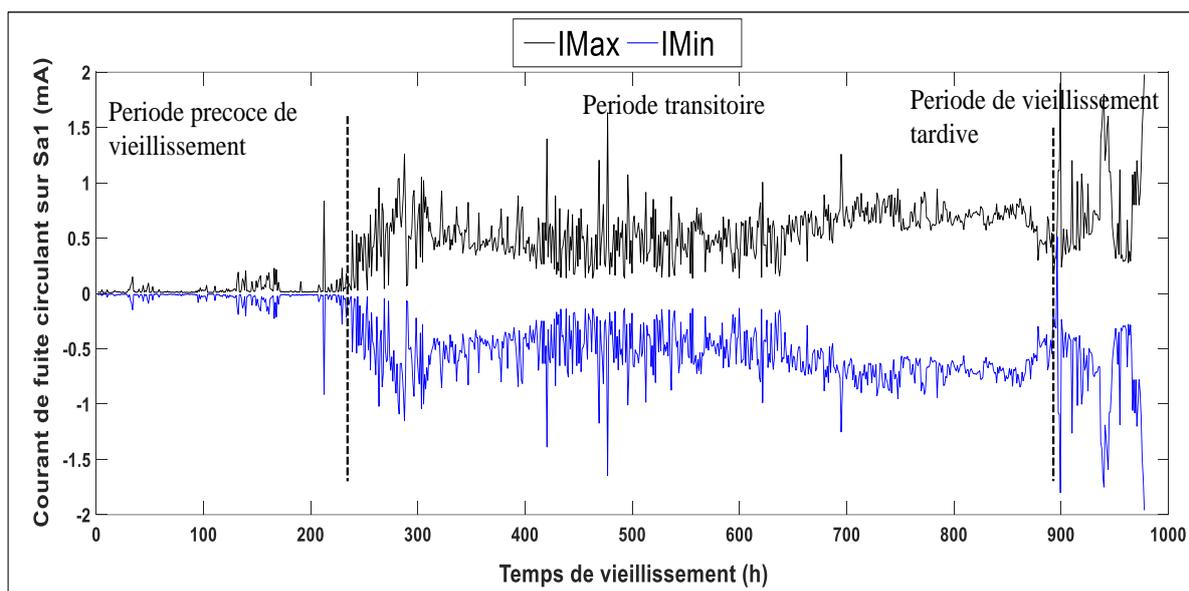
Il est à remarquer, d'après les figures IV. 29, IV. 30, IV. 31 et IV. 32 que la durée de la période précoce de vieillissement diffère d'un échantillon à un autre pour un même angle d'inclinaison α (Fig. IV. 33) et d'une isolation (Sa_1, Sa_2, Sa_3, Sa_4) à une autre en fonction de son angle d'inclinaison α ($0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 90^\circ$). Sa plus grande valeur qui est de l'ordre de 360 h est enregistrée lorsque l'isolation est en position verticale. Pour un angle α de 45° , elle est de 250 h et pour un angle α de 30° , elle est de 180 h. Cependant, sa valeur minimale (4h) est enregistrée lorsque l'isolation est en position horizontale. La durée de la période de stabilité de courant de fuite pendant le vieillissement par brouillard salin des isolants, est un paramètre très important qui peut fournir des informations sur leur résistance à l'érosion et leur capacité à maintenir leurs propriétés diélectriques même dans des environnements agressifs tel que le brouillard salin [171]. Une courbe de courant de fuite avec une période précoce de vieillissement longue révèle une bonne qualité d'isolation et le contraire, elle indique une mauvaise qualité d'isolation et une faible résistance à l'érosion lorsqu'elle est courte. Cela nous conduit à dire que la valeur élevée de la durée de la période de vieillissement de la courbe du courant de fuite lors de vieillissement par brouillard salin de l'isolation en position verticale ($\alpha = 90^\circ$), reflète sa tenue diélectrique et sa résistance au vieillissement ainsi que sa très bonne performance et fiabilité. En revanche, ces caractéristiques diminuent avec la diminution de cette période qui est fonction d'angle d'inclinaison α .

Toutes les courbes de courant de fuite des 4 échantillons testés pour chaque inclinaison α par rapport à l'horizontale telles qu'illustrées dans les figures IV. 29, IV. 30, IV. 31 et IV.32 peuvent être désassociées en 4 courbes distinctes, représentant le courant de fuite circulant à travers chaque échantillon.

La courbe de courant de fuite circulant le long de la surface des échantillons Sa_1, Sa_2, Sa_3 et Sa_4 lorsqu'ils sont inclinés de 45 degrés a été choisie afin de mieux comprendre le processus de vieillissement sous brouillard salin de chaque échantillon individuellement.

La figure IV. 33 montre que l'allure du courant de fuite circulant le long des échantillons Sa_1, Sa_2, Sa_3 , et Sa_4 inclinés de 45° par rapport à l'horizontale et soumis aux mêmes conditions de vieillissement, n'a pas suivi un modèle spécifique et sa forme d'onde a tendance à varier d'un échantillon à l'autre. Cependant, la période précoce de vieillissement est pratiquement identique pour les 4 échantillons. La différence réside dans la tenue diélectrique de ces échantillons et leur résistance au vieillissement par brouillard salin. Les échantillons Sa_1 et Sa_4 ont montrés une plus grande résistance au passage des courants de fuites importants pendant

une longue période d'exposition au brouillard salin par rapport aux échantillons Sa₂ et Sa₃ qui ont contournés après environ la moitié de la durée d'exposition de Sa₁ et Sa₄. Il est possible que cela soit dû à la variation de l'humidification des échantillons, causée par la variation de la porosité et de la rugosité de leurs surfaces ou l'inhomogénéité de la distribution de brouillard salin dans la chambre de brouillard. Cette variation peut influencer la quantité d'humidité qu'ils absorbent. Tel que, un échantillon plus poreux peut absorber plus d'humidité, ce qui entraîne une humidification et une concentration de sel plus élevée a sa surface. Cela peut donc entraîner une variation de la dégradation des surfaces de ces échantillons pendant le vieillissement, en particulier en ce qui concerne leur hydrophobie [173].



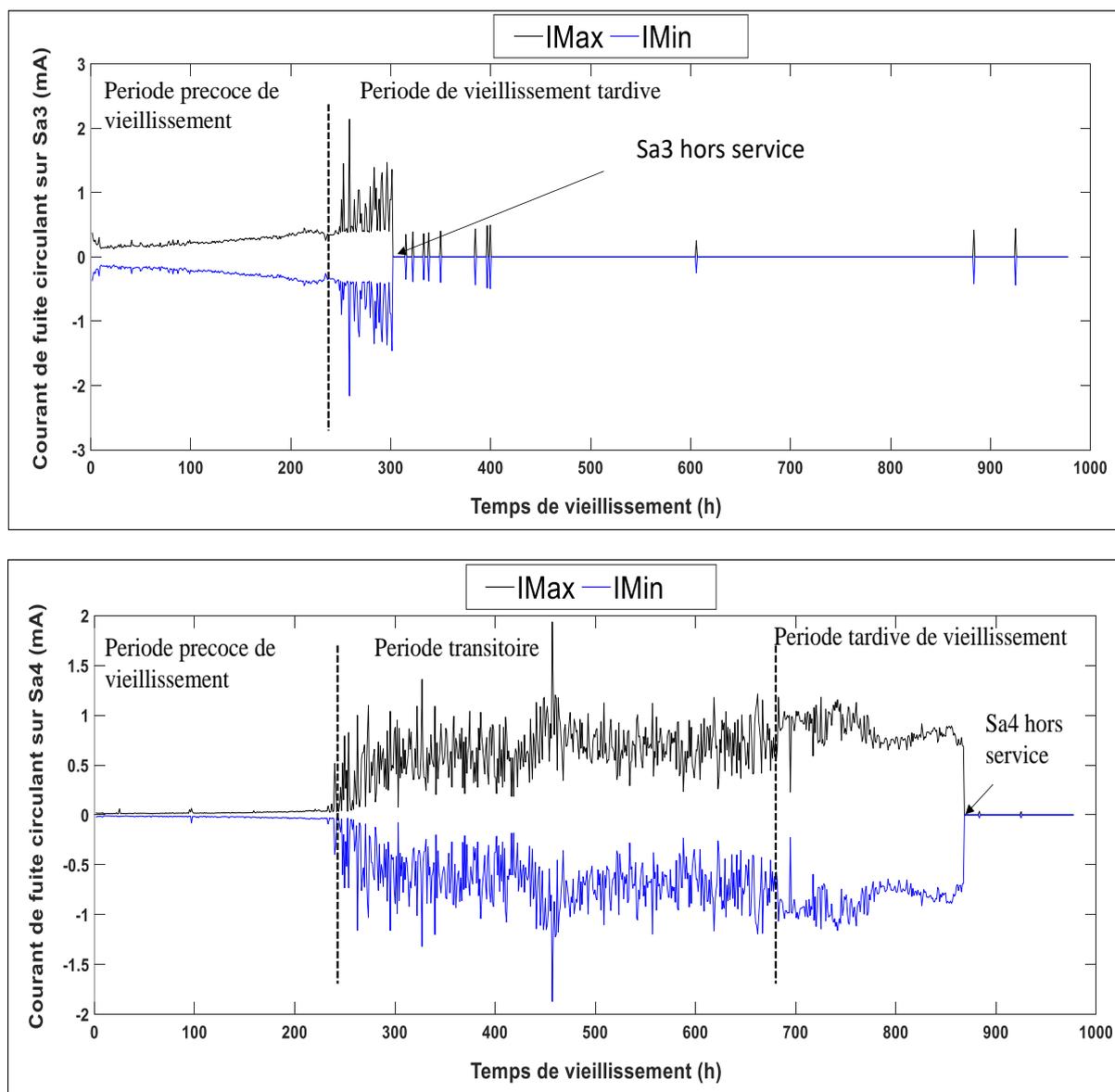


Fig. IV. 33 : Courant de fuite circulant sur la surface des échantillons Sa₁, Sa₂, Sa₃, Sa₄ séparément durant l'exposition au brouillard salin, $\alpha = 45^\circ$

Les figures IV. 34, IV. 35, IV. 36 et IV. 37 présentent les courants de fuites circulant sur les surfaces des échantillons inclinés d'un angle α égale à 0° jusqu'à 90° au cours des 24 premières heures de leur vieillissement.

La valeur initiale du courant de fuite enregistrée juste au début des essais ne dépassent pas 0.4 mA pour les inclinaisons 30° et 45° et elle devient plus élevée et peut atteindre jusqu'à 0,9 mA et 1,5 mA après seulement 24 heures, lorsque l'isolation est placée verticalement ou horizontalement respectivement. Ceci peut être expliqué par le fait qu'au début des essais, la chambre de brouillard n'est pas trop humide et les gouttes formées sur les surfaces des échantillons était trop petites. En effet, lorsque l'isolation est inclinée de 30° ou 45° , ces gouttes de volume et de tailles minimales à la surface gardent leur forme, ce qui ne favorise pas leurs déformation et allongement pour former des films ou des flaques d'eau qui conduisent au

contournement. Contrairement aux gouttes formées sur la surface des échantillons en position verticale, qui malgré leur petite taille, elles se déforment et se coalescent sous l'effet simultané du champ électrique et de la forte force gravitationnelle formant ainsi un canal conducteur le long de la ligne de fuite de l'échantillon permettant le passage de courant de fuite. La valeur des courants de fuite élevées lorsque les échantillons sont en position horizontale est dû au fait que l'eau salée du brouillard salin a tendance à s'accumuler plus facilement sur une surface horizontale, ce qui augmente le risque de formation de chemins conducteurs pour le courant électrique.

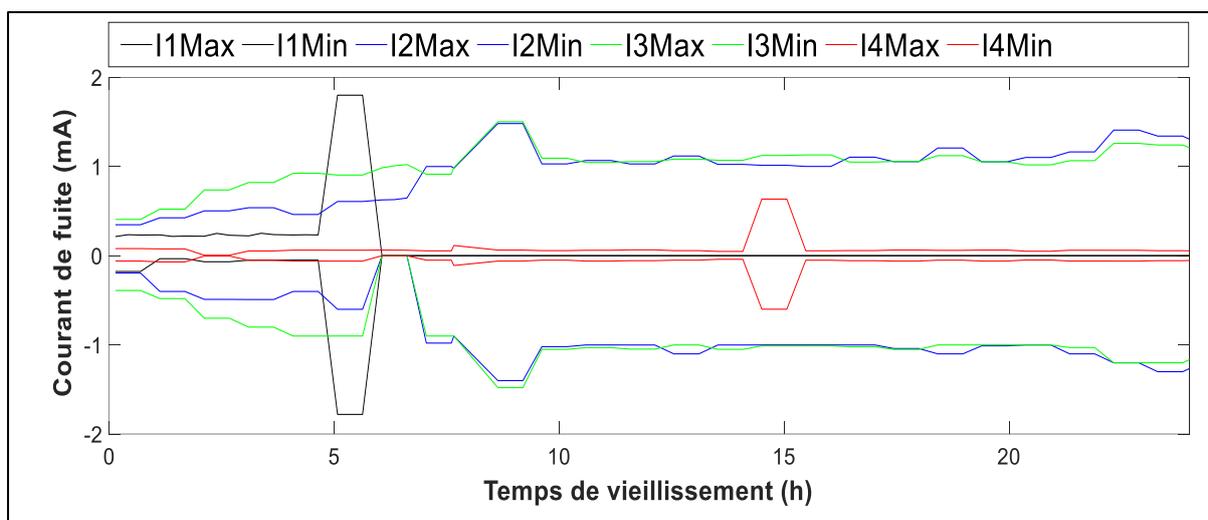


Fig. IV. 34 : Courants de fuites circulants sur Sa_1, Sa_2, Sa_3, Sa_4 pendant les premières 24 h d'exposition au brouillard salin, $\alpha = 0^\circ$

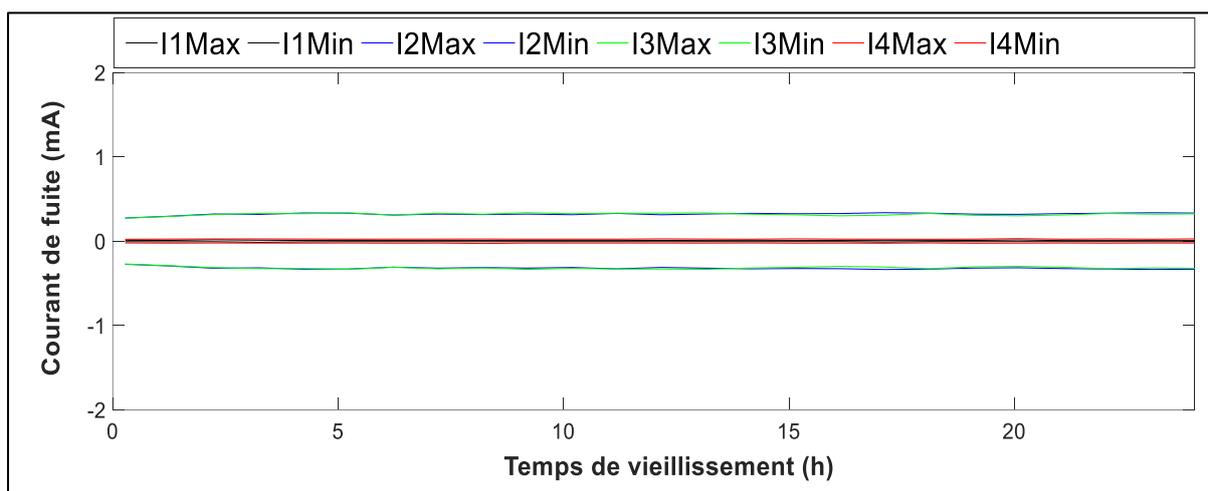


Fig. IV. 35 : Courants de fuites circulants sur Sa_1, Sa_2, Sa_3, Sa_4 pendant les premières 24 h d'exposition au brouillard salin, $\alpha = 30^\circ$

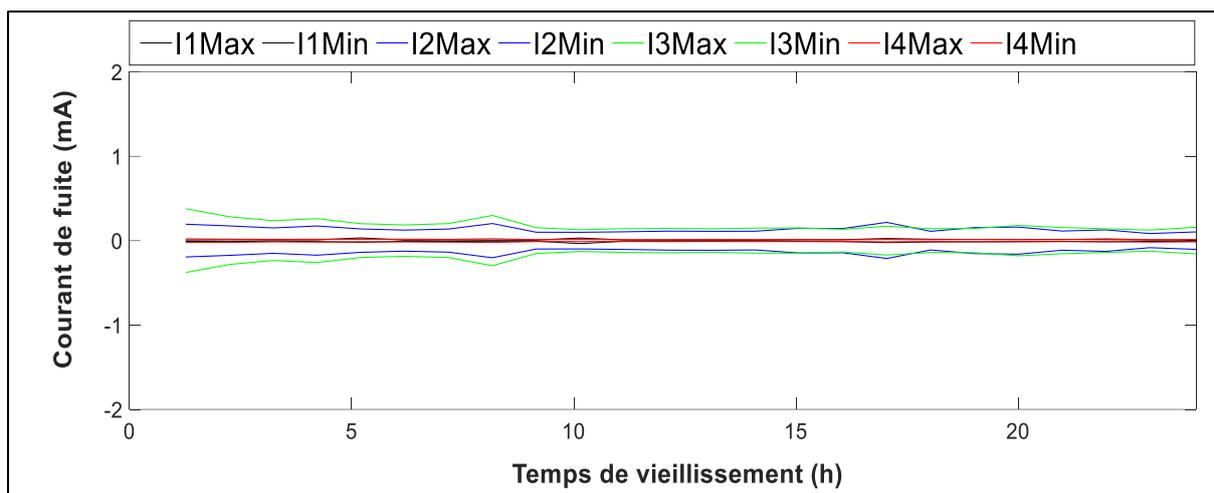


Fig. IV. 36 : Courants de fuites circulants sur Sa₁, Sa₂, Sa₃, Sa₄ pendant les premières 24 h d'exposition au brouillard salin, $\alpha = 45^\circ$

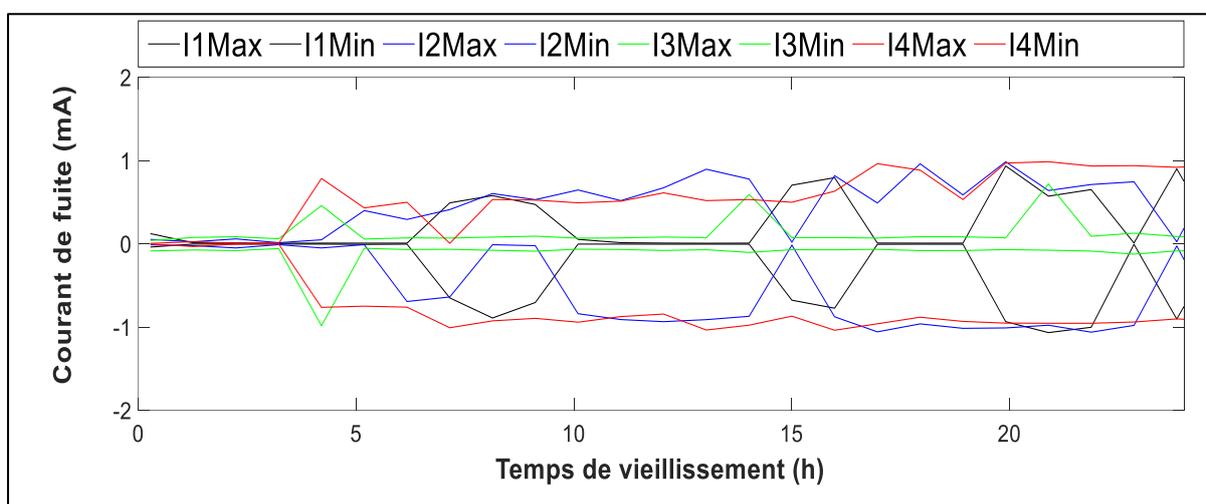


Fig. IV. 37 : Courants de fuites circulants sur Sa₁, Sa₂, Sa₃, Sa₄ pendant les premières 24 h d'exposition au brouillard salin, $\alpha = 90^\circ$

IV. 5 Conclusion

L'analyse de l'évolution du volume des gouttes d'eau de pluie naturelle recouvrant une surface isolante en silicone hydrophobe en absence de tension et à angle d'inclinaison variable sur site, ainsi que des essais en laboratoire sur l'humidification de cette isolation par des gouttes d'eau de volume variable en fonction de l'angle d'inclinaison de sa surface ont révélés les résultats suivants :

- La pluie est un phénomène aléatoire et les résultats trouvés sont vérifiés sur trois périodes de mesure de la pluie naturelle ;
- Sous la chute naturelle de la pluie, le volume de la goutte atteint une valeur maximale ($V_d = 140$ à $152 \mu\text{l}$) dans le cas où la surface isolante est en position horizontale ($\alpha =$

0°). Ce cas de figure est très défavorable pour l'isolation en silicone hydrophobe car la ligne de fuite humide est très grande devant celle de sa zone sèche. En conséquence, le risque de contournement et d'altération de l'isolation par les décharges sont énormes ;

- Le volume des gouttes d'eau de pluie récoltée sur plusieurs secteurs d'un même échantillon en silicone diminue avec la croissance de l'angle d'inclinaison de la surface isolante par rapport à l'horizontale ;
- Le volume maximal de gouttes d'eau trouvé dans le cas de la surface isolante en position verticale ne dépasse pas 20µl, lorsque celle-ci est mise hors ou sous tension alternative. Au-delà de ce volume la goutte tombe. Dans ce cas de figure, la taille de la ligne de fuite est la plus petite et celle de la zone sèche est plus grande ;
- Le rapport des deux volumes des gouttes d'eau sur l'isolation en position horizontale et sur celle en position verticale est au maximum égal à 7.5. Cela veut dire que la ligne de fuite de l'isolation en position horizontale est 7.5 fois plus humide que celle trouvée en position verticale. Donc le contournement le plus probable de l'isolation sous tension de service peut avoir lieu dans cet intervalle d'angle d'inclinaison de sa surface.
- Le nombre de gouttes résiduelles augmente avec l'élévation de l'angle d'inclinaison ;
- Une corrélation entre les deux caractéristiques $V_{rd} = f(\alpha)$ obtenues sur site et au laboratoire. La seule différence réside au niveau du volume des gouttes d'eau résiduelles sur la surface de l'isolation influencé par la polarité du champ électrique qui change à chaque alternance.
- La courbe de tension de contournement de l'isolation en fonction de l'angle de son inclinaison lorsque $45 \mu l \leq V_d \leq 90 \mu l$, présente pour un même angle (α) un minimum quel que soit le volume (V_{di}) des gouttes d'eau déposées initialement. La position de ce minimum se trouve décalée vers des angles d'inclinaison plus faible avec la croissance de la taille des gouttes d'eau ($0^\circ \leq \alpha \leq 25^\circ$).

L'étude de l'impact de l'angle d'inclinaison d'une isolation en silicone sur sa performance lorsqu'elle est soumise au vieillissement combiné sous brouillard salin et tension alternative a conduit aux points essentiels suivant :

- D'après l'inspection visuelle de l'état de surface effectué sur les échantillons vieillis, retirés de la chambre de brouillard, il a été constaté, qu'il n'y a pas eu de dégradations importantes, des brulures ou des fissures sur toutes leurs surfaces. Cependant, une faible décoloration des échantillons a été observée.
- Une diminution de l'angle de contact statique et dynamique de l'isolation en fonction

de son inclinaison par rapport à l'horizontale et de son temps d'exposition au brouillard.

- Les résultats des tests comparatifs de rugosité effectués sur les surfaces des échantillons avant et après leur exposition au brouillard salin sous une haute tension alternative révèlent une augmentation de la rugosité de toute ces surfaces, indépendamment de l'angle d'inclinaison α .
- Une augmentation progressive du courant de fuite est enregistrée sur tous les échantillons avec l'augmentation de leur temps d'exposition au brouillard salin jusqu'à atteindre la valeur seuil du courant prédéterminée qui conduit à leur mise hors service.
- La durée nécessaire pour atteindre le courant de fuite seuil varie d'un échantillon à l'autre en fonction de son angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale et sa valeur optimale est enregistré lorsque l'isolation est en position verticale.
- Le développement de courant de fuite se déroule en trois périodes distinctes : la période de vieillissement précoce, la période de transition et la période de vieillissement tardive.
- Une courbe de courant de fuite de l'isolation inclinée de $\alpha = 90^\circ$ avec une période de vieillissement précoce élevée, indique une très bonne qualité d'isolement. Cependant, elle indique une mauvaise qualité d'isolement et une faible résistance à l'érosion lorsque celle-ci est petite comme dans le cas de l'isolation en position horizontale ($\alpha = 0^\circ$).

CONCLUSION GENERALE

Notre investigation porte sur l'étude sur site et en laboratoire de la performance d'une isolation en silicone à angle d'inclinaison variable sous pluie et tension alternative et sur l'évaluation de l'impact de son angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale sur sa résistance au vieillissement en présence de brouillard salin sous tension alternative.

Les résultats émanant de l'exposition de plusieurs échantillons d'une isolation propre en silicone hydrophobe durant trois périodes temporelles, sous pluie naturelle et conditions climatiques défavorables, ont mené aux conclusions essentielles suivantes :

- Existence d'une ligne de fuite de l'isolation à un taux d'humidification par pluie naturelle très élevé. Il est favorisé par le vent vis-à-vis de ses homologues et elle peut être le siège d'un contournement par une décharge électrique en cas de sa mise sous tension.
- Déclin du degré d'humidification de cette ligne de fuite avec l'augmentation de l'angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale de l'isolation sous l'effet de l'ensemble des forces essentielles de gravitation et hydrodynamiques des gouttes résiduelles d'eau de pluie recouvrant sa surface.
- Mise en évidence de deux intervalles d'angles critiques d'inclinaison de l'isolation ($0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$) et ($60^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$) dont l'emploi du premier est très défavorable pour le dimensionnement des ailettes des isolateurs du fait de la réduction drastique du pouvoir de leur isolement. Par contre l'exploitation du second est très favorable pour leur performance électrique du fait du rapprochement de sa valeur de celle des mêmes isolateurs à l'état sec.
- Absence d'influence de la période temporelle de pluie naturelle sur le degré d'humidification de la ligne de fuite de l'isolation sous des conditions climatiques pratiquement similaires.

Les résultats des essais effectués au laboratoire sur le taux d'humidification d'une isolation en silicone au moyen d'un dépôt approprié de gouttes d'eau à volume variable en fonction de l'angle d'inclinaison de sa surface sont résumés en points essentiels suivants :

- Déclin de l'intensité d'humidification de la surface de l'isolation avec l'élévation de l'angle de son inclinaison, indépendamment du volume du dépôt de gouttes d'eau et le niveau de tension appliquée à celle-ci.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Similitude qualitative de l'allure des deux caractéristiques $V_{rd} = f(\alpha)$ obtenues sur site et au laboratoire. La seule différence réside au niveau du mode d'humidification de la surface de l'isolation.

L'étude de l'effet de l'angle d'inclinaison d'une isolation en silicone hydrophobe sur sa résistance au vieillissement sous brouillard salin a révélé :

- Le déclin qualitatif de l'hydrophobie de l'isolation au brouillard salin avec la diminution de l'angle de son inclinaison après son exposition.
- L'isolation peut maintenir ses propriétés hydrophobes pendant une période allant jusqu' à cinq fois plus longue en position verticale qu'en position horizontale. Ceci nous conduit à dire que l'isolation en position verticale est cinq fois plus performante que l'isolation en position horizontale.
- L'angle d'inclinaison α de l'isolation par rapport à l'horizontale a un impact significatif sur sa résistance au vieillissement. En effet, les isolations inclinées à des angles plus élevés ont montré une résistance supérieure au cheminement des courants de fuites pendant une longue période sous brouillard salin par rapport à celles inclinées à des angles plus faibles et elle est optimale lorsque l'isolation est en position verticale. Ces résultats suggèrent que l'inclinaison peut jouer un rôle important dans la protection contre les effets néfastes du brouillard salin.
- L'exposition des isolations en silicone hydrophobe sous tension à la pluie et au brouillard salin, affecte et diminue leur performance et pouvoir d'isolement électrique. Notre étude, révèle l'existence d'un intervalle d'angle d'inclinaison très favorable pour le pouvoir d'isolement des isolateurs humidifiés en raison de son rapprochement de celui obtenu dans le cas sec. L'isolation dans cet intervalle d'inclinaison reste performante même dans les conditions climatiques les plus défavorables.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] B. B. Dong, X. L. Jiang, Z. J. Zhang, J. L. Hu, Q. Hu and L. C. Shu, “Effect of Environment Factors on AC Flashover Performance of 3 Units of Polluted Insulator Strings Under Natural Fog Condition”, IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 21, No. 4, pp. 1926-1932, 2014.
- [2] Z. Jia, C. Chen, X. Wang, H. Lu, C. Yang and T. Li, “Leakage Current Analysis on RTV Coated Porcelain Insulators during Long Term Fog Experiments”, IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 21, No. 4, pp. 1547-1553, 2014.
- [3] F. Yin, M. Farzaneh, X.L. Jiang, “Electrical Performance of Composite Insulators under Icing Conditions”, IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation., Vol.21, pp.2584–2593, 2014.
- [4] L. Yang, Y. Hao, L. Li, and Y. Zhao “Comparison of Pollution Flashover Performance of Porcelain Long Rod, Disc Type and composite UHVDC Insulators at High Altitudes”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 19, No. 3, pp. 1053 – 1059, 2012.
- [5] K. Wieczorek, J. Fleszynski and W. Bretuj, “Effect of Shape of Insulator Housings and Positions of Composite Insulators on Ageing Resistance Under High Voltage and Precipitation”, IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 19, No. 3, pp. 1044-1052, 2012.
- [6] C. Baer, R. Bärsch, A. Hergert, J. Kindersberger, “Evaluation of the Retention and Recovery of the hydrophobicity of Insulating Materials in High Voltage Outdoor Applications under AC and DC Stresses With the Dynamic Drop Test", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 23, Issue n° 1, pp. 294-303, 2015.
- [7] R. A. Ghunem, “Using the Inclined-Plane Test to Evaluate the Resistance of Outdoor Polymer Insulating Materials to Electrical Tracking and Erosion”, IEEE Electrical Insulation Materials 31, pp.16-22, 2015.
- [8] B. X. Du, Y. Liu, “Pattern Analysis of Discharge Characteristics for Hydrophobicity Evaluation of Polymer Insulator”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Insulation Vol. 18, No. 1, pp. 114 - 121, 2011

- [9] Arshad, A. Nekahi, S. G. McMeekin, M. Farzaneh, “Measurement of surface resistance of silicone rubber sheets under polluted and dry band conditions”, *Electr Eng* 100, pp. 1729-1738, 2018.
- [10] A. Ren, H. Liu, J. Wei and Q. Li, “Natural Contamination and Surface Flashover on Silicone Rubber Surface under Haze-Fog Environment”, *Energies*, 10, 1580, pp. 1-18, 2017.
- [11] Sir Geoffrey Taylor, « Disintegration of Water Droplets in an Electric Field », vol. 280, no 1382, 1964 ,p .383-397 (DOI 10.1098/rspa.1964.0151, JSTOR2415876 , Bibcode1964RSPSA. 280..383T)
- [12] Zeleny, J., « The Electrical Discharge from Liquid Points, and a Hydrostatic Method of Measuring the Electric Intensity at Their Surfaces. », *Physical Review*, vol. 3, no 2, 1914 , p .69–91)DOI 10.1103/PhysRev.3.69, Bibcode1914PhRv....3...69Z).
- [13] C. T. Wilson et G. I Taylor, « The bursting of soap bubbles in a uniform electric field », *Proc. Cambridge Philos. Soc.*, vol. 22, no 5, 1925 ,p .728)DOI 10.1017/S0305004100009609 ,Bibcode 1925PCPS...22.728W).
- [14] J. J. Nolan, « The Breaking of Water-Drops by Electric Fields », *Proceedings of the Royal Irish Academy Section A: Mathematical and Physical Sciences*, vol. 37, 1926 ,p .28.
- [15] W. A. Macky, « Some Investigations on the Deformation and Breaking of Water Drops in Strong Electric Fields », vol. 133, no 822, 1st October 1931, p. 565–587 (DOI 10.1098/rspa.1931.0168, Bibcode 1931RSPSA.133.565M).
- [16] J. Latham and I. W. Roxburgh, “Disintegration of pairs of water drops in an electric field,” *Proc. R. Soc. A* 295, 84–97 (1966).
- [17] P. R. Brazier-Smith, “Stability and shape of isolated and pairs of water drops in electric field,” *Phys. Fluids* 14(1), 1–6 (1971).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [18] Sameer. Mhatre, Shivraj. Deshmukh , Rochish M. Thaokar ,'Electrocoalescence of a drop pair', *Physics of Fluids* 27, 092106 (2015), <https://doi.org/10.1063/1.4931592>.
- [19] J. S. Eow, M. Ghadiri, A. O. Sharif, and T. J. Williams, "Electrostatic enhancement of coalescence of water droplets in oil: a review of the current understanding," *Chem. Eng. J.*, vol. 84, no. 3, pp. 173–192, December 2001.
- [20] J.-D.Chen, "Effects of London-van der Waals and electric double layer forces on the thinning of a dimpled film between a small drop or bubble and a horizontal solid plane," *J. Colloid Interface Sci.*98(2), 329–341 (1984).[https://doi.org/10.1016/s0021-9797\(84\)80051-x](https://doi.org/10.1016/s0021-9797(84)80051-x)Google Scholar Crossref.
- [21] P. Atten, "Electrocoalescence of water droplets in an insulating liquid," *J. Electrostat.* 30, 259–270 (1993).
- [22] T. G. O. Berg, G. C. Fernish, and T. A. Gaukler, "The mechanism of coalescence of liquid drops," *J. Atmos. Sci.* 20, 153–158 (1963).
- [23] C. P. Galvin, "Design principles for electrical coalescers," *I Chem E Symp. Ser.* 88, 101–113 (1986).
- [24] G. M. Panchenkov and V. M. Vinogradov, "Water-in-oil emulsion in a constant homogeneous electric field," *Chem. Technol. Fuels Oils* 6(6), 438–441 (1970).
- [25] K. E. T. Giljarhus and S. T. Munkejord, "Numerical investigation of electrostatically enhanced coalescence of two drops in a flow field," in *IEEE International Conference on Dielectric Liquids (IEEE, 2011)*, pp. 1–4.
- [26] R. S. Allan and S. G. Mason, "Particle motions in sheared suspensions. XIV. Coalescence of liquid drops in electric and shear fields," *J. Colloid Sci.* 17, 383–408 (1962).
- [27] D. Sartor, "A laboratory investigation of collision efficiencies, coalescence and electrical charging of simulated cloud droplets," *J. Meteorol.* 11, 91–103 (1954).
- [28] C. Priest, S. Herminghaus, and R. Seemann, "Controlled electrocoalescence in microfluidics: Targeting a single lamella," *Appl. Phys. Lett.* 89, 134101 (2006).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [29] Keim, S.: Optische Diagnose an singulären Tropfen auf polymeren Isolierstoffoberflächen im elektrischen Feld, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2003.
- [30] Hofmann, J.: Elektrische TE- und Ableitstrommessungen mit Impulsspannung an polymeren Isolierstoffoberflächen mit Tropfenbelägen zur Diagnose des Oberflächenzustandes – am Beispiel von Elastomeren, Dissertation, Technische Hochschule Zittau, 1993.
- [31] Feier-Iova, S.: The Behavior of Water Drops on Insulating Surfaces Stressed by Electric Field; Dissertation; Technische Universität Darmstadt, 2009.
- [32] Schütte, T.; Hörnfeldt, S.: Dynamics of electrically stressed water drops on insulating surfaces; ABB Corporate, Swedish Power Transmission Institute Box 707, Ludvika, Schweden, 1990.
- [33] Mizuno, Y.; Iwatani, M.; Nagata, M.; Naito, K.; Kondo, K.; Ito, S.: Behavior of Water Droplets on Silicone Rubber Sheet under AC Voltage Application, Nagoya Institute of Technology, Meijo University, NGK Insulators, Ltd., 1998.
- [34] T. Yamada; T. Sugimoto; Y. Higashiyama; M. Takeishi; T. Aoki, "Resonance phenomena of a single water droplet located on a hydrophobic sheet under AC electric," IEEE Transactions on Industry Applications, Volume: 39, pp: 59 - 65, Jan.-Feb. 2003.
- [35] B. X. Dul, Yong Liul, Y. S. Xia\ B. X. Yang and B. C. Liu, "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.
- [36] Y. Higashiyama ; S. Yanase ; T. Sugimoto, "Behavior of water droplets located on a hydrophobic insulating plate under DC field, "Compte rendu de la conférence de 1998 sur les applications industrielles de l'IEEE. Trente-troisième réunion annuelle de l'IAS (Cat. No.98CH36242) DOI : 10.1109/IAS.1998 ,12-15 octobre 1998.
- [37] Y. Higashiyama, S. Yanase, & T. Sugimoto, "DC corona discharge from water droplets on a hydrophobic surface", Journal of Electrostatics 55 (2002), pp. 351–360.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [38] C. Bär, R. Cervinka, R. Bärsch, J. Seifert, J. Lambrecht, H. J. Winter, "A Comparative Evaluation of the Retention of the Hydrophobicity and the Tracking Resistance of Silicone Elastomers under AC And DC Stresses", XVII International Symposium on High Voltage Engineering, Hannover, Germany, August 22-26, 2011.
- [39] Seo, Y., Oshikawa, N., Miyake, T. et al. Characteristics of hydrophobicity loss on silicone rubber surface during a dynamic drop test with direct current voltage application. *Nanoscale Res Lett* 7, 4 (2012). <https://doi.org/10.1186/1556-276X-7-4>.
- [40] D. K. Das Gupta, K. Doughty, and A. Goodings. Charge motion on moist polymer surfaces. *IEEE Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 1986.
- [41] N. M. Ijumba, A. C. Britten and J. P. Swartz, "The Hydrophobicity of Silicone Rubber Insulators Subjected to Water Droplet Corona under HVDC Potential", 0-7803-7459-21021\$17.00D 2002 IEEE, pp. 1884-1888.
- [42] K. Karakoulidis, Michael G. Danikas, P. Rakitzis, "Deterioration Phenomena on Polymeric Insulating Surfaces Due to Water Droplets", *Journal of Electrical Engineering*, Vol. 56, N°. 7-8, 2005, 169–175.
- [43] J. Ndoumbe, A. Beroual, A. Moukengue Imano "Behavior of water droplets on insulator surfaces submitted to DC voltage - coalescence", Conference: Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 2012 Annual Report Conference on, DOI: 10.1109/CEIDP.2012.6378883.
- [44] R. Boudissa, T. Belhou, K.D. Haim, S. Kornhuber, "Effect of Inclination Angle of Hydrophobic Silicone Insulation Covered by Water Drops on its DC Performance.", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 24, no 5, p. 2890-2900, October 2017.
- [45] R. Boudissa, F. Bouchelga, S. Kornhuber and Klaus Dieter Haim "Constellation of Condensation and Raindrops and Its Effect on the DC Flashover Voltage of Inclined Silicone Insulation" *Energies* 2019, 12, 3549.
- [46] Z. Jiang, X. Jiang, Z. Zhang, Y. Guo and Y. Li, "Investigating the Effect of Rainfall Parameters on the Self-Cleaning of Polluted Suspension Insulators: Insight from Southern

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- China”, *Energies*, 10, 601; pp. 1-13, 2017.
- [47] W. Bretuj, J. Fleszynski, A. Tyman, K. Wieczork. “Effect of silicone rubber insulator’s profiles on their ageing performance in rain conditions.” 15th international symposium on high voltage engineering. Ljubjana, Slovenia, August 27-31, 2007.
- [48] A. De La O and R. S. Gorur, “Flashover of Contaminated Nonceramic Outdoor Insulators in a Wet Atmosphere”, *IEEE Transaction on Dielectrics and Electric Insulation*, Vol. 5, No. 6, pp. 814-823, 1998.
- [49] L. Yang, Y. Sun, Y. Liao, Z. Kuang, Y. Hao, L. Li, F. Zhang, “Dynamic Deformation of Pendant Drops on the Edge of High-voltage Bushing Sheds Under Extreme Rainfall”, *IEEE Access*, Vol. xx, 2020, pp.1-13.
- [50] Parr, D. J., & Scarisbrick, R. M. (1965), “Performance of synthetic insulating materials under polluted conditions. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 112(8), 1625. doi:10.1049/piee.1965.0264.
- [51] Kurtz, M., "Comparison of Tracking Test Methods", *IEEE Trans. on Electrical Insulation*, Vol. EI-6, No. 2, June 1971.
- [52] Gorur, R.S., Cherney, E.A., Hackam, R., Orbeck, T., "The Electrical Performance of Polymeric Insulating Materials, under Accelerated Aging in a Fog Chamber", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 3, No. 3, pp. 1157-1163, July 1988
- [53] Van Der Huir, R., Karner, H.C., "Evaluation of Polymeric Insulating Materials for HV Outdoor Application", *Sixth Intl. Symp. on High Voltage Engrg.*, New Orleans, August 28 - Sept. 1,1989.
- [54] Fini, G.P., Marrone, G., Porrino, A., "Results of Accelerated Ageing Tests on Components of Electric System made with Polymeric Materials", *CIGRE Paper 15-07*, August 28 - Sept. 3,1988.
- [55] Schneider, H.M., Hall, J.F., "Accelerated Aging of Nonceramic Insulators, EPRI Accelerated Aging Facility", Presented to the Northeast Transmission Group, October 3,1990.
- [56] H. Zhang and R. Hackam, “Influence of Fog Parameters on the Aging of HTV Silicone

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Rubber”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 6 No. 6, pp.835-844, 1999.
- [57] 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/\$20.00 ©2006 IEEE.
- [58] Y. Kurimoto, Y. Tashiro, Y. Murakami, H. Homma and M. Nagao, “Variation of Leakage Current Caused by Hydrophobicity Loss of Silicone Rubber in Dynamic Drop Test”, Proceedings of 2008 International Symposium on Electrical Insulating Materials, September 7-11, 2008, Yokkaichi, Mie, Japan.
- [59] G. P. Bruce and S. M. Rowland, “Performance of Silicone Rubber in DC Inclined Plane Tracking Tests”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 17, No. 2, pp.521-532, 2010.
- [60] S. Thong-Om, W. Payacho, 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.
- [61] Dipankar Ghosh and Dipak Khastgir, “Degradation and Stability of Polymeric High-Voltage Insulators and Prediction of Their Service Life through Environmental and Accelerated Aging Processes”, ACS Omega 2018, 3, 11317–11330.
- [62] Rashid A, Saleem J, Amin M, Ali SM, Khan AA, Qureshi MB, et al. (2021) Investigation of 9000 hours multi-stress aging effects on High-Temperature Vulcanized Silicone Rubber with silica(nano/micro) filler hybrid composite insulator. PLoS ONE 16(7): e0253372. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0253372>.
- [63] Bruins, P.R., Editor, "Epoxy Resin Technology," Journal of polymer science, vol.7 pp. 24652466, 1968.
- [64] Dey, P., Drinkwater, B.J., Proud, S.H.R., "Developments in Insulation for High Voltage Overhead Transmission Systems", Proc, 9th Electrical Insulation Conference, Boston, Mass, Sept. 8-11,1969.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [65] Vose, F.C., "Field Service Trials of Polymer Insulators for High Voltage Transmission Lines", Paper No. 31, CP 65-6633, IEEE T&D Summer Meeting, Detroit, Michigan, June 27 - July 2, 1965.
- [66] James F. Hall, "History and bibliography of polymeric insulators for outdoor applications," IEEE Trans on Power Deliv, vol.8, N° 1, pp. 376-385, January 1993
- [67] Bauer, E.A., "Plastic Composite Insulators to the System Rodurflex", Presentation to the IEEE Nonceramic/Composite Insulator Working Group in New York, January 28, 1976.
- [68] M. BOUHAUCHE, "Etude et analyse du comportement des isolateurs composites utilisés en Algérie ", Thèse de doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, Juin 2018.
- [69] CIGRE working group 22-03, "Worldwide Service Experience with HV Composite Insulators", Electra, No. 191, pp. 27-43, August 2000.
- [70] S. M. Gubanski, A. E. Vlastos, "Wettability of Naturally Aged Silicon and EPDM Composite Insulators", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 3, pp. 1527-1535, 1990.
- [71] Y. Zhu, M. Otsubo, C. Honda and S. Tanaka, "Loss and Recovery in Hydrophobicity of Silicone Rubber Exposed to Corona Discharge", Polymer Degradation and Stability, Vol. 91, No. 7, pp. 1448-1454, 2006.
- [72] J. Kim, M. K. Chaudhury, "Corona-Discharge-Induced Hydrophobicity Loss and Recovery of Silicones", Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Vol. 2, pp. 703-706, 1999.
- [73] Muhsin Tunay Gencoglu, "The comparison of ceramic and non-ceramic insulators," e-Journal of New World Sciences Academy, vol. 2, N° 4, pp. 274-294, 2007.
- [74] B. Marungsri, W. Onchantuek, A. Oonsivilai, T. Kulworawanichpong, "Analysis of electric field and potential distributions along surface of silicone rubber insulators under various contamination conditions using finite element method," World Academy of Science, Engineering and Technology 53, 2009.
- [75] J. Ndoumbe, "Etude comportementale des gouttelettes d'eau déposées sur la surface

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- d'un isolateur composite haute tension en présence du champ électrique", Thèse de doctorat, Ecole doctorale électrique, électrotechnique et automatique de Lyon, Mars 2014.
- [76] V. Belaud, "Structuration de surfaces au moyen d'un traitement laser fem to seconde : applications à la fonctionnalisation de surface du polypropylène en vue de sa métallisation", Thèse de doctorat, Spécialité Matériaux, Ecole Centrale de Lyon, 2014.
- [77] T. Young. "An essay on the cohesion of fluids," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 95, pp. 65-87, 1805.
- [78] IEC 62073, "Guidance on the measurement of wettability of insulator surfaces", IEC/TS 62073, Ed.1.0, 2000.
- [79] Y. Yuan et T. Lee, "Contact angle and wetting properties", *Springer Series in Surface Sciences*, vol. 51, pp. 1-27, 2013.
- [80] Cigré, "Evaluation of dynamic hydrophobicity properties of polymeric materials for nonceramic outdoor insulation; retention and transfer of hydrophobicity," Cigré WG D1.14 TB442, 2010.
- [81] S. Gubanski, R. Hartings, "Swedish Research on the Application of Composite Insulators in Outdoor Insulation", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 11, No. 5, pp. 24-31, 1995.
- [82] Swedish Transmission Research Institute (STR); "Hydrophobicity classification guide,"; Guide1, 92/1, 1992.
- [83] H. C. Hillborg, "loss and recovery of hydrophobicity of polydimethylsiloxane after exposure to electrical discharges", Ph.D. Thesis, Sweden, 2001.
- [84] S. Feier-Iova, "The Behavior of Water Droplet on Insulating Surfaces Stressed by Electric Field", Ph.D. Thesis, TU Darmstadt, 2009. BIBLIOGRAPHIE 140.
- [85] A. J. Phillips, D. J. Childs et H. M. Schneider, "Aging of non-ceramic insulators due to corona from water drops", *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 14, no 3, pp. 1081-1089, 1999.
- [86] J. Chang et R. Gorur, "Hydrophobicity of silicone rubber used for outdoor insulation", *Properties and Applications of Dielectric Materials*, Proceedings of the 4th International

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Conference on, 1994.

- [87] R. Gorur, E. Cherney, R. Hackam et T. Orbeck, "The electrical performance of polymeric insulating materials under accelerated aging in a fog chamber", IEEE Trans. On Power Delivery, vol. 3, no 3, pp. 1157-1164, Juillet 1988.
- [88] R. Gorur, "Research into polymeric insulating materials for high voltage outdoor insulators," PhD thesis, University of Windsor, 1986.
- [89] J. Kindersberger et M. Kuhl, "Effect of hydrophobicity on insulator performance", 6th International Symposium on High Voltage Engineering, New Orleans, Aout 1989.
- [90] R. Gorur, G. Karady, A. Jagota, M. Shah, et A. Yates, "Aging in silicone rubber used for outdoor insulation", IEEE Transactions on Power Delivery vol. 7, no 2, pp. 525-538, 1992.
- [91] Norme CEI 60243-1, "Rigidité diélectrique des matériaux isolants. Méthodes d'essai. Partie 1 : essais aux fréquences industrielles", 1998.
- [92] J. Chang et R. Gorur, "The role of backbone chain rotation in the hydrophobicity recovery of polymeric materials for outdoor insulation", Proceedings of the 4th International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, Sestri Levante, Italy, pp. 270-274, Jun 1992.
- [93] W. Mosch, E. Lemke et M. Eberhardt, "Einführung in die Hochspannungstechnik- 4. Lehrbrief: Luftisolierungen", 1. Auflage, Bestell - no. 02 1429 043, TU Dresden, 1988.
- [94] S. Loana, "Effet de la fonte et de la pollution sur la tension de tenue maximale des isolateurs recouverts de glace", Thèse de doctorat, Université de Québec à Chicoutimi, Octobre 1996.
- [95] CEI 815, Commission Électrotechnique Internationale, rapport de la CEI, "Guide pour le choix des isolateurs sous pollution", publication 815, première édition, Genève, Suisse, 1986.
- [96] C. Gary et all, "Les propriétés diélectriques de l'air et les très haute tension", collection de la direction des études et recherches d'électricité de France. Edition Eyrolles, Paris, 1984.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [97] K. Naito, "Insulator pollution. Part 1 : General aspect", Séminaire des isolements des lignes et des postes HT, Casablanca, March, 1989.
- [98] K. Chrzan, "Conductivity of aqueous dust solutions", IEEE. Trans. On E.I, Vol E. I-22, no 3, June, 1987.
- [99] P. J. Lambeth, H. Auxel et M. P. Verma, "Méthode de mesure de la sévérité de la pollution naturelle et son influence sur le comportement des isolateurs à HT", Electra, n° 20, 1972.
- [100] G. Neumärker, "Verschmutzungszustand und Kriechweg", Monatsber. D. Deut. Akad, Wiss., Berlin, vol.1, pp.352 – 359, 1959.
- [101] H. Streubel, "The influence of non-uniform contamination on the flashover voltage of insulators" 4th International Symposium on High Voltage Engineering, Rapport 46-10, Athens, Greece, 5-9 September 1983.
- [102] M. Tegar, "Etude mathématique des mécanismes de développement des décharges électriques sur des isolateurs installés en régions polluées", Thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Algérie, Algérie, Juillet 1993.
- [103] R. S. Gorur, E. A. Cherney, and R. Hackam, "Polymer insulator profiles evaluated in a fog chamber," IEEE Trans. Power Deliv., vol. 5, no. 2, pp. 1078–1085, 1990.
- [104] G. Päsold, R. Baersch, J. C. Mauroux, T. Schoenemann, "Elektrisches Verhalten von polymeren Isolierstoffoberflächen unter erschwerten klimatischen Innenraumbedingungen", ETG - Fachbericht 112, S. 27-34, VDE-Verlag 2008.
- [105] D. König, "Vorgänge an äußeren Grenzflächen unter erschwerten Innenraumbedingungen", ETG-Fachbericht 76 (1999), S. 9-25.
- [106] R. Bärsch, J. Kindersberger, "Grenzfläche Feststoff - Gas - Beanspruchungen", Wechselwirkungen, Design, Prüfverfahren, Lebensdauer. ETG-Fachbericht 99 (2005), S. 7-26.
- [107] M. Amin and M. Salman, "Aging of polymeric insulator (an overview)," Rev. Adv. materials Science, pp. 96–116, 2006.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [108] A. Cimador et S. Vitet, "La Pollution des Isolateurs", EDF-Epure, No 27, Juillet 1990.
- [109] R. Boudissa, S. Mouhoubi et A. Haddad, "Performance des écrans sous tension alternative et continue". 7ème conférence nationale sur la haute tension (CNHT 2009), Sidi Bel Abbés, Algérie 2009.
- [110] T. Kikuchi, S. Nishimura, M. Nagao, K. Izumi, Y. Kubota et M. Sakata, "Survey on the use of non-ceramic composite insulators", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 6, pp. 548-556, 1999.
- [111] F. AOUABED "Contribution à l'étude d'un circuit équivalent des isolateurs synthétiques sous pollution en utilisant l'EMTP" thèse magister Sétif 2010.
- [112] A. Tzimas, E. D. Silva, S. M. Rowland, B. Boumeqid, M. Queen, and M. Michel, "Asset management frameworks for outdoor composite insulators," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 19, pp. 2044-2054, 2012.
- [113] S.-I. Han, J.-Y. Yoon, K.-S. Park, and S.-O. Han, "Surface degradation of silicone rubber under accelerated aging condition," in IEEE 1997 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1997, pp. 439-443.
- [114] X. Wang, S. Kumagai, M. Sato, and N. Yoshimura, "Contaminant properties of silicone rubber insulator in the accelerating aging of acid rain," in 1998 annual report conference on electrical insulation and dielectric phenomena (Cat. No. 98CH36257), 1998, pp. 48- 51.
- [115] S. Gubanski, A. Derfalk, S. Wallström, and S. Karlsson, "Biological contamination of insulators: influence on performance and diagnostic techniques to assess the problem," in INMR World Insulator Congress, 2005.
- [116] S. Wallstrom, K. Dowling, and S. Karlsson, "Microbiological growth testing on silicone rubber materials for outdoor high voltage insulation," in ABSTRACTS OF PAPERS OF THE AMERICAN CHEMICAL SOCIETY, 2001, pp. U356-U356.
- [117] D. Birtwhistle, G. Cash, G. George, B. Goss, A. Krivda, and H. Liu, "Field Monitoring of the Ageing of Composite High Voltage Insulators," in Ageing Studies And Lifetime Extension Of Materials, New York, USA: Kulwer Academic/ Plenum Publishers, pp. 225–237, 2001.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [118] H.-J. Kloes and D. Koenig, "Multifactor-surface-tests of organic insulating materials in the early stage of degradation," in, Conference Record of the 1996 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, vol. 1, pp. 296–299 vol.1, 1996.
- [119] U. Kaltenborn, J. Kindersberger, and J. Speck, "Surface behaviour of epoxy castings during the early ageing period," in Proceedings of the 1998 IEEE 6th International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, 1998. ICSD, pp. 269–272, 1998.
- [120] B. Varlow and D. Auckland, "The influence of mechanical factors on electrical treeing," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 5, pp. 761-766, 1998.
- [121] E. David, J.-L. Parpal, and J.-P. Crine, "Influence of internal mechanical stress and strain on electrical performance of polyethylene electrical treeing resistance," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 3, pp. 248-257, 1996.
- [122] R. Hartings, "The AC-behavior of a hydrophilic and hydrophobic post insulator during rain," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 9, pp. 1584-1592, 1994.
- [123] W. Vosloo and J. P. Holtzhausen, "The design principles of on-line insulator test stations to be used on power distribution and transmission networks", 1996.
- [124] B. Pokarier, C. Lee, and D. Hawker, "Leakage current monitoring of composite long rod insulators," in Proceedings of 1994 4th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM), 1994, pp. 530-533 vol.2.
- [125] W. Shaowu, L. Xidong, C. Zixia, W. Xun, L. Zhi, Z. Yuanxiang, Y. Yu, W. Liming, and G. Zhicheng, "Hydrophobicity changing of silicone rubber insulators in service," in CIGRÉ session, 2002.
- [126] R. Sundararajan, A. Mohammed, N. Chaipanit, T. Karcher, and Z. Liu, "In-service aging and degradation of 345 kV EPDM transmission line insulators in a coastal environment," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 11, pp. 348-361, 2004.
- [127] F. H. Molina, A. P. Dadam, A. G. Kanashiro, W. Pinheiro, and G. R. d. Almeida, "Experimental study concerning the utilization of polymeric materials in distribution lines,"

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- in 2014 IEEE PES T&D Conference and Exposition, 2014, pp. 1-5.
- [128] IEC, "61009 - Insulators for Overhead Lines Composite Suspension and Tension Insulators for AC Overhead Lines with a Nominal Voltage Greater Than 1 000 V Definitions," in Test Methods and Acceptance Criteria, ed, 2008.
- [129] A. International, "ASTM G154-16-Standard Practice for Operating Fluorescent Ultraviolet (UV) Lamp Apparatus for Exposure of Nonmetallic Materials," ed: ASTM International West Conshohocken, PA, 2016.
- [130] F. Perrot, "Multifactor pollution testing to assess the long-term performance of composite surge arresters and insulators," in IEE conference publication, 1999, p. 4.
- [131] J. Fourmigue, M. Noel, and G. Riquel, "Aging of polymeric housing for HV insulators: comparison between natural and artificial testing," in Proceedings of 1995 Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1995, pp. 404-407.
- [132] G. Haddad, "Prediction of remaining service life of polymer insulators," 2016.
- [133] "Manual of Atlas material testing solutions," Atlas Electric Devices Company 2001.
- [134] M. Ehsani, G. R. Bakhshandeh, J. Morshedian, H. Borsi, E. Gockenbach, and A. A. Shayegani, "The dielectric behavior of outdoor high-voltage polymeric insulation due to environmental aging," European Transactions on Electrical Power, vol. 17, pp. 47-59, 2007/01/01 2006.
- [135] Y. Bok-Hee and H. Chan-Su, "Surface degradation of HTV silicone rubber and EPDM used for outdoor insulators under accelerated ultraviolet weathering condition," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 12, pp. 1015-1024, 2005.
- [136] L. S. Nasrat and R. M. Sharkawy, "An investigation into the electrical properties of rubber blends for insulators," in 2007 Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo, 2007, pp. 146-149.
- [137] IEC, "60216 - Electrical insulating materials - Thermal endurance properties - Part 1: Ageing procedures and evaluation of test results," ed, 2013.
- [138] N. Bouaziz, "Effet du vieillissement thermique sur la tenue diélectrique du

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- polyesterimide utilisé dans les machines électriques," Université Mouloud Mammeri, 2012.
- [139] S. D. Burnside and E. P. Giannelis, "Nanostructure and properties of polysiloxane-layered silicate nanocomposites," *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, vol. 38, pp. 1595-1604, 2000.
- [140] E. Sherif and C. Andreasson, "Results from long term tests with long rod composite insulators exposed to natural pollution," *Publisher: Nord IS*, vol. 84, 1984.
- [141] T. Sorquist and A. E. Vlastos, "Outdoor polymeric insulators long-term exposed to HVDC," in *Proceedings of 1996 Transmission and Distribution Conference and Exposition*, 1998, pp. 135-142.
- [142] IEC-TS 62073, "Guidance on the measurement of hydrophobicity of insulator surfaces", 2016.
- [143] IEC60250, "Recommended methods for the determination of the permittivity and dielectric dissipation factor of electrical insulating materials at power, audio and radio frequencies including wavelengths".
- [144] T. Belhoul, R. Boudissa, K.D. Haim, "Comparison of the Performance of Silicone and Glass Barriers under Direct Current and Very Severe Conditions of Pollution", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 24, Issue n° 1, pp. 471-482, 2017.
- [145] R. Boudissa, T. Belhoul, K.D. Haim and S. Kornhuber, "Effect of Inclination Angle of Hydrophobic Silicone Insulation Covered by Water Drops on its DC Performance", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 24, Issue 5, pp. 2890-2900, 2017.
- [146] A. Aouabed, A. Bayadi, R. Boudissa, "Flashover voltage of silicone insulating surface covered by water droplets under AC voltage", *Electric Power Systems Research* 143, pp. 66 – 72, 2017.
- [147] CEI 60507, "Essais sous pollution artificielle des isolateurs destinés aux réseaux à courant alternatif", 1991.
- [148] E. Phillipow, "Systems of Electrical Power Engineering", *Taschenbuch Elektrotechnik*, Vol. 6, *Hochspannungstechnik*, Carl Hanser, VEB Verl, Berlin, Muenchen, Wien (1982).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [149] CEI 62631-2-1, “Dielectric and resistive properties of solid insulating materials - Part 2-1: Relative permittivity and dissipation factor - Technical frequencies (0,1 Hz to 10 MHz) - AC Methods”, 2018.
- [150] OMICRON Lab, 2020 SPECTANO 100 User Manual engl.
- [151] ASTM D412, "Tensile Test on Rubber and Elastomers".
- [152] ISO 34 "Tear Strength of Rubber, Vulcanized or Thermoplastic", 2010.
- [153] IEC 62217, "Polymeric HV insulators for indoor and outdoor use - General definitions, test methods and acceptance criteria", 2012.
- [154] DIN EN ISO 19403-7, "Paints and varnishes - Wettability - Part 7: Measurement of the contact angle on a tilt stage (roll-off angle) ", 2020.
- [155] ISO 4287, "Specification geometrique des produits (GPS) - Etat de surface : Methode du profil - Termes, definitions et parametres d1etat de surface", 1997.
- [156] Adnan S Krzma, M. Albano, A. Haddad, "Flashover influence of fog rate on the characteristics of polluted silicone-rubber insulators",52nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC), pp.1-5, 2017.
- [157] B. S. Yilbas, A. Al-Sharafi, H. Ali and N. Al-Aqeeli, "Dynamics of a water droplet on a hydrophobic inclined surface: influence of droplet size and surface inclination angle on droplet rolling", RSC Adv., 7, 48806–48818, 2017.
- [158] A. De la O, R. S. Gorur, J. T. Burnham, “Laboratory Wet Tests Artificially Contaminated Non ceramic and Ceramic Insulators”, 10th International Symposium on High Voltage Engineering, Montréal, Québec Canada, August 25 - 29, 1997.
- [159] J. Li, Y. Wei, Z. Huang, F. Wang, X. Yan, “Investigation of the Electric Field Driven Self-propelled Motion of Water Droplets on a Super-hydrophobic Surface”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 23, No. 5, pp. 3007 – 3015, 2016.
- [160] K. Hamour, F. Bouchelga, R. Boudissa, S. Kornhuber, K. D. Haim, “Optimization of the superhydrophobic insulation longevity by expulsion of any wet deposit with a weak alternating electrical field”, Journal of Electrostatics 105 (2020) 103451.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [161] H. Morgan and N. G. Green, "AC Electrokinetics: colloids and nanoparticles", Research Studies Press LTD, Baldock, Hertfordshire, England, 2003.
- [162] M. Ben Hassine, "Modélisation du vieillissement thermique et mécanique d'une protection externe en EPDM de jonctions rétractables à froid," 2013.
- [163] T. Tanaka, "Aging of polymeric and composite insulating materials. Aspects of interfacial performance in aging," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 9, pp. 704-716, 2002.
- [164] R. Sundararajan, A. Mohammed, N. Chaipanit, T. Karcher, and Z. Liu, "In-service aging and degradation of 345 kV EPDM transmission line insulators in a coastal environment," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 11, pp. 348-361, 2004.
- [165] Zhijin, Z.; Tian, L.; Xingliang, J.; Chen, L.; Shenghuan, Y.; Yi, Z. "Characterization of Silicone Rubber Degradation Under Salt-Fog Environment with AC Test Voltage". IEEE Access 2019, 7, 66714–66724.
- [166] A. Tuteja, W. Choi, J. M. Mabry, G. H. McKinley, and R. E. Cohen, "Robust omniphobic surfaces," Proceedings of the National Academy of Sciences, vol. 105, no. 47, pp. 18200-18205, 2008.
- [167] Sundararajan, R.; Mohammed, A.; Chaipanit, N.; Karcher, T.; Liu, Z. "In-service aging and degradation of 345 kV EPDM transmission line insulators in a coastal environment". IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2004, 11, 348–361.
- [168] D. Ghosh, D. Khastgir, "Degradation and Stability of Polymeric High-Voltage Insulators and Prediction of Their Service Life through Environmental and Accelerated Aging Processes", ACS Omega 2018, 3, 11317–11330 DOI: 10.1021/acsomega.8b01560 ACS Omega 2018, 3, 11317–1133011319.
- [169] R. N. Wenzel, "Resistance of Solid Surfaces to Wetting by Water", Industrial & Engineering Chemistry, vol. 28, no 8, p. 988-994, 1936.
- [170] K. WIECZOREK" Influence of the Shape of Composite Insulators Housing on their

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Aging Resistance in presence of High DC Voltage and Clean Fog", PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, ISSN 0033-2097, R. 94 NR 10/2018.

- [171] A. H. El-Hag, A. N. Jahromi, M. Sanaye-Pasand, " Prediction of leakage current of non-ceramic insulators in early aging period", Electric Power Systems Research 78 (2008) 1686–1692
- [172] Y. Kurimoto, Y. Tashiro, Y. Murakami, H. Homma and M. Nagao, 'Variation of Leakage Current Caused by Hydrophobicity Loss of Silicone Rubber in Dynamic Drop Test', Proceedings of 2008 International Symposium on Electrical Insulating Materials, September 7-11, 2008, Yokkaichi, Mie, Japan
- [173] I. Ullah, M. Akbar, H. A. Khan "Degradation analysis of RTV-SiR based composites under both polarities DC voltage for insulators coating", Materials Today Communications 29 (2021)102890

Résumé

Le présent travail porte sur l'étude de l'effet des différentes conditions environnementales telles que la pluie naturelle et le brouillard sur la performance électrique d'une isolation en silicone hydrophobe. L'investigation est portée sur la caractérisation de la quantité d'eau de pluie récoltée et l'évolution du volume de gouttes d'eau d'impact sur une surface isolante en silicone hydrophobe en fonction de son angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale lorsqu'elle est hors tension. Ensuite, la reproduction de ce phénomène naturel a été réalisée en laboratoire, en déterminant le volume et la constellation des gouttes d'eau de pluie obtenues sur site afin d'évaluer l'effet du volume des gouttes de pluie sur l'humidification de l'isolation inclinée, et donc sur sa performance électrique sous un niveau variable de tension alternative. De plus, l'effet de l'angle d'inclinaison de cette isolation par rapport à l'horizontale sur sa performance au cours du vieillissement sous brouillard salin et haute tension alternative a été déterminé, en quantifiant le courant de fuite circulant sur sa surface durant son exposition au brouillard salin, en examinant l'état de sa surface et en déterminant son angle de contact statique. Les résultats des mesures sur site et en laboratoire indiquent une diminution de la taille de la surface humide et de la longueur de la ligne de fuite de l'isolation mouillée avec l'augmentation de son angle d'inclinaison. Ces résultats mettent en évidence deux intervalles d'angles d'inclinaison critiques pour l'isolation, défavorables et favorables pour le dimensionnement des ailettes des isolateurs correspondant respectivement à leur performance électrique minimale et maximale. Les résultats émanant des tests de vieillissement de l'isolation montrent une excellente résistance au vieillissement et une conservation efficace de ses propriétés hydrophobes sur une longue période d'exposition au brouillard avec des angles d'inclinaisons élevés. Ce qui signifie que la performance de l'isolation s'améliore à mesure que son angle d'inclinaison augmente.

Mots clés – Isolation en silicone, Pluie, Angle d'inclinaison, Volume de gouttes d'eau, Microdécharge, Tension alternative, Brouillard salin, Courant de fuite, Rugosité, Angle de contact statique, Contournement.

Abstract

This work focuses on the study of the different environmental conditions effect such as rain and fog on the electrical performance of a hydrophobic silicone insulation. The investigation is focused on characterizing the amount of rainwater collected and the evolution of the water droplets volume on a hydrophobic silicone insulating surface depending on its angle of inclination with respect to the horizontal when it is de-energized out of voltage. Then, the reproduction of this natural phenomenon was carried out in the laboratory, by determining the volume and constellation of rainwater droplets obtained on site in order to evaluate the effect of the volume of raindrops on the humidification of the inclined insulation, and therefore on its electrical performance under a variable level of alternating tension. In addition, the effect of the angle of inclination of this insulation relative to the horizontal on its performance during aging under saline fog and high alternating tension was determined, by quantifying the leakage current flowing on its surface during its exposure to saline fog, by examining the state of its surface and by determining its static contact angle. The measurements result on site and in the laboratory indicate a decrease in the size of the wet surface and the length of the leakage line of the wet insulation with the increase of its angle of inclination. These results highlight two critical intervals of inclination angles for the insulation, unfavorable and favorable for the sizing of the fins of the insulators corresponding respectively to their minimum and maximum electrical performance. The results from the aging tests of the insulation show excellent resistance to aging and effective conservation of its hydrophobic properties over a long period of exposure to fog with high inclination angles. This means that the performance of the insulation improves as its angle of inclination increases.

Keywords – Silicone insulation, Rain, Inclination angle, water droplets volume, Microdischarge, AC voltage, Fog, Leakage current, Roughness, Static contact angle, Flashover.

ملخص

هذا العمل يتعلق بدراسة تأثير الظروف البيئية المختلفة مثل الأمطار الطبيعية والضبباب على الأداء الكهربائي لعازل من السيليكون المائل. البحث يركز على توصيف كمية الماء المتجمع من الأمطار وتطور حجم قطرات الماء المتأثرة على سطح العازل المائل من السيليكون بناءً على زاويتها المائلة بالنسبة للأفق عندما تكون خارج التوتر. ثم تم تكرار هذه الظاهرة الطبيعية في المختبر، بتحديد حجم وتجمع قطرات الماء المتجمعة من الأمطار على الموقع لتقييم تأثير حجم قطرات المطر على ترطيب العازل المائل، وبالتالي على أدائه الكهربائي تحت مستوى متغير من التوتر المتناوب. بالإضافة إلى ذلك، تم تحديد تأثير زاوية الميل لهذا العازل بالنسبة للأفق على أدائه خلال الشبخوخة تحت الضباب المالح والتوتر المتناوب العالي، بتحديد التيار التسرب الذي يتدفق على سطحه أثناء تعرضه للضبباب المالح، وفحص حالة سطحه وتحديد زاويته الاتصال الثابتة. تشير نتائج القياسات في الموقع والمختبر إلى انخفاض حجم السطح الرطب وطول خط التسرب للعازل المائل مع زيادة زاويته المائلة. هذه النتائج تسلط الضوء على فترتين حرجيتين من زوايا الميل للعازل، غير مواتية ومواتية لتصميم أجنحة العوازل المتوافقة على التوالي مع أدائها الكهربائي الأدنى والأقصى. تظهر النتائج الناتجة عن اختبارات شبخوخة العازل مقاومة ممتازة للشبخوخة والحفاظ الفعال على خصائصه المقاومة للماء على مدى فترة طويلة من التعرض للضبباب مع زوايا الميل العالية.

كلمات مفتاحية: عازل السيليكون -المطر-حجم قطرات الماء-الجهد المتناوب-الضبباب المالح-الخشونة-زاوية الميل-الوميض .