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

Université des Sciences et de la Technologie d'Oran-Mohamed Boudiaf

Faculté de Génie Électrique
Département d'Électrotechnique

THÈSE

En vue de l'obtention du grade de
Docteur

Spécialité : Electrotechnique
Option : Ingénierie des plasmas et décharges

Présentée par

Mohammed El-Amine ABED

Contribution à l'étude du vieillissement des isolateurs composites.

Soutenue le 30 juin 2021, devant le jury composé de:

MM.

Mohamed RIZOUGA	Professeur	USTO-MB	**Président**
Hocine HADI	Professeur	USTO-MB	**Encadrant**
Ahmed Wahid BELARBI	Professeur	USTO-MB	**Co-Encadrant**
Azzedine HAMID	Professeur	CUNB	
Amar TILMATINE	Professeur	UDL	**Examinateurs**
Nouredine ZEKRI	Professeur	USTO-MB	

Contribution à l'étude du vieillissement des isolateurs composites.

Par

Mohammed El-Amine ABED

RÉSUMÉ

Durant leur service, les isolateurs composites en silicone sont exposés à plusieurs contraintes comme : la température, les rayonnements ultraviolets (UV) et la pollution atmosphérique. Compte tenu de leur importance dans le phénomène de vieillissement, l'impact de ces contraintes sur les propriétés superficielles et internes de l'isolateur, au cours d'un cycle de vieillissement accéléré à long terme, est étudié dans cette thèse. Une investigation est faite sur un prototype d'isolateur composite en silicone pour étudier les conséquences du vieillissement sur son hydrophobicité, ses propriétés électriques et diélectriques (surfaciques et volumiques), le champ électrique à sa surface, ainsi que sa tension de contournement.

Pour suivre l'évolution des propriétés de l'isolateur pendant le cycle de vieillissement, différentes mesures sont utilisées, à savoir la mesure de l'angle de contact, du courant de surface, de l'indice de la mouillabilité de surface, de la permittivité relative, du facteur de dissipation diélectrique et des résistivités : volumique et surfacique. Une corrélation est faite entre les propriétés électriques/diélectriques de l'isolateur et son hydrophobicité.

Un calcul numérique du champ électrique est fait via le logiciel COMSOL Multiphisycs. Ce calcul est basé sur des données réelles obtenues pendant le vieillissement de l'isolateur. Une corrélation est faite entre le degré des contraintes de vieillissement, les propriétés électriques/diélectriques et l'amplitude du champ électrique à la surface de l'isolateur dans l'état propre et en cas de présence de gouttelettes d'eau. Une étude sur la tenue diélectrique en surface de l'isolateur est réalisée, l'influence des contraintes appliquées ainsi que l'état de surface de l'isolateur sur sa tension de contournement sont investiguées. Dans le but de voir l'impact du vieillissement sur la capacité de l'isolateur à dissiper les charges de surface après un éventuel contournement, une approche est proposée consistant à mesurer le courant transitoire de surface de l'isolateur.

Mots-clés : Haute tension, vieillissement des polymères, isolateurs composites, hydrophobicité, spectroscopie diélectrique, contournement, calcul du champ électrique, dissipation des charges électriques.

Contribution to the Study of the Ageing Phenomenon of Silicone-Rubber Insulators.

By

Mohammed El-Amine ABED

ABSTRACT

During their service, Silicone-rubber (SiR) insulators are exposed to several constraints such as temperature, ultraviolet (UV) radiation and atmospheric pollution. Given their importance in the ageing phenomenon, their impact on the surface and bulk properties of the insulator during a long-term accelerated aging cycle is studied in this thesis. An investigation is carried out on a SiR prototype insulator to study the consequences of ageing on its surface hydrophobicity, its (surface and bulk) electrical and dielectric properties, the electric field at its surface, as well as its flashover voltage.

To follow the evolution of the properties of the insulator during the aging cycle, various measurements are used, namely the measurement of contact angle, wettability class index, surface current, relative permittivity, dissipation factor and bulk resistivity. A correlation is made between the electric/dielectric properties of the insulator and its hydrophobicity.

A numerical calculation of the electric field is made using COMSOL Multiphisycs software. This calculation is based on real data obtained during the ageing of the insulator. A correlation is made between the degree of ageing stresses, the electrical/dielectric properties and the electric field at the surface of the insulator in the clean state and in the presence of water droplets. A study on the dielectric strength on the surface of the insulator is carried out, the influence of the applied stresses as well as the surface condition of the insulator on its flashover voltage are investigated. In order to see the impact of ageing on the ability of the insulator to dissipate surface charges after a possible flashover, an approach which consists in measuring the transient current of the surface of the insulator is proposed.

Keywords: High-voltage, ageing of polymers, composite insulators, hydrophobicity, dielectric spectroscopy, flashover, charge decay.

مساهمة في دراسة ظاهرة تقادُم العوازل الكهربائيّة المركّبة.

من طرف

محمّد الأمين عابد

ملخّص

خلال مدّة استخدامها، تَكون العوازل الكهربائيّة المركّبة عُرضة لعدّة عوامل قد تُسبِّب تقادمَها مثل الحرارة، الأشعّة الفوق البنفسجيّة، والتّلوّث الجوّيّ. نظرا للأهميّة الّتي تلعبها هذه العوامل في ظاهرة التّقادُم، قُمنا في هذه الأُطروحة بدراسة تأثيرها على الخواصّ السّطحيّة والدّاخليّة لعازل كهربائيٍّ مركّب مصنوع من مادة السِّيليكون، وهذا خلال دورة تقادُم مسرَّع على مدى طويل نسبيّا. تَمَّ التّحقيق في أثر التّقادُم على: خاصّيّة النُّفور من الماء الّتي تميِّز هذا النَّوع من العوازل، خصائصه العازِليّة (الكهرَسامِحة)، شدّة الحقل الكهربائيّ على سطحه، إضافة إلى قيمة التّوتُّر المؤدّية إلى تشكُّل قوس كهربائيٍّ على سطحه.

لِتتبُّع تطوّر الخصائص المذكورة آنفا خلال دورة التّقادُم، تمّ إجراء عدّة قياسات مثل زاوية التّماسِّ (أيّ الزّاوية النّاتجة عن التقاء الهواء، سطح العازل وقطرة الماء الموضوعة فوقه)، شدّة التيّار الكهربائيّ السّطحي، مؤشِّر صِنف التَّبلُّل، السّماحيّة النِّسبيّة، مُعامل الضّياع، إضافة إلى المُقاومة الكهربائيّة الدّاخليّة والسّطحيّة. تمّت أيضا دراسة العلاقة بين الخصائص العازِليّة للعازل وخاصّية النُّفور من الماء.

أجرينا كذلك حسابا رقميّا لمعرفة شدّة الحقل الكهربائيّ على سطح العازل باستخدام برنامج COMSOL Multiphisycs الّذي يعتمد في عمله على طريقة العناصر المنتهية. هذا الحساب مبني على المُعطيات الّتي تحصّلنا عليها خلال الدّراسة التّجريبيّة للتّقادُم. تمكنّا من تحديد الارتباط بين درجة العوامل المسبِّبة للتّقادُم، الخصائص العازِليّة وشدّة الحقل في الحالة الّتي يكون فيها سطح العازل جافّاً وحين وجود قطرة ماء عليه. خلال دراستنا لِمَتانة العزل لسطح العازل تطرّقنا إلى تأثير عوامل التّقادُم وحالة سطح العازل على قيمة التّوتُّر المؤدّية إلى تشكّل القوس الكهربائيّ. اقترحنا في الأخير مقاربة تتمثّل في قياس التّيّار السَّطحي العارِض، وهذا بغرض معرفة تغيُّر قدرة العازل، نتيجة تقادُمه، على التّخلّص من الشّحنات الكهربائيّة المتجمّعة فوق سطحه إثر حدوث قوس كهربائيٍّ.

الكلمات الدّالّة: التّوتُّر العاليّ، تقادُم البوليميرات، العوازل المركّبة، خاصّية النُّفور من الماء، التّحليل الطّيفيُّ الكهرَسامحيُّ، تشكُّل قوس كهربائيٍّ على سطح العازل، حساب شدّة الحقل الكهربائيّ، تضاؤل الشّحنات الكهربائيّة.

À ma mère et à mon père, ceux à qui je dois tout.

« …ô mon Seigneur, fais-leur ; à tous deux ; miséricorde comme ils m'ont élevé tout petit ».

Le saint Coran, sourate 17. Al Isra (Le voyage nocturne), verset 24.

Avant-propos.

Ce travail de thèse a été réalisé, en majeur partie, dans le laboratoire de génie électrique d'Oran (LGEO) de l'université des sciences et de la technologie d'Oran-Mohamed Boudiaf (USTO-MB), au sein de l'équipe haute tension et calcul du champ.

En arrivant à la fin de ce travail, je voudrais adresser ici, en quelques lignes, des remerciements à tous ceux qui s'en sont, directement ou indirectement, impliqués :

Je tiens tout d'abord à exprimer mes sincères remerciements à mon directeur de thèse, le Professeur Hocine HADI. Son expérience dans le domaine de la haute tension, son esprit critique, ses remarques, et sa constante disponibilité ont été essentiels pour l'aboutissement de cette thèse, et m'ont toujours poussé à aller jusqu'au bout.

Mes remerciements s'adressent également à mon co-directeur de thèse et responsable de la formation doctorale, le Professeur Ahmed Wahid BELARBI pour avoir accepté de me co-encadrer, et qui n'a pas ménagé d'efforts pour que je puisse mener à bien ce travail.

J'exprime ma profonde gratitude envers le Docteur Mohammed El Amine SLAMA de m'avoir accompagné pendant ces années de recherche depuis mon projet de Master. Je le remercie pour ses nombreux conseils qui m'ont aidé à avancer, et son aide considérable qu'il a apporté à ce travail.

J'exprime toute ma reconnaissance à monsieur Abdelkader ZEROUALI, responsable de département de maintenance de GRTE-SONELGAZ, pour nous avoir fourni des chaines d'isolateurs en silicone qui ont fait l'objet de cette étude.

Mes profonds remerciements vont au Professeur Nouredine ZEKRI, d'une part, de m'avoir bien accueilli dans son laboratoire d'études physique des matériaux (LEPM) de l'université des sciences et de la technologie d'Oran-Mohamed Boudiaf, où la partie des essais de la spectroscopie diélectrique y a été faite, et d'autre part, pour sa participation en tant qu'examinateur au jury de cette thèse.

Mes vifs remerciements vont au président du jury le Professeur Mohamed RIZOUGA, ainsi qu'aux membres examinateurs : le Professeur Azzedine HAMID et le Professeur Amar TILMATINE, pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'évaluer et de juger ce travail.

Je remercie énormément le Professeur Mohamed BENZOHRA pour sa sympathie, ses encouragements et ses précieux conseils qui m'ont été très utiles lors des expérimentations.

Un grand merci au Professeur Ali TAHRI, qui a mis à ma disposition le matériel de son laboratoire pour la réalisation de certaines électrodes prévues pour les essais.

Mes remerciements vont naturellement à mes amis et collègues de l'USTO-MB pour la bonne ambiance et les moments agréables qu'on a passés ensemble. Je pense notamment à Amine LAHOUARI, Walid RAHMOUNI, Ibrahim BENLAHBIB, Abderrahmane DHIBA, Hichem

SMAHI, Farouk HADJ-BENALI, et Abderrahmane HAYANI. Je n'oublie évidemment pas mes anciennes collègues du laboratoire de la haute tension et décharges électriques mesdames : Sarah BENDIMERAD, Amina ZELMAT et Djamila ABID, ainsi que les autres étudiants que j'ai y côtoyé durant mon séjour. Je remercie également les membres du LEPM, tout particulièrement Omar MOSBAH et Abdellah DILEME, pour leur amabilité et leur gentillesse.

Je n'omets pas d'exprimer mon respect et mes sentiments les plus sincères aux enseignants qui ont contribué à ma formation durant tout mon parcours académique.

Enfin, je ne saurais terminer sans remercier toute personne, dont le nom n'a pas figuré dans ces lignes (mais à qui, certainement, je pense), et dont l'aide, le soutient, et les prières m'ont permis d'achever ce travail.

Table des matières.

Avant-propos. **6**

Table des matières. **8**

Liste des figures. **12**

Liste des tableaux. **18**

Liste des symboles. **19**

Liste des abréviations. **22**

Introduction générale. **24**

Chapitre I : Généralités sur les isolateurs composites. **28**

I.1 Introduction **29**

I.2 Isolateurs composites **29**

I.2.1 Définitions 29

I.2.1.1 Matériau composite 29

I.2.1.2 Isolateur composite 29

I.2.2 Historique 30

I.2.3 Structure des isolateurs composites 30

I.2.3.1 Noyau 30

I.2.3.2 Revêtement extérieur et jupes 31

I.2.3.3 Interface 31

I.2.3.4 Pièces d'accrochage 32

I.2.4 Caractéristiques 32

I.3 Hydrophobicité **32**

I.3.1 Angle de contact 33

I.3.2 Définitions 34

I.3.3 Transfert et recouvrement de l'hydrophobicité 35

I.4 Dynamique des gouttes sous champ électrique **36**

I.4.1 Principales forces 36

I.4.1.1 Force due à la tension de surface 36

I.4.1.2 Force de gravité 37

I.4.1.3 Forces dues à la différence de pression 38

I.4.1.4 Forces électriques 38

I.5 Contournement des isolateurs composites **39**

I.5.1 Apparition des décharges partielles aux bords des gouttelettes 40

I.5.2 Mécanisme du contournement des isolateurs hydrophobes 41

I.5.3 Mécanisme de contournement des isolateurs hydrophiles 42
I.6 Conclusion 44

Chapitre II : Le phénomène de vieillissement des isolateurs composites : état de l'art. 45

II.1 Introduction 46
II.2 Limites des isolateurs composites 46
II.3 Phénomène de vieillissement des isolateurs composites 46
II.3.1 Impact des contraintes électriques 47
II.3.2 Impact des contraintes atmosphériques 48
II.3.2.1 Température 49
II.3.2.2 Rayonnements ultraviolets (UV) 51
II.3.2.3 Absorption d'eau, et contamination 52
II.4 Manifestation du vieillissement des isolateurs composites 55
II.5 Méthodes de diagnostic de l'état des isolateurs composites 56
II.5.1 Inspection visuelle 56
II.5.2 Imagerie des émissions Ultraviolets 56
II.5.3 Imagerie des émissions thermiques infrarouges (IR) 57
II.5.4 Mesure de l'hydrophobicité 57
II.5.5 Mesure du courant de fuite 57
II.5.6 Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) 57
II.5.7 Spectroscopie photo-électronique X (XPS) 58
II.5.8 Spectroscopie des rayons X à dispersion d'énergie (EDX) 58
II.5.9 Spectroscopie de masse des ions secondaires (SIMS) 58
II.5.10 Microscopie électronique à balayage (MEB ou SEM) 59
II.6 Conclusion 59

Chapitre III : Démarche expérimentale. 60

III.1 Introduction 61
III.2 Préparation des échantillons 61
III.3 Contraintes étudiées 62
III.3.1 Température 62
III.3.2 Rayonnements ultraviolets 63
III.3.3 Solutions salines 63
III.4 Techniques de caractérisation 64
III.4.1 Mesure de l'hydrophobicité 64
III.4.1.1 Mesure de l'angle de contact statique 65

III.4.1.2 Détermination de l'indice de la classe de mouillabilité 66
III.4.2 Courant de surface en régime permanent 67
III.4.3 Spectroscopie diélectrique 70
III.4.3.1 Rappels sur les phénomènes de polarisation 72
III.4.3.2 Dispositif de mesure 73
III.4.4 Tension de contournement 76
III.5 Méthodologie de l'étude 77
III.5.1 Phase précontrainte et propriétés de référence 77
III.5.2 Phase de contrainte 79
III.5.3 Phase post-contrainte 80
III.5.4 Phase finale 81
III.6 Conclusion 81

Chapitre IV : Étude des propriétés superficielles du matériau de revêtement en silicone durant un cycle de vieillissement. 82

IV.1 Introduction 83
IV.2 Résultats 83
IV.2.1 Phase de contrainte 83
IV.2.1.1 Effet de la température 83
IV.2.1.2 Effet de la salinité 85
IV.2.1.3 Effet des rayonnements UV 87
IV.2.2 Phase post-contrainte 89
IV.2.2.1 Effet de la température 89
IV.2.2.2 Effet de la salinité 91
IV.2.2.3 Effet des rayonnements UV 93
IV.3 Discussion 95
IV.3.1 Effet de la température 95
IV.3.2 Effet de la salinité 97
IV.3.3 Effet des rayonnements UV 100
IV.4 Conclusion 100

Chapitre V : Étude des propriétés internes du matériau de revêtement en silicone après un cycle de vieillissement. 102

V.1 Introduction 103
V.2 Résultats et discussions 103
V.2.1 Effet de la température 103
V.2.1.1 Analyses diélectriques 103

V.2.1.2 Corrélation des propriétés internes et surfaciques avec la température du vieillissement 119
V.2.1.3 Etude de la tension de contournement 121
V.2.2 Effet de la salinité 124
V.2.2.1 Analyses diélectriques 124
V.2.2.2 Corrélation des propriétés internes et surfaciques avec la salinité 138
V.2.2.3 Etude de la tension de contournement 140
V.2.3 Effet des rayonnements UV 142
V.2.3.1 Analyses diélectriques 142
V.2.3.2 Résistivité surfacique et volumique en régime permanent 147
V.2.3.3 Etude de la tension de contournement 147
V.3 Conclusion 148

Chapitre VI : Impact du vieillissement du matériau de revêtement en silicone sur le champ électrique à la surface de l'isolateur composite. 150

VI.1 Introduction 151
VI.2 Calcul du champ électrique 152
VI.3 Résultats et discussions 153
VI.3.1 Effet du vieillissement sur la distribution du champ électrique 153
VI.3.1.1 Isolateur propre (sans dépôt de gouttelette) 153
VI.3.1.2 Effet de la présence d'une gouttelette d'eau sur la surface de l'isolateur . 158
VI.3.2 Effet du vieillissement sur le phénomène de contournement 166
VI.3.2.1 Influence sur la tension de contournement 166
VI.3.2.2 Influence sur le courant transitoire de surface après le contournement .. 168
VI.3.3 Effet du vieillissement sur la dissipation des charges de surface après le contournement 174
VI.4 Conclusion 178

Conclusion générale. 179

Références. 182

Liste des figures.

Figure 1. Structure typique d'un isolateur composite. 31
Figure 2. Surface d'une ailette découpée à partir d'une chaine d'isolateurs composites en silicone et recouverte de gouttelettes d'eau. 33
Figure 3. (a) Représentation d'une gouttelette liquide 'l' déposée sur une surface solide 's' dans un gaz environnant 'g', (b) Equilibre des forces s'exerçant sur le point P, entre les trois milieux. 34
Figure 4. Structure chimiques des PDMS. 35
Figure 5. Diffusion des LMW PDMS à partir du volume du matériau en silicone vers sa surface polluée. 36
Figure 6. Représentation axisymétrique de la gouttelette d'eau sur le plan définit par $\vec{r}$ et $\vec{z}$ [48]. 37
Figure 7. Composantes normale et tangentielle du champ électrique sur l'interface gaz/liquide de la gouttelette d'eau [48]. 39
Figure 8. Phases de contournement sous pollution d'une surface hydrophobe [2] 42
Figure 9. Phases de contournement sous pollution d'une surface hydrophile [2] 44
Figure 10. Décharges corona à la surface d'un isolateur composite [75]. 47
Figure 11. Différentes formes de détérioration des isolateurs composites : (a) cheminement, (b) perforation, (c) dégradation probablement causée par la température générée par les décharges partielles, (d) craquelure de l'ailette du revêtement, (e) détérioration causée par un animal, ce genre de dommages se produit généralement pendant le stockage de l'isolateur, (f) dommage lié à une mauvaise manutention [114] 55
Figure 12. Echantillons utilisés : (a) chaine d'isolateurs, (b) échantillons découpés. 61
Figure 13. Etuve utilisée pour le vieillissement thermique. 62
Figure 14. Dispositif utilisé pour le vieillissement par rayonnements UV. 63
Figure 15. Solutions utilisées pour le vieillissement par immersion. 64
Figure 16. Schéma global montrant la procédure utilisée pour la mesure de l'angle de contact. 65
Figure 17. Influence de la durée du dépôt de la gouttelette sur l'angle de contact. 66
Figure 18. Photo de référence de la classe de mouillabilité d'une surface hydrophobe d'après la norme IEC62073 [22]. 67
Figure 19. (a) Montage utilisé pour la mesure du courant de surface, (b) schéma simplifié montrant le raccordement électrique du montage. 68
Figure 20. Photo d'une ailette découpée qui montre la non-uniformité de son épaisseur (en pointillé). 69
Figure 21. Photos montrant l'ensemble des électrodes de la cellule de mesure du courant de surface et l'échantillon : (a) l'ensemble des électrodes, (b) échantillon monté sur une électrode de garde de section plane (sans pression exercée), (c) échantillon monté sur une électrode de garde de section inclinée (sans pression exercée). 69

Figure 22. Influence des conditions atmosphériques sur le courant de surface : (a) la température ambiante, (b) l'humidité relative. 70
Figure 23. Diagramme de Fresnel des courants pour un isolant imparfait [138]. 71
Figure 24. Montage utilisé pour les essais de la spectroscopie diélectrique : (a) vue d'ensemble du montage [143], (b) schéma de principe de la mesure, incluant la cellule ZGS. 74
Figure 25. Facteur de dissipation diélectrique en fonction de la fréquence. 75
Figure 26. Schéma de principe du montage utilisé pour les essais de contournement. 77
Figure 27. Méthodologie adoptée dans l'étude. : (a) phases de l'étude, (b) séquence de la procédure de caractérisation. 78
Figure 28. Évolution temporelle de la température relative des échantillons exposés à la contrainte thermique après leur prélèvement. 80
Figure 29. Angle de contact lors de la phase de contrainte thermique. 84
Figure 30. Indice de la classe de mouillabilité lors de la phase de contrainte thermique. 84
Figure 31. Courant de surface lors de la phase de contrainte thermique. 84
Figure 32. Angle de contact lors de la phase d'immersion des échantillons. 86
Figure 33. Indice de la classe de mouillabilité lors de la phase d'immersion des échantillons. 86
Figure 34. Courant de surface lors de la phase d'immersion des échantillons. 86
Figure 35. Angle de contact lors de la phase d'exposition aux rayonnements UV. 88
Figure 36. Indice de la classe de mouillabilité lors de la phase d'exposition aux rayonnements UV. 88
Figure 37. Courant de surface lors de la phase d'exposition aux rayonnements UV. 88
Figure 38. Angle de contact pendant la phase post-contrainte thermique. 90
Figure 39. Indice de la classe de mouillabilité pendant la phase post-contrainte thermique. 90
Figure 40. Courant de surface pendant la phase post-contrainte thermique. 90
Figure 41. Angle de contact pendant la phase postérieure à l'immersion. 92
Figure 42. Indice de la classe de mouillabilité pendant la phase postérieure à l'immersion. 92
Figure 43. Courant de surface pendant la phase postérieure à l'immersion. 92
Figure 44. Angle de contact pendant la phase postérieure à l'exposition aux rayonnements UV. 94
Figure 45. Indice de la classe de mouillabilité pendant la phase postérieure à l'exposition aux rayonnements UV. 94
Figure 46. Courant de surface pendant la phase postérieure à l'exposition aux rayonnements UV. 94
Figure 47. Photographies montrant l'hydrophobicité d'un échantillon en silicone : (a) angle de contact d'un échantillon non vieilli, (b) angle de contact de l'échantillon après vieillissement par rayonnements UV, (c) indice de la classe de mouillabilité d'un échantillon non vieilli, (d) indice de la classe de mouillabilité d'un échantillon après vieillissement par rayonnements UV. 95
Figure 48. Variation de la permittivité réelle en fonction de la fréquence après vieillissement thermique. 104
Figure 49. Variation du facteur de dissipation diélectrique en fonction de la fréquence après vieillissement thermique. 105

Figure 50. Variation du module complexe en fonction de la fréquence après vieillissement thermique. 106
Figure 51. Parties réelle et imaginaire de la susceptibilité diélectrique du matériau non vieilli. 108
Figure 52. Parties réelle et imaginaire de la susceptibilité diélectrique après vieillissement thermique à 2 °C. 109
Figure 53. Parties réelle et imaginaire de la susceptibilité diélectrique après vieillissement thermique à 50 °C. 109
Figure 54. Parties réelle et imaginaire de la susceptibilité diélectrique après vieillissement thermique à 110 °C. 110
Figure 55. Partie réelle de la susceptibilité diélectrique du matériau non vieilli en fonction de la pulsation, montrant la contribution de la relaxation et de la conduction par saut. 114
Figure 56. Partie imaginaire de la susceptibilité diélectrique du matériau non vieilli en fonction de la pulsation, montrant la contribution de la relaxation, de la conduction par saut et de la conduction DC. 114
Figure 57. Partie réelle de la susceptibilité diélectrique du matériau après vieillissement thermique à 2 °C en fonction de la pulsation, montrant la contribution de la relaxation et de la conduction par saut. 115
Figure 58. Partie imaginaire de la susceptibilité diélectrique du matériau après vieillissement thermique à 2 °C en fonction de la pulsation, montrant la contribution de la relaxation, de la conduction par saut et de la conduction DC. 115
Figure 59. Partie réelle de la susceptibilité diélectrique du matériau après vieillissement thermique à 50 °C en fonction de la pulsation, montrant la contribution de la relaxation et de la conduction par saut. 116
Figure 60. Partie imaginaire de la susceptibilité diélectrique du matériau après vieillissement thermique à 50 °C en fonction de la pulsation, montrant la contribution de la relaxation, de la conduction par saut et de la conduction DC. 116
Figure 61. Partie réelle de la susceptibilité diélectrique du matériau après vieillissement thermique à 110 °C en fonction de la pulsation, montrant la contribution de la relaxation et de la conduction par saut. 117
Figure 62. Partie imaginaire de la susceptibilité diélectrique du matériau après vieillissement thermique à 110 °C en fonction de la pulsation, montrant la contribution de la relaxation, de la conduction par saut et de la conduction DC. 117
Figure 63. Angle de contact en fonction la permittivité mesurée à 0,05 Hz après le vieillissement thermique. 119
Figure 64. Facteur de dissipation diélectrique, résistivité volumique, résistivité surfacique et angle de contact en fonction de la température du vieillissement thermique. 120
Figure 65. Tension de contournement en fonction du nombre de tests de contournements après vieillissement thermique. 122

Figure 66. Tension de contournement en fonction du facteur de dissipation diélectrique mesuré à 0,05 Hz après vieillissement thermique. 123
Figure 67. Variation de la permittivité réelle en fonction de la fréquence après vieillissement par immersion. 125
Figure 68. Variation du facteur de dissipation diélectrique en fonction de la fréquence après vieillissement par immersion. 125
Figure 69. Variation du module complexe en fonction de la fréquence après vieillissement par immersion. 126
Figure 70. Parties réelle et imaginaire de la susceptibilité diélectrique après vieillissement par immersion à 3 µS/cm. 127
Figure 71. Parties réelle et imaginaire de la susceptibilité diélectrique après vieillissement par immersion à 7 mS/cm. 127
Figure 72. Parties réelle et imaginaire de la susceptibilité diélectrique après vieillissement par immersion à 18 mS/cm. 128
Figure 73. Parties réelle et imaginaire de la susceptibilité diélectrique après vieillissement par immersion à 46 mS/cm. 128
Figure 74. Parties réelle et imaginaire de la susceptibilité diélectrique après vieillissement par immersion à 138 mS/cm. 129
Figure 75. Partie réelle de la susceptibilité diélectrique du matériau après vieillissement par immersion à 3 µS/cm en fonction de la pulsation, montrant la contribution de la relaxation et de la conduction par saut. 132
Figure 76. Partie imaginaire de la susceptibilité diélectrique du matériau après vieillissement par immersion à 3 µS/cm en fonction de la pulsation, montrant la contribution de la relaxation, de la conduction par saut et de la conduction DC. 132
Figure 77. Partie réelle de la susceptibilité diélectrique du matériau après vieillissement par immersion à 7 mS/cm en fonction de la pulsation, montrant la contribution de la relaxation et de la conduction par saut. 133
Figure 78. Partie imaginaire de la susceptibilité diélectrique du matériau après vieillissement par immersion à 7 mS/cm en fonction de la pulsation, montrant la contribution de la relaxation, de la conduction par saut et de la conduction DC. 133
Figure 79. Partie réelle de la susceptibilité diélectrique du matériau après vieillissement par immersion à 18 mS/cm en fonction de la pulsation, montrant la contribution de la relaxation et de la conduction par saut. 134
Figure 80. Partie imaginaire de la susceptibilité diélectrique du matériau après vieillissement par immersion à 18 mS/cm en fonction de la pulsation, montrant la contribution de la relaxation, de la conduction par saut et de la conduction DC. 134

Figure 81. Partie réelle de la susceptibilité diélectrique du matériau après vieillissement par immersion à 46 mS/cm en fonction de la pulsation, montrant la contribution de la relaxation et de la conduction par saut. 135
Figure 82. Partie imaginaire de la susceptibilité diélectrique du matériau après vieillissement par immersion à 46 mS/cm en fonction de la pulsation, montrant la contribution de la relaxation, de la conduction par saut et de la conduction DC. 135
Figure 83. Partie réelle de la susceptibilité diélectrique du matériau après vieillissement par immersion à 138 mS/cm en fonction de la pulsation, montrant la contribution de la relaxation et de la conduction par saut. 136
Figure 84. Partie imaginaire de la susceptibilité diélectrique du matériau après vieillissement par immersion à 138 mS/cm en fonction de la pulsation, montrant la contribution de la relaxation, de la conduction par saut et de la conduction DC. 136
Figure 85. Angle de contact en fonction du facteur de dissipation diélectrique mesuré à 0,05 Hz après le vieillissement par immersion dans les solutions salines. 137
Figure 86. Facteur de dissipation diélectrique, résistivité volumique, résistivité surfacique et angle de contact des échantillons vieillis en fonction de la conductivité des solutions salines. 138
Figure 87. Tension de contournement en fonction du nombre de tests de contournements après vieillissement par immersion. 140
Figure 88. Tension de contournement en fonction du facteur de dissipation diélectrique mesuré à 0,05 Hz après vieillissement par immersion dans les solutions salines. 141
Figure 89. Variation de la permittivité réelle en fonction de la fréquence après vieillissement par rayonnements UV. 143
Figure 90. Variation du facteur de dissipation diélectrique en fonction de la fréquence après vieillissement par rayonnements UV. 143
Figure 91. Variation du module complexe en fonction de la fréquence après vieillissement par rayonnements UV. 144
Figure 92. Parties réelle et imaginaire de la susceptibilité diélectrique après vieillissement par rayonnements UV. 144
Figure 93. Partie réelle de la susceptibilité diélectrique du matériau après vieillissement par rayonnements UV en fonction de la pulsation, montrant la contribution de la relaxation et de la conduction par saut. 145
Figure 94. Partie imaginaire de la susceptibilité diélectrique du matériau après vieillissement par rayonnements UV en fonction de la pulsation, montrant la contribution de la relaxation, de la conduction par saut et de la conduction DC. 145
Figure 95. Tension de contournement en fonction du nombre de tests de contournements après vieillissement par rayonnements UV. 148
Figure 96. (a) : chaine d'isolateurs, (b) : modèle simplifié 3D utilisé dans la simulation montrant la ligne de référence. 154

Figure 97. Distribution du champ électrique - Effet de la permittivité : (a) après le vieillissement thermique, (b) après le vieillissement par rayonnements UV, (c) après le vieillissement par immersion. 155
Figure 98. Distribution du champ électrique - Effet de la conductivité : (a) après le vieillissement thermique, (b) après le vieillissement par rayonnements UV, (c) après le vieillissement par immersion. 156
Figure 99. Illustration de présence d'une gouttelette sur la surface de l'isolant. 158
Figure 100. Distribution du champ électrique en fonction de l'angle de contact : (a) après le vieillissement thermique, (b) après le vieillissement par rayonnements UV, (c) après le vieillissement par immersion. 159
Figure 101. Effet de la présence d'une gouttelette sur la surface de l'isolateur : (a) sur le champ électrique, (b) sur le potentiel électrique. 161
Figure 102. Influence du choix de maillage sur le facteur d'intensification du champ électrique. 163
Figure 103. Illustration du maillage de différentes tailles sur la surface de l'échantillon au voisinage de l'électrode portée à la haute tension. 163
Figure 104. Facteur d'intensification du champ électrique en fonction de : (a) la température du vieillissement thermique, (b) la conductivité des solutions salines. 165
Figure 105. Configurations étudiées (vue de dessus) : (a) isolateur propre, (b) présence d'une gouttelette d'eau à la surface de l'isolateur, (c) comparaison des tensions de contournement. 166
Figure 106. Variation de la tension de contournement en fonction du nombre d'essais, cas d'isolateur non vieilli. 168
Figure 107. La variation du courant transitoire de surface après 8 contournements en fonction du temps : (a) : après le vieillissement thermique, (b) : après le vieillissement par rayonnements UV, (c) : après le vieillissement par immersion. 170
Figure 108. Variation du courant transitoire de surface après contournement en fonction du nombre d'essais de contournements et du temps, cas d'isolateur non vieilli. 172
Figure 109. La variation de la charge électrique de surface calculée juste après le contournement en fonction du nombre d'essais, cas d'isolateur non vieilli. 173
Figure 110. Cas d'isolateur non vieilli : (a) le taux de dissipation des charges de surface en fonction du nombre d'essais de contournement, (b) la tension de contournement en fonction du taux de dissipation des charges. 175
Figure 111. Variation du taux de dissipation de charges de surface en fonction de : (a) la température de vieillissement, (b) la conductivité des solutions salines. 176
Figure 112. Variation du taux de dissipation de charges de surface en fonction de la conductivité de surface : (a) après vieillissement thermique, (b) après vieillissement par immersion. 177

Liste des tableaux.

Tableau 1. Masse relative après un test d'immersion à court tem. 98
Tableau 2. Paramètres d'ajustement des courbes de la susceptibilité diélectrique complexe après vieillissement thermique. 118
Tableau 3. Paramètres d'ajustement des courbes des propriétés diélectriques et de l'hydrophobicité pour le vieillissement thermique. 120
Tableau 4. Tension moyenne de contournement après vieillissement thermique. 122
Tableau 5. Paramètres d'ajustement de la courbe de la tension de contournement en fonction du facteur de dissipation diélectrique pour le vieillissement thermique. 123
Tableau 6. Paramètres d'ajustement des courbes de la susceptibilité diélectrique complexe après vieillissement par immersion. 129
Tableau 7. Paramètres d'ajustement des courbes des propriétés diélectriques et de l'hydrophobicité pour le vieillissement par immersion. 139
Tableau 8. Tension moyenne de contournement après vieillissement par immersion. 140
Tableau 9. Paramètres d'ajustement de la courbe de la tension de contournement en fonction du facteur de dissipation diélectrique pour le vieillissement par immersion. 142
Tableau 10. Paramètres d'ajustement des courbes de la susceptibilité diélectrique complexe après vieillissement par rayonnements UV. 146
Tableau 11. Energie de dissociation des liaisons chimiques dans une molécule de PDMS [77]. 147
Tableau 12. Tension moyenne de contournement après vieillissement par rayonnements UV. 148
Tableau 13. Propriétés internes des isolateurs étudiés mesurées à 0,05 Hz. 154
Tableau 14. Angle de contact et facteur d'intensification du champ en fonction des contraintes de vieillissement. 160
Tableau 15. Angle de contact et facteur d'intensification du champ en fonction des contraintes de vieillissement. 164
Tableau 16. Tension de contournement des isolateurs en fonction des contraintes de vieillissement. 167
Tableau 17. Paramètres d'ajustement des courbes du courant transitoire de surface en fonction des différentes contraintes de vieillissement. 169
Tableau 18. Paramètres d'ajustement des courbes du courant transitoire de surface en fonction du nombre de contournements pour le cas de l'isolateur non vieilli. 172

Liste des symboles.

θ	Angle de contact.
γ_{sl}	Tension de surface solide/liquide.
γ_{lg}, γ_l	Tension de surface liquide/gaz (tension de surface).
γ_{sg}	Tension de surface solide/gaz.
γ_s	Énergie de surface solide.
S	Paramètre d'étalement.
$\vec{F}_\gamma$	Force due à la tension de surface.
$\vec{n}$	Vecteur unitaire.
$\hat{s}$	Longueur d'arc du profil de la gouttelette.
$\vec{F}_g$	Force de gravité.
$\vec{g}$	Accélération.
$\Delta\rho$	Différence de densité à travers l'interface gaz/liquide.
z	Hauteur de la gouttelette.
$\vec{F}_p$	Force due à la différence de pression.
Δp	Différence de pression entre le liquide et le gaz.
T	Tenseur de Maxwell.
E	Intensité du champ électrique.
ε	Permittivité.
σ	Conductivité électrique.
I_S	Courant de surface.
ρ_S	Résistivité surfacique.
R_S	Résistance surfacique.
p	Périmètre de l'électrode gardée.
κ	Intervalle entre l'électrode gardée et l'anneau de garde.
d_1	Diamètre de l'électrode gardée.
U	Tension appliquée.
I	Courant total.
I_C	Courant de charge.
I_P	Courant de pertes.
δ	Angle de pertes.
$\tan\delta$	Facteur de dissipation diélectrique.
Z^*	Impédance complexe.
Y^*	Admittance complexe.
σ_v	Conductivité volumique.
ε^*	Permittivité complexe.

σ_v *	Conductivité complexe.
j	L'unité imaginaire.
f	Fréquence.
$\vec{P}$	Vecteur polarisation.
$d\vec{p}$	Somme vectorielle des moments dipolaires.
dV	Élément de volume.
$\vec{E}$	Champ électrique.
$\vec{D}$	Vecteur de déplacement électrique.
χ	Susceptibilité diélectrique relative.
ε_r	Permittivité relative du matériau.
ε_0	Permittivité du vide.
U_C	Tension de contournement.
I_{TS}	Courant transitoire de surface.
Z_l	Impédance d'une self.
R_{L1}, R_{L2}	Relais haute tension.
R_{d1}, R_{d2}	Résistances de mesure.
R_p	Résistance de protection.
R_g	Résistance de décharge à la terre.
ρ_v	Résistivité volumique.
ε'	Permittivité relative réelle.
M	Masse relative.
m_0	Masse initiale de l'échantillon.
m	Masse de l'échantillon à un moment donné.
M *	Module complexe.
M'	Partie réelle du module complexe
M''	Partie imaginaire du module complexe.
ε''	Permittivité relative imaginaire.
w	Pulsation.
χ'	Susceptibilité diélectrique réelle.
χ''	Susceptibilité diélectrique imaginaire.
p, n	Exposants (LFD).
w_c	Pulsation critique.
χ *	Susceptibilité diélectrique complexe.
ε_∞	Permittivité à haute fréquence.
ε_c'	Valeur à partir de laquelle la permittivité réelle est constante.
ξ	Entier naturel.
τ_D	Temps de relaxation Debye.
ε_s	Permittivité à basse fréquence (statique).

α , β	Exposants (Havriliak-Negami).
σ_{Ho}	Conductivité par saut (Hopping).
σ_{DC}	Conductivité en régime permanent.
χ_s	Susceptibilité statique.
γ	Exposant (terme de conduction par Hopping).
ψ	Exposant (unité imaginaire).
τ	Temps de relaxation.
R^2	Coefficient de corrélation.
T	Température du vieillissement thermique.
A, B, C, Y_0, R_0	Constantes (équations d'ajustement).
P_V	Puissance absorbée par l'unité de volume par un diélectrique.
w_p	Pulsation de relaxation.
S_a	Conductivité électrique de la solution.
e	Energie du rayonnement électromagnétique.
λ	Longueur d'onde du rayonnement électromagnétique.
ν	Fréquence du rayonnement électromagnétique.
$\hbar$	Constante de Planck.
c	Célérité de la lumière.
e_D	Énergie de dissociation d'une liaison chimique.
N_A	Constante d'Avogadro.
F	Facteur d'intensification du champ électrique.
$E_{\max}$	Valeur du champ électrique due à la présence d'une gouttelette.
E_0	Valeur du champ électrique en l'absence d'une gouttelette.
ϕ	Degré de la contrainte exercée.
t	Temps.
Q_S	Charge électrique accumulée.
η	Nombre de contournements.
D_S	Taux de dissipation des charges.

Liste des abréviations.

CEI	Commission électrotechnique internationale.
UV	Ultraviolet.
GIS	Gas insulated substation.
EPR	Éthylène propylène.
EPDM	Éthylène propylène diène monomère.
PTFE	Polytétrafluoroéthylène.
SiR	Silicone rubber.
RTV	Room temperature vulcanized.
HTV	High temperature vulcanized.
HCR	High consistency rubber.
LSR	Liquid silicone rubber.
EVA	Éthylène-acétate de vinyle.
PE	Polyéthylène.
LMW	Low molecular weight.
PDMS	Polydiméthylsiloxane.
ATH	Alumina trihydrate.
HMW	High molecular weight.
EHD	Électrohydrodynamique.
AC	Alternating current.
BSL	Basic switching impulse insulation level.
BIL	Basic lightning impulse insulation level.
rms	Root mean square.
DC	Direct current.
ESDD	Equivalent salt deposit density.
HVDC	High voltage direct current.
NSDD	Non-soluble deposit density.
IR	Infrarouge.
LC	Leakage current.
FTIR	Fourier transform infrared spectroscopy.
XPS	X-Ray photo-electron spectroscopy.
EDXS	Energy-dispersive X-ray spectroscopy.
SIMS	Secondary ion mass spectroscopy.
SEM	Scanning electron microscopy.
TGA	Thermogravimetric analysis.
DSC	Differential scanning calorimetry.
XRF	X-ray fluorescence spectroscopy.
XRD	X-ray diffraction spectroscopy.
LIF	Laser induced fluorescence spectroscopy.
CT-Scan	Computed tomography scan.
SLAM	Microscopie acoustique laser à balayage.

LIBS	Laser-induced breakdown spectroscopy.
IPT	Inclined plane test.
RWDT	Rotating wheel dip test.
GRTE	Gestionnaire du réseau de transport de l'électricité.
NaCl	Sodium chloride.
WCI	Wetttability class index.
MWS	Maxwell-Wagner-Sillars.
LFD	Low frequency dispersion.
MEF	Méthode des éléments finis.
PMMA	Polyméthacrylate de méthyle.
POM	Polyoxyméthylène.

Introduction générale.

La pollution atmosphérique présente un risque non seulement sur la santé de la population mais également sur la sécurité des réseaux d'énergie électrique, affectant ainsi l'économie du pays. Les accidents dus au contournement sous pollution des isolateurs "classiques" des lignes aériennes à haute tension peuvent provoquer des dégâts considérables. Plusieurs solutions ont été adoptées par les gestionnaires des réseaux électriques pour faire face au contournement comme : le nettoyage des isolateurs [1]–[5], l'allongement de la ligne de fuite [6], le graissage des isolateurs et l'utilisation des revêtements à base d'émaux semi-conducteurs ou de caoutchoucs isolants synthétiques [3], [7], [8].

L'utilisation des isolateurs composites présente une meilleure alternative notamment dans les zones fortement polluées grâce à leur hydrophobicité qui limite le mouillage de la surface de l'isolateur, et qui le protège ainsi contre les effets du courant de fuite. Depuis leur commercialisation, ces isolateurs ont connu plusieurs modifications dans la structure chimique/physique des matériaux avec lesquels ils sont fabriqués, ce qui a permis d'améliorer leurs performances [9]. Cependant, même ces isolateurs présentent des limites, dont la principale est leur sensibilité au vieillissement. En fait, les isolateurs des lignes aériennes sont exposés durant leur exploitation à de différentes contraintes qui provoquent leur vieillissement comme : le soleil, la pluie, la neige, le vent, la tension de service, la pollution de l'air, les surtensions de foudres ou de manœuvres, les décharges électriques, etc.

Une des principales interrogations qui ont motivé cette étude est : dans quelles mesures les contraintes auxquelles l'isolateur composite est exposé peuvent influencer les propriétés de son matériau de revêtement en silicone pendant la période de contrainte ? Non seulement pendant la période de contrainte mais également pendant la période post-contrainte. En effet, l'évolution des propriétés du matériau en silicone après la contrainte est rarement investiguée dans la littérature bien qu'elle peut contribuer d'avantage à comprendre le mécanisme de vieillissement des isolateurs composites, ce qui représente une étape nécessaire pour développer des méthodes et procédures plus adaptées pour la caractérisation de l'isolation externe, ainsi que pour améliorer les matériaux utilisés dans la fabrication des isolateurs.

L'hydrophobicité est l'un des paramètres clés des isolateurs en silicone. Quand ils sont neufs, ces isolateurs présentent une très bonne hydrophobicité, cependant dû aux contraintes rencontrées pendant le service, le vieillissement se produit et l'hydrophobicité est dégradée. L'hydrophobicité d'une surface peut être évaluée par plusieurs techniques, les deux techniques les plus utilisées actuellement sont : la mesure de l'angle de contact, et la détermination de l'indice de la classe de mouillabilité de surface. Ces deux techniques mentionnées ci-dessus

permettent une évaluation visuelle de la surface de l'isolateur et sont utilisées pour des inspections périodiques. Cependant, il serait d'un grand intérêt de les corréler à un outil permettant une évaluation quantitative et permanente de la surface.

À présent, la théorie principale qui explique le phénomène du recouvrement de l'hydrophobicité après sa perte est la diffusion des polydimethylsiloxanes à faible poids moléculaire (LWM PDMS) du volume vers la surface de l'isolateur. L'hypothèse d'une relation entre les propriétés internes et superficielles du matériau en silicone peut donc se poser. Les propriétés diélectriques/électriques internes telles que le facteur de dissipation diélectrique, la permittivité relative et la résistivité volumique qui peuvent êtres investiguées dans le cadre de la spectroscopie diélectrique peuvent révéler des informations importantes sur la structure du matériau d'un point de vu microscopique comme les mouvements internes à l'échelle moléculaire et la dynamique des charges déclenchés par les mécanismes de conduction.

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'étude du vieillissement des isolateurs composites en silicone par l'action de la température, des rayonnements ultraviolets (UV) et de l'immersion dans des solutions salines et non saline. Pour cela, des échantillons en silicone ont été soumis à un cycle de vieillissement accéléré. Les propriétés superficielles, et internes des échantillons ont été suivies et évaluées par différentes techniques de mesure. Le présent manuscrit est structuré en six chapitres :

Le premier chapitre est consacré à l'étude des isolateurs composites, nous aborderons les connaissances acquises à ce jour sur la technologie de fabrication de ces isolateurs, leur comportement en présence de gouttelettes d'eau et le champ électrique à leur surface. En plus, nous présenterons des notions sur les décharges partielles et le mécanisme de contournement de ce genre d'isolateurs.

Le deuxième chapitre présente une synthèse bibliographique sur les différents travaux portant sur le vieillissement des isolateurs composites en silicone.

Le troisième chapitre porte sur la méthodologie que nous avons adoptée pour l'étude du phénomène de vieillissement. Nous présenterons tout d'abord la préparation des échantillons utilisés dans l'étude, puis le choix des contraintes appliquées, et enfin les montages et techniques de mesures utilisées.

Le quatrième chapitre concerne la caractérisation superficielle des échantillons. L'évolution des propriétés superficielles, à savoir l'angle de contact, l'indice de la classe de mouillabilité de

surface et du courant de surface en régime permanent durant un cycle de vieillissement sera étudiée. Une comparaison sera faite entre ces propriétés pendant la période de contrainte et la période post-contrainte (période de repos).

Le cinquième chapitre concerne la caractérisation interne des échantillons. Les résultats d'évaluation des propriétés diélectriques/électriques internes (permittivité relative, facteur de dissipation diélectrique et la résistivité volumique) à travers la spectroscopie diélectrique seront étudiés. Une corrélation sera faite entre ces propriétés et l'hydrophobicité.

Le sixième chapitre montrera l'impact du vieillissement sur les performances de l'isolateur composite, notamment sur la répartition du champ électrique à la surface de ce dernier et sur sa tension de contournement. Les résultats du calcul numérique effectué via le logiciel COMSOL Multiphisycs seront présentés. Ces résultats sont basés sur les données réelles obtenues pendant le vieillissement de l'isolateur par l'action de la température, des rayonnements UV et de l'immersion dans des solutions salines et non saline. Dans le but de voir l'impact du vieillissement sur la capacité de l'isolateur à dissiper les charges de surface après un éventuel contournement, une approche sera proposée consistant à mesurer le courant transitoire de surface de l'isolateur, juste après le contournement.

À la fin, le bilan de cette étude sera présenté dans une conclusion générale.

Chapitre I : Généralités sur les isolateurs composites.

I.1 Introduction

Les matériaux composites sont obtenus par l'assemblage de matériaux organiques ou inorganiques, surtout ceux à base des polymères. Ils sont utilisés pour la fabrication des isolateurs appelés composites, dont ils feront l'objet de ce premier chapitre.

I.2 Isolateurs composites

I.2.1 Définitions

I.2.1.1 Matériau composite

Un matériau composite est défini comme étant un assemblage de deux ou plusieurs matériaux dotés de propriétés physiques, mécaniques ou électriques différentes. L'assemblage final ayant des propriétés supérieures aux propriétés de chacun des matériaux constitutifs [10]. On distingue : la matrice, les renforts et les charges. **Les matrices** ont pour rôle d'assurer la cohésion du composite. **Les renforts** sont généralement sous forme de fibres qui peuvent être structurées sous forme de tissus. La plus utilisée reste la fibre de verre, mais on peut citer les fibres de carbone, de quartz ou les fibres synthétiques. **Les charges**[1] sont des additifs inertes qui permettent de modifier sensiblement les propriétés mécaniques, électriques ou thermiques du composite. Il peut, par exemple, s'agir d'en améliorer l'aspect de surface ou bien, simplement, de réduire le prix de revient du matériau transformé [11].

I.2.1.2 Isolateur composite

L'isolateur composite est défini par la commission électrotechnique internationale CEI comme étant : *« [un] isolateur constitué d'au moins deux matériaux isolants : le fût et l'enveloppe externe. Les isolateurs composites peuvent, par exemple, être constitués soit d'ailettes séparées montées sur le fût, avec ou sans couche intermédiaire, soit d'une enveloppe complète avec ses ailettes, moulée ou coulée directement en une seule pièce sur le fût »* [12].

Généralement, on appelle isolateurs composites tout isolateur fabriqué à base de matériaux polymères composites. Ils sont aussi communément appelés sous d'autres noms, tels

[1] À ne pas confondre avec les porteurs de charges électriques.

qu'isolateurs polymères, isolateurs synthétiques, isolateurs organiques et isolateurs non-céramiques (en Amérique du nord notamment) [13].

I.2.2 Historique

Les années 1930 et 1940 ont vu l'apparition des premiers isolateurs organiques afin de remplacer les isolateurs inorganiques [14], mais ceux-ci souffrent de problèmes de résistance aux intempéries, et leurs caractéristiques n'étaient pas satisfaisantes pour une utilisation externe. Dans les années 1950, les isolateurs en résines époxydes ont été développés, mais ils ont présenté des inconvénients tels que leurs poids, leur sensibilité aux rayonnements ultraviolets (UV) et leur tendance à la perforation. Ces types d'isolateurs n'ont jamais été mis en service effective mais utilisés dans les postes sous enveloppe métallique - *Gas Insulated Substation* (GIS). Vers le milieu des années 1970, un certain nombre de nouveaux matériaux isolants ont été développés tels que : l'éthylène propylène (EPR), l'éthylène propylène diène monomère (EPDM), le polytétrafluoroéthylène (PTFE ou Téflon), le silicone, etc. [15]. En 2012, les isolateurs composites ont représenté plus de 30% du marché mondial [16].

Aujourd'hui, il y a une tendance à remplacer les isolateurs en verre et en porcelaine par ceux en matériaux composites, notamment dans les zones fortement polluées [1], [3], [7], [17]. Cela est dû aux nombreux avantages que présentent les isolateurs composites.

I.2.3 Structure des isolateurs composites

Un isolateur composite (**Figure 1**) est constitué de deux parties isolantes, à savoir un noyau et son revêtement extérieur, et des pièces d'accrochage.

I.2.3.1 Noyau

Le noyau est la partie isolante interne qui assure la résistance mécanique de l'isolateur. Il est constitué de fibres de verre imprégnées de résine, ce qui confère à l'isolateur une bonne tenue mécanique, les fibres sont disposées dans le sens de la traction imposée par le poids du câble suspendu. Le pouvoir isolant du noyau dépend essentiellement du type de fibres et de la résine utilisée, et de la technologie d'ensimage des fibres [11], [16], [18]–[20].

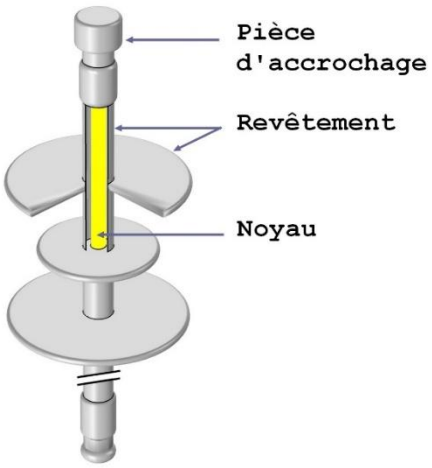


Figure 1. Structure typique d'un isolateur composite.

I.2.3.2 Revêtement extérieur et jupes

Ces éléments, électriquement isolants, assurent la ligne de fuite nécessaire et protègent le noyau des intempéries. Il convient de noter que les caoutchoucs synthétiques en silicone ou en EPDM ou même le PTFE sont parmi les revêtements ayant un comportement satisfaisant [6], [11]. Certains types d'isolateurs composites comportent une gaine faite d'un matériau isolant, entre le noyau et les jupes. Cette gaine fait partie du revêtement.

I.2.3.3 Interface

Une interface est la surface de contact entre les matériaux différents. Dans le cas des isolateurs composites, il existe plusieurs interfaces [20]:

- Entre fibres de verre et résine d'imprégnation ;
- Entre charge et matrice du polymère ;
- Entre noyau et revêtement ;
- Entre les diverses parties du revêtement : entre jupes, ou entre gaines et jupes ;
- Entre revêtement, noyau et pièces d'extrémité ;

I.2.3.4 Pièces d'accrochage

En générale métalliques, elles sont fixées au noyau pour transmettre les charges mécaniques [20].

I.2.4 Caractéristiques

Les isolateurs composites présentent plusieurs avantages, comme leur faible coût [21], leur faible poids qui facilite leur transport et assemblage et qui permet aussi la construction des pylônes plus légers et compacts [22], leur résistance à la destruction, et surtout, ils présentent un bon comportement sous pollution, et peuvent donc être employés dans les zones fortement polluées [7], [16], [17], [23], [24]. Ce qui leur donne cette caractéristique remarquable est : leur caractère hydrophobe [2]–[4], [16], [25].

Il existe plusieurs matériaux composites utilisés dans l'isolement des réseaux électriques, nous citons - par ordre décroissant, les produits émergeants les plus utilisés : le silicone - *Silicone rubber* (SiR) sous ses trois formes : *room temperature vulcanized* (RTV), *high temperature vulcanized* (HTV) appelé parfois *high consistency rubber* (HCR) et *liquid silicone rubber* (LSR), l'EPR, l'EPDM, l'éthylène-acétate de vinyle (EVA), l'époxy, le PTFE, le polyéthylène (PE), etc. [16]. Dans l'isolement externe des lignes aériennes à hautes tension, on distingue généralement deux principales classes d'isolateurs composites : les isolateurs en EPDM, et ceux en silicone (HTV, LSR et RTV).

Les isolateurs en silicone sont de 20 à 30% plus chers que les autres produits concurrents tels que l'EPDM [16]. Ces derniers et contrairement au isolateurs en silicone ne restent pas typiquement hydrophobes, mais se détériorent en devenant hydrophiles après une période courte d'utilisation, comparée à celle du silicone.

Il convient de noter qu'une des caractéristiques importantes des isolateurs en silicone est le «zéro maintenance (pas de lavage)». L'origine de cet avantage est le phénomène de transfert de l'hydrophobicité : la pollution adhère au revêtement en silicone de l'isolateur et devient aussi hydrophobe que le silicone lui-même [1], [16], [26].

I.3 Hydrophobicité

L'hydrophobicité d'un matériau est définit comme étant sa propriété à résister à l'écoulement de l'eau sur sa surface, ou autrement dit, sa résistance à la formation d'un film continu d'eau

sur sa surface [27]. Le caractère hydrophobe de la surface d'isolateurs composites (**Figure 2**) est l'un des paramètres les plus critiques affectant leurs performances à long terme [1], [25].

Figure 2. Surface d'une ailette découpée à partir d'une chaine d'isolateurs composites en silicone et recouverte de gouttelettes d'eau.

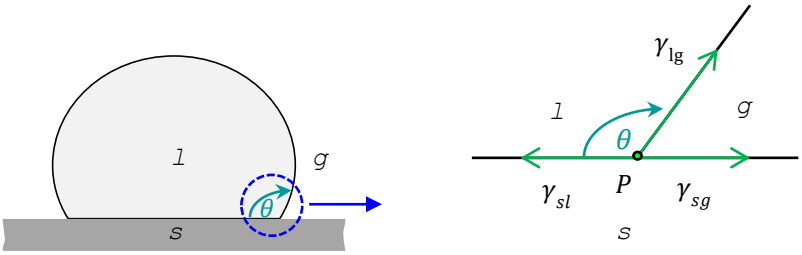
I.3.1 Angle de contact

Différentes techniques ont été mises en œuvre pour déterminer les propriétés de surface des solides. Beaucoup sont basées sur la mesure de l'angle de contact (θ) entre une goutte liquide et la surface du solide sur lequel elle s'appuie. Cette méthode a été décrite pour la première fois par Young en 1805. Ainsi, lorsque l'on dépose une goutte de liquide sur la surface d'un solide, une compétition entre l'énergie de cohésion des molécules de liquide et l'énergie d'adhésion entre le liquide et le solide aura lieu. Lorsque le travail de cohésion entre les molécules de liquide est supérieur au travail d'adhésion entre le solide et le liquide, la goutte de liquide forme un angle de contact fini avec la surface solide. Dans le cas contraire, la goutte s'étale [10]. Il est à noter aussi que le volume de la goutte influe considérablement sur sa forme. Une goutte plus grosse commence à sentir l'influence de la gravité et s'aplatit sous son propre poids [28].

L'équilibre du système (**Figure 3**) s'exprime par l'équation de Young [10], [25], [29] :

$$\gamma_{sl} + \left(\gamma_{\mathrm{lg}} \cdot \cos\theta\right) - \gamma_{sg} = 0 \qquad (1)$$

Où γ_{sl} est la tension de surface solide/liquide [N/m], γ_{lg} est la tension de surface liquide/gaz, appelée par convention tension de surface et notée γ_l [N/m], γ_{sg} est la tension de surface solide/gaz [N/m], elle est souvent considérée égale à l'énergie de surface solide γ_s.



(a) *(b)*

Figure 3. (a) Représentation d'une gouttelette liquide 'l' déposée sur une surface solide 's' dans un gaz environnant 'g', (b) Equilibre des forces s'exerçant sur le point P, entre les trois milieux.

I.3.2 Définitions

Tension de surface γ_l **:** elle provient d'excès d'énergie des molécules de surface, qui contrairement à ceux du volume, sont moins stabilisées par les interactions interatomiques [30]. Elle peut être définie comme étant l'énergie par unité de surface, ou bien la force par unité de longueur [29]. La notion de tension de surface peut se généraliser à tout type d'interface liquide/liquide, liquide/gaz, liquide/solide et solide/gaz [31].

Mouillage : désigne l'étalement d'une goutte déposée sur une surface solide. Il peut être défini par le paramètre d'étalement S qui mesure la différence entre l'énergie du système sec et l'énergie du système mouillé [29] :

$$S = \gamma_{sg} - (\gamma_{sl} + \gamma_l) \qquad (2)$$

- Quand $S > 0$ on parle de mouillage total, la goutte s'étale complètement ($\theta = 0$).
- Quand $S < 0$ on est en présence d'un mouillage partiel, la goutte forme une calotte sphérique en faisant un angle de contact, $\theta \neq 0$.

On considère une surface comme **hydrophobe** si $\theta > 90$ °, et **hydrophile** lorsque $\theta < 90$ °. On parle également de surface **super-hydrophobe** lorsque $\theta > 140$ ° [27], [29]. Grâce aux différentes techniques de fabrication et de traitement de surface, on arrive aujourd'hui à obtenir des matériaux dont l'angle de contact varie entre 150 et 170 °. Cependant la propriété super-hydrophobe reste, généralement, limitée à une fine couche superficielle du matériau [32].

I.3.3 Transfert et recouvrement de l'hydrophobicité

L'hydrophobicité des matériaux composites en silicone est due à ce qu'on appelle les substances à faible poids moléculaire - *Low Molecular Weight polydiméthylsiloxane* (LMW PDMS). La structure chimique des PDMS est illustrée sur la **Figure 4**. Ces substances possèdent des groupes de méthyle (CH_3) latéraux qui sont responsables de l'hydrophobicité du matériau. La chaine principale contient des liaisons du groupement Siloxane (Si-O-Si) qui confèrent au matériau une flexibilité de la chaine, ces liaisons lui confèrent également une bonne stabilité thermique [33]. Les PDMS sont opaques à l'origine. La couleur grise des isolateurs en silicone est due aux additifs chimiques comme le tri-hydrate d'alumine - *Alumina trihydrate* (ATH) qui sont ajoutés avant le processus de vulcanisation [34]. Il est important de mentionner ici que d'autres additifs "nano" ou "micro" (de l'ordre du nanomètre ou du micromètre) peuvent être ajoutés comme le dioxyde de silicium (poudre de quartz) (SiO_2) - *Silicon dioxide* (Silica) [35]. Les LMW PDMS sont produites soit par polymérisation lors du processus de fabrication du matériau et/ou lors de sa dégradation (par exemple la scission des chaines à poids moléculaire élevé - *High Molecular Weight* (HMW) [36], [37].

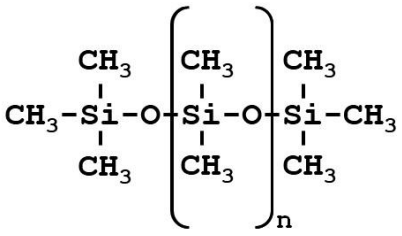


Figure 4. Structure chimiques des PDMS.

Les principaux mécanismes de recouvrement de l'hydrophobicité du matériau sont la diffusion des LMW PDMS du volume vers la surface, et la réorientation des groupes de méthyle non polaires vers la surface [33], [38].

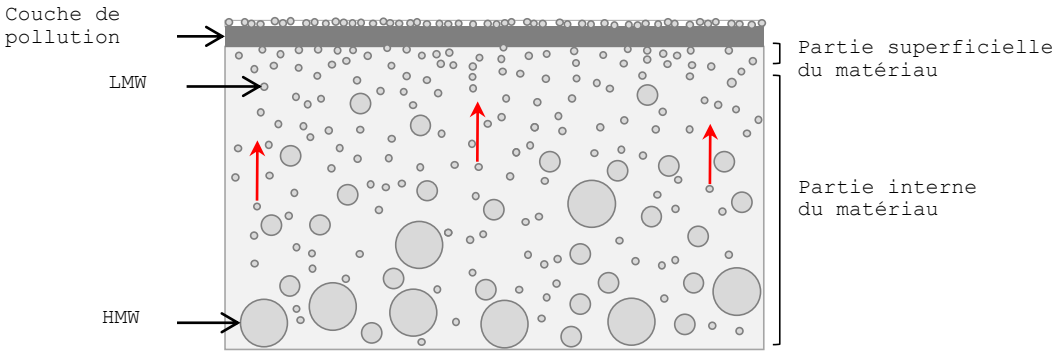


Figure 5. Diffusion des LMW PDMS à partir du volume du matériau en silicone vers sa surface polluée.

Le transfert d'hydrophobicité est souvent décrit comme une diffusion des LMW PDMS dans la couche de pollution [36], [39]. Ainsi, l'angle de contact d'une surface en silicone polluée est généralement plus élevé que si la surface est propre ou neuve. Le retour d'expérience des isolateurs composites après 10 ans de service dans une ligne à 420 kV a montré que ces derniers possèdent une valeur très élevée d'angle de contact : autour de 140 ° sur la surface supérieure de l'ailette, autour de 115 ° sur la surface inférieure de l'ailette, environ 105 ° après nettoyage de l'ailette, et 110 ° quand les isolateurs sont neufs. Ces valeurs confirment l'avantage du phénomène de transfert de l'hydrophobicité, et justifie la pratique courante de ne pas nettoyer les isolateurs composites en silicone si un transfert d'hydrophobicité aura lieu [22].

I.4 Dynamique des gouttes sous champ électrique

Le comportement d'une goutte dans un champ électrique a fait l'objet de plusieurs études et une abondante littérature traite cet aspect [2], [14], [30], [40]–[47]. Dans l'équilibre statique, l'interface gaz/liquide d'une gouttelette d'eau déposée sur une surface solide est soumise à l'action des forces suivantes (exprimées par unité de surface) [48]:

I.4.1 Principales forces

I.4.1.1 Force due à la tension de surface

Elle est donnée par l'**équation (3)** :

$$\vec{F}_\gamma = -\gamma_l \cdot \left(\frac{d\theta}{d\bar{s}} + \frac{\sin\theta}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right) \cdot \vec{n} \qquad (3)$$

Avec

$$d\hat{s} = \sqrt{dr^2 + dz^2} \tag{4}$$

Et

$$\begin{cases} \dfrac{dx}{d\hat{s}} = \cos\theta \cdot \cos a \\ \dfrac{dy}{d\hat{s}} = \cos\theta \cdot \sin a \\ \dfrac{dz}{d\hat{s}} = \sin\theta \end{cases} \tag{5}$$

Où $\hat{s}$ est la longueur d'arc du profil de la gouttelette dans le plan défini par $\vec{r}$ et $\vec{z}$ (**Figure 6**), θ et a sont les coordonnées dans le système sphérique, avec : $0 \leq \theta \leq 180$ ° et $-90° \leq a \leq +90°$.

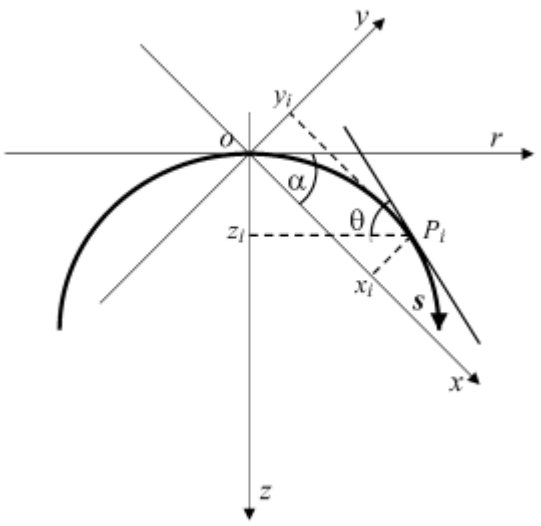


Figure 6. Représentation axisymétrique de la gouttelette d'eau sur le plan définit par $\vec{r}$ et $\vec{z}$ [48].

I.4.1.2 Force de gravité

Dépend de la masse de la gouttelette. Si la masse augmente, l'effet de la force due à la gravité augmente, la gouttelette s'aplatit (dans la direction de l'axe z) (**Figure 6**) ce qui réduit son angle de contact θ. La force due à la gravité est donnée par :

$$\vec{F}_g = g \cdot \Delta\rho \cdot z \cdot \vec{n} \qquad (6)$$

Où g est l'accélération due à la gravité, $\Delta\rho$ est la différence de densité à travers l'interface gaz/liquide, z est la hauteur de la gouttelette, $\vec{n}$ est un vecteur unitaire normal à un élément de l'interface gaz/liquide.

I.4.1.3 Forces dues à la différence de pression

Ces forces résultent de la différence de pression Δp entre le liquide et le gaz. Elles sont exprimées par :

$$\vec{F}_p = \Delta p \cdot \vec{n} \qquad (7)$$

I.4.1.4 Forces électriques

Quand un champ électrique est appliqué parallèlement à la surface de l'isolant solide sur lequel la gouttelette est déposée, cette dernière subie les forces du champ (**Figure 7**) qui sont exprimées d'après le tenseur de Maxwell par l'ensemble d'équations suivant :

$$\begin{cases} T_n = \dfrac{1}{2}\left[\left(1-\dfrac{\varepsilon_l \cdot \sigma_g^2}{\varepsilon_g \cdot \sigma_l^2}\right)\varepsilon_g E_{ng}^2 - \left(\varepsilon_g - \varepsilon_l\right)E_{tg}^2\right] \\ T_t = \left(1-\dfrac{\varepsilon_l \cdot \sigma_g}{\varepsilon_g \cdot \sigma_l}\right)\varepsilon_g E_{ng} E_{tg} \end{cases} \qquad (8)$$

Où ε et σ sont respectivement la permittivité et la conductivité électrique du milieu correspondant, E est l'intensité du champ électrique, les indices n et t signifient respectivement la normale et la tangente des composantes de force à l'interface gaz/liquide.

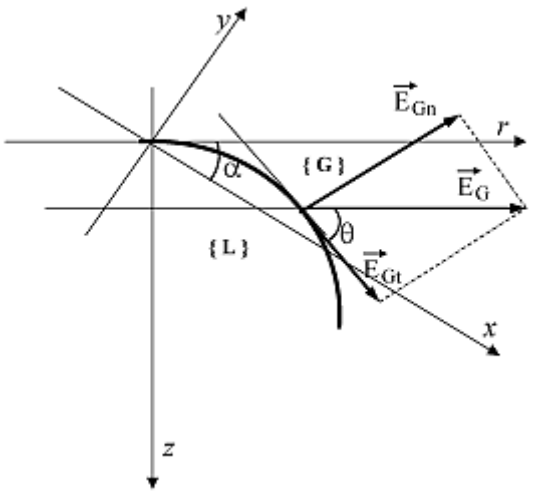


Figure 7. Composantes normale et tangentielle du champ électrique sur l'interface gaz/liquide de la gouttelette d'eau [48].

La goutte acquiert à son interface des charges électriques et subit ainsi l'action d'une force électrique, qui au-delà d'une certaine valeur de seuil tend à la faire déformer, vibrer ou même déplacer de son état de repos [43], [49], les travaux de Taylor ont montré qu'une goutte soumise à un fort champ électrique pouvait de même développer des pointes appelées "cônes de Taylor" [28]. Cela est régi par des phénomènes de l'électrohydrodynamique (EHD)[2], dont on peut citer : la diélectrophorèse, l'électrodéformation, l'électrostriction, l'électrothermique, l'électromouillage, etc. [42].

Le comportement des gouttelettes d'eau sous champ électrique alternatif est différent de celui en continu [44]. Ce comportement sous l'influence d'un champ électrique, et l'apparition de décharges partielles jouent un rôle primordial dans le processus du contournement des isolateurs composites comme nous allons le voir dans ce qui va suivre.

I.5 Contournement des isolateurs composites

Lors du processus qui mène au contournement[3] des isolateurs composites, des décharges partielles s'amorcent au niveau des points de contact triple (pièce métallique d'accrochage/air/diélectrique solide) et/ou (gouttelettes d'eau/air/diélectrique solide) pour

[2] Les phénomènes EHD régissent la dynamique des fluides sous l'effet d'un champ électrique.
[3] Le contournement est une décharge disruptive extérieure à l'isolateur se produisant, entre les parties soumises à la tension de service, le long de la surface isolante ou dans l'air près de l'isolateur [20].

ensuite s'allonger selon certains mécanismes. Aussi, il nous semble important de donner un rappel sur les décharges partielles surfaciques notamment la décharge corona.

I.5.1 Apparition des décharges partielles aux bords des gouttelettes

Une décharge corona, ou effet corona, est une décharge électrique qui se produit lors de l'ionisation de l'air, qui dans les conditions normales, est un milieu isolant [50]. Elle s'établit à des pressions gazeuses assez importantes (de l'ordre de la pression atmosphérique) dans un champ électrique non uniforme qui peut être obtenu par différentes configurations. Elle se manifeste sous forme de lueur bleue, qui apparait autour de l'électrode à faible rayon de courbure, car c'est là où le champ électrique devient intense (par effet ou "pouvoir" de pointe) [51]–[54]. La décharge corona apparait seulement en champ non uniforme, en champ uniforme, on assiste directement à un claquage. Ses conditions d'établissement dépendent de plusieurs facteurs : nature, température, humidité, densité et pression du gaz utilisé ; nature des électrodes, distance inter-électrodes, rayon de courbure, nature de la tension appliquée, etc. [55], [56].

Au bout d'une certaine tension électrique appliquée, des décharges partielles apparaissent sur la surface des gouttelettes ou au niveau de l'interface entre la gouttelette, le diélectrique et l'air. Ces décharges sont aussi appelées : *water drop corona*. Les conditions d'amorçage dépendent entre-autres du champ critique d'instabilité de la gouttelette. Cette instabilité peut être caractérisée par :

- La formation de pointes côniques ;
- Le développement des filaments à la surface ;
- L'éclatement de la gouttelette en deux ou plusieurs autres petites gouttelettes ;

Le mécanisme physique d'amorçage des décharges aux bords des gouttelettes est assez bien expliqué par la théorie des streamers en champ non-uniforme [44]. Toutefois, les différents travaux dans la littérature [1], [22], [57] ont montré que le seuil d'apparition de l'effet corona à la surface d'isolants en silicone en présence de gouttelettes d'eau est entre 3 kV/cm à 5 kV/cm voir même 7 kV/cm. Ces valeurs seuils sont intimement liées au volume des gouttelettes et à l'angle de contact.

Notons que la distance entre les gouttelettes influe considérablement sur le seuil d'apparition de la décharge corona et la localisation de la génération des décharges partielles [58], [59].

Plusieurs travaux [44], [57]–[62] ont montré que les décharges partielles apparaissent au niveau du point de contact triple : isolateur, air et gouttelette. Cependant lorsque la distance de séparation entre gouttelettes est de l'ordre de quelques millimètres, l'amorçage des décharges aura lieu sur la surface des gouttelettes, bien plus haut que le point triple.

I.5.2 Mécanisme du contournement des isolateurs hydrophobes

La **Figure 8** illustre le processus - simplifié - du contournement des isolateurs hydrophobes [2], [3] :

Dans la première phase, on assiste à la formation des gouttelettes d'eau sur la surface de l'isolateur, la couche de pollution soluble se dissout dans les gouttelettes d'eau, qui deviennent alors conductrices (**Figure 8 (a)**).

La région humide autour de chaque goutte d'eau augmente par diffusion, ce qui conduit à la formation des zones de conductivité élevée (**Figure 8 (b)**). La diffusion se poursuit au point que les zones humides se fusionnent, et de petites valeurs de courants de fuite commencent à circuler dans plusieurs chemins différents. L'effet Joule sèche certaines zones humides et finalement un équilibre est atteint entre l'évaporation et le mouillage. La faible conductivité de la surface de l'isolateur persiste entre les zones humides.

Sous l'action du champ électrique les gouttelettes d'eau ont tendance à s'allonger sous forme de filaments, et s'aplatir sur la surface de l'isolateur (**Figure 8 (c)**).

Le champ devient intense aux extrémités des filaments d'eau, ce qui donne naissance à des décharges partielles *"spots"* distribuées aléatoirement sur la surface de l'isolateur (**Figure 8 (d)**).

Les décharges partielles surfaciques peuvent éroder l'hydrophobicité, conduisant à la création de zones humides irrégulières. Les gouttelettes continuent à s'aplatir sous l'action du champ, ce qui favorise le processus de mouillage. Les régions mouillées restent entourées de couches à faible conductivité qui sont encore couvertes par des gouttelettes (**Figure 8 (e)**).

La phase finale résulte de la combinaison de la croissance des filaments d'eau et la formation des zones humides, qui peut éventuellement court-circuiter l'isolateur à travers un chemin électrolytique conducteur. Un arc peu se propager le long de ce chemin, provoquant ainsi le contournement de l'isolateur (**Figure 8 (f)**).

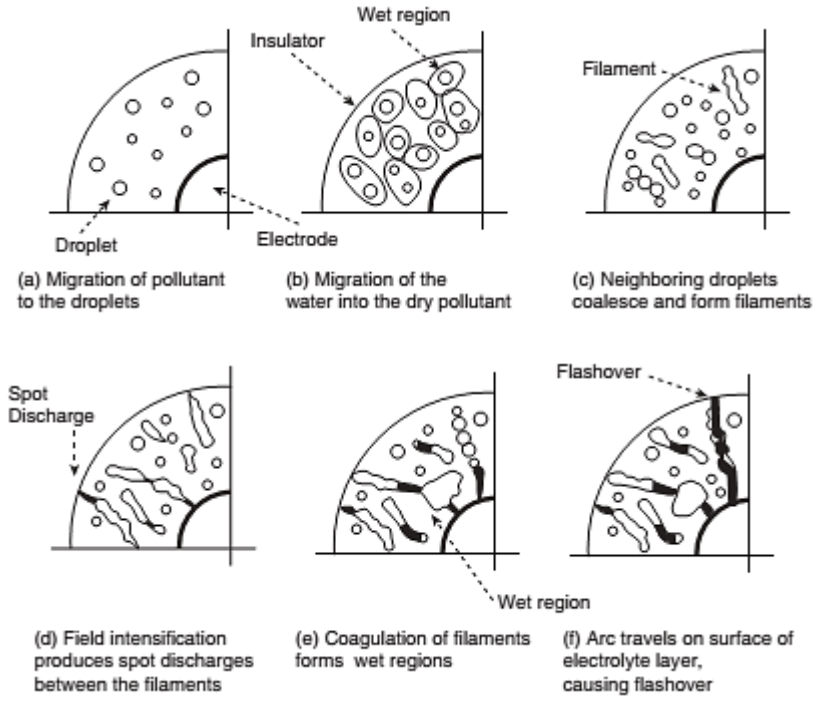


Figure 8. Phases de contournement sous pollution d'une surface hydrophobe [2].

Il a été montré que la tension de contournement sous pollution des isolateurs composites est plus grande que celle des isolateurs classiques (en verre et en porcelaine) [63]–[65]. Pour les isolateurs composites, la tension de contournement (en AC) dépend de la répartition de l'hydrophobicité le long de la chaine [66]. Il a été rapporté que l'arc électrique du contournement consomme une partie des LMW PDMS qui se trouvent sur la surface de l'isolateur et qui sont responsables de l'hydrophobicité du matériau [67]. C'est probablement la raison pour laquelle l'hydrophobicité du matériau diminue quand ce dernier subit un contournement sur sa surface.

Le mécanisme de contournement des isolateurs composites lorsqu'ils sont hydrophobes, est différent à celui des isolateurs classiques qui sont hydrophiles d'origine qui sera présenté dans § **I.5.3**. Cette différence est due à l'hydrophobicité du matériau. Par conséquent, lorsque les isolateurs composites perdent leur hydrophobicité - suite au vieillissement par exemple - leur mécanisme de contournement devient similaire à celui des isolateurs classiques.

I.5.3 Mécanisme de contournement des isolateurs hydrophiles

Le phénomène de contournement est le résultat d'une évolution qui peut être présentée comme suit [1]–[4], [68], [69]:

Phase 1 : Humidification de la couche de pollution et circulation d'un courant de fuite : après l'humidification de la couche de pollution, on assiste à la formation d'un électrolyte qui couvre la partie isolante, cela donne naissance à un courant de fuite qui circule à travers ce dernier. Ce courant provoque un échauffement de l'électrolyte qui a pour effet d'accroître la conductivité électrique du milieu et par suite le courant (**Figure 9 (a)**).

Phase 2 : Echauffement de l'électrolyte et apparition des bandes sèches : l'échauffement croissant provoque un assèchement local de la couche de pollution. Les lignes de courant se trouvent en constriction et la densité de courant augmente en valeur notamment dans les bords de la zone sèche, à ce stade on peut enregistrer des valeurs de courant dans l'ordre de 10 à 100 mA. La zone sèche a tendance à s'étendre latéralement jusqu'à l'interruption complète du courant (**Figure 9 (b)**).

Phase 3 : Apparition des arcs locaux et élargissement des bandes sèches : la tension se trouve reportée aux bornes de la bande sèche et des arcs locaux sont susceptibles de s'amorcer. Au voisinage des pieds d'un arc local, la constriction des lignes de courant conduit à un élargissement de la bande sèche (**Figure 9 (c)**).

A partir de ce stade, trois cas peuvent se présenter selon les contraintes auxquelles est soumis l'isolateur :

- ***Arc fugitif*** **:** l'arc électrique s'éteint rapidement, puis se réamorce à un autre endroit et ainsi de suite. Ceci engendre une faible perte d'énergie du réseau électrique (**Figure 9 (d)**) ;

- ***Arc permanent*** **:** l'arc électrique se fixe sur la surface de l'isolateur, soit en s'y maintenant (courant continu), soit en se réamorçant au même endroit (courant alternatif). Cet arc peut entraîner par effet thermique, une dégradation de l'isolateur (**Figure 9 (e)**) ;

- ***Allongement longitudinal*** **:** l'arc s'allonge longitudinalement jusqu'à court-circuiter l'isolateur (**Figure 9 (f)**) ;

Ce qui a été dit ci-dessus est résumé ci-dessous par le schéma de la **Figure 9**. Afin de bien assimiler le processus de contournement, l'isolateur est présenté comme étant une plaque rectangulaire.

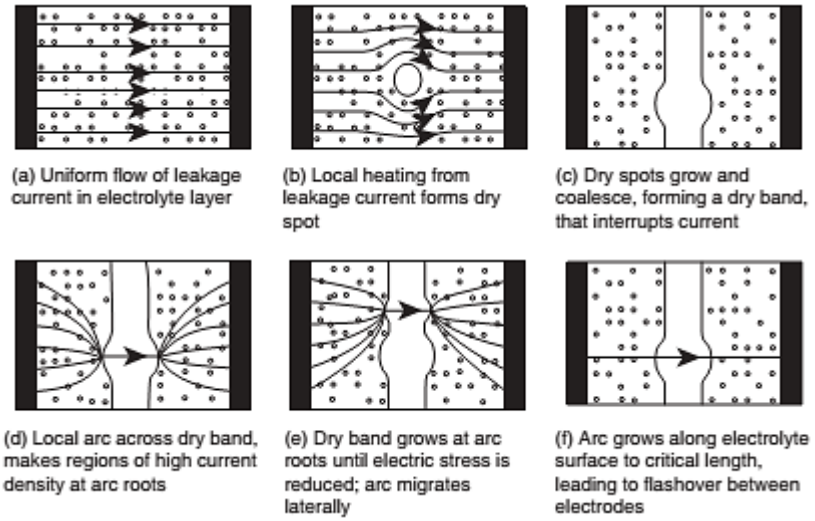


Figure 9. Phases de contournement sous pollution d'une surface hydrophile [2].

I.6 Conclusion

Ce chapitre a porté sur des généralités concernant les isolateurs composites en silicone. Nous avons premièrement présenté leurs structures. Nous avons par la suite présenté l'hydrophobicité qui est considérée comme propriété clé dans la tenue diélectrique surfacique des isolateurs en silicone, notamment dans les milieux fortement pollués. Nous avons vu que cette propriété confère aux isolateurs en silicone un autre mécanisme de contournement où la présence de gouttelettes d'eau en joue un rôle primordiale. Les décharges partielles surfaciques, notamment la décharge corona se trouvent mieux avantagées en présence de gouttelettes d'eau. Nous allons voir dans le chapitre suivant que ces décharges contribuent à la dégradation des propriétés des isolateurs et mènent à leur vieillissement. Nous allons également voire l'impact des contraintes atmosphériques - auxquelles les isolateurs en silicone sont exposés - sur le vieillissement.

Chapitre II : Le phénomène de vieillissement des isolateurs composites : état de l'art.

II.1 Introduction

Ce chapitre présente principalement un recueil sur l'état de l'art et les connaissances acquises jusqu'à ce jour sur le phénomène de vieillissement des isolateurs composites notamment ceux en silicone. Une attention particulière sera accordée aux méthodes de diagnostic de l'état de santé de ces isolateurs.

II.2 Limites des isolateurs composites

Durant le service, les isolateurs doivent assurer leur fonction vis-à-vis des contraintes électriques comme : la tension de service de la ligne, les surtensions temporaires comme les chocs de manœuvre - *Basic Switching Impulse Insulation Level (BSL)* et les chocs de foudre - *Basic Lightning Impulse Insulation Level (BIL)* [70], et les décharges partielles surfaciques et volumiques. Des contraintes mécaniques, qui sont les charges mécaniques auxquelles ils sont soumis, par exemple : poids des conducteurs et du givre, action du vent, tension mécanique des conducteurs éventuellement [6]. Et enfin, des contraintes atmosphériques, comme : la pollution du site, les rayonnements UV et la température.

À part des caractéristiques précédentes, l'isolateur doit avoir un bon comportement thermique comme : la capacité à dissiper la chaleur, et la capacité à supporter les variations brusques de la température [71].

Malgré leurs avantages cités précédemment dans le chapitre I, les isolateurs composites présentent des inconvénients qui limitent leur usage comme la fracture du noyau en fibre de verre [72] et leur sensibilité au vieillissement. Le vieillissement peut causer la détérioration des propriétés surfaciques du matériau de revêtement comme l'hydrophobicité et également les propriétés des interfaces comme noyau/revêtement. Ceci peut conduire à la réduction du pouvoir isolant de l'isolateur amenant ainsi au contournement ou à la perforation.

II.3 Phénomène de vieillissement des isolateurs composites

Le vieillissement est défini comme étant une altération lente et irréversible du matériau dans les conditions de service, impliquant sa structure, sa morphologie ou sa composition, et amenant à une perte de ses propriétés fonctionnelles. Ces évolutions peuvent être dues à une instabilité propre au matériau ou à son environnement [11].

II.3.1 Impact des contraintes électriques

Les principaux mécanismes qui conduisent au vieillissement sous contrainte électrique, et qui sont susceptibles de provoquer une rupture de l'isolant sont : les arborescences électriques, et les décharges partielles. Ces dernières ont pour origine soit des cavités gazeuses au sein de l'isolant, des cavités entre les jupes et les pièces d'accrochages métalliques, des décharges surfaciques, et en fin des décharges corona.

La décharge corona est considérée comme étant un facteur inestimable dans la dégradation de la surface et la perte d'hydrophobicité des isolateurs composites [35], [46], [47], [59], [73], [74]. Cette dégradation de surface est principalement due à : l'action des électrons libres et ions, et des rayonnements UV très énergétiques qui bombardent la surface [35], [74]. Il en résulte la formation des espèces comme l'ozone (O_3), le gaz de méthane (CH_4), les couches de SiO_x - *Silica-like layer* -, les radicaux d'hydroxyle, etc. [22]. Les gouttelettes d'eau présentes à la surface d'un isolateur composite deviennent le siège des décharges corona suite à l'intensification du champ électrique (**Figure 10**) [14], [19], [34], [44], [57], [58], [75], [76]. Cependant, si la décharge corona est temporaire, l'isolateur en silicone peut recouvrir son hydrophobicité grâce à la diffusion des LMW PDMS du volume vers la surface [1].

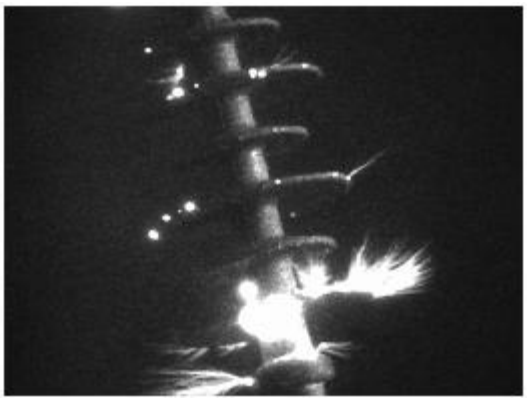


Figure 10. Décharges corona à la surface d'un isolateur composite [75].

Il existe une contradiction dans la littérature sur le rôle joué par la décharge corona sur le recouvrement de l'hydrophobicité. N. Yoshimura *et al.* [77] affirment qu'un traitement par corona accélère le processus de recouvrement de l'hydrophobicité par activation des LMW. L'intensité et le temps d'application de la décharge corona sont aussi des facteurs principaux en termes de dommage qu'ils causent [22]. La perte de l'hydrophobicité dépend de l'intensité de la décharge pendant le traitement du matériau par la décharge corona [78], les auteurs ont

noté que le matériau est devenu hydrophobe après 12 min de traitement avec une intensité de 7 kV (rms). Le recouvrement de l'hydrophobicité demande plus de temps que celui nécessaire pour sa perte, cet état est atteint après environ 100 h. Ces mêmes auteurs excluent l'effet de l'épaisseur du matériau sur le processus de recouvrement de l'hydrophobicité. Une autre étude a montré que le taux de recouvrement de l'hydrophobicité est initialement important, puis diminue avec le temps, le recouvrement total a nécessité une durée de 20 jours [79].

En ce qui concerne le rôle joué par le temps de traitement par l'effet corona sur la dynamique du recouvrement, Y. Liang *et al.* [80], ont remarqué que le taux de recouvrement de l'hydrophobicité passe par quarte périodes : "augmentation (0-4 h)-diminution (4-24 h)-augmentation (24-48 h)-diminution (48-72 h) ", le recouvrement est plus important dans les premiers temps de repos puis commence par décroitre. En observant le changement de la surface du matériau, les auteurs rapportent que la dynamique de recouvrement dépend aussi des variations physiques et chimiques de la surface. Dans une autre investigation sur la relation entre la durée de traitement par corona et le phénomène de recouvrement de l'hydrophobicité [81], il a été montré que, pour certaines durées de traitement, la valeur de l'angle de contact après le recouvrement dépasse celle de l'état initial.

M. Gubanski et ses collaborateurs ont étudié l'impact de la décharge corona en régime alternatif (AC), et permanent (DC) sur la surface des échantillons en HTV et en LSR. Différents outils ont été utilisés pour la caractérisation de l'état de surface [74]. Mis à part le dommage dans la surface des échantillons, une influence sur leurs tensions de contournement a été enregistrée. P. Vinod *et al.* [79] ont montré qu'une décharge corona en régime DC^+ cause plus de dommage thermique à la surface de silicone, suivie par le régime DC^- et le régime AC. Ces auteurs ont trouvé que la tension seuil d'initiation de la décharge corona au bord d'une gouttelette d'eau en DC est supérieure à celle en AC.

II.3.2 Impact des contraintes atmosphériques

Durant l'exploitation, les isolateurs en silicone sont soumis à de différentes contraintes telles que : le champ électrique, la pluie (parfois acide), l'humidité, la neige, la lumière solaire, la pollution de l'air, les colonisations biologiques, les tempêtes de sable, etc. Par conséquent, les performances des isolateurs sont dégradées, et il devient plus vulnérables aux facteurs externes tels que corona, décharges partielles en surface, arcs en bande sèche, absorption d'humidité par le matériau du revêtement, etc.

Le vieillissement des isolateurs composites au cours de leur vie en service est un phénomène complexe en raison de la synergie des facteurs impliqués, par exemple : électriques, mécaniques, thermiques et environnementaux. De nombreux chercheurs préfèrent étudier séparément l'action de chaque facteur afin de mieux comprendre le phénomène de dégradation. Dans ce contexte, l'effet du champ électrique, des décharges corona, de la température, des rayonnements UV, de l'humidité, des pluies acides, de la pollution et d'autres facteurs a fait l'objet des études approfondies.

II.3.2.1 Température

Les isolateurs en silicone sont parfois exposés à des conditions de température extrêmes qui peuvent dans certaines régions atteindre jusqu'à 88 °C [82]. Cependant, le soleil n'est pas la seule source de chaleur à laquelle les isolateurs en silicone sont exposés. En fait, les décharges partielles surfaciques, en particulier les arcs en bandes sèches, constituent une autre source de chaleur ; des températures supérieures à 400 °C ont été enregistrées sur la surface de l'isolateur au cours d'une activité d'arc en bande sèche [67]. Pour faire face aux effets du courant de fuite, une nouvelle approche qui consiste en l'utilisation des isolateurs composites avec un revêtement texturé a été proposée [83]. M. Zhao *et al.* [9] ont étudié, par la suite, l'influence des différentes formes de textures réalisées, par gravure par laser, sur l'hydrophobicité du silicone.

En raison de la chaleur provenant du conducteur de ligne, la partie de la chaine d'isolateurs en contact avec le conducteur est normalement portée à une température plus élevée que le reste de la chaine. Cependant, O. Fujii *et al.* [84] ont suggéré, à travers des essais au laboratoire, que cette chaleur n'est pas en mesure de réduire la tenue au claquage de l'isolateur en porcelaine. Contrairement aux céramiques, les polymères composites présentent une faible conductivité thermique qui réduit leur pouvoir à dissiper la chaleur [85]. Toutefois, l'effet de la température du conducteur sur les caractéristiques des isolateurs composites n'est toujours pas clair, à notre connaissance, vu l'absence de documentation sur ce sujet.

Q. Wang *et al.* [86] ont comparé l'hydrophobicité et son transfert des trois principaux types de silicone (HTV, LSR et RTV), soumis à une contrainte thermique allant de 90 à 175 °C pendant 60 jours. Leurs résultats ont montré que le transfert de l'hydrophobicité est affecté par la durée et le degré de la contrainte thermique. Ils ont montré également que le RTV présente une meilleure tenue à la contrainte thermique par rapport aux LSR et HTV.

H. Jahn *et al.* [39] ont également étudié l'influence de la température sur le mécanisme de transfert et de recouvrement de l'hydrophobicité en utilisant la mesure de l'angle de contact dynamique (l'angle d'avancée et l'angle de reculée). Leur étude consiste à appliquer un traitement par l'effet corona aux échantillons de silicone LSR pour leur faire perdre leur hydrophobicité, puis les stocker à des températures différentes. L'angle de contact dynamique est mesuré par la suite à différents moments au cours de stockage. Les résultats trouvés montrent que les températures élevées favorisent le processus de recouvrement de l'hydrophobicité ; en plus du mécanisme de diffusion des LMW PDMS vers la surface du matériau, le mécanisme de conduction en surface a été suggéré pour expliquer la dépendance entre l'hydrophobicité et la température.

Le travail de Z. Li *et al.* [87] qui a porté sur la dépendance de l'hydrophobicité du silicone à la température de sa surface, montre que la température favorise le mécanisme de transfert et de recouvrement de l'hydrophobicité suite à la diffusion des LMW PDMS du volume vers la surface du matériau. A. Ghambari-siahkali *et al.* [88], quant à eux, ont rapporté que la dégradation du silicone LSR suite à une contrainte hydrothermique est limitée à seulement 100 µm de sa surface, tandis que le volume du matériau reste intact.

J. W. Chang et R. S. Gorur [89] ont investigué le rôle joué par le mécanisme de rotation de la chaine principale dans le polymère sur le recouvrement de l'hydrophobicité. Leurs résultats montrent que ce mécanisme est dépendant de la température. Ces auteurs ont montré que la température présente un double effet : à des températures peu élevées (< 100 °C), le matériau en silicone est hydrophile, cependant à une température de 100 °C, le matériau recouvre son hydrophobicité. Pour ces auteurs, la première transition (1er cas) est due à la substitution des groupes de méthyle en surface par des groupes d'hydroxyle issus de l'humidité atmosphérique, ce qui donne un caractère polaire à la surface du matériau. La seconde transition (2eme cas) est provoquée à des températures plus élevées où les chaines cycliques formées subissent une seconde rotation conformationnelle exposant ainsi les groupes de méthyle (qui présentent un caractère hydrophobe) à la surface du matériau. Une autre étude de J. W. Chang et R. S. Gorur [90] a révélé une régénération des chaines LMW PDMS par un processus de scission des chaines HMW PDMS. Les auteurs soulignent le rôle joué par la température dans ce processus, notamment dans les températures élevées qui permet au silicone de conserver son hydrophobicité.

II.3.2.2Rayonnements ultraviolets (UV)

Le comportement des isolateurs en silicone, lorsqu'ils sont exposés à des rayonnements UV, a également fait l'objet de plusieurs études :

Y. Khan [91], a trouvé que les UV_A diminuent la tension de contournement (en AC) du silicone pour les deux cas : sec et humide. Cependant, dans son interprétation des résultats obtenus, l'auteur n'a pris en considération que le rôle joué par les UV_A, bien que son étude n'a pas investigué l'action isolé des UV_A, mais l'action combiné de la température, la tension, et des radiations UV_A avec deux intensités (1 et 4 mW/cm^2), selon des cycles de vieillissement qui ont durés environ 1000 h. Pour les silicones LSR, Y. Lin *et al.* [92] ont proposé un mécanisme de vieillissement par rayonnements UV_A autre que celui des silicones HTV.

M. T. Nazir et B. T. Phung [17] ont étudié le rôle joué par les additifs en SiO_2, leurs tailles (micro ou nano), et leur combinaison dans la résistance du silicone face à l'effet combiné des rayonnements UV_A, de la température, et de la tension électrique. Ils ont trouvé que cette combinaison de contraintes provoque une oxydation et une fissuration de la surface du matériau en silicone. Ils ont trouvé également que les échantillons en silicone chargés en nano-silica présentent une meilleure performance en terme d'hydrophobicité et de rugosité, par rapport à ceux en micro-silica, de ceux en nano-silica+micro-silica, ou ceux sans additifs. Par contre l'ajout des nano-silica au silicone semble augmenter les pertes diélectriques dans la fréquence industrielle.

F. Jin *et al.* [93] ont constaté l'apparition des pores sur la surface des échantillons en HTV lors d'un vieillissement simultané par rayonnements UV_B et température. Le nombre de pores et leurs rayons augmentent en fonction de la durée du vieillissement, ce qui fait augmenter la rugosité de surface. Ils ont montré que l'augmentation de la rugosité provoque une réduction de la tension de contournement (en AC). B. Venkatesulu et M. Joy Thomas [82] ont réalisé un vieillissement accéléré à long terme sur un isolateur en silicone ; l'effet combiné de la température, des rayonnements UV_B et de la tension électrique a été étudié. Les résultats trouvés indiquent que malgré le changement de certaines caractéristiques de l'isolateur tel que la rugosité de la surface, l'angle de contact, il n'y a pas eu un changement noté dans le courant de fuite ni dans la tension de contournement (en AC) sous les conditions sèche et humide pour les deux cas de cas de figures étudiés : isolant neuf et vieilli. Ainsi il a été montré que l'hydrophobicité du matériau ne dépend pas des LMW. Une même combinaison de contrainte a été appliquée pendant 1000 h sur des isolateurs en silicone par E. M. Savadkoohi *et al.* [94]

a abouti à des résultats différents, les résultats ont montré, généralement, une réduction de la tension de contournement (en AC) avec la durée de vieillissement. Cependant les auteurs n'ont pas mentionné la nature des rayonnements UV appliqués (UV_A, UV_B ou UV_C) ni le type des isolateurs en silicone utilisés dans leur étude (HTV, LSR ou autres).

A. Majzoobi *et al.* [95] ont investigué les effets d'application des rayonnements UV_C pendant une durée de 160 jours sur la tension de contournement des isolateurs en polymère. D'après leur étude, les radiations UV_C n'ont pas d'effet remarquable sur la tension de contournement de l'isolateur lorsqu'il est sec et propre. Cependant, lorsque l'isolateur est humide et pollué, l'effet des radiations UV_C sur la tension de contournement devient considérable. Ils ont trouvé aussi que la contamination déposée sur la surface de l'isolateur le protège contre l'action des radiations UV_C. I. A. Joneidi *et al.* [96] arrivent à la même conclusion pour un vieillissement par UV_C prolongé à 5000 h. Dans un autre travail, Z. Farhadinejad *et al.* [97] ont rapporté que l'application de rayonnements UV_C à l'isolateur avait un effet négligeable sur la valeur du courant de fuite (en AC) lorsque l'isolateur était sec et propre. Cependant, lorsqu'une couche de pollution humide est appliquée après l'exposition de l'isolateur aux rayonnements UV_C, l'effet des rayonnements devient plus évident.

II.3.2.3Absorption d'eau, et contamination

L'eau, l'humidité et les solutions aqueuses sont des facteurs importants qui peuvent amener à la défaillance des isolateurs composites. La diffusion de l'eau dans le revêtement extérieur et les différentes interfaces de l'isolateur en silicone peut entraîner une dégradation des propriétés diélectriques, électriques et mécaniques de l'isolateur [72], [98], [99]. L'eau peut causer la rupture des liaisons de Siloxane notamment à des valeurs de pH inférieures à 2,5 ou supérieures à 11 [38]. Plusieurs études ont été menées sur l'effet de la perméabilité du silicone à l'eau et aux autres solutions aqueuses sur les propriétés des différents matériaux.

De nombreux travaux basés sur la mesure du changement de poids du matériau en silicone suite à l'immersion dans l'eau et dans des solutions salines, ont montré que l'absorption de l'eau augmente en fonction du temps d'immersion et diminue en fonction de la conductivité de la solution saline [98], [100]–[103].

Y. Gao *et al.* [98] ont rapporté que le processus de diffusion de l'eau et des solutions salines dans le silicone obéit au modèle de diffusion de Langmuir. Pareil pour les résultats de Z. Wang *et al.* [104]. C. Wu *et al.* [101] ont démontré que l'augmentation du taux des additifs en ATH

favorise la perméation liquide du silicone. Dans un autre travail, Z. Wang *et al.* [102] ont également étudié les caractéristiques des additifs, le type de solution et sa température lors de l'absorption d'eau par le HTV silicone.

R. Barsch *et al.* [78], ont étudié le rôle joué par l'humidité sur l'hydrophobicité du matériau. Des spécimens en silicone de différentes épaisseurs (de 2 à 10 mm) ont été stockés dans un récipient d'eau à une température de 50 °C. Ces auteurs ont remarqué que plus l'épaisseur du matériau devienne importante moins est le temps de perte de l'hydrophobicité, ce temps est passé de 250 à 400 h pour des épaisseurs de 2 et 10 mm respectivement.

En ce qui concerne l'effet de la pollution, un grand nombre d'études y a été consacré durant ces dernières années :

L'influence de l'accumulation et la répartition de la pollution sur la surface de l'isolateur sur le champ électrique a été étudié [105], [106]. L'influence du champ électrique (en DC) sur l'accumulation de la pollution a été également étudié [24], [107]. E. M. Savadkoohi *et al.* [94] ont étudié l'influence de la non-uniformité de la pollution des isolateurs en silicone avec différents profils, et ont montré que plus le dépôt de pollution est non-uniforme, plus la tension de contournement (en AC) de l'isolateur est réduite. Z. Yang *et al.* [65] ont proposé une fonction puissance reliant la tension de contournement (en AC) à la densité du dépôt de sel équivalent (ESDD) des différents contaminants.

En utilisant la mesure de l'angle de phase entre la tension appliquée sur l'isolateur et le courant résultant, L. Yang *et al.* [108] ont étudié les caractéristiques du mouillage d'un isolateur composite et des isolateurs classiques, pollués artificiellement.

Z. Zhijin *et al.* [109] ont étudié les performances (en AC) des plaques en silicone exposées au brouillard salin, en utilisant des mesures physicochimiques et électriques. Leurs mesures ont montré que les échantillons non alimentés en tension présentent une meilleur hydrophobicité par rapport aux échantillons alimentés en tension durant le brouillard salin, le champ électrique a été suggéré comme facteur engendrant la réduction de l'hydrophobicité via les décharges partielles surfaciques qui détruisent la structure moléculaire de la surface. Les mesures physicochimiques ont montré une baisse, avec le temps de l'exposition au brouillard, dans le nombre des groupes de méthyle responsables de l'hydrophobicité. Les mesures diélectriques ont montré une augmentation des pertes diélectriques dans les basses fréquences en fonction du temps d'exposition et de la conductivité du brouillard, la tension de

contournement des échantillons quat à elle est inversement proportionnelle à ces deux derniers paramètres.

Une analyse de l'accumulation naturelle de pollution sur des chaines d'isolateurs composites exploitées dans une ligne HVDC de 800 kV pendant 3 ans a été faite par Z. Zhang *et al.* [107]. Les résultats ont montré une non-uniformité dans la répartition de la pollution le long de la chaine, les parties les plus susceptibles au dépôt de pollution ont été déterminées. La face supérieure de l'ailette accumule plus de pollution que la face inférieure, la face à l'abri du vent accumule plus de pollution que la face qui en est exposée, et finalement, le côté près de la haute tension et le côté près de la terre accumulent plus de pollution que la partie centrale de la chaine. Ces observations ont été par la suite confirmées par des essais de pollution via une soufflerie - *Wind tunnel* - et l'influence de la vitesse du vent et du diamètre des particules de pollution et de l'humidité relative sur l'accumulation de la pollution a été étudiée. Une partie de ces essais a été par la suite reprise par X. Qiao *et al.* [24] qui ont comparé la densité du dépôt non-soluble (NSDD) de la pollution (constituée de SiO_2) entre des isolateurs composites alimentés en tension continue et d'autres non alimentés. Ils se sont aperçus que ces derniers accumulent moins de pollution par rapport aux autres, aussi l'accumulation de la pollution augmente avec l'augmentation de la tension appliquée.

Bien que les isolateurs en silicone présentent une faible capacité à accumuler les dépôts de pollution à leurs surfaces, les essais d'A. Nosseir *et al.* [23] ont montré que les tempêtes de sables provoquent une augmentation de la rugosité de surface suite à l'érosion par chocs avec les particules de sable. Par conséquent, la capacité de l'isolateur à accumuler la pollution s'accroît.

Un autre genre de pollution qui mène au contournement et provoque des pannes majeures dans les lignes aériennes est la pollution due aux fientes d'oiseaux, notamment les rapaces. Ce type de contournement - *Bird streamer flashover* - est plus fréquent sur les lignes de transport que sur les lignes de distribution [110]. H. j. West *et al.* [111] ont mesuré la conductivité des fientes d'aigles, de faucons et de balbuzards, et ont trouvé qu'elle varie de 8,33 à 33,33 mS/cm.

Les isolateurs en silicone sont également sujets aux colonisations biologiques sur leurs surfaces, notamment dans les zones tropicales et subtropicales qui sont caractérisées par une forte humidité et pluviométrie ainsi que des rayonnements solaires intenses. Les algues vertes sont les espèces principales parmi les bio-contaminants, elles présentent un caractère

hygroscopique, et qui peuvent détruire l'hydrophobicité des isolateurs en présence d'humidité [112]. D'autres espèces peuvent aussi exister comme les : *fungi*, *lichen* et *protozoa* [113].

II.4 Manifestation du vieillissement des isolateurs composites

Suite aux différentes contraintes exercées pendant le service, plusieurs phénomènes de dégradation peuvent apparaître au cours du vieillissement des isolateurs composites. La **Figure 11** en montre quelques exemples.

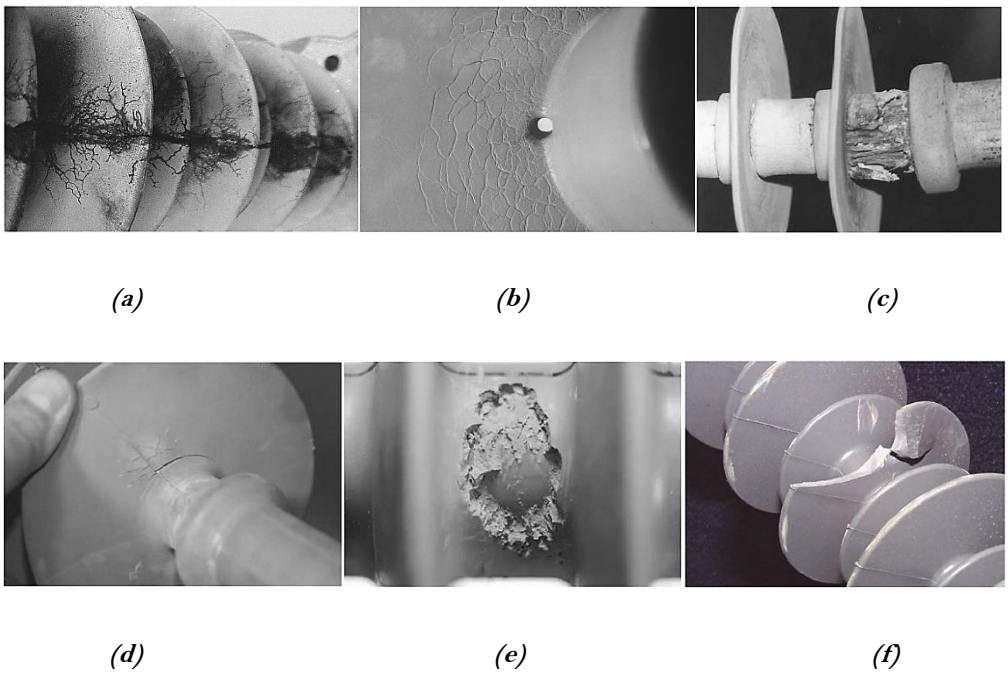


Figure 11. Différentes formes de détérioration des isolateurs composites : (a) cheminement, (b) perforation, (c) dégradation probablement causée par la température générée par les décharges partielles, (d) craquelure de l'ailette du revêtement, (e) détérioration causée par un animal, ce genre de dommages se produit généralement pendant le stockage de l'isolateur, (f) dommage lié à une mauvaise manutention [114].

Cheminement : une dégradation irréversible par formation des chemins qui apparaissent et se développent à la surface de l'isolateur. Ces chemins sont conducteurs même à sec, et l'isolateur en question peut être considéré comme étant un court-circuit dans la ligne [20], [114], [115].

Perforation : une décharge disruptive à travers la matière isolante solide de l'isolateur et qui entraîne la perte définitive de la rigidité diélectrique. Sur la **Figure 11 (b)**, la ligne de fuite offerte par l'ailette qui a subi une perforation est court-circuitée [12], [20].

Erosion : une dégradation irréversible et non conductrice qui se produit sur la surface de l'isolateur par perte de matière [20], [115].

Craquelure : fracture superficielle de profondeur supérieure à 0,1 mm [20], [115].

II.5 Méthodes de diagnostic de l'état des isolateurs composites

Les isolateurs composites ont besoin d'être évalués pour des fins de maintenance ou de recherche et développement [22]. Des efforts ont été consacrés pendant plusieurs années pour la recherche et la détermination des paramètres physiques relatifs à l'utilisation des isolateurs composites [74]. Les propriétés électriques, mécaniques et physico-chimiques sont généralement mesurées pour l'évaluation de l'état d'isolation. Par conséquent, plusieurs techniques ont été développées et proposées pour le diagnostic des isolateurs composites entièrement, ou, individuellement, leurs parties constituantes comme : le matériau de revêtement, le noyau, et les pièces d'accrochages. Certaines techniques nécessitent la mise hors service de la ligne et le démontage de l'isolateur pour une évaluation au laboratoire - *in-lab evaluation* -, d'autres peuvent être appliquées sur terrain, et même en temps réel - *on-line monitoring* - sans avoir besoin d'interrompre le service. Nous allons citer ci-dessous les techniques les plus répandues dans le diagnostic des isolateurs composites.

II.5.1 Inspection visuelle

C'est l'approche la plus utilisée par les chercheurs et les gestionnaires des réseaux électriques pour l'identification des isolateurs composites défectueux. L'examinateur cherche des signes de défauts comme l'érosion, la fissuration, la scission, etc. Si l'inspection est faite sur terrain, l'examinateur doit être équipé de jumelles à haute puissance [22], [113]. La quantification de la décoloration du revêtement en silicone par un colorimètre a été aussi proposée pour évaluer le vieillissement de l'isolateur [116].

II.5.2 Imagerie des émissions Ultraviolets

Son principe repose sur la détection, via une caméra UV, des photons émis par l'activité des décharges partielles sur la surface de l'isolateur composite. Son principal inconvénient est que son utilisation est limitée à la nuit, et ce, pour éviter toute interférence entre l'émission générée par les décharges électriques et celle par la lumière solaire [113].

II.5.3 Imagerie des émissions thermiques infrarouges (IR)

Cette technique exploite les émissions dans le spectre infrarouge pour détecter les points chauds sur l'isolateur composite. Ces émissions détectées par une caméra IR ont pour origine les courants dus aux décharges partielles (soit sur la surface de l'isolateur, soit dans l'interface revêtement-noyau). Cependant la température générée est souvent faible, et la mesure se trouve influencée par les conditions météorologiques [113], [117].

II.5.4 Mesure de l'hydrophobicité

L'hydrophobicité est la propriété la plus importante qui caractérise les isolateurs composites. La mesure de l'hydrophobicité est largement adoptée pour l'estimation du vieillissement des isolateurs composites[4].

II.5.5 Mesure du courant de fuite

C'est une technique de mesure en ligne, elle consiste à mesurer le courant électrique qui circule sur la surface de l'isolateur. Pour cela différents systèmes de mesure peuvent être utilisés. Une configuration typique consiste à utiliser un transducteur (un transformateur de courant par exemple) branché en série avec l'isolateur, la tension aux bornes du transducteur est relevée, et les données peuvent être enregistrées par un ordinateur [118], [119]. La mesure du courant de fuite est une méthode non couteuse en termes de montage de mesure/enregistrement requis. Son inconvénient est que la valeur du courant de fuite est sensible aux changements météorologiques notamment l'humidité, on assiste parfois à des pics de courant qui ne sont pas liés à la dégradation de la surface de l'isolateur mais plutôt à l'augmentation de l'humidité autour de l'isolateur [118]. De ce fait, son emploi dans le diagnostic du vieillissement des isolateurs composites est généralement limité.

II.5.6 Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR)

Son principe repose sur la mesure de la réponse du matériau suite à son exposition aux rayonnements infrarouges de longueur d'onde allant de 0,78 à 10^3 µm. La réponse spectrale est calculée en utilisant la transformée de Fourier du signal mesuré. Les fréquences du rayonnement IR absorbé par le matériau correspondent aux vibrations des atomes de ce

[4] Nous allons revoir en détails cette technique dans le chapitre III de ce manuscrit.

dernier, ces vibrations se traduisent par des pics au niveau du spectre IR obtenu, chaque pic correspond à une molécule/groupement spécifique. L'amplitude du pic traduit la concentration de la molécule ou le groupement en question. Par la suite, une comparaison est faite entre les courbes obtenues et les courbes de références préalablement enregistrées dans le logiciel d'exploitation du spectromètre. Cela permet d'identifier la composition chimique du matériau suite à l'identification des molécules/groupements responsables des absorptions observées, ou alors d'estimer son état de dégradation [119]. La FTIR peut être classée comme étant une technique de mesure "destructive" du fait qu'une découpe d'échantillon à partir de l'ailette de la chaine d'isolateur est nécessaire. Elle présente aussi des limitations à son utilisation comme la mise en forme des échantillons et la difficulté d'analyse des échantillons de faibles dimensions, ajoutons à ceux-là la difficulté d'analyse des échantillons dont la surface est fortement dégradée suite au vieillissement par exemple [120].

II.5.7 Spectroscopie photo-électronique X (XPS)

C'est une technique plus spécifique à la caractérisation de surface. Son principe repose sur l'exposition de l'échantillon à un faisceau monochromatique de rayons X dans une chambre à vide poussé, ces rayonnements sont assez énergétiques pour ioniser les éléments de la surface de l'échantillon. La différence entre l'énergie des rayons X entrants et l'énergie cinétique des photoélectrons éjectés est proportionnelle à leur énergie de liaison. Le fait que cette énergie de liaison soit caractéristique de chaque élément permet des mesures qualitatives des éléments présents en surface. La comparaison du nombre d'électrons éjectés de différents éléments donne des informations sur la composition atomique de la couche superficielle à une profondeur de 1 à 10 nm [119], [121].

II.5.8 Spectroscopie des rayons X à dispersion d'énergie (EDX)

C'est une technique utilisée pour l'identification des éléments constituant l'échantillon. Son principe repose sur l'application d'un faisceau d'électrons à la surface de l'échantillon. Ce faisceau engendre une ionisation des éléments, qui émettent des rayons X caractéristiques en se désexcitant, de sorte qu'ils peuvent être identifiés [119], [121].

II.5.9 Spectroscopie de masse des ions secondaires (SIMS)

C'est une technique qui consiste à bombarder la surface de l'échantillon par un faisceau d'ions. Ce faisceau mène à l'éjection des particules secondaires chargées (ions, électrons), neutres ou

des photons. Le spectre de masse des ions éjectés au cours du bombardement est tracé, et qui permet l'identification des éléments présents dans l'échantillon [122], [123].

II.5.10 Microscopie électronique à balayage (MEB ou SEM)

Elle est utilisée pour observer la topographie de la surface du matériau, elle permet de détecter des défauts comme les fissurations et les trous [109]. Un faisceau d'électrons est produit, accéléré et focalisé pour bombarder la surface du matériau à analyser. Lorsque le faisceau bombarde l'échantillon, ses électrons se divisent en quatre groupes : les électrons arrêtés qui s'arrêtent en bombardant l'échantillon, donnent leur énergie aux électrons de la matière et les excitent ; les électrons absorbés dans le matériau et qui éjectent les électrons du matériau hors de celui-ci ; les électrons déviés et enfin, les électrons réfléchis. Tous ces électrons sont détectés par divers détecteurs et, en conséquence, une image qui représente les détails de la forme de la surface et de la rugosité du matériau jusqu'à l'échelle du micromètre, est produite [119]. L'utilisation de cette technique peut, cependant, endommager la surface de l'échantillon en raison de la forte énergie du faisceau électronique appliqué [124].

Notons qu'il existe encore d'autres méthodes qui ont été proposées pour l'évaluation des isolateurs composites comme : l'analyse thermogravimétrique (TGA), la Calorimétrie différentielle à balayage (DSC), la Spectrométrie de fluorescence X (XRF), la Cristallographie aux rayons X (XRD), la Fluorescence induite par laser (LIF), la Tomodensitométrie (TDM ou CT-Scan), Microscopie acoustique laser à balayage (SLAM) [22], [113]. La Spectrométrie d'émission atomique de plasma induit par laser (LIBS) [125]. L'essai en plan incliné (IPT) et le test d'immersion de la roue tournante (RWDT) sont également des méthodes populaires qui permettent d'évaluer la résistance de l'isolateur composite aux cheminement et à l'érosion [126].

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une synthèse bibliographique sur l'état de l'art concernant le phénomène de vieillissement des isolateurs en silicone. Nous avons présenté à la fin de ce chapitre, les techniques les plus utilisées pour le diagnostic des isolateurs en silicone, leurs avantages et inconvénients. Dans le chapitre suivant nous abordons la partie expérimentale de notre travail.

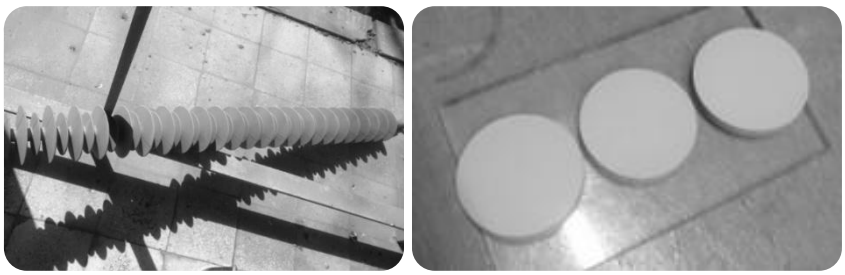
Chapitre III : Démarche expérimentale.

III.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la démarche expérimentale suivie dans cette étude. Nous y présenterons d'abord les échantillons utilisés, puis le choix des contraintes appliquées, nous aborderons, par la suite, les différentes techniques de caractérisation, les montages de mesures, ainsi que les protocoles expérimentaux.

III.2 Préparation des échantillons

Les échantillons utilisés dans cette étude ont été obtenus à partir d'une chaine d'isolateurs en silicone HTV (**Figure 12**), cette chaine d'isolateurs nous a été fournie par le gestionnaire du réseau de transport de l'électricité d'Oran (GRTE) de la SONELGAZ. La chaine est neuve et n'a jamais été exploitée.



(a) *(b)*

Figure 12. Echantillons utilisés : (a) chaine d'isolateurs, (b) échantillons découpés.

À partir des ailettes du revêtement en silicone de la chaine d'isolateurs, des échantillons sont découpés sous forme de pastilles en utilisant un découpe-joint **Boehm JLB250P** ; ils ont un diamètre de 40 mm et une épaisseur moyenne de 4,7 mm, sauf ceux destinés à la caractérisation par la spectroscopie diélectrique qui ont un diamètre de 20 mm et une épaisseur de 4 mm. La surface des échantillons a été nettoyée à l'eau distillée à l'aide d'une éponge douce, après quoi les échantillons ont été laissés à sécher à la température ambiante dans un dessiccateur.

Pour s'assurer de la répétabilité du phénomène étudié, trois échantillons pour chaque cas de figure ont été utilisés, c'est-à-dire trois échantillons par paramètre. L'estimation des résultats est une estimation ponctuelle qui est calculée en utilisant les valeurs de la moyenne arithmétique.

III.3 Contraintes étudiées

III.3.1 Température

La température générée pendant les décharges et l'effet de la température ambiante à long terme font partie des agents de vieillissement qui affectent les isolateurs composites [82]. Pour étudier l'effet de la température, les échantillons sont placés dans une étuve à convection à température contrôlée (**Figure 13**), puis exposés à une température de 50 °C ou de 110 °C pendant des durées spécifiées. La contrainte à 2 °C consiste à refroidir les échantillons dans un réfrigérateur.

Figure 13. Etuve utilisée pour le vieillissement thermique.

Les températures 2 °C et 50 °C ont été choisies pour simuler la température ambiante à laquelle est exposé l'isolateur dans les conditions atmosphériques "sévères", notamment dans les périodes de l'hiver et de l'été. Le choix de la température de 110 °C constitue un intérêt particulier. En effet, à 110 °C le matériau est supposé sec et dépourvu d'humidité. D'autre part, plusieurs chercheurs, lors des procédures de prétraitement, ont recours à l'usage des températures de l'ordre de 100-120 °C pendant plusieurs heures pour le conditionnement des isolateurs. Cependant, l'utilisation d'une telle valeur élevée de température pourrait présenter une influence sur les caractéristiques du matériau, ce qui risque d'erroner les résultats obtenus par la suite. Les résultats présentés dans le chapitre IV confirmeront cette hypothèse.

III.3.2 Rayonnements ultraviolets

La lumière solaire et les décharges corona sont deux sources de rayonnements UV qui affectent les performances des isolateurs en silicone. Le spectre d'émission de la décharge corona s'étend de 210 nm à 900 nm [127]. Dans l'air, la lumière d'émission se situe principalement dans l'intervalle 230-405 nm [128], et elle est considérée comme la plus dangereuse pour les matériaux composites.

Dans ce travail, l'étude de l'effet des rayonnements UV consiste à exposer les échantillons aux rayonnements obtenus par une lampe fluorescente de 11 W, UV_C (254) - avec une émission principale dans une longueur d'onde de 254 nm. Cette lampe est dotée d'un tube en verre de quartz pour éviter la formation d'ozone. Les échantillons sont déposés à une distance de 11 cm de la source des rayonnements UV pendant la période de la contrainte (**Figure 14**).

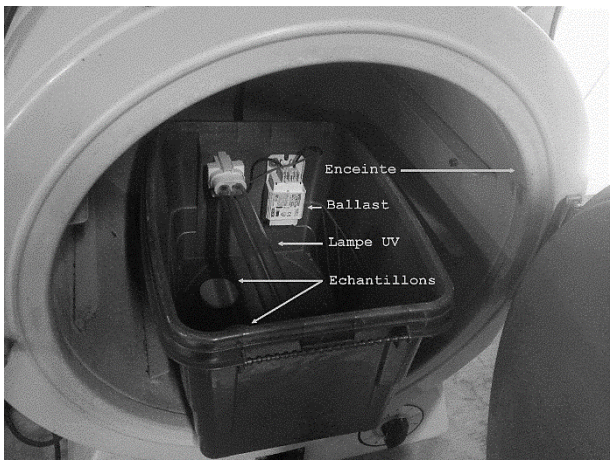


Figure 14. Dispositif utilisé pour le vieillissement par rayonnements UV.

III.3.3 Solutions salines

Le test d'immersion est souvent utilisé comme un prétraitement visant à éliminer l'hydrophobicité des surfaces hydrophobes. Dans ce travail, l'étude de l'effet de l'immersion consiste à immerger des échantillons dans des solutions d'électrolytes à température ambiante à l'intérieur des boîtes en verre pendant une durée déterminée. Cinq niveaux de conductivité sont utilisés : 3 µS/cm, 7 mS/cm, 18 mS/cm, 46 mS/cm et 138 mS/cm (**Figure 15**). Où 3 µS/cm est la conductivité électrique de l'eau distillée. Les autres conductivités sont obtenues en dissolvant du sel de NaCl dans un volume d'eau distillée. La valeur de conductivité a été mesurée à l'aide d'un conductimètre pour liquides **Inolab cond720**. Ces niveaux de

conductivité sont choisis pour couvrir l'ensemble de la gamme de salinité rencontrée sur le terrain, c'est-à-dire de la très faible à la très élevée [129]–[131]. D'autre part, le choix de NaCl en tant que sel est régi par une mesure préalable de la pollution des isolateurs du côté ouest du réseau électrique algérien à haute tension [132].

Figure 15. Solutions utilisées pour le vieillissement par immersion.

III.4 Techniques de caractérisation

III.4.1 Mesure de l'hydrophobicité

L'hydrophobicité est l'un des paramètres clés des isolateurs en silicone. Quand ils sont neufs, ces isolateurs présentent une très bonne hydrophobicité, cependant, dû aux contraintes rencontrées pendant le service, le vieillissement se produit et l'hydrophobicité est dégradée. L'hydrophobicité d'une surface peut être évaluée par différentes techniques, les deux techniques les plus utilisés actuellement sont : la mesure de l'angle de contact et la détermination de l'indice de la classe de mouillabilité – *Wetttability class index* (WCI). Ces deux techniques mentionnées ci-dessus permettent une évaluation visuelle de la surface et sont utilisées pour des inspections périodiques.

L'hydrophobicité du matériau est déterminée, généralement, soit par l'indice de la classe de mouillabilité, soit par la mesure de l'angle de contact triple formé par la gouttelette, l'isolant et l'air : plus l'angle de contact augmente plus l'isolateur est hydrophobe [133]. L'évaluation de l'hydrophobicité par l'indice de la classe de mouillabilité est plus pratique dans les conditions d'usage en service (sur terrain), cependant elle reste liée à l'estimation de l'opérateur. Par contre l'évaluation de l'hydrophobicité à travers la mesure de l'angle de contact est plus fiable ; or elle nécessite le démontage complet de la chaîne d'isolateurs pour

une évaluation au laboratoire ; ainsi que la découpe d'un échantillon à partir de l'isolateur pour le monter sur le dispositif de mesure de l'angle de contact (goniomètre). Ce qui en fait une méthode destructive. Une corrélation entre les deux méthodes d'estimation de l'hydrophobicité est donc avantageuse.

III.4.1.1 Mesure de l'angle de contact statique

L'angle de contact statique[5] est mesuré sur plusieurs endroits de la surface de l'échantillon, on retient la moyenne de 3 mesures pour chaque échantillon. La mesure de l'angle de contact est faite selon les recommandations de la norme IEC62073 [133], et ce par le dépôt d'une gouttelette d'eau distillée de volume égal à 20 µl sur la surface horizontale de l'échantillon. Une photo de la gouttelette est prise avec un appareil photo à haute résolution, puis transférée à un ordinateur pour déterminer la valeur de l'angle de contact à l'aide d'un logiciel d'analyse de contour. Le schéma résumant le principe de la mesure de l'angle de contact est illustré sur la **Figure 16**.

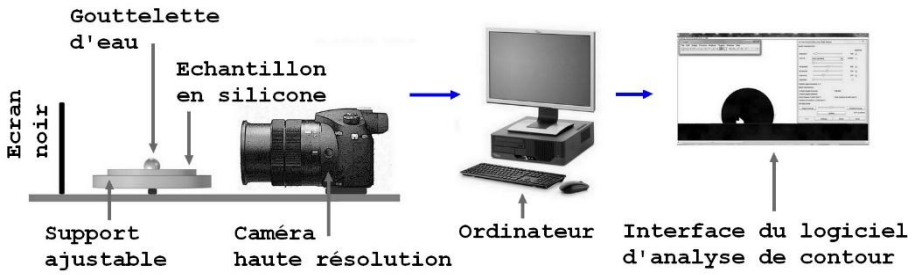


Figure 16. Schéma global montrant la procédure utilisée pour la mesure de l'angle de contact.

La valeur de l'angle de contact d'une gouttelette dépend de plusieurs propriétés de la gouttelette elle-même, comme sa taille [59], [76], [134]. Des études ont par contre, montré que la valeur de l'angle de contact est indépendante de la taille et de la conductivité de la gouttelette [25]. Hackam, dans une revue extensive sur les isolateurs composites utilisés dans l'isolement externe [25], a souligné l'importance de la réalisation des mesures de l'angle de contact peu de temps après avoir placé la gouttelette sur la surface du matériau, et ce, pour ne pas modifier sa surface par la présence de l'eau. Cela nous a amené à investiguer l'influence de cette durée du dépôt sur la valeur de l'angle de contact. Nous avons donc réalisé des essais

[5] Pour des raisons de simplicité, sera nommé "angle de contact" dans le reste de ce manuscrit.

préliminaires sur un échantillon non vieilli, et les résultats sont représentés sur la **Figure 17**. Nos résultats montrent que cette durée de dépôt n'a pas d'influence significative sur la valeur de l'angle de contact - environ 2 ° - durant un intervalle de temps de 60 s. Par conséquent, la mesure de l'angle de contact dans cette présente étude est faite après 60 s du dépôt de la gouttelette. L'angle de contact rapporté pour chaque cas est la moyenne de 9 mesures.

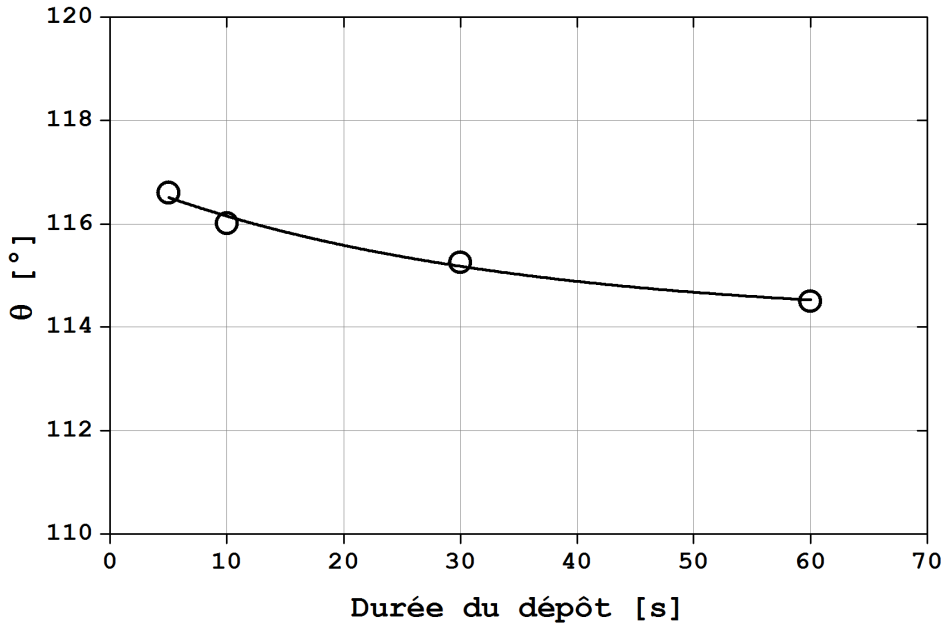


Figure 17. Influence de la durée du dépôt de la gouttelette sur l'angle de contact.

III.4.1.2 Détermination de l'indice de la classe de mouillabilité

Selon la norme IEC62073, l'indice de la classe de mouillabilité est évalué par *la méthode de spray*. L'eau distillée est vaporisée sur la surface de l'échantillon, à une distance de 30 cm pendant une durée de 20 secondes. L'indice de la classe de mouillabilité de la surface de l'échantillon est déterminé après 10 secondes de la fin de la vaporisation d'eau, suite à la comparaison avec les photos des différentes classes de mouillabilité (de WCI1 à WCI6) rapportées dans la référence [133] (**Figure 18**).

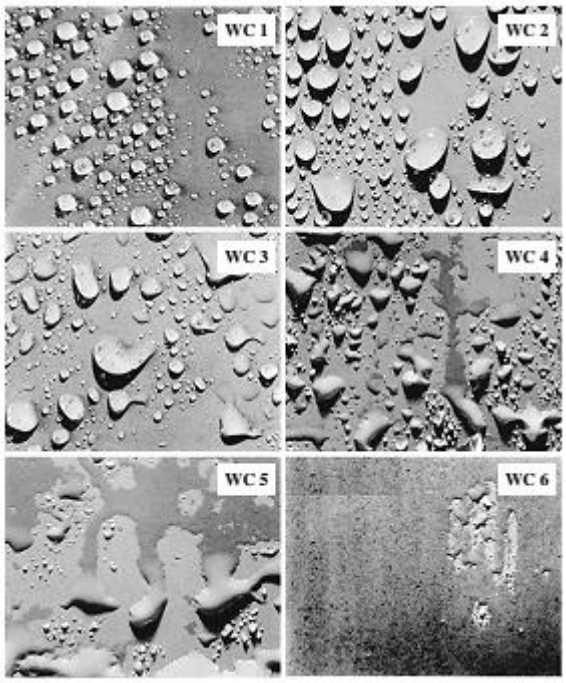


Figure 18. Photo de référence de la classe de mouillabilité d'une surface hydrophobe d'après la norme IEC62073 [22].

III.4.2 Courant de surface en régime permanent

La mesure du courant de surface (I_S) est une approche relativement simple. Le courant de surface peut donner une indication des performances électriques de l'isolateur, qui sont liées à son état de surface. Par exemple, il peut révéler une présence d'une contamination conductrice ou une dégradation de la surface de l'isolateur.

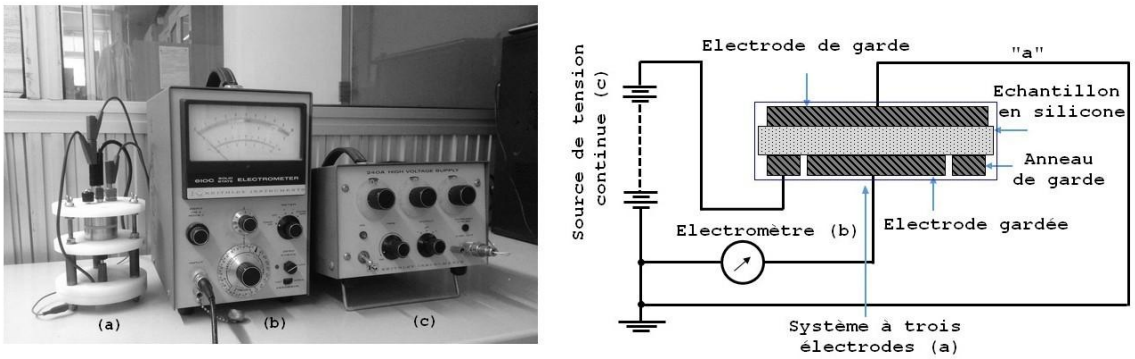
Dans notre étude, la mesure du courant de surface est faite en se basant sur les recommandations de la norme IEC 93 [135]. Le montage utilisé pour la mesure est présenté sur la **Figure 19 (a)**, il se compose d'une source de tension continue, un électromètre et une cellule contenant les échantillons. Cette cellule de mesure a été conçue à notre laboratoire, elle contient trois électrodes (**Figure 19 (a)** : (a)) à savoir : l'électrode de garde, l'électrode gardée et l'anneau de garde. Un électromètre **KEITHLEY 610C** est utilisé pour la mesure de la valeur du courant de surface entre l'anneau de garde et l'électrode gardée. L'électrode de garde est utilisée comme électrode de protection, elle sert à dériver le courant volumique en dehors de l'électromètre à travers le fil conducteur "a". La tension continue de 1 kV est fournie par un générateur **KEITHLEY 240A**, et la durée de l'application de la tension est de 1 minute.

La résistivité surfacique ρ_S [Ω] peut être calculée par [135] :

$$\rho_S = R_S \frac{p}{\kappa} \tag{9}$$

$$\rho_S = \frac{U}{I_S \cdot \kappa}\left[\pi\left(d_1 + \kappa\right)\right] \tag{10}$$

Où R_S est la résistance surfacique [Ω], p est le périmètre de l'électrode gardée [cm], κ est l'intervalle entre l'électrode gardée et l'anneau de garde [cm], d_1 est le diamètre de l'électrode gardée [cm], et U est la tension appliquée [V].



(a) *(b)*

Figure 19. (a) Montage utilisé pour la mesure du courant de surface, (b) schéma simplifié montrant le raccordement électrique du montage.

Pour réaliser les mesures du courant de surface, il a été nécessaire de concevoir une cellule de mesure dont les électrodes sont adaptées à la forme de nos échantillons (**Figure 21 (a)**).

Comme on le sait, les ailettes des chaines d'isolateurs en silicone présentent, en générale, une épaisseur non uniforme (voir la partie en trait discontinu sur la **Figure 20**). En conséquence, les échantillons obtenus à partir des ailettes auront naturellement une épaisseur non uniforme et possèdent un écart d'épaisseur sur leurs deux extrémités. En réalité, cet écart dépend de la position de la découpe des échantillons (depuis le bord inférieur de l'ailette), et est proportionnel au diamètre de l'échantillon. Pour les échantillons de petit diamètre, l'écart est insignifiant, tandis qu'il devient important pour les échantillons de grand diamètre.

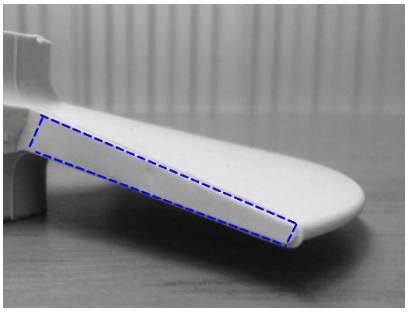


Figure 20. Photo d'une ailette découpée qui montre la non-uniformité de son épaisseur (en pointillé).

Cette forme particulière d'échantillon empêche d'établir un contact parfait entre l'échantillon et l'électrode de garde plane de la cellule[6] comme on peut le voir sur la **Figure 21 (b)**.

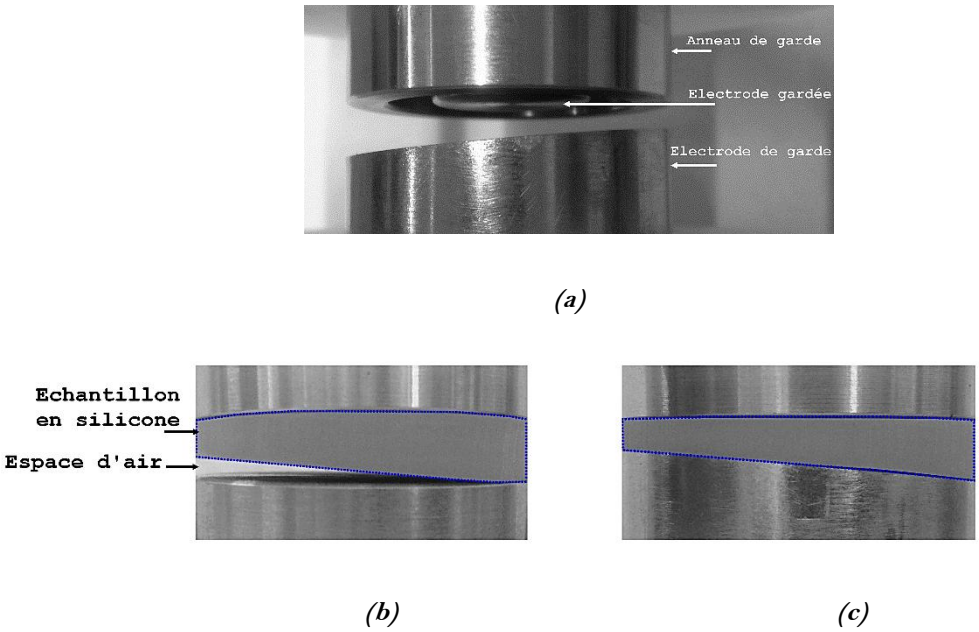


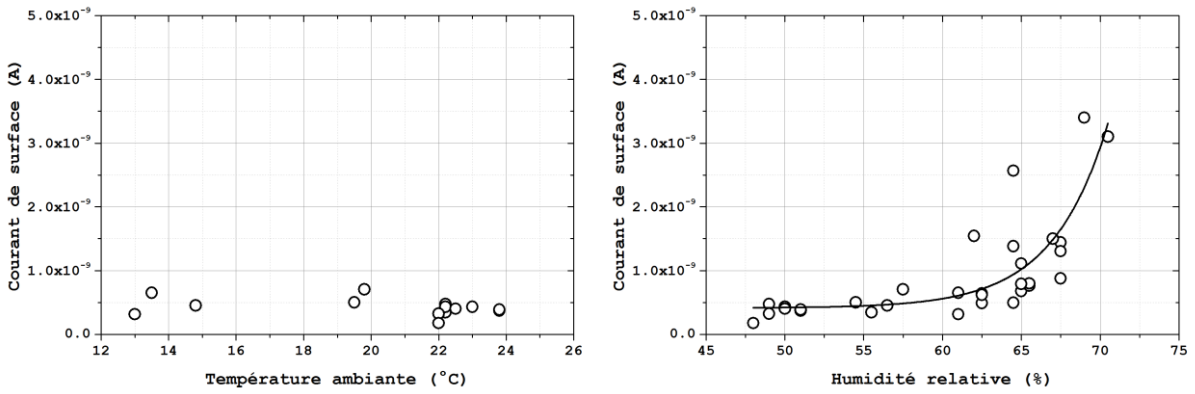
Figure 21. Photos montrant l'ensemble des électrodes de la cellule de mesure du courant de surface et l'échantillon : (a) l'ensemble des électrodes, (b) échantillon monté sur une électrode de garde de section plane (sans pression exercée), (c) échantillon monté sur une électrode de garde de section inclinée (sans pression exercée).

De ce fait, la composante volumique du courant ne peut pas être drainée correctement en dehors de l'électromètre et s'ajoute à la composante surfacique du courant, ce qui pourrait introduire des erreurs dans la mesure de cette dernière. Pour faire face à cette situation, deux solutions nous étaient envisageables : agir sur les échantillons pour uniformiser leurs

[6] Le serrage des électrodes entre elles permet toutefois de minimiser le volume d'air entre l'échantillon et l'électrode de garde, mais reste insuffisant pour assurer un bon contact entre eux.

épaisseurs via un découpage, ou bien agir sur la forme de l'électrode de garde. Nous avons opté pour la deuxième solution, afin d'éviter toute éventuelle modification de propriété surfacique (comme la rugosité) par le procédé de découpage suite à la formation des bavures par exemple. Nous avons donc conçu une électrode de garde dont l'inclinaison de la section correspond à celle des échantillons. La **Figure 21 (c)** montre qu'avec une électrode de garde de section inclinée, la qualité de contact est bien meilleure qu'avec une électrode plane.

Le courant de surface peut être sensible à la variation de l'humidité relative et de la température ambiante. Nous avons fait des essais préliminaires pour évaluer la dépendance de la valeur du courant de surface aux conditions atmosphériques. La **Figure 22** montre l'influence de ces deux facteurs sur la valeur du courant. Bien que l'effet de la température ambiante soit négligeable sur une plage de température allant de 12 à 25 °C, l'effet de l'humidité relative quant à lui se manifeste au-delà de 62% par une croissance exponentielle de la valeur de courant. Par conséquent, dans notre étude, les mesures de courant de surface sont réalisées dans les conditions atmosphériques ambiantes suivantes : 20-23 °C pour la température et 50-55% pour l'humidité relative. Et ce pour écarter toute influence des conditions atmosphériques sur la mesure du courant.



(a) *(b)*

Figure 22. Influence des conditions atmosphériques sur le courant de surface : (a) la température ambiante, (b) l'humidité relative.

III.4.3 Spectroscopie diélectrique

La spectroscopie diélectrique est l'ensemble des techniques de mesure des propriétés diélectriques d'un milieu en fonction de la fréquence. Elle couvre une large gamme fréquentielle, allant de 10^{-6} jusqu'à 10^{14} Hz. Son principe repose sur l'application d'une tension

sinusoïdale de fréquence variable entre les bornes d'une substance et la mesure du courant électrique résultant et son déphasage par rapport à cette tension [136].

Dans la pratique, les isolants ne sont pas parfaits. Le courant résultant (I) n'est donc pas en quadrature avec la tension appliquée, il est égal à la somme de deux courants : le courant de charge (I_C) et le courant de pertes (I_P). Le déphasage entre le courant (I) et le courant de charge est donné par l'angle δ qui est appelé "angle de pertes". La tangente de cet angle ($\tan\delta$) est appelée "la tangente de l'angle de pertes" ou "le facteur de dissipation diélectrique[7]" [137], [138]. Le diagramme de Fresnel pour un isolant imparfait est montré sur la **Figure 23**.

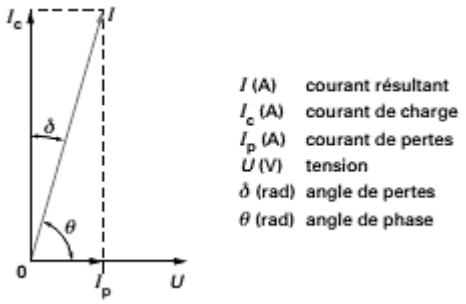


Figure 23. Diagramme de Fresnel des courants pour un isolant imparfait [138]***.***

L'impédance et l'admittance complexes (Z^* et Y^*) peuvent être obtenues en utilisant la loi d'Ohm. La conductivité volumique σ_v est déduite de l'admittance connaissant la géométrie de l'échantillon (surface et épaisseur). Enfin, la permittivité complexe ε^* est reliée à la conductivité volumique complexe σ_v^* par l'**équation (11)**, où $j=\sqrt{-1}$ est l'unité imaginaire, et f est la fréquence [136] :

$$\sigma_v^*(f) = jw\varepsilon_0\varepsilon^*(f) \qquad (11)$$

L'analyse de ces paramètres permet de déterminer les différents processus impliqués dans la réponse diélectrique du matériau comme la relaxation et le transport des charges (conduction). Ainsi, il nous semble utile de donner ici, quelques notions de base sur les mécanismes de polarisation qui nous seront nécessaires dans la compréhension et l'interprétation des résultats

[7] Nous utilisons ce 2eme terme dans le reste de ce manuscrit.

expérimentaux présentés dans le chapitre V. Pour une approche plus détaillée, on peut se référer par exemple aux ouvrages suivants : [136]–[142].

III.4.3.1 Rappels sur les phénomènes de polarisation

Dans un diélectrique, les porteurs de charges ne sont pas libres à se déplacer (à une grande distance) mais sont liés. Si on y applique un champ électrique, les porteurs de charges positives et négatives se déplacent légèrement les uns par rapport aux autres, créant ainsi des dipôles électriques. L'ensemble de ces dipôles forme ce qu'on appelle "vecteur polarisation" noté $\vec{P}$, ou simplement "polarisation". Il est défini par [141], [142] :

$$\vec{P} = \frac{d\vec{p}}{dV} \qquad (12)$$

Où $d\vec{p}$ est la somme vectorielle des moments dipolaires contenus dans un volume dV.

La polarisation peut encore s'écrire en fonction du champ électrique appliqué $\vec{E}$ et du vecteur de déplacement électrique $\vec{D}$ comme suit [138]:

$$\vec{P} = \vec{D} - \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E} \qquad (13)$$

$$\vec{P} = \varepsilon_0 \vec{E} - \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E} = \varepsilon_0 \left(1 - \varepsilon_r\right) \vec{E} \qquad (14)$$

$$\vec{P} = \varepsilon_0 \chi \vec{E} \qquad (15)$$

Où χ est la susceptibilité diélectrique relative du matériau. ε_r et ε_0 étant respectivement la permittivité relative du matériau, et la permittivité du vide ($8{,}854.10^{-12}$ F/m).

Sous l'action d'un champ électrique, les diélectriques se polarisent selon des mécanismes différents en fonction de la fréquence du champ. On dénombre quatre types de polarisations classiques :

- **Polarisation électronique :** elle résulte du déplacement du nuage électronique par rapport au noyau de l'atome, et s'établit à des fréquences de l'ordre de 10^{15} Hz [139].

- **Polarisation atomique :** elle est due au déplacement d'atomes ou de groupes d'atomes dans la molécule, et s'observe à des fréquences de l'ordre de 10^{12} Hz [138], [139].

- **Polarisation dipolaire (polarisation par orientation) :** elle est causée par l'orientation des molécules polaires[8], qui ont tendance à s'orienter suivant le sens du champ appliqué. Elle se manifeste à des fréquences comprises entre 10^{3} et 10^{6} Hz [138], [139], [141], [142].

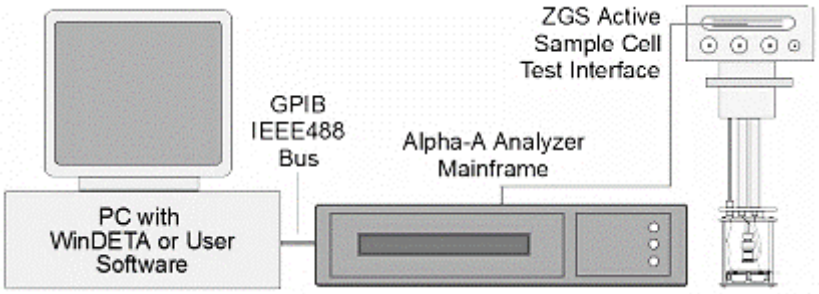
- **Polarisation interfaciale (polarisation par charge d'espace ou effet Maxwell-Wagner-Sillars) :** elle provient des accumulations locales des porteurs de charges aux interfaces entre les différentes phases constituant le matériau hétérogène (impuretés, lacunes, joints de grains, etc.) lorsque ces phases ont des valeurs différentes de permittivité et de conductivité. Elle apparaît à des fréquences entre 10^{-3} et 10^{-1} Hz [138], [139], [141].

III.4.3.2 Dispositif de mesure

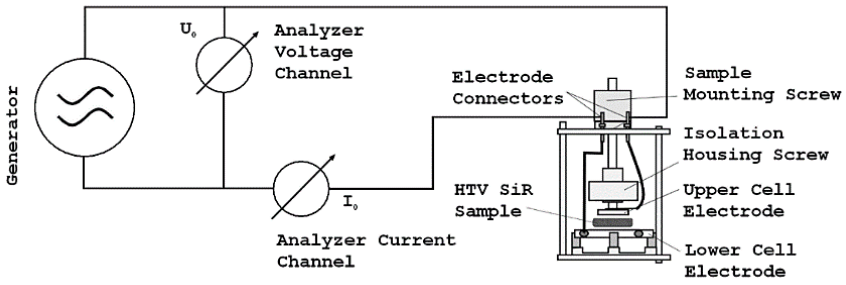
Pour notre étude[9], nous utilisons un analyseur d'impédance **NOVOCONTROL Alpha-A10** permettant de mesurer les réponses fréquentielles dans la plage 3 µHz-20 MHz. Il est équipé d'un porte échantillon **ZGS** dans lequel les échantillons de diamètre de 20 mm et d'épaisseur de 4 mm sont introduits. Le schéma de principe du montage et de la mesure est illustré sur la **Figure 24**. Au cours de l'opération de mesure, les données peuvent êtres visualisées en direct depuis l'interface **WinDETA**, cette interface offre également la possibilité d'exporter les données au format ASCII.

[8] Les diélectriques peuvent être classés selon leurs polarisations en deux groupes : les polymères polaires qui possèdent un moment dipolaire permanent, et les polymères non polaires (ou apolaires) qui possèdent un moment dipolaire nul.

[9] Cette partie de mesures a été réalisée au laboratoire d'études physique des matériaux (LEPM) de l'université des sciences et de la technologie d'Oran- Mohamed Boudiaf.



(a)



(b)

Figure 24. Montage utilisé pour les essais de la spectroscopie diélectrique : (a) vue d'ensemble du montage [143], (b) schéma de principe de la mesure, incluant la cellule ZGS.

Lors de la préparation des échantillons destinés à la caractérisation par la spectroscopie diélectrique, on a recours, généralement, à métalliser les deux faces de l'échantillon via l'évaporation ou la pulvérisation avec un film métallique de conductivité électrique élevée comme l'or, l'argent ou l'aluminium. Un autre moyen plus simple et moins coûteux consiste à recouvrir la surface de l'échantillon avec une peinture conductrice en argent liquide. Il faut, cependant, s'assurer que les propriétés du matériau ne seront pas affectées par cette pratique [144], [145]. La métallisation[10] des échantillons est particulièrement importante pour les matériaux à haute permittivité comme certaines céramiques dont la valeur de permittivité avoisine les 1500 [144], pour la plus part des diélectriques, les effets dus au mauvais contact sont moins remarquables [146].

Cette pratique, par contre, est impossible à appliquer dans notre étude. En fait, métalliser les deux faces de l'échantillon va le rendre inutilisable pour une autre caractérisation comme la

[10] La métallisation se fait dans le but d'améliorer la qualité de contact entre les électrodes de la cellule de mesure et la surface "non homogène" de l'échantillon.

mesure de la tension de contournement (U_C) ou du courant transitoire de surface (I_{TS}) ou, encore même, une éventuelle mesure complémentaire de l'hydrophobicité, puisque ces mesures visent les propriétés superficielles de l'échantillon. Pour remédier à ça, nous nous servirons du système de compression à boulon et écrou réglable dont est équipée la cellule **ZGS** (**Figure 24 (b)**), il permet d'optimiser le contact entre les électrodes de la cellule et l'échantillon[11]. Ainsi un meilleur compromis entre précision et intérêt des mesures est visé.

La **Figure 25** montre une variation typique du facteur de dissipation diélectrique en fonction de la fréquence (présentation en log-log) pour un de nos échantillons.

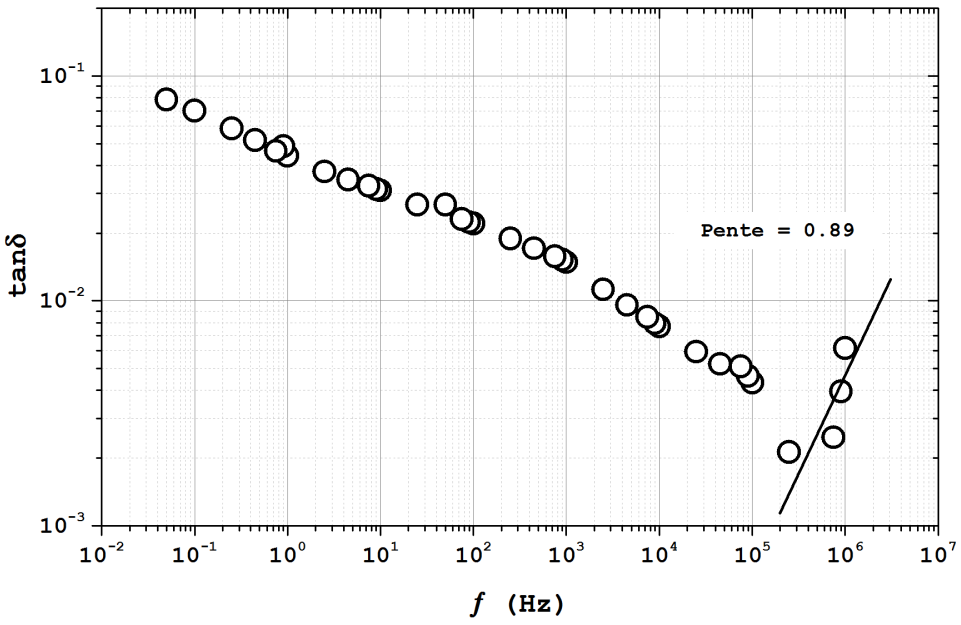


Figure 25. Facteur de dissipation diélectrique en fonction de la fréquence.

Nous pouvons remarquer qu'il existe un pic inférieur dans le domaine des hautes fréquences (à environ 1 MHz) suivi d'une droite avec une pente de l'ordre de +0,89. Cette droite n'est pas une caractéristique du matériau étudié (elle ne reflète pas des pertes intrinsèques au matériau). Elle est, normalement, due à une résistance électrique en série (résistance de contact) créée par un contact non parfait entre l'électrode de mesure et l'échantillon [143], [145], [147]. Vers les hautes fréquences, cette résistance se comporte comme une inductance et son

[11] Toutefois, on veille à ce que la compression exercée ne soit pas trop importante, afin de ne pas déformer l'échantillon puisqu'il est caoutchouteux.

amplitude (Z_l) devient proportionnelle à la fréquence [148], d'où est l'origine de la pente proche de l'unité illustrée la **Figure 25** [139].

Cette résistance de contact est, évidemment, causée par l'absence de métallisation dans nos échantillons comme nous avons dit plus haut. Son effet parasite se présente au-delà de $2{,}5.10^5$ Hz, et ne présente pas d'influence sur les mesures dans les fréquences inférieures. Vue les limites de notre montage, une mesure au-dessus de 10^5 Hz n'est pas exploitable à moins d'erreurs grossières. Par conséquent, les mesures présentées dans cette étude sont effectuées entre 5.10^{-2} et 10^5 Hz.

Il convient de noter que la réponse diélectrique de l'isolant dépend de la fréquence du signal appliqué et de la température de l'isolant. Durant notre étude, le changement de la température ambiante est de l'ordre de 3 °C. Des mesures préliminaires nous ont montré que cet écart de température est assez faible pour influencer la réponse diélectrique/électrique du matériau étudié.

III.4.4 Tension de contournement

La tenue diélectrique en surface est un paramètre clé pour le choix de l'isolation externe en haute tension. La tension de tenue est définie comme étant une tension qui doit être appliquée à un objet pendant l'essai dans des conditions spécifiées (1 minute par exemple) durant lequel aucune décharge disruptive ne doit se produire [149].

Afin d'étudier l'effet des contraintes de vieillissement appliquées dans cette étude sur la tenue diélectrique en surface (sèche) de l'isolateur, nous mesurons la tension de contournement des différents cas étudiés. Le modèle d'essais est représenté sur la **Figure 26** est constitué de l'échantillon qui est placé entre les deux électrodes en inox de dimensions identiques, l'électrode supérieure est portée à la haute tension continue qui est délivrée par un générateur de haute tension (0-100 kV/ 30 mA) tandis que l'électrode inférieure est mise à la terre. L'ensemble des électrodes est fixé à un support isolant en PTFE. R_{L1} et R_{L2} étant des relais haute tension, R_{d1} et R_{d2} sont des résistances de mesure, R_p est une résistance de protection et R_g est une résistance de décharge à la terre. Les tensions de contournement obtenues sont indiquées par des voltmètres au niveau du pupitre de commande. Pour tous les essais, la tension est augmentée progressivement avec une vitesse de 0,5 kV/s jusqu'à ce qu'un arc de contournement s'établisse entre les électrodes. La tension d'établissement de l'arc est relevée et l'essai est repris plusieurs fois.

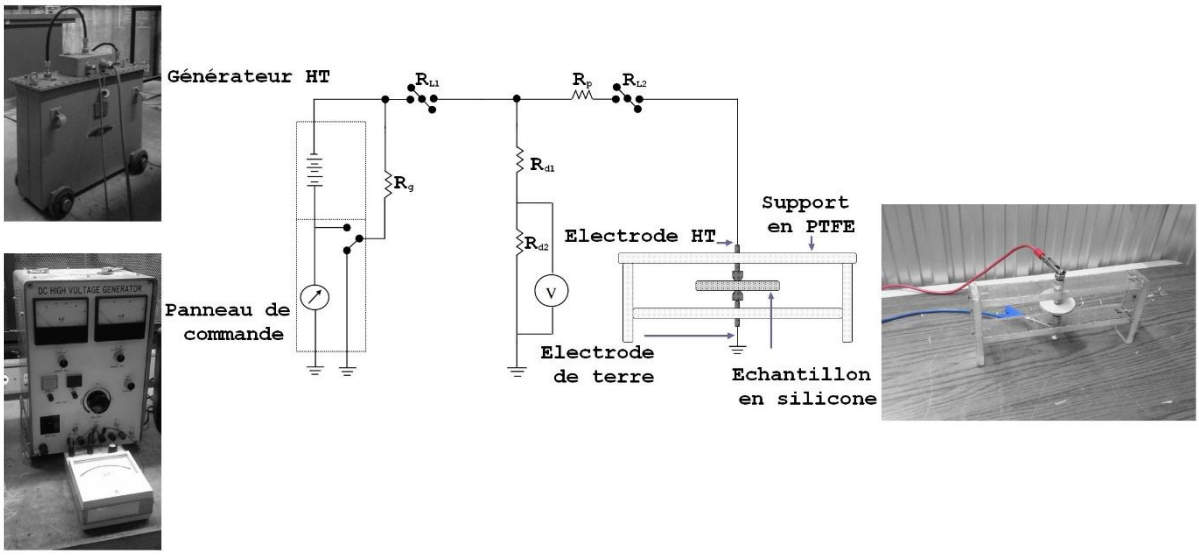


Figure 26. Schéma de principe du montage utilisé pour les essais de contournement.

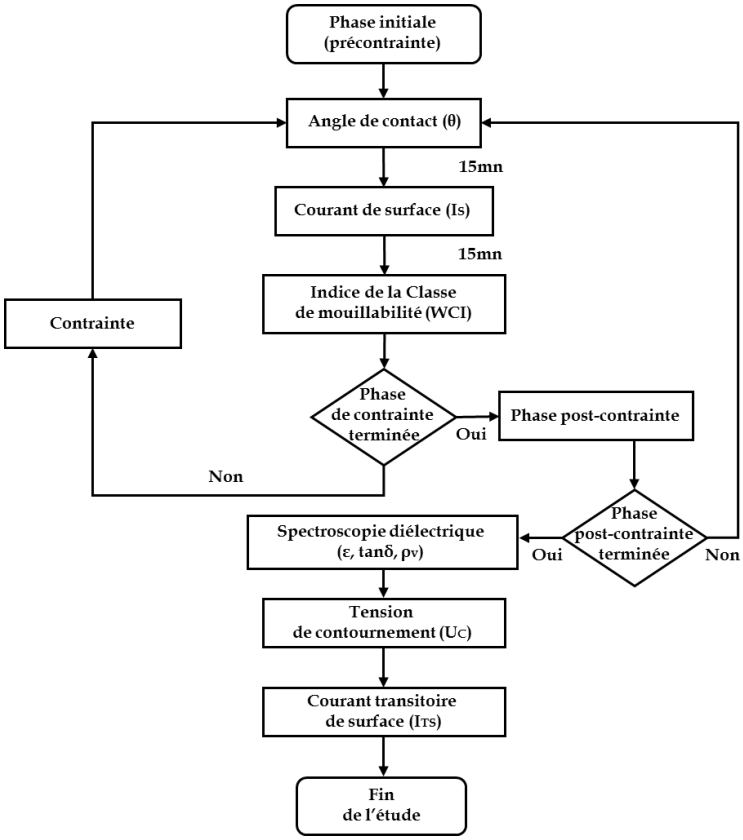
III.5 Méthodologie de l'étude

La méthodologie adoptée dans cette étude est résumée sur la **Figure 27**. La caractérisation des échantillons consiste à évaluer leurs propriétés superficielles et/ou internes durant des phases déterminées. Rappelons que toutes les mesures sont réalisées dans les conditions atmosphériques ambiantes suivantes : 20-23 °C pour la température et 50-55 % pour l'humidité relative.

III.5.1 Phase précontrainte et propriétés de référence

Comme nous l'avons déjà mentionné auparavant, les échantillons étudiés sont découpés à partir des revêtements des ailettes d'isolateurs qui n'ont jamais été exploités. Avant l'application de toute contrainte, on commence d'abord par déterminer les propriétés superficielles des échantillons non vieillis : l'angle de contact, l'indice de la classe de mouillabilité, le courant de surface et la tension de contournement. Ainsi que leurs propriétés diélectriques/électriques internes : la permittivité relative réelle (ε'), le facteur de dissipation diélectrique et la résistivité volumique (ρ_v). Toutes ces propriétés (superficielles et internes) seront, par la suite, considérées comme propriétés de référence.

(a)



(b)

Figure 27. Méthodologie adoptée dans l'étude.[12] : (a) phases de l'étude, (b) séquence de la procédure de caractérisation.

Dans l'approche que nous avons adopté, l'étude du phénomène de vieillissement consiste à suivre l'évolution des propriétés superficielles des échantillons durant un cycle de vieillissement qui comprend deux phases : la phase de contrainte, et la phase post-contrainte (ou phase de repos), à la fin de cette phase post-contrainte, le cycle de vieillissement est achevé et le matériau est considéré vieilli, et c'est à ce moment-là que nous évaluons les propriétés internes des échantillons "vieillis".

[12] La mesure du courant transitoire de surface sera présentée dans le chapitre VI de ce manuscrit.

III.5.2 Phase de contrainte

Pendant la phase de contrainte, une contrainte "singulière" (température, rayonnements UV ou immersion dans une solution) est appliquée aux échantillons pendant une durée de 42 jours pour la température, de 56 jours pour les rayonnements UV et de 56 jours, également, pour l'immersion. Ces échantillons sont retirés périodiquement du dispositif de vieillissement pour la mesure des propriétés superficielles. L'utilisation des techniques de caractérisation superficielle suit un ordre précis en commençant tout d'abord par la mesure de l'angle de contact puis par la mesure du courant de surface et enfin par la détermination de l'indice de la classe de mouillabilité.

L'intervalle du temps entre l'utilisation de deux techniques successives est de 15 minutes. Cela représente le temps nécessaire pour la préparation des dispositifs de mesure et la réalisation des opérations de mesure. La durée totale de la caractérisation superficielle par les différentes techniques après chaque période de contrainte/repos est, généralement, d'environ 1 h. Des essais préliminaires ont été faits pour étudier l'effet de cette période d'interruption de la contrainte appliquée sur les propriétés investigués. Nous avons trouvé que cette période ne présente pas d'influence, ceci peut être dû à la courte durée que présente la période de l'interruption par rapport à la période de contrainte/repos qui dépasse, en générale, 1000 h.

La **Figure 28** montre l'évolution temporelle de la température relative[13] des échantillons vieillis par l'effet thermique après leur prélèvement sur les dispositifs de vieillissement, après une certaine durée de contrainte. D'après cette figure, nous remarquons qu'un certain temps est nécessaire pour permettre aux échantillons d'atteindre un équilibre thermique[14]. C'est pour cette raison que nous attendons, généralement, entre 15 et 20 minutes avant le début de la caractérisation superficielle pendant la période de contrainte, et ce, pour toutes les contraintes étudiées. En fait, commencer directement la caractérisation, sans que les échantillons atteignent l'équilibre thermique, risquerait d'influencer les résultats. Par exemple, les échantillons conditionnés à 2 °C subissent une condensation sur leurs surfaces quand ils sont retirés du dispositif de vieillissement. Cela est dû à l'écart entre la température de ces échantillons et la température ambiante, et qui pourrait influencer la mesure de l'hydrophobicité et/ou du courant de surface qui, comme montré sur la **Figure 22 (b)**, est sensible aux fortes valeurs d'humidité. De même, les échantillons conditionnés à 110 °C

[13] Le rapport entre la température de l'échantillon et la température ambiante.
[14] Quand la température de l'échantillon est égale à la température ambiante.

possèdent lors des premiers instants qui suivent leur prélèvement sur le dispositif de vieillissement, une température presque deux fois supérieure à la température ambiante, et qui risquerait de fausser la mesure de l'angle de contact suite à l'évaporation de gouttelettes déposées par exemple.

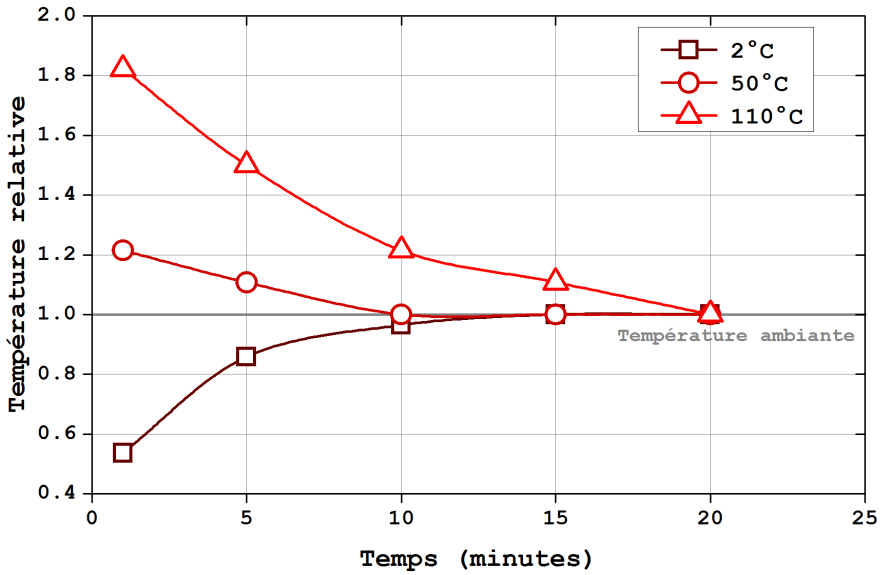


Figure 28. Évolution temporelle de la température relative des échantillons exposés à la contrainte thermique après leur prélèvement.

Après la fin de cette phase de contrainte, les échantillons sont stockés à la température ambiante dans un dessiccateur, au fond duquel est placé du gel de silice afin d'éliminer les particules d'eau dans l'air.

III.5.3 Phase post-contrainte

Pendant la phase post-contrainte, les mêmes échantillons sont caractérisés périodiquement par les trois techniques utilisées dans la phase de contrainte. L'intérêt de cette phase d'étude est de bien suivre l'évolution des propriétés superficielles des échantillons après l'arrêt de la contrainte. La durée de cette deuxième phase est la même que celle de la première phase, c.-à-d. 42 jours pour la température, 56 jours pour les rayonnements UV et 56 jours pour l'immersion. Après l'écoulement de cette deuxième phase, le cycle de vieillissement est terminé.

III.5.4 Phase finale

Cette dernière phase représente la phase finale du cycle de vieillissement dans notre étude. Les échantillons sont considérés vieillis. Les propriétés des échantillons vieillis sont déterminées, incluant leurs propriétés superficielles (l'angle de contact, l'indice de la classe de mouillabilité, la résistivité surfacique et la tension de contournement), ainsi que leurs propriétés diélectriques/électriques internes (la permittivité relative réelle, le facteur de dissipation diélectrique et la résistivité volumique).

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes techniques utilisées pour la caractérisation des échantillons en silicone durant les différentes phases du cycle de vieillissement. Nous avons également présenté notre approche adoptée pour l'étude du phénomène de vieillissement. Le vieillissement accéléré dans cette étude a été conçu comme une illustration extrême de la dégradation du matériau de revêtement en silicone. Dans les deux chapitres suivants, nous allons présenter les résultats expérimentaux issus de cette étude.

Chapitre IV : Étude des propriétés superficielles du matériau de revêtement en silicone durant un cycle de vieillissement.

IV.1 Introduction

Le présent chapitre présente les résultats de mesures obtenues par les trois méthodes de caractérisation superficielle du matériau de revêtement de l'isolateur. Leur utilisation suit un ordre précis en tenant compte des contraintes appliquées à l'échantillon lors de la caractérisation :

- **Mesure de l'angle de contact**.
- **Mesure du courant de surface :** cette mesure met en jeu la dynamique des charges électriques surfaciques qui, après la mesure peuvent persister un certain temps sur la surface du matériau. Ce temps dépend du processus de relaxation - *decay*. C'est pour cette raison que cette mesure est faite après la mesure de l'angle de contact afin d'éviter l'influence des charges électriques sur la valeur de l'angle de contact lors du dépôt de la gouttelette d'eau.
- **Détermination de l'indice de la classe de mouillabilité :** comme nous avons vu au chapitre précédent, cette technique nécessite une vaporisation d'eau sur toute la surface de l'échantillon. Une durée d'attente de 15 minutes entre deux techniques de caractérisation peut s'avérer insuffisante pour permettre un séchage total de la surface de l'échantillon après une pulvérisation d'eau. C'est pour cette raison que cette technique de caractérisation est utilisée en dernier.

IV.2 Résultats

IV.2.1 Phase de contrainte

IV.2.1.1 Effet de la température

La **Figure 29**, la **Figure 30** et la **Figure 31** montrent l'évolution des propriétés superficielles des échantillons pendant la phase de contrainte thermique.

La **Figure 29** montre une diminution de l'angle de contact pendant la période de chauffage/refroidissement. Pour les échantillons refroidis à 2 °C et notamment ceux chauffés à 50 °C, la diminution est initialement importante (pendant les 48 premières heures).

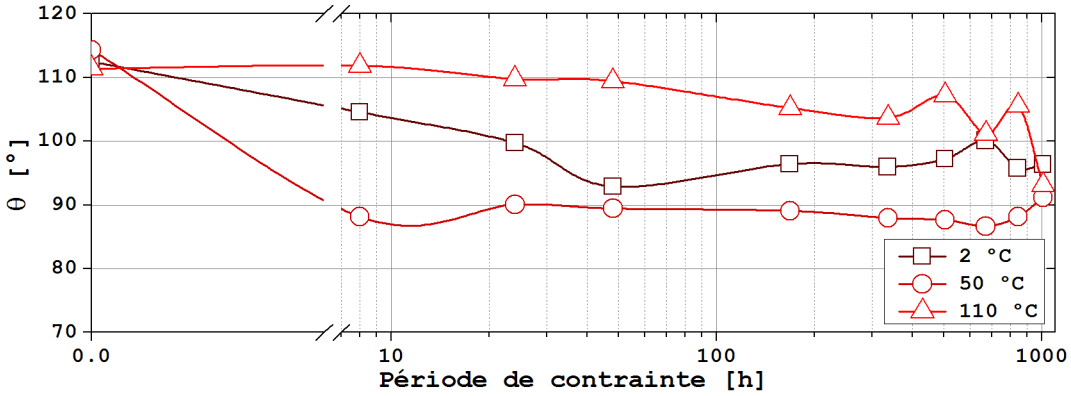


Figure 29. Angle de contact lors de la phase de contrainte thermique.

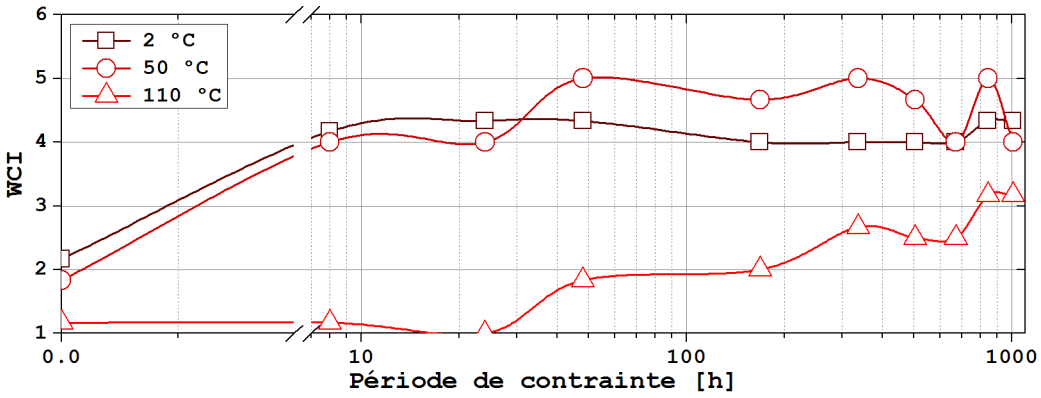


Figure 30. Indice de la classe de mouillabilité lors de la phase de contrainte thermique.

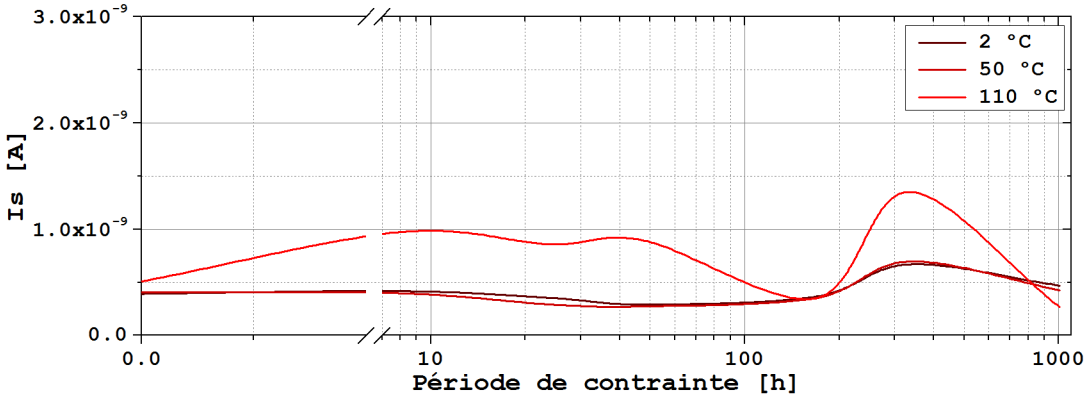


Figure 31. Courant de surface lors de la phase de contrainte thermique.

Ensuite, elle devient relativement insignifiante pour le reste de la période de contrainte. À 110 °C, l'angle de contact diminue plus lentement et présente des fluctuations au bout d'environ 500 h de contrainte. En général, les valeurs de l'angle de contact des échantillons chauffés à 110 °C sont plus élevées que celles des ceux refroidis à 2 °C et celles des ceux chauffés à 50 °C. Les échantillons chauffés à 50 °C présentent la valeur la plus basse de l'angle de contact.

La variation de l'indice de la classe de mouillabilité pendant la période de contrainte thermique est illustrée sur la **Figure 30**. Selon la norme CEI 62073 [133], un indice de classe de mouillabilité élevé signifie une mouillabilité totale, donc l'augmentation de l'indice de la classe de mouillabilité au cours du temps entraîne une perte d'hydrophobicité. Il est intéressant de noter qu'il existe une certaine similitude dans l'indice de la classe de mouillabilité des échantillons refroidis à 2 °C et ceux chauffés à 50 °C durant les 24 premières heures, ce qui n'est pas révélé par la mesure de l'angle de contact.

La **Figure 31** montre l'évolution du courant de surface pendant la période de contrainte thermique. Les échantillons chauffés à 110 °C présentent un courant de surface plus élevé que les échantillons refroidis à 2 °C et ceux chauffés à 50 °C. Pour ces deux derniers cas, la différence de leurs courants de surface est faible.

IV.2.1.2 Effet de la salinité

La variation de l'angle de contact, de l'indice de la classe de mouillabilité et du courant de surface pendant la période d'immersion des échantillons dans les différentes solutions est illustrée sur la **Figure 32**, la **Figure 33** et la **Figure 34**.

Comme le montre la **Figure 32**, l'angle de contact diminue pendant les 96 heures qui suivent le début de l'immersion des échantillons. Il est évident que cette diminution est proportionnelle à l'augmentation de la conductivité électrique de la solution pendant les premières 24 heures. La variation de l'angle de contact semble être liée à la conductivité de la solution dans la première étape d'immersion. Par la suite, l'angle de contact continue de diminuer puis à devenir, plus au moins, stable dans la dernière étape de la phase d'immersion pour le cas des échantillons immergés dans des solutions de : 3 µS/cm, 7 mS/cm, 18 mS/cm et 46 mS/cm.

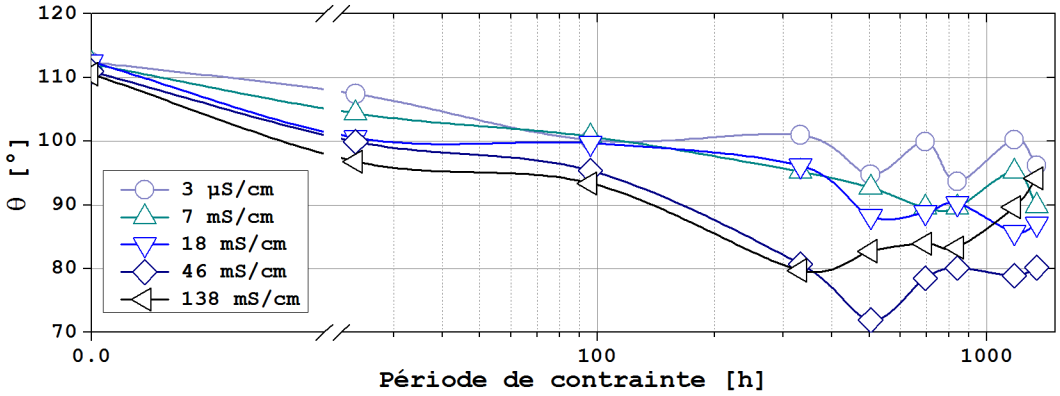


Figure 32. Angle de contact lors de la phase d'immersion des échantillons.

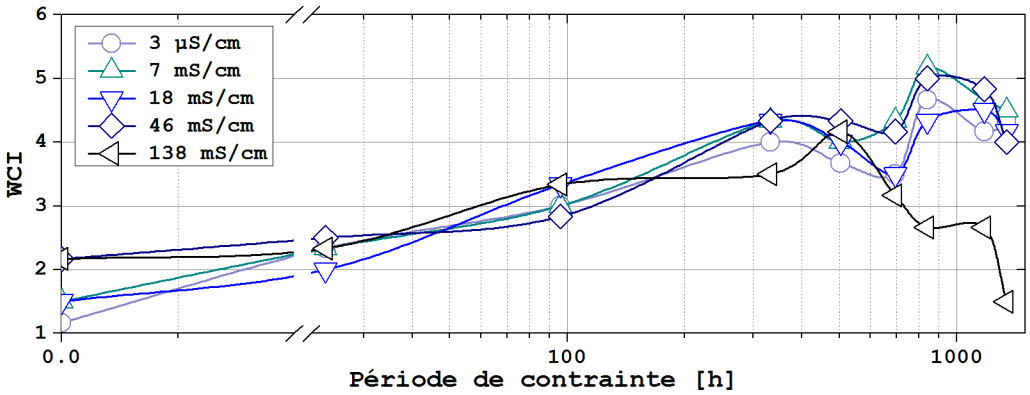


Figure 33. Indice de la classe de mouillabilité lors de la phase d'immersion des échantillons.

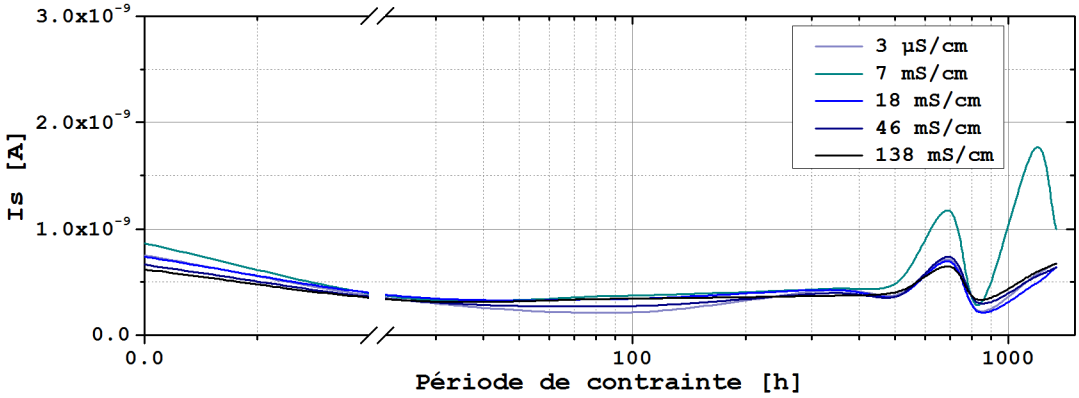


Figure 34. Courant de surface lors de la phase d'immersion des échantillons.

Les échantillons immergés dans l'eau distillée (3 µS/cm) conservent un angle de contact plus élevé que les autres échantillons. Pour les échantillons immergés dans la solution à 138 mS/cm, l'angle de contact continue à diminuer jusqu'à atteindre une valeur seuil, d'où il commence à augmenter. Généralement, la diminution de l'angle de contact pendant la période d'immersion est proportionnelle à l'augmentation de la conductivité de la solution, sauf pour la solution à 138 mS/cm. En effet, l'angle de contact des échantillons immergés dans cette solution commence à augmenter au bout d'environ 332 heures, ce qui était inattendu.

Il ressort de la **Figure 33** que l'indice de la classe de mouillabilité augmente avec la durée d'immersion, ce qui signifie que les échantillons immergés dans toutes les solutions salines perdent leur hydrophobicité. Contrairement à l'angle de contact, l'indice de la classe de mouillabilité ne semble pas dépendre de la conductivité dans l'intervalle de 3 µS/cm à 46 mS/cm. Pour les échantillons de 138 mS/cm, l'indice de la classe de mouillabilité atteint une valeur minimale à 503 heures à partir de laquelle il commence à diminuer jusqu'à atteindre une valeur inférieure à la valeur de référence (échantillons non vieillis), ce qui signifie que l'hydrophobicité s'améliore durant cette période de la phase de l'immersion.

Le lien entre le courant de surface et la conductivité de la solution ne semble pas évident. En général, les échantillons immergés à 7 mS/cm ont un courant de surface plus élevé pendant la période d'immersion, en particulier après 500 h d'immersion. Pour le reste des échantillons, on constate que lors de l'immersion, le courant de surface diminue par rapport aux valeurs de référence.

IV.2.1.3 Effet des rayonnements UV

La **Figure 35** , la **Figure 36** et la **Figure 37** montrent l'évolution de l'angle de contact, de l'indice de la classe de mouillabilité et du courant de surface pendant la période d'exposition des échantillons aux rayonnements UV. Nous remarquons qu'au début de cette période, l'angle de contact présente une légère diminution dans sa valeur puis reste approximativement constant. L'indice de la classe de mouillabilité passe de 1 à environ 2,5 et les échantillons restent hydrophobes tout au long de cette période d'exposition aux rayonnements UV. Le courant de surface est, généralement, stable pendant la période d'exposition aux rayonnements UV, bien qu'il diminue légèrement dans les 24 premières heures.

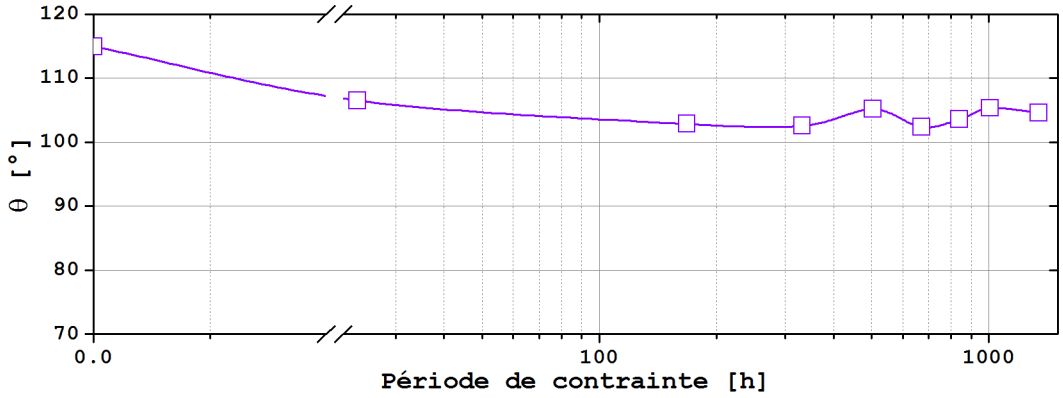


Figure 35. Angle de contact lors de la phase d'exposition aux rayonnements UV.

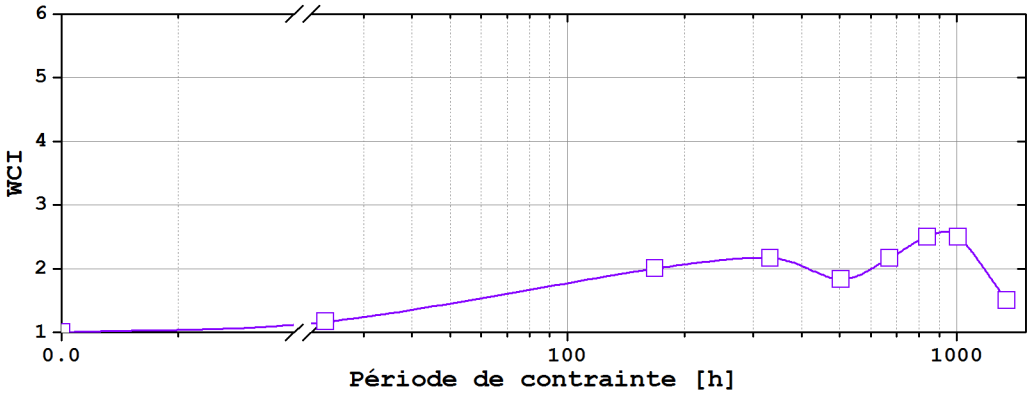


Figure 36. Indice de la classe de mouillabilité lors de la phase d'exposition aux rayonnements UV.

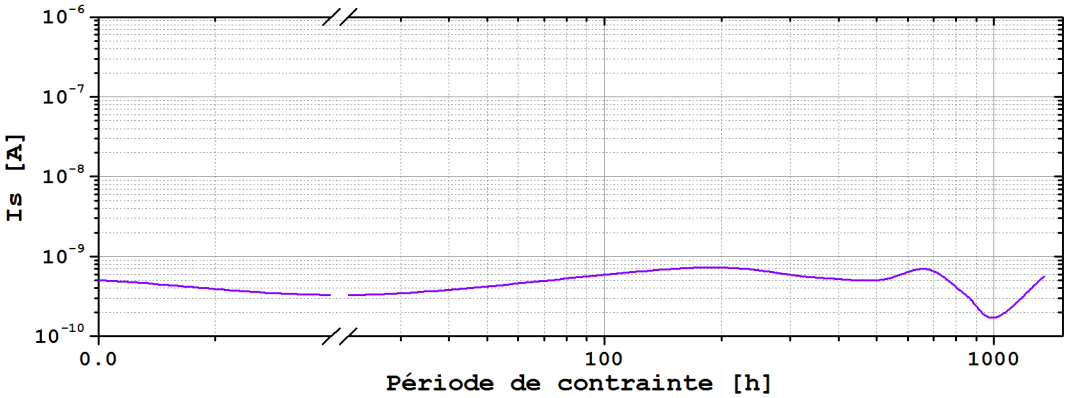


Figure 37. Courant de surface lors de la phase d'exposition aux rayonnements UV.

IV.2.2 Phase post-contrainte

IV.2.2.1 Effet de la température

La variation de l'angle de contact, de l'indice de la classe de mouillabilité et du courant de surface pendant la phase post-contrainte est représentée respectivement sur la **Figure 38** à la **Figure 40**.

D'après la **Figure 38**, il apparaît que les échantillons, préalablement, refroidis à 2 °C et ceux chauffés à 50 °C ne présentent pas de différence significative dans la valeur de l'angle de contact pendant la période de repos (la différence maximale est d'environ 4 °). L'angle de contact augmente légèrement par rapport à la dernière étape de la phase de contrainte pour les échantillons chauffés à 50 °C. Pour les échantillons refroidis à 2 °C, l'angle de contact diminue par rapport à la période de contrainte. Les échantillons préalablement chauffés à 110 °C se comportent différemment des autres : l'angle de contact augmente significativement (+13 °) pendant les huit premières heures de la période post-contrainte, puis il diminue presque de la même amplitude (-14 °) au bout de 24 heures. Par la suite, la diminution reste moins importante jusqu'à atteindre 80 °, pour se stabiliser enfin à environ 87 ° au cours de la dernière étape de la phase post-contrainte.

Comme montré sur la **Figure 39**, et sauf pour les échantillons de 110 °C où l'indice de la classe de mouillabilité continue à augmenter, il n'y a pas de différence significative pour les autres cas dans l'indice de la classe de mouillabilité dans la période post-contrainte par rapport à la période de contrainte.

Le courant de surface dans le cas des échantillons de 110 °C diffère de celui des échantillons de 2 °C et de celui de 50 °C, ces deux derniers ont des valeurs très proches.

Cependant, selon la **Figure 29**, la **Figure 30** et la **Figure 31**, il existe une relation entre l'angle de contact, l'indice de la classe de mouillabilité et le courant de surface pour les échantillons de 110 °C pendant 306-1008 heures de contrainte thermique. C'est surtout sur la **Figure 29** et la **Figure 31** que le courant de surface suit les variations de l'angle de contact. La même chose est observée à partir des **Figure 38** et **Figure 40** après la contrainte. On peut conclure que la variation de l'angle de contact module les charges de surface.

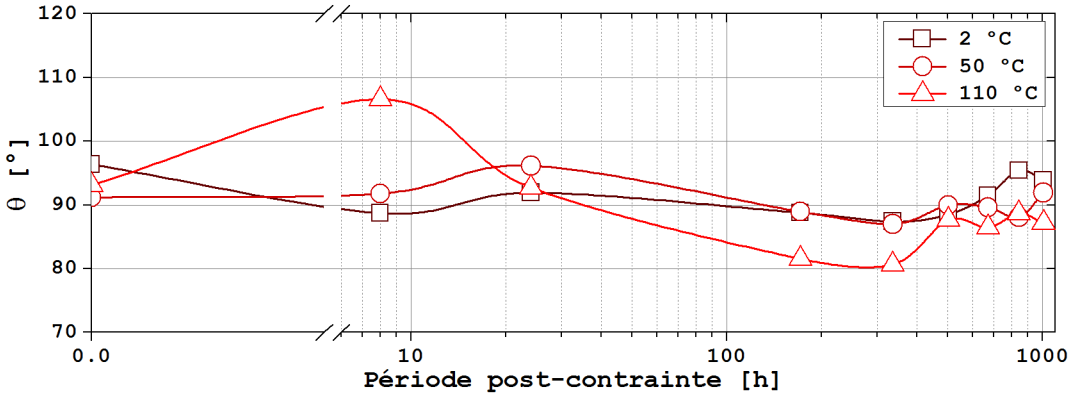


Figure 38. Angle de contact pendant la phase post-contrainte thermique.

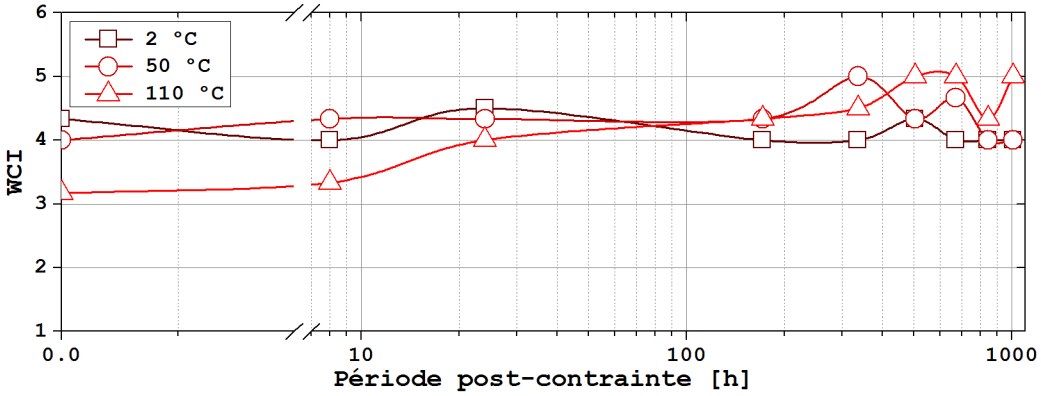


Figure 39. Indice de la classe de mouillabilité pendant la phase post-contrainte thermique.

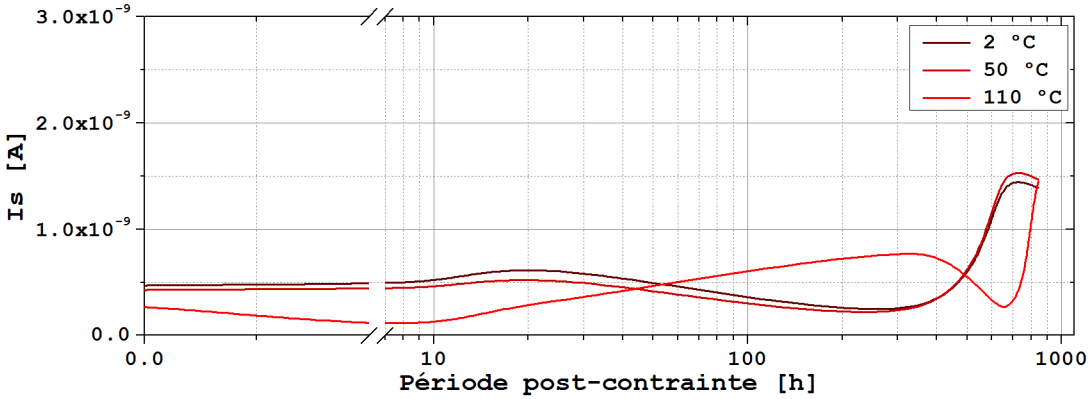


Figure 40. Courant de surface pendant la phase post-contrainte thermique.

IV.2.2.2 Effet de la salinité

La **Figure 41**, la **Figure 42** et la **Figure 43** présentent respectivement l'évolution de l'angle de contact, de l'indice de la classe de mouillabilité et du courant de surface des échantillons - préalablement immergés - pendant la phase post-contrainte.

Selon la **Figure 41**, l'angle de contact augmente rapidement durant les 24 premières heures après qui suivent le retrait des échantillons des solutions de 18 mS/cm, 46 mS/cm et 138 mS/cm. Pour les échantillons de 7 mS/cm et 3 µS/cm, l'augmentation est moins rapide. Par la suite, l'évolution de l'angle de contact a tendance à être plus stable dans le temps, à l'exception des fluctuations observées pendant la dernière étape de la phase post-contrainte. Pendant les premières 24 heures de la période post-contrainte, la variation de l'angle de contact semble être liée à la conductivité de la solution : l'angle de contact augmente avec la conductivité de la solution.

A l'exception des échantillons préalablement immergés à 138 mS/cm, l'indice de la classe de mouillabilité sur la **Figure 42** ne montre pas de variation significative en fonction de la conductivité de la solution pendant la période post-contrainte. On peut donc conclure que la conductivité des solutions dans lesquelles les échantillons y ont été immergés n'affecte pas l'indice de la classe de mouillabilité pendant la période post-contrainte.

Par rapport à la période d'immersion, le courant de surface est légèrement élevé pendant la période post-contrainte pour tous les échantillons, et reste pratiquement stable. Au début de la période post-contrainte, l'augmentation du courant de surface est plus prononcée pour les échantillons immergés auparavant dans la solution de 7 mS/cm.

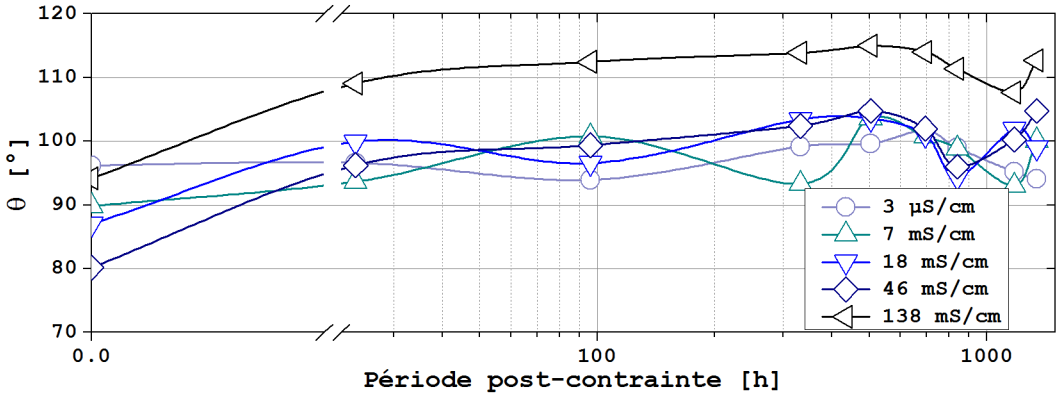


Figure 41. Angle de contact pendant la phase postérieure à l'immersion.

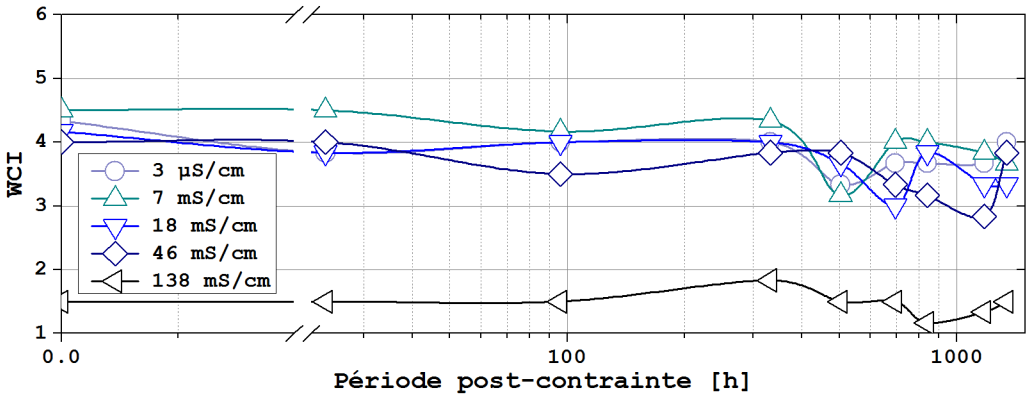


Figure 42. Indice de la classe de mouillabilité pendant la phase postérieure à l'immersion.

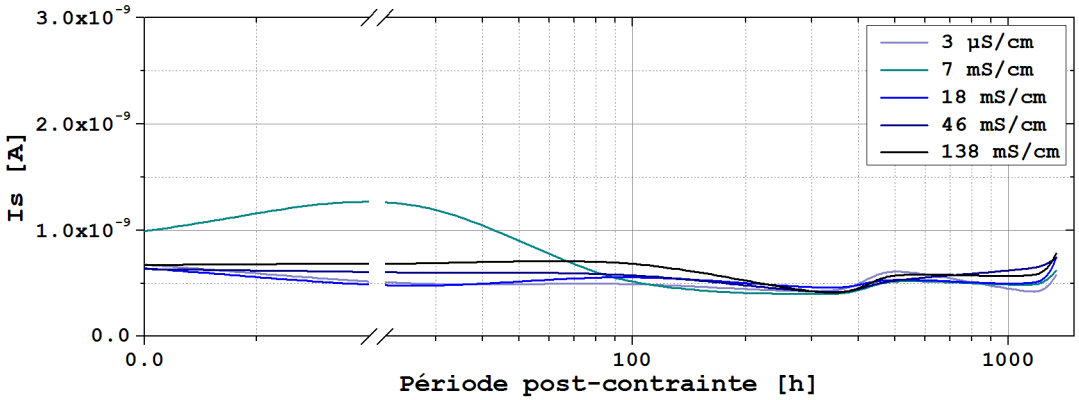


Figure 43. Courant de surface pendant la phase postérieure à l'immersion.

IV.2.2.3 Effet des rayonnements UV

La **Figure 44**, la **Figure 45**, et la **Figure 46**, présentent respectivement l'évolution, pendant la phase post-contrainte, de la valeur de l'angle de contact, de l'indice de la classe de mouillabilité et du courant de surface des échantillons vieillis par rayonnements UV.

Pendant la phase post-contrainte (**Figure 44**), l'angle de contact diminue considérablement (-23,43 °) pendant les 24 premières heures et continue à diminuer moins rapidement jusqu'à 168 heures pour finalement atteindre une certaine stabilité.

La **Figure 45** montre que l'indice de la classe de mouillabilité varie d'environ 1,5 à 5,5 ce qui signifie une mouillabilité totale des surfaces des échantillons.

On peut voir sur la **Figure 46** que le courant de surface devient très élevé pendant la dernière étape de la période post-contrainte, atteignant environ 10^{-7}A, ce qui veut dire que la résistivité de surface devient environ 93 fois inférieure à sa valeur de référence.

D'autre part, il existe une relation entre l'hydrophobicité des échantillons et le courant de surface pendant et après l'exposition aux rayonnements UV. Selon la **Figure 35** et la **Figure 37**, les variations du courant de surface et de l'indice de la classe de mouillabilité ont presque la même tendance lors de la période de l'exposition aux rayonnements UV. Dans la **Figure 45** et la **Figure 46**, l'indice de la classe de mouillabilité et le courant de surface se comportent également de la même manière dans l'intervalle 168-1008 heures pendant la période post-contrainte. Notre conclusion est que la diminution de l'hydrophobicité affecte la quantité de charges de surface après le rayonnement UV.

Une inspection visuelle à la fin du cycle de vieillissement par rayonnements UV a montré que les échantillons vieillis par rayonnements UV n'ont pas été décolorés. Cependant, lors des opérations de mesure de l'hydrophobicité[15], nous avons constaté qu'ils sont devenus plus durs avec des surfaces plus rugueuses par rapport aux échantillons non vieillis.

[15] Lors de l'essuyage de la surface.

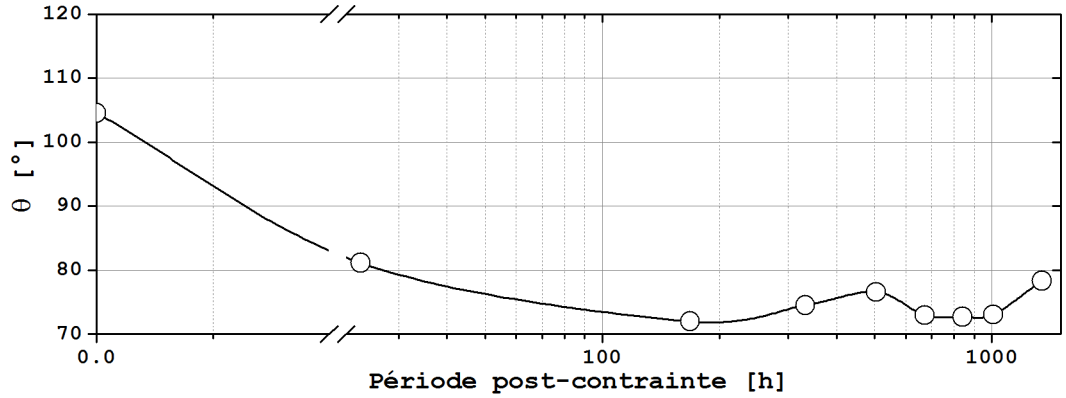


Figure 44. Angle de contact pendant la phase postérieure à l'exposition aux rayonnements UV.

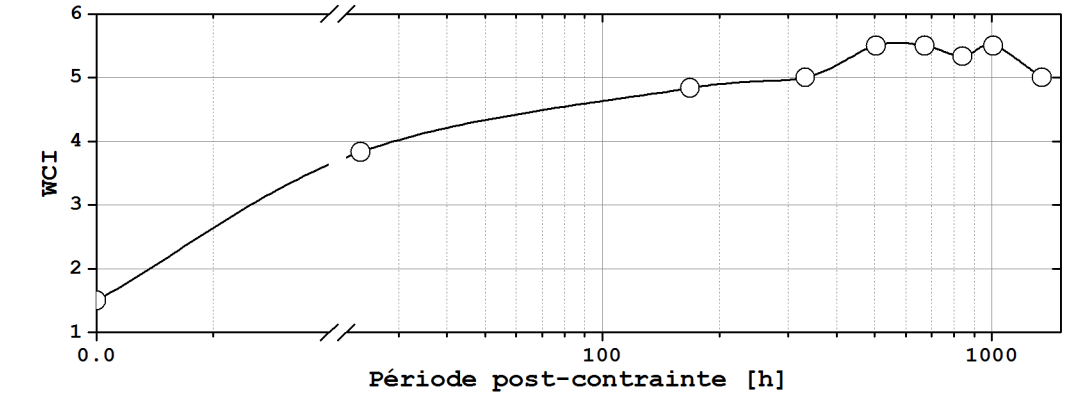


Figure 45. Indice de la classe de mouillabilité pendant la phase postérieure à l'exposition aux rayonnements UV.

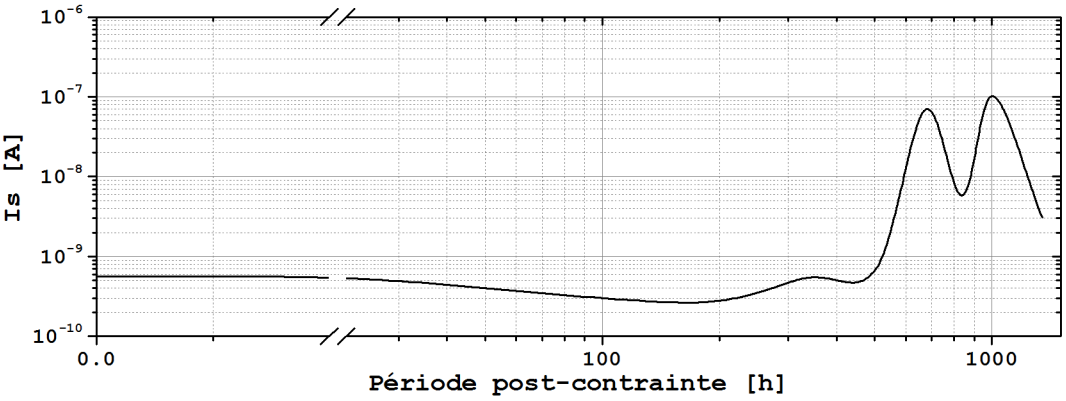


Figure 46. Courant de surface pendant la phase postérieure à l'exposition aux rayonnements UV.

Un exemple de la réduction de l'hydrophobicité d'un échantillon vieilli par les rayonnements UV après la fin du cycle de vieillissement est présenté sur la **Figure 47**, et comparé au cas non vieilli. L'angle de contact de l'échantillon vieilli par les rayonnements UV montre une diminution évidente (d'environ 30%) de sa valeur initiale. L'indice de la classe de mouillabilité subit également une réduction.

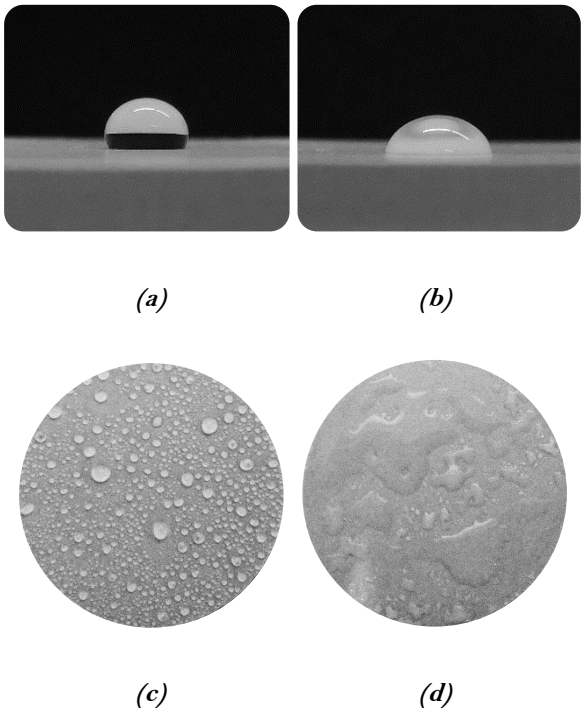


Figure 47. Photographies montrant l'hydrophobicité d'un échantillon en silicone : (a) angle de contact d'un échantillon non vieilli, (b) angle de contact de l'échantillon après vieillissement par rayonnements UV, (c) indice de la classe de mouillabilité d'un échantillon non vieilli, (d) indice de la classe de mouillabilité d'un échantillon après vieillissement par rayonnements UV.

IV.3 Discussion

IV.3.1 Effet de la température

Pour les trois niveaux de température étudiés, les résultats de mesure d'hydrophobicité (angle de contact et indice de la classe de mouillabilité) montrent que les échantillons ne recouvrent pas leur hydrophobicité de référence, même après une période de repos de 1008 heures. Ceci montre que la dégradation de cette propriété peut être irréversible (le vieillissement est atteint). Un travail mené par E. A. Cherney *et al.* [150] indique que la fin de vie d'un matériau polymère est associée à une forte perte d'hydrophobicité et à un retard considérable dans son processus de recouvrement causé par l'épuisement des chaînes LMW.

Q. Wang *et al.* [86] ont montré, à travers les mesures par la FTIR et de l'angle de contact, que la dépendance de l'hydrophobicité du silicone HTV à la température de vieillissement n'est pas monotone. La diminution de la température peut conduire à une diminution de la vitesse de diffusion des espèces LMW du volume du matériau en silicone vers la couche de pollution [151]. Nous avons, cependant, noté que sous certaines valeurs de température, c'est-à-dire 2 °C et en particulier 110 °C, et pendant une certaine durée de contrainte, l'hydrophobicité du matériau est meilleure par rapport à la période post-contrainte. De plus, nous pensons que le chauffage à 110 °C est susceptible de provoquer une scission des liaisons chimiques dans les longues chaînes PDMS qui se décomposent en chaînes PDMS LMW. Ces LMW PDMS continuent à diffuser vers la surface du matériau durant une courte durée après l'arrêt de la contrainte, comme le montre la **Figure 38**, et assurent son hydrophobicité. Ce processus peut encore être observé à des températures plus élevées que 110 °C. En fait, cette suggestion peut être supportée par les résultats de N. Yoshimura *et al.* [77] qui montrent que l'hydrophobicité des revêtements en silicone HTV chauffés à des températures de 250 °C et 300 °C pendant 100 heures ne diminue pas.

La mesure du courant de surface (en DC) reflète la résistivité surfacique du matériau. Il apparaît que la différence de la valeur du courant de surface est négligeable dans l'intervalle de température allant de 2 à 50 °C. Un chauffage dans cet intervalle ne semble pas affecter la résistivité surfacique même pendant la période post-contrainte. Le chauffage à 110 °C, par contre, augmente la valeur du courant. Ceci est probablement dû à l'apparition de porteurs de charges électriques sur la surface du matériau qui augmentent la conductivité surfacique. Les groupes de méthyle (CH_3) sont responsables de l'hydrophobicité du PDMS. Comme leur moment dipolaire est très faible, ils sont considérés comme non polaires. En revanche, la liaison du groupement Siloxane (-Si-O-Si-) confère un caractère relativement polaire (ou ionique) à la molécule PDMS susceptible de favoriser la conduction électrique à la surface du matériau. En effet, H. Jahn *et al.* [39] rapportent que la conductivité électrique du silicone augmente en fonction de la température. Une température élevée peut intensifier le mouvement thermique des porteurs de charges piégés dans la bande de valence, ce qui augmente la possibilité qu'ils quittent cette bande vers la bande de conduction [152]. Pendant la période post-contrainte, nous avons constaté que la conductivité surfacique des échantillons de 110 °C diminue, en générale, par rapport à la période de contrainte.

Dans plusieurs études, les chercheurs ont recours au chauffage à des températures allant de 100 à 120 °C, pendant des heures, et ce, comme procédure de prétraitement pour le

conditionnement des échantillons en silicone. Cependant, l'application de telles températures élevées peut affecter sérieusement les propriétés superficielles du matériau. En effet, d'après nos résultats de mesure du courant de surface pendant la période de contrainte thermique à 110 °C (**Figure 29**), nous avons vu que la valeur de courant de surface a augmenté significativement après environ 8 h de contrainte, ce qui peut indiquer un changement des propriétés physico-chmique du matériau. De ce fait, nous ne recommandons pas le prétraitement des échantillons de silicone HTV à des températures aussi élevées, et plus de précautions doivent être prises lors de l'utilisation de cette approche.

IV.3.2 Effet de la salinité

L'effet de l'immersion est évident pendant les 24 premières heures. Plus la solution est saline -c'est-à-dire plus sa conductivité est élevée, plus l'angle de contact est faible. Selon la référence [103], la diminution de l'angle de contact est due à la diffusion de la solution dans le matériau de revêtement en silicone lors de l'immersion. Z. Wang *et al.* [102] montrent que l'augmentation de la conductivité d'une solution aqueuse ralentit l'absorption d'eau du silicone HTV et, d'après eux, ce phénomène peut être dû à deux effets ; à savoir, une diminution de la taille du volume libre à l'intérieur du matériau en raison de l'effet de blindage des contres-ions, ou une diffusion d'eau réduite en raison d'une solution à potentiel chimique plus faible.

Pour quantifier la diffusion de l'eau, nous avons refait les essais d'immersion. Cette fois-ci, la masse des échantillons est mesurée par une balance **KERN** d'une résolution de 10^{-4} g. Le **Tableau 1** montre le changement de la masse relative des échantillons (M), elle est mesurée avant l'immersion, après 24 h d'immersion, et après 24 h de "post-immersion". Elle est calculée suivant l'équation suivante :

$$\mathrm{M} = \frac{m - m_0}{m_0} \cdot 100\% \qquad (16)$$

Où m et m_0 représentent, respectivement, la masse de l'échantillon à un moment donné, et sa masse initiale.

Tableau 1. Masse relative après un test d'immersion à court tem.

Cas étudiés [mS/cm]	**0,003**	**7**	**18**	**46**	**138**
M [%] **(après 24 h d'immersion)**	0,165	0,016	0,015	-0,073	-0,220
M [%] **(après 24 h de post-immersion)**	0,038	0,070	-0,079	-0,052	-0,205

À partir du **Tableau 1**, et en partant de l'hypothèse que la diffusion de la solution vers le silicone, et la diffusion des PDMS vers la solution s'effectuent simultanément, on pense que l'augmentation du poids des échantillons immergés pendant 24 h est due au fait que la quantité de la solution diffusée est supérieure à la quantité des PDMS perdues par le matériau. Avec l'augmentation de la conductivité de la solution, la quantité de la solution diffusée devient inférieure à la quantité de PDMS perdues, ce qui explique les valeurs de l'angle de contact sur la **Figure 32**. En fait, il a été rapporté que la solution NaCl peut causer une altération de la matrice du polymère et la dissolution des additifs [98]. Cela conduit à l'érosion de la surface du HTV silicone, et ainsi, le poids du matériau se trouve réduit [153]. On peut, d'après le **Tableau 1**, remarquer aussi qu'après 24 h de post-contrainte, une certaine quantité d'eau peut résider à l'intérieur des échantillons.

Cependant, l'effet de l'immersion devient plus complexe en fonction de la durée d'immersion, et ce, en raison des fluctuations de l'angle de contact pour le cas de l'eau distillée, et de recouvrement de l'angle de contact pour la solution de 46 mS/cm, surtout celle de 138 mS/cm.

M. Ali et R. Hackam [103] ont montré que l'angle de contact des échantillons immergés dans une solution de NaCl à 100 mS/cm diminue, mais conserve une valeur plus élevée par rapport aux autres échantillons immergés dans des solutions de conductivité inférieure. Néanmoins, et à notre connaissance, aucune remarque n'a été rapportée dans la littérature sur l'amélioration de l'hydrophobicité du matériau en silicone lors de l'immersion dans une solution saline.

Il est difficile, actuellement, de donner une interprétation précise de ce phénomène. Afin de comprendre ces résultats obtenus, des recherches supplémentaires sont nécessaires. Mais, nous pouvons dire qu'une diffusion continue d'eau dans le matériau n'explique pas l'augmentation de l'angle de contact pour les solutions à haute conductivité.

Par contre, on pense que ce phénomène puisse être lié au "transfert de l'hydrophobicité". En fait, 138 mS/cm est une solution saturée qui contient des particules de sel de NaCl non dissoutes, qui s'adsorbent sur la surface du silicone, et les molécules LWM PDMS y sont transférées, par conséquent, la diffusion de la solution devient plus difficile à l'intérieur du matériau. Il est possible que, pour les échantillons immergés dans les solutions à forte salinité, la diffusion de la solution saline ne se fasse pas dans tout le volume de l'échantillon mais reste limité à une certaine épaisseur. A partir de la zone "sèche" de l'échantillon, les molécules LMW PDMS (présents auparavant), se diffusent vers la surface et assurent le recouvrement de l'hydrophobicité pendant la période de l'immersion. Par conséquent, la diffusion de la solution s'arrête.

Pendant la période post-contrainte, l'angle de contact des échantillons immergés auparavant dans 138 mS/cm augmente rapidement, dépasse la valeur de référence après quelques heures et reste plus élevée par rapport aux autres échantillons. L'augmentation de l'angle de contact est plus importante lorsque la conductivité de la solution est importante, ceci est en accord avec les résultats de M. Ali et R. Hackam [154]. Ensuite, l'effet de conductivité sur l'angle de contact devient moins prononcé.

L'indice de la classe de mouillabilité montre une dégradation d'hydrophobicité pendant la période d'immersion (sauf pour 138 mS/cm où l'hydrophobicité commence à se recouvrir après 695 heures). Cependant, il semble que l'indice de la classe de mouillabilité ne dépend pas de la conductivité de la solution. Cela vaut également pour la période post-contrainte (à l'exception des échantillons de 138 mS/cm où ils présentent une différence significative de l'indice de la classe de mouillabilité par rapport aux autres échantillons).

Le courant de surface, lui aussi, présente une faible dépendance à la conductivité des solutions. Les pics observés lors de la dernière étape de la phase d'immersion, et lors du début de la période post-contrainte, révèlent une dégradation de la résistivité surfacique du matériau, cependant, cette dégradation n'est pas permanente puisque le courant revient à son niveau stationnaire après 96 heures de repos. Il est possible que la diminution de la résistivité surfacique été due à la présence de traces microscopiques d'eau ou de solution saline sur la surface de l'isolant, qui n'ont pas été complètement éliminées après la mesure de l'angle de contact.

IV.3.3 Effet des rayonnements UV

Les résultats expérimentaux montrent que l'hydrophobicité est maintenue pendant la période de contrainte par les rayonnements UV, ceci est en accord avec les résultats rapportés par les références [155], [156]. Cela suggère que l'exposition du matériau HTV en silicone aux rayonnements UV n'affecte pas considérablement l'hydrophobicité (une différence maximale d'environ 13 ° dans l'angle de contact et une différence d'environ un dans l'indice de la classe de mouillabilité). Pourtant, l'évaluation de l'hydrophobicité en période post-contrainte montre le contraire. En fait, l'hydrophobicité commence à se dégrader et la surface du matériau devient constamment hydrophile. Lors de l'exposition aux rayonnements UV, et en raison de la chaleur dégagée par la lampe UV, la température à l'intérieur de la chambre de vieillissement UV était de l'ordre de 30 °C qui, dans notre étude, est considérée comme température supérieure à la température ambiante. La combinaison de la température et des rayonnements UV pourrait être un facteur responsable du maintien de l'hydrophobicité pendant la période de l'exposition aux UV.

Le courant de surface enregistré lors de la dernière partie de la période post-contrainte révèle une dégradation considérable de la résistivité surfacique. Cela peut être dû à l'augmentation du nombre de porteurs de charge existant auparavant sur la surface du matériau et provenant d'impuretés, ou à l'apparition de nouveaux porteurs. En effet, les rayonnements UV peuvent être responsables de la formation de groupes d'hydroxyle (OH) [97]. En raison de leur caractère polaire, ces groupes contribuent considérablement à l'hydrophilicité de la surface en s'attachant aux molécules d'eau, favorisant ainsi le passage du courant sur la surface du matériau.

IV.4 Conclusion

Dans ce chapitre, un cycle d'essai de vieillissement accéléré a été appliqué aux échantillons en silicone pour étudier l'effet de la température, des rayonnements UV et de l'immersion dans des solutions salines et dans l'eau distillée. Les résultats obtenus nous ont conduits aux conclusions suivantes :

Un désaccord occasionnel entre les résultats de l'angle de contact et de l'indice de la classe de mouillabilité est dû à la non-uniformité d'hydrophobicité sur la surface de l'isolant en raison de l'inhomogénéité du matériau.

La contrainte thermique semble affecter différemment l'hydrophobicité et la résistivité surfacique du matériau de revêtement en silicone en fonction de la température appliquée.

Pendant la phase de contrainte par rayonnements UV, l'hydrophobicité est meilleure que dans la phase post-contrainte, bien que les autres propriétés de surface soient dégradées. Pour estimer le degré de vieillissement du matériau de revêtement, l'évaluation de l'hydrophobicité comme seul paramètre lors du diagnostic de l'isolateur n'est pas suffisante.

La conductivité de la solution affecte l'hydrophobicité pendant la période d'immersion. Cet effet devient plus complexe en fonction de la durée d'immersion, notamment pour les hauts niveaux de conductivité.

La mesure du courant de surface ne reflète pas de manière fiable le changement physico-chimique sur la surface du matériau isolant pendant le vieillissement par immersion.

Dans le chapitre suivant, les propriétés internes du matériau de revêtement en silicone seront étudiées en fonction des contraintes appliquées pendant le cycle de vieillissement. La corrélation entre ces paramètres et la tension de contournement sera également étudiée.

Chapitre V : Étude des propriétés internes du matériau de revêtement en silicone après un cycle de vieillissement.

V.1 Introduction

L'objectif principal de ce chapitre est d'étudier l'influence du vieillissement par l'action de : la température, les rayonnements UV et l'immersion dans des solutions salines et dans l'eau distillée sur le changement des propriétés diélectriques internes du matériau de revêtement en silicone. Il est à noter que les résultats des mesures qui seront présentés dans ce chapitre concernent la phase finale du cycle de vieillissement que nous avons réalisé.

La technique de la spectroscopie diélectrique que nous avons présentée dans le chapitre III, sera utilisée dans cette investigation pour déterminer la réponse diélectrique du matériau. La résistivité surfacique sera calculée à partir des résultats de mesure du courant de surface. Nous allons présenter également les résultats de mesure de la tension de contournement.

Nous aborderons aussi l'étude de la corrélation entre les propriétés internes du matériau de revêtement et ses propriétés superficielles.

V.2 Résultats et discussions

V.2.1 Effet de la température

V.2.1.1 Analyses diélectriques

La **Figure 48** présente la variation de la partie réelle de la permittivité relative avec la fréquence pour les différentes températures appliquées lors du cycle de vieillissement thermique. Sur la même figure ainsi que sur les figures suivantes, la courbe des échantillons non vieillis est également incluse afin de servir comme référence.

Selon la **Figure 48**, la permittivité diminue avec l'augmentation de la fréquence. L'effet du vieillissement thermique est observable à partir 0,05 Hz jusqu'à environs 1 kHz, où il est évident que la permittivité diminue avec l'augmentation de la température de vieillissement. Au-delà de 1 kHz, nous constatons que la permittivité ne présente pas de changement significatif en fonction de la température de vieillissement et est approximativement constante avec une moyenne autour de 4,75 qui représente la permittivité du silicone [157], [158]. En revanche, les échantillons vieillis à 2 °C présentent une permittivité proche des échantillons non vieillis.

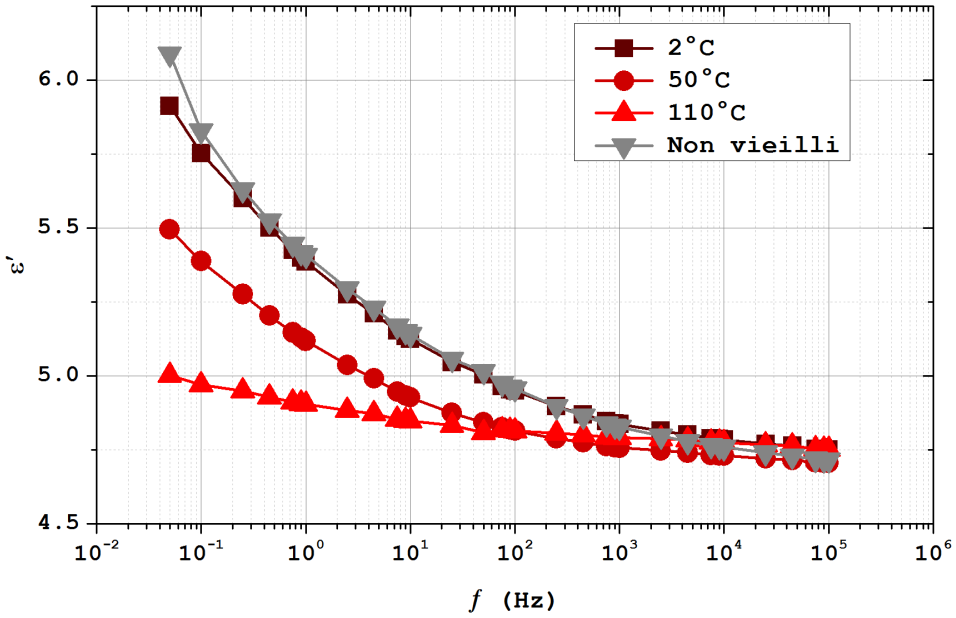


Figure 48. Variation de la permittivité réelle en fonction de la fréquence après vieillissement thermique.

La **Figure 49** illustre la variation du facteur de dissipation diélectrique avec la fréquence pour les différentes températures de vieillissement. La même tendance est observable que précédemment : l'augmentation de la température fait diminuer le facteur de dissipation diélectrique. Le facteur de dissipation diélectrique diminue considérablement avec l'augmentation de la fréquence jusqu'à 1 kHz. A partir de cette fréquence, les valeurs du facteur de dissipation diélectrique des échantillons vieillis sont plus proches, et ce, jusqu'à la fréquence 0,1 MHz. Par la suite, le facteur de dissipation diélectrique est approximativement constant (une moyenne inférieure à 5.10^{-3}). Les échantillons vieillis à basse température 2 °C présentent un facteur de dissipation diélectrique proche des échantillons non vieillis.

Dans cette étude, les propriétés diélectriques des échantillons en silicone sont étudiées dans une fréquence allant de 0,05 à 10^5 Hz. Par conséquent, la polarisation électronique et la polarisation atomique sont des mécanismes qui ne sont pas observés.

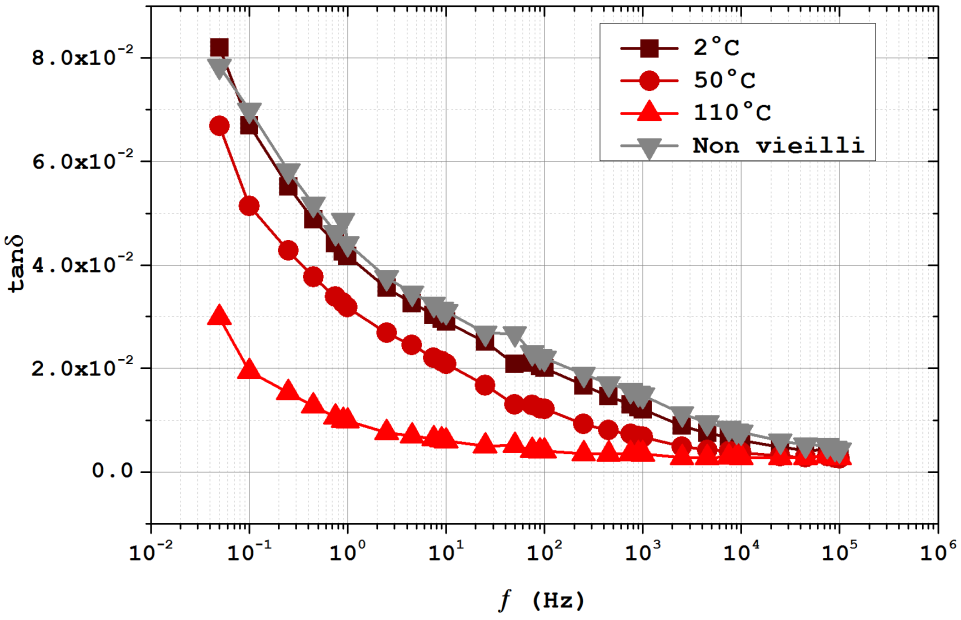


Figure 49. Variation du facteur de dissipation diélectrique en fonction de la fréquence après vieillissement thermique.

Selon la **Figure 48**, la permittivité interagit avec la température de vieillissement. Cet effet est plus prononcé pour les basses fréquences (0,05-10^3 Hz). En effet, dans cette gamme de fréquences, la polarisation interfaciale ou effet "Maxwell-Wagner-Sillars (MWS)" est ,généralement, le mécanisme le plus dominant [139], [157]. Cette polarisation apparaît - comme nous avons vu dans le chapitre III - dans les matériaux hétérogènes suite à l'accumulation des porteurs de charges électriques aux interfaces du matériau [138], [139], [141], [159]. Il convient de noter que dans les basses fréquences, la polarisation d'électrode peut également contribuer à l'augmentation de la permittivité complexe pour les matériaux, moyennement à très conducteurs [136].

Le formalisme du module électrique est utilisé dans l'étude des propriétés de relaxation [159]–[164]. Le module complexe M^* en fonction de la pulsation w est donné par l'**équation (17)**, les parties réelle M' et imaginaire M'' du module complexe sont données par l'**ensemble d'équations (18)**. Etant donné que ε' et ε'' apparaissent dans le dénominateur, le module réel et imaginaire sont minimisés par l'augmentation de la permittivité réelle et imaginaire [165]. Ainsi ce formalisme permet de minimiser, ou même d'éliminer les effets des électrodes et de contacts qui masquent la relaxation dans le formalisme de la permittivité [160], [161].

$$M^*(w) = \frac{1}{\varepsilon^*(w)} = \frac{1}{\varepsilon'(w) - j\varepsilon''(w)} = M'(w) + jM''(w) \qquad (17)$$

Où

$$\begin{cases} M'(w) = \dfrac{\varepsilon'(w)}{\left[\varepsilon'(w)\right]^2 + \left[\varepsilon''(w)\right]^2} \\ M''(w) = \dfrac{\varepsilon''(w)}{\left[\varepsilon'(w)\right]^2 + \left[\varepsilon''(w)\right]^2} \end{cases} \qquad (18)$$

La **Figure 50** présente la variation des parties réelle et imaginaire du module électrique en fonction de la fréquence. On s'attendrait à voir un pic dans les courbes du module imaginaire indiquant un processus de relaxation, mais la tendance est similaire à la courbe du facteur de dissipation diélectrique, cela suggère que l'augmentation des valeurs de la permittivité réelle et imaginaire dans les basses fréquences est intrinsèque au matériau et non pas due aux effets parasites.

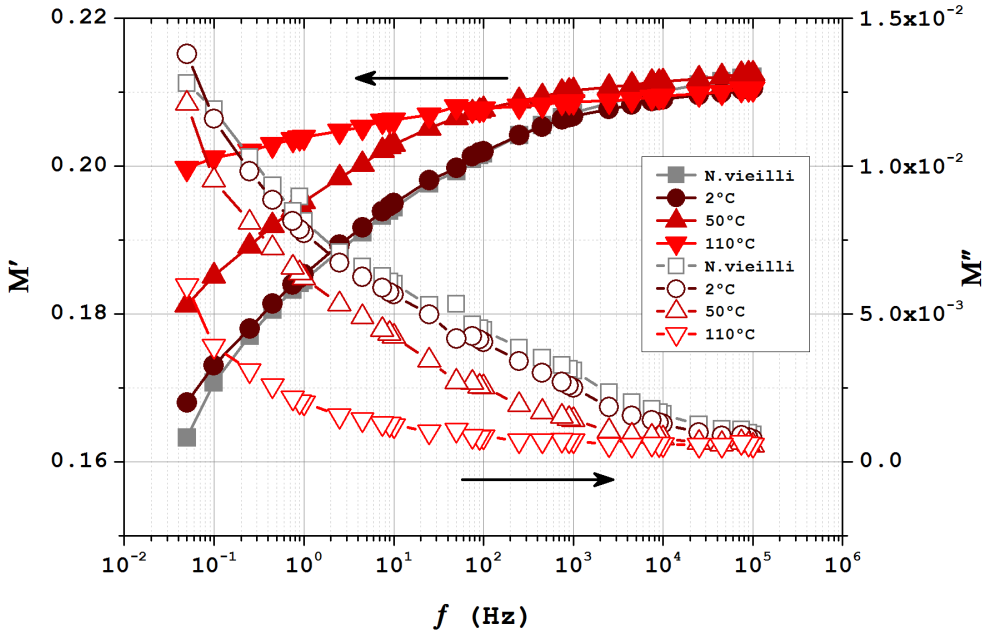


Figure 50. Variation du module complexe en fonction de la fréquence après vieillissement thermique.

L'absence d'un pic de relaxation dans notre matériau pourrait être attribuée au phénomène de dispersion en basses fréquences - *Low frequency dispersion* (LFD) - [166] qui est caractérisé par [167]:

$$\begin{cases} \chi'(w) \propto \chi''(w) \propto w^{-p}, & w < w_c \\ \chi'(w) \propto \chi''(w) \propto w^{n-1}, & w > w_c \\ 0 < p, n < 1 \end{cases} \quad (19)$$

Où χ' et χ'' représentent respectivement la partie réelle et imaginaire de la susceptibilité diélectrique complexe, p et n sont des constantes. w_c est la pulsation critique, elle représente le point d'intersection des courbes de χ' et χ'' dans une représentation "log-log" en fonction de la fréquence (ou de la pulsation). La susceptibilité diélectrique complexe χ^* est donnée par [168]:

$$\chi^*(w) = \varepsilon^*(w) - \varepsilon_\infty = \chi'(w) - j\chi''(w) \quad (20)$$

Où

$$\begin{cases} \chi'(w) = \varepsilon'(w) - \varepsilon_\infty \\ \chi''(w) = \varepsilon''(w) \end{cases} \quad (21)$$

Avec

$$\varepsilon_\infty = \lim_{w \to \infty} \varepsilon'(w) \quad (22)$$

Dans notre étude, ε_∞ est obtenue à partir de la moyenne arithmétique des valeurs constantes de la permittivité réelle ($\varepsilon_c'(w)$) vers les hautes fréquences (autours de 10^5 Hz) :

$$\varepsilon_\infty = \frac{1}{\xi}\sum_i^{\xi} \varepsilon_c'(w) \qquad (23)$$

Où ξ est le nombre de permittivités réelles dont la valeur est constante vers les hautes fréquences.

La **Figure 51** à la **Figure 54** présentent la variation de la susceptibilité diélectrique complexe en fonction de la pulsation pour les échantillons non vieillis et ceux vieillis par la contrainte thermique. Dans ces figures, les valeurs de χ' dans les fréquences supérieures à 45.10^3 Hz sont omises des courbes à cause de la soustraction de la valeur de ε_∞ (**équation (21)**). Les valeurs de χ'' ne sont donc aussi pas présentées dans ces fréquences.

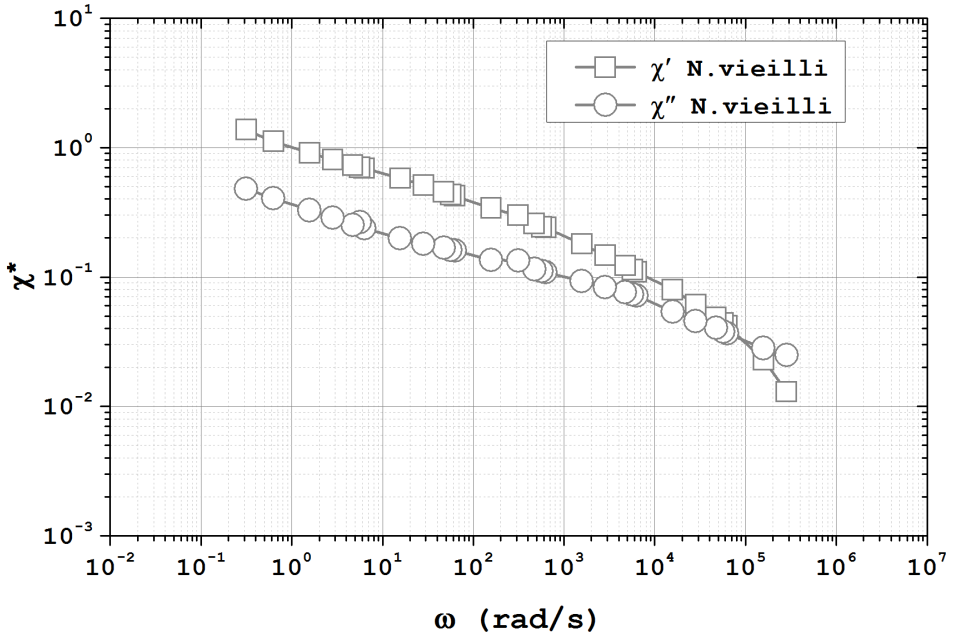


Figure 51. Parties réelle et imaginaire de la susceptibilité diélectrique du matériau non vieilli.

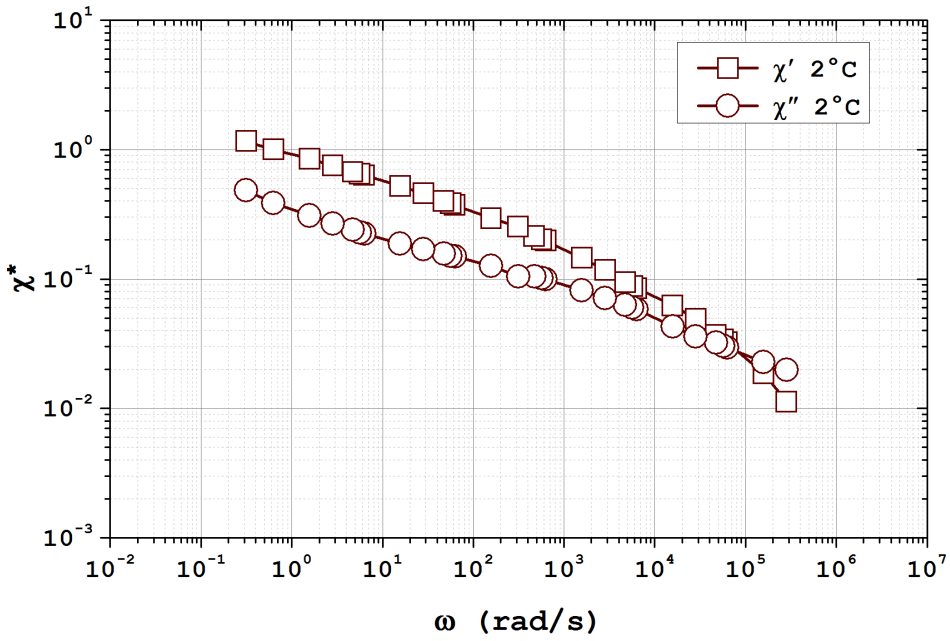


Figure 52. Parties réelle et imaginaire de la susceptibilité diélectrique après vieillissement thermique à 2 °C.

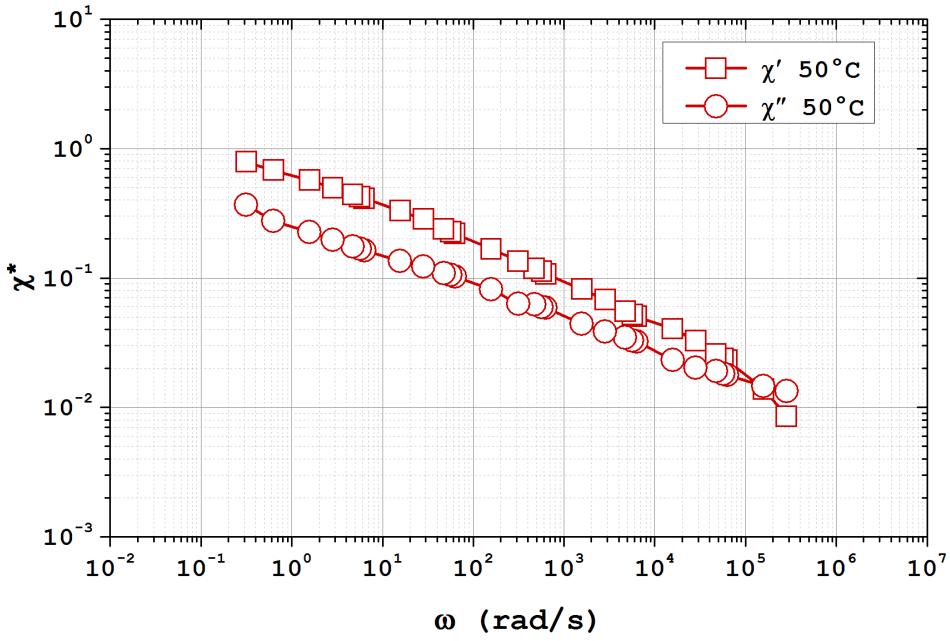


Figure 53. Parties réelle et imaginaire de la susceptibilité diélectrique après vieillissement thermique à 50 °C.

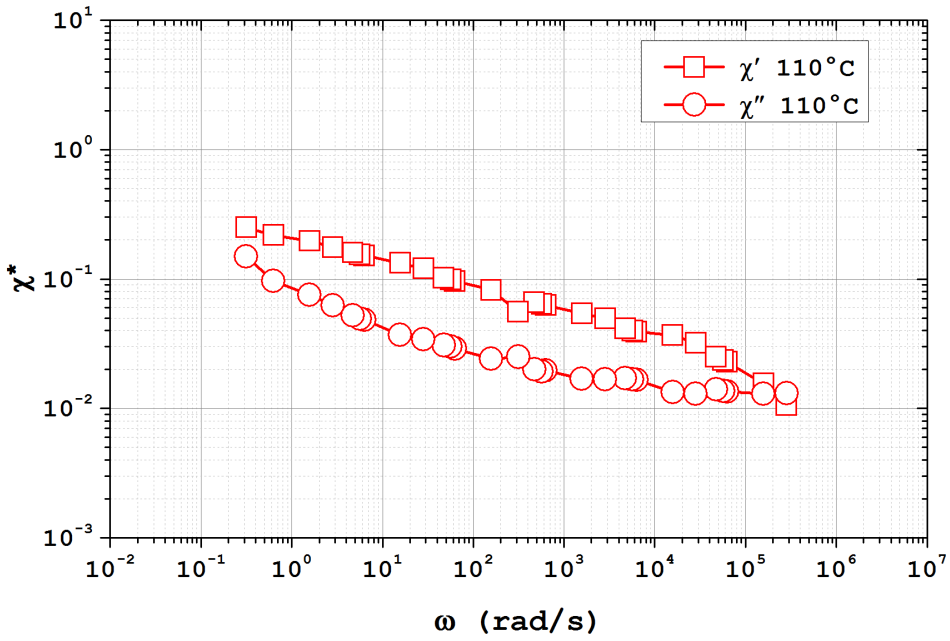


Figure 54. Parties réelle et imaginaire de la susceptibilité diélectrique après vieillissement thermique à 110 °C.

Nous remarquons d'après ces quatre figures précédentes que la partie réelle de la susceptibilité diélectrique est quasi-parallèle à la partie imaginaire pour des pulsations très inférieures à w_c . D'après les courbes, w_c a pour valeur de 89,852.10³ de 84,913.10³ de 136,948.10³ et de 206,696.10³ rad/s pour les échantillons non vieillis, vieillis à : 2 °C, 50 °C et 110 °C respectivement. Nous constatons que les valeurs de w_c se déplacent vers les hautes fréquences en fonction de la température du vieillissement. Pour les échantillons vieillis à 110 °C, la pente de la susceptibilité imaginaire commence à augmenter au-delà de 10 rad/s.

Pour une relaxation type Debye, la susceptibilité diélectrique complexe est donnée par l'**équation (24)**, où τ_D est le temps de relaxation Debye, ε_s est la permittivité statique [169].

$$\chi^*(w) = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + jw\tau_D} \qquad (24)$$

$$= \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + w^2\tau_D^2} - j\frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)w\tau_D}{1 + w^2\tau_D^2}$$

Où

$$\varepsilon_s = \lim_{w \to 0} \varepsilon'(w) \qquad (25)$$

En pratique, la relaxation type Debye est rarement observée [167]. Pour les polymères isolants, la relaxation empirique Havriliak-Negami décrit bien la réponse diélectrique [139]. La susceptibilité diélectrique complexe (**équation (24)**) devient de la forme [170]:

$$\chi^*(w) = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{\left[1 + (jw\tau)^\alpha\right]^\beta} \qquad (26)$$

Où α et β sont des constantes en relation avec la forme de la réponse diélectrique, avec $\alpha \neq 1$ et $\beta \neq 1$. Pour $\alpha = \beta = 1$, nous obtenons la réponse classique de Debye. Pour $\alpha \neq 1$ et $\beta = 1$, nous obtenons la réponse Cole-Cole. Pour $\alpha = 1$ et $\beta \neq 1$, nous obtenons la réponse Cole-Davidson.

En prenons en considération la conductivité en DC (σ_{DC}) et la conductivité par saut - *Hopping* - (σ_{Ho}), l'**équation (26)** devient de la forme [139], [170]:

$$\chi^*(w) = \frac{\chi_s}{\left[1 + (jw\tau)^\alpha\right]^\beta} + \frac{\sigma_{DC}}{j\varepsilon_0 w} + \frac{\sigma_{Ho}}{\varepsilon_0 (jw)^\gamma} \qquad (27)$$

Avec $0 < \gamma < 1$. La susceptibilité diélectrique à $w = 0$ rad/s est : $\chi_s = \varepsilon_s - \varepsilon_\infty$.

Sachant que $(j)^\psi$ est exprimé par :

$$(j)^\psi = \cos\left(\frac{\psi\pi}{2}\right) + j\sin\left(\frac{\psi\pi}{2}\right) \qquad (28)$$

Les parties réelle et imaginaire de la susceptibilité diélectrique obtenues par l'équation deviennent alors :

$$\chi'(w) = \frac{\chi_s \cos\left[\beta \tan^{-1}\left(\frac{(w\tau)^{\alpha}\sin\left(\frac{\alpha\pi}{2}\right)}{1+(w\tau)^{\alpha}\cos\left(\frac{\alpha\pi}{2}\right)}\right)\right]}{\left[\left(1+(w\tau)^{\alpha}\cos\left(\frac{\alpha\pi}{2}\right)\right)^2+\left((w\tau)^{\alpha}\sin\left(\frac{\alpha\pi}{2}\right)\right)^2\right]^{\frac{\beta}{2}}} + \frac{\sigma_{Ho}}{\varepsilon_0 w^{\gamma}\cos\left(\frac{\gamma\pi}{2}\right)} \qquad (29)$$

$$\chi''(w) = \frac{\chi_s \sin\left[\beta \tan^{-1}\left(\frac{(w\tau)^{\alpha}\sin\left(\frac{\alpha\pi}{2}\right)}{1+(w\tau)^{\alpha}\cos\left(\frac{\alpha\pi}{2}\right)}\right)\right]}{\left[\left(1+(w\tau)^{\alpha}\cos\left(\frac{\alpha\pi}{2}\right)\right)^2+\left((w\tau)^{\alpha}\sin\left(\frac{\alpha\pi}{2}\right)\right)^2\right]^{\frac{\beta}{2}}} + \frac{\sigma_{Ho}}{\varepsilon_0 w^{\gamma}\sin\left(\frac{\gamma\pi}{2}\right)} + \frac{\sigma_{DC}}{\varepsilon_0 w} \qquad (30)$$

La **Figure *55*** à la **Figure *62*** présentent les résultats de l'ajustement de la susceptibilité réelle et imaginaire en utilisant les **équations (*29*)** et **(*30*)** pour les échantillons non vieillis et ceux vieillis par la contrainte thermique. Dans les mêmes figures, la contribution de la polarisation et de la conduction (par saut et DC) est également présentée. Dans le **Tableau *2***, nous rapportons les paramètres d'ajustement des courbes. Mis à part les déviations dans les hautes fréquences, nous remarquons que le modèle d'ajustement décrit raisonnablement la variation pulsationnelle de la susceptibilité diélectrique complexe de nos échantillons, avec des coefficients de corrélation supérieurs à 0,989.

La susceptibilité diélectrique complexe semble influencée par la conduction par saut, notamment pour les échantillons non vieillis. Le **Tableau *2*** montre que la conductivité par saut diminue avec l'augmentation de la température du vieillissement. La conduction par saut est favorisée par l'existence des états localisés (pièges) vides ou occupés dans la bande interdite près des défauts de structure du matériau [171]. Ces états localisés constituent un chemin de passage des porteurs de charges à l'intérieur du matériau [168], [172], [173]. Nos résultats suggèrent que la densité des états localisés vides diminue avec le vieillissement. Ces états localisés sont probablement dus aux interfaces entre les additifs présents dans le volume du matériau et les PDMS [170], [174]. La température appliquée lors du vieillissement accélère la diffusion des LMW PDMS vers la surface du matériau, et peut même rompre les liaisons chimiques de certains groupes comme les groupes de méthyle (CH_3) hydrophobes.

Les résultats de la susceptibilité diélectrique complexe pour les échantillons non vieillis montrent un pic de relaxation à 17,81 rad/s qui, premièrement, se décale vers les hautes fréquences pour les échantillons vieillis à 2 °C, puis se déplace vers les basses fréquences ,tout en diminuant en amplitude, pour les échantillons vieillis à 50 et à 110 °C. Le décalage du pic de relaxation pour les échantillons vieillis à 2 °C est attribué à l'effet de la polarisation dipolaire ; cette polarisation est due, éventuellement, à la présence de molécules d'eau dans le volume du matériau qui ont pour origine la condensation pendant la période de contrainte. Les échantillons vieillis à des températures relativement élevées (50 et 110 °C), quant à eux, ne contiennent pas des molécules résiduelles d'eau, et leur polarisation est décidée par l'effet MWS.

Le décalage du pic de relaxation vers les basses fréquences en fonction de la température du vieillissement thermique peut aussi indiquer que les échantillons sont dégradés par réticulation [175]. Dans [157], S. Hanada *et al.* ont étudié l'influence de la température sur les propriétés du silicone. Leurs résultats montrent que le nombre de liaisons (Si-O-Si) augmente dans les chaines PDMS tandis que les liaisons ($Si\text{-}CH_3$) diminuent surtout à des températures élevées. Ces mêmes auteurs ont conclu que le silicone soumis à l'action de la température se dégrade par formation d'une structure réticulée due à l'oxydation. Cependant, il est difficilement envisageable d'attribuer la dégradation thermique de nos échantillons, seulement, qu'à la réticulation des chaines PDMS car celle-ci prévoit une diminution de la conductivité DC suite à la diminution de la mobilité des porteurs de charges libres. En revanche, une compétition entre une dégradation par réticulation et par scission des chaines peut paraître plus plausible.

La conduction en DC augmente évidemment avec la température du vieillissement, ce qui est dû à la réduction de la densité des porteurs de charges localisés et l'apparition de porteurs de charges libres à l'intérieur du matériau suite à la scission des chaines PDMS. Ces porteurs de charges ont assez d'énergie pour passer à la bande de conduction et participer à la conduction DC.

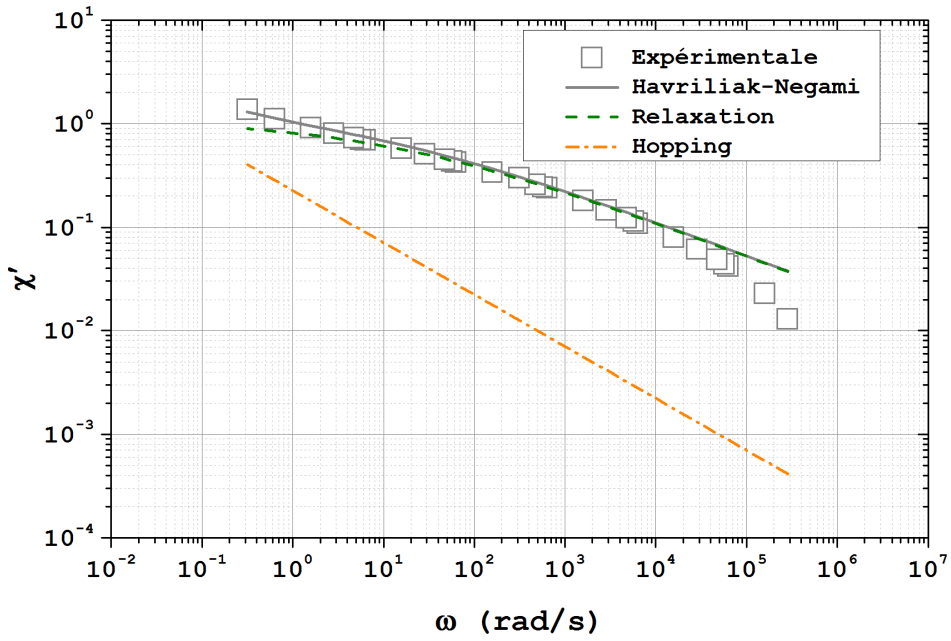


Figure 55. Partie réelle de la susceptibilité diélectrique du matériau non vieilli en fonction de la pulsation, montrant la contribution de la relaxation et de la conduction par saut.

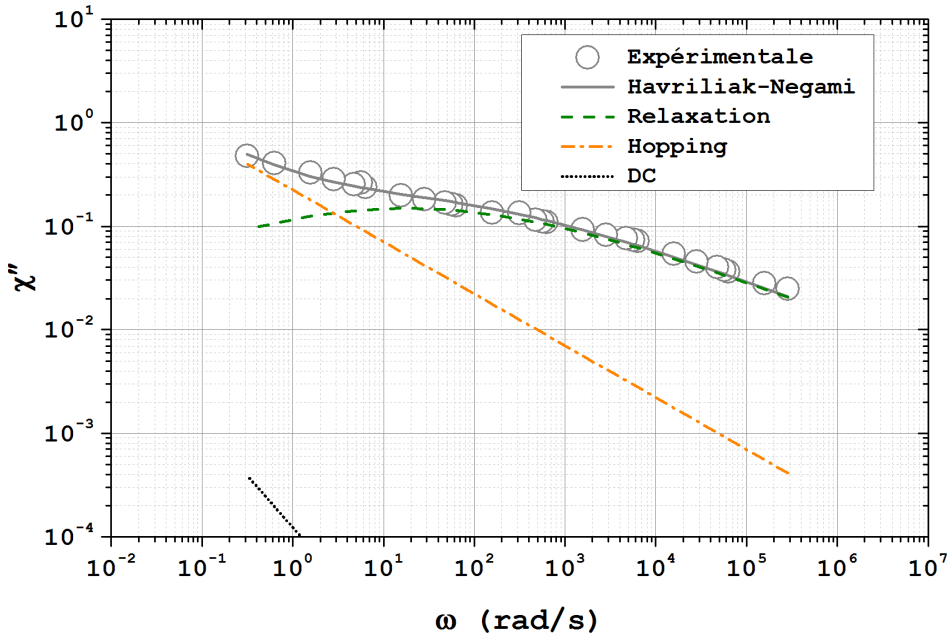


Figure 56. Partie imaginaire de la susceptibilité diélectrique du matériau non vieilli en fonction de la pulsation, montrant la contribution de la relaxation, de la conduction par saut et de la conduction DC.

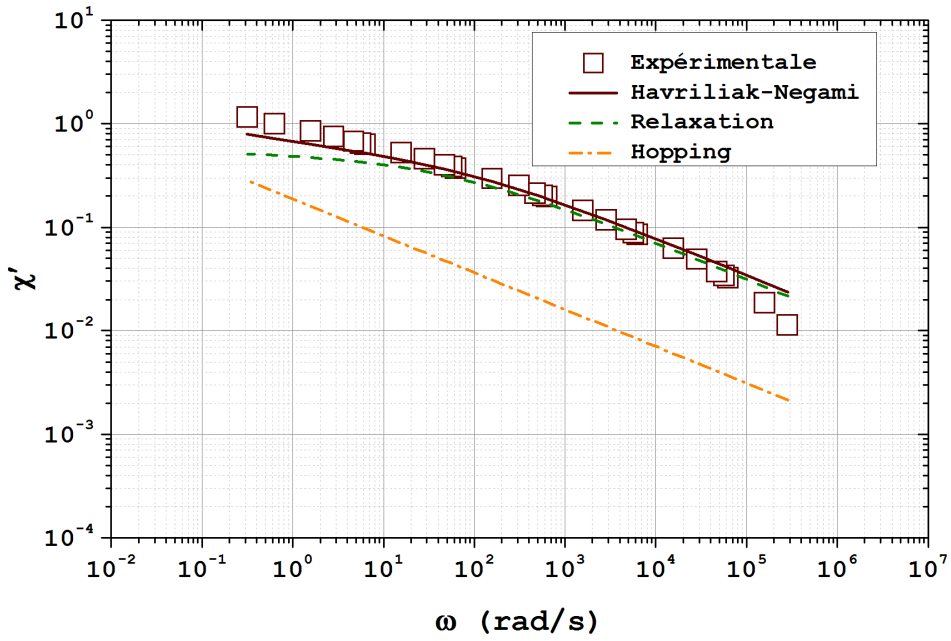


Figure 57. Partie réelle de la susceptibilité diélectrique du matériau après vieillissement thermique à 2 °C en fonction de la pulsation, montrant la contribution de la relaxation et de la conduction par saut.

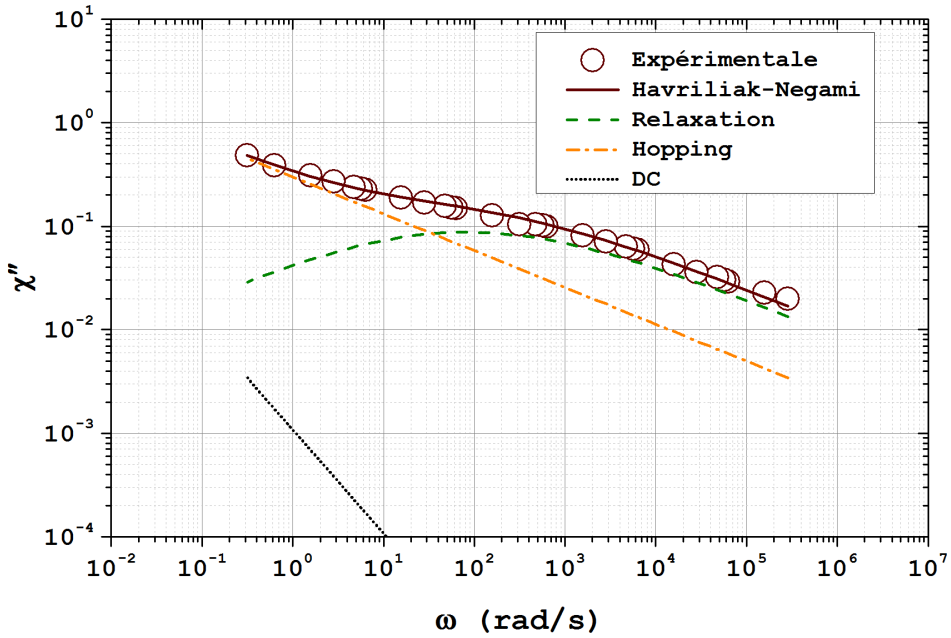


Figure 58. Partie imaginaire de la susceptibilité diélectrique du matériau après vieillissement thermique à 2 °C en fonction de la pulsation, montrant la contribution de la relaxation, de la conduction par saut et de la conduction DC.

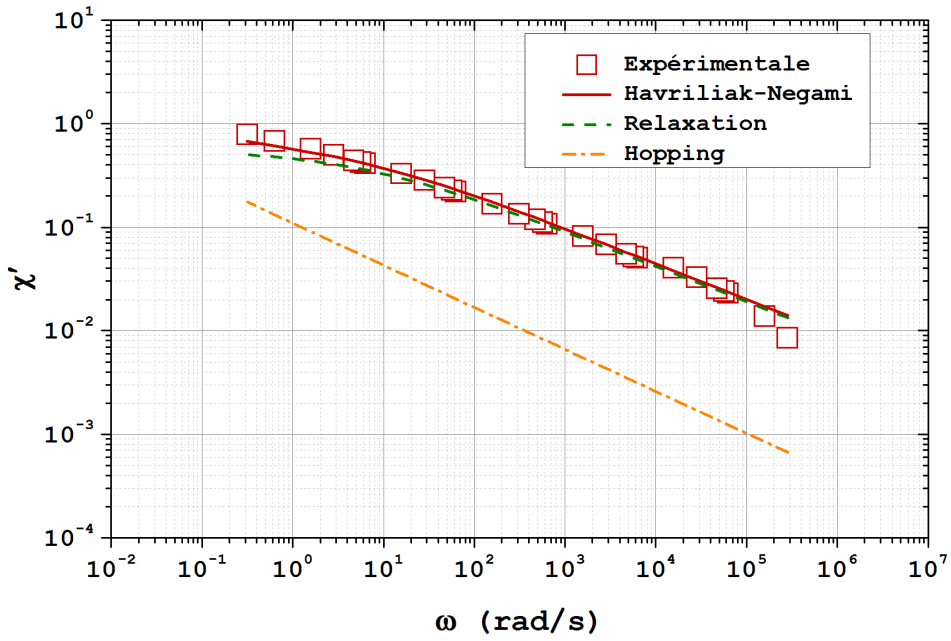


Figure 59. Partie réelle de la susceptibilité diélectrique du matériau après vieillissement thermique à 50 °C en fonction de la pulsation, montrant la contribution de la relaxation et de la conduction par saut.

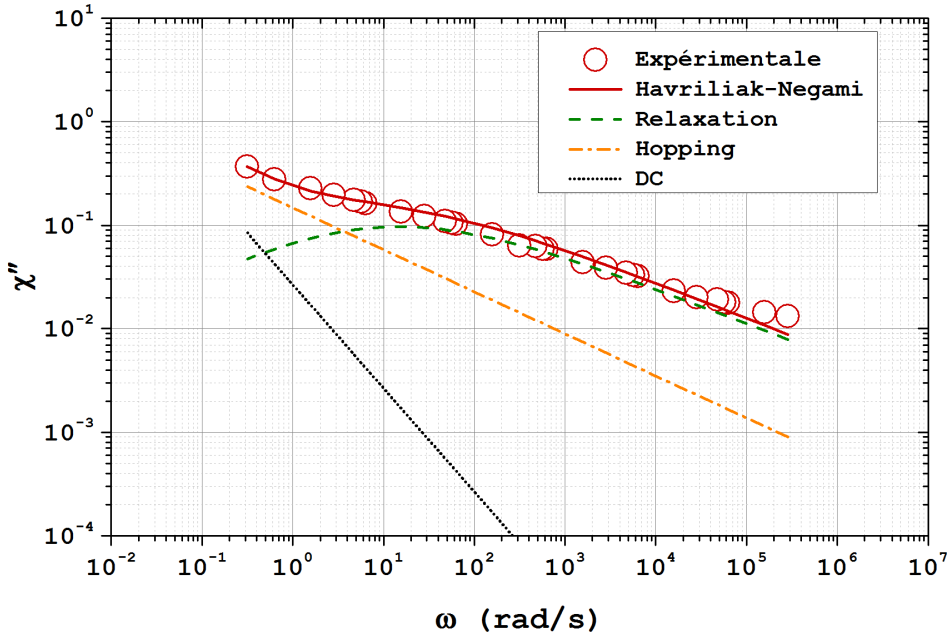


Figure 60. Partie imaginaire de la susceptibilité diélectrique du matériau après vieillissement thermique à 50 °C en fonction de la pulsation, montrant la contribution de la relaxation, de la conduction par saut et de la conduction DC.

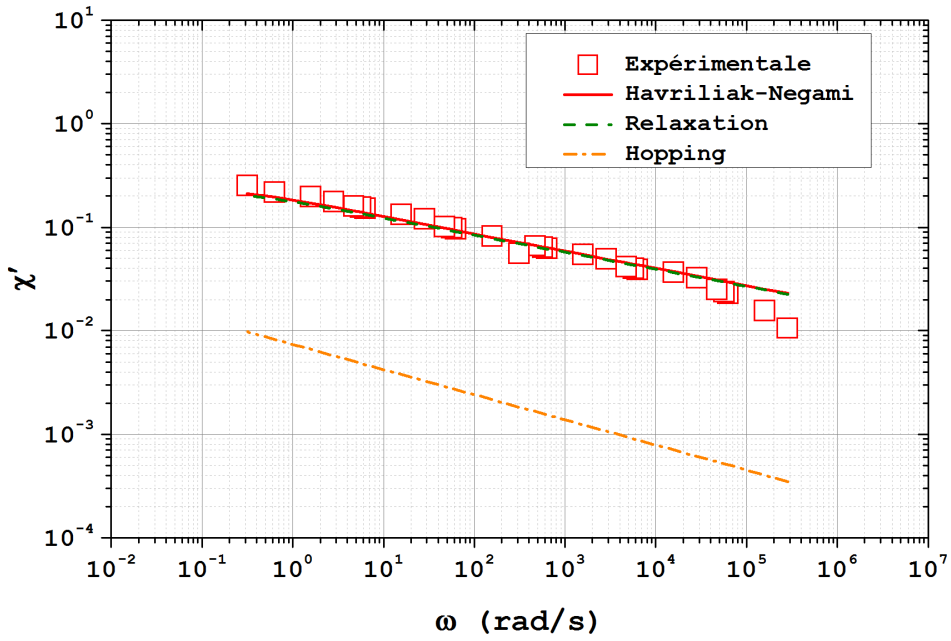


Figure 61. Partie réelle de la susceptibilité diélectrique du matériau après vieillissement thermique à 110 °C en fonction de la pulsation, montrant la contribution de la relaxation et de la conduction par saut.

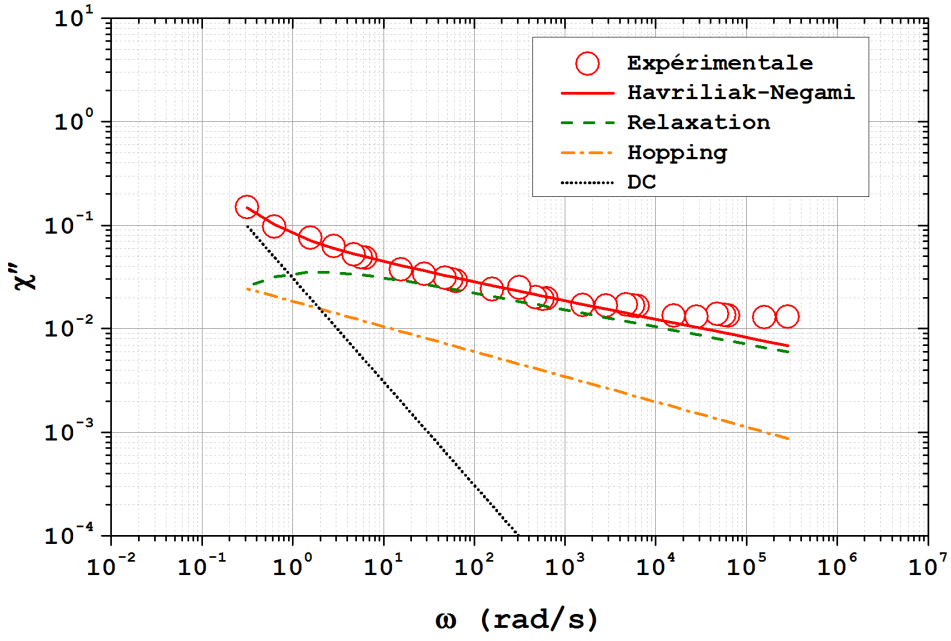


Figure 62. Partie imaginaire de la susceptibilité diélectrique du matériau après vieillissement thermique à 110 °C en fonction de la pulsation, montrant la contribution de la relaxation, de la conduction par saut et de la conduction DC.

Tableau 2. Paramètres d'ajustement des courbes de la susceptibilité diélectrique complexe après vieillissement thermique.

Contrainte	χ_s	γ	σ_{Ho} [S/m]	α	β	τ [s]	σ_{DC} [S/m]	R^2
Non vieilli	1,099	0,501	$1{,}407.10^{-12}$	0,336	0,988	0,056	$1{,}085.10^{-15}$	0,992
2 °C	0,554	0,356	$1{,}406.10^{-12}$	0,404	0,902	0,015	$9{,}533.10^{-15}$	0,997
50 °C	0,567	0,406	$7{,}776.10^{-13}$	0,464	0,736	0,128	$2{,}352.10^{-13}$	0,992
110 °C	0,223	0,242	$6{,}060.10^{-14}$	0,815	0,202	3,019	$2{,}726.10^{-13}$	0,989

A une fréquence donnée, l'amplitude de la permittivité mesurée indique, éventuellement, la densité des espèces impliquées dans la polarisation. D'après les résultats précédents, on peut spéculer sur la nature de ces espèces impliquées dans la polarisation MWS : il pourrait s'agir des LMW PDMS. Sur la base de cette hypothèse, il semble que le vieillissement thermique diminue la densité des LMW PDMS situées dans les interfaces du matériau. En revanche, le vieillissement à 110 °C peut probablement rompre les liaisons chimiques des longues chaînes PDMS qui se décomposent en chaînes LMW PDMS, et qui diffusent vers la surface du silicone du fait de leur gradient de concentration.

La **Figure 63** supporte cette hypothèse. Elle présente la variation de l'angle de contact en fonction de la permittivité réelle mesurée à 0,05 Hz. On voit que l'angle de contact décroît linéairement avec la diminution de la permittivité. Cette variation peut être exprimée d'après l'**équation empirique (31)** obtenue avec un coefficient de corrélation de 0,930 :

$$\theta = 7{,}46 \cdot \varepsilon' + 50{,}16 \qquad (31)$$

En effet, l'hydrophobicité du matériau en silicone provient des groupements de méthyle (CH_3) contenus dans les unités PDMS. L'épuisement de ces groupements conduit à la réduction de la valeur de l'angle de contact. Cette réduction est proportionnelle à la température de vieillissement.

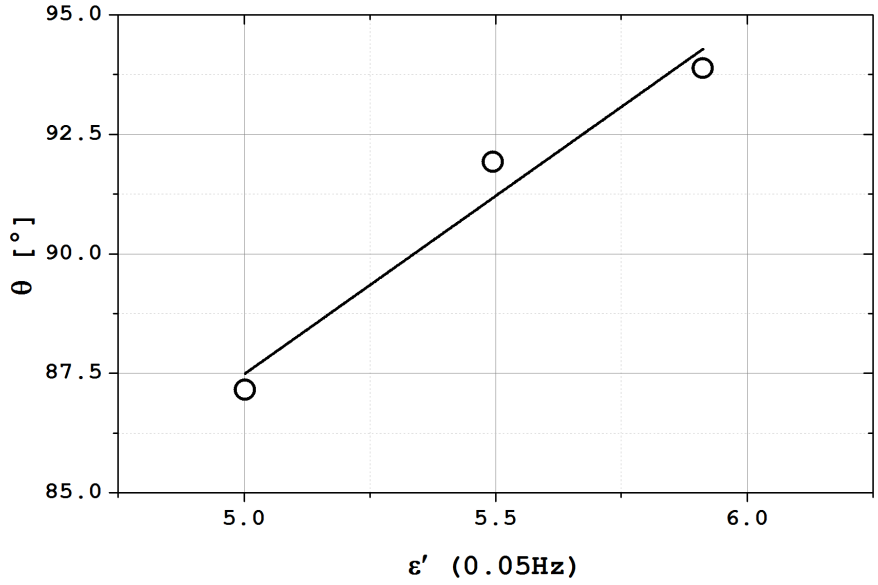


Figure 63. Angle de contact en fonction la permittivité mesurée à 0,05 Hz après le vieillissement thermique.

V.2.1.2 Corrélation des propriétés internes et surfaciques avec la température du vieillissement

La **Figure 64** illustre la corrélation entre la température du vieillissement thermique (T) et les propriétés étudiées : angle de contact, résistivité surfacique[16], résistivité volumique en régime permanent et facteur de dissipation diélectrique. Les paramètres d'ajustement correspondants (A, B, C, Y_0, R_0 et R^2) sont présentés dans le **Tableau 3**.

Selon la **Figure 64**, le facteur de dissipation diélectrique, la résistivité volumique et la résistivité surfacique présentent une variation exponentielle qui peut être exprimée par l'**équation (32)**, le facteur de dissipation diélectrique diminue avec la température. Approximativement, la même tendance se retrouve pour la résistivité volumique, la résistivité surfacique, quant à elle, augmente avec le vieillissement thermique.

[16] Calculée à partir de la valeur du courant de surface en DC.

L'angle de contact diminue linéairement avec le vieillissement thermique selon l'**équation (33)**, on remarque que plus la température de vieillissement est élevée, moins l'angle de contact est élevé.

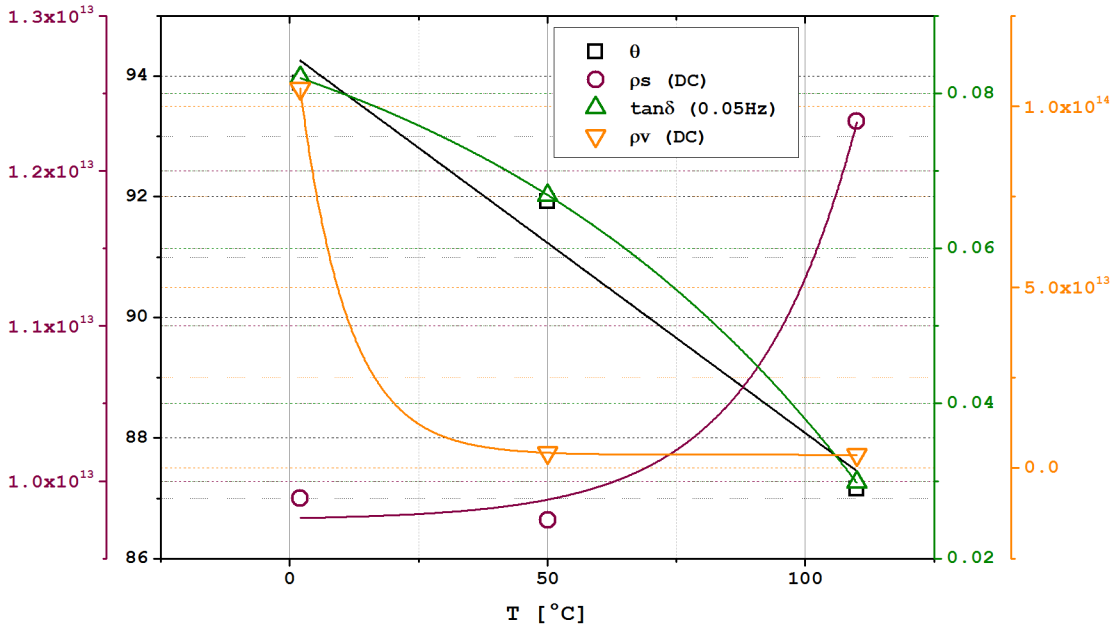


Figure 64. Facteur de dissipation diélectrique, résistivité volumique, résistivité surfacique et angle de contact en fonction de la température du vieillissement thermique.

Tableau 3. Paramètres d'ajustement des courbes des propriétés diélectriques et de l'hydrophobicité pour le vieillissement thermique.

	θ [°]	$\tan\delta$	ρ_v [Ω.m]	ρ_s [Ω]
A	94,388	-0,018	$1{,}254.10^{14}$	$1{,}079.10^{10}$
B	-0,063	-	-	-
Y_0	-	0,100	$3{,}665.10^{12}$	$9{,}750.10^{12}$
R_0	-	0,012	-0,107	0,049
R^2	0,941	0,999	1	0,984

$$Y(T) = Y_0 + A \cdot e^{R_0 \cdot T} \quad (32)$$

$$\theta = B \cdot T + A \quad (33)$$

V.2.1.2.1 Résistivité surfacique et volumique en régime permanent

Le calcul de la valeur de la résistivité surfacique a montré que les résistivités de surface des échantillons vieillis par la température sont inférieures à celles des échantillons non vieillis. Les taux de décroissance sont de 71,82%, 72,22% et 64,90% correspondant respectivement au vieillissement par : 2 °C, 50 °C et 110 °C. Il n'existe pas de différence significative entre les résistivités surfaciques des échantillons vieillis à 2 °C et ceux vieillis à 50 °C comme on peut le voir sur la **Figure 64**. Les échantillons vieillis à 110 °C, quant à eux, présentent une valeur supérieure à celles des deux autres.

La résistivité volumique des échantillons vieillis est toujours inférieure à celle des échantillons non vieillis. Le taux de diminution est de 88,61%, 99,54% et 99,60% pour les températures de 2 °C, 50 °C et 110 °C respectivement. Ces résultats sont quelque peu contradictoires avec ceux rapportés par C. Yuan *et al.* [158], qui montrent que la conductivité volumique (en DC) diminue pour les isolateurs vieillis pendant le service dans les lignes aériennes par rapport aux isolateurs conservés à l'état neuf. La différence peut être due au fait que le vieillissement naturel est la combinaison de plusieurs facteurs comme la température, la pollution, les rayonnements UV, le champ électrique, etc. d'où la difficulté d'identifier la contribution de chaque facteur.

V.2.1.3 Etude de la tension de contournement

La **Figure 65** présente la variation de la tension de contournement avec le nombre de tests de contournements pour les échantillons vieillis par la température ainsi que les échantillons non vieillis. Le **Tableau 4** illustre la tension moyenne de contournement U_C des différents échantillons.

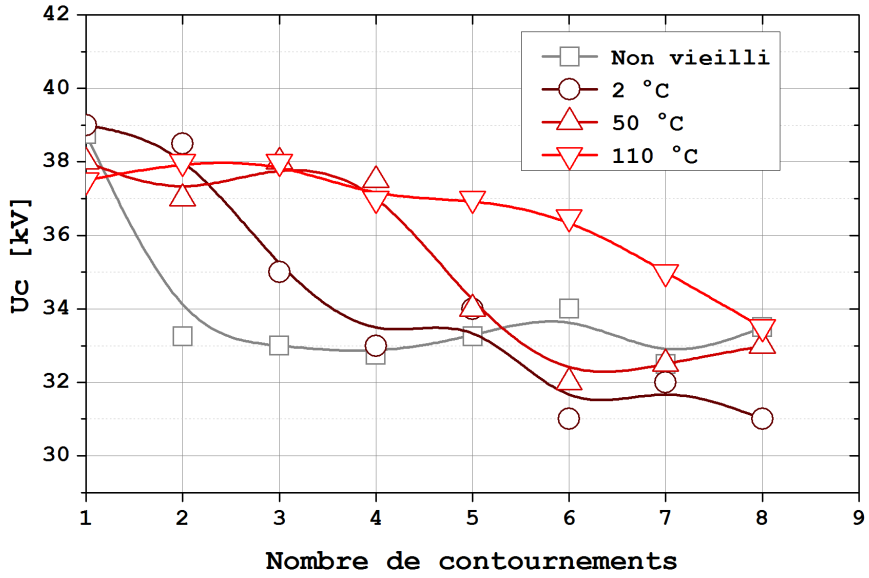


Figure 65. Tension de contournement en fonction du nombre de tests de contournements après vieillissement thermique.

Tableau 4. Tension moyenne de contournement après vieillissement thermique.

Cas étudiés	Non vieilli	2 °C	50 °C	110 °C
U_C [kV]	33,87	34,19	35,25	36,56

Selon la **Figure 65**, la valeur de la tension de contournement diminue avec le nombre de tests quels que soient les échantillons (vieillis ou non). Pour le cas des échantillons non vieillis, la tension de contournement diminue de 14% par rapport à sa valeur initiale, et reste de plus en moins constante avec une moyenne de 34 kV. Pour les échantillons vieillis par la température, la tendance générale est que la tension de contournement diminue avec le nombre de tests. Cependant, l'effet du vieillissement thermique ne suit pas l'ordre des températures. En effet, la tension de contournement correspondant à un vieillissement à 2 °C est la plus élevée pour le premier et le deuxième test mais diminue au troisième test et reste la valeur la plus basse. Dans le cas d'échantillons vieillis à 50 °C et à 110 °C, la tension de contournement chute à partir du 4ème test et continue à diminuer.

La **Figure 66** présente la variation de la tension de contournement avec le facteur de dissipation diélectrique pour différentes températures de vieillissement.

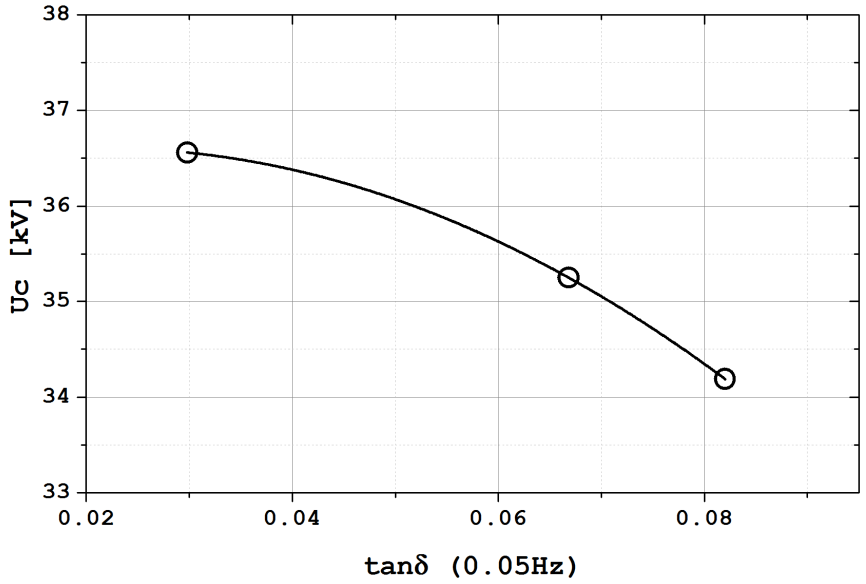


Figure 66. Tension de contournement en fonction du facteur de dissipation diélectrique mesuré à 0,05 Hz après vieillissement thermique.

Les résultats révèlent l'existence d'un lien entre ces deux propriétés. En fait, la tension de contournement varie comme l'inverse du facteur de dissipation diélectrique en fonction de la température de vieillissement. Cette variation peut très bien être exprimée par l'**équation polynomiale (*34*)** du 2eme ordre.

$$U_C = C \cdot (\tan\delta)^2 + B \cdot (\tan\delta) + A \qquad (34)$$

Tableau 5. Paramètres d'ajustement de la courbe de la tension de contournement en fonction du facteur de dissipation diélectrique pour le vieillissement thermique.

	U_C
A	36,299
B	28,463
C	-660,754
R^2	1

Cette dépendance peut être due à l'effet thermique provoqué par les pertes diélectriques, ce qui réduit la rigidité diélectrique à la surface des échantillons. La permittivité imaginaire ε'' est donnée par :

$$\varepsilon'' = \varepsilon' \tan\delta \qquad (35)$$

Dans un champ électrique de valeur E [V/m] et de fréquence f [Hz], la puissance absorbée par l'unité de volume par un diélectrique P_V [W/m³] est donnée par l'équation suivante [138] :

$$P_V = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon'' E^2 \qquad (36)$$

Pour un champ électrique constant, et à fréquence constante, la puissance absorbée augmente avec la permittivité imaginaire qui est fonction de la permittivité et du facteur de dissipation diélectrique. Le silicone présente un faible pouvoir à dissiper la chaleur du fait de sa faible conductivité thermique. La puissance absorbée se traduit donc par un échauffement du matériau qui fait augmenter la valeur de la conductivité électrique et facilite donc le claquage.

Ces résultats concordent avec ceux rapportés par un travail récent [176] qui a été entrepris dans notre laboratoire. Ce travail a porté sur l'étude du vieillissement thermique à très court terme (24 à 48 h de contrainte thermique) des échantillons en silicone similaires à ceux présentés dans cette étude, et a permis d'observer la dépendance entre la température de l'échantillon et sa tension de contournement. L'étude a consisté à mesurer la tension de contournement des échantillons chauffés à : 40, 60 et 80 °C (avant que ceux-ci se refroidissent). Les résultats ont montré que la tension de contournement diminue avec l'augmentation de la température de l'échantillon.

V.2.2 Effet de la salinité

V.2.2.1 Analyses diélectriques

La **Figure 67** et la **Figure 68** présentent la variation de la permittivité et du facteur de dissipation diélectrique avec la fréquence pour les différentes conductivités de solutions utilisées dans le vieillissement par immersion.

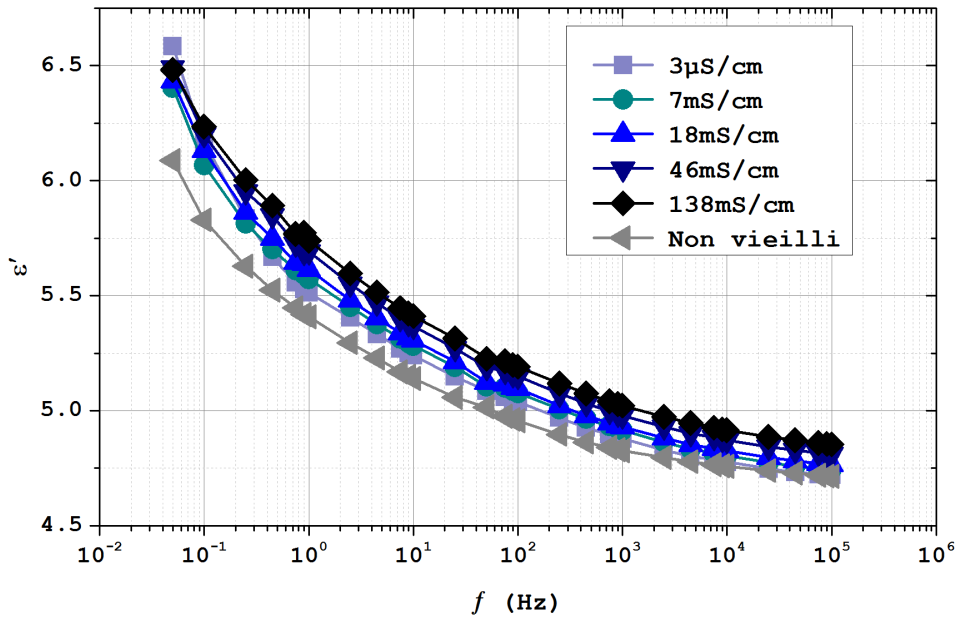


Figure 67. Variation de la permittivité réelle en fonction de la fréquence après vieillissement par immersion.

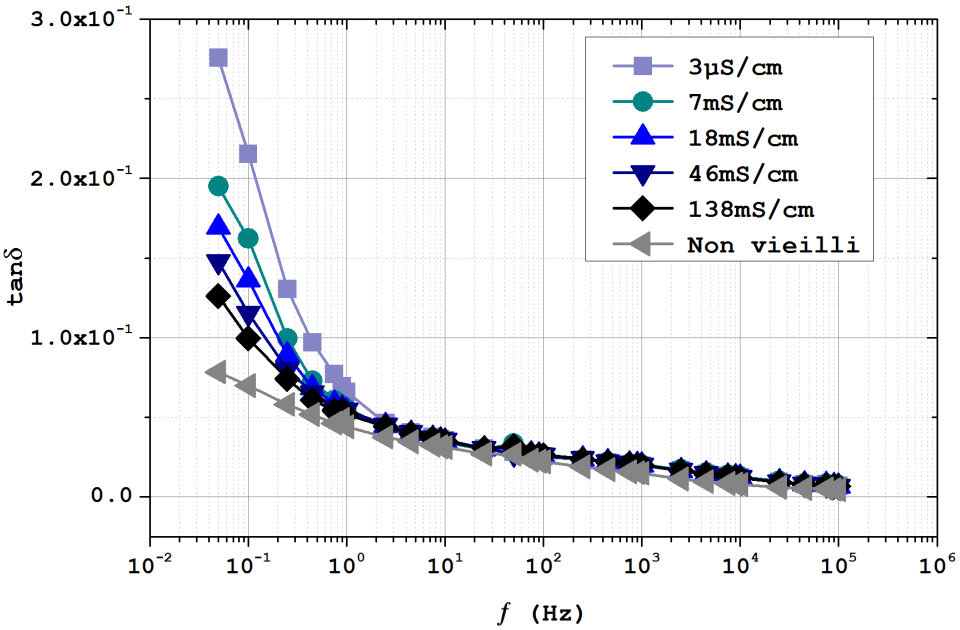


Figure 68. Variation du facteur de dissipation diélectrique en fonction de la fréquence après vieillissement par immersion.

Les résultats montrent, *a priori*, que la permittivité augmente avec la conductivité de solutions. Pour le facteur de dissipation diélectrique, les résultats montrent un comportement différent par rapport à celui constaté pour la permittivité. En effet, le facteur de dissipation diélectrique diminue avec la conductivité dans les fréquences inférieures à 2 Hz. Au-delà de cette fréquence, la conductivité ne présente pas d'influence sur le facteur de dissipation diélectrique.

La **Figure 69** illustre le module complexe par rapport à la fréquence. Les mêmes remarques faites précédemment peuvent se trouver ici.

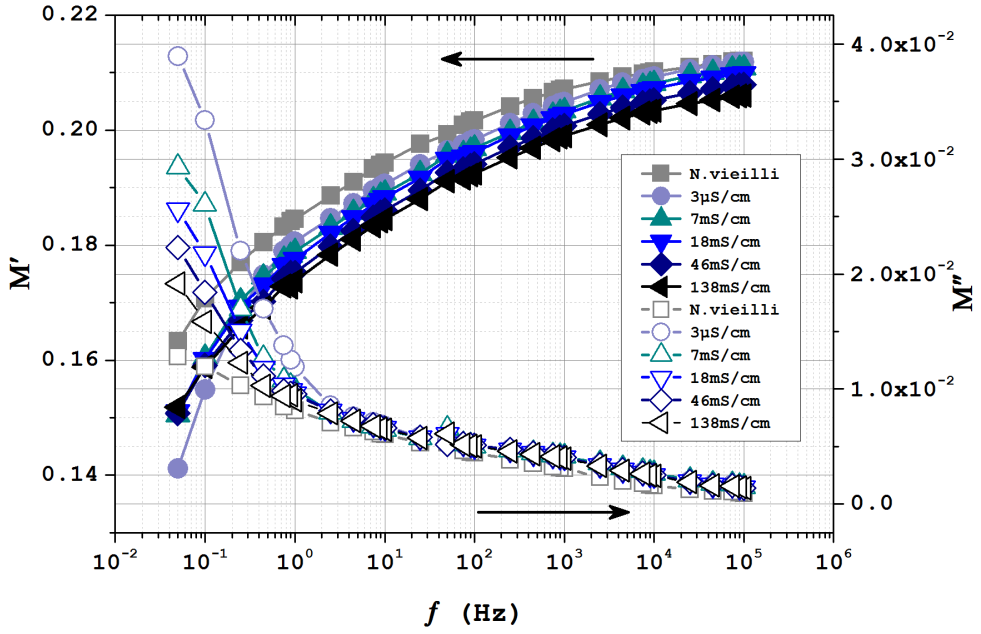


Figure 69. Variation du module complexe en fonction de la fréquence après vieillissement par immersion.

Nous remarquons d'après la **Figure 70** à la **Figure 74**, que les courbes de la susceptibilité diélectrique complexe présentent une intersection, dans les hautes valeurs de pulsation, à w_c qui a pour valeur de $56{,}151.10^3$, de $57{,}665.10^3$, de $61{,}258.10^3$, de $63{,}049.10^3$ et de $65{,}514.10^3$ rad/s pour les échantillons vieillis à : 3 µS/cm, 7, 18, 46 et 138 mS/cm respectivement. Les valeurs de w_c se décalent vers les hautes fréquences en fonction de l'augmentation de la salinité de la solution. Pour les échantillons vieillis dans les solutions à faible salinité, la courbe de la partie imaginaire de la susceptibilité diélectrique complexe se rapproche de celle de la partie réelle, mais on n'assiste pas à une autre intersection.

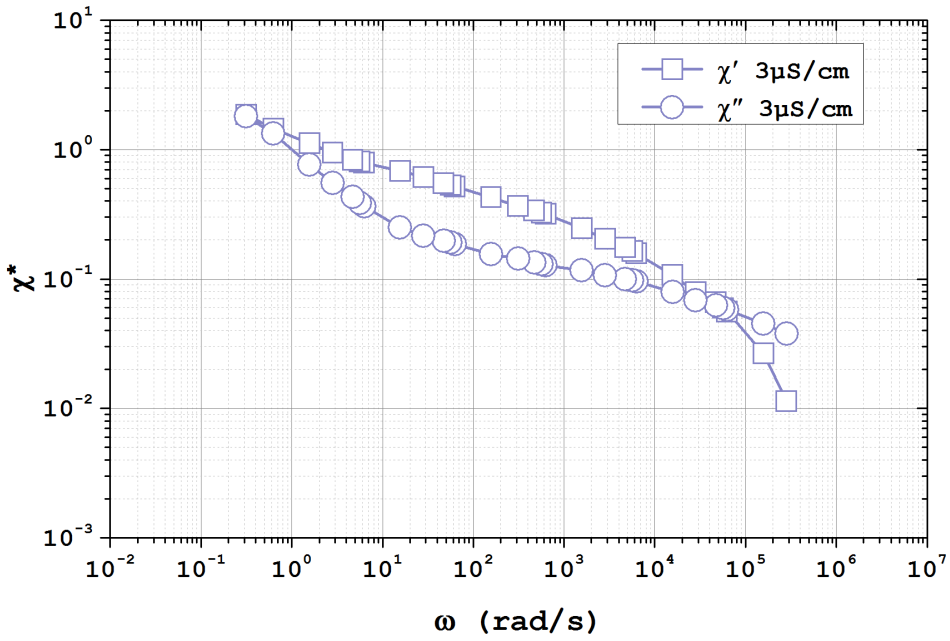


Figure 70. Parties réelle et imaginaire de la susceptibilité diélectrique après vieillissement par immersion à 3 µS/cm.

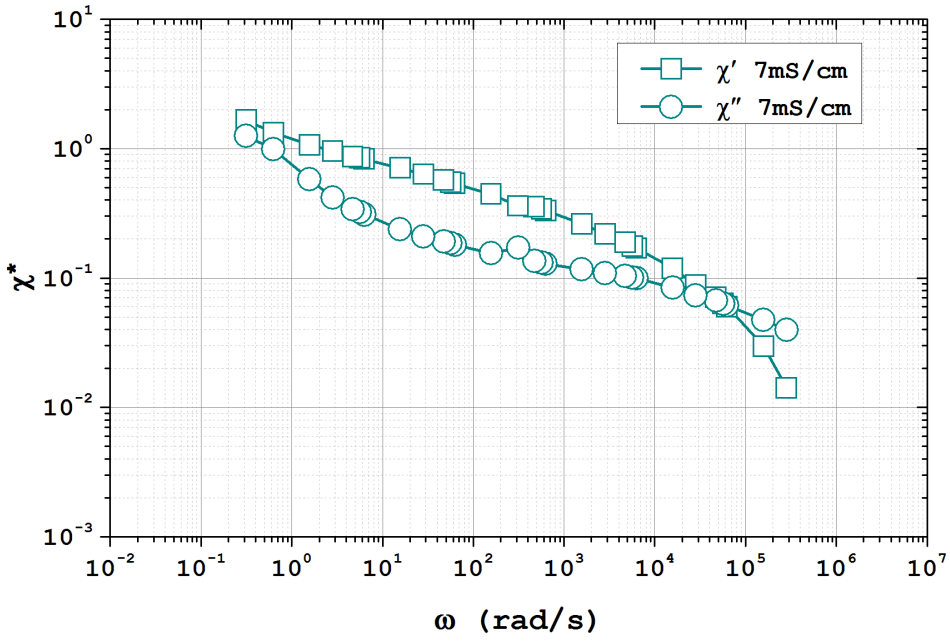


Figure 71. Parties réelle et imaginaire de la susceptibilité diélectrique après vieillissement par immersion à 7 mS/cm.

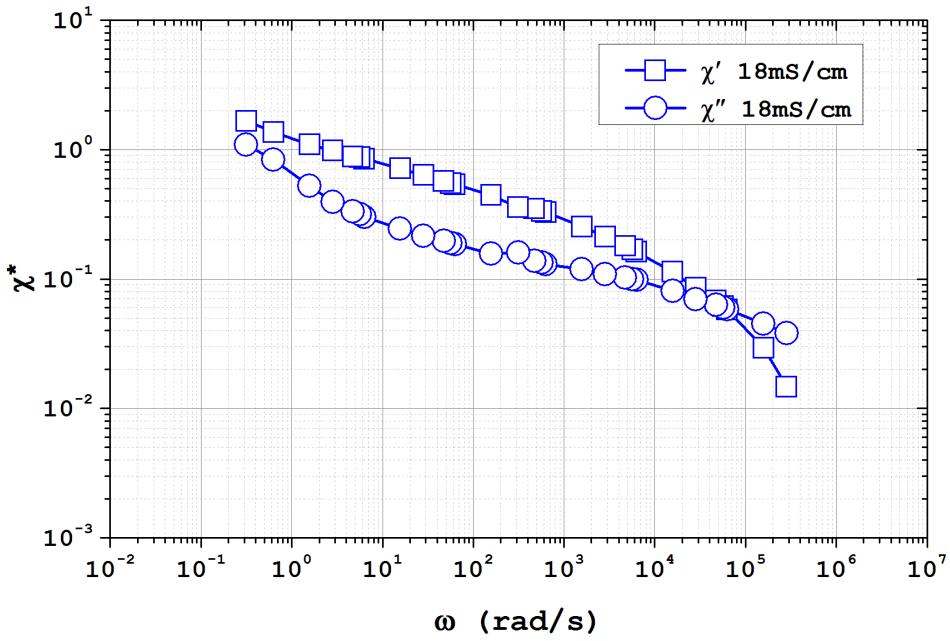


Figure 72. Parties réelle et imaginaire de la susceptibilité diélectrique après vieillissement par immersion à 18 mS/cm.

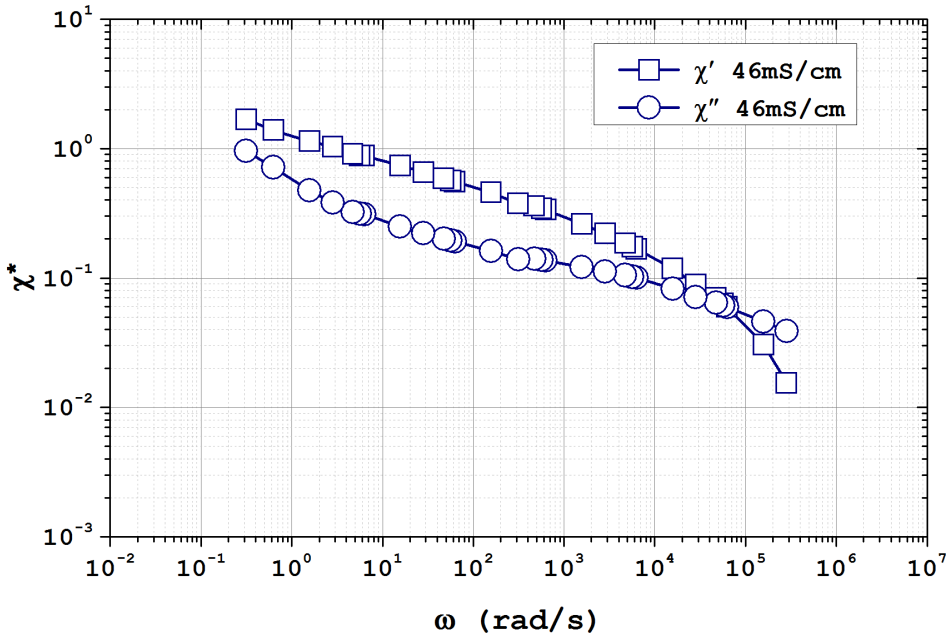


Figure 73. Parties réelle et imaginaire de la susceptibilité diélectrique après vieillissement par immersion à 46 mS/cm.

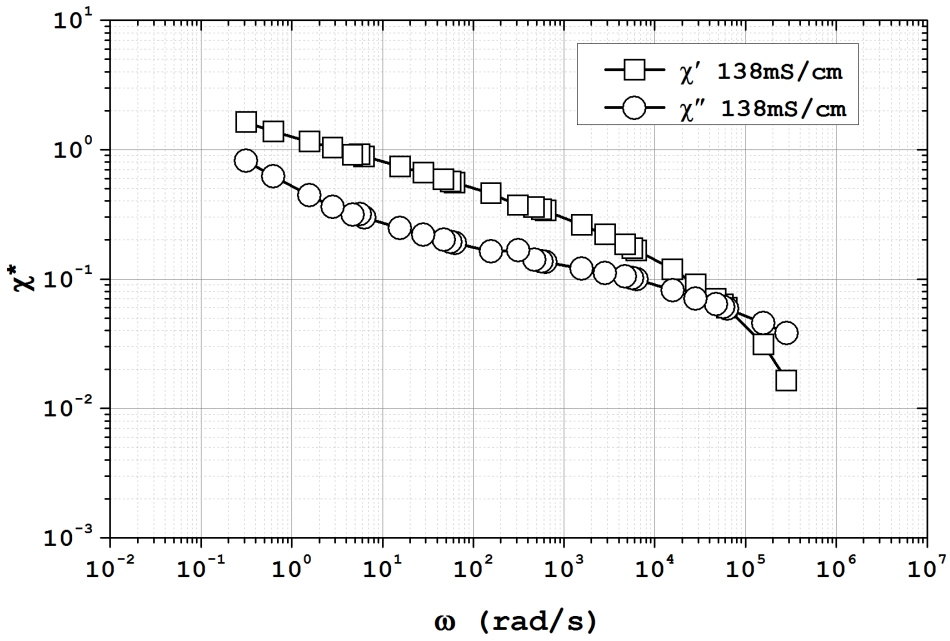


Figure 74. Parties réelle et imaginaire de la susceptibilité diélectrique après vieillissement par immersion à 138 mS/cm.

La **Figure 75** à la **Figure 84** présentent les résultats de l'ajustement des courbes de la susceptibilité réelle et imaginaire en utilisant les **équations (29)** et **(30)**, pour les échantillons vieillis par immersion. Dans les mêmes figures, la contribution de la polarisation et de la conduction (par saut et DC) est également présentée. Dans le **Tableau 6**, nous rapportons les paramètres d'ajustement des courbes. L'écart entre les données expérimentales et le modèle d'ajustement dans les hautes fréquences augmente pour les échantillons vieillis dans les solutions à hautes conductivités.

Tableau 6. Paramètres d'ajustement des courbes de la susceptibilité diélectrique complexe après vieillissement par immersion.

Contrainte	χ_s	γ	σ_{Ho} [S/m]	α	β	τ [s]	σ_{DC} [S/m]	R^2
Non vieilli	1,099	0,501	$1{,}407.10^{-12}$	0,336	0,988	0,056	$1{,}085.10^{-15}$	0,992
3 µS/cm	0,552	0,514	$5{,}615.10^{-12}$	0,460	0,830	0,001	$6{,}908.10^{-13}$	0,997
7 mS/cm	0,673	0,488	$3{,}960.10^{-12}$	0,415	0,826	0,002	$3{,}591.10^{-13}$	0,994
18 mS/cm	1,148	0,605	$3{,}715.10^{-12}$	0,344	0,855	0,024	$4{,}039.10^{-14}$	0,996
46 mS/cm	1,181	0,588	$3{,}259.10^{-12}$	0,338	0,879	0,026	$3{,}018.10^{-14}$	0,997
138 mS/cm	1,534	0,621	$1{,}921.10^{-12}$	0,329	0,860	0,079	$1{,}214.10^{-14}$	0,990

Nous remarquons que la conduction par saut est la plus dominante pour les faibles fréquences, notamment pour les échantillons vieillis dans les solutions de faible conductivité. Ce comportement est la conséquence de la présence de l'eau aux interfaces du matériau [174], [177].

Une foi absorbée à l'intérieur du matériau en silicone HTV, l'eau peut exister sous deux formes : liée, et libre. Dans le premier cas, l'eau est attachée à la surface des particules des additifs via des liaisons hydrogène ou les forces de van der Waals, tandis que dans le second cas, l'eau occupe le volume libre ou les cavités d'air préexistantes dans le matériau [102]. J. Dai *et al.* [153] ont montré que les solutions de NaCl accélèrent le processus de diffusion, mais réduisent la quantité d'eau entrante dans le matériau. Z. Wang *et al.* [102] quant à eux, ont montré que l'absorption d'eau par le silicone HTV est ralentie suite à l'augmentation de la conductivité de la solution NaCl. Selon ces mêmes auteurs, ce phénomène peut être dû à deux effets. D'une part, à la diminution de la taille du volume libre à l'intérieur du matériau du fait de la contraction des chaines moléculaires PDMS, et qui résulte de l'effet de blindage créé par les contre-ions à l'intérieur du matériau; d'autre part, à l'abaissement du potentiel chimique de l'eau ainsi que la différence de potentiel chimique de l'eau entre l'intérieur et l'extérieur du matériau en raison de l'augmentation des molécules de soluté dans la solution.

Avec l'augmentation de la conductivité des solutions, la contribution de la polarisation commence à se manifester comme le montre les valeurs de χ_s dans le **Tableau 6**. En ce qui concerne les courbes de pertes diélectriques, le pic de relaxation est décalé vers les hautes fréquences (par rapport aux échantillons non vieillis). Avec l'augmentation de la conductivité des solutions, le pic se déplace vers les basses fréquences. Les valeurs de w_p peuvent être calculées à partir du **Tableau 6**. Le décalage du pic de relaxation vers les hautes fréquences peut être attribué à la contribution de la polarisation dipolaire qui résulte de la présence des molécules d'eau (fortement polaires) à l'intérieur des échantillons vieillis auparavant par immersion. Comme la quantité d'eau absorbée diminue avec l'augmentation de la conductivité de la solution, l'effet de la polarisation dipolaire le suit.

Il a été montré que l'adsorption d'eau dans l'interface additif-matrice du polymère implique une augmentation de la constante diélectrique et des pertes dans le matériau composite dans les basses fréquences [178]. Les résultats de la **Figure 67** présente cette tendance. Cependant, après la séparation de la contribution des différents processus impliqués dans la réponse diélectrique, nous avons trouvé que les valeurs de χ_s (qui est proportionnelle à la permittivité

réelle) pour les échantillons immergés auparavant dans 3 µS/cm et 7 mS/cm sont inférieures à celles des échantillons non vieillis. Ce constat peut être expliqué comme suit :

Lors de l'immersion, la diffusion de l'eau est plus importante pour les solutions à faibles conductivités comme nous avons vu précédemment et elle provoque l'hydrolyse des PDMS. Les LMW PDMS peuvent également diffuser dans le liquide en raison de la différence de concentration à l'intérieur et à l'extérieur du matériau [102]. Les mesures de l'hydrophobicité lors de la phase finale, comme nous allons présenter plus loin, montrent que θ est plus faible pour les solutions à faibles conductivités. Cela suggère que la quantité des PDMS perdue durant l'immersion est inversement proportionnelle à la conductivité de la solution. Par conséquent, le volume libre après la déshydratation (après le vieillissement par immersion) est plus important dans les échantillons immergés dans les solutions à faible conductivité.

L'eau possède une permittivité relative élevée ($\varepsilon = 81$), ce qui en fait un très bon solvant. Cependant, dans le cas de l'électrolyte NaCl, ce ne sont pas toutes les molécules de NaCl qui vont être dissociées dans l'eau. En fait, selon la loi d'Ostwald, le taux de dissociation est inversement proportionnel à la concentration de la solution [52]. Ceci nous amène à admettre que le nombre de composés ioniques NaCl non dissous augmente en fonction de la conductivité des solutions utilisées. En plus des molécules d'eau, le silicone absorbe également les ions et les molécules NaCl pendant l'immersion dans les solutions à fortes conductivité. À l'intérieur du matériau, ces molécules se trouvent piégées, probablement à l'interface additifs-PDMS après la déshydratation, et favorisent l'effet MWS, ce qui explique les valeurs élevées de χ_s pour les solutions à forte conductivité. L'augmentation du volume libre peut également expliquer la réduction de la valeur de la susceptibilité diélectrique réelle [175].

Par rapport aux échantillons non vieillis, il y a une augmentation de la conductivité DC qui peut être due à la présence de l'eau dans le matériau. Cette conduction (probablement ionique extrinsèque) diminue avec l'augmentation de la conductivité de la solution en raison de la diminution du volume libre dans le matériau [172]. Il a été suggéré que, suite à la percolation, les molécules d'eau peuvent offrir un chemin par saut aux porteurs de charges qui participent à la conduction DC [174].

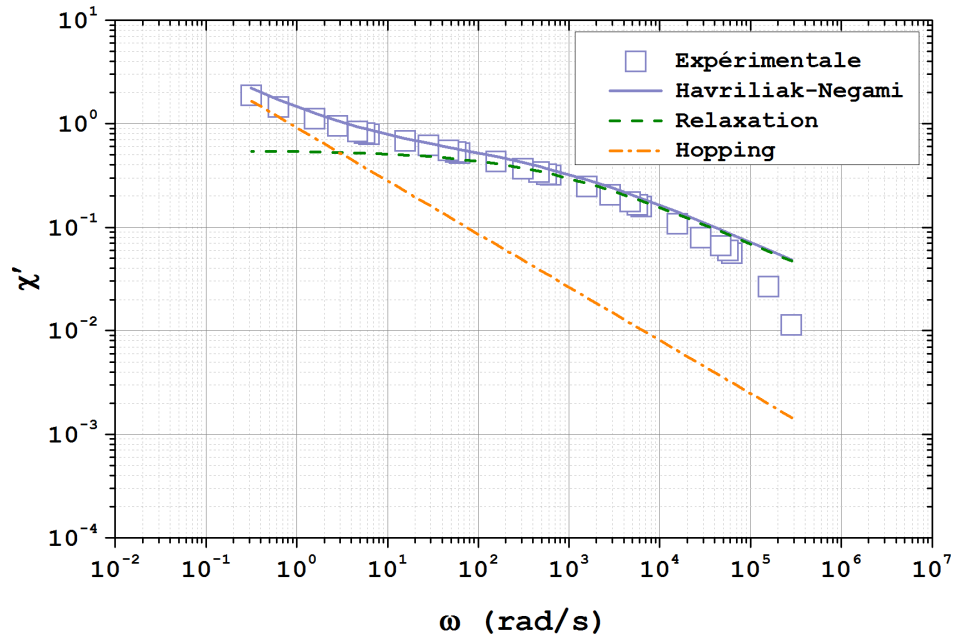


Figure 75. Partie réelle de la susceptibilité diélectrique du matériau après vieillissement par immersion à 3 µS/cm en fonction de la pulsation, montrant la contribution de la relaxation et de la conduction par saut.

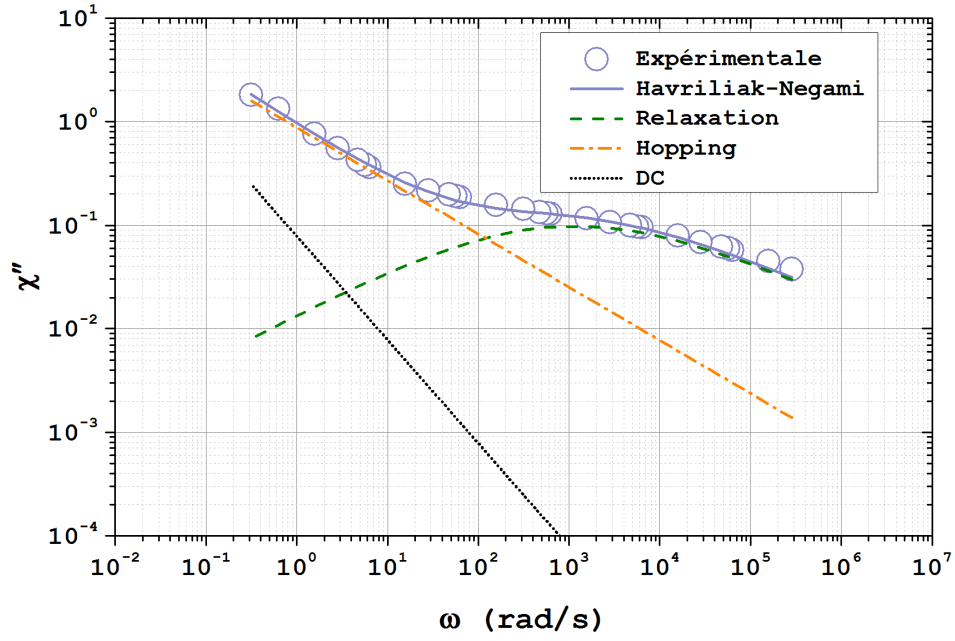


Figure 76. Partie imaginaire de la susceptibilité diélectrique du matériau après vieillissement par immersion à 3 µS/cm en fonction de la pulsation, montrant la contribution de la relaxation, de la conduction par saut et de la conduction DC.

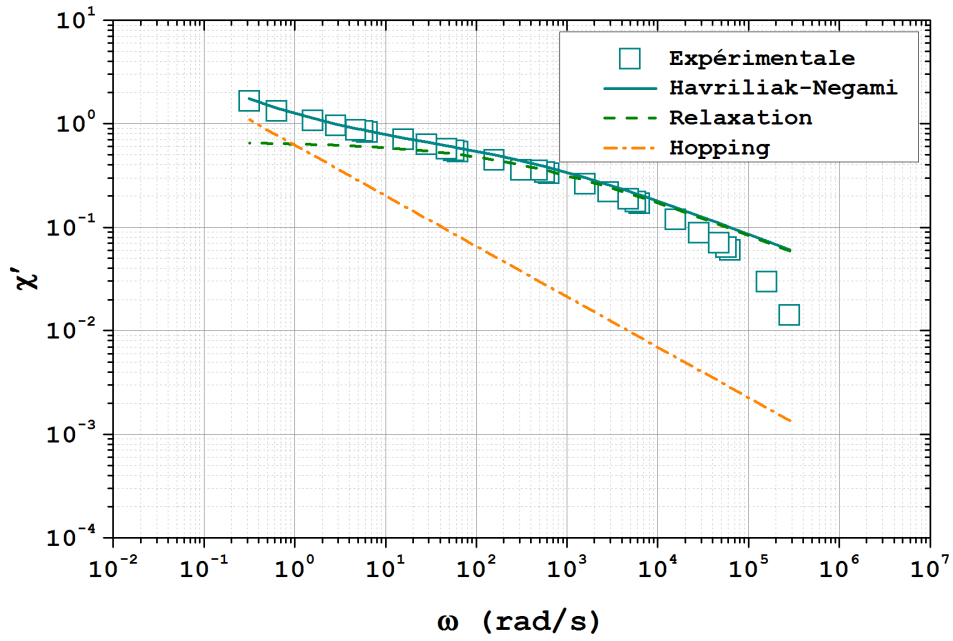


Figure 77. Partie réelle de la susceptibilité diélectrique du matériau après vieillissement par immersion à 7 mS/cm en fonction de la pulsation, montrant la contribution de la relaxation et de la conduction par saut.

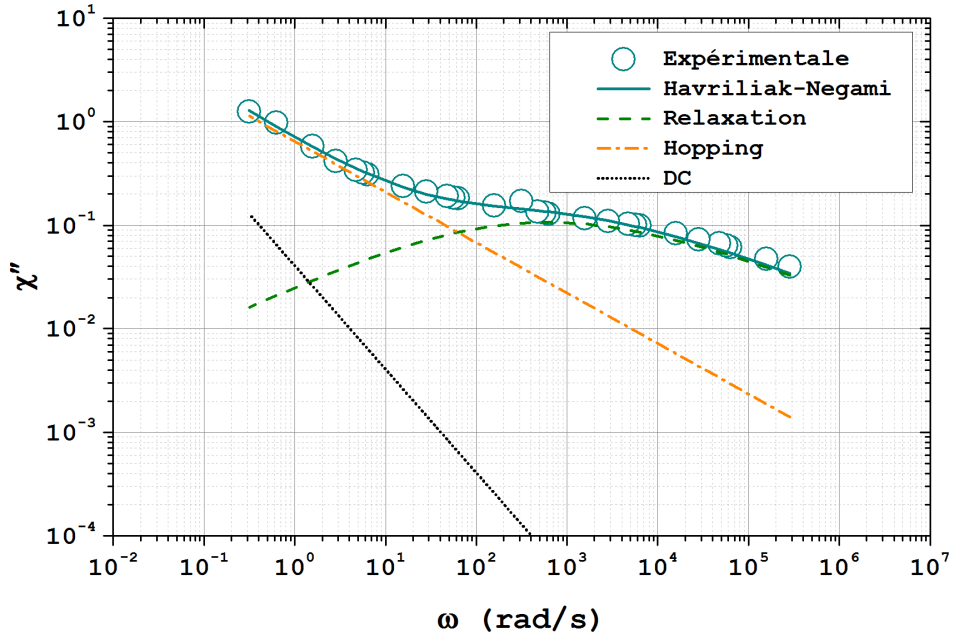


Figure 78. Partie imaginaire de la susceptibilité diélectrique du matériau après vieillissement par immersion à 7 mS/cm en fonction de la pulsation, montrant la contribution de la relaxation, de la conduction par saut et de la conduction DC.

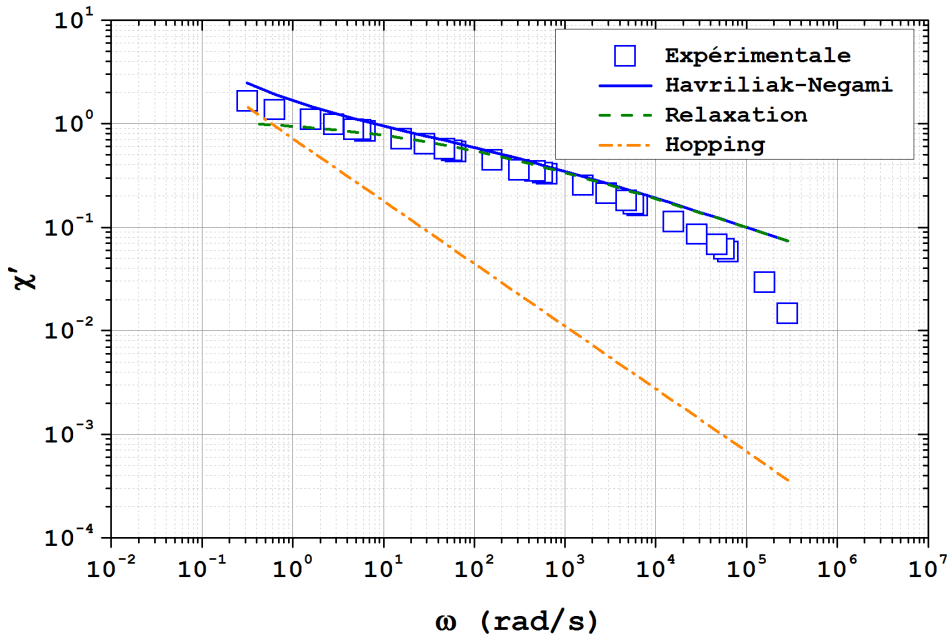


Figure 79. Partie réelle de la susceptibilité diélectrique du matériau après vieillissement par immersion à 18 mS/cm en fonction de la pulsation, montrant la contribution de la relaxation et de la conduction par saut.

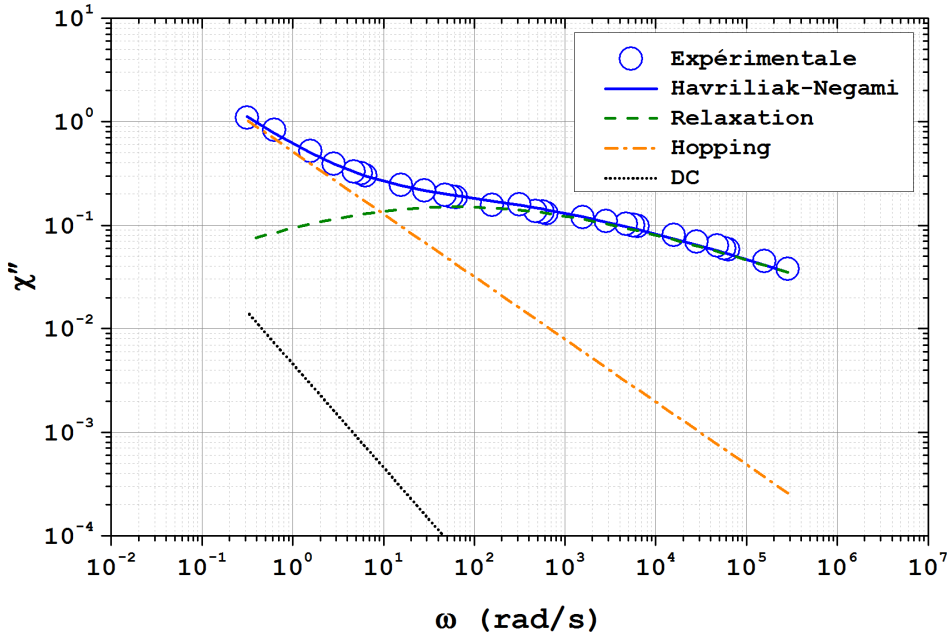


Figure 80. Partie imaginaire de la susceptibilité diélectrique du matériau après vieillissement par immersion à 18 mS/cm en fonction de la pulsation, montrant la contribution de la relaxation, de la conduction par saut et de la conduction DC.

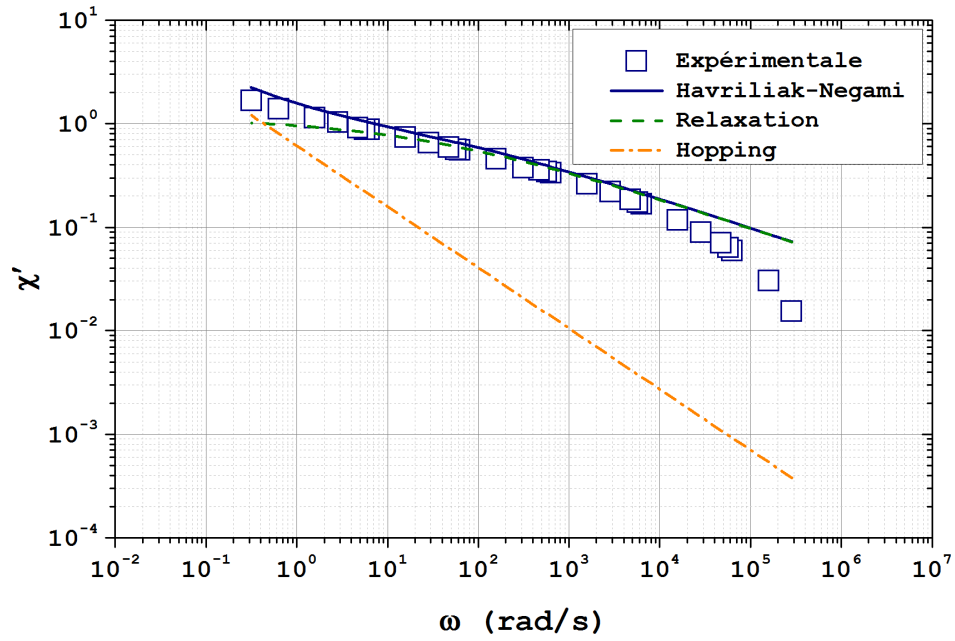


Figure 81. Partie réelle de la susceptibilité diélectrique du matériau après vieillissement par immersion à 46 mS/cm en fonction de la pulsation, montrant la contribution de la relaxation et de la conduction par saut.

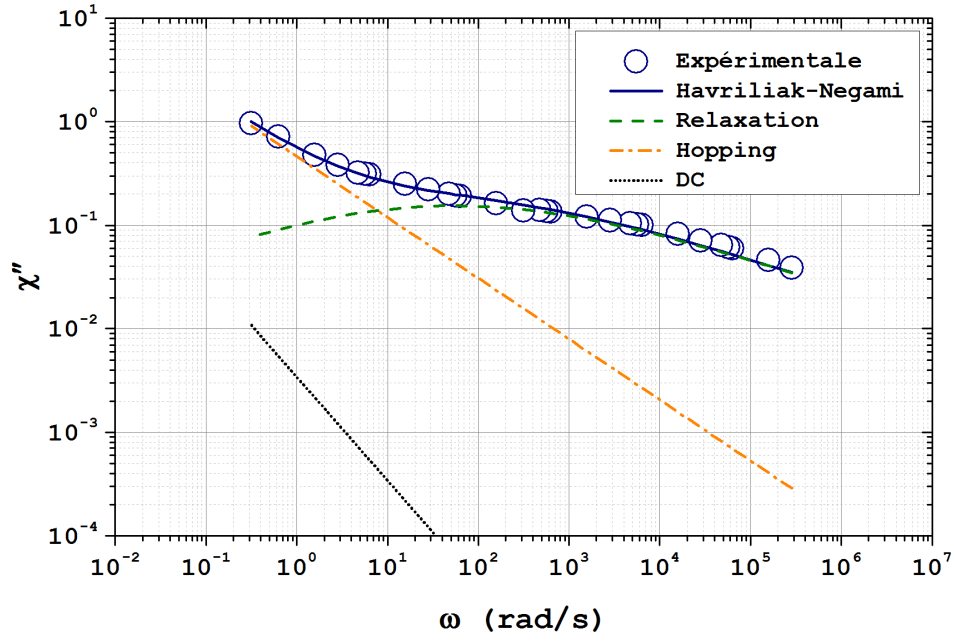


Figure 82. Partie imaginaire de la susceptibilité diélectrique du matériau après vieillissement par immersion à 46 mS/cm en fonction de la pulsation, montrant la contribution de la relaxation, de la conduction par saut et de la conduction DC.

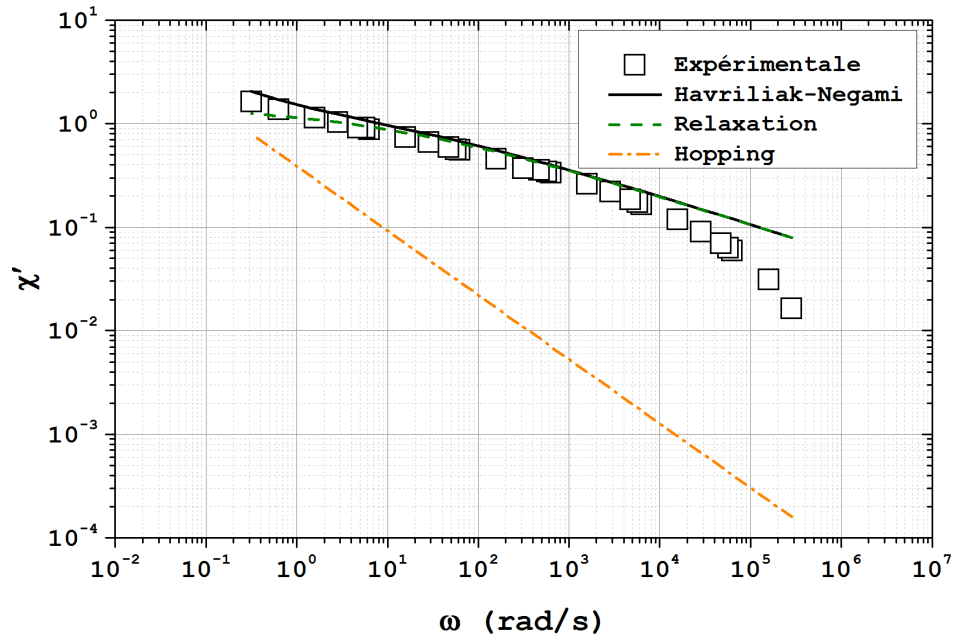


Figure 83. Partie réelle de la susceptibilité diélectrique du matériau après vieillissement par immersion à 138 mS/cm en fonction de la pulsation, montrant la contribution de la relaxation et de la conduction par saut.

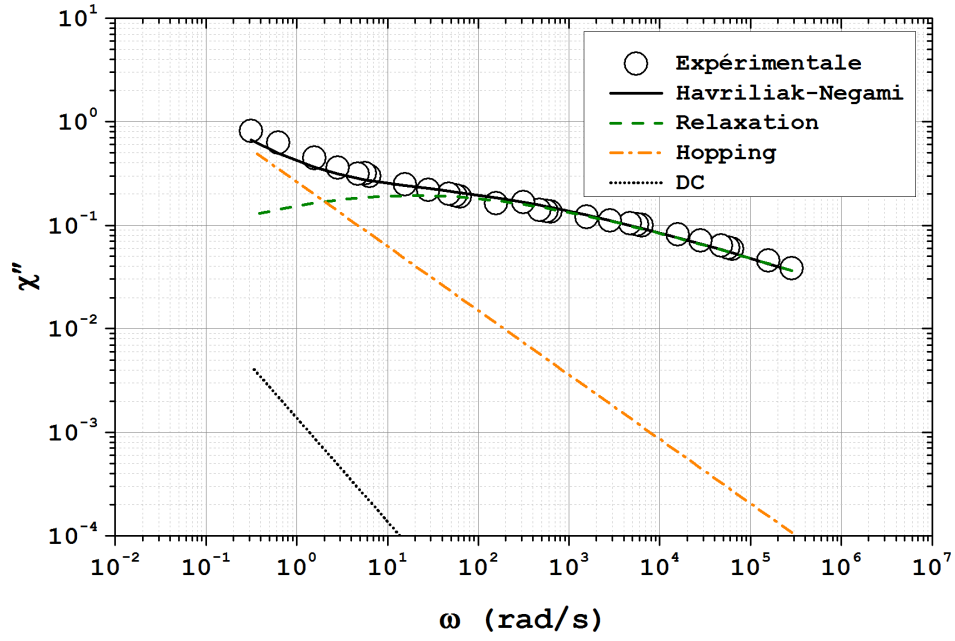


Figure 84. Partie imaginaire de la susceptibilité diélectrique du matériau après vieillissement par immersion à 138 mS/cm en fonction de la pulsation, montrant la contribution de la relaxation, de la conduction par saut et de la conduction DC.

Il est évident, *à posteriori*, que l'augmentation constatée dans les valeurs de la permittivité relative sur la **Figure 67** est associée à la conduction et non pas à la polarisation. Cela montre que pour l'étude de l'influence de l'absorption d'eau, le paramètre $\tan\delta$ est plus approprié que ε'.

L'eau peut se fixer sur les surfaces des additifs via des liaisons d'hydrogène ou des forces de van der Waals [102]. Les valeurs élevées du facteur de dissipation diélectrique des échantillons vieillis dans des solutions à faible conductivité peuvent refléter une plus grande absorption d'eau.

En effet, malgré la longue période post-contrainte qui sépare la fin de la phase d'immersion et la phase finale où ces mesures diélectriques sont réalisées, l'eau qui a été absorbée par les échantillons ne s'est pas complètement évaporée, et les échantillons ont conservé une certaine quantité d'eau absorbée. Ce résultat supporte ceux rapportés par R. Kochetov *et al.* [179] qui montrent que même un traitement thermique effectué après immersion ne suffit pas à extraire toutes les molécules d'eau piégées à l'intérieur du matériau composite.

La quantité de molécules d'eau résiduelles à l'intérieur des échantillons vieillis par immersion influence leur hydrophobicité de surface, l'augmentation de l'absorption d'eau conduit à la diminution de l'angle de contact comme le montre la **Figure 85**.

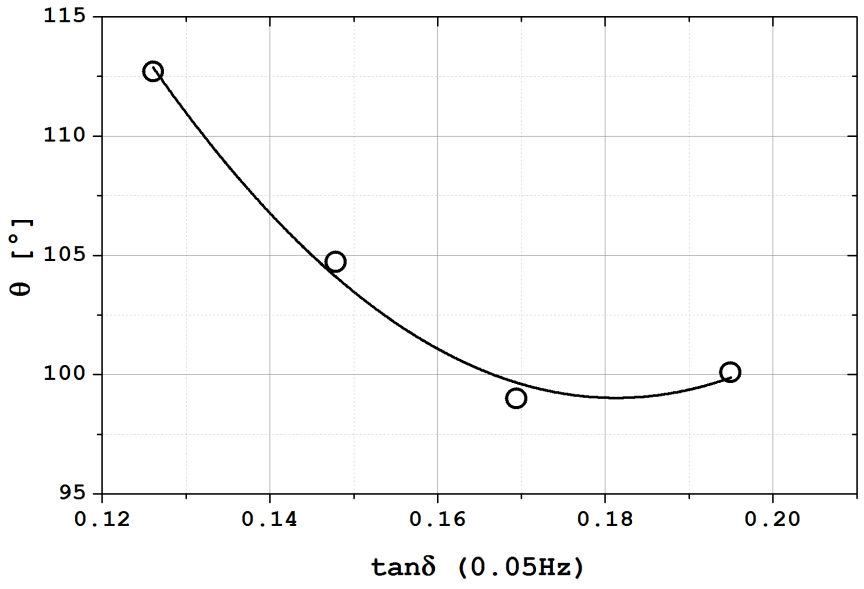


Figure 85. Angle de contact en fonction du facteur de dissipation diélectrique mesuré à 0,05 Hz après le vieillissement par immersion dans les solutions salines.

Cette dépendance peut être exprimée par l'**équation (37)**, avec un coefficient de corrélation de 0,988.

$$\theta = 4543,30 \cdot (\tan\delta)^2 - 1647,29 \cdot (\tan\delta) + 248,34 \qquad (37)$$

V.2.2.2 Corrélation des propriétés internes et surfaciques avec la salinité

La **Figure 86** présente une corrélation entre les propriétés des échantillons vieillis dans les solutions salines et la conductivité de ces solutions (S_a). Les paramètres d'ajustement sont présentés dans le **Tableau 7**.

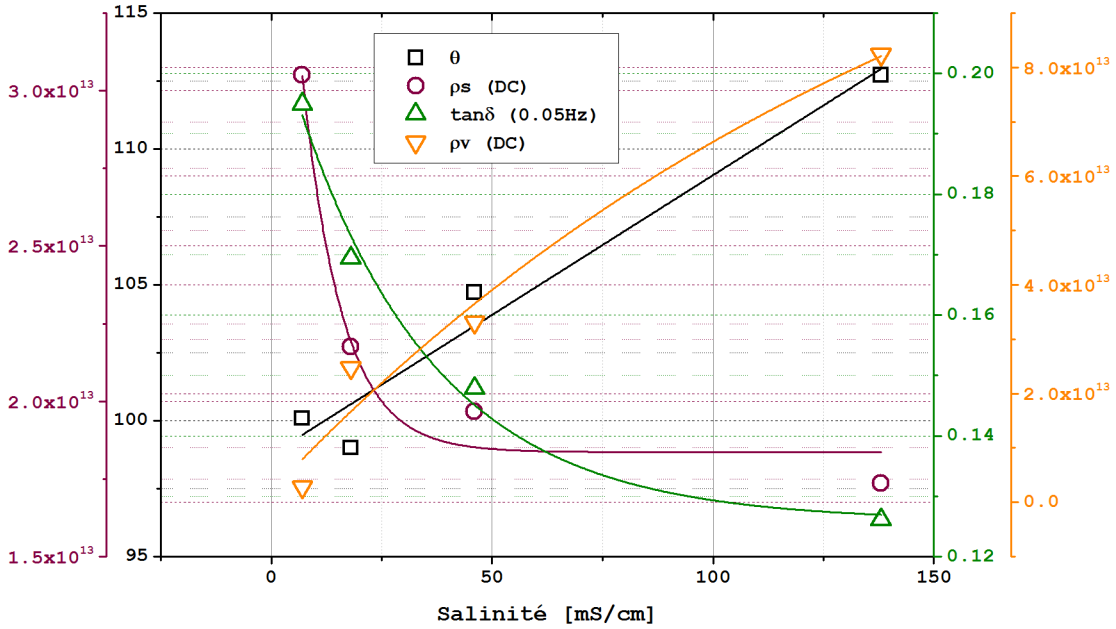


Figure 86. Facteur de dissipation diélectrique, résistivité volumique, résistivité surfacique et angle de contact des échantillons vieillis en fonction de la conductivité des solutions salines.

Tableau 7. Paramètres d'ajustement des courbes des propriétés diélectriques et de l'hydrophobicité pour le vieillissement par immersion.

	θ [°]	$\tan\delta$	ρ_v [Ω.m]	ρ_s [Ω]
A	98,756	0,084	-1,396.10^{14}	2,636.10^{13}
B	0,102	-	-	-
Y_0	-	0,125	1,416.10^{14}	1,836.10^{13}
R_0	-	-0.032	-0,006	-0,111
R^2	0,941	0,970	0,908	0,928

Nous remarquons que l'ensemble du facteur de dissipation diélectrique, de la résistivité volumique et de la résistivité surfacique présentent une allure exponentielle, comme pour le vieillissement thermique, et peuvent être exprimés par l'**équation (38)**. Le facteur de dissipation diélectrique et la résistivité surfacique diminuent avec la conductivité de la solution saline.

L'angle de contact augmente linéairement, après le vieillissement par immersion saline, l'hydrophobicité est plus élevée pour les échantillons vieillis dans des solutions à haut degré de salinité. Cette dépendance est exprimée par l'**équation (39)**.

$$Y(S_a) = Y_0 + A \cdot e^{R_0 \cdot S_a} \qquad (38)$$

$$\theta = B \cdot S_a + A \qquad (39)$$

V.2.2.2.1 Résistivité surfacique et volumique en régime permanent

Le vieillissement par immersion affecte la résistivité surfacique où sa valeur diminue avec la conductivité des solutions. La résistivité surfacique présente un taux de variation différent en fonction de la conductivité des solutions : une augmentation de 30,35% et 39,35% pour les solutions de 3 µS/cm et 7 mS/cm respectivement, et une diminution de 0,67%, 10,16% et 20,73% pour les solutions de 18 mS/cm, 46 mS/cm et 138 mS/cm.

Le vieillissement par immersion affecte également la résistivité volumique des échantillons où la tendance est plus prononcée, on note un taux de diminution de 99,84%, 99,70%, 97,31%, 96,40% et 91,06% pour les solutions de 3 µS/cm, 7 mS/cm, 18 mS/cm, 46 mS/cm et 138 mS/cm respectivement.

V.2.2.3 Etude de la tension de contournement

La **Figure 87** illustre la variation de la tension de contournement avec le nombre d'essais de contournements pour les échantillons vieillis dans les solutions à différentes conductivités. Dans le **Tableau 8**, la tension de contournement moyenne est indiquée en fonction de la contrainte de vieillissement correspondante.

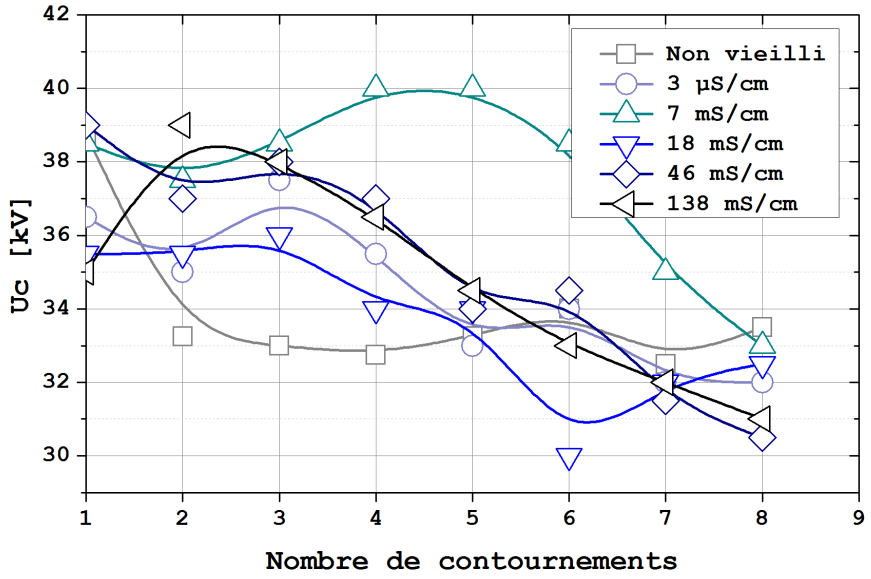


Figure 87. Tension de contournement en fonction du nombre de tests de contournements après vieillissement par immersion.

Tableau 8. Tension moyenne de contournement après vieillissement par immersion.

Cas étudiés [mS/cm]	Non vieilli	0,003	7	18	46	138
U_c [kV]	33,87	34,44	37,62	33,69	35,19	34,87

D'après ces résultats (**Figure 87** et **Tableau 8**), la tendance générale est que la tension de contournement diminue avec le nombre de tests pour les échantillons vieillis dans les solutions de 3 µS/cm, 18 mS/cm et 46 mS/cm. Les échantillons vieillis dans une solution de 138 mS/cm présentent une augmentation de 11% de la valeur de la tension de contournement entre le premier et le deuxième test, puis une diminution pour le reste des tests. Les échantillons vieillis à 7 mS/cm, quant à eux, présentent une évolution plus au moins différente par rapport aux autres échantillons. En effet, la tension de contournement augmente lors des cinq premiers tests, puis commence à diminuer à partir du 6ème test. Ces résultats montrent que la tension de contournement est généralement influencée par la conductivité des solutions salines utilisées dans le vieillissement par immersion.

La **Figure 88** illustre les variations de la tension de contournement des échantillons vieillis dans les solutions salines avec le facteur de dissipation diélectrique.

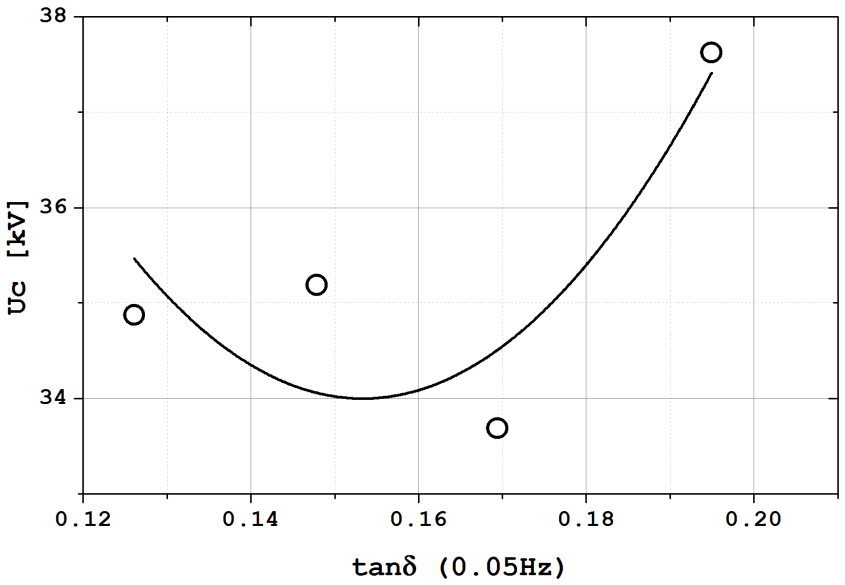


Figure 88. Tension de contournement en fonction du facteur de dissipation diélectrique mesuré à 0,05 Hz après vieillissement par immersion dans les solutions salines.

La tension de contournement diminue avec le facteur de dissipation diélectrique dans la première partie de la courbe, puis augmente. L'ajustement de la courbe montre que, tout comme constaté pour le vieillissement thermique, la tendance correspond à la fonction polynomiale du 2eme degré donnée, précédemment, par l'**équation (34)**.

Tableau 9. Paramètres d'ajustement de la courbe de la tension de contournement en fonction du facteur de dissipation diélectrique pour le vieillissement par immersion.

	U_C
A	80,376
B	-604,884
C	1972,322
R^2	0,714

La diminution de la tension de contournement peut être due à la température stockée dans le volume du diélectrique comme nous avons montré par l'**équation (36)**. L'augmentation de la tension de contournement dans la deuxième partie de la courbe présentée sur la **Figure 88** peut être expliquée par la présence d'humidité résiduelle au niveau du volume du matériau comme nous avons rapporté dans § **V.2.2.1**. Probablement, l'effet principal de l'humidité résiduelle est qu'elle contribue au refroidissement de la surface du matériau.

V.2.3 Effet des rayonnements UV

V.2.3.1 Analyses diélectriques

La **Figure 89**, la **Figure 90** et la **Figure 91** illustrent la variation de la permittivité, du facteur de dissipation diélectrique et du module électrique complexe avec la fréquence pour les échantillons vieillis par rayonnements UV. Les résultats montrent que la permittivité diminue dans une gamme de fréquence comprise entre 0,05 Hz et 250 Hz. À partir de cet intervalle, la permittivité est plus ou moins constante mais est supérieure à la permittivité des échantillons non vieillis. Selon la **Figure 90**, la tendance générale est que le facteur de dissipation diélectrique diminue avec l'augmentation de la fréquence. Et d'autre part, le facteur de dissipation des échantillons vieillis par rayonnements UV est toujours inférieur à celui des échantillons non vieillis. La variation du module électrique complexe suit celle de la permittivité et du facteur de dissipation diélectrique. La susceptibilité diélectrique complexe d'après la **Figure 92** montre aussi un comportement de type LFD.

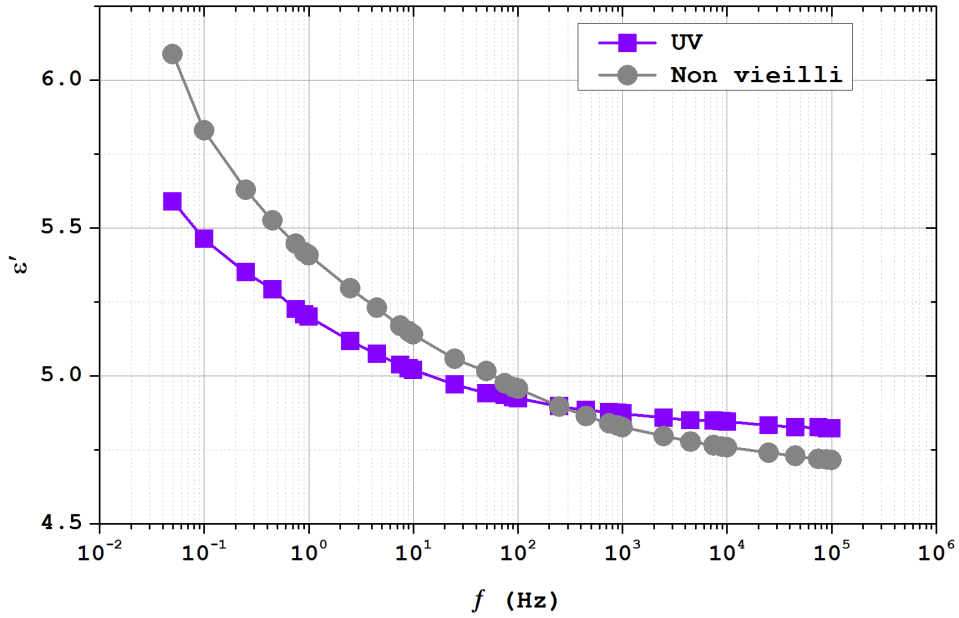


Figure 89. Variation de la permittivité réelle en fonction de la fréquence après vieillissement par rayonnements UV.

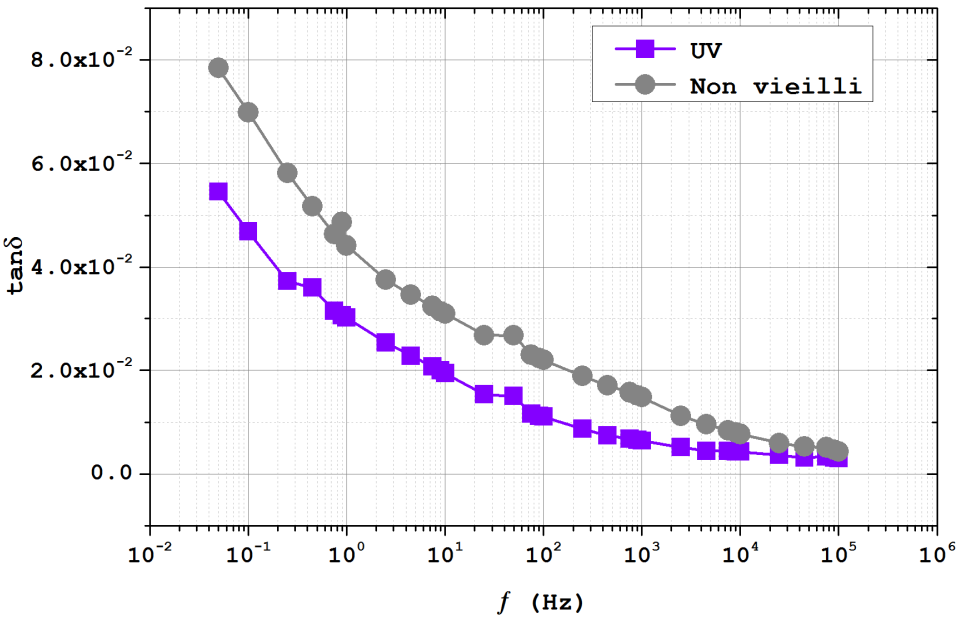


Figure 90. Variation du facteur de dissipation diélectrique en fonction de la fréquence après vieillissement par rayonnements UV.

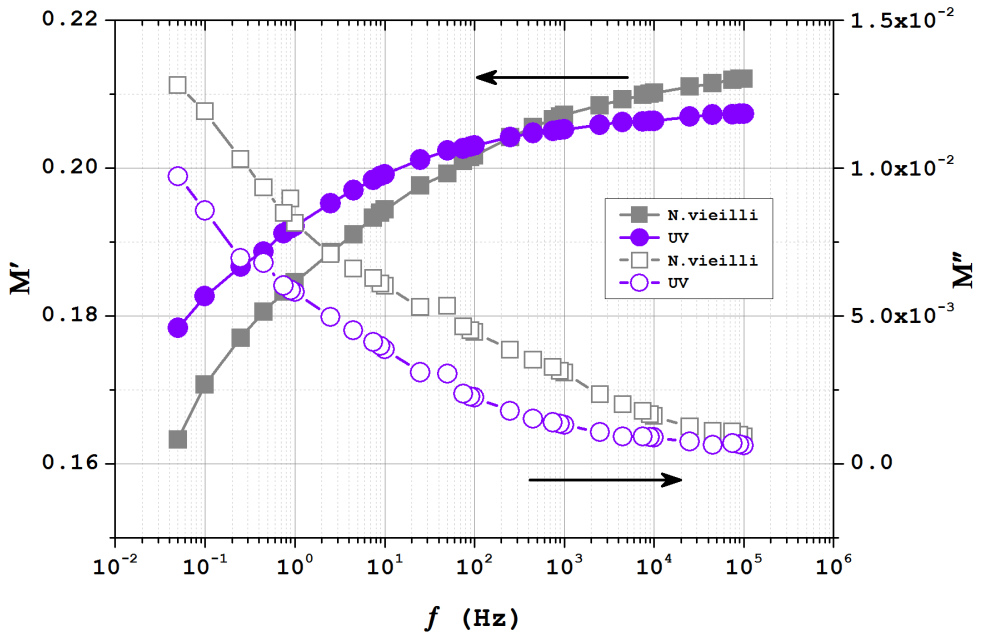


Figure 91. Variation du module complexe en fonction de la fréquence après vieillissement par rayonnements UV.

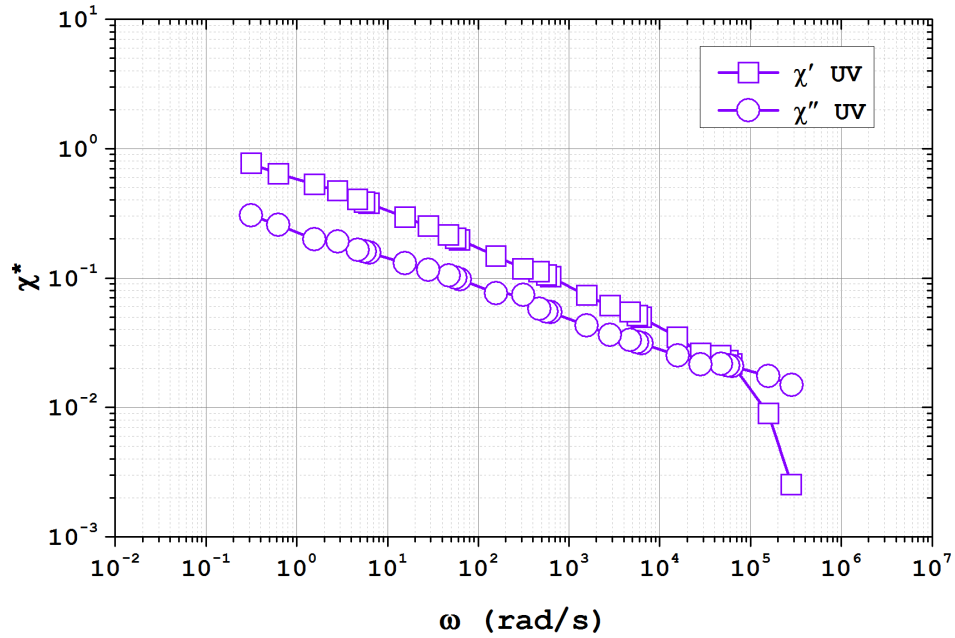


Figure 92. Parties réelle et imaginaire de la susceptibilité diélectrique après vieillissement par rayonnements UV.

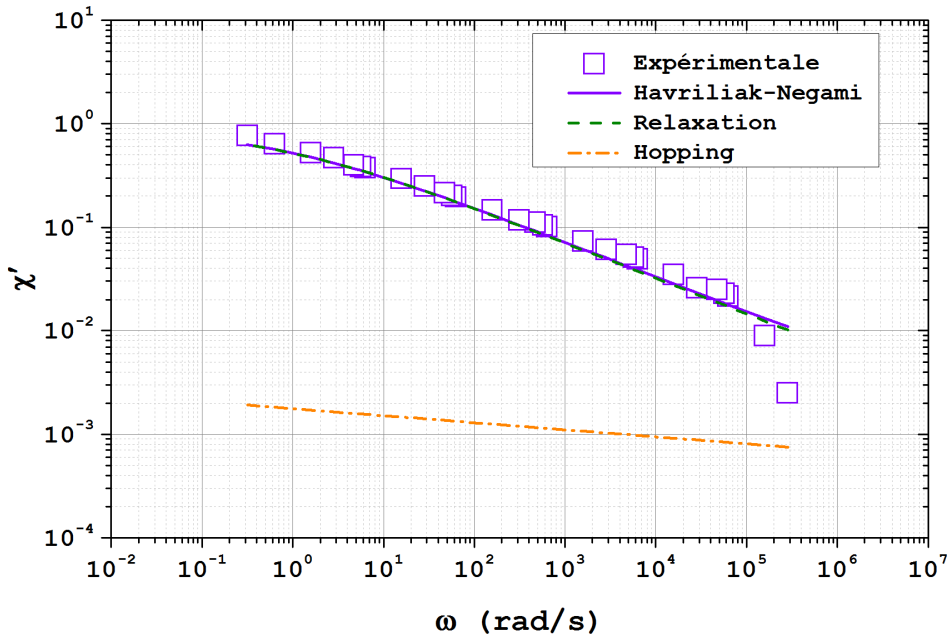


Figure 93. Partie réelle de la susceptibilité diélectrique du matériau après vieillissement par rayonnements UV en fonction de la pulsation, montrant la contribution de la relaxation et de la conduction par saut.

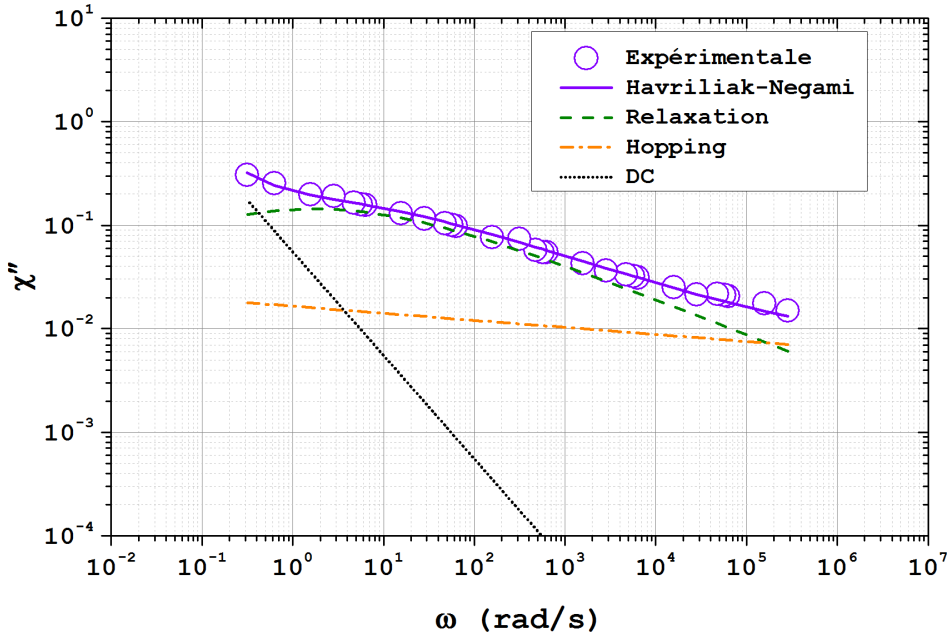


Figure 94. Partie imaginaire de la susceptibilité diélectrique du matériau après vieillissement par rayonnements UV en fonction de la pulsation, montrant la contribution de la relaxation, de la conduction par saut et de la conduction DC.

Sur la **Figure 93** et la **Figure 94**, nous avons présenté la susceptibilité diélectrique réelle et imaginaire des échantillons vieillis par rayonnements UV, les paramètres d'ajustement des courbes sont présentés dans le **Tableau 10**. On peut constater que la conduction par saut est très réduite comparé aux échantillons non vieillis (**Figure 56**), de plus, elle présente une faible pente (0,068). Dans la partie imaginaire de la susceptibilité diélectrique complexe, nous remarquons que la conduction DC est importante par rapport aux échantillons non vieillis (**Figure 56**). En dessous de 3,66 rad/s, la valeur de la conduction DC dépasse celle de la conduction par saut, ce qui suggère une augmentation de la mobilité des charges libres ou la réduction de la densité des états localisé vide.

Tableau 10. Paramètres d'ajustement des courbes de la susceptibilité diélectrique complexe après vieillissement par rayonnements UV.

Contrainte	χ_s	γ	σ_{Ho} [S/m]	α	β	τ [s]	σ_{DC} [S/m]	R^2
Non vieilli	1,099	0,501	$1{,}407.10^{-12}$	0,336	0,988	0,056	$1{,}085.10^{-15}$	0,992
UV	0,894	0,068	$1{,}555.10^{-14}$	0,423	0,819	0,924	$4{,}887.10^{-13}$	0,995

Ces variations peuvent résulter d'une modification de la structure physico-chimique des échantillons vieillis par rayonnements UV. En fait, l'énergie (e) des rayonnements émis par la lampe UV utilisée dans cette étude peut être calculée d'après l'équation suivante [115] :

$$e = \hbar \cdot \nu = \hbar \cdot \frac{c}{\lambda} \qquad (40)$$

Où λ est la longueur d'onde des rayonnements, ν est la fréquence des rayonnements, $\hbar$ et c présentent respectivement la constante de Planck et la célérité de la lumière. Pour une longueur d'onde de 254 nm, l'énergie obtenue est d'environ 470 kJ/mole[17]. Remarquons que cette énergie est supérieure aux énergies de dissociation (e_D) des liaisons chimiques dans les PDMS (**Tableau 11**) [77], ce qui montre qu'une dégradation par scission des chaines PDMS a pu avoir lieu pendant la période de contrainte. Par conséquent, des produits de

[17] Cette énergie est ramenée à l'échelon molécule-gramme en multipliant e par la constante d'Avogadro (N_A=6,022.10^{23} mol^{-1}).

décomposition ont été créés comme, par exemple, les Silanols qui possèdent des groupes d'hydroxyle (OH) [77], [97] et les radicaux libres.

Tableau 11. Energie de dissociation des liaisons chimiques dans une molécule de PDMS [77].

Liaison	C-H	Si-C	Si-O	O-H
e_D [kJ/mol]	414	301	447	463

V.2.3.2 Résistivité surfacique et volumique en régime permanent

Pour les échantillons vieillis par les rayonnements UV, la résistivité surfacique est réduite de 83,51% par rapport aux échantillons non vieilli. Notons que parmi les contraintes étudiées, les rayonnements UV présentent le plus d'impact sur la résistivité surfacique des échantillons. Le taux de réduction de la résistivité volumique est de 99,78%.

V.2.3.3 Etude de la tension de contournement

La **Figure 95** présente la variation de la tension de contournement avec le nombre de tests de contournements pour les échantillons vieillis par les rayonnements UV ainsi que les échantillons non vieillis. Le **Tableau 12** illustre la tension moyenne de contournement U_C des différents échantillons.

La tension de contournement des échantillons vieillis sous rayonnements UV est inférieure à celle des échantillons non vieillis, en particulier après le premier test de contournement où elle diminue de 15% par rapport aux échantillons non vieillis. Par la suite, cette valeur diminue légèrement en fonction du nombre de tests puis reste pratiquement constante.

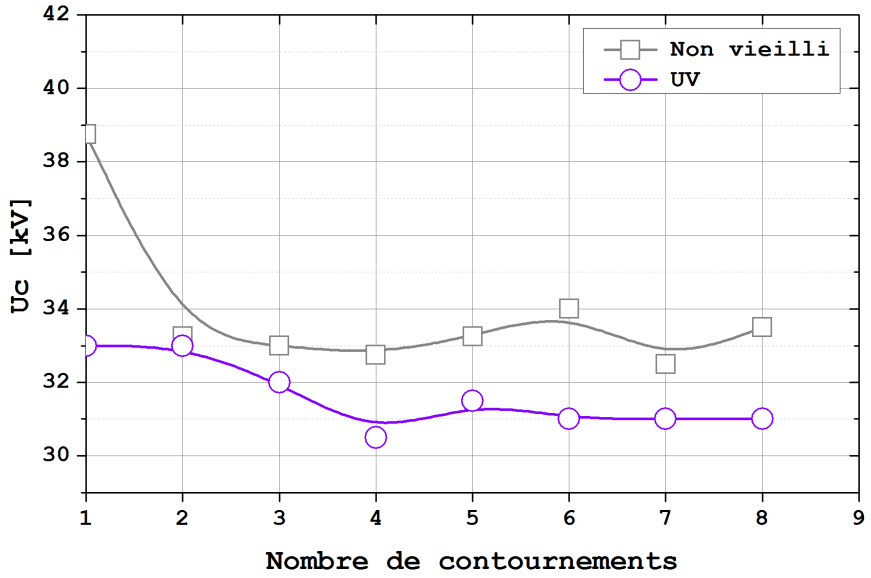


Figure 95. Tension de contournement en fonction du nombre de tests de contournements après vieillissement par rayonnements UV.

Tableau 12. Tension moyenne de contournement après vieillissement par rayonnements UV.

Cas étudiés	Non vieilli	UV
U_c [kV]	33,87	31,63

V.3 Conclusion

Dans ce chapitre, l'effet de vieillissement par la température, les rayonnements UV et l'immersion dans des solutions salines et non saline sur les propriétés diélectriques internes des échantillons en silicone vieillis a été étudié par la technique de la spectroscopie diélectrique. La corrélation avec la température de vieillissement et la conductivité des solutions salines a été présentée. Nous avons également abordé la corrélation entre les propriétés internes et l'hydrophobicité des échantillons vieillis.

Il a été montré que la réponse diélectrique du matériau en silicone est régie par les mécanismes de polarisation et de conduction. Aussi, il a été constaté que les propriétés diélectriques/électriques comme la permittivité et la résistivité volumique sont affectées par

les contraintes de vieillissement, ce qui influence la performance de l'isolateur vis-à-vis du contournement.

Il existe une corrélation entre l'hydrophobicité de surface du matériau et certaines de ses propriétés diélectriques quel que soit le type de contrainte ou son degré. De plus, la tension de contournement est bien corrélée au facteur de dissipation diélectrique quel que soit le type de contrainte (température ou salinité) ou son degré.

Chapitre VI : Impact du vieillissement du matériau de revêtement en silicone sur le champ électrique à la surface de l'isolateur composite.

VI.1 Introduction

Un isolateur hydrophobe fait face à la diffusion de l'eau sur sa surface, par conséquent, au lieu d'avoir un film continu d'eau, il y aura une formation de gouttelettes. En présence d'un champ électrique suffisant, ces gouttelettes deviennent le siège des décharges partielles surfaciques. Plusieurs travaux ont été consacrés à l'étude de l'impact du volume, de la conductivité, de la constitution chimiques, de la permittivité et du nombre de gouttelettes sur l'initiation et l'évolution des décharges surfaciques [44], [76], [134], [180]–[187]. D'autres travaux ont été faits pour étudier l'influence de la présence de gouttelettes, leurs formes, leurs angles de contact et leurs positions sur la répartition du champ électrique et son amplitude sur la surface de l'isolateur [188]–[193].

Suite aux décharges électriques, des charges électriques peuvent apparaître sur la surface des isolateurs composites. Ces charges peuvent rester sur la surface de l'isolateur pendant une certaine période qui est déterminée par l'efficacité du mécanisme de dissipation des charges - *Charge Decay* - de l'isolateur [194]. Plusieurs processus peuvent être impliqués dans le mécanisme de dissipation : la conduction en surface ou en volume, et la neutralisation par les ions présents dans le gaz environnant [195], [196]. Ces trois processus peuvent acter individuellement, mais, généralement, ils agissent simultanément et il est difficile de distinguer leurs contributions individuelles [195]. La dissipation des charges peut être surveillée via la mesure du champ électrique, de la densité de charges ou du potentiel électrique de surface [196]. Les sondes électrostatiques sont largement utilisées dans la mesure du potentiel électrique de surface qui permet par la suite le calcul de la densité de charges [197]. Bien qu'elle ne permet pas une évaluation quantitative, la technique de "*Lichtenberg Dust figure*" a été également utilisée, vue sa simplicité, pour étudier l'accumulation des porteurs de charges sur les surfaces des isolateurs composites [198], [199].

Ce chapitre présente une investigation sur les conséquences du vieillissement du matériau de revêtement en silicone sur le champ électrique en surface d'un prototype d'isolateur et sur sa tension de contournement.

Dans la première partie un calcul numérique du champ électrique sera fait, basé sur les données obtenues pendant l'étude du vieillissement du matériau de revêtement par l'action de la température, des rayonnements UV et de l'immersion dans des solutions salines et non saline. Une corrélation sera également faite entre le degré des contraintes de vieillissement, les propriétés diélectriques et l'amplitude du champ électrique à la surface de l'isolateur.

Dans la deuxième partie, une étude expérimentale sur la tenue diélectrique en surface de l'isolateur sera réalisée, l'influence des contraintes appliquées ainsi que l'état de surface de l'isolateur sur la tension de contournement seront investiguées. Une nouvelle approche, qui consiste à mesurer le courant de surface de l'isolateur après le contournement, sera présentée dans ce chapitre et sa corrélation avec le vieillissement sera discutée.

VI.2 Calcul du champ électrique

Pour étudier l'influence des propriétés diélectriques et de l'hydrophobicité de l'isolateur vieilli sur la répartition et l'intensité du champ électrique, un modèle de simulation basé sur les données expérimentales a été élaboré. Le calcul numérique du champ électrique a été fait en utilisant la méthode des éléments finis (MEF) via le logiciel COMSOL Multiphysics. Plusieurs études ont procédé au calcul numérique du champ en utilisant un model 2D, afin de simplifier la géométrie et de réduire le temps de calcul ; cependant, en cas de présence de gouttelette, les résultats obtenus peuvent ne pas être représentatifs du phénomène physique, notamment lors de l'utilisation du modèle 2D axisymétrique. Dans notre étude, la nature 3D du problème a été prise en compte afin d'obtenir des résultats plus rélistes.

Une gouttelette se trouvant dans un champ électrique, subit une déformation de ses interfaces causée par l'amplitude de ce dernier, et ainsi change de forme [42]. L'objectif de cette simulation est de chercher une éventuelle corrélation entre le degré de vieillissement de la surface de l'isolateur et la répartition du champ en cas de présence de gouttelette. Pour cela, l'intérêt donc est de garder constant l'angle de contact initial avant la déformation de la gouttelette. Des mesures expérimentales préliminaires sur le seuil de déformation en cas de présence d'une seule gouttelette[18] nous ont montré que la tension seuil est de 15 kV (en DC). De ce fait, la valeur de la tension utilisée pour la simulation est fixée à 7 kV, elle correspond approximativement à 50% de la valeur de la tension seuil, et à une valeur du champ électrique géométrique égale à 1,57 kV/cm.

Dans cette étude, le module AC/DC de COMSOL Multiphysics a été utilisé dans le domaine stationnaire. La nature physique du problème étudié implique la prise en considération des deux milieux séparément : isolant et conducteur. Les paramètres diélectriques utilisés dans la simulation sont représentés dans le **Tableau 13**.

[18] Voir la configuration utilisée sur la Figure 99.

La géométrie du modèle étudié est présentée sur la **Figure 96**, où l'isolateur est un disque de 40 mm diamètre et de 4,7 mm d'épaisseur. Au milieu de ses deux faces, il est en contact avec deux électrodes - en acier inoxydable - demi-sphériques de 4,5 mm de rayon. Le potentiel électrique est appliqué à l'électrode supérieure, tandis que l'électrode inférieure sert de masse. Pour une analyse plus complète, nous nous proposons d'étudier les effets suivants :

- **Effet du vieillissement du matériau de revêtement en silicone sur les propriétés diélectriques (permittivité relative et conductivité volumique) de l'isolateur :** pour cela, la simulation est faite pour le cas d'un isolateur propre sans dépôt de gouttelette sur sa surface. L'objectif ici est de voir l'impact du changement des propriétés diélectriques suite aux contraintes exercées pendant le vieillissement sur le champ électrique à la surface de l'isolateur. Ainsi une corrélation est faite entre le degré de la contrainte de vieillissement appliquée et l'amplitude du champ électrique.

- **Effet du vieillissement du matériau de revêtement en silicone sur l'hydrophobicité de l'isolateur :** pour cela, la simulation est faite pour le cas d'un isolateur en présence d'une gouttelette d'eau à sa surface. L'objectif est de voir l'impact du changement de la valeur de l'angle de contact suite au vieillissement sur la répartition du champ et son amplification près de la gouttelette.

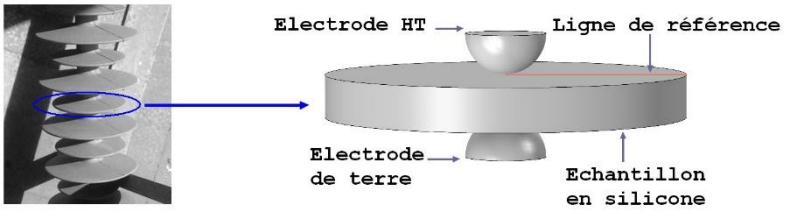
- **Effet du vieillissement sur la tension de contournement de l'isolateur**.

VI.3 Résultats et discussions

VI.3.1 Effet du vieillissement sur la distribution du champ électrique

VI.3.1.1 Isolateur propre (sans dépôt de gouttelette)

L'interface résulte de la réunion de diélectriques de différentes permittivité et conductivité. Dans la pratique de la haute tension, nous pouvons rencontrer plusieurs types d'interface : gaz/solide, liquide/solide, gaz/liquide/solide, etc. Il a été montré par Galimberti et *al.* qu'en présence d'un champ électrique, la génération d'une décharge glissante dans une interface gaz/diélectrique solide est liée à la création d'une composante tangentielle du champ électrique à la surface de ce diélectrique solide [55]. Vue l'importance de l'interface air/isolant solide dans le processus de contournement, le champ électrique sera analysé sur la ligne de référence illustrée sur la **Figure 96 (b)**.



(a) *(b)*

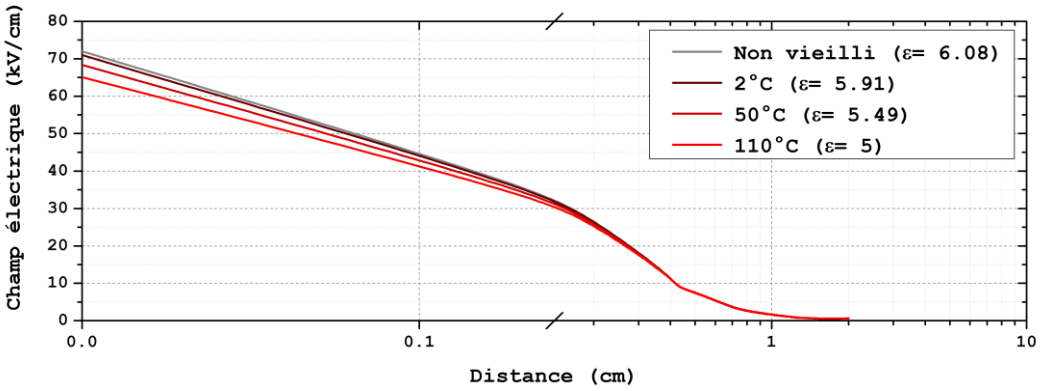
Figure 96. (a) : chaine d'isolateurs, (b) : modèle simplifié 3D utilisé dans la simulation montrant la ligne de référence.

Tableau 13. Propriétés internes des isolateurs étudiés mesurées à 0,05 Hz.

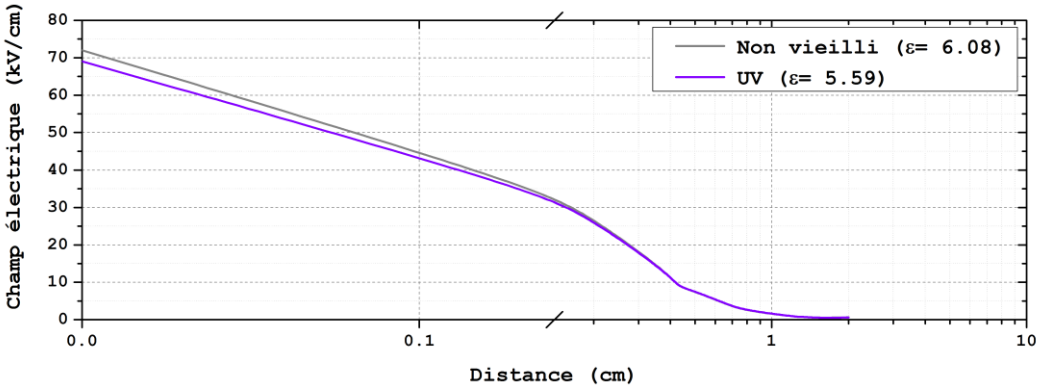
Contrainte	**Non vieilli**	**Température [°C]**			**UV**	**Immersion [mS/cm]**				
Niveaux	-	2	50	110	-	0,003	7	18	46	138
ε_r	6,08	5,91	5,49	5	5,59	6,58	6,40	6,43	6,49	6,48
σ_v [pS/m]	14,3	13,7	12,5	11,1	12,7	16,3	15,429	15,416	15,5	15,415

Il ressort du **Tableau 13** que l'effet du vieillissement thermique est plus évident : les valeurs de la permittivité et de la conductivité volumique diminuent si la température du vieillissement augmente. Il est vrai que les valeurs de permittivité et de conductivité des isolateurs vieillis par immersion ont augmenté par rapport aux isolateurs originaux, cependant la différence entre ces valeurs en fonction du degré de salinité de la solution est moins importante.

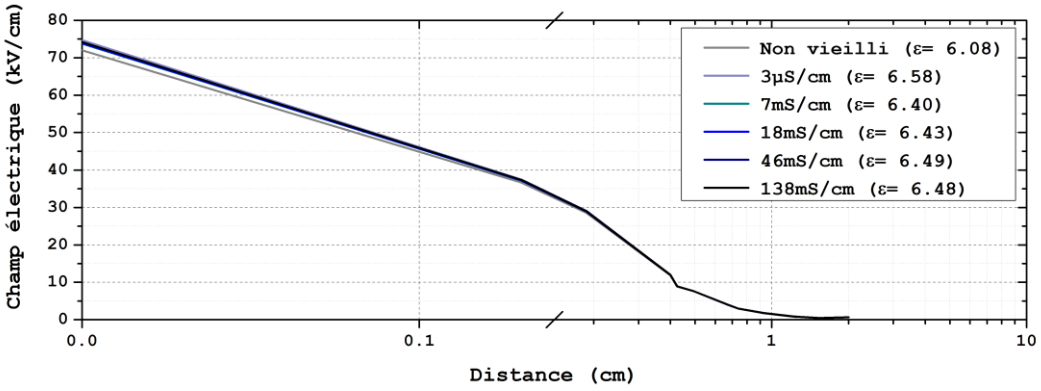
La **Figure 97** et la **Figure 98** présentent la distribution du champ électrique sur la surface de l'isolateur en fonction des différents niveaux de contraintes (thermique, rayonnements UV et salinité) appliquées auparavant. L'axe des abscisses est présenté en échelle logarithmique. Sur toutes les figures, la courbe du champ dans le cas de l'isolateur non vieilli est représentée également afin de servir comme allure de référence. Rappelons que toutes ces courbes sont obtenues pour une même tension appliquée.



(a)

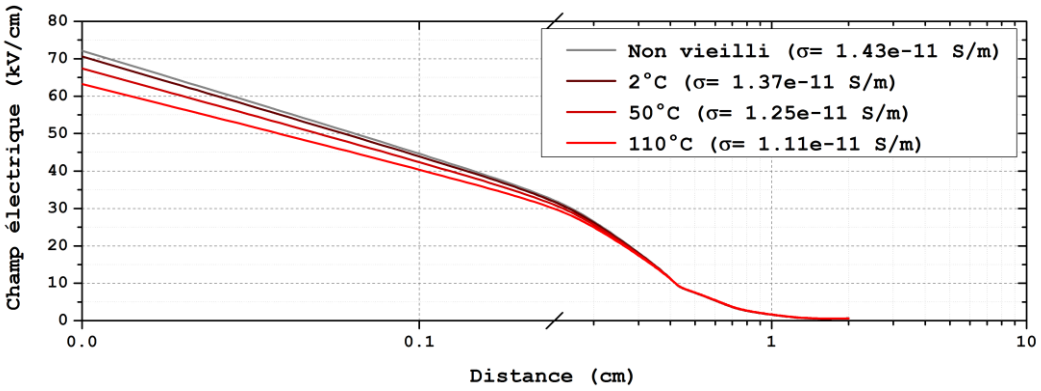


(b)

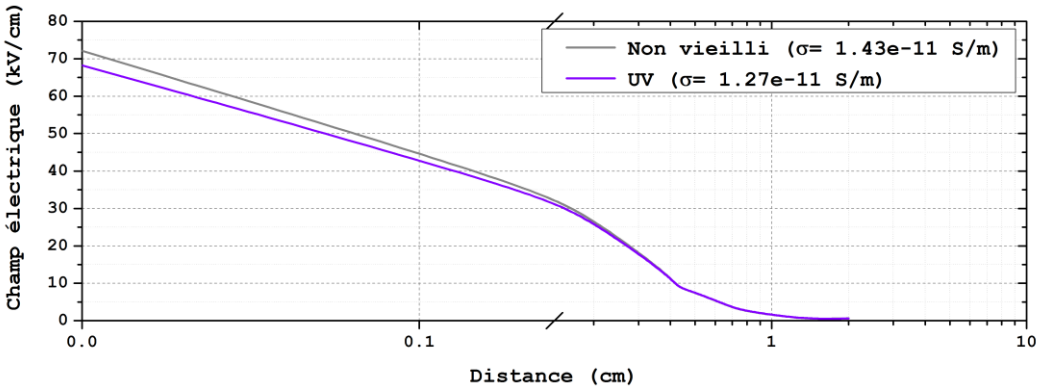


(c)

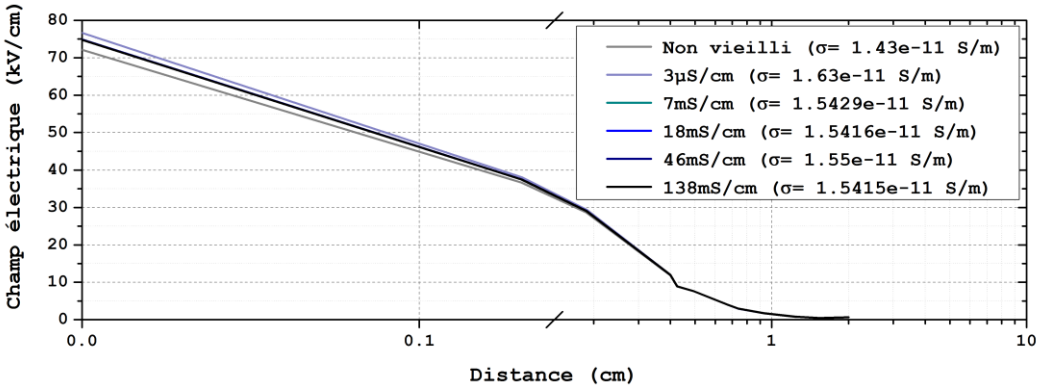
Figure 97. Distribution du champ électrique - Effet de la permittivité : (a) après le vieillissement thermique, (b) après le vieillissement par rayonnements UV, (c) après le vieillissement par immersion.



(a)



(b)



(c)

Figure 98. Distribution du champ électrique - Effet de la conductivité : (a) après le vieillissement thermique, (b) après le vieillissement par rayonnements UV, (c) après le vieillissement par immersion.

Pour tous les cas de figures, nous remarquons que la valeur du champ diminue considérablement en s'éloignant de l'électrode haute tension. Ceci est en accord avec des observations qui ont été rapportées dans la littérature [58], [191]–[193], [200], [201].

Pour les isolateurs vieillis par la contrainte thermique, on constate que la valeur du champ diminue avec la diminution de la valeur de la permittivité. Pour les isolateurs vieillis par les rayonnements UV, la valeur du champ électrique diminue également par rapport aux isolateurs non vieillis en raison de la valeur de permittivité. Les isolateurs vieillis par immersion quant à eux présentent des valeurs plus ou moins élevées du champ par rapport aux isolateurs non vieillis. Cependant, l'effet du degré de salinité de la solution sur le champ électrique n'est pas très évident en raison des valeurs proches de permittivité. Mais, d'une façon générale, on peut établir que pour toutes les contraintes étudiées, la valeur du champ électrique augmente avec l'augmentation de la permittivité du matériau.

Il a été rapporté dans plusieurs travaux que la permittivité du matériau influence l'initiation et le développement des décharges glissantes sur une interface gaz/diélectrique solide. Dans la référence [202], les autrices ont montré que la tension de contournement se voit diminuée avec l'augmentation de la permittivité des matériaux utilisés (de différentes natures). M. L. Coulibaly [55], a conclu que le renforcement du champ électrique au voisinage d'une pointe - légèrement distancée de la surface du diélectrique solide - est d'autant plus important que la différence entre la permittivité du diélectrique solide et du gaz est grande. X. Meng *et al.* [203], dans leur travail sur l'influence de la permittivité des matériaux en : Nylon, SiR, Polyméthacrylate de méthyle (PMMA), Polyoxyméthylène (POM), PTFE, et céramique, sur la propagation des streamers surfaciques ont également trouvé que les matériaux aux permittivités plus élevées subissent un champ électrique plus élevé à leurs surfaces. Ils ont trouvé encore que pour les matériaux aux permittivités plus élevées, un champ plus intense est nécessaire pour la propagation des streamers, ce qui semble, à première vue, contradictoire avec ce qui a été dit plus haut. En partant du fait que, l'accumulation des charges surfaciques croît avec la permittivité, et de leurs résultats de simulation qui indiquent que le champ électrique est réduit - dans la seconde partie de l'intervalle inter-électrodes - par la présence des charges, ces auteurs donnent une explication basée sur l'affaiblissement de l'ionisation en tête du streamer suite à l'attachement des charges à la surface du matériau.

En ce qui concerne l'influence de la conductivité de l'isolateur pour le vieillissement thermique et le vieillissement par rayonnements UV (**Figure 98 (a)**, **(b)**), les mêmes remarques faites pour l'influence de la permittivité peuvent s'appliquer ici. Cependant pour l'effet du

vieillissement par immersion, illustré sur la **Figure 98 (c)**, on note que les isolateurs vieillis à 3µS/cm (eau distillée) possèdent une amplitude du champ supérieure à celle des isolateurs non vieillis et aux autres isolateurs vieillis dans les solutions salines (7 mS/cm, 18 mS/cm, 46 mS/cm et 138 mS/cm), ceux-ci ont des valeurs très proches du champ. Cette différence de résultats peut être due à la valeur très élevée de la conductivité que possèdent les isolateurs vieillis par immersion dans l'eau distillée (3µS/cm) par rapport aux isolateurs vieillis dans les solutions salines qui possèdent des valeurs proches de conductivité, ainsi que par rapport aux isolateurs non vieillis qui possèdent une conductivité réduite.

VI.3.1.2 Effet de la présence d'une gouttelette d'eau sur la surface de l'isolateur

Dans des conditions d'humidité sévère ou de pluie, des gouttelettes d'eau se forment sur la surface de l'isolateur. La forme de ces gouttelettes d'eau dépend fortement de l'hydrophobicité de l'isolateur. En présence d'un champ électrique suffisamment élevé, des décharges partielles apparaissent, généralement au niveau du point de contact triple. La valeur du champ électrique seuil d'apparition de ces décharges est intimement liée au volume des gouttelettes et à leurs angles de contact.

Nous procédons maintenant à l'étude de la variation du champ électrique à la surface de l'isolateur, suite à la présence de gouttelette d'eau. Pour simplifier l'étude, nous avons retenu le cas de présence d'une seule gouttelette sur la surface supérieure de l'isolateur. La configuration est présentée sur la **Figure 99**.

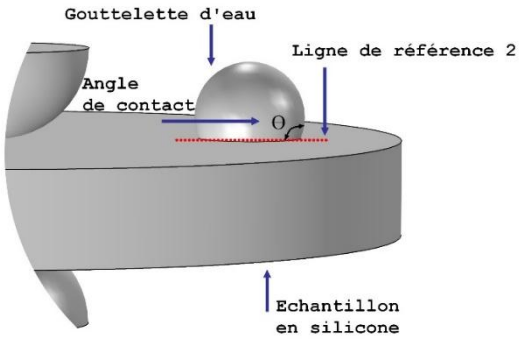
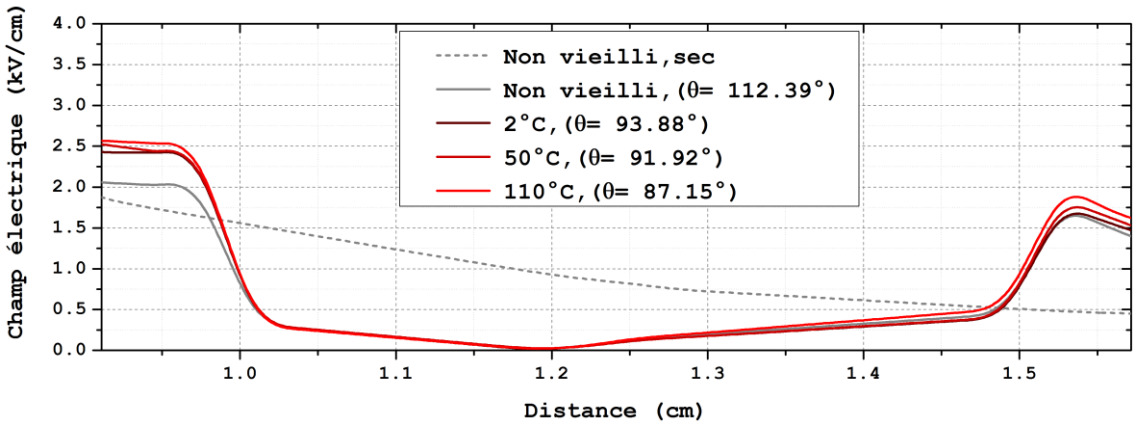
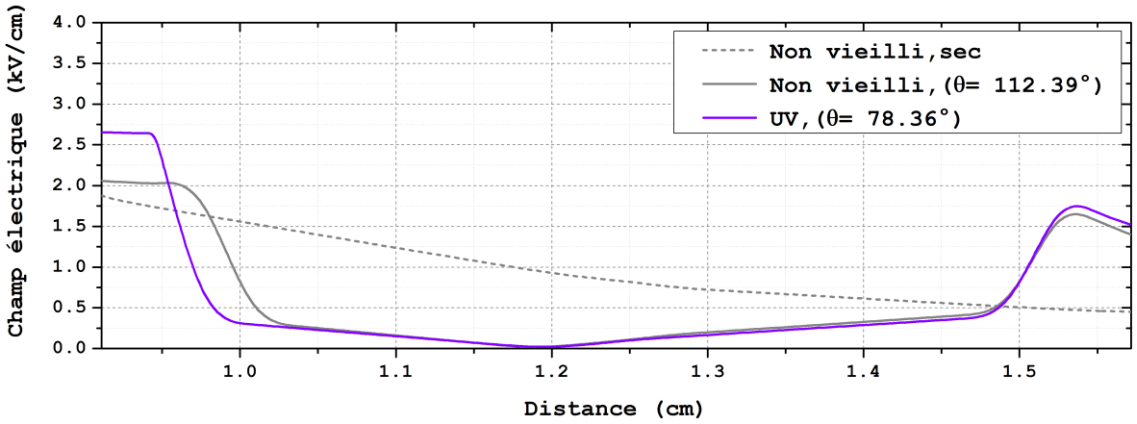


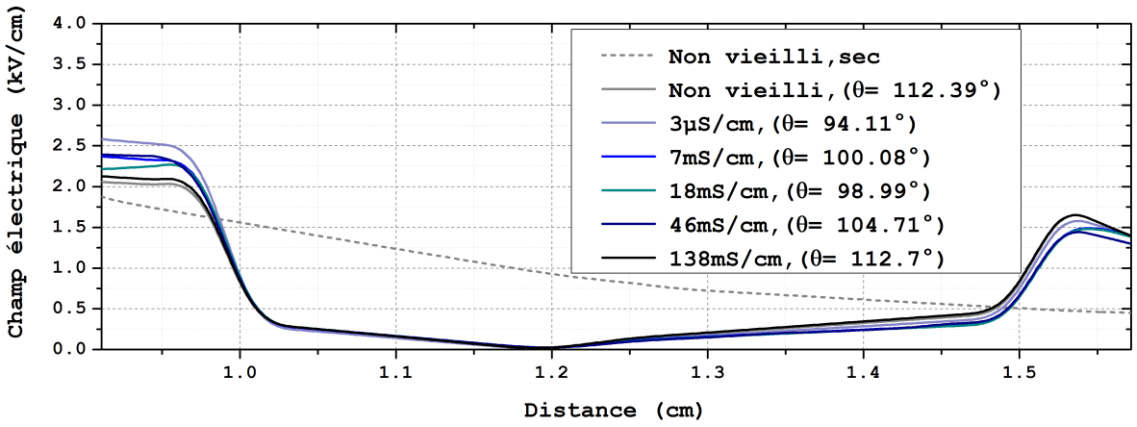
Figure 99. Illustration de présence d'une gouttelette sur la surface de l'isolant.



(a)



(b)



(c)

Figure 100. Distribution du champ électrique en fonction de l'angle de contact : (a) après le vieillissement thermique, (b) après le vieillissement par rayonnements UV, (c) après le vieillissement par immersion.

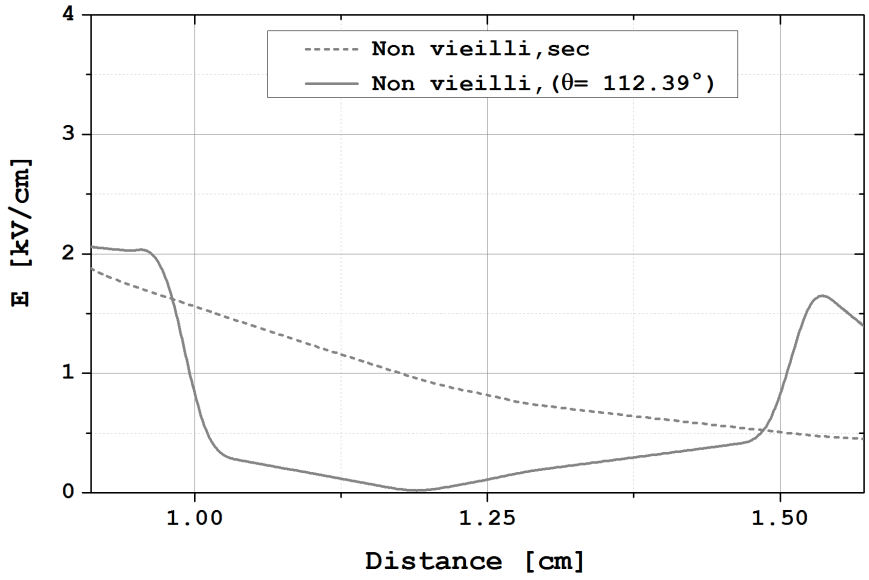
La **Figure 100** montre la distribution du champ sur la surface de l'isolateur suite à la présence d'une gouttelette d'eau avec différentes valeurs d'angle de contact. Ici, les valeurs de l'angle de contact correspondent aux valeurs mesurées sur la surface des échantillons en silicone vieillis par les différentes contraintes. Ces valeurs sont illustrées dans le **Tableau 14**.

Tableau 14. Angle de contact et facteur d'intensification du champ en fonction des contraintes de vieillissement.

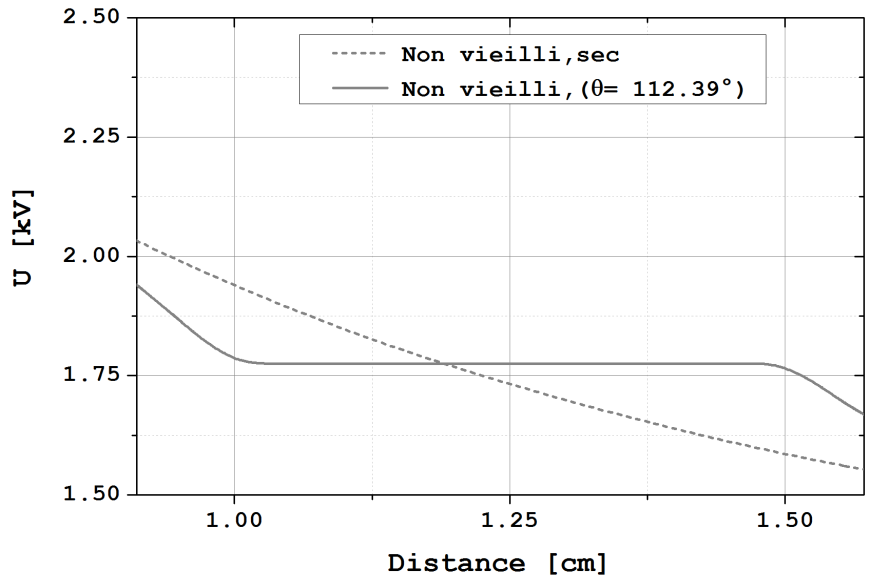
Contrainte	**Non vieilli**	**Température [°C]**			**UV**	**Immersion [mS/cm]**				
Niveaux	-	2	50	110	-	0,003	7	18	46	138
θ [°]	112,39	93,88	91,92	87,15	78,36	94,11	100,08	98,99	104,71	112,7

D'après la **Figure 100**, il est évident que la présence d'une gouttelette d'eau à la surface de l'isolateur conduit à une diminution de la valeur du champ électrique à l'intérieur de cette gouttelette. Cette diminution peut être attribuée à la valeur quasi-constante du potentiel le long du diamètre de la gouttelette comme le montre la **Figure 101 (b)**. Cependant au niveau du point de contact triple (eau/isolant solide/air) le champ électrique augmente par rapport au cas où l'isolateur est sec (sans dépôt de gouttelette). Cette augmentation de la valeur du champ est dépendante de la valeur de l'angle de contact. Des travaux ont attribué cette augmentation de la valeur du champ au niveau du point de contact triple à l'écart de valeurs de permittivité des milieux le constituant [204].

Nous avons vu, plus haut, pour l'isolateur sec et propre, que la valeur du champ électrique sur la surface de l'isolateur est très élevée au voisinage de l'électrode haute tension, cet endroit constitue un point de contact triple (électrode/isolant solide/air). Il a été également rapporté, dans d'autres travaux, que la valeur très intense du champ électrique au point de contact triple est causée par la singularité [44].



(a)



(b)

Figure 101. Effet de la présence d'une gouttelette sur la surface de l'isolateur : (a) sur le champ électrique, (b) sur le potentiel électrique.

VI.3.1.2.1 Singularité

Le problème de singularité provient du fait que, théoriquement, la valeur du champ électrique tend vers l'infini au niveau du point de contact triple. De plus, la méthode des éléments finis qui est largement utilisée pour la résolution des problèmes de l'électromagnétisme ne peut estimer avec précision la valeur du champ dans cet endroit, cela est dû au fait que lors du maillage, la forme autour du point triple est impossible à reproduire correctement [205].

Pour notre étude, les électrodes utilisées ont une forme d'une demi-sphère, l'angle formé au point de contact triple (électrode/isolant solide/air) possède une valeur de 180 °. Du fait de cette courbure, l'électrode et l'isolant ont une ligne tangentielle de contact commune. Dans cette situation, le problème de singularité du champ ne se présente pas, mais il peut se présenter, par contre, pour des valeurs d'angle de contact supérieures à 90 ° et inférieures à 180 ° [206]. Comme le montre le **Tableau 14**, la majorité des valeurs d'angle de contact mesurées dans notre étude est comprise dans cet intervalle.

Sur la **Figure 102**, nous avons présenté les résultats du calcul du facteur d'intensification (F)[19] du champ électrique obtenus en fonction de la taille relative du maillage utilisé (**Figure 103**).

Nous remarquons que la courbe peut être divisée en deux parties. Dans la première partie, la valeur du facteur d'intensification du champ électrique augmente considérablement avec un maillage de l'ordre de 0,01. Dans la deuxième partie, il est évident que le facteur d'intensification du champ électrique varie légèrement, notamment entre 0,07 et 0,04 où nous pouvons considérer que la valeur du champ électrique converge dans cet intervalle. Pour faire face au problème de singularité dans notre étude, la taille relative du maillage utilisé doit être située dans cet intervalle. Par conséquent, une taille relative du maillage de l'ordre de 0,04 a été considérée pour tous les modèles étudiés.

[19] Nous reviendrons en détail sur cette notion dans § VI.3.1.2.2.

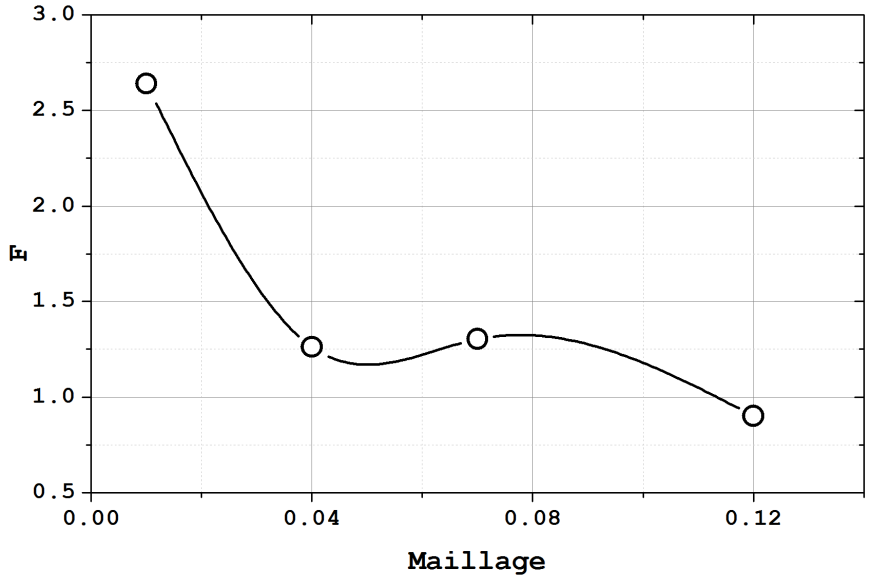


Figure 102. Influence du choix de maillage sur le facteur d'intensification du champ électrique.

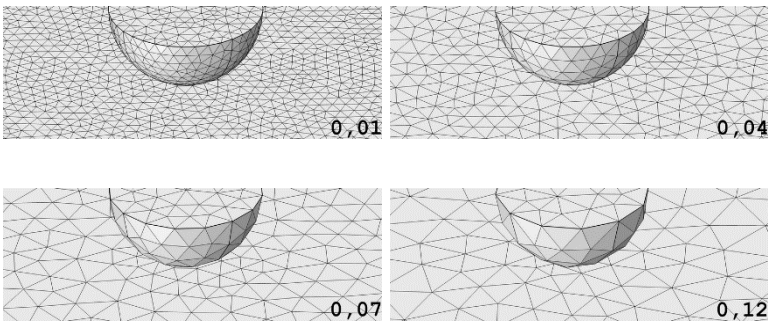


Figure 103. Illustration du maillage de différentes tailles sur la surface de l'échantillon au voisinage de l'électrode portée à la haute tension.

VI.3.1.2.2 Facteur d'intensification du champ électrique

Afin de quantifier la dépendance entre l'angle de contact de la gouttelette et le champ électrique, nous nous proposons de calculer le facteur d'intensification du champ électrique sur le bord de la gouttelette par l'**équation (41)**. Cette notion de "facteur d'intensification" a été largement utilisée par de nombreux chercheurs [44], [76], [134], [204], ce facteur d'intensification (F) représente le rapport entre la valeur du champ électrique due à la présence de gouttelette (E_{max}) et la valeur du champ électrique en l'absence de gouttelette (E_0).

$$F = \frac{E_{max}}{E_0} \quad (41)$$

Le **Tableau 15** présente les valeurs du facteur d'intensification du champ électrique calculées pour toutes les contraintes de vieillissement.

Tableau 15. Angle de contact et facteur d'intensification du champ en fonction des contraintes de vieillissement.

Contrainte	**Non vieilli**	**Température [°C]**			**UV**	**Immersion [mS/cm]**				
Niveaux	-	2	50	110	-	0,003	7	18	46	138
F	1,26	1,49	1,51	1,55	1,62	1,51	1,42	1,42	1,36	1,2

D'après le **Tableau 14** et le **Tableau 15** , il résulte que le facteur d'intensification du champ électrique augmente avec la diminution de l'angle de contact. Ceci montre qu'une perte d'hydrophobicité de l'isolateur présente un impact sur le champ électrique sur sa surface. Le cas d'un vieillissement par les rayonnements UV présente le cas le plus défavorable, où la valeur du champ électrique à la surface de l'isolateur vieilli peut augmenter de 29% en cas de conditions sévères d'humidité.

La **Figure 104 (a)** montre que l'intensification du champ croît avec la température de vieillissement thermique. En ce qui concerne le vieillissement par immersion, la **Figure 104 (b)** montre que l'intensification du champ décroît avec l'augmentation de la conductivité de la solution.

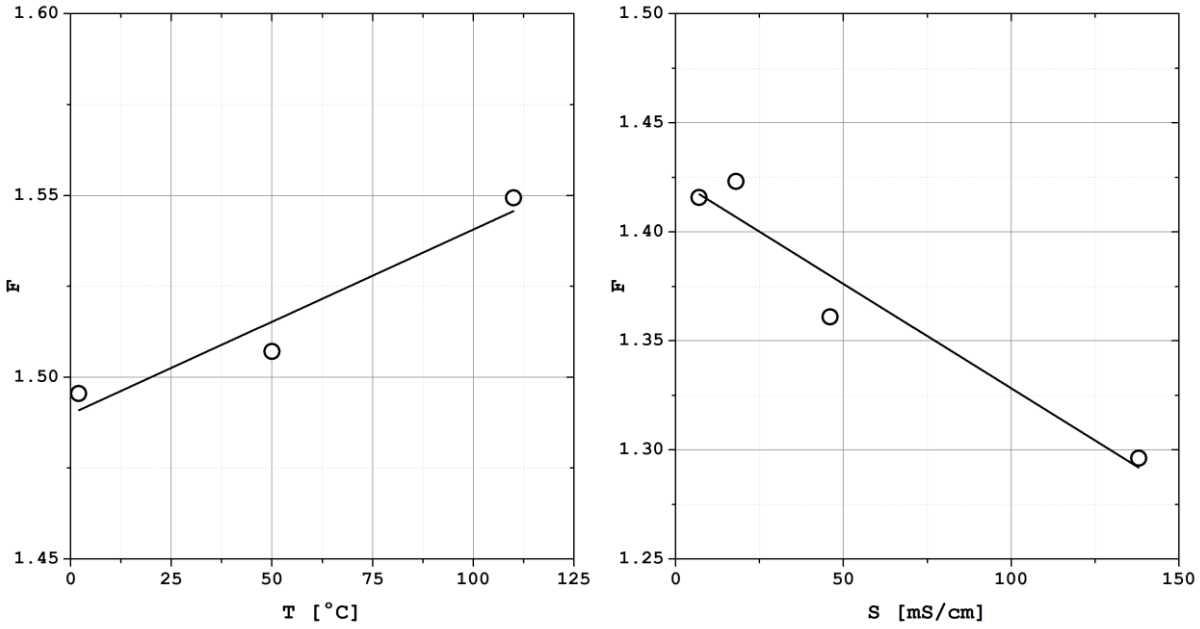
Il ressort que la variation du facteur d'intensification présente une linéarité avec la température et de la salinité. Cette variation suit une droite qui a pour équation :

$$F = B \cdot \phi + A \quad (42)$$

Où ϕ est le degré de la contrainte exercée, B et A étant des constantes qui dépendent de la contrainte. Les coefficients de corrélation (R^2) obtenus sont respectivement 0,873 et 0,906 pour le vieillissement thermique et pour le vieillissement par immersion.

- **Pour un vieillissement thermique :** $B = 5{,}076.10^{-4}$ et $A = 1{,}489$;
- **Pour un vieillissement par immersion :** $B = -9{,}573.10^{-4}$ et $A = 1{,}424$;

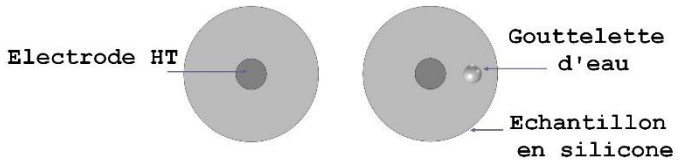
L'effet de l'immersion est moins important par rapport à celui des rayonnements UV et de la température. Il est prévu que la tenue diélectrique en surface des isolateurs (qui ont fait l'objet de cette étude) vieillis par immersion sera plus importante que les autres isolateurs - vieillis par rayonnements UV et par la température, lors des conditions sévères d'humidité.



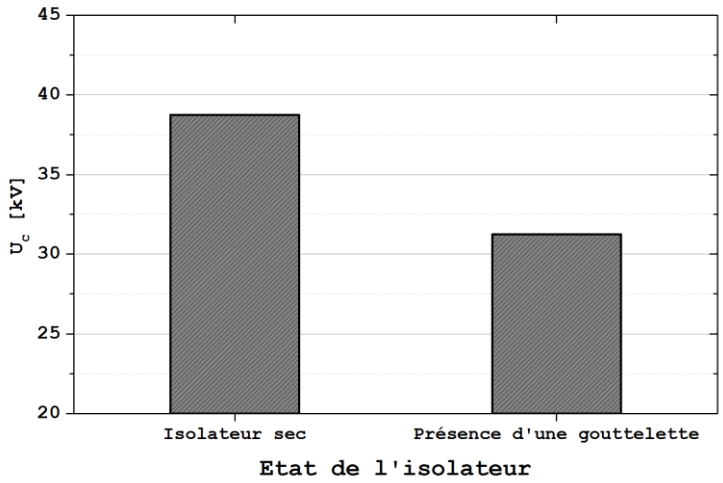
(a) *(b)*

Figure 104. Facteur d'intensification du champ électrique en fonction de : (a) la température du vieillissement thermique, (b) la conductivité des solutions salines.

Afin de vérifier, expérimentalement, l'impact de l'intensification du champ en cas de présence de gouttelette d'eau en surface de l'isolateur sur sa tenue diélectrique en surface, la tension de contournement est mesurée. Une gouttelette d'eau avec un volume de 6 µl, et une conductivité de 3 µS/cm est déposée avec une micropipette sur la surface supérieure de l'isolateur (près de l'électrode de haute tension). La configuration étudiée est présenté sur la **Figure 105 (b)**.



(a) *(b)*



(c)

Figure 105. Configurations étudiées (vue de dessus) : (a) isolateur propre, (b) présence d'une gouttelette d'eau à la surface de l'isolateur, (c) comparaison des tensions de contournement.

La **Figure 105 (c)** illustre une comparaison de la tension de contournement de l'isolateur non vieilli à l'état propre, et en cas de présence d'une gouttelette sur sa surface. On remarque que la présence d'une seule gouttelette réduit la tension de contournement de 19,35% de sa valeur quand l'isolateur est propre. Cela est normalement dû à la réduction de la valeur du champ électrique seuil de l'initiation de la décharge électrique, car comme nous avons montré dans la **Tableau 14**, le champ électrique est amplifié de 20% suite à la présence d'une gouttelette d'eau sur la surface de l'isolateur.

VI.3.2 Effet du vieillissement sur le phénomène de contournement

VI.3.2.1 Influence sur la tension de contournement

Dans le **Tableau 16** les valeurs moyennes de la tension de contournement (U_C) pour les différents cas étudiés sont présentées.

Tableau 16. Tension de contournement des isolateurs en fonction des contraintes de vieillissement.

Contrainte	**Non vieilli**	**Température (°C)**			**UV**	**Immersion [mS/cm]**				
Niveau	-	2	50	110	-	0,003	7	18	46	138
U_c [kV]	33,87	34,19	35,25	36,56	31,63	34,44	37,62	33,69	35,19	34,87

On remarque d'après le **Tableau 16** que la variation des valeurs de tension de contournement suite au vieillissement n'est pas très large, mais se situe seulement dans un intervalle de 0,5% à 11%. Il convient de noter que lors des essais de contournement, le temps de repos après chaque contournement est de 30 secondes ; lorsque ce temps est écoulé, on augmente progressivement la tension jusqu'à avoir un deuxième contournement, et ainsi de suite jusqu'à l'obtention du nombre voulu de contournement.

Concernant l'effet de la température, les isolateurs vieillis auparavant à 110 °C gardent une tenue diélectrique en surface plus élevée par rapport aux autres isolateurs de 50 °C et de 2 °C. Ces résultats peuvent trouver leur explication dans la **Figure 97 (a)**, où les échantillons vieillis à 110 °C sont moins favorables à la propagation de la décharge surfacique suite à la réduction de la valeur du champ électrique au voisinage de l'électrode de pointe. La valeur de la tension de contournement pour les échantillons vieillis par les rayonnements UV est inférieure de 7% à celle des échantillons non vieillis. Les résultats montrent que la tension de contournement n'est pas très influencée par la salinité des solutions utilisées dans le vieillissement par immersion.

La **Figure 106** présente la variation de la tension de contournement de l'isolateur non vieilli en fonction du nombre de contournement. Sur cette figure, nous n'avons présenté que trois valeurs de tension qui correspondent aux trois nombres de contournements. Il ressort que la valeur de la tension de contournement diminue de 11% de sa valeur initiale après le premier essai de contournement, puis elle reste sensiblement la même, même si le nombre de contournement augmente.

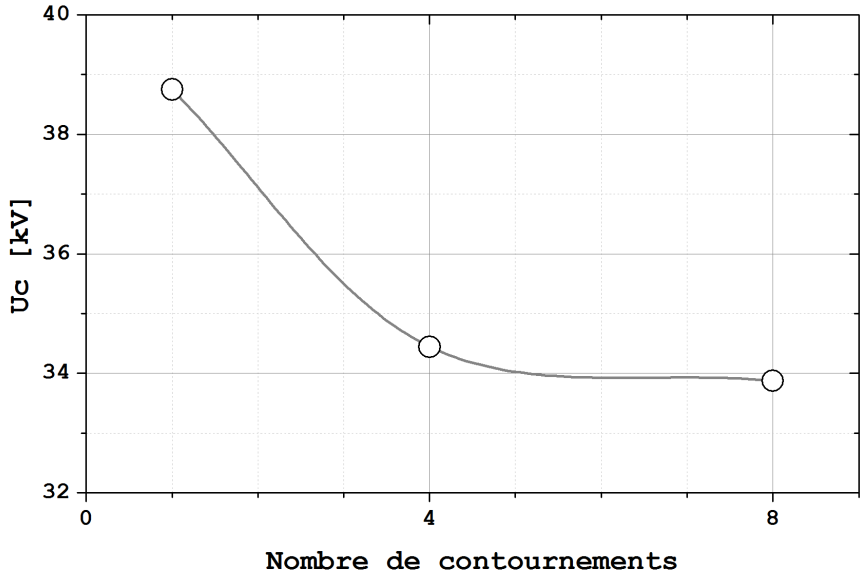


Figure 106. Variation de la tension de contournement en fonction du nombre d'essais, cas d'isolateur non vieilli.

VI.3.2.2 Influence sur le courant transitoire de surface après le contournement

VI.3.2.2.1 Courant transitoire de surface

Nous allons étudier, dans ce qui suit, la capacité du matériau vieilli à dissiper les charges de surface et sa relation avec son état de surface. Pour cela, nous utilisons une technique qui consiste à mesurer le courant transitoire de surface (I_{TS}) (en DC). Ce courant électrique décrit la variation, par rapport au temps (t), de la charge électrique (Q_S) accumulée sur la surface de l'échantillon suite au contournement, il est exprimé par :

$$I_{TS} = \frac{dQ_S}{dt} \qquad (43)$$

Le courant I_{TS} représente le courant total mesuré par l'électromètre. Les limites de cette techniques sont que le type de porteurs de charges et leur répartition ne peuvent être connus de manière précise, ajoutons à cela l'intervalle du temps entre l'établissement de l'arc de contournement sur la surface de l'isolateur et le début de la mesure du courant I_{TS} qui est

d'environ 75 s et ce qui empêche d'obtenir des informations initiales avec précision, mais elles peuvent, toutefois, être obtenues par ajustement de la courbe.

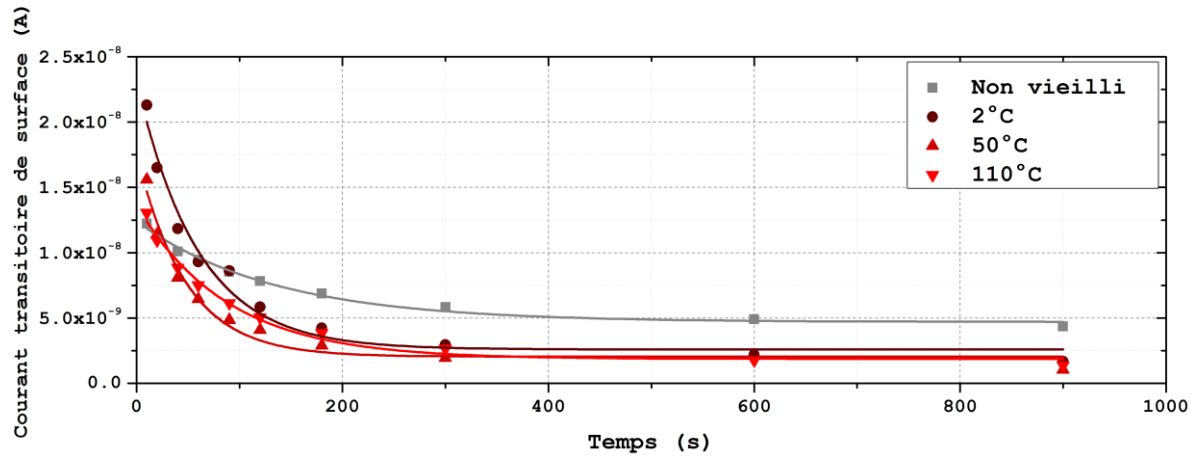
Ce courant possède deux composantes, la première composante est due à la polarisation, elle est initialement intense puis s'amortit selon une constante de temps, tandis que la deuxième composante est due à la conduction et atteinte en régime permanent. Le courant transitoire de surface est mesuré juste après les essais de contournement de l'isolateur, en utilisant le même dispositif de mesure illustré sur la **Figure 19**.

La **Figure 107** présente l'évolution temporelle du courant transitoire de surface après huit essais de contournement, pour les différentes contraintes de vieillissement. L'**équation exponentielle (44)** du courant transitoire de surface en fonction du temps reflète très bien la tendance des courbes, elle présente des coefficients de corrélation (R^2) proches de l'unité. Y_0 , A, et R_0 étant des constantes, et t présente le temps [s]. Le **Tableau 17** présente les paramètres d'ajustement correspondant à chaque courbe.

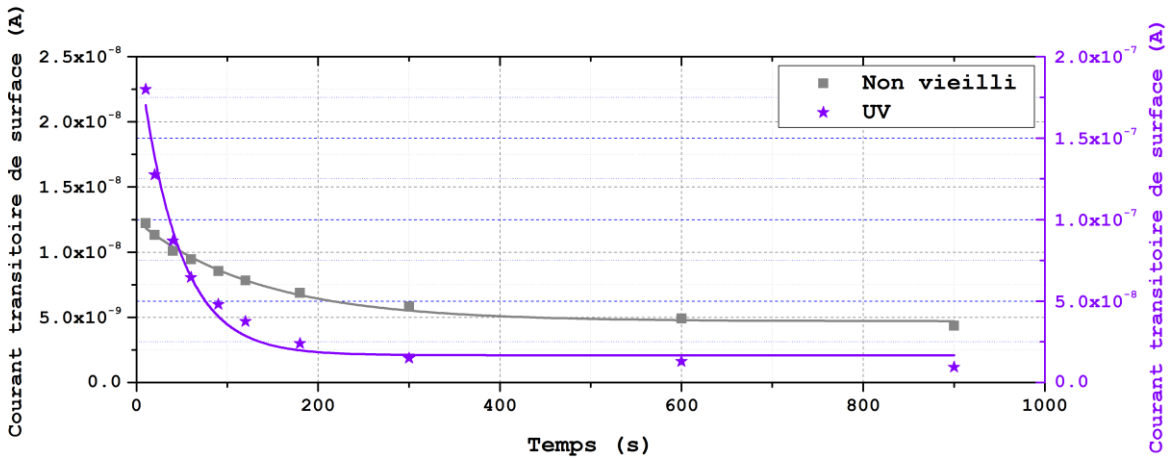
$$I_{TS}(t) = Y_0 + Ae^{R_0 t} \qquad (44)$$

Tableau 17. Paramètres d'ajustement des courbes du courant transitoire de surface en fonction des différentes contraintes de vieillissement.

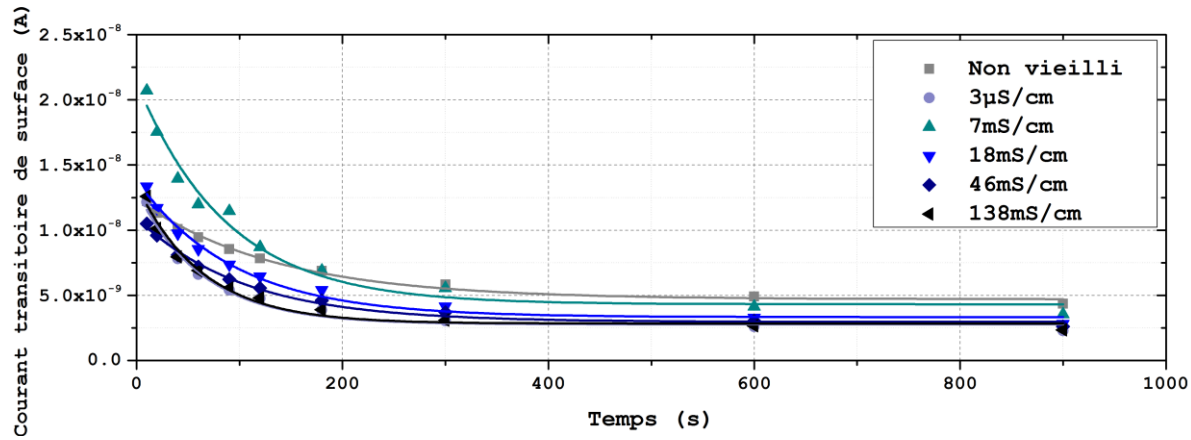
Contrainte	Niveau	Y_0	A	R_0	R^2
Non vieilli	-	4,699.10^{-9}	7,708.10^{-9}	-0,00746	0,989
Température	2	2,597.10^{-9}	2,061.10^{-8}	-0,01684	0,971
[°C]	50	2,043.10^{-9}	1,562.10^{-8}	-0,02108	0,969
	110	1,866.10^{-9}	1,179.10^{-8}	-0,01138	0,985
UV	-	1,681.10^{-8}	1,936.10^{-7}	-0,02329	0,978
	0,003	2,782.10^{-9}	1,027.10^{-8}	-0,01568	0,980
Immersion	7	4,313.10^{-9}	1,710.10^{-8}	-0,01148	0,973
[mS/cm]	18	3,327.10^{-9}	1,050.10^{-8}	-0,01053	0,984
	46	2,965.10^{-9}	8,006.10^{-9}	-0,00971	0,990
	138	2,836.10^{-9}	1,067.10^{-8}	-0,01583	0,979



(a)



(b)



(c)

Figure 107. La variation du courant transitoire de surface après 8 contournements en fonction du temps : (a) : après le vieillissement thermique, (b) : après le vieillissement par rayonnements UV, (c) : après le vieillissement par immersion.

Pour toutes les contraintes étudiées, il ressort que la décroissance du courant transitoire de surface est plus rapide pour les premiers instants, puis devient plus lente jusqu'à atteindre une valeur constante en régime permanent et qui représente la valeur du courant de conduction de surface.

En ce qui concerne les isolateurs vieillis thermiquement, on remarque qu'au début de la mesure (à t = 10 s), la valeur du courant transitoire de surface est plus élevée pour les isolateurs vieillis à 2 °C où elle a atteint $2{,}3.10^{-8}$ A, elle diminue avec l'augmentation de la température de vieillissement avec $1{,}56.10^{-8}$ A pour 50 °C et $1{,}30.10^{-8}$ A pour 110 °C. Cependant, cette proportionnalité n'est pas conservée, où on remarque qu'au bout de 40 s, le courant diminue plus vite pour les isolateurs vieillis à 50 °C. La valeur maximale la plus élevée du courant transitoire de surface revient aux isolateurs vieillis par les rayonnements UV avec $1{,}8.10^{-7}$ A. Pour les isolateurs vieillis par immersion, nous remarquons qu'au début, la valeur du courant transitoire de surface ne semble pas dépendre de la salinité de la solution. $1{,}21.10^{-8}$ A, $2{,}07.10^{-8}$ A, $1{,}33.10^{-8}$ A, $1{,}05.10^{-8}$ A et $1{,}26.10^{-8}$ A sont les valeurs correspondantes respectivement aux solutions de : 3 µS/cm, 7 mS/cm, 18 mS/cm, 46 mS/cm et 138 mS/cm. Les isolateurs vieillis dans la solution de 7 mS/cm possèdent une valeur plus élevée par rapport aux autres isolateurs. Cependant, nous remarquons que, pour les solutions salines, la valeur du courant transitoire de surface dépend de la salinité de la solution après un temps de 40 s, où il est évident que le courant transitoire de surface diminue avec l'augmentation de la salinité.

La **Figure 108** présente la variation temporelle du courant transitoire de surface mesuré immédiatement après le contournement, en fonction du nombre d'essais de contournement sur l'isolateur non vieilli. On remarque que l'amplitude du courant transitoire de surface augmente en fonction du nombre d'essais de contournement. On remarque également que le courant transitoire de surface diminue asymptotiquement en fonction du temps. Quelle que soit le nombre de contournement, la tendance du courant transitoire de surface peut également être décrite par l'**équation (44)**. Les coefficients de corrélation correspondants à chaque courbe, ainsi que les paramètres d'ajustement des courbes (Y_0, A et R_0) sont présentés dans le **Tableau 18**.

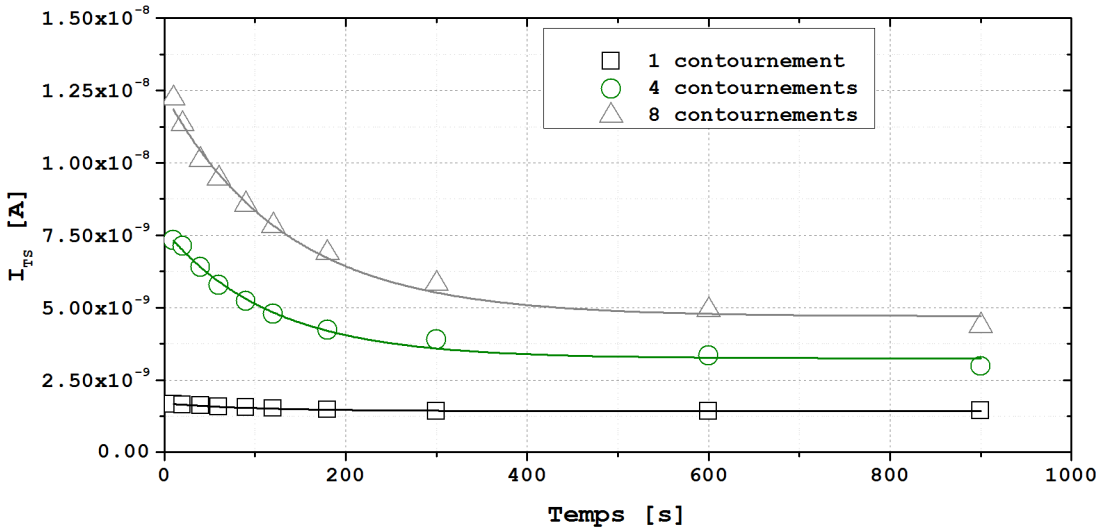


Figure 108. Variation du courant transitoire de surface après contournement en fonction du nombre d'essais de contournements et du temps, cas d'isolateur non vieilli.

Tableau 18. Paramètres d'ajustement des courbes du courant transitoire de surface en fonction du nombre de contournements pour le cas de l'isolateur non vieilli.

Nombre de contournements	Y_0	A	R_0	R^2
1	1,429.10^{-9}	2,667.10^{-10}	-0,010	0,981
4	3,245.10^{-9}	4,445.10^{-9}	-0,008	0,986
8	4,699.10^{-9}	7,708.10^{-9}	-0,007	0,989

Les résultats de mesure de la tension de contournement (**Figure 106**) ont montré, cependant, que cette dernière n'est pas très affectée par le nombre de contournements entre le 4eme et le 8eme essai.

Le courant transitoire de surface représente, comme nous avons vu d'après l'**équation (43)**, la variation, par rapport au temps, de la charge électrique (Q_S) accumulée sur la surface de l'échantillon suite au contournement. Cette charge peut être calculée par l'intégration de l'**équation (44)** dans le temps. Elle est donnée par l'**équation (46)**, où C, est une constante. Les paramètres Y_0, A et R_0 sont ceux donnés par le **Tableau 18**.

$$Q_s(t) = \int I_{TS}(t)\, dt \qquad (45)$$

$$Q_s(t) = Y_0 \cdot t + \frac{A}{R_0} e^{R_0 t} + C \qquad (46)$$

La **Figure 109** montre la charge électrique totale en fonction du nombre de contournements. Il est évident que la charge augmente linéairement avec le nombre de contournements (η) selon l'**équation (47)**, où A et B sont des constantes, de valeurs $9{,}131.10^{-7}$ et $5{,}433.10^{-7}$ respectivement.

$$|Q_s| = B \cdot \eta + A \qquad (47)$$

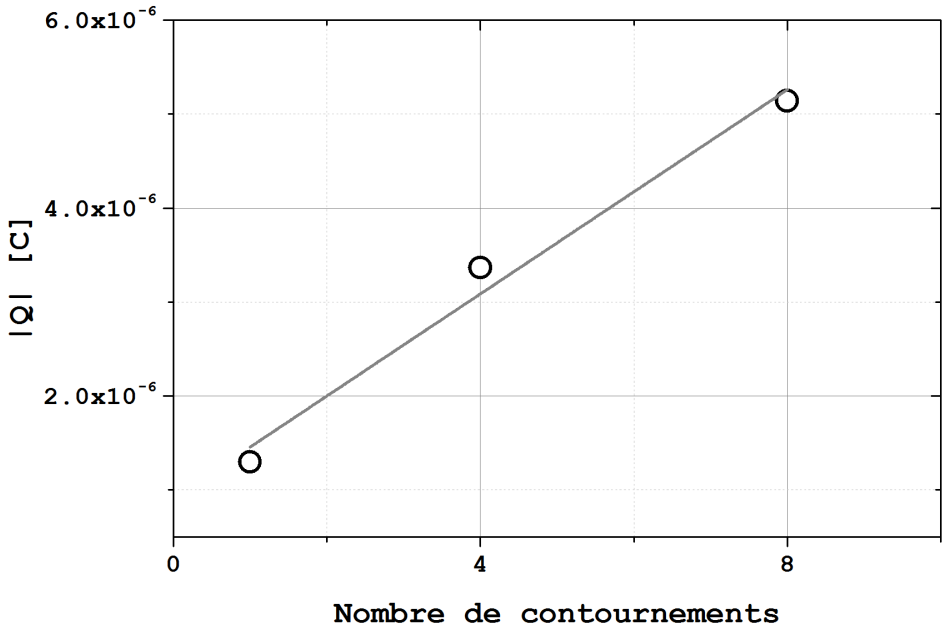


Figure 109. La variation de la charge électrique de surface calculée juste après le contournement en fonction du nombre d'essais, cas d'isolateur non vieilli.

Il a été rapporté que la présence de charges électriques influe sur la tension de contournement selon la polarité des charges et de la source [207]. Cependant, malgré l'augmentation de la valeur de la charge totale en fonction du nombre de contournements, la tension de contournement reste sensiblement la même entre le 4eme et le 8eme essai (**Figure 106**).

Le calcul de la constante du temps (R_0^{-1}) en fonction du nombre de contournements donne respectivement les valeurs de 99,84 s, 117,04 s et 134 s pour 1, 4 et 8 essais de contournements.

Dans cette étude, les essais de contournement sont séparés par un intervalle d'arrêt de 30 secondes. Vue les valeurs des constantes du temps, cette durée ne peut permettre une élimination totale des charges accumulées sur la surface de l'échantillon entre deux essais successifs de contournements. Un certain taux de charges peut donc persister sur la surface de l'échantillon et conduire à la réduction de la tension de contournement, cela doit être régit par l'efficacité du mécanisme de dissipation des charges.

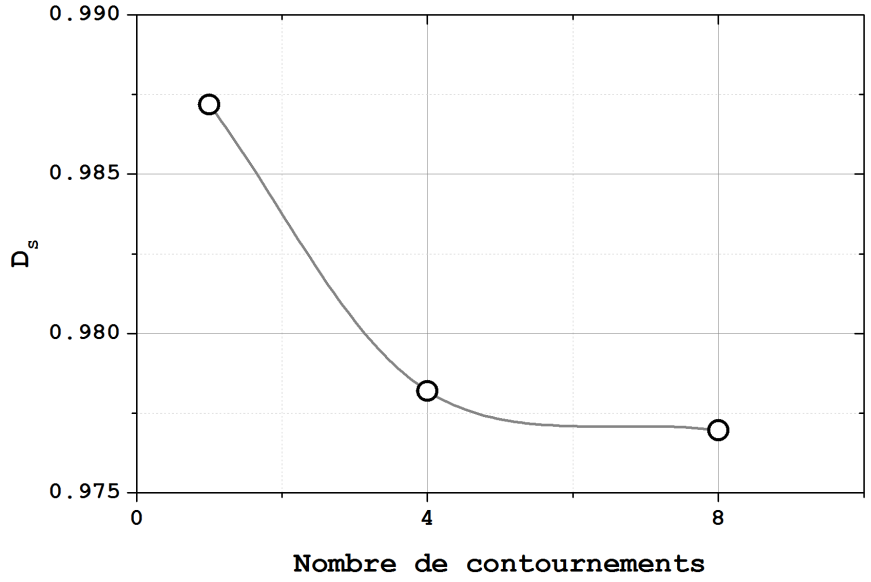
VI.3.3 Effet du vieillissement sur la dissipation des charges de surface après le contournement

La décroissance de la valeur du courant transitoire de surface reflète la dissipation de la charge électrique accumulée sur la surface de l'isolateur après le contournement. Il est à noter que, contrairement aux autres méthodes de mesure de dissipation des charges, le processus de dissipation dans la méthode que nous avons présentée ne se fait pas naturellement, mais se trouve accéléré suite à l'application d'un champ électrique tangentiel lors de la mesure.

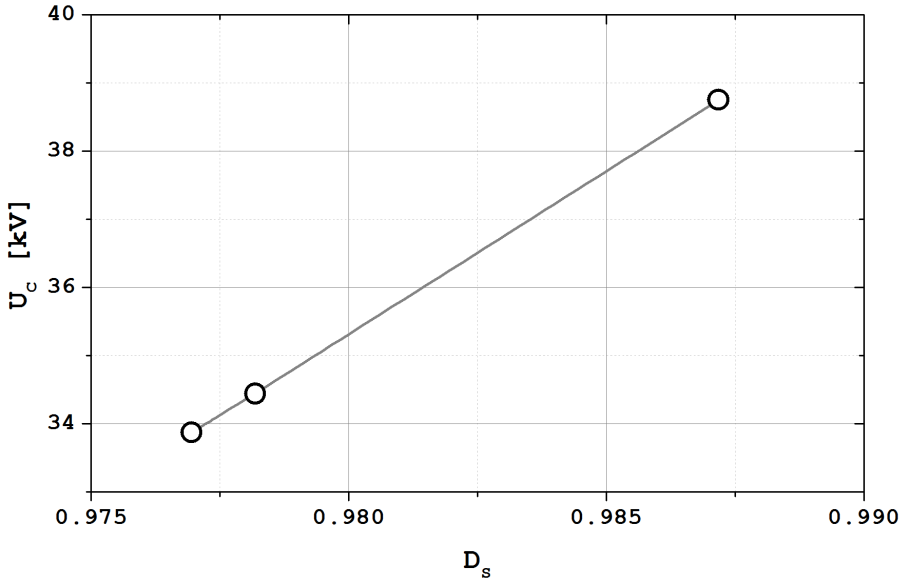
Afin d'analyser l'impact du vieillissement sur la dissipation des charges accumulées sur la surface de l'échantillon suite au contournement, nous définissons l'expression du taux de dissipation des charges (D_S) par l'**équation (48)**. Dans ce qui suit, le taux de dissipation est calculé entre deux moments donnés (t_1 = 10 s et t_2 = 900 s) :

$$D_S = \left| \frac{Q_S(t_2) - Q_S(t_1)}{Q_S(t_2)} \right| \qquad (48)$$

La **Figure 110 (a)** montre que le taux de dissipation diminue avec le nombre d'essais de contournement, cette diminution est causée par l'apport de nouvelles charges après chaque contournement comme illustré sur la **Figure 109**. Vue l'augmentation de la constante du temps après chaque contournement, l'échantillon devient donc incapable d'évacuer l'ensemble des charges accumulées sur sa surface, ce qui cause, par conséquence, la réduction de la tension de contournement constatée sur la **Figure 106**. Il existe une corrélation linéaire entre la tension de contournement et le taux de dissipation comme le montre la **Figure 110 (b)**.



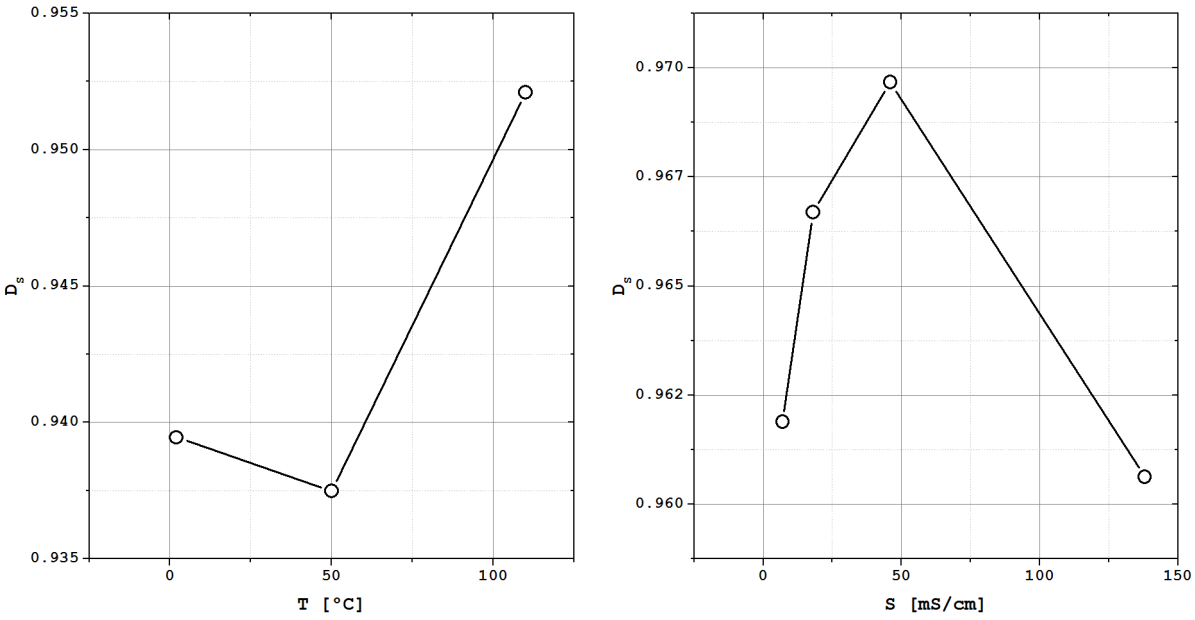
(a)



(b)

Figure 110. Cas d'isolateur non vieilli : (a) le taux de dissipation des charges de surface en fonction du nombre d'essais de contournement, (b) la tension de contournement en fonction du taux de dissipation des charges.

La **Figure 111** présente l'influence de la température et de la salinité, exercées pendant le vieillissement, sur le taux de dissipation des charges accumulées sur la surface des échantillons après le contournement.



(a) *(b)*

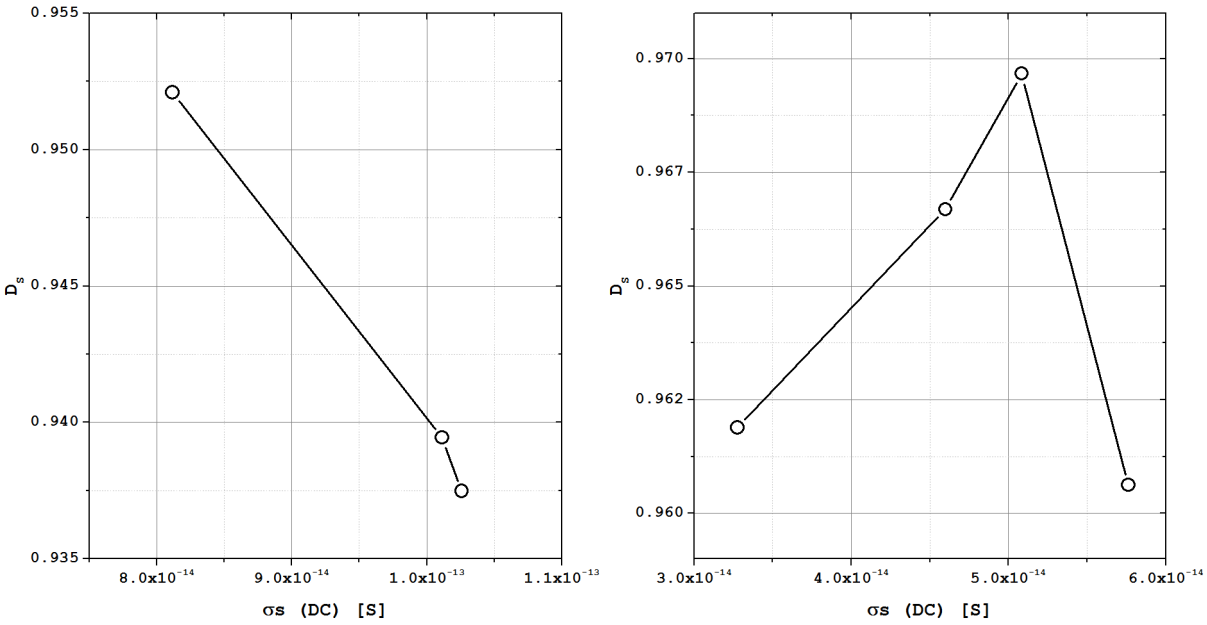
Figure 111. Variation du taux de dissipation de charges de surface en fonction de : (a) la température de vieillissement, (b) la conductivité des solutions salines.

Nous remarquons que le taux de dissipation de charges dépend des contraintes de vieillissement. D'une façon générale, le taux de dissipation augmente avec la température de vieillissement. L'allure de la courbe portant sur l'effet de la salinité présente deux tendances ; au début, pour les solutions salines de 7 mS/cm jusqu'à 46 mS/cm, le taux de dissipation présente une augmentation en fonction de la salinité pour atteindre son maximum à 46 mS/cm. À partir de 46 mS/cm, on note une décroissance du taux de dissipation quand la salinité augmente.

Nous avons mentionné précédemment que, d'après la littérature, la conductivité volumique et la conductivité surfacique jouent un rôle important dans le processus de dissipation des charges. Les silicones sont des isolants possédant une très faible conductivité qui réduit la dynamique des porteurs de charge. Cependant, nous avons montré dans le chapitre précédant

que la conductivité volumique et la conductivité surfacique changent avec le vieillissement. Nous allons, dans ce qui suit, voir l'influence de ces deux conductivités dans le processus de dissipation des porteurs de charge dans notre cas.

La dépendance du taux de dissipation à la conductivité de surface est présentée sur la **Figure 112**.



(a) *(b)*

Figure 112. Variation du taux de dissipation de charges de surface en fonction de la conductivité de surface : (a) après vieillissement thermique, (b) après vieillissement par immersion.

Nous pouvons distinguer cette dépendance en deux parties : pour une conductivité comprise entre $3{,}5.10^{-14}$ S/cm et 5.10^{-14} S/cm, on note une augmentation du taux de dissipation, cette tendance est observée pour le vieillissement par immersion. Au-delà de 5.10^{-14} S/cm et jusqu'à 1.10^{-13} S/cm le taux de dissipation diminue. Il ressort que la conductivité de surface joue un rôle important dans le processus de dissipation des charges accumulées à la surface de l'isolateur suite au contournement, contrairement à la conductivité de volume. Cela suggère que la conduction en surface est le mécanisme dominant dans le processus de dissipation après le contournement de l'isolateur.

VI.4 Conclusion

Dans ce chapitre, l'impact du vieillissement sur la répartition du champ électrique à la surface de l'isolateur a été étudié, ainsi que sur le contournement de ce dernier.

Il a été constaté que les propriétés diélectriques/électriques comme la permittivité et la résistivité volumique, ainsi que l'angle de contact sont affectées par les contraintes de vieillissement, ces propriétés vont influencer le champ électrique, ce qui conduit à la réduction de la performance de l'isolateur vis-à-vis du contournement.

La mesure du courant transitoire de surface après le contournement peut révéler la dégradation de l'isolateur suite à une contrainte de vieillissement. La conduction en surface semble être le mécanisme dominant dans le processus de dissipation des charges électriques après le contournement de l'isolateur.

Conclusion générale.

L'objectif de ce travail était de contribuer à la compréhension du phénomène de vieillissement des isolateurs composites. Les principaux résultats, expérimentaux et de simulation numérique obtenus sont les suivants :

L'angle de contact et l'indice de la classe de mouillabilité de surface peuvent être utilisés comme deux outils complémentaires pour évaluer l'hydrophobicité du matériau en silicone. Pour mieux estimer l'hydrophobicité, ils doivent être utilisés ensemble. Les fluctuations observées dans l'angle de contact et dans l'indice de la classe de mouillabilité de surface entre deux mesures successives reflètent le caractère dynamique de l'hydrophobicité. Cela signifie qu'une inspection visuelle (de l'isolateur composite) basée sur les résultats de mesure d'hydrophobicité n'est pas fiable, à moins qu'elle ne soit effectuée sur une période continue et suffisamment longue.

Il existe une corrélation entre l'hydrophobicité de surface du matériau et ses propriétés diélectriques quel que soit le type ou le degré de la contrainte. De plus, la tension de contournement est bien corrélée au facteur de dissipation diélectrique quel que soit le type de contrainte (température ou salinité) ou son degré. Ce qui suggère que le facteur de dissipation diélectrique, est un paramètre déterminant quant à la tenue diélectrique en surface du matériau étudié.

La contrainte thermique semble affecter différemment l'hydrophobicité et la résistivité de surface du matériau en silicone en fonction de la température appliquée. Le vieillissement thermique affecte aussi les propriétés diélectriques du matériau en silicone. Il réduit les pertes diélectriques dans les basses fréquences, ceci s'accompagne d'une augmentation de la rigidité diélectrique de la surface du matériau vieilli. L'hydrophobicité du matériau vieilli thermiquement augmente avec la permittivité et diminue avec la température du vieillissement.

Les rayonnements UV peuvent entraîner une modification de la structure physico-chimique du matériau en silicone, non seulement au niveau superficiel mais même au niveau interne. Les rayonnements UV entraînent également une réduction de la tension de contournement.

La conductivité de la solution affecte l'hydrophobicité pendant la période d'immersion. Cet effet devient plus complexe en fonction de la durée d'immersion, notamment pour les hauts niveaux de conductivité. La mesure du courant de surface ne reflète pas de manière fiable les changements physico-chimiques sur la surface du matériau isolant pendant le vieillissement par immersion. Le vieillissement par immersion entraîne une augmentation du facteur de

dissipation diélectrique, en particulier pour les solutions à faible conductivité. L'eau peut diffuser dans le matériau pendant l'immersion, en raison de la perte de son hydrophobicité. En fait, une quantité limitée d'eau peut encore résider à l'intérieur du matériau même après une longue période de séchage.

Les mesures de la spectroscopie diélectrique peuvent révéler le degré de dégradation des propriétés diélectriques du matériau isolant en silicone avec le vieillissement. Par conséquent, cette technique de mesure peut être utilisée comme outil de diagnostic de l'état des isolateurs externe des réseaux électriques.

Les résultats du calcul numérique ont montré que le champ électrique en présence de gouttelette d'eau est intensifié sur ses deux bords, précisément, au niveau des points de contact triple (air/eau/solide) de part et d'autre de cette dernière. Il existe une corrélation linéaire entre l'intensification du champ électrique et la contrainte de vieillissement appliquée. Pour le vieillissement thermique, l'intensification augmente avec l'augmentation de la température de vieillissement ; pour le vieillissement par immersion, on note un effet inverse, c'est-à-dire que l'intensification du champ diminue si la saliné augmente.

La mesure du courant transitoire de surface après le contournement peut révéler le degré de dégradation de l'isolateur suite à une contrainte de vieillissement. Elle permet de donner de façon très qualitative, des informations sur la charge électrique accumulée sur la surface ainsi que son taux de dissipation.

La conduction en surface semble être le mécanisme dominant dans le processus de dissipation des charges électriques après le contournement de l'isolateur. La conduction en volume, quant à elle, ne présente pas d'influence dans ce processus.

Notons, pour finir, que cette recherche décrit des aspects importants affectant le vieillissement du matériau de revêtement en silicone. Il nous semble que les résultats obtenus pourraient conduire à une meilleure connaissance du phénomène de vieillissement des isolateurs composites utilisés dans les réseaux de transport et de distribution de l'énergie électrique.

Références.

[1] A. Küchler, *High voltage engineering: Fundamentals · Technology · Applications*. Springer Vieweg, 2018.

[2] M. Farzaneh and W. A. Chisholm, *Insulators for Incing and Polluted Environments*, IEEE Press. 2009.

[3] A. Haddad and D. F. Warn, *Advances in High Voltage Engineering*. The Institution of Engineering and Technology, 2007.

[4] E. Kuffel, W. S. Zaengl, and J. Kuffel, *High voltage engineering*. 2000.

[5] R. De Forges De Parny and J.-P. Levêque, "Lignes aériennes - Entretien," *Tech. l'Ingénieur*, no. D4430, 1993.

[6] X. Ducouret, "Lignes aériennes : matériels - Isolateurs," *Tech. l'Ingénieur*, no. D4423, 2004.

[7] F. Kiessling, P. Nefzger, J. F. Nolasco, and U. Kaintzyk, *Overhead Power Lines: Planning, Design, Construction*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2003.

[8] X. Wei, Z. Jia, Z. Sun, Z. Guan, and M. Macalpine, "Development of anti-icing coatings applied to insulators in China," *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 30, no. 2, pp. 42–50, 2014.

[9] M. Zhao, W. Li, Y. Wu, X. Zhao, M. Tan, and J. Xing, "Performance investigation on different designs of superhydrophobic surface texture for composite insulator," *Materials (Basel).*, vol. 12, no. 7, p. 1164, 2019.

[10] A. Seyni, "Propriétés physico-chimiques et d'usage de matériaux composites à charge dégradable produits par co-broyage," Université de toulouse, 2008.

[11] G. Teyssedre and L. Boudou, "Polymères et composites pour l'électrotechnique," *Tech. l'Ingénieur*, no. D2335, 2010.

[12] "International Electrotechnical Vocabulary (IEV)," vol. 50, no. 471, p. 10, 1984.

[13] W.-K. Chen, *The Electrical Engeneering Handbook*. Elsevier academic press edition, 2004.

[14] X. Zhang and S. M. Rowland, "Behaviour of low current discharges between water drops," *Annu. Rep. - Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena, CEIDP*, pp. 437–440, 2009.

[15] S. Kobayashi, Y. Matsuzaki, H. Masuya, Y. Arashitani, and R. Kimata, "Development of composite insulators for overhead lines," *Furukawa Rev.*, no. 19, pp. 129–135, 2000.

[16] R. Znaidi, "Les isolateurs des lignes électriques aériennes ; Historique et retour d'expériences," in *POLIREL*, 2013.

[17] M. T. Nazir and B. T. Phung, "Accelerated ultraviolet weathering investigation on micro-/nano-SiO2 filled silicone rubber composites," *High Volt.*, vol. 3, no. 4, pp. 295–302, 2018.

[18] S. Orlowska, "Conception et prédiction des caractéristiques diélectriques des matériaux composites à deux et trois phases par la modélisation et la validation expérimentale," École Centrale de Lyon, 2003.

[19] J. P. Habas, J. M. Arrouy, and F. Perrot, "Effects of electric partial discharges on the rheological and chemical properties of polymers used in hv composite insulators after railway service," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 16, no. 5, pp. 1444–1454, 2009.

[20] "Code d'essai de vieillissement des isolateurs composite," *EDF*, no. HN 66-E-01, p. 21, 1989.

[21] G. Kone, C. Volat, and H. Ezzaidi, "3D numerical investigation of internal defects in a 28 kV composite insulator," *EIC 2014 - Proc. 32nd Electr. Insul. Conf.*, no. June, pp. 208–212, 2014.

[22] K. O. Papailiou and F. Schmuck, *Silicone Composite Insulators: Materials, Design, Applications*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013.

[23] A.Nosseir, M.Awad, H.Said, and B.A.Arafa, "Étude comparative de l'effet des tempêtes de sable sur le vieillissement des isolateurs conventionnels et des isolateurs polymères," *Cigré 1996 Sess. Pap. Proc.*, no. 15–301, 1996.

[24] X. Qiao, Z. Zhang, X. Jiang, and T. Liang, "Influence of DC electric fields on pollution of HVDC composite insulator short samples with different environmental parameters," *Energies*, vol. 12, no. 12, p. 2304, 2019.

[25] R. Hackam, "Outdoor HV composite polymeric insulators," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 6, no. 5, pp. 557–585, 1999.

[26] D. A. Swift, C. Spellman, and A. Haddad, "Hydrophobicity transfer from silicone rubber to adhering pollutants and its effect on insulator performance," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 13, no. 4, pp. 820–829, 2006.

[27] Y. Khan, "Hydrophobic characteristics of EPDM composite insulators in simulated arid desert environment," *World Acad. Sci. Eng. Technol.*, vol. 33, pp. 750–755, 2009.

[28] É. Reyssat, "Gouttes, films et jets: quand les écoulements modèlent les interfaces," Université Paris-Diderot - Paris VII, 2007.

[29] M. Callies Reyssat, "Splendeur et misère de l'effet lotus," Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2007.

[30] M. Bienia, "Etude de déformation de goutte et de film mince induite électriquement," Université Joseph- Fourier - Grenoble I, 2005.

[31] F. Cyril and M. N. Xavier, "Phénomène d'électromouillage," Université de Nice Sophia-Antipolis, 2010.

[32] G. Wang *et al.*, "A Review on Fabrication Methods and Research Progress of Superhydrophobic Silicone Rubber Materials," *Adv. Mater. Interfaces*, vol. 8, no. 1, p. 2001460, 2021.

[33] U. Kaltenborn, P. Meier, and Y. Dirix, "Loss and recovery of hydrophobicity of novel hydrophobic epoxy resins," *Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenom. (CEIDP), Annu. Rep.*, pp. 303–306, 2002.

[34] D. D. Hinde, "Corona Discharges on the Surfaces of Hight Voltage Composite

Insulators," Queensland University of Technology, 2009.

[35] M. T. Nazir, B. T. Phung, and M. Hoffman, "Performance of silicone rubber composites with SiO2 micro/nano-filler under AC corona discharge," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 23, no. 5, pp. 2804–2815, 2016.

[36] N. Mavrikakis, K. Siderakis, D. Kourasani, M. Pechynaki, and E. Koudoumas, "Hydrophobicity transfer mechanism evaluation of field aged composite insulators," *Int. Conf. Power Eng. Energy Electr. Drives*, vol. 2015-Septe, pp. 215–219, 2015.

[37] N. S. Tomer, "Evaluation et amélioration du comportement à long terme d'élastomères pour une application isolateur électrique," Université BLAISE Pascal, 2012.

[38] T. G. Gustavsson, "Silicone rubber insulators-impacts of material formulation in coastal environment," Chalmers University of Technology, 2002.

[39] H. Jahn, R. Barsch, and E. Wendt, "The Influence of Temperature on the Recovery of the Hydrophobicity on Silicone Rubber Surfaces," in *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), Annual Report*, 2000.

[40] M. Hamel, "Influence de la variation de la température ambiante sur les vibrations induites par effet de couronne," Université du Québec à Chicoutimi, 1991.

[41] L. Ménétrier-Deremble, "Gouttes et champs électriques dans un système microfluidique," Université Paris 6, 2007.

[42] A. M. Benselama, "Modélisation numérique du comportement d'une particule sous champ électrique dans les microsystèmes : De la déformation au déplacement," Université Joseph Fourier, Grenoble I, 2005.

[43] J. Roux, J. Achard, Y. Fouillet, J. Roux, J. Achard, and Y. Fouillet, "Détachement d'une microgoutte légèrement déformable sous l'action d'une force électrique," in *18ème Congrès Français de Mécanique*, 2007.

[44] S. Feier-Iova, "The Behaviour of Water Drops on Insulating Surfaces Stressed by Electric Field," Universität Darmstadt, 2009.

[45] Y. Zhu, M. Otsubo, and C. Honda, "Behavior of water droplet on electrically stressed polymeric coating surface," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 201, no. 9-11 SPEC. ISS., pp. 5541–5546, 2007.

[46] W. Jianwu, W. Xishan, L. Lei, and L. Haiyan, "Study of Discharge Process and Characteristics of Discrete Water Droplets on the RTV Hydrophobic Surface in the Non-uniform Electric Field," in *2006 International Conference on Power System Technology Study*, 2006.

[47] E. Da Silva and S. M. Rowland, "The dependency of water droplet behaviour and leakage current pattern on electrode configuration," *Annu. Rep. - Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena, CEIDP*, pp. 242–245, 2009.

[48] A. Moukengué Imano and A. Beroual, "Deformation of water droplets on solid surface in electric field," *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 298, no. 2, pp. 869–879, 2006.

[49] Y. Higashiyama, S. Yanase, and T. Sugimoto, "DC corona discharge from water droplets on a hydrophobic surface," *J. Electrostat.*, vol. 55, no. 3–4, pp. 351–360, 2002.

[50] P. Varma and S. Venkateshwara, "Thermal Degradation In Composite Insulation Due To Corona Discharges," Arizona State University, 2010.

[51] S. Kalashnikov, *Electricité*. Edition Mir Moscou, 1980.

[52] S. Sivoukhine, *Cours de physique générale, Tome 3, Electricité*. Edition Mir Moscou, 1983.

[53] C. Gary and M. Moreau, *L'effet de couronne en tension alternative, Collection de la direction des études et recherches d'électricité de France (EDF) n° 24*. Editions Eyrolles, 1976.

[54] D. Amir Aid, "Etude de Streamer Cathodique et Anodique dans un Plasma Haute Pression," Université des Sciences et Technologies d'Oran Mohamed Boudiaf (USTO-MB), 2010.

[55] M. L. Coulibaly, "Caractérisation des décharges électriques se propageant aux interfaces gaz/solide – Relation entre propriétés des matériaux et dimension fractale," École Centrale de Lyon, 2009.

[56] D. Saad, "Effet de la décharge couronne sur les surfaces isolantes et les surfaces métalliques," Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2011.

[57] V. M. Moreno and R. S. Gorur, "Effect of long-term corona on non-ceramic outdoor insulator housing materials," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 8, no. 1, pp. 117–128, 2001.

[58] M. E. A. Slama, M. E. A. Abed, H. Hadi, D. Mihoub, and Z. Amina, "HVAC Parametric Study and Numerical Calculation of Partial Discharge Inception of Water Droplet At the Surface of Hydrophobic Insulator," *J. Electr. Eng.*, vol. 14, no. 3, pp. 247–253, 2014.

[59] Z. Guan, L. Wang, B. Yang, X. Liang, and Z. Li, "Electric field analysis of water drop corona," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 20, no. 2 I, pp. 964–969, 2005.

[60] Y. Zhu, M. Otsubo, C. Honda, Y. Hashimoto, and A. Ohno, "Mechanism for change in leakage current waveform on a wet silicone rubber surface - A study using a dynamic 3-D model," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 12, no. 3, pp. 556–565, 2005.

[61] A. J. Phillips, D. J. Childs, and H. M. Schneider, "Aging of non-ceramic insulators due to corona from water drops," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 14, no. 3, pp. 1081–1086, 1999.

[62] H. Gao, Z. Jia, Y. Mao, Z. Guan, and L. Wang, "Effect of hydrophobicity on electric field distribution and discharges along various wetted hydrophobic surfaces," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 15, no. 2, pp. 435–443, 2008.

[63] C. Yuan, G. Zhicheng, and L. Xidong, "Analysis of Flashover on the Contaminated Silicone Rubber Composite Insulator," in *Proceedings of the 5" International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, 1997, pp. 914–917.

[64] L. Lan and R. S. Gorur, "Computation of ac wet flashover voltage of ceramic and composite insulators," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 15, no. 5, pp. 1346–1352,

2008.

[65] Z. Yang, X. Jiang, X. Han, Z. Zhang, and J. Hu, "Influence of pollution chemical components on AC flashover performance of various types of insulators," *High Volt.*, vol. 4, no. 2, pp. 105–112, 2019.

[66] X. Yu, Q. Zhang, X. Yang, H. Yang, J. Zhou, and B. Liu, "Influence of non-uniform hydrophobicity distribution on pollution flashover characteristics of composite insulators," *IET Sci. Meas. Technol.*, vol. 12, no. 8, pp. 1009–1014, 2018.

[67] N. Bashir and H. Ahmad, "Ageing of transmission line insulators: The past, present and future," *PECon 2008 - 2008 IEEE 2nd Int. Power Energy Conf.*, no. PECon 08, pp. 30–34, 2008.

[68] C. Gary, *Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions, Collection de la direction des études et recherches d'électricité de France (EDF) n° 51*. Editions Eyrolles, 1984.

[69] M. E.-A. Slama, "Étude expérimentale et modélisation de l'influence de la constitution chimique et de la répartition de la pollution sur le contournement des isolateurs haute tension," École Centrale de Lyon, 2011.

[70] M. E.-A. Slama, "Contribution à l'étude de l'influence de la non-uniformité de la pollution basée sur la méthode de la DDSE pour le dimensionnement des isolateurs des lignes THT à courant alternatif," Université des Sciences et Technologies d'Oran Mohamed Boudiaf (USTO-MB), 2002.

[71] N.Drozdov and N.Nikouline, *Matériaux électriques*. École supérieure MOSCOU, 1973.

[72] Z. Yuan, Y. Tu, Y. Zhao, H. Jiang, and C. Wang, "Degradation behavior and aging mechanism of decay-like fractured GRP rod in composite insulator," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 26, no. 3, pp. 1027–1034, 2019.

[73] D.A. Hoch, N. Mahatho, and F. Bologna, "Water induced discharges on transmission voltage silicone rubber insulators," *Pap. Publ. UViRCO Technol.*, vol. 17, no. 7, 2012.

[74] S. M. Gubanski, "Outdoor polymeric insulators: Role of corona in performance of silicone rubber housings," *Annu. Rep. - Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena, CEIDP*, vol. 2015-Decem, pp. 1–9, 2015.

[75] A. Phillips *et al.*, "Electric fields on AC composite transmission line insulators," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 23, no. 2, pp. 823–830, 2008.

[76] M. H. Nazemi, "Experimental Investigations on Water Droplets on Polymeric Insulating Surfaces under the Impact of High Electric Fields," Universität Darmstadt, 2015.

[77] N. Yoshimura, S. Kumagai, and S. Nishimura, "Electrical and environmental aging of silicone rubber used in outdoor insulation," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 6, no. 5, pp. 632–650, 1999.

[78] R. Baersch, J. Lambrecht, and H. Jahn, "On the evaluation of the hydrophobicity of composite insulator surfaces," *Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenom. (CEIDP), Annu. Rep.*, vol. 2, pp. 468–471, 1996.

[79] P. Vinod, B. M. A. Desai, R. Sarathi, and S. Kornhuber, "Investigation on the electrical, thermal and mechanical properties of silicone rubber nanocomposites," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 26, no. 6, pp. 1876–1884, 2019.

[80] Y. Liang, L. Ding, K. Yang, C. R. Li, and Y. Tu, "Study on hydrophobicity recovery characteristics and mechanism of HTV silicone rubber after corona deterioration," *Annu. Rep. - Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena, CEIDP*, pp. 308–311, 2007.

[81] R. Dai, S. Wang, and F. Lu, "RTV silicone rubber hydrophobicity loss and recovery character under AC corona," *2011 Int. Conf. Electr. Control Eng. ICECE 2011 - Proc.*, pp. 807–810, 2011.

[82] B. Venkatesulu and M. Joy Thomas, "Long-term accelerated weathering of outdoor silicone rubber insulators," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 18, no. 2, pp. 418–424, 2011.

[83] A. Krzma, M. Albano, and A. Haddad, "Comparative characterisation of conventional and textured 11 kV insulators using the rotating wheel dip test," *High Volt.*, vol. 5, no. 6, pp. 739–746, 2020.

[84] O. Fujii, Y. Mizuno, and K. Naito, "Temperature of insulators as heated by conductor," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 22, no. 1, pp. 523–526, 2007.

[85] I. A. Tsekmes, R. Kochetov, P. H. F. Morshuis, and J. J. Smit, "Thermal conductivity of polymeric composites: A review," *Proc. IEEE Int. Conf. Solid Dielectr. ICSD*, pp. 678–681, 2013.

[86] Q. Wang, X. Liang, Z. Yan, W. Bao, and T. Jiang, "The influence of heat aging on different kinds of silicon rubber material," *Proc. IEEE Int. Conf. Prop. Appl. Dielectr. Mater.*, pp. 473–478, 2018.

[87] Z. Li, X. Liang, Y. Zhou, J. Tang, J. Cui, and Y. Liu, "Influence of temperature on the hydrophobicity of silicone rubber surfaces," *Annu. Rep. - Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena, CEIDP*, pp. 679–682, 2004.

[88] A. Ghanbari-Siahkali, S. Mitra, P. Kingshott, K. Almdal, C. Bloch, and H. K. Rehmeier, "Investigation of the hydrothermal stability of cross-linked liquid silicone rubber (LSR)," *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 90, no. 3, pp. 471–480, 2005.

[89] J. W. Chang and R. S. Gorur, "The Role of Backbone Chain Rotation in the Hydrophobicity Recovery of Polymeric Materials for Outdoor Insulation," in *Proceedings of the 4th Int. Conf. on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics*, 1992, pp. 270–274.

[90] J. W. Chang and R. S. Gorur, "Surface recovery of silicone rubber used for HV outdoor insulation," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 1, no. 6, pp. 1039–1046, 1994.

[91] Y. Khan, "Degradation of High Voltage Polymeric Insulators in Arid Desert's Simulated Environmental Conditions," *Am. J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 2, no. 2, pp. 438–445, 2009.

[92] Y. Lin, F. Yin, Y. Liu, L. Wang, Y. Zhao, and M. Farzaneh, "Effect of ultraviolet-A radiation on surface structure, thermal, and mechanical and electrical properties of

liquid silicone rubber," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 136, no. 24, pp. 1–11, 2019.

[93] F. Jin, C. Wu, B. Liang, Y. Zhou, X. Liang, and X. Li, "Breakdown characteristics of HTV silicone rubber under multiple stress conditions at high altitude," *Proc. IEEE Int. Conf. Prop. Appl. Dielectr. Mater.*, pp. 554–557, 2018.

[94] E. M. Savadkoohi *et al.*, "Experimental investigation on composite insulators AC flashover performance with fan-shaped non-uniform pollution under electro-thermal stress," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 121, no. April, p. 106142, 2020.

[95] A. Majzoobi, I. . Joneidi, S. Mohajer, H. Mohseni, and A. . Shayegani, "Experimental Investigation of Effect of UV Radiation on Flashover Voltage of Polymeric Insulators With and Without Contamination," in *XVII International Symposium on High Voltage Engineering*, 2011.

[96] I. Ahmadi-Joneidi, A. Majzoobi, A. Shayegani-Akmal, H. Mohseni, and J. Jadidian, "Aging evaluation of silicone rubber insulators using leakage current and flashover voltage analysis," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 20, no. 1, pp. 212–220, 2013.

[97] Z. Farhadinejad, M. Ehsani, I. Ahmadi-Joneidi, A. Shayegani, and H. Mohseni, "Effects of UVC radiation on thermal, electrical and morphological behavior of silicone rubber insulators," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 19, no. 5, pp. 1740–1749, 2012.

[98] Y. Gao, J. Wang, X. Liang, Z. Yan, Y. Liu, and Y. Cai, "Investigation on permeation properties of liquids into HTV silicone rubber materials," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 21, no. 6, pp. 2428–2437, 2014.

[99] Z. Wang, Z. D. Jia, M. H. Fang, Y. S. Li, and Z. C. Guan, "Moisture absorption, desorption, and moisture-induced electrical performances of high-Temperature vulcanized silicone rubber," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 23, no. 1, pp. 410–417, 2016.

[100] J. Zhidong and G. Zhicheng, "Loss and recovery of hydrophobicity of RTV silicone rubber coating," *Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenom. (CEIDP), Annu. Rep.*, pp. 388–391, 2002.

[101] C. Wu, X. Liang, S. Xu, S. Li, Y. Gao, and Y. Liu, "Effect of alumina tri-hydrate surface modification on liquid permeation and electrical performance of silicone rubber," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 24, no. 1, pp. 543–551, 2017.

[102] Z. Wang, Z. D. Jia, M. H. Fang, and Z. C. Guan, "Absorption and permeation of water and aqueous solutions of high-temperature vulcanized silicone rubber," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 22, no. 6, pp. 3357–3365, 2015.

[103] M. Ali and R. Hackam, "Effects of saline water and temperature on surface properties of HTV silicone rubber," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 15, no. 5, pp. 1368–1378, 2008.

[104] Z. Wang, L. H. Zhao, Z. D. Jia, and Z. C. Guan, "Water and moisture permeability of high-temperature vulcanized silicone rubber," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 24, no. 4, pp. 2440–2448, 2017.

[105] H. Boulanouar, A. Bayadi, and A. Haddad, "Analysis of textured silicone rubber

performance under contaminated conditions," *IET Sci. Meas. Technol.*, vol. 13, no. 3, pp. 461–468, 2019.

[106] J. He, K. He, and B. Gao, "Modeling of dry band formation and arcing processes on the polluted composite insulator surface," *Energies*, vol. 12, no. 20, p. 3905, 2019.

[107] Z. Zhang, X. Qiao, S. Yang, and X. Jiang, "Non-uniform distribution of contamination on composite insulators in HVDC transmission lines," *Appl. Sci.*, vol. 8, no. 10, p. 1962, 2018.

[108] L. Yang *et al.*, "Effects of structure and material of polluted insulators on the wetting characteristics," *IET Sci. Meas. Technol.*, vol. 13, no. 2, pp. 131–138, 2019.

[109] Z. Zhijin, L. Tian, J. Xingliang, L. Chen, Y. Shenghuan, and Z. Yi, "Characterization of Silicone Rubber Degradation under Salt-Fog Environment with AC Test Voltage," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 66714–66724, 2019.

[110] R. Sundararajan *et al.*, "Preventive measures to reduce bird related power outages-Part II: Streamers and contamination," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 19, no. 4, pp. 1848–1853, 2004.

[111] H. J. West, J. E. Brown, and A. L. Kinyon, "Simulation of EHV Transmission Line Flashovers Initiated by, Bird Excretion," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-90, no. 4, pp. 1627–1630, 1971.

[112] S. Yang, Z. Jia, and X. Ouyang, "Effects of algae contamination on the hydrophobicity of high-voltage composite insulators," *High Volt.*, vol. 4, no. 3, pp. 234–240, 2019.

[113] S. M. Gubanski, A. Dernfalk, J. Andersson, and H. Hillborg, "Diagnostic methods for outdoor polymeric insulators," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 14, no. 5, pp. 1065–1080, 2007.

[114] W. G. B2.21, "Guide for the Assessment of Composite Insulators in the Laboratory after their Removal from Service," *CIGRE Tech. Broch.*, no. 481, p. 62, 2011.

[115] R. Fournié, *Les isolants en électrotechnique: essais, mécanismes de dégradation, applications industrielles, Collection de la direction des études et recherches d'électricité de France (EDF) n° 73.* Eyrolles, 1990.

[116] Y. Xia, X. Song, Z. Jia, and X. Wang, "Mechanism and quantitative characterization of color fading phenomenon of HTV composite insulators silicone rubber," *Proc. IEEE Int. Conf. Prop. Appl. Dielectr. Mater.*, pp. 748–751, 2018.

[117] M. Albano, R. T. Waters, P. Charalampidis, H. Griffiths, and A. Haddad, "Infrared analysis of dry-band flashover of silicone rubber insulators," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 23, no. 1, pp. 304–310, 2016.

[118] M. Amin, S. Amin, and M. Ali, "Monitoring of leakage current for composite insulators and electrical devices," *Rev. Adv. Mater. Sci.*, vol. 21, no. 1, pp. 75–89, 2009.

[119] M. Amin, M. Akbar, and M. Salman, "Composite insulators and their aging: An overview," *Sci. China, Ser. E Technol. Sci.*, vol. 50, no. 6, pp. 697–713, 2007.

[120] J. Gardette, "Caractérisation des polymères par spectrométrie optique," *Tech. l'Ingénieur*, no. AM3271, 1989.

[121] K. Lepinay, "Développement et applications de la tomographie chimique par spectroscopie EDX," Institut national des sciences appliquées (INSA) de Lyon, 2013.

[122] A. V. Walker, *Secondary ion mass spectrometry*, 3rd ed. Elsevier Ltd., 2016.

[123] E. Darque-Ceretti, M. Aucouturier, and P. Lehuédé, "Spectrométrie de masse d'ions secondaires : SIMS et ToF-SIMS - Principes et appareillages," *Tech. l'Ingénieur*, no. P2618, 2014.

[124] C. J. G. Plummer, "Caractérisation des polymères par microscopie électronique," *Tech. l'Ingénieur*, no. AM3282, 2001.

[125] X. Wang, S. Lu, T. Wang, X. Qin, X. Wang, and Z. Jia, "Analysis of pollution in high voltage insulators via laser-induced breakdown spectroscopy," *Molecules*, vol. 25, no. 4, p. 822, 2020.

[126] R. A. Ghunem, "Using the inclined-plane test to evaluate the resistance of outdoor polymer insulating materials to electrical tracking and erosion," *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 31, no. 5, pp. 16–22, 2015.

[127] F. Grum and L. F. Costa, "Spectral emission of corona discharges," *Appl. Opt.*, vol. 15, no. 1, pp. 76–79, 1976.

[128] B. Pinnangudi, R. S. Gorur, and A. J. Kroese, "Quantification of corona discharges on nonceramic insulators," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 12, no. 3, pp. 513–523, 2005.

[129] "Guide for the selection of insulators in respect of polluted conditions," *Int. Electrotech. Comm.*, no. IEC 60815, p. 39, 1986.

[130] "Artificial pollution tests on high-voltage insulators to be used on a.c. systems," *Int. Electrotech. Comm.*, no. IEC 60507, p. 56, 1991.

[131] Arshad, A. Nekahi, S. G. McMeekin, and M. Farzaneh, "Investigating flashover behaviour of silicone rubber insulators under contaminated conditions," *Annu. Rep. - Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena, CEIDP*, vol. 2015-Decem, pp. 856–859, 2015.

[132] M. A. Slama, H. Hadi, S. Flazi, and N. Tchouar, "Etude du dépôt de pollution responsable du contournement des isolateurs des lignes aériennes du réseau électrique THT national," *Sci. Technol. B*, no. 25, pp. 43–50, 2007.

[133] "Guidance on the measurement of wettability of insulator surfaces," *IEC Tech. Specif.*, no. TS 62073, p. 21, 2003.

[134] J. Ndoumbe, "Étude comportementale des gouttelettes d'eau déposées sur la surface d'un isolateur composite haute tension en présence du champ électrique," École Centrale de Lyon, 2014.

[135] "Methods of test for volume resistivity and surface resistivity of solid electrical insulating materials," *Int. Electrotech. Comm.*, no. IEC 60093, p. 40, 1980.

[136] F. Kremer and A. Schönhals, *Broadband dielectric spectroscopy*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2003.

[137] R. Fournié, *Les isolants en électrotechnique: concepts et théories, Collection de la direction des études et recherches d'électricité de France (EDF) n° 63*. Eyrolles, 1986.

[138] J. Dubois, "Propriétés diélectriques des polymères," *Tech. l'Ingénieur*, no. E1850, 1998.

[139] A. Kahouli, "Spectroscopie diélectrique appliquée aux polymères," *Tech. l'Ingénieur*, no. D2308, 2016.

[140] G. Williams and D. K. Thomas, "Phenomenological and molecular theories of dielectric and electrical relaxation of materials," *Novocontrol Appl. Note Dielectr.*, vol. 3, pp. 1–29, 1998.

[141] P. Robert, *Matériaux de l'électrotechnique, traité d'électricité volume II*. Georgi, 1979.

[142] R. Fournié and R. Coelho, "Diélectriques - Bases théoriques," *Tech. l'Ingénieur*, no. D2300, pp. 1–18, 2000.

[143] Novocontrol Tehnologies, "High Performance Dielectric, Conductivity and Electrochemical Impedance Analyzers," *Novocontrol Technol.*, pp. 1–6.

[144] G. Schaumburg and D. Wilmer, "Improving the Accuracy of Dielectric Measurements," *Novocontrol Technol.*, pp. 1–5, 2018.

[145] N. Tehnologies, "WinDETA, Owner's Manual," *Novocontrol Technol.*, no. 3, 2009.

[146] Novocontrol Tehnologies, "Test Interfaces for Alpha-A Modular Measurement System," *Novocontrol Technol.*, pp. 1–7, 1998.

[147] A. K. Jonscher and J. Menegotto, "Low-loss Behavior of a-PVDF," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 7, no. 2, pp. 303–305, 2000.

[148] F. de Dieuleveult and O. Romain, *Electronique appliquée aux hautes fréquences*. Dunod, 2008.

[149] M. Aguet and J.-J. Morf, *Energie électrique, traité d'électricité volume XII*. Georgi, 1981.

[150] E. Cherney *et al.*, "End-of-life and replacement strategies for RTV silicone rubber coatings," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 21, no. 1, pp. 253–261, 2014.

[151] C. Li, L. Zhao, J. Xiong, S. Zhang, and J. Yao, "Influence of seasons on hydrophobicity of silicone rubber insulators in semi-wet warm-temperature zone of China," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 15, no. 4, pp. 1081–1088, 2008.

[152] B. X. Du, Z. R. Yang, Z. L. Li, and J. Li, "Temperature-dependent charge property of silicone rubber/SiC composites under lightning impulse superimposed DC voltage," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 26, no. 3, pp. 810–817, 2019.

[153] J. Dai, X. Yao, H. Y. Yeh, and X. Liang, "Moisture absorption of filled silicone rubber under electrolyte," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 99, no. 5, pp. 2253–2257, 2006.

[154] M. Ali and R. Hackam, "Recovery of hydrophobicity of htv silicone rubber after accelerated aging in saline solutions," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 16, no. 3, pp. 842–852, 2009.

[155] X. Wang, X. Liang, and Y. Zhou, "Aging effect of UV radiation on SIR insulators' hydrophobicity property," *Annu. Rep. - Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena, CEIDP*, pp. 241–244, 2004.

[156] B. H. Youn and C. S. Huh, "Surface degradation of HTV silicone rubber and EPDM used for outdoor insulators under accelerated ultraviolet weathering condition," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 12, no. 5, pp. 1015–1024, 2005.

[157] S. Hanada, M. Miyamoto, N. Hirai, L. Yang, and Y. Ohki, "Experimental investigation of the degradation mechanism of silicone rubber exposed to heat and gamma rays," *High Volt.*, vol. 2, no. 2, pp. 92–101, 2017.

[158] C. Yuan, C. Xie, L. Li, X. Xu, S. M. Gubanski, and Z. He, "Dielectric response characterization of in-service aged sheds of (U) HVDC silicone rubber composite insulators," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 23, no. 3, pp. 1418–1426, 2016.

[159] G. C. Psarras, E. Manolakaki, and G. M. Tsangaris, "Electrical relaxations in polymeric particulate composites of epoxy resin and metal particles," *Compos. - Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 33, no. 3, pp. 375–384, 2002.

[160] E. Neagu, P. Pissis, and L. Apekis, "Electrical conductivity effects in polyethylene terephthalate films," *J. Appl. Phys.*, vol. 87, no. 6, pp. 2914–2922, 2000.

[161] A. B. Abdul, A. M. North, and G. Kossmehl, "Charge carrier hopping in poly(arylene vinylenes)," *Eur. Polym. Journal*, vol. 13, no. 10, pp. 799–803, 1977.

[162] Y. Ohki, "Dielectric relaxation phenomena of several insulating polymers analyzed by electric modulus spectra," *Proc. IEEE Int. Conf. Prop. Appl. Dielectr. Mater.*, pp. 192–195, 2015.

[163] G. M. Tsangaris, G. C. Psarras, and N. Kouloumbi, "Electric modulus and interfacial polarization in composite polymeric systems," *J. Mater. Sci.*, vol. 33, no. 8, pp. 2027–2037, 1998.

[164] J. Saji, A. Khare, R. N. P. Choudhary, and S. P. Mahapatra, "Impedance analysis, dielectric relaxation, and electrical conductivity of multi-walled carbon nanotube-reinforced silicon elastomer nanocomposites," *J. Elastomers Plast.*, vol. 47, no. 5, pp. 394–415, 2015.

[165] F. Tian and Y. Ohki, "Electric modulus powerful tool for analyzing dielectric behavior," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 21, no. 3, pp. 929–931, 2014.

[166] A. K. Jonscher, "Dielectric relaxation in solids," *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 32, no. 14, 1999.

[167] L. Dissado, "Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials," *Springer Handb. Electron. Photonic Mater.*, pp. 219–245, 2017.

[168] G. G. Raju, *Dielectrics in electric fields*. CRC Press, 2003.

[169] E. Tuncer, "Dielectric relaxation in dielectric mixtures," Chalmers University of Technology, 2001.

[170] E. Tuncer and S. M. Gubanski, "Electrical properties of filled silicone rubber," *J. Phys. Condens. Matter*, vol. 12, no. 8, pp. 1873–1897, 2000.

[171] Y. Segui, "Diélectriques - Courants de conduction," *Tech. l'ingénieur*, no. D2301, pp. 1–12, 2000.

[172] L. A. Dissado and J. C. Fothergill, *Electrical Degradation and Breakdown in Polymers*. The Institution of Engineering and Technology, 1992.

[173] Y. Segui, "Contribution à l'étude des mécanismes de conduction dans les films minces de polymère. Application à la passivation des composants à semiconducteurs," Université Paul Sabatier de Toulouse, 1978.

[174] T. Jiang *et al.*, "Impact of Water Permeation on the Dielectric Response of HTV Silicone Rubber," *7th IEEE Int. Conf. High Volt. Eng. Appl. ICHVE 2020 - Proc.*, pp. 6–9, 2020.

[175] Z. Ahmad, *Polymeric Dielectric Materials*. IntechOpen, 2012.

[176] O. Nezari, "Vieillissement d'un isolant composite sous l'effet de la température et la décharge électrique," Université des Sciences et Technologies d'Oran Mohamed Boudiaf (USTO-MB), 2018.

[177] L. A. Dissado and R. M. Hill, "Anomalous Low-frequency Dispersion. Near Direct Current Conductivity in Disordered Low-dimensional Materials," *J. Chem. Soc. Faraday Trans. 2 Mol. Chem. Phys.*, vol. 80, no. 3, pp. 291–319, 1984.

[178] N. A. Pérez, A. Sylvestre, J. L. Augé, M. T. Do, and S. Rowe, "Dielectric spectroscopy in silicone rubber incorporating nanofillers," *Annu. Rep. - Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena, CEIDP*, pp. 453–456, 2006.

[179] R. Kochetov *et al.*, "Effect of water absorption on dielectric spectrum of nanocomposites," *34th Electr. Insul. Conf. EIC 2016*, no. June, pp. 579–582, 2016.

[180] R. Boudissa, F. Bouchelga, S. Kornhuber, and K. D. Haim, "Constellation of Condensation and Raindrops and Its Effect on the DC Flashover Voltage of Inclined Silicone Insulation," *Energies*, vol. 12, no. 18, p. 3549, 2019.

[181] Y. Liu, X. Kong, Y. Wu, and B. Du, "Dynamic Behavior of Droplets and Flashover Characteristics for CFD and Experimental Analysis on SiR Composites," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 8095–8101, 2019.

[182] Y. Li *et al.*, "Effect of Water Droplets on the Corona Discharge Characteristics of Composite Insulators in Arid Areas," *ICEMPE 2019 - 2nd Int. Conf. Electr. Mater. Power Equipment, Proc.*, pp. 467–472, 2019.

[183] C. Ouled Ghouth and H. Si Salah, "Etude expérimentale des performances d'un isolateur en composite silicone soumis à différentes conditions de pollution," Université des Sciences et Technologies d'Oran Mohamed Boudiaf (USTO-MB), 2014.

[184] O. Mahamane Sani Sabo and O. Hama Abdoulaye, "Etude expérimentale d'un isolant

en composite sous différentes conditions de pollution," Université des Sciences et Technologies d'Oran Mohamed Boudiaf (USTO-MB), 2016.

[185] M. Addou and B. Moghtit, "Isolateur réel de type composite soumis à différentes sources de tension," Université des Sciences et Technologies d'Oran Mohamed Boudiaf (USTO-MB), 2019.

[186] Y. Ahmed Fouatih and H. M. Allami, "Influence de la permittivité de la pollution sur la tension de contournement d'un isolateur composite," Université des Sciences et Technologies d'Oran Mohamed Boudiaf (USTO-MB), 2019.

[187] Y. Hao *et al.*, "Experimental investigation on influence of shed parameters on surface rainwater characteristics of large-diameter composite post insulators under rain conditions," *Energies*, vol. 13, no. 19, p. 5011, 2020.

[188] S. Hajiaghasi, Z. Rafiee, A. Salemnia, and T. S. Aghdam, "A Three-Dimensional Analysis of Silicone Rubber Insulators Under Different Environmental Conditions Considering the Corona Rings Effect," *Iran. J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 15, no. 3, pp. 375–385, 2019.

[189] E. S. M. El-Refaie, M. K. Abd Elrahman, and M. K. Mohamed, "Electric field distribution of optimized composite insulator profiles under different pollution conditions," *Ain Shams Eng. J.*, vol. 9, no. 4, pp. 1349–1356, 2018.

[190] S.Benharat, S.Bouazabia, and A. Haddad, "A Study of the Behavior of Water Droplets Under The Influence of Non-Uniform Electric Field in Silicon Rubber," in *The 5th International Conference on Electrical Engineering – Boumerdes (ICEE-B)*, 2017.

[191] M. Bouhaouche, A. Mekhaldi, and M. Teguar, "Composite Insulators in a 400 kV AC Line in Algeria for Improving Electric Field Distribution," *Proc. 2018 3rd Int. Conf. Electr. Sci. Technol. Maghreb, Cist. 2018*, 2018.

[192] I. A. Joneidi, M. A. Kamarposhti, A. A. Shayegani Akmal, and H. Mohseni, "Leakage current analysis, FFT calculation and electric field distribution under water droplet on polluted silicon rubber insulator," *Electr. Eng.*, vol. 95, no. 4, pp. 315–323, 2013.

[193] M. Marich, "Validation de nouvelles méthodes de modélisation du contournement des isolateurs pollués," Université des Sciences et Technologies d'Oran Mohamed Boudiaf (USTO-MB), 2018.

[194] S. Kumara, B. Ma, Y. Serdyuk, and S. M. Gubanski, "Surface charge decay on HTV silicone rubber: Effect of material treatment by corona discharges," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 19, no. 6, pp. 2189–2195, 2012.

[195] S. Alam, Y. V. Serdyuk, and S. M. Gubanski, "Potential decay on silicone rubber surfaces affected by bulk and surface conductivities," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 22, no. 2, pp. 970–978, 2015.

[196] S. Kumara, Y. V. Serdyuk, and S. M. Gubanski, "Surface charge decay on polymeric materials under different neutralization modes in air," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 18, no. 5, pp. 1779–1788, 2011.

[197] S. Akram, J. Castellon, and S. Agnel, "Progress in gas/solid interface charging

phenomena," *Coatings*, vol. 10, no. 12, p. 1184, 2020.

[198] L. Xing, L. Weidong, X. Yuan, C. Weijiang, and B. Jiangang, "Surface charge accumulation and pre-flashover characteristics induced by metal particles on the insulator surfaces of 1100 kV GILs under AC voltage," *High Volt.*, vol. 5, no. 2, pp. 134–142, 2020.

[199] H. Zhou *et al.*, "Review of charge accumulation on spacers of gas insulated equipment at DC stress," *CSEE J. Power Energy Syst.*, vol. 6, no. 3, pp. 496–517, 2020.

[200] M. H. Abderrazzaq and A. M. Abu Jalgif, "Characterizing of corona rings applied to composite insulators," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 95, pp. 121–127, 2013.

[201] M. E. A. Abed, H. Hadi, A. W. Belarbi, and M. E. A. Slama, "Flashover Study of Silicone Rubber Insulator in Presence of Water Droplets under HVDC Electric Field," *2016 IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenom.*, pp. 798–801, 2016.

[202] S. Bendimerad and M. Acimi, "Phénomènes des décharges électriques glissantes à l'interface Air/Isolant solide," Université des Sciences et Technologies d'Oran Mohamed Boudiaf (USTO-MB), 2012.

[203] X. Meng, H. Mei, C. Chen, L. Wang, Z. Guan, and J. Zhou, "Characteristics of Streamer Propagation Along the Insulation Surface: Influence of Dielectric Material," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 22, no. 2, pp. 1193–1203, 2015.

[204] Y. Zhu, M. Otsubo, C. Honda, and S. Tanaka, "Corona discharge from water droplet on electrically stressed polymer surface," *Japanese J. Appl. Physics, Part 1 Regul. Pap. Short Notes Rev. Pap.*, vol. 45, no. 1 A, pp. 234–238, 2006.

[205] Y. Oh, K. Song, H. Kim, and S. Park, "Modified Finite Element Method to Consider the Singularity of the Electric Field Using a Singularity Function," in *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 2006, pp. 688–691.

[206] T. Takuma and B. Techaumnat, *Electric Fields in Composite Dielectrics and their Applications*. Springer Dordrecht Heidelberg, 2010.

[207] B. Du and M. Xiao, "Influence of surface charge on DC flashover characteristics of epoxy/BN nanocomposites," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 21, no. 2, pp. 529–536, 2014.

Durant leur service, les isolateurs composites en silicone sont exposés à plusieurs contraintes comme : la température, les rayonnements ultraviolets (UV) et la pollution atmosphérique. Compte tenu de leur importance dans le phénomène de vieillissement, l'impact de ces contraintes sur les propriétés superficielles et internes de l'isolateur au cours d'un cycle de vieillissement accéléré à long terme est étudié dans cette thèse. Une investigation est faite sur un prototype d'isolateur composite en silicone pour étudier les conséquences du vieillissement sur son hydrophobicité, ses propriétés électriques et diélectriques (surfaciques et volumiques), le champ électrique à sa surface, ainsi que sa tension de contournement. Pour suivre l'évolution des propriétés de l'isolateur pendant le cycle de vieillissement, différentes mesures sont utilisées, à savoir la mesure de l'angle de contact, du courant de surface, de l'indice de la mouillabilité de surface, de la permittivité relative, du facteur de dissipation diélectrique et des résistivités : volumique et surfacique. Une corrélation est faite entre les propriétés électriques/diélectriques de l'isolateur et son hydrophobicité. Un calcul numérique du champ électrique est fait via le logiciel COMSOL Multiphisycs. Ce calcul est basé sur des données réelles obtenues pendant le vieillissement de l'isolateur. Une corrélation est faite entre le degré des contraintes de vieillissement, les propriétés électriques/diélectriques et l'amplitude du champ électrique à la surface de l'isolateur dans l'état propre et en cas de présence de gouttelettes d'eau. Une étude sur la tenue diélectrique en surface de l'isolateur est réalisée, l'influence des contraintes appliquées ainsi que l'état de surface de l'isolateur sur sa tension de contournement sont investiguées. Dans le but de voir l'impact du vieillissement sur la capacité de l'isolateur à dissiper les charges de surface après un éventuel contournement, une approche est proposée consistant à mesurer le courant transitoire de surface de l'isolateur.

Mots-clés : Haute tension, vieillissement des polymères, isolateurs composites, hydrophobicité, spectroscopie diélectrique, contournement, calcul du champ électrique, dissipation des charges électriques.

During their service, Silicone-rubber (SiR) insulators are exposed to several constraints such as temperature, ultraviolet (UV) radiation and atmospheric pollution. Given their importance in the ageing phenomenon, their impact on the surface and bulk properties of the insulator during a long-term accelerated aging cycle is studied in this thesis. An investigation is carried out on a SiR prototype insulator to study the consequences of ageing on its surface hydrophobicity, its (surface and bulk) electrical and dielectric properties, the electric field at its surface, as well as its flashover voltage. To follow the evolution of the properties of the insulator during the aging cycle, various measurements are used, namely the measurement of contact angle, wettability class index, surface current, relative permittivity, dissipation factor and bulk resistivity. A correlation is made between the electric/dielectric properties of the insulator and its hydrophobicity. A numerical calculation of the electric field is made using COMSOL Multiphisycs software. This calculation is based on real data obtained during the ageing of the insulator. A correlation is made between the degree of ageing stresses, the electrical/dielectric properties and the electric field at the surface of the insulator in the clean state and in the presence of water droplets. A study on the dielectric strength on the surface of the insulator is carried out, the influence of the applied stresses as well as the surface condition of the insulator on its flashover voltage are investigated. In order to see the impact of ageing on the ability of the insulator to dissipate surface charges after a possible flashover, an approach which consists in measuring the transient current of the surface of the insulator is proposed.

Keywords: High-voltage, ageing of polymers, composite insulators, hydrophobicity, dielectric spectroscopy, flashover, charge decay.

خلال مدّة استخدامها، تَكون العوازل الكهربائيّة المركّبة عُرضة لعدّة عوامل قد تُسبِّب تقادمَها مثل الحرارة، الأشعّة الفوق البنفسجيّة، والتّلوّث الجوّيّ. نظرا للأهميّة الّتي تلعبها هذه العوامل في ظاهرة التّقادُم، قُمنا في هذه الأُطروحة بدراسة تأثيرها على الخواصّ السّطحيّة والدّاخليّة لعازل كهربائيٍّ مركّب مصنوع من مادة السّيليكون، وهذا خلال دورة تقادُم مسرَّع على مدى طويل نسبيّا. تَمَّ التّحقيق في أثر التّقادُم على: خاصّيّة النُّفور من الماء الّتي تميِّز هذا النَّوع من العوازل، خصائصه العازِليّة (الكهرَساميحة)، شدّة الحقل الكهربائيِّ على سطحه، إضافة إلى قيمة التّوتُّر المؤدّية إلى تشكُّل قوس كهربائيٍّ على سطحه. لِتتبُّع تطوّر الخصائص المذكورة آنفا خلال دورة التّقادُم، تمّ إجراء عدّة قياسات مثل زاوية التّماسّ (أيّ الزّاوية النّاتجة عن التقاء الهواء، سطح العازل وقطرة الماء الموضوعة فوقه)، شدّة التيّار الكهربائيِّ السّطحي، مؤشِّر صِنف التّبلُّل، السّماحيّة النِّسبيّة، مُعامل الضّياع، إضافة إلى المُقاومة الكهربائيّة الدّاخليّة والسّطحيّة. تمّت أيضا دراسة العلاقة بين الخصائص العازِليّة للعازل وخاصّيّة النُّفور من الماء . أجرينا كذلك حسابا رقميّا لمعرفة شدّة الحقل الكهربائيِّ على سطح العازل باستخدام برنامج COMSOL Multiphisycs الّذي يعتمد في عمله على طريقة العناصر المنتهية. هذا الحساب مبني على المُعطيات الّتي تحصّلنا عليها خلال الدّراسة التّجريبيّة للتّقادُم. تمكنّا من تحديد الارتباط بين درجة العوامل المسبِّبة للتّقادُم، الخصائص العازِليّة وشدّة الحقل في الحالة الّتي يكون فيها سطح العازل جافّاً وحين وجود قطرة ماء عليه. خلال دراستنا لِمَتانة العزل لسطح العازل تطرّقنا إلى تأثير عوامل التّقادُم وحالة سطح العازل على قيمة التّوتُّر المؤدّية إلى تشكّل القوس الكهربائيِّ. اقترحنا في الأخير مقاربة تتمثّل في قياس التّيّار السَّطحي العارِض، وهذا بغرض معرفة تغيُّر قدرة العازل، نتيجة تقادُمه، على التّخلّص من الشّحنات الكهربائيّة المتجمّعة فوق سطحه إثر حدوث قوس كهربائيٍّ.

الكلمات الدّالّة: التّوتُّر العاليّ، تقادُم البوليميرات، العوازل المركّبة، خاصّيّة النُّفور من الماء، التّحليل الطّيفيُّ الكهرَسامحيُّ، تشكُّل قوس كهربائيٍّ على سطح العازل، حساب شدّة الحقل الكهربائيِّ، تضاؤل الشّحنات الكهربائيّة.