

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la**  
**Recherchescientifique Université A. MIRA-BEJAIA**  
**Faculté Technologie**  
**Département de Génie Électrique**



**Mémoire de fin d'étude en vue d'obtention**  
**du diplôme Master**  
**En Génie Electrique**  
**Option : Réseau électrique**

Présenté par :

BOUAKIL Yasmina & SEFASFA Malia

**Thème :**

**Etude expérimentale de l'effet combiné de la  
température et des UV sur le comportement  
des isolateur Silicone**

**Soutenue le : 25/06/2023**

**Devant le jury composé de :**

<b>Nom et Prénom</b>	<b>Grade</b>		
Mr Herzine	MCB	Université de Bejaia	Président
Mme Belhoul	MAA	Université de Bejaia	Examineur
Mr Sahli	MCB	Université de Bejaia	Encadrant

**Année universitaire :**

**2022-2023**

## **REMERCIEMENT**

*Tout d'abord, nous exprimons notre profonde gratitude pour notre Seigneur ; l'Éternel, pour nous avoir prodigué donné santé, courage et patience pour réaliser ce travail.*

*Ensuite, nous tenons à exprimer notre très grande considération et notre vive reconnaissance pour **Monsieur SAHLI Zahir** pour avoir accepté d'encadrer notre travail que voici, de même que pour sa patience, ses précieux conseils, sa bienveillante disponibilité à nous orienter, ce qui nous a menés à l'aboutissement de ce travail.*

*Qu'il veuille bien accepter toute notre gratitude et respect.*

*Nos remerciements s'adressent également à **madame Wafia Ghabeche** pour ses soutiens. Nous remercions à l'occasion laboratoire de recherche en mécanique des matériaux et maintenance industrielle (LR3MI) de l'université Badji Mokhtar d'Annaba. Aussi un grand merci à tous les enseignants des techniques de haute tension pour leurs soutiens et bienveillants conseils.*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère.*

*D'abord à mes chers parents :*

*Vous représentez pour moi le symbole de la bonté par*

*Excellence, la source de tendresse et l'exemple de*

*Dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi.*

*A mes sœurs et mes chers frères pour leurs*

*Encouragements, leur appui et leur soutien moral*

*Mes professeurs qui m'ont enseigné et à tous ceux qui*

*Me sont chers.*

*Malia*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A mes chers parents*

*A mon cher et unique frère*

*A mes aimables chères sœurs*

*A ceux que j'aime infiniment*

*Yasmina*

# TABLE DES MATIERE

Remerciement	
Dédicace	
Table des matières	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale .....	1

## **CHAPITRE I. Généralités sur les isolateurs de haute tension et phénomène de pollution**

I.1 Introduction.....	3
I.2 Définitions .....	3
I.2.1 Isolant.....	3
I.2.2 Isoler.....	3
I.2.3 Isolation.....	3
I.2.4 Diélectrique .....	3
I.3 Différents types d'isolants .....	4
I.3.1 Isolant Gazeux .....	4
I.3.2 Isolants liquides [2].....	4
I.3.3 Isolants solides.....	4
I.4 Propriétés diélectriques des isolants [4] .....	4
I.4.1 Rigidité diélectrique .....	5
I.4.2 Permittivité .....	5
I.4.3 Angle de pertes et facteur de dissipation.....	6
I.5 Matériaux isolant utilises pour la fabrication des isolateurs.....	6
I.5.1 Céramique .....	7
I.5.2 Verres .....	7
I.5.2.1 Le verre trempé .....	8
I.5.2.2 Le verre recuit .....	8
I.5.3 Matériaux synthétiques (composites) .....	8
I.6 Profil de l'isolateur .....	9
I.7 Principaux types d'isolateurs .....	9

I .7.1	Isolateurs de type rigide .....	9
I.7.2	Chaîne d'isolateurs.....	10
I.7.2.1	Isolateurs capot et tige .....	11
I.7.2.2	Isolateur à long fût.....	11
I .8	Pollution des isolateurs .....	12
I .8.1	Formation et répartition des couches polluantes .....	12
I .8.2.	Sources de pollution.....	13
I .8.3	Pollution naturelle .....	13
I .8.3.1	Pollution marine .....	13
I .8.3.2	Pollution désertique .....	13
I .8.3.	Pollution industrielle .....	13
I .8.4.	Pollution mixte.....	14
I .8.5.	Conséquences de la pollution .....	14
I .8.5.1	Arc non localisé.....	14
I .8.5.2	Arc permanent .....	14
I .8.6.	Techniques de lutte contre la pollution .....	14
I .8.6.1.	Allongement de la ligne de fuite .....	14
I .8.6.2	Isolateurs plats.....	15
I .8.6.3.	Graissage périodique .....	15
I .8.6.4	Revêtement silicone.....	15
I .8.6.5	Les isolateurs composites .....	15
I .8.6.6	Nettoyage des isolateurs .....	15
I .9	Phénomène de contournement des isolateurs pollués .....	15
I .9.1	Contournement .....	15
I .9.2	Définition.....	16
I .9.3	Déroulement du contournement .....	16
I .9.3.1	Contrainte de contournement .....	17
I .9.3.2.	Tension de contournement .....	17
I .9.3.3	Tension de tenue.....	17
I .9.3.4	Courant de fuite .....	17
I .9.3.5	Courant de fuite critique .....	17
I .9.3.6	Longueur critique de l'arc.....	17
I .9.3.7	Diamètre de la décharge.....	18

I.10	Choix d'isolateur .....	18
------	-------------------------	----

I.	Conclusion .....	19
----	------------------	----

## **Chapitre II : La silicone et les isolateurs composites en HT**

II.1	Introduction .....	20
II.2	Silicone [18, 19 et 20] .....	20
II.3	Différentes familles de silicones.....	20
II. 3.1	Huiles et gomme .....	21
II.3.2	Gels silicones.....	21
II. 3.3	Elastomères silicones .....	21
II.3.4	Résines siloxanes.....	22
II. 4	Structure moléculaire de la silicone .....	22
II.4.1	Les propriétés de la silicone .....	23
II.5	Avantages pour les applications moyennes et hautes tension de la silicone [21].....	23
II.5.1	Sécurité accrue .....	23
II.5.2	Utilisation en extérieur.....	23
II.5.3	Haute protection anti-incendie .....	23
II.5.4	Large plage de température.....	23
II.5.5.	Plus grande longévité.....	24
II.5.6.	Meilleur rendement.....	24
II.5.7.	Hydrophobicité.....	24
II.5.8.	Nettoyage .....	24
II.5.9.	Tenue aux UV et aux intempéries .....	24
II .5.10.	Tenue au feu .....	25
II.5.11.	Elasticité.....	25
II.5.12.	Propriétés diélectriques .....	25
II.5.13.	Thermo stabilité.....	25
II.6	Domaines d'applications de la silicone.....	25
II.6.1	Câble électrique .....	26
II.6.2	Accessoires pour câble.....	27
II.6.3.	Isolateur.....	27
II.6.4 .	Connecteur à serrage mécanique .....	27
II.7	Isolateurs composites .....	27

II 7.1	Définitions .....	27
II 7.2	Matériau composite .....	28
II.7.3	Isolateur composite .....	28
II .8	Structure des isolateurs composites .....	28
II.8.1	Noyau.....	28
II.8.2	Revêtement extérieur et jupes .....	29
II.8.3	Interface .....	29
II.8.4	Pièces d'accrochage.....	29
II.9.	Principaux types d'isolateurs composites.....	30
II.10	Conditions d'utilisation.....	31
II.11	Avantages et inconvénients des isolateurs polymères en silicone[35].....	31
II.12	Avantages des isolateurs composites[35].....	31
II.13	Inconvénients des isolateurs composites [35] .....	32
II.14	Hydrophobicité .....	33
II.15	Energie de surface et angle de contact des gouttes d'eau.....	33
II.	Conclusion.....	35

### **Chapitre III : Le phénomène de vieillissement des isolateurs composites : état de l'art.**

III.1	Introduction .....	36
III.2	Limites des isolateurs composites .....	36
III.3	Phénomène de vieillissement des isolateurs composites .....	36
III.3.1	Impact des contraintes électriques .....	36
III.3.2	Impact des contraintes atmosphériques .....	38
III.3.2.1	Température.....	39
III.3.2.3	Absorption d'eau, et contamination.....	42
III.4	Manifestation du vieillissement des isolateurs composites.....	46
III.5	Méthodes de diagnostic de l'état des isolateurs composites .....	47
III.5.1	Inspection visuelle.....	47
III.5.2	Imagerie des émissions Ultraviolets.....	47
III.5.3	Imagerie des émissions thermiques infrarouges (IR).....	48
III.5.4	Mesure de l'hydrophobicité .....	48
III.5.5	Mesure du courant de fuite .....	48



III.5.6	Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR).....	48
III.5.7	Spectroscopie photo-électronique X (XPS).....	49
III.5.8	Spectroscopie des rayons X à dispersion d'énergie (EDX).....	49
III.5.9	Spectroscopie de masse des ions secondaires (SIMS) .....	49
III.5.10	Microscopie électronique à balayage (MEB ou SEM).....	49
III.	Conclusion.....	50

## **Chapitre IV : partie expérimentale**

IV.1	Introduction.....	51
IV.2	Modèle expérimental et techniques de mesure .....	51
IV.2.1	Matériaux et préparation des échantillons .....	51
IV.2.1.1	La silicone .....	51
IV.2.1.2	Dispositif expérimental de vieillissement à ultraviolet à régulateur de température .....	52
IV.2.1.3	Préparation de la solution polluante.....	53
IV.2.1.4	Simulation de la pollution saline .....	54
IV.2.2	Dispositif expérimental et techniques de caractérisation de l'hydrophobicité .....	56
IV.2.2.1	technique de mesure de la tension de claquage .....	56
IV.2.2.2	Techniques de Mesure du courant de fuite .....	58
IV.2.2.3	Technique de Mesure de pertes diélectriques.....	59
IV.2.2.4	Technique de mesure de l'angle de contact (tension de surface) .....	67
IV.2.2.5	Technique de mesure de la dureté .....	68
IV.2.2.6	Technique de mesure de la rugosité.....	69
IV.2.2.6.1	Critères de la rugosité 2D .....	70
IV.3	Résultats et discussions.....	71
IV.3.1	Observation visuelle .....	71
IV.3.2	Tension de contournement.....	72
IV.3.3	Courant de fuite.....	75
IV.3.4	Facteur de dissipation.....	77
IV.3.5	Rugosité et dureté.....	78
IV.3.6	Angle de contact.....	81
IV.	Conclusion .....	82
	Conclusion générale .....	83
	Référence bibliographique	

# Liste des figures

## Chapitre I

Figure 1 : Photo représente un isolateur en céramique.....	7
Figure 2 : élément d'une chaîne d'isolateur en verre .....	8
Figure 3 : isolateur en matériaux synthétiques.....	9
Figure 4 : Un isolateur du type rigide.....	10
Figure 5 : isolateur composite.....	11
Figure 6 : isolateur à capot et tige type suspension.....	11
Figure 7 : photo isolatrice du type long fut.....	12

## Chapitre II

Figure 8 : Gel silicone bi composant pour étanchéité et isolation des boîtes de dérivation .....	21
Figure 9 : Élastomère de clapet de décharge de pression de caoutchouc de silicone.....	22
Figure 10 : Structure chimique de la silicone.....	23
Figure 11 : Structure d'un câble haute tension.....	26
Figure 12 : Structure typique d'un isolateur composite.....	29
Figure 13 : Isolateur composé de poste de suspension.....	30
Figure 14 : Isolateur de suspension composée.....	30
Figure 15 : Surface d'une ailette découpée à partir d'une chaîne d'isolateurs composites en silicone et recouverte de gouttelettes d'eau .....	33
Figure 16 : Angle de contact d'une goutte d'eau sur une surface solide .....	34
Figure 17 : Comportement d'une goutte d'eau sur une surface isolante .....	34

## Chapitre III

Figure 18 : Décharges corona à la surface d'un isolateur composite .....	37
Figure 19 : Isolateurs composite en silicone pollué .....	43
Figure 20 : Différentes formes de détérioration des isolateurs composites .....	46

## Chapitre IV

Figure 21 : lot 1 de six échantillons de silicone bleu.....	52
Figure 22 : Lot 2 de six échantillons de silicone gris .....	52
Figure 23 : Cellule de vieillissement sous UV et température.....	53
Figure 24 : Conductimètre à sonde mobile .....	54
Figure 25 : Dispositif expérimentale pour la reproduction de la pollution artificielle .....	55
Figure 26 : Répartition de la pollution sur la surface de l'isolateur silicone obtenue par pulvérisation.....	56
Figure 27 : Schéma du dispositif expérimental du laboratoire haute tension de l'université Abderrahmane Mira de Bejaïa .....	57
Figure 28 : Dispositif expérimentale du laboratoire haut de tension de l'université Abderrahmane Mira de Bejaïa .....	59
Figure 29 : Schéma bloc du pont de Schering.....	61
Figure 30 : Schémas du branchement de la cellule de mesure de pertes diélectriques .....	64
Figure 31 : photographie de la cellule de mesure de pertes diélectrique.....	65

# Liste des figures

Figure 32 : éléments constituant le pont de mesure de pertes diélectriques .....	66
Figure 33 : Micropipette utilisée pour doser et disposer la goutte d'eau sur la surface de la silicone.....	67
Figure 34 : Tracé de la tangente au point d'interface solide / liquide / gaz.....	68
Figure 35 : Appareil de mesure de dureté.....	69
Figure 36 : Appareil de mesure de rugosité .....	70
Figure 37 : Observation visuelle de la décoloration des échantillons après vieillissement au UV et a la température.....	72
Figure 38 : Tension de claquage de l'échantillon bleu en fonction.....	73
Figure 39 : Tension de claquage de l'échantillon gris en fonction de la conductivité .....	73
Figure 40 : Tension de claquage de l'échantillon bleu en fonction de temps de vieillissement .....	74
Figure 41 : Tension de claquage de l'échantillon gris en fonction de temps de vieillissement	74
Figure 42 : Formation d'un canal électrolytique suite au passage de l'arc électrique.....	75
Figure 43 : Evolution du courant de fuite en fonction de la conductivité .....	76
Figure 44 : Evolution du courant de fuite en fonction de la conductivité .....	76
Figure 45 : Evolution du courant de fuite en fonction du temps de vieillissement .....	77
Figure 46 : Evolution du courant de fuite en fonction du temps de vieillissement .....	77
Figure 47 : Evolution de la capacité des échantillons en fonction de temps de vieillissement	78
Figure 48 : Evolution du facteur de dissipation en fonction de temps de vieillissement .....	78
Figure 49 : L'écart arithmétique moyen du profil des échantillons en fonction de temps de vieillissement .....	79
Figure 50 : L'écart quadratique moyen du profil des échantillons en fonction de temps de vieillissement .....	80
Figure 52 : La hauteur moyenne du profil des échantillons en fonction de temps de vieillissement .....	80
Figure 52 : Evolution de la dureté shore (HS) en fonction du temps de vieillissement .....	81
Figure 53 : Evolution de l'angle de contact des échantillons en fonction de temps de vieillissement .....	81

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Spécifications de la lampe UVA selon le fabricant .....	53
---	----

# **Introduction générale**

De nos jours, l'énergie électrique joue un rôle très important dans le développement et l'évolution de l'industrie et l'économie des pays. De ce fait, il faut assurer, à tout instant, un bon équilibre entre la demande croissante et la production de l'énergie. C'est pour cela, qu'une très grande part d'importance est attachée aux réseaux électriques de distribution, principalement aux lignes de haute tension. Ces lignes peuvent parcourir des centaines de kilomètres et donc traverser des régions très différentes par leur climat, leur industrialisation, leur localisation géographique, etc. Par conséquent, les systèmes d'isolation du réseau sont exposés à diverses contraintes. Parmi celles-ci, la pollution qui se dépose sur les surfaces d'isolateurs

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 [1]. 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 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 auxquelles l'isolateur composite est exposé peuvent influencer les propriétés de son.

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, le courant de fuite, la tension de contournement, le facteur de pertes, ainsi que la rugosité et la dureté.

Le travail est organisé en 4 chapitres :

Le premier chapitre traite les différents types d'isolateurs et le déroulement du contournement et les différents types de pollutions.

Le deuxième chapitre présente en premier la structure et l'utilité de la silicone et des généralités sur les isolateurs composites, Les phénomènes de vieillissement des isolateurs composites induits par le dépôt des gouttes d'eau sur leurs surfaces y sont décrits, ainsi que leurs effets sur la performance de la surface hydrophobe.

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

Le quatrième et dernier chapitre est consacré à la discussion et interprétation des résultats obtenus sur les différentes méthodes de caractérisation du vieillissement des isolateurs hydrophobe

Nous allons terminer ce mémoire par une conclusion générale résumant les résultats obtenus.

# **CHAPITRE I**

Généralités sur les isolateurs  
de haute tension et phénomène  
de pollution



**I.1 Introduction**

Les lignes aériennes et les postes des réseaux de transport d'énergie électrique sont exposés à diverses contraintes. Parmi celles-ci, la pollution des isolateurs constitue l'un des facteurs de première importance dans la qualité et la fiabilité du transport d'énergie. En effet par temps de pluie ou de brouillard, les dépôts polluants se fixant sur les surfaces isolantes réduisent considérablement la résistivité superficielle et le contournement peut alors survenir. L'humidification des couches polluantes facilite en fait, la circulation d'un courant de fuite sur les surfaces isolantes provoquant des échauffements locaux et par la suite l'assèchement de la couche de pollution. Ainsi, la répartition du potentiel est modifiée d'une façon significative et des arcs partiels peuvent apparaître. Ces derniers peuvent évoluer jusqu'au contournement total de l'isolateur. Les conséquences du contournement vont de la détérioration de la surface de l'isolateur, surtout les isolateurs composites, jusqu'à la mise hors service de la ligne haute tension. Ainsi, une des caractéristiques principale d'un isolateur haute tension sera donc sa tenue au contournement en fonction de l'environnement dans lequel il est utilisé.

**I.2 Définitions****I.2.1 Isolant**

On appelle isolant électrique toute matière dont la conductivité électrique est nulle, ou dans la pratique est très faible. a l'échelle atomique une matière est dite isolante si elle ne contient pas d'électrons libres qui permettent le passage du courant électrique. [2]

**I.2.2 Isoler**

L'action d'isoler est le moyen d'empêcher la conduction entre conducteurs électriques soumis à des tensions différentes.[2]

**I.2.3 Isolation**

C'est un système constitué par des matériaux isolants ou un assemblage de matériaux isolants à considérer avec les parties conductrices associées

**I.2.4 Diélectrique**

Un diélectrique est défini comme un milieu dans lequel les bandes de conduction et de valence sont séparées par une énergie supérieure à 5eV. On le définit aussi comme un milieu dans lequel tout volume de la substance possède un moment dipolaire (polarisation permanente) ou susceptible d'en acquérir sous l'action d'un champ électrique.[2]

## I.3 Différents types d'isolants

### I.3.1 Isolant Gazeux

Les principaux isolants gazeux sont : l'air atmosphérique, l'azote, les gaz rares, l'hydrogène.[2]

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

Rigidité diélectrique variable suivant la nature de gaz

- Permittivité faible, les gaz sont auto-régénérateurs
- Phénomène d'ionisation des gaz
- Légers et inflammables.

### I.3.2 Isolants liquides [2]

Les liquides diélectriques sont souvent utilisés en association avec des solides (transformateurs, condensateurs câbles). Ils ont pour rôle de se substituer aux vacuoles qui sont sources de décharges partielles. Les liquides sont utilisés pour [2] :

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

### I.3.3 Isolants solides

Les isolants solides sont d'origines minérales, organiques et résineuses [3] :

- Les isolants d'origine minérale sont des substances siliceuses et calcaire, solides à la température ordinaire, incombustibles et supportant des températures élevées, à l'exception des dérivés hydrocarbures (verre, produits céramiques, ...)[3] ;
- Les isolants d'origine organique sont généralement des substances fibreuses à base de cellulose. Ces matériaux ont une bonne résistance mécanique, ils sont combustibles et ne supportent pas des températures supérieures à 100°C sans perdre leurs propriétés mécaniques et diélectriques (cellulose, silicone); les isolants d'origine résineuse sont généralement des matières organiques naturelles ou synthétiques qui peuvent se présenter à l'état solide, thermoplastique ou plastique (caoutchouc,...).[3]

## I.4 Propriétés diélectriques des isolants [4]

On peut subdiviser les caractéristiques électriques des matériaux isolants en deux grandes familles :

- ❖ La première comprend les propriétés essentielles qui sont :
  - Rigidité diélectrique  $E$  ;
  - Permittivité relative  $\epsilon_r$  ;
  - Facteur de pertes diélectriques  $\text{tg}\delta$ ;
  - Résistivité électrique  $\rho$ ;
  - Décharge disruptive ou claquage  $U_c$ .

- ❖ La seconde famille réunit des caractéristiques plus directement liées à l'emploi de l'isolant dans une catégorie de matériels déterminée, donc en liaison étroite avec les diverses contraintes subies par le matériau au cours de son service (Température, fréquence, ...).

Dans certains cas ces dernières caractéristiques peuvent être les éléments déterminants du choix d'un isolant destiné à une certaine fonction.

#### I.4.1 Rigidité diélectrique

La rigidité diélectrique d'un matériau isolant est la valeur du champ électrique auquel il faut le soumettre pour qu'il en résulte une perforation qui le rende inapte à remplir ultérieurement sa fonction. De façon pratique, la rigidité diélectrique est définie comme étant le rapport entre la tension à laquelle se produit une perforation dans les conditions d'essai spécifiées et la distance entre les deux électrodes auxquelles est appliquée la tension.

Suivant les positions relatives des conducteurs et de la surface des matériaux on distingue :

- La rigidité diélectrique transversale, pour laquelle le champ électrique appliqué est perpendiculaire aux surfaces principales du matériau ;
- La rigidité diélectrique longitudinale, obtenue entre deux conducteurs situés sur une même surface de l'isolant.

#### I.4.2 Permittivité

Lorsqu'un diélectrique est soumis à l'action d'un champ électrique, il se produit à l'échelle moléculaire diverses modifications qui ont pour effet de créer un champ électrique propre  $E_p$  à l'intérieur de la substance, s'opposant au champ électrique ( $E_e$ ) extérieur appliqué. Cette caractéristique des isolants solides et liquides porte le nom de la permittivité relative  $\epsilon_r$ .

La permittivité relative d'un diélectrique parfait est le quotient de la capacité  $C_x$  entre deux électrodes supposées noyées dans ce diélectrique, par la capacité  $C_0$  de la configuration d'électrodes dans le vide :

$$\epsilon_r = \frac{C_x}{C_0} \quad (\text{I.1})$$

La permittivité absolue  $\epsilon_a$  est le produit de la permittivité relative par la constante électrique du vide.

$$\epsilon_a = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \quad (\text{I.2})$$

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

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

$$\epsilon r = \epsilon r' - jj\epsilon r'' \quad (\text{I.3})$$

Où  $\epsilon'$  est la partie réelle de la permittivité complexe, jouant le même rôle que  $\epsilon$  dans le cas des diélectriques parfaits.

$$\epsilon a = \epsilon * r. \epsilon 0 \quad (\text{I.4})$$

### I.4.3 Angle de pertes et facteur de dissipation

Tout isolant soumis à un champ électrique alternatif est traversé par des courants de conduction et d'absorption qui donnent lieu à des pertes diélectriques. Le diélectrique réel peut être représenté par les schémas équivalents suivants.

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

$$\text{tg } \delta = \frac{I_a}{I_r} = \frac{U_h}{U_r} = \frac{R_a}{P_r} \quad (\text{I.5})$$

D'après la formule I.3 on peut écrire :

$$\text{tg } \delta = \frac{\epsilon r''}{\epsilon r'} \quad (\text{I.6})$$

Le produit  $\epsilon r'' = \epsilon r' \text{Tg} \delta$  est dénommé **indice de pertes**, car il caractérise l'énergie dissipée dans le diélectrique.

### I.5 Matériaux isolant utilisés pour la fabrication des isolateurs

On trouve plusieurs isolants solides qui peuvent être utilisés pour la fabrication des isolateurs de haute tension comme le verre, la céramique et la porcelaine. Mais durant ces dernières années, la porcelaine est de plus en plus abandonnée à cause de deux inconvénients principaux qui sont : le poids lourd des isolateurs et la difficulté de détection des amorçages ces dernières années on s'intéresse de plus en plus à l'utilisation des isolateurs en matériaux polymères [5].

**I.5.1 Céramique**

Le développement et la fabrication des céramiques datent depuis longtemps à cause de leurs performances. Pour les isolateurs installés dans des lieux où il y a des Contraintes mécaniques très importantes, on utilise de préférence la céramique à Grains très fins. Souvent, on trouve la céramique dans les postes : isolateurs supports, couverture Isolante des sectionneurs, des disjoncteurs, des transformateurs de potentiel, des Bornes de traversées des transformateurs de puissance,...etc. [5].



**Fig.1 Photo représente un isolateur en céramique**

**I.5.2 Verres**

En Algérie, les isolateurs utilisés dans les lignes de moyenne et haute tension Sont en verre. Parmi les avantages que présentent le verre, le bas prix et l'observation Des défauts est très facile [5]. Nous trouvons deux types de verre pour la Fabrication des isolateurs : le verre trempé et le verre recuit [5].



**Fig.2 : élément d'une chaîne d'isolateur en verre**

#### **I.5.2.1 Le verre trempé**

Celui-ci est obtenu par réchauffage de l'isolant retiré du moule à une température d'environ 70 °C, puis refroidi par des jets d'air sous pression judicieusement répartis sur toute sa surface ; les couches extérieures de la pièce isolante acquièrent rapidement une rigidité qui ne leur permet plus aucune déformation. Le verre trempé présente une contrainte mécanique en traction environ **5 à 6** fois plus grande que le verre recuit et peut supporter des variations brusques de température pouvant atteindre 100° C.

La couleur verte de l'isolateur en verre provient de l'oxyde de fer présent dans sa composition, si celui-ci est absent le verre est transparent outre son bas prix, le verre présente l'avantage de permettre de déceler les défauts par une simple observation [6].

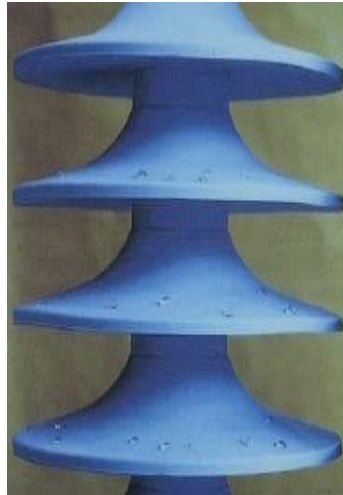
#### **I .5.2.2 Le verre recuit**

Il a surtout été utilisé pour faire des isolateurs rigides, mais on s'est aperçu que Les isolateurs un peu épais ne résistaient pas aux variations brusques de températures. De plus, le verre recuit ne supporte que des tensions mécaniques relativement faibles, Ce qui interdit son emploi pour les isolateurs de suspension [6].

#### **I.5.3 Matériaux synthétiques (composites)**

Les isolateurs en matériaux synthétiques sont composés d'un centre en fibres de verre imprégnées d'une résine et d'un revêtement à ailettes de type élastomère.

Leur avantage est qu'ils sont légers et présentent une grande résistance mécanique. [5].



**Fig.3 : isolateur en matériaux synthétiques**

## **I.6 Profil de l'isolateur**

Pour assurer sa fonction, le profil de l'isolateur doit satisfaire les conditions suivantes:

1. Une longueur de fuite maximale.
2. Un nombre optimum de nervures (pour une taille donnée de l'isolateur) qui permet d'avoir une tension de contournement plus élevée.
3. Une géométrie de l'isolateur permettant le nettoyage naturel de l'isolateur par le vent ou par la pluie.
4. Des diamètres de l'isolateur différents assurant une contamination non-uniforme et donc des tensions de contournement plus élevées. (**Fig .3**) Isolateurs en matériaux synthétiques

## **I.7 Principaux types d'isolateurs**

Il y a deux principaux types d'isolateurs : les isolateurs de type rigide et les éléments de chaîne.

### **I.7.1 Isolateurs de type rigide**

Ce type d'isolateur permet d'obtenir une liaison rigide entre le support et le câble. Il est constitué d'un ou plusieurs isolateurs encastrés et scellés entre eux, ils sont fixés aux pylônes par des ferrures de différentes formes (**Fig.4**). Ils sont montés sur pylônes soit d'une façon verticale, horizontale ou oblique (inclinée). Mais ce type d'isolateurs est utilisé pour les lignes aériennes qui ne dépassent pas le niveau de tension de 60 kV [7].

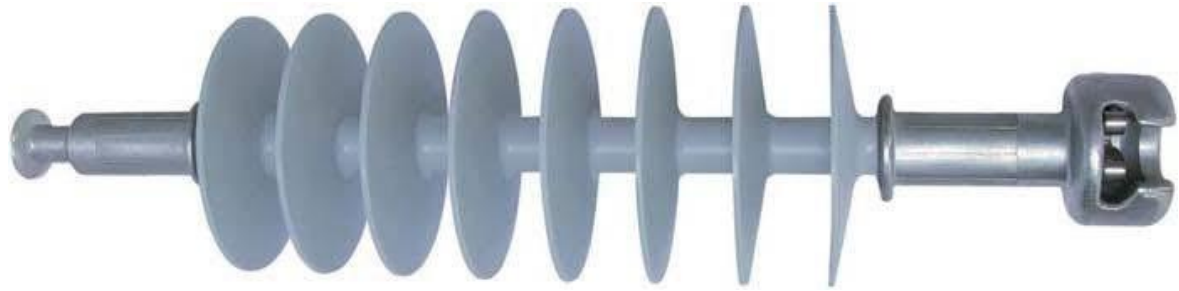


**Fig.4 : Un isolateur du type rigide**

### **I.7.2 Chaîne d'isolateurs**

C'est un isolateur constitué par un matériau isolant équipé de pièces métalliques de liaison, nécessaires pour le relier de façon flexible à d'autres éléments de chaîne, à la pince de suspension du conducteur ou au support, ces éléments sont soumis principalement à des efforts de traction. Ils sont généralement utilisés en suspension et forment des chaînes d'isolateurs soit verticales (chaînes d'alignement) soit horizontales (chaînes d'ancrages). Il existe deux types principaux d'éléments de chaîne. [8]





**Fig.5 : isolateur composite**

#### **I.7.2.1 Isolateurs capot et tige**

L'isolateur capot et tige est constitué d'un bloc isolant portant à sa partie supérieure un capot scellé en fonte malléable et à l'intérieur une tige en acier, avec cannelures et dont la tête conique est également scellée dans le verre (ou la porcelaine). L'extrémité inférieure de cette tige est arrondie et a les dimensions voulues pour pénétrer dans le capot de l'élément suivant, et y être maintenue par une goupille. L'assemblage consiste à effectuer un scellement du capot et du diélectrique par du ciment, puis celui de la tige et du diélectrique. [9]



**Fig.6 : isolateur à capot et tige type suspension**

#### **I.7.2.2 Isolateur à long fût**

Il est constitué d'un cylindre plein en céramique, en porcelaine ou en matériaux synthétiques, muni d'ailettes (**Fig.7**). A chaque extrémité est fixée une pièce métallique de liaison. Celle-ci peut être enveloppante en forme de capot scellé autour des extrémités tronconiques prévues sur le cylindre, ou bien en forme de tige scellée dans une cavité prévue à cet effet. De tels isolateurs peuvent être utilisés unitairement ou en série de plusieurs éléments en fonction de leur longueur et du niveau d'isolement requis.



**Fig.7 : photo isolatrice du type long fut**

## **I.8 Pollution des isolateurs**

La pollution est un phénomène qui constitue un sérieux problème sur l'isolement des ouvrages de haute tension, dont il faut tenir compte lors du dimensionnement de l'isolement des lignes de haute tension. Ceci est dû à la formation de couches plus ou moins conductrices sur la surface des isolateurs. Ces couches peuvent engendrer une diminution considérable de la résistivité superficielle des surfaces des isolants et par suite la diminution de la tension de tenue des isolateurs.

### **I.8.1 Formation et répartition des couches polluantes**

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

Plusieurs travaux d'observation [10,11] ont montré qu'il existe toujours une distinction nette entre les couches formées à la surface supérieure et celles formées à la surface inférieure d'un isolateur soumis à la pollution naturelle. Cela veut dire que la répartition de la pollution le long de l'isolateur est très peu uniforme ; le vent, par exemple, impose des orientations préférentielles pour les dépôts.

La pluie qui lave périodiquement les surfaces exposées est un autre facteur de non-uniformité puisque les parties arbitrées de l'isolateur ne sont jamais lavées. Cette répartition dépend [12] :

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

**I.8.2. Sources de pollution**

Les divers types de pollution atmosphérique les plus fréquemment observés peuvent être regroupés selon leurs origines et classés comme suit :

**I.8.3 Pollution naturelle**

La pollution naturelle provient :

- des sels marins dans les régions côtières.
- des poussières du sol (notamment lors des chantiers importants).
- des sables véhiculés par le vent en régions désertiques.

**I.8.3.1 Pollution marine**

Les installations situées au bord de la mer sont exposées aux embruns portés par le vent et qui se déposent progressivement sur les isolateurs, formant une couche de pollution de sel qui devient conductrice lorsqu'elle est humidifiée par le brouillard ou simplement par condensation. Un courant de fuite s'établit alors à travers la couche superficielle et des arcs électriques peuvent prendre naissance.

**I.8.3.2 Pollution désertique**

La pollution désertique est caractérisée surtout par les dépôts de sable se formant à la surface des isolateurs après les vents de sable. Une fois humidifiés, ces dépôts deviennent plus ou moins conducteurs (en fonction des concentrations en sels solubles qu'ils contiennent) et engendrent la circulation d'un courant de fuite qui apparaît brusquement et qui est suivi par l'apparition d'arcs partiels qui peuvent conduire au contournement total de l'isolateur.

**I.8.3. Pollution industrielle**

Au voisinage de certaines zones industrielles, la pollution est engendrée par l'évacuation des fumées des usines (raffinerie, cimenterie, minerais ..... etc.). La présence d'éléments conducteurs dans les couches, et/ou la dissolution des sels qu'elles contiennent engendrent la circulation d'un courant de fuite plus ou moins fort selon les concentrations des agents polluants.

**I .8.4. Pollution mixte**

Ce type de pollution est en fait le plus fréquent et le plus sévère pour l'exploitation des ouvrages électriques. La pollution mixte résulte de la combinaison entre les différents types de pollution phénomène de pollution Comme par exemple les pollutions marine et industrielle lorsque des installations industrielles sont situées en bord de mer.

**I .8.5. Conséquences de la pollution**

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

La rupture diélectrique de l'air peut être atteinte entre deux points de la surface isolante entraînant l'amorçage d'un arc électrique qui court-circuite une partie de la ligne de fuite. Trois cas peuvent se présenter selon les contraintes auxquelles est soumis l'isolateur [12 ,13]

**I .8.5.1 Arc non localisé**

L'arc électrique s'éteint rapidement, puis se réamorçage aléatoirement à un autre endroit et ainsi de suite. Il y a apparition d'un courant de fuite intermittent entraînant une perte d'énergie relativement faible et généralement supportable par l'installation [13].

**I .8.5.2 Arc permanent**

L'arc électrique se fixe à la surface, 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 du support isolant nécessitant le remplacement de l'élément défaillant [13].

**I .8.6. Techniques de lutte contre la pollution**

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

**I .8.6.1. Allongement de la ligne de fuite**

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

Le changement de type d'isolateur (pour rallonger la ligne de fuite): c'est une technique très coûteuse et souvent impossible à réaliser en poste.

- L'utilisation de prolonger la ligne de fuite en matériaux polymères, qui sont collés sur la surface des isolateurs existants [14].
- Le nombre de disques en verre par chaîne d'isolateurs indique la tension transportée par les lignes de distribution électrique.

**I .8.6.2 Isolateurs plats**

Les isolateurs sans nervures ont la propriété d'accumuler moins de pollution que les isolateurs traditionnels et s'autonettoyant très bien sous l'effet du vent [14].

**I .8.6.3. Graissage périodique**

Par mesure économique, seuls les isolateurs de postes sont concernés. On utilise des graisses silicones. Grâce à ses propriétés hydrophobes, la graisse protège temporairement les isolateurs [14].

**I .8.6.4 Revêtement silicone**

Cette méthode consiste à appliquer, par pulvérisation ou au pinceau, un caoutchouc silicone qui se vulcanise à température ambiante à la surface des isolateurs Ce revêtement protège les isolateurs et améliore leurs tenues sous pollution.

**I .8.6.5 Les isolateurs composites**

Ils ont de bonnes propriétés hydrophobes et peuvent être utilisés dans des conditions de pollution très sévères. Cependant, ces isolateurs, revêtus d'un polymère voient leurs caractéristiques changer au cours du temps ; ils peuvent vieillir sous l'effet des différentes contraintes (électriques et climatiques) auxquelles ils sont soumis en service.

**I .8.6.6 Nettoyage des isolateurs**

Le nettoyage manuel et le lavage périodique hors tension sont fréquemment utilisés à travers le monde. Néanmoins, l'application de ces méthodes pose des problèmes majeurs à cause des interruptions de service, parfois assez longues. Pour éviter ces coupures, un lavage sous tension des isolateurs est réalisé à l'aide d'installations fixes ou mobiles. Dans les deux cas, il est effectué selon des règles strictes concernant la qualité de l'eau du lavage

**I .9 Phénomène de contournement des isolateurs pollués****I .9.1 Contournement**

Le phénomène de pollution des lignes aériennes constitue un sujet d'étude d'une importance primordiale. Cela provient du fait que la pollution des isolateurs constitue un sérieux problème pour l'exploitation des réseaux de haute tension. En effet, et suite à l'interaction entre, l'air transportant des grains de poussières et l'isolateur, une couche

étrangère se dépose sur les surfaces de celui-ci. Une fois cette couche humidifiée, la tension de tenue peut diminuer considérablement, provoquant des incidents très graves. [15]

### **I.9.2 Définition**

On dit que le contournement se produit sur la surface de l'isolateur lorsqu'une décharge électrique s'établit entre ses extrémités et contourne la surface de l'isolateur. Le contournement provoque l'ouverture du disjoncteur, car il établit un court-circuit entre le conducteur et le pylône (défaut monophasé à la terre). Le contournement cause habituellement l'interruption momentanée de l'écoulement de l'énergie dans le réseau. De telles interruptions, bien qu'étant nocives, peuvent être tolérées dans des endroits ruraux. Dans des secteurs urbains avec les industries de pointe (domaines pharmaceutiques, production de véhicules...) les interruptions ne sont pas acceptables parce qu'elles mènent à d'énormes pertes financières de production, de machines bloquées et des pertes de contrôle du cycle du processus. Par exemple, aux USA une interruption de 0,25 s dans une usine à papier peut provoquer des pertes de 100 000 dollars. [15]

### **I.9.3 Déroulement du contournement**

Phase 1 : dépôt de pollution Des grains de pollution se déposent sur la surface de l'isolateur

Phase 2 : Formation d'un électrolyte conducteur A sec, la résistance superficielle reste élevée malgré le dépôt de pollution. Quand la couche de pollution devient humide (brouillard, humidité, rosée du matin, pluie fine...), elle se transforme en électrolyte conducteur et donne naissance à un courant de fuite superficiel If circulant sur la surface de l'isolateur

Phase 3 : formation d'une bande sèche Dans les régions étroites de l'isolateur, où la densité de courant de fuite superficiel et circulants sur la surface de l'isolateur

Phase 4 : contournement Comme la résistance de la bande sèche est beaucoup plus grande par rapport au reste de l'électrolyte, pratiquement toute la tension aux bornes de l'isolateur est maintenant appliquée aux extrémités de cette zone. Il se produit alors un claquage dans la bande sèche :

- Soit la décharge s'éteint  $\Rightarrow$  pas de contournement
- Soit la décharge progresse sur la surface  $\Rightarrow$  contournement de l'isolateur est élevée, une partie de l'électrolyte s'évapore et crée une bande sèche

De manière générale, le contournement d'un isolateur pollué est précédé de l'apparition d'un courant de fuite accompagné de la formation d'une bande sèche et d'arc partiels, Un arc peut se propager en surface jusqu'au contournement total de l'isolateur.

#### **I .9.3.1 Contrainte de contournement**

La contrainte de contournement d'un isolateur est le rapport de la tension de contournement à la longueur totale de l'isolateur [13].

#### **I .9.3.2. Tension de contournement**

La tension de contournement est le niveau de tension le plus bas à partir duquel tous les arcs joignent les deux électrodes [16]. Elle dépend :

- de la résistivité volumique moyenne de la pollution,
- de la répartition de la couche de pollution,
- du profil et des dimensions de l'isolateur

#### **I .9.3.3 Tension de tenue**

C'est le niveau de tension le plus important, que peut supporter une isolation sans provoquer de décharge disruptive (contournement dans le cas des isolateurs). [16]

#### **I .9.3.4 Courant de fuite**

C'est un courant de nature impulsionnelle. Il est de faible amplitude, circulant à travers la couche polluante le long de la surface de l'isolateur. Il est donc à caractère électrolytique et de type résistif. Il devient important lorsqu'on s'approche de la tension de contournement. Il dépend de plusieurs facteurs, entre autres, la nature de la couche de pollution, la longueur de la ligne de fuite et les conditions atmosphériques [8].

#### **I .9.3.5 Courant de fuite critique**

C'est le courant minimal nécessaire pour provoquer le contournement sous pollution d'un isolateur à une tension donnée. Il est indépendant du procédé d'essai ainsi que de la forme de l'isolateur. Le seul facteur dont dépend ce courant sous une tension donnée est la ligne de fuite, c'est-à-dire la contrainte spécifique exprimée en kV/cm [12].

#### **I .9.3.6 Longueur critique de l'arc**

En atmosphère polluée, l'apparition d'un courant de fuite est accompagnée par la formation d'arcs partiels sur des surfaces isolantes. Selon les conditions électriques, ces arcs peuvent se développer en engendrant le contournement total ou s'éteindre après un certain temps.

La longueur critique d'un arc représente la longueur limite de l'arc partiel qui peut s'éteindre. Dès que l'arc dépasse cette longueur critique, il se propagera et conduira inévitablement au contournement total [12].

### I.9.3.7 Diamètre de la décharge

Le diamètre du canal de la décharge est un paramètre important ; sa connaissance est indispensable à l'élaboration de modèles et la caractérisation physique du phénomène. Sa mesure est cependant très délicate à cause de la diffusion de la lumière. La décharge n'est pas un volume dont les frontières sont parfaitement nettes (bien définies). Il est donc nécessaire de définir un diamètre équivalent.

Matsumoto et al. [17] ont développé un dispositif de mesures optiques composé d'une matrice de 512 photodiodes disposées à des intervalles de 28 $\mu$ m. Ce dispositif leur a permis de mesurer avec une bonne précision le diamètre de la colonne de la décharge. Leurs observations montrent que le diamètre  $d_d$  (mm) de la décharge dépend de la polarité de la tension et du courant  $i$  (A) qui la parcourt. A cet effet, ils proposent une relation empirique liant le diamètre de la décharge et le courant :

$$d_d = a_p i^{b_p} \quad (I.1)$$

Où

$i$  : le courant,  $d_d$  : le diamètre, Les constantes  $a_p$  et  $b_p$  : dépendant de la polarité appliquée à l'électrode haute tension avec :

- ✓  $a_p = 14$  et  $b_p = 0,78$  pour la polarité positive.
- ✓  $a_p = 22$  et  $b_p = 0,78$  pour la polarité négative.

A partir de la mesure de la densité du courant pendant la propagation de la décharge, Wilkins [17] montre que le rayon de la décharge peut être estimé par :

$$r_{dd} = \sqrt{i} 1.45 \pi \quad (I.2)$$

## I.10 Choix d'isolateur

Les isolateurs les mieux adaptés sont ceux qui retiennent le taux de dépôt polluants le moins élevé, c'est à dire ceux qui possèdent les meilleures propriétés d'auto nettoyage.

L'apparition d'une nouvelle usine a proximité d'un post, Léa construction d'un ouvrage routier voisin, ou un évènement météorologique exceptionnel peuvent changer la sévérité de



pollution d'un site, ce qui peut provoquer des incidents qui influent directement sur l'isolation, pour cela il faut prévoir une protection pour les installations existantes contre les nouvelles sources de pollution. [5]; et le choix des isolateur se fait en fonction :

- De la tension de service de la ligne
- Des efforts mécaniques auxquels ils sont soumis
- Du prix de revient (rigide ou suspendue)
- Du degré de sévérité de la pollution du site d'utilisation

## **I. Conclusion**

Nous avons présenté dans ce chapitre un résumé sur les isolateurs en précisant leur rôle et leurs différents types, et une synthèse des différents aspects des phénomènes de pollution.

Les isolateurs sont des éléments essentiels dont dépendent la sécurité d'exploitation, la qualité et la continuité de service. Les isolateurs les mieux adaptées à un environnement donné sont ceux qui possèdent les meilleures propriétés d'auto-nettoyage.

La pollution des isolateurs est un facteur essentiel dont il faut tenir compte dans la conception. Pour mieux dimensionner les chaînes d'isolateurs, il est indispensable de connaître la sévérité de la pollution des sites concernés. La connaissance de cette sévérité consiste à étudier les différents paramètres qui définissent l'état de dégradation de l'isolation.

# **CHAPITRE II**

La silicone et les isolateurs  
composites en HT



**II.1 Introduction**

Les isolateurs composites sont de plus en plus utilisés dans les installations extérieures par les compagnies d'électricité, traditionnellement prudentes, à travers le monde. Leur croissance est liée à leurs avantages par rapport aux isolateurs traditionnels (en porcelaine ou en verre). De meilleures performances en présence de la pollution et dans les conditions humides. L'utilisation massive des isolateurs polymériques a entraîné de nombreuses études visant à maîtriser et améliorer les performances en service de ce type d'isolateurs.

**II.2 Silicone [18, 19 et 20]**

Les principaux dérivés organosiliciés industriels sont les silicones (l'une des origines de ce nom viendrait de silicone, traduction anglaise du mot silicium) dont la production mondiale, en constante expansion, avoisinerait annuellement le million de tonnes. Leur méthode de préparation a été découverte par Müller en Allemagne pendant la seconde guerre mondiale, a été, indépendamment industrialisée par E. G. Rochow aux États-Unis à la fin de cette guerre ; cinquante ans après, très améliorée, elle est toujours d'actualité. L'attractivité de ses propriétés couplées à la possibilité de disposer de produits silicones sous différentes formes (huiles, résines, élastomères, gels...) a fait que ces polymères se rencontrent dans pratiquement tous les secteurs de l'industrie.

Les polysiloxanes ou caoutchoucs de silicone sont les caoutchoucs très spéciaux dont le tonnage est le plus important. Ce ne sont plus des caoutchoucs à squelette carboné mais des caoutchoucs à base de silicium-oxygène. Leur qualité la plus remarquable est leur domaine d'utilisation en température, qui s'étend de 85 à + 250°C, avec une quasi-constance de leurs propriétés dans ce domaine. En revanche, leurs propriétés mécaniques sont relativement faibles. Ils entrent dans de nombreuses applications de secteurs tels que l'industrie électrique et électronique, ou l'industrie automobile. Ils se caractérisent aussi par une grande inertie physiologique, ce qui permet de les utiliser dans le domaine médical (prothèses). Ils ont une résistance médiocre aux huiles hydrocarbonées sauf pour les élastomères silicones fluorés, très chers, mais très appréciés dans l'aéronautique (tenue au froid, à la chaleur et au kérosène)

**II.3 Différentes familles de silicones**

Les polymères siloxanes peuvent être produits sous différentes formes : fluides, gommés, gels, élastomères et résines.

### II. 3.1 Huiles et gomme

Les huiles silicones ont fait leurs preuves dans le refroidissement et l'isolation des modernes et du fait de leur excellente stabilité thermique, de nouvelles applications exigeant des propriétés similaires ne sauraient tarder. Elles sont également beaucoup utilisées dans les accessoires de câbles haute tension. Les huiles silicones sont des polymères linéaires pouvant présenter une longueur de chaîne de deux à 1000 atomes Si, voire beaucoup plus, en alternance avec des ponts oxygène.

### II.3.2 Gels silicones

Élastomères, suivant le type d'application. Par rapport aux huiles, ils réduisent le risque de fuites. Et comparés aux élastomères, ils remplissent parfaitement les cavités de géométrie complexe et adhèrent solidement au Les gels silicones sont un groupe particulier d'isolants et peuvent remplacer les huiles ou les x parois intérieures des pièces. Les gels silicones (**Fig. 8**) sont la plupart du temps des produits composants de basse viscosité.



**Fig.8 Gel silicone bi composant pour étanchéité et isolation des boites de dérivation**

### II. 3.3 Elastomères silicones

Les élastomères silicones et les silicones de revêtement (**Fig.9**) forment le plus grand groupe de produits silicones et sont optimisés en permanence en raison de la grande variété d'applications. Ils sont fabriqués à partir de polymères silicones. Les caoutchoucs sont subdivisés en plusieurs catégories selon leur viscosité et leur mode de réticulation. Tandis

qu'autrefois les pièces isolantes étaient souvent réalisées par moulage de caoutchouc silicone RTV-2, aujourd'hui, les procédés se diversifient.



**Fig.9 Élastomère de clapet de décharge de pression de caoutchouc de silicone**

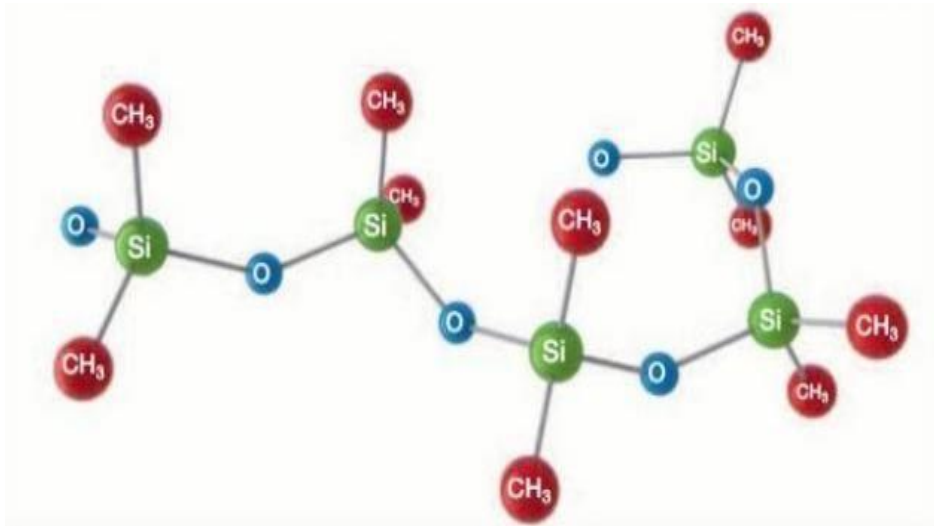
### **II.3.4 Résines siloxanes**

Les résines siloxanes se distinguent par leur haute stabilité thermique, une propriété que l'on exploite dans l'isolation des grosses installations électriques. Leur excellente résistance à la chaleur devrait conduire tôt ou tard à de nouvelles applications.

## **II. 4 Structure moléculaire de la silicone**

Chaque molécule de silicone est constituée d'une chaîne d'atomes de silicium et d'oxygène (**Fig.10**) Caractérisée en ce que l'agent actif hydrophobe de type organopolysiloxane est choisi parmi les composés.

Où  $p$  est un nombre entier de 0 à 150 ; et les symboles R, identiques ou différents, représentent chacun un groupe alkyle ou Alcoy de 1 à 10 atomes de carbone, cyclo alkyle de 3 à 10 atomes de carbone, un groupe phényle le plus couramment, un groupe réactif, un halogène ou un hydrogène. Les silicones sont par conséquent beaucoup plus résistantes vis-à-vis de la chaleur, de l'oxydation et des rayons ultraviolets que leurs homologues organiques. La nature du groupement R joue un rôle dans les propriétés chimiques des silicones : caractère plus ou moins hydrophobe, propriétés rhéologiques, caractère lubrifiant, anti-adhérent. De plus, elles présentent un caractère hydrophile (dû à la liaison Si R O, très polaire), et hydrophobe à la fois. Cette propriété est utilisée par exemple pour l'imperméabilisation : la partie hydrophile se lie préférentiellement au substrat (tissus, moquette, papier ou pierres) et présente vers l'extérieur ses groupements organiques hydrophobes [21].



**Fig.10 : Structure chimique de la silicone**

#### **II.4.1 Les propriétés de la silicone**

En raison de leur structure chimique, les silicones sont parfaitement adaptées aux applications moyennes et haute tension et présentent de nombreuses propriétés électriques, physiques, mécaniques et chimiques particulièrement intéressantes [22 et 23].

### **II.5 Avantages pour les applications moyennes et hautes tension de la silicone [21]**

#### **II.5.1 Sécurité accrue**

Minimisation du risque de décharge électrique due à la couche de pollution, d'où une plus grande sécurité par rapport aux isolants conventionnels.

#### **II.5.2 Utilisation en extérieur**

Parfaite convenance applications en plein air.

#### **II.5.3 Haute protection anti-incendie**

Utilisation dans les lieux exigeant une haute protection anti-incendie, comme les tours d'immeubles, les locomotives, les navires, les hôpitaux et le métro.

#### **II.5.4 Large plage de température**

Montage des éléments isolants à basse température. Pas de perte d'élasticité sous exposition permanente aux très hautes ou très basses températures.

**II.5.5. Plus grande longévité**

Ralentissement significatif du vieillissement électrique, d'où une nette augmentation de la durée de vie par rapport aux autres isolants, sous contraintes identiques.

**II.5.6. Meilleur rendement**

Température de fonctionnement plus élevée que celle des autres isolants, autorisant une meilleure exploitation des transformateurs.

**II.5.7. Hydrophobicité**

Par rapport aux autres matériaux, les silicones se distinguent par un très haut pouvoir imperméabilisant à long terme, appelé hydrophobicité, cette dernière constitue une propriété essentielle des isolateurs composites à enveloppe élastomère silicone. L'eau ne pénètre pas dans les pièces d'isolation en élastomères silicones, mais perle à la surface, même au bout de nombreuses années. Ils minimisent les courants de cheminement et évitent les décharges dues au contournement électrique, même si la surface est fortement polluée, car ils transmettent leurs propriétés hydrophobes à la couche de dépôts par transfert d'hydrophobie. Ces propriétés particulières d'élastomères silicone spécialement conçus garantissent l'hydrophobicité de l'isolateur en service.

**II.5.8. Nettoyage**

Un nettoyage des isolateurs n'est par conséquent que rarement nécessaire. Un nettoyage peut cependant être nécessaire en cas de salissures importantes, par exemple lors d'un encrassement axial par de grands oiseaux ou de la prolifération de moisissures. Les moisissures se développent généralement lors d'un stockage inadéquat dans un espace non ventilé, ce qui produit le dépôt de condensation sur les isolateurs. Un solvant volatil tel que l'acétone, le toluol, le trichloréthylène ou l'isopropanol peut alors être employé pour nettoyer les isolateurs. Le solvant doit être appliqué sur un chiffon non pelucheux servant à nettoyer la surface de l'isolateur (ne pas verser le solvant directement sur l'isolateur).

**II.5.9. Tenue aux UV et aux intempéries**

Par comparaison aux autres matériaux, les élastomères silicones sont très résistants au rayonnement ultraviolet. La stabilité de la chaîne Si-O confère aux silicones une haute résistance au spectre ultraviolet de la lumière solaire. Même les climats agressifs des régions côtières ou désertiques n'entament pratiquement pas leurs propriétés : l'élastomère silicone POWERSIL 310 ne présente par exemple qu'une légère altération de ses propriétés mécaniques après un test accéléré d'exposition aux intempéries de 3000 heures.



**II .5.10. Tenue au feu**

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

**II.5.11. Elasticité**

Les élastomères se différencient des thermodurcissables par leur propriété d'élasticité caoutchouteuse, c'est-à-dire la capacité à subir de très grandes déformations réversibles sous l'action de contrainte mécaniques. Ils peuvent atteindre de très grands allongements (jusqu'à 500 %) tout en étant capables de retrouver leur géométrie initiale en restituant au milieu l'énergie qui leur a été fournie lors de la déformation [24]. La très haute élasticité des silicones facilite le montage et permet l'utilisation de nouvelles techniques de montage, comme par exemple, la rétraction à froid pour les accessoires de câbles. Par ailleurs, les silicones conservent leur élasticité jusqu'à -45 °C et conviennent de ce fait aux applications en haute altitude ou dans les régions polaires.

**II.5.12. Propriétés diélectriques**

Les silicones présentent une haute résistance électrique et un faible facteur de perte diélectrique, une très haute résistance électrique ainsi qu'une haute rigidité diélectrique sur une longue durée. Par rapport aux autres isolants, leur vieillissement électrique est très faible.

**II.5.13. Thermo stabilité**

Les silicones sont très résistantes aux contraintes thermiques en raison de leur structure chimique. Les huiles silicones sont thermostables à long terme, jusqu'à 180 °C, même en présence d'oxygène atmosphérique, et supportent des températures encore plus élevées sur une courte durée, pas de variation importante des propriétés physiques entre -40 °C et 250°C, grande inertie chimique (oxydation et hydrolyse). Ils sont stables jusqu'à 150°C en présence d'oxygène.

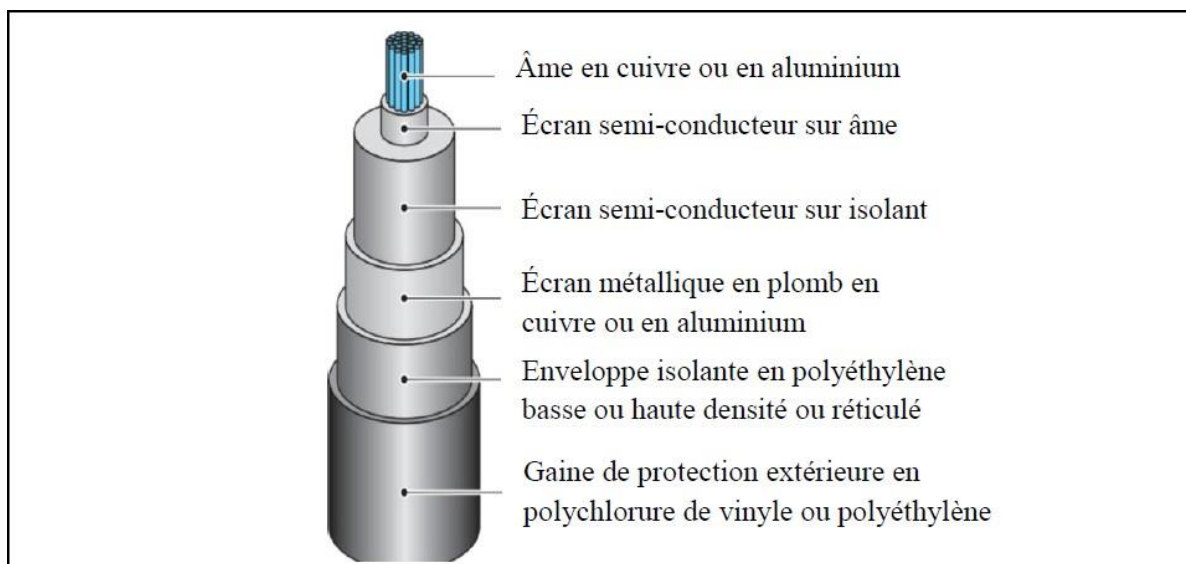
**II.6 Domaines d'applications de la silicone**

Les silicones sont des polymères utilisés dans de nombreuses applications de l'industrie du fait de leurs propriétés d'étanchéité, d'anti-adhérence, de lubrification, de moulage...etc. Les polymères sont fréquemment trouvés dans notre entourage, de nos ordinateurs personnels à la fabrication automobile, de nos facilités de vie aux installations militaires.

Plus précisément quelques polymères d'isolation sont largement utilisés avec leurs propriétés d'isolation électrique. Les polymères jouent un rôle très significatif comme matière d'isolation avec des propriétés électriques à cause de leur aisance de traitement, masse de production, efficacité et leur capacité de résistance. Les polymères sont toujours développés avec des propriétés chimiques et mécaniques spéciales pour rencontrer quelques exigences particulières, dans le dépit duquel, les propriétés électriques doivent surpasser les autres propriétés. D'autre part, les polymères isolants sont célèbres pour leurs applications comme isolateurs et diélectriques, qui sont des matériaux dont la charge électrique ne circule pas librement et la rend très difficile à conduire un courant électrique sous un champ électrique. Quelques matériaux sont désignés pour servir comme isolateurs sûrs sous une tension basse ou bien modérée, pendant que d'autres sont développés pour être utilisés sous une haute ou bien très haute tension (HT ou THT). Ces matériaux ont une fonction bien particulière qui détermine leur utilisation.

### II.6.1 Câble électrique

Le matériau d'isolation doit présenter, outre des spécifications diélectriques (résistivité et rigidité diélectrique élevées, permittivité diélectrique et pertes diélectriques faibles), des caractéristiques liées à son utilisation dans le câble (insensibilité aux chocs, aux vibrations et aux attaques chimiques, résistance au feu et tenue au vieillissement). Les caoutchoucs de silicone sont destinés à la fabrication de câbles spéciaux (**Fig.11**), par exemple dans la marine ou l'aviation, notamment grâce à leur excellente tenue aux températures extrêmes (de  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$  à  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). De plus, leur comportement au feu est remarquable puisque la combustion du câble provoque une transformation en silice qui préserve les propriétés d'isolation du câble [24 et 25].



**Fig.11 : Structure d'un câble haute tension**

### **II.6.2 Accessoires pour câble**

Pour assurer la fiabilité du réseau de transport d'électricité et afin de garantir une bonne isolation entre des pièces qui sont sous différents potentiels, l'emploi d'accessoires tels que les isolateurs comme support de câbles électriques ou les connecteurs électriques à perforation d'isolant pour la transmission d'énergie entre deux câbles nus ou gainés, s'avère nécessaire et indispensable.

### **II.6.3. Isolateur**

Un isolateur possède double rôle, porte le conducteur et assure une liaison isolante entre les câbles aériens sous tension et leur support (pylône). Les isolateurs sont des composants indispensables au transport et à la distribution de l'énergie électrique. Par conséquent, Ils doivent posséder des caractéristiques mécaniques et électriques définies. La plupart des isolateurs en service utilisent de la porcelaine ou du verre comme principal matériau isolant. Cependant, la tendance est à leur remplacement par des isolateurs composites, à matrice polymère silicone renforcée par des charges de silice ( $\text{SiO}_2$ ) et qui présentent les avantages suivants :

- Une faible masse et un encombrement réduit permettant une mise en place facilitée.
- Des performances équivalentes et une meilleure tenue à la pollution [26 et 27].

### **II.6.4 .Connecteur à serrage mécanique**

Définis par la norme française NF C 33-020, ils comportent

- Les connecteurs à dérivation sur les réseaux torsadés isolés.
- Les connecteurs de dérivation de réseaux torsadés sur les réseaux en conducteurs nus en cuivre, en aluminium ou en alliage d'aluminium.
- Les connecteurs de mesure et de mise en court-circuit pré-isolés sur les réseaux torsadés permettant la mise en court-circuit et éventuellement à la terre de tous les conducteurs de réseau lors d'une intervention, les mesures de tension.

## **II.7 Isolateurs composites**

### **II 7.1 Définitions**

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

### **II 7.2 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 [28]. 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 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 [29].

### **II.7.3 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 » [30].

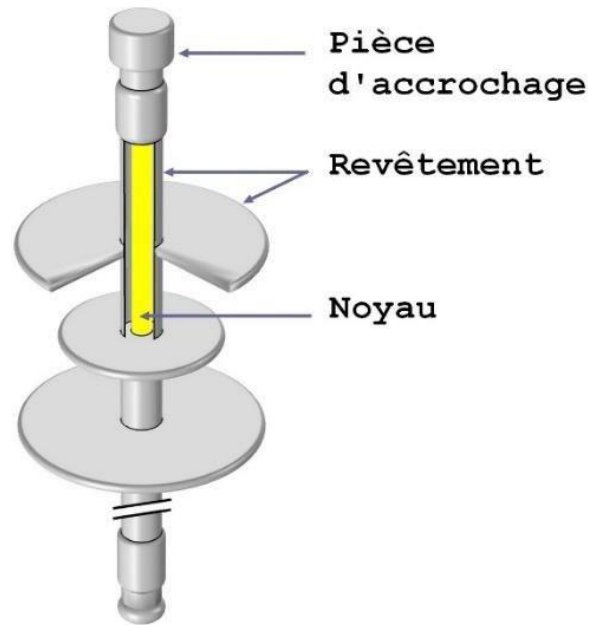
Généralement, on appelle isolateurs composites tout isolateur fabriqué à base de matériaux Polymères composites. Ils sont aussi communément appelés sous d'autres noms, tels qu'isolateurs polymères, isolateurs synthétiques, isolateurs organiques et isolateurs non céramiques (en Amérique du nord notamment) [31].

## **II .8 Structure des isolateurs composites**

Un isolateur composite (**Fig.12**) est constitué de deux parties isolantes, à savoir un noyau et son revêtement extérieur, et des pièces d'accrochage.

### **II.8.1 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 [29], [28], [32], [33].



**Fig.12 : Structure typique d'un isolateur composite.**

### **II.8.2 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 [34], [29]. 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.

### **II.8.3 Interface**

Une interface est la surface de contact entre les matériaux différents. Dans le cas des isolateurs composites, il existe plusieurs interfaces [33]:

- 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 ;

### **II.8.4 Pièces d'accrochage**

En générale métalliques, elles sont fixées au noyau pour transmettre les charges mécaniques [33].

## II.9. Principaux types d'isolateurs composites

On peut distinguer deux types principaux d'isolateurs composites couramment utilisés dans l'industrie de l'énergie :

1. Isolateur de suspension est illustré dans la (**Fig.13**), il est utilisé dans les lignes de transmission et de distribution haute tension et pour systèmes BT, MT et HT.
2. Isolateur composé de poste de suspension est illustré à la (**Fig.14**), il est utilisé sur les sous-stations et les centrales électriques.



**Fig.13 : Isolateur composé de poste de suspension**



**Fig.14 : Isolateur de suspension composée**

Chaque isolateur composite a des caractéristiques parmi lesquelles :

- Tension assignée.
- Tension assignée de tenue au choc de foudre et à fréquence industrielle sous pluie.
- Charge mécanique spécifiée.
- Longueur minimale nominale de la ligne de fuite.
- Pas entre les ailettes.
- Hydrophobie des matériaux.

**II.10 Conditions d'utilisation**

Les isolateurs doivent être prévus pour être installés à l'extérieur, supporter des températures comprises entre  $-5^{\circ}\text{C}$  et  $+55^{\circ}\text{C}$  et être insensible aux effets de la condensation, de la pluie, des changements rapides de température et du rayonnement solaire.

**II.11 Avantages et inconvénients des isolateurs polymères en silicone[35].**

Les avantages et les inconvénients des isolateurs polymères à haute tension sont importants pour comprendre les applications et les développements des isolateurs électriques et aussi les isolateurs polymères de lignes de transmission offrent des avantages importants par rapport aux isolateurs en porcelaine et en verre spéciaux dans les lignes de transmission ultra haute tension.

Grâce aux nombreux avantages des isolateurs composites par rapport aux isolateurs classiques, l'application des premiers est en augmentation dans le monde entier

**II.12 Avantages des isolateurs composites[35].**

Les raisons de l'utilisation massive des isolateurs composites varient considérablement entre les fournisseurs d'énergie électrique, mais les plus courantes peuvent se résumer comme suit:

- Poids réduit (jusqu'à 80% par rapport aux types traditionnels). Cela se traduit par une conception plus économique (plus légère) des pylônes et évite également la nécessité d'utiliser des grues lourdes pour leur installation, économisant ainsi le coût.
- L'énergie de surface faible de l'isolateur polymère peut être continuellement hydrofuges (hydrophobe) même en présence de conditions humides telles que le brouillard, la rosée et la pluie. Par conséquent, ils ne sont pas soumis à des courants de fuite élevée qui permettent une réduction de 30% de la distance de fuite équivalente de la porcelaine et du verre. Cette réduction des exigences de distance de fuite peut influencer la hauteur de conception des structures de transmission et également la mise à niveau de la tension des systèmes existants sans changer les dimensions du pylône
- La capacité de tension de tenue de l'isolateur polymère est comparable ou meilleure que celle des isolateurs en porcelaine et en verre. Avec une distance d'arc à sec inférieure de 30% par rapport aux conceptions de porcelaine standard à 230 kV, l'isolateur composite a démontré un amorçage à des niveaux de tension supérieurs de 30% à ceux de la porcelaine au pire niveau de contamination.

- Les isolateurs en polymère sont moins susceptibles d'être sérieusement endommagés par le vandalisme, tels que les coups de feu qui provoquent la rupture des isolateurs céramiques.
- L'utilisation d'isolateurs composites réduit les coûts d'entretien, comme le lavage de l'isolateur qui est souvent requis pour les isolateurs en céramique et en verre dans les environnements fortement contaminés, moins coûteux par rapport à une chaîne équivalente en verre trempé 36 à 44 %, moins coûteux pendant le transport et moins coûteux pendant l'installation avec un gain de 37%.
- Profil des ailettes de forme aérodynamique et présentant une ligne de fuite suffisante: 31 à 68 % supérieure par rapport à une chaîne équivalente en verre trempé.
- Pente calculée de manière à éviter l'accumulation de la pollution par une faible prise de vent.
- Facilité de manutention.
- Rapidité d'installation.
- Moins vulnérable aux effets de la corrosion.

### **II.13 Inconvénients des isolateurs composites [35].**

Les principaux inconvénients des isolateurs polymères composites sont :

- Les isolateurs polymères de nature organique sont plus sensibles aux changements chimiques conduisant à l'érosion et au suivi des matériaux.
- Un autre phénomène qui affecte la performance de l'isolateur polymère est la couronne qui est causée par des champs électriques élevés sur la surface de l'isolateur.
- Fiabilité à long terme est inconnue, aussi l'espérance et la vie des isolateurs de polymère est difficile à estimer (20 ans dans un milieu très fortement pollués).
- Difficulté de localiser les défauts
- Les oiseaux picorant le caoutchouc et le rendant inutile sont un gros inconvénient des isolateurs polymères.
- Remplacement de toute la chaîne d'isolateurs en cas d'anomalie.
- Non possibilité d'intervention en sous tension.
- Isolateurs en polymère sont constitués de matériaux organiques et la modification chimiques sur la surface en raison aux intempéries crée des problèmes sur la surface.
- Isolateurs en polymère peuvent souffrir de l'érosion et se dégradent en fin de compte, ce qui peut conduire à l'échec d'isolateurs.



### II.14 Hydrophobicité

L'hydrophobicité d'un matériau est définie comme étant sa propriété à résister à l'écoulement de l'eau sur sa surface [36], ou autrement dit, sa résistance à la formation d'un film continu d'eau sur sa surface. Le caractère de perte d'hydrophobie de la surface d'isolateurs composites (**Fig.15**) est l'un des paramètres les plus critiques affectant leurs performances à long terme. [37]. [38].



**Fig.15 : Surface d'une ailette découpée à partir d'une chaîne d'isolateurs composites en silicone et recouverte de gouttelettes d'eau.**

### II.15 Energie de surface et angle de contact des gouttes d'eau

Une faible énergie de surface, ou une tension de surface, est une autre caractéristique clé des polysiloxanes. Une indication de l'énergie libre de la surface peut être obtenue en mesurant l'angle de contact d'une goutte d'eau sur la surface d'un matériau solide comme la montre **fig.16** à partir de . La mesure de cet angle permet de déduire le caractère hydrophobe (grand angle, faible énergie de surface) ou hydrophile (petit angle, grande énergie de surface) de la surface. Les phénomènes de mouillage se produisent à des endroits où les trois états de "solide", "liquide" et "gazeux" sont en contact. La relation entre les différentes tensions superficielles et l'angle de contact a été donnée par Young en 1805 en tant qu'équation [39].

$$\cos(\theta) = \frac{\gamma_{sv} - \gamma_{ls}}{\gamma_{lv}} \quad (2.1)$$

La tension inter faciale solide-liquide :  $\gamma_{ls}$  ;

La tension inter faciale solide-vapeur :  $\gamma_s$  ;

La tension inter faciale liquide-vapeur :  $\gamma_{lv}$  ;

Angle de contact :  $\theta$  .

Il est important de mentionner que l'équation de Young n'est valable que pour des surfaces idéales et lisses Un angle de contact inférieur à  $90^\circ$  indique que le fluide se répandra sur une grande surface sur la surface ( $\theta \leq 90^\circ$  la surface est hydrophile); alors que les angles de contact supérieurs à  $90^\circ$  signifient généralement que le fluide minimisera son contact avec la surface et formera une goutte liquide compacte ( $\theta > 90^\circ$  la surface est hydrophobe) [39].

fig.17

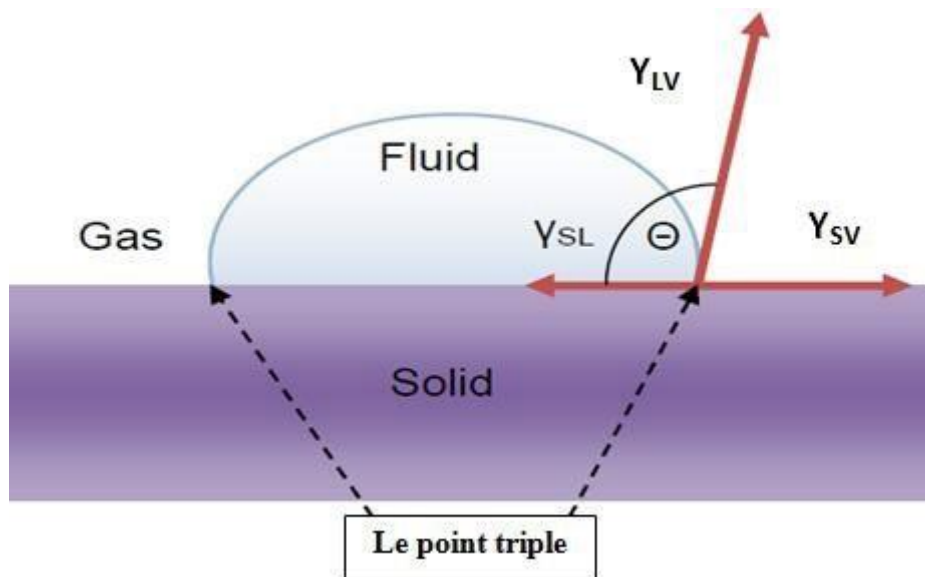
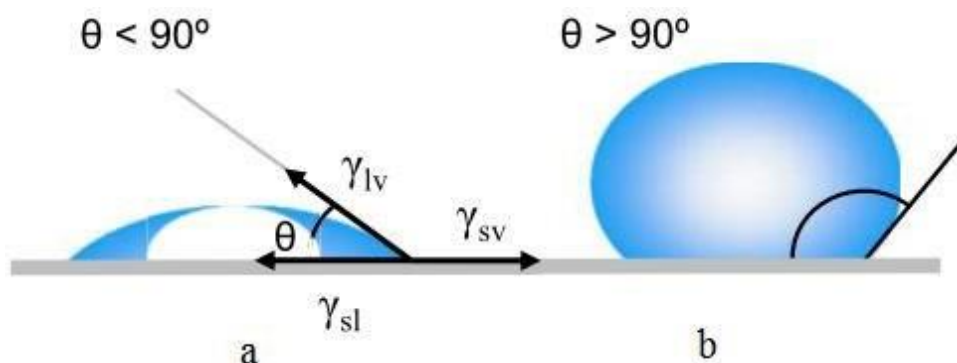


Fig.16 : Angle de contact d'une goutte d'eau sur une surface solide



a) surface hydrophile

b) surface hydrophobe

Fig.17 : Comportement d'une goutte d'eau sur une surface isolante

Aujourd'hui, avec l'utilisation de caméras CCD numériques et de logiciels informatiques avancés, la mesure de l'angle de contact d'une goutte d'eau sur toute surface solide a été

automatisée et l'équipement de laboratoire est maintenant disponible dans le commerce [39DS].

## **II. 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.

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 sur le vieillissement, auxquelles les isolateurs en silicone sont exposés.

# **CHAPITRE III**

Le phénomène de  
vieillessement des isolateurs  
composites : état de l'art



### III.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.

### III.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 manoeuvre - *Basic Switching Impulse Insulation Level (BSL)* et les chocs de foudre - *Basic Lightning Impulse Insulation Level (BIL)* [40], 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 [34]. 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 [41].

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 [42] 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.

### III.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 [29].

#### III.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 [43], [44], [45], [46], [47],

[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 [49], [48]. Il en résulte la formation des espèces comme l'ozone (O<sub>3</sub>), le gaz de méthane (CH<sub>4</sub>), les couches de SiO<sub>x</sub> - *Silica-like layer* -, les radicaux d'hydroxyle, etc. [50].

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 (**Fig.18**) [51], [52], [53], [54], [55]. 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 [37].



**Fig.18 : Décharges corona à la surface d'un isolateur composite**

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.* [56] 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 [50]. La perte de l'hydrophobicité dépend de l'intensité de la décharge pendant le traitement du matériau par la décharge corona [57], 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 [58].

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.* [59], ont remarqué que le taux de recouvrement de l'hydrophobicité passe par quatre 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 décroître. 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 [60], 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 [48]. Mis à part le dommage dans la surface des échantillons, une influence sur leurs tensions de contournement a été enregistrée. P. Vinod *et al.* [58] 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.

### III.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. 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.

### III.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 [61]. 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 [62]. 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 [63]. M. Zhao *et al.* [64] 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 chaîne d'isolateurs en contact avec le conducteur est normalement portée à une température plus élevée que le reste de la chaîne. Cependant, O. Fujii *et al.* [65] 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 [66]. 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.* [67] 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.* [68] 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.* [69] 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.* [70], quant à eux, ont rapporté que la dégradation du silicone LSR suite à une contrainte hydrothermique est limitée à seulement 100  $\mu\text{m}$  de sa surface, tandis que le volume du matériau reste intact.

J. W. Chang et R. S. Gorur ont investigué le rôle joué par le mécanisme de rotation de la chaîne 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 ( $< 100\text{ }^\circ\text{C}$ ), le matériau en silicone est hydrophile, cependant à une température de  $100\text{ }^\circ\text{C}$ , 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 chaînes cycliques formées subissent une seconde rotation conformation elle 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[112] a révélé une régénération des chaînes LMW PDMS par un processus de scission des chaînes 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.

### III.3.2.2 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 [71], a trouvé que les UVA 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 UVA, bien que son étude n'a pas investigué l'action isolée des UVA, mais l'action combinée de la température, la tension, et des radiations UVA avec deux intensités (1 et 4 mW/cm<sup>2</sup>), selon des cycles de vieillissement qui ont durés environ 1000 h. Pour les silicones LSR, Y. Lin *et al.* [72] ont proposé un mécanisme de vieillissement par rayonnements UVA autre que celui des silicones HTV.

M. T. Nazir et B. T. Phung [73] ont étudié le rôle joué par les additifs en SiO<sub>2</sub>, leurs tailles (micro ou nano), et leur combinaison dans la résistance du silicone face à l'effet combiné des rayonnements UVA, 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 nanosilica présentent une meilleure performance en termes 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.* [74] ont constaté l'apparition des pores sur la surface des échantillons en HTV lors d'un vieillissement simultané par rayonnements UVB 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 [61] ont réalisé un vieillissement accéléré à long terme sur un isolateur en silicone ; l'effet combiné de la température, des rayonnements UVB 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. Savadkoobi *et al.* [75] a abouti à des résultats différents, les résultats ont montré, généralement, une réduction de la tension de contournement (en AC) avec la durée de

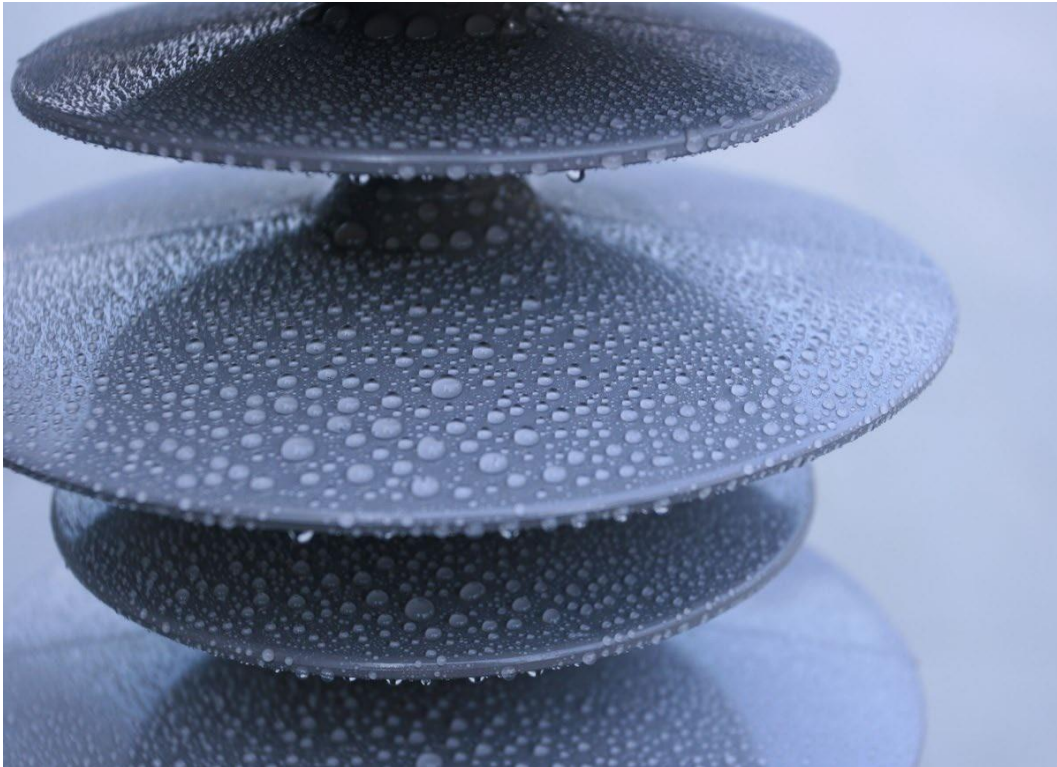
vieillissement. Cependant les auteurs n'ont pas mentionné la nature des rayonnements UV appliqués (UVA, UVB ou UVC) ni le type des isolateurs en silicone utilisés dans leur étude (HTV, LSR ou autres).

A. Majzoobi *et al.* [76] ont investigué les effets d'application des rayonnements UVC pendant une durée de 160 jours sur la tension de contournement des isolateurs en polymère. D'après leur étude, les radiations UVC 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 UVC 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 UVC. I. A. Joneidi *et al.* [77] arrivent à la même conclusion pour un vieillissement par UVC prolongé à 5000 h. Dans un autre travail, Z. Farhadinejad *et al.* [78] ont rapporté que l'application de rayonnements UVC 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 UVC, l'effet des rayonnements devient plus évident.

### III.3.2.3 Absorption 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 [42], [79], [80]. L'eau peut causer la rupture des liaisons de Siloxane notamment à des valeurs de pH inférieures à 2,5 ou supérieures à 11 [81]. 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.

**La figure19** représente une surface polymérique d'un isolateur composite en silicone pollué, contaminé par le dépôt des gouttelettes d'eau



**Fig.19 : Isolateurs composite en silicone pollué**

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 [79], [82]–[83].

Y. Gao *et al.* [79] 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.* [84]. C. Wu *et al.* [85] ont démontré que l'augmentation du taux des additifs en ATH favorise la perméabilité liquide du silicone. Dans un autre travail, Z. Wang *et al.* [86] 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.* [57], 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 [87], [88]. L'influence du champ électrique (en DC) sur l'accumulation de la pollution a été également étudié [89], [90]. E. M. Savadkoohi *et al.* [75] 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.* [91] 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.* [92] ont étudié les caractéristiques du mouillage d'un isolateur composite et des isolateurs classiques, pollués artificiellement.

Z. Zhijin *et al.* [93] 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 meilleure 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 qu'at à elle est inversement proportionnelle à ces deux derniers paramètres.

Une analyse de l'accumulation naturelle de pollution sur des chaînes d'isolateurs composites exploitées dans une ligne HVDC de 800 kV pendant 3 ans a été faite par Z. Zhang *et al.* [90].

Les résultats ont montré une non-uniformité dans la répartition de la pollution le long de la chaîne, 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 chaîne. 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.* [89] qui ont comparé la densité du dépôt non-soluble (NSDD) de la pollution (constituée de SiO<sub>2</sub>) 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.

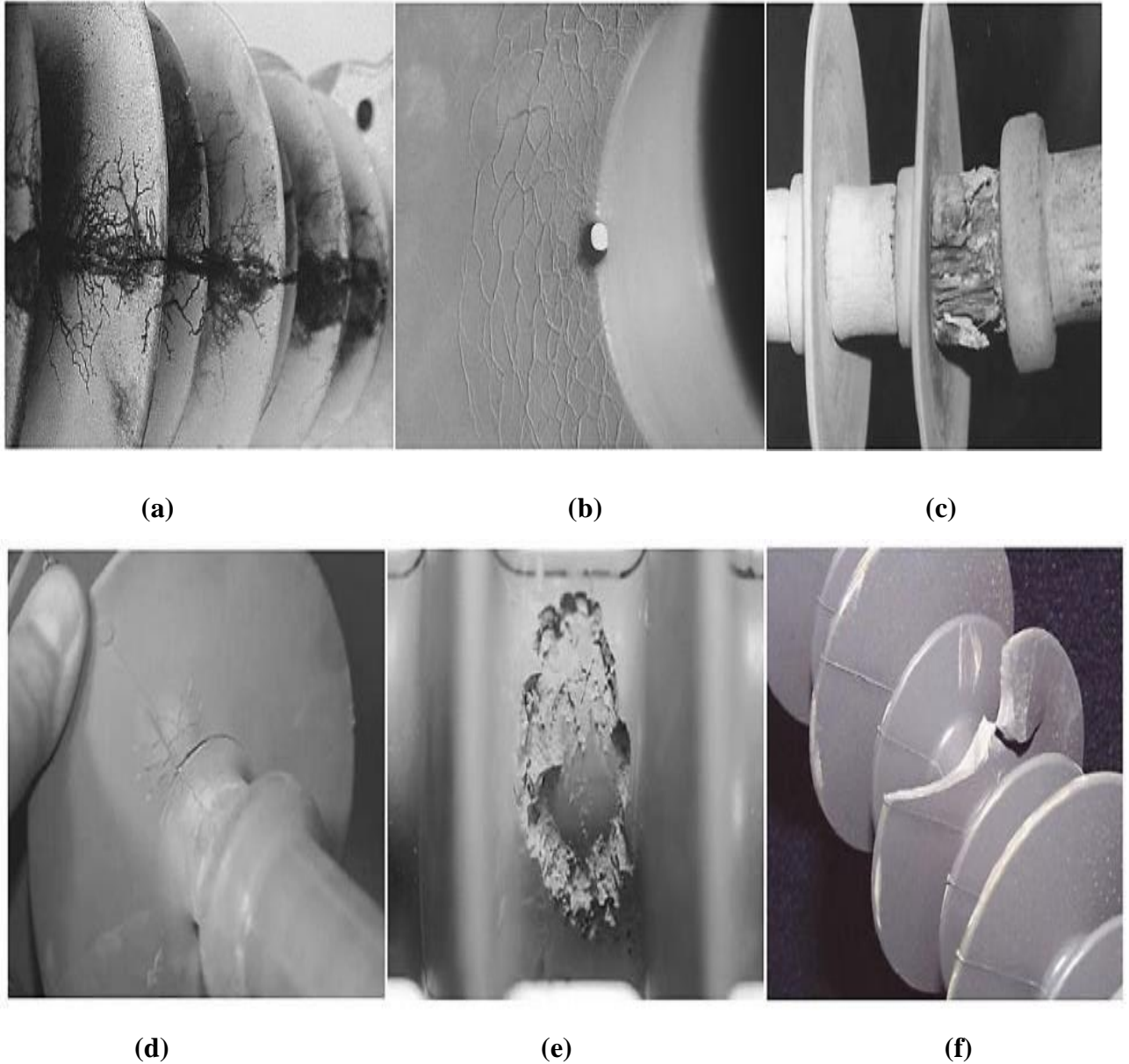
Bien que les isolateurs en silicone présentent une faible capacité à accumuler les dépôts de pollution à leurs surfaces, les essais d'A. Nosseir *et al.* [94] ont montré que les tempêtes de sables provoquent une augmentation de la rugosité de surface suite à l'érosion par chocs avec les particules de 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 [95]. H. j. West *et al.* [96] 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 [97]. D'autres espèces peuvent aussi exister comme les : *fungi*, *lichen* et *protozoa* [98].

### III.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 20 en montre quelques exemples.



**Fig.20 : 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

**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 [33], [99], [100].

**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 20 (b), la ligne de fuite offerte par l'ailette qui a subi une perforation est court-circuitée [30], [33].

**Erosion** : une dégradation irréversible et non conductrice qui se produit sur la surface de l'isolateur par perte de matière [33], [100].

**Craquelure** : fracture superficielle de profondeur supérieure à 0,1 mm [33], [100].

### III.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 [50]. Des efforts ont été consacrés pendant plusieurs années pour la recherche et la détermination des paramètres physiques relatifs à l'utilisation des isolateurs composites [48]. 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.

#### III.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'examineur cherche des signes de défauts comme l'érosion, la fissuration, la scission, etc. Si l'inspection est faite sur terrain, l'examineur doit être équipé de jumelles à haute puissance [50], [98]. La quantification de la décoloration du revêtement en silicone par un colorimètre a été aussi proposée pour évaluer le vieillissement de l'isolateur [101].

#### III.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 [98].

### **III.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 [98], [102].

### **III.5.4 Mesure de l'hydrophobicité**

C'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 composites4.

### **III.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 [103], [104]. 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 [103]. De ce fait, son emploi dans le diagnostic du vieillissement des isolateurs composites est généralement limité.

### **III.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 103  $\mu\text{m}$ . 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 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 [104]. 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 chaîne 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 [105].

### **III.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 [104], [106].

### **III.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 [104], [106].

### **III.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 [107], [108].

### **III.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. Un faisceau d'électrons est produit,

accélééré 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 [104].

L'utilisation de cette technique peut, cependant, endommager la surface de l'échantillon en raison de la forte énergie du faisceau électronique appliqué [109].

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) [50], [98]. La Spectrométrie d'émission atomique de plasma induit par laser (LIBS) [110]. 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 cheminements et à l'érosion [111].

### **III. 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 IV

## PARTIE Expérimental



## IV.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.

L'objectif de ce travail est d'étudier le processus de vieillissement d'isolants en silicone exposés aux rayonnements UV et à une température de 50C°. Pour y parvenir, deux types différents d'isolants en silicones commerciales ont été utilisés. Puis leur propriété électrique ainsi que des changements sur leurs surfaces ont été étudiés en mesurant le courant de fuite et tension de claquage en pulvérisons une solution contaminée avec cinq déférentes conductivités électriques en mesurant aussi leurs pertes diélectriques ainsi que leurs état de surface (dureté, rugosité, et décoloration).

L'objectif principal de ce travail était l'étude de l'effet des rayons UV et de la température sur les isolateurs de types silicone. Les échantillons étudiés sont des plaques de silicone solide, de nature souple (caoutchouteux), de couleurs déférentes (bleu et gris) et de dimension 120\*50\*6 mm<sup>3</sup>.

## IV.2 Modèle expérimental et techniques de mesure

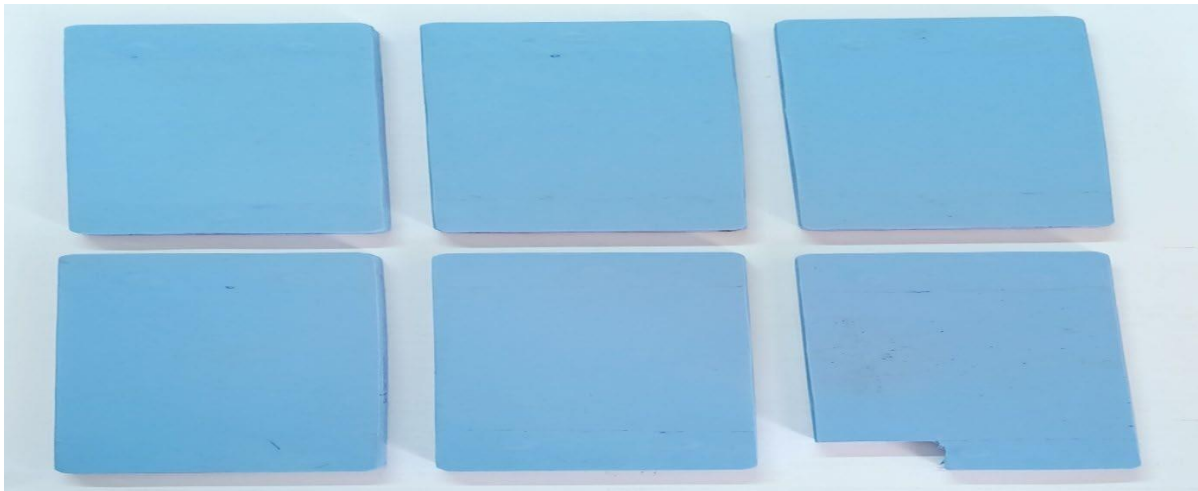
### IV.2. 1 Matériaux et préparation des échantillons

#### IV.2.1.1 La silicone

Afin de mener à bien cette étude expérimentale qui a pour but d'analyser et d'identifier les multiples effets des UV et de la température sur : la tension de claquage sous pollution, le courant de fuite et pertes diélectriques ainsi que sur l'angle de contact, dureté du matériau et sa rugosité. Nous avons réservé deux lot de six échantillons de silicone, six de chaque fabricant ci-dessus présenté **fig.21** et **fig.22**

Avant d'entreprendre le processus de vieillissement, une série de mesures est entreprise sur l'ensemble des échantillons de silicone de chaque lot à l'état vierge. Les résultats de ces mesures, qui seront présentés ultérieurement, feront l'objet de valeurs de référence.

Les douze échantillons seront vieillis sous une lampe à ultraviolet et à une température de 50C° pendant 1008 heures. Après chaque semaine d'exposition, un prélèvement de deux échantillons (un de chaque lot) est réalisé.



**Fig.21 lot 1 de six échantillons de silicone bleu**



**Fig.22 Lot 2 de six échantillons de silicone gris**

#### **IV.2.1.2 Dispositif expérimental de vieillissement à ultraviolet à régulateur de température**

Le vieillissement a été effectué par lot de six échantillons de silicone, dans une étuve pour éviter maintenir la température constante. Les échantillons ont été bien nettoyés avec de l'eau distillée ensuite séchée. Ceux-ci ont été déposés horizontalement en parallèle avec la lampe à UV. Un seul côté des échantillons a été exposé à la lumière UV, les échantillons sont disposés à une distance de 50cm par rapport à la source des UV. L'intensité UV constante du côté cible



des composites a été contrôlée à 40 W/m en ajustant sa position et la contrainte thermique a été maintenue à 50°C.

Les lampes UVA sont particulièrement utiles pour comparer différents types de polymères. Par conséquent, une lampe fluorescente à UVA-340 avec les spécifications indiquées dans le tableau.1 a été installée à l'intérieur de l'étuve. Le rayonnement de la lampe simule les conditions de la lumière du soleil dans la plage de longueur d'onde typique de 295 à 365 nm. La **fig.23** montre la disposition des échantillons à l'intérieur de l'étuve de vieillissement.

Modèle	UVA-340
Longueur d'onde	280-400 nm
Pic principal	340 nm
Irradiante	50 w/m =500 mW/cm
Longueur	60 cm
Fabrication	Pekin Zhongyu Bo Tang Tech chine

**Tableau .1 Spécifications de la lampe UVA selon le fabricant**



**Fig.23 Cellule de vieillissement sous UV et température**

#### **IV.2.1.3 Préparation de la solution polluante**

La solution polluante est composée d'un mélange d'eau distillée ou de robinet, selon la conductivité volumique souhaitée, auxquels on ajoute des petites gouttes d'eau saline pour

varier la conductivité de la solution. La variation du degré de pollution est obtenue en variant la concentration de NaCl dans l'eau. La conductivité de la solution est fixée à la valeur désirée à l'aide d'un conductimètre (**fig.24**) qui affiche la conductivité de la solution ionique ramenée à la température normale de 20°C. Les solutions sont réajustées avant chaque début d'une série d'essais, afin de garder les mêmes caractéristiques de la solution. Les différentes conductivités volumiques utilisées dans notre étude sont : (11 ; 50 ; 500 ; 1000 ; 1500 et 2000)  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .



**Fig.24** Conductimètre à sonde mobile

#### IV.2.1.4 Simulation de la pollution saline

Afin de simuler la pollution saline (brouillard salin, bruine), on utilise un pulvérisateur qui atomise les gouttelettes d'eau, et pour reproduire la même pollution saline sur la surface des isolateurs on a fabriqué un mécanisme en bois (**Fig.25**) qui nous permet de contrôler le degré de pollution en fixant certains paramètres dont la distance d'application de la pollution et le volume appliqué.

Ainsi ce dispositif permet de garder une distance horizontale fixe de 35cm entre la plaque de silicone et le pulvérisateur, et une distance verticale de 22cm et un volume de pollution identique et qui a permis d'obtenir une bonne reproductibilité et une pollution uniformément répartie sur la surface interélectrodes de l'échantillon comme le montre la figure (Fig.26).



**Fig.25 Dispositif expérimentale pour la reproduction de la pollution artificielle**





**Fig.26 Répartition de la pollution sur la surface de l'isolateur silicone obtenue par pulvérisation**

## **IV.2.2 Dispositif expérimental et techniques de caractérisation de l'hydrophobicité**

### **IV.2.2.1 technique de mesure de la tension de claquage**

La figure **fig.27** illustre le dispositif expérimental utilisé pour la mesure de la tension de claquage sous tension alternative. Le dispositif est constitué des éléments suivants :

- Un transformateur HT (T100) 0.08/135 kV pouvant délivrer une tension allant de 0 à 100 kV pour des essais en alternatif et de 0 à 135 kV en tension continue ;
- Un appareil de commande automatique et manuelle de tension SG, à vitesse de montée variable ;
- Un diviseur de tension capacitif ( $C_0 = 0.1$  nF et  $C_u = 41.4\mu\text{F}$ ) pour les mesures en tension alternative ;
- Un voltmètre de crête AC/DC de type MU11, à affichage digital permettant, selon le montage électrique, la mesure des hautes tensions alternatives ou continues ;
- Une résistance de protection  $R = 106$  k $\Omega$  limitant le courant ;
- Une table servant de support à l'objet d'essai (ensemble échantillons et électrodes) ;

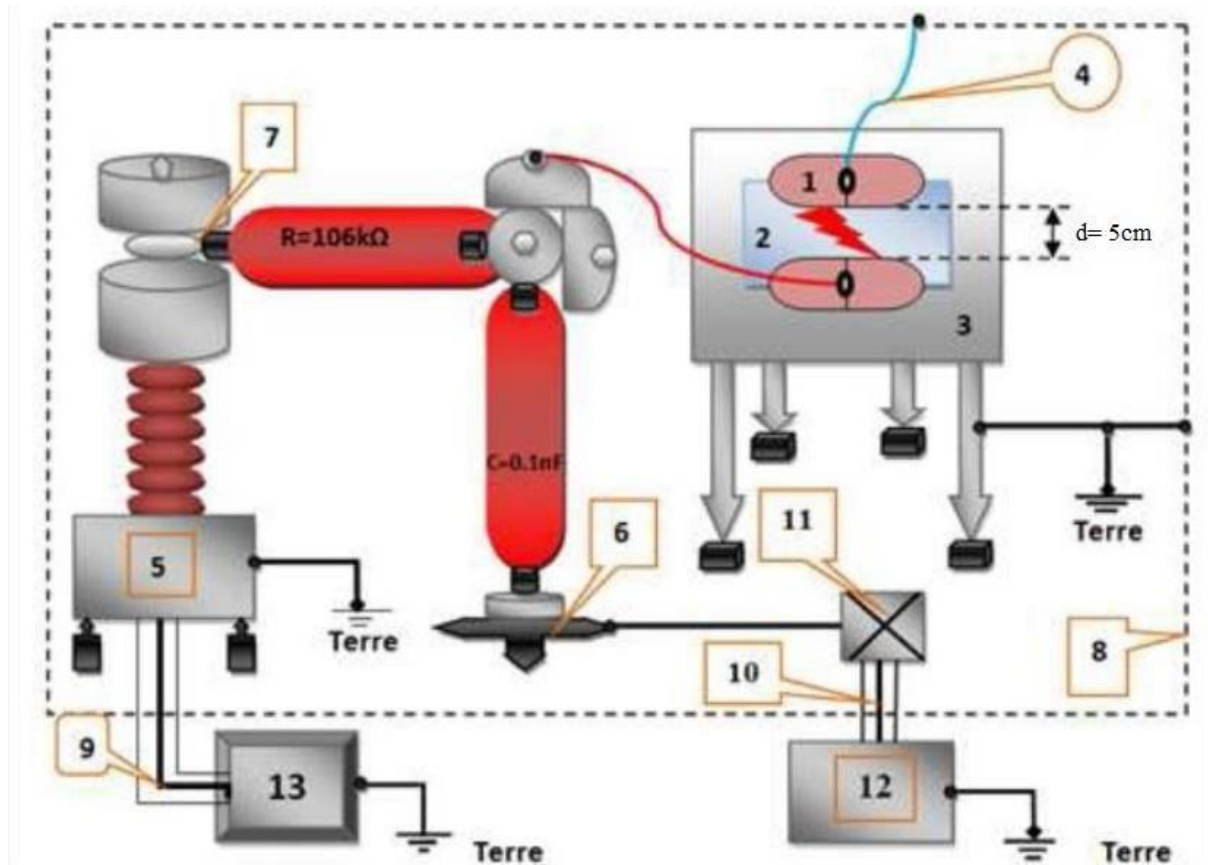


Fig.27 Schéma du dispositif expérimental du laboratoire haute tension de l'université Abderrahmane Mira de Bejaïa.

- 1 : Électrode en cuivre.
- 2 : Matériaux solide (silicone).
- 3 : Table. Capacitif.
- 4 : Fil conducteur mis à la terre
- 5 : Transformateur haute tension.
- 6 : Support d'éléments.
- 7 : Nœuds de liaison.
- 8 : Grille de protection.
- 9 et 10 : Câble coaxial.
- 11 : Boîte de connexion.
- 12 : (MU11) Voltmètre de crête.
- 13 : (SG1BT) Système de commande manuel et automatique.
- 14 : Résistance d'amortissement
- 15 : Capacité haute tension du diviseur capacitif

La tension d'essai est mesurée à l'aide d'un diviseur de tension capacitif relié au secondaire du transformateur d'essai. Ce diviseur est constitué d'une capacité haute tension  $C = 0.1 \text{ nF}$  en série avec un ensemble de capacités (capacité basse tension, capacité du câble coaxial et capacité d'entrée des appareils de mesure), permettant ainsi de réduire de la tension réelle.

La tension de contournement retenue est la moyenne arithmétique de 20 essais pour chaque cas de conductivité pour une distance entre électrodes de 8cm.

#### IV.2.2.2 Techniques de Mesure du courant de fuite

La mesure du courant de fuite s'effectue par l'intermédiaire du signal tension capté aux bornes d'une résistance  $R_M = 100\Omega$ , insérée en série avec l'objet d'essais et la terre. Cette tension est mesurée à l'aide d'un millivoltmètre. Par suite le courant est déterminé en appliquons la loi d'Ohm.  $I = U/R$

Les essais sont réalisés sur des échantillons vierges et d'autre soumis à des cycles de vieillissement accéléré sous des rayons UV et température contrôlée pour simuler les conditions de l'exploitation des isolateurs de type extérieur.

Après préparation de l'objet d'essai, il a été procédé à la mesure préalable de la tension de contournement pour les différents degrés de sévérité et dispositions de la pollution. La mesure de la tension de contournement nous permet de prévoir les paliers ainsi que le cas limite de la tension à appliquer pour l'enregistrement du courant de fuite. Le courant de fuite retenu pour chaque conductivité est la moyenne arithmétique de cinq essais et la tension appliquée retenue dans notre cas est de 15 kV.

La figure (**fig.28**) représente des photographie du coté haute tension et du coté commande du dispositif expérimental du laboratoire haute tension de l'université A. MIRA de.



(a)



(b)

**Fig.28 Dispositif expérimentale du laboratoire haut de tension de l'université  
Abderrahmane Mira de Bejaia**

(a) Coté commande

(b) coté haut de tension

#### IV.2.2.3 Technique de Mesure de pertes diélectriques

Lorsqu'un diélectrique est soumis à un champ électrique, il se produit à l'échelle moléculaire diverses modifications qui ont pour effet de créer un champ électrique propre à l'intérieur de la substance, s'opposant au champ électrique extérieur appliqué. Cette caractéristique des matériaux isolants solides et liquides porte le nom de permittivité relative  $\epsilon_r$ .

Tout isolant soumis à un champ électrique alternatif est traversé par des courants de conduction et d'absorption qui donnent lieu à des pertes diélectriques. En outre, si une isolation solide n'est pas parfaitement homogène et comporte de petites inclusions d'air ou de gaz, des décharges partielles se produisent à l'intérieur de ces vacuoles, donnant lieu à une



dissipation d'énergie. Le courant total parcourant un isolant est déphasé sur la tension d'un angle  $\phi$  inférieur à  $90^\circ$ . Son complément  $\delta$  est appelé angle de pertes. La tangente de cet angle ( $\text{tg}\delta$ ) est appelée facteur de dissipation. L'indice de pertes d'un isolant ( $\epsilon_r \cdot \text{tg}\delta$ ) est égale au produit de la permittivité relative par son facteur de dissipation.

La station de mesure des pertes diélectriques du laboratoire de haute tension de l'université A. MIRA de Bejaia est composée de :

- Pont de mesure (type 2809) de  $C_x$  et de  $\text{tg}\delta_x$  ;
- Indicateur de zéro (type (5516) ;
- Condensateur étalon (3320,1000pF) ;
- Cellule de mesure pour les isolants solides (type 2914) ;
- Régulateur de température (type 2966) ;
- Transformateur d'isolement LTS002 ;

#### IV.2.2.3.1 Descriptif et principe de mesure

Le pont de mesure fonctionne en conjugaison avec un capteur de courant. Les enroulements primaires variables  $N_1$  et  $N_2$  constituent les branches inférieures du pont, respectivement, du côté  $C_x$  et du côté  $C_N$ , et servent à l'équilibre grossier de  $C_x$ . L'indicateur de zéro, de type 5516, est relié à l'enroulement  $N_1$ . Lorsque le flux magnétique dans le noyau est nul (valeur minimale sur l'indicateur de zéro), le pont est équilibré (**fig.29**).

- Les enroulements  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_{24}$  et  $N_{25}$  sont tous sur le même noyau, mais sont enroulés dans des sens différents.
- L'enroulement auxiliaire  $N_{24}$  sert à l'équilibrage fin de  $C_x$ , et l'enroulement auxiliaire  $N_{25}$  sert à l'équilibrage de  $\text{tg}\delta$ .
- Le micro-ordinateur incorporé calcule les valeurs d'affichage de  $C_x$ ,  $\text{tg}\delta$ ,  $U_{\text{test}}$  et sa fréquence à partir des commutateurs des décades de  $C_x$  et  $\text{tg}\delta$ , ainsi que des valeurs de réglage analogique et numérique de  $C_N$ .



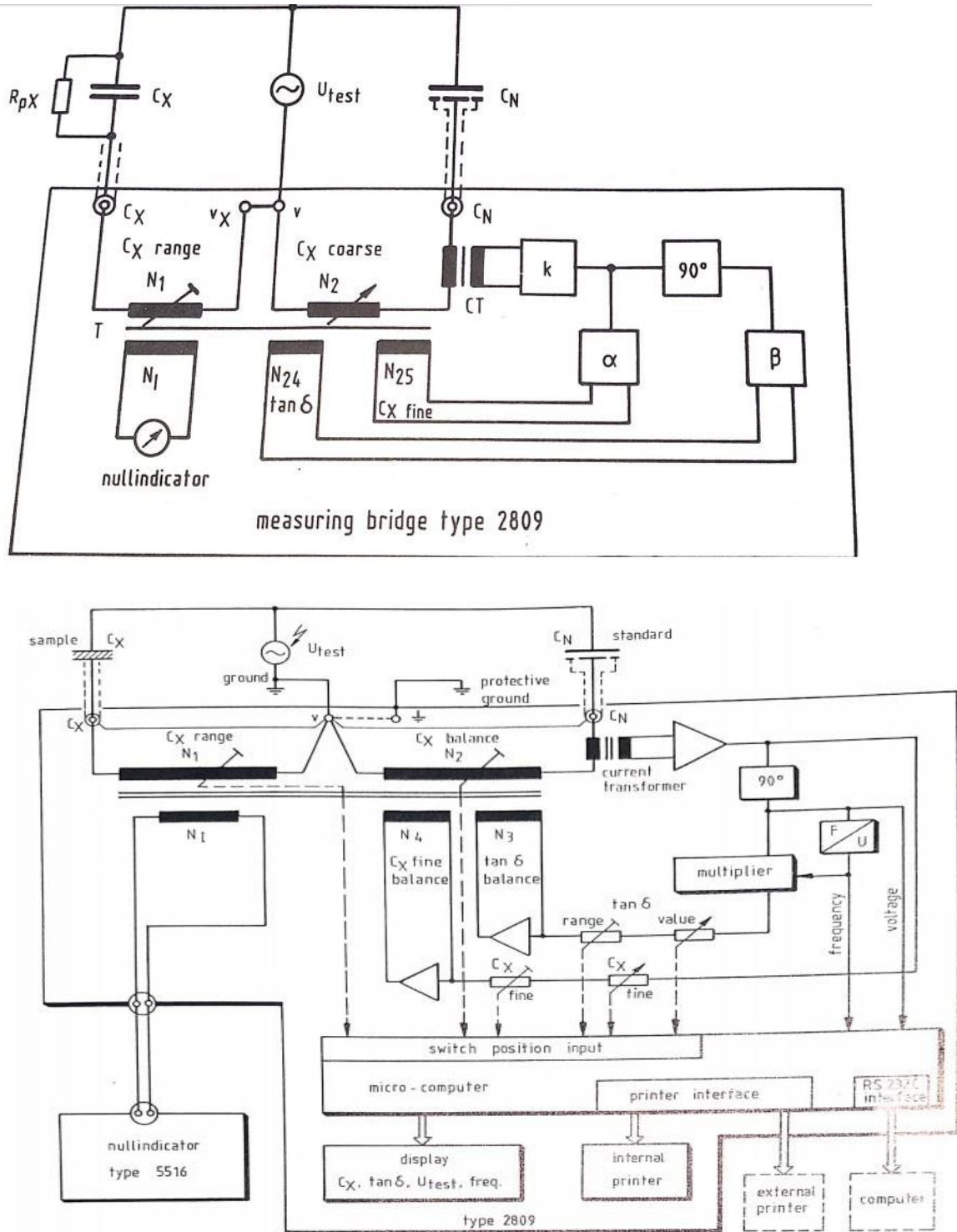


Fig.29 Schéma bloc du pont de Schering

Pour être en adéquation avec les normes CEI 34 32 de 2015 nous avons suivis les étapes suivantes :

**1-** Réaliser le montage de la figure.29 en utilisant la cellule de mesure type2914. (Pour éliminer l'influence de la résistance du câble entre l'alimentation de courant et l'objet d'essai, raccorder le condensateur étalon à la borne de l'objet d'essai).

**2-** Relier V à la terre avec la barrette de mise à la terre.

**3-** Introduire l'échantillon de silicone dans la cellule de mesure.

**4 –** Resserrer les électrodes à l'aide du bouton rotatif, jusqu'à exercer une pression de  $2\text{N/cm}^2$  indiquer sur le manomètre incorporé au cycle.

**5-** Recouvrir la cellule avec la cloche en verre, de sorte que l'interrupteur de sécurité coupe automatiquement la haute tension dès que l'on enlève la cloche de verre de l'appareil.

**6-** Vérifier que le sélecteur de tension d'alimentation (33) est mis sur la bonne tension.

**7-** Sélectionner l'application linéaire « LIN » ou logarithmique « LOG »(20) sur l'indicateur de Zéro.

**8-** Sélectionner le niveau de sensibilité (22) de 1 à 6 pour une opération linéaire et de 4 à 6 pour une opération logarithmique.

**9-** Régler la fréquence à 50Hz sur le sélecteur (24).

**10-** Connecter la prise de terre (25).

**11-** Afficher la température d'essai désirée sur le régulateur de température.

**12-** Vérifier que le sélecteur de tension sur le régulateur de température est mis sur la borne tension.

**13-** Activer la touche POWER sur le régulateur de température.

**14-** Actionner la touche POWER (26) sur l'indicateur de zéro ;

**15-** Mettre l'appareil sous tension, et le laisser chauffer pendant 03 minutes.

**16-** Vérifier la valeur de  $C_N$  réglée sur l'interrupteur de codage (5), qui doit correspondre à celle du condensateur étalon ; la corriger le cas échéant.

**17-** Calculer la valeur maximale attendue du courant d'essai à partir de la formule  $I_x = U \omega C_X$ . Mettre le sélecteur (11) en regard de la gamme de courant correspondant.

**18-** Activer l'alimentation de tension d'essai et augmenter cette tension à la valeur souhaitée.

**19-** Commencer à équilibrer en réglant alternativement la décade  $C_x$  (9 et 10), les éléments d'équilibrage de  $\text{tg}\delta_x$  avec le commutateur de gamme (6), les éléments d'équilibrage grossier et fin (7 et 8) ainsi que le sélecteur de sensibilité (22) sur l'indicateur de zéro, jusqu'à obtenir la valeur de lecture minimale sur celui-ci.

**20-** Dès que l'indicateur de zéro indique une valeur minimale, relever les valeurs de  $C_x$ ,  $\text{tg}\delta_x$  ;

**21-** Calculer la valeur de  $\epsilon_{rx}$  par l'équation 2 ou 3 ;

$$\epsilon_{rx} = \frac{C_x}{C_0} = \frac{C_x}{\epsilon_0 \frac{S}{d}} \dots \dots \dots (1)$$

$$\epsilon_{rx} = 0,5647 C_x d \dots \dots \dots (2)$$

Avec  $C_x$  : Capacité exprimée en pF, mesurée avec la cellule ;

$d$  : Epaisseur de l'éprouvette en cm (à déterminer au palmer) ;

$S$  : surface des plaques en  $\text{cm}^2$ , soit  $20 \text{ cm}^2$  ;

$C_0$  : Capacité à vide exprimée en pF ;

$\epsilon_0$  : Permittivité du vide ( $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$ ).

**22-** Calculer l'indice de perte  $\epsilon_{rx} \text{ tg}\delta_x$  ;

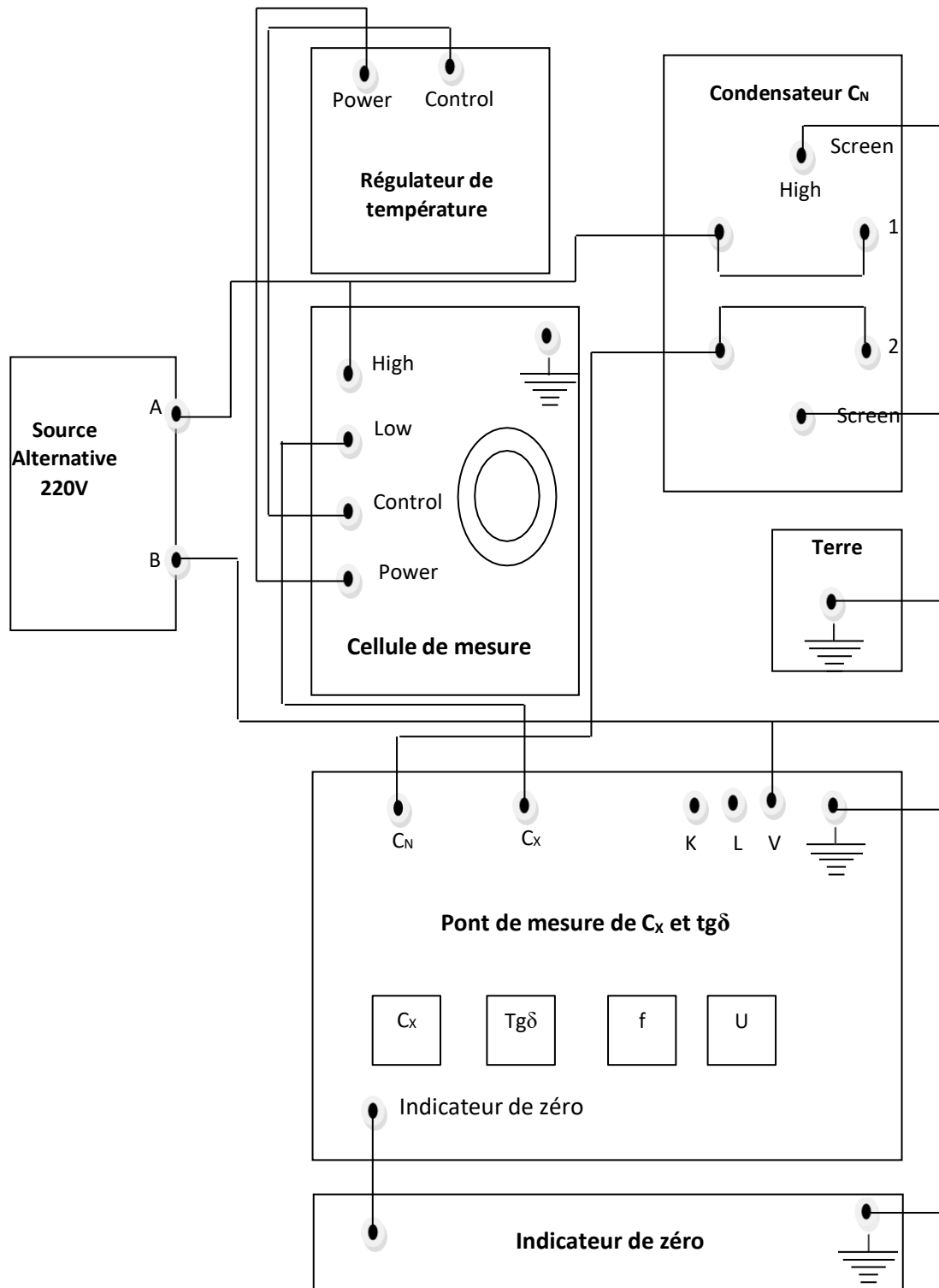


Fig.30 Schémas du branchement de la cellule de mesure de pertes diélectriques



Fig.31 photographie de la cellule de mesure de pertes diélectrique.



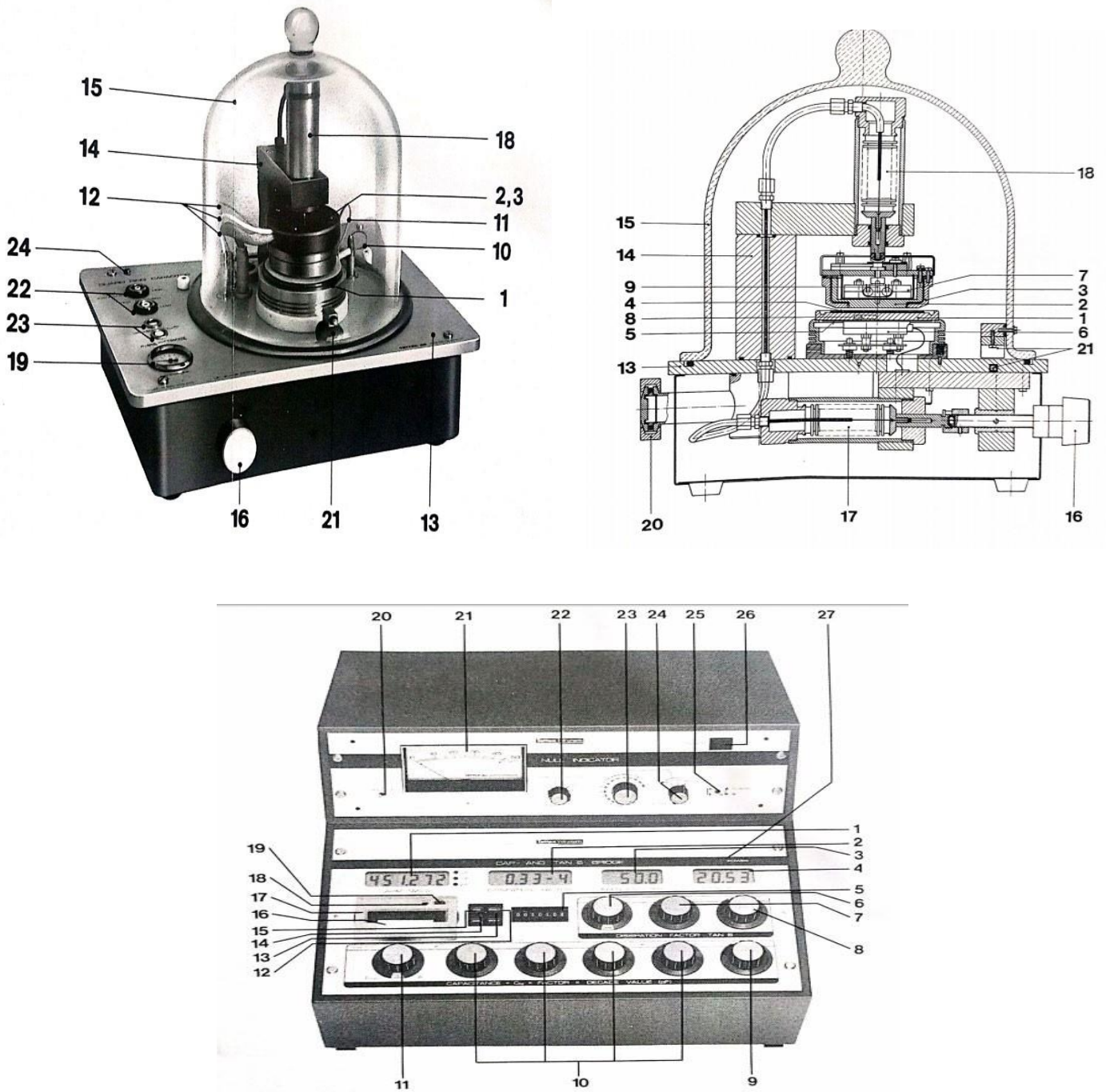


Fig.32 éléments constituant le pont de mesure de pertes diélectriques

#### IV.2.2.4 Technique de mesure de l'angle de contact (tension de surface)

La mesure de la tension de surface d'un matériau hydrophobe est une technique qui permet de quantifier la capacité d'un matériau à repousser l'eau. En effet, la tension de surface d'un matériau est liée à l'interaction entre ses molécules et celle de l'eau. Plus la tension de surface est élevée, plus le matériau est mouillable par l'eau.

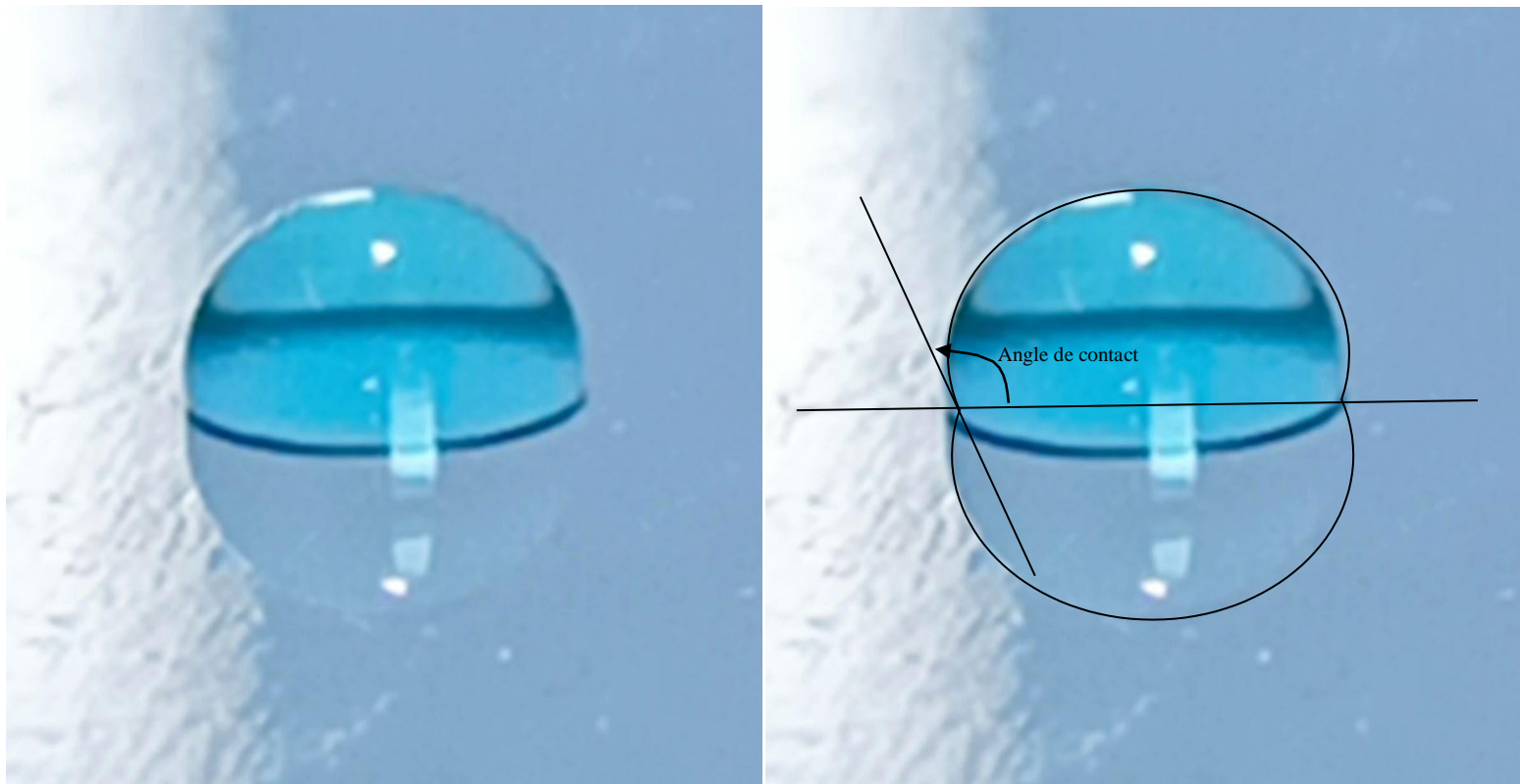
L'angle de contact est une mesure de la capacité d'un liquide à mouiller la surface d'un solide. La forme que prend une goutte sur une surface dépend de la tension superficielle du fluide et de la nature de la surface. À la frontière entre les gouttelettes et l'environnement gazeux, la tension superficielle provoque un contour courbé. Au bord de la goutte, là où le contour se confond avec la surface d'appui, l'angle de contact entre l'interface liquide / solide et la tangente à l'interface liquide / gazeux se forme.

Il existe différentes méthodes pour mesurer l'angle de contact d'un matériau hydrophobe, mais l'une des plus courantes est la méthode de la goutte suspendue qui consiste à :

- 1- Préparer une solution de liquide tensio-actif. Le plus courant est l'eau dé-ionisée avec une petite quantité de tensio-actif, comme le tensio-actif fluoré PFPE.
- 2- Déposer une petite quantité de liquide sur le matériau à l'aide d'une micropipette (**fig.33**).
- 3- Mesurer la forme de la goutte à l'aide d'une image prise par appareil photo ou microscope. Il est important de prendre la mesure avant que la goutte ne s'évapore.
- 4- Utiliser un logiciel pour calculer l'angle de contact du matériau en fonction de la forme de la goutte (**fig.34**).



**Fig .33 Micropipette utilisée pour doser et disposer la goutte d'eau sur la surface de la silicone**



**Fig.34 Tracé de la tangente au point d'interface solide / liquide / gaz**

Il est important de noter que la tension de surface n'est qu'un indicateur de la mouillabilité du matériau par l'eau et que d'autres facteurs, tels que la rugosité et l'adhérence, peuvent également jouer un rôle important dans les interactions entre le matériau et l'eau.

La connaissance de l'angle de contact d'un matériau est un élément de base pour la prise de décision dans la pratique. Dans le domaine d'isolateurs en hautes tensions il convient d'obtenir un mouillage aussi faible que possible. La mouillabilité peut être influencée par un traitement de surface approprié des isolateurs.

#### **IV.2.2.5 Technique de mesure de la dureté**

La mesure de la dureté de la silicone est un élément crucial pour évaluer son aptitude à résister à la dégradation due au vieillissement sous l'effet des rayons UV et de la température. Le vieillissement est une considération essentielle pour les produits en silicone qui sont souvent utilisés dans des environnements hostiles et soumis à des contraintes extrêmes. Parmi les méthodes de mesure les plus courantes figurent la méthode de jet de bille en acier, qui consiste à projeter une bille en acier sur la surface du matériau et à mesurer la ratio de vitesses (vitesse d'impacte – vitesse de rebond) pour en déduire sa dureté. Cette méthode est réputée pour sa simplicité et sa rapidité et est largement utilisée pour évaluer la résistance des produits en silicone aux contraintes mécaniques et aux changements environnementaux.



Les mesures de dureté sont effectuées au niveau du laboratoire de recherche en Mécanique des Matériaux et Maintenance Industrielle (LR3MI) de l'université de Badji Mokhtar d'Annaba à l'aide d'un duromètre Mitutoyo Hardmatic (HH-401) (**fig.35**). Ce test a pour principe le rebond d'un projectile sphérique calibré en carbure à une vitesse déterminée sur le matériau à tester (plus le matériau est dur, plus la hauteur de rebond est importante). Lorsque le projectile frappe la surface, une déformation de surface entraînant une perte d'énergie cinétique. Cette perte d'énergie est calculée via des mesures de vitesse. L'appareil mesure le ratio vitesse de rebond par rapport à la vitesse d'impact. La tension du signal est proportionnelle à la vitesse du projectile et le traitement du signal par le système électronique fournit la lecture de la dureté qui s'affiche à l'écran.



**Fig. 35 Appareil de mesure de dureté**

#### **IV.2.2.6 Technique de mesure de la rugosité**

La mesure de rugosité est une technique de mesure qui permet de quantifier la texture de la surface d'un matériau. La rugosité est définie comme l'ensemble des irrégularités de la surface d'un matériau, qui peuvent être mesurées en termes de hauteur, d'amplitude, de longueur d'onde, de fréquence et de direction.

Les essais de mesure de rugosité sont réalisés au niveau du laboratoire de recherche en Mécanique des Matériaux et Maintenance Industrielle (LR3MI) de l'université de Badji Mokhtar d'Annaba. La station de mesure de rugosité du laboratoire est composée d'un

rugosimètre type SurfTest-201 Mitutoyo (SJ-201M) (fig.36) muni d'un palpeur en diamant avec un mécanisme de déplacement automatique et de stockage de données. Le diamètre de sa pointe est de 5  $\mu\text{m}$ , et se déplace linéairement sur une longueur d'analyse de 4 mm avec une largeur de (0,8x3) mm. Il possède une plage de mesure maximale de 350  $\mu\text{m}$  (-200  $\mu\text{m}$  à +150  $\mu\text{m}$ ) et permet de présenter une texture de surface en utilisant différents paramètres de rugosité.



Fig .36 Appareil de mesure de rugosité

#### IV.2.2.6.1 Critères de la rugosité 2D

Les 3 critères de rugosité suivis lors des mesures sont :

1. L'écart arithmétique moyen du profil,  $R_a$ , AA (*Arithmetic Average*) ou CLA (*Center Line Average*) : Moyenne arithmétique des valeurs absolues des écarts du profil par rapport à la ligne de référence arithmétique à l'intérieur de la longueur de base (Equation 3).

2. L'écart quadratique moyen du profil,  $R_q$  ou RMS (*Root Mean Square*) : Valeur moyenne quadratique des écarts du profil par rapport à la ligne de référence des moindres carrés à l'intérieur de la longueur de base (Equation 4).

3. Pour étudier les pics et les creux présentant les valeurs maximales, le critère  $R_z$  a été choisi pour sa représentation des limites. La somme définit une hauteur de rugosité  $R_{zi}$  comme étant la somme de la plus grande hauteur et du plus profond des creux. Par conséquent, le critère de hauteur moyenne de profil  $R_z$  est défini par la norme *DIN 4768, 1990* (Equation 5).

$$R_a = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} |y| dx \quad (3)$$

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} y^2(x) dx} \quad (4)$$

$$R_z = \frac{1}{n} (R_{z1} + R_{z2} + \dots + R_{zn}) \quad (5)$$

4. Avec :  $l_m$  la longueur de base,  $y$  l'écart par rapport à la référence,  $n$  le nombre de longueurs de base.

5. Ces valeurs sont automatiquement mesurées avec un rugosimètre type SurfTest-201 Mitutoyo (SJ-201M) muni d'un palpeur en diamant avec un mécanisme de déplacement automatique et de stockage de données. Le diamètre de sa pointe est de 5  $\mu\text{m}$ , et se déplace linéairement sur une longueur d'analyse de 4 mm avec une largeur de (0,8x3) mm. Il possède une plage de mesure maximale de 350  $\mu\text{m}$  (-200  $\mu\text{m}$  à +150  $\mu\text{m}$ ) et permet de présenter une texture de surface en utilisant différents paramètres de rugosité. Dans cette étude, les équations suivantes ont été utilisées :

$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{ii=1}^N |Y_{ii}| \quad (6)$$

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{ii=1}^N Y_{ii}^2} \quad (7)$$

$$R_z = \frac{1}{5} \sum_{ii=1}^5 Y_{pi} + \frac{1}{5} \sum_{ii=1}^5 Y_{vi} \quad (8)$$

Avec :  $N$  est le nombre d'événements (pics ou creux),  $Y_i$  est l'écart par rapport à une ligne moyenne,  $Y_{pi}$  est la pic la plus haute et  $Y_{vi}$  étant la profondeur du creux le plus bas.

### IV.3 Résultats et discussions

#### IV .3.1 Observation visuelle

Lors de l'observation visuelle de la surface des échantillons vieillissés sous rayons ultraviolet et température, on a pu remarquer plusieurs changements significatifs. Tout d'abord, la couleur de la surface est devenue plus terne et moins brillante. On remarque que ces échantillons ont commencé à s'éclaircir, et cette décoloration s'accroît au fur et à mesure que la durée d'exposition augmente. Des fissures et des craquelures sont également apparues, témoignant d'une perte de flexibilité du matériau. Ces changements sont dus à la dégradation de la structure moléculaire de la silicone sous l'effet de la chaleur et des UV (**Fig. 37**)

Aussi, on remarque l'apparition de taches jaunâtres réparties sur la surface des échantillons vieillissés, plus la durée d'exposition augmente plus les taches apparaissent sur toute la surface. La décoloration est considérée comme un premier indice de la dégradation du polymère, ainsi

que ça perte de son aspect physico-chimique provoquée par le phénomène de cyclisation intramoléculaire. Ce phénomène initie l'oxydation de surface, qui provoque la perte d'hydrophobicité, enfin la surface de l'élastomère devienne convexe.



**Fig. IV.37 Observation visuelle de la décoloration des échantillons après vieillissement au UV et a la température**

#### **IV. 3.2 Tension de contournement**

Les courbes des **figures (38 et 39)**, montrent l'évolution de la tension de contournement en fonction de la conductivité volumique de l'électrolyte exprimée en  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Pour les deux échantillons considérés, nous remarquons que la variation de la tension de contournement en fonction de la conductivité suit une fonction de puissance ( $U_c = k\sigma^-$ ). Ce résultat est prévisible car l'augmentation de la conductivité de la couche de pollution provoque la diminution de l'impédance équivalente vue des électrodes et la tenue diélectrique se dégrade ainsi de plus en plus. Les deux figures montrent que pour une même valeur de la conductivité volumique, la tension de contournement augmente quand le temps d'exposition aux rayons ultraviolet augmente.

D'après les résultats des courbes de la tension de contournement en fonction de temps d'exposition (**fig.40et fig.41**), le vieillissement des isolateurs polymère dépend fortement du temps d'exposition au rayon ultraviolet. En remarque une diminution quasi linéaire et le pic de vieillissement n'est pas atteint après 1008 heures d'exposition au UV sous une température de  $50^\circ\text{C}$ .

Ces résultats ont mis en avant l'interaction entre le temps d'exposition et la perte d'hydrophobicité. L'efficacité des isolateurs hydrophobes est fortement impactée par l'exposition aux rayons ultraviolets qui est lui-même accentué du fait de la température. Plus le temps d'exposition augmente et pour des tensions de plus en plus petites et sous l'effet du

champ électrique, les forces électriques qui s'exercent sur les gouttelettes de pollution sont suffisantes pour contrer les phénomènes d'hydrophobie de l'isolateur silicone et les gouttelettes s'alignent puis s'étalent sur la surface de l'isolateur pour former un canal d'électrolyte conducteur que l'arc suivra pour le contournement (**figure.42**).

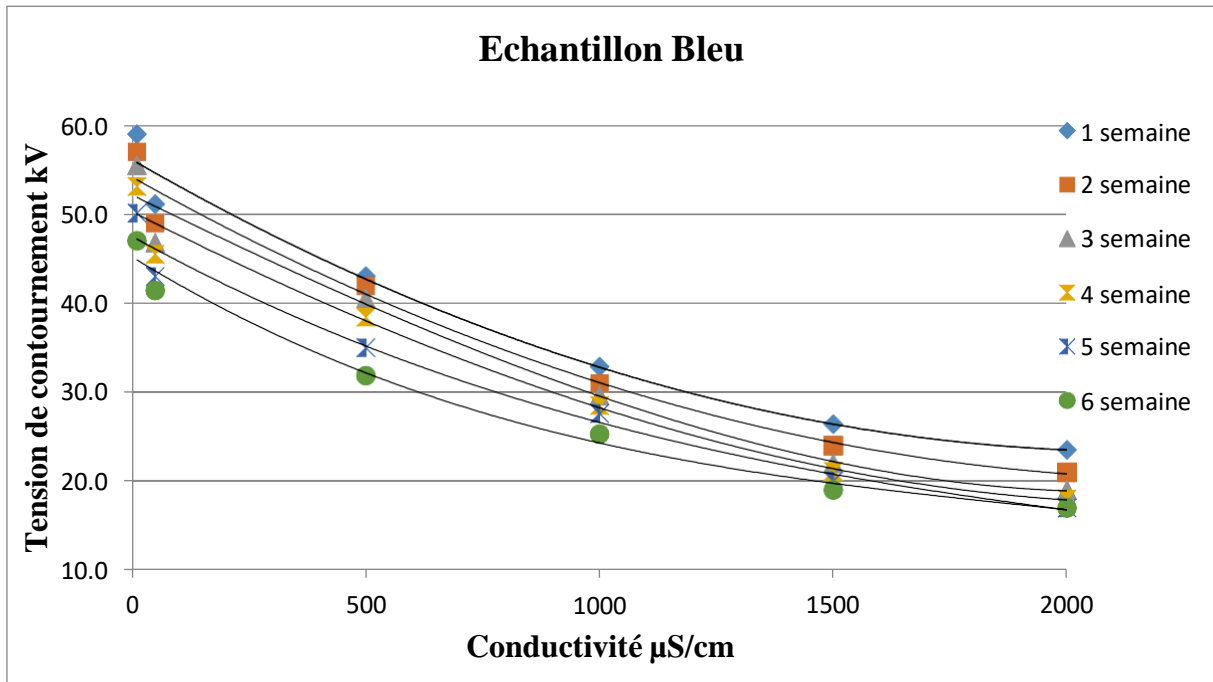


Fig. 38 Tension de claquage de l'échantillon bleu en fonction

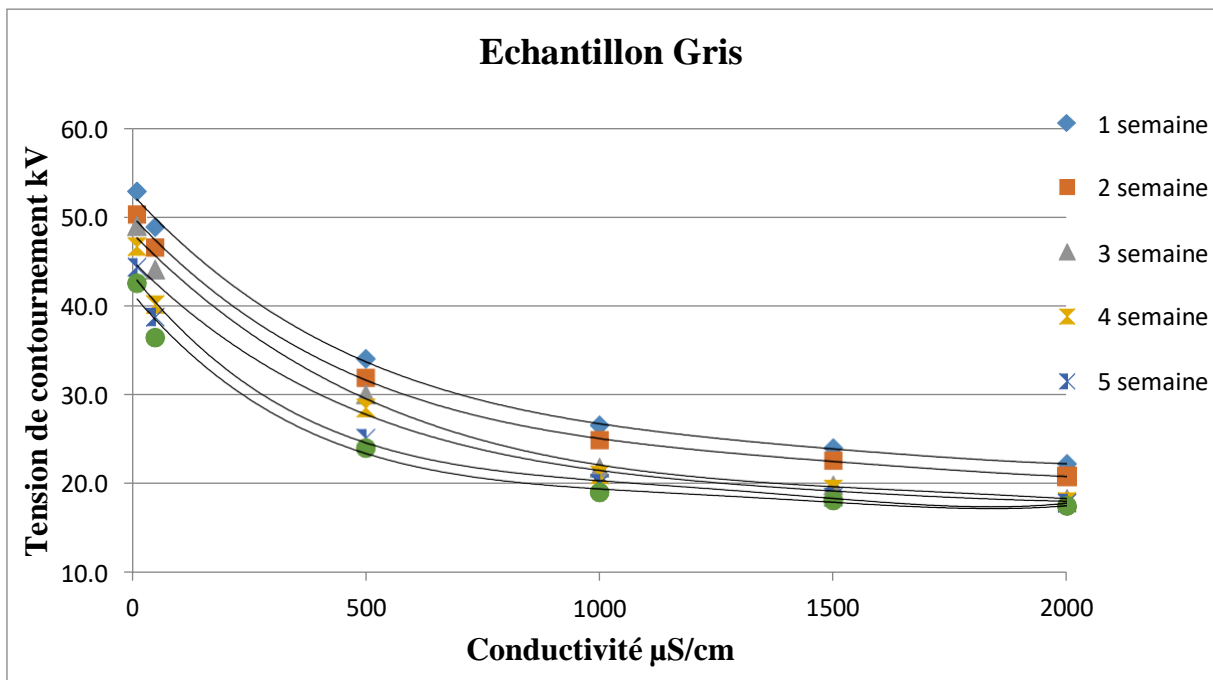


Fig.39 Tension de claquage de l'échantillon gris en fonction de la conductivité

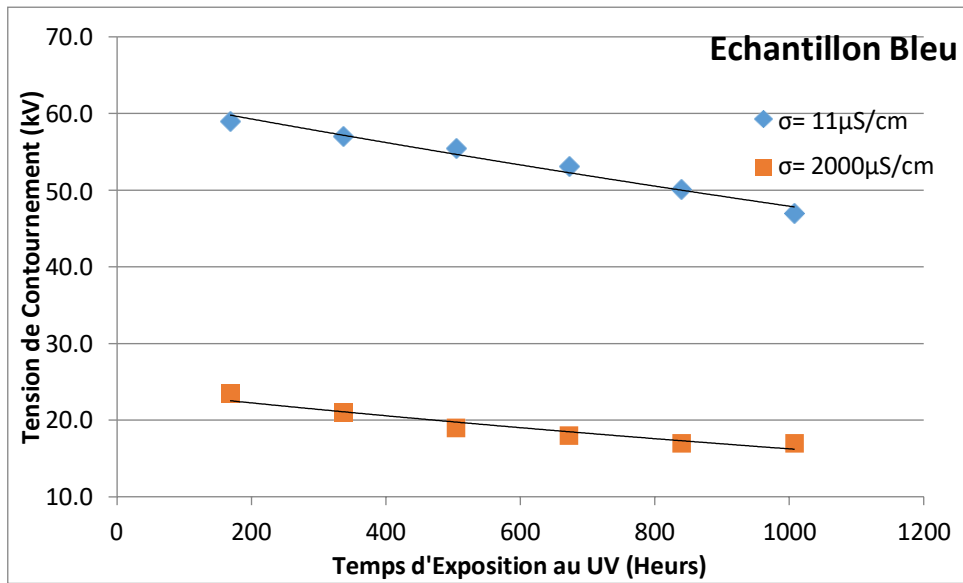


Fig.40 Tension de claquage de l'échantillon bleu en fonction de temps de vieillissement

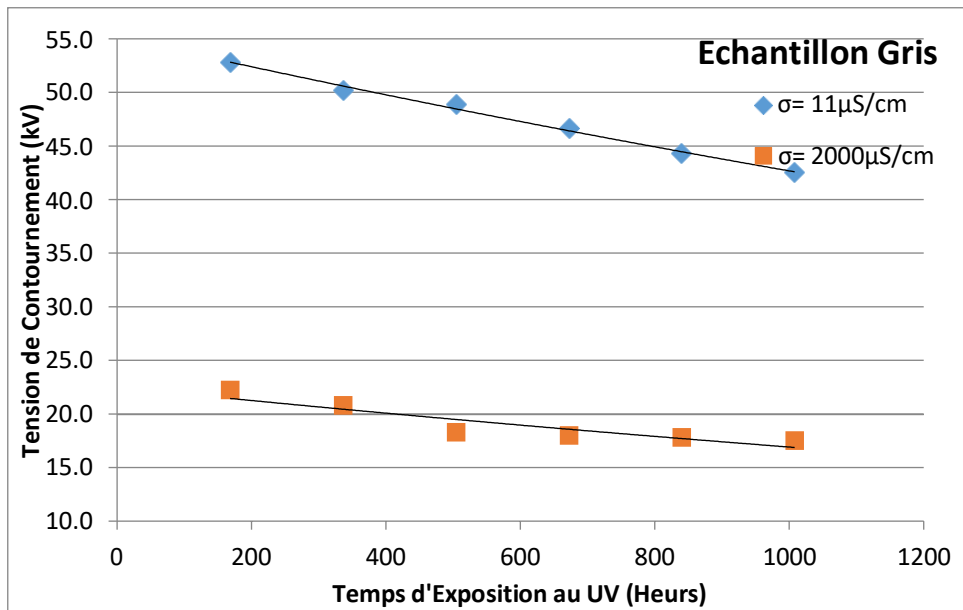
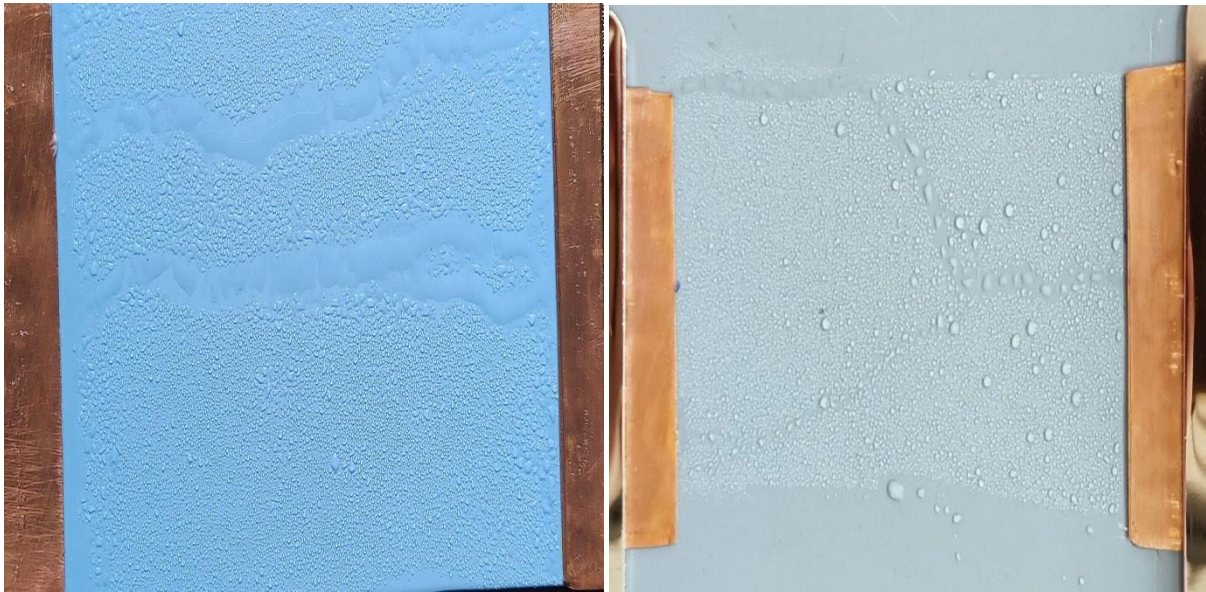


Fig.41 Tension de claquage de l'échantillon gris en fonction de temps de vieillissement





**Fig.42. Formation d'un canal électrolytique suite au passage de l'arc électrique**

### IV.3.3 Courant de fuite

La mesure du courant de fuite est un critère prépondérant pour la caractérisation d'un matériau hydrophobe. Plus le matériau est moins hydrophobe plus la mouillabilité de la surface du matériau est étendue plus le courant de fuite est important.

**Les figure. 43 et 44** montrent les variations du courant de fuite en fonction de la conductivité, pour chaque période de vieillissement et pour une tension appliquée de 15 kV, on peut voir que les valeurs augmentent au fur et à mesure que la conductivité augmente (échantillon vierge et vieillis), les valeurs de courant de fuite pour les échantillons vieillis sont significativement plus élevées que ceux de l'échantillon vierge.

On remarque que l'augmentation de la conductivité sur la surface des échantillons fait augmenter le courant de fuite ce qui est prévisible, et que l'augmentation du temps d'exposition des échantillons au UV fait augmenter aussi le courant de fuite pour le même degré de sévérité de pollution. Du fait que le courant de fuite augmente en fonction du temps d'exposition au UV sous des conditions de laboratoire bien contrôlées, on peut déduire que la mouillabilité est plus importante et les échantillons ont perdus partiellement leurs hydrophobicité.

En remarque aussi que les courbes de courant de fuite en fonction du temps d'exposition (**Fig. 45 et 46**) ont une tendance quasi-linéaire et le vieillissement maximal n'est pas atteint après 1008 heures d'exposition.

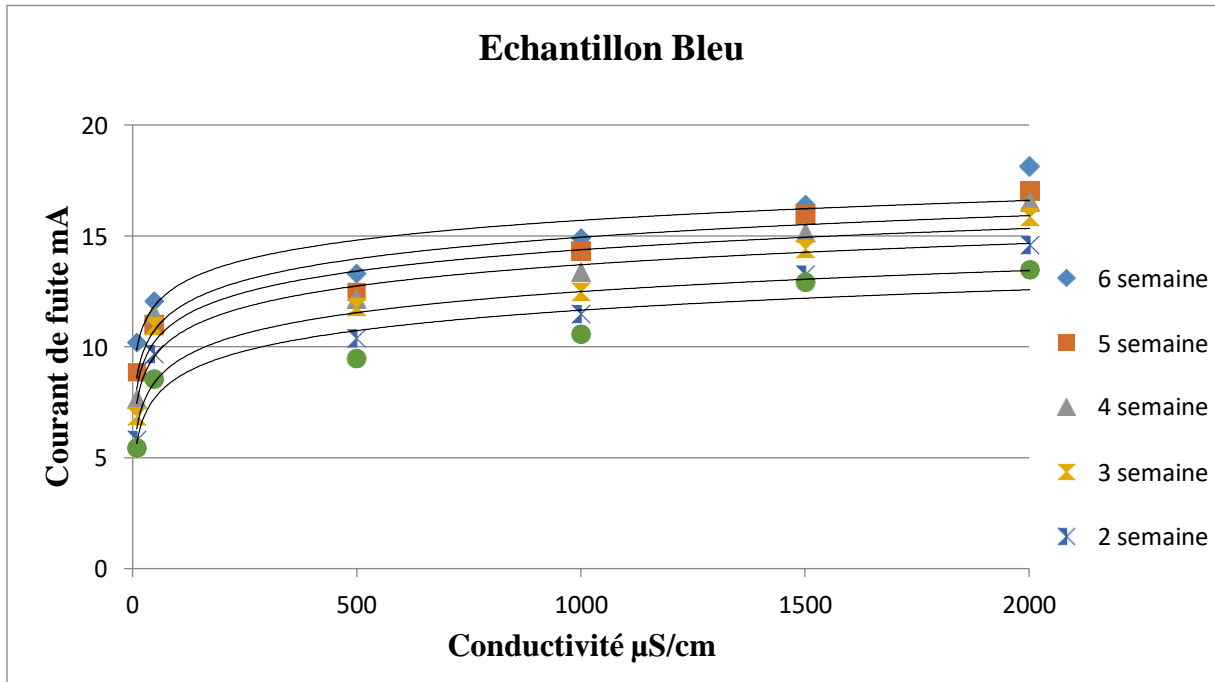


Fig.43 Evolution du courant de fuite en fonction de la conductivité

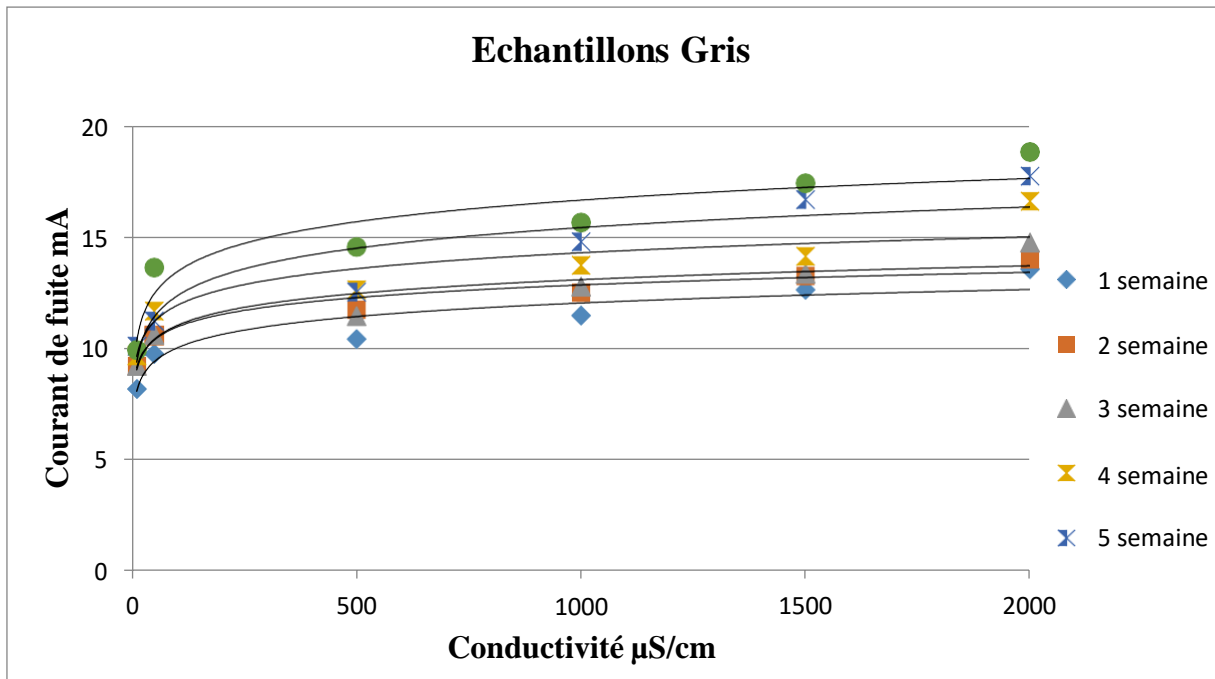


Fig..44. Evolution du courant de fuite en fonction de la conductivité



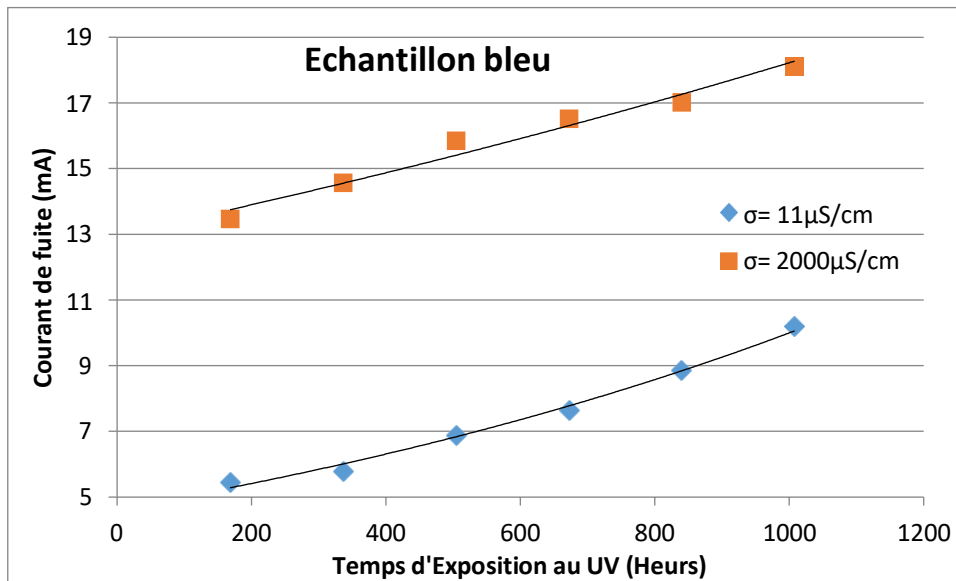


Fig.45. Evolution du courant de fuite en fonction du temps de vieillissement

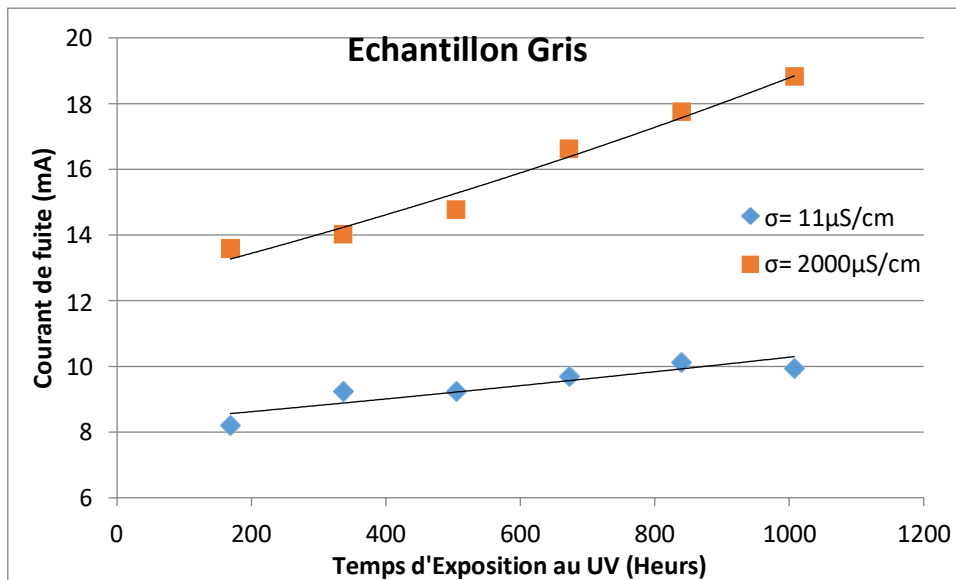
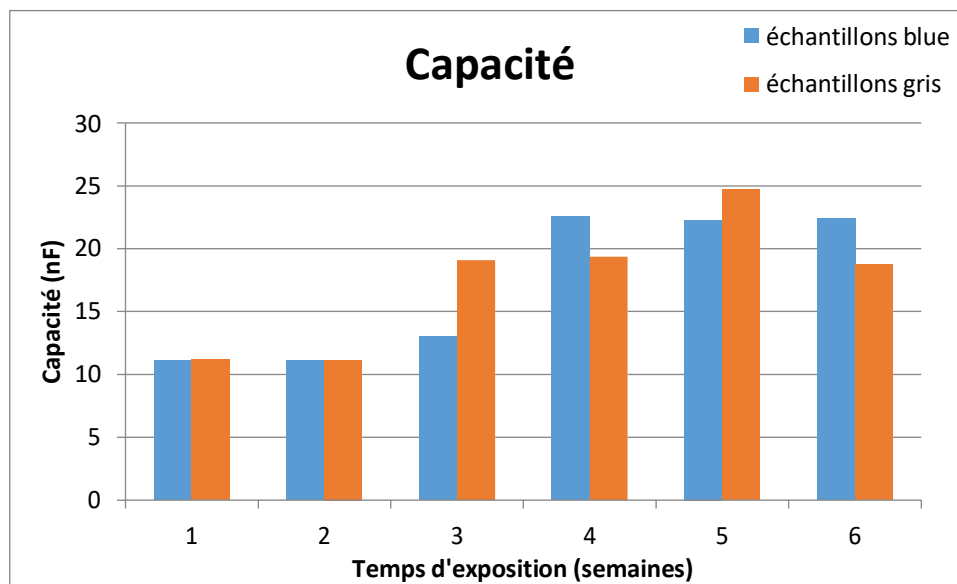


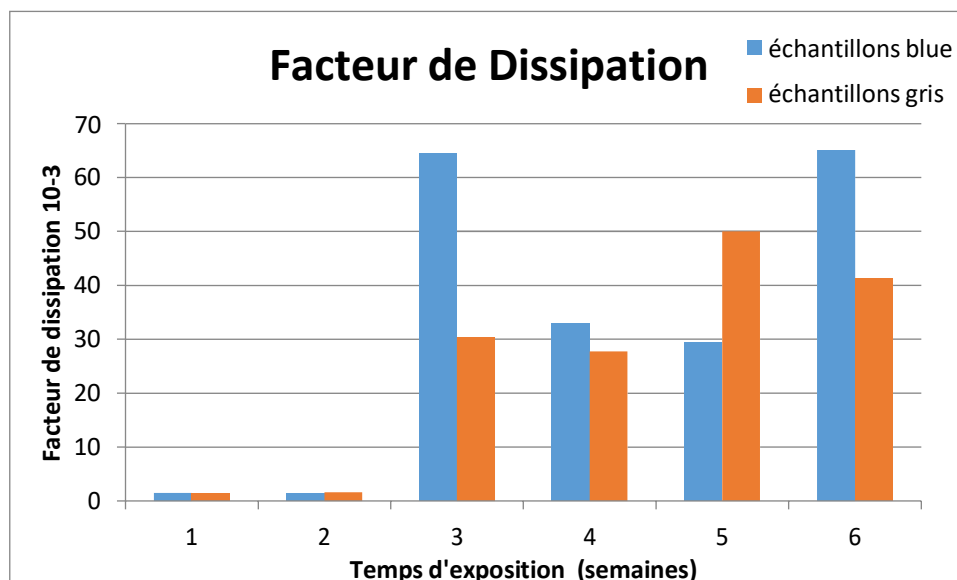
Fig.46. Evolution du courant de fuite en fonction du temps de vieillissement

#### IV.3.4. Facteur de dissipation

Les mesures de  $C_x$  et  $\text{tg}\delta$ , sont représentés respectivement sur les figure 47 et 48. Nous remarquons l'augmentation de la valeur de  $\text{tg}\delta$  après exposition aux rayons ultraviolets. Même constat a été rapporté dans des investigations précédentes. Nous remarquons une augmentation importante après la troisième semaine d'exposition puis se stabilisant cela s'explique par un début de dégradation en surface des échantillons et les rayons UV ne sont pas suffisamment puissants pour pénétrer en profondeur de la matière.



**Fig.47. Evolution de la capacité des échantillons en fonction de temps de vieillissement**



**Fig.48. Evolution du facteur de dissipation en fonction de temps de vieillissement**

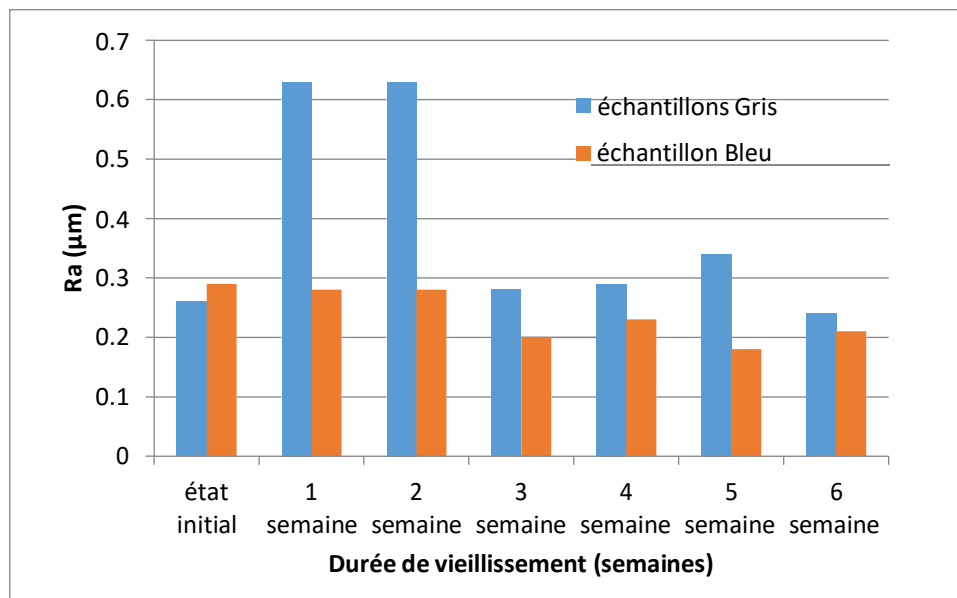
#### IV.3.5 Rugosité et dureté

La mesure de la dureté et la rugosité des échantillons nous permet d'étudier l'effet des UV sur la morphologie de nos échantillons en silicones.

Une surface, quelque soit son procédé de fabrication, n'est pas une surface parfaitement lisse : selon la méthode d'usinage et les outils utilisés, mais aussi selon le matériau, elle présente de nombreuses irrégularités, micro-géométriques ou macro-géométriques. Ces irrégularités sont définies par comparaison avec une ligne "moyenne" et sont classées en deux catégories : des aspérités ou "pics", et des cavités ou "creux". L'ensemble de ces défauts de surface constitue la rugosité.

Les trois critères de rugosité considérés montrent une nette augmentation durant les deux premières semaines d'exposition puis ils se stabilisent à des niveaux plus faibles (figures 49, 50 et 51). Dans notre cas nous pouvons l'expliquer par une chimi-cristallisation partielle au sein du matériau suite à l'ordonnement partiel des chaînes moléculaires lors de la solidification qui survienne après le ramollissement de la silicone suite à son exposition aux rayons ultraviolets combinés à une température de 50°.

La figure 52 représente la dureté de la silicone en fonction du temps de vieillissement en remarque un ramollissement de notre matériau durant les quatre semaines de vieillissement puis un durcissement a tendance croissante. Des études et testes complémentaires sont nécessaires pour élucider le phénomène.



**Fig.49 L'écart arithmétique moyen du profil des échantillons en fonction de temps de vieillissement**

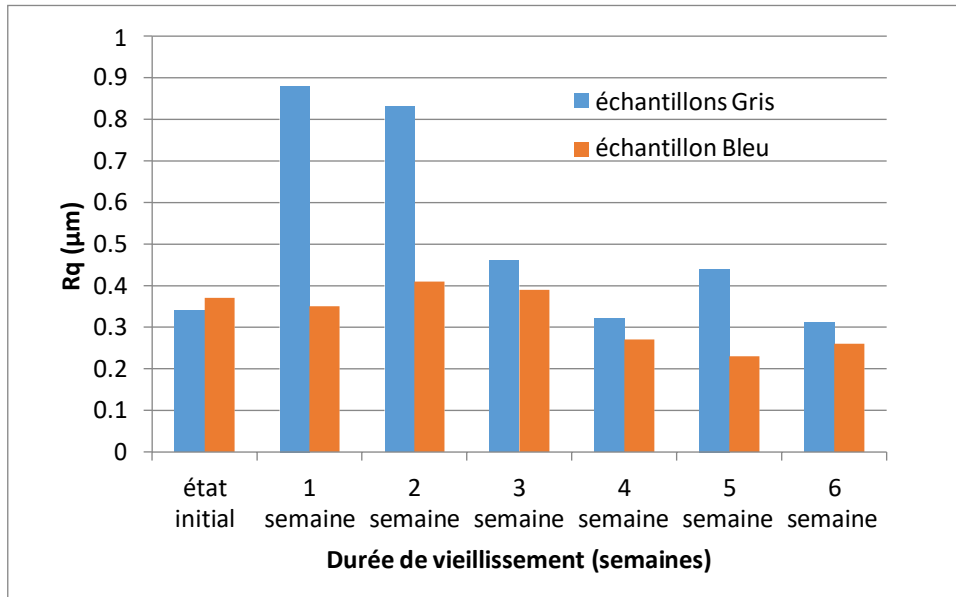


Fig.50 L'écart quadratique moyen du profil des échantillons en fonction de temps de vieillissement

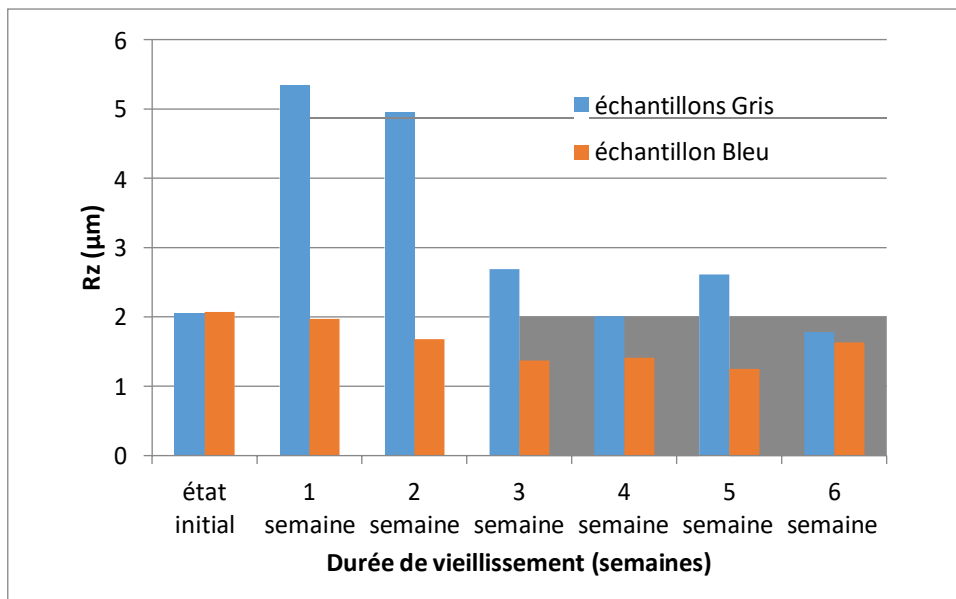
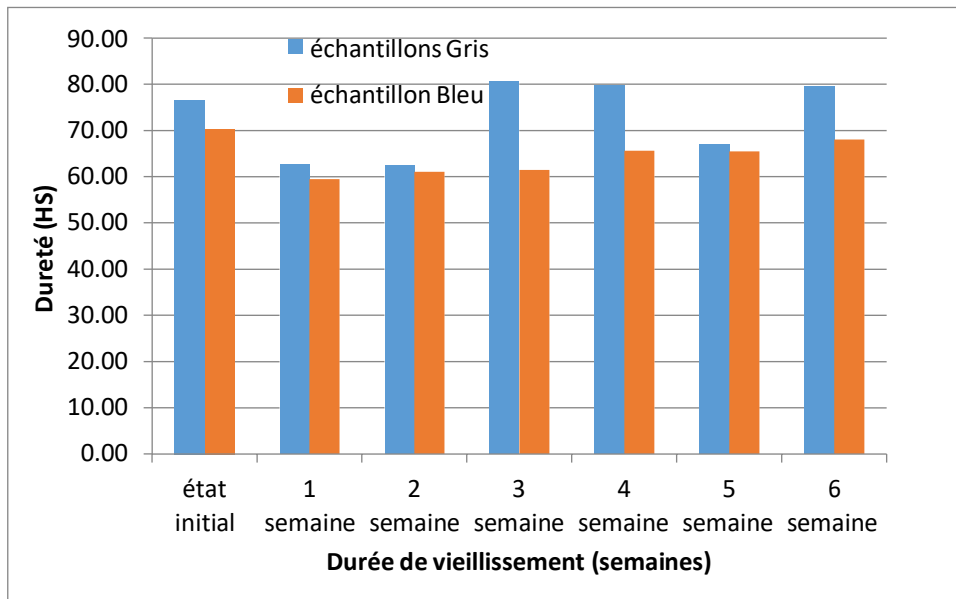


Fig.5 :.La hauteur moyenne du profil des échantillons en fonction de temps de vieillissement

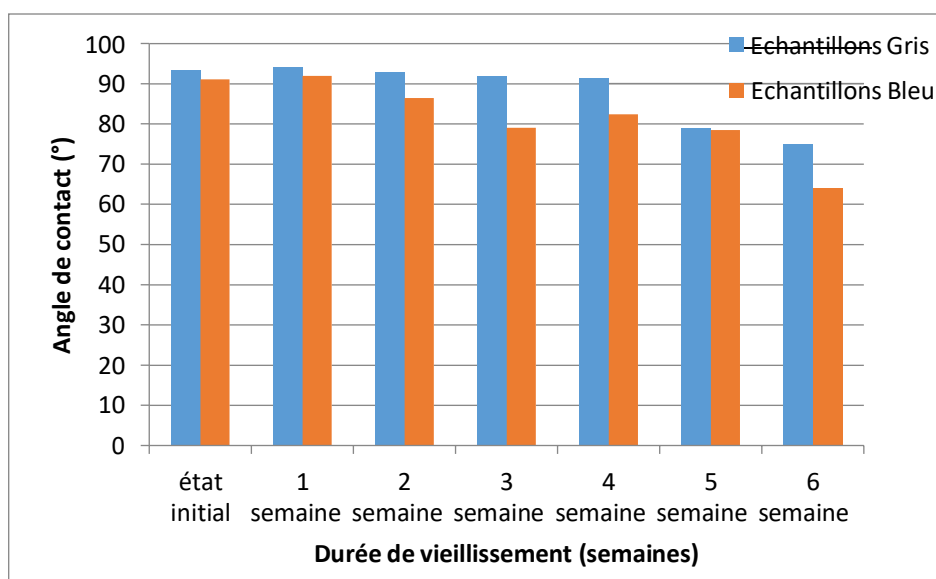


**Fig.52 : Evolution de la dureté shore (HS) en fonction du temps de vieillissement**

#### IV.3.6 Angle de contact

La mesure de l'angle de contact permet de déterminer la capacité d'un liquide à mouiller la surface d'un solide. La forme que prend une goutte sur une surface dépend de la tension superficielle du fluide et de la nature de la surface (chimie, rugosité).

L'historgramme de la figure.53 représente l'angle de contact mesuré en fonction du temps de vieillissement. En remarque une légère augmentation au début d'exposition qui coïncide avec la période de ramollissement de notre matériau, suivi par une diminution constante pour atteindre les 29% après 6 semaines d'exposition dans le cas des échantillons de couleur bleu.



**Fig.53 Evolution de l'angle de contact des échantillons en fonction de temps de vieillissement**

## IV. Conclusion

Les résultats obtenus lors de l'étude de l'influence des rayons ultraviolets et de la température sur la silicone nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

- L'exposition prolongée aux rayons ultraviolets et à température d'exploitation extrême a provoqué une décoloration de la silicone qui s'accroît au fil du temps d'expositions avec apparition de taches jaunes.
- Une perte d'hydrophobie et diminution de l'angle de contact est remarquée après chaque cycle de vieillissement accéléré pour tous les échantillons.
- Les angles de contact sont extrêmement sensibles à la dégradation des surfaces et sont donc un excellent indicateur de l'état d'oxydation de l'échantillon.
- L'augmentation du temps de vieillissement provoque la réduction de la tension de claquage des isolateurs à base de silicone.
- L'augmentation du temps de vieillissement provoque l'accroissement des courants de fuite des isolateurs à base de silicone.
- Il est observé que l'effet de la pollution sur le courant de fuite et la tension de claquage est accentué suite à l'exposition aux rayons UV et à la température. De plus, leur combinaison avec la pollution salinée augmente largement le courant de fuite, et diminue considérablement la tension de claquage.
- La rugosité et la dureté sont de très bon indicateur de l'état de surface d'un matériau, des rugosités particulières peuvent procurer au matériau la propriété de super hydrophobie.

# **Conclusion générale**

L'objectif de ce travail était de contribuer à la compréhension du phénomène de vieillissement accéléré sous UV et température de 50C° des isolateurs silicones. Les principaux résultats d'analyse et discussion, expérimentaux obtenus durant l'expérience, sont les suivants :

Il existe une corrélation entre l'hydrophobicité de surface du matériau et ses propriétés diélectriques quelque soit le type ou le degré de la contrainte. De plus, la tension de contournement est bien corrélée au facteur de dissipation diélectrique quelque soit le type de contraintes (température ou salinité) ou leurs degrés. Ce qui suggère l'angle de contact (l'hydrophobicité), est un paramètre déterminant quant à la tenue diélectrique des isolateurs silicones étudiés.

La contrainte thermique semble affecter différemment l'hydrophobicité et la tension de surface du matériau en silicone. Le vieillissement thermique affecte aussi les propriétés diélectriques du matériau en silicone. Il augmente les pertes diélectriques dans les basses fréquences, ceci s'accompagne d'une diminution de la rigidité diélectrique de la surface du matériau vieilli. L'hydrophobicité du matériau vieilli diminue (perte d'hydrophobie) avec la durée d'exposition aux rayons ultraviolets.

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 du fait que le niveau maximum du vieillissement n'est pas atteint après les 1008 heures d'exposition. Les rayonnements UV entraînent également une réduction de la tension de contournement.

Les mesures de facteur de pertes diélectriques 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.

La mesure du courant de fuite sur la surface de l'isolateur pollué peut révéler le degré de dégradation de l'isolateur suite à une contrainte de vieillissement.

L'angle de contact peut être utilisé comme un outil pour évaluer l'hydrophobicité du matériau en silicone.

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.



# Référence bibliographiques

- [1] 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.
- [2] M. Nemamcha, « cours sur le claquage des isolants haute tension », 2001.
- [3] A. Chabloz, « Technologie des matériaux à l'usage des professions de l'électricité », 1986
- [4] Philippe Robert, « matériaux de l'électrotechnique » édition Georgie 1979.
- [5] X. Ducouret, « Lignes aériennes : matériels », *Techniques de l'ingénieur*, D4423.
- [6] Ducouret ,X. Réseaux électriques mixtes : lignes aériennes : matériels, isolateurs.
- [7] M.Terkmani, M .Bouamer, « Contournement des isolateurs des lignes de haute tension », PFE, USTO, Juin 2005.
- [8] CHAKOU Abdelkarim, DJEMMAA Mohamed « Elaboration d'un modèle dynamique de contournement d'un isolateur pollué sous une tension impulsionnelle» Projet de fin d'Etudes, Département d'électrotechnique, Université Kasdi Merbah–Ouargla, juin 2012.
- [9] F.Amidi, K.Ouerdane, « Les effets de la pollution sur les ouvrages électriques à 30 kV en régions littorales », Projet de fin d'Etudes, Département d'électrotechnique, Université des Sciences et Technologies Houari Boumediene, Bâb Ezzouar, juin 1998.
- [10] A. Mekhaldi, « Etude des Phénomènes de Conduction et de Décharge Electrique sur des Surfaces Isolantes Polluées sous Tension Alternatives 50 Hz », Thèse de doctorat, ENP, Département de Génie Electrique, Laboratoire de haute tension, Septembre 1999.
- [11] CEI 60 - 1, « Techniques des Essais à Haute Tension Définitions et Prescriptions Générales relatives aux Essais », Deuxième Edition, 1989.
- [12] M. Tegar, « Etude Mathématique des Mécanismes de Développement des Décharges Électriques sur des Isolateurs Installés en Régions Polluées », Thèse de Magister ENP, Juillet 1993.
- [13] W. Heise, G.F, luxa, G.Revrery, M. P. Verma, « Estimation de la méthode d'essais sous pollution artificielle par couche solide », CIGRE, rapport 33-09, Paris. France, 1982.

- [14] GUIA Talal, « Comportement d'un Modelé D'isolateur Sous Tension Impulsionnelle » Mémoire de Magister, en Génie Electrique (Electrotechnique) à l'ENP, 10, Avenue Hassen Badi, BP 182, El-Harrach, Alger, Algérie.
- [15] . A.Tilmatine, « Isolateurs des lignes aérienne haute tension », cours chapitre 6, juin 2002.
- [16] Boudjamaa Med Abdelhakim, Sebti Redouane, « Modélisation Des Phénomènes de Pollution Des Isolateurs de Haute Tension » Projet de fin d'Etudes, Département Electrotechnique Industriel, Université Kasdi Merbah–Ouargla, juin 2012.
- [17] Mr. Sid Ahmed Bessedik, « Contournement des isolateurs pollutes », these de doctorat, Département d'électrotechnique, Option: Haute Tension et Décharges Electriques. Université des Sciences et de la Technologie D'Oran Mohamed Boudiaf, Soutenue le 28 juin 2015.
- [18] Silicone, H.Guivier, « techniques de l'ingenieur » A3475.
- [19] J. Dunogues, M. Pouchard, Silicium, « ENCYCLOPAEDIA UNIVERSALIS », 2011.
- [20] L. Carette, M. Pouchol, Silicones, dans : Traité plastiques et composites: Techniques de l'ingénieur, 2001, A3475
- [21] Bulletin technique Wacke, « Silicones. Composés et propriétés» , 1993.
- [22] Les silicone, G.Schorsch Techno-Nathan International 1988
- [23] L. Carette, J.M.Pouchol, Les Silicones, Matières Thermodurcissables: Monographie, Les Techniques de l'ingénieur, Plastique et composite, A3475, 2005.
- [24] J. Verdu, Vieillissement des plastiques, AFNOR Technique, Edition Eyroles, Paris 1984.
- [25] Christiane Bär, « Untersuchungen zum Einfluss der Prüfspannungsart auf die Hydrophobiebeständigkeit sowie die ochspannungskriechstromfestigkeit von polymeren Isolierstoffen », Faculté de génie électrique et informatique dans le Département de génie électrique et technologie de l'information / technologie de l'énergie électrique de l'Université des sciences appliquées de Zittau / Görlitz pour l'obtention du diplôme universitaire Ingénieur diplômé (FH)
- [26] M. Plopean, P.V. Notingher, C. Stancu, S. Grigorescu, Electrical ageing of polyethylene power cables insulation subjected to an electric field in the presence of water, The 7th International Conference on Advanced Topics and Electrical Engineering, 12-14 May 2011,

- [27] Bucharest, Romania [24] A.Motori, F. Sandrolini, G.C. Montanari, "Chemical, physical and microstructural properties of thermally aged XLPE cable models", IEEE, Conference Record of the International Symposium on Properties and Applications of Dielectric Materials, pp. 764-768, Beijing, China, September 12-16 1988.
- [28] A. Seyni, "Propriétés physico-chimiques et d'usage de matériaux composites à charge dégradable produits par co-broyage," Université de toulouse, 2008.
- [29] G. Teyssebre and L. Boudou, "Polymères et composites pour l'électrotechnique," Tech. l'Ingénieur, no. D2335, 2010.
- [30] "International Electrotechnical Vocabulary (IEV)," vol. 50, no. 471, p. 10, 1984.
- [31] W.-K. Chen, The Electrical Engineering Handbook. Elsevier academic press edition, 2004.
- [32] S. Orłowska, "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.
- [33] "Code d'essai de vieillissement des isolateurs composite," EDF, no. HN 66-E-01, p. 21, 1989.
- [34] X. Ducouret, "Lignes aériennes : matériels - Isolateurs," Tech. l'Ingénieur, no. D4423, 2004.
- [35] Muhsin Tunay Gencoglu, « The comparison of ceramic and non-ceramic insulators », e-Journal of new world sciences academy, vol. 2, N°. 4, pp. 274-294, 2007.
- [36] Y. Khan, "Hydrophobic characteristics of EPDM composite insulators in simulated arid desert environment," World Acad. Sci. Eng. Technol., vol. 33, pp. 750–755, 2009.
- [37] A. Küchler, High voltage engineering: Fundamentals · Technology · Applications. Springer Vieweg, 2018.
- [38] R. Hackam, "Outdoor HV composite polymeric insulators," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 6, no. 5, pp. 557–585, 1999.
- [39] T. Young, «An essay on the cohesion of fluids, phys. rev. lett. » , vol. 95, pp. 65-87, 1805.

- [40] 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.
- [41] N. Drozdov and N. Nikouline, *Matériaux électriques*. École supérieure MOSCOU, 1973.
- [42] 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.
- [43] M. T. Nazir, B. T. Phung, and M. Hoffman, "Performance of silicone rubber composites with SiO<sub>2</sub> micro/nano-filler under AC corona discharge," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 23, no. 5, pp. 2804–2815, 2016.
- [44] 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.
- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] 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.
- [48] 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.
- [49] M. T. Nazir, B. T. Phung, and M. Hoffman, "Performance of silicone rubber composites with SiO<sub>2</sub> micro/nano-filler under AC corona discharge," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 23, no. 5, pp. 2804–2815, 2016..
- [50] K. O. Papailiou and F. Schmuck, *Silicone Composite Insulators: Materials, Design, Applications*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013.

- [51] S. Feier-Iova, "The Behaviour of Water Drops on Insulating Surfaces Stressed by Electric Field," Universität Darmstadt, 2009.
- [52] 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.
- [53] 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.
- [54] A. Phillips et al., "Electric fields on AC composite transmission line insulators," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 23, no. 2, pp. 823–830, 2008.
- [55] M. H. Nazemi, "Experimental Investigations on Water Droplets on Polymeric Insulating Surfaces under the Impact of High Electric Fields," Universität Darmstadt, 2015.
- [56] 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.
- [57] 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.
- [58] 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.
- [59] 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.
- [60] 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
- [61] 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.

- [62] 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.
- [63] 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.
- [64] 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.
- [65] 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.
- [66] 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.
- [67] 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.
- [68] 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.
- [69] 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.
- [70] 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.
- [71] 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.

- [72] 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.
- [73] M. T. Nazir and B. T. Phung, "Accelerated ultraviolet weathering investigation on micro-/nano-SiO<sub>2</sub> filled silicone rubber composites," *High Volt.*, vol. 3, no. 4, pp. 295–302, 2018.
- [74] 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.
- [75] E. M. Savadkoobi 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.
- [76] 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.
- [77] 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.
- [78] 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.
- [79] 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.
- [80] 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.
- [81] T. G. Gustavsson, "Silicone rubber insulators-impacts of material formulation in coastal environment," *Chalmers University of Technology*, 2002.

- [82] 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
- [83] 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.
- [84] 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.
- [85] 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.
- [86] 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.
- [87] 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.
- [88] 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.
- [89] 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.
- [90] 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.
- [91] 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.



- [92] 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.
- [93] 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.
- [94] 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.
- [95] 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.
- [96] 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.
- [97] 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.
- [98] 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.
- [99] 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.
- [100] 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.
- [101] 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.
- [102] 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.

- [103] 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.
- [104] 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.
- [105] J. Gardette, "Caractérisation des polymères par spectrométrie optique," *Tech. l'Ingénieur*, no. AM3271, 1989.
- [106] K. Lepinay, "Développement et applications de la tomographie chimique par spectroscopie EDX," Institut national des sciences appliquées (INSA) de Lyon, 2013.
- [107] A. V. Walker, *Secondary ion mass spectrometry*, 3rd ed. Elsevier Ltd., 2016.
- [108] 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.
- [109] C. J. G. Plummer, "Caractérisation des polymères par microscopie électronique," *Tech. l'Ingénieur*, no. AM3282, 2001.
- [110] 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.
- [111] 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.
- [112] 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.

## **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. 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, 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 tension de contournement, de la rugosité et dureté du matériau, du facteur de dissipation diélectrique. Une corrélation est faite entre les propriétés électriques/diélectriques de l'isolateur et son hydrophobicité.

Les propriétés électriques/diélectriques 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, aussi en a mesuré le degré de mouillabilité de surface par l'étude de l'angle de contact (la forme que prend la goutte sur la surface du solide), ainsi que l'étude de dureté et rugosité (l'effet des (UV) sur la morphologie de nos échantillons en silicone)

### **Abstract**

During their service, silicone composite insulators are exposed to several constraints such as: temperature, ultraviolet (UV) radiation and atmospheric pollution. Given their importance in the aging phenomenon, the impact of these stresses on the surface and internal properties of the insulator, during a long-term accelerated aging cycle. An investigation is made on a prototype silicone composite insulator to study the consequences of aging on its hydrophobicity, its electrical and dielectric properties, as well as its flashover voltage.

To follow the evolution of the properties of the insulator during the aging cycle, different measurements are used, namely the measurement of the contact angle, the surface current, the flashover voltage, the roughness and the hardness of the material, the dielectric dissipation

factor. A correlation is made between the electrical/dielectric properties of the insulator and its hydrophobicity.

The electrical/dielectric properties of the electric field at the surface of the insulator in the clean state and in the presence of water droplets. A study on the surface dielectric strength of the insulator is carried out, the influence of the stresses applied as well as the surface condition of the insulator on its flashover voltage are investigated. In order to see the impact of aging on the ability of the insulator to dissipate surface charges after a possible flashover, an approach is proposed consisting in measuring the surface transient current of the insulator, also measuring its degree of surface wettability by the study of the contact angle (the shape that the drop takes on the surface of the solid), as well as the study of hardness and roughness (the effect of (UV) on the morphology of our silicone samples).

### ملخص

والتلوث أثناء الخدمة، تتعرض عوازل مركب السيليكون لعدة قيود مثل: درجة الحرارة، والأشعة فوق البنفسجية الجوي. نظرًا لأهميتها في ظاهرة الشيخوخة، فإن تأثير هذه الضغوط على السطح والخصائص الداخلية للعازل، خلال دورة الشيخوخة المتسارعة طويلة المدى. تم إجراء تحقيق على نموذج أولي من عازل مركب من السيليكون لدراسة عواقب الشيخوخة على مقاومته للماء، وخصائصه الكهربائية والعازلة، فضلاً عن جهد الفلاش. لمتابعة تطور خصائص العازل أثناء دورة الشيخوخة، يتم استخدام قياسات مختلفة، وهي قياس زاوية التلامس، والتيار السطح، والجهد الكهربائي، وخشونة المادة وصلابتها وعامل تبديد العزل الكهربائي. يتم عمل ارتباط بين الخواص الكهربائية / العازلة للكهرباء للعازل ونفاذه للماء الخواص الكهربائية / العازلة للمجال الكهربائي على سطح العازل في الحالة النظيفة وفي وجود قطرات الماء. يتم إجراء دراسة على قوة العزل السطحي للعازل، ويتم فحص تأثير الضغوط المطبقة وكذلك حالة سطح العازل على جهد الفلاش. من أجل رؤية تأثير الشيخوخة على قدرة العازل على تبديد الشحنات السطحية بعد حدوث وميض ضوئي محتمل، تم اقتراح نهج يتكون من قياس التيار العابر السطحي للعازل، وكذلك قياس درجة قابلية ترطيب السطح من خلال دراسة زاوية التلامس (الشكل الذي يتخذه القطرة على سطح المادة الصلبة)، وكذلك دراسة الصلابة والخشونة (تأثير الأشعة فوق البنفسجية على شكل عينات السيليكون لدينا)