

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



جامعة بجاية
Tasdawit n Bgayet
Université de Béjaïa

Faculté Technologie

Département de Génie Électrique

Mémoire de fin d'étude

En vue d'obtention du diplôme de Master en électrotechnique

Option : Réseau électrique et commande électrique

Thème

**Etude du vieillissement des isolateurs polymères sous
conditions désertique**

Présenté par

Melle. Boumezoued Sandra

Melle. Rabhi Tiziri

Dirigé par

Dr. SAHLI Zahir

Devant le jury

Mr. HERZINE S.

Mme. Bendahmane A.

Année Universitaire : 2023/2024

Remerciement

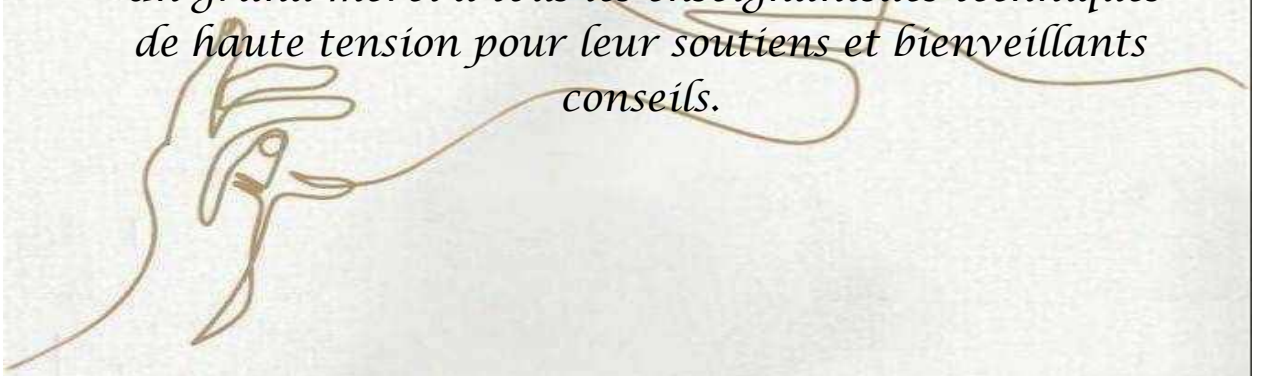
Avant tout, nous remercions de notre cœur le bon Dieu qui nous a offert de la santé volonté, courage et de la patience de mener à bien ce travail. Nous remercions toute personne qui, de près ou de loin ayant participé à la réalisation et l'évolution de ce travail.

*Nous tenons d'abord à remercier notre directeur de recherches Monsieur **Sahli Zahir**, pour son soutien constant et ses précieux conseils tout au long de notre projet. Ses encouragements et sa confiance en moi ont été une source de motivation inestimable. Encore merci pour nous avoir fait bénéficier de ses compétences scientifiques de ses conseils et sa disponibilité.*

*Nous remercierons également les membres de jury **Mr Herzine M** et **Mme Bendahmane Apour** pour avoir pris le temps d'examiner notre travail et pour leurs commentaires constructifs.*

Nos remerciements s'adressent à plateau technique d'analyse physico-chimique et laboratoire biologie de l'université de Bejaia.

Un grand merci à tous les enseignants des techniques de haute tension pour leur soutien et bienveillants conseils.



Dédicace

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère.

A mon cher homme, mon précieux offre du dieu, qui doit ma vie, ma réussite, il m'a chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours tout mon respect mon chère père :

Malek

A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences qui m'a soutenu et encouragé durant ces années d'étude mon adorable mère :

Soraya

A mes chères sœurs : Nina, Daya, Joujou, qui n'ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail et jamais cessée de me conseiller, m'encourager et me soutenir tout au long de mes études, Que dieu les protégées et leurs offre la chance et le bonheur.

A tous mes cousines, les amis que j'ai connu jusqu'à maintenant, pour leurs amours et supports dans les moments difficiles. Sans oublier mon binôme Sandi pour son entente et sa sympathie.

Tiziri

Dédicace

*Avec tous mes sentiments de respect. Avec l'expérience de ma vie,
je dédie ma remise de diplôme et ma joie :*

Ma grande mère

*A l'âme bienveillante de ma grande mère qui reste toujours à mon
cœur, chacune de mes réussites lui est dédiée.*

Ma mère Hakima

*Vous m'avez donné la vie, la tendresse et le courage pour réussir.
Tout ce que je peux t'offrir ne pourra exprimer l'amour et la
reconnaissance que je vous port. J'avoue vraiment que vous êtes
pour moi la lumière qui me guide vers le chemin de la réussite.*

Mon père Laïd

*L'épaule solide, l'œil attentif compréhensif et la personne la plus
digne de mon estime et de mon respect. Aucune dédicace ne
saurait exprimer mes sentiments, que dieu vous préserve et vous
procure santé et longue vie*

*A mon chère oncle Saïd et sa chère épouse Sara, qui ne cessent
jamais de m'encourager et qui m'a aidé à devenir ce que je suis
aujourd'hui*

*A mon Chère frère Malek et mes chères sœurs Lydia, Salsabil
aucune dédicace ne saurait exprimer toute l'amour que j'ai pour
vous, votre joie et votre gaieté me comblent de bonheur.*

*A Mimi, pour sa grande patience, je le remercie chaleureusement
surtout pour son soutien moral ininterrompu et ses nombreux
conseils*

*A mes chères amies je vous remercie vos amitiés. Sans oublier mon
binôme Tizou pour son entente et sa sympathie*

A mon petit chaton Léo qui a été une source constante de joie.

A tous qui m'aiment

Sandra

Sommaire

Table des matières

<i>Introduction générale</i>	11
<i>CHAPITRE I</i>	3
<i>Généralités sur la silicose et les isolateurs composites en silicose</i>	3
I. Introduction	3
I.1. Définitions	3
I.1.1. Isolant	3
I.1.2. Isoler	3
I.1.3. Isolation	3
I.1.4. Isolateur	3
I.1.5. Diélectriques	3
I.2. Différents types d'isolants	3
I.2.1. Isolant Gazeux	3
I.2.2. Isolants liquides	4
I.2.3. Isolants solides	4
I.3. Caractéristiques des isolateurs	4
I.3.1. Tension d'essai	4
I.3.2. Tension de contournement	4
I.3.3. Courant de fuite	5
I.3.4. Courant de fuite critique	5
I.3.5. Ligne de fuite spécifique (Is) d'un isolateur	5
I.3.6. Facteur de forme d'un isolateur	5
I.4. Matériaux isolants utilisés pour la fabrication des isolateurs en silicose	5
I.4.1. Céramique	5
I.4.2. Verre	6
I.4.3. Matériaux synthétiques	7
I.5. Différents types d'isolateurs	7
I.5.1. Isolateurs supports	7
I.5.2. Isolateurs de traversées	8
I.5.3. Isolateurs de lignes aériennes	8
I.6. Propriétés diélectriques des isolants	9
I.6.1. Rigidité diélectrique	9
I.6.2. Permittivité	9
I.6.3. Angle de pertes et facteur de dissipation	10
I.7. Contraintes subites par l'isolateur	10
I.7.1. Contraintes mécaniques	10

I.7.2. Contraintes électriques	11
I.7.3. Contraintes climatiques et environnemental	11
I.8. Choix d'isolateur.....	11
I.9. Les silicones	12
I.9.1. Définition	12
I.10. Les différents types de silicone	12
I.10.1. Huiles et gomme.....	12
I.10.2. Gels silicones	12
I.10.3. Elastomères silicones	13
I.10.4. Résines Siloxanes	13
I. Conclusion	14
<i>CHAPITRE II</i>	15
<i>Travaux antérieurs concernant les effets des UV et du champ électrique sur les isolateurs silicone</i>	15
II. Introduction	14
II.1. Études antérieures effectuée concernent les effets des UV sur la silicone.....	14
II.1.1. L'ultraviolet	14
II.1.2. Études en service et en laboratoire	15
II.1.3. Études en conditions sèches.....	16
II.2. Vieillessement thermique des isolants à base de polymères	18
II.2.1. Processus de nature physique.....	18
II.2.1.1. Processus physique sans transfert de masse	18
II.2.1.1.1. Vieillessement par relaxation de volume et d'enthalpie	18
III.2.1.1.2. Vieillessement par chocs thermiques	19
II.2.1.1.3. Fissuration sous contrainte en milieu tensioactif.....	19
II.2.1.1.4. Influence sur les propriétés du polymère	20
II.2.1.2. Processus physique avec transfert de masse	20
II.2.1.2.2. Vieillessement par migration d'adjuvants	21
II.2.2. Processus chimique	21
II.2.2.1. Réticulation	22
III.2.2.2. Oxydation	22
III.2.2.3. Dépolymérisation	23
II.2.3. Endurance ThermiquedesMatériaux Isolants	24
II.2.3.1. Position des travaux liés à l'endurance thermique.....	24
II.3.3.2. Choix des températures de vieillissement	25
II.2.3.3. Durée de vie	25
II.2.3.4.Choix des critères de dégradation (critère de fin de vie)	26

II.2.3.5. Vitesse de dégradation	27
II.3. Vieillessement Electrique	27
II. Conclusion.....	30
<i>Chapitre III</i>	14
<i>Partie expérimentale</i>	14
III. Introduction	28
III.1. Objectif des essais	28
III.2. Modèle expérimental et techniques de mesure.....	28
III.2.1. Matériaux et préparation des échantillons.....	28
III.2.1.1. La silicone	28
III.2.1.2. Dispositif expérimental de vieillissement.....	29
III.2.1.3. Préparation de la solution polluante	32
III.2.1.4. Simulation de la pollution saline	32
III.3. Dispositif expérimental et techniques de caractérisation de l'hydrophobicité.....	34
III.3.1. Technique de mesure de la tension de claquage	34
III.3.2. Techniques de Mesure du courant de fuite.....	36
III.3.3. Technique de Mesure de pertes diélectriques.....	37
III.3.3.1. Descriptif et principe de mesure.....	38
III.3.5. Technique de mesure de l'angle de contact (tension de surface)	46
III.3.6. La diffraction des rayons X (DRX ou XRD)	49
<i>Résultats et discussions</i>	27
III.4. Observation visuelle	50
III.5. Tension de contournement	52
III.5.1. Mesure de la tension de contournement pour différents niveaux de pollution	53
III.6. Mesure du courant de fuite.....	54
III.7. Hydrophobie et angle de contact.....	56
III.8. Analyse à la diffractométrie de rayon X (DRX).....	59
III.9. Mesure de capacité Cx et du facteur de perte tg δ	62
III. Conclusion	65
<i>Conclusion générale</i>	66

Figure.I.1: Photo représente un isolateur en céramique.....	6
Figure.I.2: Isolateur en verre.....	6
Figure.I.3: Isolateurs en matériaux synthétique	7
Figure.I.4: Photo isolateur support.....	8
Figure.I.5: Photo isolatrice de traversée.....	8
Figure.I.6: Huiles silicones	12
Figure.I.7: Gel d'étanchéité en silicone.....	13
Figure.I.8: Élastomère de clapet de décharge de pression de caoutchouc de silicone	13
Figure.I.9: Résines de silicone	14
Figure.II.10: Une lumière noire, également appelée lumière UV-A.....	15
Figure.II.11: Cellule de test pour le vieillissement UV	17
Figure.II.12: Arborescence électrique observée dans le volume d'une résine époxy configuration ponte/plan à laquelle a été superposée la théorie de la percolation de A.K. Joncher & R. Lacoste [61].	29
Figure.III.13: Lot de huit échantillons de silicone gris.....	29
Figure.III.15: Image de mode de fixation des	30
Figure.III.14: Image de la tête de l'aiguille sous microscope optique.	30
Figure.III.16: Microscope optique utilisé pour la prise de photo numérique pour la mesure du rayon de courbe de l'électrode active (aiguille).....	31
Figure.III.17: Cellule de vieillissement sous UV et champ électrique et température.	32
Figure.III.18: Conductimètre à sonde mobile.....	32
Figure.III.19: Dispositif expérimentale pour la reproduction de la pollution artificielle.	33
Figure.III.20: Répartition de la pollution sur la surface de l'isolateur silicone obtenue par pulvérisation.	34
Figure.III.21: Schéma du dispositif expérimental du laboratoire haute tension de l'université Abderrahmane Mira de Bejaïa.	35
Figure.III.22: Dispositif expérimentale du laboratoire haut de tension de l'université Abderrahmane Mira de Bejaïa.....	37
Figure.III.23: Schéma bloc du pont de Schering	40
Figure.III.24: Schémas du branchement de la cellule de mesure de pertes diélectrique.	43
Figure.III.25: éléments constituant le pont de mesure de pertes diélectriques.	44
Figure.III.26: Photographie de la cellule de mesure de pertes diélectrique.....	45
Figure.III.27: Pont de Schering.	46
Figure.III.28: Micropipette utilisée pour doser et disposer la goutte d'eau sur la surface de la silicone.	47
Figure.III.29: Tracé de la tangente au point d'interface solide / liquide / gaz.	48
Figure.III.30: Comportement d'une goutte d'eau sur une surface isolante.	49
Figure.III.31: Vue d'une installation de diffraction avec les rayons X.....	50
Figure.III.32: Des taches de rouille sur la surface des échantillons vieillis.....	51
Figure.III.33: Observation visuelle de la décoloration des échantillons en silicone après vieillissement UV et le champ électrique.	52
Figure.III.34: Modèles de Wenzel et Cassie-Baxter.	52
Figure.III.35: Tension de claquage de l'échantillon en fonction de la conductivité.....	54
Figure.III.36 : Evolution du courant de fuite en fonction du temps de vieillissement.	56
Figure.III.37: Angle de contact d'une gouttelette d'eau sur la surface de la silicone vierge.....	57
Figure.III.38: Diffractogramme des échantillons vierges et vieillis.	60
Figure.III.39: Zoom autour du point $2\theta=18^\circ$	61
Figure.III.40: Zoom autour du point $2\theta=20,5^\circ$	62
Figure.III.41 : Evolution de la capacité des échantillons en fonction de temps de vieillissement.	63
Figure.III.42 : Evolution du facteur de dissipation en fonction de temps de vieillissement.....	64
Figure.III.43 : Evolution de l'indice de perte diélectrique $\epsilon_r * tg\delta$ en fonction de temps de vieillessement.....	64

Tableau.III.1 : Spécifications de la lampe UVA selon le fabricant.....	31
Tableau.III.2 : Coté exposé du l'échantillon (coté supérieur).....	58
Tableau.III.3 : Coté non exposé du l'échantillon (coté inférieur).....	58

Introduction générale

L'isolation électrique est un élément critique dans les appareils fonctionnant sous haute tension. La durée de vie d'un matériel étant souvent liée à la durée de vie de son isolation, beaucoup de travaux ont pour objet la compréhension des mécanismes de vieillissement des matériaux utilisés comme isolants électriques.

Les isolateurs en polymère, de plus en plus présents dans les réseaux électriques en raison de leurs avantages, sont soumis à un vieillissement accéléré sous les conditions désertiques. Cette étude vise à identifier et à comprendre les mécanismes de dégradation induit par les facteurs environnementaux agressifs du désert, tels que les rayonnements UV, les températures extrêmes, les champs électriques et les polluants atmosphériques. Ce sujet complexe qui nécessite une compréhension approfondie des mécanismes de dégradation intervenant à l'échelle du matériau isolant. Les recherches en cours visent à améliorer la durée de vie et la fiabilité des isolateurs en polymères utilisés dans les réseaux de transport, de l'énergie électrique et dans les régions désertiques. Le vieillissement thermique, électrique et le vieillissement sous rayonnement UV sont également des facteurs importants à considérer.

Pour étudier le vieillissement des isolateurs en polymère sous les conditions désertique, plusieurs techniques expérimentales sont utilisées, notamment le vieillissement artificiel sous rayonnement UV à température contrôlée, le vieillissement électrique et le vieillissement thermique. Ces techniques permettent de simuler les conditions réelles et d'évaluer les propriétés physico-chimiques, électriques et mécaniques des isolateurs avant et après vieillissement. Ces isolateurs présentent une très bonne hydrophobicité, cependant dû aux contraintes rencontrées pendant le service, le vieillissement se produit et l'hydrophobicité est dégradée, ce qui provoque l'altération des propriétés électrique et diélectrique de la silicone.

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'étude du vieillissement des isolateurs composites en silicone sous l'action des rayonnements ultraviolets (UV), le champ électrique et la température. Pour cela, des échantillons en silicone ont été soumis à des cycles de vieillissement accéléré. Les propriétés superficielles, et internes des échantillons ont été suivies et évaluées par différentes techniques de mesure (La mesure de l'angle de contact, le courant de fuite, la tension de contournement, le facteur de pertes, ainsi que la diffraction des rayons X).

Le travail est organisé en 3 chapitres :

Le premier chapitre aborde une généralité sur la silicone et les isolateurs composite en silicone.

Le chapitre présente les travaux antérieurs concernant les effets des UV et du champ électrique sur les isolateurs silicone.

Le troisième chapitre est consacré aux techniques expérimentales et le matériel utilisé pour l'évaluation de degré de vieillissement des échantillons ainsi que à la discussion et l'interprétation des résultats obtenus sur les différentes méthodes de caractérisation du vieillissement des isolateurs hydrophobe.

CHAPITRE I

Généralités sur la silicone et les isolateurs composites en silicone

I. Introduction

Les isolateurs composites en silicone sont un type d'isolateurs utilisé dans les applications électriques notamment dans les lignes Ariennes à haute tension. Ils offrent plusieurs avantages par rapport aux isolateurs traditionnels en porcelaine ou en verre, tels qu'un poids réduit, une énergie de surface faible une capacité de tension de tenue comparable ou supérieure, et une réduction des exigences de distance de fuite.

I.1. Définitions

I.1.1. Isolant

Un isolant est une substance ou un corps dont la conductivité est nulle, ou en pratique, très faible[1].

I.1.2. Isoler

L'action d'isoler est le moyen d'empêcher la conduction entre conducteurs électriques soumis à des tensions différentes[1].

I.1.3. Isolation

C'est un système constitué par des matériaux isolants ou un assemblage de matériaux isolants considérer avec les parties conductrices associées[2].

I.1.4. Isolateur

On appelle isolateur tout système d'isolation constitué par des matériaux isolants ou un assemblage de ceux-ci, en liaison avec les parties conductrices associées. Son rôle principal d'amarrer les conducteurs et à les isoler des supports. On les emploie sous forme de cloches simples et de chaînes d'isolateurs. Les isolateurs se font en porcelaine, verre ou silicone[3].

I.1.5. Diélectriques

Un diélectrique est défini comme un milieu matériel dans lequel les bandes de conduction et de valence sont séparées par une énergie supérieure à 5 eV. Le milieu matériel peut être constitué par un solide, un liquide ou un gaz[4].

I.2. Différents types d'isolants

I.2.1. Isolant Gazeux

Les principaux isolants gazeux sont : l'air atmosphérique, l'azote, gaz rare de l'air, l'hydrogène.

L'air et les gaz secs sont de bons isolants, ils ont des propriétés particulières[2]

- ✚ Rigidité diélectrique variable suivant la nature de gaz ;
- ✚ Permittivité faible, les gaz sont auto-régénérateurs ;
- ✚ Phénomène d'ionisation des gaz ;
- ✚ Légers et inflammables.

I.2.2. Isolants liquides

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.2.3. Isolants solides [5]

Les isolants solides sont disponibles sous forme minérale, organique et résineuse :

- ✚ 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, ...)

- ✚ Les isolants d'origine organique sont généralement des substances fibreuses à base de

Cellulose. Ces matériaux ont une bonne résistance mécanique, ils sont combustibles ente 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...).

I.3. Caractéristiques des isolateurs [6][7]

I.3.1. Tension d'essai

C'est la valeur efficace de la tension appliquée à l'isolateur en permanence pendant toute la durée de l'essai.

I.3.2. Tension de contournement

La tension de contournement est le niveau de tension le plus bas à partir du quel tous les arcs joignent les deux électrodes.

I.3.3. Courant de fuite

Le courant de fuite est un courant de faible amplitude à travers la couche polluante le long de la surface de l'isolateur. Son intensité devient considérable lorsque cette couche est humidifiée. En effet, dans les conditions de forte humidité, la dissolution des sels contenus dans la couche polluante provoque la formation d'une couche électrolytique.

I.3.4. Courant de fuite critique

C'est le courant minimal nécessaire pour provoquer un contournement, sa valeur est obtenue dans la dernière demi-période avant le contournement.

I.3.5. Ligne de fuite spécifique (Is) d'un isolateur

Plus courte distance ou somme des plus courtes distances suivant les contours des surfaces extérieures des parties isolantes entre les parties qui sont normalement soumises à la tension de service, généralement exprimées en mm/kV.

I.3.6. Facteur de forme d'un isolateur

Le facteur de forme est déterminé par les dimensions de l'isolateur. Pour l'estimation graphique du facteur de forme, on trace la courbe de l'inverse de la circonférence $1/P$ en fonction de la longueur de la ligne de fuite partielle. Le facteur de forme est donné par l'aire située sous la courbe et calculé suivant la

Formule :

$$F = \int_0^L dl/P(l) \quad (\text{I.1})$$

Avec :

L : Longueur partielle de l'isolateur(m) ;

P(l) : Périmètre de l'isolateur en fonction de la longueur de fuite partielle l(m).

I.4. Matériaux isolants utilisés pour la fabrication des isolateurs en silicone

I.4.1. Céramique

Le développement et la fabrication des céramiques datent depuis longtemps à cause de leurs performances. Pour les isolateurs qui vont être utilisés dans des lieux où il y a des contraintes mécaniques très importantes[8], on utilise de préférence des céramiques à grains très fins.

Souvent on trouve les céramiques dans les postes : isolateurs supports, couverture isolante des sectionneurs, des disjoncteurs, des transformateurs de potentiel, des bornes de traversées des transformateurs de puissance...[9][10].



Figure.I.1:Photo représente un isolateur en céramique

I.4.2. Verre

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[11].

On trouve deux types de verre pour la fabrication des isolateurs : le verre trempé et le verre recuit.

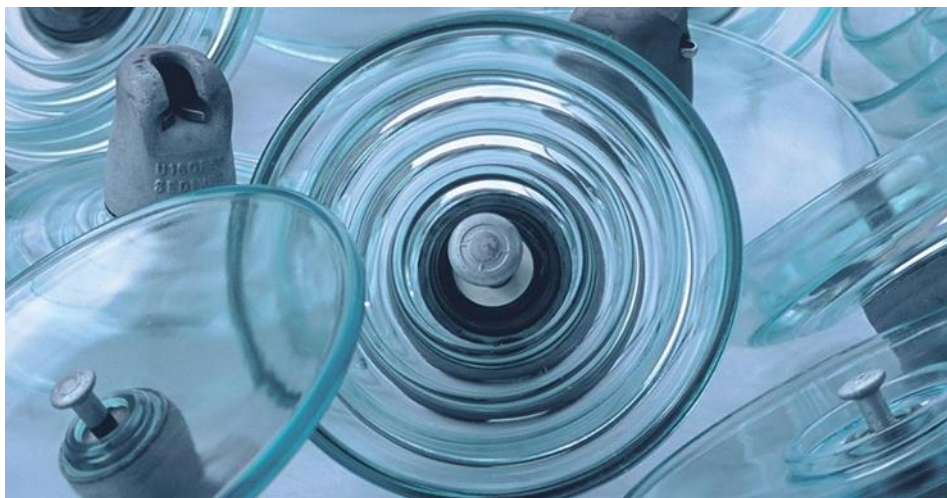


Figure.I.2:Isolateur en verre

- Le verre trempé :

La résistance à la traction du verre trempé est environ 5 à 6 fois plus grande que le verre recuit et peut supporter des variations brusques de température pouvant atteindre 100° C[11].

- **Le verre recuit :**

Le verre recuit est utilisé pour la fabrication d'isolateurs rigides, mais présente cependant des inconvénients. Parmi eux, nous citons le fait qu'il ne résiste pas aux variations brusques de température et qu'il ne supporte que des tensions mécaniques relativement faibles et c'est pour cette raison qu'il n'est pas utilisé pour la fabrication des isolateurs de suspension.

I.4.3. Matériaux synthétiques

Les isolateurs en matériaux synthétiques sont composés d'un centre en fibre de verre imprégnée, 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[9][12][10].

Ils ont de bonnes propriétés hydrophobes et peuvent être utilisés dans des conditions de pollution très sévères.[9] L'inconvénient de ces isolateurs est le vieillissement sous l'effet des différentes contraintes auxquelles ils sont soumis (électrique, mécanique, atmosphérique, ...)[9].



Figure.I.3: Isolateurs en matériaux synthétique

I.5. Différents types d'isolateurs

Les diélectriques solides sont largement utilisés dans les lignes aériennes. Ils se présentent sous différentes formes : supports, bagues et isolateurs de ligne.

I.5.1. Isolateurs supports [13]

Ils sont utilisés, particulièrement dans les postes de transformations, comme supports de matériels et d'appareils portés à une haute tension tels que les transformateurs montés en cascade, les disjoncteurs, les transformateurs de mesure, etc.



Figure.I.4: Photo isolateur support

I.5.2. Isolateurs de traversées [13]

Ils sont utilisés pour faire traverser à un conducteur à haute tension une paroi mise à la terre. C'est le cas d'une ligne haute tension qui pénètre dans un poste maçonné. Ces isolateurs sont en général de type extérieur/intérieur, la partie se trouvant à l'extérieur soumise aux intempéries est munie de cloches de sorte à augmenter la résistance de la ligne de fuite et la partie intérieure est constituée d'un simple cylindre.

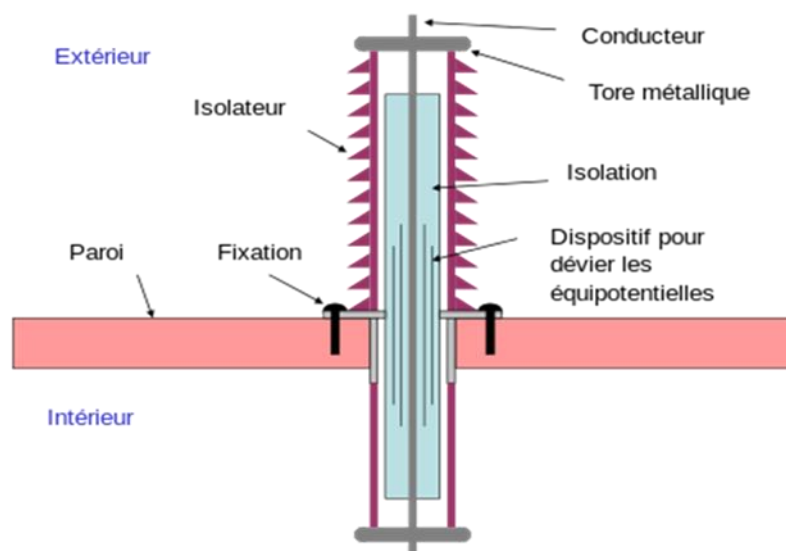


Figure.I.5:Photo isolatrice de traversée

I.5.3. Isolateurs de lignes aériennes

Les conducteurs des lignes aériennes sont fixés aux supports par l'intermédiaire d'isolateurs. Les isolateurs doivent présenter deux qualités, l'une est d'ordre électrique et l'autre est d'ordre mécanique, car ils doivent posséder une rigidité diélectrique suffisante pour tenir la tension de

service d'un côté et de l'autre côté ils doivent y avoir des propriétés mécaniques pour résister aux sollicitations exercées sur eux.

I.6. Propriétés diélectriques des isolants

I.6.1. Rigidité diélectrique [14]

La rigidité diélectrique d'un isolateur est la valeur du champ auquel il faut le supporter pour qu'il en résulte une perforation qui le rend inapte à remplir ultérieurement sa fonction. En pratique, on la définit comme étant le rapport entre la tension à laquelle se produit une perforation et la distance entre les deux électrodes auxquelles est appliquée la tension, dans des conditions d'essai spécifiées.

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

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

I.6.2. Permittivité [15]

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, liquides et gaz porte le nom de la permittivité relative ϵ_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 :

$$\epsilon_r = C_x / C_0 \quad (\text{I.2})$$

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

$$\epsilon_a = \epsilon_r / \epsilon_0 \quad (\text{I.3})$$

$$\epsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m} \quad (\text{I.4})$$

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 écrit :

$$\varepsilon_r^* = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r'' \quad (\text{I.5})$$

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

$$\varepsilon_a^* = \varepsilon_r^* \times \varepsilon_0 \quad (\text{I.6})$$

I.6.3. Angle de pertes et facteur de dissipation [15]

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 $\varphi = < \pi/2$. Son complément δ est appelé **angle de pertes**. La tangente de cet angle est appelée facteur de dissipation (ou de pertes) et s'obtient de la façon suivante :

$$\text{tg } \delta = \frac{I_a}{I_r} = \frac{U_a}{U_r} = \frac{P_a}{P_r} \quad (\text{I.7})$$

D'après la formule I.5 on peut écrire :

$$\text{tg } \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (\text{I.8})$$

Le produit $\varepsilon'' = \varepsilon' \text{tg } \delta$ est dénommé **indice de pertes**, car il caractérise l'énergie dissipée

Dans le diélectrique.

I.7. Contraintes subites par l'isolateur

I.7.1. Contraintes mécaniques [16]

De par sa conception, la chaîne d'isolateurs est articulée (avec un faible degré de liberté) à chaque isolant, ce qui leur permet de travailler exclusivement à la traction :

- ✚ Charge permanente appliquée à la chaîne (poids des conducteurs, des accessoires) ;
- ✚ Surcharge exceptionnelle due au vent.
- ✚ Les dimensions de chaque élément d'isolateur dépendent de la charge Mécanique qui est supportée en service ; lorsque la charge augmente les dimensions augmentent aussi.

I.7.2. Contraintes électriques [17][18]

Ce type de contraintes est important, et elles se résument en :

- ✚ Tension de service : C'est la tension normale que supporte l'isolateur ;
- ✚ Décharge disruptive : phénomène associé à une défaillance de l'isolateur sous l'effet

De la contrainte électrique, avec chute de tension et passage d'un courant entraînent une perte permanente de la rigidité diélectrique ;

- ✚ Tension de contournement : C'est la plus faible tension produisant un amorçage entre Conducteurs et la masse ;

- ✚ Surtensions accidentelles : Elles sont de brève durée pouvant être à l'origine d'un Orage ou d'un régime transitoire.

I.7.3. Contraintes climatiques et environnemental [19]

Les isolateurs sont spécialement influés par la contamination de l'environnement, dans les ouvrages (lignes et postes) installés au bord de mer, les embruns portés par les vents déposent progressivement sur les isolateurs une couche de sel, qui à plus ou moins longue échéance, ensuite recouvre toute la surface de l'isolant y compris les parties les mieux protégées. Cette couche de sel humidifiée par les embruns eux-mêmes par un brouillard ou simplement par condensation, devient conductrice. Ce qui donne naissance à un courant de fuite qui s'établit à travers la couche superficielle, et dans certaines conditions des arcs peuvent se développer et provoquer le contournement total de l'isolateur.

I.8. Choix d'isolateur

Les isolateurs entrent pour un pourcentage très modeste de l'ordre de 7%, dans le prix d'une ligne aérienne. Cependant, ils sont un élément essentiel dont dépendent la sécurité d'exploitation, la qualité et la continuité de service. Les isolateurs les mieux adaptés à un environnement donné sont ceux qui retiennent le taux de dépôts polluant le moins élevé, c'est-à-dire les isolateurs qui possèdent les meilleures propriétés d'auto – nettoyage. Même bien choisie, une isolation n'est jamais à l'abri d'un incident. La sévérité de la pollution d'un site peut changer. L'apparition d'une nouvelle usine à proximité d'un poste, la construction d'un ouvrage routier voisin ou plus simplement, un événement météorologique exceptionnel peuvent augmenter, durablement ou temporairement, la pollution d'un site, lorsqu'un poste ou une ligne y sont déjà en exploitation. Le dimensionnement initialement correct

des isolateurs peut alors devenir insuffisant et il faut pouvoir protéger les installations existantes contre les nouvelles sources de pollution éventuelles[1].

I.9. Les silicones

I.9.1. Définition

Les silicones sont des composés inorganiques constituées d'un mélange de silicium et d'oxygène. Il s'agit de matières « plastiques » présentes aussi bien sous la forme liquide que solide. Ces substances composent les implants mammaires mais aussi des mastics, des colles, des joints, certains meubles et cosmétiques. C'est leur présence dans cette dernière catégorie de produits qui nous intéresse[20].

I.10. Les différents types de silicone

I.10.1. Huiles et gomme

Les huiles de silicone ont déjà fait leurs preuves dans les domaines modernes du refroidissement et de l'isolation et grâce à leur excellente stabilité thermique, de nouvelles applications exigeant des propriétés similaires apparaîtront bientôt. Ils sont également largement utilisés dans les accessoires de câbles haute tension. Les huiles de silicone sont des polymères linéaires dont la longueur de chaîne varie de 2 à 1 000 atomes de silicium, voire plus, alternant avec des ponts oxygène.



Figure.I.6: Huiles silicones

I.10.2. Gels silicones

Les gels silicones sont un groupe particulier d'isolants peuvent remplacer les huiles ou les 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 aux parois intérieures des pièces. Les gels silicones (figure I.7) sont la plupart du temps des produits bi-composants de basse viscosité.



Figure.I.7: Gel d'étanchéité en silicone

I.10.3. Elastomères silicones

Les élastomères silicones et les silicones de revêtement (figure I.8) 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.



Figure.I.8: Élastomère de clapet de décharge de pression de caoutchouc de silicone

I.10.4. Résines Siloxanes

Les résines de silicone sont connues pour leur grande stabilité thermique, une propriété est utilisée pour l'isolation des grandes installations électriques. Leur excellente résistance à la chaleur apportera de nouvelles applications.

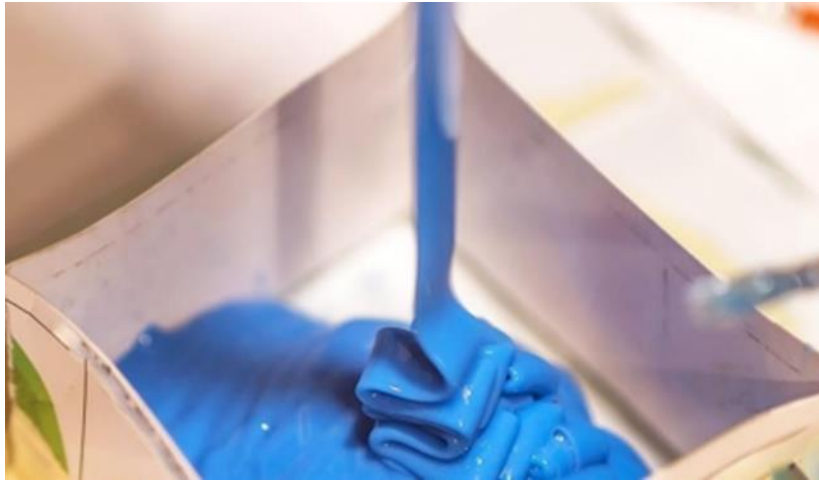


Figure.I.9: Résines de silicone

I. Conclusion

En conclusion, la silicone et les isolateurs composites en silicone sont des matériaux remarquables qui ont révolutionné de nombreux domaines grâce à leurs propriétés exceptionnelles. La silicone, un polymère synthétique à base de silicium, se distingue par sa résistance aux températures extrêmes, aux rayons UV, aux intempéries et aux produits chimiques. Sa flexibilité, sa durabilité et sa résistance aux environnements difficiles en font un choix idéal pour une large gamme d'applications, allant des joints d'étanchéité aux dispositifs médicaux.

Quant aux isolateurs composites en silicone, ils représentent une avancée majeure dans le domaine de l'isolation électrique. Constitués d'un noyau isolant recouvert d'un revêtement en silicone, ces dispositifs combinent les propriétés d'isolation électrique avec une résistance exceptionnelle aux décharges partielles, aux intempéries, aux polluants et aux rayons UV. Leur robustesse, leur légèreté et leur faible besoin d'entretien en font une solution de choix pour les réseaux de transport et de distribution d'électricité, en particulier dans les environnements sévères ou pollués.

CHAPITRE II

*Travaux antérieurs concernant les effets des UV
et du champ électrique sur les isolateurs silicone*

II. Introduction

Le vieillissement d'un isolant solide ou d'un système d'isolation est défini par la CEI[1]et IEEE[2]comme toute modification irréversible des caractéristiques du matériau isolant. Ces modifications ont un impact significatif sur les performances de l'isolant et diminuent sa durée de vie. Le degré de vieillissement d'un isolant dépend des propriétés physiques, de la composition chimique du matériau, de la nature et la durée de la contrainte appliquée, ainsi que du processus et des traitements au cours de sa fabrication [3].

Au cours des sept dernières années, les isolateurs en verre et en céramique ont été rapidement remplacés par des isolateurs polymères pour les applications d'isolation extérieure haute tension (HT). Néanmoins, les polymères isolants sont de nature organique et l'exposition aux UV, au champ électrique et à la température peut entraîner une dégradation progressive de leur composition chimique. Des recherches sur les conséquences des UV, du champ électrique et de la température sur les propriétés électriques du silicone ont été menées, dans le but de comprendre leur processus de vieillissement et de prendre les mesures nécessaires avant qu'ils ne se détériorent complètement, afin d'assurer une utilisation plus efficace.

II.1. Études antérieures effectuée concernent les effets des UV sur la silicone

Des expériences de vieillissement accéléré sur des isolants composites remplis de particules de SiO₂ (silice) de taille micrométrique ont montré une résistance au cheminement, une résistance à l'érosion et des caractéristiques de diffusion UV améliorées. Avec le développement des nano diélectriques pour l'isolation HT, il est désormais important d'étudier les caractéristiques de réflexion et de protection des matériaux composites dans un environnement de vieillissement sous UV[4].

II.1.1. L'ultraviolet

La lumière ultraviolette est l'un des principaux facteurs responsables de la dégradation des isolants polymères. Les principales sources de lumière ultraviolette sont : le soleil, la formation de couronnes et les activités d'arc à bande sèche sur la surface isolante. L'énergie de la lumière du soleil qui détruit les polymères se situe entre 270 et 340nm.Cette énergie destructrice constitue moins de 5% du rayonnement total atteignant la surface de la planète.

L'absorption de ce rayonnement UV entraîne une dégradation mécanique et chimique de la structure du polymère, ce qui peut affecter les propriétés diélectriques et de tissage de ce polymère. La vitesse à laquelle la dégradation se produit dépend de l'intensité et de la longueur d'onde du rayonnement. Ces facteurs varient selon la saison, l'altitude et l'heure de la journée. Les effets dégradants de ces rayonnements sont encore accélérés dans de fortes températures et de champs électrique intense. Il suggère donc que les composés polymères destinés à être utilisés dans des environnements extérieurs devraient être évalués sous haute tension en présence combinée de rayonnement UV et des températures élevés.

Les effets du rayonnement UV sur un polymère comprennent : craquelures, farinage ou fissuration de la surface, décoloration et perte d'hydrophobicité, ils sont discutés dans les sections suivantes[5].



Figure.II.10: Une lumière noire, également appelée lumière UV-A.

II.1.2. Études en service et en laboratoire

Plusieurs chercheurs ont mené des études sur la dégradation multifactorielle des isolants polymères externes, y compris en conditions humides. Ils ont examiné la détérioration des isolants polymères en service depuis cinq ans près de la région côtière du New Hampshire. Les changements majeurs dans la structure organique du composite ont été

analysés à l'aide de techniques avancées telles que l'analyse des propriétés de surface, la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR), la microscopie électronique à balayage (MEB) et la spectroscopie photo électronique à rayons X. De plus, la décoloration et l'assombrissement de la surface ont été quantifiés pour la première fois en relation avec le vieillissement[6].

II.1.3. Études en conditions sèches

Des études ont été réalisées sur la dégradation multi-stress des isolants polymères dans des conditions sèches (UV et température) pour simuler les conditions climatiques désertiques arides et tropicales, pour étudier les variations d'hydrophobicité de surface. Il a été constaté que la perte d'hydrophobicité dans les isolants polymère était proportionnelle aux intensités de rayonnement UV et que le taux de récupération de l'hydrophobicité des isolants silicones était relativement plus rapide. À cette fin, un modèle de diagramme de diffusion 3D basé sur les résultats obtenus a été développé pour illustrer clairement la tendance de la dégradation et de la défaillance de l'isolant au fil du temps[6].

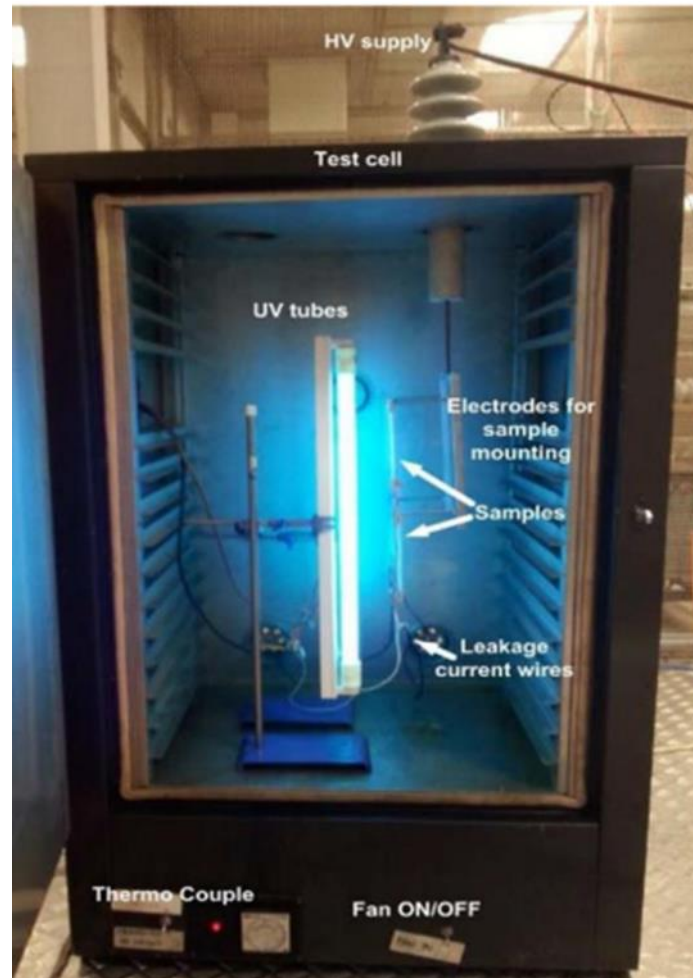


Figure.II.11: Cellule de test pour le vieillissement UV

II.2. Vieillessement thermique des isolants à base de polymères

Le processus de vieillissement thermique peut impliquer des processus physiques (dégazage, migration de plastifiants, changement de morphologie), ou chimiques, dont l'oxydation par l'oxygène atmosphérique est un facteur important. Il est possible que ces phénomènes impactent la composition chimique du polymère, ou dans certains cas, se limitent aux additifs (problèmes d'incompatibilité d'adjuvants)[7][8].

II.2.1. Processus de nature physique

Tous les phénomènes dans lesquels la structure chimique des macromolécules et autres composants du polymère n'est pas altérée sont favorisés comme des processus physiques[9][10]. Les propriétés des matériaux à constitution unique (tels que le PE, le PRC, etc.) peuvent être influencées par plusieurs processus physiques. Cela englobe le processus de ramollissement du matériau lorsque sa température de transition vitreuse dépassée ou lorsque sa partie cristalline atteint son point de fusion[11].

Le processus physique peut résulter :

- ✚ De modification de la configuration spatiale des macromolécules (cristallisation secondaire, relaxation, ...).
- ✚ De phénomènes de surface (fissuration en milieu tensioactif).
- ✚ De phénomène de transport (pénétration de solvants, migration d'adjuvants).

Nous pouvons distinguer deux grandes catégories de phénomènes selon qu'ils impliquent ou non un transfert de masse.

II.2.1.1. Processus physique sans transfert de masse

II.2.1.1.1. Vieillessement par relaxation de volume et d'enthalpie

En réalité, les changements de volume et d'enthalpie sont deux aspects distincts (mais parallèles) d'un même processus d'évolution de la configuration du réseau macromoléculaire à l'état transparent.[12] En réalité, il s'agit d'un phénomène associé à l'instabilité propre du matériau amorphe en dessous de sa température vitreuse de transition. Dans les polymères semi-cristallins tels que le PE, le PP, etc., certains segments stéréoréguliers (donc cristallisables) qui étaient bloqués dans la phase amorphe vont se disperser et s'intégrer

progressivement dans des zones cristallines. Le processus de vieillissement se manifeste par une augmentation du taux de cristallinité[9].

III.2.1.1.2. Vieillissement par chocs thermiques

Les chocs thermiques peuvent entraîner des ruptures mécaniques induites par dilatation différentielle. Deux mécanismes sont susceptibles d'intervenir :

A. Gradient de température dans l'épaisseur

Les matériaux organiques sont des isolants thermiques, à moins d'exceptions. Une variation rapide de la température du milieu entraîne un gradient de température dans l'épaisseur du matériau, ce qui entraîne une dilatation différentielle entre la zone superficielle et la zone interne. La rupture peut être provoquée par une seule variation de température dans le cas d'un choc thermique de grande amplitude. En cas de cycles avec des amplitudes plus faibles, les dommages peuvent survivre à long terme, car le matériau est soumis à une fatigue accumulée[10][12].

B. Matériaux hétérogènes

Dans les matériaux composites, les variations de température provoquent des contraintes internes dues aux dilatations différentielles, pouvant potentiellement endommager le matériau. Il s'agit d'un phénomène de fatigue mécanique provoqué par la différence des coefficients de dilatation des phases présentes[9][10].

II.2.1.1.3. Fissuration sous contrainte en milieu tensioactif

En présence de tensioactifs, les polymères sont responsables de fissures dans les zones les plus étroites, ce qui peut se produire après un laps de temps allant de quelques minutes à quelques jours, en fonction des conditions et de la qualité des polymères utilisés. La fissuration est associée à l'apparition de forces de tension superficielles à l'interface entre un polymère et un liquide. La vitesse de pénétration dans les fissures est influencée par différents paramètres tels que la contrainte mécanique, la température et la tensioactivité du liquide, dont la viscosité détermine la vitesse. En plus des facteurs externes, il y a également des facteurs internes tels que la structure du polymère, la répartition des masses moléculaires et la morphologie du polymère (distribution des tailles de cristallites et sphérulites)[9].

II.2.1.1.4. Influence sur les propriétés du polymère

Le vieillissement physique sans transfert de masse affecte toutes les propriétés dépendant du volume libre et de la mobilité moléculaire. La masse volumique augmente, le coefficient de dilatation et le facteur de pertes diélectriques diminuent[9] H. St. Onge et S. Péliesson [13] ont montré aussi que la rigidité diélectrique dépend de la théorie de volume libre et de la cristallinité qui sont des phénomènes liés au vieillissement physique sans transfert de masse.

II.2.1.2. Processus physique avec transfert de masse

Nous avons distingué deux grandes catégories de phénomènes selon qu'il y a un transfert de petites molécules du matériau vers l'environnement (pertes d'adjuvants) ou de l'environnement vers le matériau (absorption de solvants).

II.2.1.2.1. Vieillissement par absorption de solvants

La pénétration du solvant dans un polymère est influencée par les facteurs suivants[9] :

- ✚ **La structure chimique du motif structural élémentaire** : C'est elle qui détermine essentiellement l'affinité du polymère pour le solvant considéré.
- ✚ **La morphologie** : Les zones cristallines peuvent être considérées comme imperméables, la stabilité globale décroît donc avec le taux de cristallinité.
- ✚ **Le taux de réticulation** : La pénétration du solvant est d'autant plus aisée que le taux de réticulation est faible. Les conséquences physiques de ce type de vieillissement sont :
 - ✚ **Plastification** : Elle se traduit par une modification du comportement mécanique (diminution du module d'élasticité, de la contrainte au seuil d'écoulement et de la contrainte à la rupture, augmentation de l'allongement à la rupture) [9].
 - ✚ **Gonflements différentiels** : Ils peuvent se produire au niveau microscopique si le matériau est hétérogène, posant un problème d'instabilité dimensionnelle ou de contraintes internes qui se développent à l'interface et peuvent conduire à des ruptures mécano-chimiques de chaînes [9][14].

II.2.1.2.2. Vieillessement par migration d'adjuvants

La majorité des additifs ajoutés à la résine lors de la fabrication du polymère se déplacent du matériau vers l'environnement pendant le fonctionnement dans les conditions de service. Les petites particules sont transférées selon trois mécanismes principaux :

A. L'évaporation

C'est le cas le plus fréquemment rencontré dans les applications électriques (isolations de câble). Les molécules de plastifiant à la surface peuvent donc passer dans l'atmosphère, d'où la naissance d'un gradient de concentration dans l'épaisseur du matériau. L'apparition de ce gradient entraîne la diffusion du plastifiant du cœur vers la surface conduisant à sa disparition progressive [9]. La capacité d'évaporation du plastifiant est directement liée au poids moléculaire de ce dernier[15]. Le phénomène d'évaporation se manifeste dans la dégradation des polymères utilisés dans l'isolation des câbles sous la forme d'une perte de masse [16][17]et affecte considérablement les propriétés mécaniques du polymère [18][19].

B. L'extraction

Les phénomènes d'extraction sont à prendre en compte dans les cas de contact entre un polymère et un milieu liquide. Ici, c'est la stabilité de l'adjuvant dans le liquide qui est susceptible de jouer le rôle le plus important et qui sera en tout cas le premier paramètre à prendre en compte lors du choix du matériau [20][14].

C. L'exsudation

L'exsudation n'est que le résultat d'une évolution du matériau vers l'équilibre. Dans certains cas, le mélange (polymère + adjuvants) peut être déstabilisé par un corps tiers provenant de l'environnement [20][14].

II.2.2. Processus chimique

Toute modification chimique du matériau sous l'influence de l'environnement est appelée vieillissement chimique. Dans la réalité, le vieillissement chimique est souvent combiné à un vieillissement physique, ce qui entraîne une interférence entre les deux phénomènes[9].

II.2.2.1. Réticulation

La réticulation, est la réaction conduisant à la formation de ponts covalents entre les segments de chaînes voisines. Elle se traduit par une diminution de la mobilité moléculaire. Dans le cas des polymères linéaires de taux de réticulation modérés, la réticulation se traduit par l'apparition de chaînes plus ramifiées et de masse moléculaire plus élevée que ce qui existe dans les chaînes initiales. Dans le cas des polymères tridimensionnels, la réticulation se traduit par une augmentation de la concentration en nœuds de réseau. Elle peut être suivie par une diminution du taux de gonflement, et par une augmentation de la température de transition vitreuse T_v et du module d'élasticité [21].

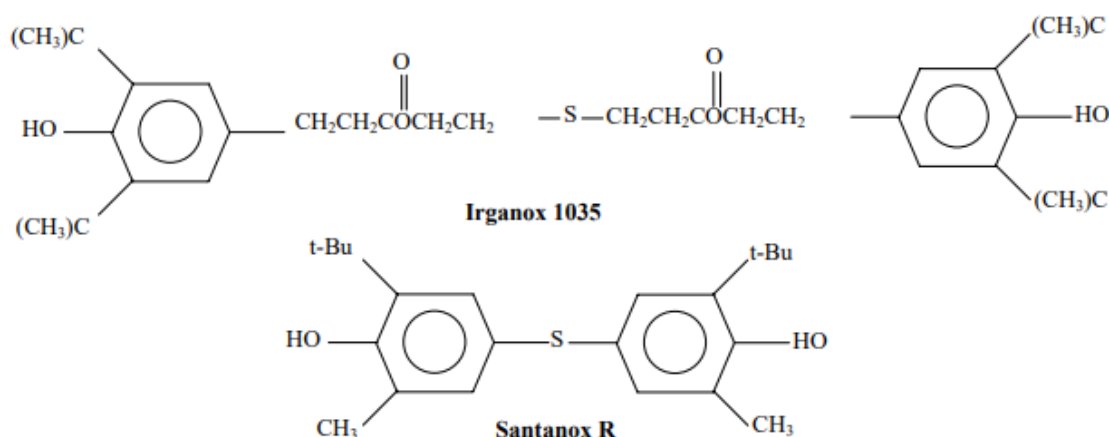
Les propriétés physiques des matériaux sont peu affectées, à l'exception d'une diminution de la solubilité. En termes de propriétés mécaniques, la réticulation entraîne une augmentation du module d'élasticité, de la résistance à la traction et de la température de ramollissement. Dans le cas de polymères initialement linéaires, une réticulation modérée peut également conduire à une augmentation de l'allongement à la rupture[22][23]. Dans des conditions réelles de vieillissement, le PE peut subir à la fois une scission de chaîne et une réticulation, faisant évoluer ses propriétés en fonction de l'équilibre de ces processus[9].

III.2.2.2. Oxydation

Le vieillissement thermique des polymères conduit à une oxydation de la chaîne carbonée, provoquant une dégradation des propriétés électriques et mécaniques[24][25][26]. L'oxydation se manifeste au cours du vieillissement sous la forme d'une accumulation des groupes carbonylés (acides, cétone, aldéhydes...). La zone concentrée est plus importante dans la partie amorphe que dans la partie cristalline du polymère semi-cristallin, en raison de la plus facile diffusion de l'oxygène. Il existe plusieurs facteurs qui affectent le phénomène d'oxydation des polymères[27]. On peut citer entre autres la non saturation du polymère, la présence des ions métalliques, processus de fabrication, la présence des groupes chimiques, tels que le groupe carbonylé, les hydroptérides, les catalyseurs et les antioxydants, la structure et la morphologie du matériau, c'est-à-dire sa densité, ses ramifications, cristallinité, ...[28].

Pour faire face au problème de la dégradation oxydante des isolants à base des polymères, des antioxydants sont incorporés à la résine du matériau. La qualité et la quantité

de l'antioxydant ajouté joue un rôle très important dans la stabilité à l'oxydation du matériau [29]. Les principaux antioxydants utilisés dans la fabrication des câbles à base des polymères sont Irganox 1035 et SantaNox R, dont les formules chimiques sont les suivantes[30][31].



Les informations les plus importantes sur le phénomène de l'oxydation sont rapportées dans la littérature par F. Gugumus dans une série de publications[32][33]. Concernant la détection de l'oxydation, elle peut s'effectuer par des essais physico-chimiques. Plusieurs auteurs[34][35]ont exploité la Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (FTIR) pour identifier les groupes carbonyles résultant au cours du processus de l'oxydation. D'autres travaux [36][37] ont été publiés et portent sur l'utilisation de l'Analyse Enthalpique Différentielle (DSC) pour mesurer le temps d'induction de l'oxydation (OIT). D'après J.P. Crin[38], l'énergie d'activation liée à l'oxydation thermique varie linéairement avec l'antioxydant contenu dans le matériau.

III.2.2.3. Dépolymérisation

La dépolymérisation est un cas particulier de la réaction de coupure de chaînes. Elle conduit à l'élimination d'un fragment moléculaire (monomère), et à une diminution très faible et rapide de la masse moléculaire. Une coupure de chaîne crée un site actif qui déstabilise la liaison monomère voisine et entraîne l'élimination séquentielle de molécules de monomère. La dépolymérisation est donc l'inverse de la polymérisation, elle est d'autant plus facile que l'énergie de liaison monomère-monomère est faible [9].

II.2.3. Endurance Thermique des Matériaux Isolants

II.2.3.1. Position des travaux liés à l'endurance thermique

Les études sur l'endurance thermique des matériaux isolants ont commencé dans les années 1970 dans les articles de B. Fallou[39]. De nombreuses années se sont écoulées depuis le moment où plusieurs méthodes de leurs caractères furent développées. Parmi eux, il y a plusieurs méthodes qui ont été développées et ont été écrites et publiées dans certaines parties de la publication CEI 216[40]. Ces méthodes, qui sont basées sur la loi d'Arrhenius, qui caractérise la vitesse des réactions chimiques[41]. G.C. Montanari a exploité ces méthodes conventionnelles pour étudier l'endurance thermique des isolants utilisés dans les câbles haute tension. Les résultats de ses investigations ont été publiés dans plusieurs articles dans IEEE [42][43]. On peut consulter d'autres résultats sur l'application de ces méthodes dans les références [22][44][45]. L'avantage de ces méthodes est centré sur la facilité d'examiner n'importe quelle propriété importante en service, dans des conditions de température, de durée et d'environnement choisis pour les essais d'endurance, qui représentent de façon pratique les conditions de service. Cependant, comme il sera mentionné ci-dessous, l'inconvénient essentiel de ces méthodes provient de leur inaptitude à étudier les transformations détaillées responsables du vieillissement observé. La complexité du vieillissement et certaines autres limitations des essais conventionnelles d'endurance thermique ont conduit à utiliser des techniques complémentaires. Celles-ci ont été développées et publiées à la session de 1982 de la CIGRE[11].

Un autre aspect thermodynamique basé sur la théorie d'Eyring a été introduit pour étudier l'endurance thermique de certains matériaux polymères. Le principe de cette théorie est l'existence d'une enthalpie d'activation ΔH et d'une entropie d'activation ΔS et non seulement une énergie d'activation apparente E comme le modèle d'Arrhenius. Ces deux grandeurs thermodynamiques sont déterminées expérimentalement en présentant le $\text{Log}(tT)$ en fonction de $1/T$. G.C. Montanari[46][47] a publié des résultats basés sur l'application du modèle d'Eyring. Il a utilisé le temps d'induction de l'oxydation (IOT), mesuré par la DSC, comme un critère de dégradation du matériau. Dans un travail plus récent, M.A. Morsy et al. [48] ont présenté des résultats d'application d'une nouvelle technique analytique dite ESR (Electron Spin Resonance) pour étudier l'endurance thermique du PRC et de PVC.

II.3.3.2. Choix des températures de vieillissement

La CEI 216 [40] fixe un minimum de trois températures dont chacune diffère de la plus voisine de 20°C. Elle exige aussi que le critère de dégradation soit atteint :

- ✚ En au moins 100h pour la température la plus élevée.
- ✚ En au moins 5000h pour la température la plus basse.

II.2.3.3. Durée de vie

L'effet de la température sur les isolants électriques a été examiné en 1930 par W.M. Mont singer qui a présenté une formule empirique décrivant la réduction de la durée de vie de moitié pour un accroissement de 8°C de la température (règle de 8°C) du papier utilisé comme isolant dans les transformateurs.

La durée de vie est le temps qu'il faut à une propriété techniquement importante pour atteindre une valeur limite, appelée critère de fin de vie, à partir de laquelle le matériau ne peut plus fonctionner de manière satisfaisante[45].

Deux approches ont été développées pour estimer la durée de vie des matériaux isolants solides sous contrainte thermique :

1^{ère} approche :

Elle se fonde sur un principe purement chimique basé sur un modèle de type Arrhenius[49][50]. Lorsqu'un processus unique régit la dégradation selon la loi d'Arrhenius, le graphique d'endurance thermique ou courbe de durée de vie est une droite sur un graphique avec le logarithme du temps en ordonnée et l'inverse de la température en abscisse. De manière générale, pour les matériaux, on peut supposer des durées de vie de 25 à 30 ans pour une utilisation annuelle d'environ 2 000 h à 7 500 h. Pour les équipements plus petits, des durées de vie de 20 000 heures à 100 000 heures sont probablement plus réalistes[51].

P.K. David [52] a observé une relation surprenante entre les deux paramètres A et B du modèle de durée de vie. Cette relation est une relation linéaire de type $A = \alpha + \beta B$. L'auteur a appelé cette relation l'effet du vieillissement compensé (Ageing compensation effect ACE). L'existence de cette variation linéaire entre A et B a été vérifiée par G.C. Montanari sur une large gamme de matériaux isolants [53][54][55]. La vérification a été faite de deux manières différentes :

- ✚ Pour le même matériau et pour un critère de fin de vie donné, il a déterminé les paramètres A et B pour différentes propriétés.
- ✚ Pour le même matériau et pour une seule propriété, il a choisi différents critères de fin de vie, et pour chaque critère il a déterminé les paramètres A et B.

2^{eme} approche

La théorie d'Eyring affirme que la dégradation est un processus thermodynamique. Elle propose une alternative qui répond aux limites de l'approche précédente[56].

- ✚ Absence d'un sens physique de la constante A.
- ✚ Absence de relation directe entre la valeur de l'énergie d'activation E et la nature du Processus de dégradation.
- ✚ Absence de linéarité du graphe log(t) en fonction de 1/T.

La durée de vie basée sur le modèle d'Eyring est donnée par l'équation suivante[56]:

$$t = \frac{h}{KT} \exp \frac{\Delta H}{KT} = \frac{h}{KT} \exp \frac{\Delta H}{KT} \exp \frac{-\Delta S}{K} \quad (\text{II.1})$$

Où :

ΔG : énergie libre.

ΔH : enthalpie d'activation.

ΔS : entropie d'activation.

K : constante de Boltzmann.

H : constante de Planck.

T : température absolue.

La détermination de ΔH et ΔS s'effectue graphiquement en présentant Log (tT) en fonction de 1/T. J.P. Crine[57] a trouvé aussi une relation linéaire entre ΔH et ΔS c-à-d l'existence de l'effet de vieillissement compensé entre ΔH et ΔS .

II.2.3.4.Choix des critères de dégradation (critère de fin de vie)

La publication CEI 216[40] donne deux façons de définir le critère de dégradation, toutes les deux étant également valables :

- ✚ Par le pourcentage d'augmentation ou de diminution de la valeur initialement mesurée pour la propriété qui est généralement 50% de la valeur initiale de la propriété mécanique ou électrique. Pour la perte de masse, le critère peut être choisi égale à 3% de la valeur initiale comme dans le cas d'étude du vieillissement de l'éthylène propylène diène monomère (EPDM) [42].
- ✚ Par une valeur fixe de la propriété. Cette valeur peut être choisie en fonction des exigences normales en service.

II.2.3.5. Vitesse de dégradation

Dans un domaine expérimental limité, le taux de dégradation V des polymères peut être considéré comme variant avec la température de vieillissement T selon la loi d'Arrhenius. Cette vitesse est donnée par la relation suivante [20].

$$V = V_0 \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) \quad (\text{II.2})$$

Avec :

E : énergie d'activation du phénomène.

R : constante des gaz parfaits.

V_0 : constante.

T : température absolue.

La dégradation est d'autant plus rapide que la température est plus élevée.

II.3. Vieillessement Electrique

La rigidité diélectrique des isolants polymères est naturellement limitée, comme celle de tout matériau. En outre la rigidité varie dans le temps et dépend des différents mécanismes possibles de dégradation des polymères sous le champ électrique. Aucun isolant ne résiste à un champ électrique de plus de 10^3 kV/mm. Si un électron parvient à s'accrocher sur une molécule neutre, ce champ est suffisant pour ioniser le radical anion, puis accélérer l'électron, qui ionise des molécules et déclenche une rupture par avalanche. Ce processus intervient très rapidement, en $10^{-9} - 10^{-8}$ s dès que les conditions de claquage sont remplies (valeur de champ électrique). Les mauvais isolants claquent en général par effet thermique. Le courant

qui passe chauffe le matériau, ce qui augmente sa conductivité, donc le courant, ...etc. La rupture intervient par emballement thermique ce qui nécessite un temps compris entre 10^{-8} – 10^{-4} s. Un matériau bon isolant électrique peut être peu résistant à la propagation des fissures. Dans ce cas, les forces électrostatiques peuvent provoquer la propagation d'une fissure jusqu'au moment où le champ provoque la rupture par avalanche (rupture électromécanique). Ces trois types de rupture diélectrique sont normalement absents dans des matériaux peu âgés, car les pièces diélectriques sont calculées pour pouvoir supporter les champs et les efforts correspondants. En pratique, les défaillances proviennent du vieillissement du matériau sous l'action du champ électrique[58]. Les décharges partielles sont une cause habituelle du vieillissement des isolants polymères en champ alternatif. Les arborescences électriques sont une manifestation analogue du vieillissement sous champ mais plus lente à s'établir. Ces deux processus n'interviennent qu'à champ élevé supérieur à 10kV/mm. Deux autres mécanismes interviennent pour expliquer, à long terme, les défaillances des isolants polymères : l'oxydation progressive du matériau et la diminution de la masse moléculaire des chaînes de polymère, ce qui augmente en général la conductivité ionique. En présence d'humidité, ou de vapeur d'eau les champs électriques, même relativement faibles, provoquent l'apparition d'arborescences humides qui croissent jusqu'au claquage [58].

En pratique, pour les câbles accompagnés d'une isolation réalisée à partir de matériaux synthétiques, le vieillissement électrique est une combinaison compliquée des matériaux design, des processus de production, des impuretés, de la quantité des interfaces, et de la structure des matériaux[59]. En 1984, A.K. Jonscher et R. Lacoste ont proposé un modèle du vieillissement électrique sous la forme conceptuelle d'un concept de percolation[60]. Ce concept donnerait l'impression de l'arborescence se déplaçant préférentiellement à travers les zones avec des vacuoles s'agrandissant à l'aide d'écorces de décharge partielle LP. Voici quelques stades suivant ce concept[60] dans la figureII.12 :

Etape 1 : Le matériau est en équilibre sous champ faible ou nul. En moyenne, le champ électrique n'a aucune action sur la structure : s'il y a création de défauts, ils le sont sous forme métastable. La structure peut donc revenir à son état initial.

Etape 2 : Le champ est suffisant pour créer de nouveaux défauts à partir de défauts initiaux de façon irréversible. Ce processus entraîne une augmentation de la densité de charges au sein du matériau.

Etape 3 : Sous l'action combinée du champ électrique et du temps, la densité de défauts est telle que la probabilité pour qu'ils se groupent en amas n'est pas nulle.

Etape 4 : Les porteurs dont le libre parcours moyen est de plus en plus grand, au sein de ces amas, sont susceptibles d'acquérir des énergies importantes donc de produire des défauts de dimensions plus importantes qui peuvent apparaître sous forme d'arborescences par exemple.

Etape 5 : La rupture se fait selon un mécanisme de percolation entre les amas des défauts.

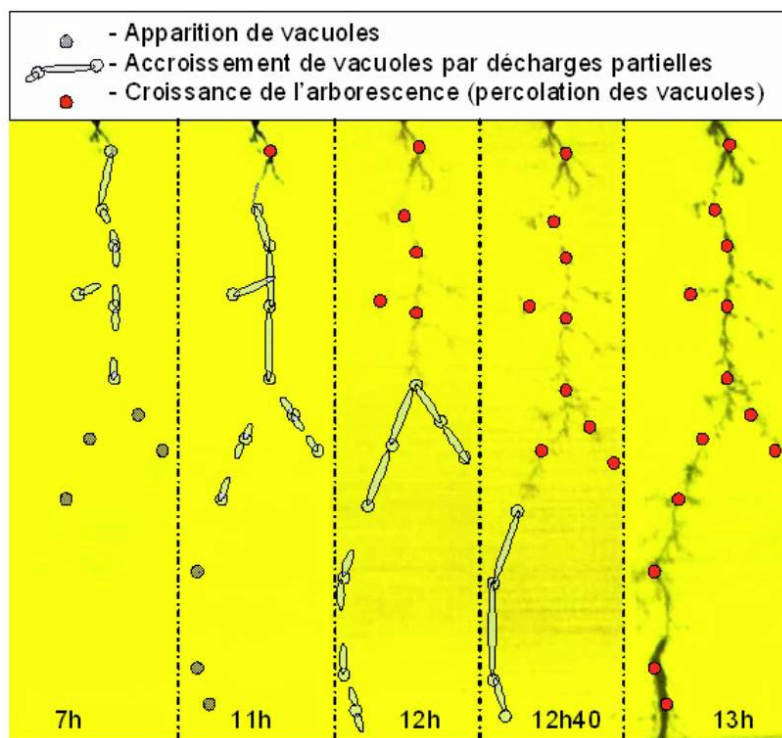


Figure.II.12: Arborescence électrique observée dans le volume d'une résine époxy configuration pont/plan à laquelle a été superposée la théorie de la percolation de A.K. Joncher & R. Lacoste [61].

A ce jour, ce modèle n'a pas fait l'objet de développements analytiques qui auraient ouvert la voie à une quelconque expression quantitative du champ de rupture ou de la durée de vie. Notons en outre que les arborescences ne sont formées potentiellement que durant

l'étape 4. Les signaux précurseurs de la rupture de la matrice coronaire se sont déjà et peuvent potentiellement se développer au cours des étapes précédentes[61].

Au fil des années, plusieurs théories ont été développées dans le but d'avoir une bonne compréhension des phénomènes de dégradation sous le champ électrique. Notons que ces différentes théories sur le vieillissement électrique, qui coexistent à ce jour, ont toutes un dénouement commun : la dégradation électrique commence dans les zones qui présentent des densités importantes de contaminations, d'impuretés et de vacuoles[62][63]. La différence entre ces théories réside dans le mécanisme qui entraîne le processus de la rupture. H.R. Zeller [64] a proposé une théorie qui se base sur un processus purement électrique mené par la charge d'espace. D'autres théories développées par G. Bahder[65], T.W. Dakin [66] et A.L. Mckean[67] stipulent que le processus de dégradation est gouverné par l'effet des décharges partielles au sein des vacuoles et les inclusions dans l'isolant. Le principe du modèle développé par J.P. Crin[68][69] se résume dans le fait que le mécanisme de dégradation est associé à la structure moléculaire du matériau et à la formation des submicrocavités, ce qui engendre un effet électromécanique déformant ainsi la structure des bandes de l'isolant et conduisant, par la suite, à la rupture diélectrique du matériau.

II. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons abordés l'état des connaissances dans le domaine de vieillissement sous chacune des contraintes suivantes :

- ✓ Les rayons UV
- ✓ La température
- ✓ Le champ électrique

Au terme de ce chapitre nous tirons les conclusions suivantes :

- ✓ L'absorption des rayons UV entraîne une dégradation mécanique et chimique de la structure du polymère, ce qui peut affecter les propriétés diélectriques et la vitesse de dégradation dépend de la longueur d'onde du rayonnement.
- ✓ Le processus de vieillissement thermique implique des processus physiques (dégazage, migration, changement de morphologie) et chimiques ; dont l'oxydation.

- ✓ Les décharges partielles et l'oxydation progressive du matériau de la diminution de la masse moléculaire des chaînes sont des causes et les signes de vieillissement électrique des polymères.

An orange scroll banner with rounded corners and a slight shadow, containing the chapter title. The banner is positioned horizontally across the middle of the page.

Chapitre III
Partie expérimentale

III. Introduction

Le vieillissement sous les ultraviolets (UV), la température et le champ électrique sont l'un des problèmes les plus importants que les isolants y sont confrontés.

Ce chapitre concerne la méthodologie expérimentale utilisée dans notre l'étude. On y décrit les échantillons utilisés, puis le choix des contraintes appliquées, ensuite on passe en revue les différentes techniques de caractérisation, les montages de mesures et les protocoles expérimentaux mis en place pour mener à bien notre étude.

L'objectif de ce travail est d'étudier le processus de vieillissement d'isolants en silicone exposés aux rayonnements UV au champ électrique et à une température de 60C°.

III.1. Objectif des essais

Dans le cadre de ce travail, nous portons un intérêt particulier à l'effet des ultraviolets, le champ électrique et de la température sur la silicone.

III.2. Modèle expérimental et techniques de mesure

III.2.1. Matériaux et préparation des échantillons

III.2.1.1. La silicone

Cette étude vise à évaluer l'influence des UV, le champ électrique et de la température sur les caractéristiques de la silicone, en se concentrant sur la tension de claquage sous pollution, le courant de fuite, les pertes diélectriques, l'angle de contact et les changements physicochimiques de la surface des échantillons.

Nous avons réservé un lot de huit échantillons de silicone, ci-dessus présenté (figure III.13).

Avant de commencer le processus de vieillissement, on effectue des mesures sur tous les échantillons de silicone à l'état initial (vierge). Les résultats de ses mesures, qui seront présentés ultérieurement, serviront de valeurs de référence. Les huit échantillons seront ensuite soumis à un vieillissement sous une lampe UV, champ électrique et à une température de 60 C° pendant 1000 heures. Après chaque 144h d'exposition, un échantillon est prélevé pour analyse.



Figure.III.13: Lot de huit échantillons de silicone gris.

III.2.1.2. Dispositif expérimental de vieillissement

Le vieillissement a été effectué par lot de huit échantillons de silicone à la fois, dans une étuve pour maintenir une 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, à une distance de 50cm de la source UV. Tandis que la température a été maintenir à 60C° pour assurer une contrainte thermique constante. Une contrainte électrique (champs électrique) est appliquée aux échantillons grâce à quatre aiguilles de rayon de courbure de 100µm.

Pour mesurer l'angle de courbure de l'électrode active (aiguille) nous avant d'abord photographier les pointes des aiguilles par moyen d'un appareil photo numérique type (BASLER A312fc) monté sur un microscope optique type (NIKON ECLIPSE e200) offrant un agrandissement de plus de 1000 fois, relié par le biais d'une interface type

(câbleUSBE119932) à un PC pour une acquisition d'image et de données numériques voir figureIII.14. Cette opération est réalisée au laboratoire de recherche de biologie animale de l'université de Bejaia.

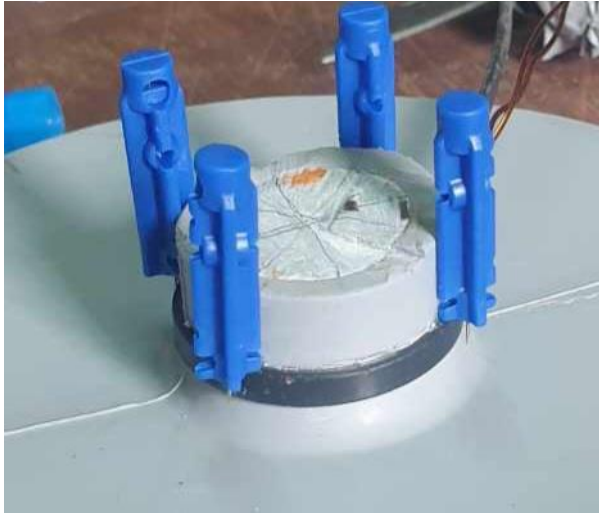


Figure.III.15:Image de mode de fixation des Aiguilles sur les échantillons.

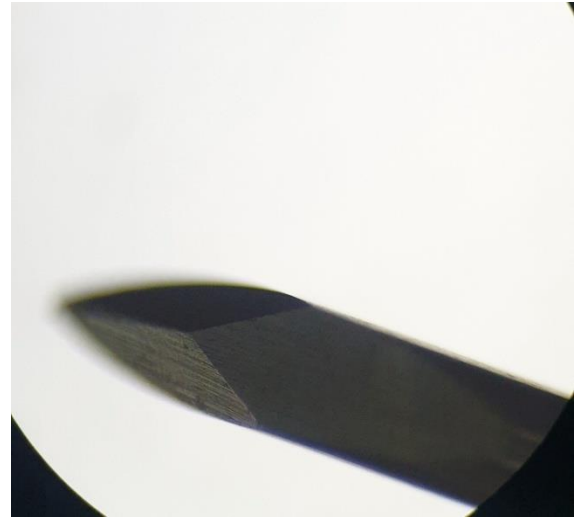


Figure.III.14: Image de la tête de l'aiguille Sous microscope optique (*150).



Figure.III.16: Microscope optique utilisé pour la prise de photo numérique pour la mesure du rayon de courbe de l'électrode active (aiguille).

Le vieillissement sous des lampes UVA est particulièrement utile pour comparer différents types de polymères. Ainsi, une lampe fluorescente à UVA-340 dont les spécifications sont consignées dans le tableau.1 a été installée à l'intérieur de l'étuve. Le rayonnement de la lampe simule les conditions du rayonnement solaire dans la plage de longueur d'onde typique de 295 à 365 nm. La figure III.17 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	PékinZhongyi Bo Teng Tech. Chin

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

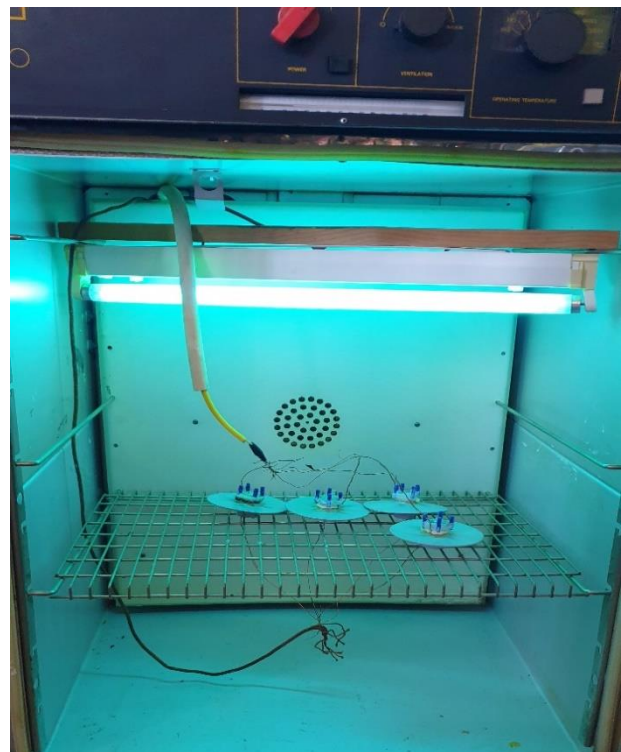
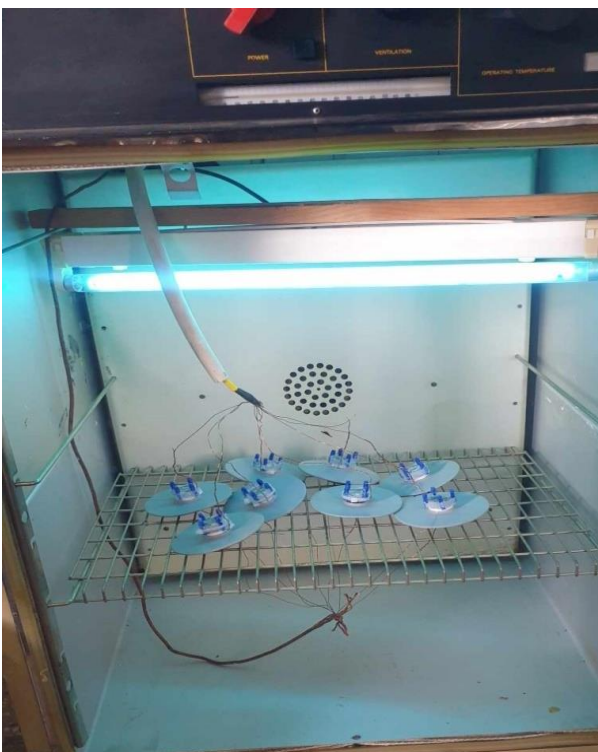


Figure.III.17:Cellule de vieillissement sous UV et champ électrique et température.

III.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, on ajoute des petites gouttes d'eau saline pour varier la conductivité de la solution. On obtient une variation du niveau de pollution en modifiant la concentration de $NaCl$ dans l'eau. La conductivité de la solution est ajustée à la valeur souhaitée à l'aide d'un conductimètre (FigureIII.18) montrant la conductivité de la solution ionique à la température normale de $20^{\circ}C$. Avant chaque début d'une série d'essais, les solutions sont ajustées pour maintenir les mêmes caractéristiques de la solution. Les différentes conductivités volumiques utilisées dans notre étude sont : (765 ; 1000 ; 1500 ; 2000 et 3000) $\mu S/cm$.



Figure.III.18:Conductimètre à sonde mobile.

III.2.1.4. Simulation de la pollution saline

Pour simuler la pollution saline, on utilise un pulvérisateur pour atomiser les gouttelettes d'eau. Afin de reproduire la même pollution saline sur la surface des isolateurs,

un mécanisme en bois (figureIII.19) a été fabriqué. Ce dernier nous permet de contrôler précisément le niveau de pollution en fixant certains paramètres dont la distance d'application de la pollution et le volume appliqué.

Ce dispositif permet de garder une distance horizontale fixe de 35cm entre les échantillons 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 inter électrodes de l'échantillon comme le montre la figureIII.19.

Le pulvérisateur est actionné 10 fois pour obtenir une pollution bien répartie sur la surface de l'échantillon comme le montre la figureIII.20 et cela est répété pour tous les échantillons avec les cinq conductivités mentionnées précédemment.



Figure.III.19:Dispositif expérimental pour la reproduction de la pollution artificielle.



Figure.III.20:Répartition de la pollution sur la surface de l'isolateur silicone obtenue par pulvérisation.

III.3. Dispositif expérimental et techniques de caractérisation de l'hydrophobicité

III.3.1. Technique de mesure de la tension de claquage

La figure III.21 montre dispositif expérimentale 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 100kV 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 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 $R = 106 \text{ k}\Omega$ limitant le courant ;
- ✚ Une table servant de support à l'objet d'essai (ensemble échantillons et électrodes) ;

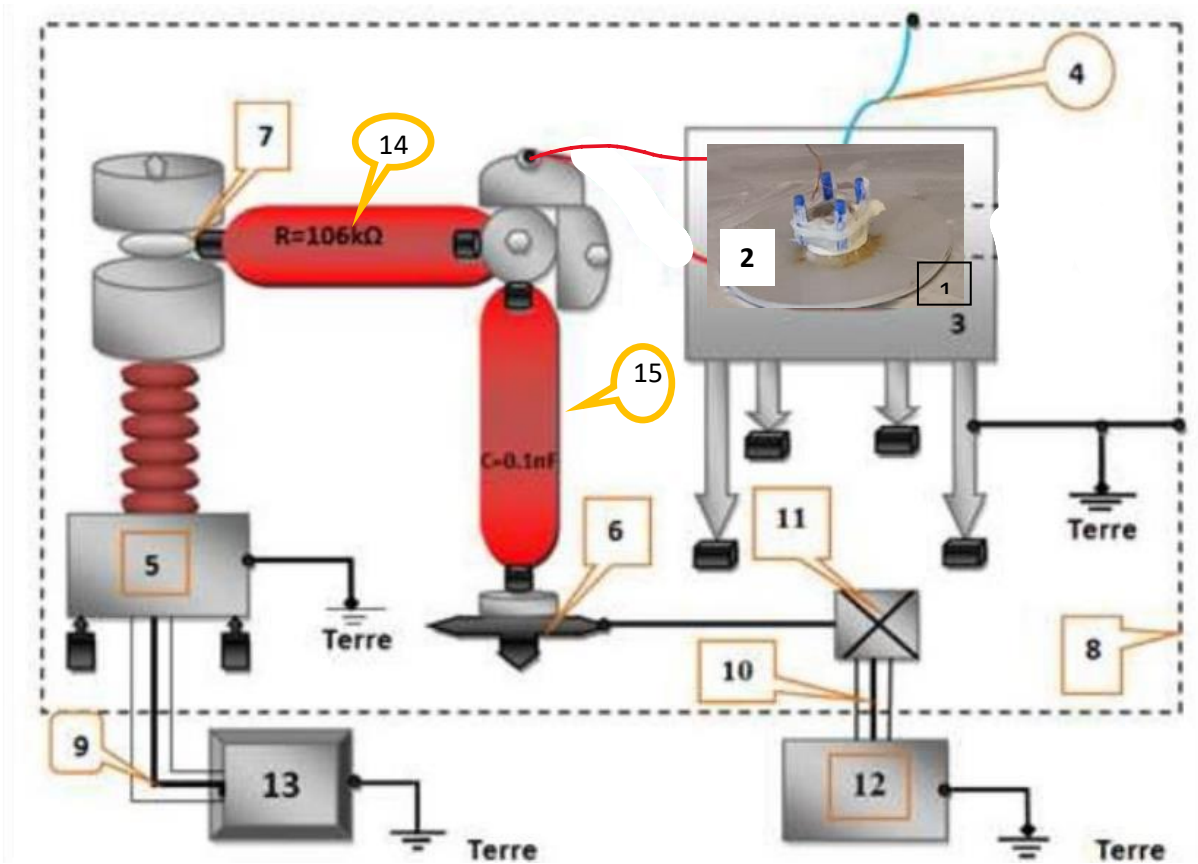


Figure.III.21:Schéma du dispositif expérimental du laboratoire haute tension de l'université Abderrahmane Mira de Bejaïa.

- ✚ 1 : Électrode en Aluminium.
- ✚ 2 :Isolateur solide (silicone).
- ✚ 3 : Table.
- ✚ 4 : Fil conducteur de mise 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 en utilisant un diviseur de tension capacitif connecté au secondaire du transformateur d'essai. Ce diviseur est composé d'une capacité haute tension de $C=0.1nF$ en série avec un ensemble de capacités (capacité basse tension, capacité du câble coaxial et capacité d'entrée des appareils de mesure), ce qui permet de diminuer la tension effective. La tension de contournement retenue est la moyenne arithmétique de 20 essais pour chaque cas de conductivité.

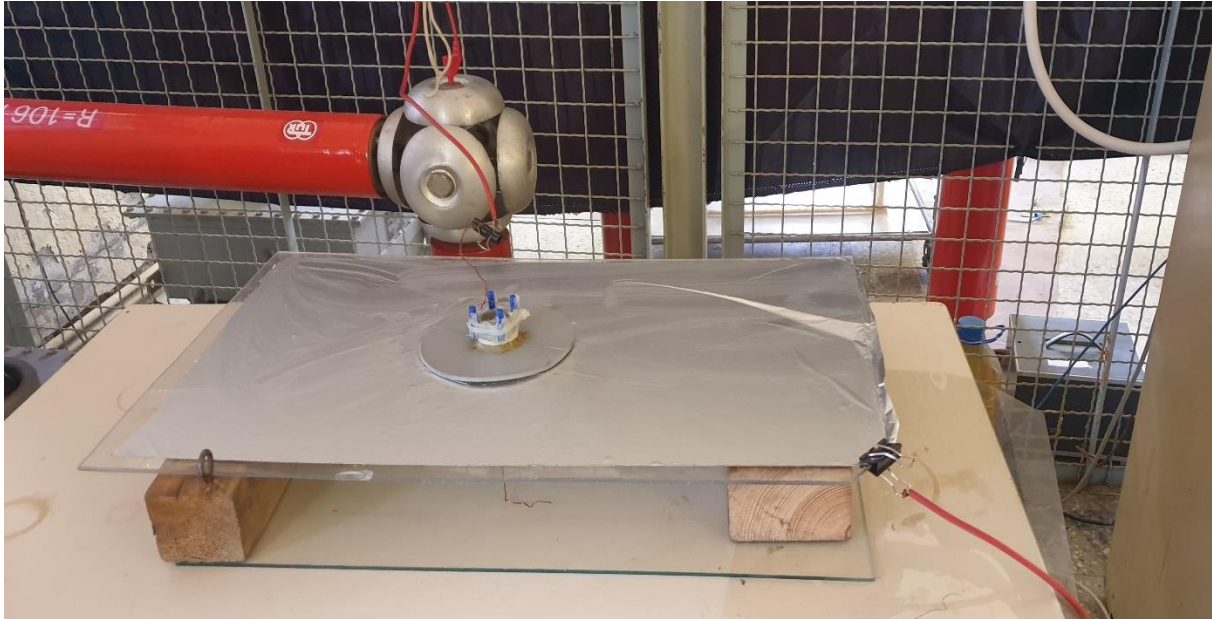
III.3.2. Techniques de Mesure du courant de fuite

La mesure du courant de fuite s'effectue par l'intermédiaire du signal tension capté aux bornes d'une faible résistance, insérée en série avec l'objet d'essais et la terre. Cette tension est mesurée à l'aide d'un voltmètre. Par suite le courant est déterminé en appliquons la loi d'Ohm.

Les essais sont réalisés sur des échantillons vierges et d'autre soumis à des cycles de vieillissement accéléré. Pour bien démontrer l'effet du vieillissement sur les polymères, des mesures du courant de fuit sont réalisées sur des échantillons sec et pollués avec cinq conductivités déférentes en fixons la tension d'alimentation à 10kV.



(a)



(b)

Figure.III.22:Dispositif expérimental du laboratoire haut de tension de l'université Abderrahmane Mira de Bejaia

(a) Coté commande (b) coté haut de tension

III.3.3. Technique de Mesure de pertes diélectriques

Quand un diélectrique est exposé à un champ électrique, il subit des changements au niveau moléculaire qui génèrent un champ électrique interne s'opposant au champ externe appliqué. Cette caractéristique des matériaux isolants solides et liquides porte le nom de permittivité relative ϵ_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. De plus, si une isolation solide n'est pas complètement homogène et contient des petites quantités d'air ou gaz, une décharge partielle se produit à l'intérieur de ces vacuoles, entraînant une dissipation d'énergie. Le courant total parcourant un isolant est déphasé par rapport la tension d'un angle Φ inférieur à 90° . Son complément δ est appelé angle de pertes. La tangente de cet angle ($tg\delta$) est appelée facteur de dissipation. L'indice de pertes d'un isolant ($\epsilon_r \cdot tg\delta$) est égal 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 :

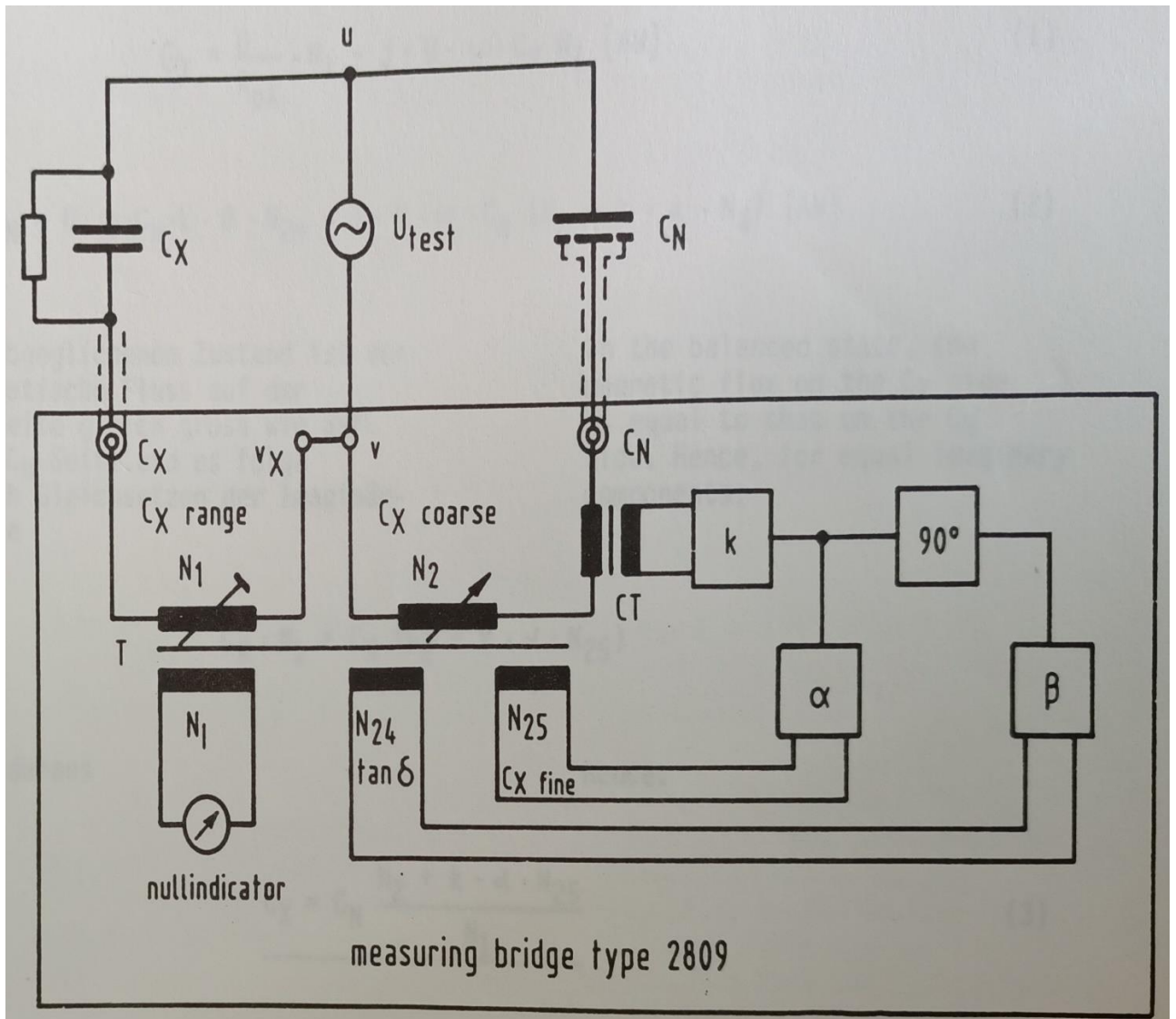
- ✚ Pont de mesure (type 2809) de C_x et de $tg\delta_x$;

- ✚ 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.

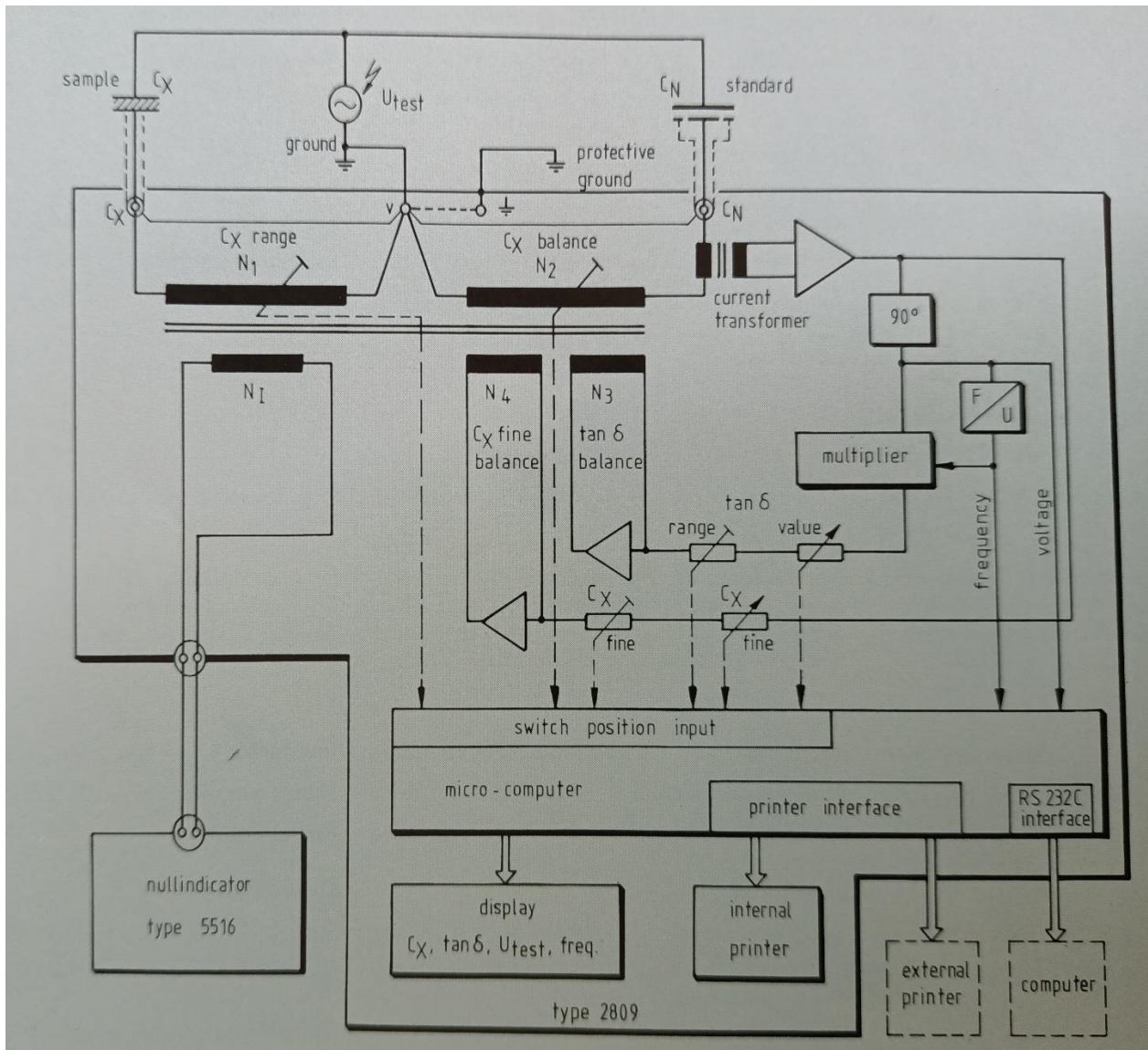
III.3.3.1. Descriptif et principe de mesure

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 (figure III.23).

- ✚ 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 $tg\delta$;
- ✚ Le micro-ordinateur incorporé calcule les valeurs d'affichage de C_X , $tg\delta$, U_{test} et sa fréquence à partir des commutateurs des décades de C_X et $tg\delta$, ainsi que des valeurs de réglage analogique et numérique de C_N .



a



b

Figure.III.23: Schéma bloc du pont de Schering.

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

- ✚ Réaliser le montage de la figure III.24 en utilisant la cellule de mesure type 2914. (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).
- ✚ Relier V à la terre avec la barrette de mise à la terre.
- ✚ Introduire l'échantillon de silicone dans la cellule de mesure
- ✚ Resserrer les électrodes à l'aide du bouton rotatif, jusqu'à exercer une pression de 2N/cm^2 indiquée sur le manomètre incorporé au socle.

- ✚ 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.
- ✚ Vérifier que le sélecteur de tension d'alimentation (33) est mis sur la bonne tension.
- ✚ Sélectionner l'application linéaire « LIN » ou logarithmique « LOG » (20) sur l'indicateur de Zéro.
- ✚ Sélectionner le niveau de sensibilité (22) de 1 à 6 pour une opération linéaire et de 4 à 6 pour une opération logarithmique.
- ✚ Régler la fréquence à 50Hz sur le sélecteur (24).
- ✚ Connecter la prise de terre (25).
- ✚ Afficher la température d'essai désirée sur le régulateur de température.
- ✚ Vérifier que le sélecteur de tension sur le régulateur de température est mis sur la borne tension.
- ✚ Activer la touche POWER sur le régulateur de température.
- ✚ Actionner la touche POWER (26) sur l'indicateur de zéro ;
- ✚ Mettre l'appareil sous tension, et le laisser chauffer pendant 03 minutes.
- ✚ 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.
- ✚ 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.
- ✚ Activer l'alimentation de tension d'essai et augmenter cette tension à la valeur souhaitée.
- ✚ Commencer à équilibrer en réglant alternativement la décade C_x (9 et 10), les éléments d'équilibrage de $tg \delta_x$ 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.
- ✚ Dès que l'indicateur de zéro indique une valeur minimale, relever les valeurs de C_x , $tg \delta_x$;
- ✚ Calculer la valeur de ε_{rx} par l'équation 2 ou 3 ;

$$\varepsilon_{rx} = \frac{1}{C_0} \frac{C_x}{\varepsilon_0 \frac{S}{d}} \quad \text{III.1}$$

$$\varepsilon_{rx} = 0,5647 C_x d \quad \text{III.2}$$

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 cm^2 , soit 20 cm^2 ;

C_0 : Capacité à vide exprimée en pF ;

ϵ_0 : Permittivité du vide ($\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$).

✚ Calculer l'indice de perte $\epsilon_{rx} \cdot \text{tg}\delta_x$;

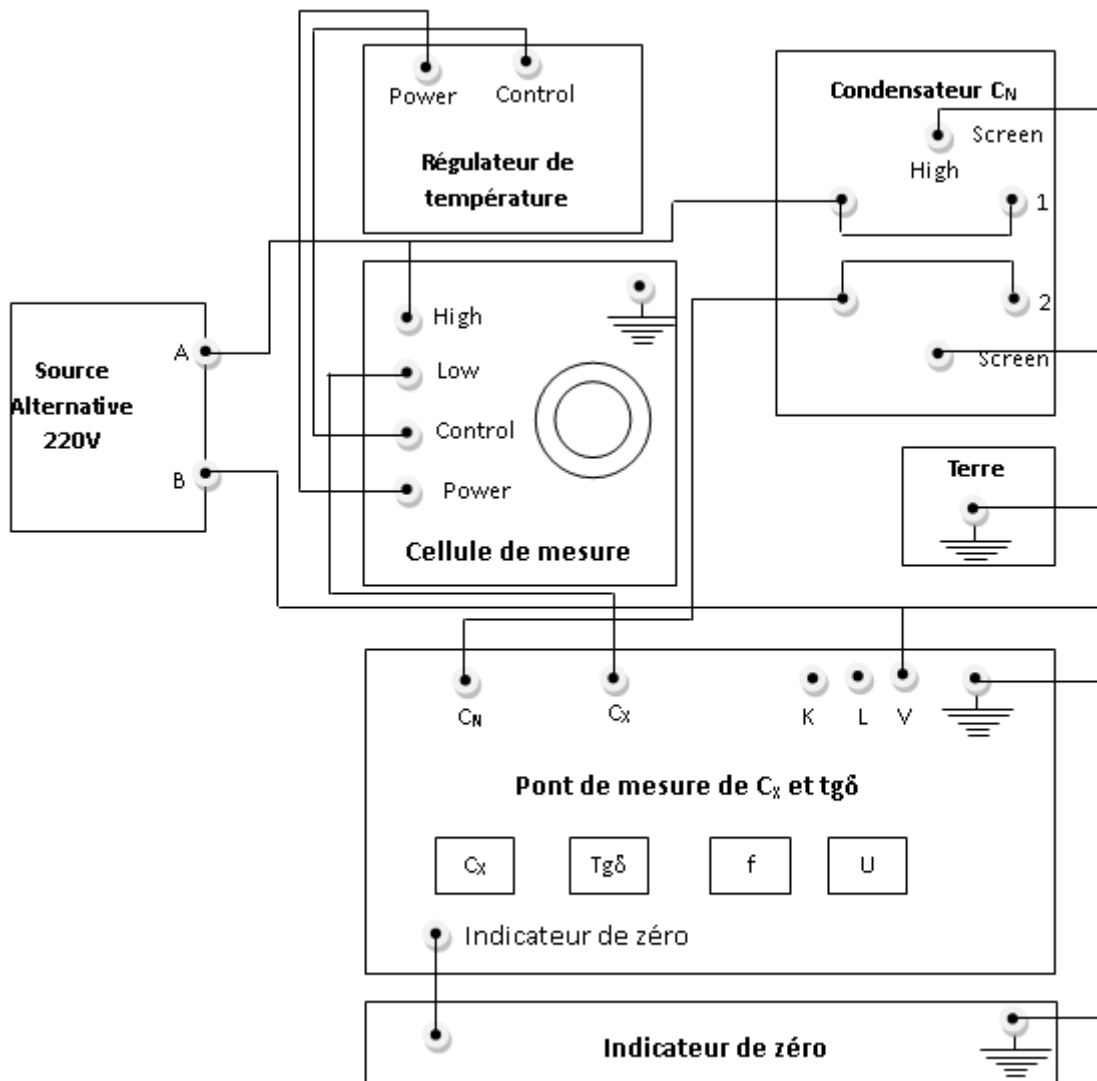


Figure.III.24:Schémas du branchement de la cellule de mesure de pertes diélectriques.

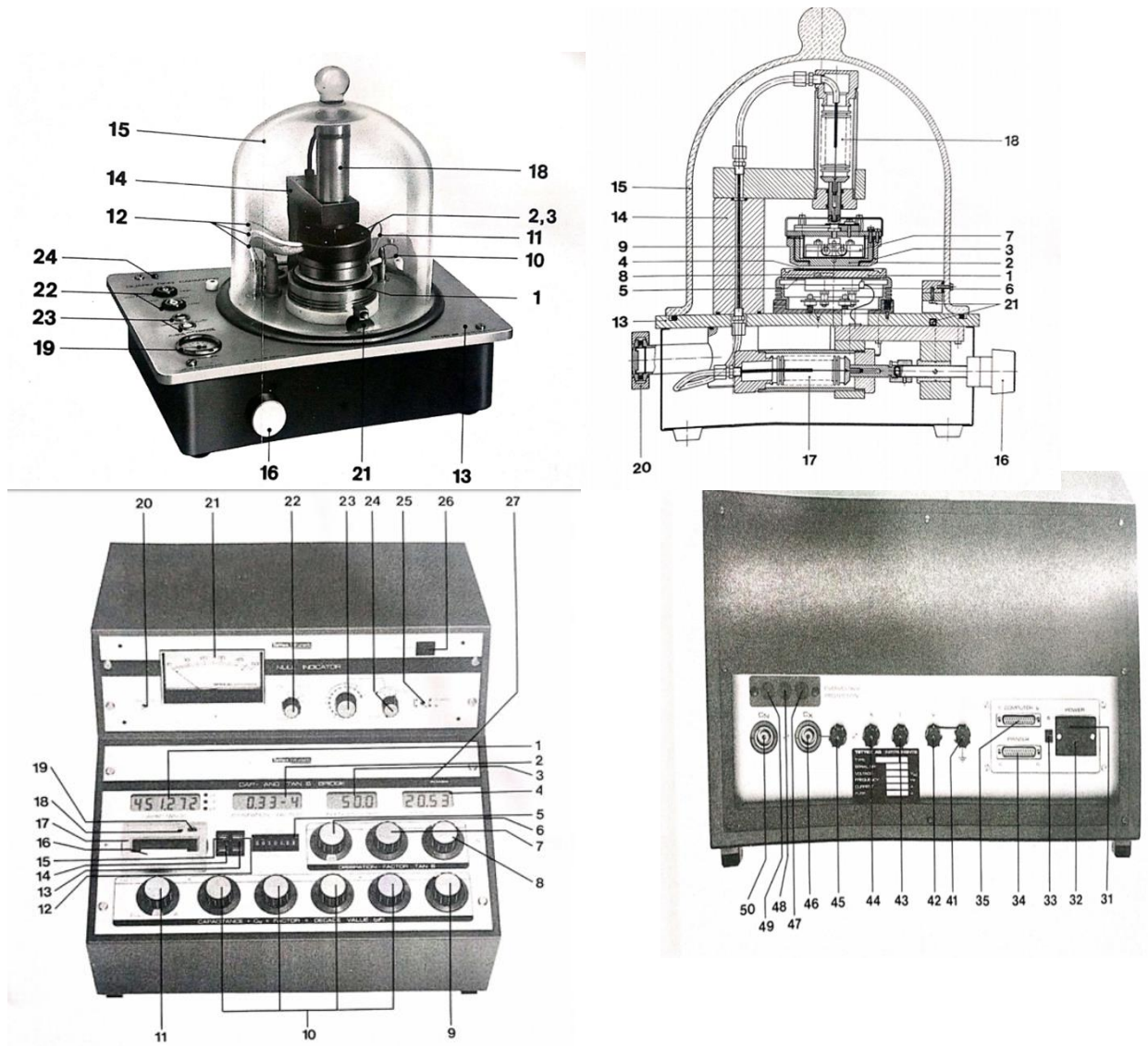


Figure.III.25:éléments constituant le pont de mesure de pertes diélectriques.



Figure.III.26: Photographie de la cellule de mesure de pertes diélectrique.

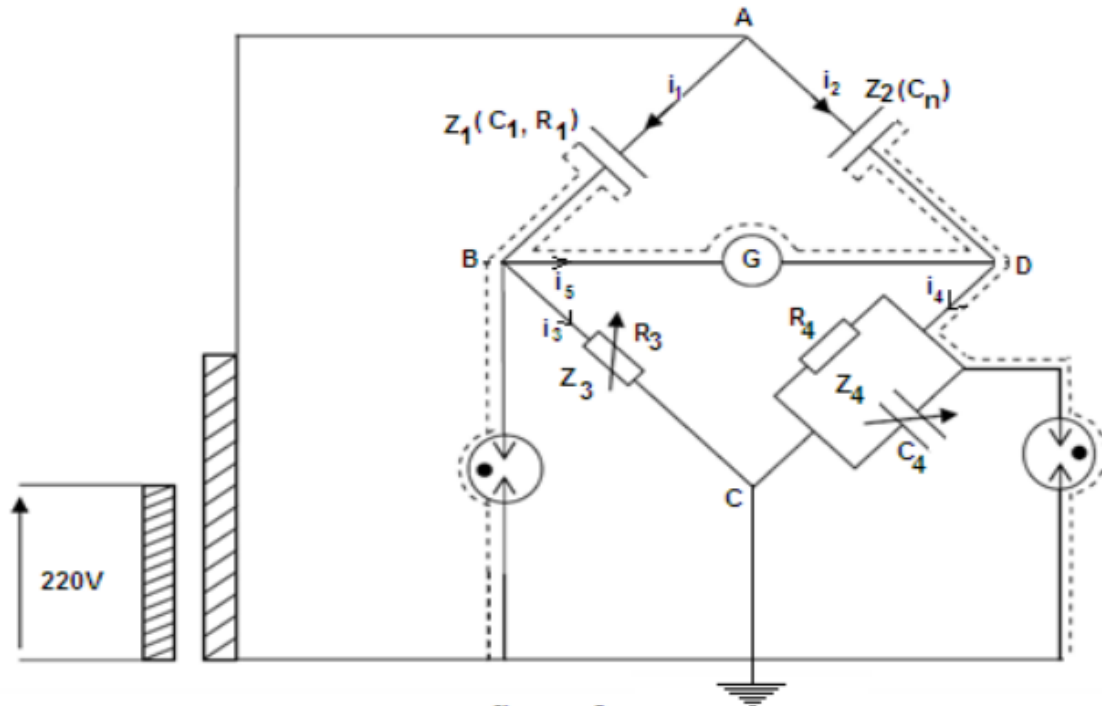


Figure.III.27: Pont de Schering.

III.3.5. Technique de mesure de l'angle de contact (tension de surface)

La tension de surface d'un matériau hydrophobe est une mesure de sa capacité à repousser l'eau. Elle est liée à l'interaction entre les molécules du matériau et celles 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. Il détermine la forme que prend une goutte sur la surface. A la frontière entre la goutte et l'environnement gazeux, la tension superficielle crée un contour courbé. Au bord de la goutte, l'angle de contact se forme entre l'interface liquide /solide et la tangente à l'interface liquide/gazeux.

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 :

- ✚ 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 ;
- ✚ Déposer une petite quantité de liquide sur le matériau à l'aide d'une micropipette(figureIII.28) ;
- ✚ 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.

- ✚ Utiliser un logiciel pour calculer l'angle de contact du matériau en fonction de la forme de la goutte (figure III.29).

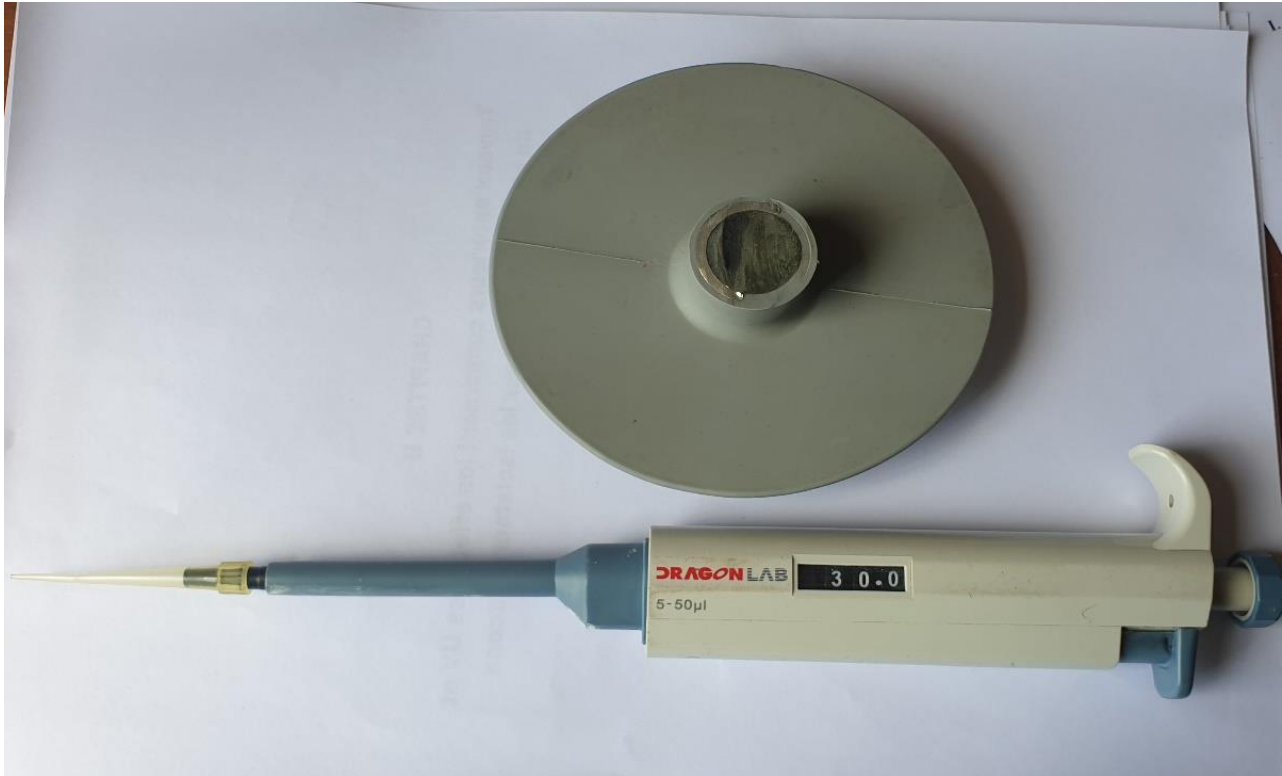


Figure.III.28: Micropipette utilisée pour doser et disposer la goutte d'eau sur la surface de la silicone.

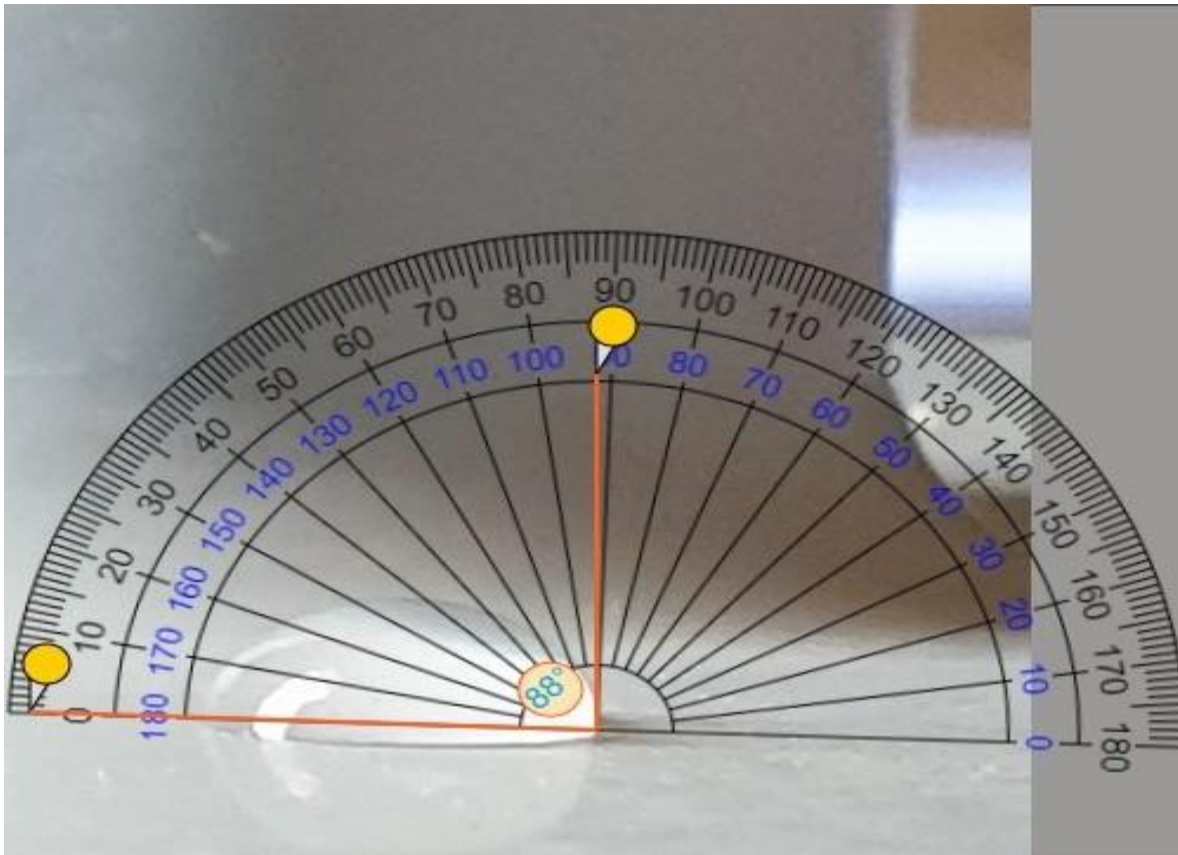


Figure.III.29:Tracé de la tangente au point d'interface solide / liquide / gaz.

Il est important de noter que la tension de surface est seulement 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.

La figure III.30. Représente un récapitulatif des différents types de régimes de mouillage en fonction de leur angle de contact qui définit le caractère hydrophile ou hydrophobe de la surface.

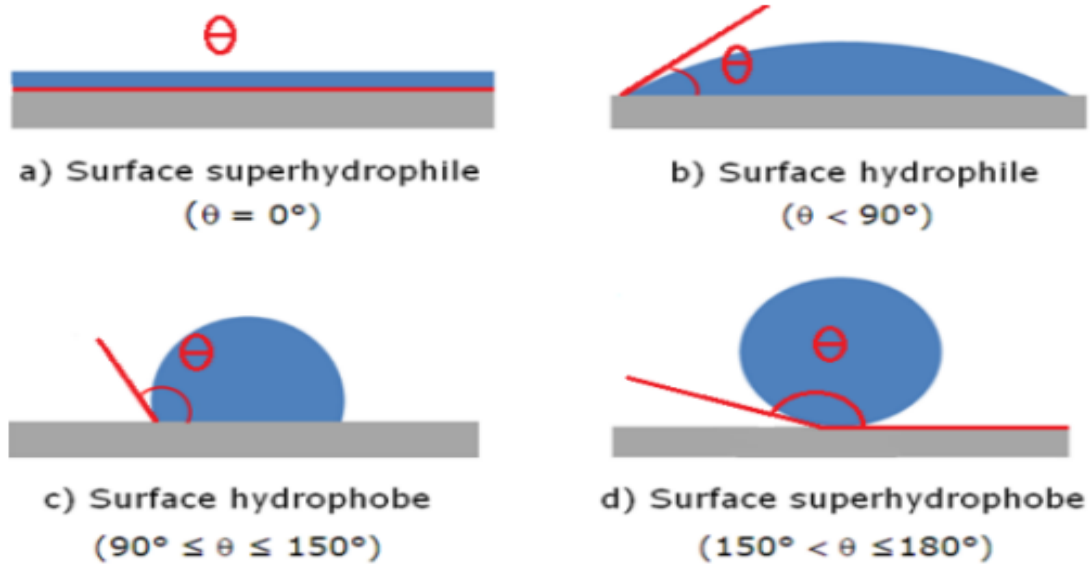


Figure.III.30:Comportement d'une goutte d'eau sur une surface isolante.

III.3.6. La diffraction des rayons X (DRX ou XRD)

La diffractométrie des rayons X est une méthode d'analyse Physico-chimique. Elle ne marche que sur la matière cristallisée (minéraux, métaux, céramiques, produits organiques cristallisés). Par contre, elle permet de reconnaître des produits ayant la même composition chimique brute, mais uniforme de cristallisation différente, par exemple de distinguer les différentes silices, les différents aciers, ou les différentes alumines. L'appareil de mesure est un diffractomètre dont les données collectées forment le diagramme de diffraction ou le diffractogramme.

✚ Mesure

Les échantillons silicone de dimension (20x10) mm² sont exposés à un faisceau de rayons X dont l'intensité est mesurée au moyen d'un détecteur rotatif directionnel.

La diffraction des rayons X consiste à appliquer un rayonnement de longueur d'onde ($0.1 < \lambda < 10$ nm) sur l'échantillon orienté. Ce rayonnement pénètre le cristal, il y a absorption d'une partie de l'énergie et excitation des atomes : Les rayons X, comme toutes les ondes électromagnétiques, provoquent un déplacement du nuage électronique par rapport au noyau dans les atomes ; ces oscillations induites provoquent une réémission d'ondes électromagnétiques de même fréquence, ce phénomène est appelé diffusion Rayleigh.

La longueur d'onde des rayons X étant de l'ordre de grandeur des distances inter atomiques (quelques angströms), les interférences des rayons diffusés vont être Alternativement constructives ou destructives. Selon la direction de l'espace, on va donc avoir un flux important de photons X, ou au contraire très faible, ces variations selon les directions forment le phénomène de diffraction X.



Figure.III.31: Vue d'une installation de diffraction avec les rayons X.

Résultats et discussions

III.4. Observation visuelle

Quand on examine visuellement la surface des échantillons vieillis exposés aux rayons ultraviolets, ou champ électrique et à la température, on peut observer divers changements importants. En premier lieu, la couleur de la surface est devenue moins éclatante et plus terne.

On constate que ces échantillons ont commencé à devenir plus clairs, et cette décoloration augmente progressivement avec la durée d'exposition. Des fissures et des craquelures sont également apparues à proximité immédiate de l'électrode sous tension, 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 et le champ électrique (figure III.32). En remarque aussi l'apparition de taches de rouille sur la surface des échantillons vieillis au tour des électrodes et qui diminues en s'éloignant et elles gagnent en intensité avec la durée d'exposition, ce qui indique une détérioration progressive au fil du temps.

La coloration est souvent perçue comme un signe précoce de détérioration des polymères, accompagnée d'une altération de leurs propriétés physico-chimiques due à des processus de cyclisation intramoléculaire. Ce phénomène initie l'oxydation de surface, qui provoque la perte d'hydrophobicité, enfin la surface de l'élastomère devienne convexe.

Un phénomène très intéressant est observé sur la surface des échantillons vieillis tout autour des pointes sous haute tension, c'est le phénomène d'iridescence, aussi connue sous le nom de gonochorisme ou d'irisation, c'est la propriété de certaines surfaces qui semblent changer de couleur selon l'angle de vue ou d'illumination (figure III.33). Selon les modèles de Wenzel et Cassie-Baxter (figure III.34) les surfaces des matériaux hydrophobes ont un agencement en nanostructure très régulière (micro-piliers). La multiplication des points de contact, et leur taille infime permet d'obtenir de très grands angles de contact avec la goutte, et donc de créer une surface hydrophobe. La présence de crêtes permet de faire rebondir l'eau et de créer de plus petites gouttelettes, qui auront moins de chances de se lier à la surface. Mais sous l'action du champ électrique les micro-piliers se sont inclinés dans un sens divergent de la pointe sous tension vers l'extérieur. L'élément clé à l'origine de ces couleurs est l'état de surface ainsi créé. Les micro-piliers mesurent moins d'un micromètre d'épaisseur. Ce qui correspond justement à l'ordre de grandeur des longueurs d'onde de la lumière visible. Ainsi, lorsque la lumière du soleil vient frapper la surface sous un certain angle, certains rayons sont réfléchis par un premier pilier, incliné d'autres

traversent ce premier pilier et sont réfléchis par d'autres, juste derrière. La différence de longueur entre ces deux chemins est tellement petite, qu'au final, les rayons interfèrent entre eux et ne laissent échapper qu'une seule couleur, qui dépend de l'épaisseur des piliers. Les motifs coronaires que l'on observe autour de la pointe sous tension indiquent simplement des variations locales du champ électrique qui diminue en s'éloignant de la pointe. Cette iridescence s'étend sur la surface de l'isolateur autour des pointes sous tension et avec le temps d'expositions pour atteindre des distances dépassant 3cm après 5 semaines d'exposition.

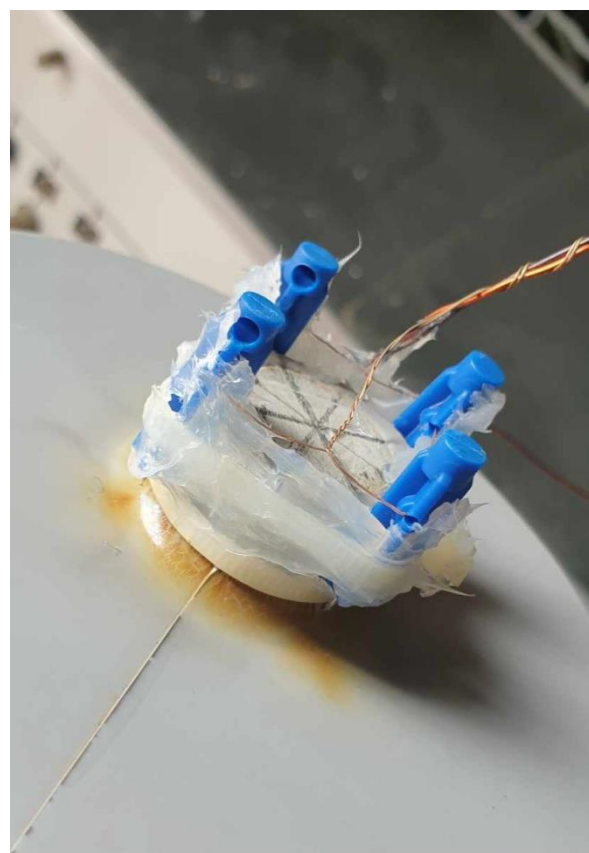
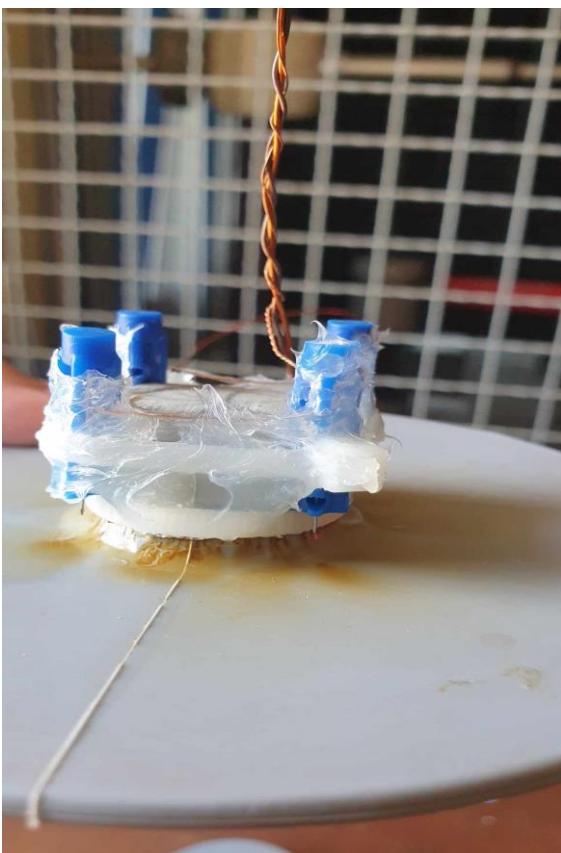


Figure.III.32:Des taches de rouille sur la surface des échantillons vieillis.



Figure.III.33: Observation visuelle de la décoloration des échantillons en silicone après vieillissement (phénomène iridescence).

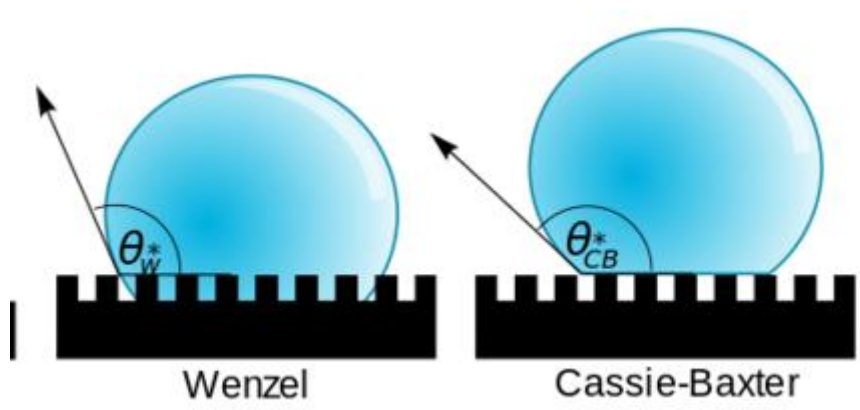


Figure.III.34: Modèles de Wenzel et Cassie-Baxter.

III.5. Tension de contournement

Dans cette étude, nous analysons l'influence de la durée du vieillissement sur la tension de contournement des échantillons sous pollution pour mettre en évidence la perte d'hydrophobie de la silicone sous l'action combiné des UV, du champ électrique et de la température.

III.5.1. Mesure de la tension de contournement pour différents niveaux de pollution

L'essai de contournement est effectué juste après avoir humidifié l'isolateur par la solution saline (en suivant les étapes décrite dans le paragraphe III.2.1.4). Pour être en conformité avec la norme de la CEI nous répétons l'essai de contournement vingt fois pour chaque solution saline.

Avant chaque essai nous nettoyons toute la zone de l'isolateur avec le papier absorbant pour éliminer les traces laissées par le passage de l'arc électrique et le reste de la pollution.

La valeur de la tension de contournement retenue est la moyenne des vingt valeurs obtenues. Ces essais sont effectués sous tension alternative pour chaque niveau de pollution (765 μ S/cm, 1000 μ S/cm, 1500 μ S/cm, 2000 μ S/cm, 3000 μ S/cm).

Dans le but d'opérer avec un minimum d'erreurs dans les mesures, nous avons gardés la distance fixe entre le pulvérisateur et l'objet d'essai ainsi que le nombre de pulvérisations.

La figure III.35 montre les variations de tension de contournement (claquage) sur la surface des échantillons en fonction de la conductivité volumique de l'électrolyte exprimée en μ S/cm.

D'après la figure III.35 on remarque que l'augmentation de la conductivité sur la surface de l'échantillon fait diminuer la tension de claquage tout au long de l'expérience. Ce résultat est attendu car lorsque la conductivité de la couche de pollution augmente, l'impédance équivalente vue des électrodes diminue, ce qui entraîne une dégradation croissante de la tenue diélectrique. La figure III.35 montre que pour une même valeur de la conductivité volumique, la tension de contournement diminue quand le temps de vieillissement augmente.

Le vieillissement des isolateurs polymères dépend fortement du temps d'exposition aux rayons UV, comme le montre le résultat de courbe de tension de claquage en fonction du temps de vieillissement (figure III.35), on remarque une diminution quasi linéaire et le pic de vieillissement n'est pas atteint après 720 heures d'exposition au UV sous une température de 60°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 et du champ électrique.

On addition l'effet de la pollution conductrice et une exposition prolongée aux rayons UV réduit considérablement la tension de claquage. Cela prouve aussi que cet effet de réduction de tension de claquage est amplifié en présence des deux facteurs pollution conductrice et les contraintes abordées dans le cadre de notre étude.

Ce qui a le plus d'impact sur la tension de claquage des échantillons pollués est l'exposition prolongée aux UV qui provoque à son tour la perte d'hydrophobie de la silicone engendrant la diminution de l'angle de contact, qui se traduit par l'aplatissement des gouttelettes de pollution sur la surface des échantillons et un grand mouillage de cette dernière ainsi favorisant l'apparition des arcs partiels qui se propagent jusqu'au contournement.

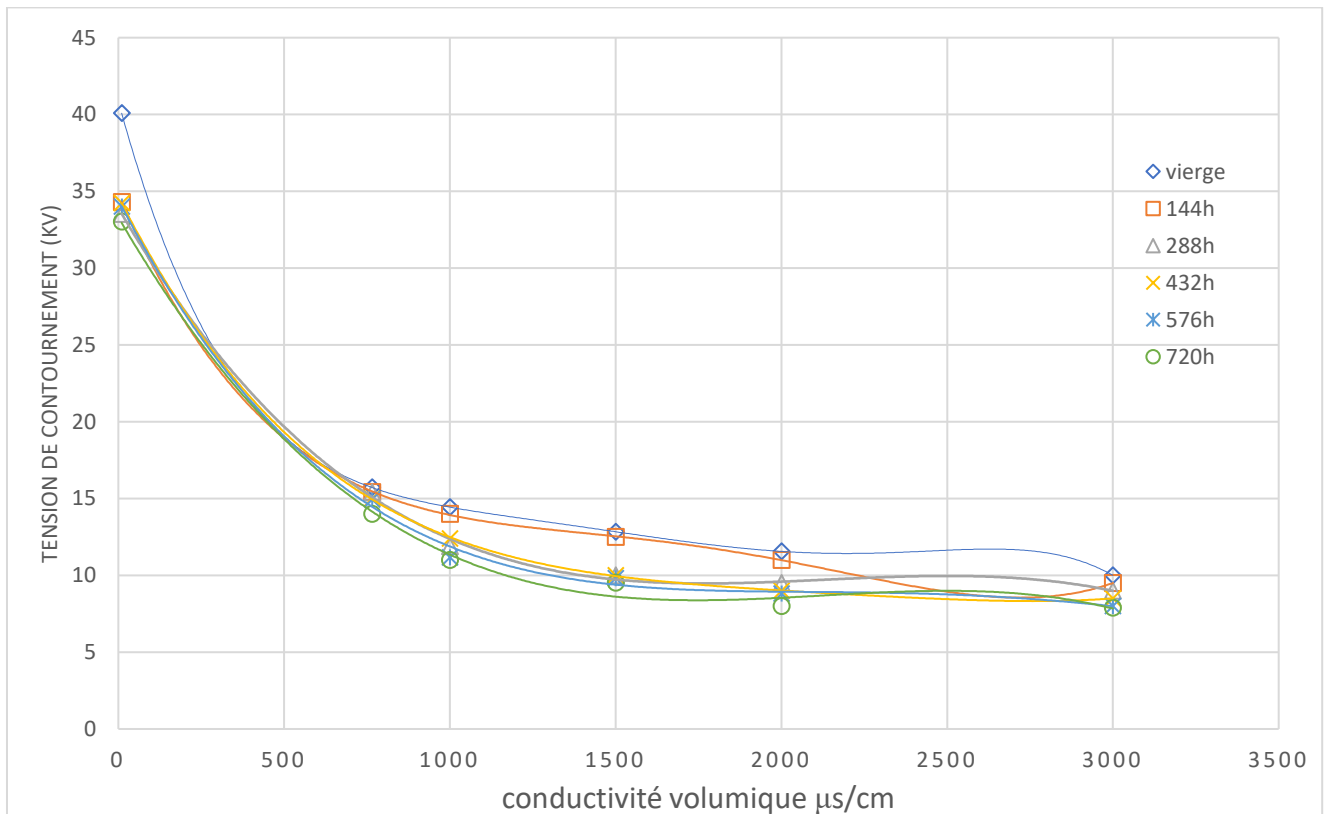


Figure.III.35: Tension de claquage de l'échantillon en fonction de la conductivité.

III.6. 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 de mesure R_M , 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.

Les essais sont réalisés sur des échantillons vierges et d'autre soumis à des cycles de vieillissement accéléré sous l'action simultanée du champ électrique, des rayons UV et sous température contrôlée pour simuler les conditions désertiques d'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 la quantité pollution pulvérisée sur la surface de l'isolateur. 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 10 kV.

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.

La figure III.36 montre la variation du courant de fuite en fonction du temps de vieillissement et pour une tension appliquée de 10 kV, on peut voir que les valeurs de courant augmentent et suit une fonction exponentielle au fur et à mesure que le temps de vieillissement augmente, 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 augmentée aussi le courant de fuite pour le même degré de sévérité de pollution. Du fait que la mouillabilité est plus importante et les échantillons ont perdus partiellement leurs hydrophobicités. Ce constat est dû essentiellement au fait que l'angle de contact des échantillons diminue avec le temps de vieillissement ce qui fait qu'une goutte de même volume aplati, mouillera une surface plus importante de l'isolateur au point où les des gouttes s'agglomèrent entre elles pour former une continuité de l'électrolyte sur la surface de l'isolateur et qui engendre une augmentation exponentielle du courant de fuite pour les plus longues périodes d'expositions.

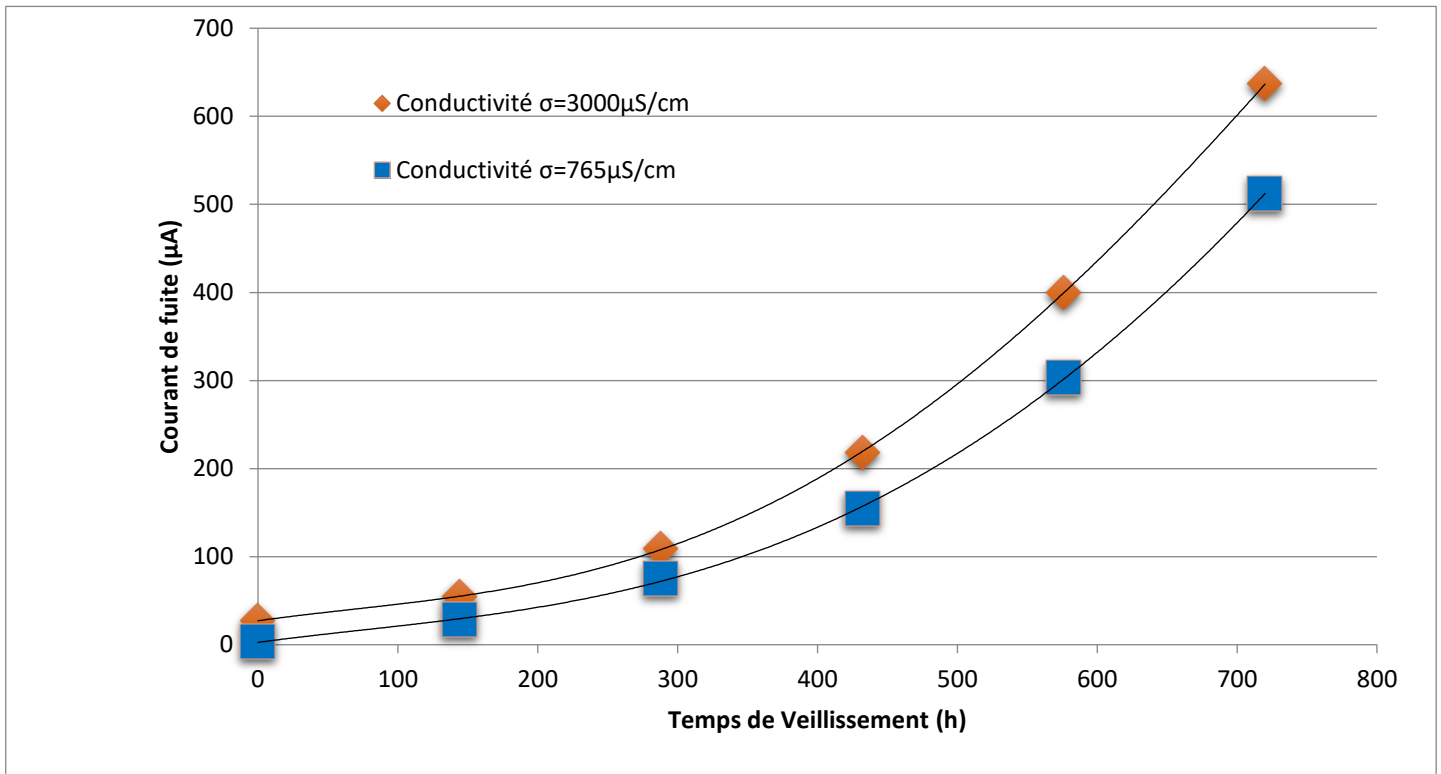


Figure.III.36 : Evolution du courant de fuite en fonction du temps de vieillissement.

III.7. Hydrophobie et angle de contact

L'hydrophobicité d'une surface est caractérisée par l'angle de contact θ d'une goutte de liquide déposée sur une surface solide plane, celui-ci est défini par l'angle formé entre la tangente à la goutte au point de contact et la surface solide. La mesure de cet angle permet de déduire le caractère hydrophobe ou hydrophile de la surface exprimé par son indice d'hydrophobicité. La forme que prend une goutte sur une surface dépend de la tension superficielle du fluide et de la nature de la surface

Dans notre étude, l'angle de contact α de la goutte d'eau est déterminé pour différentes zones de la surface de l'isolateur de silicone pour chacun des huit échantillons, pour ce qui est du volume des gouttes ils ont été fixés à 3µl.

A l'aide d'un appareil photo numérique de grande isolation, nous avons réalisé des prises de photos des gouttes d'eau posées sur la surface de l'échantillon de silicone, et ces

dernières sont alors traitées en utilisant le site https://www.ginifab.com/feeds/angle_measurement/ pour mesurer l'angle de contact θ , dans un premier temps, et déterminer l'évolution de l'angle de contact en fonction du temps de vieillissement.

La surface de la silicone vierge présente des gouttelettes discrètes dont l'angle de contact formé et mesurée avec la méthode ci-dessus citée est égal à $\alpha = 88^\circ$. Cette valeur témoigne d'un mouillage faible de cette surface, donc d'un état d'hydrophobicité moyen de la silicone vierge (figure III.37).

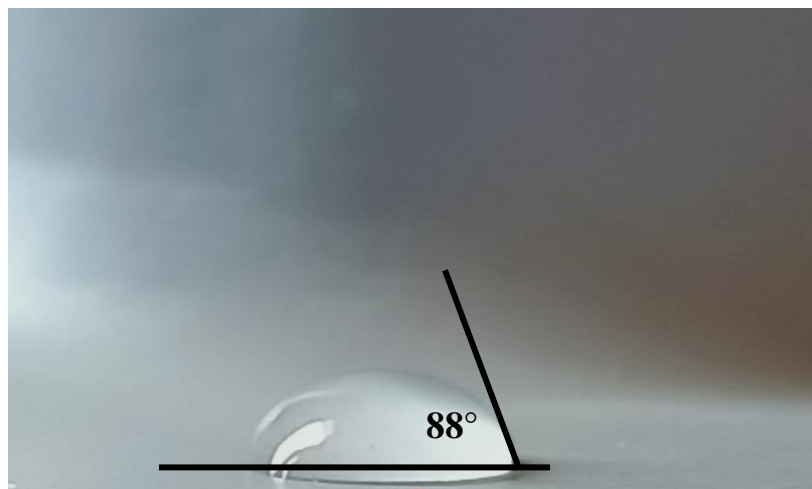


Figure.III.37: Angle de contact d'une gouttelette d'eau sur la surface de la silicone vierge.

Les tableaux résumant les résultats de la mesure de l'angle de contact α sur les deux côtés des échantillons considérés (côté exposé au UV et côté non exposé au UV), en fonction du temps de vieillissement ainsi que la position de la prise de la mesure de l'angle de contact par rapport à l'électrode active (pointe sous tension) et l'électrode circulaire mise à la terre.

Position de la mesure de l'angle de contact sur l'isolateur	Durée du vieillissement (Heures)			
	144 h	288 h	432 h	576 h
Proche de l'électrode mise à la terre	55°	$\alpha < 45^\circ$	$\alpha < 45^\circ$	$\alpha < 30^\circ$
A une distance de 2,5cm de l'électrode mise à la terre	86°	83°	81°	78°
A une distance de 5cm de l'électrode mise à la terre	87°	82°	82°	78°

Tableau.III.2 : Coté non exposé du l'échantillon (coté supérieur).

Position de la mesure de l'angle de contact sur l'isolateur	Durée du vieillissement (Heures)			
	144 h	288 h	432 h	576 h
Proche de la pointe sous tension	$\alpha < 45^\circ$	$\alpha < 30^\circ$	$\alpha < 30^\circ$	$\alpha < 20^\circ$
A une distance de 2,5cm de la pointe sous tension	82°	75°	60°	$\alpha < 45^\circ$
A une distance de 5cm de la Pointe sous tension	80°	77°	65°	55°

Tableau.III.3 : Coté exposé du l'échantillon (coté inférieur).

D'après les valeurs des deux tableaux ci-dessus on remarque que l'angle de contact relevé sur différentes positions des échantillons considérés diminue avec la durée d'exposition au diverses contraintes considérées dans notre étude. Le gradient de l'angle de contact, par

rapport aux valeurs des échantillons à l'état vierge, est moins important pour le côté non exposé en s'éloignant des électrodes et en allant vers les extrémités de l'ailette. Nous avons enregistré les valeurs les plus faibles dans les zones où le phénomène d'iridescence est apparu (aux tours des pointes sous tension) ce qui nous permet de déduire que l'action combiné des contraintes étudiées dans le cadre de ce travail sont suffisante pour modifier la structure microscopique de la silicone entraînant une dégradation très importante de l'hydrophobicité, une des propriétés pour lesquels la silicone est utilisée dans l'isolation en haute tension.

III.8. Analyse à la diffractométrie de rayon X (DRX)

Pour les besoins de l'analyse de la structure de nos échantillons à la DRX, nous avons procédé à la découpe des portions rectangulaires de (1cm x 2 cm) sur l'échantillon vierge et sur les échantillons vieillis. Sur les échantillons vieillis nous avons ciblé les zones qui ont subi plus de dégâts.

La diffractométrie de rayons X est une technique d'analyse basée sur la diffraction des rayons X par la matière. La méthode générale consiste à bombarder l'échantillon avec des rayons X, et à analyser l'intensité des rayons X qui est diffusée selon l'orientation dans l'espace. Les rayons X diffusés interfèrent entre eux, l'intensité présente donc des maxima dans certaines directions, on parle de phénomène de « diffraction ». On enregistre l'intensité détectée en fonction de l'angle de déviation 2θ du faisceau. Les résultats de la DRX sont obtenus sur un diagramme de diffraction. Ce diagramme est aussi appelé diffractogramme.

Avoir des informations précises sur la structure cristalline de nos échantillons vierge et vieillis est essentielle pour interpréter la dégradation des propriétés des isolateurs en silicone. Les résultats de la DRX nous a permet d'obtenir des informations sur l'arrangement des éléments de nos échantillons, en mesurant la diffraction de rayons X sur les échantillons analysés.

D'après le diffractogramme on peut constater que l'action combiné des trois contraintes de vieillissement considérées dans notre étude, permet d'exercer des contraintes sur les couches superficielles, en imposant des tensions résiduelles et des déformations. On remarque sur diffractogramme pour un angle déviation de faisceau de $2\theta=18^\circ$ et $2\theta=20,1^\circ$, une diminution de l'intensité avec le temps de vieillissement.

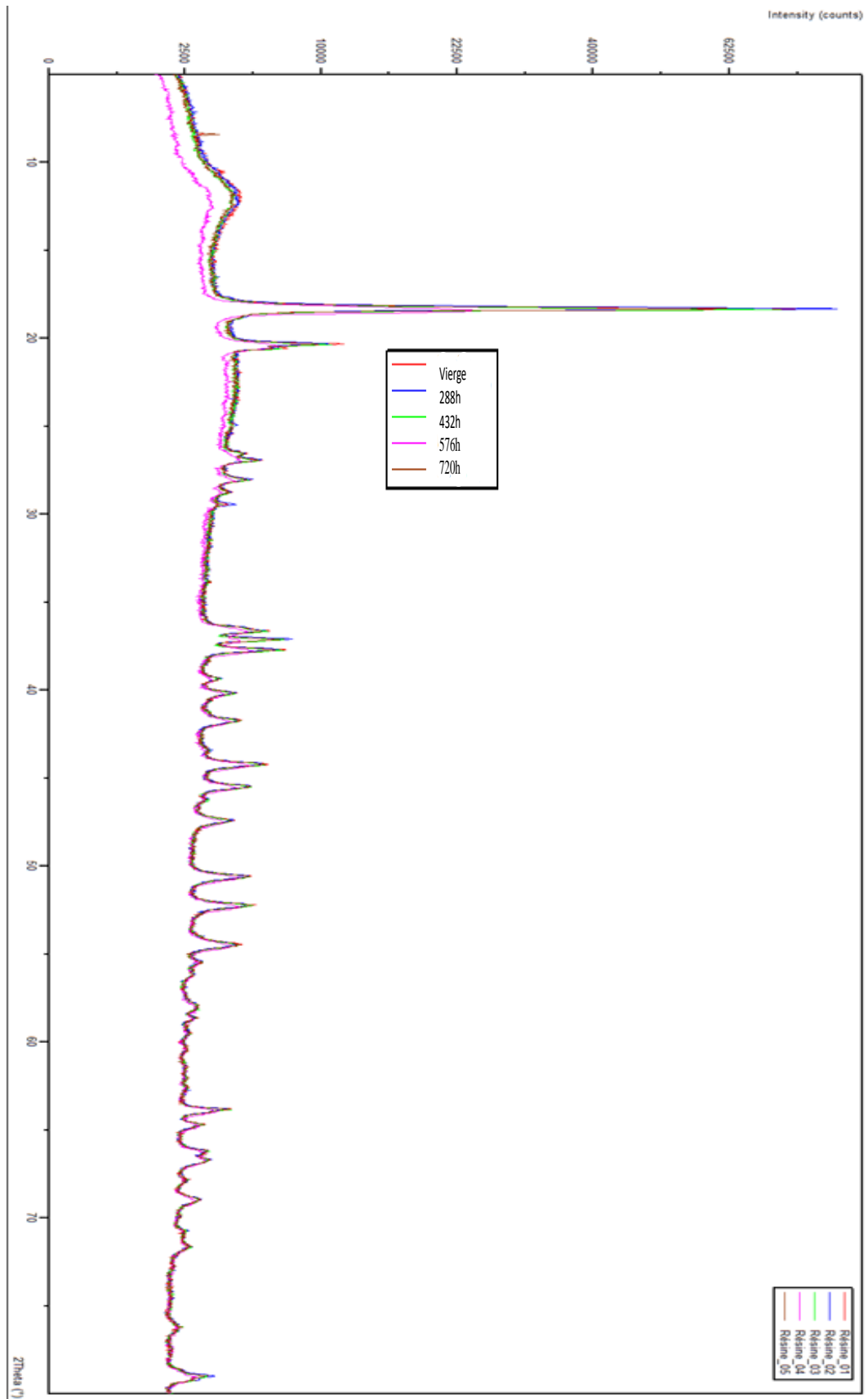


Figure.III.38:Diffractogramme des échantillons vierges et vieillis.

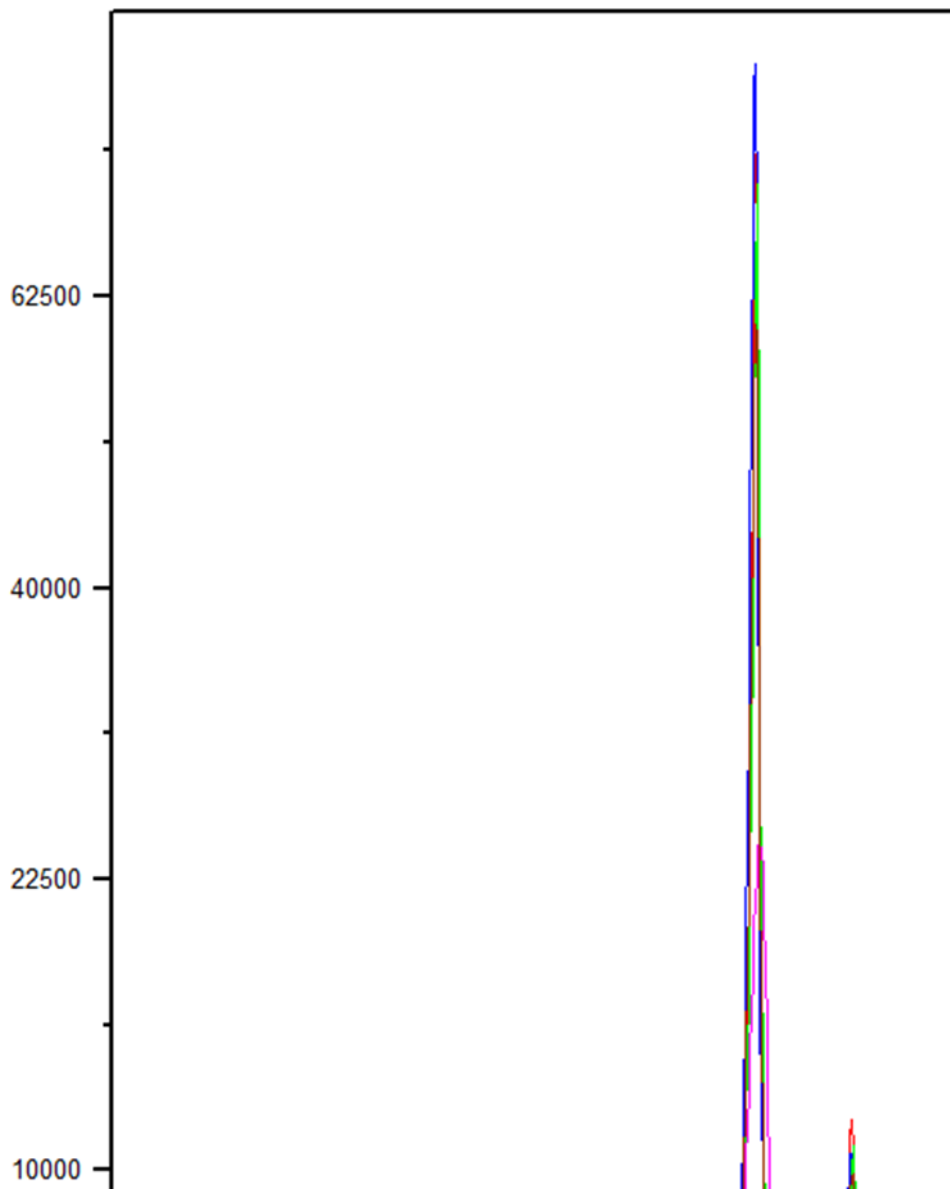


Figure.III.39:Zoomautour du point $2\theta=18^\circ$.

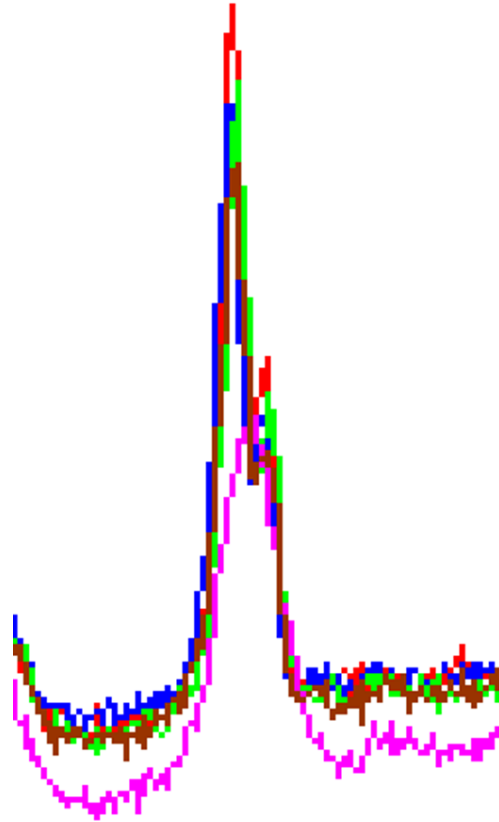


Figure.III.40: Zoom autour du point $2\theta=20,5^\circ$.

III.9. Mesure de capacité C_x et du facteur de perte $\text{tg } \delta$

Les mesures de C_x de $\text{tg } \delta$ et de l'indice de perte ($\epsilon_r * \text{tg } \delta$) sont représentés respectivement sur les figure III.41, III.42 et III.43. Au début du processus de vieillissement, nous remarquons l'augmentation de la valeur de l'indice de perte diélectrique après exposition aux trois contraintes considérées dans notre étude. Même constat a été rapporté dans des investigations précédentes. Dans notre cas, l'indice de perte diélectrique ne cesse de s'aggraver avec le temps de vieillissement, à l'inverse de ce qui a été rapporté par des investigations antérieurs réalisés dans notre laboratoire où la contrainte champs électrique n'a pas été considérée, l'indice de perte diélectrique ce stabilise après la deuxième semaine de vieillissement. 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 mais l'action combinée des trois contraintes, en particulier le champ électrique, a engendré des déformations dans la structure moléculaire de la silicone et la dégradation de ces propriétés diélectrique.

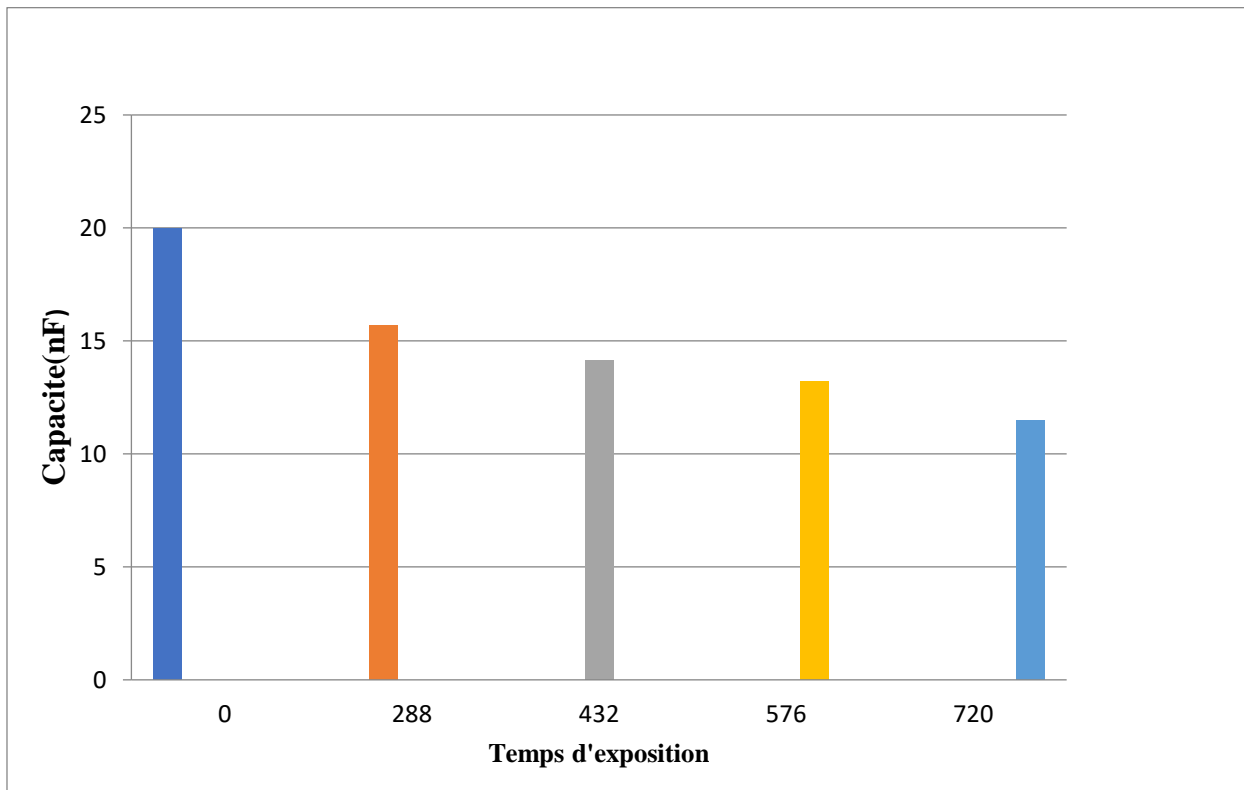
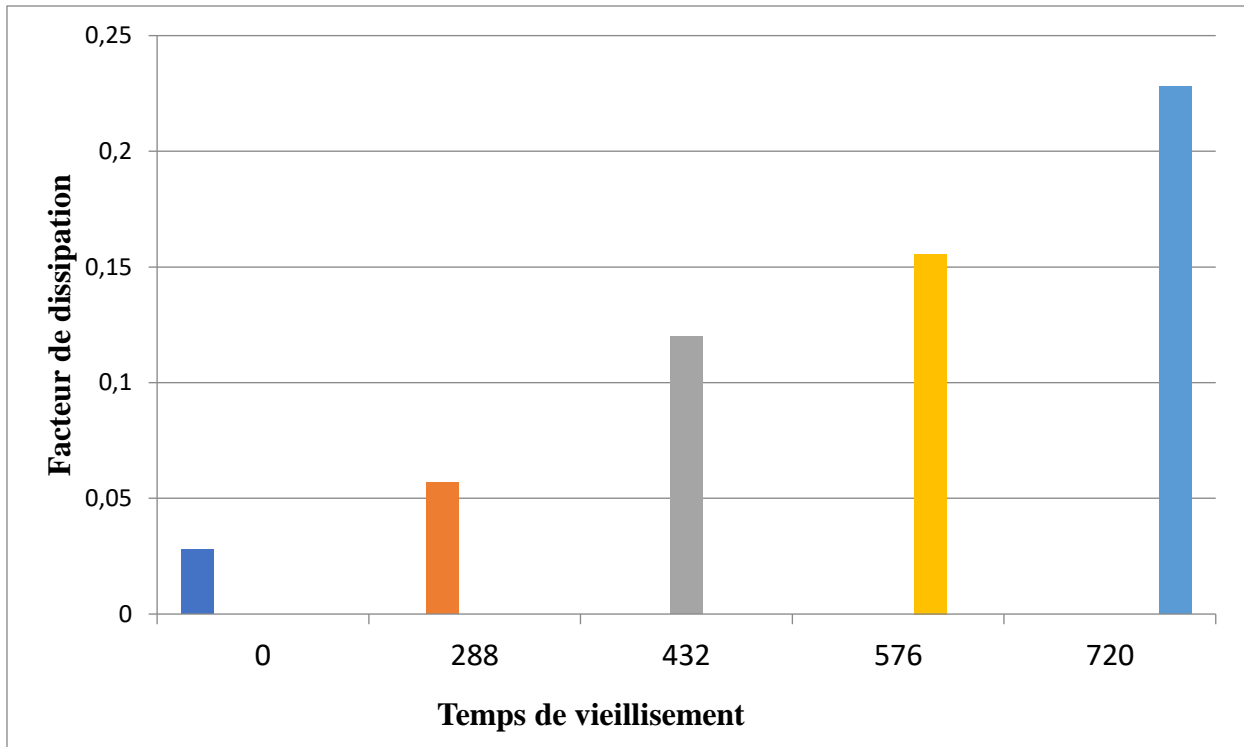


Figure.III.41 : Evolution de la capacité des échantillons en fonction de temps de vieillissement.



FigureIII.42 : Evolution du facteur de dissipation en fonction de temps de vieillissement.

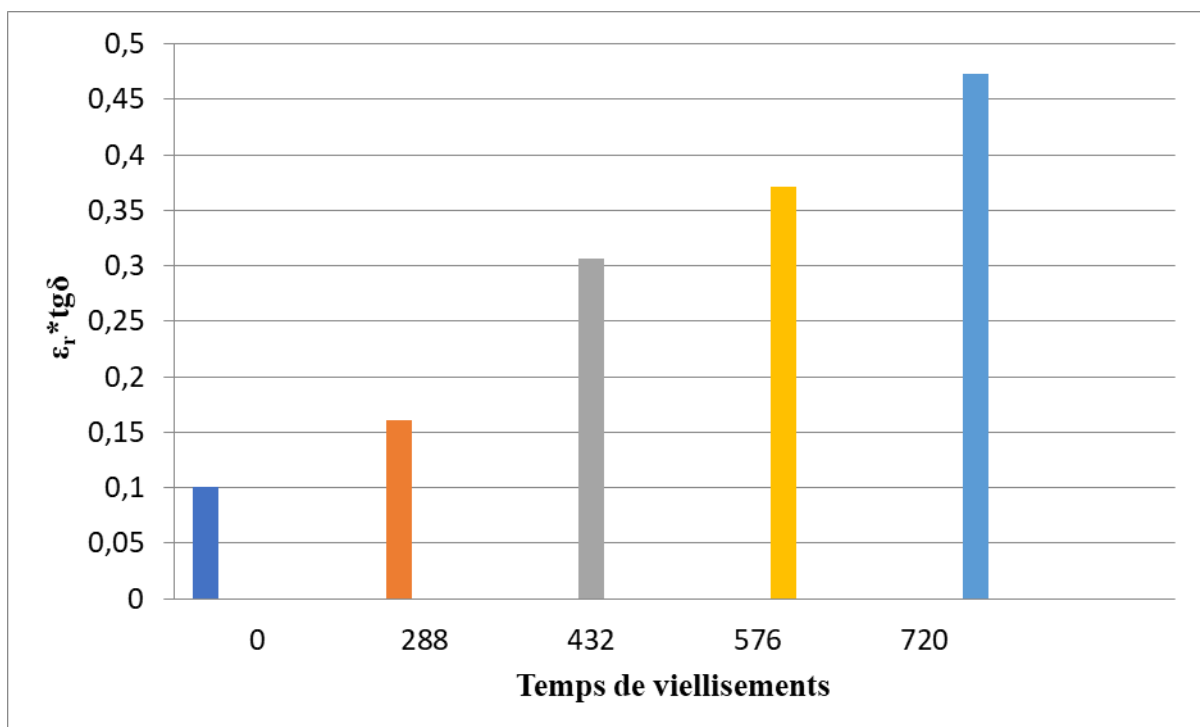


Figure.III.43 : Evolution de l'indice de perte diélectrique $\epsilon_r * tg\delta$ en fonction de temps de vieillissement.

III. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats obtenus des différents essais de l'étude de l'influence des rayons ultraviolets, du champ électrique et la température sur la silicone nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

L'exposition prolongée aux rayons ultraviolets, le champ électrique et à température d'exploitation extrême a provoqué une décoloration de la silicone qui s'accroît avec l'augmentation de la durée d'expositions. Avec apparition de la rouille sur les deux surfaces (exposée et non exposée).

Une perte d'hydrophobie et diminution de l'angle de contact est constatée après chaque cycle de vieillissement accéléré pour tous les échantillons.

L'augmentation du temps de vieillissement provoque la réduction de la tension de claquage sous pollution 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'impact de la solution saline sur le courant de fuite et la tension de claquage est amplifié après une exposition aux rayons UV, au champ électrique 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.

Sur le diffractogramme on peut constater que l'action combinée des trois contraintes de vieillissement considérées dans notre étude, permet d'exercer des contraintes sur les couches superficielles, en imposant des tensions résiduelles et des déformations.

Conclusion générale

Les environnements désertiques est un problème important qui peut avoir des conséquences graves sur la sécurité et la fiabilité des lignes électriques haute tension. Notre travail a permis de mieux comprendre les mécanismes de vieillissement des isolateurs en polymère sous les conditions désertique et développer des méthodes pour évaluer leur état. L'objectif principale de notre travail était l'étude de l'effet des rayons UV, du champ électrique ainsi que la température (60°) sur les isolateurs de types silicone.

Tout d'abord, nous avons réalisé une étude préliminaire des performances d'un isolateur silicone vierge et sec, sans aucune pollution. Ensuite, nous avons commencé à effectuer des cycles de vieillissement accélérer afin de simuler une exposition prolongée a l'action combiné des rayon UV, du champ électrique et du température 60°et d'en déduire l'impact sur les isolateurs silicone. Nous avons exposé ce matériau, dans un premier temps à des cycles de vieillissement électrique et thermique sous des rayons UV. Après on a relevé, des mesures électriques de pertes diélectrique de capacité, de la tension de contournement et de courant de fuite, ainsi que l'analyse physicochimique des échantillons par l'analyse de la DRX ainsi que la mesure de l'angle de contact.

Les résultats obtenus par cette étude expérimentale nous a permis de comprendre le comportement de ce matériau et de corrélér celui-ci à son comportement électrique, ce qui a permis de tirer des conclusions intéressantes sur le comportement de la silicone, que nous résumons comme suit :

- ✚ Le vieillissement de la silicone, sous l'effet des contraintes étudiées, affecte ces performances électriques.
- ✚ La dégradation de la silicone se manifeste par une diminution de sa rigidité diélectrique longitudinale et de sa capacité (permittivité électrique) et par une augmentation de son facteur de perte.
- ✚ Les mesures de facteur de pertes diélectriques peuvent révéler le degré de dégradation des propriétés diélectriques du matériau isolant en silicone avec le vieillissement.
- ✚ Dégradation de ses caractéristiques physiques, notre isolateur est devenu hydrophile qui provoque la diminution de l'angle de contact de nos échantillons de silicone.
- ✚ Les gouttelettes d'eau peuvent se déforme sous l'influence d'un faible champ électrique augmentant la mouillabilité.

- ✚ L'exposition prolongée aux contraintes études entraîne une diminution de la tension de contournement.
- ✚ Les rayonnements UV peuvent entraîner une modification de la structure physico-chimique du matériau en silicone.
- ✚ Le courant de fuite sous pollution augmente avec l'exposition prolongée aux diverses contraintes de vieillissement.
- ✚ La présence de pollutions conductrice aggrave la tension de contournement et courant de fuite.
- ✚ Décoloration des échantillons exposés aux rayons UV. Ce qui est un bon indice de leur détérioration.

Ces résultats soulignent l'importance de procéder à des cycles de vieillissement au laboratoire des matériaux de revêtement en silicone et les matériaux des isolateurs destinés pour les environnements désertiques. Des recommandations peuvent être formulées pour améliorer leur durabilité, comme l'utilisation de formulations de silicone plus résistantes aux UV.

Ce travail nous a permis une meilleure compréhension du phénomène de dégradation des isolants.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] **A. Khelfaoui O. Bouberma**, Moelisation par methodedeselementsfinisdesphenomenesdeconductionsurfaciquesur L'isolateur Pollues, Universite kasdi merbah ouargla,2013 2014.
- [2] **M. Nemamcha**, :Polycope de cours : « Claquage des isolantes hautes tensions »,Université Guelma, 2001.
- [3] **K. N. F. AMIR**, mémoire d'ingénieur U.A.M de Bejaia, « étude du comportement d'un isolateur pollué soumis à une tension alternative », juin 2004.
- [4] **M. .. M.Terkmani**, "Contournement des isolateurs des lignes de haut tension", PFE, USTO, Juin 2005.
- [5] **A. Chabloz**, « Technologie des matériaux à l'usage des professions de l'électricité », 1986.
- [6] **S.DJAFRI**, «Pollution des isolateurs », Mémoire d'ingénieur, 1982, ENP Alger.
- [7] **E. K. M.A.B.ELKASAIRG**, «Performance des chaînes d'isolateurs haute tension soumises à la pollution désertique»,CIGRE, rapport , 33-05,1970.
- [8] **X. Ducouret**, « Lignes aériennes : matériels », Techniques de l'ingénieur, D4423.
- [9] **M. M. Terkmani**, « Contournement des Isolateurs des Lignes de Haute Tension »projet de fin d'étude, Université de science et Technologie d'Oran, Juin 2005.
- [10] **A. B. M. Tegar**, , « Pollution des Isolateurs de Haute Tension », Cours 4èm Année, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger.
- [11] **Y. P. Claverie**, « Les Phénomènes de Pollution des Isolateurs et l'Isolément des Ouvrages En Régions Polluées », RGE, Tome 82, No. 3, pp. 166-194,, Paris, France , Mars 1973.
- [12] **L. Arrabiy**, « Visualisation et Traitement de Signal de Courant de Fuite sur une Surface Isolante Polluée », Projet de Fin d'Etude, Département de Génie Electrique,

Ecole Nationale polytechnique d'Alger, Juin 1999 .

- [13] Document internet, «<http://www.hydro.quebec.com>» type d'isolateurs.
- [14] Brigitte FALLOU, « Technique de l'ingénieur » D214.
- [15] Philippe ROBERT, « matériaux de l'électrotechnique » édition Georgie, 1979.
- [16] A. F.ZEDAM, «Etude comparative de la distribution du potentiel électrique dans l'isolateur chaîne par voie numérique et expérimentale»Mémoire d'ingénieur, promotion, université FERHAT ABBAS-SETIF, 2001.
- [17] K. F.AMIR, «Etude du comportement d'un isolateur pollué soumis à une tension alternative », mémoire d'ingénieur U .de Bejaia, juin 2004.
- [18] TECHNIQUE DE L'INGENIEUR, «1S, D4, partie I».
- [19] A. F.ZEDAM, «Etude comparative de la distribution du potentiel électrique dans l'isolateur chaîne par voie numérique et expérimentale»Mémoire d'ingénieur, promotion 2001, université FERHAT ABBAS-SETIF.).
- [20] «<https://cosmetiques.ooreka.fr/>,» [En ligne].
-
- [1] «CEI 505,» *“Evaluation and identification of electrical insulation systems, Part 1: General principles and guide to applications”*, 1975.
- [2] «IEEE Standard 1064-1991,» *“Guide for multifactor stress functional testing of electrical insulation systems”*, 1991.
- [3] S.B. Dalal, R.S. Gorur, «“Aging of distribution cables in service and its simulation in the laboratory”, IEEE, Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 12, N°1, laboratory, pp. 139-146,» February 2005.

- [4] M. T. Nazir, «Accelerated ultraviolet weathering investigation on micro-/nano-SiO₂ filled silicone rubber composites » the institution of engineering and technology,» 06 novembre 2018.
- [5] Mahomet. A. Mohammed. S, Vieillissement de Polymère Isolants (un aperçu) « Department of Electrical Engineering, University of Engineering and Technology, Taxila, Pakistan,» November 05, 2006.
- [6] A. Suzuki, T. Kumai, M. Hidaka, R. Kishida, N. Toshima, Y. Koshino, K. Sakanishi, Y. Utsumi and Higashi Ku, «Deterioration Diagnosis Technique of Housing Rubber for Composite Hollow Insulator,» (NGK Review Overseas Edition No. 27, Dec. 2003).
- [7] M. Chatin, “Plastiques”, Techniques de l’Ingénieur, Publication A3000, 1986 .
- [8] N. Nandakumar, “Ageing and stabilisation of PVC electrical insulation...a review”, Popular Plastics, pp. 3-9, May 1982.
- [9] J. Verdu, “Vieillissement des plastiques”, AFNOR Technique, Edition Eyroles, Paris, 1984.
- [10] J.P. Trotignon, “Précis de matières plastiques. Structures, propriétés, mise en œuvre et normalisation”, Edition Nathan, Paris, 1982.
- [11] C. S. A. D. B. Fallou, “Méthodes complémentaires aux essais d’endurance thermique des matériaux isolants”, CIGRE, Groupe 15-05, Septembre 1982.
- [12] J. Verdu, “Vieillissement physique”, Techniques de l’Ingénieur, Publication A3150, 1980.
- [13] H. O. M. W. “. d. o. e. s. o. p. C. o. t. E. I. a. D. P. (. p. 5.-5. S. Pelissou, 1986.
- [14] J. Verdu, “Vieillissement chimique”, Techniques de l’Ingénieur, Publication A3151, 1980.
- [15] A. Marcilla S. Garcia J.C. Garcia-Quesada, “Study of the migration of PVC plasticizers”, Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, Vol. 71, pp. 457-463, 2004.

- [16] I.Jakubowicz N. Yarahmadi T. Gevert, "Effects of accelerated and natural ageing on plastized polyvinyl chloride (PVC)", *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 66, pp. 415-421, 1999.
- [17] A.Jiménez L. Torre J.M. Kenny, "Thermal degradation of poly(vinyl chloride) plastisols base on low-migration polymeric plasticizers", *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 73, pp. 447-453, 2001.
- [18] A. Boubakeur M. Nedjar R. Khaili, "Etude des propriétés électriques du polychlorure de vinyle avant et après un vieillissement thermique", *Numéro Spécial AJOT Journal, Proceeding of CEA'94*, Vol.1,Alger, Mars 1995.
- [19] A.Boubakeur M. Nedjar R. Khaili, "Influence of thermal ageing on the properties of PVC", *2nd Middle east power system conference, MEPCON'92*, pp. 124-127, Assiut University, Egypt, 1992.
- [20] J. Verdu, "Comportement à long terme", *Techniques de l'Ingénieur, Publication A3150*,, 1975.
- [21] X. Buch, "Dégradation thermique et fluage d'un adhésive structural époxyde", *Thèse de Doctorat, Ecole des Mines de Paris*, 2000.
- [22] M. Nedjar, "Influence du vieillissement thermique sur les propriétés du PVC utilisé dans l'isolation des câbles de H.T", *Thèse de Magister, U.T.O, Tizi-Ouzou*, Décembre 1991.
- [23] A. Boubakeur A. Bérroual M. Nedjar , "Thermal aging of Polyvinyl Chloride used in electrical insulation", *Annales de Chimie, Science des Matériaux*, Vol. 28, pp. 97-104, 2003.
- [24] A.T. Bulinski, S.S. Bamji, R.J. Densley, "Influence of the oxidation on water tree initiation and growth in XLPE cables", *IEEE, Proceeding of the 3rd International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics*, pp. 422-426,, 1989.
- [25] H.M. Banford, R.A. Fouracre, A. Faucitano, A. Buttafava, "Correlation of dielectric behaviour with chemical structure in aged polypropylene", *IEEE, Annual Report of Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, pp. 385-

390, 1994.

- [26] V. Langlois, L. Audouin, J. Verdu, M. Meyer, "Vieillessement thermique du polyéthylène réticulé", Journées d'études des polymères, JEPO18, Groupement Français d'études et d'applications des polymères (G.F.P), Septembre 1990.
- [27] S. Luzuriaga, J. Kovarova, I. Fortelny, "Degradation of pre-aged polymers exposed to simulated recycling: Properties and thermal stability", *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 91, Issue 6, pp. 1226-1232, June 2006.
- [28] J.V. Gulmine, L. Akcelrud, "Correlation between structure and accelerated artificial ageing of XLPE", *European Polymer Journal*, Vol.42, Issue 3, pp. 553-562, March 2006.
- [29] L. Deschamps, C. Caillot, M. Pars, J. Perret, "L'utilisation des matériaux synthétiques pour l'isolation des câbles haute tension et très haute tension", R.G.E., Tome 83, N°5, pp. 343-360, Mai 1983.
- [30] A.Rivatton, S. Cambon, J.-L. Gardette, "Radiochemical ageing of ethylene-propylene diene elastomers. 4. Evaluation of some anti-oxidants", *Polymer Degradation and stability*, Vol. 91, pp. 136-143, 2006.
- [31] F. Oldervoll, E. Ildstad, "Space charge, oxidation and morphology changes in Low Density Polyethylene during high voltage DC ageing", *IEEE, Conference Record of the International Symposium on Electrical Insulation*, pp. 477-480, Anaheim, CA USA,, April 2-5, 2000.
- [32] F. Gugumus, "Thermooxidative degradation of polyolefins in the solid state. Part1:Experimental kinetics of functional group formation", *Polymer Degradation and stability*, Vol. 52, pp.131-144, May 1996.
- [33] F. Gugumus, "Thermooxidative degradation of polyolefins in the solid state. Part7:Effect of sample thickness and heterogeneous oxidation kinetics for polypropylene", *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 62, pp.245-257, 1998.
- [34] G.A. George, M. Celina, A.M. Vassallo, P.A. Cole-Clarke, "Real-time analysis of the thermal oxidation of polyolefins by FT-IR emission", *Polymer Degradation and*

Stability, Vol. 48, pp. 199-210, 1995.

- [35] Haridoss, J.-P. Crine S., «“Oxidation and thermal resistance of HMW-PE and XLPE H.V. Cables”, IEEE, Conference Record of the International Symposium on Electrical Insulation, pp. 219-224, Boston, MA, June 5-8» 1988.
- [36] L.R. Mason, A.B. Reynolds, «“Standardization of oxidation induction time testing used in life assessment of polymeric electric cables”, Journal of Applied Polymer Science, Vol. 66, pp. 1691-1702» 1997.
- [37] L. M. D. R. J.E. Volponi, «“The use of differential photocalorimetry to measure the oxidation induction time of isotactic polypropylene”, Polymer Testing, Vol.23, pp. 461-465» 2004.
- [38] J. Crine, «“Application of the rate theory to polymers thermal ageing and mechanical breakdown”, American chemical society, Chicago» August 1993.
- [39] P. B. B. Fallou, «“Etude de l’endurance des matériaux à l’action de la température et des rayonnements”, R.G.E., Tome 80-N°3» Mars 1971.
- [40] «IEC 216, “Guide for the determination of thermal endurance properties of electrical insulating materials”, Part1» 1990.
- [41] «IEC 216, “Guide for the determination of thermal endurance properties of electrical insulating materials”, Part1» 1990.
- [42] G. Montanari, «“Thermal aging of EPR cables”, IEEE, Proceeding of 2nd International Conference on Properties and Application of Dielectric Materials, pp. 320-324» 1988.
- [43] G.C. Montanari, G. Mazzanti, A. Motori, A. Campus, U.H. Nilsson, «“Comparison of cross-linked polyethylene compounds by short-term electrical and thermal tests”, IEEE, Annual Report of Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), pp. 287-291» October 1997.
- [44] A. Boubakeur, M. Nedjar, R. Khaili, «“Endurance thermique du PVC utilisé dans les câbles de haute tension”, 3eme Journées Maghrébines des Sc. des Matériaux, pp.

143-147» Alger, 1992.

- [45] M. Le Huy, G. Hvrard, «“Methodologies for lifetime predictions of rubber using Arrhenius and WLF models”, *Die Angewandte Makromolekulare Chemie* 261/262, pp. 135-142» 1998.
- [46] G.C. Montanari, A. Motori, «“Short-term thermal endurance characterization of polymeric cable insulating materials: Use of oxidative stability measurements”, *IEEE, Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 3, N° 4, pp. 561-566» August 1996.
- [47] G.C. Montanari, A. Motori A.T. Bulinski, S.S. Bamji, J. Densley, «“Application of oxidation induction time and compensation effect to the diagnosis of HV polymeric cable insulation”, *IEEE, Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 3, N°3, pp. 351-360» June 1996.
- [48] M.A. Morsy, M.H. Shwehdi, «“Electron spin resonance spectral study of PVC and XLPE insulation materials and their life time analysis”, *Spectrochimica Acta Part A*, Vol. 63, Issue 3, pp. 624-630» March 2006.
- [49] L. Deschamps, C. Caillot, M. Pars, J. Perret, «“L’utilisation des matériaux synthétiques pour l’isolation des câbles haute tension et très haute tension”, *R.G.E.*, Tome 83, N°5, pp. 343-360» Mai 1983.
- [50] L. Simoni, «“Ageing theory of engineering materials”, *Alta frequenza*, Volume XLII, N°10» October 1973.
- [51] J. Carlier, «“L’endurance thermique des isolants et systèmes d’isolation. Incidence dans la construction des matériels. Classification thermique des systèmes d’isolation des machines électriques de grande puissance”, *R.G.E.*, Tome 83, N° 7/8, pp. 467-469» Juillet/Août 1974.
- [52] P. David, «“The ageing compensation effect: Correlation of different thermal life-lines of the same material”, *IEEE, 5th International Conference on Dielectric Materials measurements and Applications*, pp. 151-154» 1988.
- [53] G.C. Montanari, A. Motori, « “Short-term thermal endurance characterization of

polymeric cable insulating materials: Use of oxidative stability measurements”, IEEE, Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 3, N° 4, pp. 561-566, August» 1996.

[54] G. Montanari, « “A new thermal life model derived by the aging compensation effect”, IEEE, Transactions on Electrical Insulation, Vol. 25, N° 2, pp. 309-318» April 1990.

[55] A. M. G.C. Montanari, « “Considerations of the compensation effect observed in the aging of insulating materials”, Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 28, pp. 1433-1438» 1995.

[56] J. Crine, « “A molecular model to evaluate the impact of aging space charges in polymer dielectrics”, IEEE, Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation”, Vol. 4, N° 5, pp. 487-495» October 1997.

[57] J.-P. Crine, J.-L. Parpal, C. Dang, « “A new approach to the electric aging of dielectrics”, IEEE, Annual Report of Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), pp. 161-167» 1989.

[58] J.-F. Fauvarque, « “Polymères pour isolants électriques”, CNAM, pp. 273-318, Paris» 1993.

[59] A. Medjdoub, « “Influence des vieillissements thermique et électrique sur les propriétés du polyéthylène réticulé chimiquement utilisé dans les câbles de moyenne tension”, Thèse de Magister, Université de Bejaia» 1997.

[60] R. L. A.K. Jonscher, « “On a cumulative model of dielectric breakdown in solids”, IEEE, Transaction, on Electrical Insulation, Vol. EI-19, N°6, pp. 567-577» December 1984.

[61] C. Laurent, « “Contribution à l’étude des mécanismes de la rupture à long terme des polymères”, Thèse d’Etat Science Physique, Université Paul Sabatier de Toulouse» 1984.

[62] O. Gallot-lavallee, « “Etude de la charge d’espace et des phénomènes luminescents comme précurseurs du vieillissement électrique d’une résine époxy utilisée dans

l'isolation haute tension”, Thèse de Doctorat ès sciences, Université Paul Sabatier de Toulouse» 2004.

- [63] J.C. Fothergill, G.C. Montanari, G.C. Stevens, C. Laurent, G. Teysedre, L.A. Dissado, U.H. Nilsson, G. Platbrood, «“Electrical, microstructural, physical and chemical characterization of HV XLPE cable peelings for an electrical aging diagnostic data base”, IEEE, Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 10, N° 3, pp. 514-527» June 2003.**
- [64] H. Zeller, «“Breakdown and prebreakdown phenomena in solid dielectrics”, IEEE, Proceeding of 2nd International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectric, pp. 98-109» 1986.**
- [65] G. Bahder, T. Garrity, M. Sosnowski, R. Eaton, C. Katz, «“Physical model of electric aging and breakdown of extruded polymeric insulated power cables, IEEE, Transactions on PAS, Vol. 101, pp. 1378-1388» 1982.**
- [66] T. Dakin, «“Electrical insulation deterioration treated as a chemical rate phenomenon”, AIEE Transactions, Vol. 67, pp. 113-122» 1948.**
- [67] D. T. M. D. A. Z. A.L. Mackean, «“Breakdown mechanism studies in XLPE cable”, IEEE, transactions PAS, Vol. 97, pp. 1167-1175» 1978.**
- [68] J.-P. Crine, and K. Vijn, «“A molecular approach to the physico-chemical factors in the electric breakdown of polymers”, Applied Physics Communications, Vol. 5, pp. 139-163» 1985.**
- [69] J.-L. Parpal, J.-P. Crine, C. Dang, «“Electrical aging of extruded dielectric cables : A physical model”, IEEE, Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 4, N° 2, pp. 197-209» April 1997.**