

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



Faculté de Technologie
Département de Génie Électrique
Laboratoire de Génie Électrique de Bejaia

Mémoire de Fin d'Étude

*En vue de l'obtention du diplôme de Master en Électrotechnique
Option : Électrotechnique / Réseaux électrique*

THÈME :

ETUDE DE L'ANGLE D'INCLINAISON DE LA GOUTTE D'EAU
SUR L'HYDROPHOBICITE DE LA SURFACE D'UNE PLAQUE
DE SILICONE VIEILLIE SOUS ALTIRENATIVE

➤ Préparé par :
Mr. OUCHENIR Noureddine
Mr. REMMACHE Saadi

❖ Encadré par :
Mme. ROUHA

✓ Devant le jury :
Mr. ZEBBOUDJ.Y
Mr.AIT MOKHTAR.E

Promotion : 2018 / 2019



Remerciements

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

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

Qu'elle veuille bien accepter tous nos sentiments de gratitude et de respect.

Nous remercions de même les membres du Jury pour avoir concédé de passer en revue notre étude et se prononcer sur sa qualité éventuelle.

Nos remerciements s'adressent également à :

***M^r HAMOUR** ainsi que tous les enseignants des techniques de haute tension pour leurs soutiens et bienveillants conseils. Nous remercions à l'occasion tous les enseignants du Département du génie électrique.*

Dédicace

Que ce travail témoigne de mes respects :

A mes parents :

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

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

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

A ma sœur et à mes frères.

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

A mes amis : M .Elyes, O.Abd Erhamane, F.Slimane, M.Bezza, R. Karim, B. Karim, et B.Mourad .

A mes collègues : R. Saadi, M .Omar, M. Hocine, Kh. Soufien.

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

OUCHENIR Nouredine

Dédicaces

Louange à Dieu, le Miséricordieux, qui voulut bien que tout cela advienne.

Je dédie ce modeste travail :

A mes trop chers parents : leur amour a laissé en moi une empreinte vivace.

Le sacrifice des plus profitables années de vos

vies, pour me voir réussir.

Je vous prie de trouver en ce travail le fruit de vos efforts.

*Que Dieu m'accorde la grâce de vous avoir encore à mes côtés pour longtemps
afin que vous soyez témoins de ma reconnaissance.*

A ma famille, en particulier mes cousins.

À tous mes amis

Noureddine, Omar, Hocine, Malek, Madani, Fatah

À tous ceux qui m'aiment.

REMMACHE Saadi

Sommaire

Remerciement

Dédicaces

Liste des figures

Liste des tableaux

Abréviations

INTRODUCTION GENERALE 1

Chapitre I : La silicone pour le Génie Electrique

I.1. Introduction 3

I.2 Les éléments constitutifs d'une ligne électrique 4

I.2.1 Les supports 5

I.2.2 Isolateurs de lignes aériennes 5

I.2.2.1 La Porcelaine 6

I.2.2.2 Le Verre 6

I.2.2.2.a Le Verre trempé 7

I.2.2.2.b Le Verre recuit 7

I.2.2.3 La Bakélite 7

I.2.2.4 La Silicone 7

I.2.2.4.a Les propriétés de la silicone 8

I.2.2.4.b Structure moléculaire de la silicone 8

I.2.2.4.c Caractéristiques fondamentales de la silicone dans diverses applications 9

I.2.2.4.d Autres propriétés des silicones 11

I.2.2.4.e Différentes familles de silicones 12

I.2.2.4.f Élastomères silicones 12

I.2.2.4.g Applications des silicones dans l'isolation électrique 12

I.2.2.4.h Isolateur long fut 14

I.2.2.5 Avantage du revêtement en silicone des isolateurs 14

I.3 Pollution des isolateurs 14

I.3.1 Salinité 14

I.3.2 Couche de pollution	14
I.3.3 Degré de pollution	15
I.4 Sources de pollution	15
I.4.1 Pollution naturelle	15
I.4.2 Pollution marine	15
I.4.3 Pollution désertique	15
I.4.4 Poussières du sol et zones agricoles	15
I.4.5 Pollution industrielle	15
I.4.6 Pollution domestique	16
I.4.7 Pollution mixte	16
I.5 Impact de la pollution	16
I.5.1 Techniques de lutte contre la pollution	16
I.5.2 Utilisation des isolateurs plats (auto-nettoyables)	16
I.5.3 Graissage des isolateurs (couches hydrophobes)	16
I.5.4 Revêtements à base de silicones	17
I.6 Classification des sites pollués	17
I.7 Conséquences de la pollution sur l'isolateur	17
I.7.1 Influences des facteurs climatiques sur les isolants pollués	18
I.8 Conclusion	18

Chapitre II : Méthodes de diagnostique

II.1 Introduction	19
II.2 Les outils de caractérisations physico-chimiques et méthodes de mesures	19
II.2.1 Caractérisations physiques	19
II.2.1.1 Rigidité diélectrique	19
II.2.1.2 Facteur de perte, Capacité et Permittivité	21
II.2.1.3 Résistance et Résistivité	23
II.2.1.4 Hydrophobicité	25
II.2.2 Analyses chimiques	30
II.2.2.1 La spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier(FTIR)	30

II.2.2.2 La microscopie électronique à balayage (MEB)	30
II.2.2.3 La diffraction des rayons X (DRX)	31
II.2.2.4 Analyses thermiques	32
II.3 Conclusion	32

Chapitre III : Protocole Expérimental

III.1 Introduction	33
III.2 Le Matériau Silicone	33
III.3 L'objet d'essais	35
III.4 Techniques expérimentales	37
III.4.1 Mode opératoire - Angles de déclinaison α et de contact θ	37
III.4.2 Essais de vieillissement électriques	39
III.4.3 Les mesures électriques	43
III.4.3.1 Mesure de la capacité C_x et du facteur de perte $tg\delta$	44
III.4.3.2 Mesure de la résistance	44
III.4.4 Analyses chimiques	45
III.4.4.1 L'analyse FTIR mode ATR	45
III.4.4.2 Analyses thermiques (AT)	47
III.4.4.3 La diffraction des rayons X (DRX)	50
III.4.4.5 Le microscope optique	52
III.5 Conclusion	53

Chapitre IV : Présentation et discussions des résultats

IV.1 Introduction	54
IV.2 Mesure de l'angle de contact de la goutte d'eau et de l'indice d'hydrophobicité de la surface de la plaque de silicone.	54
IV.3 Analyse par microscopie optique	73
IV.4 Présentation et discussion des résultats d'essais électriques	74
IV.4.1. Mesure de la résistance	74
IV.4.2 Rigidité diélectrique longitudinale	76

IV.4.3 Mesure de la capacité C_x et du facteur de perte $tg\delta$	78
IV.5 Présentation et discussion des résultats des analyses chimiques	79
IV.5.1 Analyse par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (IRTF)	79
IV.5.2 Analyse par diffraction des rayons X (DRX)	81
IV.6 Analyses thermiques	86
IV.7 Discussion des résultats	92
IV.8 Conclusion	94
Conclusion générale	96
Bibliographie	

Liste des figures

Figure I- 1 : Réseaux HTA souterrains en double dérivation.	3
Figure I- 2 : Réseaux HTA souterrains en coupure d'artère.	4
Figure I- 3 : Réseau HTA aérienne en simple dérivation.	4
Figure I- 4 : Types de supports a) Sapin, b) Danube et c) Portique.	5
Figure I- 5 : Structure chimique de la silicone.	9
Figure I- 6 : Caractéristiques de la silicone et leurs avantages dans les applications MT/HT.	10
Figure I- 7 : Hydrophobicité d'une surface en silicone.	11
Figure I- 8 : a) : Isolateur en silicone. b) : Traversée avec un revêtement en silicone.	13
Figure I-9 : a) Disjoncteur avec revêtement en silicone b) Transformateur avec revêtement en silicone.	13
Figure I- 10 : Principe d'un isolateur à long fût.	14
Figure II- 1 : Circuit de mesure de la tension de contournement d'une surface isolante.	20
Figure II- 2 : Circuit de mesure de la tension de claquage d'un matériau isolant.	21
Figure II- 3 : Schéma de principe du pont de Schering.	21
Figure II- 4 : Schéma de principe du pont de Schering à transformateur différentiel.	23
Figure II- 5 : Schéma de mesure de la résistance transversale.	24
Figure II- 6 : Schéma de mesure de la résistance superficielle.	25
Figure II- 7 : Angle de contact et tensions de surface d'une gouttelette d'eau déposée sur une surface solide.	26
Figure II- 8 : Comportement d'une gouttelette d'eau sur une surface isolante (a) : surface hydrophile (porcelaine), (b) : surface hydrophobe (Silicone).	27
Figure II- 9 : méthode théorique détermination de l'angle de contact θ	27
Figure II- 10 : Schéma de principe de la méthode pratique de détermination de l'angle de contact.	28
Figure II- 11 : Différents types de régimes de mouillage.	29
Figure II- 12 : Schéma de principe d'un microscope électronique à balayage.	31

Figure III- 1 : Photographie de la plaque de la silicone solide étudiée	34
Figure III- 2 : Photographies a) : déshumidification de la silicone dans le dessiccateur en ver b) : Gel de silice (Silicagel)	35
Figure III- 3 : Différentes vues du banc d'essai de mesure de l'angle de contact θ	36
Figure III- 4 : Objet d'essai.	37
Figure III- 5 T : technique de pose de la goutte d'eau sur la plaque de silicone solide.....	38
Figure III- 6 : photographies de l'objet d'essai avec une distribution des gouttes d'eau a) : linéaire, b) : en zigzag	39
Figure III- 7 : Photographie du conductimètre.	40
Figure III- 8 : Dispositif expérimental de vieillissement électrique et de mesure de la tension de claquage	41
Figure III- 9 : Photos des éléments du dispositif d'essais et de mesure de la haute tension du laboratoire HT G.E. Université de Béjaia.	42
Figure III- 10 : Objets d'essai.	43
Figure III- 11 : Photo de la surface polluée de la silicone avant et pendant le passage de la décharge.	43
Figure III- 12 : Photo du dispositif de mesure des résistances R_t et R_s	45
Figure III- 13 : Photo du spectrophotomètre IR affinity-1 et le mode ATR.	46
Figure III- 14 : Représentation schématique du principe de la spectroscopie IR.	47
Figure III-15 . Photo de l'appareil PT 1600 STA et ses éléments.	48
Figure III.16 : Représentation schématique d'une ATG (type Setaram TG-DTA 92 B).	49
Figure III.17 : Cellule de mesure de l'ATD	50
Figure III.18 : Schéma de principe de loi de Bragg.	50
Figure III.19 : Principe d'un diffractomètre de poudre.	51
Figure III- 20 : Détermination de la largeur à mi-hauteur (β) à partir d'une courbe de diffraction des rayons X.	52
Figure. III.21 : Schéma d'un microscope.	52

Figure IV.1 : Angle de contact θ en fonction de l'angle de déclinaison α pour différents volumes de la goutte, $\sigma=0.2\text{ms}$ et une distribution linéaire ou zigzag dans le cas de l'état vierge de la silicone.	56
Figure IV.2 : Angle de contact θ en fonction de l'angle de déclinaison α pour différents volumes de la goutte, $\sigma=5\text{ms}$ et une distribution linéaire ou zigzag dans le cas de l'état vierge de la silicone.	56
Figure IV. 3 : Angle de contact θ en fonction de l'angle de déclinaison α pour différents volumes de la goutte, pour $\sigma=0.2\text{ms}$ et distribution linéaire ou zigzag, cas de l'état vieilli à sec de la silicone.	58
Figure IV.4 : Angle de contact θ en fonction de l'angle de déclinaison α pour différents volumes de goutte, pour $\sigma=5\text{ms}$ et distribution linéaire ou zigzag, cas de l'état vieilli à sec de la silicone.	58
Figure IV. 5 : Angle de contact θ en fonction de l'angle de déclinaison α pour différents volumes de la goutte, pour $\sigma=0.2\text{ms}$ et une distribution linéaire ou zigzag dans le cas de l'état vieilli sous pollution de la silicone.	59
Figure IV.6 : Angle de contact θ en fonction de l'angle de déclinaison α pour différents volumes de la goutte, pour $\sigma=5\text{ms}$ et une distribution linéaire ou zigzag dans le cas de l'état vieilli sous pollution de la silicone.	60
Figure IV-7 : L'angle de contact en fonction du volume à $\alpha=0^\circ$ (X35)	61
Figure IV. 8 : Angle de contact en fonction du volume à $\alpha=30^\circ$	62
Figure IV.9 : angle de contact en fonction de la conductivité $\alpha=0^\circ$ (1Y5).	63
Figure IV.10 : angle de contact en fonction de la conductivité $\alpha=30^\circ$ (1Y5).	63
Figure IV.11 : L'angle de contact θ en fonction de la distribution des gouttes d'eau à $\alpha=0^\circ$	64
Figure IV.12 : L'angle de contact θ en fonction de la distribution des gouttes d'eau à $\alpha=30^\circ$	64
Figure. IV 13 : Angle de contact d'une gouttelette d'eau sur la surface de la silicone vieilli à sec $\alpha=30^\circ$ (446).	66
Figure IV- 14 : L'angle de contact θ en fonction du volume de la goutte pour l'état vierge de la silicone à $\alpha= 0^\circ$	66
Figure IV- 15 : L'angle de contact θ en fonction du volume de la goutte pour l'état vierge de la silicone à $\alpha= 30^\circ$	67
Figure IV- 16.a. L'angle de contact θ en fonction du volume de la goutte pour l'état vieilli à sec à $\alpha= 30^\circ$	67
Figure IV.17 : L'angle de contact θ en fonction de l'angle de déclinaison α pour différentes conductivités à l'état vierge de la silicone.	68

Figure IV.18 : a- L'angle de contact θ en fonction de l'angle de déclinaison α pour différentes conductivités vieilles à sec.	69
Figure IV.18 : b- angle de contact θ en fonction de l'angle de déclinaison α pour différentes conductivités vieilles sous pollution	70
Figure IV.19 : Angle de contact d'une gouttelette d'eau sur la surface horizontale de la silicone vierge $\alpha = 0^\circ$ (135).	70
Figure. IV.20 : Angle de contact d'une gouttelette d'eau posée sur la surface de la silicone vieilli électriquement à sec (435), $\alpha = 0^\circ$	72
Figure. IV.21 : Angle de contact d'une gouttelette d'eau sur la surface de la silicone vieilli électriquement sous pollution conductrice de $\sigma = 0.2 \text{ ms}$, $\alpha = 0^\circ$ (336).	72
Figure IV.22 : Photographies au microscope optique des différents échantillons : (a) la silicone vierge, (b) silicone vieilli à sec, (c) silicone vieilli sous pollution humide.	74
Figure IV. 23 : Caractéristique $V(I_t)$ de la silicone.	75
Figure IV.24 : caractéristique $V(I_s)$ de la silicone.	76
Figure IV.25 : Photo de l'arc sur la surface polluée de la silicone.	78
Figure IV. 26 : Spectre IRTF des échantillons (vierge et vieillis) de la silicone.	80
Figure. IV.27 : Spectre DRX des échantillons (vierges et vieillis) de la silicone.	82
Figure. IV.28 : Spectre DRX des échantillons vierge et vieillis de silicone à $2\theta = 18.65^\circ$ du pic principal.	84
Figure. IV. 29 : Spectre DRX des échantillons vierge et vieillis de silicone à $2\theta = 12^\circ$	85
Figure IV.30 : Thermogrammes ATG de la silicone vierge, vieilli électriquement à sec et sous pollution humide de conductivité $\sigma = 0.2 \text{ ms}$ et $\sigma = 5 \text{ ms}$	87
Figure IV.30.a : Thermogrammes ATG de la silicone vierge, vieilli électriquement à sec et sous pollution humide de conductivité $\sigma = 0.2 \text{ ms}$ et $\sigma = 5 \text{ ms}$ - Zoom sur les températures de fin de dégradation.	88
Figure IV.30.b : Thermogrammes ATG de la silicone vierge, vieilli électriquement à sec et sous pollution humide de conductivité $\sigma = 0.2 \text{ ms}$ et $\sigma = 5 \text{ ms}$ - Zoom sur les températures de fin de dégradation thermique T_{fd}	89
Figure. IV.31 : Thermo-grammes DTG de la silicone vierge, vieilli électriquement à sec et sous pollution humide de conductivité $\sigma = 0.2 \text{ ms}$ et $\sigma = 5 \text{ ms}$	91
Figure IV. 32 : Thermogrammes DTG de la silicone vierge, vieilli électriquement à sec et sous pollution humide de conductivité $\sigma = 0.2 \text{ ms}$ et $\sigma = 5 \text{ ms}$ - Zoom sur le point de maximum de dégradation thermique.....	91

La liste des tableaux

Tableau I.1 : Classification des sites pollués	17
Tableau II.1 : La corrélation de l'IH avec l'angle de contact θ	30
Tableau III .1 : Les techniques d'analyse thermique.....	47
Tableau VI.1 : Angle de contact θ en fonction de l'angle de déclinaison α de la surface de l'échantillon de silicone, pour les différents paramètres mis en jeu dans le cas de l'état vierge de la surface de la silicone.....	55
Tableau VI.2 : Angle de contact θ en fonction de l'angle de déclinaison α de la surface de l'échantillon de silicone, pour les différents paramètres mis en jeu dans le cas de l'état vieilli de la surface propre de la silicone	57
Tableau VI.3 : Angle de contact θ en fonction de l'angle de déclinaison α de la surface de l'échantillon de silicone, pour les différents paramètres mis en jeu dans le cas de l'état vieilli de la surface polluée de la silicone $\sigma=0.2$ mS	59
Tableau VI.4 : Angle de contact θ en fonction de l'angle de déclinaison α de la surface de l'échantillon de silicone, pour les différents paramètres mis en jeu dans le cas de l'état vieilli de la surface polluée de la silicone $\sigma=5$ ms.....	60
Tableau IV .5 : Résistance transversale et résistivité transversale de la silicone vierge, vieillie à l'état propre et vieillie sous pollution.....	75
Tableau IV.6 : Résistance superficielle et résistivité superficielle de la silicone vierge, vieillie à l'état propre et vieillie sous pollution.....	76
Tableau IV.7 : La rigidité diélectrique longitudinale El de la silicone.....	77
Tableau IV.8 : Valeurs de la capacité et le facteur de perte de la silicone à $U=100V$ et $f=50Hz$	78
Tableau IV.9 : Permittivité électrique et indice de perte de la silicone à $U = 100 V$ et $f = 50 Hz$	79
Tableau IV.10 : Les différentes bandes d'absorption caractéristiques de la silicone.....	81
Tableau IV.11 : Caractéristiques des pics principaux des spectres DRX des échantillons de Silicone.	83
Tableau IV.12 : Taux de cristallinité des différents échantillons analysés de Silicone.....	85
Tableau IV.13 : Tableau récapitulatif des températures des échantillons de silicone, vierge, vieillie électriquement sous pollution humide de conductivité $\sigma = 0.2$ ms et $\sigma = 5$ ms et vieillie électriquement à sec	92

Liste des symboles

ϵ_r : permittivité relative ;

$\text{Tg } \delta$: Facteur de pertes ;

E_d : La rigidité diélectrique ;

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

d : distance inter électrode ;

E_l : Rigidité diélectrique longitudinale ;

C_x : la capacité ;

Z : Impédance (Ω) ;

E_t : Rigidité diélectrique transversale ;

R_t : La résistance transversale ;

P_t : La résistivité transversale ;

R_s : La résistance superficielle ;

Θ : Angle ($^\circ$) ;

γ_{ls} : la tension superficielle entre le solide et le liquide ;

γ_{lv} : La tension superficielle entre le liquide et sa phase vapeur ;

γ_{sv} : La tension superficielle entre le solide et la vapeur ;

b : la hauteur de la gouttelette ;

r : le rayon de la gouttelette ;

H : humidité ;

T : La température ;

P : la pression ;

σ : la conductivité ;

F : la fréquence ;

λ : Longueur d'onde de rayonnement (μm) ;

D : Diamètre (cm) ;

Introduction générale

Introduction générale

La révolution technologique est suivie d'une forte croissance de la consommation d'énergie électrique au niveau mondial, ce fait a non seulement poussé les fournisseurs à en produire davantage tant en quantité (niveau de tension, puissance), qu'en qualité (continuité de service et sécurité), mais aussi a incité les fabricants de matériels électriques à chercher de nouveaux moyens plus performants pour répondre aux exigences de la demande.

Parmi ces matériels électriques figurent les isolateurs qui jouent un rôle à la fois mécanique et électrique dans la sécurité du transport et la distribution de l'énergie. En effet, ils doivent porter les conducteurs et les isoler du pylône. On en trouve, entre autres, ceux en élastomères silicones qui constituent un matériau de choix du fait principalement de leur hydrophobicité couplée à une bonne résistance aux contraintes climatiques. Par ailleurs, ces polymères possèdent une bonne stabilité thermique, une bonne tenue au feu et une tension de claquage équivalente aux autres polymères.

Malheureusement, ces isolateurs vieillissent sous service, et la présence des gouttelettes d'eau sur leur surface constitue l'un des principaux facteurs impliqués dans le mécanisme de vieillissement. En effet, les variations brutales de température, la rosée matinale, les pluies, la fonte de la neige sont autant d'éléments qui favorisent le dépôt des gouttelettes d'eau sur les surfaces des isolateurs extérieurs des réseaux de transmission. L'influence de ces gouttelettes d'eau sur le mécanisme de contournement de la surface des jupes de l'isolateur est largement déterminée par la forme des gouttelettes. Il est bien connu que sous l'influence d'un champ électrique, une gouttelette d'eau peut se déformer et en retour, elle peut perturber le champ électrique à travers la formation d'un champ local de forte intensité dans ses environs immédiats. Ce champ local intense peut conduire à un allongement des gouttelettes accompagné d'une réduction de la distance d'isolement entre l'électrode de terre et l'électrode haute tension [1]. Ce qui peut engendrer des décharges partielles pouvant se développer en un arc électrique et conduire au contournement de l'isolateur.

L'hydrophobicité de la surface en particulier, est l'un des facteurs importants qui contribuent à la performance supérieure des polymères de silicone pour résister au mouillage en raison de leur faible énergie libre de surface. Cette propriété participe à la réduction des courants de fuite et à la minimisation de la probabilité de l'apparition des bandes sèches. En service, la surface polymérique tend à se détériorer, affectant négativement l'hydrophobicité du matériau.

La perte d'hydrophobie va influencer les propriétés électriques de la surface mouillée et donc la tension de claquage ; le niveau de tension de génération des décharges sera plus faible et les courants de fuite élevés. Toutefois, les surfaces composites ont une propriété autonome de recouvrement de l'hydrophobicité. Pour les isolateurs composites ou non-céramiques, la perte ou la réduction de l'hydrophobicité peut engendrer de graves répercussions sur le réseau électrique. L'hydrophobicité affecte les isolateurs polymères de silicone de deux façons.

D'une part, la perte d'hydrophobicité diminue les propriétés isolantes de l'isolateur ainsi que ses performances de résistance à la pollution[2],[3] d'autre part, elle a une influence sur le processus de vieillissement des isolateurs polymériques, réduisant ainsi leur durée de vie.

La compréhension des mécanismes de dégradation de la surface des polymères est fondamentale pour la conception et le dimensionnement des isolateurs. Pour mieux étudier et comprendre ces mécanismes complexes, il est important de caractériser les matériaux utilisés en menant des investigations expérimentales en laboratoire et des simulations.

L'objectif de ce travail est d'examiner le comportement des gouttelettes d'eau à la surface d'un isolateur composite notamment l'élastomère de Silicone. Sous un champ électrique, le comportement des gouttelettes d'eau se traduit généralement par leur déformation. La déformation des gouttelettes provoque l'intensification du champ électrique autour de celles-ci puis des décharges partielles prennent naissance à la surface de l'isolateur. Ces décharges peuvent entraîner une dégradation de la surface du matériau, et conduire éventuellement au claquage électrique. L'influence des paramètres tels que le volume des gouttelettes d'eau, la conductivité de l'eau, la distribution des gouttelettes sur la surface du matériau et la déclinaison de cette dernière, sera investiguée.

Le présent manuscrit est organisé autour de quatre chapitres. Dans le premier chapitre, nous avons essentiellement décrit les principales caractéristiques de la silicone et son utilisation dans le domaine du Génie Électrique. Dans le deuxième chapitre nous avons décrit les différentes techniques d'analyses qui permettent de faire un monitoring du comportement physico-chimique du matériau. Le troisième chapitre est consacré à la présentation du matériau silicone et du protocole expérimental des différentes techniques de diagnostic utilisées les résultats de nos travaux sont exposés, interprétés et discutés dans le quatrième chapitre.

Nous avons terminé ce travail par une conclusion générale.

Chapitre I :
La silicone pour le génie
électrique

I.1. Introduction

L'énergie électrique est acheminée depuis les centrales de production vers les consommateurs d'électricité via un réseau électrique constitué d'un ensemble d'infrastructures assurant la production, le transport, la répartition et la distribution de l'énergie électrique. Ces fonctions sont assurées par :

- la source ou le générateur dont la fonction est de transformer l'énergie d'origine hydraulique, thermique ou autre en énergie électrique ;
- le transformateur de puissance destiné à transférer de la puissance en modifiant l'amplitude des signaux (courant, tension) et en conservant la même fréquence ;
- les postes électriques forment les nœuds du réseau électrique où sont connectées les lignes électriques ;
- Les lignes électriques transportent l'énergie électrique sur les longues distances depuis le site de la production jusqu'aux consommateurs.

Ces dernières sont souterraines ou aériennes. Elles véhiculent l'énergie électrique à différents niveaux de tension selon le type de réseau concerné. Les réseaux de transport sont à très haute tension, les réseaux de répartition sont à haute tension et les réseaux de distribution sont à moyenne tension ou à basse tension.

Les réseaux HTA souterrains alimentent par des câbles HTA enterrés en double dérivation (figure I.1) ou en coupure d'artère (figure I.2) les zones urbaines ou mixtes à forte densité de charge.

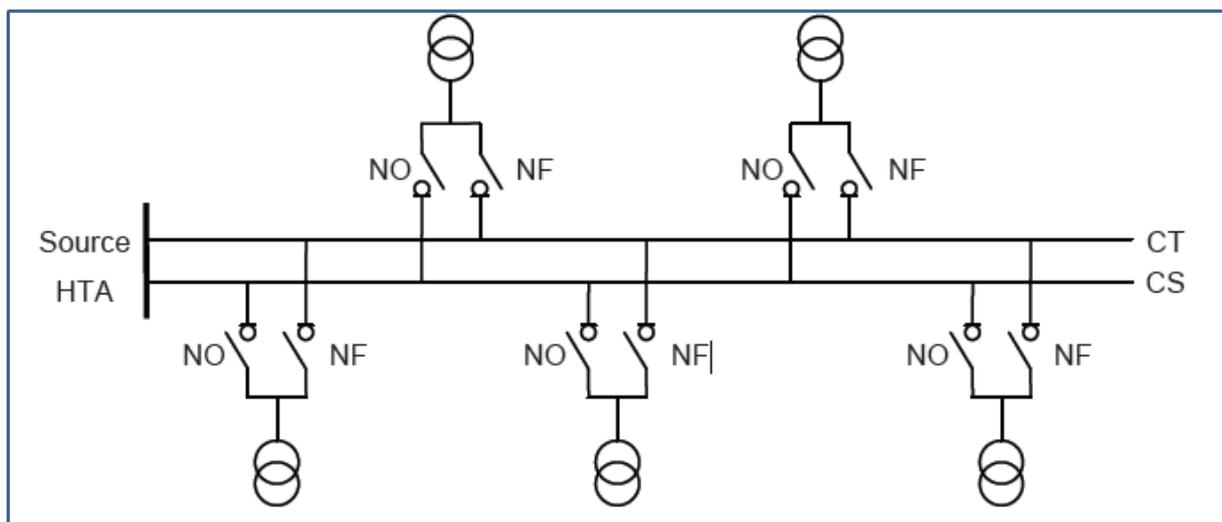


Figure I- 1 Réseaux HTA souterrains en double dérivation.

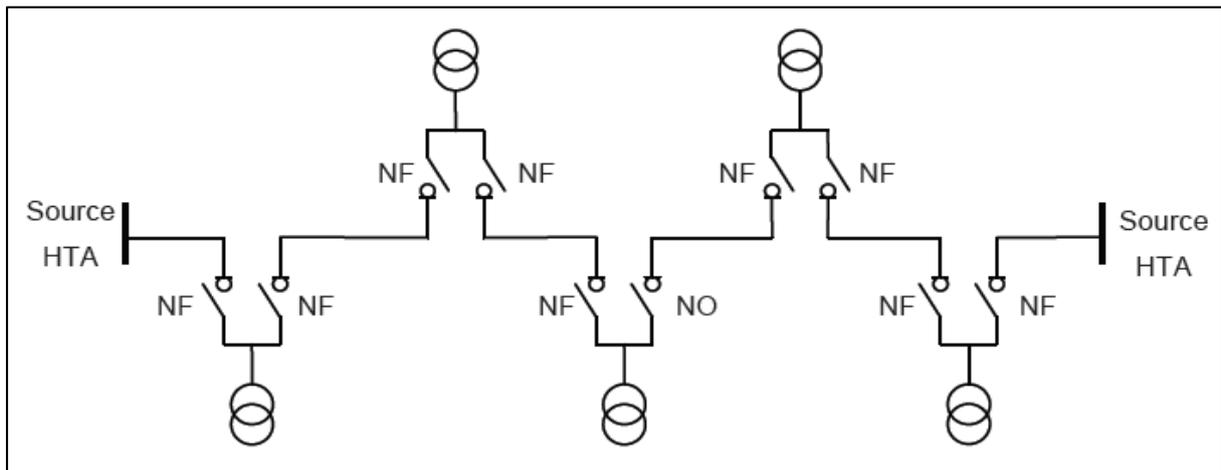


Figure I- 2 Réseaux HTA souterrains en coupure d'artère.

Les réseaux HTA aériens alimentent par des lignes HTA aériennes en simple dérivation (Figure I.3), traditionnellement moins coûteuses que les câbles souterrains, les zones rurales à faible densité de charge.

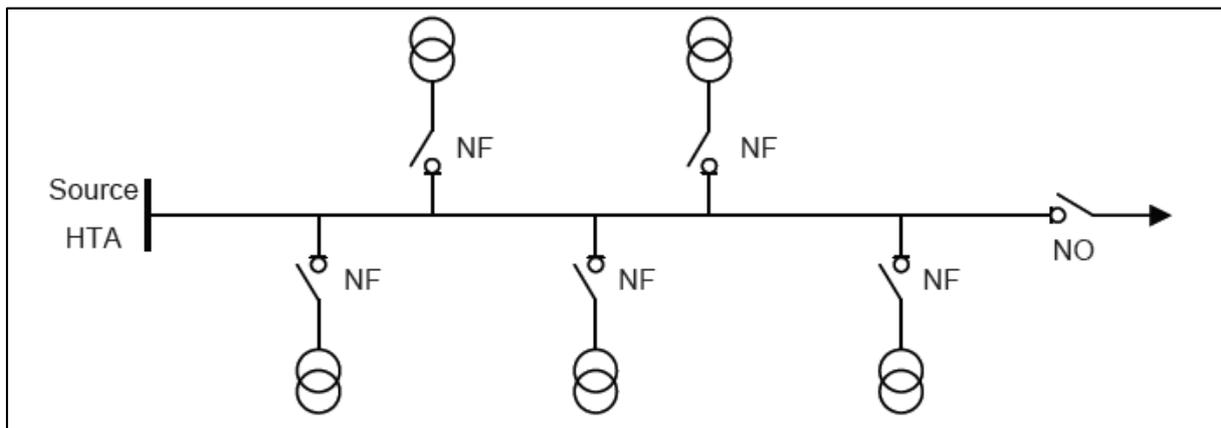


Figure I- 3 Réseau HTA aérienne en simple dérivation.

NF désigne un interrupteur normalement ferme, et NO un interrupteur normalement ouvert. Dans ce chapitre, nous nous intéressons au réseau aérien de manière générale et à l'isolateur de traversée à revêtement en silicone de manière particulière.

I.2 Les éléments constitutifs d'une ligne électrique

Les lignes aériennes constituent des circuits de transmissions des réseaux triphasés reliant le générateur aux charges. Une ligne de transmission électrique à quatre paramètres, à savoir la

résistance, l'inductance, la capacité et la conductance shunt. Ces derniers sont répartis uniformément sur toute la ligne. Chaque élément de ligne a sa propre valeur.

I.2.1 Les supports

Ils sont destinés à suspendre les conducteurs et à supporter leurs poids ainsi que les charges extérieures (vent, neige) et à maintenir les conducteurs à une distance entre eux et à des hauteurs du sol, imposées par des normes établies en fonction du poids de la structure et de la tension de la ligne. Ces supports permettent de maintenir les conducteurs en nappe horizontale, en drapeau ou en triangle.

Les supports de types pylônes peuvent supporter jusqu'à trois ternes et sont de silhouettes Sapin, Danube ou Portique (figure I.4.a, b, et c)

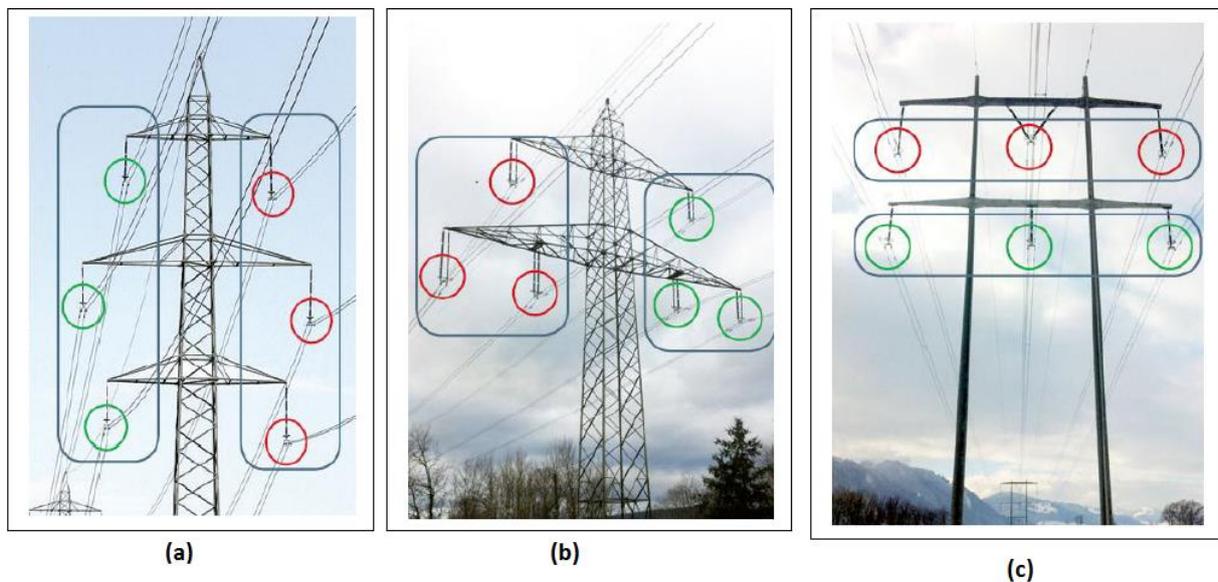


Figure I- 4 : Types de supports a) Sapin, b) Danube et c) Portique.

a) Pylône silhouette Sapin à deux systèmes (en bleu) à trois phases chacun (vert/rouge).

b) Pylône silhouette Danube à deux systèmes(en bleu) à trois phases chacun (vert/rouge).

c) Pylône en Portique à deux systèmes (en bleu) à trois phases chacun (vert/rouge).

I.2.2 Isolateurs de lignes aériennes

L'isolateur assure l'isolement entre deux pièces portées à des potentiels différents pour empêcher les courts circuits, les pertes de courant et les charges d'électrocution. L'isolateur est constitué de matériau solide, liquide ou gazeux qui possède une très grande résistance au passage du courant et dont la conductibilité est pratiquement nulle.

Les isolateurs des lignes aériennes, quant à eux, sont constitués de matériaux solides et ont pour rôle d'isoler électriquement les lignes de transport d'énergie électrique des pylônes mis à la terre, et de soutenir ces mêmes lignes en résistant aux différentes contraintes mécaniques dues surtout au poids de la ligne, son mouvement en présence de vent, etc.

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

I.2.2.1 La porcelaine

La porcelaine est constituée par du kaolin et du quartz de première qualité. Ils sont cuits à 1400°C, puis recouverts d'émail au silicate et recuits au four pour obtenir une glaçure à chaud qui le rend imperméable à l'eau [4]. Les propriétés électriques, mécaniques et thermiques sont les suivantes :

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

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

I.2.2.2 Le verre [5],[6]

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

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

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

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

I.2.2.2.a Le verre trempé

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

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

I.2.2.2.b Le verre recuit

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

I.2.2.3 La bakélite

C'est une résine artificielle inventée vers 1909 par le chimiste BAKELAND. On l'obtient sous trois états [6],[7]

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

I.2.2.4 La Silicone

La silicone est une substance synthétique à base de silicium et d'oxygène formant une classe particulière de plastique. Les silicones, ou polysiloxanes, sont des polymères inorganiques formés d'une chaîne silicium oxygène (...-Si O Si O Si O- ...) sur laquelle des groupes se fixent sur les atomes de silicium. Certains groupes organiques peuvent être utilisés pour relier entre elles plusieurs de ces chaînes Si-O. Le type le plus courant est le polydiméthylsiloxane linéaire

ou PDMS. Le silicium étant présent en proportion suffisante pour affecter les propriétés du produit de façon sensible.

Les silicones sont d'excellents isolants pour les applications hautes et moyenne tension en raison de leur structure moléculaire. Par exemple, les isolateurs en silicone recouverts d'une couche de pollution présentent une résistance aux courants de cheminement plus haute que les modèles en porcelaine, en verre ou en EPDM. Les décharges électriques sont évitées même dans des conditions de pollution extrêmes.

Mais leurs avantages ne se limitent pas aux isolateurs. Aujourd'hui, on utilise les silicones isolants dans toutes les applications MT et HT exigeant une haute sécurité de fonctionnement et une grande longévité, par exemple dans les transformateurs, sous forme d'huile, ou dans les extrémités de câbles haute tension [8].

I.2.2.4.a Les propriétés de la silicone [9]

Les silicones se distinguent quelques propriétés fondamentales :

- Liaison Si-O 'forte' et grande inertie chimique ;
- Bonne tenue aux UV par rapport aux autres polymères ;
- Température de dégradation élevée ; Flexibilité à froid de la chaîne polymérique ;
- Température de transition vitreuse basse ;

Ils possèdent une stabilité remarquable aux intempéries et au vieillissement thermique. A titre d'exemple, on peut citer l'estimation qui figure ci-dessous :

- Rigidité diélectrique 15 kV/mm ;
- Permittivité relative à 25 °C est de 5,4 ;
- Facteur de dissipation diélectrique à 25 °C et 10 kHz ; $\text{tg } \delta = 4 \text{ à } 5 \cdot 10^{-3}$;
- Conductivité thermique : 0,41 à 0,62 W/m.K ;
- Température d'auto-inflammation est supérieure à 300 °C ;
- Masse volumique de 2300 à 2800 kg/m³ ;

I.2.2.4.b Structure moléculaire de la silicone

La structure des silicones, ou chimiquement parlant, des polyorganosiloxanes, est analogue à la structure organique du quartz modifié. Leur motif de base se compose d'une alternance d'atomes de silicium et d'oxygène (Figure I.5). La haute énergie de liaison du chaînon de base silicium oxygène (Si-O-Si-O) confère aux silicones une haute stabilité minérale, nettement supérieure à celle des polymères à motif carbone (C-C), comme par exemple l'EPDM. À titre

de comparaison, l'énergie des liaisons CC est de 348 kJ/mol et celle d'une liaison Si-O de 444 kJ/mol. La lumière solaire de courtes longueurs d'ondes (300 nm), renfermant une énergie d'environ $6,2 \cdot 10^{22}$ kJ (= 398 kJ/mol), peut entraîner la rupture des liaisons C-C tandis que la liaison Si-O reste stable.

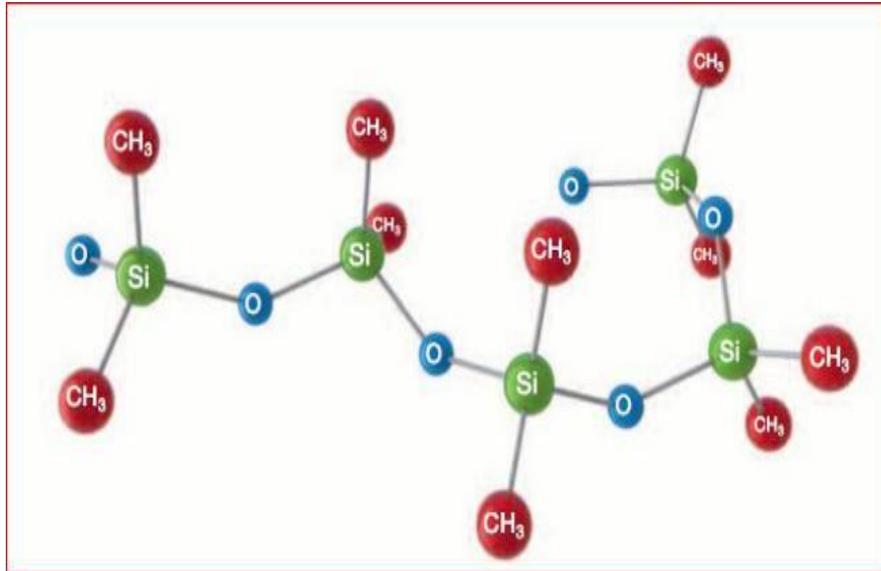


Figure I- 5 : Structure chimique de la silicone.

I.2.2.4.c Caractéristiques fondamentales de la silicone dans diverses applications

Les caractéristiques de la silicone et leurs avantages dans les applications (8) MT/HT sont résumés sur le schéma suivant (figure I.6) :

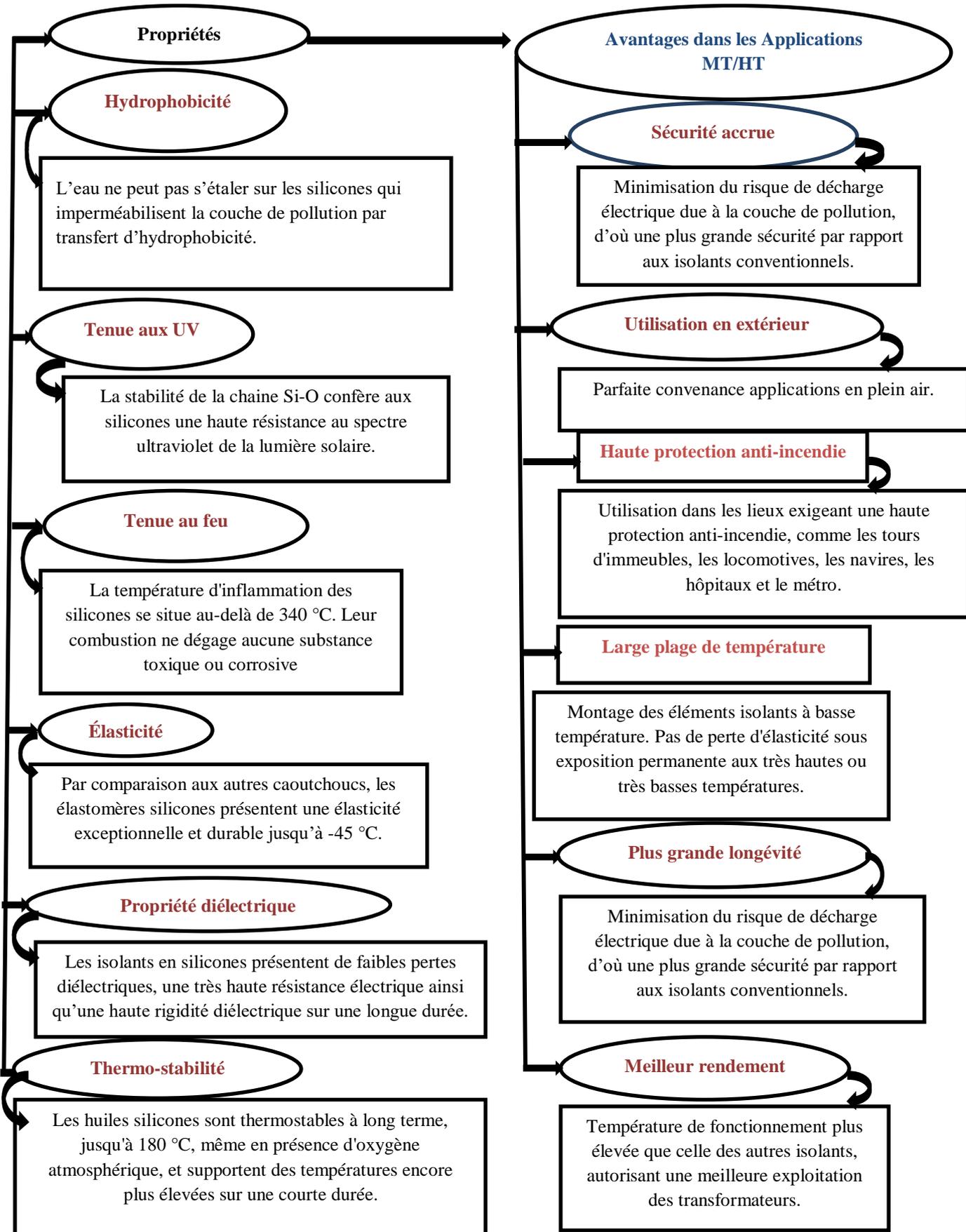


Figure I- 6 Caractéristiques de la silicone et leurs avantages dans les applications MT/HT.

I.2.2.4.d Autres propriétés des silicones [10]

❖ Hydrophobicité

Par rapport aux autres matériaux, les silicones se distinguent par un très haut pouvoir imperméabilisant à long terme, appelé hydrophobicité comme il est illustré sur la figure (I.7). L'eau ne pénètre pas dans les pièces d'isolation en élastomères silicones, mais perle à la surface, même au bout de nombreuses années, ils minimisent les courants de cheminement et évitent les décharges dues au contournement électrique, même si la surface est fortement polluée, car ils transmettent leurs propriétés hydrophobes à la couche de dépôts par transfert d'hydrophobie.



Figure I- 7 : Hydrophobicité d'une surface en silicone.

❖ Tenue aux UV et aux intempéries

Par comparaison aux autres matériaux, les élastomères silicones sont très résistants au rayonnement ultraviolet. Même les climats agressifs des régions côtières ou désertiques n'entament pratiquement pas leurs propriétés : l'élastomère silicone POWERSILR 310 ne présente par exemple qu'une légère altération de ses propriétés mécaniques après un test accéléré d'exposition aux intempéries de 3000 heures.

❖ Élasticité

La très haute élasticité des silicones facilite le montage et permet l'utilisation de nouvelles techniques de montage, comme par exemple, la rétraction à froid pour les accessoires de câbles. Par ailleurs, les silicones conservent leur élasticité jusqu'à -45 °C et conviennent de ce fait aux applications en haute altitude ou dans les régions polaires.

I.2.2.4.e Différentes familles de silicones

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

❖ Huiles et gomme

Sont des polymères linéaires, se différencient par leur masse molaire ou viscosité.

❖ Gels de silicone

Sont des fluides légèrement réticulés de PDMS, où la réticulation est réalisée par un silane de motif T ou par réaction chimique entre un groupe de vinyle avec de l'hydrogène des différentes chaînes de siloxane.

❖ Résines de silicone

Sont des réseaux plus fortement réticulés, les propriétés physiques de la résine de silicone sont réglées en changeant le rapport des siloxanes branchés ou linéaires et également des motifs fonctionnels attachés au Si.

I.2.2.4.f Élastomères silicones

Les élastomères silicones sont principalement constitués de chaînes PDMS linéaires avec des bloqueurs réactifs aux extrémités des chaînes. Les chaînes s'associent entre elles ou à des réticulants ajoutés pour former des réseaux élastométriques. Des charges minérales, telle que la silice, sont aussi incorporées dans le but de conférer au matériau de bonnes propriétés mécaniques telles que l'élasticité, l'amortissement, la résistance au déchirement.

Les propriétés générales des élastomères silicones, comme celles des PDMS, présentent des avantages par rapport aux élastomères organiques traditionnels [11]

I.2.2.4.g Applications des silicones dans l'isolation électrique

En plus de ses bonnes propriétés électriques, la silicone présente une excellente hydrophobicité de surface et flexibilité, ce qui lui donne un large champ d'utilisation, en particulier dans l'isolation extérieure dans le domaine du génie électrique. Les figures (I.8) et (I.9) sont quelques exemples d'utilisation de l'élastomère silicone pour l'isolation électrique haute tension.



Figure I- 8 a) : Isolateur en silicone.

b) : Traversée avec un revêtement en silicone.

On les trouve dans des isolateurs et des traversées (Fig. 1.8) mais également dans des disjoncteurs et des transformateurs de mesure (Fig. I.9).



Figure I-9 a) Disjoncteur avec revêtement en silicone b) Transformateur avec revêtement en silicone.

En moyenne et haute tension, les élastomères silicones sont aussi utilisés dans l'isolation des câbles, les terminaisons des câbles et les barres d'alternateurs qui doivent résister aux températures élevées.

I.2.2.4.h Isolateur long fût

Il est constitué d'un bâton cylindrique plein en céramique, en porcelaine ou en matériaux synthétiques muni d'ailettes. On a recours aux isolateurs à long fût en silicone depuis plus de 40 ans en raison de la haute tenue aux intempéries et à l'érosion de ce matériau[12].

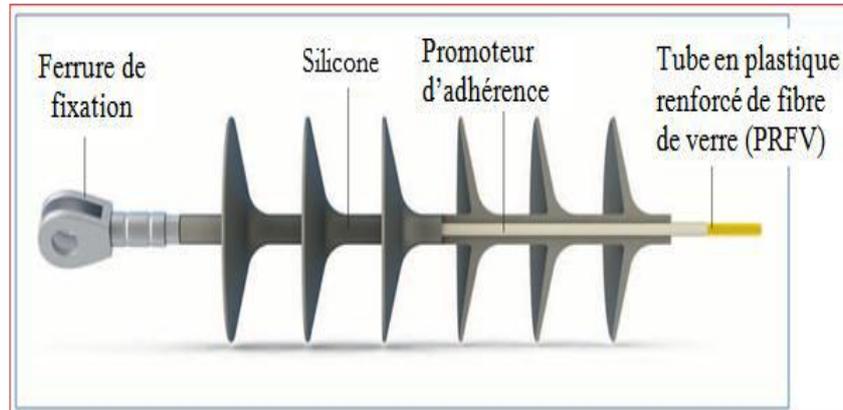


Figure I- 10 Principe d'un isolateur à long fût.

I.2.2.5 Avantage du revêtement en silicone des isolateurs

- Plus grande sécurité de fonctionnement ;
- Traitement des installations existantes ;
- Plus longue durée de vie.

I.3 Pollution des isolateurs

La pollution des isolateurs constitue un problème majeur dans la dégradation de l'isolement des ouvrages (postes et lignes) de haute tension [13]. Portés par le vent et déposés sur la surface isolante des chaînes des isolateurs, et en présence d'humidité, les divers dépôts polluants deviennent plus ou moins conducteurs.

I.3.1 Salinité

La salinité est définie comme la concentration du sel dans l'eau. Elle correspond à la masse de sel divisée par le volume de la solution, généralement exprimée en kg/m³.

I.3.2 Couche de pollution

C'est une couche conductrice électrolytique appliquée sur la surface de l'isolation. Elle est composée du sel et des matériaux inertes.

I.3.3 Degré de pollution

C'est la valeur qui caractérise la pollution telle que la salinité, la conductivité de la couche et la densité de dépôt de sel [14].

I.4 Sources de pollution

Les sources de pollution sont nombreuses et leurs de degrés de gravité différents.

I.4.1 Pollution naturelle

Ce type de pollution est très répandu et affecte un grand nombre d'ouvrage. Nous pouvons la résumer en trois grandes catégories : marine, désertique et poussière du sol.

I.4.2 Pollution marine

Cette pollution caractérise les ouvrages en bordures de mer et peut s'étaler jusqu'à plusieurs dizaines de kilomètres du littoral vers l'intérieur. Les embruns marin portés par le vent se déposent sur la surface des isolateurs et se cristallisent à plus ou moins longue échéance. La particularité de cette pollution est qu'elle est exclusivement constituée de sels ioniques, notamment le NaCl, et de peu de matières insolubles dont la densité équivalente ne dépasse pas les 0,1 mg/cm² de surface de l'isolateur [15]

I.4.3 Pollution désertique

Par pollution désertique nous entendons la pollution propre aux climats désertiques, c'est-à-dire des régions où règne une faible pluviométrie et où l'humidification se fait par condensation. L'accumulation de la pollution se fait à la suite d'une interaction entre l'écoulement d'un air riche en poussière et l'obstacle formé par l'isolateur [16].

I.4.4 Poussières du sol et zones agricoles

Les poussières du sol constituent des agents de pollution dans les régions manquant de végétation [17] où le sol a subi un dessèchement de sa couche superficielle suite à une longue période sèche. On ajoutera à cela que l'utilisation d'engrais par pulvérisation ou le labourage des terres conduit lui aussi à la constitution d'une couche de pollution fortement conductrice [18].

I.4.5 Pollution industrielle

Ce type de pollution est peu étendu et se concentre dans des points particuliers, n'intéressant que quelques pylônes. Il dépend étroitement de l'industrie (usines métallurgiques, chimiques, des centrales électriques et des complexes pétrochimiques, etc.) le dépôt de pollution peut se

constituer par la fixation de particules solides telles que les dépôts ferromagnétique issus des usine métallurgiques et l'absorption de gaz présent dans les fumées par la couche liquide [19]

I.4.6 Pollution domestique

Cette pollution est due aux fumées et au gaz échappant des appareils des habitations et les moyens de transport. On note que la pollution est généralement mixte, résultant de la combinaison de plusieurs sources.

I.4.7 Pollution mixte

La pollution mixte résulte de la combinaison d'une ou plusieurs pollutions précitées, c'est la forme de pollution la plus sévère pour l'exploitation des ouvrages électriques.

I.5 Impact de la pollution

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

I.5.1 Techniques de lutte contre la pollution

Il permet d'adapter le dimensionnement aux nouvelles conditions de pollution. Deux techniques sont employées :

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

I.5.2 Utilisation des isolateurs plats (auto-nettoyables)

L'utilisation d'isolateurs plats conduit à la diminution de la ligne de fuite des isolateurs. En effet, ces derniers sans nervures ont la propriété d'accumuler moins de pollution que les isolateurs traditionnels et s'auto nettoient très bien sous l'effet du vent. Ils sont principalement utilisés dans les régions désertiques [20].

I.5.3 Graissage des isolateurs (couches hydrophobes)

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

et de la qualité intrinsèque du produit. Elle est généralement comprise entre 1 et 4 ans. Le graissage est largement utilisé dans le monde, mais l'opération de nettoyage puis de graissage est pénible, longue et coûteuse. Elle nécessite, par ailleurs, une interruption de service [21].

I.5.4 Revêtements à base de silicones

Cette méthode consiste à appliquer, par pulvérisation ou au pinceau, un caoutchouc silicone qui se vulcanise à température ambiante à la surface des isolateurs. Comme pour le graissage, grâce à ses propriétés hydrophobes, ce revêtement protège et améliore leur tenue sous pollution. Par contre sa longévité est, en général, nettement supérieure à celle du graissage [22].

I.6 Classification des sites pollués

Pour définir l'isolement des lignes de transport et d'établir la corrélation entre la salinité et les niveaux de pollution naturelle, quatre classes de sévérité ont été définies selon la norme CEI 815 qui sont : faible, moyenne, forte et très forte (Tableau I.2) [23].

Tableau I.1. Classification des sites pollués.

Faible 0.06 mg/cm ²	Cette classe correspond à une pollution faible d'origine naturelle (sauf marine). Elle concerne généralement des zones non industrielles ayant une faible densité d'habitations, situées loin de la mer. Un isolement normal convient facilement pour ces zones (régions agricoles, montagneuses).
Moyenne 0.20 mg/cm ²	correspond à une pollution moyenne, naturelle (sauf marine) ou faiblement industrielle. Elle correspond à des zones à moyenne densité d'habitation et situées loin de la mer.
Forte 0.60 mg/cm ²	Elle correspond à une forte pollution marine et industrielle. Les zones considérées possèdent une forte densité d'habitation et situées près de la mer, donc exposées à des embruns marins relativement forts. Ces sites nécessitent un isolement important.
Très forte >0.60 mg/cm ²	Elle correspond à des zones où le niveau de pollution est exceptionnel. La pollution dans ces zones peut être naturelle, industrielle ou mixte.

I.7 Conséquences de la pollution sur l'isolateur [24]

Lorsque l'isolateur est propre ou recouvert d'une couche de pollution sèche, la résistivité à la surface est très grande et le courant capacitif circulant à la surface est très faible. Le dépôt de pollution accumulé à la surface de l'isolateur provoque, en présence de l'humidité, la formation d'une couche électrolytique augmentant ainsi la conductivité superficielle. Cette couche devient, par la suite, le siège d'un courant de conduction de valeur relativement importante. Ce qui peut conduire à la formation et au développement d'arcs électriques le long de la surface de l'isolateur. Selon les conditions auxquelles est soumis l'isolateur, trois cas peuvent se présenter:

I.7.1 Influences des facteurs climatiques sur les isolants pollués

Parmi les facteurs climatiques et météorologiques essentiels nous distinguons [25]:

1- Le vent : il constitue l'agent qui assure le transport des poussières et des sels marins, il peut être considéré comme un agent d'auto nettoyage dans le cas où sa vitesse est grande.

2- La température : les hautes températures ont une influence positive pour les surfaces polluées, car elles sèchent les dépôts et augmentent leur résistivité. Lorsque la température croît, la rigidité diélectrique est soit constante, soit légèrement décroissante. À partir d'une certaine température limite, appelée température de transition, survient une décroissance très rapide.

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

4- La pluie : pendant les premières heures du matin, elle agit négativement sur la surface contaminée des isolateurs, car elle engendre l'augmentation de la conductivité de la couche de pollution.

I.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit essentiellement les principales caractéristiques de la silicone et son utilisation dans le domaine du Génie Electrique, en particulier pour l'isolateur de traversée. Nous pouvons conclure que les isolants solides, notamment les silicones sont très demandées dans le domaine industriel en égard à leurs excellentes propriétés électriques, thermiques et mécaniques mais surtout pour leurs coûts raisonnables.

La pollution reste un facteur déterminant pour le dimensionnement d'isolement dans les ouvrages de haute tension.

Chapitre II :

Méthode de diagnostic

II.1 Introduction

Pour suivre l'évolution du vieillissement des matériaux isolants électriques, il existe une très grande variété d'outils électrique et physico-chimiques de caractérisation. Ces outils peuvent être utilisés simultanément au vieillissement du matériau pour connaître à tout moment son état.

II.2 Outils de caractérisations physico-chimiques et méthodes de mesure

II.2.1 Caractérisations physiques

II.2.1.1 Rigidité diélectrique

La rigidité diélectrique d'un isolant est la tension qui provoque la perforation d'un centimètre d'épaisseur de l'isolant. Elle s'évalue par l'intensité du champ électrique, auquel il faut soumettre le matériau pour qu'il en résulte une perforation qui le rende inapte à remplir ultérieurement sa fonction. De façon pratique, la rigidité diélectrique est définie comme étant le rapport entre la tension à laquelle se produit une perforation dans les conditions d'essais spécifiées et la distance entre les deux électrodes auxquelles est appliquée la tension. La rigidité diélectrique est donnée par l'expression de l'équation (II.1).

$$E_d = \frac{U}{d} \text{(kV/cm)} \text{(II.1)}$$

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

d : distance inter-électrodes.

a) Mesure de la rigidité diélectrique (26): l'essai de rigidité diélectrique est destiné à éprouver les éléments isolants des composants et des différents sous-ensembles constituant un équipement électrique, et à vérifier que les lignes de fuite entre points et entre points et la masse sont convenablement dimensionnées suivant la technologie employée. L'essai de rigidité diélectrique consiste à appliquer une tension (continue ou alternative) entre deux points du système (ex : l'air ou autres matériaux isolants) et vérifier qu'il n'y a pas un courant de fuite supérieur à la valeur nominale admissible due à des phénomènes de claquage ou de décharges disruptives. La sanction de défaut est déterminée par l'analyse de la forme, de l'amplitude et du temps de maintien du courant fourni par le générateur à l'élément en teste et par comparaison avec une consigne déterminée.

b) Rigidité diélectrique longitudinale : elle dépend de peu de la nature de l'isolant mais beaucoup plus de son état sec et propre. En effet dans la plus part des cas, l'amorçage ou décharge entre deux conducteurs se produit d'abord dans le milieu ambiant ou voisinage de la

surface du solide. Elle est obtenue entre deux conducteurs situés sur une même surface.

La rigidité diélectrique longitudinale d'un matériau isolant est déterminée lorsque la décharge s'opère entre deux conducteurs plans (électrodes planes) situés sur une même surface de cet isolant. La rigidité longitudinale est alors donnée par la relation (II.2).

$$E_l = \frac{U_{contournemnt}}{d} \quad (\text{kV/cm}) \quad (\text{II.2})$$

La Figure II.1 illustre le schéma de principe de la mesure de la tension de contournement d'une surface isolante.

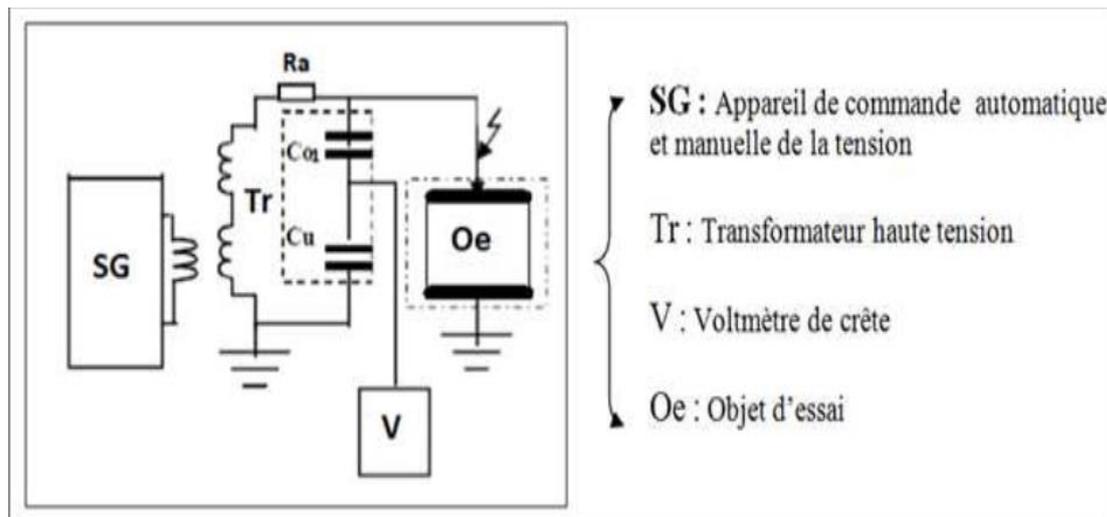


Figure II- 1 Circuit de mesure de la tension de contournement d'une surface isolante.

c) Rigidité diélectrique transversale : c'est celle pour laquelle le champ électrique appliqué est perpendiculaire à la surface principale du matériau. La rigidité diélectrique transversale d'un matériau isolant est obtenue entre deux conducteurs plans (électrodes planes) situées de part et d'autre des surfaces de cet isolant. La rigidité diélectrique transversale dépend de la nature de l'isolant. La tension de perforation de l'épaisseur de l'isolant est mesurée, pour une distance inter électrodes (épaisseur de la plaque isolante), par la montée rapide de la tension jusqu'à perforation de l'isolant. La rigidité diélectrique transversale est alors déterminée par la relation (II.3)

$$E_t = \frac{U_{perforation}}{d} \quad (\text{kV/cm}) \quad (\text{II.3})$$

La Figure (II.2) illustre le schéma de principe de la mesure de la tension de perforation de l'isolant.

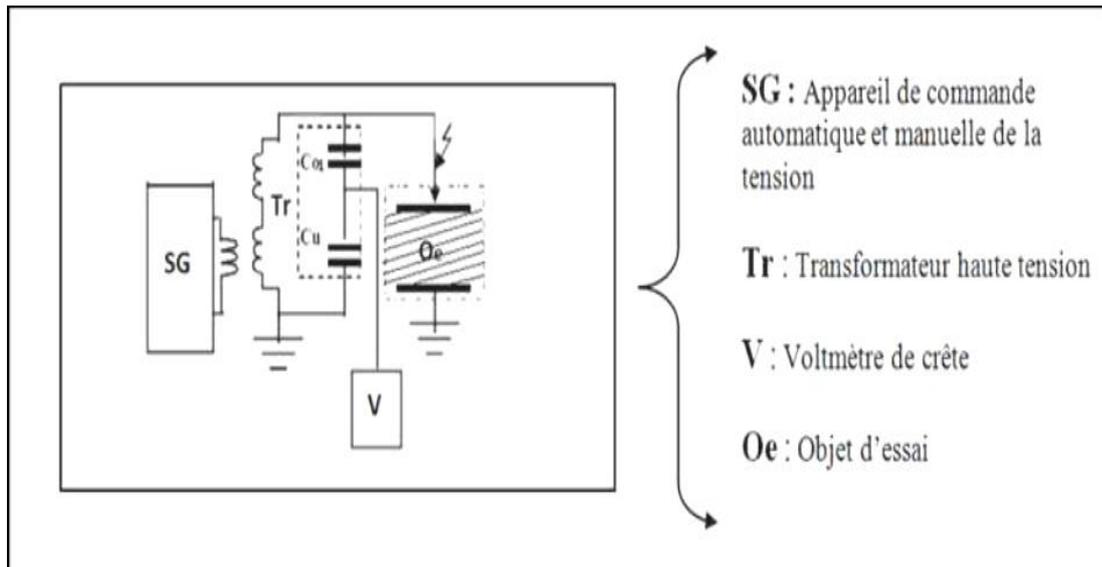


Figure II- 2 Circuit de mesure de la tension de claquage d'un matériau isolant.

II.2.1.2 Facteur de perte, capacité et permittivité

a) Mesure du facteur de pertes $tg\delta$ par la méthode du pont de Schering

[27],[28],[29],[30].

Le pont de SCHERING (Figure II .3) permet la mesure de la capacité et du facteur de perte d'isolation (condensateur, câbles, isolateurs, bornes de traversées, isolants, etc.) en tension alternative.

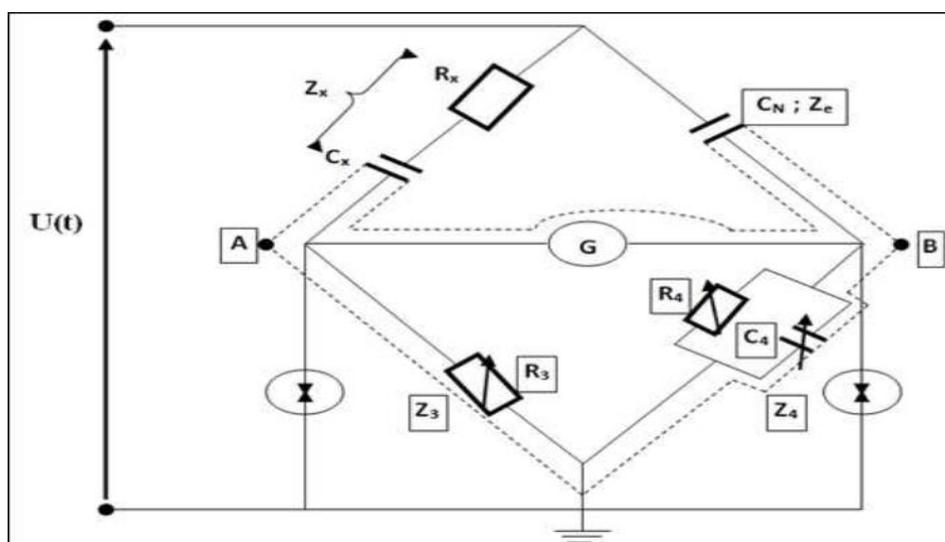


Figure II- 3 Schéma de principe du pont de Schering.

- . Impédance de branche : L'impédance de l'objet d'essais

$$Z_x = R_x + \frac{1}{j\omega C_x} \quad (II.4)$$

$$Z_x = \frac{1}{jC_W x} (1 + jtg\delta_x) \quad (\text{II.5})$$

Avec :

$$tg\delta_x = W \cdot R_x \cdot C_x \quad (\text{II.6})$$

$$Z_N = \frac{1}{jC_N W} \quad (\text{II.7})$$

Z_N : Impédance de la capacité étalon de facteur de perte faible.

$$Z_3 = R_3 \quad (\text{II.8})$$

$$Z_4 = \frac{R_4 \cdot (1 + jW C_4)}{R_4 + \frac{1}{jC_W 4}} \quad (\text{II.9})$$

A l'équilibre : $I_G = 0$

D'où

$$Z_x \cdot Z_4 = Z_N \cdot Z_3 \quad (\text{II.10})$$

En remplaçant les expressions des impédances et en égalant les parties réelles et imaginaires, nous trouvons :

$$C_x = \frac{R_4}{R_3} \cdot C_N \quad (\text{II.11})$$

$$tg\delta_x = W \cdot R_x \cdot C_x = \frac{W \cdot R_3 \cdot C_x \cdot C_4}{C_N} \quad (\text{II.12})$$

$$tg\delta = W \cdot R_x \cdot C_4 \quad (\text{II.13})$$

b) Mesure de la constante diélectrique ϵ_r

$$C_x = \epsilon_r \cdot C_0 \Rightarrow \epsilon_r = \frac{C_x}{C_0} \quad (\text{II.14})$$

$$C_0 = \epsilon_0 \cdot \frac{S}{a} \quad (\text{II.15})$$

D'où

$$\epsilon_r = \frac{R_4}{R_3} \cdot C_N \cdot \frac{a}{\epsilon_0 \cdot S} \quad (\text{II.16})$$

c) Le pont à transformateur différentiel [31].

La capacité C_x et C_N sont placés dans la branche H.T. La branche basse tension est remplacée par les bobinages W_1 et W_2 du transformateur, le troisième bobinage du transformateur est connecté à l'indicateur zéro. Le pont est en équilibre si :

$$C_x = \frac{W_1}{W_2} \cdot C_N \quad (\text{II.17})$$

Le nombre de spire du bobinage est fixé à 4 positions de sorte que le rapport à choisir soit de : 0.1 ; 1 ; 10 ou 100. Le bobinage W_2 donne des positions de réglage variables.

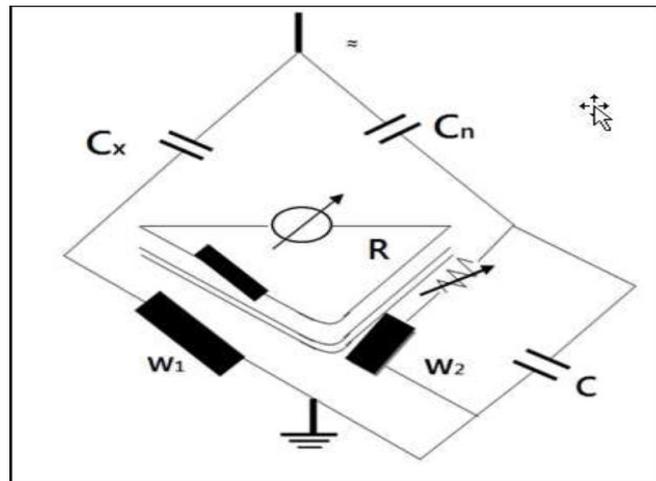


Figure II- 4 Schéma de principe du pont de Schering à transformateur différentiel.

Pour déterminer $tg \delta$, des résistances et des capacités variables sont ajoutées au pont. Le facteur de perte est donné par : $tg\delta = W.C.R$. Le réglage de C et R donne la valeur de $tg\delta$ à 50 ou 60 Hz.

II.2.1.2 Résistance et résistivité

a) Mesure de la résistance transversale

La résistance transversale R_t mesurée entre deux électrodes appliquées sur deux faces opposées d'un échantillon, est le quotient de la tension continue appliquée aux électrodes par la partie du courant qui traverse l'isolant entre ces électrodes.

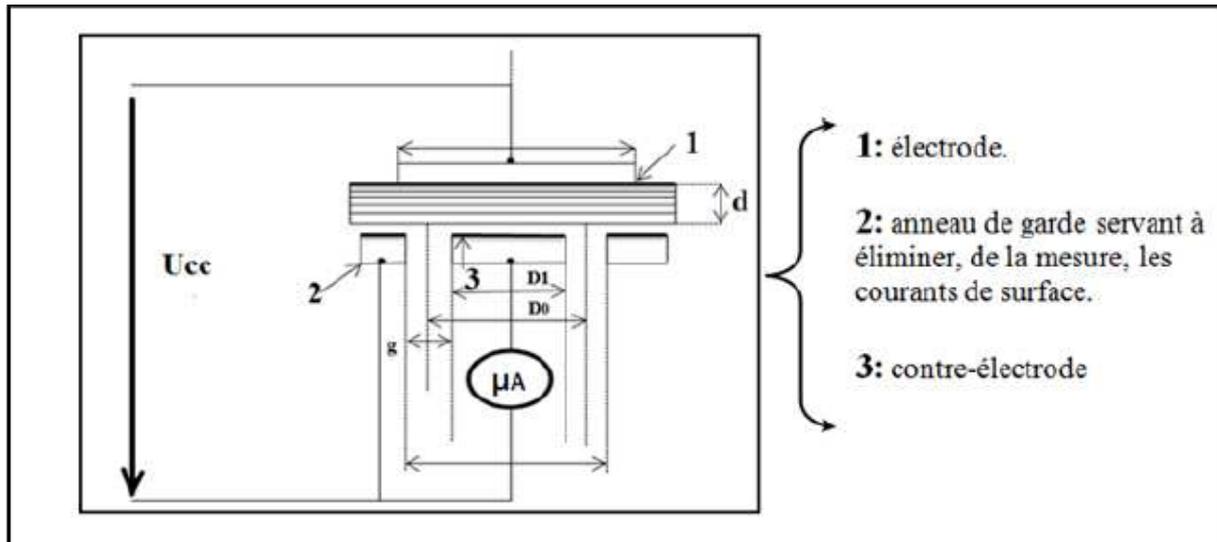


Figure II- 5 Schéma de mesure de la résistance transversale.

b) Mesure de la résistivité transversale (34)

La résistivité transversale d'un matériau ρ_t est le quotient du gradient du potentiel par densité du courant qui le traverse, ce qui donne :

$$\rho_t = S_t \cdot \frac{R_t}{d} \quad (\text{II.18})$$

D'où
$$S = \frac{\pi D_0^2}{4} \quad (\text{II.19})$$

$$D_0 = \frac{D_1 + D_2}{2} \quad (\text{II.20})$$

c) Mesure de la résistance superficielle

La résistance superficielle R_s mesurée entre deux électrodes appliquées sur la même face d'un échantillon est le quotient de la tension continue appliquée aux électrodes par la partie du courant à travers la mince couche d'humidité (pollution) qui pourrait exister à la surface de l'isolant et dans les couches superficielle de ce dernier.

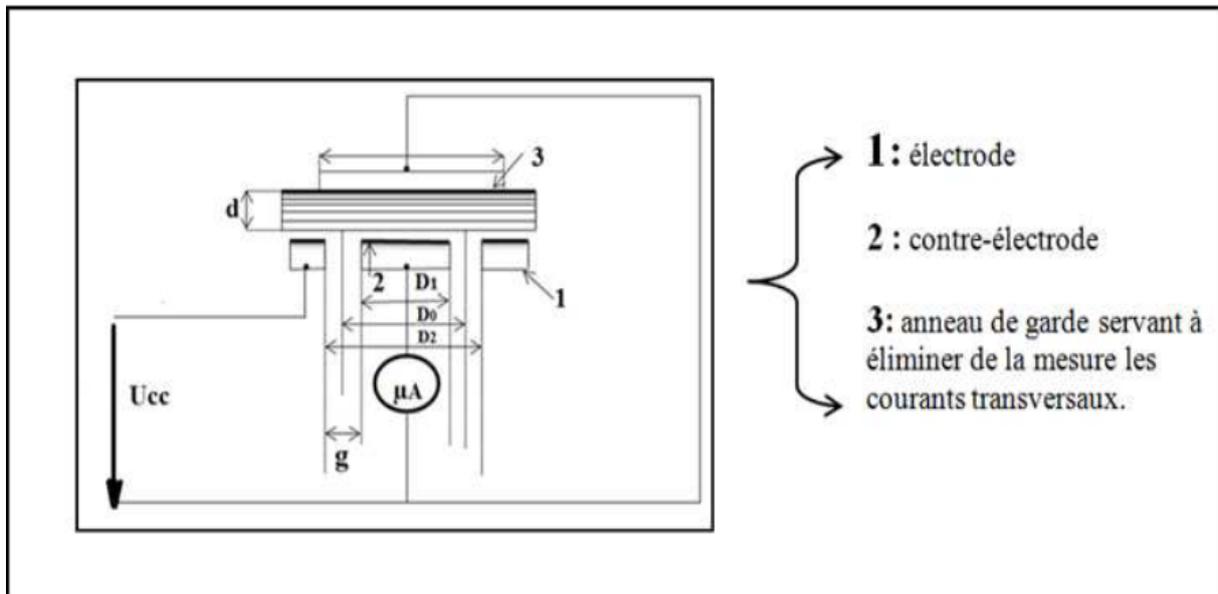


Figure II- 6 Schéma de mesure de la résistance superficielle.

d) Mesure de la résistivité superficielle

La résistivité superficielle d'un matériau ρ_s est le quotient du gradient du potentiel en surface par le courant et par unité de largeur, soit :

$$\rho_s = \frac{P \cdot R_s}{g} \quad (\text{II.21})$$

$$P = \pi \cdot D_0 \quad (\text{II.22})$$

D'où

$$D_0 = \frac{D_1 + D_2}{2} \quad \text{Et} \quad g = \frac{D_1 - D_2}{2} \quad (\text{II.23})$$

II.2.1.2 Hydrophobicité

a) Définition

L'hydrophobicité d'une surface est caractérisée par l'angle de contact. Lorsqu'une goutte de liquide est déposée sur une surface solide plane, l'angle entre la tangente à la goutte au point de contact et la surface solide est appelé angle de contact (θ).

La mesure de cet angle permet de déduire le caractère hydrophobe (grand angle, faible énergie de surface) ou hydrophile (petit angle, grande énergie de surface) de la surface.

L'angle de contact d'une goutte est dépendant de la taille de cette goutte. Il dépend à la fois du liquide, du solide qui le supporte ou le contient, et du gaz qui environne les deux. T. Young a montré en 1805 que cet angle est fixé par l'équilibre de trois tensions de surface (comme indiqué sur la figure (II.7)).

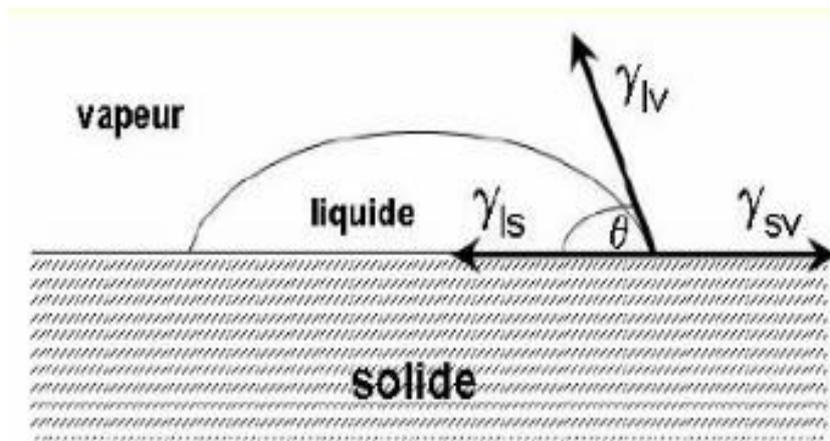


Figure II- 7 : Angle de contact et tensions de surface d'une gouttelette d'eau déposée sur une surface solide.

θ est l'angle de contact caractérisant le caractère hydrophobe ou hydrophile de la surface solide.

γ_{ls} : la tension superficielle entre le solide et le liquide ;

γ_{lv} : La tension superficielle entre le liquide et sa phase vapeur ;

γ_{sv} : La tension superficielle entre le solide et la vapeur.

L'équilibre de la goutte se traduit par :

$$\gamma_{sv} = \gamma_{ls} + \gamma_{lv} \cdot \cos \theta, \quad (\text{II.22})$$

$$\text{Soit : } \cos \theta = \frac{\gamma_{sv} - \gamma_{ls}}{\gamma_{lv}} \quad (\text{II.23})$$

Des travaux ont montré que l'angle de contact d'une gouttelette d'eau sur une surface d'élastomère silicone peut varier entre 95° et 105° suivant la taille de la gouttelette. La figure (II.8) illustre le comportement d'une gouttelette d'eau sur une surface hydrophile et hydrophobe.

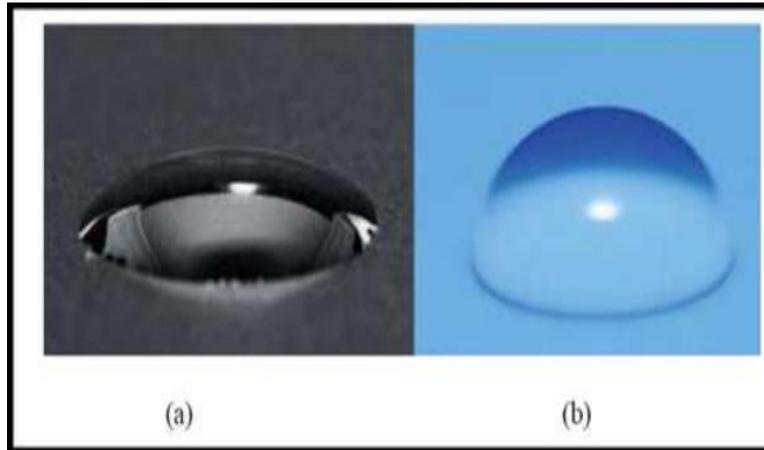


Figure II- 8 Comportement d'une gouttelette d'eau sur une surface isolante (a) : surface hydrophile (porcelaine), (b) : surface hydrophobe (Silicone).

- si $\theta \leq 90^\circ$ la surface est hydrophile ;
- si $\theta \geq 90^\circ$ la surface est hydrophobe.

Les silicones sont caractérisées par un pouvoir imperméabilisant par rapport aux autres matériaux, et ce à long terme, appelé hydrophobicité ; l'eau ne pénètre pas dans les pièces d'isolation en élastomères silicones, mais perle à la surface, même au bout de nombreuses années.

Si une décharge survient, elle occasionne un comportement hydrophile, mais du fait de leurs faible poids et de leur flexibilité, les élastomères silicones retrouvent parfaitement leurs caractères hydrophobes. L'angle de contact peut-être obtenu de plusieurs manières [32] :

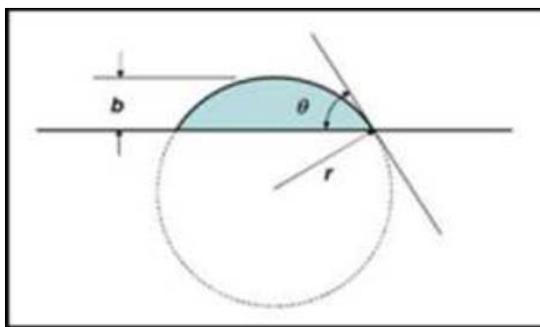


Figure II- 9 méthode théorique détermination de l'angle de contact θ .

$$\sin \theta = \frac{r-b}{b} \quad (\text{II.24})$$

Ou encore :

$$\theta = 90^\circ - \left(\frac{r-b}{\sqrt{2rb-b^2}} \right) \quad (\text{II.25})$$

b : est la hauteur de la gouttelette

r : le rayon de la gouttelette

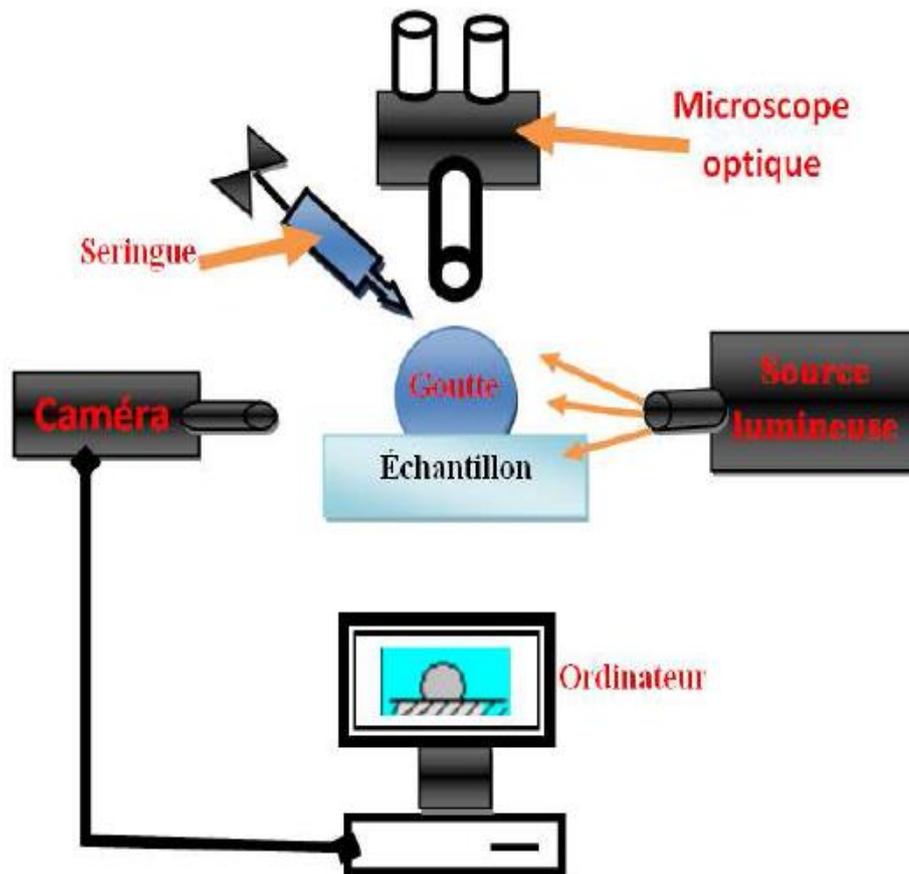


Figure II- 10 : Schéma de principe de la méthode pratique de détermination de l'angle de contact.

En pratique, une goutte de liquide, en général de l'eau ultra-pure, est déposée par une seringue sur la surface de l'échantillon à analyser. La mesure de l'angle est réalisée sur une image capturée par un PC via une caméra. Le logiciel Image J permet de numériser le contour de la goutte par la méthode d'interpolation. Un système motorisé permet de faire des mesures d'angles à l'avancée et au retrait de la goutte, l'aiguille de la seringue étant alors maintenue dans la goutte. Une enceinte en plexiglas permet d'isoler le système goutte-échantillon de l'air et des contaminations extérieures.

Afin d'effectuer des mesures d'angle de contact entre une goutte d'eau et un solide, nous disposons d'un porte-échantillon inversé, adapté au positionnement de l'échantillon dans un liquide, la surface à déterminer étant tournée vers le bas. Dans ce cas, nous utilisons une seringue à aiguille recourbée adaptée à la dépose d'une goutte d'eau.

b) Hydrophobe et Hydrophile

La figure (II.11) 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.

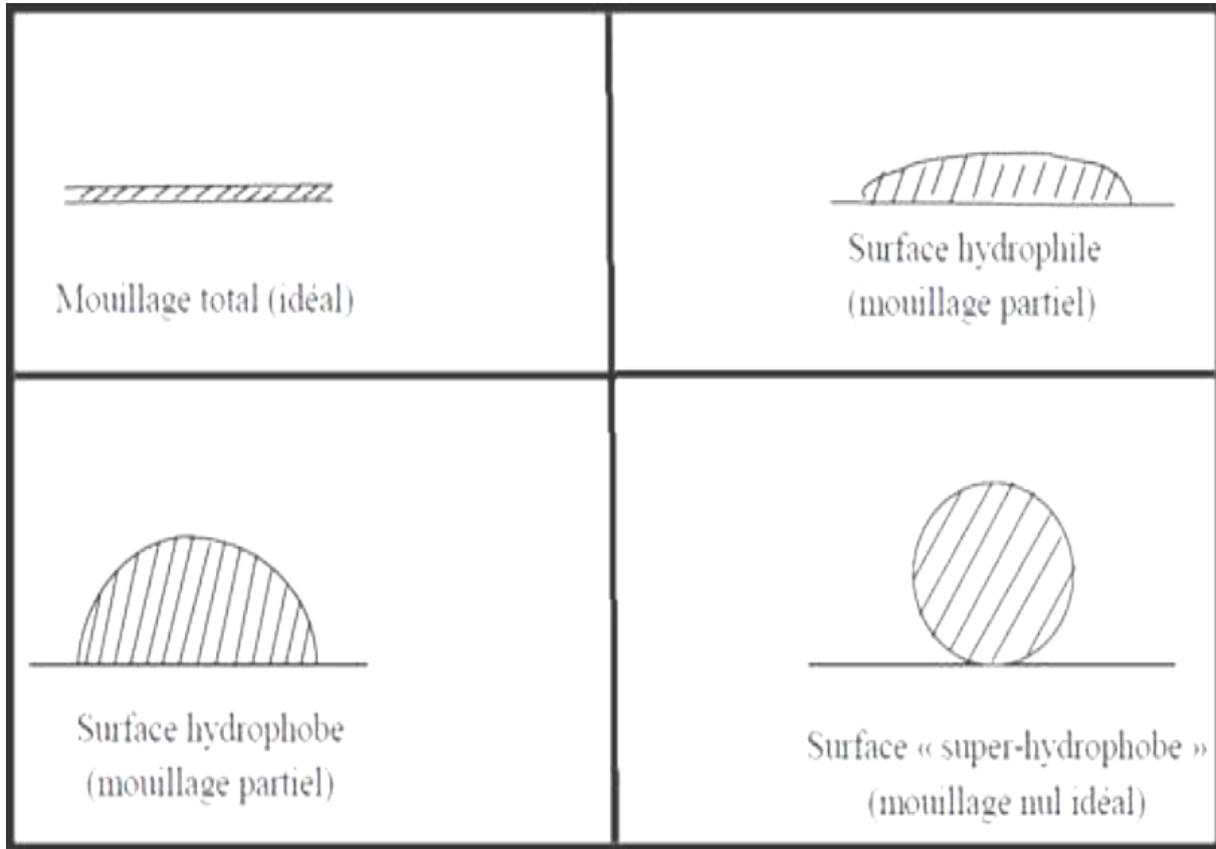


Figure II- 11 Différents types de régimes de mouillage.

c) Indice d'hydrophobicité (IH)

L'indice d'hydrophobicité (IH), est obtenu en mesurant l'angle de contact entre la surface de l'échantillon et les gouttelettes d'eau, en utilisant un microscope optique. La corrélation de l'IH avec l'angle de contact θ est représentée dans le tableau (II.1).

Tableau II.1 : corrélation de l'IH avec l'angle de contact θ .

IH	Description
1	Seules des gouttelettes discrètes sont formées. $\theta > 80^\circ$ pour la majorité des gouttelettes.
2	Seules des goutteles discrètes sont formées. $50^\circ < \theta < 80^\circ$
3	Seules des gouttelettes discrètes sont formées. $20^\circ < \theta < 50^\circ$, elles ne sont plus circulaires.
4	Des gouttelettes discrètes et des traces mouillées de rigoles d'eau sont observées (c.à.d. $\theta = 0^\circ$). Zones complètement mouillées $< 2 \text{ cm}^2$. Elles couvrent $< 90\%$ de la surface testée.
5	Quelques zones complètement mouillées $> 2 \text{ cm}^2$, qui couvrent moins de 90% de la surface testée.
6	zones mouillées qui couvrent $> 90\%$, c'est-à-dire de petites zones non mouillées (taches / traces) sont toujours observées.
7	film d'eau continu sur toute la zone testée.

II.2.2 Analyses chimiques

II.2.2.1 La spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (FTIR)

La spectroscopie infrarouge est une technique expérimentale permettant l'identification de matériaux par la nature des fonctions chimiques qui les constituent. Son principe repose sur l'interaction entre une source poly chromatique émettant des photons dont la longueur d'onde se situe dans le domaine de l'infrarouge (*i.e.* entre 2.5 et $25 \mu\text{m}$), et le matériau permettant la détection des différents modes (ou fréquence) de vibration des liaisons ou groupements chimiques présentes dans le matériau [32],[33],[34],[35].

II.2.2.2 La microscopie électronique à balayage (MEB)

La Microscopie électronique à balayage (MEB) ou Scanning Electron Microscopy) en anglais (SEM) est une technique de microscopie électronique permettant de caractériser la morphologie d'un échantillon, en produisant des images en haute résolution de la surface de celle-ci en utilisant le principe des interactions électrons-matière. De plus, le MEB se trouve généralement associée à d'autres équipements, entre autres, la microanalyse X (EDX), analyse élémentaire locale [36].

Le principe du MEB consiste en un faisceau d'électrons balayant la surface de l'échantillon à analyser qui, en réponse, réémet certaines particules. Ces particules sont analysées par différents détecteurs qui permettent de reconstruire une image en trois dimensions de la surface.

En effet, l'appareil MEB présente un fil de tungstène qui va chauffer et émettre ainsi des électrons. Ces électrons vont être accélérés de par l'application d'une différence de potentiel.

Ensuite, une bobine constituée de fils de cuivre va condenser le faisceau. Enfin, une seconde bobine de balayage va permettre de défléchir le faisceau et de voir une image plus grande que la surface éclairée par le seul faisceau car celui-ci balaye la surface de l'échantillon. La figure (II.12) illustre le schéma de principe de fonctionnement du MEB. L'interaction électrons-matière va entraîner l'émission de photons X et d'électrons.

Le microscope électronique à balayage permet d'obtenir des images de surfaces de pratiquement tous les matériaux solides, à des échelles allant de celle de la loupe (x10) à celle du microscope électronique en transmission (x500.000 ou plus). Ces images frappent en premier par le rendu très parlant du relief et la grande profondeur de champ.

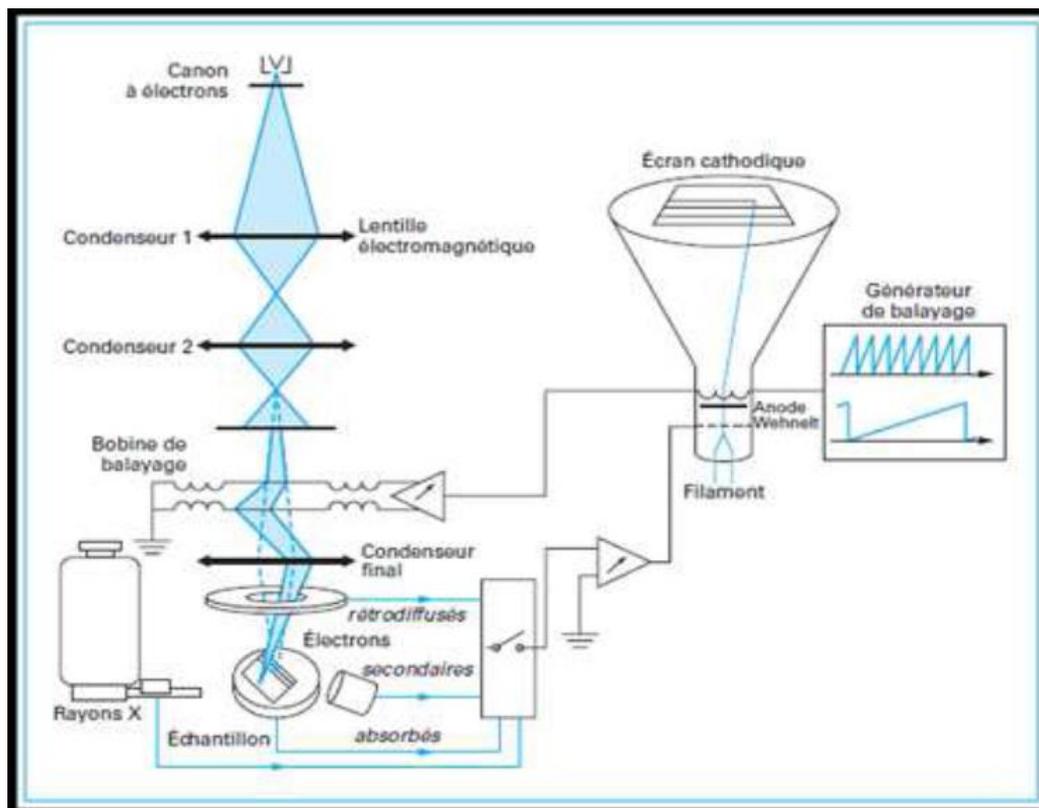


Figure II- 12 Schéma de principe d'un microscope électronique à balayage.

II.2.2.3 Diffraction des rayons X (DRX)

La diffraction des rayons X est une méthode d'analyse chimique utilisée pour la caractérisation des réseaux cristallins et de façon générale, l'analyse quantitative de la cristallinité. En effet, cette méthode s'applique aux matières présentant les caractéristiques de l'état cristallin : un arrangement périodique, ordonné et dans des plans réticulaires tridimensionnels des atomes constitutifs (roches, cristaux, minéraux, argiles...). La méthode permet ainsi clairement de distinguer les produits amorphes (verres, polymères...) des produits cristallisés [37].

II.2.2.4 Analyses thermiques

a) Analyses thermogravimétrique et thermique différentielle (ATG/ATD)

Cette analyse est basée sur l'étude de la perte de masse sous l'effet d'une sollicitation thermique. Cet appareil qui se compose d'une balance et d'un système de chauffe sous gaz inerte permet de mesurer l'évaporation des divers produits et la dégradation du matériau à haute température. Facile d'utilisation, il faut tout de même prendre en compte les gammes de températures utilisées (vitesse de chauffe, durée...), et bien différencier les évaporations de solvants d'une dégradation structurelle [38].

Les analyses ATG/ATD permettent de déterminer les températures de dégradation thermique (la température initiale de décomposition (T_i), la température de dégradation maximale (T_m) et la température finale de décomposition (T_f) des échantillons de polymères, ce qui permettra de voir l'impact de la température sur la stabilité thermique du matériau étudié. Ces analyses thermiques sont réalisées sous atmosphère contrôlée inerte et dans une gamme de température allant de 20 à 1600°C programmée à 90°C/mn [39].

b) Analyse calorimétrique différentielle (DSC)

La DSC repose sur une mesure directe des effets thermiques (flux de chaleur) associés aux changements d'état d'un matériau et/ou de sa dégradation. Elle permet de déterminer la température de transition vitreuse (T_g), les températures et les enthalpies de fusion et de cristallisation des matériaux polymères. L'analyse des échantillons se fait sous une atmosphère d'azote entre 25°C et 200°C avec une vitesse de chauffe de 10°C/mn. La masse des échantillons est d'environ 14 mg. Les températures de transition vitreuse et de fusion sont déterminées à partir des thermogrammes au maximum des pics endothermiques.

II.2 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit les différentes techniques d'analyses qui permettent de faire un monitoring du comportement physico-chimique du matériau considéré. Ceci est possible grâce à la mesure et la quantification de ses grandeurs caractéristiques. A chaque grandeur sa méthode de détermination qui nécessite le moyen et la technique pour une meilleure précision de la mesure.

Chapitre III :

Protocole expérimental

III.1 Introduction

L'étude expérimentale menée dans ce chapitre a pour but d'analyser la perte partielle et totale de l'hydrophobicité de l'isolation en silicone en fonction de la déclinaison de la surface de l'isolation, ceci sous l'effet des paramètres d'influence suivants : la taille des gouttes d'eau, leur conductivité électrique, leur distribution, et l'état de surface du matériau (vierge, vieilli propre et vieilli polluée avec une solution conductrice sous tension alternative). Il est question, dans un premier temps et pour chacun des cas étudié, de déterminer l'angle de contact θ et par là, l'indice d'hydrophobicité (IH) du matériau pour statuer sur son état. Dans un deuxième temps, nous ferons une caractérisation de l'état du matériau considéré au moyen des méthodes physico-chimiques précitées (§ II). Pour ce faire, nous avons réalisé un banc d'essais muni d'un plan porte objet à angle α d'inclinaison variable à volonté ($0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$), en vue de mener les tests sur l'effet de la déclinaison de la surface de la silicone sur son hydrophobicité. Ces essais sont réalisés pour quatre tailles des gouttes d'eau (0,1 ml à 0,4 ml), deux distributions en surface des gouttelettes d'eau (linéaire et en zigzag) et deux conductivités de la solution d'eau (5 ms et 0,2 ms). Cette expérimentation est effectuée sur des échantillons de silicone présentant différents états de surface ; soit vierge, vieilli électriquement à sec sous une contrainte de tension alternative (50 Hz) croissante et vieilli électriquement (AC 50 Hz) sous pollution humide de conductivité 5 ms et 0,2 ms.

Pour voir les effets que pourrait avoir la déclinaison de la surface du matériau silicone sur son indice d'hydrophobicité, en l'occurrence sa morphologie et ses performances électriques, thermiques, et physiques, relativement à son état vierge, sous l'effet des paramètres d'influence : le vieillissement électrique, la pollution, la taille et la distribution des gouttes d'eau, une série de mesures physiques, électriques et d'analyses chimiques et thermiques sont réalisées.

Les essais de vieillissement électriques accélérés effectués sur des échantillons de silicone sont réalisés au laboratoire de Haute Tension, et les analyses chimiques sont réalisées au laboratoire de Génie des procédés de l'Université A. MIRA, Bejaia.

III.2 Le matériau silicone

La silicone trouve divers domaines d'application industrielle, elle est utilisée comme isolant électrique dans les machines, isolateurs des lignes de hautes et moyennes tensions, dans certains appareils électriques, comme on la retrouve dans les domaines de la médecine, de l'automobile, de l'aéronautique, et bien d'autres ; ceci en raison de ses caractéristiques physiques, électriques, thermiques et chimiques exceptionnelles.

Dans le cadre de ce travail, nous portons un intérêt particulier à la silicone utilisée pour le revêtement des chaînes d'isolateurs en haute tension. Le matériau silicone étudié est une plaque de silicone solide, de nature souple (caoutchouteux), de dimension 160*80*6mm³ (figure III.1).



Figure III- 1 Photographie de la plaque de la silicone solide étudié

Afin de mener à bien cette étude expérimentale qui a pour but d'analyser la perte partielle et totale de l'hydrophobicité de l'isolation en silicone en fonction de la déclinaison de la surface de l'isolation, sous l'effet des paramètres d'influence cités précédemment, nous avons réservé trois plaques de silicone ci-dessus présentées.

Avant d'entreprendre tout essai physique ou électrique, une série de mesures de caractérisation physico-chimique est entreprise sur la première plaque de silicone à l'état vierge. Les résultats de ces mesures, qui seront présentés ultérieurement, feront l'objet de valeurs de référence.

La deuxième plaque de silicone est d'abord vieillie électriquement à l'état propre (sec), en lui faisant subir une série de décharges en surface (AC 50 Hz), avant d'entreprendre la même série de mesures de caractérisation physico-chimique que précédemment.

La troisième plaque de silicone, quant à elle, est divisée en plusieurs compartiments, où chacun est d'abord vieilli sous une pollution humide conductrice, en lui faisant subir une série de décharges en surface (AC 50 Hz). Chaque compartiment est relatif à une conductivité de la solution polluante, une taille des gouttelettes d'eau polluante, une distribution des gouttelettes d'eau sur la surface de la plaque. Nous avons testé deux conductivités de la solution polluante, deux tailles des gouttelettes d'eau polluante et deux distributions des gouttelettes d'eau sur la surface de la plaque, ceci avant d'entreprendre la même série de mesures de caractérisation physico-chimique que précédemment.

Pour chacun des cas correspondant à un état de surface du matériau silicone (vierge, vieilli propre et vieilli pollué avec une solution conductrice sous tension alternative), il est question de mesurer l'angle de contact θ de la goutte d'eau déposée sur le matériau pour différentes

déclinaisons de la plaque en silicone. Cette opération est répétée pour les deux tailles de la goutte d'eau, les deux conductivités considérées et les deux distributions des gouttes, et par la même déterminer l'indice d'hydrophobicité (IH) pour chaque cas étudié.

Afin de protéger nos échantillons de silicone contre l'humidité, nous procédons avant chaque série d'essais, à leur nettoyage à l'alcool, avant de les placer dans un dessiccateur. Ce dernier est constitué d'une cuve circulaire surmontée d'un couvercle, l'ensemble est en verre épais ou en polycarbonate (figure III.1.a). Au préalable, une quantité suffisante de dessicatif (Silicagel) souvent bleu (présence d'indicateur coloré) est déposée au fond de l'appareil, surmonté d'un disque perforé. Lorsque le dessicatif change de couleur (virant souvent au rose), il faut le régénérer par étuvage (figure III.1.b).



Figure III- 2 Photographies a) : déshumidification de la silicone dans le dessiccateur en ver
b) : Gel de silice (Silicagel)

III.3 L'objet d'essais

En vue de mener les tests sur l'effet de la déclinaison de la surface de la silicone sur son hydrophobicité, nous avons confectionné un banc d'essais qui permet de faire des mesures de l'angle de contact θ de la goutte d'eau déposée sur la plaque de silicone en fonction de la déclinaison de cette dernière. Le banc d'essais, en bois verni, est muni d'un plan porte objet (où sera posée la plaque de silicone), dont l'angle d'inclinaison α est variable à volonté.

La figure ci-après (III.3) illustre un ensemble de photographies du banc d'essai prises sous plusieurs angles de vue. Il est constitué d'une armature (1) supportant un plan amovible rotatif (2), offrant des angles d'inclinaison α (3) réglables à volonté, et allant de 0° à 180° par rapport à l'horizontale. L'angle α d'inclinaison du plan est ajustable par réglage de la longueur d'une

tige support (4), et l'angle α est directement lu sur un rapporteur (5) fixé sur l'armature à la position horizontal 0° .



Figure III- 3 Différentes vues du banc d'essai de mesure de l'angle de contact θ .

a) : $\alpha=0^\circ$, b) : $\alpha=30^\circ$, c) : $\alpha=90^\circ$ et d) : $\alpha=180^\circ$

(1): armature, (2): plan rotatif, (3): angles d'inclinaison α , (4): tige support, (5): rapporteur

L'échantillon de silicone (6) de dimensions $(16 \times 8 \times 0,6) \text{ cm}^3$ est posé sur une plaque en plexiglas (7) et fixé par une raille en plexiglas (8), le tout étant fixé sur le plan amovible (1). Pour réaliser les essais de vieillissement électrique, deux électrodes (9) de forme parallélépipédique en cuivre et de taille $(8 \times 1,5 \times 0,5) \text{ cm}^3$ arrondies aux extrémités afin d'éviter l'effet de bords sont déposées sur la plaque en silicone, distante l'une de l'autre d'une distance d . Une des deux électrodes est portée à la Haute Tension et l'autre est mise à la terre. La figure (III.4) montre une photographie de l'objet d'essai.

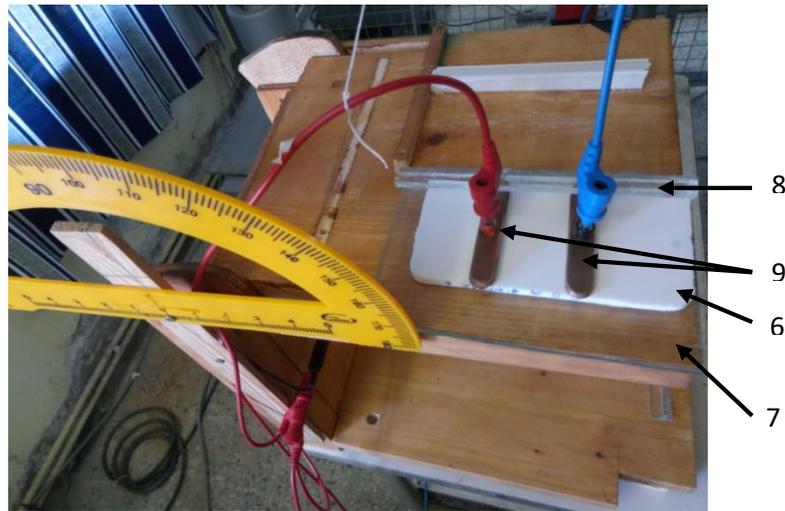


Figure III- 4 Objet d'essai.

(6): échantillon de silicone, (7): plaque en plexiglas, (8): raille en plexiglas, (9): électrodes

III. 4 Techniques expérimentales

Plusieurs techniques rivalisent en termes de facilités que de résultats.

III.4.1 Mode opératoire : angles de déclinaison α et de contact θ

Pour analyser la perte partielle et totale de l'hydrophobicité de l'isolation en silicone en fonction de la déclinaison de la surface de l'isolation, nous avons adopté le mode opératoire décrit ci-après. Avant tout essai, nous avons procédé à la caractérisation physico-chimique du matériau silicone vierge, en réalisons des mesures électriques de la rigidité diélectrique E_d , du facteur de perte $\text{tg}\delta$, de la capacité C_x , de la permittivité ϵ_r , de la résistance R_t et la résistivité ρ_t transversales et de la résistance R_s et la résistivité ρ_s longitudinale. Ensuite une série d'analyses chimiques : FTIR, ATG/DTG, DRX et microscope optique est réalisée. Les résultats obtenus, qui seront présentés ultérieurement, font guise de référence.

1- La plaque de silicone est fixée sur la raille du banc d'essai.

2- Le plan porte-objet rotatif est réglé à la position désirée en fixant l'angle d'inclinaison α (lu sur le rapporteur).

3- A l'aide d'une seringue graduée au dixième de millilitre, nous déposons sur la surface de l'échantillon de silicone des rangés de gouttelettes d'eau de même taille et de même conductivité.

Nos tests sont réalisés pour :

- ✓ les angles d'inclinaison $\alpha=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$ et 180° ;
- ✓ deux distributions des gouttelettes d'eau : linéaire et en zigzag ;
- ✓ deux conductivités de la solution d'eau $\sigma= 5\text{mS}$ et $\sigma=0,2\text{mS}$;
- ✓ Quatre tailles des gouttes d'eau : 0,1ml à 0.4 ml ;
- ✓ Quatre états de surface de la plaque de silicone : vierge, vieilli électriquement à sec sous une contrainte de tension alternative (50 Hz) croissante et vieilli électriquement (AC 50 Hz) sous pollution humide de conductivité 5 ms et 0.2ms.

4- Une photographie de la goutte d'eau est prise au moyen d'un appareil photo numérique muni d'une lunette grossissante et offrant une grande résolution d'image.

5- L'image nette de la gouttelette d'eau est visionnée sur un écran PC et l'image est ensuite traitée pour déterminer l'angle de contact θ et l'indice d'hydrophobicité du matériau analysé (chap. II, § II.2.1.2.c, Tab. II.1).

6- Pour obtenir une meilleure qualité d'image, nous avons utilisé une eau distillée colorée avec un bleu de méthyle.

7- Enfin, les échantillons de silicone vieillis à sec et sous pollution humide conductrice seront, à leur tour, caractérisés en réalisant les mêmes mesures électriques et analyses chimiques qu'au point 0 ci-dessus.

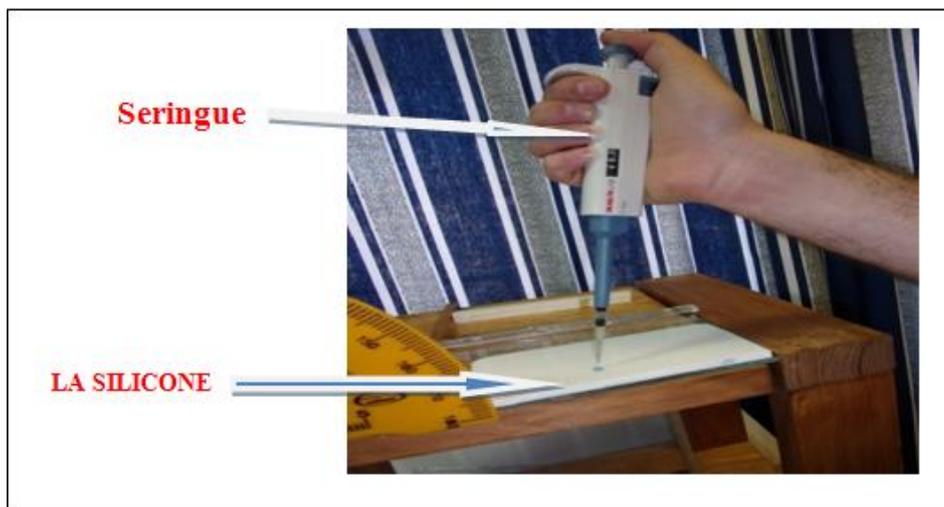


Figure III- 5 Technique de pose de la goutte d'eau sur la plaque de silicone solide

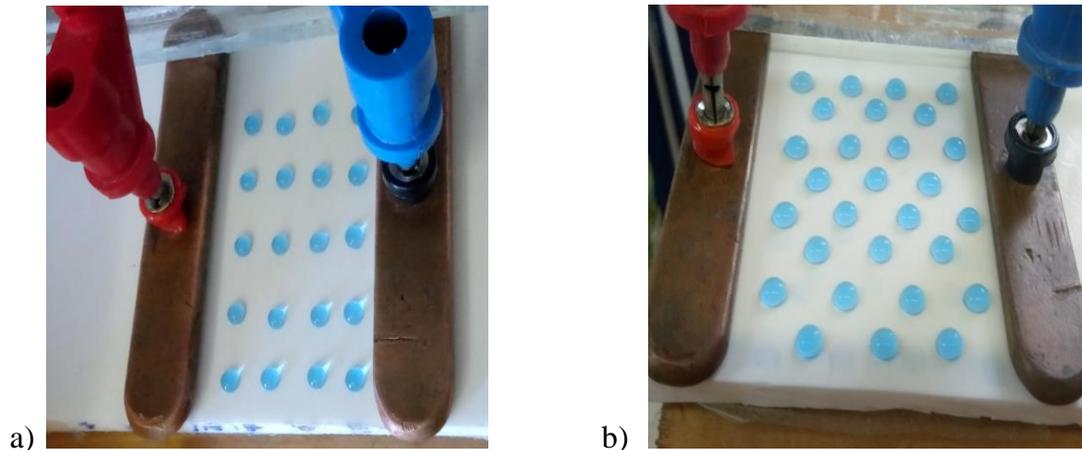


Figure III- 6 : photographies de l'objet d'essai avec une distribution des gouttes d'eau

a) : linéaire, b) : en zigzag

III.4.2 Essais de vieillissement électrique

Les essais de vieillissement électriques accélérés sur des échantillons de silicone sont réalisés dans le but de simuler un cas de contournement par une décharge électrique d'un système d'isolateur en Silicone sous contrainte de champ électrique.

Ces essais consistent à appliquer sur la surface de l'échantillon considéré, entre deux électrodes planes en cuivre distantes de d (cm), une rampe de tension alternative 50 Hz, de vitesse constante 2 kV/s jusqu'au claquage. Pour simuler ce vieillissement électrique accéléré, nous avons fait subir à l'échantillon, une série de 350 claquages superficiels, et ce dans le cas de trois états de leurs surfaces : sec, pollué avec une solution de conductivité électrique $\sigma = 5 \text{ ms}$ et pollué avec une solution de conductivité électrique $\sigma = 0.2 \text{ ms}$. Dans le cas de ces deux derniers cas (Surface polluée à $\sigma = 5 \text{ ms}$ et $\sigma = 0.2 \text{ ms}$), les gouttes de pollution conductrice sont appliquées sur la surface de l'échantillon en adoptant deux distributions (linéaire et en Zigzag) et en déposant des gouttes de tailles 0.1ml ou 0.4ml, de conductivité $\sigma = 5 \text{ ms}$ ou $\sigma = 0.2 \text{ ms}$. Chaque compartiment de surface de 1 cm de long correspond à un ensemble (taille, conductivité, distribution) codé numériquement en (XYZ) où :

X=1, 2, 3 et 4 pour un volume de 0.1, 0.2, 0.3 et 0.4 ml de la goutte,

Y=3 pour $\sigma=0.2 \text{ ms}$ et Y=4 pour $\sigma=5 \text{ ms}$,

Z=5 pour une distribution linéaire et Z=6 pour une distribution en zigzag des gouttes.

La solution polluante, composée d'un mélange d'eau distillée et de chlorure de sodium (Na Cl) avec du bleu de méthyle est préparée selon la conductivité désirée que nous contrôlons au moyen d'un conductimètre, comme illustré ci-après (figure III.6).

Après la rupture, nous relevons la valeur de la tension de claquage (contournement), le temps et le chemin emprunté par la décharge. Vu que la décharge est initiée de manière aléatoire sur la surface de l'échantillon, nous relevons les zones touchées par dix passages de la décharge.

Tous les essais sont réalisés de manière successive de sorte à conserver les mêmes conditions climatiques de laboratoire, soit une température ambiante $T = 20^{\circ}\text{C}$, une pression $P = 1007\text{ hPa}$ et une humidité $H = 63\%$.

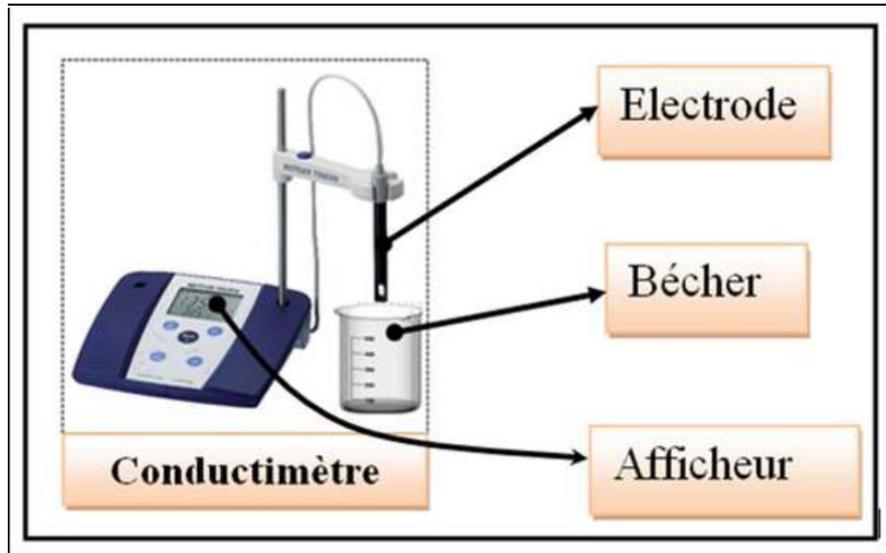


Figure III- 7 Photographie du conductimètre.

La figure suivante (III.8) illustre le dispositif expérimental utilisé pour le vieillissement accéléré du matériau et la mesure de la tension de claquage sous tension alternative. Le dispositif est constitué des éléments suivants :

- Un transformateur HT (T100) 0.8/135 kV pouvant délivrer une tension allant de 0 à 100 kV pour des essais en alternatif et de 0 à 135 kV en tension continue ;
- Un appareil de commande automatique et manuelle de tension SG, à vitesse de montée variable ;
- Un diviseur de tension capacitif ($C_0 = 0.1\ \mu\text{F}$ et $C_u = 41.4\ \mu\text{F}$) pour les mesures en tension alternative ;
- Un voltmètre de crête AC/DC de type MU11, à affichage digital permettant, selon le montage électrique, la mesure des hautes tensions alternatives ou continues ;
- Une résistance de protection $R = 106\ \text{k}\Omega$ limitant le courant ;
- Une table servant de support à l'objet d'essai (ensemble échantillons et électrodes) ;

- Enfin, l'ensemble dispositif HT et échantillon est entouré par une cage de protection.

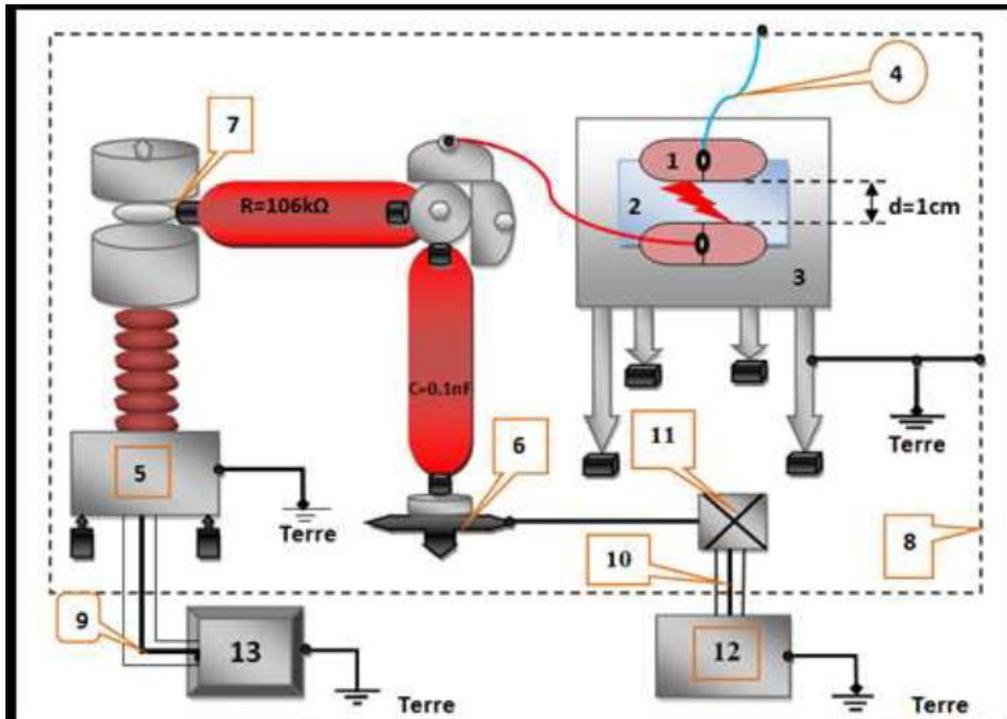


Figure III- 8 : Dispositif expérimental de vieillissement électrique et de mesure de la tension de claquage.

1 : Électrode en cuivre. 2 : Matériaux solide (silicone). 3 : Table. 4 : Fil conducteur. 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.



a) Transformateur haute tension T100



a) Résistance de protection



c) : Diviseur de tension capacitif



d) : Voltmètre de crête MU11



e) : appareil de commande automatique et manuelle de la tension

Figure III- 9 : Photos des éléments du dispositif d'essais et de mesure de la haute tension du laboratoire HT G.E. Université de Béjaia.

Notre objet d'essai est constitué de l'échantillon de silicone et de la paire d'électrodes en cuivre. La figure (III.10) montre une photo de l'objet d'essai pour une surface non polluée de la silicone avant le passage de la décharge.

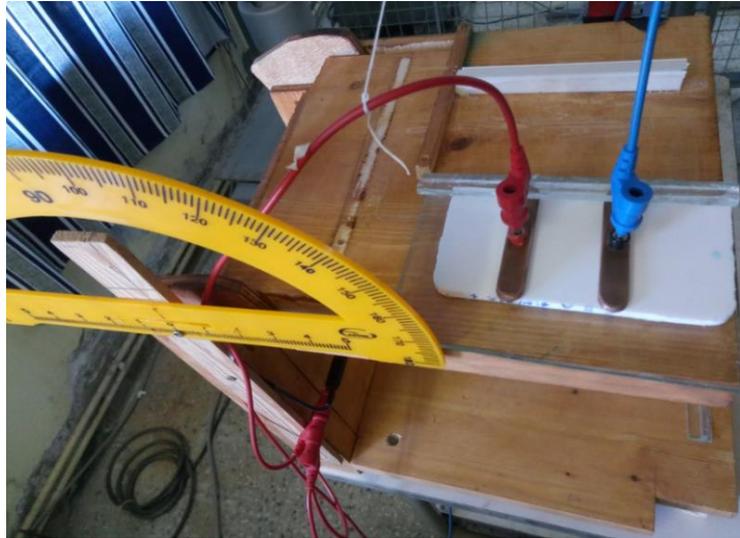


Figure III- 10 Objets d'essai.

La figure qu'on va voir (III.11) montre deux photos de l'objet d'essai pour une surface polluée de la silicone avant et pendant le passage de la décharge.

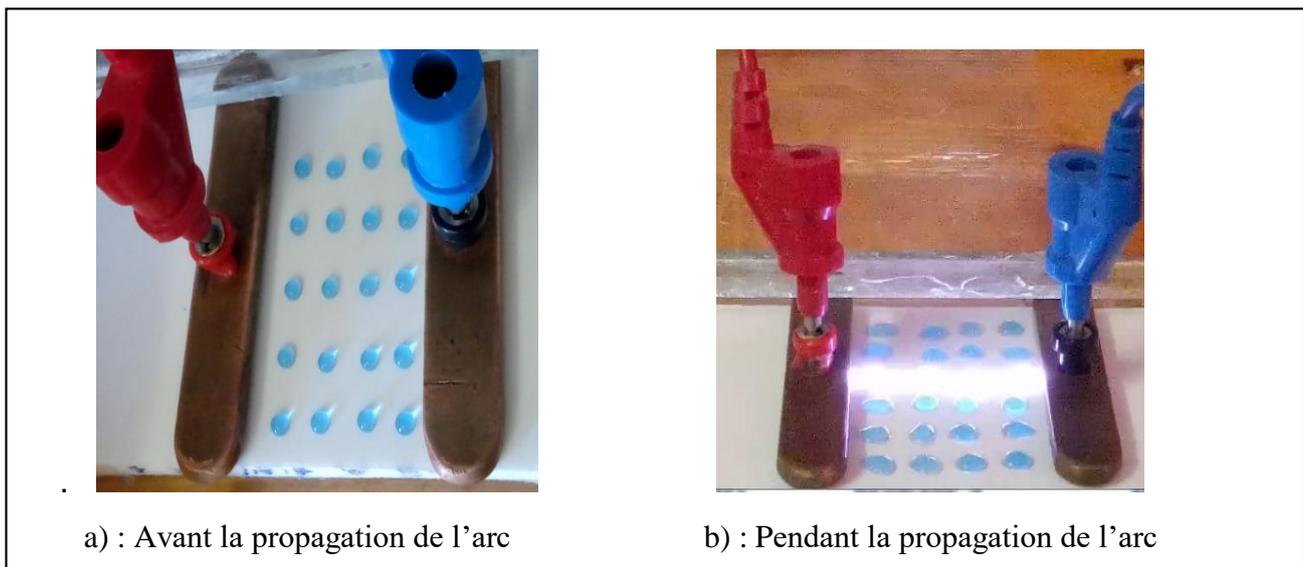


Figure III- 11 : Photo de la surface polluée de la silicone avant et pendant le passage de la décharge.

III.4.3 Les mesures électriques

Pour voir l'effet de ce vieillissement électrique sur le matériau silicone, nous avons procédé, avant et après vieillissement, à la mesure de quelques grandeurs électriques à savoir :

- résistance transversale R_t ;

- résistivité transversale ρ_t ;
- résistance superficielle R_s ;
- résistivité superficielle ρ_s ;
- rigidité diélectrique longitudinale E_1 ;
- capacité C_x ;
- permittivité ϵ_r ;
- facteur de perte $tg\delta$.

III.4.3.1 Mesure de la capacité C_x et du facteur de perte $tg\delta$

Le facteur de pertes $tg\delta$ et la capacité C_x sont déterminés avant et après vieillissement de l'échantillon de silicone pour tous les cas envisagés de la surface de l'échantillon de silicone (vierge, vieilli à sec et vieilli sous pollution humide de conductivité électrique $\sigma = 5 \text{ ms } \sigma = 0:2 \text{ ms}$. C_x et $tg\delta$ sont mesurés sous une tension électrique appliquée $V = 100 \text{ V}$ et une fréquence $f = 50 \text{ Hz}$. La permittivité ϵ_r et l'indice de perte $\epsilon_r \cdot tg\delta$ du matériau sont alors déterminés.

III.4.3.2 Mesure de la résistance

a- Mesure de la résistance transversale : la résistance transversale R_t du matériau est déterminée par la pente de la caractéristique $V(I_t)$, établie selon la méthode de mesure illustrée par la Figure (1.21). La résistivité transversale est alors calculée par l'équation (1.18). Ces mesures sont réalisées avant et après vieillissements des échantillons.

b- Mesure de la résistance superficielle : la résistance superficielle R_s du matériau est déterminée par la pente de la caractéristique $V(I_s)$ établie selon la méthode de mesure illustrée par la Figure (1.23). La résistivité superficielle est alors calculée par l'équation (1.21). Ces mesures sont réalisées avant et après vieillissements des échantillons. La figure *infra* (III.12) illustre une photo du dispositif expérimental de mesure de R_t et R_s

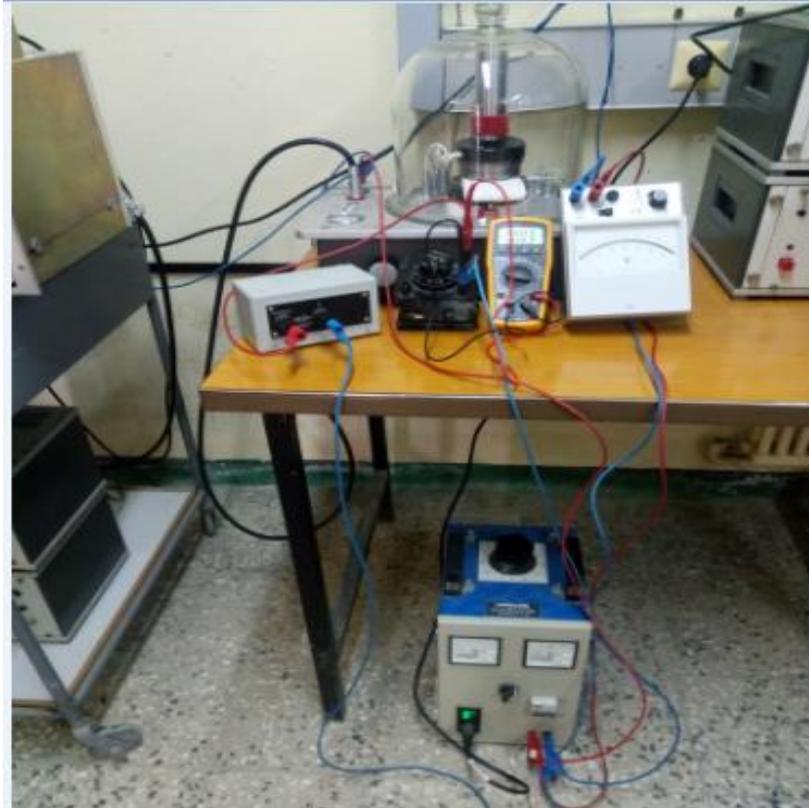


Figure III- 12 : Photo du dispositif de mesure des résistances R_t et R_s .

III.4.4 Analyses chimiques

III.4.4.1 L'analyse FTIR mode ATR

La réflectance totale atténuée est une technique en spectroscopie infrarouge, ou plus précisément spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR), permettant de déterminer les liaisons chimiques d'un échantillon. Elle est basée sur le principe optique de la réflectance, phénomène optique bien connu, cette méthode ne nécessite que très peu de préparation de l'échantillon, et permet d'analyser aussi bien les liquides que les solides.

1- Préparation de l'échantillon : des pastilles translucides carrées de dimension 1cm de côté et 1mm d'épaisseur sont découpés de l'échantillon vierge de référence et des zones de l'échantillon vieilli (à sec et sous pollution conductrice de 5 ms et 0,2 ms respectivement) où la décharge est passée 10 fois, afin de réaliser l'analyse FTIR, pour ce faire nous avons utilisé un cutter à lame fine.

2- principe de mesure : l'analyse FTIR – ATR est réalisée sur les pastilles minces, au moyen d'un spectrophotomètre IR affinity-1, dont la gamme spectrale est comprise dans l'intervalle $[400 \text{ cm}^{-1} ; 4000 \text{ cm}^{-1}]$. Le traitement des spectres obtenus est réalisé à l'aide du logiciel panorama trial version. La figure (III.13) représente le spectrophotomètre IR affinity-1 et le mode ATR.



Figure III- 13 : Photo du spectrophotomètre IR affinity-1 et le mode ATR.

La pastille est soumise à un rayonnement électromagnétique dans la gamme des longueurs d'onde du centre infrarouge ($2.5\mu\text{m} < \lambda < 50\mu\text{m}$). Sous l'action de la radiation lumineuse, une molécule peut passer d'un état d'énergie $E1$ vers un état d'énergie supérieure $E2$. Lorsque la fréquence du champ électrique induit par l'onde électromagnétique coïncide avec la fréquence de vibration d'un mode propre de la molécule, l'interaction créée engendre la vibration de certaines liaisons et l'absorption de l'énergie de l'onde excitatrice correspondante. La position des bandes d'absorption dépend, en particulier, de la différence d'électronégativité des atomes, de leur masse et de l'environnement proche du groupement considéré. Par conséquent, à un matériau de composition chimique et de structure donnée va correspondre un ensemble de bandes d'absorption caractéristiques permettant d'identifier le matériau. La figure (III.14) illustre le principe de la mesure.

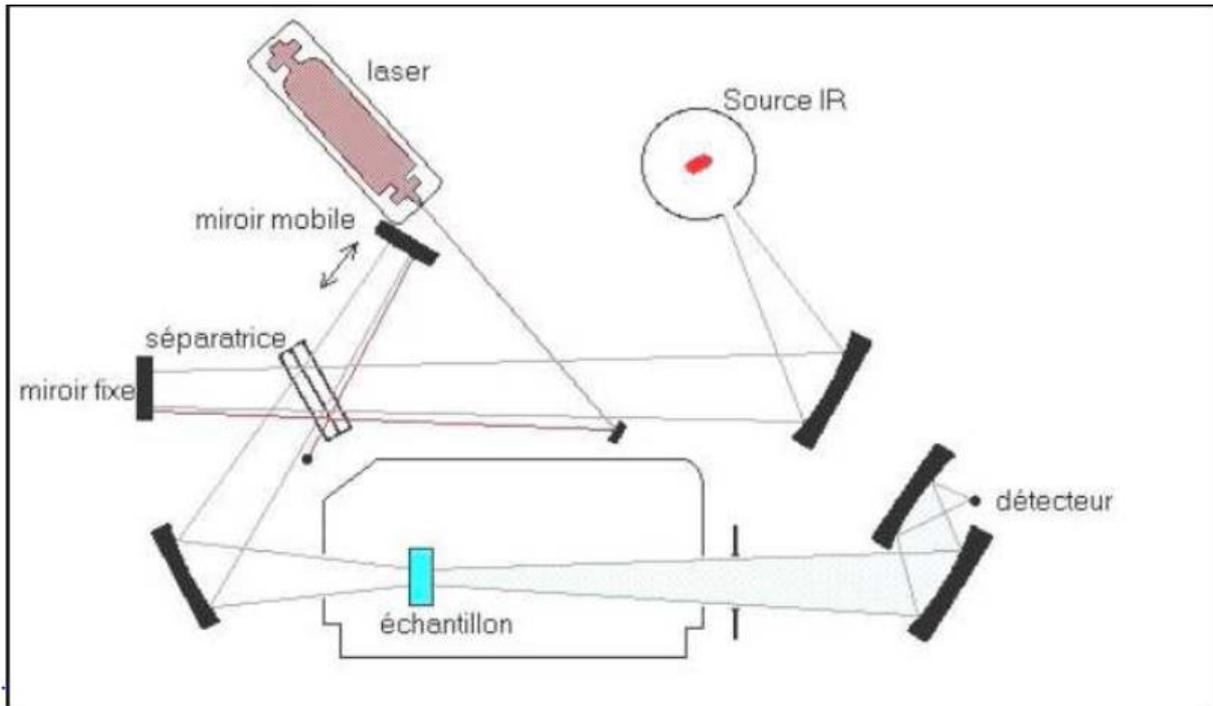


Figure III- 14 : Représentation schématique du principe de la spectroscopie IR.

III.4.4.2 Analyses thermiques (AT)

Les analyses thermiques (ATD et ATG) sont réalisées afin qu'elles puissent nous fournir des informations concernant la stabilité thermique des matériaux et les changements d'enthalpies pendant la décomposition thermique ou pendant les changements de phase. Leurs techniques respectives sont résumées dans le tableau III. 1.

Tableau III .1 – Les techniques d'analyse thermique.

Technique	Paramètre mesuré	Instrument utilisé
Thermogravimétrie (ATG)	Masse	Thermo balance
Analyse Thermique Différentielle (ATD)	Différence de températures	Appareil DTA

Des éprouvettes de la dimension des creusets utilisés, sont découpées de l'échantillon vierge de référence et des zones de l'échantillon vieilli (à sec et sous pollution conductrice de 5 ms et 0.2 ms respectivement) ou la décharge est passée 10 fois.

1- L'appareillage (ATD/ATG)

Figure III-15. Photo de l'appareil PT 1600 STA et ses éléments.

2- Principe de fonctionnement de l'ATG : l'ATG est une technique mesurant la variation de masse d'un échantillon lorsqu'il est soumis à une augmentation de la température, sous atmosphère contrôlée. Cela consiste à déterminer la perte de masse lors de la fusion, de la déshydratation, du séchage et de la décomposition. Cette variation de masse peut-être sous forme d'une perte de masse (émission de vapeurs) ou un gain de masse (fixation de gaz). La manière d'enregistrement des variations de la masse consiste à maintenir le fléau de la micro balance de l'appareil en position horizontale et mesurer la force nécessaire à cela. L'équilibre entre l'ensemble suspente-échantillon et le contreponds est assuré par un électroaimant. Le courant nécessaire pour le maintien de l'équilibre est traduit en mesure de masse (Figure III.15). La figure suivante (III.16) illustre l'appareil et ses différents organes principaux, utilisé pour l'analyse thermique de nos échantillons.

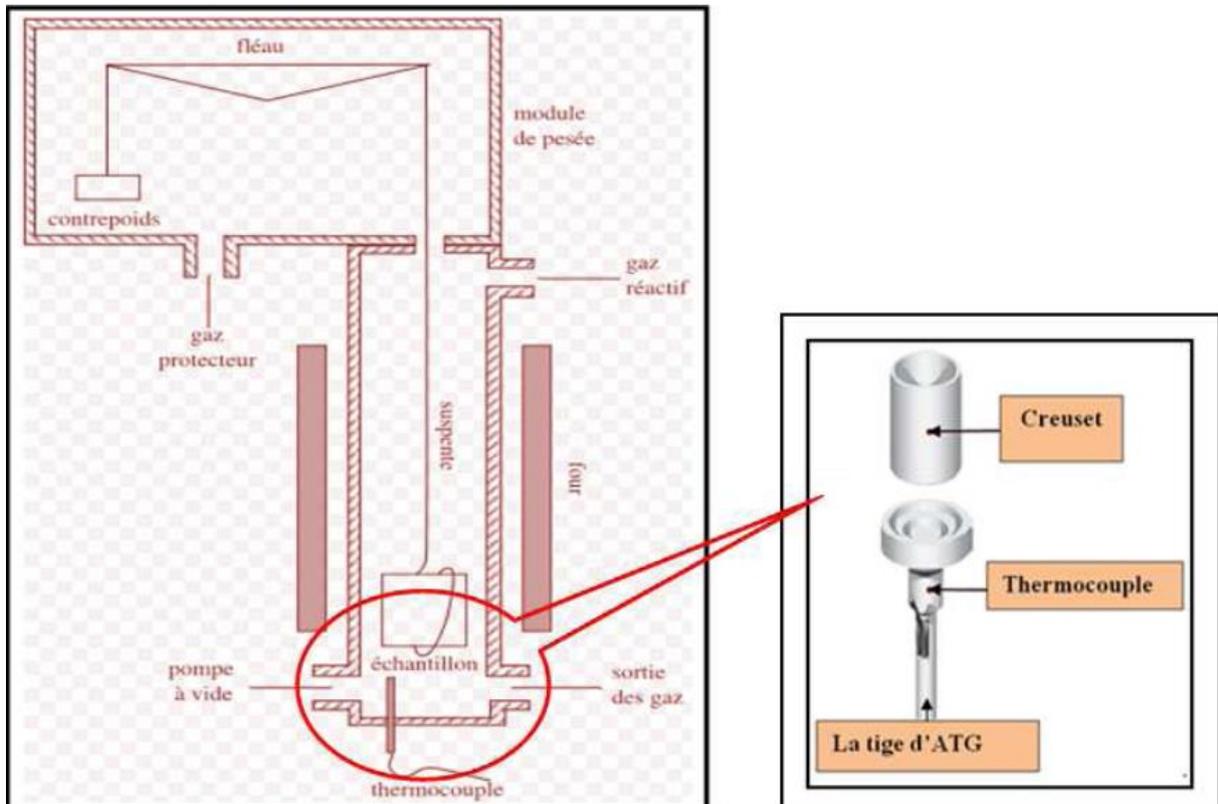


Figure III.16- Représentation schématique d'une ATG (type Setaram TG-DTA 92 B).

3- Principe de fonctionnement de l'ATD : l'ATD est une technique mesurant la différence de température entre un échantillon et une référence matériau inerte thermiquement en fonction du temps ou de la température lorsqu'ils sont soumis à une augmentation de température, sous atmosphère contrôlée. La figure (III.17) illustre la cellule expérimentale utilisée.

Type d'Analyse :

- Détermination des températures de décomposition ;
- Evolution des matériaux soumis à une élévation de température ;
- Détermination des températures de transformation de phases des matériaux.

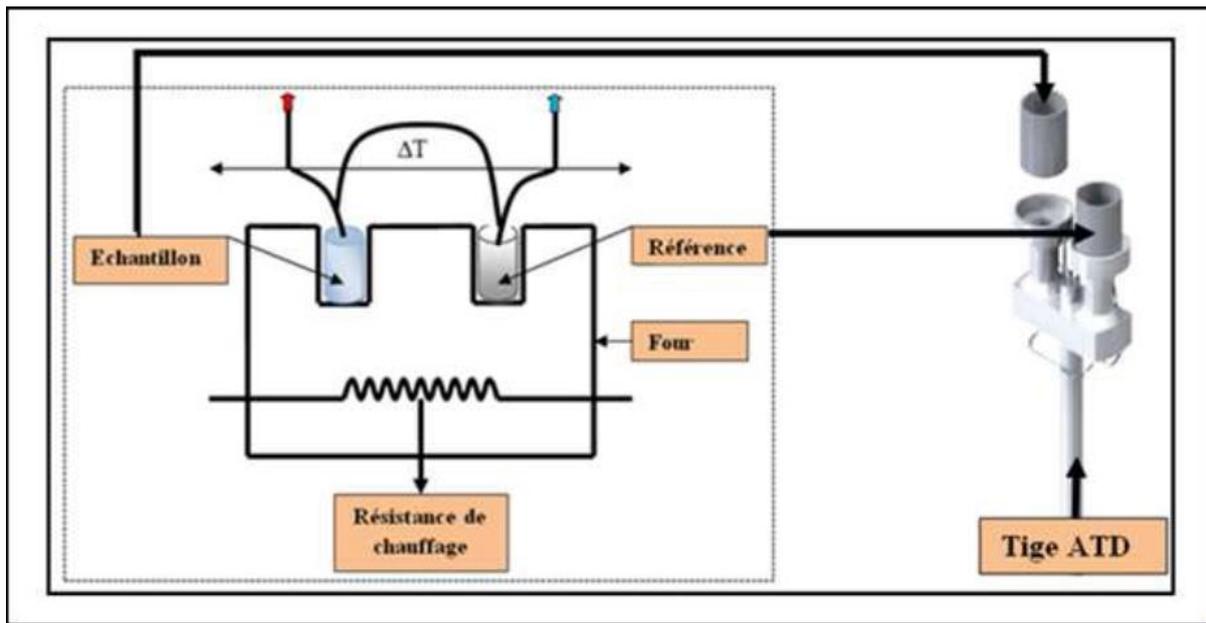


Figure III.17- Cellule de mesure de l'ATD.

III.4.4.3 Diffraction des rayons X (DRX)

La diffraction des rayons X permet d'identifier les phases cristallines présentes dans les matériaux analysés et offre la possibilité d'établir leur composition chimique. Aussi permet-elle d'évaluer leur degré de cristallinité et de mettre en évidence la morphologie des cristallites qui les constituent. Elle donne de même la possibilité d'estimer les dimensions de ces cristallites. La figure ci-après (III.18) illustre le schéma de principe d'un diffractomètre de poudre. Un faisceau de rayons X monochromatique incident est diffracté par l'échantillon à certains angles spécifiques, suivant la loi de Bragg.

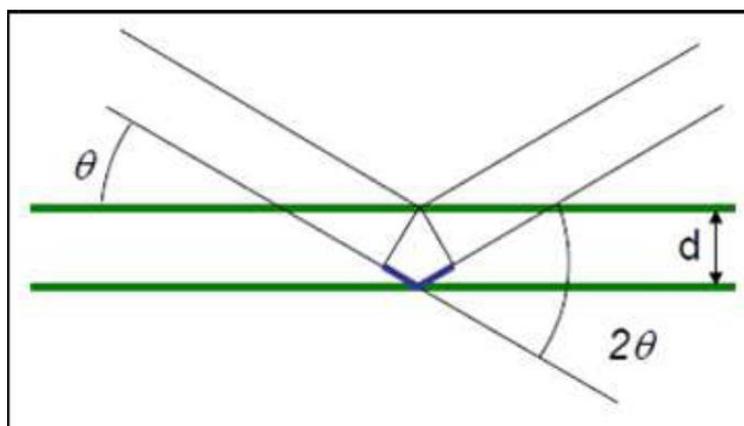


Figure III.18- Schéma de principe de loi de Bragg.

$$2d_{hkl} \cdot \sin \theta = n \cdot \lambda \quad (\text{III.1})$$

- d : Distance inter réticulaire, c'est -à -dire distance séparant deux plans consécutifs ;
- θ : Angle de diffraction des rayons X sur la surface du matériau étudié ;
- n : Ordre de la réflexion ;
- λ : Longueur d'onde du faisceau de rayons X.

L'enregistrement du signal par un détecteur adapté permet de visualiser les angles et les intensités des pics de diffraction obtenus. L'indexation de ces pics est réalisée à l'aide de bases de données spécifiques permettant l'identification du (ou des) composé(s) en présence. L'analyse radio cristallographique a été effectuée à température ambiante sur un diffractomètre de poudre de marque Bruker AXS; D8 ADVANCE, fonctionnant avec une tension de 40 kV et une intensité de 40 mA. L'analyse est effectuée grâce aux rayonnements $K\alpha$ d'une anti cathode de cuivre ($K\alpha = 1.54060$). Du silicium de très haute pureté est utilisé comme étalon interne. Les spectres RX ont été enregistrés en 2θ entre 20 et 80°. Les films de silicone de dimension (16x8) mm^2 sont exposés à un faisceau de rayons X dont l'intensité est mesurée au moyen d'un détecteur rotatif directionnel.

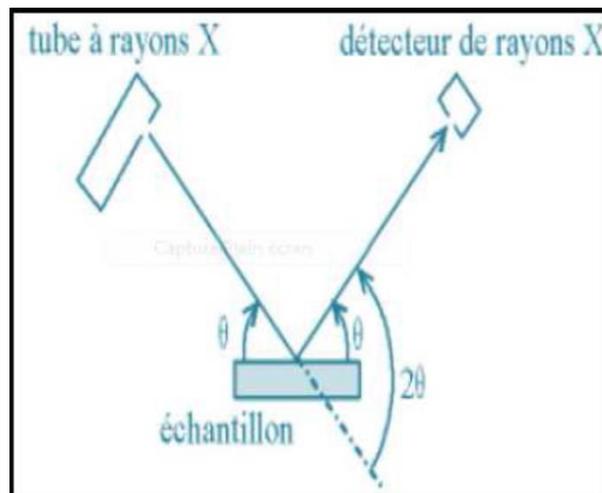


Figure III.19- Principe d'un diffractomètre de poudre.

La taille des grains a été calculée en utilisant la formule de Debye-Sherrer.

$$D = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (\text{III.2})$$

- D : désigne la taille des cristallites en \AA ;
- λ : largeur à mi-hauteur exprimée en radian ;
- θ : position du pic de diffraction considéré.

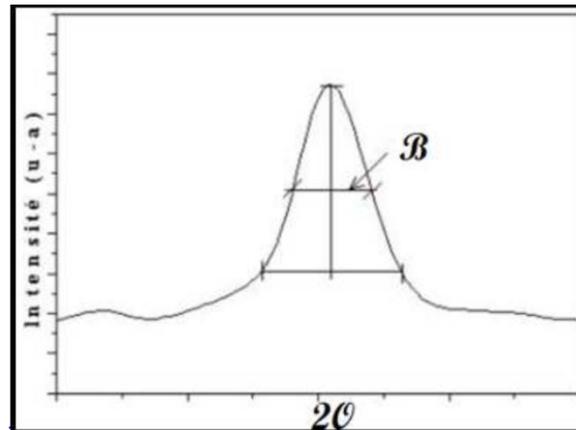


Figure III- 20 Détermination de la largeur à mi-hauteur (β) à partir d'une courbe de diffraction des rayons X.

III.4.4.5 Le microscope optique

La microscopie est un ensemble de techniques permettant d'obtenir une image des structures à l'échelle microscopique. Le principe est dans tous les cas le même : une onde est envoyée sur la préparation ou émise par la préparation. Cette onde est captée par un objectif qui la concentre et passe par un oculaire qui crée une image observable. Cette image est soit observée à l'œil nu, soit photographiée, soit enregistrée par caméra CCD et stockée sur ordinateur pour retraitement. La figure qui suit (III.21) représente le microscope optique.

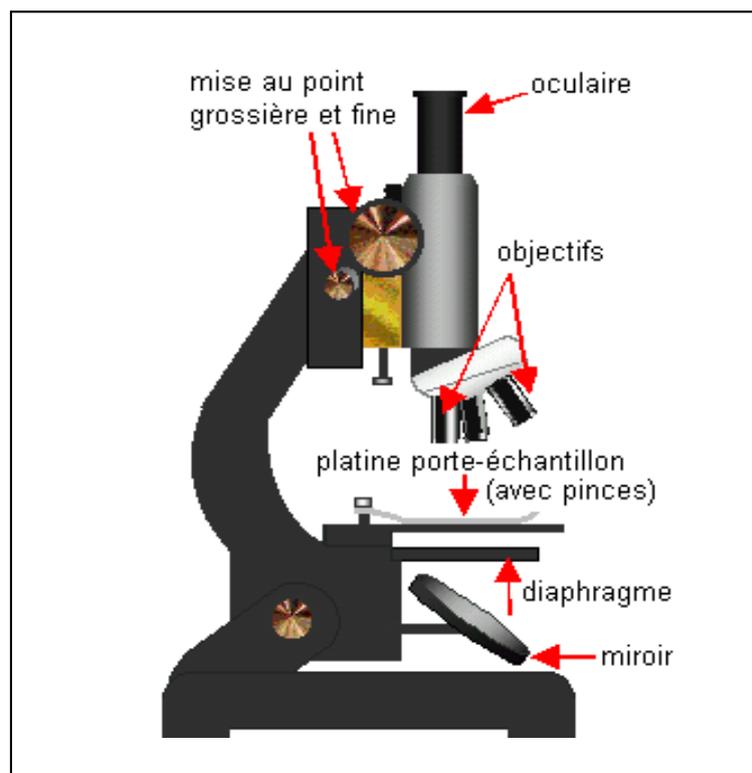


Figure. III.21 – Schéma d'un microscope.

III. 5 Conclusion

En vue d'avoir une meilleure approche possible du comportement de la silicone vis-à-vis de sa perte totale ou partielle de son hydrophobicité sous l'effet des paramètres d'influence étudiés, des techniques de mesures sont utilisées et présentées dans ce chapitre. Ces dernières nous ont permis de réaliser la caractérisation physico-chimique de la silicone, dont les résultats intéressants obtenus seront présentés dans le chapitre IV suivant.

Chapitre IV :
Présentation et discussions
des résultats

IV.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation et l'interprétation des résultats obtenus des différents essais physique (angles de contact, indice d'hydrophobicité), électriques (Rigidité diélectrique, pertes diélectrique,...) et des analyses chimiques (IR, ATG, DTG, DRX et microscope optique) menés dans les divers laboratoires des universités algériennes, soient : les laboratoires de Génie électrique et Génie des Procédés dès l'université A. Mira, Bejaia et Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou. Les résultats de ces analyses ont formés une banque de données importante qui nous a permis de faire le point sur le comportement de la silicone vis-à-vis de sa perte totale ou partielle de son hydrophobicité en fonction de sa déclinaison sous l'effet des paramètres d'influence étudiés, ainsi que de caractériser et d'évaluer le comportement électrique, chimique et thermique de la silicone avant et après vieillissement sous la contrainte électrique et/ou de pollution conductrice humide. Des conclusions intéressantes sont tirées des résultats de cette étude que nous présentons ci-dessous.

IV.2 Mesure de l'angle de contact de la goutte d'eau et de l'indice d'hydrophobicité de la surface de la plaque de silicone

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 (IH).

Dans notre étude, l'angle de contact θ de la goutte d'eau est déterminé pour différentes déclinaisons de la surface de la plaque de silicone, sous l'effet des paramètres d'influence mis en jeu, à savoir : le volume des gouttes, leurs conductivités et leurs distributions sur la surface de contact. Pour une meilleure gestion des variantes étudiées, nous avons adopté le code (XYZ) défini ci-après.

X=1, 2, 3 et 4 pour un volume de 0.1, 0.2, 0.3 et 0.4 ml de la goutte,

Y=3 pour $\sigma=0.2$ mS et Y=4 pour $\sigma=5$ mS,

Z=5 pour une distribution linéaire et Z=6 pour une distribution en zigzag des gouttes.

Moyennement un appareil photo numérique de précision, nous avons réalisé des prises de photos des gouttes d'eau posées sur la plaque de silicone, et ces dernières sont alors traitées en utilisant le logiciel IMAGE J pour mesurer l'angle de contact θ , dans un premier temps, et

déterminer par la suite l'indice d'hydrophobicité de cette surface défini dans le tableau (II.1) du (§ II.2.1.2.c), et ce pour les différentes variantes considérées.

Les tableaux IV.1, IV 2 , IV.3 et IV.4 résument les résultats de la mesure de l'angle de contact θ en fonction de l'angle de déclinaison α de la surface de l'échantillon de silicone, pour les différents paramètres mis en jeu et pour les trois états de la surface de la silicone considérés, soit vierge, vieillie à l'état propre et vieillie sous pollution respectivement.

Tableau VI.1. Angle de contact θ en fonction de l'angle de déclinaison α de la surface de l'échantillon de silicone, pour les différents paramètres mis en jeu dans le cas de l'état vierge de la surface de la silicone.

Angle α XYZ	0°		30°		60°		90°		120°	
	θ	HI	θ	HI	θ	HI	θ	HI	θ	HI
135	109	1	134	1	140	1	147	1	150	1
136	109	1	134	1	140	1	147	1	150	1
235	105	1	140	1	145	1	La goutte glisse		La goutte glisse	
236	105	1	140	1	145	1	La goutte glisse		La goutte glisse	
335	102	1	143	1	La goutte glisse		La goutte glisse		La goutte glisse	
336	102	1	143	1	La goutte glisse		La goutte glisse		La goutte glisse	
435	98	1	145	1	La goutte glisse		La goutte glisse		La goutte glisse	
436	98	1	145	1	La goutte glisse		La goutte glisse		La goutte glisse	
145	105	1	108	1	140	1	147	1	149	1
146	105	1	108	1	140	1	147	1	149	1
245	99	1	135	1	153	1	La goutte glisse		La goutte glisse	
246	99	1	135	1	153	1	La goutte glisse		La goutte glisse	
345	96	1	140	1	La goutte glisse		La goutte glisse		La goutte glisse	
346	96	1	140	1	La goutte glisse		La goutte glisse		La goutte glisse	
445	93	1	147	1	La goutte glisse		La goutte glisse		La goutte glisse	
446	93	1	147	1	La goutte glisse		La goutte glisse		La goutte glisse	

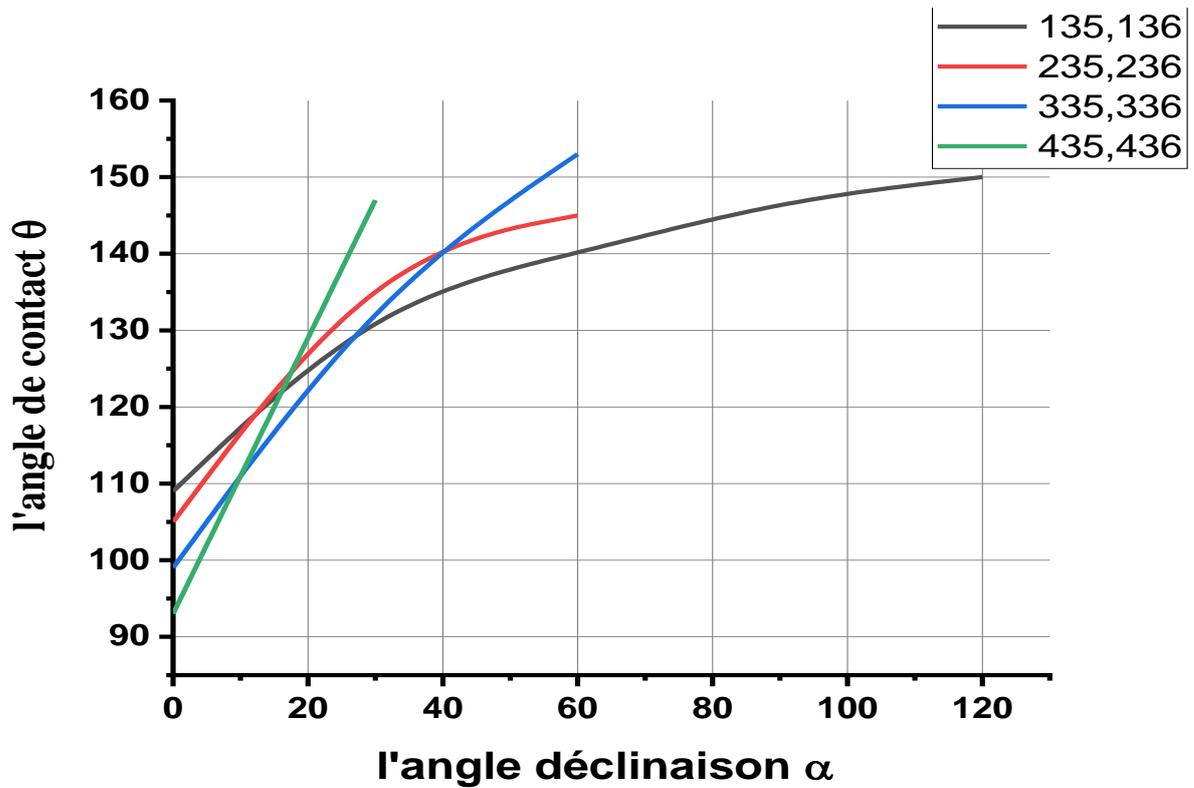


Figure IV.1 Angle de contact θ en fonction de l'angle de déclinaison α pour différents volumes de la goutte, $\sigma=0.2\text{ms}$ et une distribution linéaire ou zigzag dans le cas de l'état vierge de la silicone.

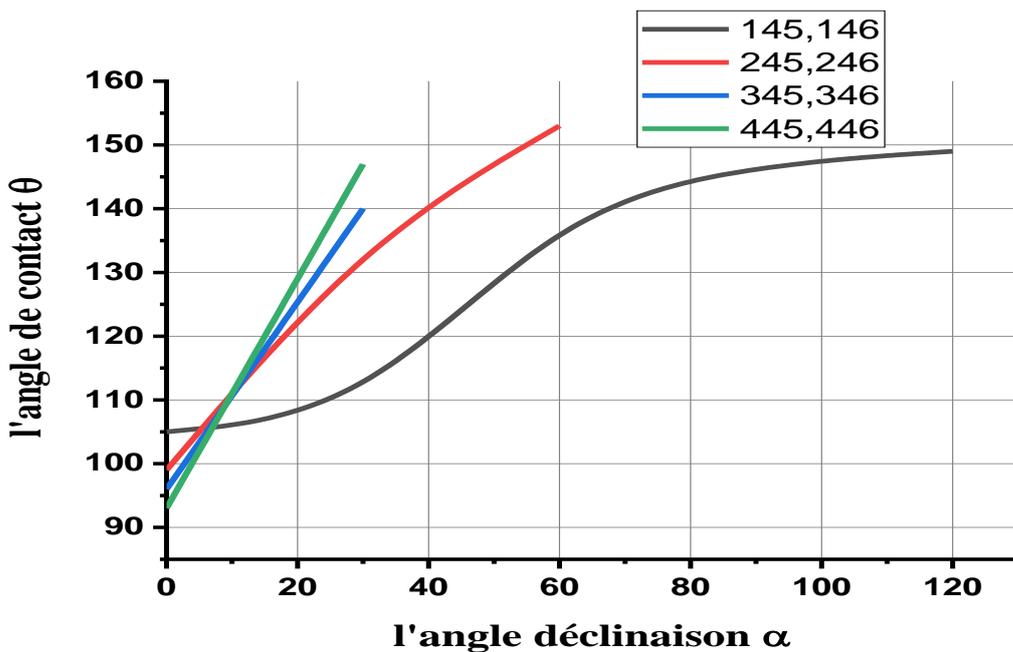


Figure IV.2- Angle de contact θ en fonction de l'angle de déclinaison α pour différents volumes de la goutte, $\sigma=5\text{ms}$ et une distribution linéaire ou zigzag dans le cas de l'état vierge de la silicone.

Tableau VI.2. Angle de contact θ en fonction de l'angle de déclinaison α de la surface de l'échantillon de silicone, pour les différents paramètres mis en jeu dans le cas de l'état vieilli de la surface propre de la silicone.

Angle α XYZ	0°		30°		60°		90°		120°	
	θ	HI	θ	HI	θ	HI	θ	HI	θ	HI
135	80	1	138	1	140	1	143	1	147	1
136	80	1	138	1	140	1	143	1	147	1
235	74	2	143	1	153	1	La goutte glisse		La goutte glisse	
236	74	2	143	1	153	1	La goutte glisse		La goutte glisse	
335	70	2	145	1	La goutte glisse		La goutte glisse		La goutte glisse	
336	70	2	145	1	La goutte glisse		La goutte glisse		La goutte glisse	
435	63	2	149	1	La goutte glisse		La goutte glisse		La goutte glisse	
436	63	2	149	1	La goutte glisse		La goutte glisse		La goutte glisse	
145	84	1	97	1	127	1	146	1	149	1
146	84	1	97	1	127	1	146	1	149	1
245	82	1	105	1	148	1	La goutte glisse		La goutte glisse	
246	82	1	105	1	148	1	La goutte glisse		La goutte glisse	
345	80	1	124	1	La goutte glisse		La goutte glisse		La goutte glisse	
346	80	1	124	1	La goutte glisse		La goutte glisse		La goutte glisse	
445	76	1	149	1	La goutte glisse		La goutte glisse		La goutte glisse	
446	76	1	149	1	La goutte glisse		La goutte glisse		La goutte glisse	

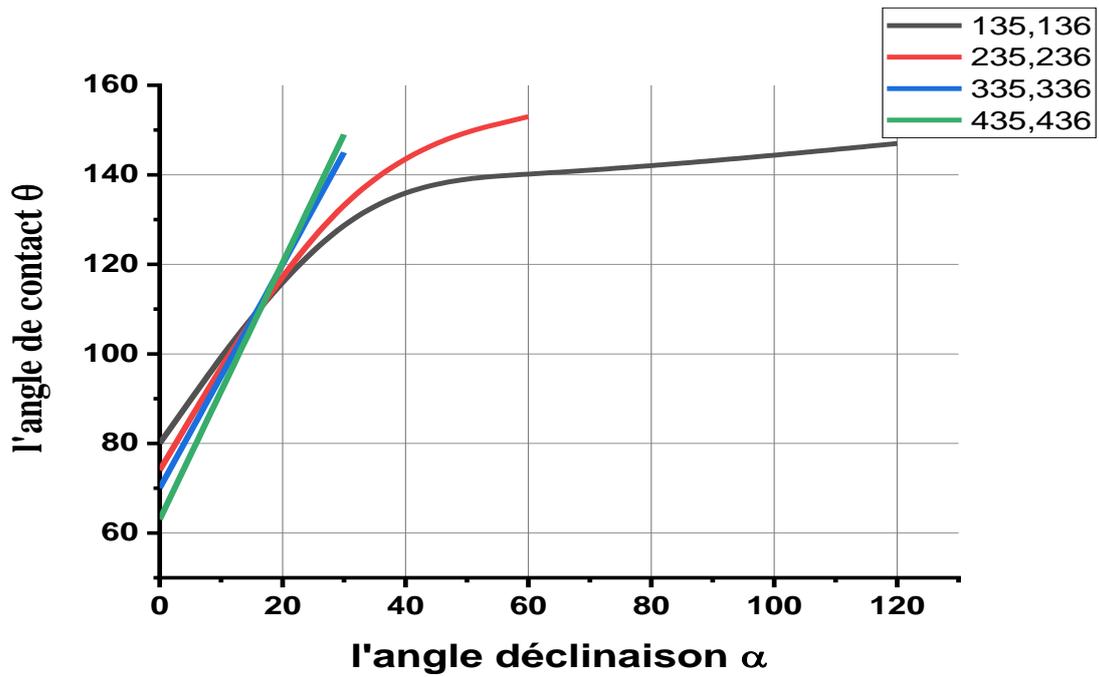


Figure IV. 3. Angle de contact θ en fonction de l'angle de déclinaison α pour différents volumes de la goutte, pour $\sigma=0.2\text{ms}$ et distribution linéaire ou zigzag, cas de l'état vieillie à sec de la silicone.

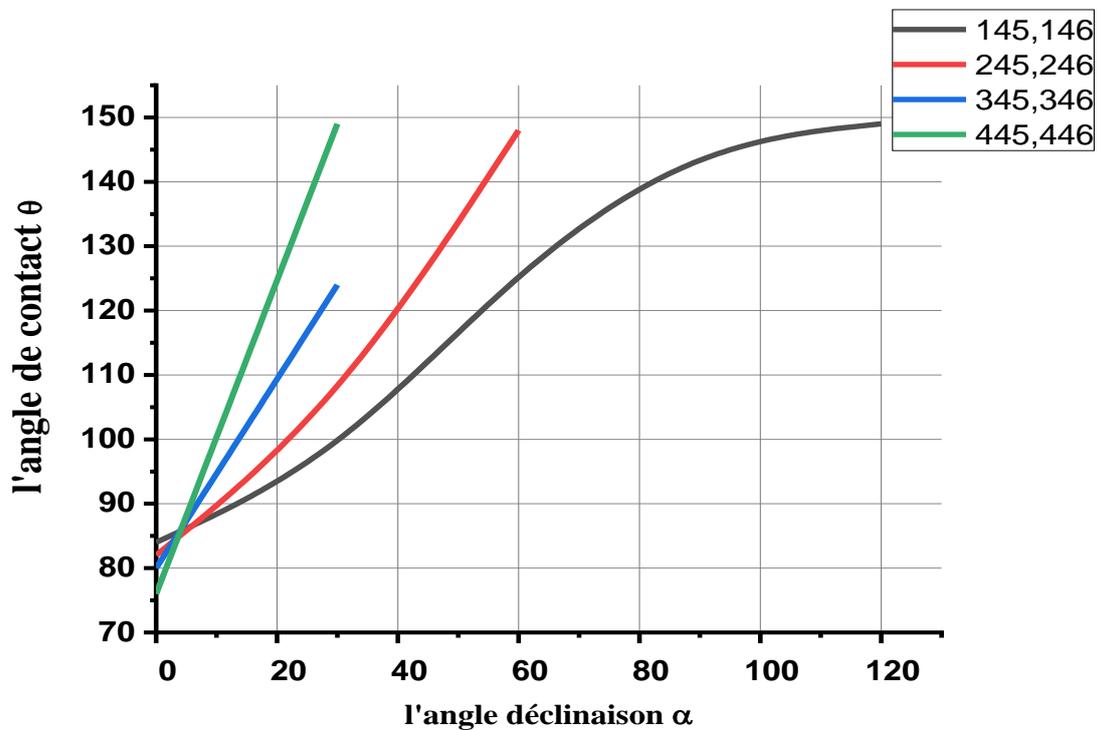


Figure IV.4- Angle de contact θ en fonction de l'angle de déclinaison α pour différents volumes de la goutte, pour $\sigma=5\text{ms}$ et distribution linéaire ou zigzag, cas de l'état vieillie à sec de la silicone.

Tableau VI. 3. Angle de contact θ en fonction de l'angle de déclinaison α de la surface de l'échantillon de silicone, pour les différents paramètres mis en jeu dans le cas de l'état vieilli de la surface polluée de la silicone à $\sigma=0.2$ mS.

Angle α XYZ	0°		30°		60°		90°		120°	
	θ	HI	θ	HI	θ	HI	θ	HI	θ	HI
135	82	1	117	1	132	1	153	1	La goutte glisse	
136	82	1	117	1	132	1	153	1	La goutte glisse	
235	80	1	136	1	145	1	La goutte glisse		La goutte glisse	
236	80	1	136	1	145	1	La goutte glisse		La goutte glisse	
335	77	2	139	1	La goutte glisse		La goutte glisse		La goutte glisse	
336	77	2	139	1	La goutte glisse		La goutte glisse		La goutte glisse	
435	73	2	144	1	La goutte glisse		La goutte glisse		La goutte glisse	
436	73	2	144	1	La goutte glisse		La goutte glisse		La goutte glisse	

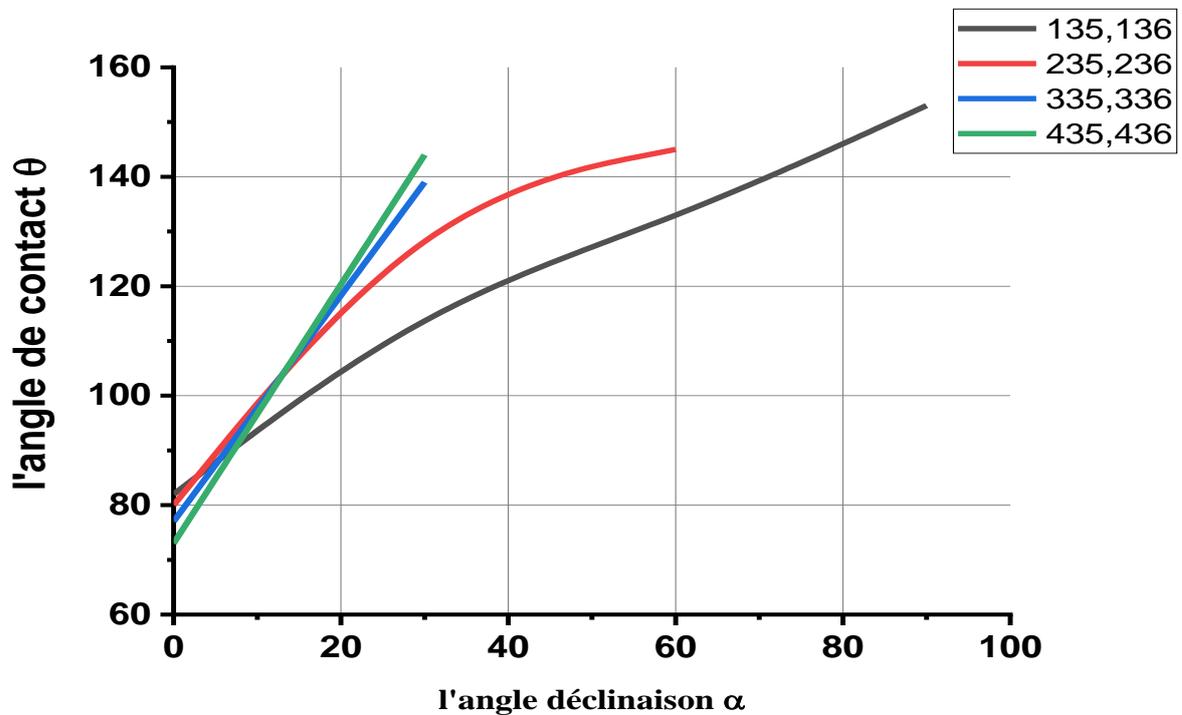


Figure IV. 5- Angle de contact θ en fonction de l'angle de déclinaison α pour différents volumes de la goutte, pour $\sigma=0.2$ ms et une distribution linéaire ou zigzag dans le cas de l'état vieilli sous pollution de la silicone.

Tableau VI.4 : Angle de contact θ en fonction de l'angle de déclinaison α de la surface de l'échantillon de silicone, pour les différents paramètres mis en jeu dans le cas de l'état vieilli de la surface polluée de la silicone $\sigma=5$ ms.

Angle α XYZ	0°		30°		60°		90°		120°	
	θ	HI	θ	HI	θ	HI	θ	HI	θ	HI
145	73	2	123	1	138	1	La goutte glisse		La goutte glisse	
146	73	2	123	1	138	1	La goutte glisse		La goutte glisse	
245	71	2	130	1	142	1	La goutte glisse		La goutte glisse	
246	71	2	130	1	142	1	La goutte glisse		La goutte glisse	
345	70	2	137	1	La goutte glisse		La goutte glisse		La goutte glisse	
346	70	2	137	1	La goutte glisse		La goutte glisse		La goutte glisse	
445	68	2	129	1	La goutte glisse		La goutte glisse		La goutte glisse	
446	68	2	129	1	La goutte glisse		La goutte glisse		La goutte glisse	

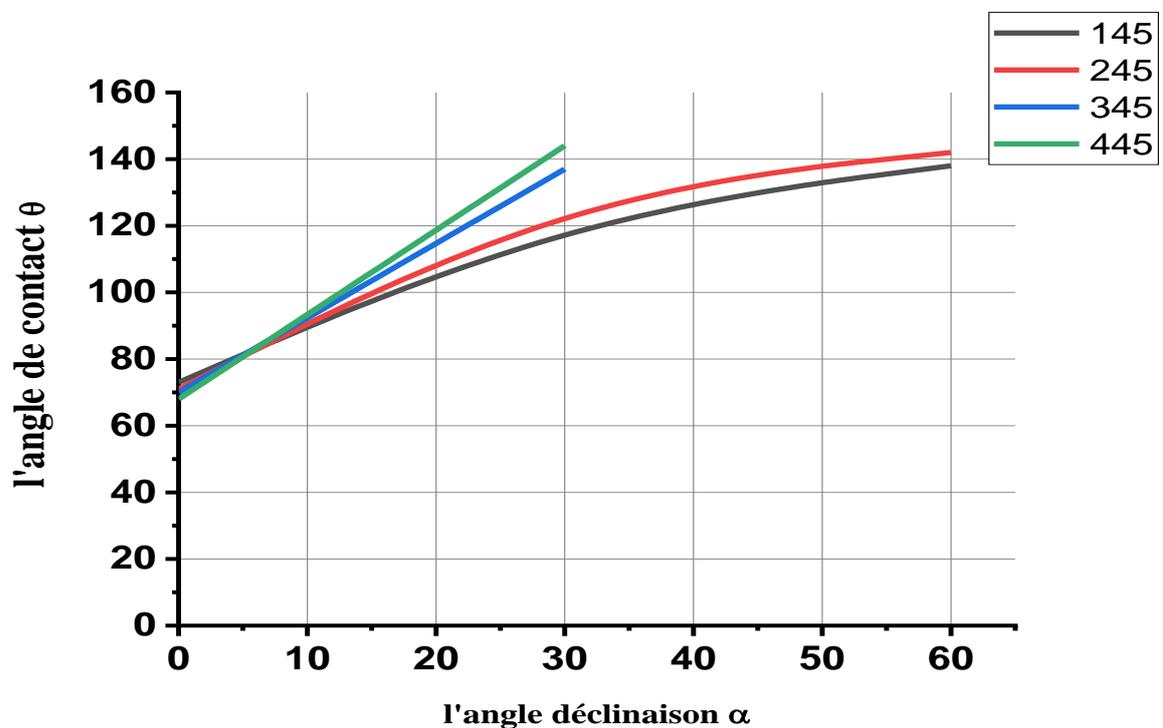


Figure IV.6 - Angle de contact θ en fonction de l'angle de déclinaison α pour différents volumes de la goutte, pour $\sigma=5$ ms et une distribution linéaire ou zigzag dans le cas de l'état vieilli sous pollution de la silicone.

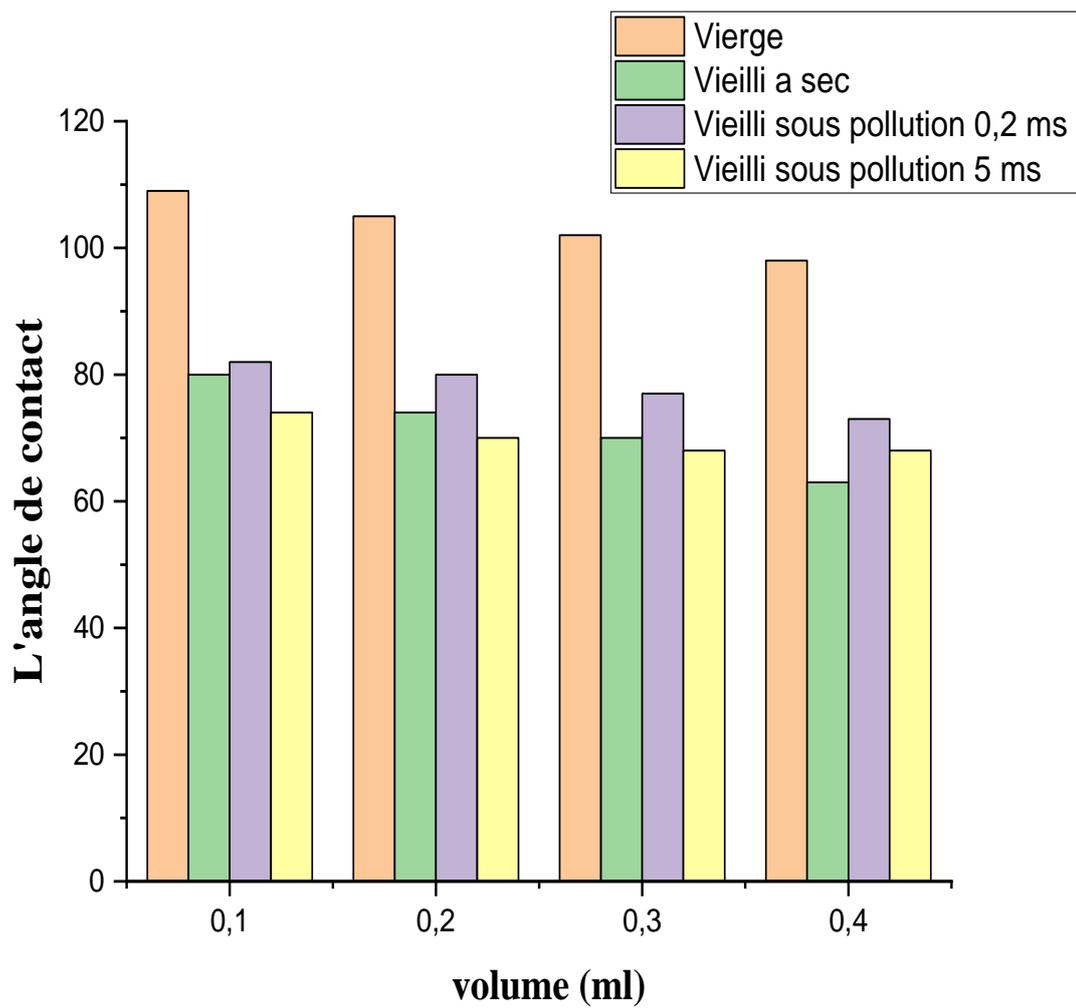


Figure IV-7- L'angle de contact en fonction du volume à $\alpha=0^\circ$ (X35)

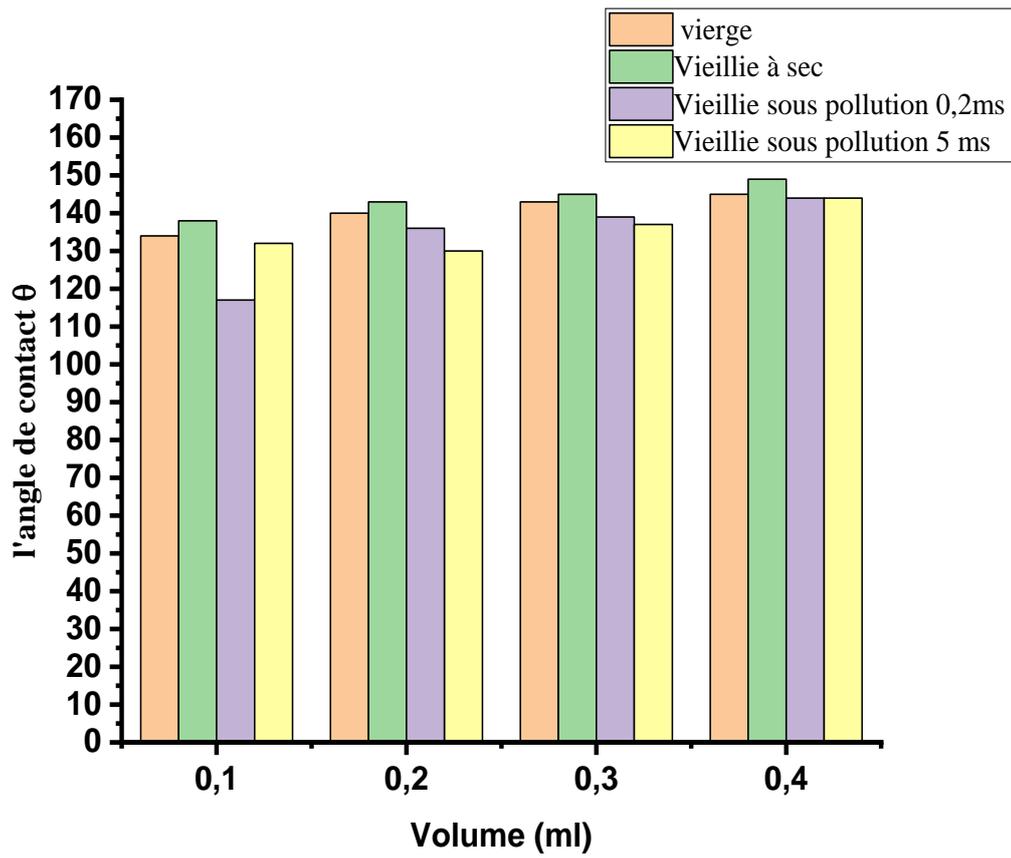


Figure IV. 8. Angle de contact en fonction du volume à $\alpha=30^\circ$.

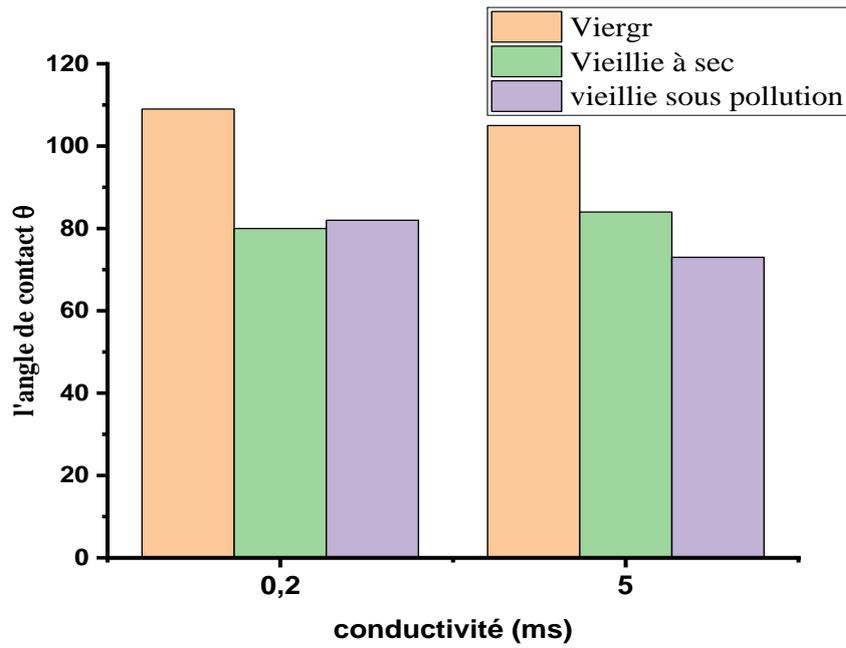


Figure IV.9- angle de contact en fonction de la conductivité $\alpha=0^\circ$ (1Y5).

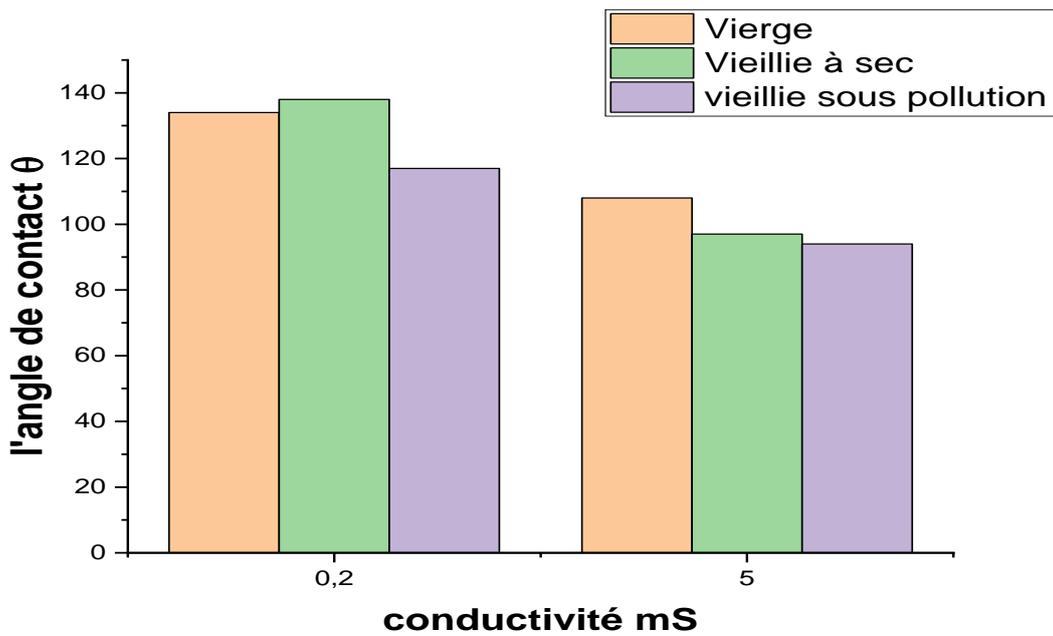


Figure IV.10- angle de contact en fonction de la conductivité $\alpha=30^\circ$ (1Y5).

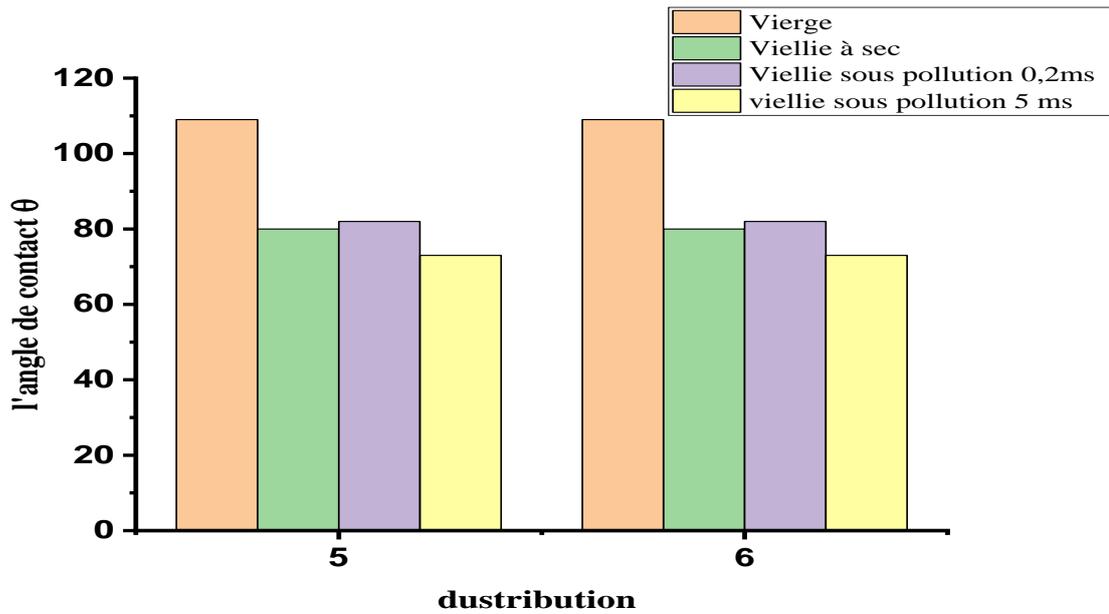


Figure IV.11- L'angle de contact θ en fonction de la distribution des gouttes d'eau à $\alpha=0^\circ$

5) linéaire 6) zigzag

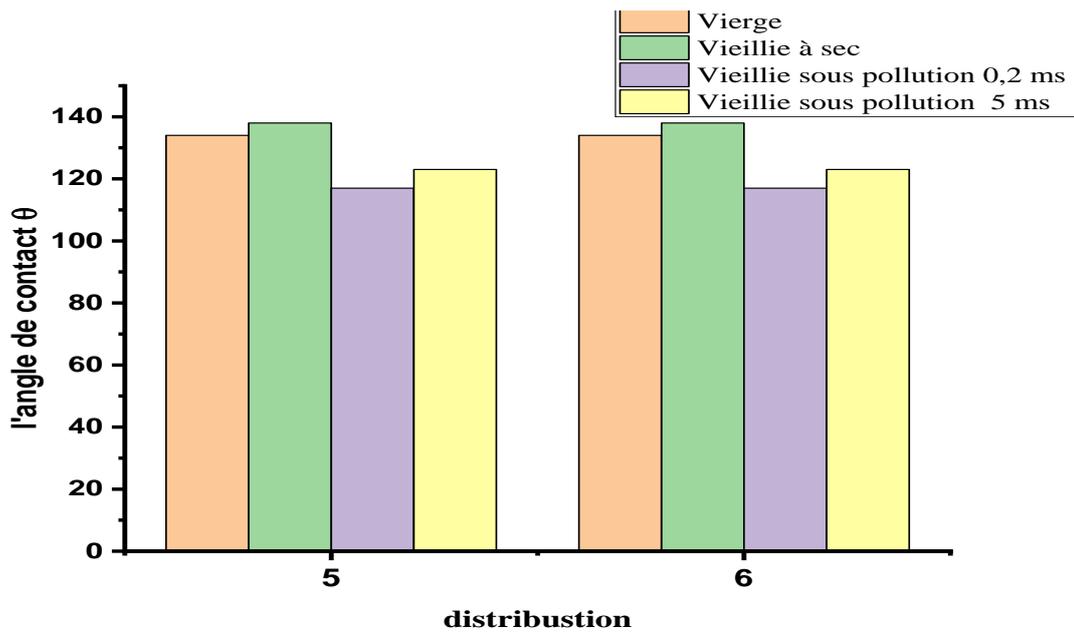


Figure IV.12- L'angle de contact θ en fonction de la distribution des gouttes d'eau à $\alpha=30^\circ$

5) linéaire 6) zigzag

Les résultats de mesures, dressés dans les tableaux suivants (IV.1), (IV.2), (IV.3) et (VI.4), et traduits par les différentes caractéristiques illustrées (figures IV.1, IV.2, IV.3, IV.4, IV.5 et IV.6) et les histogrammes (figures IV.7 à IV. 12) montrent que l'angle de contact θ augmente à mesure que l'angle de déclinaison α augmente, ceci est vrai quel que soit la variante (X,Y, Z) considérée.

Effet de la déclinaison α de la surface de la plaque de silicone sur l'angle de contact θ en fonction de l'état de cette surface: (voir tableaux IV.1 à IV.4 et figures IV.1 à IV.6)

À l'état vierge, comme vieilli à sec, de la plaque de silicone, les gouttes d'eau de faible volume (0,1 ml) simulant une pluie fine, demeurent collées à la surface de la plaque même quand cette dernière est verticale ($\alpha=90^\circ$), voir renversée ($\alpha=120^\circ$).

À l'état vieilli sous pollution, de la plaque de silicone, nous constatons cependant, l'éjection de la goutte d'eau, de volume = 0,1 ml, par glissement sur la surface de la plaque de silicone pour les grandes déclinaisons α de cette dernière, et ce dépendamment de la conductivité de la solution polluante. Pour $\sigma=0,2$ mS l'éviction de la goutte s'opère à $\sigma=120^\circ$, alors que pour $\sigma=5$ mS l'éviction de la goutte a lieu à $\sigma=90^\circ$.

Effet du volume des gouttes d'eau posées sur la surface de la plaque de silicone :

Pour des volumes de la goutte supérieurs ($>0,1$ ml), celle-ci glisse sous l'effet de son poids, pour des déclinaisons α de la surface plus faibles. L'éjection de la goutte se produit à :

- $\alpha=90^\circ$ pour le volume moyen de 0,2 ml simulant une pluie moyenne,
- et à $\alpha=60^\circ$ pour le volume moyennement grand (0,3 ml) simulant une pluie modérément forte et pour les grands volumes de la goutte (0,4 ml) simulant les grandes pluies, et ce peu importe l'état de la surface (vierge ou vieillie), la conductivité de la solution polluante et la distribution considérée linéaire ou en zigzag. Il est à noter que la goutte glisse sur la surface sans perdre sa forme arrondie de son front et une surface sèche derrière elle, pas d'effet mouillage de la surface (figure IV.13).

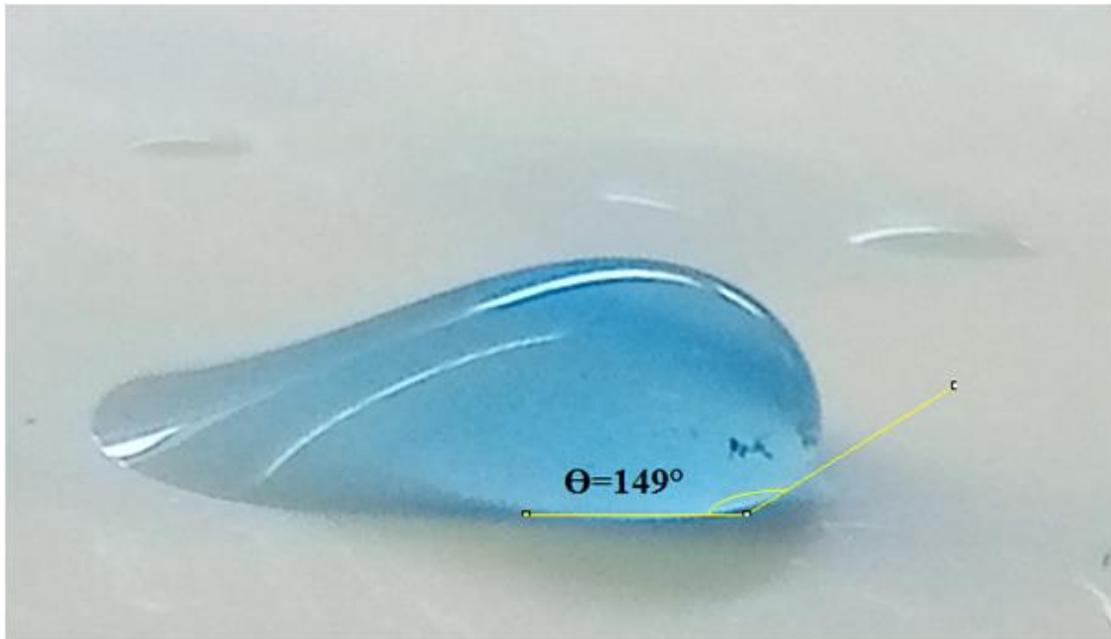


Figure. IV 13 – Angle de contact d’une gouttelette d’eau sur la surface de la silicone vieillie à sec $\alpha=30^\circ$ (446).

À angle de déclinaison $\alpha=0^\circ$, l’angle de contact θ diminue avec le volume de la goutte (figure IV. 14) delà d’une valeur critique de α ($5^\circ < \alpha < 15^\circ$ environ), spécifique à chaque état de surface et aux paramètres mis en jeu, l’ordre est renversé et θ augmente avec le volume de la goutte pour α donné (figure IV.1 à IV.6) et (figure IV.14 à IV 16).

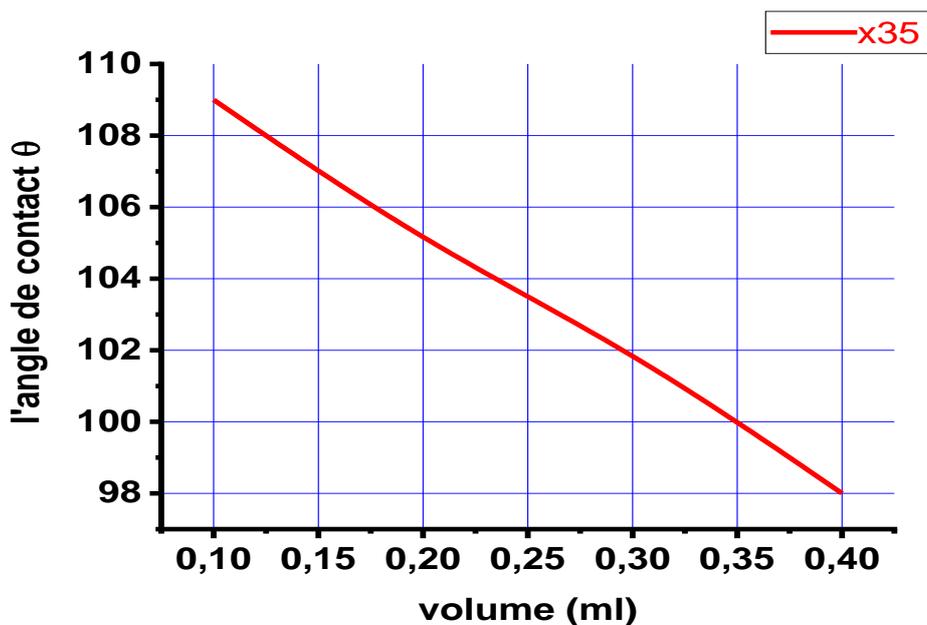


Figure IV- 14 L’angle de contact θ en fonction du volume de la goutte pour l’état vierge de la silicone à $\alpha=0^\circ$.

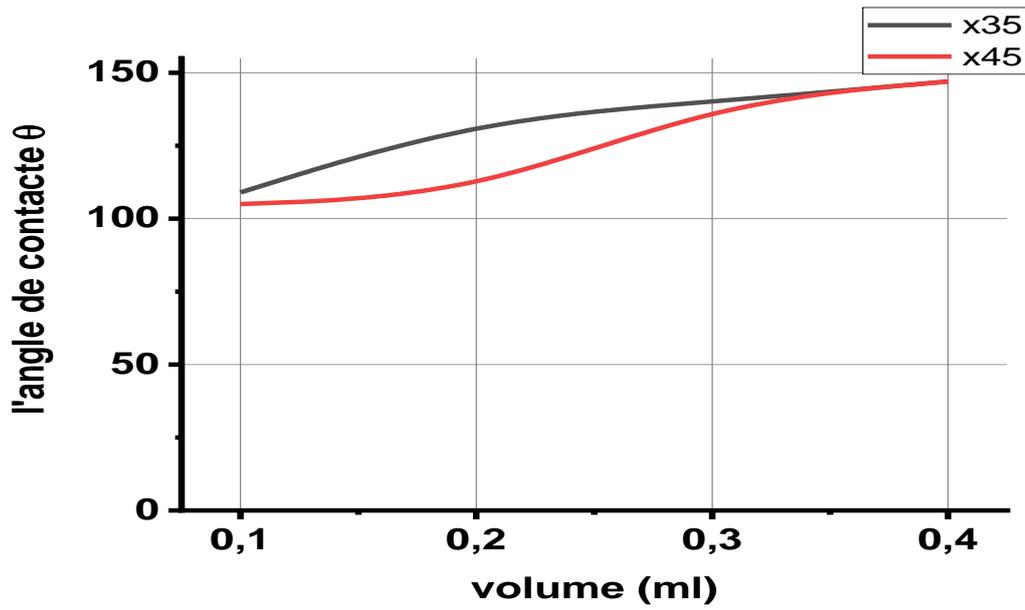


Figure IV- 15 L'angle de contact θ en fonction du volume de la goutte pour l'état vierge de la silicone à $\alpha = 30^\circ$.

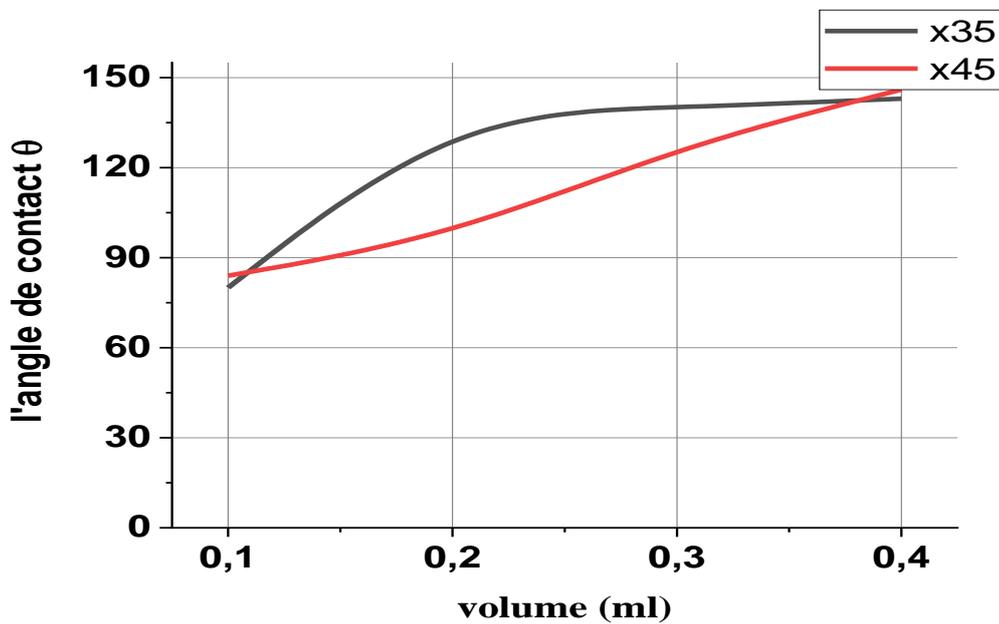


Figure IV- 16.a. L'angle de contact θ en fonction du volume de la goutte pour l'état vieilli à sec à $\alpha = 30^\circ$.

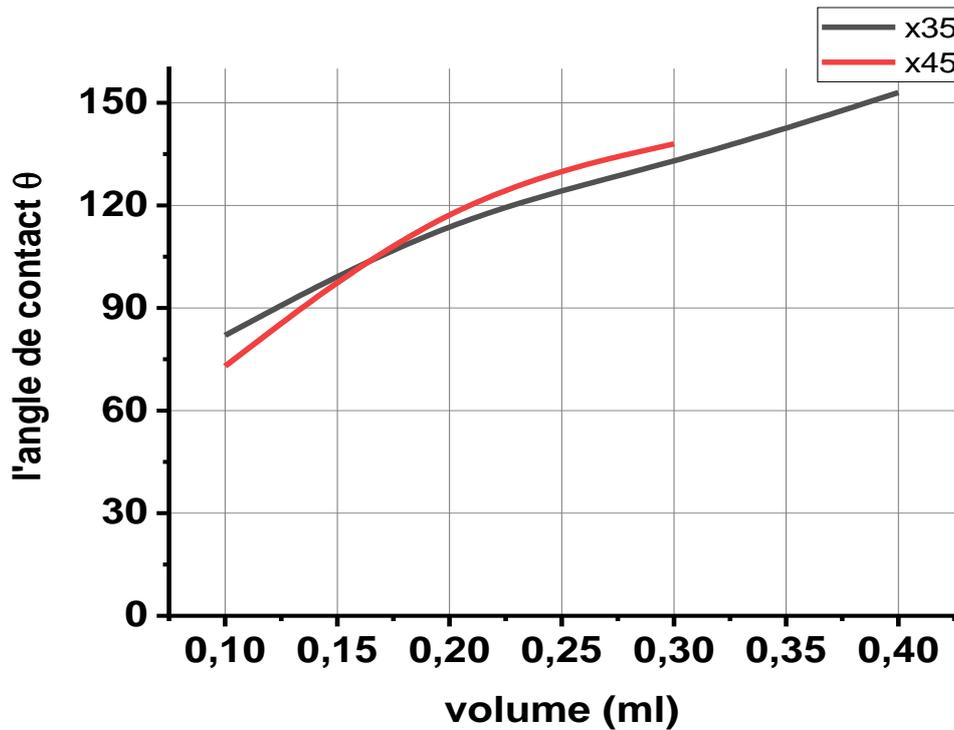


Figure IV- 16.b. L'angle de contact θ en fonction du volume de la goutte pour l'état vieilli sous pollution $\sigma=0.2\text{ms}$ et $\sigma=5\text{ms}$ $\alpha=30^\circ$

Effet de la distribution des gouttes d'eau sur la surface de la plaque de silicone :

Il est toutefois à remarquer, que l'effet de la distribution des gouttes d'eau sur la surface de la plaque de silicone, aussi bien vierge que vieillie, n'est pas notable (figures IV.1 à IV.6),

Effet de la conductivité des gouttes d'eau posées sur la surface de la plaque de silicone :

La conductivité des gouttes d'eau posées sur la surface de la plaque de silicone ont, quant à elles, un effet remarquable sur l'angle de contact θ qui diminue avec l'augmentation de σ (figures IV.17 et IV18).

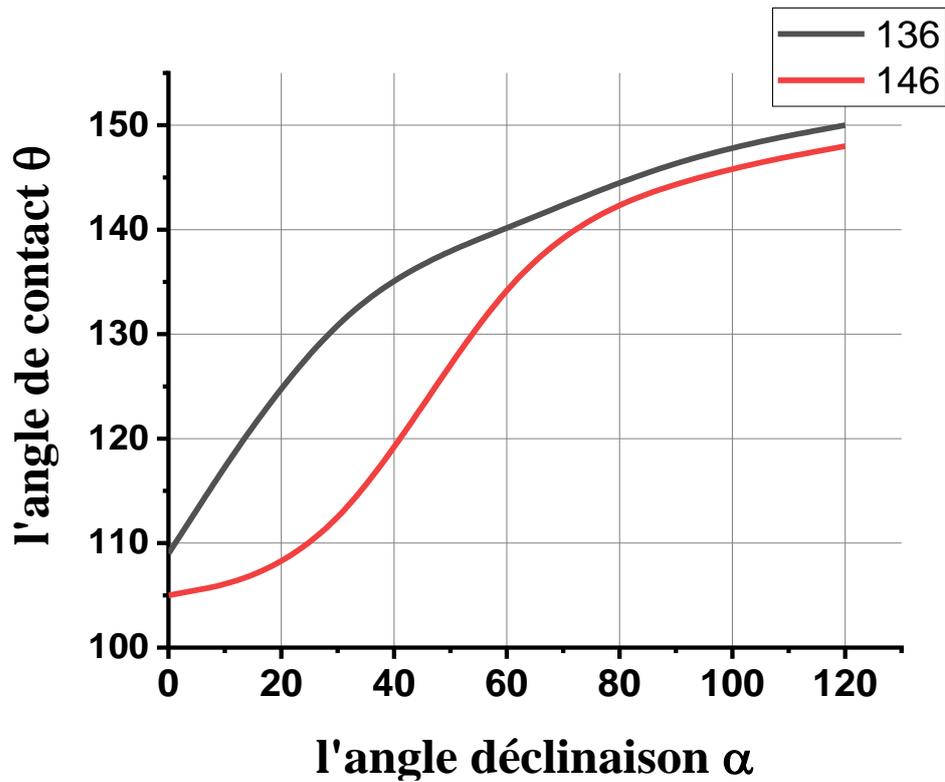


Figure IV.17- L'angle de contact θ en fonction de l'angle de déclinaison α pour différentes conductivités à l'état vierge de la silicone.

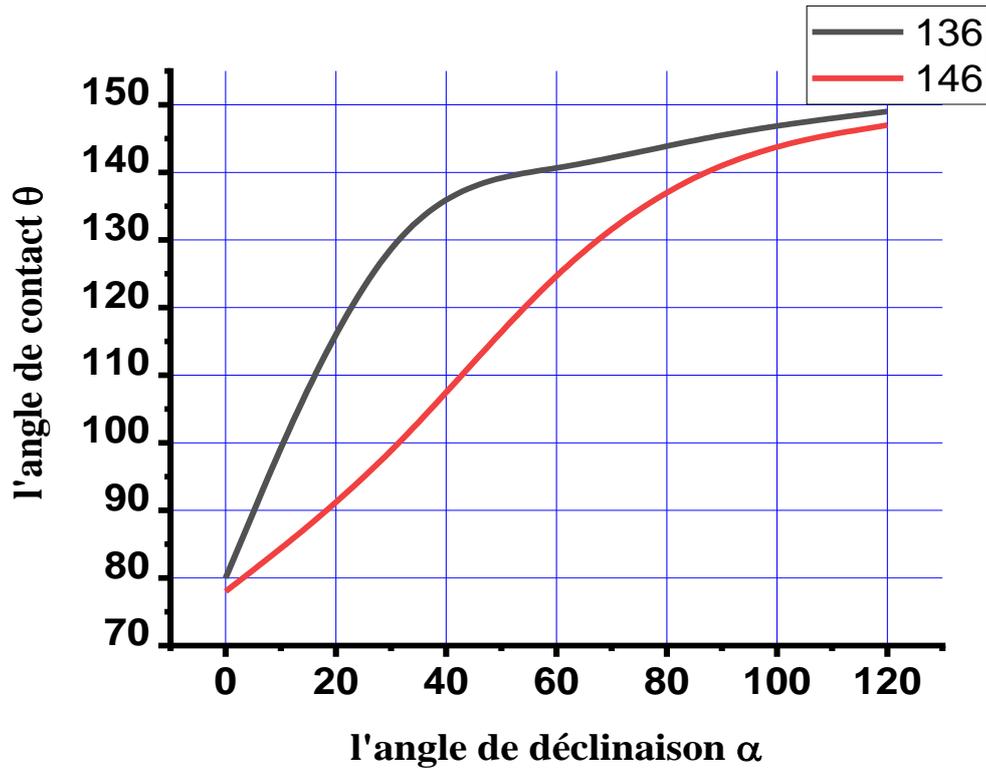


Figure IV.18. a- L'angle de contact θ en fonction de l'angle de déclinaison α pour différentes conductivités vieilles à sec.

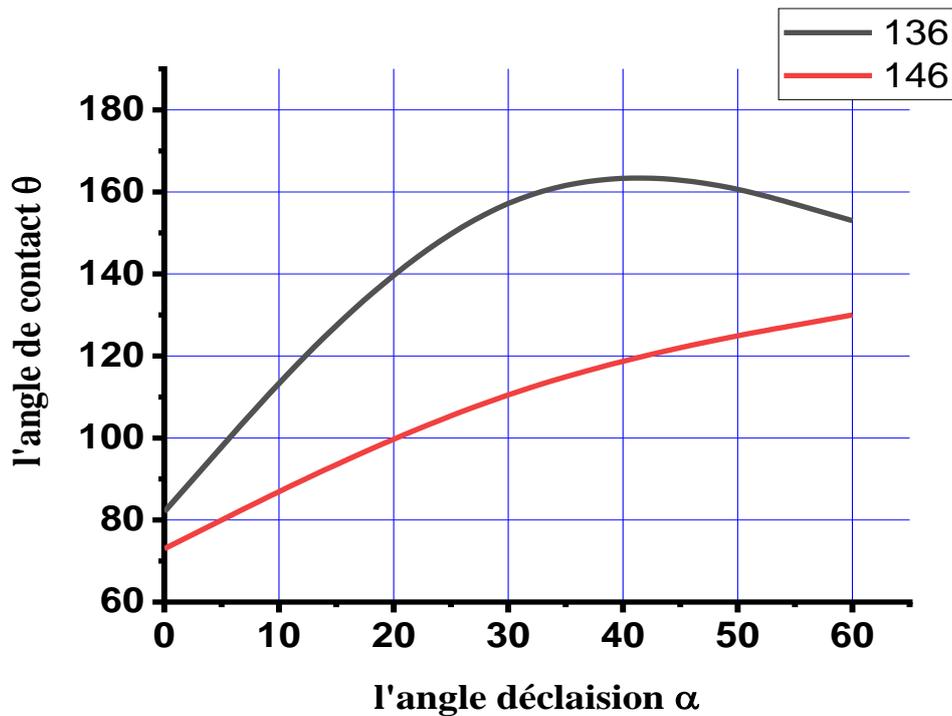


Figure IV.18. b- angle de contact θ en fonction de l'angle de déclinaison α pour différentes conductivités vieilles sous pollution.

Nous pouvons ainsi déduire que la conductivité des gouttes d'eau dégrade la propriété hydrophobe de la surface de la silicone.

Effet de l'état de surface de la plaque de silicone et de la conductivité de la solution polluante sur l'hydrophobicité du matériau :

L'hydrophobie de la surface de la plaque de silicone se trouve affectée par un vieillissement aussi bien à sec que sous pollution de cette dernière (figure IV. 9 à IV.10), toutefois une forte conductivité de la solution polluante dégrade davantage cette propriété

Nous pouvons ainsi déduire : à l'état de jeunesse du matériau (état vierge), ce dernier jouit d'une bonne hydrophobie. À son vieillissement, par contre, sur site causé par les multiples contournements subit (état vieilli à sec) et les conditions environnementales imposées par le site d'exploitation dont dépend le degré de pollution qui peut être faible ou élevé (états vieillis sous pollution à $\sigma = 0,2\text{mS}$ et $\sigma = 5\text{ mS}$ respectivement), engendre la diminution de cette propriété, sans toutefois aller jusqu'à sa dégradation complète (figure IV.20 et IV.21). Le matériau conserve le caractère hydrophobe qui se trouve légèrement affecté, ce qui témoigne de la bonne qualité du matériau silicone.

Remarquons, également, que la surface horizontale ($\alpha = 0^\circ$) de la silicone vierge présente des gouttelettes discrètes dont l'angle de contact formé est obtus ($98^\circ \leq \theta \leq 109^\circ$) (figure IV.19). Cette valeur témoigne d'un mouillage faible de cette surface, donc d'un bon état d'hydrophobicité de la silicone vierge, auquel correspond un indice d'hydrophobicité $I_H = 1$ et ce pour tous les cas envisagés de volume, conductivité et distribution des gouttes d'eau, (Exemple de la figure IV.19).

Le caractère hydrophobe de la surface vierge augmente à mesure que la déclinaison de cette dernière augmente (figure IV.13), ($\alpha > 30^\circ$ simulant une jupe d'isolateur à forte déclinaison ou en long fut pour $\alpha = 90^\circ$), ou que le volume des gouttes d'eau devient important, simulant une forte pluie (tableau IV.1 et figures IV.1 et IV.2).

Quelque soient les paramètres mis en jeu, la surface de la silicone ne perd pas son caractère hydrophobe, puisque les gouttes d'eau restent perlées jusqu'à glisser sous l'effet de leurs poids, pour les angles de déclinaison α mentionnés ci-dessus, tout en conservant leurs formes arrondies lors de leur éviction (figure IV.13).

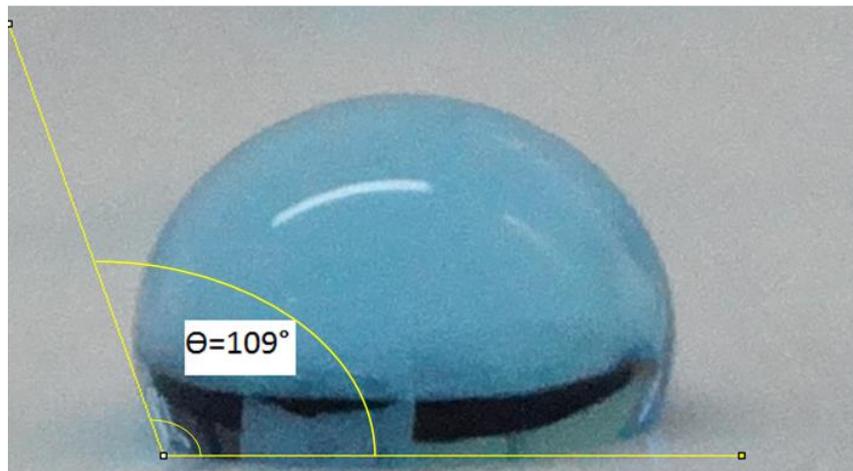


Figure IV.19 – Angle de contact d’une gouttelette d’eau sur la surface horizontale de la silicone vierge $\alpha = 0^\circ$ (135).

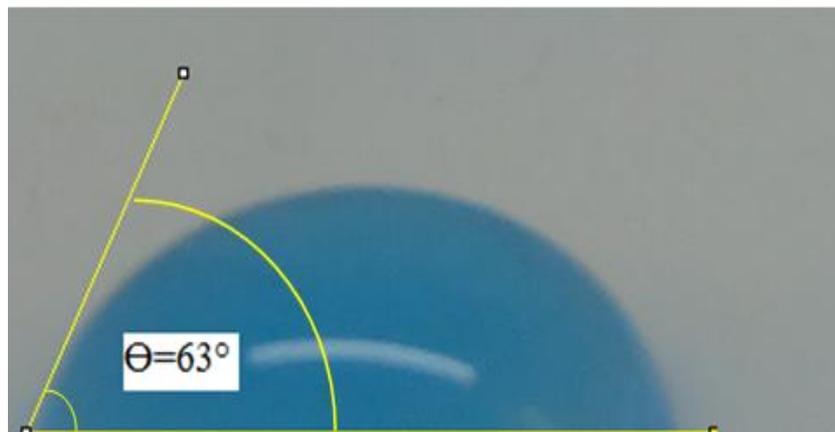


Figure. IV.20 – Angle de contact d’une gouttelette d’eau posée sur la surface de la silicone vieillie électriquement à sec (435), $\alpha = 0^\circ$.

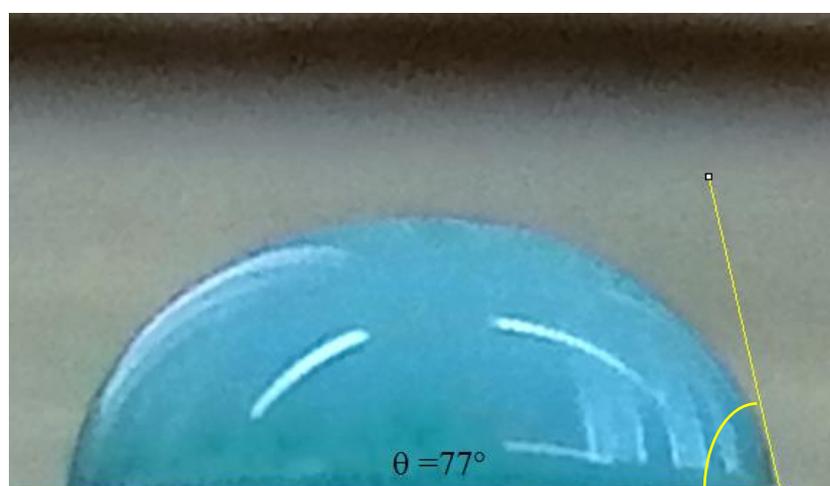


Figure. IV.21 – Angle de contact d’une gouttelette d’eau sur la surface de la silicone vieillie électriquement sous pollution conductrice de $\sigma = 0.2 \text{ ms}$, $\alpha = 0^\circ$ (336).

IV.3 Analyse par microscopie optique

La microscopie optique nous a permis d'avoir des informations sur le relief des échantillons de la silicone analysés, soient vierge, vieilli à sec et vieilli sous pollution humide. Les observations et les prises photographiques effectuées par le microscope optique ont révélé d'importantes modifications dans la structure morphologique de surface de ces échantillons. L'observation au microscope a révélé des traces provoquées par la décharge électrique sur les échantillons de matériau vieilli sous contrainte de champ électrique à l'état propre et pollué.

Lors du vieillissement à sec de la surface de la silicone, la décharge électrique a provoqué de légères saignées localisées, retraçant sa trajectoire. Ceci a provoqué un dépoli de la surface qui devient plus mate (voire figure IV.22 (b)).

Alors que le vieillissement sous pollution de la surface de la silicone, laisse apparaître des traces réparties sur toute la surface de l'échantillon en silicone. Les traces de la décharge reconstituées sur la figure (IV.22.c), suivent dans les zones préférentielles faibles du matériau, une trajectoire sinueuse sous forme d'arborescence dans la direction du champ électrique.

La salinité de la couche de pollution favorise la naissance des arcs électriques suite à l'établissement d'un courant de fuite à travers la couche superficielle et le caractère hydrophobe de la silicone laisse les gouttes d'eau perler en surface du matériau, ce qui constitue des points de concentration de la décharge provoquant une sévère altération de l'état de surface de celui-ci.

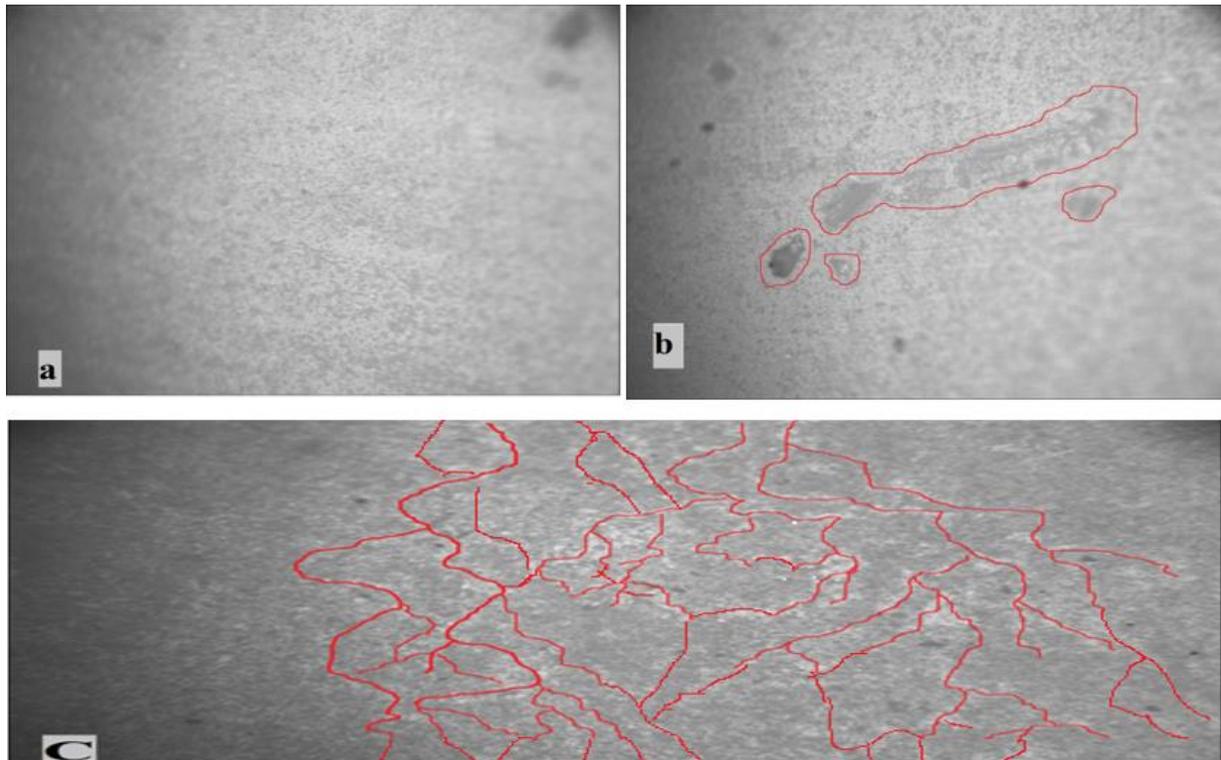


Figure IV.22 – Photographies au microscope optique des différents échantillons : (a) la silicone vierge, (b) silicone vieilli à sec, (c) silicone vieilli sous pollution humide.

IV.4 Présentation et discussion des résultats d'essais électriques

IV.4.1. Mesure de la résistance

1- Mesure de la résistance transversale : la figure IV.23 représente la caractéristique $V(I_t)$ du matériau silicone. La résistance transversale R_t , déterminée par la pente de la caractéristique $V(I_t)$ et la résistivité transversale ρ_t calculée par l'équation (II.18), (Voir § II.2.1.2 .b) sont dressées dans le tableau (IV.5) pour un état vierge, vieilli propre et vieilli sous pollution du matériau.

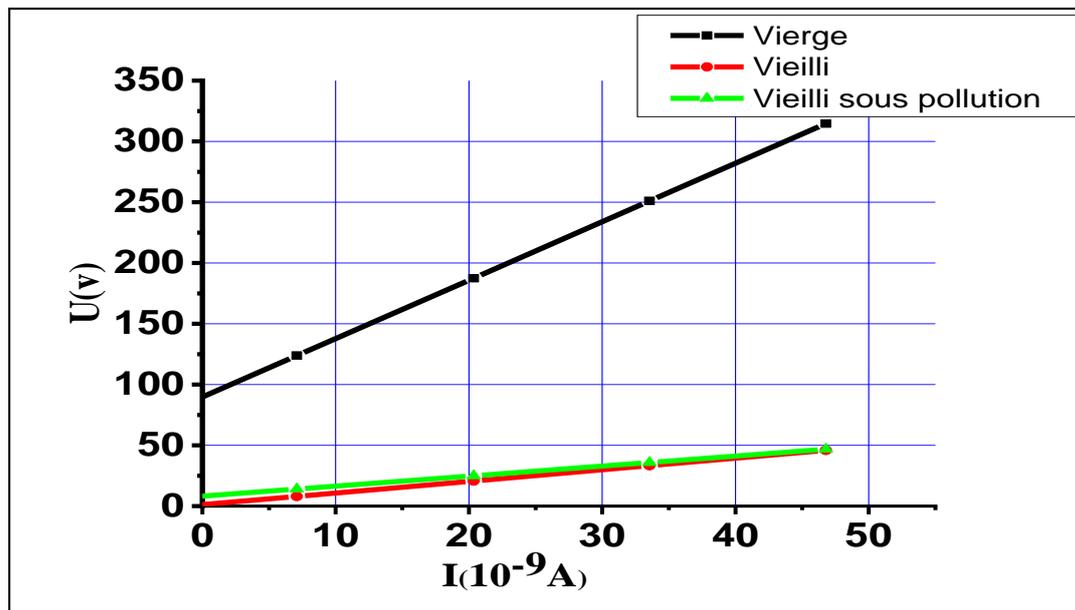


Figure IV. 23. Caractéristique $V(I_t)$ de la silicone.

Tableau IV. 5 – Résistance transversale et résistivité transversale de la silicone vierge, vieillie à l'état propre et vieillie sous pollution.

Etat du matériau	La résistance R_t ($10^9 \Omega$)	Résistivité ρ_t (10^9)
La silicone vierge	4.85	1.61
La silicone vieillie à l'état propre	0.94	0.31
La silicone vieillie sous pollution	0.77	0.25

À l'état vierge, la silicone présente une bonne résistance et résistivité transversales, cependant, le vieillissement à l'état propre, comme sous pollution, de la silicone diminue de la valeur de ces deux grandeurs électriques (tableau IV.5).

2- Mesure de la résistance superficielle : la figure IV. 24 représente les caractéristiques $V(I_s)$ de la silicone. La résistance superficielle R_s , déterminée par la pente de la caractéristique $V(I_s)$ et la résistivité superficielle ρ_s calculée par l'équation (II.21) (voir § II.2.1.2 .d) sont dressées dans le tableau (IV.6) pour un état vierge, vieilli propre et vieilli sous pollution du matériau.

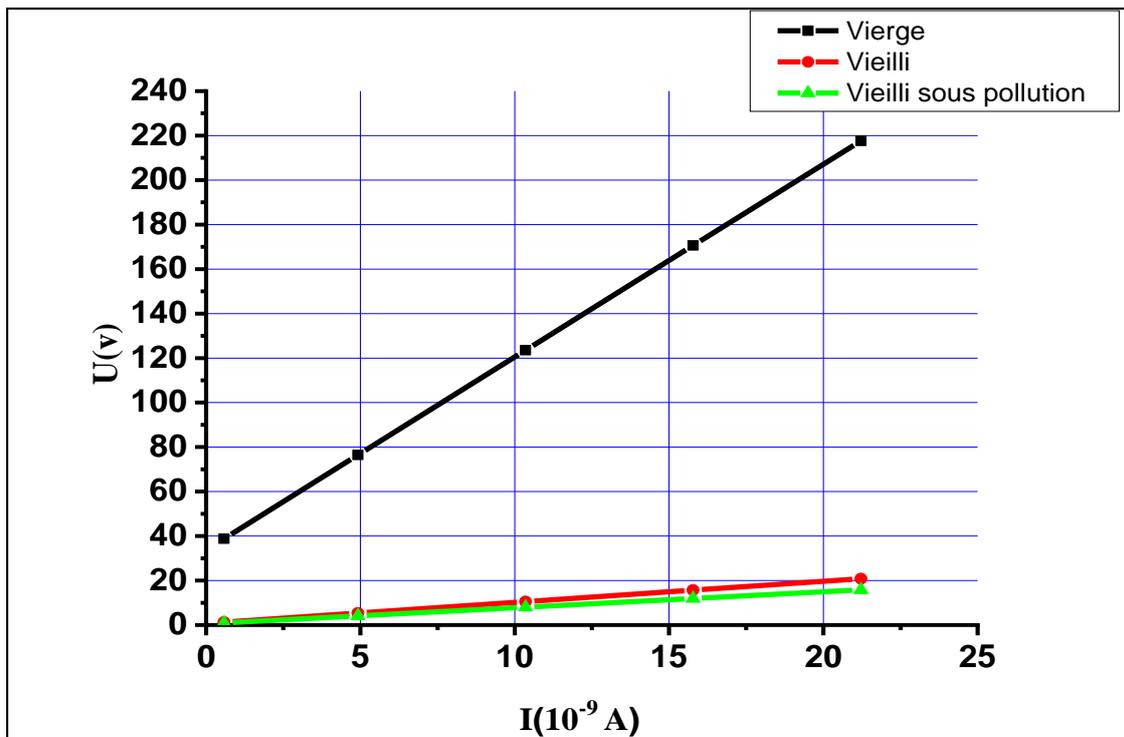


Figure IV.24- caractéristique V(Is) de la silicone.

Tableau IV.6 – Résistance superficielle et résistivité superficielle de la silicone vierge, vieillie à l'état propre et vieillie sous pollution.

État du matériau	La résistance Rs (10 ⁹ Ω)	Résistivité (10 ⁹)
silicone vierge	8.70	13.76
silicone vieillie à l'état propre	1.106	1.75
silicone vieillie sous pollution	0.692	1.094

De même, à l'état vierge, la silicone présente une bonne résistance et résistivité superficielles. Cependant, à l'état vieilli propre et vieillie sous pollution, ces deux grandeurs électriques diminuent (tableau IV.6).

IV.4.2 Rigidité diélectrique longitudinale

Le tableau IV.7 représente les résultats de mesure de la rigidité diélectrique longitudinale E_1 du matériau.

X, X, X : volume, conductivité, distribution.

1 : volume 0.1 ml

2 : volume 0.2 ml

3 : conductivité 0.2 mS

4 : conductivité 5 mS

5 : distribution alignée

6 : distribution en zigzag

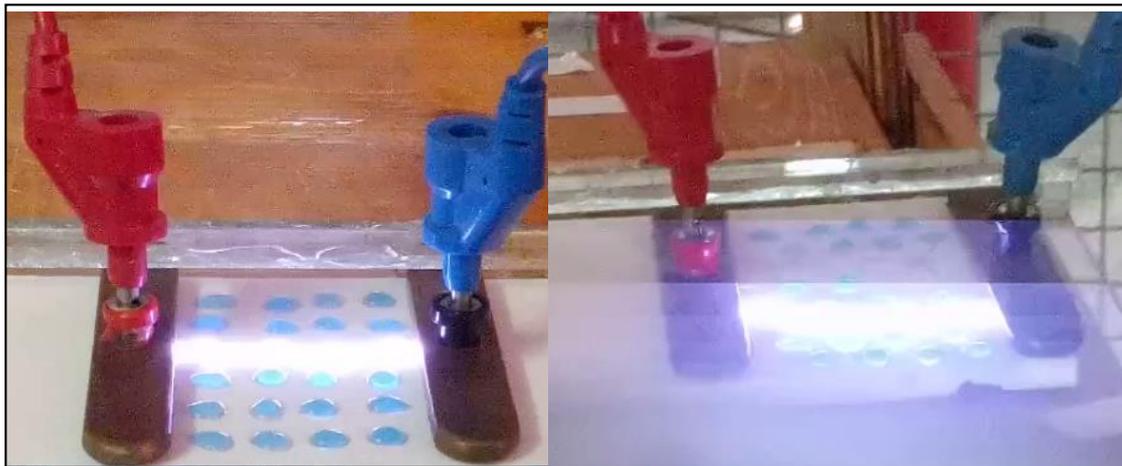
Tableau IV.7 – rigidité diélectrique longitudinale El de la silicone.

Etat de surface de l'échantillon	propre	Polluée									
		135	136	145	146	235	236	245	246	335	445
El (kV/cm)	9.1	7.8	6.7	7.6	7.3	7.2	6.6	6.7	6.8	6.9	6.5

À l'état propre (sec), la silicone présente une bonne rigidité diélectrique. Par contre, à l'état pollué, elle perd de ses performances au fur et à mesure que la conductivité et le volume de la pollution déposée sont élevés.

La décharge glissante résultant de l'application de la contrainte de champ électrique a provoqué la dégradation de la surface de ce matériau, laissant des traces visibles au microscope optique et plus profondes avec l'augmentation de la conductivité de la couche polluante ; la Silicone se carbonise et la couche de carbone ainsi déposée augmente sa conductivité superficielle, ce qui affecte directement sa rigidité longitudinale.

On remarquera également que la rigidité longitudinale de la silicone sous pollution humide conductrice est plus grande lorsque les gouttes de pollution suivent une distribution linéaire, relativement à une distribution en zigzag de ces dernières. Ceci parce que dans le cas de la distribution linéaire, la décharge s'ouvre un chemin préférentiel en se faufilant entre les rangées de gouttes (figure IV.25 .a). Dans le cas d'une distribution en zigzag, elle surplombe les gouttes qui sont de conductivité plus grande que la surface propre de la silicone (figure IV. 25.b).



a) : Distribution linéaire

b) : Distribution en zigzag

Figure IV.25 : Photo de l'arc sur la surface polluée de la silicone.

IV.4.3 Mesure de la capacité C_x et du facteur de perte $tg\delta$

Les valeurs de mesure de quelques propriétés diélectriques des échantillons en silicone (capacité, facteur de perte) sont consignées dans le tableau (IV.8). Celles-ci ont été mesurées à l'aide du pont de Schering au Laboratoire de Haute tension de l'Université A. Mira, Bejaia.

Tableau IV. 8. Valeurs de la capacité et du facteur de perte de la silicone à $U=100V$ et $f=50Hz$.

État du matériau	Capacité (pF/m)	$Tg\delta$
La silicone vierge	11.85	6.6×10^{-2}
La silicone vieillie à l'état propre	10.86	6.74×10^{-2}
La silicone vieillie sous pollution	9.99	1.368×10^{-1}

À partir du tableau IV.8, nous remarquons que le vieillissement électrique de la silicone résulte d'une diminution de sa capacité, conjuguée à une augmentation du facteur de perte dans le cas d'une surface polluée. Cette constatation rejoint celles faites pour les résistances électriques et les rigidités diélectriques de la silicone que nous remettons aux dommages laissés par la décharge sur la surface de la silicone, de surcroît aggravés par la conductivité du facteur polluant.

1-Calcul de la permittivité électrique ϵ_r et de l'indice de perte $\epsilon_r .tg$

La permittivité électrique et l'indice de perte, calculés en vertu des équations (II.12) et (II.16) (voir § II.2.1.2.a) pour une tension $U = 100 V$ et une fréquence $f = 50 Hz$ à l'état vierge, vieillie propre et vieillie sous pollution du matériau silicone, sont dressés dans le tableau (IV.9).

Tableau. IV.9- Permittivité électrique et indice de perte de la silicone à $U = 100 \text{ V}$ et $f = 50 \text{ Hz}$.

État du matériau	Permittivité ϵ_r (F/m)	l'indice de perte $\epsilon_r \cdot tg\delta$
La silicone vierge	4	24.28×10^{-2}
La silicone vieillie à l'état propre	3.68	26.96×10^{-2}
La silicone vieillie sous pollution	3.38	4.62×10^{-1}

À partir du tableau IV.9, nous remarquons que le vieillissement électrique de la silicone se traduit par une diminution de la permittivité électrique ϵ_r du matériau, donc de sa capacité C_x , et en corolaire par une augmentation du facteur de perte $tg\delta$ donc de l'indice de perte, image des pertes diélectriques engendrées dans le matériau. La pollution humide est un facteur dégradant de l'état du matériau et la conductivité de cette première aggrave son vieillissement.

IV.5 Présentation et discussion des résultats des analyses chimiques

IV.5.1 Analyse par spectroscopie Infrarouge à transformée de Fourier (IRTF)

L'influence du vieillissement de la silicone en milieu sec (état propre) et humide (état pollué à $\sigma = 0.2 \text{ ms}$ et $\sigma = 5 \text{ ms}$) a été étudiée par la spectroscopie IR, de manière à identifier les changements structuraux éventuels pouvant apparaître à l'échelle moléculaire. Cette analyse a permis de déterminer les spectres de variation d'absorbance A (unité arbitraire de la quantité de lumière réfléchi par le matériau) en fonction de la fréquence de bombardement des matériaux par le rayonnement infrarouge, soit du nombre d'onde ν (cm^{-1}).

L'absorbance A met en évidence les types de liaisons existants dans le matériau, caractérisés par un ou plusieurs pics apparaissant sur une plage de fréquence (nombre d'onde ν (cm^{-1})) bien définie.

La figure (IV.26) illustre la variation de l'absorbance A en fonction du nombre d'onde ν (cm^{-1}) s'étalant sur une plage allant de 500 à 4000 cm^{-1} , pour les différents échantillons analysés de la silicone (vierge, vieillis à sec et sous pollution humide).

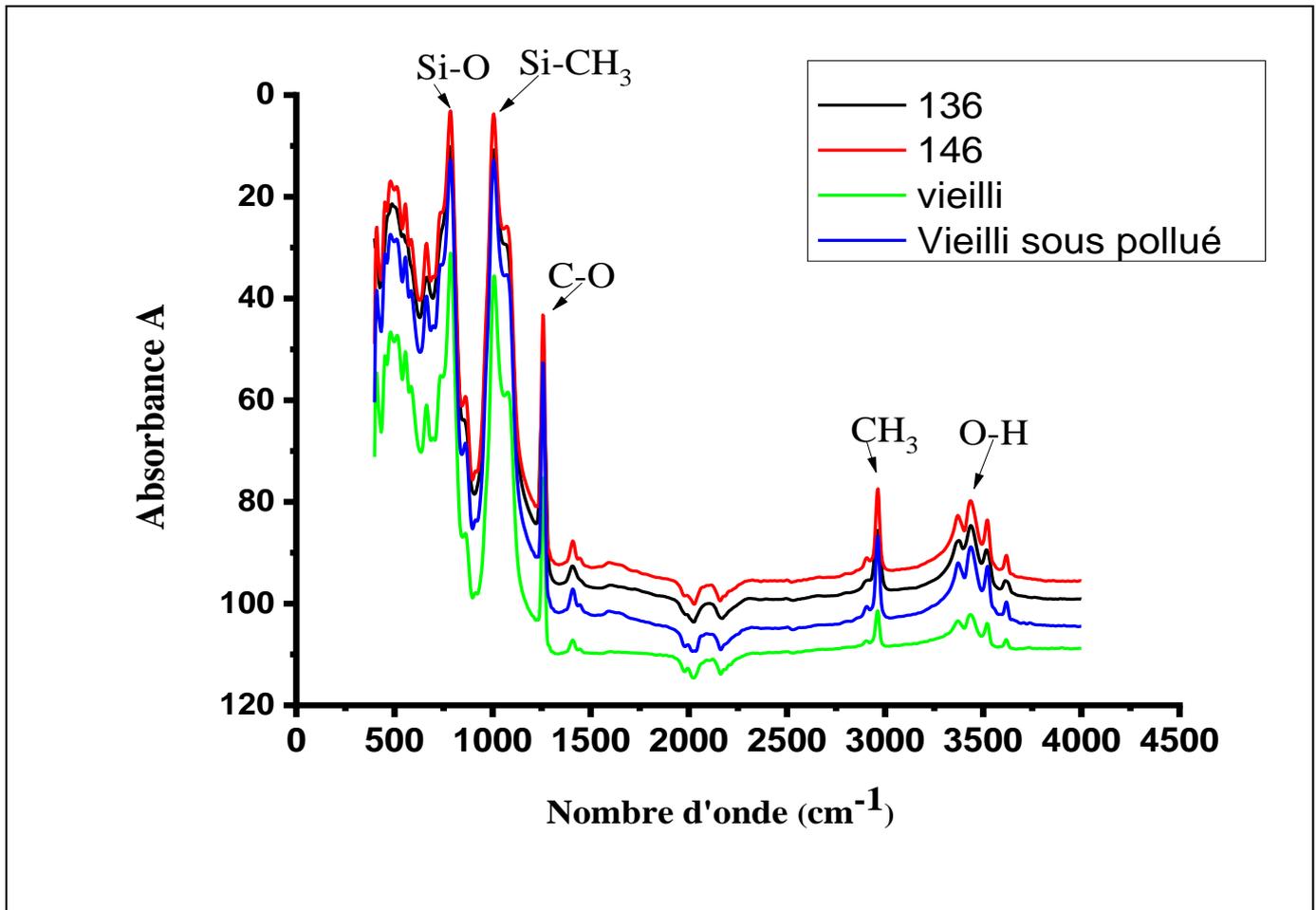


Figure IV. 26 - Spectre IRTF des échantillons (vierge et vieillis) de la silicone.

Le spectre IRTF présente la même allure pour l'ensemble des échantillons analysés (vierge, vieillis sous pollution et vieillis à l'état propre) indiquant l'apparition des mêmes bandes d'absorption avec la même évolution des spectres chimiques en présence. Les bandes d'absorption caractéristique de la silicone sont regroupées dans le tableau IV.10. Cependant, nous observons des bandes d'intensité plus élevées dans le cas de la silicone vieillie (à sec et sous pollution humide) par rapport à la silicone vierge. Cette intensification est plus marquée dans le cas d'un vieillissement sous pollution humide relativement au cas d'un vieillissement à sec. Ceci témoigne de la production d'un même mécanisme d'oxydation pour l'ensemble des échantillons. Le vieillissement électrique du matériau favorise ce mécanisme à un degré plus élevé sous pollution humide. Il est à noter que la position des bandes d'absorption n'a pas changé, sans pour autant avoir disparition ou apparitions de pic, ce qui signifie que le matériau dans ce cas n'a pas subi de modification dans sa structure moléculaire mais une légère altération liée à l'oxydation, ce qui pourrait contribuer à la diminution de son indice d'hydrophobicité.

Tableau IV.10 – Différentes bandes d'absorption caractéristiques de la silicone.

Bandes d'absorption (cm^{-1})	Attribution
793	Vibration d'élongation des liaisons Si-O
1261	Vibrations des liaisons Si-CH ₃
3444	Vibrations de déformation de groupes O-H
1409	Vibrations d'élongations des liaisons C-O
2967	Vibrations d'élongation de la liaison C-H des groupements CH ₃

IV.5.2 Analyse par diffraction des rayons X (DRX)

La diffraction des rayons X constitue une des techniques les plus utilisées et les plus répondues pour l'identification des matériaux cristallins. Un faisceau de rayons X est diffracté sur un réseau de plans cristallins selon la loi de Bragg.

Les diagrammes de diffraction des rayons X aux faibles angles 2θ allant de 2 à 60°, de la silicone vierge, vieillie à l'état humide et à l'état sec ont été déterminés. De plus, pour une étude comparative, les spectres obtenus sont tracés sur un même système d'axes illustrés sur la figure (IV.27) ces spectres montrent une structure combinée entre une partie cristalline correspondant à un arrangement ordonné des atomes et une partie amorphe où les atomes qui constituent le matériau sont désordonnés car ils ne respectent aucun ordre à moyenne et grande distance. La coexistence d'une phase amorphe et d'une phase cristalline prouve l'aspect semi-cristallin de la silicone.

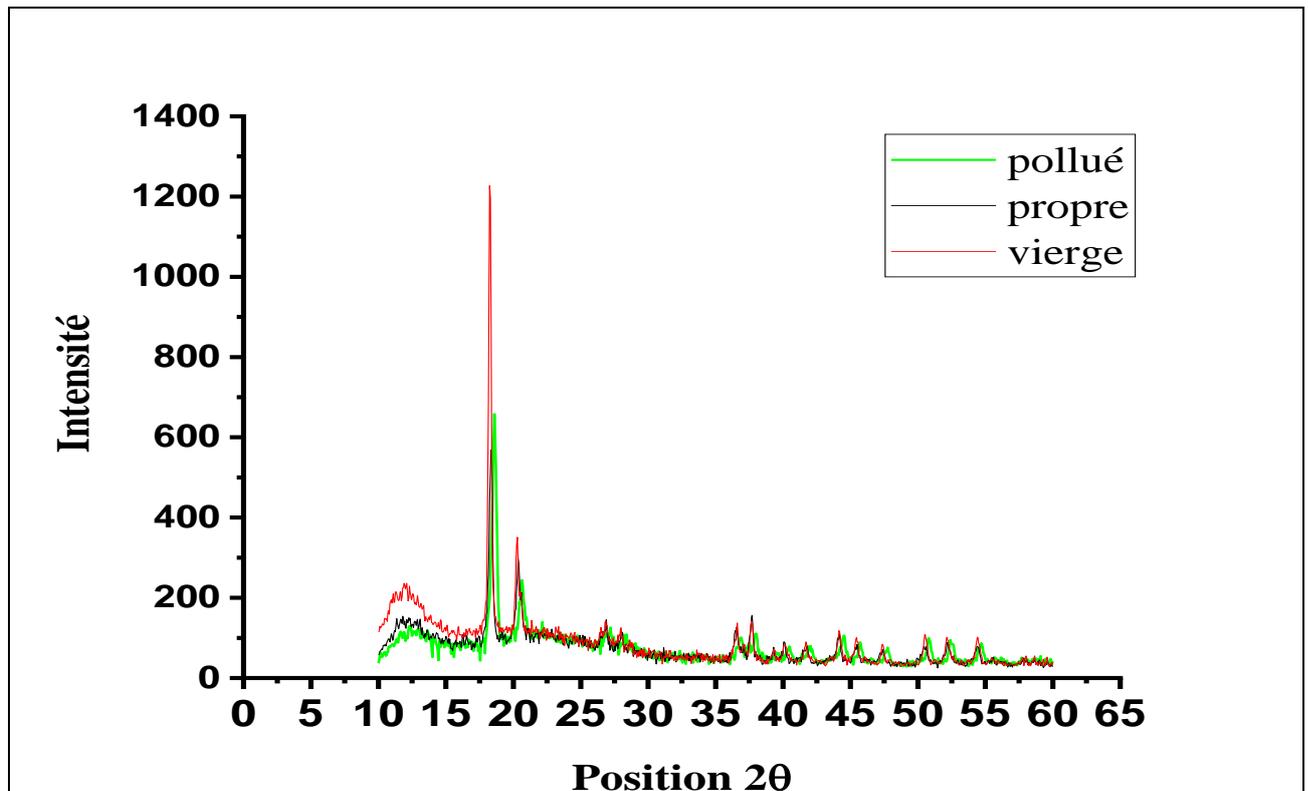


Figure. IV.27 – Spectre DRX des échantillons (vierges et vieillis) de la silicone.

En termes de nombre de pics, les spectres DRX des trois échantillons de silicone (vierge, vieillie électriquement à l'état propre, et sous pollution) sont quasi-identiques. Nous retrouvons, sur chacun des spectres, un pic de diffraction principal correspondant à une position 2θ , une distance basale (D_b) et une intensité (I_{ob}) respectives, témoignant de la présence d'une phase cristalline importante dans ces plans. Cependant, sur le plan intensité, position et largeur des pics mesurée à mi- amplitude, une différence notable est relevée entre ces derniers. Le tableau IV.11 résume les caractéristiques relatives à chacun des pics principaux des trois spectres

Tableau IV.11 : Caractéristiques des pics des spectres DRX des échantillons de la silicone.

Échantillons de silicone	Position $2\theta(^{\circ})$	Intensité Lobs (cts)	Distance basale Db ($^{\circ}$)	Largeur du pic à mi-amplitude ($^{\circ}$)	Décalage $\Delta 2\theta (^{\circ})$
Vierge	18.65	1084	4.83	0.41	0
Vieilli électriquement à l'état propre	18.40	474	4.79	0.31	0.25 A droite
Vieilli électriquement sous pollution	18.32	567	4.13	0.25	0.33 A droite

Par référence à la position angulaire $2\theta=18,65^{\circ}$ du pic principal relatif à l'échantillon de silicone vierge, les décalages angulaires des pics principaux relatifs aux échantillons vieillis à l'état propre de $\Delta 2\theta=0,25^{\circ}$ et sous pollution de $\Delta 2\theta=0,33^{\circ}$ vers les grands angles, témoignent d'une déformation de la structure du matériau. De même, les variations des intensités et des largeurs des pics traduisent une différence des taux de cristallinité des trois cas d'échantillons analysés. Le pic relatif à l'état vierge du matériau est plus étroit et plus intense, par rapport aux pics relatifs aux états vieillis du matériau. Le pic relatif à l'échantillon vieilli sous pollution est plus large et plus intense que son homologue vieilli à l'état propre (figure IV.28). Ces constats peuvent s'expliquer après détermination des taux de cristallinités des trois différents échantillons analysés, dressés dans le tableau (IV.11) précédant.

À l'angle $2\theta = 20,25^{\circ}$ correspondant à un plan basal de distance $4:03^{\circ}A$, un pic de diffraction d'intensité moins importante est détecté, démontrant la présence d'un taux de cristallinité dans ce plan. Ce pic diminue d'intensité, est décalé vers les grands angles et s'élargit suite à l'exposition de la silicone aux différentes conditions de vieillissement humide et à sec. Ceci explique, encore une fois, que la structure cristalline de la silicone a été affectée par le vieillissement électrique, renforçant ainsi sa phase amorphe. Ce constat est accentué dans le cas d'un vieillissement sous pollution de la silicone (figure IV.28).

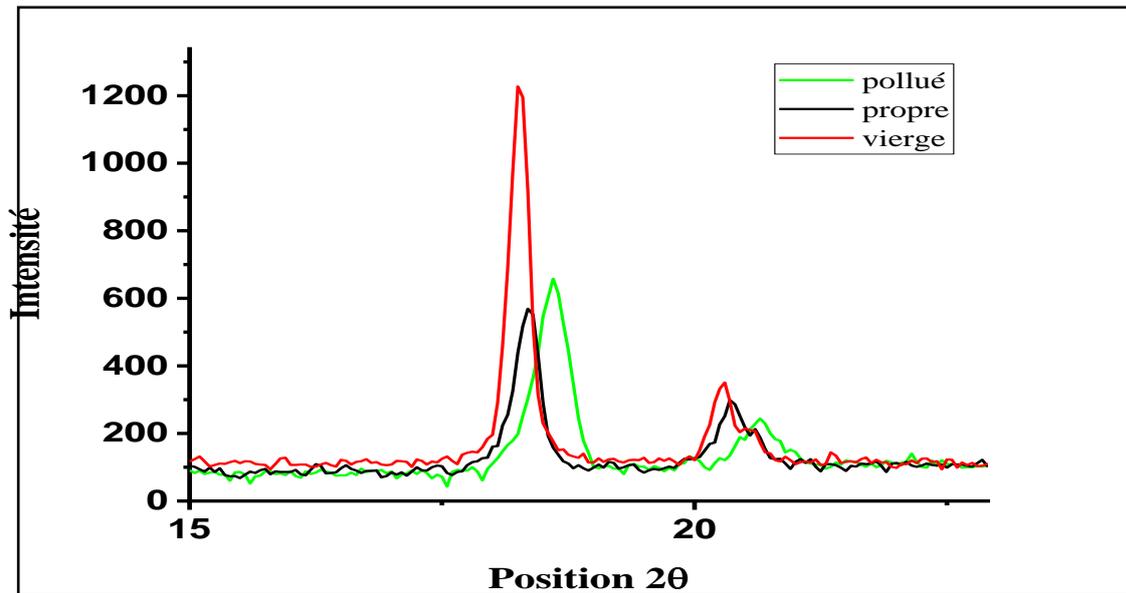


Figure. IV.28– Spectre DRX des échantillons vierge et vieillis de silicone à $2\theta = 18.65^\circ$ du pic principal.

Le spectre DRX de la silicone vierge présente également un large et faible pic de diffraction à $2\theta = 12^\circ$, correspondant à une distance basale de 7.37Å . Ce pic indique aussi la présence d'une phase cristalline dans ce plan. Cependant, ce pic est quasi absent dans le cas de la silicone vieillie à l'état propre ou pollué, ceci s'explique par un changement de phase du matériau vers un état amorphe. Cette mutation de l'état du matériau est plus marquée dans le cas de la silicone vieillie sous pollution (figure IV.29).

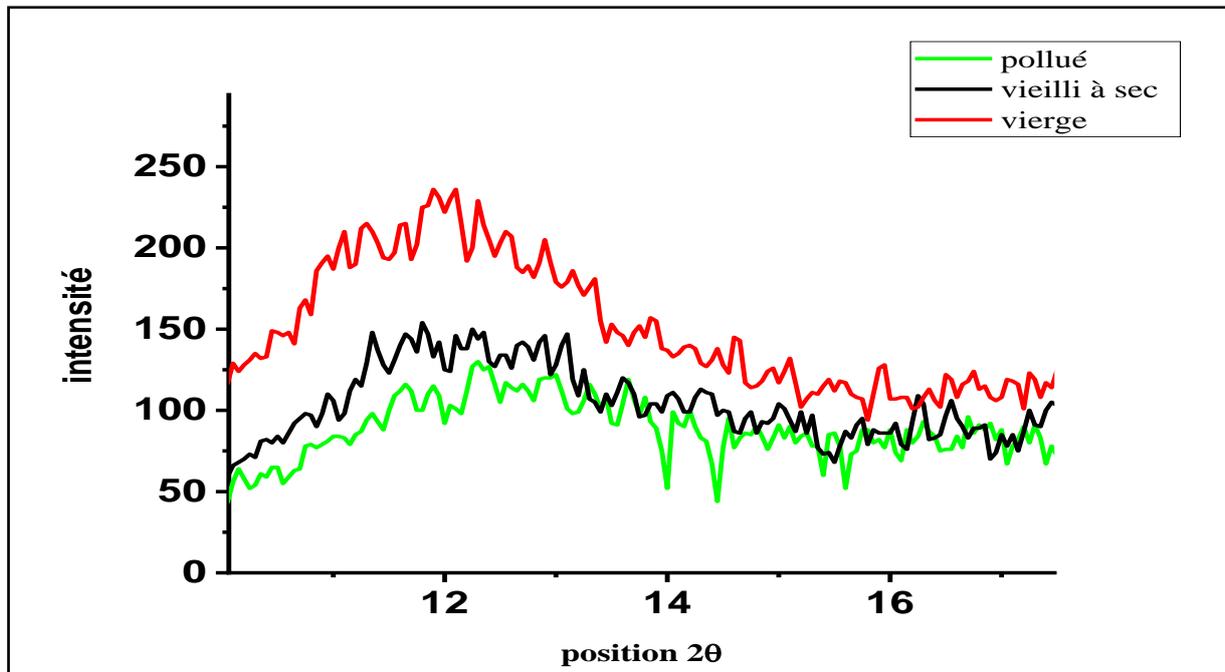


Figure. IV. 29 – Spectre DRX des échantillons vierge et vieillis de silicone à $2\theta = 12^\circ$.

La fraction massique d'unités structurales présentes dans la zone cristalline des polymères semi cristallin définit le taux de cristallinité X_c donné par l'équation (IV.1), telle que :

$$\chi_c(\%) = \frac{x_1}{x_1 - x_2} \times 100 \quad (\text{IV.1})$$

Avec :

- x_1 : Surface de pic (mm^2)
- x_2 : Surface totale (mm^2)

Le tableau ci-dessous (IV.12) résume les taux de cristallinité des trois différents échantillons analysés, calculés selon l'équation IV.1, moyennant le logiciel "X'Pert Highscore".

Tableau IV.12– Taux de cristallinité des différents échantillons analysés de silicone.

Échantillon de silicone	$\chi_c(\%)$
Vierge	65
Vieilli sous pollution humide	57
Vieilli à sec	61

Les résultats obtenus dans le tableau que nous venons de voir (IV.12) montrent que le vieillissement électrique de la Silicone, aussi bien sous pollution humide qu'à l'état propre, induit une perte en taux de cristallinité, relativement à l'état vierge de ce matériau. Cette perte se produit au profit de la phase amorphe qui est ainsi renforcée et qui constitue une zone du matériau électriquement faible.

Nous remarquons également que la perte en taux de cristallinité est plus accentuée dans le cas d'un vieillissement électrique sous pollution que le cas d'un vieillissement à sec. La pollution humide favorise la destruction des cristallites, ce qui accélère la dégradation du matériau, ce qui pourrait expliquer la diminution de son indice d'hydrophobicité.

IV.6 Analyses thermiques

Le comportement thermiques de la silicone avant et après vieillissement sous une contrainte de champ électrique avec ou sans facteur de pollution, est évalué par une analyse thermogravimétrie (ATG/DTG). Les thermo grammes de l'ATG et la DTG (dérivée de l'ATG), relatifs aux échantillons de silicone vierge, vieilli électriquement à l'état propre (sec) et vieilli électriquement sous pollution humide conductrice (à $\sigma = 0.2 \text{ ms}$ et $\sigma = 5 \text{ ms}$), donnent l'évolution du pourcentage de la perte de masse et la vitesse de la perte de masse par rapport à un état de référence, respectivement, en fonction de la variation de la température.

Les thermo grammes des analyses ATG/DTG nous ont permis de déterminer les températures de dégradation thermique (la température initiale de décomposition (T_i), la température du maximum de dégradation (T_m), la température de fin de dégradation (T_{fd}), ainsi que la perte de masse (%) et le taux de résidu (%), des échantillons de la silicone. Ces résultats sont illustrés sur les figures (IV.30 et IV.31).

La stabilité thermique des différents échantillons de la silicone avant et après vieillissement a été étudiée par l'analyse thermogravimétrie (ATG). Cette analyse nous a permis, en effet, de mettre en évidence l'influence du vieillissement électrique et de la pollution sur la dégradation de la silicone solide. Les thermo- grammes de l'ATG, ainsi obtenus, nous ont permis de déterminer les températures de tenue thermique (température de dégradation initiale T_i et température de fin de dégradation T_{fd}), ainsi que le taux de perte de masse (%). Lors de l'analyse, nous avons suivi l'évolution de la masse des échantillons de la silicone en fonction de la température sous azote à une vitesse de chauffe de $20^\circ\text{C} / \text{min}$ sur un intervalle de température allant de 0 à 1000°C . La perte en masse due à la formation des produits volatils durant la dégradation est suivi en fonction de la température. Les résultats de l'analyse ATG/DTG sont représentés dans la figure (IV.30).

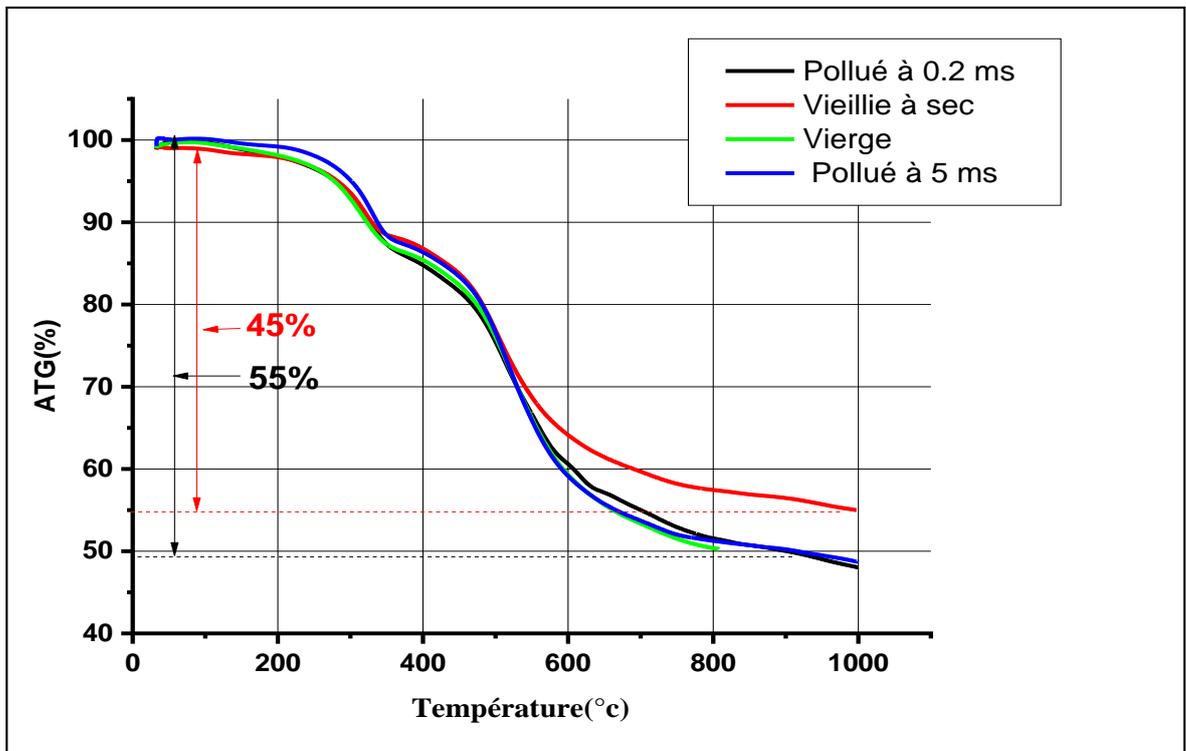


Figure IV.30– Thermogrammes ATG de la silicone vierge, vieillie électriquement à sec et sous pollution humide de conductivité $\sigma = 0.2 \text{ ms}$ et $\sigma = 5 \text{ ms}$.

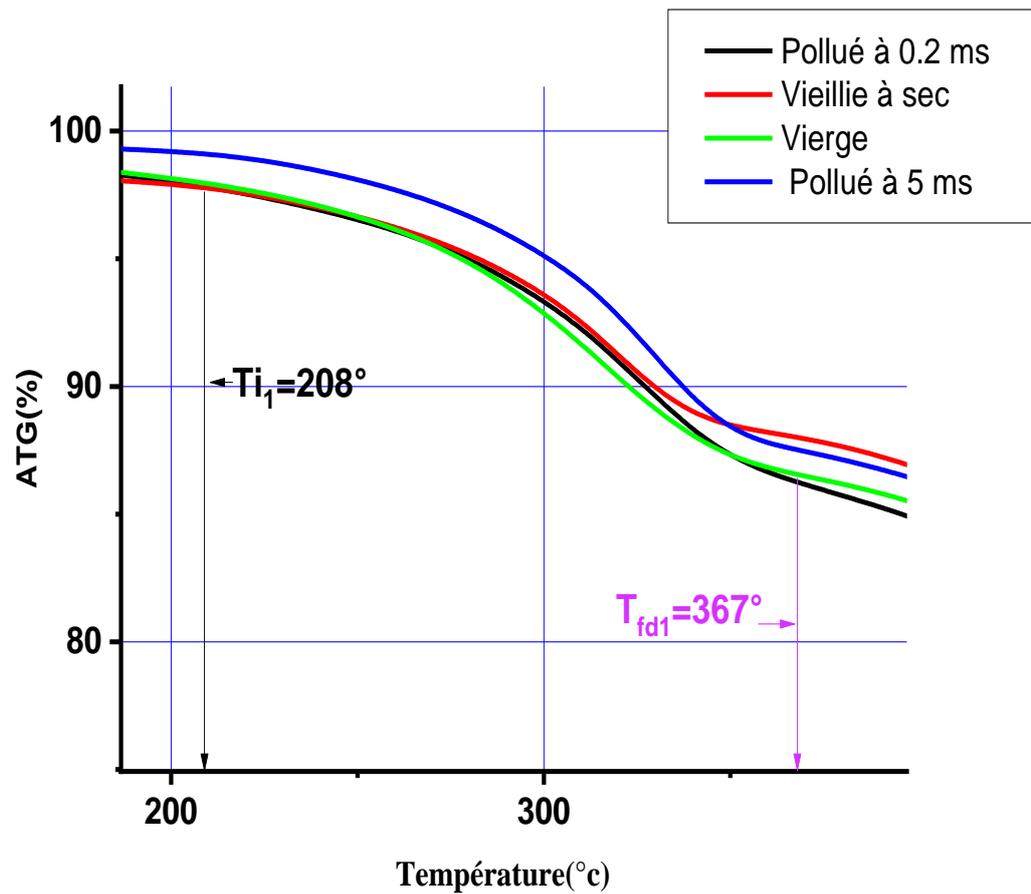


Figure IV.30.a – Thermogrammes ATG de la silicone vierge, vieillie électriquement à sec et sous pollution humide de conductivité $\sigma = 0.2 \text{ ms}$ et $\sigma = 5 \text{ ms}$ - Zoom sur les températures de fin de dégradation.

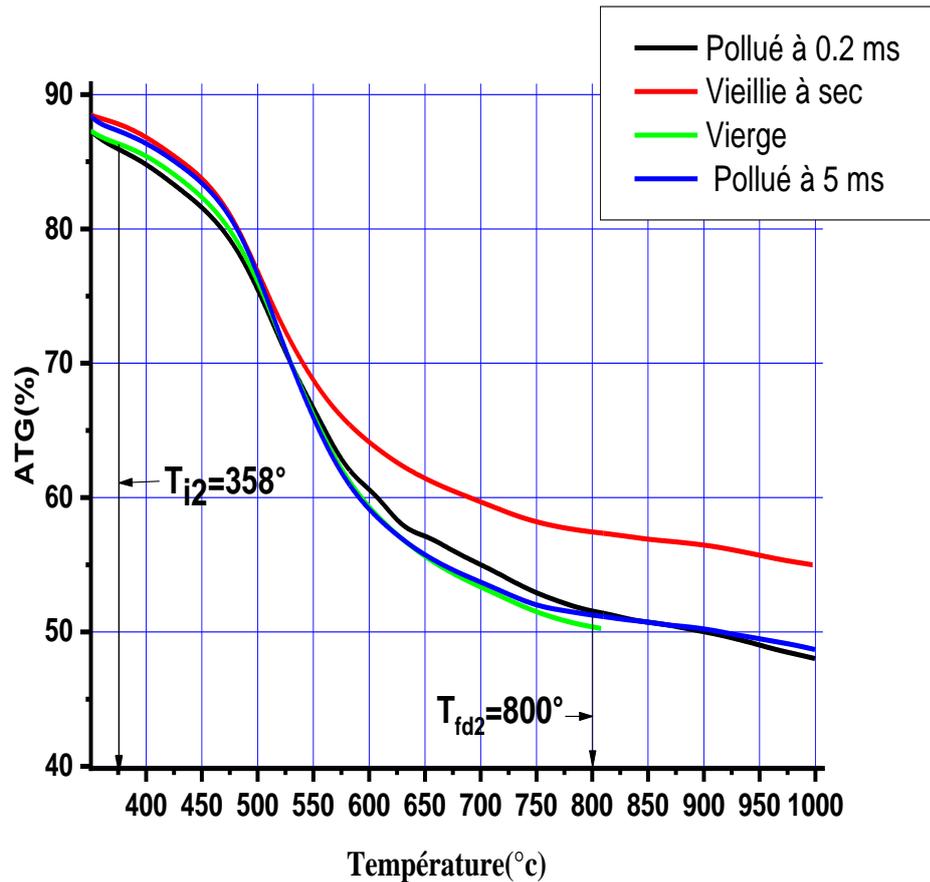


Figure IV.30.b – Thermogrammes ATG de la silicone vierge, vieillie électriquement à sec et sous pollution humide de conductivité $\sigma = 0.2 \text{ ms}$ et $\sigma = 5 \text{ ms}$ - Zoom sur les températures de fin de dégradation thermique T_{fd}

Les résultats montrent que les échantillons de silicone vierge et vieillis électriquement (à sec et sous pollution humide de conductivité $\sigma = 0.2 \text{ ms}$ et $\sigma = 5 \text{ ms}$) affichent une bonne tenue thermique, allant jusqu'à une température initiale de décomposition T_{i1} égale à 208°C , pour le cas vierge et vieilli électriquement à sec et sous pollution à $\sigma = 0.2 \text{ ms}$. Cette température de tenue thermique est augmentée sous l'effet du vieillissement électrique sous pollution humide à $\sigma = 5 \text{ ms}$ ($T_{i1} = 248^{\circ}\text{C}$). Remarquons, également, que la dégradation thermique de toutes les formulations se produit en deux étapes et sur deux plage de températures,

La premier comprise entre 208°C (température initiale de dégradation T_{i1}) et 367°C , (température de fin de première dégradation T_{fd}). S'en suit la rupture totale de la tenue thermique de tous les échantillons du matériau, se traduisant par une perte de masse importante, synonyme d'une mauvaise tenue thermique de la silicone, aux fortes températures.

Cette chute brutale commence de la température $T_{i2} = 370^{\circ}\text{C}$ jusqu'à $T = 763^{\circ}\text{C}$ pour l'échantillon vieilli à sec, alors que la température de dégradation total pour les deux cas

d'échantillons (vierge et sous pollution humide de conductivité $\sigma = 0.2 \text{ ms}$, celle-ci commence à $T_{i2}=358^\circ\text{C}$ jusqu'à $T=800^\circ\text{C}$ et enfin pour l'échantillon vieilli sous pollution humide de conductivité $\sigma = 5 \text{ ms}$, la température de dégradation commence de $T_{i2}=372^\circ\text{C}$ jusqu'à $T=877^\circ\text{C}$.

Une différence de perte de masse d'environ 7% qui avantage le matériau vieilli électriquement à sec, est notée entre ce dernier et les cas vierge, et vieillis sous pollution humide de conductivité $\sigma = 0.2 \text{ ms}$ et $\sigma = 5 \text{ ms}$.

Dans tous les cas envisagés, le matériau ne subissait aucune perte de poids jusqu'à une température de tenue assez grande où la destruction du matériau commence à s'opérer. Ce résultat indique que les conditions de fonctionnement sous-normales seront sans danger pour le polymère et qu'il n'y aura pas de destruction en fonctionnement normal.

Remarquons également que la quantité du résidu enregistrée est importante (environ 50 à 60 %), ce qui signifie que le matériau contient beaucoup d'additifs minéraux.

La figure (IV.30) illustre les spectres de l'analyse DTG, qui représente la dérivée du thermogramme de l'analyse thermogravimétrique (ATG), des différents échantillons étudiés. Ces courbes nous permettent de déterminer les températures du maximum de décomposition (T_m) des échantillons de la silicone, déterminées aux points de leur asymptote horizontale.

Le point de maximum de dégradation de la silicone vierge atteint une température élevée $T_m = 538^\circ\text{C}$. Cette température est légèrement plus grand dans le cas de la silicone vieilli à l'état propre ($T_m = 526^\circ\text{C}$), alors que les échantillons vieilli sous pollution ($\sigma=0,2 \text{ mS}$ et $\sigma= 5 \text{ ms}$) atteignent une dégradation maximale au même point à la température $T_m = 512^\circ\text{C}$ plus faible.

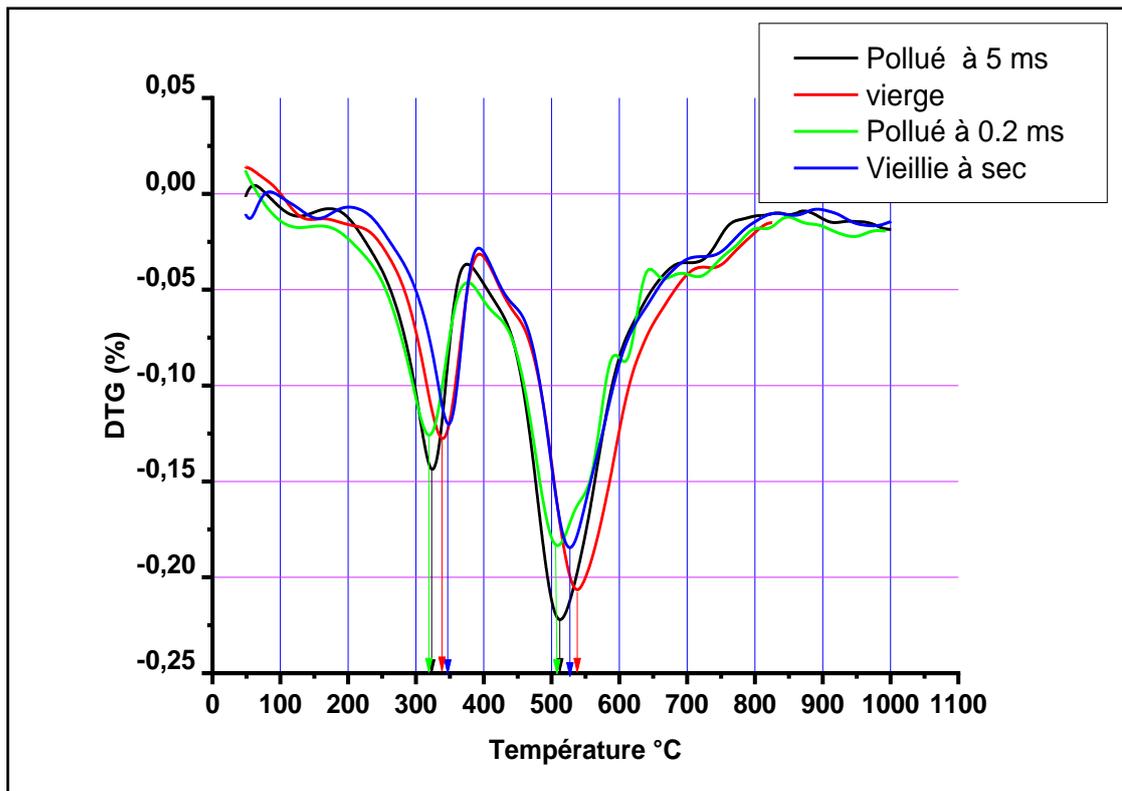


Figure. IV.31 – Thermo-grammes DTG de la silicone vierge, vieillie électriquement à sec et sous pollution humide de conductivité $\sigma = 0.2 \text{ ms}$ et $\sigma = 5 \text{ ms}$.

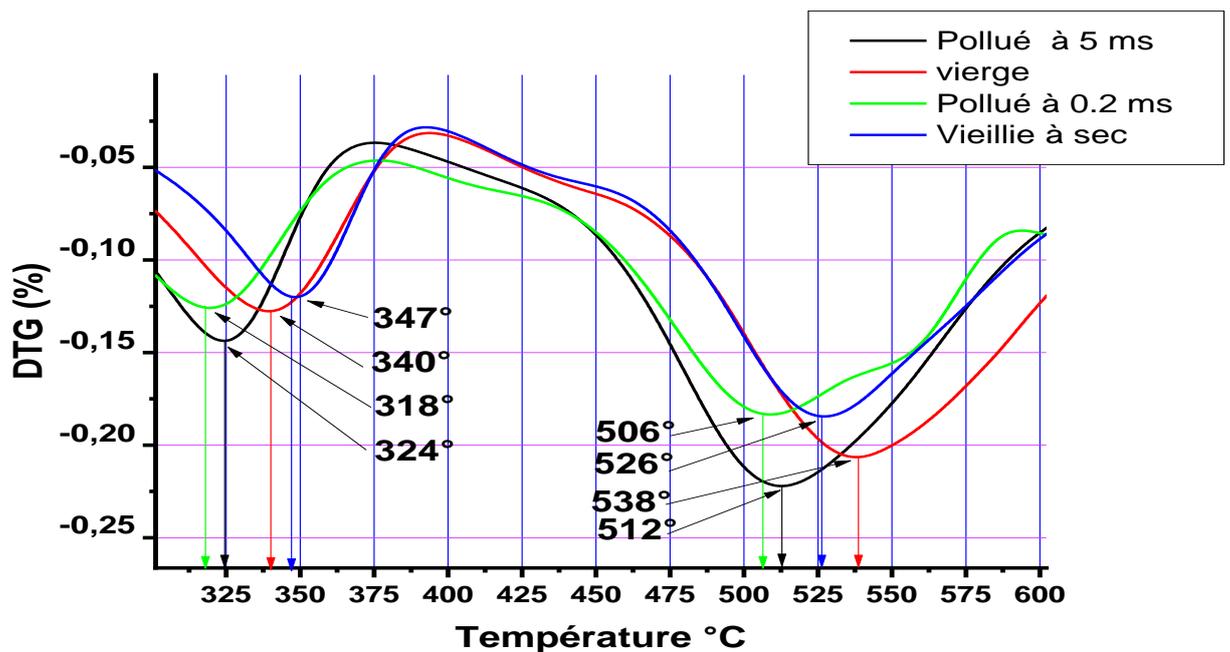


Figure IV. 32 – Thermogrammes DTG de la silicone vierge, vieillie électriquement à sec et sous pollution humide de conductivité $\sigma = 0.2 \text{ ms}$ et $\sigma = 5 \text{ ms}$ - Zoom sur le point de maximum de dégradation thermique

Tableau IV.13 – Tableau récapitulatif des températures des échantillons de silicone, vierge, vieillie électriquement sous pollution humide de conductivité $\sigma = 0.2 \text{ ms}$ et $\sigma = 5 \text{ ms}$ et vieillie électriquement à sec.

Échantillons de silicone	T_{i1} (°C)	T_{f1} (°C)	T_{i2} (°C)	T_{f2} (°C)	T_{max1} (°C)	T_{max2} (°C)	$\Delta m\%$
Vierge	208	367	358	800	270	540	54
Vieilli électriquement sous pollution humide de conductivité 0.2 ms .	208	367	358	800	270	540	54
Vieilli électriquement sous pollution humide de conductivité 5 ms .	208	367	372	877	270	525	58
Vieilli électriquement à sec	208	367	370	763	270	525	52

IV.7 Discussion des résultats

Les différents résultats de mesures et d'analyses obtenus lors de cette étude nous ont permis de faire certaines constatations et de tirer quelques conclusions que nous résumons comme suit :

- les paramètres tels que le volume et la conductivité des gouttelettes d'eau peuvent décider du comportement de ces dernières sur la surface de l'isolation ;
- La performance de la surface hydrophobe en silicone, recouverte de grande goutte d'eau ($V_I=0,3$ à 0.4ml) est obtenue pour un angle d'inclinaison minimum de celle-ci égal à $\alpha=30^\circ$. Cette valeur s'étend à $\alpha=60^\circ$ pour les volumes moyens des gouttes ($V_I=0.2\text{ml}$), et au-delà à $\alpha=120^\circ$ pour les petites gouttes ($V_I=0.1\text{ml}$) ;
- La conductivité des gouttes d'eau dégrade la propriété hydrophobe de la surface de silicone ;
- L'effet de la position des gouttes d'eau sur la surface de la silicone, sur l'hydrophobicité de cette dernière n'est pas notable ;
- La silicone vierge présente un indice d'hydrophobicité (IH) de plus basse valeur, ce qui traduit le bon état de la surface, par contre, l'IH augmente avec le vieillissement du matériau en raison de l'érosion de sa surface ;
- Remarquons aussi, qu'en dépit du vieillissement électrique sévère de la silicone et de la présence de la couche polluante conductrice humide, les gouttelettes d'eau en surface

de cette dernière n'ont pas perdue leur forme arrondie, ce qui témoigne du bon caractère hydrophobe de la silicone. Cependant, la perte d'hydrophobicité enregistré notamment dans le cas de la silicone vieillie électriquement, avec ou sans présence de la pollution, pourrait être expliquée par les mécanismes suivants :

- La faible hydrophobicité de l'échantillon de silicone vieilli électriquement s'explique par le bilan des forces de tension superficielle γ_{SL} , γ_{LV} , γ_{SV} , (voir la figure II.7, § II.2.1.2.a), où la tension γ_{SV} est inférieure à la tension γ_{SL} qui tend à augmenter l'aire entre la paroi du matériau et le liquide ;
- Le caractère apolaire de la silicone vierge l'empêche de faire d'interactions électrostatiques avec l'eau, de type dipôle permanent/dipôle permanent (forces de Keesom et la basse énergie de surface du matériau silicone par rapport à l'énergie plus élevée du liquide (eau), s'exprime alors par l'empilement des molécules d'eau les unes sur les autres lui donnant cet aspect hydrophobe. Sous l'effet du vieillissement électrique, la silicone perd de son caractère apolaire, ce qui lui permet de créer des liaisons hydrogène avec les molécules d'eau qui est très polaire et qui cherche à interagir avec des molécules polaires, ce qui conduit à une plus importante migration des molécules d'eau vers la surface du matériau, diminuant par là son indice d'hydrophobicité ;
- La dégradation de la silicone sous l'effet de la contrainte de champ appliqué peut être liée directement à la fragilisation de ce matériau suite au changement de phase opéré, au mécanisme d'oxydation produit et à l'altération de sa surface sous l'effet de l'intense énergie de décharge, ce qui se traduit par une diminution de ses performances électrique et physique.
- L'analyse DRX a révélé que la structure moléculaire de la silicone est affectée par l'action du champ électrique appliquée et par la présence de la pollution conductrice humide. La perte de cristallites pourrait être produite par les forces résultant de l'interaction du champ électrique alternatif avec des molécules polaires (des zones amorphe) de la silicone. Le caractère polaire de la solution polluante conductrice (Na Cl) contribue à cette dégradation ;
- Le vieillissement électrique affecte l'état de surface de la silicone qui se carbonise suite au passage de la décharge électrique. Ceci lui confère un aspect

mât et poreux, Cette dégradation est due à l'oxydation de la silicone qui se produit sous l'effet couronne, suite à l'application du champ électrique. Des changements de phases et des ruptures de chaînes moléculaires conduisant à un dégagement gazeux d'hydrogène sont alors révélés par les analyses FTIR et DRX de la silicone, expliquant la détérioration de ses propriétés mécaniques et électriques et par là l'augmentation de son indice d'hydrophobicité (IH) ; Ce dernier est affecté car pour réacquérir une stabilité chimique, à l'échelle moléculaire, la paroi du matériau manifeste une attirance entre le carbone C et l'hydrogène H qui constitue la molécule d'eau, d'où leur attachement et l'effet mouillage qui augmente.

IV.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté et discuté les résultats de l'analyse de l'évolution de l'hydrophobicité de la surface d'une plaque de silicone en fonction de la déclinaison de cette dernière sous l'effet de différents paramètres mis en jeu, tels que le volume, la distribution et la conductivité des gouttes d'eau qui y sont déposées, ceci pour quatre états de surface de la silicone : vierge, vieillie à sec et vieillie sous pollution humide conductrice de conductivité $\sigma=0,2$ mS et $\sigma=5$ mS. A la lumière des résultats des essais réalisés nous avons pu tirer les conclusions suivantes:

L'angle de contact θ des gouttes posées sur la surface de la plaque de silicone, croît à mesure que l'angle de déclinaison α de cette dernière augmente, ceci est vrai quel que soit la variante (volume, conductivité, distribution) des gouttes, considérée.

Pour un angle d'inclinaison de la surface hydrophobe en silicone $\alpha > 30^\circ$, la performance de cette dernière croît à mesure que la goutte devient fine. Celle-ci continue de perler jusqu'à atteindre un angle limite provoquant son expulsion par glissement sur la surface. La goutte glisse en conservant une forme arrondie de son front, laissant derrière elle une surface sèche.

La conductivité des gouttes d'eau et le vieillissement sous une contrainte de champ électrique avec ou sans pollution, altèrent le caractère hydrophobe de la silicone.

La dégradation de la silicone sous l'effet de la contrainte de champ appliqué peut être lié directement à la fragilisation de ce matériau suite au changement de phase opéré, au mécanisme d'oxydation produit et à l'altération de sa surface sous l'effet de l'intense énergie de décharge.

En effet, l'analyse IRTF a montré que la contrainte du champ électrique renforce le mécanisme d'oxydation de la silicone (présence des liaisons C=O et O-H) qui est un processus naturel de vieillissement des matériaux et ce processus est accéléré en présence d'une pollution

conductrice. Les résultats de la diffraction de rayons X (DRX) ont révélé une modification de la microstructure de la silicone et une diminution du taux de cristallinité après le vieillissement électrique sous différentes conditions imposées, ceci signifie un renforcement de la phase amorphe qui constitue les zones électriquement faibles du matériau. L'exposition à une pollution conductrice favorise ce changement d'état, ce qui est en faveur du vieillissement électrique du matériau.

D'autre part, l'analyse microscope optique a permis d'observer une dégradation de la surface de la silicone dépolie suite au passage de la décharge. Les traces laissées par cette dernière suivent les zones amorphes électriquement faibles orientées dans la direction du champ électrique. Les analyses thermiques montrent une bonne stabilité thermique de la silicone sous l'effet du vieillissement électrique avec ou sans présence de pollution.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif principal de notre travail est d'analyser l'évolution de l'hydrophobicité de la surface d'une plaque de silicone en fonction de la déclinaison de cette dernière sous l'effet de différents paramètres mis en jeu, tels que le volume, la distribution et la conductivité des gouttes d'eau qui y sont déposées, ceci pour quatre états de surface de la silicone : vierge, vieillie à sec et vieillie sous pollution humide conductrice de conductivité $\sigma=0,2$ mS et $\sigma=5$ mS. Cette étude est complétée par des analyses chimiques IR, DRX, ATG/DTG et microscopie optique. Ces investigations ont été réalisées aux laboratoires de haute tension et de génie des procédés des universités de Bejaia et de Tizi-Ouzou.

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

- L'angle de contact θ des gouttes posées sur la surface de la plaque de silicone, croit à mesure que l'angle de déclinaison α de cette dernière augmente, ceci est vrai quelque soit la variante (volume, conductivité, distribution) des gouttes, considérée.

- Pour un angle d'inclinaison de la surface hydrophobe en silicone $\alpha > 30^\circ$, la performance de cette dernière croit à mesure que la goutte devient fine. Celle-ci continue de perler jusqu'à atteindre un angle limite provoquant son expulsion par glissement sur la surface. La goutte glisse en conservant une forme arrondie de son front, laissant derrière elle une surface sèche.

- La conductivité des gouttes d'eau et le vieillissement sous une contrainte de champ électrique avec ou sans pollution, altèrent le caractère hydrophobe de la silicone.

- L'effet de la position des gouttes d'eau sur la surface de la silicone, sur l'hydrophobicité de cette dernière n'est pas notable.

- La silicone vierge présente un indice d'hydrophobicité (IH) de plus basse valeur, ce qui traduit le bon état de la surface, par contre, l'IH augmente avec le vieillissement du matériau en raison de l'érosion de sa surface.

- Le vieillissement de la silicone, sous l'effet de la contrainte du champ électrique, affecte ces performances électriques (diminution de sa rigidité diélectrique longitudinale, de ses résistances et résistivités longitudinales et transversales et de sa capacité (permittivité électrique) et augmentation de son facteur de perte) et physique (perte partielle de l'hydrophobicité).

- Cette dégradation est liée à la fragilisation de la silicone à l'échelle microscopique due au changement de phase d'un état cristallin à l'état amorphe de certaines zones du matériau et au mécanisme d'oxydation qui est accéléré sous l'effet de la contrainte de champs électrique,

ainsi qu'à la modification de sa morphologie superficielle due au passage de la décharge électrique qui à provoqué un dépoli de la surface du matériau.

Bibliographie

1 Bibliographie

- [1]. V. Mohan, K. Chandrasekharan, and K. Padmanabhan, "Marangoni effects under electric fields," *Adv. Space Res.*, vol. 3, no. 5, pp. 177–180, 1983.
- [2]. J. F. Hall, "History and bibliography of polymeric insulators for outdoor applications," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 8, no. 1, pp. 376–385, 1993.
- [3]. J. Y. Zhu, M. Otsubo, C. Honda, and S. Tanaka, "Loss and recovery in hydrophobicity of silicone rubber exposed to corona discharge," *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 91, no. 7, pp. 1448–1454, juillet 2006.
- [4]. Site de Bluestar Silicones "<http://www.bluestarsilicones.com/silicones/lang/fr/bluestarsilicones/histoire>".
- [5]. F. Amir et KH. Namaoui: "étude du comportement d'un isolateur pollué soumis à une tension alternative" PFE Ingénieur, UAM Béjaïa, juin 2004.
- [6]. A. Chabloz, "Technologie des matériaux à l'usage de profession de l'électricité", 1986.
- [7]. A. Simuila, L. dascalescu et R. Tabazeon, "breakdown on ionized air gaps in the presence of spherical conductive particle" session 2143. 9th ISH, Graz 1995, pp. 1-4.
- [8]. Wacker, "silicones pour applications haute et moyenne tension" www.wacker.com.
- [9]. S. Djafri, "pollution des isolateurs". PFE Ingénieur, promotion 1982, ENP Alger.
- [10]. Wacker, "Silicones pour applications haute et moyenne tension" www.wacker.com.
- [11]. D. Namane, "Effet de la discontinuité de la pollution sur le comportement d'isolateur haute tension, sous la fréquence de 50 Hz", Mémoire de Magister, Génie Electrique, ENP1998.
- [12]. A. Mekhaldi, "Etude du développement d'un arc électrique sur des surfaces isolantes Contaminées par la pollution désertique", Mémoire de Magister, Génie Electrique, ENP1990.
- [13]. R. Bouzeroura, "Etude du développement d'arcs électriques parallèles sur une surface isolante non uniformément polluée sous tension continue", Thèse de magister, Université de Bejaia, 2009.
- [14]. F. Aouabed, "contribution à l'étude d'un circuit équivalent des isolateurs synthétiques sous pollution en utilisant l'EMTP", Thèse de Magister, Université Farhat Abbes Sétif, 2010.
- [15]. K. Naito, "Insulator Pollution. Part 1 : General aspects. Séminaire Des isolements des lignes et postes HT". Casablanca, 1989.
- [16]. M.A.B. EL-Koshairy et F.A.M. Rizk, "Comportement des isolateurs des lignes de transport THT dans les conditions de pollution désertiques", CIGRE, Rapport 33-05, 1978.
- [17]. F. Frifra et N. Rezak, "Etude physico-chimique du dépôt de pollution sur la surface des isolateurs HT". PFE, Département de chimie industrielle, USTO-MB, Algérie, 1999.
-

- [18]. CEI 815 "Guide pour le choix des isolateurs sous pollution", 1986.
- [19]. K. Chrzan, "Conductivity of Aqueous Dust Solutions", *IEEE Trans on E.I.*, Vol. EI-22, Issue. 3, pp. 241-244, 1987.
- [20]. A. Mekhaldi, "Etude du développement d'un arc électrique sur des surfaces isolantes contaminées par la pollution désertique", *Thèse de Magister, Génie Electrique, ENP 1990.*
- [21]. A. Mekhaldi, "Etude des phénomènes de conduction et de décharge électrique sur des surfaces isolantes polluées sous tension alternative 50 Hz", *Thèse de doctorat d'état, Génie Electrique, ENP Alger, 1999.*
- [22]. Z. Sahli, « Etude de la non uniformité de la pollution sur les caractéristiques de contournement des isolateurs réels sous tension continue », *Thèse de Magister, département d'électrotechnique, Université Abderrahmane Mira de Bejaia.*
- [23]. B. Hammoum, A. Kerbouche, "Etude du Phénomène de Pollution des Isolateurs de Haute Tension dans la Région Electrique du Centre Algérien", *Mémoire de projet de fin d'études, Génie Electrique, ENP 2007.*
- [24]. . Camidor, M. Cojan, P. Haute feuille, M. Morceau "Méthodes de dimensionnement des isolateurs de lignes aériennes en régions polluées " *CIGRE, Rapport 33-04, 1978.*
- [25]. A. Cimador, S. Vitet, "La Pollution des Isolateurs", *EDF-Epure, No 27, Juillet 1990.*
- [26]. F. Amidi, k. Ouerdane, "Les effets de la pollution sur les ouvrages électriques a 30kV en régions littorales", *Projet de fin de cycle, Département d'Electrotechnique, Universités des Sciences et Technologies Houari Boumediene, Bab Ezzouar, juin 1998.*
- [27]. C. H. A. Ely, P. J. Lambeth, J. S. T. Looms, D. A. S. Surift, Legb, "contournement des polymères humides et pollués", *L'ailette booster, rapport 15-02 1978.*
- [28]. I. Kimoto, T. Fujimura, "performance of isolateurs for direct current transmission line under polluted condition", *IEEE, trans, on pas vol pas 92 N3. PP 934 949, may june 1973.*
- [29]. Philippe Jorda N, *Publication, 14 novembre 2008.*
- [30]. W. Reider, "plasma und lichtbogen", *vierwegverlag, brunschweig, pp 128-132, 1967.*
- [31]. kind, karner, "heth voltage, experimental technique", *VIEWEG édition, 1978.*
- [32]. S. H. Kim, E. A. Cherney, R. Hackam, "hydrophobic behavior of insulators coated with rtv silicone rubber", *IEEE Transactions on Electrical Insulation, 27(3), june 1992.*
- [33].] G. Riquel, M. Fourmigue, M. Noel, D. de Becker, R. Parraud, "natural and artificial aging of non-ceramic insulators, evaluation of techniques", *9th International Symposium on High Voltage Insulators Graz, 1995.*
- [34]. H. M. Schneider, W. M. Guidi, J. T. Burnham, R. S. Gorur, J. F. Hall, "Accelerated aging and flashover test on 138 kv non-ceramic line post insulators", *EEE Transaction on power Delivery, 8(1), 1993.*
-

[35]. A. E. Vlastos, S. M. Gubanski, "surface structural changes of naturally aged silicone and epdm composite insulators", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 6, 1991.

[36]. J. Faerber, "Microscopie électronique à balayage Microanalyse X par sonde électronique", *Institut de Physique et Chimie des Matériaux de Strasbourg*, 2004.

[37]. P. Combette, I. Ernoult, "physique des polymères", Tome 1, "structure, fabrication, emploi". *Hermann Editeurs*, 2005.

[38]. C. Paris, "Etude et Modélisation de la Polymérisation Dynamique de Composites à Matrice Thermodurcissable", thèse de doctorat à *Institut National Polytechnique de Toulouse*, 2011.

[39]. N. Rouha, "Caractérisation Electrique et Physico-chimique des Arborescences Electriques dans l'EPDM", *Thèse de Doctorat en Electrotechnique E.N.P Algérie*, 2014.

