



**République Algérienne Démocratique et Populaire**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

**Université A.MIRA-BEJAIA**

**Faculté de Technologie**

**Département de Génie Electrique**

**Réalisé par :**

**Melle BENAMER Betitra**

**Melle BENYAHIA Sara**

## **Mémoire de fin d'étude**

**En vue de l'obtention du diplôme master en électrotechnique**

**Option : Electrotechnique industrielle**

**Réseaux électriques**

**Thème**

**Effet de l'inclinaison d'une isolation en silicone  
sur le degré d'humidification de sa ligne de  
fuite sous tension alternative**

**Soutenu publiquement le 26 / 09 / 2021 devant les jurys composé de :**

**A. Bendahmane**

**U.A.M.Bejaia**

**Présidente**

**N. Rouha**

**U.A.M.Bejaia**

**Examinatrice**

**S.SLIMANI**

**U.A.M.Bejaia**

**Promotrice**

**Promotion: 2020/2021**

## **REMERCIEMENT**

Nous remercions avant tout le grand Dieu qui nous a donné la force, le courage et la patience de faire ce modeste travail.

Nous exprimons notre profonde reconnaissance et nos sincères remerciements à notre promotrice, **Mme Atmani Samia**, pour ses encouragements et ses précieuses orientations durant notre travail.

Nos plus vifs remerciements s'adressent à notre Co-promoteur, **Mr Boudissa Rabah** Allah yerhmo, pour son accueil, sa confiance, ses encouragements, son suivi et ses précieux conseils. Sa grande qualité scientifique et son entière disponibilité ont fortement contribué à l'accomplissement de ce travail.

Il nous a apporté beaucoup de joie, de bonheur et de savoir faire. Il était une personne drôle, généreuse. On ne sait pas comment le remercier, pour tout ce qu'il a fait pour nous, que ce soit de la joie, de l'apprentissage ou autre chose.

Merci infiniment, que le bon dieu vous accueille dans son vaste paradis.

Nous tenons plus largement à exprimer notre reconnaissance à tous ceux et celles qui ont contribué de près ou de loin au bon déroulement de notre travail.

Que les membres du jury trouvent ici l'expression de notre gratitude et nos vifs remerciements pour avoir accepté d'examiner et évaluer ce travail.

**BETITRA**

**SARA**

## **DÉDICACE**

*Je dédie ce modeste travail*

*A ma très chère mère*

*Pour tous les sacrifices qu'elle a fait pour m'offrir le climat idéal de travail et qui m'a apporté son soutien depuis toujours, son encouragement et ses conseils dans les soucis de ma réussite.*

*A mes chères sœurs et frères*

*A ma collègue sara*

*Et enfin à tous mes amis et tous qui me sont très chers.*

**BETITRA**

Je dédie ce modeste travail à :

Mes parents qui m'ont toujours soutenu depuis ma naissance et  
durant toute ma vie.

Mes grands parents

Mon binôme Betitra

Mes frères et ma sœur

Ma chère tante Samia

Ma meilleure amie Lahna et ma cousine Hylda.

**SARA**

## Sommaire

<b>Introduction générale</b> .....	01
------------------------------------	----

### Chapitre I

#### Isolation en silicone et travaux intérieurs sur leurs performances électriques

I.1 Introduction.....	03
I.2 Définitions.....	03
I.2.1 Isolants .....	03
I.2.2 Isolateurs.....	03
I.2.3 Isolation.....	04
I.2.4 Diélectrique.....	04
I.3 Caractéristiques diélectriques des matériaux isolants.....	04
I.3.1 Résistivité .....	04
I.3.2 Rigidité diélectrique .....	04
I.3.3 Permittivité .....	05
I.3.3 .1 Permittivité relative.....	05
I.3.4 Conductivité électriques.....	05
I.3.5 Facteur de perte diélectrique.....	06
I.4 Différents types d'isolants.....	06
I.4.1 Isolants gazeux .....	06
I.4.2 Isolants liquides .....	06
I.4.3 Isolants solides.....	07
I.5 Performance d'une surface d'un isolant.....	07
I.5.1 Angle de contact.....	07
I.5.2 La mouillabilité.....	07
I.5.2.1 Superhydrophillté.....	07
I.5.2.2 Hydrophilite.....	08
I.5.3 Non mouillabilité.....	08
I.5.3.1 Hydrophobicité.....	09
I.5.3.2 Super hydrophobicité.....	09
I.6 Matériaux isolants utilisés pour la fabrication des isolateurs.....	09
I.6.1 Céramique.....	09
I.6.2 Verre.....	09

I.6.2.1 Verre trempé.....	09
I.6.2.2 Verre recuit.....	09
I.6. Bakélite.....	10
I.6.4 Silicone .....	10
I.6.4 .1 Différentes familles de silicones.....	11
I.6.4 .1.1 Huiles et gomme.....	11
I.6.4 .1.2 Gels silicones.....	11
I.6.4 .1.3 Elastomères silicones.....	11
I.6.4 .1.4 Résines siloxanes .....	11
I.6.4 .2 Structure moléculaire de la silicone.....	11
I.6.4.3 Les propriétés de la silicone .....	12
I.6.4.3 .1 Hydrophobicité.....	13
I.6.4.3 .2 Nettoyage.....	13
I.6.4.3.3 Tenue aux UV et aux intempéries.....	13
I.6.4.3.4 Tenue au feu.....	13
I.6.4.3.5 Elasticité.....	14
I.6.4.3.6 Propriétés diélectriques.....	14
I.6.4.3.7 Thermo stabilité.....	14
I.6.4.4 Domaines d'applications de la silicone.....	14
I.6.4.4 .1 Câble électrique.....	15
I.6.4.4 .2 Accessoires pour câble.....	15
I.6.4.4 .2.1 Isolateur .....	16
I.6.4.4 .2.2 Connecteur à serrage mécanique.....	16
I.7 Vieillessement des polymères.....	17
I.8 Récupération de l'hydrophobicité .....	17
I.9 Travaux antérieurs .....	18
I.10 Conclusion .....	20

## **Chapitre II**

### **Pollution des isolateurs haute tension et phénomène de décharge**

II.1 Introduction.....	21
II.2 Définition.....	21
II.2.1 Pollution.....	21
II.2.2 Contournement .....	22

II.2.3 Tension de contournement .....	22
II.2.4 Tension de tenue .....	22
II.2.5 Ligne de fuite .....	23
II.2.6 Courant de fuite .....	23
II.3 Différentes sources de pollution .....	23
II.3.1 Pollution naturelle.....	23
II.3.1.1 Pollution marine .....	23
II.3.1.2 Pollution désertique .....	23
II.3.1.3 Autre type de Pollution naturelle .....	24
II.3.2 Pollution industrielle .....	24
II.3.3 Pollution mixte .....	24
II.4 Pollution des isolateurs .....	24
II.4.1 Formation et répartition des couches polluantes.....	24
II.4.1.1 Non-uniformité longitudinale par groupe .....	25
II.4.1.2 Non-uniformité transversale .....	25
II.4.1.3 Non- uniformité longitudinale.....	25
II.5 Influence des facteurs climatiques sur les isolateurs pollués.....	25
II.5.1 Le vent .....	26
II.5.2 La pluie.....	25
II.5.3 L'humidité .....	26
II.5.4 La température.....	26
II.6 Sévérité de pollution.....	26
II.6.1 Les méthodes de mesures de la sévérité de pollution.....	26
II .6.1.1 Méthode de la densité de dépôt de sel équivalent (DSE) .....	27
II.6.1.2 Conductance superficielle.....	28
II.6.1.3 Méthode de courant de fuite .....	29
II.6.1.4 Mesure de pollution d'air.....	29
II.6.1.5 Mesure optique.....	29
II.7 Classifications de types de pollution.....	30
II.7.1 Classe I.....	30
II.7.2 Classe II.....	30
II.7.3 Classe III.....	30
II.7.4 Classe IV.....	30
II .8 Méthode d'essai sous pollution .....	31

II.8.1 Essai sous pollution naturelle .....	32
II.8.2 Essai sous pollution artificielle .....	32
II.8.2.1 Méthode de couche solide .....	32
II.8.2.2 Méthode de la pollution liquide .....	33
II.8.2.3 Méthode de brouillard salin.....	33
II.9 Conséquence de la pollution.....	33
II.9.1 Arc non localisé.....	33
II.9.2 Arc fixe.....	34
II.9.3 Court-circuit.....	34
II.9.4 Contentement .....	34
II.10 Technique de lutte contre la pollution.....	36
II.10.1 Allongement de la ligne de fuite .....	36
II.10.2 Utilisation des isolateurs plats (auto-nettoyables) .....	36
II.10.3 Graissage des isolateurs (couches hydrophobes) .....	36
II.10.4 Revêtements à base de silicones.....	37
II.10.5 Les isolateurs composites .....	37
II.10.6 Nettoyage des isolateurs .....	37
II.11 Effet de la pollution sur les équipements électriques .....	37
II.12 Décharge électrique.....	38
II.12.1 Décharge thermique.....	38
II.12.2 Décharge partielle.....	39
II.12.3 Décharge intrinsèque.....	39
II.13 Conclusion .....	40

## **Chapitre III**

### **Partie expérimentale**

III.1 Introduction .....	41
III.2Modèle expérimental et techniques de mesure .....	41
III. 3 Résultats et discussions.....	44
III. 3.1 Isolation hors tension.....	44
III.3.2 Isolation sous tension.....	54
III.4 Conclusion.....	63
<b>Conclusion Générale.....</b>	<b>64</b>

## Liste des figures

### Chapitre I

#### Isolation en silicone et travaux intérieurs sur leurs performances électriques

<b>Fig. I.1</b> : Tension de claquage de quelques polymères (épaisseur $e = 3 \text{ m}$	05
<b>Fig. I.2</b> : Schéma équivalent d'un condensateur	06
<b>Fig. I.3</b> : Comportement d'une goutte sur une surface	08
<b>Fig. I.4</b> : Structure chimique de la silicone	12
<b>Fig. I.5</b> : Structure d'un câble haute tension	15
<b>Fig. I.6</b> : Structure d'une isolatrice haute tension	16

### Chapitre II

#### Pollution de l'isolatrice haute tension et phénomène de décharge

<b>Fig. II.1</b> : Différentes étapes du processus de contournement d'une surface isolante polluée	36
--	----

### Chapitre III

#### Partie expérimentale

<b>Fig. III.1</b> : Arrangement en zigzag des gouttes d'eau sur la surface de l'isolation en silicone délimitée par deux électrodes et micropipette (a : modèle expérimental, b : électrodes à dents HT et terre, c : micropipette graduée, d : ajustement du volume de $100\mu\text{l}$ à $120\mu\text{l}$	41
<b>Fig. III.2</b> : Dispositif à paroi supérieure rotative assurant la variation de l'angle d'inclinaison ( $\alpha$ ) de l'isolation par rapport à l'horizontale (a : $\alpha = 0^\circ$ , b : $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ , c : $\alpha = 90^\circ$ )	43
<b>Fig. III.3</b> : Schéma de mesure de niveau de tension appliquée à l'isolation et de visualisation de la décharge électrique évoluant sur sa surface (Tr: Transformateur; AC: Appareil de commande de la tension d'essai; Vcr: Voltmètre de crête, Oe: Objet d'essai; Cam: Caméscope; PC: Ecran Ordinateur	43
<b>Fig. III.4</b> : Dessiccateur en PVC	44

<b>Fig. III.5 :</b> Volume total des gouttes d'eau résiduelles sur l'isolation en fonction de son angle d'inclinaison	47
<b>Fig. III.6 :</b> Gouttes d'eau de volume 120 $\mu$ l initialement déposées sous $\alpha = 0^\circ$	47
<b>Fig. III.7 :</b> Allongement des gouttes d'eau de volume 120 $\mu$ l sous $0^\circ < \alpha < 11^\circ$	48
<b>Fig. III.8 :</b> Chute partielle des gouttes d'eau allongées de volume 120 $\mu$ l sous $15^\circ < \alpha < 30^\circ$	48
<b>Fig. III.9 :</b> Gouttes d'eau résiduelles de volume 120 $\mu$ l sous $\alpha \geq 30^\circ$	48
<b>Fig. III.10:</b> Volume total des gouttes d'eau résiduelles le long de la ligne de fuite la plus humide en fonction de l'angle d'inclinaison de l'isolation	49
<b>Fig. III.11 :</b> Volume résiduel des gouttes d'eau sur la ligne de fuite l'isolation ( $V_{rth} = 120 \mu\text{l}$ , $\alpha = 30^\circ$ )	49
<b>Fig. III.12 :</b> Surface des gouttes d'eau résiduelles de ligne fuite la plus humide en fonction de l'angle d'inclinaison de l'isolation	50
<b>Fig. III.13 :</b> Gouttes d'eau de volume 90 $\mu$ l initialement déposées sous $\alpha = 0^\circ$	51
<b>Fig. III.14 :</b> Allongement sans chute des gouttes d'eau de volume 90 $\mu$ l sous $0^\circ < \alpha < 11^\circ$	52
<b>Fig. III.15 :</b> Chute partielle des gouttes d'eau allongées de volume 90 $\mu$ l sous $15^\circ < \alpha < 30^\circ$	52
<b>Fig. III.16 :</b> Gouttes d'eau résiduelles de volume 90 $\mu$ l sous $\alpha \geq 30^\circ$	52
<b>Fig. III.17:</b> $U_c = f(\alpha, V_i)$ d'une isolation en silicone (5 rangées x 5 gouttes d'eau en zigzag, $\sigma_v = 30 \mu\text{S/cm}$ , $L_c = 6 \text{ cm}$ , $L_{dd} = L_{de} = 1 \text{ cm}$ et $l_r = 2 \text{ cm}$ )	53
<b>Fig. III.18:</b> Longueur de la ligne de fuite la plus humide en fonction de l'angle d'inclinaison de l'isolation	53
<b>Fig. III.19:</b> Volume total des gouttes d'eau résiduelles sur l'isolation en fonction de son angle d'inclinaison	55
<b>Fig. III.20:</b> Comparaison des volumes des gouttes d'eau résiduelles recouvrant la même isolation hors ( $U_a = 0 \text{ kV}$ ) et sous tension ( $U_a = 20 \text{ kV}$ )	56
<b>Fig. III 21:</b> Comparaison des volumes des gouttes d'eau résiduelles recouvrant la même isolation hors ( $U_a = 0 \text{ kV}$ ) et sous tension ( $U_a = 20 \text{ kV}$ )	56
<b>Fig. III.22:</b> Comparaison des volumes des gouttes d'eau résiduelles recouvrant la même isolation hors ( $U_a = 0 \text{ kV}$ ) et sous tension ( $U_a = 20 \text{ kV}$ )	57
<b>Fig. III.23:</b> Comparaison des volumes des gouttes d'eau résiduelles recouvrant la même isolation hors ( $U_a = 0 \text{ kV}$ ) et sous tension ( $U_a = 20 \text{ kV}$ )	58

<b>Fig. III.24:</b> Volume total des gouttes d'eau résiduelles le long de la ligne de fuite la plus humide en fonction de l'angle d'inclinaison de l'isolation	59
<b>Fig. III.25:</b> Surface des gouttes d'eau résiduelles de ligne fuite la plus humide en fonction de l'angle d'inclinaison de l'isolation sous tension	59
<b>Fig. III.26:</b> Comparaison des surfaces des gouttes d'eau résiduelles recouvrant la ligne de fuite la plus humide de la même isolation hors ( $U_a = 0$ kV) et sous tension ( $U_a = 20$ kV) à volume initial $V_i = 120 \mu\text{l}$	60
<b>Fig. III 27 :</b> Comparaison des surfaces des gouttes d'eau résiduelles recouvrant la ligne de fuite la plus humide de la même isolation hors ( $U_a = 0$ kV) et sous tension ( $U_a = 20$ kV) à volume initial $V_i = 90 \mu\text{l}$	61
<b>Fig. III.28 :</b> Comparaison des surfaces des gouttes d'eau résiduelles recouvrant la ligne de fuite la plus humide de la même isolation hors ( $U_a = 0$ kV) et sous tension ( $U_a = 20$ kV) à volume initial $V_i = 60 \mu\text{l}$	61
<b>Fig. III.29 :</b> Comparaison des surfaces des gouttes d'eau résiduelles recouvrant la ligne de fuite la plus humide de la même isolation hors ( $U_a = 0$ kV) et sous tension ( $U_a = 20$ kV) à volume initial $V_i = 120 \mu\text{l}$	62
<b>Fig. III.30:</b> Longueur de la ligne de fuite la plus humide en fonction de l'angle d'inclinaison de l'isolation	63

## Liste des tableaux

<b>Tab. II.1:</b> Classification de la pollution selon le type d'environnement	31
--	----

## Liste des symboles

$\Theta$	Angle de contact
$\theta_A$	Angle d'avancée de la gouttelette.
$\theta_R$	Angle de recul de la gouttelette
AC	Appareil de commande de la tension d'essai
$C_x$	Capacité entre deux électrodes
$C_0$	Capacité dans le vide
Na Cl	Chlorure de sodium
$\sigma_\theta$	Conductivité volumique à température $\theta$ en (S/m)
$\theta_{20}$	Conductivité volumique à la température de 20°C en (S/m)
G	Conductance en (S).
I	Courant en (A).
$\Sigma$	Conductance superficielle
G	Conductance superficielle
Eg	Champ électrique dans les vacuoles gazeuses
Ei	Champ électrique dans l'isolant
Cam	Caméscope
DDSE	Densité de dépôt de sel équivalent
$\phi_e$	Diamètre des électrodes
D	Diamètre de la goutte
Cam	Ecran Ordinateur
$\nabla P_\Delta$	Effets de forces dues à la pression
$\mu \nabla^2 \vec{V}_f$	Effets de forces dues à viscosité
Fg	Effets de forces dues à la force de gravitation exercées sur la goutte d'eau
Sio	Formule chimique d'une chaîne de silicone
B	Facteur dépendant de la température $\theta$
Fad	Forces d'adhérence
Fs	Force de cisaillement
Fd	Force de traînée aérienne
F <sub>e</sub>	Force électrique
F	Facteur de forme
CO <sub>2</sub>	Gaz de carbone
HT	Haute tension
SF6	Hexafluorure de soufre
L	La largeur des électrodes
L <sub>c</sub>	La ligne de fuite totale de l'isolation
L <sub>dd</sub>	La distance entre deux gouttes d'eau adjacentes reposant sur la ligne de fuite de l'isolation

$L_{de}$	La distance séparant une goutte d'eau de l'électrode
$l_{rr}$	La distance comprise entre deux rangées successives sur la largeur de l'isolation
$R_a$	La résistance d'affaiblissement de courant
$L_{ifh}$	La longueur de la ligne de fuite la plus humide de l'isolation
$S_{ifh}$	La surface des gouttes résiduelles de la ligne de fuite la plus humide
$D$	La densité du fluide
$A_w$	La surface de contact de la goutte
$\mu$	La viscosité du liquide de la gouttelette
$V$	La vitesse du flux
$Y$	La distance normale à la surface de contact
$\rho_a$	La densité de l'air
$A_c$	La surface de la section transversale de La gouttelette
$U_T$	La vitesse de translation des gouttelettes le long de la surface inclinée de l'isolation
$\sigma$	L'angle d'inclinaison de l'isolation
$\rho_t$	La charge totale
$\epsilon$	La permittivité absolue de l'eau
$\rho_m$	La densité volumique
$g$	La gravité
$E$	Le champ électrique
$C_d$	Le coefficient de traînée
$V_{cr}$	Le voltmètre de crête
$C_1, C_2$	Les capacités basse tension du diviseur capacitif suscité
$O_e$	Objet d'essai
$\epsilon_r$	Permittivité relative
$\epsilon_a$	Permittivité absolue
$\epsilon_0$	Permittivité du vide
$\epsilon_{ri}$	Permittivité relative de l'isolant
$\epsilon_{rg}$	Permittivité relative de gaz
$r_c$	rayon de courbure des électrodes
$P$	Résistivité ( $\rho$ )
$R_s$	Résistance surfacique
$R_v$	Résistance volumique
$S$	Surface nettoyée en $m^2$ .
$S_a$	Salinité d'eau en ( $Kg / m^3$ )

THT	Très haute tension
$\Theta$	Température de la suspension en °C
V	Tension en (V)
$\gamma_{LV}$	Tension de surface,
Tr	Transformateur
V	Volume de la suspension en m <sup>3</sup>
V <sub>cr</sub>	Voltmètre de crête
V <sub>r</sub>	Volume résiduelles total des gouttes d'eau reposant sur l'isolation
V <sub>r1fh</sub>	Volume résiduelles de la ligne de fuite la plus humide
V <sub>f</sub>	Vélocité
$\mu$	Viscosité

## Introduction générale

Depuis leur apparition vers la fin du XIXe siècle, les lignes utilisées pour les réseaux électriques, ensemble des infrastructures permettant d'acheminer l'énergie électrique des centres de production (centrales électriques) vers les consommateurs d'électricité sont constituées majoritairement de lignes électriques aériennes. Les structures et les équipements électriques destinés pour ces lignes sont alors soumis à des conditions météorologiques parfois extrêmes. Divers phénomènes tels que la foudre, le vent, l'accumulation de neige, glace ou verglas ont commencé à perturber le bon fonctionnement de l'ensemble du réseau. Par-dessus ces contraintes météorologiques, s'ajoute la contrainte environnementale causée par le phénomène de pollution qui en résulte de l'humidification d'un dépôt polluant accumulé à la surface des isolateurs. Contrairement aux phénomènes météorologiques qui peuvent affecter l'ensemble des structures du réseau, le phénomène de pollution concerne particulièrement les isolateurs. Ces derniers sont des composants électrotechniques considérés comme les pièces maîtresses du réseau grâce au double rôle essentiel qu'ils jouent pour la fiabilité de l'acheminement de l'énergie électrique vers les consommateurs. Non seulement ces composants permettent de fixer, maintenir ou soutenir les conducteurs électriques nus, mais aussi ils assurent l'isolation électrique entre ces derniers et les structures [1].

La contrainte imposée par le phénomène de pollution est la diminution considérable de la performance électrique des isolateurs. En effet, lorsque le phénomène se produit, le dépôt polluant devient conducteur à cause de la dissolution du sel et un courant de fuite commence à circuler à la surface de l'isolateur pollué. Dans ce cas, les isolateurs entraînent inévitablement la formation des arcs électriques peuvent alors apparaître par la suite, se développer dans certaines conditions et continuer même jusqu'à provoquer un court-circuit qui, à son tour, mènerait jusqu'à contournement total de l'isolateur puis la perte du réseau. Évidemment, une panne d'électricité n'est pas souhaitable ni pour les compagnies fournissant l'électricité, ni pour les abonnés.

La performance des isolateurs est une condition essentielle des critères de dimensionnement des isolateurs en vue d'augmenter la fiabilité des réseaux.

Le but essentiel recherché à travers ce présent travail consiste en la détermination du degré d'humidification de la ligne de fuite d'une isolation en silicone hydrophobe après l'avoir inclinée par rapport à l'horizontale d'un angle variable lorsqu'elle est hors ou mise sous tension alternative.

Le présent travail comporte trois chapitres :

Le premier est dédié à la description des isolants silicones, leurs propriétés électriques et la synthèse des travaux de recherche effectués sur l'effet de l'angle d'inclinaison sur le degré d'humidification de la ligne de fuite d'une isolation en silicone sous tension alternative.

Le deuxième, sera consacré au phénomène de pollution, son origine, les méthodes de sévérités de pollution et phénomène de décharge.

Finalement, le troisième chapitre est réservé à la partie expérimentale et l'interprétation des résultats obtenus.

Chapitre I :  
Isolation en silicone et travaux antérieur  
sur leurs performances électriques

## Introduction

Depuis la fin du XXe siècle, les matériaux composites sont de plus en plus utilisés pour les applications hautes et moyenne tension en raison de leur structure moléculaire et leur excellente hydrophobicité. Les silicones présentent de nombreuses propriétés : une bonne stabilité thermique entre (80°C et 250°C), de très bonnes propriétés hydrophobes, une bonne tenue au feu sans dégagement toxique, des propriétés d'anti-adhérence. L'attractivité de ces propriétés couplée à la possibilité de disposer des produits silicones sous différentes formes (suivant l'application souhaitée), des propriétés lubrifiantes et adoucissantes, une très grande innocuité et une très bonne inertie chimique [1].

Dans le domaine de l'électrotechnique, les élastomères silicones sont déjà largement utilisés dans l'isolation extérieure d'installations électriques haute tension (isolateurs principalement). Les raisons principales sont liées à la bonne tenue aux contraintes climatiques couplées aux bonnes propriétés hydrophobes de ces matériaux. Ils tendent à remplacer de plus en plus les isolateurs en porcelaine ou verre même si le recul sur la fiabilité des élastomères silicones dans leur utilisation n'a pu être complètement éprouvée (on considère que les élastomères silicones sont matures depuis le début des années 1990 pour de telles applications).

Parmi les défauts rencontrés dans des dispositifs électriques de la haute tension, le contournement des isolations servant à séparer électriquement entre elles les parties conductrices en contact avec l'isolant est un problème réel qui est dû à la pollution des isolateurs.

### I.2 Définitions

#### I.2.1 Isolants

Un isolant est une substance dont la conductivité est nulle, ou en pratique très faible. L'action d'isoler est le moyen d'empêcher la conduction électrique entre conducteurs soumis à des champs électriques. On peut considérer comme isolant, tous les matériaux dont la résistivité est supérieure à  $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$  [2 et 3].

#### I.2.2 Isolateur

L'isolateur est utilisé pour l'isolement entre deux corps ou deux pièces sous différentes tensions afin d'empêcher les courts circuits et les pertes de courant résultantes. Les isolateurs des lignes aériennes ont deux fonctions principales. D'une part, ils permettent d'isoler

électriquement les lignes de transport d'énergie électrique des pylônes mis à la terre, et d'autre part, ils ont un rôle mécanique qui consiste à soutenir ces mêmes lignes et donc résister aux différentes contraintes mécaniques dues surtout au poids de la ligne, son mouvement en présence de vent [4 et 5].

### I.2.3 Isolation

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

### I.2.4 Diélectrique

Un milieu est diélectrique s'il ne contient pas de charges électriques susceptibles de se déplacer. Il ne peut donc pas conduire le courant électrique et il est électriquement neutre. En revanche, les charges électriques à l'intérieur du milieu peuvent se déplacer sous forme de mouvements de faible amplitude et former un dipôle électrostatique sous l'effet d'un champ électrique extérieur. Le matériau est alors capable d'emmagasiner de l'énergie électrostatique.

Un diélectrique est caractérisé par sa permittivité ou constante diélectrique  $\epsilon_r$  (permittivité relative par rapport à celle du vide  $\epsilon_0$ ). Elle décrit le facteur par lequel le champ électrique entre les charges est diminué par rapport au vide et par définition est toujours supérieure à 1. Plus la constante diélectrique est élevée, plus la force entre les deux charges électriques séparées par ce diélectrique est faible. La constante diélectrique intervient aussi en optique en modifiant l'indice de réfraction.

## I.3 Caractéristiques diélectriques des matériaux isolants

D'une manière générale, les matériaux isolants sont caractérisés par :

### I.3.1 Résistivité

La résistivité d'un matériau, généralement symbolisée par la lettre grecque rho ( $\rho$ ), représente sa capacité à s'opposer à la circulation du courant électrique. Elle correspond à la résistance d'un tronçon de matériau d'un mètre de longueur et d'un mètre carré de section et est exprimée en ohm-mètre ( $\Omega \cdot m$ ).

Sous l'action du champ électrique, toutes les charges se mettent en mouvement. Dans un diélectrique, ce mouvement est un courant électrique, le mouvement des charges libres bien que leur quantité est très faible constituent un courant de fuite. Ce dernier a deux chemins possibles : il passe à travers le diélectrique lui-même ou bien il s'écoule par la surface du diélectrique. On aura donc un courant de fuite surfacique et un autre volumique. Chacun d'eux développe une résistance surfacique ( $R_s$ ) et une autre volumique ( $R_v$ ) [6].

### I.3.2 Rigidité diélectrique

La rigidité diélectrique transversale d'un matériau est sa propriété de s'opposer à la décharge disruptive. C'est la valeur maximale du champ électrique que l'on peut appliquer sans qu'un claquage ou une perforation ou un contournement ou un amorçage d'arc se produit, rendant impossible une nouvelle application de la tension. Selon la norme CEI 60243-1, la rigidité diélectrique transversale d'un matériau se définit comme étant le rapport entre la tension à laquelle se produit le claquage et la distance séparant les électrodes entre lesquelles est appliquée la tension [7 et 8].

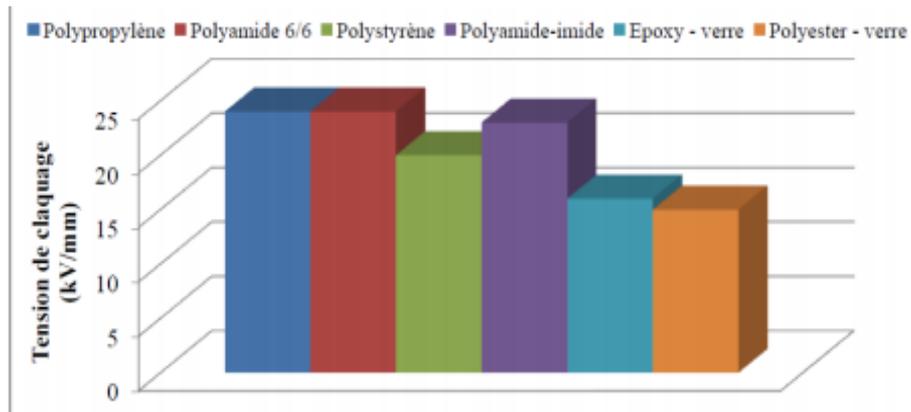


Fig. I.1 : Tension de claquage de quelques polymères (épaisseur  $e = 3$  mm)

### I.3.3 permittivité

Elle permet de décrire la réponse d'un milieu donné à un champ électrique. Elle est exprimée en Farad par mètre [F/m]. Dans la pratique on utilise de façon quasi exclusive la permittivité relative  $\epsilon_r$  représentant le rapport de la permittivité absolue  $\epsilon_a$  à la permittivité du vide  $\epsilon_0$ . On peut la calculer selon la formule suivante [9] :

$$\epsilon_r = \epsilon_a / \epsilon_0 \quad (1)$$

#### I.3.3.1 Permittivité relative

Cette caractéristique des isolants solide, liquide et gaz porte le nom de la permittivité relative  $\epsilon_r$ . La permittivité relative d'un diélectrique parfait est le quotient de la capacité  $C_x$  entre deux électrodes supposées noyées dans ce diélectrique, par la capacité  $C_0$  de la configuration d'électrodes dans le vide :

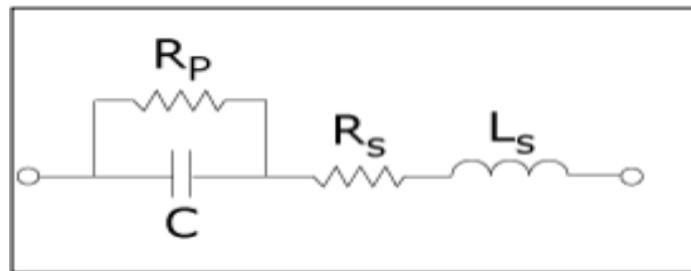
$$\epsilon_r = C_x / C_0 \quad (2)$$

### I.3.4 Conductivité électrique

La conductivité électrique est la capacité d'un matériau à laisser passer ou conduire le courant électrique, comme la plupart des métaux et les solutions chargées en ions.

### I.3.5 Facteur de pertes diélectriques

Ce facteur nous permet de connaître la puissance dissipée dans le matériau lorsqu'un champ électrique variable lui est appliqué. Il est exprimé par la tangente de l'angle  $\delta$  qui représente l'écart à la quadrature entre le courant et la tension d'un condensateur ayant le matériau considéré comme diélectrique. Supposant un dispositif constituant un condensateur réel (avec pertes) est représenté par le schéma équivalent parallèle tel que représenté sur la figure :



**Fig. I.2:** Schéma équivalent d'un condensateur

## I.4 Différents types d'isolants

### I.4.1 Isolants gazeux

Généralement dans le domaine de la haute tension ; on emploie souvent un gaz comme diélectrique, tel que les lignes aériennes et les disjoncteurs. Le développement de la technique de l'isolation gazeuse a pris un grand pas dans le domaine industriel lié à l'élévation des tensions et courants utilisés dans les grands réseaux de distribution. Pour ce type d'application, l'isolant gazeux présente deux avantages : quelle que soit la complexité de la forme du conducteur, le milieu homogène, enveloppe parfaitement les conducteurs, qu'ils soient statiques ou mobiles. Dans un milieu de diélectrique solide, le vide peut être à l'origine des décharges partielles qui conduisent à la destruction de l'isolant. Après passage puis rupture d'un arc, le gaz est le diélectrique qui protège le plus rapidement ses propriétés isolantes. Par contre après le passage d'un arc dans les diélectriques solides, ces derniers sont abimés définitivement par carbonisation. Les gaz les plus utilisés sont :

Air, azote, gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ), hexafluorure de soufre ( $\text{SF}_6$ ).

### I.4.2 Isolants liquides

Les huiles isolantes représentent l'avantage d'avoir une rigidité diélectrique élevée par rapport aux gaz et d'améliorer les propriétés diélectriques. En électrotechnique, elles sont utilisées comme imprégnant d'isolations celluloses ou comme produit de remplissage de matériels électriques très divers. Son rôle principal est d'éliminer l'air et les autres gaz [10].

#### **I.4.3 Isolants solides [11]**

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

#### **I.5 Performance d'une surface d'un isolant [12 et 13]**

##### **I.5.1 Angle de contact**

On appelle angle de contact  $\theta$ , l'angle que forme la goutte d'eau avec la surface sur laquelle elle est déposée. Ses valeurs varient de 0 à 180°, en fonction de la nature de la surface (superhydrophile, hydrophile, hydrophobe, superhydrophobe) avec laquelle elle est en contact.

##### **I.5.2 La mouillabilité**

La mouillabilité est fonction du mouillage qui correspond à la capacité d'un produit à mouiller une surface. Le mouillage est un des phénomènes importants intervenant dans les collages. De façon générale, lorsqu'un liquide est mis en contact avec la surface d'un solide et s'étale sur celle-ci, il se forme un angle de raccordement du premier sur le second. Lorsque le mouillage est parfait, l'angle de raccordement devient nul. Dans ce cas l'énergie d'adhésion est maximum. Pour un système liquide-solide donné, le mouillage dépend de la pression, de la température, de l'hygrométrie.

###### **I.5.2.1 Superhydrophillité**

Une surface superhydrophile est une surface ayant un angle de contact presque égal 0 ° avec une goutte d'eau (Fig. I.3a).

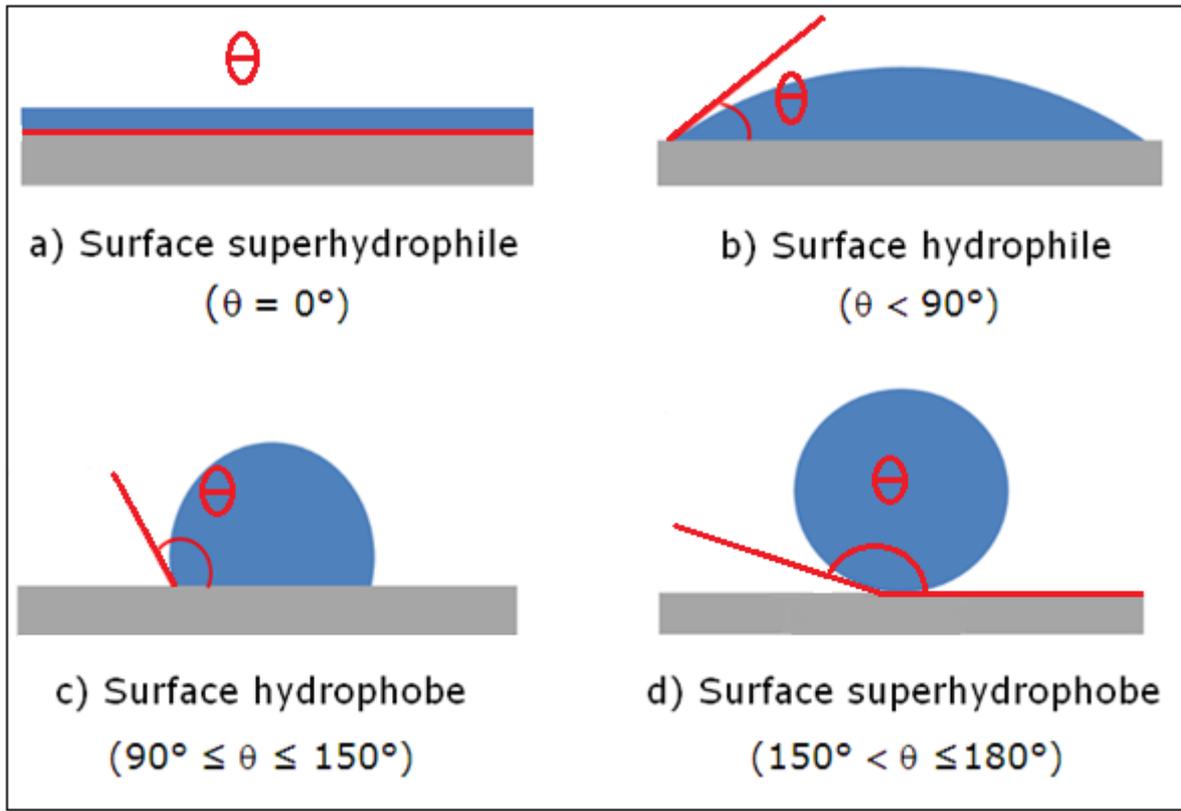


Fig. I.3 : Comportement d'une goutte sur une surface

### I.5.2.2 Hydrophilite

Une surface hydrophile ( $\theta < 90^\circ$ ) est un composé ayant une affinité pour l'eau et tendance à s'y dissoudre. Il peut être soluble dans l'eau (hydrosoluble) ou les solvants polaires. Il est également ionique caractérisée par son aptitude à créer des liaisons d'hydrogène avec des gouttes d'eau qui, en les déposant sur celle-ci, s'étalent, dans ce cas, le contact entre la surface et les gouttes d'eau est maximal (Fig. I.3b).

### I.5.3 Non mouillabilité

La non-mouillabilité désigne la capacité de la surface d'un matériau à ne pas pouvoir créer des liaisons d'hydrogènes avec une goutte d'eau, c'est ce qui l'empêche de s'étaler sur la surface.

#### I.5.3.1 Hydrophobicité

C'est la capacité de la surface d'une matière à ne pas absorber d'eau contrairement aux surfaces hydrophiles, les surfaces hydrophobes ont du mal à créer des liaisons d'hydrogène

avec les gouttes d'eau, qui, en les déposant sur celle-ci, se rassemblent afin de minimiser la surface de contact avec le matériau (Fig. I.3c).

### **I.5.3.2 Superhydrophobicité**

Les matériaux superhydrophobes sont une catégorie des matériaux hydrophobes ayant un angle de contact supérieur à  $150^\circ$  en y déposant une goutte d'eau, cette dernière a tendance à se rassembler en gardant une forme sphérique (Fig. I.3d). On dit qu'une surface est superhydrophobe si et seulement si une goutte d'eau reposant sur cette surface atteint un angle de contact d'au moins  $150^\circ$ . Pour cela une surface doit posséder deux caractéristiques: premièrement son matériau de surface est apolaire, dans un second temps sa texture de surface réalise le modèle Cassie.

## **I.6 Matériaux isolants utilisés pour la fabrication des isolateurs [14]**

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

### **I.6.1 Céramiques**

Le développement de la fabrication des céramiques date depuis longtemps à cause de leurs performances. Pour les isolateurs qui vont être utilisés dans des lieux où il y a des contraintes mécaniques très importantes, on utilise de préférence des céramiques à grains très fins. Souvent on trouve les céramiques dans les postes: isolateurs supports, couverture isolante des sectionneurs, des disjoncteurs, des transformateurs de potentiel, des bornes de traversées des transformateurs de puissance.

### **I.6.2 Verre**

En Algérie, les isolateurs utilisés dans les lignes de moyenne et haute tension sont en verre. Parmi les avantages que présentent le verre, le bas prix et l'observation des défauts est très facile. On trouve deux types de verre pour la fabrication des isolateurs: le verre trempé et le verre recuit.

#### **I.6.2.1 Verre trempé**

La résistance à la traction du verre trempé est environ 5 à 6 fois plus grande que le verre recuit et peut supporter des variations brusques de température pouvant atteindre  $100^\circ\text{C}$ .

### I.6.2.2 Verre recuit

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

### I.6.3 Bakélite

C'est une résine artificielle inventée vers 1909 par le chimiste BAKELAND. On l'obtient sous trois états [24 et 25].

- **Bakélite A** : Produite par un chauffage modéré (50°C), et une résine jaunâtre, fondant facilement et soluble dans l'alcool méthylique.
- **Bakélite B** : C'est de la bakélite transformée par un chauffage prolongé vers (110°C) ; elle est solide, friable, insoluble dans les dissolvants usuels ;
- **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 usuelles.

### I.6.4 Silicone [14, 15 et 16]

Les principaux dérivés organosiliciés industriels sont les silicones (l'une des origines de ce nom viendrait de silicone, traduction anglaise du mot silicium) dont la production mondiale, en constante expansion, avoisinerait annuellement le million de tonnes. Leur méthode de préparation a été découverte par Müller en Allemagne pendant la seconde guerre mondiale, a été, indépendamment industrialisée par E. G. Rochow aux États-Unis à la fin de cette guerre ; cinquante ans après, très améliorée, elle est toujours d'actualité.

L'attractivité de ses propriétés couplées à la possibilité de disposer de produits silicones sous différentes formes (huiles, résines, élastomères, gels...) a fait que ces polymères se rencontrent dans pratiquement tous les secteurs de l'industrie.

Les polysiloxanes ou caoutchoucs de silicone sont les caoutchoucs très spéciaux dont le tonnage est le plus important. Ce ne sont plus des caoutchoucs à squelette carboné mais des caoutchoucs à base de silicium-oxygène. Leur qualité la plus remarquable est leur domaine d'utilisation en température, qui s'étend de 85 à + 250°C, avec une quasi-constance de leurs propriétés dans ce domaine. En revanche, leurs propriétés mécaniques sont relativement faibles. Ils entrent dans de nombreuses applications de secteurs tels que l'industrie électrique

et électronique, ou l'industrie automobile. Ils se caractérisent aussi par une grande inertie physiologique, ce qui permet de les utiliser dans le domaine médical (prothèses). Ils ont une résistance médiocre aux huiles hydrocarbonées sauf pour les élastomères silicones fluorés, très chers, mais très appréciés dans l'aéronautique (tenue au froid, à la chaleur et au kérosène)

#### **I.6.4 .1 Différentes familles de silicones**

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

##### **I.6.4 .1.1 Huiles et gomme**

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

##### **I.6.4 .1.2 Gels silicones**

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

##### **I.6.4 .1.3 Elastomères silicones**

Les élastomères silicones et les silicones de revêtement forment le plus grand groupe de produits silicones et sont optimisés en permanence en raison de la grande variété d'applications. Ils sont fabriqués à partir de polymères silicones. Les caoutchoucs sont subdivisés en plusieurs catégories selon leur viscosité et leur mode de réticulation. Tandis qu'autrefois les pièces isolantes étaient souvent réalisées par moulage de caoutchouc silicone RTV-2, aujourd'hui, les procédés se diversifient.

##### **I.6.4 .1.4 Résines siloxanes**

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

#### **I.6.4 .2 Structure moléculaire de la silicone**

Chaque molécule de silicone est constituée d'une chaîne d'atomes de silicium et d'oxygène (Fig. I.4) Caractérisée en ce que l'agent actif hydrophobe de type organopolysiloxane est choisi parmi les composés de formule (1).



Où  $p$  est un nombre entier de 0 à 150 ; et les symboles R, identiques ou différents, représentent chacun un groupe alkyle ou alcoxy de 1 à 10 atomes de carbone, cycloalkyle de 3 à 10 atomes de carbone, un groupe phényle le plus couramment, un groupe réactif, un halogène ou un hydrogène.

Les silicones sont par conséquent beaucoup plus résistantes vis-à-vis de la chaleur, de l'oxydation et des rayons ultraviolets que leurs homologues organiques. La nature du groupement R joue un rôle dans les propriétés chimiques des silicones : caractère plus ou moins hydrophobe, propriétés rhéologiques, caractère lubrifiant, anti-adhérent.

De plus, elles présentent un caractère hydrophile (dû à la liaison Si R O, très polaire), et hydrophobe à la fois. Cette propriété est utilisée par exemple pour l'imperméabilisation : la partie hydrophile se lie préférentiellement au substrat (tissus, moquette, papier ou pierres) et présente vers l'extérieur ses groupements organiques hydrophobes [15].

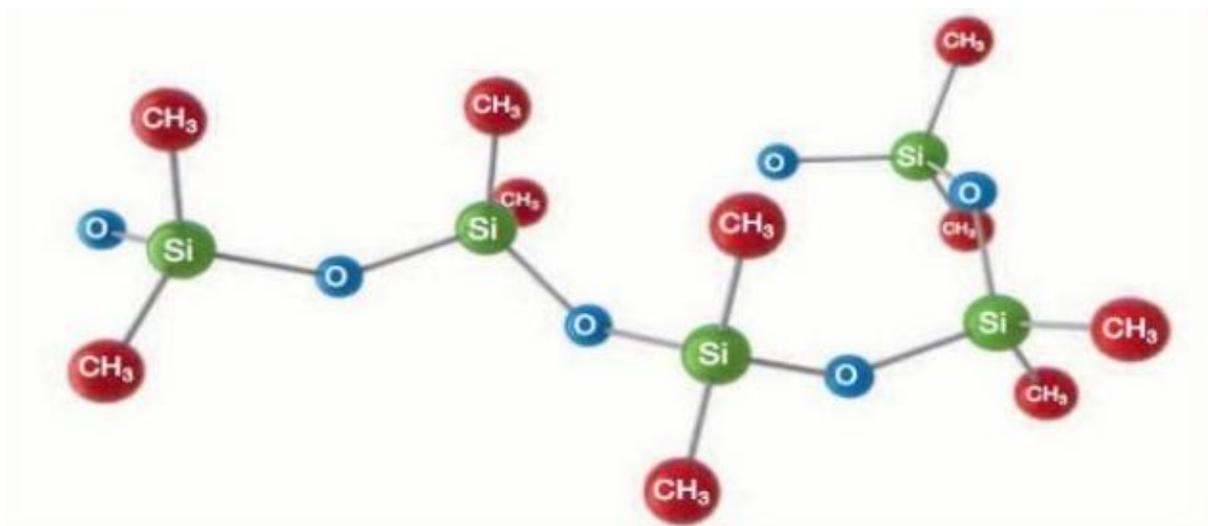


Fig. I.4 : Structure chimique de la silicone

#### I.6.4.3 Les propriétés de la silicone

En raison de leur structure chimique, les silicones sont parfaitement adaptés aux applications moyenne et haute tension et présentent de nombreuses propriétés électriques, physiques, mécaniques et chimiques particulièrement intéressantes [18 et 20].

#### **I.6.4.3 .1 Hydrophobicité**

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

#### **I.6.4.3 .2 Nettoyage**

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

#### **I.6.4.3.3 Tenue aux UV et aux intempéries**

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

#### **I.6.4.3.4 Tenue au feu**

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

#### **I.6.4.3.5 Elasticité**

Les élastomères se différencient des thermodurcissables par leur propriété d'élasticité caoutchouteuse, c'est-à-dire la capacité à subir de très grandes déformations réversibles sous l'action de contrainte mécanique. Ils peuvent atteindre de très grands allongements (jusqu'à 500 %) tout en étant capables de retrouver leur géométrie initiale en restituant au milieu l'énergie qui leur a été fournie lors de la déformation [21].

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.6.4.3.6 Propriétés diélectriques**

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

#### **I.6.4.3.7 Thermo stabilité**

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

#### **I.6.4.4 Domaines d'applications de la silicone**

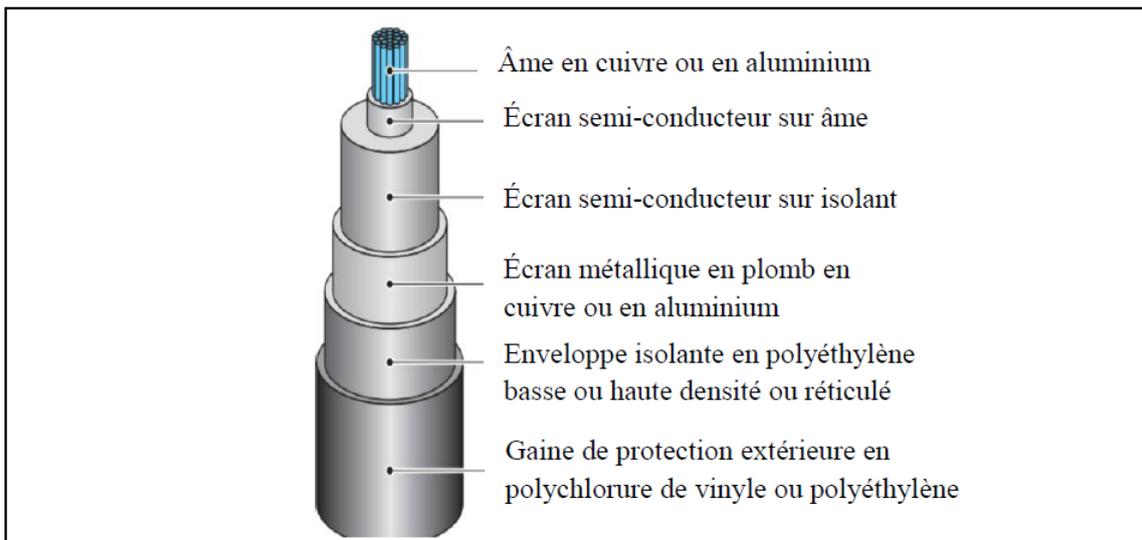
Les silicones sont des polymères utilisés dans de nombreuses applications de l'industrie du fait de leurs propriétés d'étanchéité, d'anti-adhérence, de lubrification, de moulage...etc. Les polymères sont fréquemment trouvés dans notre entourage, de nos ordinateurs personnels à la fabrication automobile,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

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

#### **I.6.4.4 .1 Câble électrique**

Le matériau d'isolation doit présenter, outre des spécifications diélectriques (résistivité et rigidité diélectrique élevées, permittivité diélectrique et pertes diélectriques faibles), des caractéristiques liées à son utilisation dans le câble (insensibilité aux chocs, aux vibrations et aux attaques chimiques, résistance au feu et tenue au vieillissement).

Les caoutchoucs de silicone sont destinés à la fabrication de câbles spéciaux, par exemple dans la marine ou l'aviation, notamment grâce à leur excellente tenue aux températures extrêmes (de  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$  à  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). De plus, leur comportement au feu est remarquable puisque la combustion du câble provoque une transformation en silice qui préserve les propriétés d'isolation du câble [21 et 22].



**Fig. I.5:** Structure d'un câble haute tension

#### **I.6.4.4 .2 Accessoires pour câble**

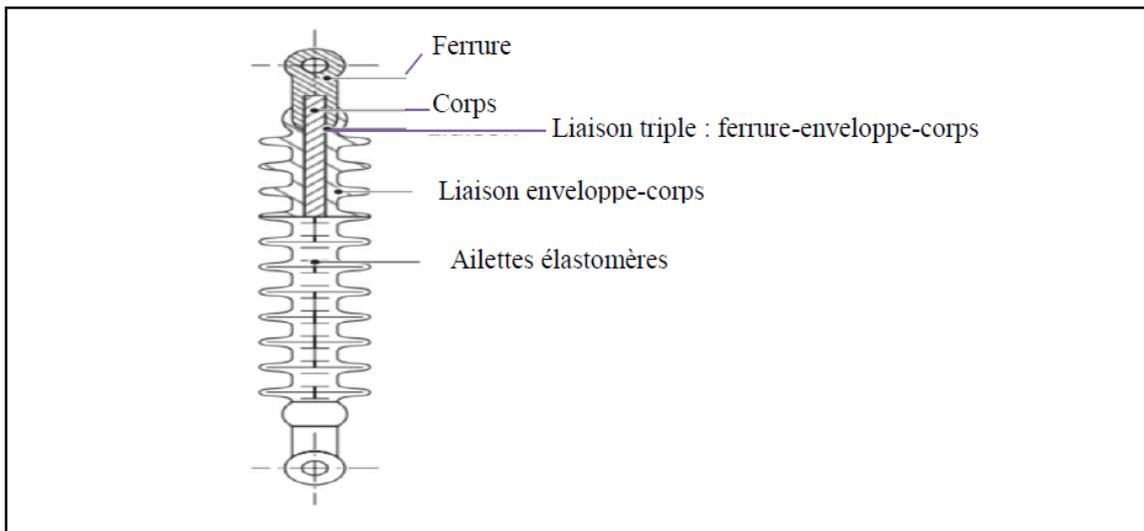
Pour assurer la fiabilité du réseau de transport d'électricité et afin de garantir une bonne isolation entre des pièces qui sont sous différents potentiels, l'emploi d'accessoires tels que les isolateurs comme support de câbles électriques ou les connecteurs électriques à perforation d'isolant pour la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

##### **I.6.4.4 .2.1 Isolateur**

Un isolateur (Fig. I.6) possède double rôle, porte le conducteur et assure une liaison isolante entre les câbles aériens sous tension et leur support (pylône).

Les isolateurs sont des composants indispensables au transport et à la distribution de l'énergie électrique. Par conséquent, Ils doivent posséder des caractéristiques mécaniques et électriques définies. La plupart des isolateurs en service utilisent de la porcelaine ou du verre comme principal matériau isolant. Cependant, la tendance est à leur remplacement par des isolateurs composites, à matrice polymère silicone renforcée par des charges de silice ( $\text{SiO}_2$ ) et qui présentent les avantages suivants :

- Une faible masse et un encombrement réduit permettant une mise en place facilitée.
- Des performances équivalentes et une meilleure tenue à la pollution [23 et 24].



**Fig. I.6** Structure d'un isolateur haute tension

#### **I.6.4.4 .2.2 Connecteur à serrage mécanique [25]**

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

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

#### **I.7 Vieillessement des polymères**

Soumis à différentes contraintes durant l'exploitation, les isolants vieillissent. Et selon le type de réaction produite sur le matériau composite, on distingue plusieurs types de vieillissement dont les principaux sont :

- Le vieillissement thermique provoqué par l'action de longue durée de hautes températures, sur le diélectrique.
- Le vieillissement électrochimique engendré par certains processus dont la cause est le phénomène d'électrolyse ayant lieu dans le diélectrique.
- Le vieillissement électrique (ionisation - décharges partielles) résultant des décharges à la surface et dans les cavités surtout gazeuses enfermées dans les diélectriques.

Le vieillissement électrique est défini comme tout changement des propriétés du matériau qui affecte ses fonctions d'isolation. Il est caractérisé par une dégradation des propriétés diélectriques du matériau, sous l'action prolongée d'une contrainte électrique (champ

électrique) relativement élevée. Il est caractérisé par l'augmentation des pertes diélectriques et une diminution de la résistivité transversale du matériau. La dégradation est particulièrement accentuée par la présence d'impuretés de différentes natures, plus particulièrement des vacuoles de gaz au sein du diélectrique ou des particules à la surface du diélectrique. Ces impuretés sont en général le siège de décharges partielles qui peuvent engendrer, après un temps relativement long, l'érosion du matériau, dans ce cas, les isolations polymères utilisées dans ces conditions vont être hydrophiles et similaires à une isolation en céramique ou finalement la rupture diélectrique.

Généralement on accepte de façon intuitive, et l'expérience le montre souvent, que la durée de vie d'un matériau isolant dépend de l'intensité de la contrainte électrique subie par celui-ci mais également de la durée d'application de cette contrainte [26, 27 et 28].

### **I.8 Récupération de l'hydrophobicité**

Après plusieurs recherches effectuées au laboratoire, il a été constaté que les matériaux en silicone sont capables de récupérer leur hydrophobicité après les dommages causés par les décharges de surface et de transférer l'hydrophobicité aux particules de pollution sur leur surface et de récupérer leurs propriétés électriques. La récupération de l'hydrophobicité de la surface est due à la diffusion du polymère mobile à faible poids moléculaire du volume à la surface. Un processus de récupération d'hydrophobicité d'importance secondaire est dû à la rotation du squelette de silicone réorientant les groupes méthyle hydrophobes vers la surface [29].

### **I.9 Travaux antérieurs**

- Le but visé à travers les travaux des chercheurs **R. B et autres** [30] consiste en la caractérisation de l'arrangement des gouttes d'eau de pluie et de condensation naturelle et son effet sur la tension continue de contournement d'une surface isolante en silicone hydrophobe sous inclinaison variable. Un support dédié à l'exposition sur site des échantillons des isolations en silicone sous la pluie et la condensation ainsi qu'un dispositif de laboratoire permettant la fixation de ces isolations et la variation de l'angle de leur inclinaison ont été réalisés. Pour des raisons de rétention d'eau au voisinage de l'électrode reliée à la terre, celle-ci est réalisée sous forme d'un jeu d'électrodes pourvues ou non de trous permettant l'évacuation d'eau. L'évolution temporelle de la constellation des gouttes d'eau de pluie et de condensation naturelle ainsi que la décharge électrique produite au laboratoire sur le modèle de simulation des deux phénomènes suscités ont été visualisées.

La caractérisation de la constellation des gouttes d'eau de pluie et de condensation naturelle sur la surface des ailettes individuelles d'un isolateur en silicone et la mesure de leur volume ont montré que:

- La surface d'une ailette est recouverte d'une combinaison d'un ensemble de grosses, moyennes et petites gouttes d'eau disposées selon une constellation beaucoup plus rapprochée d'un arrangement en zigzag asymétrique qu'en ligne droite :
- Le volume maximal d'eau recueilli par centimètre carré de la surface de l'isolation, exposée sous une pluie naturelle, est pratiquement le double de celui enregistré sur le même matériau soumis au phénomène de condensation naturelle ou artificielle.
- Sous un arrangement en zigzag symétrique de goutte d'eau, l'effet de l'angle d'inclinaison d'une isolation en silicone sur sa tension continue de contournement a mené aux principaux résultats suivants:
  - Sous une inclinaison nulle, 5 rangées de 6 gouttes d'eau de 45  $\mu$ l de volume et 200  $\mu$ S/cm de conductivité électrique, suffisent pour abaisser la tension continue négative de contournement de l'isolation à une valeur minimale égale à 40 % de celle obtenue sans ces gouttes. Dans ces mêmes conditions, le volume des gouttes d'eau joue un très grand rôle, puisque son élévation de 45 à 90  $\mu$ l entraîne une réduction de la tension de contournement de l'isolation de 70 % par rapport au cas sans gouttes d'eau.
  - Sous le même arrangement des gouttes d'eau variant entre 60 et 90  $\mu$ l, le meilleur intervalle d'angle d'inclinaison de l'isolation retenu est celui compris entre 50 et 90 °. Celui-ci permet de maintenir la tension de contournement de l'isolation égale à 80% de celle obtenue sans ces gouttes. Par conséquent, un tel profil est vivement recommandé pour les ailettes d'un isolateur réel en silicone dans les régions à plus forte pluviométrie.
  - Par contre sous le même arrangement de gouttes d'eau variant entre 45 et 60  $\mu$ l, l'intervalle d'angle d'inclinaison de l'isolation  $0^\circ < \alpha < 50^\circ$  est défavorable, puisqu'il engendre une réduction de la tension de contournement de l'isolation de 40% par rapport au cas sans gouttes d'eau.
  - Enfin un angle nul d'inclinaison de l'isolation lui est favorable lorsqu'elle est sous l'effet du même arrangement de gouttes d'eau de volume inférieur à 30  $\mu$ l.
- La retenue d'une quantité d'eau au voisinage de l'électrode terre de l'isolation avec gouttes d'eau engendre une diminution de sa tension de contournement au maximum de 11% par rapport au cas de l'isolation sans ces gouttes.

- L'objectif essentiel recherché à travers d'autres chercheurs **S.S et autres [31]** consiste en la détermination de la constellation et du volume des gouttes d'eau résiduelles recouvrant une surface isolante en silicone hydrophobe en fonction de l'angle de son inclinaison. Leur investigation est portée sur l'étude du nombre et du volume des gouttes d'eau résiduelles sur la surface isolante hydrophobe lorsque celle-ci est mise sous une inclinaison variant de  $0^\circ$  à  $90^\circ$  hors ou sous tension alternative.

Les résultats de mesure montrent que lorsque l'angle d'inclinaison croît, le nombre de gouttes résiduelles augmente et leur volume diminue, cependant le volume des gouttes résiduelles est plus grand lorsque l'isolation est sous tension quel que soit l'angle d'inclinaison de l'isolation. De plus la constellation de gouttes résiduelles sur la surface de l'isolant en fonction de l'angle de son inclinaison a été quantifiée

- L'objectif principal du travail réalisé par **R. Ydjedd [32]** était d'étudier l'effet du degré de l'angle d'inclinaison ( $\alpha$ ) par rapport à l'horizontale d'une isolation en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau, leur volume et leur conductivité électrique sur sa performance.

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

- L'analyse des différents arrangements de gouttes d'eau sur l'effet de la tension de contournement de la surface isolante hydrophobe engendre la réduction de la performance de celle-ci. Cette dernière est en fonction de la distance entre les gouttes le long de la ligne de fuite et de la largeur de l'isolation.
- L'augmentation de la conductivité volumique des gouttes d'eau engendre la décroissance de la tension de contournement. Cela est dû à leur allongement et par conséquent au raccourcissement de la distance entre gouttes.
- La croissance de la conductivité des gouttes d'eau entraîne la diminution de la tension de contournement de l'isolation.

La tension de contournement de la surface hydrophobe est plus faible en présence de grandes gouttes que petites. La performance d'une surface hydrophobe, recouverte de grandes gouttes, en fonction de l'angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale présente un minimum pour un angle  $\alpha$  égal à  $65^\circ$ . Par contre sous l'action de petites gouttes, ce minimum est obtenu pour un angle  $\alpha$  de l'ordre de  $90^\circ$ .

- Des études sur le comportement des surfaces Elastomères de silicone pour une application extérieure haute tension sont réalisées [22].

L'un des objectifs de ce travail était d'étudier l'influence du type de tension de test sur la résistance à l'hydrophobie sur éprouvettes en forme de plaque en élastomère silicone PS3160. Avec l'aide de la méthode d'essai de chute dynamique, l'éprouvette d'essai sous tension continue positive et négative ainsi que sous tension alternative.

Les résultats montrent comme prévu qu'une plus grande résistance à l'hydrophobie du matériau examiné sous contrainte de tension continue par rapport à une contrainte de tension alternative consiste. Les causes possibles résident dans des facteurs électrohydrodynamiques très différents phénomènes justifiés.

### **CONCLUSION**

Dans ce chapitre, nous avons présenté une synthèse des principales caractéristiques des surfaces polymériques. Cette synthèse montre l'importance de cette thématique qui continue de faire l'objet de nombreuses études. En effet, la fiabilité des systèmes de transport et de distribution de l'énergie électrique est tributaire de la qualité du système d'isolation.

Un matériau isolant ne peut être considéré comme un bon isolant que lorsque celui-ci possède une permittivité moins élevée, des pertes électriques les plus faibles, une rigidité diélectrique et une résistance d'isolement très grande.

Les isolants solides, notamment les polymères sont très demandés dans le domaine industriel à l'importance de leurs excellentes propriétés électriques, thermiques et mécaniques mais surtout pour leurs coûts raisonnables. La fiabilité des matériaux isolants reste toujours un des soucis majeurs de l'électrotechnique, surtout que ces matériaux sont constamment soumis à des contraintes électriques et atmosphériques sévères.

## Chapitre II

# Pollution de l'isolateur haute tension et phénomène de décharge

## II.1 Introduction

Les isolateurs entrent pour un pourcentage très modeste de l'ordre de 7%, dans le prix d'une ligne aérienne. Cependant, ils sont un élément essentiel dont dépendent la sécurité d'exploitation, la qualité et la continuité de service [33].

Les isolateurs sont des éléments essentiels dans la conception d'une ligne de transport aérienne. Leur rôle est de relier les conducteurs sous tension aux supports et d'assurer l'isolement électrique entre ces deux parties constitutives de la ligne.

Les isolateurs des lignes et de poste de transport d'énergie électrique sont le siège de plusieurs contraintes. Entre autre, la pollution des isolateurs constitue l'un des facteurs de première importance dans la qualité et la fiabilité du transport d'énergie.

En effet, au moment de pluie ou de brouillard ou de la rosée, les dépôts polluants se fixant sur les surfaces isolantes réduisent considérablement la résistivité superficielle et le contournement peut alors survenir. L'humidification des couches polluantes facilite en fait, la circulation d'un courant de fuite sur les surfaces isolantes provoquant des échauffements locaux et par la suite l'assèchement de la couche de pollution. Ainsi, la répartition du potentiel est modifiée d'une façon significative et des arcs partiels peuvent apparaître.

Par conséquent, des pertes d'énergies parfois énormes peuvent avoir lieu et peuvent évoluer jusqu'au contournement total de l'isolateur qui conduit à la mise hors service de la ligne avec destruction éventuelle de matériels, ce qui constitue la situation la plus grave. Ainsi, une des caractéristiques principales d'un isolateur haute tension sera donc sa tenue au contournement en fonction de l'environnement dans lequel il est utilisé.

La connaissance des différentes sources de pollution et le degré de contamination, est par conséquent une condition préalable et indispensable pour apprécier le niveau de l'isolement des ouvrages installés, en vue de dimensionner convenablement l'isolation.

Mais ce dimensionnement initialement correct des isolateurs peut être insuffisant et il faut pouvoir protéger les installations contre les nouvelles sources de pollution.

## II.2 Définitions

### II.2.1 Pollution

Par définition, le mot « pollution » désigne la dégradation d'un milieu qui se produit par l'introduction, directe ou indirecte, de substances nocives pour l'environnement ou par la modification de ses caractéristiques biologiques, chimiques ou physiques. Cela implique que, lorsqu'on parle des isolateurs, le phénomène de pollution est défini comme étant la

dégradation de la surface isolante par des électrolytes solubles ou des particules inertes non solubles, qui sont des substances ayant la capacité d'altérer la performance électrique des isolateurs. D'où, un isolateur est considéré comme pollué lorsque sa surface est recouverte d'électrolytes solubles ayant les propriétés d'augmenter la conductivité surfacique de cet isolateur. Le mot « contamination » est alors plus approprié dans ce cas pour décrire le phénomène de pollution des isolateurs et il se réfère plutôt à la conductivité électrique de la surface des isolateurs qu'à leur apparence extérieure.

Souvent dans les ouvrages et publications, les auteurs préfèrent utiliser le mot contamination au lieu de pollution pour lever justement cette ambiguïté.

La pollution des isolateurs constitue un problème majeur dans la dégradation de l'isolement des ouvrages de haute tension. C'est une modification défavorable des caractéristiques et propriétés de l'isolateur ; une couche de pollution se forme sur la surface de ce dernier qui entre en contact avec des grains de poussières portée par le vent et disposées sur celle-ci ; une fois humidifiée provoquera des arcs électriques et peuvent évoluer jusqu'à son contournement [34 et 35].

### **II.2.2 Contournement**

C'est une détérioration partielle ou totale de l'isolateur où il perd ses propriétés et se produit sur sa surface lorsqu'une décharge électrique s'établit entre ses extrémités [36].

### **II.2.3 Tension de contournement**

La tension de contournement est le niveau de tension le plus bas à partir duquel tous les arcs joignent les deux électrodes. La tension de contournement dépend [34 et 32] :

- De la forme des électrodes (pointe-plan, plan-plan...etc.).
- De la résistivité volumique moyenne de la pollution.
- De la répartition de la couche de pollution.
- Du profil de l'isolateur (largeur de la couche de pollution).
- De la longueur de l'isolateur.
- De la nature de la tension et sa polarité.
- Des conditions climatiques telles que la pression, l'humidité et la température.

### **II.2.4 Tension de tenue**

C'est le niveau de tension le plus important, que peut supporter une isolation sans provoquer de décharge disruptive (contournement dans le cas des isolateurs) [34].

### **II.2.5 Ligne de fuite**

La ligne de fuite est la distance la plus courte le long de la surface d'un isolant entre deux parties conductrices [34].

### **II.2.6 Courant de fuite**

C'est un courant de faible amplitude, circulant à travers la couche polluante le long de la surface de l'isolateur, son intensité devient importante lorsqu'on s'approche de la tension de contournement. Il dépend de plusieurs facteurs tels que la nature de la couche polluante et de la longueur de la ligne de fuite.

Dans les conditions de forte humidité, la dissolution des sels contenus dans la couche polluante, provoque la formation d'une couche électrolytique [34].

## **II.3 Différentes sources de pollution**

La variation des agents constituant la pollution dépend des facteurs géographiques, climatiques, sources de contamination et des conditions auxquelles sont soumises les isolations. D'après la norme CEI 815, nous citons les principales sources de pollution [35].

### **II.3.1 Pollution naturelle**

Elle dépend du climat et des facteurs météorologiques des régions. Elle est constituée de dépôts de poussières véhiculées par les vents (sable, embruns marins...etc.).

#### **II.3.1.1 Pollution marine**

Formation des couches de sel à cause des embruns portés par le vent qui se déposent progressivement sur l'isolateur des lignes de haute tension à proximité de la mer. Deviennent conductrices lorsqu'elles sont humidifiées par les embruns eux-mêmes, par un brouillard ou simplement par condensation. Cette couche devient de plus en plus conductrice, des courants de fuite encore plus intenses prennent naissance, et des arcs peuvent se développer jusqu'à engendrer le contournement total de l'isolation [34, 35 et 37].

#### **II.3.1.2 Pollution désertique**

Dans les régions désertiques, Ce genre de pollution est constitué par les particules de sable, terre, poussière, et est accentué surtout par les facteurs climatiques principalement des tempêtes de sable. Le vent en assurant le transport de ces particules arides finit par les déposer sur l'isolateur en formant une couche qui recouvre toute sa surface. Lors de variation de température entre le jour et la nuit implique le phénomène de condensation et donnant une certaine conductivité aux dépôts et à cause de l'existence d'une grande densité de sel dans le sable, engendre ainsi une diminution de la résistance superficielle des isolateurs [34, 35 et 37].

### **II.3.1.3 Autre type de pollution naturelle**

La pluie est un phénomène naturel propice à l'humidification des isolateurs. Lorsqu'elle est intense, elle est susceptible de provoquer la désagrégation des dépôts solides. Cependant, cet auto-lavage, est favorable à l'amélioration des qualités diélectriques des isolateurs. Dans certaines conditions de pluie violente, un film continu d'eau peut s'établir d'une extrémité à l'autre de la chaîne d'isolateur. Comme l'eau n'est jamais parfaitement isolante, ce phénomène peut conduire au contournement de la chaîne d'isolateur; c'est le contournement sous pluie [32 et 37].

### **II.3.2 Pollution industrielle**

Cette pollution est observée au voisinage des usines métallurgiques, chimiques ou même au bord des centrales thermiques où les isolateurs se recouvrent peu à peu de poussière faiblement conductrice, mais très hygroscopique. Le dépôt de pollution peut se constituer par la fixation de particules solides telles que les dépôts ferromagnétiques issus des usines métallurgiques et de l'absorption de gaz présent dans les fumées. Dans des conditions de forte humidité, la dissolution des sels contenus dans la poussière provoque la formation d'une couche conductrice abaissant la résistivité superficielle des isolateurs. De plus, dans les régions agricoles, les agents polluants peuvent être insecticides, engrais, grains de pollens. Cette pollution peut aussi être d'origine domestique, quand il s'agit des facteurs tels que: fumées et gaz résultant des moyens de réchauffement des habitations ou de moyens de transport [32 et 35].

### **II.3.3 Pollution mixte**

C'est une combinaison des pollutions précédentes. La pollution mixte présente le cas le plus nocif pour l'exploitation des ouvrages électriques. La couche électrolytique formée par le processus d'humidification des dépôts solides accumulés progressivement sur la surface des isolations, engendre une diminution considérable de la rigidité diélectrique [35 et 37].

## **II.4 Pollution des isolateurs**

### **II.4.1 Formation et répartition des couches polluantes**

La formation et la répartition de la couche de pollution sur la surface des isolateurs dépendent du profil des isolateurs, de la hauteur et de la disposition (verticale, horizontale ou inclinée) des chaînes d'isolateurs par rapport au sol et du niveau de tension qui leur est appliqué.

En général, la couche de pollution se concentre sur les éléments de la chaîne d'isolateurs situés du côté du conducteur de haute tension et dans les parties les mieux protégées contre les

facteurs d'auto-nettoyage (vent et forte pluie). Par conséquent, la répartition de la pollution le long des chaînes d'isolateurs est loin d'être uniforme. Cette non-uniformité devient plus accentuée lorsque la longueur des chaînes d'isolateurs augmente.

La non-uniformité de la pollution peut être classée en trois catégories :

#### **II.4.1.1 Non-uniformité longitudinale par groupe**

La cause principale de cette géométrie est le lavage sous tension et l'effet du champ électrique. Elle se présente en bandes de pollution de conductivité dont la valeur est constante dans chaque bande de la ligne de fuite d'un isolateur mais peut être variable le long du périmètre de l'isolateur [38].

#### **II.4.1.2 Non-uniformité transversale**

Ce type est caractérisé par des secteurs ou bandes de différentes conductivités superficielles de la couche polluante. Ces bandes sont réparties transversalement autour de la surface de chaque isolateur de la chaîne. La conductivité dans chaque secteur est la même le long de la ligne de fuite. Ce type de pollution est dû principalement à l'existence d'une direction privilégiée des vents et des pluies [39].

#### **II.4.1.3 Non- uniformité longitudinale périodique**

Ce type est le plus fréquent. Il est caractérisé par une variation périodique de la conductivité de la couche de pollution le long de la ligne de fuite, mais elle garde une symétrie circulaire.

Ses principales spécifications sont :

- la face inférieure de l'isolateur présente une conductivité plus grande que la face supérieure.
- la concentration de la pollution augmente de la zone périphérique vers la zone centrale.
- la pollution est plus accentuée entre les nervures.

### **II.5 Influence des facteurs climatiques sur les isolateurs pollués**

Parmi les facteurs météorologiques essentiels d'influence des dépôts polluants et par conséquent de la tenue électrique des isolateurs on distingue :

#### **II.5.1 Le vent**

Il constitue l'agent qui assure le transport des poussières et des sels marins ainsi que la distribution des dépôts polluants formés sur les surfaces des isolateurs. D'autre part, il peut être considéré comme un agent d'auto nettoyage dans le cas où sa vitesse est très élevée [40].

### **II.5.2 La pluie**

Les fines pluies humidifient les surfaces polluées, donc favorisent l'adhérence de pollution, ce qui augmente le risque de contournement. Cependant, les fortes pluies permettent le nettoyage des surfaces polluées et diminuent le risque de contournement [38].

### **II.5.3 L'humidité**

L'humidification est considérée comme un obstacle car elle influe négativement sur la tenue électrique des isolateurs puisqu'elle accroît la conductivité électrique des agents polluants déposés à leur surface et entraîne par conséquent la diminution de leur tenue surtout pendant les premières heures du matin, notamment pendant les périodes sèches [40 et 41].

### **II.5.4 La température**

Pour les surfaces polluées, les hautes températures ont une influence positive, car elles sèchent les dépôts et augmentent leur résistivité. Cependant, la différence de température entre le jour et la nuit peut provoquer le phénomène de condensation et l'humidification de la couche de pollution [40 et 41].

## **II.6 Sévérité de pollution [32 et 36]**

Le dimensionnement convenable de l'isolation externe vis-à-vis de la pollution est subordonné à la détermination du degré de pollution du lieu d'utilisation de cette isolation. La sévérité de pollution d'un site est généralement caractérisée par l'intensité de précipitation ainsi que par la conductivité des dépôts polluants. La mesure de cette sévérité est indispensable pour assurer un service sans défaillance dans un site pollué.

L'évaluation de la sévérité de pollution d'un site, devrait fournir toutes les informations nécessaires sur le comportement diélectrique des isolateurs, ainsi que sur la fiabilité des lignes et des postes. La surveillance de l'évolution spatio-temporelle de la pollution est indispensable pour la conception et le choix d'une isolation adéquate, et pour prévoir ainsi, des techniques de lutte efficaces aux problèmes de contournement sous pollution. Diverses méthodes ont été conçues pour l'évaluation de la sévérité de pollution d'un site.

### **II.6.1 Les méthodes de mesures de la sévérité de pollution**

Une évolution de la sévérité d'un site devrait fournir toutes les informations nécessaires au calcul de la probabilité du contournement sous pollution d'un isolateur et même le dimensionnement. En effet on propose d'étaler les différentes méthodes de mesure et les dispositifs nécessaires.

### II.6.1.1 Méthode de la densité de dépôt de sel équivalent (DDSE)

Il s'agit du dépôt de sel de Na Cl en mg/cm<sup>2</sup> sur la surface d'un isolateur dont la conductivité électrique est égale à celle du degré réel, dissous dans un volume d'eau. Pour calculer la DDSE, il faut prélever les dépôts polluants à la surface des isolateurs sélectionnés. Les dépôts sont récupérés par lavage à l'aide d'un matériau absorbant (coton, mouchoir à papier, éponge, brosse) et de l'eau distillée, à moins qu'il soit gratté à sec. Le dépôt est dissous dans l'eau distillée, la suspension obtenue est constamment agitée au moins pendant deux minutes avant de procéder à la mesure de la conductivité volumique  $\sigma_{\theta}$  de la suspension à température  $\theta$  en °C

La conductivité à la température ambiante ( $\theta=20^{\circ}$ ) est donnée par la relation :

$$\theta_{20} = \sigma_{\theta} [1-b (\theta-20)] \quad (1)$$

Avec

$\theta$ : Température de la suspension en °C.

$\sigma_{\theta}$  : Conductivité volumique à température  $\theta$  en (S/m).

$\theta_{20}$  : Conductivité volumique à la température de 20°C en (S/m).

$b$  : Facteur dépendant de la température  $\theta$ , qui est donnée par la relation :

$$b = - 3.2. 10^{-8} \theta_3 + 1.032. 10^{-5} \theta_2 - 8.272. 10^{-4} \theta + 3.544. 10^{-2} \quad (2)$$

Lorsque  $\theta_{20}$  est à l'intérieur de l'intervalle (0,004 à 0.4) S/m, la salinité  $S_a$  est déterminée par la relation suivante :

$$S_a = (5,7. \sigma_{20})^{1,03} \quad (3)$$

Avec :

$S_a$  : salinité d'eau en (Kg / m<sup>3</sup>)

$\sigma_{20}$  : conductivité volumique à température 20°C

La densité dépôt de sel équivalent est donnée par la formule:

$$DDSE = (S_a.V) / S \quad (4)$$

Avec:

$V$  : Volume de la suspension en m<sup>3</sup>.

$S$  : Surface nettoyée en m<sup>2</sup>.

DDSE : Densité dépôt de sel équivalent en kg/m<sup>2</sup>.

Pour la détermination de la sévérité du site, les mesures doivent être répétées avec une fréquence suffisante pour obtenir les niveaux entre périodes de lavages naturels. En conséquence, plusieurs isolateurs ou collecteurs doivent être exposés pendant toute la période d'essai. Si le lavage naturel est rare, des intervalles entre prélèvements d'un mois ou plus

peuvent être suffisants pour acquérir l'information sur l'accumulation en fonction du temps. D'autre part, si la pollution se dépose plus rapidement, il sera nécessaire de raccourcir l'intervalle entre prélèvements, pour obtenir un résultat plus sûr, les prélèvements sont habituellement effectués sur plusieurs isolateurs ou collecteurs.

La DDSE ne dépend pas seulement de la forme de l'isolateur mais aussi de la position dans laquelle il est installé, c'est-à-dire l'angle qu'il fait avec la verticale et son orientation.

Cette méthode mesure l'équivalent du composant actif du contaminant sans tenir compte de certains facteurs à savoir l'humidification de la pollution et le processus d'amorçage des arcs [3].

### II.6.1.2 Conductance superficielle

Elle est définie comme le rapport du courant à fréquence industrielle qui traverse l'isolateur à la tension appliquée. La conductance superficielle d'un isolateur est un paramètre qui caractérise l'état global de la surface isolante (niveau de pollution et degré d'humidification de la couche) lequel détermine la performance de l'isolateur.

Ainsi la méthode de la conductance superficielle est satisfaisante pour mesurer et évaluer la sévérité de pollution d'un site.

La conductance superficielle  $G$  est obtenue pendant 2 à 5 périodes une tension, alternative (50Hz) donnée  $V$ , en mesurant le courant de fuite maximum traversant la couche de pollution.

La conductance est donnée par la formule;

$$G = I / v \quad (5)$$

Avec :

$G$  : Conductance en (S).

$I$  : Courant en (A).

$V$  : Tension en (V).

La conductance superficielle  $\sigma$  des isolateurs est obtenue en multipliant la conductance superficielle  $G$  par le facteur de forme  $f$ , définie par la formule :

$$\sigma = f. G \quad (6)$$

$\sigma$  : Conductance superficielle.

$f$  : Facteur de forme.

$G$  : Conductance superficielle.

Si la couche n'est pas homogène; la conductivité superficielle locale peut être obtenue en mesurant la conductance d'une partie de la surface isolante en utilisant des électrodes auxiliaires intermédiaires. Les tensions élevées peuvent être à l'origine de la distorsion du

courant de fuite, car elles créent des zones sèches sur la surface de l'isolateur. Ceci peut être évité en limitant le temps d'application de la tension.

L'expérience a montré que la tension ne doit pas être appliquée pendant plus de deux à cinq périodes et le courant pendant le régime transitoire n'est pas pris en considération.

Lors de la méthode d'essai artificielle, il est préférable d'utiliser des isolateurs de différentes formes pour contrôler la validité de cette méthode, qui n'est valable que si tous les isolateurs donnant des valeurs voisines de la sévérité, même si la conductance ou la conductivité superficielle sont différentes.

L'utilisation d'une tension d'essai inférieure à la tension de service est avantageuse puisqu'elle réduit le risque de contournement superficiel dans la gamme des valeurs critiques, qui sont d'un intérêt fondamental pour l'évaluation du risque de défaillance. De plus, l'utilisation de faibles tensions permet d'utiliser des transformateurs moins chers et d'automatiser les équipements de mesures puisque le risque d'amorçage est faible [38].

#### **II.6.1.3 Méthode de courant de fuite**

C'est un courant de faible amplitude, circulant à travers la couche polluante le long de la surface de l'enveloppe de l'isolateur, son intensité devient importante lorsqu'on s'approche de la tension de contournement. Il dépend de plusieurs facteurs tels que la nature de la couche polluante et de la longueur de fuite. Par la mesure du courant de fuite à la surface d'un isolateur donné, on peut déterminer la sévérité du site qui donne le même courant de fuite sur la surface du même isolateur soumis à la même tension au laboratoire. La mesure du courant de fuite s'effectue de deux manières: par le comptage du nombre d'impulsions et par l'amplitude de ces dernières [32 et 38].

#### **II.6.1.4 Mesure de pollution d'air**

Les mesures de la pollution de l'air effectuées sur une période de temps donnée et permettent d'évaluer l'intensité et les caractéristiques de la pollution de l'air dans un site. Les méthodes de mesures adoptées partent du principe qu'en ce qui concerne le phénomène de contournement, une corrélation peut être établie entre l'analyse physico-chimique de l'air d'un site donné et la sévérité de la pollution de ce même site [37].

#### **II.6.1.5 Mesure optique**

Le but de cette méthode consiste à évaluer l'épaisseur de la couche de pollution déposée à la surface d'un isolateur. Un dispositif de prédiction par sonde laser effectue les mesures en se basant sur une technique elliptométrique. Un rayon à polarisation rectiligne traverse un analyseur et aboutit à un photodétecteur. Une analyse avancée des caractéristiques du rayon

réfléchi (amplitude, décharge...) permet de calculer la constante diélectrique et l'épaisseur de la couche de pollution. La mesure de la sévérité de la pollution peut ainsi se faire sans toucher à cette couche [32 et 37].

## **II.7 Classifications des sites pollués**

L'identification des substances de la pollution est impérative pour le choix de l'isolateur d'une ligne électrique. Afin d'évaluer l'isolement des lignes de transport et d'établir la corrélation entre la méthode de brouillard salin et les conditions de pollution naturelle, La norme CEI 815 donne les quatre niveaux de sévérité de pollution et leur classement dans le tableau

Afin d'évaluer l'isolement des lignes de transport et d'établir la corrélation entre la méthode de brouillard salin et les conditions de pollution naturelle, quatre classes de sévérité ont été proposées [42].

### **II.7.1 Classe I**

Cette classe correspond à une pollution faible. Cette pollution est généralement naturelle (sauf marine) ou légèrement industrielle. La salinité équivalente maximale retenue pour cette classe correspond à une pulvérisation d'une solution de chlorure de sodium à 2,5 g/l de concentration.

### **II.7.2 Classe II**

La classe 2 correspond à une pollution moyenne. En général, cette pollution est naturelle (sauf marine) ou faiblement industrielle. En classe 2, la sévérité équivalente maximale retenue est de 10 g/l.

### **II.7.3 Classe III**

Cette classe correspond à des zones très localisées où l'on trouve simultanément une forte pollution marine et industrielle. Il s'agit donc de zones à densité industrielle importante, de grandes villes ou de zones proches de la mer soumises à l'action directe des embruns. Ces sites nécessitent un isolement important. La salinité équivalente maximale, concernant cette classe, est de 80 g/l.

### **II.7.4 Classe IV**

Correspond aux zones où le niveau de pollution est exceptionnel. La pollution est éventuellement naturelle ou mixte. La salinité équivalente maximale pour la classe 4 est de 160 g/l.

Niveau de pollution	Exemple d'environnements typiques
I Faible (2.5 g/l)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zones sans industries et avec faible densité d'habitations équipées d'installation de chauffage.</li> <li>- Zones avec faible densité d'industries ou d'habitations mais soumises fréquemment aux vents et / ou pluies.</li> <li>- Régions agricoles - Régions montagneuses</li> </ul>
II Moyen (10 g/l)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zones avec industries ne produisant pas de fumées particulièrement polluantes et/ ou avec une densité moyenne d'habitations équipées d'installations de chauffage.</li> <li>- Zone à forte densité d'habitations et/ ou d'industries mais soumises fréquemment aux vents et / ou à des chutes de pluies.</li> <li>- Zones exposées aux vents de mer, mais trop proches de la côte.</li> </ul>
III Fort (80 g/l)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zones avec forte densité d'industries et banlieues de grandes villes avec forte densité d'installations de chauffage polluantes.</li> <li>- Zones situées près de la mer, ou en tout cas exposées à des vents relativement forts venant de la mer.</li> </ul>
IV Très fort (160 g/l)	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Zones généralement peu étendues, soumises à des poussières conductrices et à des fumées industrielles produisant des dépôts conducteurs particulièrement épais.</li> <li>- Zones généralement peu étendues, très proches de la cote et exposées aux embruns ou au vent très fort et polluant venant de la mer.</li> <li>- Zones désertiques caractérisées par de longues périodes sans pluie, exposées aux vents forts transportant du sable et du sel et soumises à une condensation régulière</li> </ul>

**Tab. 1** : Classification de la pollution selon le type d'environnement

### II.8 Méthodes d'essai sous pollution

Avant de mettre en service un isolant quelconque, il faut bien comparer les performances de divers types d'enveloppes et sélectionner ceux qui présentent le meilleur comportement sous pollution pour chaque site. Pour cela, il est nécessaire de les soumettre à des essais. Pour

effectuer ces essais, nous distinguons deux principales méthodes d'essai à savoir les essais sous pollution naturelle et les essais sous pollution artificielle. Ces essais peuvent être effectués dans les conditions naturelles (sur site) ou au laboratoire [32].

### **II.8.1 Essai sous pollution naturelle**

Il consiste à installer, dans les différents sites pollués, des stations dans lesquelles on observe le comportement d'un certain nombre de chaînes d'isolateurs de longueurs ou de profils différents. Les qualités respectives de ces isolateurs, placés sous la même tension, sont appréciées en fonction du courant de fuite, de la conductivité superficielle ainsi qu'en fonction du temps au contournement. On peut classer les isolateurs en distinguant ceux qui ont contourné de ceux qui ont tenu, durant deux ou trois ans d'exposition, par exemple. Ces essais ont l'avantage de tenir compte de l'effet de toutes les contraintes, dans toutes leurs complexités sur un site donné. L'inconvénient majeur de ces essais est qu'ils nécessitent plusieurs années, pour pouvoir étudier valablement les performances des isolateurs [32 et 34].

### **II.8.2 Essai sous pollution artificielle**

Les essais au laboratoire sont basés sur la reproduction de la couche et les conditions de la pollution naturelle par des solutions réparties une surface isolante et dont la conductivité est différente. Afin de valider les essais sous pollution artificielle, il a été nécessaire de comparer les performances des isolateurs testés au laboratoire à celles des isolateurs en exploitation dans des conditions naturelles. Une première approche consiste à rechercher une méthode qui simule le mieux possible les conditions naturelles de pollution, en tenant compte de la répartition non uniforme de la pollution. Une deuxième approche consiste à rechercher une méthode au laboratoire susceptible de fournir des résultats reproductibles, afin de faciliter la comparaison des performances des différents types d'isolateurs. Ils sont aujourd'hui largement utilisés et ont l'avantage d'être rapides. Les méthodes d'essais qui demeurent actuellement normalisées sont les méthodes de la couche solide, la méthode du brouillard salin et la méthode de la pollution liquide [32 et 34].

#### **II.8.2.1 Méthode de la couche solide**

Cette méthode est réalisée par la pulvérisation d'une couche de pollution solide constituée de chlorure de sodium et d'un agent liant inerte généralement le kaolin sur la surface de l'isolateur. La conductivité de cette suspension est réglée par addition d'une certaine quantité de chlorure de sodium. L'isolateur est alors séché afin que la couche polluante se stabilise.

Si l'humidification s'effectue après application de la tension (méthode du brouillard à vapeur), le paramètre de sévérité est défini par la densité de dépôt de sel en  $\text{mg}/\text{cm}^2$ . Si l'humidification a lieu avant l'application de la tension, le paramètre de sévérité est défini par la conductivité de la couche polluante.

### **II.8.2.2 Méthode de la pollution liquide**

Cette méthode s'apparente à la méthode du brouillard propre dans la mesure où un mélange liquide est appliqué sur l'isolateur avant l'essai. Cependant, dans ce cas la pollution n'est pas séchée avant l'essai. Elle est constituée d'eau, de craie et de méthylcellulose ou de kaolin. Comme pour la méthode de la couche solide la conductivité est ajustée par addition de chlorure de sodium. Après quelques minutes d'égouttage, la tension d'essai est appliquée à l'isolateur sans humidification supplémentaire. Il est important de signaler que la couche polluante n'est pas humidifiée en cours d'essai. Ainsi, après quelques minutes d'essai, les courants de fuite assèchent la couche et la probabilité de contournement décroît rapidement [32 et 34].

### **II.8.2.3 Méthode de brouillard salin**

La solution saline utilisée dans la méthode du brouillard salin représente assez bien la pollution marine contenant un peu de matière insoluble. Dans cette méthode, l'isolateur soumis à la tension d'essai, est placée dans un brouillard salin dont le taux de salinité définit la sévérité. D'après la classification des sites pollués, les valeurs de salinités appliquées sont choisies selon une progression allant de 2.5 à  $160 \text{ kg}/\text{m}^3$  [32].

## **II.9 Conséquences de la pollution**

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

La rupture diélectrique de l'air peut être atteinte entre deux points de la surface isolante entraînant l'amorçage d'un arc électrique qui court-circuite une partie de la ligne de fuite.

Trois cas peuvent se présenter selon les contraintes auxquelles est soumis l'isolateur [40].

### **II.9.1 Arc non localisé**

L'arc électrique s'éteint rapidement, puis se réamorçage à un autre endroit et ainsi de suite. Ces arcs peuvent être dus soit à la formation d'une zone sèche à la suite du passage d'un

courant de fuite, comme ils peuvent être dus à l'état de surface de l'isolateur, (l'existence des pics sur la couche de pollution). Ce phénomène ne cause pas de dommages pour l'installation, malgré l'apparition de courant de fuite à la surface de l'isolateur [36 et 43].

### II.9.2 Arc fixe

L'arc électrique se fixe à la surface, soit en s'y maintenant (courant continu), soit en s'y réamorçant au même endroit (courant alternatif). Cet arc peut entraîner, par effet thermique, une dégradation de support isolant nécessitant le remplacement de l'élément défaillant [44].

### II.9.3 Court-circuit

Dans ce cas, l'arc électrique atteint l'électrode opposée. Ainsi, la formation d'un pont conducteur sur la surface isolante polluée favorise le passage d'un fort courant, ce cas engendre la rupture totale de l'isolation [40].

### II.9.4 Contournement

Le phénomène de contournement est une décharge disruptive accompagnée d'étincelles qui se déplacent sur l'interface de l'isolateur, d'une électrode vers une autre et finir par la formation d'un pont conducteur entre ses deux électrodes.

Le contournement des isolateurs sous pollution peut être décrit en quatre phases:

#### 1) Première phase (a)

Une couche de pollution recouvre la surface isolante. Elle est constituée de sels solubles et d'acides ou de bases dilués. Si la pollution a une forme d'une couche électrolytique liquide, les phases (c) à (f) peuvent avoir lieu directement, sinon un processus d'humidification est nécessaire, phase (b), figure II.2.

#### 2) Deuxième phase (b)

La couche de pollution est humidifiée. La pollution devient ainsi conductrice.

#### 3) Troisième phase (c)

Lorsque la surface isolante polluée est soumise à une tension, des courants de fuite apparaissent sur sa surface et commencent à assécher certaines zones de la couche polluante.

#### 4) Quatrième phase (d)

Le séchage précédent n'est jamais uniforme, car il existe des zones sèches qui arrêtent l'écoulement des courants de fuite.

#### 5) Cinquième phase (e)

L'application d'une tension aux zones sèches, qui peuvent n'avoir que quelque centimètre de largeur, provoque un claquage dans l'air. Les zones sèches sont court-circuitées par des arcs

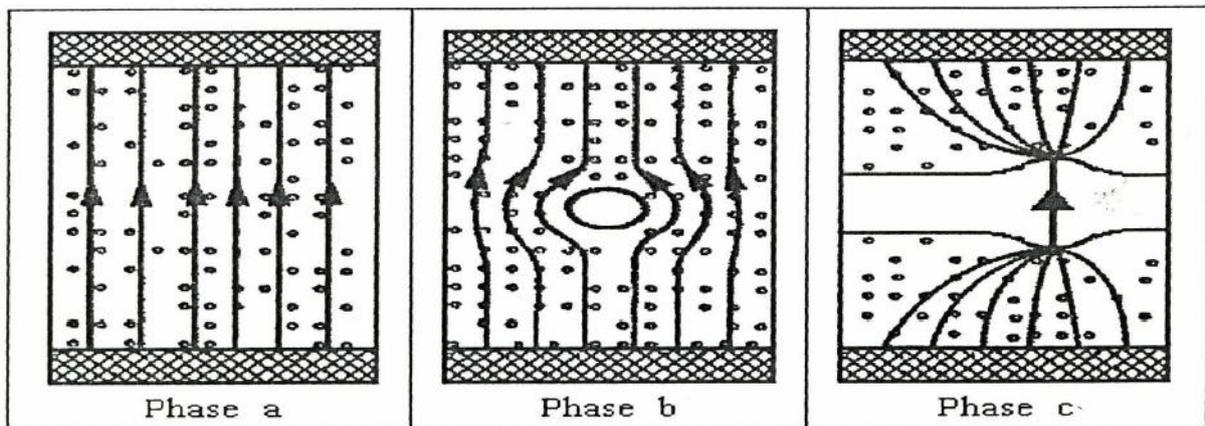
électriques en série avec la résistance de la partie non séchée de la couche polluante. Il en résulte une impulsion de courant de fuite, chaque fois qu'une zone sèche est amorcée.

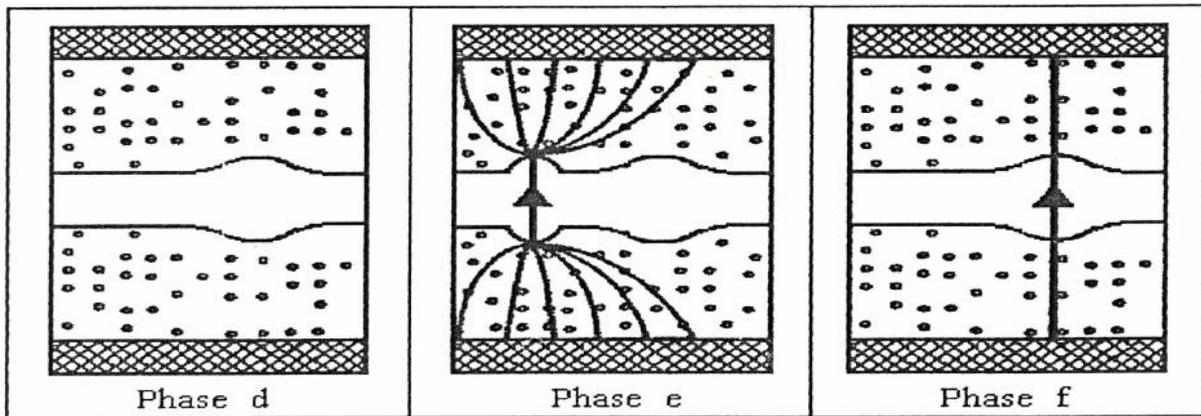
### 6) Sixième phase (f)

La résistance de la partie humide est faible, les arcs qui court-circuitent la zone sèche peuvent s'étendre le long de la surface isolante en court-circuitant ainsi une partie de plus en plus grande de cette surface. Ceci entraîne une réduction de la résistance en série avec les arcs, ce qui accroît le courant et permet aux arcs de court-circuiter une partie plus grande de la surface de l'isolant. Finalement, la surface de l'isolant se trouve complètement court-circuitée et un défaut à la masse est établi.

Sous tension continue, le processus global est relativement facile à décomposer. Une fois la décharge amorcée et si les conditions électriques le permettent, elle va se développer rapidement jusqu'au contournement, sinon la zone sèche s'élargit et la tension appliquée ne peut plus maintenir la décharge, qui va alors s'éteindre.

Sous tension alternative, le problème est plus complexe du fait des passages par zéro de l'onde de courant pendant lesquels la décharge s'éteint. Les temps au contournement sont très variables, selon les conditions électriques. Lorsque ce temps est élevé, le passage par zéro peut intervenir avant que le contournement total ne soit atteint, il faut que la tension appliquée soit augmentée afin de réamorcer la décharge à l'alternance suivante.





**Fig. II.1 :** Différentes étapes du processus de contournement d'une surface isolante polluée

## II.10 Techniques de lutte contre la pollution

A cause de l'augmentation du degré de pollution par des dépôts salins (bord de la mer) ou de divers produits issus de pollution (environnement industriel) qui représente un risque immense pour les installations électriques en provoquant des courants de fuite. Plusieurs techniques de lutte contre la pollution sont utilisées.

### II.10.1 Allongement de la ligne de fuite

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

- Le changement de type d'isolateur (pour rallonger la ligne de fuite): c'est une technique très coûteuse et souvent impossible à réaliser en poste.
- L'utilisation des matériaux polymères pour prolonger la ligne de fuite, qui sont collés sur la surface des isolateurs existants [38].

### II.10.2 Utilisation des isolateurs plats (auto-nettoyables)

Cette méthode consiste à utiliser des isolateurs qui se nettoient sous l'effet du vent et ont une propriété d'accumuler moins de pollution que les isolateurs traditionnels grâce à leur profil plat (sans nervures). Ils sont principalement utilisés dans les régions désertiques [41].

### II.10.3 Graissage des isolateurs (couches hydrophobes) [34 et 45]

On utilise des graisses silicones 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.

Par mesure économique, seuls les isolateurs de postes sont concernés.

#### **II.10.4 Revêtements à base de silicone**

Cette méthode consiste à appliquer, par pulvérisation ou au pinceau, un caoutchouc silicone qui se vulcanise à température ambiante à la surface des isolateurs. 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 [41].

#### **II.10.5 Les isolateurs composites**

Ils ont de bonnes propriétés hydrophobes et peuvent être utilisés dans des conditions de pollution très sévères. Il est constitué d'un noyau en fibre en verre imprégné d'une résine et du revêtement à ailettes de types élastomères.

Cependant, ces isolateurs, revêtus d'un polymère voient leurs caractéristiques changer au cours du temps ; ils peuvent vieillir sous l'effet des différentes contraintes (électriques et climatiques) auxquelles ils sont soumis en service [45 et 46].

#### **II.10.6 Nettoyage des isolateurs**

Afin de ne pas être obligé de couper les lignes pour le nettoyage parfois assez long qui engendre des interruptions de services, un lavage manuel et périodique sous tension est utilisé et réalisé à l'aide d'installations fixes ou mobiles. Dans les deux cas sous ou hors tension, il est effectué selon des règles strictes concernant la qualité de l'eau du lavage, le processus du lavage et les distances de sécurité et ce afin d'éliminer tout risque de contournement pendant le lavage [32].

#### **II.11 Effet de la pollution sur les équipements électriques [47]**

Les irrégularités dans la distribution des dépôts polluants sur la surface des isolateurs conduisent évidemment à une diminution des performances des isolateurs sous pollution. Ce problème a toujours entraîné et engendre encore des défauts d'isolation au niveau de ces réseaux électriques, il en résulte parfois des défaillances des équipements, des installations des consommateurs d'énergie électrique, une diminution de la fiabilité des réseaux électriques ainsi qu'un manque à gagner pour les exploitants de ces structures électriques.

Lorsque la surface est recouverte d'un dépôt conducteur de pollution humide, un courant de fuite prend alors naissance. Son amplitude est en fonction du degré de pollution (quantité de sels solubles). Le passage du courant de fuite sur la surface polluée du diélectrique entre les ferrures engendre une corrosion électrolytique de ces pièces métalliques. Les effets du courant de fuite d'autant plus nocifs que la fréquence et la durée du période humide sont élevés.

Ces phénomènes de corrosion se traduisent par :

- Une attaque de la galvanisation.
- Une attaque de la structure interne de l'acier ou de la fonte avec formation d'un dépôt de rouille conductrice qui peut couler sur le diélectrique.
- Affecter la résistance mécanique de l'isolateur : cela s'applique particulièrement aux isolateurs du capot et tige lorsque la section de la partie corrodée réduite (exemple : réduction du diamètre de la tige).
- Affecter la tenue électrique du fait de la formation d'un dépôt de rouille sur la surface isolante. En outre, ce dépôt peut entraîner des dommages à la partie isolante du fait d'une concentration du champ électrique autour de cette nouvelle électrode.
- Entraîner la rupture du diélectrique du fait de l'expression de la tige corrodée. Ce phénomène reste spécifique à l'isolateur capot et tige en porcelaine [38].

## II.12 Décharge électrique

Par définition, c'est un passage de courant électrique entre deux objets possédant des potentiels différents sur un temps extrêmement court.

La décharge électrique (ou étincelle) est instantanée pour l'œil humain et s'accompagne d'un claquement sec et violent. Mais en réalité, cette étincelle, qui correspond au passage de l'état isolant à l'état conducteur de l'air, ne se produit pas de façon instantané mais avec un retard qui dépend essentiellement de la valeur de la distribution et de l'évolution temporelle du champ électrique ainsi que d'autres facteurs qui sont liés à l'environnement où elle se produit. Le développement de la décharge disruptive (ou perforation diélectrique) à l'intérieur des matériaux isolants solides est généralement lié à un ou une association des phénomènes suivants : décharges thermiques, décharges partielles et décharges intrinsèques[34].

### II.12.1 Décharge thermique

Le courant de conduction, en générale est très faible, et les pertes diélectriques dues à la conductivité non nulle des diélectriques génèrent une énergie thermique calorifique dans le solide. Quand le temps d'application de la tension est grand, la quantité de chaleur générée dans le solide devient importante. Si cette énergie calorifique est supérieure à la possibilité d'évacuation par conduction ou convection thermique du diélectrique dans les conditions de refroidissement données, la température du diélectrique va augmenter, provoquant une instabilité thermique du diélectrique et une augmentation de courant de conduction [34 et 38].

### II.12.2 Décharge partielle

Les matériaux isolants de qualité technique comportent toujours des inclusions de particules étrangères et des vacuoles gazeuses. Lorsque ces isolants sont soumis à une certaine tension alternative à fréquence industrielle, on constate que le champ électrique est plus élevé dans les vacuoles gazeuses  $E_g$  que dans l'isolant  $E_i$ . Etant donné la continuité du vecteur induction électrique dans un milieu non ionisé à l'état initial, on trouve :

$$E_g / E_i = (\epsilon_{ri}) / (\epsilon_{rg}) \quad (7)$$

$\epsilon_{ri}$  : est la permittivité relative de l'isolant.

$\epsilon_{rg}$  : est la permittivité relative de gaz.

Deux facteurs contribuent à faire apparaître des décharges partielles dans les isolants :

D'une part la permittivité relative des isolants solides étant toujours plus élevée (2 à 6 fois) que celle de gaz ( $\epsilon_{rg} = 1$ ), le champ électrique dans les vacuoles est proportionnellement plus élevé. D'autre part, la rigidité diélectrique des gaz est nettement plus basse (environ 10 fois) que celle des solides.

Ces deux constatations, allant dans le même sens, font que des décharges dites partielles apparaissent dans les vacuoles des isolants pour des tensions 20 à 60 fois plus faibles que celle qui entraîneraient la perforation du diélectrique solide [32].

### II.12.3 Décharge intrinsèque

La décharge intrinsèque est due à la présence d'électrons libres, aptes à se déplacer dans l'isolant. Il existe deux types de décharges intrinsèques : l'une dite à haute température, l'autre dite à basse température, le phénomène de saturation s'explique par le fait que le courant à travers l'isolant ne dépend pratiquement que du nombre, bien déterminé et invariant, d'électrons libres dans l'isolant [34].

### II.13 Conclusion

Dans le matériel électrique destiné à fonctionner sous HT et MT, l'isolation des conducteurs, prend une grande importance. Leur choix doit tenir compte de leurs propriétés physiques et des différentes contraintes supportées. L'isolation assure les deux fonctions mécanique et électrique, pratiquement celle-ci est le siège de phénomène de pollution.

La pollution de l'isolation est un facteur essentiel dont il faut tenir compte dans la conception des lignes électriques de haute tension qui la contamine en diminuant ses caractéristiques.

Il est indispensable de connaître la sévérité de la pollution des sites concernés. La connaissance de cette sévérité consiste à étudier les différents paramètres qui définissent l'état de dégradation de l'isolation qui est une condition préalable et indispensable pour apprécier le niveau de l'isolement des ouvrages installés, en vue de dimensionner convenablement l'isolation [32]. De ce point de vue, le choix de cette dernière se fait donc essentiellement à partir de la tension de service, en fonction des efforts mécaniques auxquels elle est soumise (facteurs climatiques, pollution...etc.).

Les techniques de lutte contre la pollution actuellement connues (graissage, lavage, nouveau type d'isolateurs, revêtements hydrophobes) permettent de disposer aujourd'hui des solutions curatives à la plupart des problèmes de pollution rencontrés par les exploitants sur le réseau.

**Chapitre III**

**Partie expérimentale**

### III.1 Introduction

L'objectif recherché à travers cette partie expérimentale est d'étudier l'effet de l'inclinaison d'une isolation en silicone sur le degré d'humidification de sa ligne de fuite ceci consiste en la quantification de l'effet d'inclinaison par rapport à l'horizontale sur la performance d'une surface en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau à nombre de gouttes données, conductivité électrique constante, sans accumulation de la quantité d'eau sur la surface de l'isolation située du côté de l'électrode mise à la terre (électrode percée) tout en variant le volume des gouttes et l'inclinaison de l'isolation par rapport à l'horizontal, lorsque celle-ci est mise hors ou sous tension alternative.

### III.2 Modèle expérimental et techniques de mesure

Le modèle expérimental est illustré par la figure 1. Les isolations en silicone sont parallélépipédiques de dimensions (11 x 10 x 0.6) cm<sup>3</sup> et sont délimitées par une géométrie d'électrodes planes à champ électrique quasi uniforme (Figs. 1 et 1b). Ces surfaces en silicone sont des produits conçus à base de caoutchouc à haute température de vulcanisation. La substance est mélangée à de l'aluminiumtrihydrat à un taux de 4 à 5 %. L'angle de contact statique d'une goutte d'eau de 50 µl de volume reposant sur sa surface est estimé à la 104 ° selon l'entreprise allemande Wacker Chemie, fournisseur et fabricant de ces échantillons [51 et 52]. Lors de cette étude, le nombre d'éprouvettes est pris égal à 15.



**Fig. 1:** Arrangement en zigzag des gouttes d'eau sur la surface de l'isolation en silicone délimitée par deux électrodes et micropipette (a: modèle expérimental, b: électrodes à dents HT et terre, c: micropipette graduée, d: ajustement du volume de 10 à 100 µl

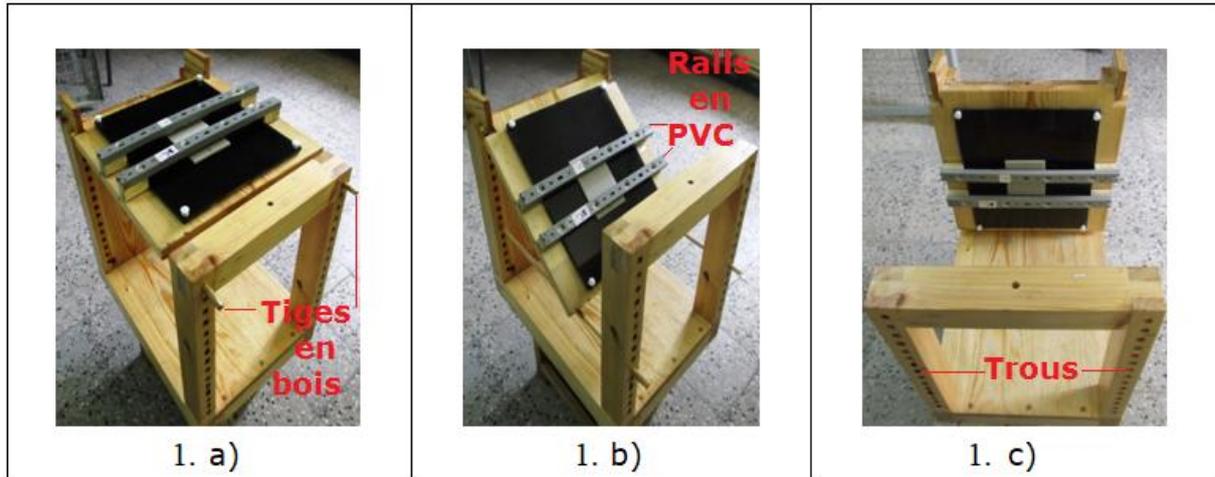
Les électrodes sont en fer, dont l'une est reliée à la terre et l'autre à la haute tension. La largeur (l) des électrodes est de 8 cm, leur diamètre ( $\phi_e$ ) est de 2 cm et leur rayon de courbure ( $r_c$ ) est égal à 1 cm. La base des électrodes est découpée en dents d'épaisseur égale à 0.2 cm. Elles sont espacées de 1.5 cm afin de faciliter l'évacuation à l'extérieur des gouttes d'eau entrant en leur contact (Fig. 1b). La ligne de fuite totale de l'isolation ( $L_c$ ) entre les électrodes

est fixée à 6 cm tout au long des essais effectués (Fig. 1a). Le point d'impact de chaque goutte d'eau sur la surface de l'isolation a été repéré au préalable à l'aide d'une teinte bleu isolante. L'arrangement en zigzag symétrique des gouttes d'eau sur la surface interélectrode de l'isolation est décrit par les paramètres ( $L_{dd}$ ), ( $L_{de}$ ) et ( $l_{rr}$ ) (Fig. 1a). La première grandeur correspond à la distance entre deux gouttes d'eau adjacentes reposant sur la ligne de fuite de l'isolation ( $L_c$ ). La deuxième est définie comme étant la distance séparant une goutte d'eau de l'électrode sous tension ou mise à la terre et la troisième comme étant celle qui est comprise entre deux rangées successives sur la largeur de l'isolation. Elles sont maintenues constantes tout au long des essais effectués dans cette étude. Leurs valeurs sont respectivement:  $L_{dd} = 1$  cm,  $L_{de} = 1$  cm et  $l_{rr} = 2$  cm.

Le dispositif permettant la variation de l'angle d'inclinaison ( $\alpha$ ) de l'isolation par rapport à l'horizontale est illustré par la figure 2. Il est confectionné en bois de (50 x 50 x 40) cm<sup>3</sup> de dimensions. Il est peint de plusieurs couches de vernis afin de ne pas être mouillé par les gouttes d'eau tombant sur celui-ci lors des essais.

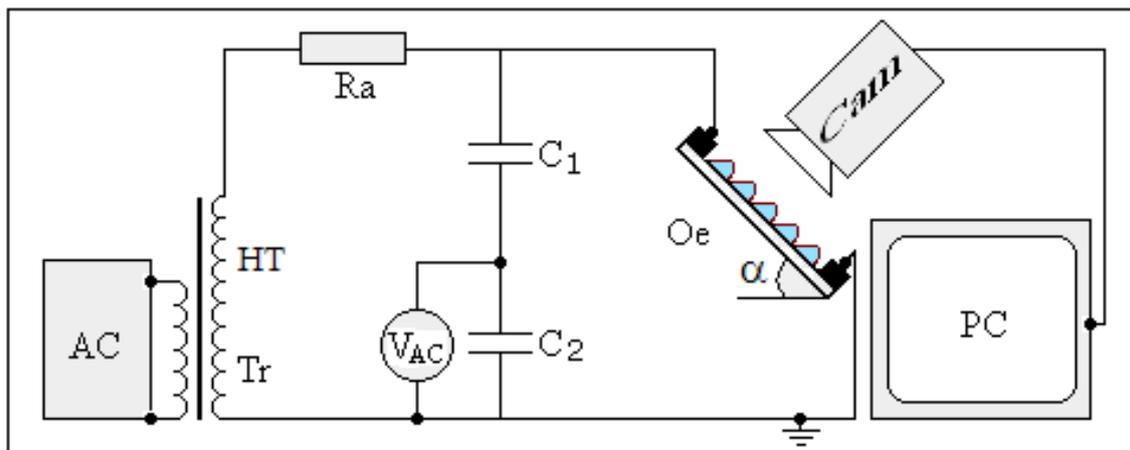
L'isolation est immobilisée sur la paroi de base supérieure du dispositif. Celle-ci est reliée à une rotule lui permettant de décrire un angle ( $\alpha$ ), compris entre 0 et 90 °. La fixation d'un angle d'inclinaison quelconque peut être obtenue au moyen de deux tiges. Celles-ci passent par des trous réalisés sur ses deux faces verticales opposées afin de bloquer la paroi à une position correspondant respectivement aux angles extrêmes suscités (Figs. 2a et 2c). La figure 2b donne la position correspondant à l'angle d'inclinaison quelconque  $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ . Le dépôt des gouttes d'eau sur l'échantillon est effectué au préalable en position horizontale de l'isolation (Fig. 2a). Ensuite, la paroi sur laquelle repose le matériau est tournée lentement puis immobilisée au moyen des deux tiges à l'angle d'inclinaison choisi.

Les essais effectués au laboratoire se rapportent aux mesures du volume, surface et longueur de gouttes d'eau résiduelles le long de la ligne de fuite de l'isolation en fonction de l'angle de son inclinaison hors ou sous un niveau de tension alternative. Le volume des gouttes d'eau et leur dépôt sur la surface isolante ont été effectués à l'aide d'une micropipette (Fig. 1c). Le volume des gouttes d'eau choisi est pris quasiment égal à (45, 60, 90 et 120)  $\mu$ l. Ces valeurs sont proches de celles trouvées lors des mesures effectuées sous pluie naturelle [48]. La conductivité électrique des gouttes d'eau est fixée égale à 29  $\mu$ S/cm. Sa mesure a été réalisée à l'aide d'un conductimètre à sonde mobile. Sa valeur est réglée en lui ajoutant du sel cuisine de telle sorte qu'elle soit la même que celle des gouttes d'eau de pluie naturelle (Fig. 4c).



**Fig.2:** Dispositif à paroi supérieure rotative assurant la variation de l'angle d'inclinaison ( $\alpha$ ) de l'isolation par rapport à l'horizontale (a:  $\alpha = 0^\circ$ , b:  $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ , c:  $\alpha = 90^\circ$ )

Les circuits électriques de mesure des différents niveaux de tension appliquée à l'isolation et de visualisation de la décharge électrique évoluant sur sa surface sont illustrés par la figure3.



**Fig. 3:** Schéma de mesure de niveau de tension appliquée à l'isolation et de visualisation de la décharge électrique évoluant sur sa surface (Tr: Transformateur; AC: Appareil de commande de la tension d'essai;  $V_{cr}$ : Voltmètre de crête, Oe: Objet d'essai; Cam: Caméscope; PC: Ecran Ordinateur.

Le circuit de mesure de la tension appliquée à l'isolation est connecté aux bornes du secondaire d'un transformateur haute tension (0.08 A/135 kV) (Fig. 3). La sortie du transformateur est reliée au diviseur capacitif ( $C_1/C_2$ ) à travers la résistance d'affaiblissement de courant ( $R_a$ ). Le voltmètre de crête ( $V_{cr}$ ), à affichage numérique, est branché aux extrémités de la capacité basse tension ( $C_2$ ) du diviseur capacitif suscit. L'objet d'essai (Oe) est connecté aux bornes du diviseur capacitif ( $C_1/C_2$ ). Le circuit de visualisation comprend une caméra rapide (Cam) et un PC. La caméra permet l'enregistrement des phénomènes électrohydrodynamiques des gouttes d'eau et des diverses séquences de développement de la

décharge électrique résultante évoluant sur la surface hydrophobe recouverte de ces perles d'eau. Le PC permet le traitement d'images à l'aide d'un logiciel Vidéo studio 11. Afin de déterminer le taux d'humidification de la ligne de fuite de l'isolation, la tension est appliquée manuellement à celle-ci. Deux niveaux de tension (0 et 20 kV), inférieurs à celui de son contournement, ont été choisis.

Après chaque essai, le volume des diverses gouttes d'eau résiduelles adhérant encore à la surface du matériau est mesuré à l'aide d'une seringue graduée en dizaines de microlitres.



**Fig. 4:** Dessiccateur en PVC

### III. 3 Résultats et discussions

Au laboratoire, l'humidification de la surface d'une isolation en silicone est obtenue au moyen d'un dépôt manuel de 25 gouttes d'eau à volume variable ( $V_i$ ), selon un arrangement en zigzag symétrique sur toute sa surface (Fig.1a). Pour chacun des volumes bien choisis, les gouttes d'eau sont déposées à l'aide d'une micropipette, sur l'isolation reposant sur l'armature mobile du dispositif en position horizontale, L'armature rotative est ensuite inclinée d'un angle ( $\alpha$ ) quelconque en absence ou sous une contrainte de tension alternative. A chaque angle d'inclinaison de la surface de l'isolation, correspond une nouvelle constellation des gouttes d'eau résiduelles. Celles-ci sont dénombrées et leur volume ( $V_d$ ), volume résiduelles de la ligne de fuite la plus humide ( $V_{lfh}$ ), la longueur de la ligne de fuite la plus humide ( $L_{lfh}$ ) et la surface des gouttes résiduelles de la ligne de fuite la plus humide ( $S_{lfh}$ ) sont mesurés en répétant une dizaine de fois l'essai pour chaque volume initial du dépôt de gouttes d'eau, et la valeur retenue est la moyenne arithmétique de tous ceux obtenues sur la même série d'essais.

#### III. 3.1 Isolation hors tension

Une goutte d'eau en mouvement sur une surface d'une isolation hydrophobe hors tension et inclinée d'un angle ( $\alpha$ ) est, selon Navier-Stokes, soumise à l'ensemble des forces données par la formule suivante :

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

Où:

-  $d$ ,  $V_f$  et  $\mu$  caractérisent respectivement la densité du fluide, sa vitesse et sa viscosité;

Les trois termes:  $\nabla P_A$ ,  $\mu \nabla^2 \vec{V}_f$  et  $\vec{F}_g$  représentent respectivement les effets de forces dues respectivement à la pression, la viscosité et la force de gravitation exercées sur la goutte d'eau

La formule 1 peut aussi s'écrire sous la forme suivante:

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

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

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

Avec :

D: Diamètre de la goutte,

$\gamma_{LV}$ : Tension de surface,

$\theta_R$ : Angle de recul de la gouttelette,

$\theta_A$ : Angle d'avancée de la gouttelette.

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

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

Où:

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

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

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

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

Pour rester immobile, une goutte résiduelle d'eau, déposée initialement sur la surface de l'isolation, inclinée d'un angle ( $\alpha$ ), doit remplir les conditions d'équilibre selon la formule (6):

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

Ou bien :

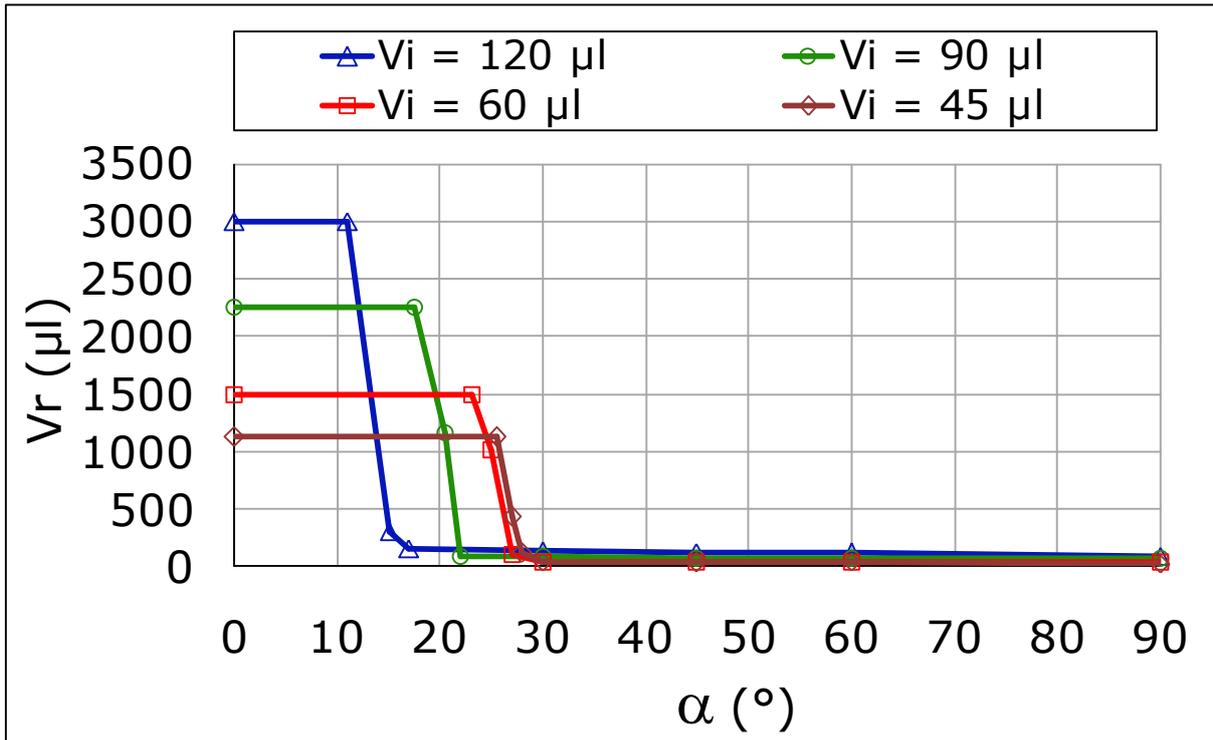
$$mg \sin \alpha = F_{ad} + F_s + F_d \quad (7)$$

La figure 5 donne la caractéristique  $V_r = f(\alpha, V_i)$  du volume total des gouttes d'eau résiduelles sur l'isolation en fonction de son angle d'inclinaison. Celle-ci peut être subdivisée en trois zones distinctes.

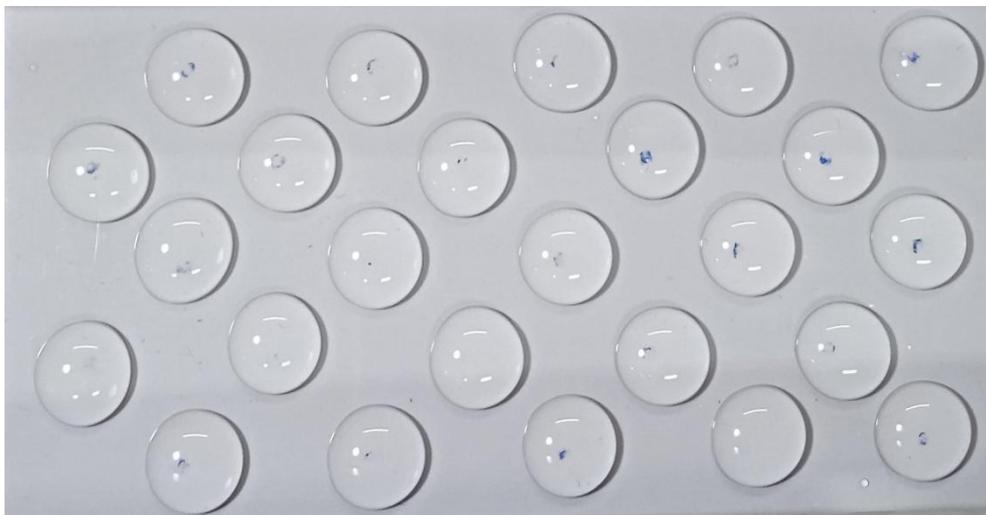
Dans la première zone, la courbe se présente sous forme d'un palier parallèle à l'axe des angles d'inclinaison. Celui-ci s'allonge avec la croissance de l'angle d'inclinaison de la surface de l'isolation jusqu'à  $\alpha < \alpha_v$ , dépendant du volume des gouttes d'eau initialement déposées ( $V_i = 120 \mu\text{l}$ ,  $\alpha_v = 11^\circ$ ) et dans le sens décroissant du volume des gouttes d'eau initiales ( $V_i$ ). Ce palier correspond à un volume de gouttes d'eau résiduelles constant et il est obtenu uniquement lorsque l'isolation est hors tension, cela veut dire que sous un angle d'inclinaison inférieur à  $\alpha_v$ , les gouttes d'eau gardent leur volume initial ( $V_i$ ), elles ne tombent pas (Fig. 7) mais s'allongent (Fig. 8) seulement sous l'action de l'ensemble des forces décrites par les formules 6 et 7.

Dans la deuxième zone, l'allure de la caractéristique  $V_r = f(\alpha, V_i)$  est strictement décroissante. En effet, au moment de l'inclinaison de l'échantillon, toute goutte résiduelle d'eau de volume ( $V_r$ ) adhérant encore à la surface de l'isolation est créée suite aux phénomènes hydrodynamiques. Sachant que le volume varie dans le même sens que la masse ( $m_d = m_{vd} V_d$ ), au coefficient près de la masse volumique de la goutte d'eau déposée ( $m_{vd}$ ), donc si ( $\alpha$ ) augmente, le volume ( $V_d$ ) ou la masse ( $m_d$ ) de la goutte d'eau résiduelle doit diminuer afin que la conservation de son équilibre soit garantie. Ceci est vérifié puisque l'intensité des trois forces ( $F_{ad}$ ), ( $F_s$ ) et ( $F_d$ ) décroît avec la diminution du volume ( $V_d$ ) de la goutte du fait de leur liaison par le diamètre de celle-ci selon les formules respectives (3), (4) et (5).

Dans la troisième zone, la caractéristique  $V_r = f(\alpha, V_i)$  présente une allure en forme d'un palier pratiquement parallèle à l'axe des angles d'inclinaison. Celui-ci se raccourcit avec la croissance de l'angle d'inclinaison de la surface de l'isolation compris entre  $\alpha'_v < \alpha < 90^\circ$ , dépendant du volume initial des gouttes d'eau ( $V_i = 120 \mu\text{l}$ ,  $\alpha'_v = 11^\circ$ ) et dans le sens décroissant du volume des gouttes d'eau initiales ( $V_i$ ). L'explication attribuée à ce phénomène est similaire aussi à celle qui a été donnée ci-dessus.



**Fig.5:** Volume total des gouttes d'eau résiduelles sur l'isolation en fonction de son angle d'inclinaison



**Fig. 6:** Gouttes d'eau de volume 120µl initialement déposées sous  $\alpha = 0^\circ$

La figure 10 donne la caractéristique  $V_{r1th} = f(\alpha_v, V_i)$  du volume total des gouttes d'eau résiduelles de la ligne de fuite la plus humide de l'isolation en fonction de l'angle de son inclination (Fig. 11). L'allure de la caractéristique du volume total des gouttes d'eau est subdivisée en trois parties de la même manière que le volume résiduel total des gouttes d'eau reposant sur la surface de l'isolation (Fig. 5).



**Fig. 7:** Allongement des gouttes d'eau de volume 120µl sous  $0^\circ < \alpha < 11^\circ$

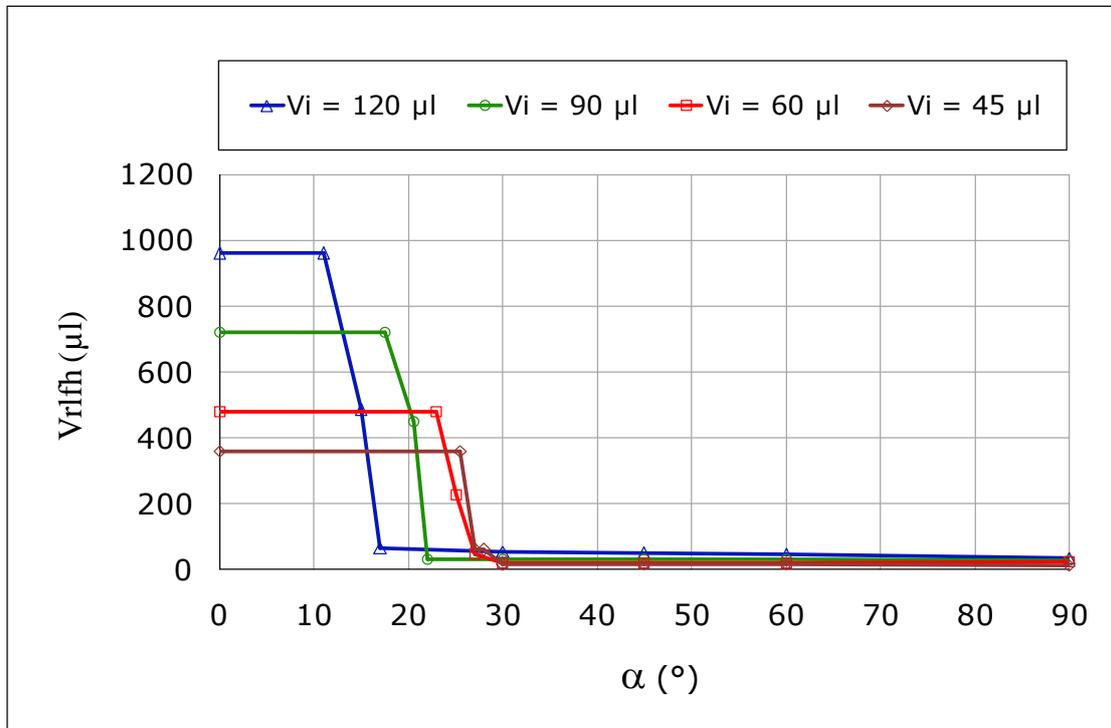


**Fig. 8:** Chute partielle des gouttes d'eau allongées de volume 120µl sous  $15^\circ < \alpha < 30^\circ$

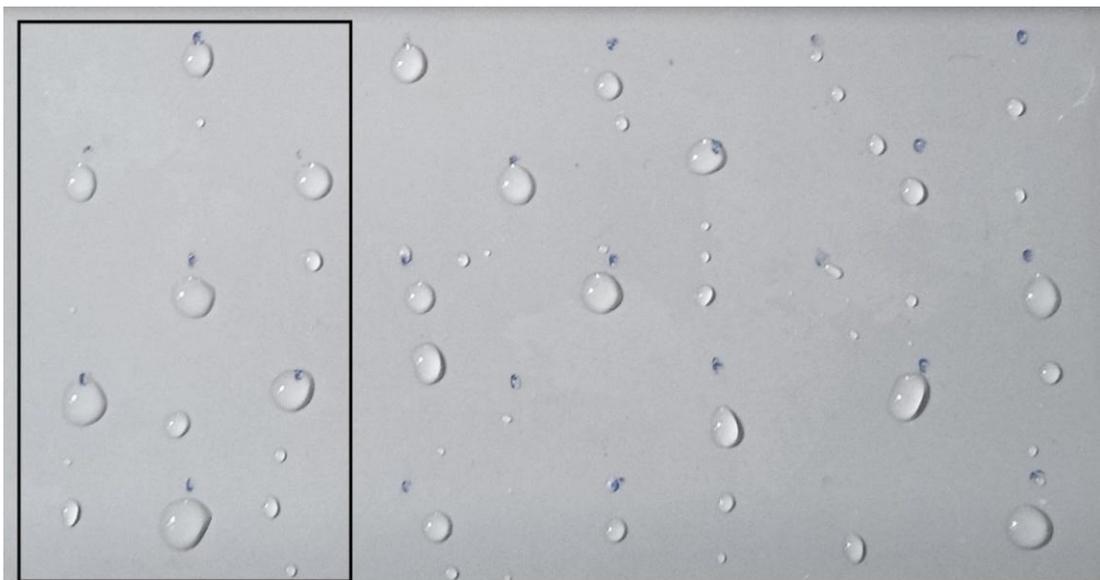


**Fig. 9:** Gouttes d'eau résiduelles de volume 120µl sous  $\alpha \geq 30^\circ$

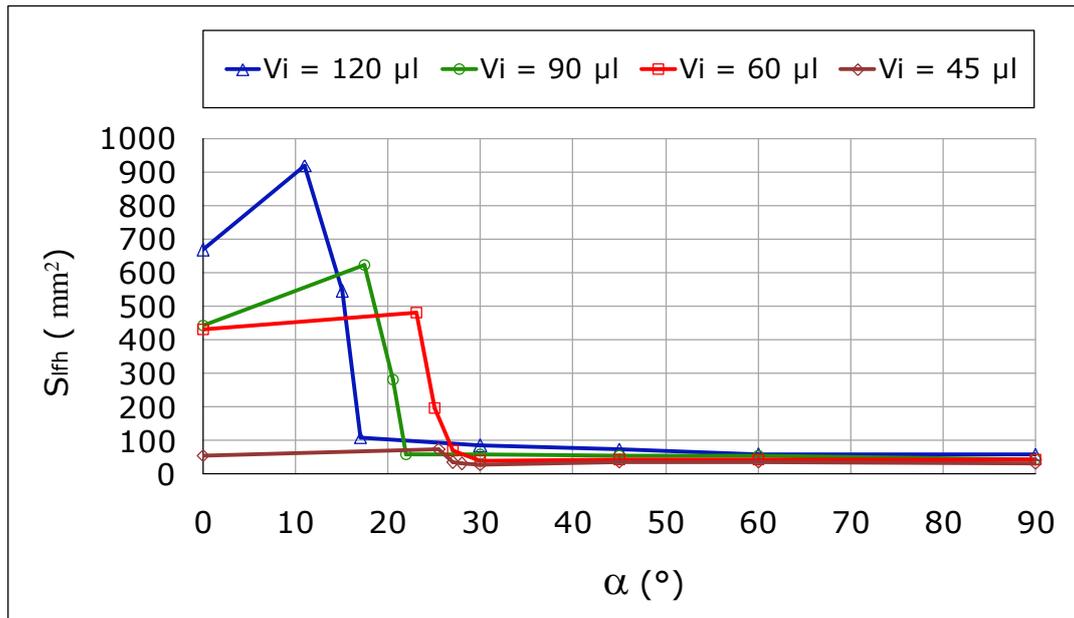
Les raisons expliquant l'évolution de ces trois parties sont similaires à celles données au volume total de l'isolation. La seule différence réside au niveau de la faible valeur du volume résiduel des gouttes d'eau se trouvant le long de la ligne de fuite de l'isolation qui représente une infime partie de sa surface totale (2 cm x 6 cm)(Fig. 11).



**Fig. 10:** Volume total des gouttes d'eau résiduelles le long de la ligne de fuite la plus humide en fonction de l'angle d'inclinaison de l'isolation



**Fig. 11:** Volume résiduel des gouttes d'eau sur la ligne de fuite l'isolation ( $V_{r_{lfh}} = 120 \mu\text{l}$ ,  $\alpha = 30^\circ$ )



**Fig. 12:** Surface des gouttes d'eau résiduelles de ligne fuite la plus humide en fonction de l'angle d'inclinaison de l'isolation

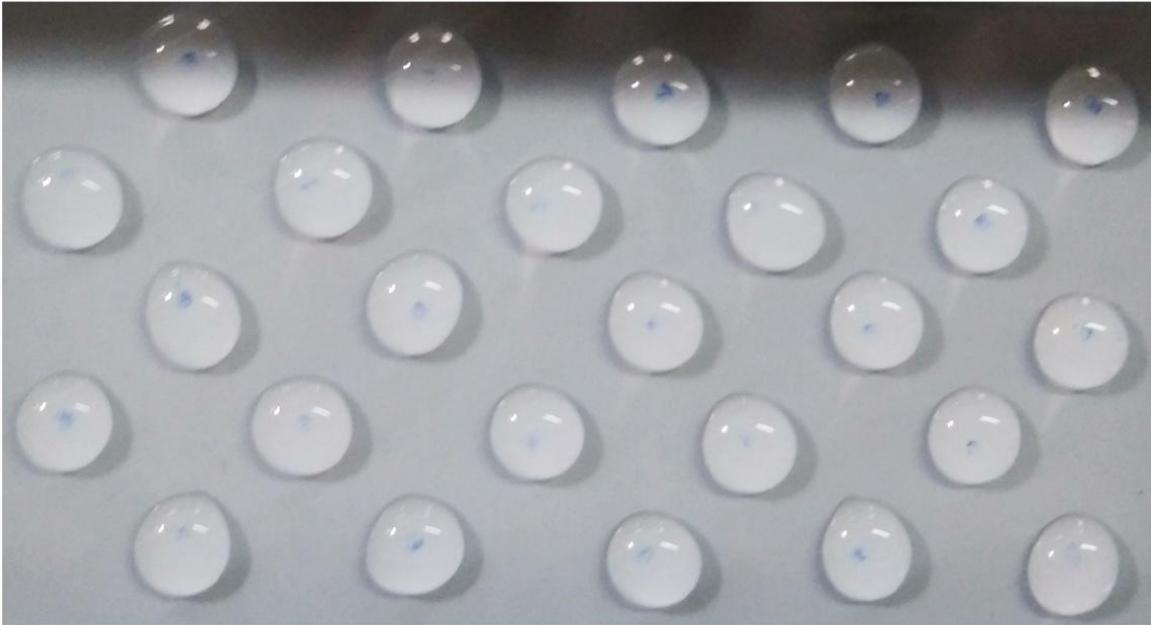
La figure 12 donne la caractéristique  $S_{lfh} = f(\alpha_v, V_i)$  de la surface de contact sur l'isolation des gouttes d'eau résiduelles se trouvant le long de sa ligne de fuite la plus humide en fonction de son angle d'inclinaison. Sa valeur est obtenue à l'aide d'un logiciel nommé image J, qui convertit la surface sélectionnée de pixels en  $\text{mm}^2$ . La surface totale de cette ligne de fuite est obtenue en sommant les surfaces des gouttes d'eau de niveaux différents se trouvant sur celle-ci. Elle est subdivisée aussi en trois zones distinctes.

La première zone est caractérisée par une allure des courbes strictement croissante et augmente avec l'élévation de l'angle d'inclinaison de la surface de l'isolation jusqu'à  $\alpha \leq \alpha_v$  ( $V_i = 120 \mu\text{l}$ ,  $\alpha_v = 11^\circ$ ) dépendant de la valeur du volume des gouttes d'eau initialement déposées (Figs. 6 et 13). Cette croissance est expliquée par l'allongement des gouttes d'eau initialement déposées qui ne tombent pas dans cet intervalle d'angle d'inclinaison (Figs. 7 et 14) en conservant leur volume initial sous l'action des forces décrites par les formules 6 et 7.

Dans la deuxième zone, Un déclin de l'allure des courbes de surface des gouttes d'eau en fonction de l'angle d'inclinaison de l'isolation est observé. Cette décroissance est justifiée par la chute partielle de ces gouttes initiales et la diminution du volume résultant avec l'élévation de l'angle d'inclinaison de l'isolation (Figs. 8 et 15).

Dans la troisième zone, la surface des gouttes d'eau résiduelles demeure quasi constante. L'explication attribuée à celle-ci est similaire à celle correspondant au volume total résiduel de la ligne de fuite de l'isolation (Figs. 9, 11 et 16).

L'allure des courbes de surfaces de la caractéristique  $S_{lth} = f(\alpha_v, V_i)$  hors tension (Fig. 12) peut être expliqué facilement et qualitativement celle de la tension alternative de contournement d'une surface en silicone (Fig. 17) sous pratiquement de conditions climatiques similaires [34]. La première zone de croissance de l'allure de la surface des gouttes d'eau de la ligne de fuite correspond à celle de décroissance de la tension de contournement de l'isolation, car plus la surface de la ligne de fuite la plus humide est élevée, plus la performance de l'isolation diminue jusqu'à atteindre sa valeur minimale.



**Fig. 13:** Gouttes d'eau de volume  $90 \mu\text{l}$  initialement déposées sous  $\alpha = 0^\circ$

La deuxième zone de décroissance de l'allure de la surface des gouttes d'eau de la ligne de fuite la plus humide correspond à celle de croissance de la tension de contournement de l'isolation (Figs. 12 et 17), car plus la surface de la ligne de fuite la plus humide est faible, plus la performance de l'isolation est élevée.

Dans la troisième zone, à la quasi-constance de la valeur de la surface des gouttes d'eau résiduelles lui correspond celle de la valeur de la tension de contournement de l'isolation (Figs. 12 et 17).

La figure 18 donne la caractéristique  $L_{lth} = f(\alpha_v, V_i)$  de la longueur de ligne de fuite la plus humide de l'isolation hors tension en fonction de son angle d'inclinaison et du volume des gouttes déposées initialement.



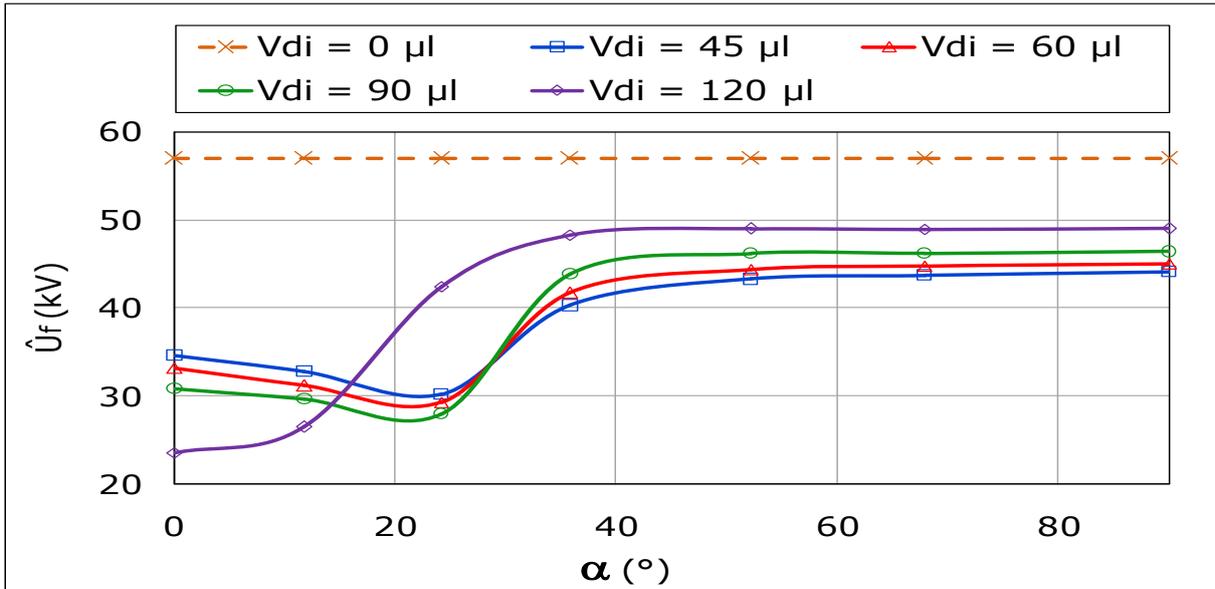
**Fig. 14:** Allongement sans chute des gouttes d'eau de volume  $90 \mu\text{l}$  sous  $0^\circ < \alpha < 11^\circ$



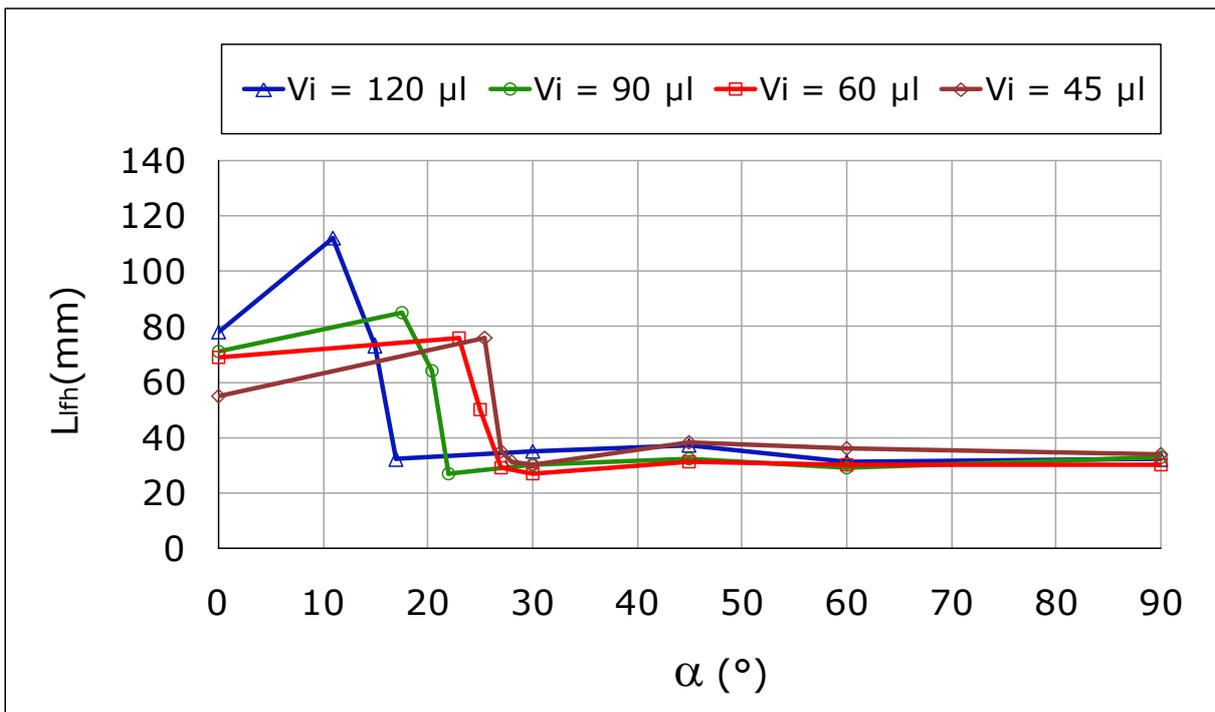
**Fig. 15:** Chute partielle des gouttes d'eau allongées de volume  $90 \mu\text{l}$  sous  $15^\circ < \alpha < 30^\circ$



**Fig. 16:** Gouttes d'eau résiduelles de volume  $90 \mu\text{l}$  sous  $\alpha \geq 30^\circ$



**Fig. 17:**  $U_c = f(\alpha, V_i)$  d'une isolation en silicone (5 rangées x 5 gouttes d'eau en zigzag,  $\sigma_v = 30$  µS/cm,  $L_c = 6$  cm,  $L_{dd} = L_{de} = 1$  cm et  $l_{rr} = 2$  cm)



**Fig. 18:** Longueur de la ligne de fuite la plus humide en fonction de l'angle d'inclinaison de l'isolation

Cette longueur de fuite est obtenue à l'aide du logiciel image J de la même façon que la surface  $S_{fth}$ . La longueur totale de cette ligne de fuite la plus humide est obtenue en additionnant toutes les longueurs des gouttes d'eau de différents niveaux rencontrées sur celle-ci. Son évolution est qualitativement très similaire à celle de la surface  $S_{fth}$ . Comme il

existe une proportionnalité entre  $S_{lth}$  et  $L_{lth}$  donc toutes les interprétations suscitées sont aussi applicables à cette grandeur.

### III.3.2 Isolation sous tension

Sous l'application d'un champ électrique à l'isolation, les gouttes d'eau se polarisent et une force électrostatique, ainsi créée [49-50], s'ajoute au bilan des forces suscitées conformément à la formule (8).

$$mg \sin \alpha + F_e = F_{ad} + F_s + F_d \quad (8)$$

Pour une goutte individuelle reposant sur une isolation et mise sous l'action d'un champ électrique non nul, l'expression de cette force électrique est de la forme [51]:

$$F_e = \rho_t E - \frac{1}{2} |E|^2 \nabla \varepsilon + \frac{1}{2} \nabla \left( |E|^2 \frac{d\varepsilon}{d\rho_m} \rho_m \right) \quad (9)$$

Où:

$E$ ,  $\rho_t$ ,  $\varepsilon$  et  $\rho_m$  représentent respectivement le champ électrique, la charge totale, la permittivité absolue de l'eau et la densité volumique.

Les trois termes du membre droit de l'équation 9 représentent respectivement la force de Coulomb, la force diélectrophorétique et la pression d'électrostriction.

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

Lorsqu'il s'agit de plusieurs gouttes d'eau (Fig. 1a), à la force de coulomb s'ajoutent les forces d'attraction mutuelles entre les gouttes d'une rangée perpendiculaire aux électrodes et de répulsion des gouttes d'eau d'une rangée parallèle à celles-ci [50 et 52]. Comme les gouttes d'eau d'une rangée quelconque se meuvent pratiquement parallèle à la direction du champ appliqué, donc les forces de répulsion sont considérées négligeables dans ce cas [53]. Par conséquent, les forces électrostatiques actives agissant sur une goutte d'eau d'une rangée quelconque sont la force de coulomb et les forces d'attraction mutuelle entre les gouttes adjacentes. Pour une goutte d'eau proche de l'une des électrodes, la formule (9) peut s'écrire donc sous la forme suivante:

$$F_e = \rho_t E - F_a \quad (10)$$

Dans ce cas, la formule 2 devient:

$$d \left( \frac{\partial \vec{V}_f}{\partial t} + \vec{V}_f \cdot \nabla \vec{V}_f \right) = mg \sin \alpha + F_e - F_{ad} - F_s - F_d \quad (11)$$

La formule 8 s'écrit sous alternance positive du champ électrique de la forme:

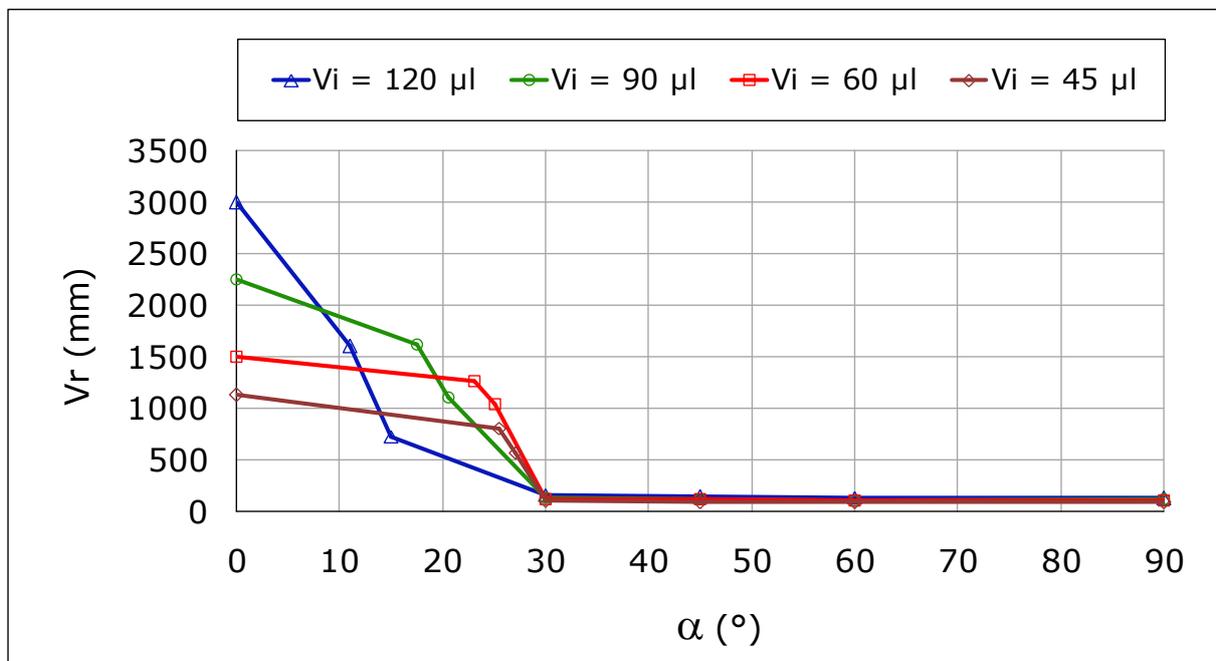
$$mg \sin \alpha + \rho E = F_{ad} + F_s + F_d + F_a \quad (12)$$

Sous alternance négative du champ électrique elle est de la forme:

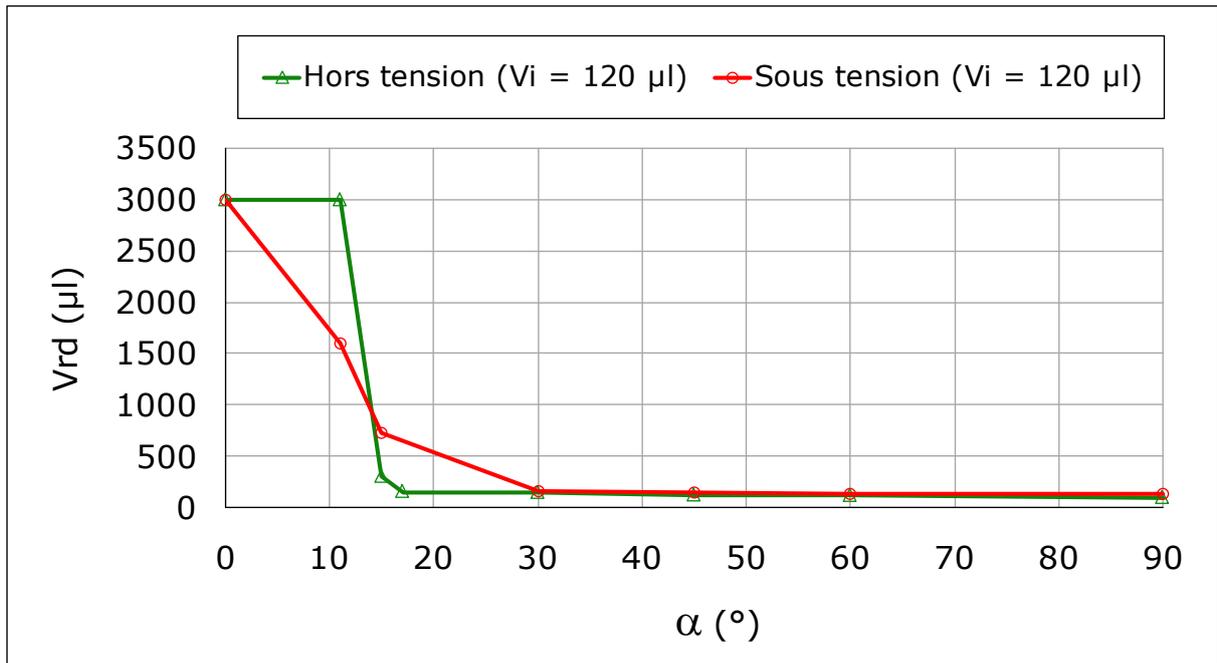
$$mg \sin \alpha - \rho E = F_{ad} + F_s + F_d + F_a \quad (13)$$

La figure 19 donne la caractéristique  $V_r = f(\alpha, V_i)$  du volume total des gouttes résiduelles sous tension en fonction de l'angle  $\alpha$ . Il en résulte son léger déclin jusqu'à un angle  $0^\circ \leq \alpha_v \leq \alpha$ , ( $V_i = 90 \mu\text{l}$ ,  $\alpha_v = 18^\circ$ ), une décroissance stricte pour  $18^\circ < \alpha_v < 30^\circ$  et enfin une constance pour  $30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ .

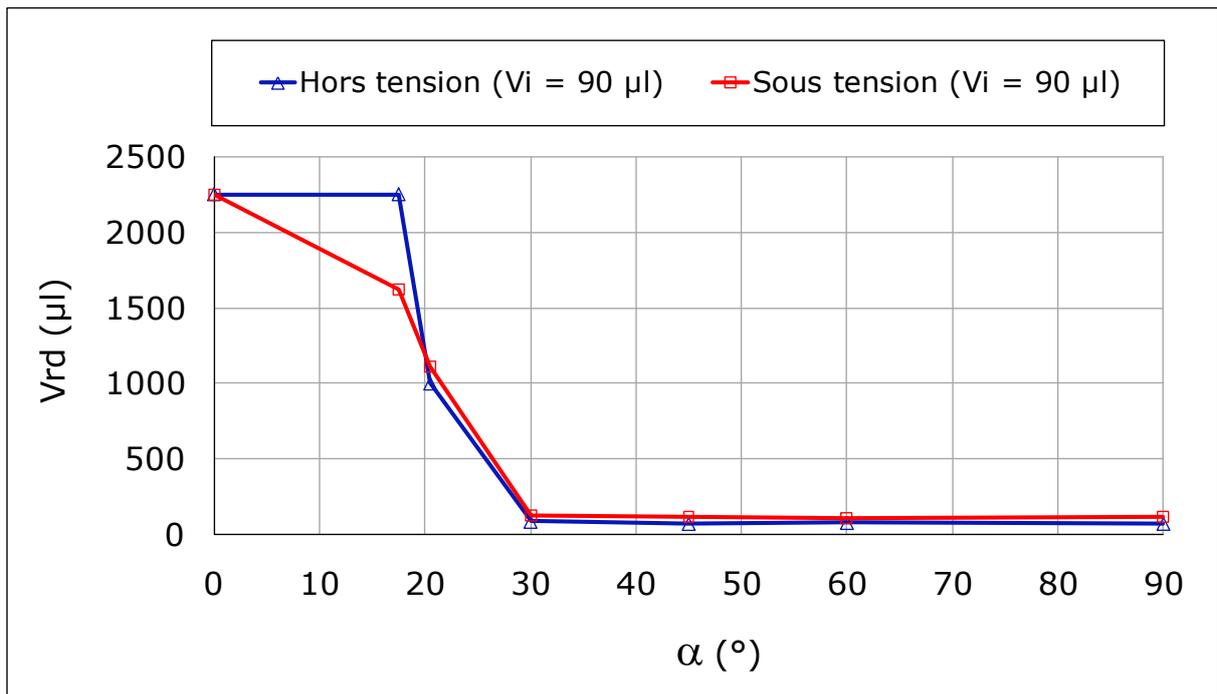
Il est à remarquer que dans la première zone, le déclin est accru avec l'élévation du volume de gouttes d'eau initialement déposées. Les figures 20 à 23 donne l'allure du volume résiduel total en fonction de l'angle  $\alpha$ , le volume des gouttes d'eau initialement déposées et le niveau de tension appliquée à l'isolation. Il en résulte que le volume total recueilli sous tension est plus faible que celui obtenu hors tension dans la première zone et le contraire a été constaté dans la deuxième et troisième zone. Le déclin du palier sous un niveau de tension de l'isolation signifie que sous un même angle d'inclinaison de l'isolation, Dans le premier cas, ce phénomène peut être expliqué par le fait que sous l'application d'un champ électrique à l'isolation, les gouttes d'eau se polarisent et une force électrostatique, ainsi créée [49 et 50], s'ajoute dans le même sens que la force de gravitation conformément à la formule 12.



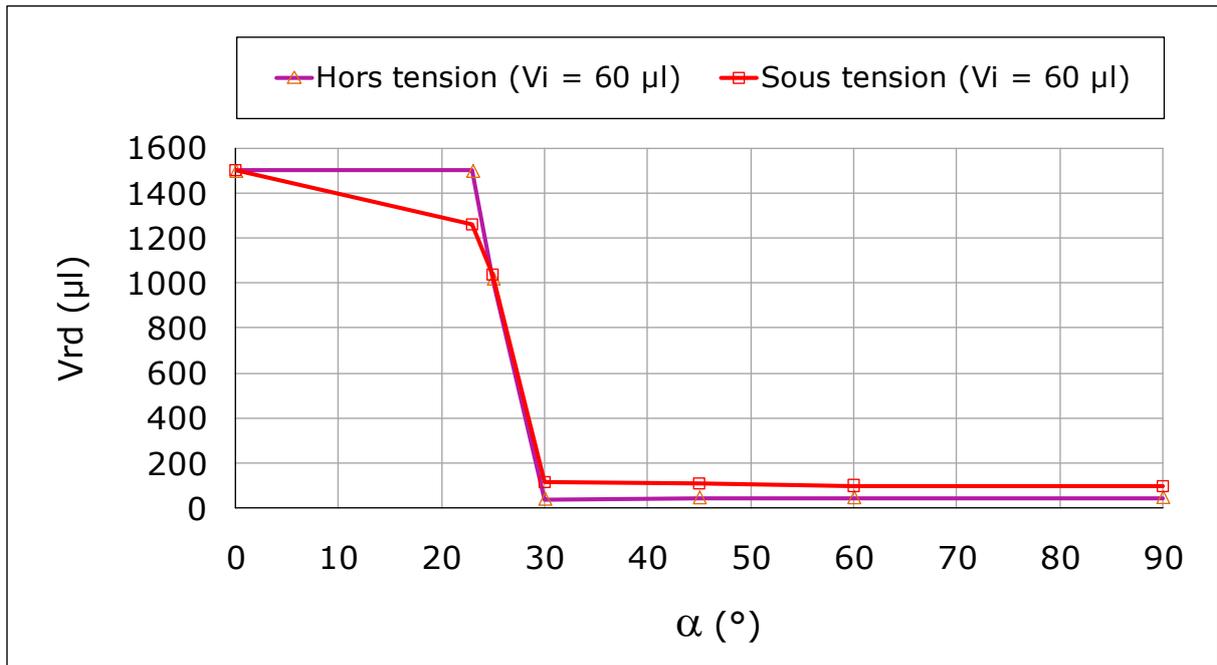
**Fig. 19:** Volume total des gouttes d'eau résiduelles sur l'isolation en fonction de son angle d'inclinaison



**Fig. 20:** Comparaison des volumes des gouttes d'eau résiduelles recouvrant la même isolation hors ( $U_a = 0 \text{ kV}$ ) et sous tension ( $U_a = 20 \text{ kV}$ )



**Fig. 21:** Comparaison des volumes des gouttes d'eau résiduelles recouvrant la même isolation hors ( $U_a = 0 \text{ kV}$ ) et sous tension ( $U_a = 20 \text{ kV}$ )

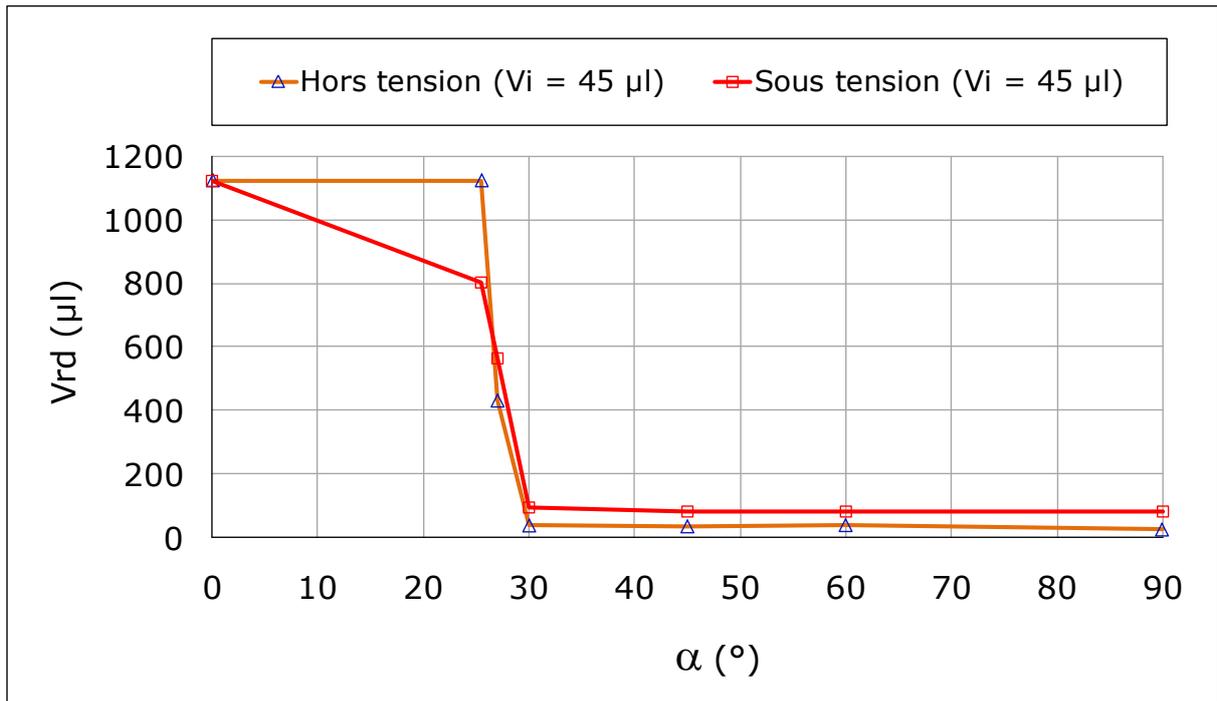


**Fig. 22:** Comparaison des volumes des gouttes d'eau résiduelles recouvrant la même isolation hors ( $U_a = 0$  kV) et sous tension ( $U_a = 20$  kV)

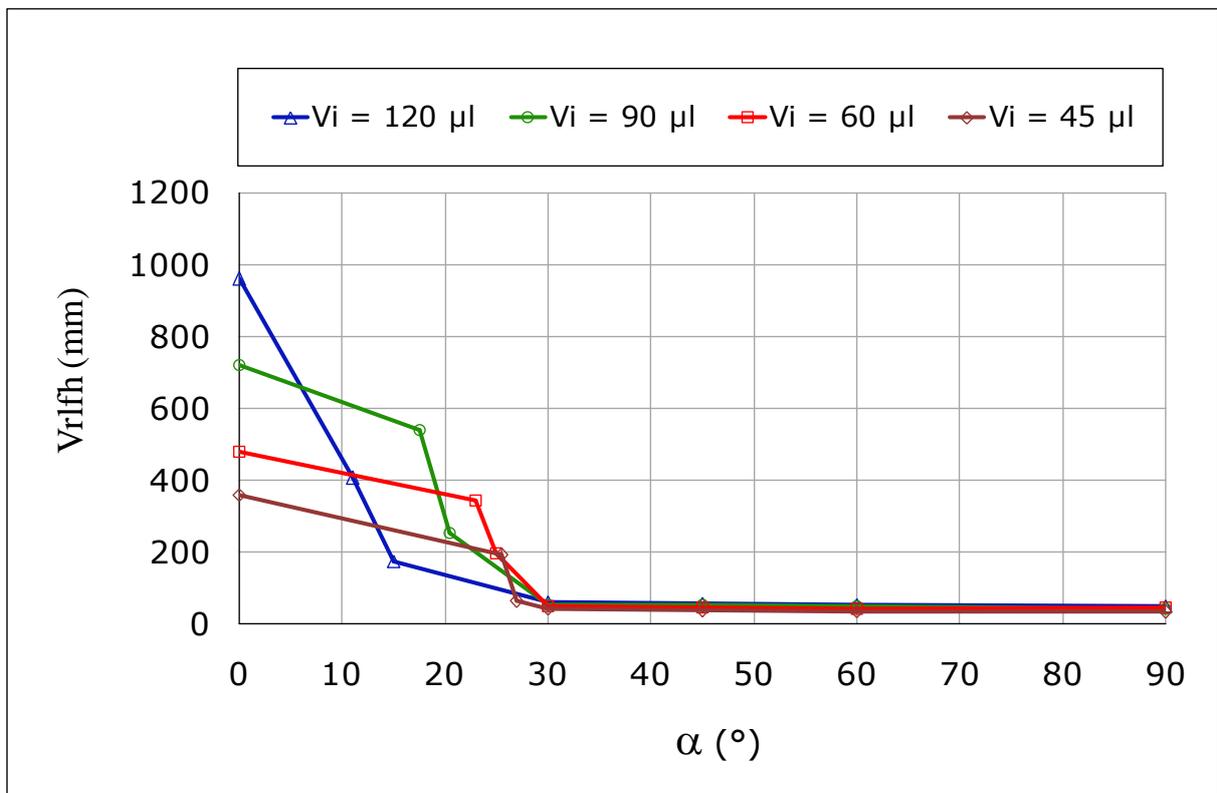
Par contre dans le deuxième cas la force électrostatique, ainsi créée [49], se retranche à la force de gravitation conformément à la formule 8.

En effet, le champ électrique alternatif change de sens au bout de chaque alternance, donc la force de coulomb peut être dans le même sens que la force de gravitation  $mg \sin\alpha$  où elles peuvent arracher une plus grande quantité d'eau à la goutte initiale (1<sup>ère</sup> zone) que lorsque dans le cas de l'alternance négative où le poids de la goutte agit seul (2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> zone).

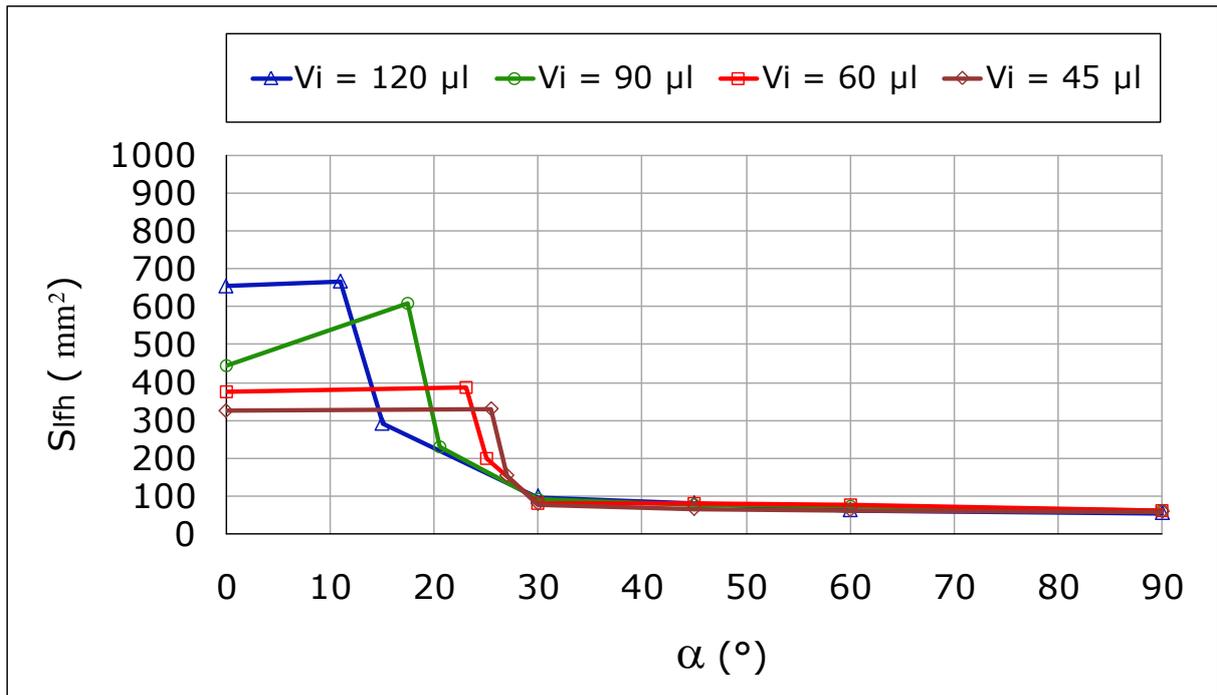
La figure 24 donne la caractéristique  $V_{rlfh} = f(\alpha_v, V_i)$  du volume total des gouttes d'eau résiduelles de la ligne de fuite la plus humide de l'isolation sous tension en fonction de l'angle de son inclinaison. L'allure de celui-ci est subdivisée en trois parties de la même manière que le volume résiduel total des gouttes d'eau reposant sur la surface de l'isolation. Les raisons expliquant l'évolution de ces trois parties sont similaires à celles données au volume total des gouttes d'eau résiduelles l'isolation hors tension. La seule différence réside au niveau de la faible valeur du volume résiduel des gouttes d'eau se trouvant le long de la ligne de fuite de l'isolation



**Fig. 23:** Comparaison des volumes des gouttes d'eau résiduelles recouvrant la même isolation hors ( $U_a = 0 \text{ kV}$ ) et sous tension ( $U_a = 20 \text{ kV}$ )



**Fig. 24:** Volume total des gouttes d'eau résiduelles le long de la ligne de fuite la plus humide en fonction de l'angle d'inclinaison de l'isolation

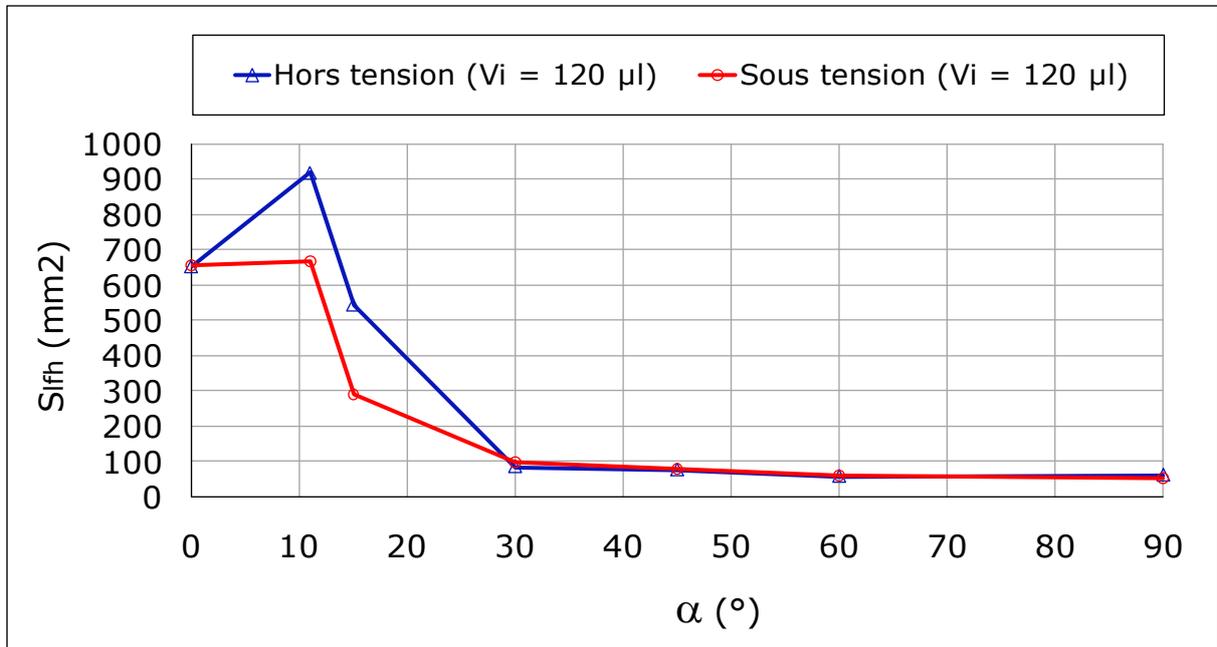


**Fig. 25:** Surface des gouttes d'eau résiduelles de ligne fuite la plus humide en fonction de l'angle d'inclinaison de l'isolation sous tension

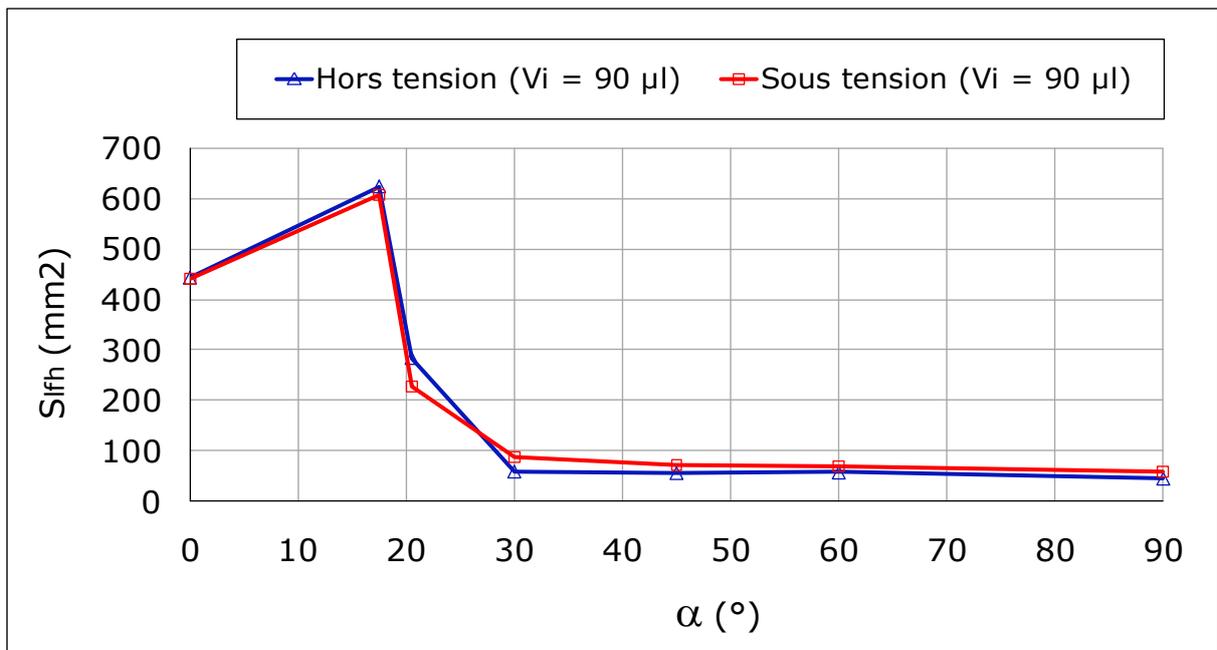
La figure 25 illustre la caractéristique  $S_{lfh} = f(\alpha_v, V_i)$  de la surface de contact avec l'isolation sous tension des gouttes d'eau résiduelles se trouvant sur sa ligne de fuite la plus humide en fonction de son angle d'inclinaison. Celle-ci présente une allure similaire à celle obtenue hors tension. Les raisons expliquant l'évolution de ces trois parties sont qualitativement similaires à celles attribuées à la surface des gouttes d'eau se trouvant sur la ligne de fuite de l'isolation hors tension. La seule différence réside au niveau de l'écart non nul entre ces deux grandeurs.

Les figures 26 à 29 donnent l'allure de la surface des gouttes d'eau de la ligne de fuite de l'isolation sous tension en fonction de l'angle  $\alpha$ , du volume des gouttes d'eau initialement déposées et le niveau de tension appliquée à l'isolation. Il en résulte que cette surface sous tension est plus faible que celle obtenue hors tension dans le premier cas (zones 1 et 2). Le contraire a été constaté dans la troisième zone. Dans le premier cas, ce phénomène peut être expliqué par le fait que sous l'application d'un champ électrique à l'isolation, les gouttes d'eau se polarisent et une force électrostatique, ainsi créée [49-50], s'ajoute dans le même sens que la force de gravitation conformément à la formule 12. Par contre dans le deuxième cas (zone 3) la force électrostatique, ainsi créée [49-50], se retranche à la force de gravitation conformément à la formule 13.

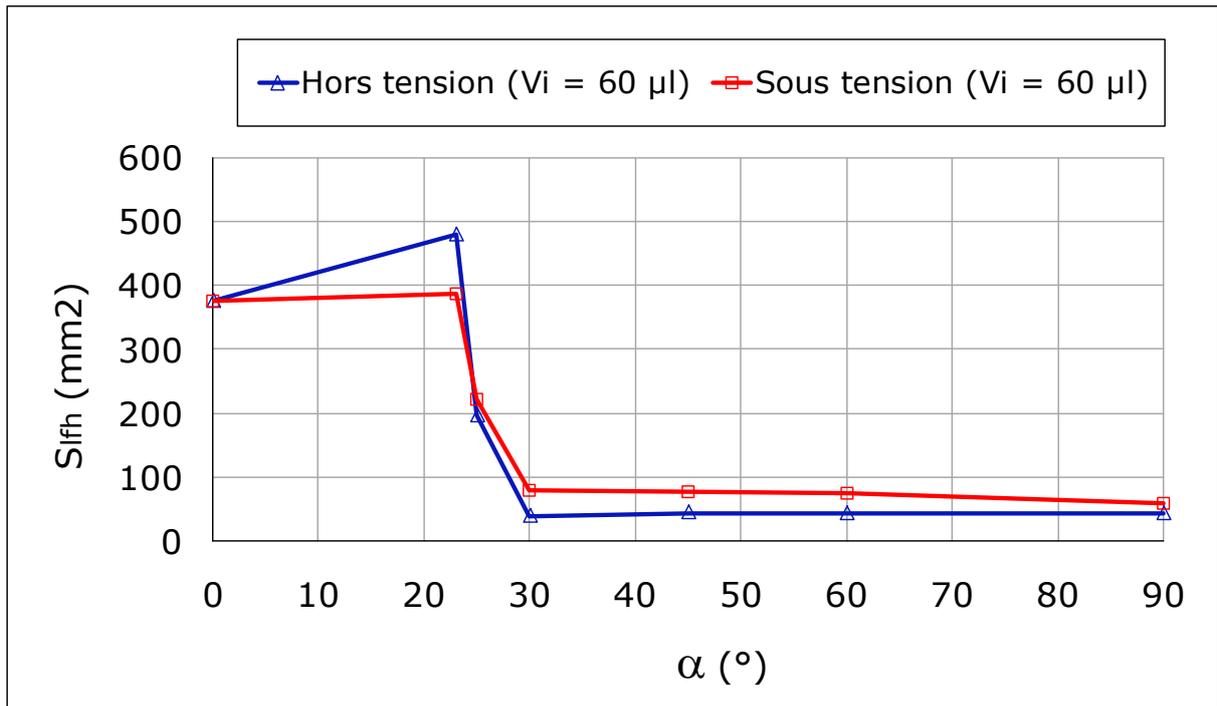
En effet, le champ électrique alternatif change de sens au bout de chaque alternance, donc la force de coulomb peut être dans le même sens que la force de gravitation  $mg \sin\alpha$  où elles peuvent arracher une plus grande quantité d'eau à la goutte initiale que dans le cas de l'alternance négative où le poids de la goutte agit seul.



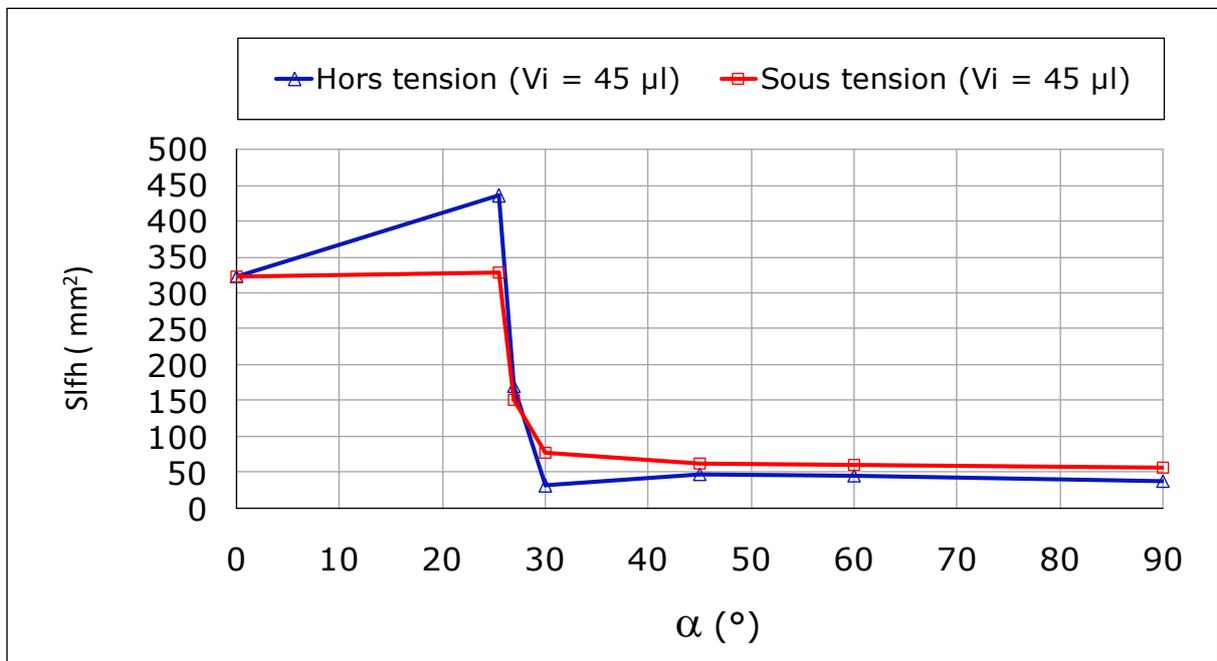
**Fig. 26:** Comparaison des surfaces des gouttes d'eau résiduelles recouvrant la ligne de fuite la plus humide de la même isolation hors ( $U_a = 0$  kV) et sous tension ( $U_a = 20$  kV) à volume initial  $V_i = 120 \mu\text{l}$



**Fig. 27:** Comparaison des surfaces des gouttes d'eau résiduelles recouvrant la ligne de fuite la plus humide de la même isolation hors ( $U_a = 0$  kV) et sous tension ( $U_a = 20$  kV) à volume initial  $V_i = 90 \mu\text{l}$

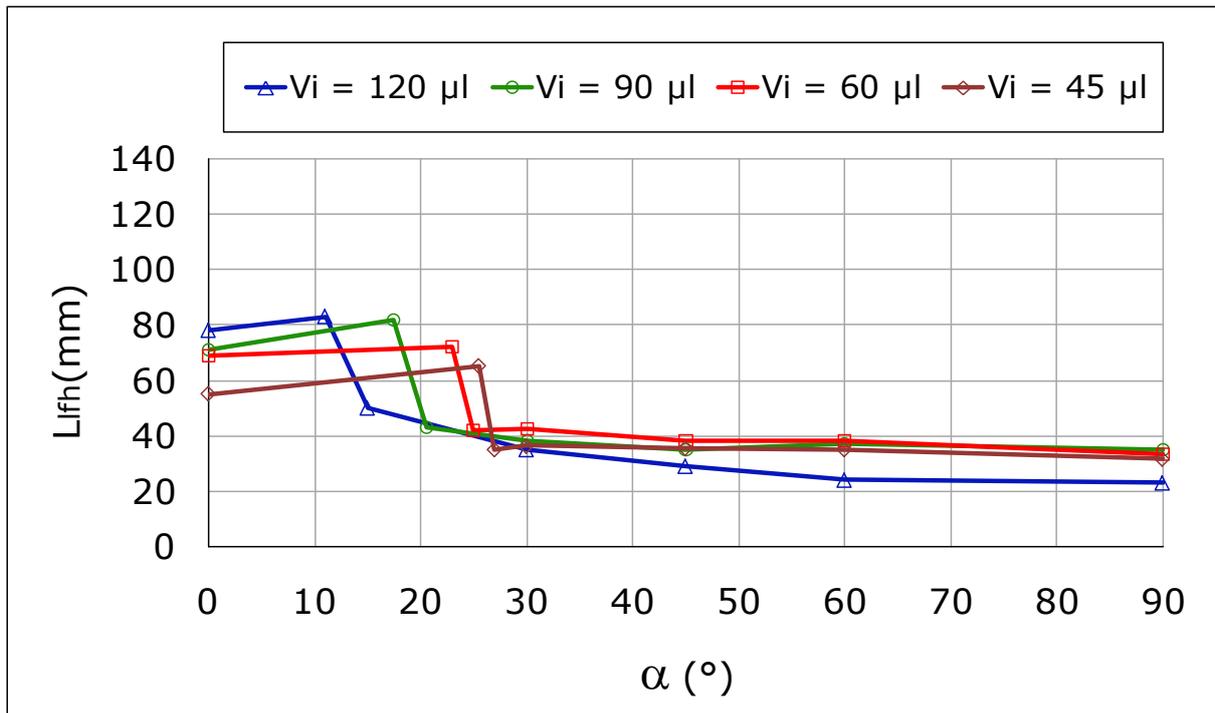


**Fig. 28:** Comparaison des surfaces des gouttes d'eau résiduelles recouvrant la ligne de fuite la plus humide de la même isolation hors ( $U_a = 0$  kV) et sous tension ( $U_a = 20$  kV) à volume initial  $V_i = 60$  μl



**Fig. 29:** Comparaison des surfaces des gouttes d'eau résiduelles recouvrant la ligne de fuite la plus humide de la même isolation hors ( $U_a = 0$  kV) et sous tension ( $U_a = 20$  kV) à volume initial  $V_i = 120$  μl

La figure 30 donne la caractéristique  $L_{\text{lfh}} = f(\alpha_v, V_i)$  de la longueur de ligne de fuite la plus humide de l'isolation sous tension en fonction de son angle d'inclinaison et du volume des gouttes initiales. La longueur totale de cette ligne de fuite la plus humide est obtenue en ajoutant toutes les longueurs des gouttes d'eau de différents niveaux se trouvant sur celle-ci. Son évolution est qualitativement très similaire à celle de la surface  $S_{\text{lfh}}$  de ligne de fuite la plus humide de l'isolation sous tension. Comme il existe une proportionnalité entre  $S_{\text{lfh}}$  et  $L_{\text{lfh}}$  donc toutes les interprétations suscitées sont aussi applicables à cette grandeur.



**Fig. 30:** Longueur de la ligne de fuite la plus humide en fonction de l'angle d'inclinaison de l'isolation

### III. 4 Conclusion

Les résultats des essais effectués au laboratoire sur la détermination du volume résiduel total recueilli sur toute la surface de l'isolation en silicone ou sur sa ligne de fuite, la surface des gouttes d'eau résiduelles reposant le long de cette ligne de fuite ou leur longueur en fonction du volume des gouttes d'eau initialement déposées, l'angle d'inclinaison de la surface de l'isolation et du niveau de tension appliqué à celle-ci sont résumés en points essentiels suivants:

- Existence d'une ligne de fuite de l'isolation à un taux d'humidification le plus élevé.
- Subdivision des courbes de ces quatre grandeurs en trois zones distinctes et leur caractérisation par deux angles d'inclinaison critiques  $\alpha_{v1}$  et  $\alpha_{v2}$ .
- Déclin qualitatif de l'allure de ces quatre grandeurs avec l'élévation de l'angle de son inclinaison, indépendamment du volume des gouttes d'eau initialement déposées et le niveau de tension appliquée à celle-ci.
- Existence d'un léger écart entre ces quatre grandeurs, lorsque l'isolation est hors ou sous tension. Cette différence peut être expliquée par celle du bilan des forces appliquées à l'isolation hors et sous tension.
- La présence du minimum de la courbe de la performance électrique d'une isolation en silicone en fonction de l'angle de son inclinaison, peut être facilement représenté par les deux grandeurs : Surface des gouttes d'eau reposant le long de la ligne de fuite et leur longueur. L'angle d'inclinaison critique  $\alpha_{v1}$  correspondant dans ce cas appartient à un intervalle d'angle défavorable pour le dimensionnement des isolateurs à cause de la chute drastique de leur performance.
- Existence d'un autre intervalle d'angle d'inclinaison de l'isolation  $\alpha_{v2}$  très favorable pour le pouvoir d'isolement des isolateurs humidifiés du fait de son rapprochement de celui obtenu à l'état sec.

## Conclusion générale

La nécessité de plus en plus aiguë de transporter des fortes puissances sur des longues distances requiert aujourd'hui la mise en place de réseaux haute tension à courant continu (HTCC). L'utilisation de matériaux isolants dans de telles applications, dont les durées de service souhaitées atteignent plusieurs dizaines d'années, implique une bonne connaissance et maîtrise de leurs propriétés à l'état initial et de leur évolution sous les fortes contraintes électriques qu'imposent les appareillages et leur environnement.

Les travaux présentés dans ce mémoire avaient pour but d'atteindre une meilleure compréhension du comportement et de l'accumulation des gouttes d'eau sur la surface d'élastomères silicones composites dédiés à des applications d'isolation volumique moyenne et haute tension, exposés aux différentes conditions de pollution.

La pollution des isolateurs est un facteur essentiel dont il faut tenir compte dans la conception des lignes électriques de haute tension servant au transport d'énergie électrique.

Pour mieux dimensionner les chaînes d'isolateurs, il est indispensable de connaître la sévérité de la pollution des sites concernés. La connaissance de cette sévérité est un facteur primordial pour la conception d'un réseau électrique, la qualité et la fiabilité du transport d'énergie.

Les composites silicones sont utilisées depuis de nombreuses années en tant qu'isolants dans les disjoncteurs à isolation gazeuse des réseaux haute tension alternative, où ils ont montré leur fiabilité. Leur emploi souhaité dans les futurs appareillages haute tension continue requiert, en raison de ce type de contrainte et des phénomènes diélectriques associés, de déterminer les propriétés de conduction volumique et surfacique de ces matériaux, leur comportement en termes d'accumulation de charges d'espace et leur rigidité diélectrique sous champ continu, en relation avec leur structure et pour des contraintes similaires à celles susceptibles d'être rencontrées en service.

L'analyse de l'effet de l'angle d'inclinaison sur le volume des gouttes d'eau résiduelles recouvrant la surface d'une isolation silicone mise hors ou sous tension alternative a conduit aux résultats essentiels suivants:

- La rigidité diélectrique longitudinale optimale d'une isolation en silicone est obtenue sans gouttes d'eau sur sa surface.
- Le volume des gouttes d'eau résiduelles diminue en fonction de l'angle d'inclinaison de l'isolation jusqu'à atteindre une valeur minimale.
- Le nombre de gouttes résiduelles augmente avec l'élévation de l'angle d'inclinaison.

- Le comportement du différent volume des gouttes d'eau initialement déposées est similaire dont s'allongent jusqu'à un angle maximal  $\alpha_v$  dépassant de leur volume puis tombent partiellement de la surface de l'isolateur, engendrant ainsi la diminution du volume résiduel jusqu'à atteindre l'équilibre.

- Les courbes du volume résiduels des gouttes d'eau sous et hors tension se rejoignent en un point d'intersection, où avant ce point le volume résiduels hors tension est plus grand que celui sous tension, le contraire a été observé pour l'intervalle qui suit, cela par le fait que sous l'application d'un champ électrique à l'isolation, les gouttes d'eau se polarisent et une force électrostatique, ainsi créée s'ajoute au bilan des forces, En effet, le champ électrique alternatif change de sens au bout de chaque alternance, donc la force de coulomb peut être dans le même sens que la force de gravitation  $mg \sin\alpha$  où elles peuvent arracher une plus grande quantité d'eau à la goutte initiale que dans le cas de l'alternance négative où le poids de la goutte agit seul.

- L'évolution des courbes de la surface et de la longueur de la ligne de fuite sous ou hors tension sont proportionnelles, où elles augmentent à une valeur maximale qui correspond à l'allongement des gouttes d'eau initialement déposées puis décroît par leur la chute et diminution de leur volume.

- Il en résulte que la surface et la longueur de la ligne de fuite hors tension est plus faible que celle obtenue sous tension.

## Références

- [1] Naivonirina Ravelomanantsoa, « Effet du vent sur le taux d'accumulation de pollution a la surface des isolateurs de haute tension dans les conditions hivernales », L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI, Décembre 2012.
- [2] O. Lamarene, « influence d'une barrière isolante sur la tension de claquage et sur le champ électrique », PFE Ingénieur, UAM Béjaïa septembre 2005.
- [3] F. Amir et KH. Namaoui, « étude du comportement d'un isolateur pollué soumis à une tension alternative », PFE Ingénieur, UAM Béjaïa, juin 2004.
- [4] S. VITET, «La pollution des isolateurs,» EDF-Epure, Juillet 1990
- [5] Bourim Hammoum, Ahmed Kerbouche, «Etude du Phénomène de Pollution des Isolateurs de Haute Tension dans la Région Electrique du Centre Algérien», Mémoire d'Ingénieur d'Etat ENP, Alger, 2007.
- [6] El BahiAzzag, « problèmes de contournement et perforation des isolateurs de haute tension », thèse doctorat d'état, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2007.
- [7] Norme CEI 60243-1, «Rigidité diélectrique des matériaux isolants. Méthodes d'essai. Partie 1 : essais aux fréquences industrielles», 1998.
- [8] P.J.VUARCHEX, «Caractéristiques des diélectriques liquides», Techniques de l'ingénieur, Traité K 714, Janvier 1988.
- [9] O. Lamarene, « influence d'une barrière isolante sur la tension de claquage et sur le champ électrique », PFE Ingénieur, UAM Béjaïa septembre 2005.
- [10] N.BERGER, « Liquides isolants en électrotechnique », Présentation générale, Techniques de l'ingénieur, D 2470, 2002
- [11] A. Chabloz, « Technologie des matériaux a l'usage de profession de l'électricité », 1986.
- [12] Futura-Science 2001-2019 consulté le 24/2/2019 10/49
- [13] D. Quéré, "Physique statistique: Les surfaces super hydrophobes", pp. 239-244, david.quere@college-de-france.fr, 2005.
- [14] Silicone, H.Guivier, « techniques de l'ingenieur » A3475.
- [15] J. Dunogues, M. Pouchard, Silicium, « ENCYCLOPAEDIA UNIVERSALIS », 2011.
- [16] L. Carette, M. Pouchol, Silicones, dans : Traité plastiques et composites: Techniques de l'ingénieur, 2001, A3475.
- [17] E.H. Belhitech, « Etude de la dégradation d'un solide isolant soumis aux décharges électriques de surface », p.49, UMMTO 2012.
- [18] Les silicone, G.Schorsch Techno-Nathan International 1988
- [19] Wacker, «silicones pour applications haute et moyenne tension» [www.wacker.com](http://www.wacker.com).

- [20] L. Carette, J.M.Pouchol, Les Silicones, Matières Thermodurcissables: Monographie, Les Techniques de l'ingénieur, Plastique et composite, A3475, 2005.
- [21] J. Verdu, Vieillissement des plastiques, AFNOR Technique, Edition Eyroles, Paris 1984.
- [22] Christiane Bär, « Untersuchungen zum Einfluss der Prüfspannungsart auf die Hydrophobiebeständigkeit sowie die Hochspannungskriechstromfestigkeit von polymeren Isolierstoffen », Faculté de génie électrique et informatique dans le Département de génie électrique et technologie de l'information / technologie de l'énergie électrique de l'Université des sciences appliquées de Zittau / Görlitz pour l'obtention du diplôme universitaire Ingénieur diplômé (FH).
- [23] M. Plopean, P.V. Notingher, C. Stancu, S. Grigorescu, Electrical ageing of polyethylene power cables insulation subjected to an electric field in the presence of water, The 7th International Conference on Advanced Topics and Electrical Engineering, 12-14 May 2011, Bucharest, Romania
- [24] A.Motori, F. Sandrolini, G.C. Montanari, "Chemical, physical and microstructural properties of thermally aged XLPE cable models", IEEE, Conference Record of the International Symposium on Properties and Applications of Dielectric Materials, pp. 764-768, Beijing, China, September 12-16 1988.
- [25] N.L. Singh, A. Qureshi, F. Singh, D.K. Avasthi, Effect of swift heavy ion irradiation on dielectrics properties of polymer composite films, Materials Science and Engineering: B, Vol. 137, No. 1-3, pp. 85-92, February 2007.
- [26] D. Birtwhistle, G. Cash, G. George, B. Goss, A. Krivda, and H. Liu, "Field Monitoring of the Ageing of Composite High Voltage Insulators," in Ageing Studies And Lifetime Extension Of Materials, New York, USA: Kulwer Academic/ Plenum Publishers, pp. 225–237, 2001.
- [27] J. Chang et R. Gorur, "Hydrophobicity of silicone rubber used for outdoor insulation", Properties and Applications of Dielectric Materials, Proceedings of the 4th International Conference on, 1994.
- [28] Adelkara, « contribution a l'étude d'un modèle dynamique de contournement d'un isolateur pollue », Mémoire De magister, Seif, 2013.
- [29] J. Chang et R. Gorur, "The role of backbone chain rotation in the hydrophobicity recovery of polymeric materials for outdoor insulation", Proceedings of the 4th International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, SestriLevante, Italy, pp. 270-274, Jun 1992

- [30] Constellation des gouttes de condensation et de pluie et son effet sur le contournement d'une isolation en silicone inclinée sous DC, R. Boudissa and F. Bouchelga, Université A. Mira de Bejaia Algérie S. Kornhuber and K.D. Haim, University of Applied Sciences of Zittau, Germany.
- [31] Effet de l'angle d'inclinaison sur le nombre et le volume des gouttes d'eau résiduelles recouvrant la surface d'une isolation silicone mise hors ou sous tension alternative, S. Slimani<sup>1</sup>, N. Bouatia<sup>1</sup>, T. Belhou<sup>1</sup> et R. Boudissa, Laboratoire de Genie Electrique – Bejaia, S. Kornhuber et K. D. Haim, Laboratoire de haute tension – Zittau
- [32] R. Ydjedd, Performance d'une surface en silicone recouverte des gouttes d'eau sous tension alternative, 2012, 2013
- [33] Meraghni Tahar, Guialssam, « effet de la pollution désertique sur l'isolateur de haute tension », mémoire de master, 2015.
- [34] S, Slimani, «contribution a l'étude de l'influence de la pollution discontinue sur le comportement des isolateurs: expérimentation et simulation », thèse de magister en Génie Électrique, Faculté de technologie, Université Ferhat Abbas- Sétif.
- [35] BELHOUL Talit, « performance d'un intervalle d'air à champ électrique non uniforme avec barrière isolante à géométrie variable sous atmosphère quelconque », Génie électrique, Option haute tension, Université ABERRAHMANE MIRA-BEJAIA, 164 pages, PDF.
- [36] Z. Salhi « étude du comportement d'un isolateur silicone dans un environnement désertique »U, MMTO, option machines électrique, promotion 2011-2012.
- [37] S. Lotfi, S. Djafri, « Contribution à l'Etude de la Pollution des Isolateurs des Lignes Ariennes de Haute Tension dans la Région de l'Arbaa », Université des et de la Technologie Houari Boumediene d'Alger, Juin 1982
- [38] F. Aouabed « Contribution à l'étude d'un circuit équivalent des isolateurs synthétiques sous pollution en utilisant l'EMTP », pour l'obtention du Diplôme de Magister en électrotechnique, option réseaux électriques, université Ferhat Abbas – Sétif.
- [39] S.SLIMANI, « Performance d'une surface isolante hydrophobe recouverte de gouttes d'eau et inclinée sous tension continue », Spécialité Electrotechnique option électrotechnique, Université ABERRAHMANE MIRA-BEJAIA, en 2014 / 2015.
- [40] F. AMIR, K. NAMAOU, « Etude du comportement d'un isolateur pollué soumis à une tension alternative », Mémoire d'ingénieur, U.A.M. de Bejaia, juin 2004.
- [41] A. Cimador, S. Vitet, « La Pollution des Isolateurs », EDF-Epure, No. 27, Juillet 1990
- [42] CEI 815 : « Guide pour le choix des isolateurs sous pollution », 1986.

- [43] Ghemam Amara EL Hadi et Behir Zakaria, « Mesure du Champ électrique autour D'une chaîne des Isolateurs De Haute Tension », Réseau électrique, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued, en Mai 2017, 91 pages, PDF.
- [44] M. Tegar, « Etude mathématique des mécanismes de développement des décharges électriques sur des isolateurs installés en régions polluées », Mémoire de Magister, Département de Génie électrique, ENP, Alger, juillet 1993.
- [45] 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.
- [46] M. Tegar, A. Boubakeur, « Pollution des isolateurs de Haute Tension », Cours 4<sup>ème</sup> Année. Département de Génie Eléctrique, ENP, Alger.
- [47] A. Hedir, M. Moudoud, Effect of ultraviolet radiations on medium and high voltage cables insulation properties, International Journal of Engineering and Technology, Vol. 8, No. 5, pp. 2308-2317, October-November 2016.
- [48] Duc Hoanh Nguyen, « Etude des élastomères silicones utilisés pour l'isolation électrique », Energie électrique, Université JOSEPH-FOURTER – GRENOBLE I, 2005, français tel 00011251v2, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00011254v2>, soumis le 22 / 12 / 2005.
- [49] J. Li, Y. Wei, Z. Huang, F. Wang, X. Yan, "Investigation of the Electric Field Driven Self-propelled Motion of Water Droplets on a Super-hydrophobic Surface", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 23, No. 5, pp. 3007 – 3015, 2016.
- [50] K. Hamour, F. Bouchelga, R. Boudissa, S. Kornhuber, K. D. Haim, "Optimization of the superhydrophobic insulation longevity by expulsion of any wet deposit with a weak alternating electrical field", Journal of Electrostatics 105 (2020) 103451.
- [51] H. Morgan and N. G. Green, "AC Electrokinetics: colloids and nanoparticles", Research Studies Press LTD, Baldock, Hertfordshire, England, 2003.
- [52] J. Ndoumbe, A. Beroual and A. Moukengue Imano, "Simulation and Analysis of Coalescence of Water Droplets on Composite Insulating Surface under DC Electric Field", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 22, No. 5 (2015), pp. 2669-2675.
- [53] J. Ndoumbe, "Behavioral study of water droplets deposited on the surface of a high-voltage composite insulator in the presence of the electric field", Doctoral Thesis 2014, Doctoral School Electronics, Electrotechnics, Automation, Central School of Lyon, France.
- [51] Z. Salhi, mémoire de magister « étude de non uniforme de la pollution sur les caractéristiques de contournement des isolateurs réels pollués sous tension continue »,

U .Bejaia, promotion 2003.

[52] IEC-TS 62073, “Guidance on the measurement of hydrophobicity of insulator surfaces”, 2016.

[53] IEC60250, “Recommended methods for the determination of the permittivity and dielectric dissipation factor of electrical insulating materials at power, audio and radio frequencies including metre wavelengths.