

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Université Abderrahmane MIRA de Bejaïa**  
**Faculté de Technologie**  
**Département de Génie Electrique**

# Mémoire de Fin de Cycle

**Présenté par :**

**M<sup>f</sup> : IGHMOURACENE Khaled**

**M<sup>f</sup> : KECHIDA Ahmed**

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Electrotechnique

Option : Techniques de haute tension

**Effet du mode de disposition de gouttes d'eau  
sur une surface en silicone hydrophobe inclinée  
sur sa performance électrique sous tension  
continue**

**Soutenu publiquement le 21/06/2015 devant le jury constitué de :**

M <sup>elle</sup> .	ROUHA	Nacéra	Docteur	Univ. Bejaia	Présidente
M <sup>f</sup> .	HERZINE	Mohand Seghir	Doctorant	Univ. Bejaia	Examineur
M <sup>f</sup> .	BOUDISSA	Rabah	Professeur	Univ. Bejaia	Rapporteur

**2014/2015**

# Remerciement

*Nous rendons grâce à dieu de nous avoir donné le courage et la patience afin de mener ce travail à terme.*

*Arrivé au terme de notre travail, nous tenons à exprimer vivement notre profonde gratitude à notre promoteur : **Mr. R. BOUDISSA** pour l'aide, le suivi et l'intérêt qu'il n'a cessé de nous apporter jusqu'à l'achèvement de notre travail.*

*Nous remercions, **M<sup>elle</sup>. F. BOUCHELGA** qui nous a généreusement fait profiter de ses connaissances en haute tension et pour son aide et ses conseils utiles.*

*Nous tenons également à remercier l'ensemble des membres du jury qui ont fait l'honneur de juger notre travail.*

*Enfin, nos chaleureux remerciements vont également à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à notre formation.*

# *Dédicace*

***Je dédie ce modeste travail à :***

❖ A mes très chers parents,

❖ Mes frères

❖ Mon collègue

❖ Tous mes amis

Ahmed

# *Dédicace*

***Je dédie ce modeste travail à :***

- ❖ A mes parents qui mon toujours soutenu dans mes études***
- ❖ Mes frères et sœurs***
- ❖ Mon collègue ainsi qu'à toute sa famille***
- ❖ A tous mes amis***

***Khaled***

---

<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>1</b>
------------------------------------	----------

## **Chapitre 01**

### **L'ETAT D'ART**

1.1 Introduction .....	3
1.2 Synthèse des travaux de recherches concernant l'effet du mode de disposition de gouttes d'eau sur une surface en silicone hydrophobe inclinée sur sa performance électrique sous tension continue.....	3
1.2.1 Y. Higashiyama .....	3
1.2.2 H.-J. Kloes et D. Konig .....	4
1.2.3 Y. Higashiyama, S. Yanase, T. Sugimoto .....	5
1.2.4 H. Deng et R. Hackam.....	6
1.2.5 N. Yoshimura, S. Kumagai, S. Nishimura.....	7
1.2.6 S. Thong-Om, W. Payakcho .....	9
1.2.7 C. Baer et autres.....	11
1.2.8 V. Joseph et M. Joy Thomas.....	12
1.2.9 A. Ouardani .....	13
1.2.10 S. Hai et R. Messouaf .....	15
1.3 Conclusion.....	21

## **Chapitre 02**

### **ISOLATEURS EN HAUTE TENSION**

2.1 Introduction .....	22
2.2 Définition .....	22
2.2.1 Isoler .....	22
2.2.2 Isolement .....	22
2.2.3 Isolation .....	22
2.2.4 Isolateur .....	23
2.2.5 Constitution de l'isolateur et son fonctionnement.....	23
2.3 Autres définitions concernant les isolateurs.....	24
2.3.1 Contournement .....	24

---

2.3.2	Ligne de contournement .....	24
2.3.3	Tension de contournement.....	24
2.3.4	Tension de tenue .....	24
2.3.5	Ligne de fuite.....	24
2.3.6	Courant de fuite .....	24
2.4	Propriétés électriques des isolations et les facteurs de leur influence .....	25
2.4.1	Rigidité diélectrique .....	25
2.4.1.1	Rigidité diélectrique transversale.....	25
2.4.1.2	Rigidité diélectrique longitudinale.....	25
2.4.2	Permittivité .....	26
2.4.3	Angle de pertes et le facteur de dissipation .....	26
2.4.4	Résistivité transversale, superficielle et résistance d'isolement .....	27
2.4.4.1	Définitions et signification.....	27
2.4.4.2	Résistance et résistivité transversale .....	28
2.4.4.3	Résistance et résistivité superficielle .....	28
2.5	Matériaux utilisés pour les isolants solides .....	28
2.5.1	Verre .....	28
2.5.2	Porcelaine .....	28
2.5.3	Bakélite.....	29
2.5.4	Polychlorure de vinyle (PVC) .....	29
2.5.5	Silicone .....	29
2.5.5.1	Définition .....	29
2.5.5.2	Structure moléculaire des silicones.....	30
2.5.5.3	Différentes familles de silicones .....	31
2.5.5.4	Propriétés diélectriques des silicones.....	31
2.5.5.5	Autres propriétés des silicones.....	31
2.5.5.6	Applications des silicones dans l'isolation électrique.....	33
2.5.5.7	Avantage du revêtement en silicone des isolateurs.....	35
2.6	Conclusion.....	35

**Chapitre 03****POLLUTION DES ISOLATEURS HAUTE TENSION**

3.1 Introduction .....	37
3.2 Définitions .....	37
3.2.1 Pollution des isolateurs .....	37
3.2.2 Salinité .....	37
3.2.3 Couche de pollution .....	38
3.2.4 Degré de pollution .....	38
3.3 Formation et la répartition de la couche de pollution .....	38
3.3.1 Non-uniformité longitudinale par groupe .....	39
3.3.2 Non-uniformité transversale .....	39
3.3.3 Non-uniformité longitudinale périodique .....	39
3.4 Sources de pollution .....	39
3.4.1 Pollution naturelle .....	39
3.4.1.1 Pollution marine .....	39
3.4.1.2 Pollution désertique .....	40
3.4.1.3 poussières du sol et zones agricoles .....	40
3.4.2 Pollution industrielle .....	40
3.4.3 Pollution domestique .....	40
3.4.4 Pollution mixte .....	40
3.5 Impact de la pollution .....	41
3.5.1 Arc non localisé .....	41
3.5.2 Arc fixe .....	41
3.6 Contournement des isolateurs pollué .....	41
3.7 Sévérité de pollution d'un site .....	42
3.8 Mesure de la sévérité de pollution d'un site .....	42
3.8.1 Densité du dépôt de sel équivalent (DDSE) .....	42
3.8.2 Conductance superficielle .....	43
3.8.3 Mesure optique .....	43
3.8.4 Mesure de la pollution de l'air .....	43
3.8.5 Densité du dépôt non soluble (DDNS) .....	44
3.9 Classification des sites pollués .....	44
3.10 Influence des facteurs climatiques sur les isolateurs pollués .....	45

---

3.11 Méthodes d'essais sous pollution .....	46
3.11.1 Essai sous pollution naturelle .....	46
3.11.2 Essais sous pollution artificielle .....	46
3.11.2.1 Méthode des couches solides .....	46
3.11.2.2 Méthode du brouillard salin .....	47
3.11.2.3 Méthode de brouillard tenu .....	47
3.12 Techniques de lutte contre la pollution .....	47
3.12.1 Allongement de la ligne de fuite.....	47
3.12.2 Utilisation des isolateurs plats (auto-nettoyables) .....	48
3.12.3 Graissage des isolateurs (couches hydrophobes).....	48
3.12.4 Revêtements à base de silicones .....	48
3.12.5 Nettoyages sous ou hors tension.....	48
3.12.6 Les isolateurs composites .....	49
3.13 Conclusion.....	49

## Chapitre 04

### PARTIE EXPERIMENTALE

4.1 Introduction .....	50
4.2 Dispositif expérimental .....	50
4.2.1 Circuits de mesure de tension et de visualisation de la décharge .....	50
4.2.2 Modèle expérimental .....	51
4.3 Pollution d'une surface isolante .....	52
4.4 Procédé d'essai.....	53
4.5 Dessiccateur .....	53
4.6 Correction des résultats suivant les conditions atmosphériques .....	54
4.7 Exemple de calcul .....	55
4.8 Résultats et discussions .....	56
4.8.1 Polarité positive .....	56
4.8.1.1 Paramètres d'influence.....	56
a) Nombres de rangées.....	56
b) Angle d'inclinaison de l'isolation et volume des gouttes d'eau .....	58
c) Arrangement des gouttes.....	61

4.8.2 Polarité négative .....	63
4.8.2.1 Paramètres d'influence.....	63
a) Nombres de rangées .....	63
b) Angle d'inclinaison de l'isolation et volume des gouttes d'eau .....	64
c) Arrangement des gouttes.....	67
4.9 Conclusion.....	69
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>70</b>

Fig. 1. 1: Forces en présence lorsqu'une goutte est placée sur un substrat en absence de contraintes électriques. ....	2
Fig. 1. 2: Diagramme schématique du dispositif expérimental. ....	3
Fig. 1. 3: Formation d'un canal d'eau lorsque la tension négative est appliquée sur (a) le PTFE et (b) SR. ....	4
Fig. 1. 4: Installation expérimentale. ....	5
Fig. 1. 5: Configuration des électrodes. ....	6
Fig. 1. 6: l'abaissement temporel de l'hydrophobicité. ....	7
Fig. 1. 7: Activités des décharges sur un isolateur en silicone. ....	8
Fig. 1. 8: Classification d'hydrophobicité (HC1-HC6). ....	8
Fig. 1. 9: Comparaison entre le champ AC et DC. ....	9
Fig. 1. 10: Photographie montrant (a) les aiguilles sur l'électrode haute tension et (b) l'image numérisée de la pellicule photographique après l'exposition à effet couronne. ....	10
Fig. 1. 11: Dispositif expérimental utilisé pour générer l'effet couronne sous champ continu. ....	10
Fig. 1. 12: L'angle de contact de l'échantillon SR avant et après exposition à la couronne sous courant alternatif. ....	11
Fig. 1. 13: $U_{DC+} = f(\alpha, V_g)$ d'une isolation en silicone hydrophobe. ....	12
Fig. 1. 14: $U_{DC+} = f(A_r)$ des gouttes d'eau à volume différents sur une surface en silicone hydrophobe ( $\alpha_c = 29,27^\circ$ ). ....	12
Fig. 1. 15: Schéma de mesure et de visualisation. ....	13
Fig. 1. 16: Caractéristiques du modèle. ....	14
Fig. 1. 17: Différentes positions du dispositif. ....	14
Fig. 1. 18: $U_{DC+} = f(Nr)$ d'une surface en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau. ....	15
Fig. 1. 19: $U_{DC+} = f(l_s, \alpha)$ d'une surface isolante en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau. ....	16
Fig. 1. 20: $U_{DC-} = f(Nr)$ d'une surface en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau. ....	17
Fig. 1. 21: $U_{DC-} = f(l_s, \alpha)$ d'une surface isolante en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau. ....	18
Fig. 2. 1: Circuit électrique équivalent série. ....	24
Fig. 2. 2: Circuit électrique équivalent série. ....	24
Fig. 2. 3: Diagramme de Fresnel correspondant au schéma équivalent parallèle. ....	25
Fig. 2. 4: Liaison Si-O. ....	28
Fig. 2. 5: Hydrophobicité d'une surface en silicone. ....	30
Fig. 2. 6: Angle de contact d'une goutte d'eau sur une surface en silicone. ....	30

Fig. 2. 7 a) Isolateur silicone b) Traversée avec un revêtement silicone .....	31
Fig. 2. 8 a) Disjoncteur avec un revêtement silicone b) Transformateur avec revêtement en silicone .....	32
Fig. 2. 9 a) Prototype d'isolation moyenne tension d'un jeu de barres ; b) Bouchon d'isolation volumique moyenne tension.....	32
Fig. 2. 10 a) Prototype de l'isolation d'une connexion moyenne tension souple en bout de câble ; b) Prototype de l'isolation d'une connexion moyenne tension souple .....	33
Fig. 4. 1: Schéma de mesure et de visualisation.....	48
Fig. 4. 2: Caractéristiques de l'isolation avec gouttes d'eau .....	49
Fig. 4. 3: Différentes positions de l'isolation .....	50
Fig. 4. 4: Conductimètre (appareil de mesure de conductivité volumique) .....	51
Fig. 4. 5: Dessiccateur .....	52
Fig. 4. 6: Gel de silice (silicagel) .....	52
Fig. 4. 7: Facteur de correction $K_h$ .....	53
Fig. 4. 8: Tension de contournement positive d'une isolation en silicone hydrophobe en fonction du nombre de rangées des gouttes d'eau.....	54
Fig. 4. 9: Phases de contournement d'une isolation en silicone hydrophobe ( $\alpha = 0^\circ$ , Nr variable).....	55
Fig. 4. 10: Tension contournement positive d'une isolation en silicone hydrophobe en fonction d'angle d'inclinaison.....	56
Fig. 4. 11: Forme des gouttes d'eau à différents volumes sur la surface du matériau .....	57
Fig. 4. 12: Tension de contournement positive d'une isolation en silicone hydrophobe en fonction du volume des gouttes d'eau .....	58
Fig. 4. 13: Mode de disposition des gouttes d'eau .....	59
Fig. 4. 14: Tension de contournement positive d'une isolation en silicone en fonction du mode de disposition des gouttelettes ( $V_g = 90 \mu\text{l}$ , $\sigma_v = 180 \mu\text{S/cm}$ , $\alpha$ variable) .....	60
Fig. 4. 15: Phases de contournement d'une isolation en silicone pour des arrangements alignés et en zigzag ( $V_g = 45 \mu\text{l}$ , $\sigma_v = 180 \mu\text{S/cm}$ , $\alpha = 0^\circ$ ) .....	60
Fig. 4. 16: Tension de contournement négative d'une isolation en silicone hydrophobe en fonction du nombre de rangées des gouttes d'eau.....	61
Fig. 4. 17: Tension de contournement négative d'une isolation en silicone hydrophobe en fonction d'angle d'inclinaison.....	62
Fig. 4. 18: Contournement d'une surface en silicone recouverte de gouttes d'eau ( $\alpha_{cr} = 35,86^\circ$ , $V_g = 45 \mu\text{l}$ , Nr = 5, $\sigma_v = 180 \mu\text{S/cm}$ ).....	63
Fig. 4. 19: Tension de contournement négative d'une isolation en silicone hydrophobe en fonction du volume des gouttes d'eau .....	64

Fig. 4. 20: surface en silicone recouverte de gouttes d'eau à différents volumes après contournement ( $N_r = 5$ , $\sigma_v = 180 \mu\text{S/cm}$ , $\alpha = 0^\circ$ ) .....	65
Fig. 4. 21: Tension de contournement négative d'une isolation en silicone en fonction du mode de positionnement des gouttelettes ( $V_g = 90 \mu\text{l}$ , $\sigma_v = 180 \mu\text{S/cm}$ , $\alpha$ variable) .....	66
Fig. 4. 22: Etapes de contournement d'un matériau en silicone hydrophobe pour les deux arrangements zigzag et aligné ( $V_g = 90 \mu\text{l}$ , $\sigma_v = 180 \mu\text{S/cm}$ , $\alpha = 0^\circ$ ) .....	66

PTFE	: Polytétrafluoroéthylène
EPDM	: Éthylène Propylène Diène Monomère
PVC	: Polychrome de vinyle
$V_m$	: Tension de mesure
$U$	: Tension électrique de claquage
$\mu S/cm$	: Micro-Siemens par centimètre
$E$	: Champ électrique
$\epsilon_r$	: Permittivité relative
$\epsilon_a$	: Permittivité absolue
$K_d$	: Facteur de correction relatif à la température et à la pression
$K_h$	: Facteur de correction relatif à l'humidité
$O_e$	: Objet d'essai
$Tr$	: Transformateur BT/HT
$Cam$	: Caméra rapide
$PC$	: Ecran de PC
$R_v$	: Résistance de volume
$d_g$	: Distance entre deux gouttes adjacentes sur la même ligne de fuite (Arrangement aligné)
$d_{gél}$	: Distance entre l'électrode et la première goutte (Arrangement aligné)
$Ar$	: Arrangement aligné des gouttes mixtes sur la ligne de fuite
$R_s$	: Résistance superficielle
$\delta$	: Angle de pertes
$HT$	: Haute tension
$\theta$	: Température
$P$	: Pression
$H$	: Humidité de l'air environnant
$\sigma_v$	: Conductivité volumique
$V_g$	: Volume des gouttes d'eau
$U_{DC+}$	: Tension de contournement positive
$U_{DC-}$	: Tension de contournement négative
$N_r$	: Nombre de rangées des gouttes d'eau
$\alpha$	: Angle d'inclinaison
$\alpha_{cr}$	: Angle d'inclinaison critique
$l_{gh}$	: Distance entre la goutte et l'électrode HT

- $l_{gt}$  : Distance entre la goutte et l'électrode terre
- $l_{gg}$  : Distance entre les gouttes en diagonale
- $l_{GG}$  : Distance entre les gouttes en ligne droite
- $l_{rr}$  : Distance entre deux rangées de gouttes d'eau sur la largeur de l'isolation

### INTRODUCTION GENERALE

Les lignes à haute tension constituent le composant principal des réseaux de transport de l'énergie électrique. Elles permettent l'acheminement de l'énergie des centrales électriques vers les centres de consommation et peuvent mesurer plusieurs milliers de kilomètres. En dehors des conducteurs, les lignes électriques comportent d'autres éléments parmi lesquels les isolateurs. Ces derniers jouent un rôle à la fois mécanique et électrique dans la sécurité du transport et la distribution de l'énergie. En effet, ils doivent porter les conducteurs et les isoler du pylône.

En service, les isolateurs doivent supporter aussi bien les contraintes électriques dans les conditions normales d'exploitation (sur une large gamme) que les surtensions transitoires dans les conditions anormales imposées par la foudre et les chocs de manœuvre. Par conséquent, un bon choix et un bon dimensionnement des isolateurs s'avèrent indispensable pour assurer la fiabilité et la qualité de l'isolement haute tension. Les isolateurs sont également soumis à plusieurs contraintes environnementales pouvant conduire à leur vieillissement. En pratique, les défaillances proviennent de l'action combinée du champ électrique et des facteurs environnementaux. Trois mécanismes fondamentaux décrivent la durée de vie d'un isolant sous l'action d'un champ électrique : le vieillissement électrique, la dégradation et finalement la rupture diélectrique.

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

Au cours des dernières années, l'utilisation des isolateurs en polymère encore appelés isolateurs composites ou isolateurs non-organiques a été massive dans les réseaux de transport et de distribution de l'énergie électrique en raison de multiples avantages qu'ils offrent, comparé aux traditionnels isolateurs en porcelaine ou en verre (grande résistance à la contamination, légèreté, bonne résistance mécanique, etc.). L'hydrophobicité de la surface en particulier, est l'un des facteurs importants qui contribue à la performance supérieure des polymères de silicone pour résister au mouillage en raison de leur faible énergie libre de surface.

L'objectif de ce travail est d'examiner quelques paramètres d'influence de la tension de contournement d'une surface en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau et la décharge électrique évoluant sur celle-ci. Ces paramètres se résument au volume des gouttelettes d'eau à faible conductivité électrique, l'arrangement en zigzag des gouttelettes et l'angle d'inclinaison de la surface en silicone par rapport à l'horizontale.

Le premier chapitre sera consacré à une synthèse du niveau des connaissances sur les performances d'une surface en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau sous tension continue.

Le deuxième chapitre fera l'objet de la description des diverses isolations électriques et leurs propriétés essentielles exploitées généralement en haute tension.

Le troisième chapitre porte sur la caractérisation des phénomènes de pollution et leurs conséquences sur les équipements électriques. Des méthodes de détermination du degré de pollution des sites, de sa simulation au laboratoire ainsi que des techniques de lutte contre ces phénomènes y sont présentées.

Le quatrième chapitre sera consacré principalement à l'étude expérimentale de l'effet de la disposition, le nombre de rangées, le volume des gouttes d'eau sur une surface en silicone hydrophobe à inclinaison variable lorsque celle-ci est soumise à une tension continue à polarité positive et négative. Les résultats expérimentaux issus de cette investigation seront suffisamment interprétés et enfin une conclusion générale permettant la synthèse du travail réalisé clôturera cette analyse.

# **Chapitre 01**

## **ETAT D'ART**

## 1.1 Introduction

Depuis leur développement dans les années soixante, les isolateurs polymériques remplacent de plus en plus les isolateurs en porcelaine dans les réseaux de transport de l'énergie électrique.

Ils présentent de nombreux avantages par rapport aux isolateurs traditionnels en porcelaine et céramique. L'utilisation massive des isolateurs polymériques a entraîné de nombreuses études visant à maîtriser et améliorer les performances en service de ce type d'isolateurs.

Une part importante de ces travaux traite le contournement des isolateurs en silicone recouverts de gouttes d'eau sous tension continue à fin de comprendre le comportement de ces derniers vis-à-vis du phénomène de décharges d'arc et l'influence de l'angle d'inclinaison de la surface, la polarité, le volume et la conductivité d'eau sur la tenue électrique de ces isolations.

Dans ce qui suit, des investigations essentielles sur la performance d'une surface isolante hydrophobe recouverte de gouttes d'eau sous tension continue, seront passées en revue.

## 1.2 Synthèse des travaux de recherches concernant l'effet du mode de disposition de gouttes d'eau sur une surface en silicone hydrophobe inclinée sur sa performance électrique sous tension continue

### 1.2.1 Y. Higashiyama [1996]

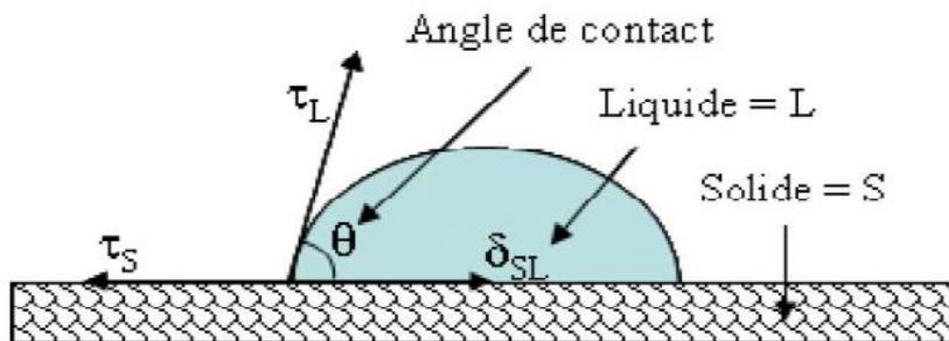
Il [1] a fait l'étude expérimentale sur le comportement des gouttelettes d'eau placées sur la surface de la plaque du polymère hydrophobe sous champ à courant continu. Afin de confirmer l'effet de l'hydrophobicité sur le mouvement des gouttelettes d'eau, il a utilisé trois types de matériaux tels que poly-tétra-fluor-éthylène (PTFE), le caoutchouc de silicone (SR), et Ethylène Propylène Diène Monomère (EPDM). Après le test il a constaté qu'il y a une différence entre le matériau isolant hydrophobe (PTFE) et le caoutchouc de silicone (SR) en particulier sur la surface de la plaque (SR) collante ou sèche un peu en raison de la migration de l'huile de silicone sur la couche intérieure.

D'autre part la surface de la plaque de (PTFE) est lisse et présente moins de frottement. Dans le cas de l'angle d'inclinaison, une goutte d'eau de volume  $0.04 \text{ cm}^3$  placée sur la

surface isolante de (SR) et (EPDM), il est remarqué que la goutte d'eau ne glisse jamais vers le bas le long de la surface de la plaque, il a conclu que le comportement des gouttelettes sous champ de courant continu dépend fortement non seulement de l'hydrophobicité mais également de la propriété extérieure d'un isolant.

### 1.2.2 H. J. Kloes et D. Konig [1997]

Des travaux ont montré qu'une goutte d'eau dans un champ électrique pouvait modifier le champ électrique et enclencher un processus de dégradation du matériau. Les auteurs [2] ont montré que le vieillissement d'un matériau polymère sous champ électrique en atmosphère humide commençait lorsque le champ électrique provoquait la déformation de la goutte d'eau. Cette déformation est à l'origine d'une augmentation du champ électrique local et engendre l'apparition des micros décharges entre les gouttelettes. La forme d'une goutte sur un substrat dépend de la tension de la surface du liquide  $\tau_L$ , du solide  $\tau_S$  ainsi que la tension inter faciale  $\delta_{SL}$ . La figure ci-dessous illustre les différentes forces qui entrent en ligne de compte dans la définition de la forme de la goutte en absence de champ électrique ( $\delta_{SL}$ ).

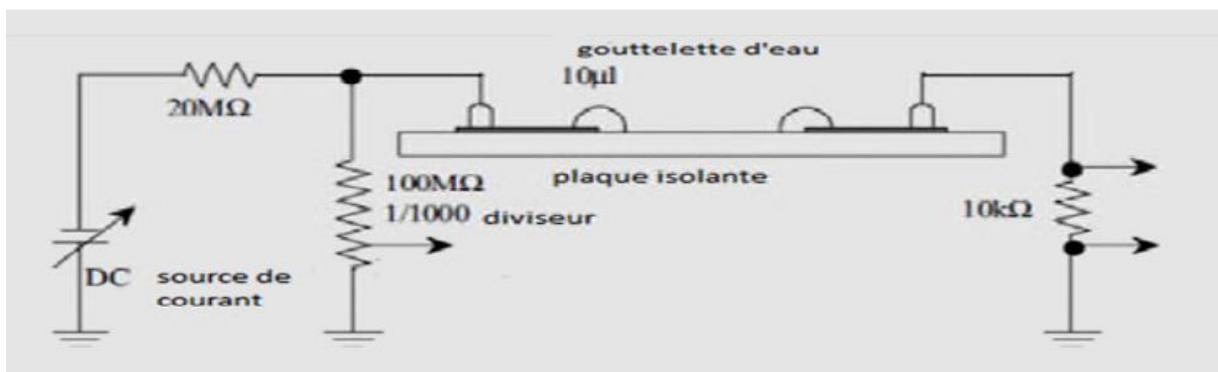


**Fig. 1. 1:** Forces en présence lorsqu'une goutte est placée sur un substrat en absence de contraintes électriques

Sous contrainte électrique, les forces électrodynamiques s'ajoutent et sont à l'origine de l'éjection des micro gouttelettes. M. Vallet a démontré que la déformation de la goutte était réversible jusqu'à un certain seuil de contrainte électrique, au-delà duquel la déformation devient permanente. Le retour de la goutte à sa forme initiale lorsque la contrainte était supprimée s'accompagnait spontanément d'une diminution de la force du champ électrique.

### 1.2.3 Y. Higashiyama, S. Yanase, T. Sugimoto [1998]

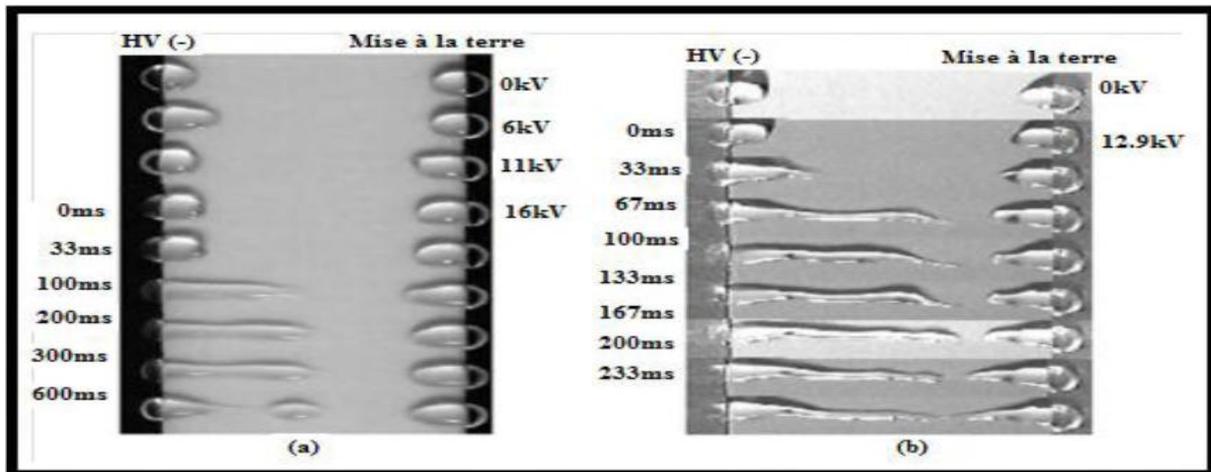
Ces auteurs [3] ont fait l'étude sur la décharge couronne qui se produit à la base des gouttelettes d'eau placées sur la surface du polymère sous champ à courant continu comme montre sur la figure 1. 2. Il a été étudié expérimentalement le comportement de ces gouttelettes d'eau sur les matériaux isolants hydrophobes, le PTFE et le caoutchouc de silicone (SR). L'hydrophobie signifie moins de mouillage ou de répulsion de l'eau. Un angle de contact d'une goutte d'eau placée sur la surface isolante est l'une des méthodes d'évaluation de l'hydrophobie. Les valeurs des deux types d'angle de contact, les angles rentrants et sortants statiques mesurés en utilisant une goutte d'eau de 4 ml de (SR) sont respectivement de  $105^\circ$  et  $65^\circ$ , et ceux du PTFE de  $101^\circ$  et  $92^\circ$ . Il convient de noter que l'angle de contact sortant de PTFE a presque la même valeur que celle de l'angle de contact statique, bien que celui du (SR) soit beaucoup plus petit que celui statique.



**Fig. 1. 2:** Diagramme schématique du dispositif expérimental

Des images vidéo ont été prises sur le comportement de deux gouttes d'eau placée sur les plaques isolantes de PTFE et SR mises sous une tension continue négative. La vitesse de la caméra vidéo est de 30 images par seconde. Bien que les gouttelettes d'eau allongée vers les électrodes opposées, la manière de l'allongement ou de la déformation des gouttelettes d'eau est tout à fait différente, bien que la gouttelette d'eau sur la plaque de PTFE s'allonge à 10 kV, l'allongement cessa bientôt, lorsque l'angle de contact apparent diminue jusqu'à une valeur inférieure à  $30^\circ$ . Ce type de mouvement ou de la division de la gouttelette d'eau a été observé à la surface de la plaque de PTFE. D'autre part, la goutte d'eau sur la plaque de SR forme un étroit canal dans une trame, le filament de la goutte d'eau négative atteint la proximité de la gouttelette d'eau positive, même si certain changement dans la forme de la

goutte d'eau a eu lieu. La goutte d'eau ne s'étend pas plus loin et conserve sa forme. L'émission de charge est un événement répétitif se produisant sous un champ électrique constant. La formation d'un filament d'eau sur la plaque de SR pourrait être due à l'épaisseur de la surface SR.



**Fig. 1. 3:** Formation d'un canal d'eau lorsque la tension négative est appliquée sur (a) le PTFE et (b) SR

D'après les auteurs ils ont constaté que la polarité de la tension appliquée affecte exactement le comportement des gouttes d'eau sur la plaque de SR comme cela est montré sur la figure 1. 3. Bien que l'agencement du système d'électrodes et des gouttelettes d'eau soit symétrique, une gouttelette négative tend à former un canal d'eau. Cette caractéristique peut être expliquée par l'effet de la décharge couronne d'une goutte d'eau. Pendant l'extension, la décharge couronne se produit à l'extrémité pointue d'une gouttelette d'eau déformée. Une certaine quantité de charge est émise l'interruption d'une goutte d'eau en petite fraction. Bien que le SR et le PTFE soient des matériaux hydrophobes, leurs conditions de surface sont très différentes. Etant donné que la charge de la surface déposée sur la plaque affecte l'intensité du champ électrique à l'extrémité d'une goutte d'eau, la force électrostatique agissant sur la gouttelette doit être clarifiée à partir de l'analyse du terrain le long de la surface des gouttelettes.

#### 1.2.4 H. Deng et R. Hackam [1999]

L'eau joue un rôle très important dans le vieillissement des matériaux polymères sous champ électrique. Les matériaux polymères isolants pour les applications externes sont

soumis pendant une période assez importante de l'année à l'action des eaux de pluie et du vent. Les auteurs [4] ont réalisé une étude pour évaluer l'impact de l'eau sur l'élimination des molécules de faible poids moléculaire présentes en surface des silicones. Cette étude a montré que l'immersion des matériaux dans une eau ayant une conductivité de  $70 \mu\text{S}/\text{cm}$  pendant 14 mois a provoqué une diminution de la quantité de molécules de faible poids moléculaire de 11 %. Ils expliquent cette diminution par une dissolution de ces molécules dans l'eau.

De nombreux autres travaux ont montré le rôle primordial de l'eau sur la conductibilité des isolateurs. La plupart des résultats de ces travaux sont interprétés en termes de quantité d'eau absorbé par le polymère en volume ou absorbé en surface. Cependant, ni les mécanismes de conduction, ni le rôle précis de l'eau n'ont pu être précisés. Il est toutefois très important de noter que la conductivité en elle-même n'est pas un danger réel pour la vie des matériaux, mais l'effet joule généré peut être la source de formation des bandes sèches et par conséquent d'apparition des décharges partielles.

### 1.2.5 N. Yoshimura, S. Kumagai, S. Nishimura [1999]

Ils [5] ont fait l'étude sur la diminution temporelle de la hydrophobicité sur la surface du matériau polymère dans les conditions d'essai suivantes :

L'électrolyte a été préparé avec du chlorure de sodium [NaCl], et les valeurs de la conductivité électrique sont de 0.1, 1, 4, 8, 12 et 16 mS/cm. En outre, le taux chutant d'électrolyte a été évalué à 12, 24, 36, 48 et 60 gouttes/mn simultanément, une tension continue de 3 kV a été appliquée à une électrode supérieure.

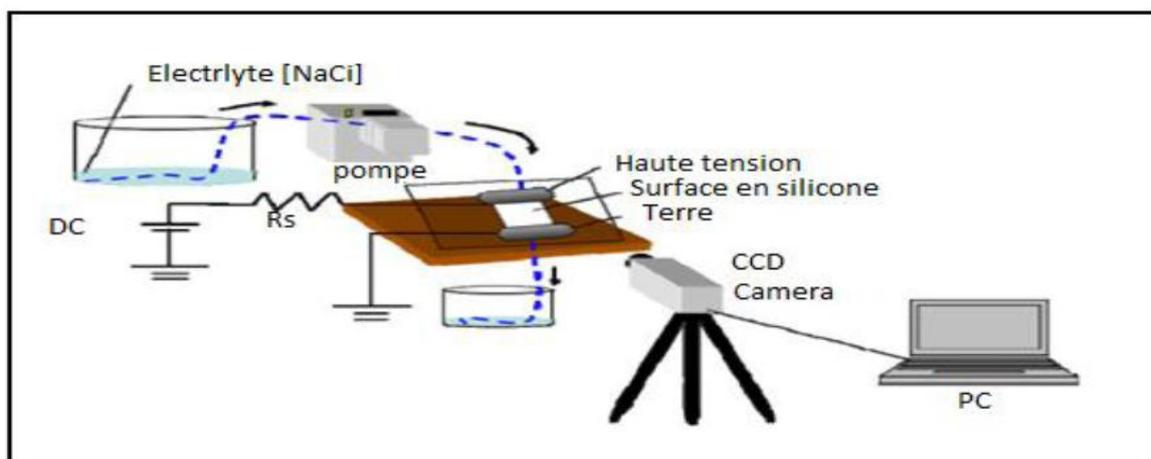
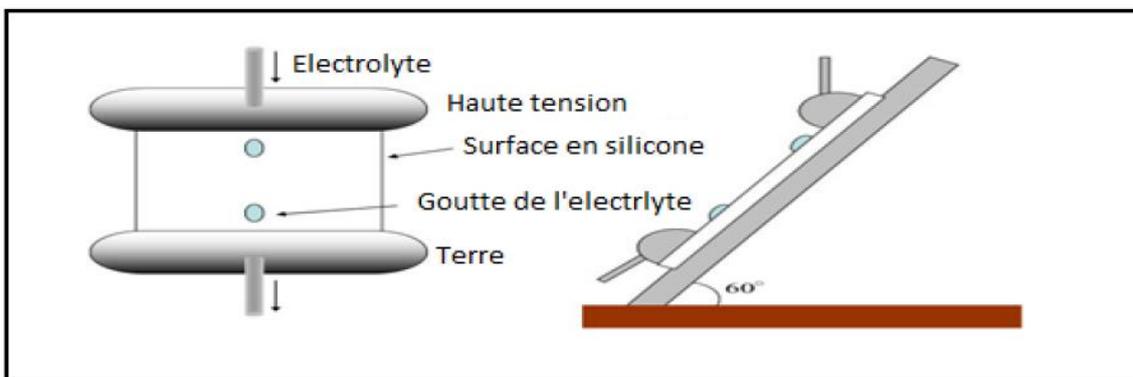


Fig. 1. 4: Installation expérimentale

La figure 1. 4 montre une installation expérimentale avec une source de tension continue et un échantillon d'essai a été arrangé entre les électrodes d'acier inoxydable de 100 mm de largeur. Ils ont laissé tomber l'électrolyte sans interruption pour examiner la surface témoin par un petit passage d'une électrode supérieure.

La figure 1. 5 montre la configuration des électrodes et d'un échantillon d'essai. L'échantillon d'essai utilisé est en silicone, de 70 mm de longueur et de 50 mm de largeur. La distance entre les électrodes est de 60 mm ; donc, le champ électrique appliqué était 50 V/mm.

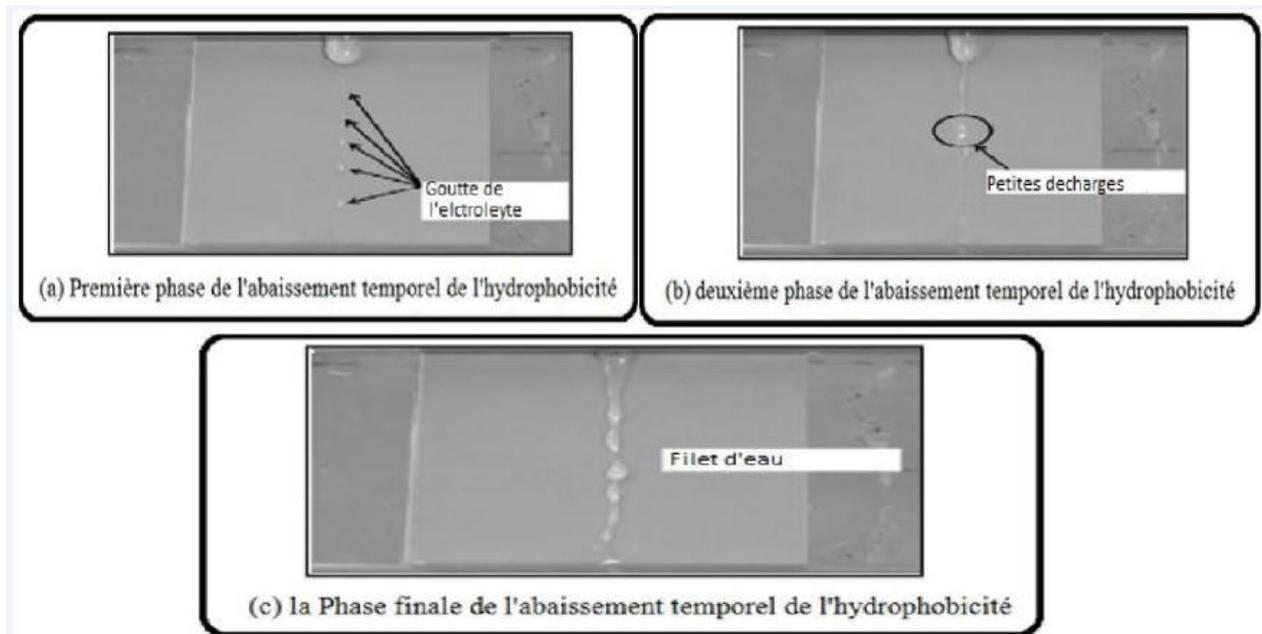


**Fig. 1. 5:** Configuration des électrodes

Ils ont évalué l'influence de l'abaissement temporel de l'hydrophobicité sous de diverses conductivités et taux chutant. Les changements d'hydrophobicité et des décharges produites sur la surface de l'échantillon d'essai ont été filmées par un appareil-photo.

La figure 1. 6 montre des images de l'abaissement temporel de l'hydrophobicité. Il en résulte que le changement de l'hydrophobicité peut être classifié en trois phases. Avec le progrès de l'abaissement de l'hydrophobicité, de petites décharges sont vues suivant les indications de la figure 1. 6b, la prochaine étape est décrite par la figure 1. 6c, une voie d'eau évidente est formée.

Dans leurs études expérimentales ils ont conclu que l'influence de l'abaissement temporel de l'hydrophobicité sous de diverses conductivités et des taux chutant ont été évalués, avec les progrès de l'abaissement d'hydrophobicité, de petites décharges sur la surface en silicone ont pu être vues. En plus, à l'étape finale, l'hydrophobicité s'est abaissée, et une voie d'eau évidente a été confirmée, une telle perte d'hydrophobicité a été influencée par la conductivité et le taux chutant de l'électrolyte.



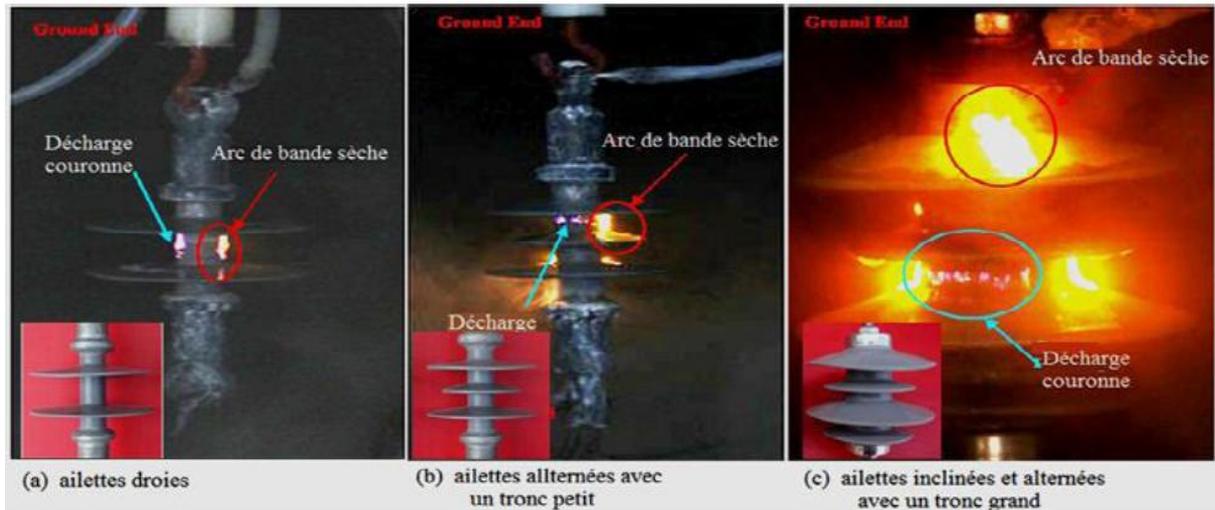
**Fig. 1. 6:** Abaissement temporel de l'hydrophobicité.

### 1.2.6 S. Thong-Om, W. Payakcho [2011] [6]

L'essai de vieillissement sous le brouillard salin a été effectué sur les isolateurs polymères, basés sur la CEI 61109. Les échantillons fabriqués de caoutchoucs en silicones HTV avec le contenu d'ATH ayant trois configurations différentes (ailettes droites, ailettes alternées, et ailettes inclinées et alternées), ont été testées sans interruption pendant 1000 heures, dans une chambre de brouillard salin artificiel (Fig. 1. 7), le degré de contamination, la réduction de l'hydrophobicité et mesure de la dureté, ont été employés comme techniques d'analyse des dommages physiques, pour évaluer le degré détérioration de surface.

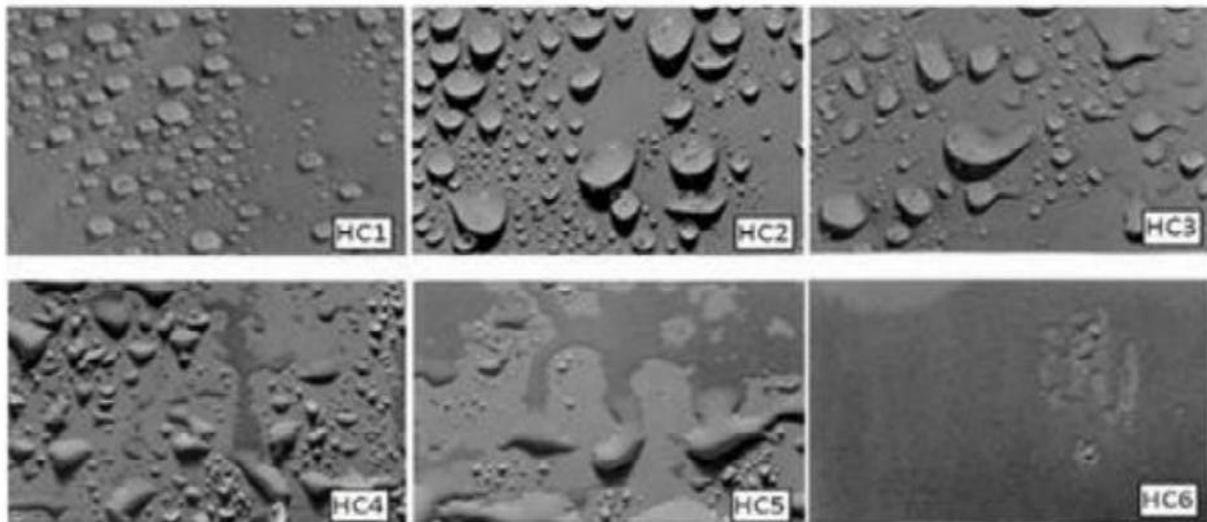
- ❖ La perte d'hydrophobicité améliore graduellement le mouillage extérieur et humidifie les formes des films d'eau ayant la conductivité élevée. Ceci induit des décharges couronnes et d'arcs de bande sèche sur la surface d'isolant polymère.
- ❖ La diminution d'hydrophobicité d'échantillons testés comparés avec un échantillon neuf indique le degré de détérioration de surface.

Ils ont observée l'arc de la bande sèche et décharges couronne sur la surface extérieur du tronc dans tous types d'échantillons (Fig. 1. 7).



**Fig. 1. 7:** Activités des décharges sur un isolateur en silicone

- ❖ Une plus grande réduction d'hydrophobicité a été mesurée sur la surface de tronc comparée avec la surface des ailettes de tous types d'échantillons.



**Fig. 1. 8:** Classification d'hydrophobicité (HC1-HC6)

L'évaluation du niveau d'hydrophobicité de la surface des échantillons testés a été basée sur la classification faite selon la figure 1.8. Les résultats de mesure de l'hydrophobicité sont affichés sur le tableau 1.

ailettes droites			ailettes alternées			ailettes à pente et alternées		
Position	HC	Position	Position	HC	Position	Position	HC	Position
1	HC 5		1	HC 4		1	HC 2	
2	HC 5		2	HC 5		2	HC 1	
3	HC 2		3	HC 2		3	HC 3	
4	HC 4		4	HC 4		4	HC 2	
5	HC 5		5	HC 5		5	HC 1	
6	HC 2		6	HC 3		6	HC 3	
7	HC 5		7	HC 4		7	HC 2	
		8	HC 4	8	HC 2			
		9	HC 2	9	HC 3			
		10	HC 4	10	HC 4			
					11	HC 4		

Tab. 1: Classification d'hydrophobicité

1.2.7 C. Baer et autres [2011]

Les auteurs [7] ont fait une étude comparative du phénomène hydrodynamique des gouttelettes d'eau sur un plan incliné, pour des matériaux isolants à partir d'élastomères de silicone (Fig. 1. 9).

Ils ont pu conclure que des amplitudes de tension de rupture sont très élevées en courant continu qu'en courant alternatif.

Ce phénomène est dû à la forte vibration des gouttelettes d'eau en courant alternatif qu'en courant continu, car la goutte prend moins de temps en AC pour tomber du haut vers le bas qu'en DC. Cette dernière se transforme en filet d'eau qui est poursuivi d'un courant de fuite. L'allongement et la formation de résidus électrolytes entraîne une augmentation supplémentaire de l'intensité du champ électrique et peut éventuellement conduire à un effet de polarité pour le maintien de l'hydrophobie.

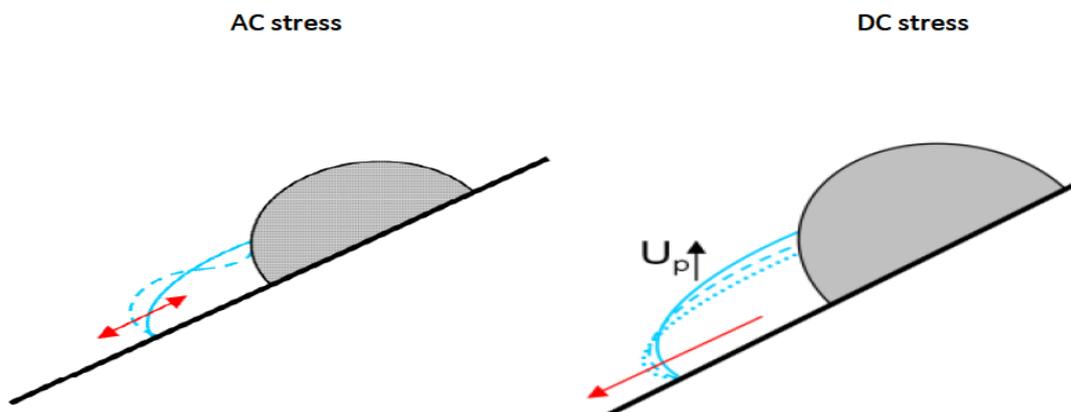
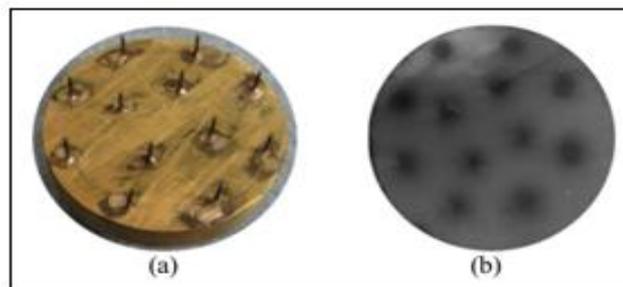


Fig. 1. 9: Comparaison entre le champ AC et DC

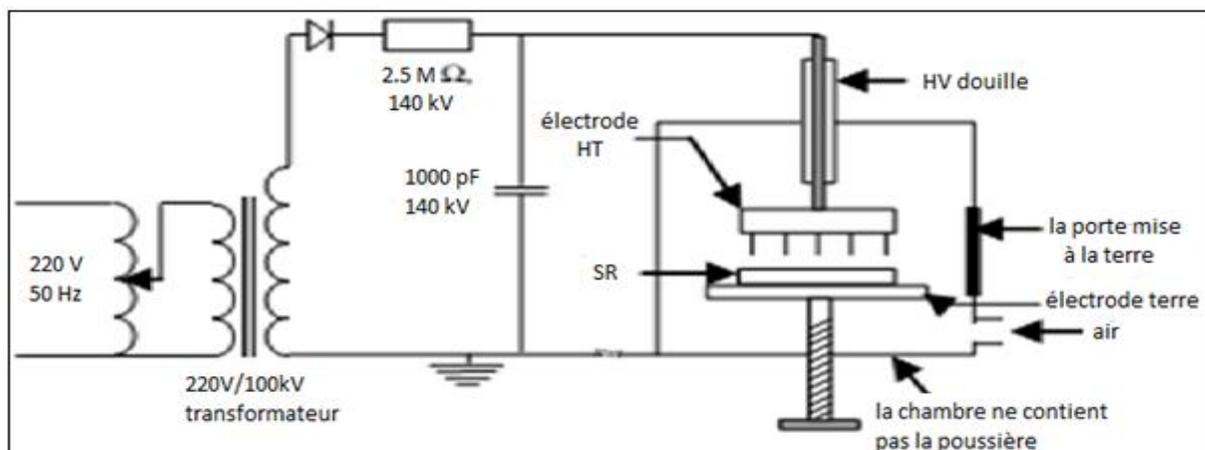
### 1.2.8 V. Joseph et M. Joy Thomas [2011] [8]

L'effet couronne sur les isolateurs de lignes de transmission se produit principalement en raison de mauvaise conception du matériel ou en de formation de gouttelettes d'eau sur la surface des isolateurs. Les gouttes utilisées étaient de 8  $\mu\text{l}$ . La dégradation de ces matériaux tels la silicone due à l'effet couronne est un problème majeur. C'est pour cela les auteurs ont pris un système d'électrodes multiples aiguille-plan pour générer l'effet couronne comme le montre la figure 1. 10.



**Fig. 1. 10:** Photographie montrant (a) les aiguilles sur l'électrode haute tension et (b) l'image numérisée de la pellicule photographique après l'exposition à effet couronne

Pour mieux comprendre les travaux de ces auteurs, la figure 1. 11 montre le dispositif expérimental utilisé pour évaluer le vieillissement de la silicone sous champ continu (positif et négatif). Un espace de 5 mm est maintenu entre la pointe de l'aiguille et la surface de l'échantillon, avec une tension de 7.5 kV pour l'alternative et 11 kV pour le continu. Cette dernière a été choisie de façon à correspondre à la crête de la tension alternative.

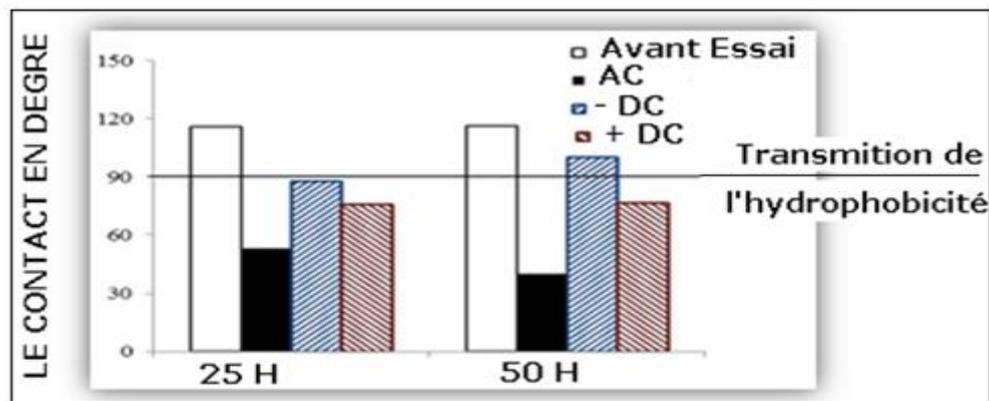


**Fig. 1. 11:** Dispositif expérimental utilisé pour générer l'effet couronne sous champ continu

L'isolant en silicone a été exposé à l'effet couronne pour deux durées différentes 25 et 50 heures, sous des conditions atmosphériques ambiantes : la température en ( $^{\circ}\text{C}$ ), la pression en Pascal (Pa) et l'humidité en (%). Le Microscope électronique à balayage (MEB) et celui à dispersion d'énergie des rayons X (EDX) ont été effectués sur l'échantillon afin de comprendre les divers changements qui se produisent à la surface en raison de l'exposition à la couronne. L'angle de contact a également été mesuré avant et après le test pour comprendre les changements d'hydrophobicité à la surface de l'échantillon.

Ils ont pu conclure que tous les échantillons deviennent hydrophiles après exposition à la couronne, à l'exception des échantillons testés sous la polarité positive pour les 50 heures comme le confirme la figure 1. 12.

Il est fort probable que l'hydrophobicité revient après 50 heures pour les échantillons testés sous champ continu positif.



**Fig. 1. 12:** Angle de contact de l'échantillon SR avant et après exposition à la couronne sous courant alternatif

### 1.2.9 A. Ouardani [2013] [9]

L'auteur a fait une étude de la tension continue positive de contournement d'une surface isolante hydrophobe en fonction du volume des gouttes d'eau la recouvrant et l'angle de son inclinaison par rapport à la verticale pour une conductivité électrique des gouttes d'eau constante et égale à  $180 \mu\text{S}/\text{cm}$ . Ses résultats ont montrés sur la figure 1.13. Il a remarqué que le volume des gouttes d'eau joue un rôle très important puisque lorsque celui-ci est de  $20 \mu\text{l}$ , la tension de contournement est décroissante et atteint la valeur la plus faible pour un angle d'inclinaison de l'ordre de  $90^{\circ}$ , et ceci est dû à l'adhésion des petites gouttes d'eau et leur allongement optimal contrairement aux grosses gouttes ( $V_g = 45 \mu\text{l}$ ) qui quittent la surface en

laissant de petites gouttes derrières elles.

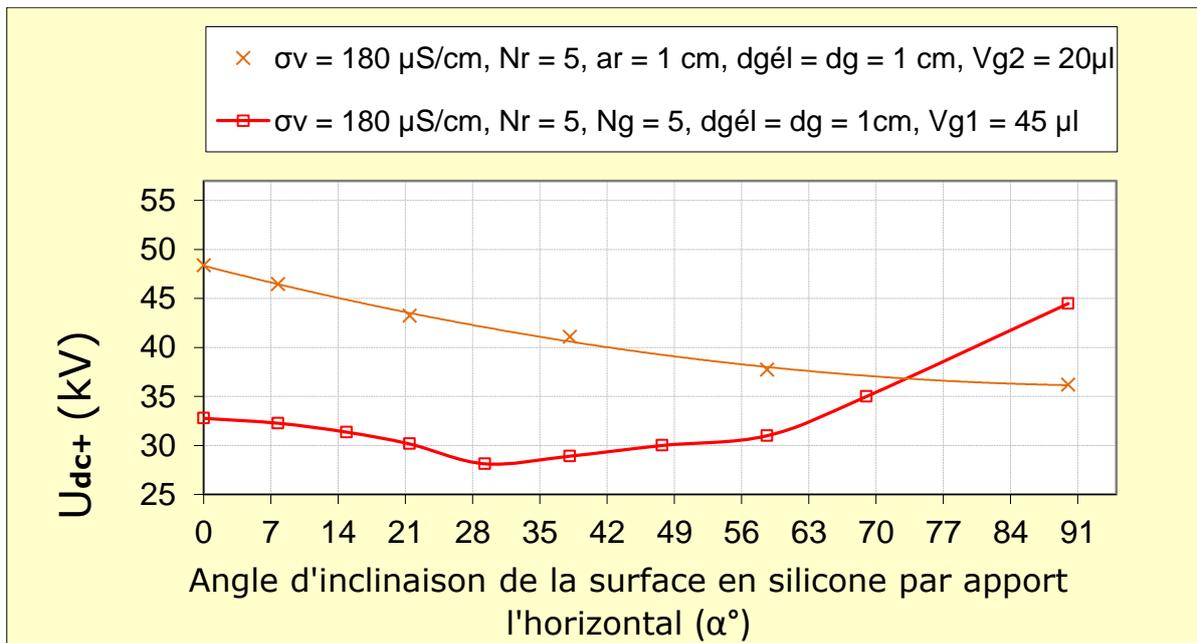


Fig. 1. 13:  $U_{DC+} = f(\alpha, V_g)$  d'une isolation en silicone hydrophobe

Le résultat de l'auteur sur l'arrangement de gouttes d'eau mixtes à volume différent sur une surface en silicone hydrophobe sous tension continue positive est illustré sur la figure 1. 14.

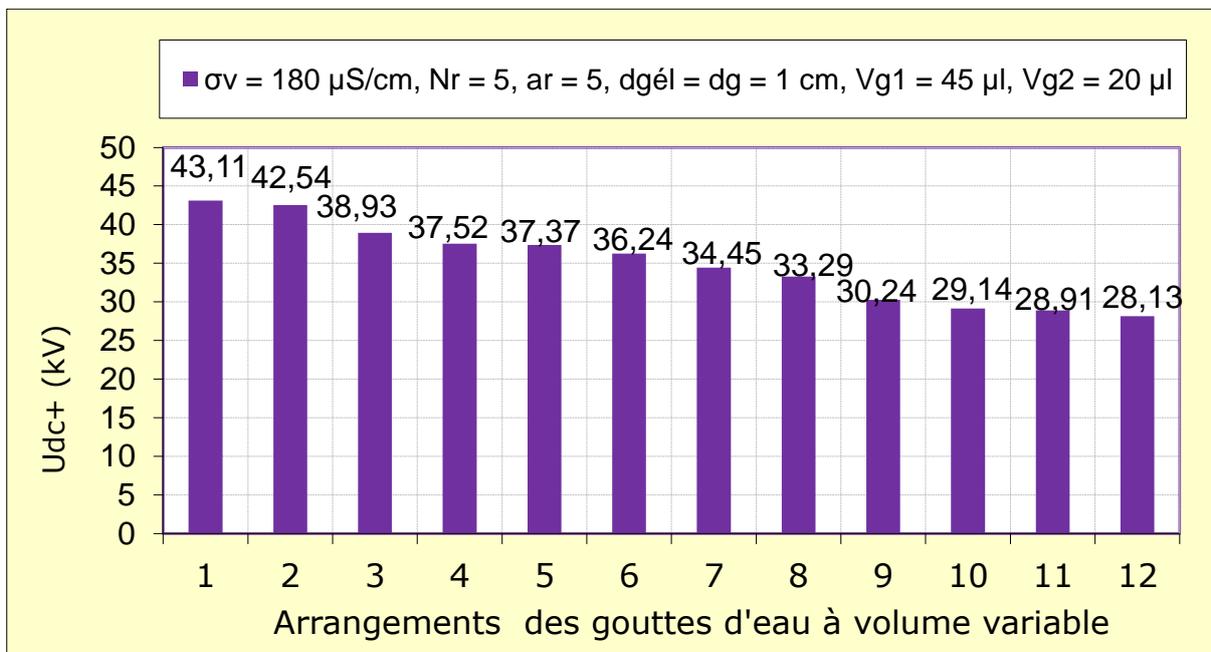


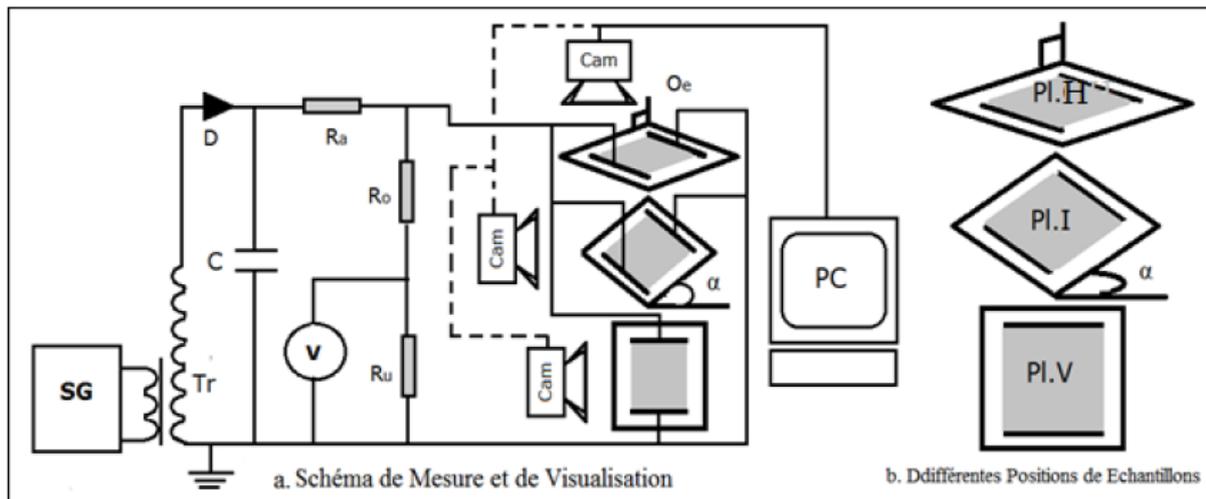
Fig. 1. 14:  $U_{DC+} = f(A_r)$  des gouttes d'eau à volume différents sur une surface en silicone hydrophobe ( $\alpha_c = 29,27^\circ$ )

### 1.2.10 S. Hai et R. Messouaf [2014]

Les auteurs [10] ont fait une étude expérimentale sur l'état de surface d'une isolation en silicone hydrophobe recouverte des gouttes d'eau sur la tension continue de contournement de la surface isolante à inclinaison variable.

Ils ont pris comme paramètres d'influence de cette grandeur, l'angle d'inclinaison, la polarité de la tension appliquée, le volume, la position de l'électrode mise sous haute tension et la largeur de la zone sèche du côté terre, variables. Cette étude est appuyée par une visualisation de la décharge électrique évoluant sur les gouttes d'eau déposées sur la surface en silicone.

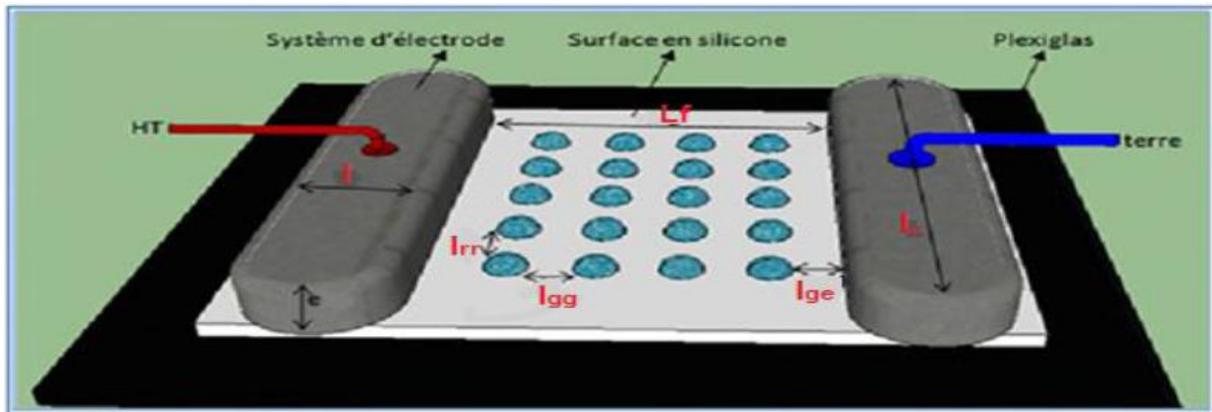
Le dispositif de mesure qu'ils ont utilisé est illustré sur la figure 1. 15.



**Fig. 1. 15:** Schéma de mesure et de visualisation (T100 : transformateur 0.08 A /135 kV; G270 : diode haute tension; C : capacité de lissage: 10 nF; Ra : Résistance haute tension de limitation de courant; R<sub>0</sub> : Résistance haute tension du diviseur résistif; Cam : Caméscope numérique; V : Voltmètre de crête; SG : Appareil de commande manuelle ou automatique du transformateur; R<sub>μ</sub> : Résistance d'entrée du voltmètre de crête; α : Angle d'inclinaison de la surface)

Le modèle expérimental utilisé par les auteurs est donné en figure 1. 16. Celui-ci est composé d'un échantillon en silicone, sur lequel reposent deux électrodes identiques planes dont l'une est reliée à la haute tension et l'autre à la terre. La distance interélectrode est fixée à 6 cm. Les électrodes planes sont en acier de 2 cm de largeur et 13.5 cm de longueur,

l'échantillon en silicone est de forme carrée de 10 cm de largeur et de 5 mm d'épaisseur. L'emplacement des gouttes d'eau sur la surface de l'échantillon est tel que la distance entre les gouttes ou entre les gouttes et les électrodes peut être variée.



**Fig. 1. 16:** Caractéristiques du modèle ( $L_f$ : Ligne de fuite entre les deux électrodes de base;  $L_{ge}$ : Distance entre la goutte et l'électrode HT ou terre;  $L_{rr}$ : Distance entre deux rangées de gouttes d'eau sur la largeur de l'isolation;  $L_{gg}$ : Distance entre les gouttes;  $e$ : Epaisseur de l'électrode;  $L$ : Longueur de l'électrode;  $l$ : Largeur de l'électrode)

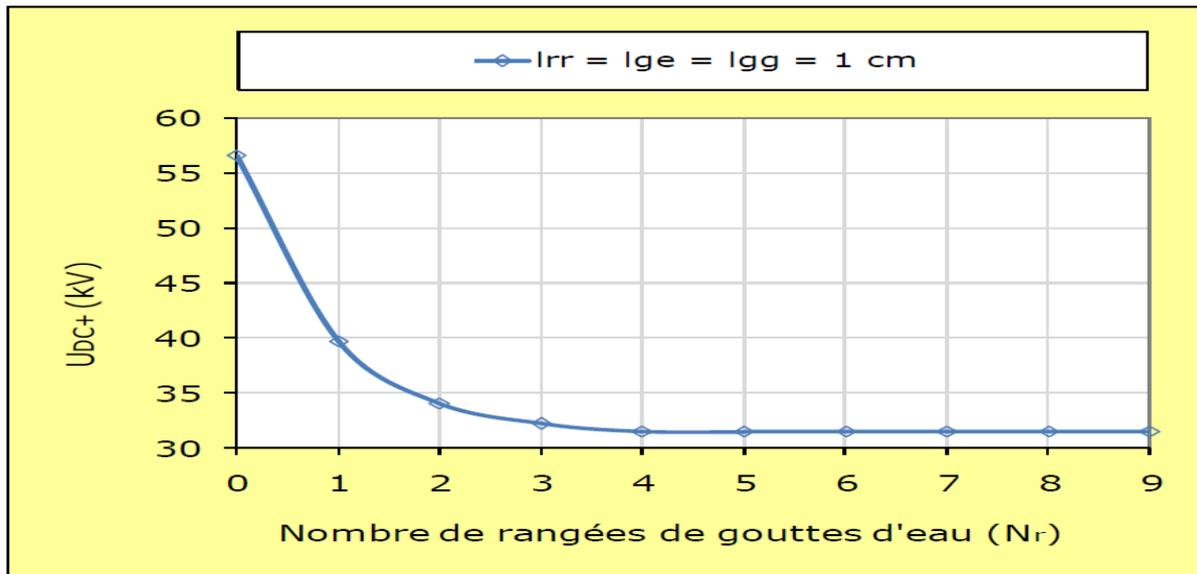
Ils ont posé ce modèle sur une plaque en plexiglas carrée de 30 cm de côté et 1 cm d'épaisseur. Cet ensemble est déposé sur un support en bois cubique, de 75 cm de longueur, 40 cm de largeur et 48 cm de hauteur. L'inclinaison par rapport à l'horizontale de la surface isolante est assurée par les guides en bois troués sur les deux côtés du dispositif (Fig. 1. 17). Le support repose sur une table en bois mise à la terre et située à 50 cm du sol.



**Fig. 1. 17:** Différentes positions du dispositif

Le résultat obtenu sur l'évolution de la tension continue positive de contournement en fonction du nombre de rangées de gouttes d'eau est illustré par la figure 1. 18. La valeur

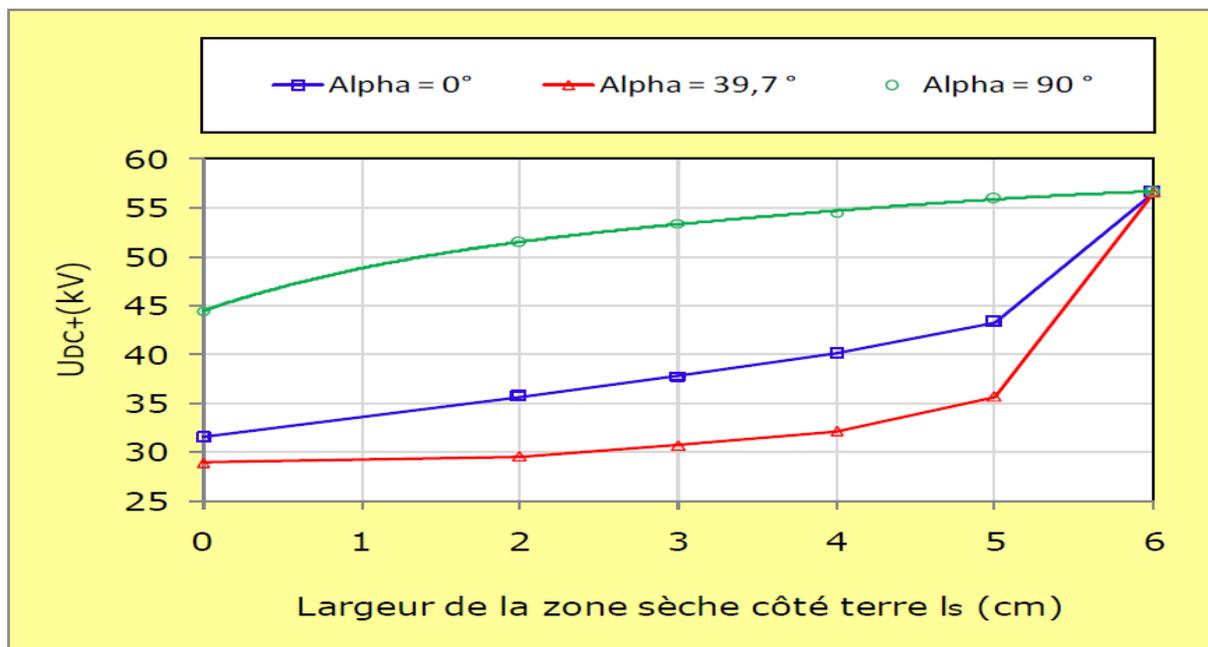
maximale de la tension de contournement est égale à 56.67 kV. Elle est atteinte en absence de gouttes d'eau. Ils ont remarqué que lorsque le nombre de rangées de gouttes d'eau augmente il a une décroissance rapide de la tension de contournement, et à partir du nombre de rangées, de l'ordre de 4 à 5, la valeur de la tension de contournement est minimale et constante (31.5 kV). Dans ce cas de figure la performance de l'isolation en DC+ chute de 44.5 % par rapport au cas où celle-ci est propre et sèche.



**Fig. 1.18:**  $U_{DC+} = f(N_r)$  d'une surface en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau

Le résultat obtenu par les auteurs sur l'évolution de la tension continue positive de contournement en fonction de l'angle d'inclinaison de l'isolation et le volume de gouttes d'eau à conductivité constante et égale à 180  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Il en résulte que lorsque le volume des gouttes d'eau est inférieur ou égal à 30  $\mu\text{l}$  ou bien supérieur ou égal à 90  $\mu\text{l}$ . L'allure de la caractéristique  $U = f(\alpha)$  est totalement décroissante. Ils ont remarqué le croisement des courbes de performance correspondant au petit et grand volume des gouttes d'eau au niveau de l'angle d'inclinaison critique de l'isolation. Ce point de croisement correspond au même volume laissé par les grosses gouttes de 90  $\mu\text{l}$  lors de leur décollage et qui est équivalent à celui des petites gouttes (20 et 30  $\mu\text{l}$ ). La confirmation de leurs résultats est obtenue à l'aide de la mesure du volume de ces gouttes à l'aide d'une seringue graduée. Les tensions de contournement de l'isolation sont obtenues pour des inclinaisons nulles où l'allongement des gouttes de 20  $\mu\text{l}$  ou 30  $\mu\text{l}$  et le raccourcissement de la ligne de fuite est minimal. Par contre les tensions les plus faibles correspondent à une inclinaison de l'isolation de 90 ° engendrant le raccourcissement maximal de la ligne de fuite de l'isolation. La performance de l'isolation est

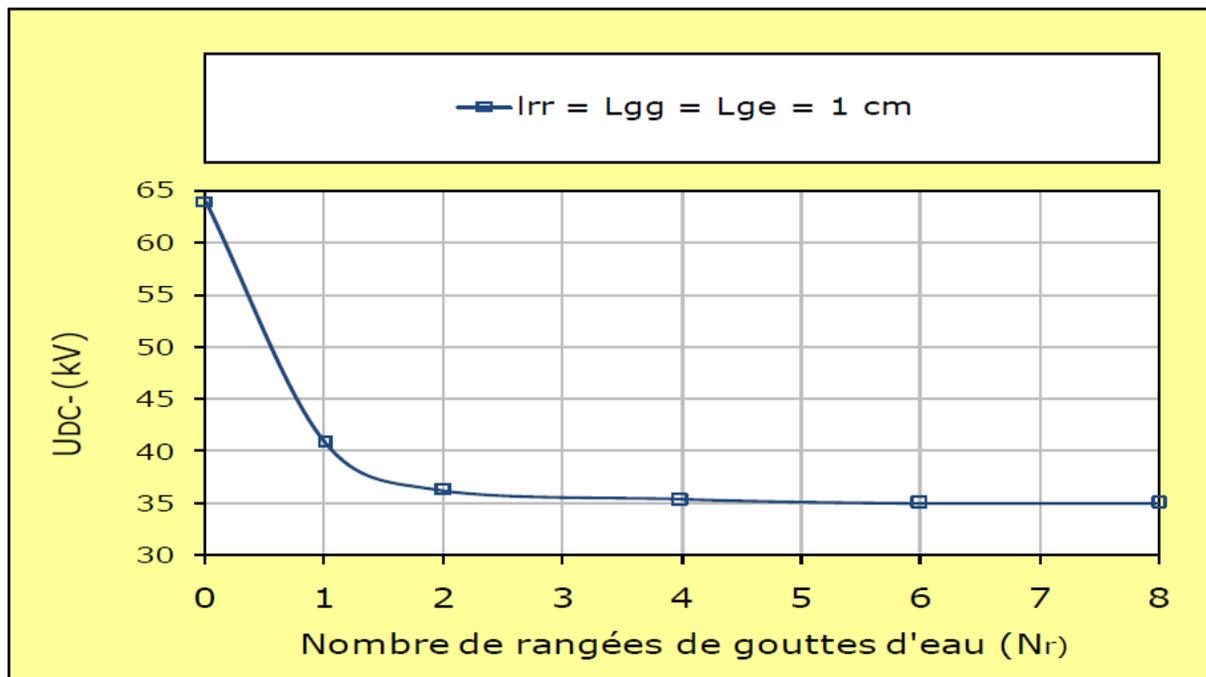
élevée pour l'angle de  $90^\circ$  car les grosses gouttes quittent la surface de l'isolation en laissant place à de petites gouttelettes d'eau engendrant l'élévation de la ligne de fuite de l'isolation. Par contre en position horizontale celles-ci s'allongent pour donner naissance à un filet d'eau de résistance électrique très faible. Pour les volumes de 45 et 60  $\mu\text{l}$ , les courbes présentent un minimum de tension de contournement correspondant à un angle d'inclinaison critique pour lequel l'allongement des gouttes d'eau sous l'effet conjugué de leur poids et la force électrique prend sa valeur maximale. De part et d'autre de ce point la performance de l'isolation augmente du fait que pour les angles élevés, les gouttes quittent la surface en se faisant remplacer par de petites gouttes pour des petits angles les gouttes s'allongent moins et l'effet de leur poids est négligeable.



**Fig. 1. 19:**  $U_{DC+} = f(l_s, \alpha)$  d'une surface isolante en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau

Pour le résultat obtenu sur la variation de la tension continue positive de contournement en fonction de la largeur de la zone sèche située au niveau de l'électrode à la terre et l'angle d'inclinaison de l'isolation sont illustré sur la figure 1. 19. Le volume des gouttes d'eau est de 45  $\mu\text{l}$  et la conductivité électrique est constante et égale à 180  $\mu\text{l}$ . Ils ont remarqué que quel que soit l'angle d'inclinaison choisi dans leurs étude, la tension de contournement de l'isolation croît en fonction de la largeur de la zone sans gouttes et tend vers une valeur limite de l'ordre de 56,5 kV, atteinte lors de l'absence de toute goutte d'eau sur la surface de la silicone. Ils ont remarqué que la tension la plus faible est obtenue pour

l'angle d'inclinaison critique indépendamment de la largeur de la zone sans gouttes. La valeur de la performance la plus élevée correspond à l'angle  $\alpha$  égal à  $90^\circ$  où les gouttes ont tendance à délaissier la surface en silicone au profit des petites gouttelettes entraînant l'élévation de la tension de contournement de l'isolation.



**Fig. 1. 20:**  $U_{DC-} = f(N_r)$  d'une surface en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau

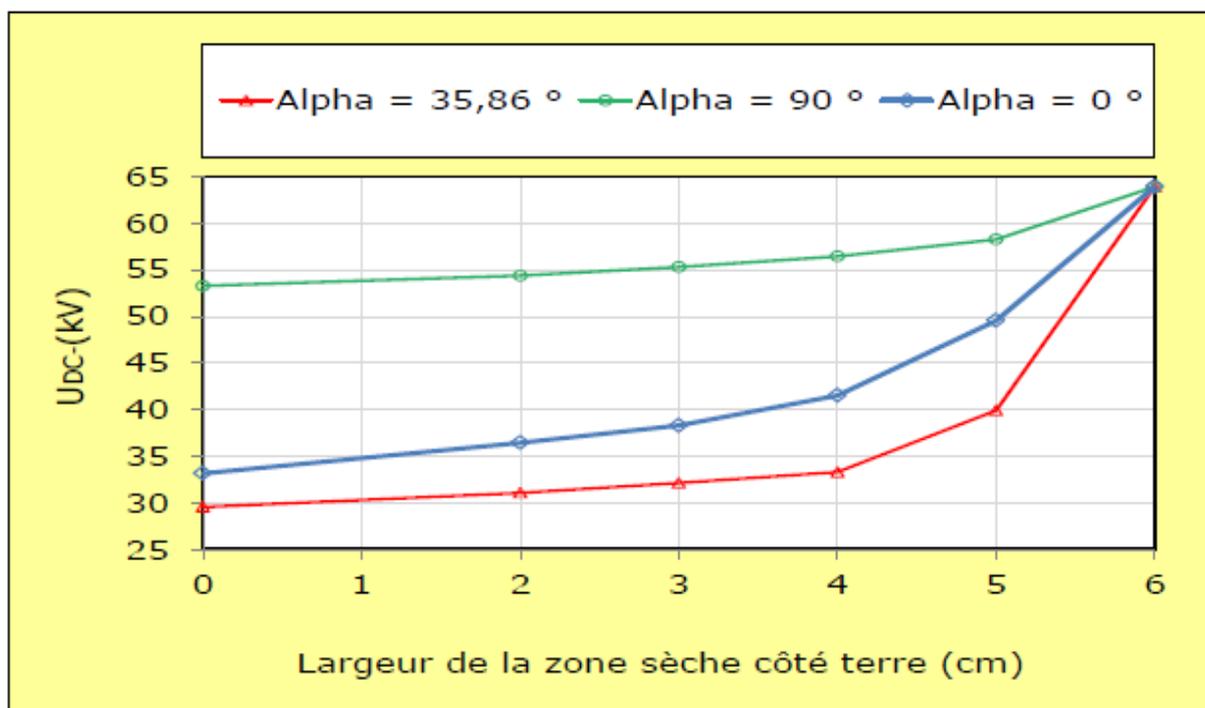
Le résultat obtenu par les auteurs sur la variation de la tension continue négative de contournement en fonction du nombre de rangées de gouttes d'eau est illustré sur la figure 1. 20. La valeur maximale de la tension de contournement, de l'ordre de 64,5 kV, est atteinte en absence de gouttes d'eau sur l'isolation. Pour un volume de gouttes d'eau égal à  $45 \mu\text{l}$  et une conductivité électrique de l'ordre  $180 \mu\text{S/cm}$ , ils ont remarqué que la tension de contournement décroît rapidement jusqu'à atteindre une valeur constante (35 kV), pour un nombre de rangées de l'ordre de 4 à 5.

La figure 1. 21 montre le résultat obtenu par les auteurs sur la tension continue négative de contournement de l'isolation en silicone hydrophobe en fonction de l'angle d'inclinaison de l'isolation et le volume de gouttes d'eau à conductivité électrique constante et égale à  $180 \mu\text{S/cm}$ . Il en résulte une évaluation similaire qu'en DC+. Cette même similitude est constatée entre deux courbes obtenues pour un même volume d'eau donné pour les deux

polarités de la tension continue. La seule différence réside plutôt sur l'amplitude de la tension de contournement de la même isolation où elle est plus élevée en polarité négative.

Ils ont remarqué que pour un angle d'inclinaison d'ordre  $67,78^\circ$  et des volumes de gouttes d'eau ( $60 \mu\text{l}$  et  $90 \mu\text{l}$ ), la tension de contournement est la même. Cette tension est justifiée par l'égalité des petites gouttelettes d'eau sur la surface lors du décollage des grosses gouttes pour les deux volumes comme il est montré sur la figure 1. 21.

Le résultat obtenu par les auteurs sur la caractéristique de la tension continue négative de contournement d'une isolation en silicone en fonction de la largeur de la zone sous gouttes d'eau située au voisinage de l'électrode mise à la terre pour trois angles d'inclinaison différents est illustré par la figure 1. 22. Le volume des gouttes d'eau est de  $45 \mu\text{l}$  et leur conductivité électrique est égale à  $180 \mu\text{S/cm}$ . Il en découle que quel que soit l'angle d'inclinaison choisi, la performance de l'isolation croît avec l'élévation de la zone sans gouttes pour tendre vers une même valeur atteinte lors de l'absence d'aucune goutte d'eau sur la surface d'isolation. Il est à signaler que la valeur la plus faible de la tension de contournement est obtenue pour un angle critique d'inclinaison et la plus élevée pour l'angle  $\alpha$  égal à  $90^\circ$ .



**Fig. 1. 22:**  $U_{DC} = f(l_s, \alpha)$  d'une surface isolante en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau

### 1.3 Conclusion

La synthèse sur les travaux réalisés par plusieurs chercheurs sur l'étude de la performance des isolations en silicone sous tension continue montre que les polymères sont bien favorisés dans le domaine d'isolation en hautes et moyennes tensions à cause de leur structure moléculaire, leur caractéristique hydrophobe ou leur résistance aux courants de cheminement en présence de pollution.

L'objectif de notre travail est d'étudier l'effet du mode de disposition de gouttes d'eau en zigzag sur une surface en silicone hydrophobe sur sa performance électrique sous tension continue positive et négative avec angle d'inclinaison variable, à l'aide d'un dispositif permettant la reproduction de l'inclinaison de la surface inférieure et supérieure d'une ailette et celle du tronc d'un isolateur d'une ligne électrique aérienne, Ceci consiste à déterminer la caractéristique de la tension de contournement en fonction de l'angle d'inclinaison de ces surfaces lorsque celles-ci sont recouvertes des gouttes d'eau à volume, conductivité, arrangement et polarité de la tension appliquée variable.

# **Chapitre 02**

## **LES ISOLATEURS HAUTE TENSION**

## 2.1 Introduction

La contrainte électrique dans les circuits électriques est résistée principalement par les isolateurs, ces derniers sont constitués d'un matériau isolant solide, caractérisé par une grande impédance au passage du courant électrique. Son rôle est de séparer deux corps conducteurs, soumis à deux potentiels différents.

Dans les réseaux de transport d'énergie électrique, l'isolement pylône-conducteur qui représente les deux parties conductrices, est assuré par une chaîne d'isolateurs. Chaque chaîne est caractérisée principalement par sa longueur de fuite (nombre d'éléments).

Dans les lignes de haute tension, le dimensionnement des isolateurs est déterminé par la surtension de manœuvres. Dans ce cas, la tenue à la tension nominale à 50 Hz des isolateurs propres et secs est excellente. Cependant, en l'absence de surtension de foudre ou de manœuvres, de nombreux défauts sont enregistrés sur les lignes aériennes (contournement électrique, défaillance d'isolateurs, ...), particulièrement par temps humide (rosée, brouillard, pluie fine, ... etc.).

Notre chapitre comporte deux parties:

- La première partie décrit les propriétés électriques des isolations, les divers types et profils d'isolateurs, les critères de leur choix ainsi que les domaines de leur utilisation.
- Dans la deuxième partie nous présentons les principales caractéristiques des isolations en silicone.

## 2.2 Définition

### 2.2.1 Isoler [11]

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

### 2.2.2 Isolement

On appelle isolement d'un ouvrage ou d'un appareil électrique son aptitude à supporter les contraintes électriques qui lui sont appliquées.

### 2.2.3 Isolation

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

➤ **Isolation autorégénératrice**

C'est une isolation qui peut être remise sous tension immédiatement après claquage ou contournement, qu'elle a subi sans dommage (isolations externes : distance dans l'air, ligne de fuite des isolateurs...).

➤ **Isolation non autorégénératrice**

C'est une isolation qui nécessite une intervention immobilisant plus ou moins longtemps l'appareil touché, lequel peut même être mis définitivement hors d'usage (papier imprégné d'huile, hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>)).

### 2.2.4 Isolateur

L'isolateur est utilisé comme son nom l'indique pour l'isolement entre deux corps ou deux pièces sous différentes tensions pour empêcher les courts circuits, les pertes de courant et les charges d'électrocution. L'isolateur est un matériau solide, liquide ou gaz qui a une très grande résistance au passage du courant et dont la conductibilité est pratiquement nulle.

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 dû surtout au poids de la ligne, son mouvement en présence de vent, etc. [12]

### 2.2.5 Constitution de l'isolateur et son fonctionnement

Les isolateurs sont des composants indispensables au transport et à la distribution de l'énergie électrique. Leur importance est reliée directement au fait de :

- Maintenir les conducteurs dans la position spécifiée (isolateurs d'alignement et d'ancrage).
- Assurer la transition entre l'isolation interne (huile, SF<sub>6</sub>) et l'isolation externe (air atmosphérique).
- Réaliser une liaison mécanique entre des conducteurs portés à des potentiels différents accrochés aux pylônes des lignes aériennes.
- Raccorder les matériels électriques au réseau (traversées de transformateur, extrémités de câbles).
- Jouer le rôle d'une enveloppe de certains appareils (disjoncteurs, parafoudres, réducteurs de mesure). [13]

## 2.3 Autres définitions concernant les isolateurs

### 2.3.1 Contournement

C'est une décharge disruptive accompagnée d'étincelles se déplaçant sur l'interface d'un isolateur d'une électrode vers une autre.

### 2.3.2 Ligne de contournement

La ligne de contournement ( $L_c$ ) est la distance la plus courte dans un gaz entre deux parties conductrices [14].

### 2.3.3 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 [15]. La tension de contournement dépend:

- de la résistivité volumique moyenne de la pollution.
- de la répartition de la couche de pollution.
- de la longueur de l'isolateur.
- du profil de l'isolateur.

### 2.3.4 Tension de tenue

C'est le niveau de tension le plus important, que peut supporter une isolation sans provoquer de décharge disruptive.

### 2.3.5 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 [15].

### 2.3.6 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 [16].

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

## **2.4 Propriétés électriques des isolations et les facteurs de leur influence**

### **2.4.1 Rigidité diélectrique**

La rigidité diélectrique d'un matériau isolant est la valeur du champ électrique auquel il faut le soumettre pour qu'il en résulte une perforation qui le rende inapte à remplir ultérieurement sa fonction.

De façon pratique, la rigidité diélectrique est définie comme étant le rapport entre la tension à laquelle se produit une perforation dans les conditions d'essai spécifiées et la distance entre les deux électrodes planes auxquelles est appliquée la tension.

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

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

Parmi les paramètres d'influence de la rigidité diélectrique on distingue la géométrie des électrodes, la température et la géométrie des éprouvettes et d'autre part d'autres paramètres aussi comme la nature de la tension et la durée d'application de la tension.

#### **2.4.1.1 Rigidité diélectrique transversale**

Dans les conditions pratiques, cette rigidité est fonction de nombreux paramètres expérimentaux et particulièrement de phénomènes qui prennent naissance dans le milieu extérieur au solide. Cette valeur est qualifiée de rigidité diélectrique pratique.

Lorsqu'il est possible de s'affranchir totalement de l'effet de ces facteurs externes, on parle alors de rigidité intrinsèque, caractéristique uniquement du matériau à étudier. Le rapport de la rigidité intrinsèque à la rigidité pratique dépend de la nature des isolants et des conditions expérimentales de leur détermination, peut parfois dépasser la valeur de 20.

#### **2.4.1.2 Rigidité diélectrique longitudinale**

La rigidité longitudinale dépend peu de la nature de l'isolant, mais beaucoup plus son état de sécheresse et de propreté. En effet, dans la plupart des cas, l'amorçage de l'espace

entre les deux conducteurs se produit d'abord dans le milieu ambiant au voisinage de la surface du solide. Ce n'est que dans certains cas, par exemple celui de matériaux ayant subi une immersion prolongée dans l'eau ou essayée à température élevée que l'amorçage intéresse réellement l'isolant et provoque une destruction réelle de sa surface (carbonisation) le rendant inapte à supporter de nouvelles contraintes.

### 2.4.2 Permittivité

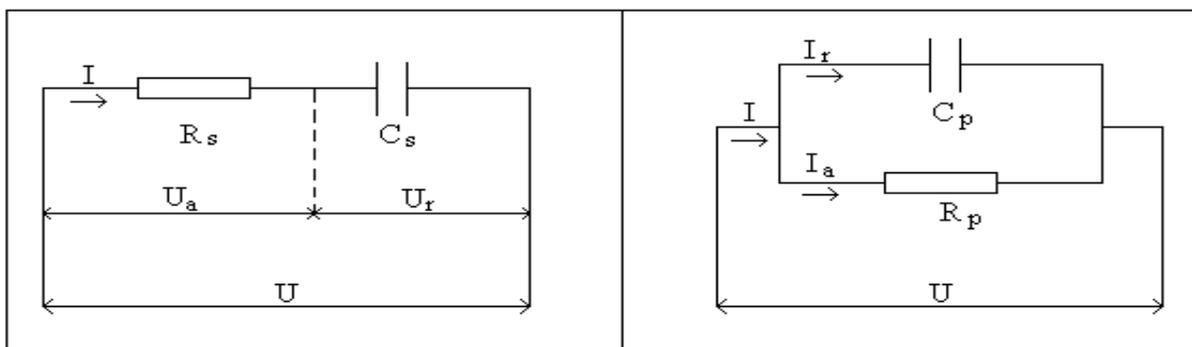
Lorsqu'un isolant est soumis à l'action d'un champ électrique, il se produit à l'échelle moléculaire diverses modifications qui ont pour effet de créer un champ électrique propre ( $E_p$ ) à l'intérieur de la substance, s'opposant au champ électrique extérieur appliqué ( $E_e$ ). Cette caractéristique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

- La permittivité relative  $\epsilon_r$  d'un diélectrique parfait est le quotient de la capacité entre deux électrodes supposées noyées dans ce diélectrique  $C_x$ , par la capacité de la configuration d'électrode dans le vide  $C_0$ .
- La permittivité absolue  $\epsilon_a$  est le produit de la permittivité relative  $\epsilon_r$  par la constante électrique du vide  $\epsilon_0$ .

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

### 2.4.3 Angle de pertes et le facteur de dissipation

Tout isolant soumis à un champ électrique alternatif est traversé par des courants de conduction et d'absorption qui donnent lieu à des pertes diélectriques. Le diélectrique réel peut être représenté par les schémas équivalents suivants (Fig. 2. 1 et 2. 2).



**Fig. 2. 1:** Circuit électrique équivalent série

**Fig. 2. 2:** Circuit électrique équivalent parallèle

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

$$\text{Tg}\delta = U_a/U_r = I_a/I_r = P_a/P_r$$

Le diagramme de Fresnel correspondant à ce circuit parallèle est donné sur la figure 2.3

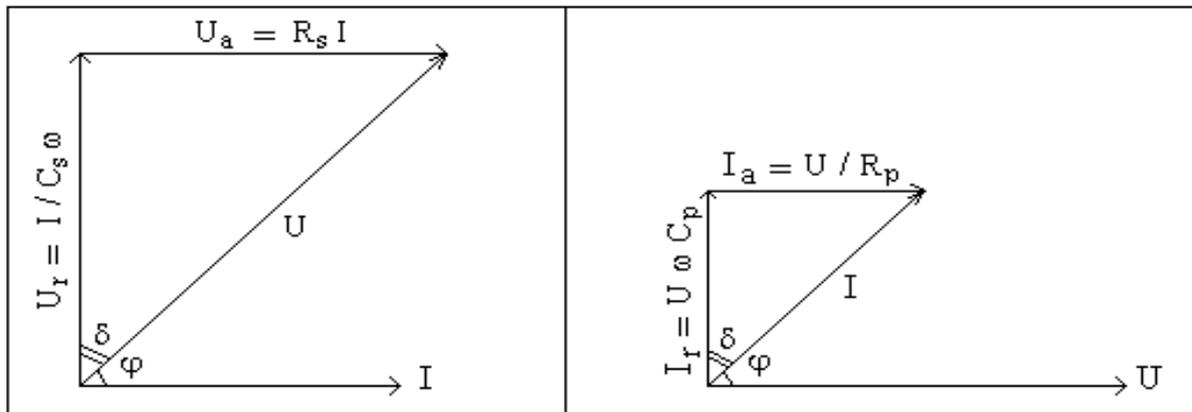


Fig. 2. 3 : Diagramme de Fresnel correspondant au schéma équivalent parallèle

## 2.4.4 Résistivité transversale, superficielle et résistance d'isolement

### 2.4.4.1 Définitions et signification

- **La résistance transversale ou volumique** est déterminée en appliquant un champ perpendiculaire à la surface d'une éprouvette et en mesurant le courant transversal qui résulte de l'application de ce champ. Elle est relative aux propriétés internes du matériau.
- **La résistance superficielle** est celle qui intervient entre deux conducteurs sur une même surface isolante. C'est une notion qui fait intervenir outre la qualité du matériau, le dépôt d'une mince couche conductrice (humide ou autre) à travers laquelle s'effectue en tout ou en partie la conduction.
- **La résistance d'isolement** fait intervenir à la fois la résistance transversale et la résistance superficielle d'un matériau, d'une façon représentative des conditions pratiques d'emploi des matériaux.

#### 2.4.4.2 Résistance et résistivité transversale

La résistivité transversale  $\rho$  d'un matériau isolant est définie comme celle d'un conducteur par la relation:  $\rho = RS/e$

Avec R : Rapport de la tension appliquée à une éprouvette d'épaisseur  $e$  par le courant qui circule à travers l'isolant entre les électrodes de surface S.

Lorsqu'on applique un échelon de tension à un courant qui en résulte comprend un terme transitoire dont la durée peut être variable et un terme permanent. Ce dernier est appelé courant de conduction. C'est à partir de celui-ci qu'est définie la résistivité transversale réelle du matériau.

Parmi les paramètres d'influence sur la résistivité transversale la température et l'humidité.

#### 2.4.4.3 Résistance et résistivité superficielle

La résistance superficielle est le quotient de la tension continue appliquée entre les deux électrodes disposées à la surface de l'isolant par le courant qui en résulte. Autrement dit c'est le quotient du gradient de potentiel en surface par le courant par unité de largeur.

### 2.5 Matériaux utilisés pour les isolants solides

#### 2.5.1 Verre [17]

Il est fabriqué en fondant dans des creusets chauffés au rouge vif à une température 900 °C; un mélange de sable, de chaux et de carbonate de Sodium. Le liquide, peu fluide est coulé dans des moules en acier ayant en creux la forme des isolateurs. Chimiquement, le verre est un mélange de Silicate alcalin et de Calcium ou de Plomb. Les principales variétés de verres utilisées dans l'industrie électrique sont les suivantes:

#### 2.5.2 Porcelaine [18]

La porcelaine est constituée par du kaolin et du quartz de première qualité. Ils sont cuits à 1400 °C, puis recouverts d'émail au silicate et recuits au four pour obtenir une glaçure à chaud qui le rend imperméable à l'eau. La rigidité diélectrique de la porcelaine varie entre 25 et 35 kV/mm, sa permittivité relative oscille entre 6 et 7. Elle est dotée d'une grande résistivité, environ  $10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$  à 20 °C, ses pertes diélectriques sont faibles en basse fréquence et en haute tension, quant à sa résistance mécanique, elle varie entre 2500 et 4000 N/mm.

### 2.5.3 Bakélite [18-19]

C'est une résine artificielle inventée vers 1909 par le chimiste BAKELAND. On l'obtient sous trois états:

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

La résistivité transversale  $\rho_{vcc}$  de la bakélite peut s'étendre entre  $10^{10}$  et  $10^{12}\Omega.cm$ , sa rigidité est de l'ordre de 10 à 20 kV/mm, quant à sa permittivité relative  $\epsilon_r$  elle varie entre 5 et 9.

### 2.5.4 Polychlorure de vinyle (PVC)

Le PVC est un polymère organique composé de molécules formant, en général, de longues chaînes d'atomes de carbones sur lesquels sont fixés des éléments dénommés chlore (Cl). Sa formule chimique:  $-CH_2-CHCl-$ . Il supporte des températures inférieures ou égales à 200°C. La résistivité transversale  $\rho_{vcc}$  du PVC est de l'ordre de  $10^{12}$  à  $10^{15}\Omega.cm$ , sa rigidité diélectrique avoisine 35 kV/mm, sa permittivité relative  $\epsilon_r$  varie entre 3 et 5, quant à son facteur de pertes, celui-ci oscille entre  $2.10^{-2}$  et  $10^{-1}$ .

### 2.5.5 Silicone

#### 2.5.5.1 Définition [20]

On donne ce nom à toute une catégorie de corps récemment inventés qui sont analogues aux résines synthétiques. Ils sont différents, parce qu'ils ne contiennent que peu ou pas de carbone dans la constitution de leurs molécules. Ils ne sont pas combustibles. On en a fabriqué de nombreuses variétés aux propriétés très diverses et faites des huiles, des vernis, des graisses, du caoutchouc.

### 2.5.5.2 Structure moléculaire des silicones [21]

L'excellente stabilité et la grande liberté de formulation des silicones sont ancrées dans le motif de base. C'est là que résident leur grand avantage et leur supériorité par rapport aux autres matériaux. Les silicones sont un groupe particulier de matières plastiques, car habituellement, le terme plastique sous-entend de « matière organique » ; mais les silicones sont des matériaux « semi-organique ».

Les silicones ont une structure chimique basée sur une alternance d'atomes de silicium et d'oxygène (Fig. 2. 4). C'est par la présence de silicium et par l'existence de la liaison Si-O que les silicones se distinguent des autres polymères organiques.

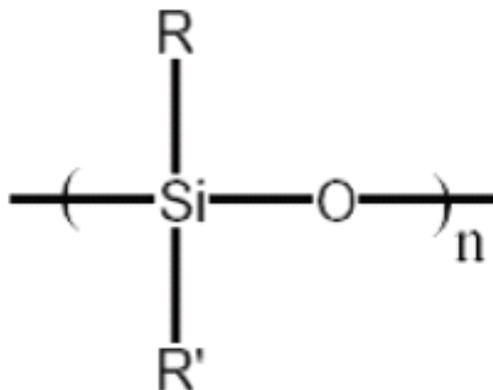


Fig. 2. 4: Liaison Si-O

### 2.5.5.3 Différentes familles de silicones [22]

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

#### ❖ Huiles et gomme

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

#### ❖ Gels de silicone

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

### ❖ Elastomères de silicone

Sont des fluides réticulés dont la structure tridimensionnelle est beaucoup plus complexe qu'un gel. En outre, ces élastomères comportent des oligomères (petites chaînes de faibles poids moléculaires) dans la matrice. Des remplisseurs, tels que la silice amorphe, sont fréquemment ajoutés à la matrice pour renforcer la dureté.

### ❖ Résines de silicone

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

## 2.5.5.4 Propriétés diélectriques des silicones [23]

Les silicones résistent jusqu'à 200 °C sans durcissement ni décharge par rapport aux autres matériaux, et conservent leurs propriétés dans une large gamme de température (- 40 à 200 °C) :

- ❖ Rigidité diélectrique de 15 kV/mm;
- ❖ Permittivité relative à 25 °C et 1 kV est de 5.4;
- ❖ Facteur de dissipation diélectrique à 25 °C et 10 kHz ;  $\text{tg } \delta = 4.10^{-3}$  à  $5.10^{-3}$ ;
- ❖ Température d'auto-inflammation est supérieure à 300 °C;
- ❖ Masse volumique de 2300 à 2800 kg/m<sup>3</sup>.

## 2.5.5.5 Autres propriétés des silicones [24]

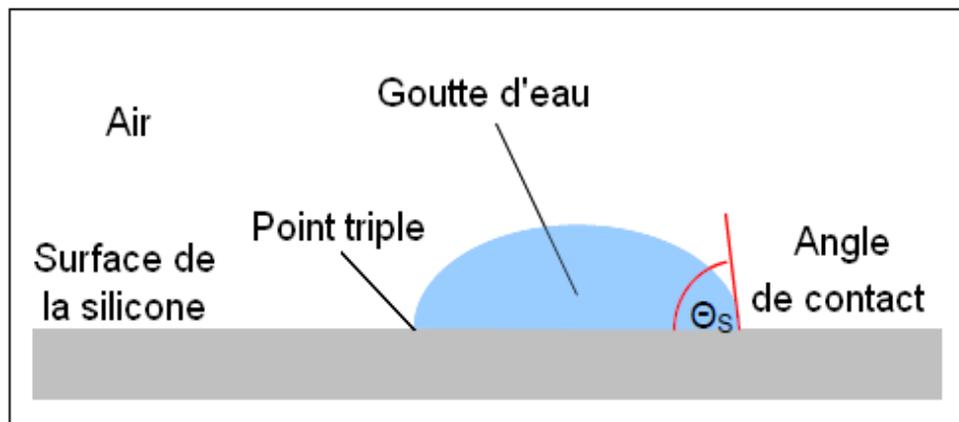
### ❖ Hydrophobicité

Par rapport aux autres matériaux, les silicones se distinguent par un très haut pouvoir imperméabilisant à long terme, appelé hydrophobicité comme il est illustré sur la figure 2.5. 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.



**Fig. 2. 5:** Hydrophobicité d'une surface en silicone

L'angle de contact d'une goutte d'eau sur une surface en silicone est montré sur la figure 2.6



**Fig. 2. 6:** Angle de contact d'une goutte d'eau sur une surface en silicone

De nombreux travaux, réalisés en particulier sur les silicones ont montré que l'on pouvait très bien suivre l'évolution des propriétés de surface d'un matériau soumis à des contraintes électriques par cette méthode. Dans une étude réalisée sur des isolants d'EPDM et de silicone en service en plein air, T. Sörqvist et al. [25] ont mis en évidence une grande corrélation entre l'évolution du courant de fuite et la perte du caractère hydrophobe de la surface. La perte du caractère hydrophobe de surface est attribuée à la mise à nue des charges minérales, à l'apparition des fissures et de l'érosion en surface.

Cette perte du caractère hydrophobe est réversible sur les silicones. En effet, de nombreuses études ont montré que les silicones avaient une aptitude à retrouver une certaine hydrophobicité après un certain temps.

### ❖ Tenue aux UV et aux intempéries

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

### ❖ Elasticité

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  $-45\text{ °C}$  et conviennent de ce fait aux applications en haute altitude ou dans les régions polaires.

## 2.5.5.6 Applications des silicones dans l'isolation électrique [26]

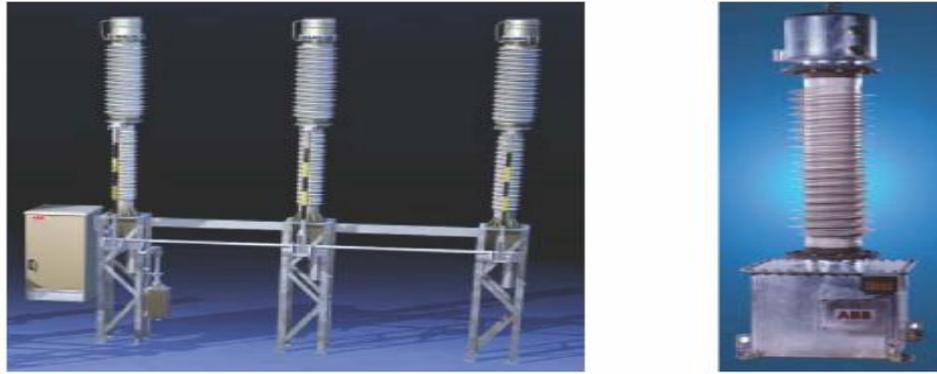
### ➤ Isolation surfacique

Grâce à une excellente hydrophobicité à la surface et à son retour suite à des décharges couronnes qui occasionnent un comportement hydrophile. Les élastomères du fait de leur flexibilité silicones sont largement utilisés dans l'isolation extérieure depuis une dizaine d'années. Les figures 2.7 et 2.8 présentent quelques exemples d'utilisation de l'élastomère silicone pour l'isolation électrique haute tension.



**Fig. 2. 7:** a) Isolateur silicone                      b) Traversée avec un revêtement silicone

On les trouve dans des isolateurs et des traversées (Fig. 2. 7) mais également dans des disjoncteurs et des transformateurs de mesure (Fig. 2. 8).

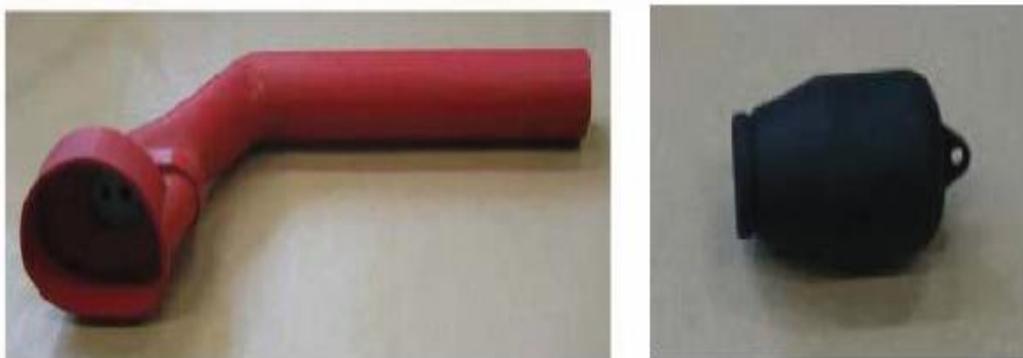


**Fig. 2. 8:** a) Disjoncteur avec un revêtement silicone b) Transformateur avec revêtement en silicone

### ➤ Isolation volumique

Ces dernières années, on a pu constater que les élastomères silicones étaient de plus en plus utilisés dans l'isolation volumique moyenne et haute tension comme par exemple dans les câbles ou les terminaisons des câbles et les barres d'alternateurs qui doivent résister aux températures élevées. Cependant, les contraintes mécaniques limitent souvent la tension à 6 kilovolts pour les générateurs et les câbles moyenne tension.

Les figures 2. 9 et 2. 10 présentent quelques prototypes et produits d'élastomères silicones utilisés dans l'isolation volumique moyenne tension. Ils sont utilisés comme isolants dans des jeux de barres à moyenne tension (fig. 2. 9a) ou des connexions souples (fig. 2. 10).



**Fig. 2. 9 a)** Prototype d'isolation moyenne tension d'un jeu de barres; **b)** Bouchon d'isolation volumique moyenne tension



**Fig. 2. 10** a) Prototype de l'isolation d'une connexion moyenne tension souple en bout de câble; b) Prototype de l'isolation d'une connexion moyenne tension souple

### 2.5.5.7 Avantage du revêtement en silicone des isolateurs

#### ➤ Plus grande sécurité de fonctionnement

Grace à l'excellente hydrophobicité des silicones, les courants de cheminement sont faibles, de l'ordre de quelques microampères, ce qui évite les décharges, même si la surface est fortement polluée ou humide.

#### ➤ Traitement des installations existantes

L'application d'un revêtement en silicone est une solution économique, permettant de revêtir les isolateurs en porcelaine, en verre ou en résine époxy d'une enveloppe hydrophobe. Le nettoyage périodique, voire le remplacement des isolateurs ne sont plus nécessaires.

#### ➤ Plus longue durée de vie

Le revêtement en silicone augmente la longévité des isolateurs existants et contribue à la gestion responsable des ressources. L'expérience a montré qu'il prolongeait la durée de vie des isolateurs de dix ans de plus.

## 2.6 Conclusion

Nous avons choisi ce matériau en silicone pour notre étude grâce aux nombreuses propriétés que présentent les silicones tel que une bonne stabilité thermique (entre  $-80\text{ °C}$  et

250 °C), de très bonnes propriétés hydrophobes, une bonne tenue au feu sans dégagement toxique, des propriétés d'anti-adhérence ou au contraire d'adhésion (suivant l'application souhaitée), une très grande innocuité et une très bonne inertie chimique. L'attractivité de ces propriétés couplée à la possibilité de disposer de produits silicones sous différentes formes (huiles, résines, élastomères, gels...).

# **Chapitre 03**

## **POLLUTION DES ISOLATEURS HAUTE TENSION**

### 3.1 Introduction

Les lignes aériennes de transport et de distribution de l'énergie électrique sont exposées à diverses contraintes. Parmi celles-ci, la pollution des isolateurs constitue l'un des facteurs de première importance dans la qualité et la fiabilité du transport d'énergie. En effet, par temps de pluie ou de brouillard, les dépôts polluants se fixant sur les surfaces isolantes réduisent considérablement la résistivité superficielle et le contournement peut parfois survenir.

L'humidification de la couche polluante facilite en fait, la dissolution des sels et la formation d'une couche électrolytique. Cette dernière engendre la naissance d'un courant de fuite, qui par effet joule, provoque des échauffements locaux et par la suite l'assèchement de la couche de pollution. La répartition du potentiel entre électrode est alors changée. Ainsi, une partie importante de la tension appliquée se trouve rapportée sur la bande sèche engendrant, si le champ local dépasse un certain seuil, un claquage diélectrique et l'établissement d'une décharge électrique. Dans certaines conditions, cette décharge peut s'allonger jusqu'à provoquer le contournement total de l'isolateur. Les conséquences du contournement vont de la détérioration de la surface de l'isolateur à la mise hors service de la ligne haute tension. Une des caractéristiques principales d'un isolateur de haute tension sera donc sa tenue au contournement en fonction de l'environnement dans lequel il est placé.

### 3.2 Définitions

#### 3.2.1 Pollution des isolateurs

La pollution des isolateurs constitue un problème majeur dans la dégradation de l'isolement des ouvrages (postes et lignes) de haute tension [27]. Portés par le vent et déposés sur la surface isolante des chaînes des isolateurs, et en présence d'humidité, les divers dépôts polluants deviennent plus ou moins conducteurs. Ce qui engendre une diminution conséquente de la tension de tenue des isolateurs. Des arcs électriques prennent naissance à la surface isolante et peuvent éventuellement, se développer en provoquant le contournement total des isolateurs.

#### 3.2.2 Salinité

La salinité est définie comme la concentration du sel dans l'eau. Elle correspond à la masse de sel divisée par le volume de la solution, généralement exprimée en  $\text{kg/m}^3$ .

### 3.2.3 Couche de pollution

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

### 3.2.4 Degré de pollution

C'est la valeur qui caractérise la pollution telle que la salinité, la conductivité de la couche et la densité de dépôt de sel. [28].

## 3.3 Formation et la répartition de la couche de pollution [29]

La formation et la répartition de la couche de pollution sur la surface des isolateurs dépend 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.

### 3.3.1 Non-uniformité longitudinale par groupe

Elle est caractérisée par un ensemble de groupes d'isolateurs, soumis à différentes conductivités de la couche de pollution, dont la valeur est constante dans chaque groupe.

Nous retrouvons ce type de pollution dans les cas suivants:

- temporairement pendant le lavage sous tension,
- dans les chaînes d'isolateurs en forme de «T»,
- par effet du champ électrique où la concentration de la pollution est accentuée sur les isolateurs les plus proches de la borne haute tension.

### 3.3.2 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.

### 3.3.3 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. Ces 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.

## 3.4 Sources de pollution

### 3.4.1 Pollution naturelle

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

#### 3.4.1.1 Pollution marine

Cette pollution caractérise les ouvrages en bordures de mer et peut s'étaler jusqu'à plusieurs dizaines de kilomètres du littoral vers l'intérieur. Les embruns marins portés par le vent se déposent sur la surface des isolateurs et se cristallisent à plus ou moins longue échéance. La particularité de cette pollution est qu'elle est exclusivement constituée de sels ioniques, notamment le NaCl, et de peu de matières insolubles dont la densité équivalente ne dépasse pas les  $0,1 \text{ mg/cm}^2$  de surface de l'isolateur [30]

#### 3.4.1.2 Pollution désertique

Par pollution désertique nous entendons la pollution propre aux climats désertiques, c'est-à-dire des régions où règne une faible pluviométrie et où l'humidification se fait par

condensation. L'accumulation de la pollution se fait à la suite d'une interaction entre l'écoulement d'un air riche en poussière et l'obstacle formé par l'isolateur [31]. Le résultat final est l'obtention d'une couche de pollution dont la caractéristique essentielle sa richesse en sels et en matière insolubles. Il est à noter que le NaCl n'est pas le sel dominant et que la densité équivalente des insolubles atteint parfait les  $0,5 \text{ mg/cm}^2$ . Cette pollution concerne les régions désertiques et les régions à proximité des carrières.

#### **3.4.1.3 Poussières du sol et zones agricoles**

Les poussières du sol constituent des agents de pollution dans les régions manquant de végétation [32] où le sol a subi un dessèchement de sa couche superficielle suite à une longue période sèche. On ajoutera à cela que l'utilisation d'engrais par pulvérisation ou le labourage des terres conduit lui aussi à la constitution d'une couche de pollution fortement conductrice [33].

#### **3.4.2 Pollution industrielle**

Ce type de pollution est peu étendu et ce concentre dans des points particuliers, n'intéressant que quelques pylônes. Il dépend étroitement de l'industrie (usines métallurgiques, chimiques, des centrales électriques et des complexes pétrochimiques, etc.) le dépôt de pollution peut se constituer par la fixation de particules solides telles que les dépôts ferromagnétique issus des usine métallurgiques et l'absorption de gaz présent dans les fumées par la couche liquide [32, 34].

#### **3.4.3 Pollution domestique**

Cette pollution est due aux fumées et au gaz échappant des appareils des habitations et les moyens de transport.

On note que la pollution est généralement mixte; elle résulte de la combinaison de plusieurs sources [35].

#### **3.4.4 Pollution mixte**

Elle est très localisée et peu étendue. Elle se présente comme la combinaison d'au moins deux types de pollution, par exemple un centre industriel situé en bord de mer.

### **3.5 Impact de la pollution**

Les couches polluantes qui s'accumulent à la surface des isolateurs engendrent une conductivité électrique superficielle. Celle-ci modifie la répartition du potentiel le long de la

ligne de fuite. La tension de 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.

### 3.5.1 Arc non localisé

L'arc électrique s'éteint rapidement, puis se réamorçe 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.

### 3.5.2 Arc fixe

L'arc électrique se fixe sur la surface, soit en s'y maintenant (source continue), soit en se réamorçant au même endroit (source alternative). L'impédance de dépôt et celle de la surface de l'isolateur étant en série avec l'arc, limitent le courant de l'arc et sa longueur. Si le courant est trop faible, l'arc s'éteindra. Généralement ce type d'arc entraîne par effet thermique une dégradation du support isolant nécessitant le remplacement de l'élément défaillant.

## 3.6 Contournement des isolateurs pollué

Généralement, les principaux phénomènes conduisant au contournement d'un isolateur pollué, soumis à la tension de service, comprenant la formation d'une couche électrolytique conductrice par humidification du dépôt de pollution sur la surface de l'isolateur, ce qui entraîne l'apparition d'un courant de fuite accompagné de la formation d'une bande sèche et d'arcs partiels, et la propagation de l'arc qui peut couvrir tout l'isolateur.

Le contournement des isolateurs pollués est accompli selon les phases suivantes:

- **Phase 1:** création et écoulement d'un courant de fuite à travers la couche électrolytique qui recouvre l'isolant. Ce courant provoque un échauffement de l'électrolyte, qui a pour effet d'accroître la conductivité du milieu. Cela conduit à l'augmentation du courant de fuite. Le niveau du courant de fuite dépend du temps, de la nature et de la quantité des polluants
- **Phase 2:** la température s'élève par effet joule, ce qui provoque un assèchement local de la couche polluante et une diminution du courant de fuite.
- **Phase 3:** la tension se trouve reportée aux bornes de la bande sèche et des arcs locaux sont susceptibles de s'amorcer, élargissant ainsi la zone sèche.

- **Phase 4:** à partir de ce stade, l'arc s'allonge longitudinalement jusqu'à atteindre les électrodes et provoquer ainsi le contournement. L'existence de ces phases dépend de nombreux paramètres caractéristiques de l'isolateur pollué: tension appliquée, conductivité de la couche, largeur de la zone sèche, profil de l'isolateur, longueur de fuite...

### 3.7 Sévérité de pollution d'un site

Le dimensionnement de l'isolation externe vis-à-vis de la pollution pose un certain nombre de problèmes spécifiques. L'un des plus fondamentaux est la détermination de la sévérité de la pollution là ou l'isolation doit être installée [36].

La mesure de cette sévérité est indispensable pour assurer un service sans défaillance dans un site pollué.

### 3.8 Mesure de la sévérité de pollution d'un site

Dans ce qui suit, nous passerons en revue différentes méthodes de mesure largement employées, basées sur des théories et des données expérimentales, dont certaines sont encore controversées [36]. Dans ce cas, les principales méthodes qui ont été proposées pour mesurer la sévérité d'un site sont :

#### 3.8.1 Densité du dépôt de sel équivalent (DDSE)

La densité de dépôt de sel équivalent DDSE est le dépôt équivalent exprimé en mg de NaCl par  $\text{cm}^2$  de la surface de l'isolateur, et qui a une conductivité électrique égale à celle du dépôt réel lorsqu'il est dissout dans la même quantité d'eau déminéralisée ou distillée [30, 37, 38].

Cette méthode consiste à exposer des isolateurs de différentes formes, disposés en chaîne verticale ou en une autre position définie, sous tension ou hors tension, à une hauteur suffisante. Des échantillons de pollution sont prélevés à la surface d'isolateur. Pratiquement on utilise la surface totale d'un élément ou séparément le haut et le bas, mais les équipements métalliques et les ciments sont exclus. Le dépôt est récupéré par le lavage en utilisant un matériau absorbant tel que le coton, un mouchoir en papier, une éponge ou une brosse et de l'eau déminéralisée. A partir de la conductivité de la solution obtenue, de la surface d'isolateur, du volume d'eau et de sa température, on peut calculer la DDSE.

### 3.8.2 Conductance superficielle

La conductance superficielle des isolateurs témoins, installés sur site, est obtenue à partir du rapport du courant électrique qui traverse l'isolateur, à la tension d'alimentation de l'isolateur témoin (tension de service)  $G = I/V$ . La conductivité superficielle est obtenue en multipliant la conductance  $G$  par un facteur de forme de l'isolateur [39].

Cette méthode est donc 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 mesure de la conductance superficielle est une méthode satisfaisante pour évaluer la sévérité de la pollution d'un site. Elle peut être représentative d'un type de site étudié, mais en général elle présente des résultats dispersés [40, 35].

### 3.8.3 Mesure optique

Dans le but de déterminer l'épaisseur de la couche polluante disposée sur la surface de l'isolateur, un dispositif à rayon laser permet à partir de rayons réfléchis (amplitude, décalage de phase, etc.) de calculer la constante diélectrique et l'épaisseur de la couche [40]. La mesure de sévérité de la pollution peut ainsi se faire sans toucher à cette couche.

### 3.8.4 Mesure de la pollution de l'air

Les mesures de la pollution de l'air s'effectuent 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 physicochimique de l'air d'un site donné et la sévérité de la pollution de ce même site [41, 42].

### 3.8.5 Densité du dépôt non soluble (DDNS)

Elle correspond à la quantité de dépôts polluants non solubles présents dans une couche de pollution. Elle s'exprime en  $\text{mg}/\text{cm}^2$ .

La mesure de la DDNS s'accompagne souvent d'une analyse physico-chimique de la pollution, au terme de laquelle les sources polluantes peuvent être identifiées [45].

### 3.9 Classification des sites pollués

Pour définir l'isolement des lignes de transport et d'établir la corrélation entre la salinité et les niveaux de pollution naturelle, quatre classes de sévérité ont été définies selon la norme CEI 81-5 qui sont : faible, moyenne, forte et très forte [46, 47].

➤ **Faible (0.06 mg/cm<sup>2</sup>)**

- Zones sans industries et avec faible densité d'habitations équipées d'installation de chauffage
- Zones avec faible densité d'industries ou d'habitations mais soumise fréquemment aux vents et/ou pluies.
- Régions agricoles.
- Régions montagneuses.

➤ **Moyenne (0.20 mg/cm<sup>2</sup>)**

- Zones avec industries ne produisant pas de fumées particulièrement polluantes et/ou avec une densité moyenne d'habitation équipée d'installation de chauffage.
- Zones à forte densité d'habitation et/ou d'industries mais soumises fréquemment à des chutes de pluies.
- Zones exposées aux vents de mer, mais trop proches de la cote.

➤ **Forte (0.60 mg/cm<sup>2</sup>)**

- Zones avec forte densité d'industries et banlieues de grandes villes avec forte densité d'installation de chauffage polluantes.
- Zones situées près de la mer, ou en tout cas exposées à des vents relativement forts venant de la mer.

➤ **Très forte (> 0.60 mg/cm<sup>2</sup>)**

- Zones généralement peu étendues, soumises à des fumées industrielles produisant des poussières conductrices.
- Zones généralement peu étendues, très proches de la cote et exposées aux embruns ou au vent fort et polluant venant de la mer.
- Zones désertiques caractérisées par de longues périodes sans pluie, exposées aux vents forts transportant de sable et du sel soumis à une condensation régulière.

### 3.10 Influence des facteurs climatiques sur les isolateurs pollués

La tenue électrique d'isolateurs dépend de plusieurs facteurs météorologiques et parmi eux on distingue:

➤ **Le vent**

Généralement les particules de pollution sont apportées par le vent, le régime laminaire de ce dernier est perturbé par la présence de l'isolateur. De ce fait, un régime turbulent apparaîtra au niveau des nervures de l'isolateur. Le résultat final est que les particules de pollution auront tendances à s'accumuler et se concentrer entre ces nervures. Ce processus est continu et n'est modifié que par la pluie et la violence du vent. Toutefois, un régime d'équilibre est atteint au bout d'une certaine période et qui correspond à la saturation de la couche contaminante.

➤ **La pluie**

Les fortes pluies permettent en général le nettoyage des surfaces polluées des isolateurs, cependant, les fines pluies peuvent mouiller les surfaces polluées, ce qui augmente le risque de contournement [27].

➤ **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 [49].

➤ **La température**

Contrairement à l'humidité, l'élévation de la température favorise l'assèchement des dépôts polluants, ce qui fait augmenter leur résistivité et par conséquent la tenue des isolateurs contaminés devienne plus importante. 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.

### 3.11 Méthodes d'essais sous pollution

Afin de comparer les performances de divers types d'isolateurs et de sélectionner ceux qui présentent le meilleur comportement sous pollution, 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 [41].

### **3.11.1 Essai sous pollution naturelle**

Ces essais consistent à installer dans différents sites pollués, des stations dans lesquelles on suit le comportement d'un certain nombre de chaînes d'isolateurs. Comme la pollution naturelle est un phénomène à évolution lent, l'essai sous pollution naturelle peut prendre jusqu'à deux ans ou trois ans. La qualité d'isolement des isolateurs placés sous la même tension est déterminée en fonction de temps au contournement.

La diversité de la nature des agents polluants impose ce type d'essais pour étudier séparément les principales sources de pollution et leurs impacts sur l'isolement des ouvrages.

Cependant, l'inconvénient majeur de ces essais est la durée des expériences qui est relativement longue. C'est pourquoi des méthodes de laboratoire furent proposées et sont largement utilisées [41].

### **3.11.2 Essais sous pollution artificielle**

Les essais au laboratoire sont basés sur la reproduction de la couche de pollution par des solutions réparties à la surface de l'isolateur et dont la conductivité peut être modifiée.

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 de pollution. 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 de laboratoire susceptible de fournir des résultats reproductibles, afin de faciliter la comparaison des performances des différents types d'isolateurs [41, 42].

#### **3.11.2.1 Méthode des couches solides [43, 38]**

L'isolateur est nettoyé puis enduit d'une solution à base de sel, d'eau et d'un absorbant inerte à base de kieselguhr ou de tonoko ou de kaolin. Le mélange est appliqué puis l'ensemble est séché. L'essai consiste à humidifier le dépôt au moyen d'un brouillard propre pendant 15 à 20 minutes pour obtenir la conductivité maximale. La tension peut être appliquée avant ou après l'humidification. Le critère de l'essai est la tension tenue calculée

sur 3 de 5 essais en Up and Down. Cette méthode représente assez bien la pollution industrielle avec une couche épaisse.

### **3.11.2.2 Méthode du brouillard salin [38, 43]**

Après un nettoyage, l'isolateur est soumis à un brouillard d'eau salée. Ce dernier est produit par deux rangées de pulvérisateurs ; la première délivre l'eau salée et la deuxième atomise et disperse la solution sur l'isolateur. Cette méthode n'utilise aucun agent liant contrairement aux autres. La tension est appliquée dès le début de l'essai et le critère d'essai est la salinité maximale tenue pour 3 essais au moins sur 4. Cette méthode simule bien la pollution marine et la pollution industrielle avec peu de matière insolubles.

### **3.11.2.3 Méthode de brouillard tenu [38, 43]**

La couche de pollution est appliquée de la même façon que pour la couche solide. L'isolateur est humidifié indirectement par pulvérisation créant ainsi une atmosphère humidifiée simulant un brouillard. La tension est appliquée dès le début de l'humidification. La grandeur mesurée est la tension tenue maximale pour 4 essais sans contournement en Up and Down. Cette méthode a pût simuler les pires situations de pollution au Japon.

## **3.12 Techniques de lutte contre la pollution**

Pour un niveau de pollution donné, une bonne conception des lignes basée sur des mesures de sévérité de pollution permet de prévenir, autant que possible, les incidents lorsque la ligne est en service. Mais un changement dans les données d'un site est toujours possible, c'est-à-dire même un dimensionnement initialement correct peut s'avérer insuffisant dans certaines conditions [36]. Les différentes méthodes utilisées consistent à :

### **3.12.1 Allongement de la ligne de fuite**

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

- Le changement de type d'isolateurs (pour allonger la ligne de fuite) : c'est une opération très coûteuse et souvent impossible à réaliser en poste.
- L'utilisation de prolongateurs de ligne de fuite en matériaux polymères, qui sont collés sur la surface des isolateurs existants [39, 44].

### **3.12.2 Utilisation des isolateurs plats (auto-nettoyables)**

L'utilisation d'isolateurs plats conduit à la diminution de la ligne de fuite des isolateurs. En effet, ces derniers sans nervures ont la propriété d'accumuler moins de pollution que les isolateurs traditionnels et s'auto nettoient très bien sous l'effet du vent. Ils sont principalement utilisés dans les régions désertiques [45].

### **3.12.3 Graissage des isolateurs (couches hydrophobes)**

Grâce à ses propriétés hydrophobes, le graissage protège temporairement les isolateurs. La longévité du graissage dépend à la fois de l'environnement (pollution, conditions climatiques) et de la qualité intrinsèque du produit. Elle est généralement comprise entre 1 et 4 ans. Le graissage est largement utilisé dans le monde, mais l'opération de nettoyage puis de graissage est pénible, longue et coûteuse. Elle nécessite, par ailleurs, une interruption de service [36].

### **3.12.4 Revêtements à base de silicones**

Cette méthode consiste à appliquer, par pulvérisation ou au pinceau, un caoutchouc silicone qui se vulcanise à température ambiante à la surface des isolateurs. Comme pour le graissage, grâce à ses propriétés hydrophobes, ce revêtement protège et améliore leur tenue sous pollution. Par contre sa longévité est, en général, nettement supérieure à celle du graissage [44].

### **3.12.5 Nettoyages sous ou hors tension**

Le nettoyage manuel (essuyage à sec de l'isolateur) ou le lavage hors tension, peuvent être utilisés de façon périodique, en particulier dans les postes. Comme ces méthodes sont utilisées hors tension, elles entraînent nécessairement des interruptions de service parfois assez longues.

Le lavage sous tension permet d'éviter ces coupures. Dans son principe, ce type de lavage permet de garder propre l'isolateur. Ce dernier est réalisé à l'aide d'installations fixes ou mobiles. Dans ces cas, il est effectué selon des règles strictes concernant la qualité de l'eau de lavage, le processus de lavage et les distances de sécurité à respecter afin d'éliminer tout risque de contournement pendant le lavage.

Le nettoyage des isolateurs à l'aide d'un abrasif pulvérisé sous pression est une technique utilisée dans certains pays (Amérique du Nord en particulier). Cette technique

permet le nettoyage d'isolateurs recouverts de pollution très adhérente (ciment, par exemple) et peut être utilisée pour dégraisser les isolateurs [14].

### **3.12.6 Les isolateurs composites**

Ces isolateurs présentent l'avantage d'une grande légèreté, une haute résistance mécanique et de bonnes propriétés hydrophobes et peuvent être utilisés dans des conditions de pollutions très sévères. Cependant, ces isolateurs, revêtus d'un polymère, voient leurs caractéristiques changer au cours du temps. Ils peuvent vieillir sous l'effet des différentes contraintes (électriques et climatiques) auxquelles ils sont soumis en service.

### **3.13 Conclusion**

Le comportement des isolateurs des lignes aériennes, et l'isolement externe d'une manière générale, est souvent affecté par le phénomène du contournement dû à la pollution atmosphérique. L'optimisation de l'isolement devient donc un point très important en vue de réduire les pertes occasionnées par le contournement.

Pour mieux dimensionner les chaînes d'isolateurs, il est indispensable de connaître la sévérité de la pollution des sites concernés. La connaissance de cette sévérité consiste à étudier les différents paramètres qui définissent l'état de dégradation de l'isolation. Il n'en demeure pas moins que trois années sont au minimum nécessaires pour déterminer la sévérité d'un site.

La méthode d'essai sous pollution artificielle est largement utilisée. Elle consiste à reproduire au laboratoire les conditions de la pollution naturelle, ainsi qu'elle possède l'avantage d'être rapide.

**Chapitre 04**

**PARTIE**

**EXPERIMENTALE**

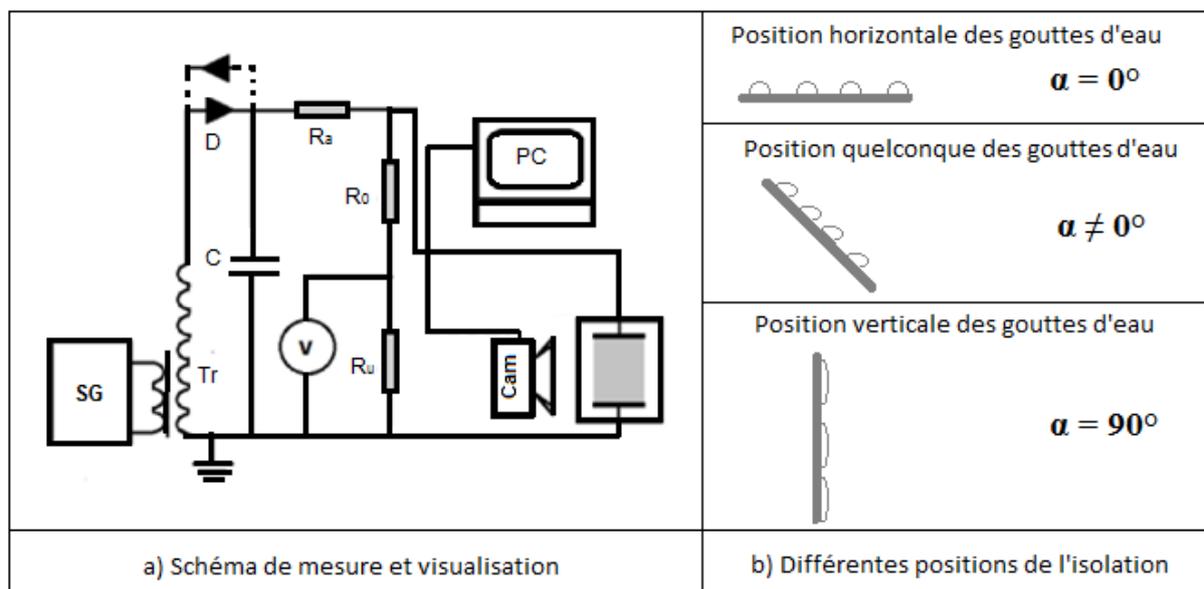
## 4.1 Introduction

Dans le but de déterminer expérimentalement l'effet du mode de disposition de gouttes d'eau sur une surface en silicone hydrophobe inclinée sur sa performance électrique sous tension continue. Nous avons effectué de nombreux essais sur des échantillons réels en silicones. Cela en gardant la distance interélectrode fixe et égale à 6 cm et en variant la polarité de la tension continue, le volume des gouttes d'eau et le nombre de rangées des gouttelettes d'eau sur la surface étudiée, ainsi que l'inclinaison de cette dernière par rapport à l'horizontale.

Ces essais concernent la mesure de la tension de contournement et la visualisation du développement de l'arc électrique évoluant sur les gouttes d'eau déposées sur la surface des échantillons en silicones.

## 4.2 Dispositif expérimental

### 4.2.1 Circuits de mesure de tension et de visualisation de la décharge



**Fig. 4. 1:** Schéma de mesure et de visualisation

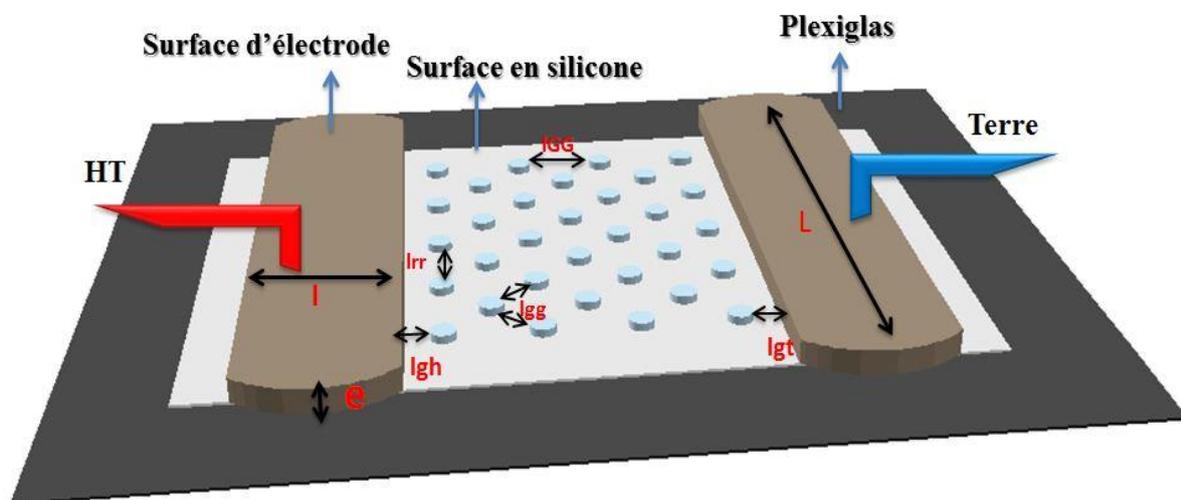
Le dispositif expérimental utilisé est représenté sur la figure 4. 1 (laboratoire de haute tension, de l'université Abderrahmane Mira de Bejaia). Il permet de réaliser simultanément des mesures électriques et vidéo graphiques. Il est constitué d'un transformateur (T100) 0.08 A/135 kV commandé automatiquement ou manuellement par un appareil (SG), d'une diode

haute tension (G270), d'une capacité de lissage 10 nF, d'une résistance haute tension de limitation de courant  $R_a = 106 \text{ k}\Omega$ , d'une résistance haute tension du diviseur résistif  $R_0 = 250 \text{ M}\Omega$ , d'un voltmètre de crête d'une résistance d'entrée  $R_\mu = 4.24 \text{ M}\Omega$ , et d'un échantillon en silicone comme objet d'essai, avec un angle d'inclinaison de la surface d'échantillon ( $\alpha^\circ$ ). La décharge est visualisée par un caméscope numérique (Cam).

En outre, nous disposons d'un baromètre, d'un thermomètre et d'un hygromètre à cheveux pour la mesure des paramètres physiques de l'air ambiant.

#### 4.2.2 Modèle expérimental

Le modèle expérimental utilisé est représenté sur la figure 4. 2. Il est constitué d'un échantillon en silicone sur lequel reposent deux électrodes planes identiques à ses extrémités, l'une est reliée à la terre et l'autre est mise sous haute tension. Les électrodes planes sont en acier de 2 cm de largeur et 13.5 cm de longueur, l'échantillon en silicone est de forme carrée de 10 cm de largeur et de 3 mm d'épaisseur. L'emplacement des gouttes d'eau sur la surface de l'échantillon est tel que la distance entre les gouttes ou entre les gouttes et les électrodes peut être variée.



**Fig. 4. 2:** Caractéristiques de l'isolation avec gouttes d'eau

$lgh$  : Distance entre la goutte et l'électrode HT;

$lgt$  : Distance entre la goutte et l'électrode terre;

$lgg$  : Distance entre les gouttes en diagonale;

$l_{GG}$  : Distance entre les gouttes en ligne droite;

$l_{rr}$  : Distance entre deux rangées de gouttes d'eau sur la largeur de l'isolation;

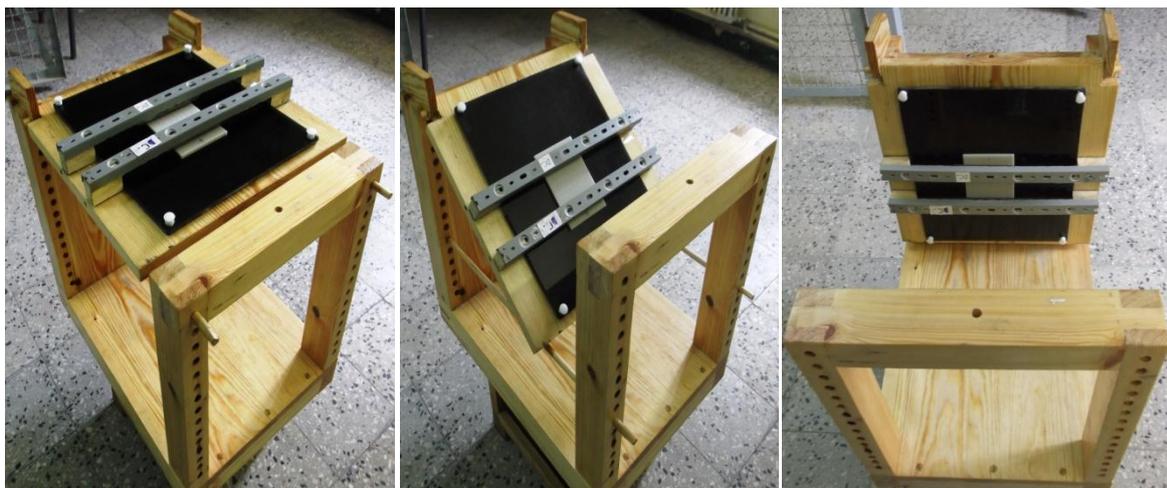
$e$ : Epaisseur de l'électrode;

$L$ : Longueur de l'électrode;

$l$ : Largeur de l'électrode.

Ce modèle est posé sur une plaque en plexiglas carrée de 30 cm de côté et 1 cm d'épaisseur. Cet ensemble est déposé sur un support en bois cubique, de 75 cm de longueur, 40 cm de largeur et 48 cm de hauteur. L'inclinaison par rapport à l'horizontale de la surface isolante est assurée par les guides en bois troués sur les deux côtés du dispositif (Fig. 4. 3). Le support repose sur une table en bois mise à la terre et située à 50 cm du sol.

La paroi supportant l'isolation, représentée en figure 4. 3, peut être orientée très aisément en variant son angle de  $0^\circ$ (a),  $\alpha$  quelconque (b), jusqu'à  $90^\circ$ (c).



a) Position horizontale

b) Position oblique

c) Position verticale

**Fig. 4. 1:** Différentes positions de l'isolation

### 4.3 Pollution d'une surface isolante

La solution polluante est composée d'un mélange d'eau distillée, selon la conductivité volumique souhaitée, auquel on ajoute de petites quantités de sel. Ainsi nous fixons la conductivité de la solution ionique à la valeur désirée, grâce à un conductimètre à sonde mobile (Fig. 4. 4).



**Fig. 4. 4:** Conductimètre (appareil de mesure de conductivité volumique)

#### 4.4 Procédé d'essai

La tension continue a été appliquée après la préparation de notre matériau isolant qui a été mis dans un dessiccateur pour limiter l'effet de l'humidité, et lui faire récupérer son hydrophobicité. Avant et après chaque essai le matériau en silicone doit être bien nettoyé à l'aide du papier mouchoir. Le dépôt des gouttelettes d'eau est assuré au moyen d'une seringue graduée. Le point d'application de chaque goutte d'eau sur la surface du matériau est repéré à l'aide d'une teinte bleu isolante.

Afin d'avoir une bonne répétitivité des résultats, 12 essais ont été réalisés sur 12 échantillons différents en silicone, pour chaque paramètre d'influence et la valeur retenue est la moyenne arithmétique de ces mesures. Après chaque série réalisée, les échantillons doivent être mis au repos pendant plus de quatre heures pour permettre à l'isolation de récupérer son hydrophobicité.

#### 4.5 Dessiccateur

Un dessiccateur désigne un équipement servant à protéger des échantillons en silicone contre l'humidité. Au laboratoire, il est sous forme parallélépipède en verre comme il est montré sur la figure 4. 5. Au préalable, une quantité suffisante de gel de silice de couleur orange est déposée au fond du dessiccateur. Ce gel permet de soutirer l'humidité absorbée par

les films de silicone lors du dépôt des gouttes d'eau sur leur surface après chaque essai. Lorsque le gel de silice change de couleur et devient transparent, il faut le régénérer (Fig.4. 6).



**Fig. 4. 5:** Dessiccateur



**Fig. 4. 6:** Gel de silice (silicagel)

#### 4.6 Correction des résultats suivant les conditions atmosphériques

La tension de contournement des isolateurs électriques de haute tension est strictement liée aux conditions atmosphériques nominales, dont on trouve la température ambiante, la pression et l'humidité de l'air environnant. La valeur de la tension de contournement ramenée aux conditions normales de température  $\theta_0$ , de pression  $P_0$  et d'humidité  $H_0$  ( $\theta_0 = 20\text{ °C}$ ,  $P_0 = 100\text{ kPa}$  et  $H_0 = 11\text{ g/m}^3$ ), est donnée par la relation suivante:

$$U = \frac{Kh}{Kd} \cdot Um$$

$Um$ : Tension de contournement mesurée à la température  $\theta$ , à la pression  $P$  et à l'humidité  $H$ ;

$U$ : Tension de contournement ramenée aux conditions normales de température  $\theta_0$ , de pression  $P_0$  et d'humidité  $H_0$ .

$K_d$ : Facteur de correction relatif à la température et à la pression;

$$K_d = \frac{2,93 \cdot P}{273 + \theta}$$

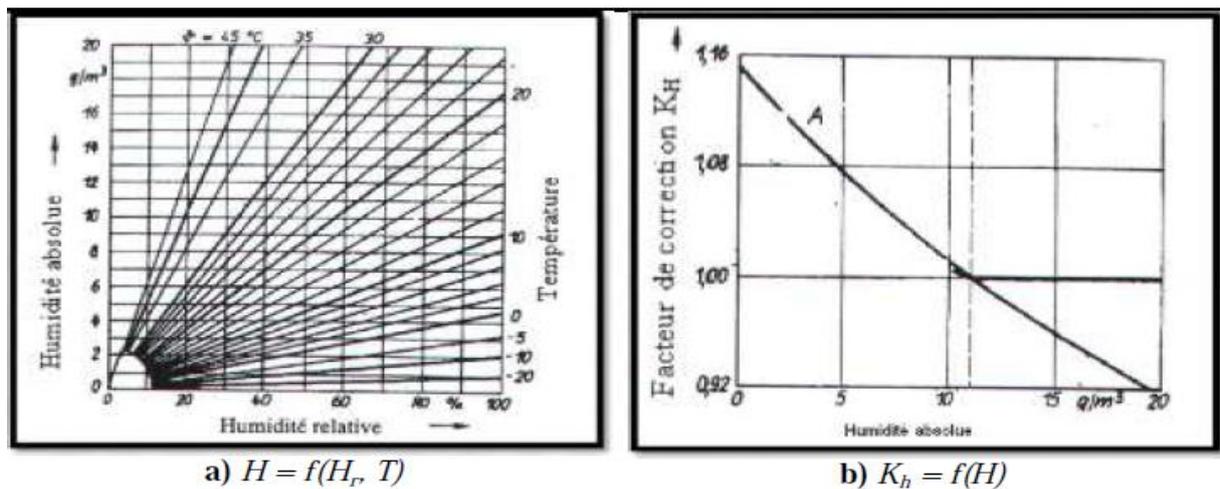
$P$ : Pression en kPa;

$\theta$ : Température en °C

$K_h$ : Facteur de correction relatif à l'humidité;

Pour calculer le facteur de correction  $K_h$  relatif à l'humidité, une transformation de l'humidité relative exprimée en (%) vers l'humidité absolue exprimée en ( $\text{g}/\text{m}^3$ ), est nécessaire, car  $K_h$  est donné en fonction de cette dernière. L'abaque de la figure (4. 7a), donne la transformation de l'humidité relative à l'humidité absolue en fonction de la température.

La valeur de l'humidité absolue lue sur l'abaque de la figure (4. 7a) est reportée sur l'abaque de la figure (4. 7b), pour déduire  $K_h$ .



**Fig. 4. 7:** Facteur de correction  $K_h$

#### 4.7 Exemple de calcul

Soit un système de deux électrodes planes placées sur la surface de l'isolant dont la ligne de fuite est de 6 cm. Pour les conditions de température, de pression et d'humidité suivantes:

$T = 25 \text{ °C}$ ,  $P = 1016 \text{ hPa} = 101.6 \text{ kPa}$ ,  $H_r = 64 \%$ , la tension linéique de contournement mesurée a pour valeur :  $U_m = 29.83 \text{ kV}$ . En utilisant les formules de correction suscitées et les abaques ci-dessus (Fig. 4. 7), nous trouvons:  $K_h = 0,98$ ,  $K_d = 0.9989$  et  $U = 29.26 \text{ kV}$ .

Il en résulte que les valeurs de mesure ramenées aux conditions normales de température, pression et d'humidité sont très peu différentes de celles réalisées sous conditions quelconques. L'écart, obtenu est donc négligé.

## 4.8 Résultats et discussions

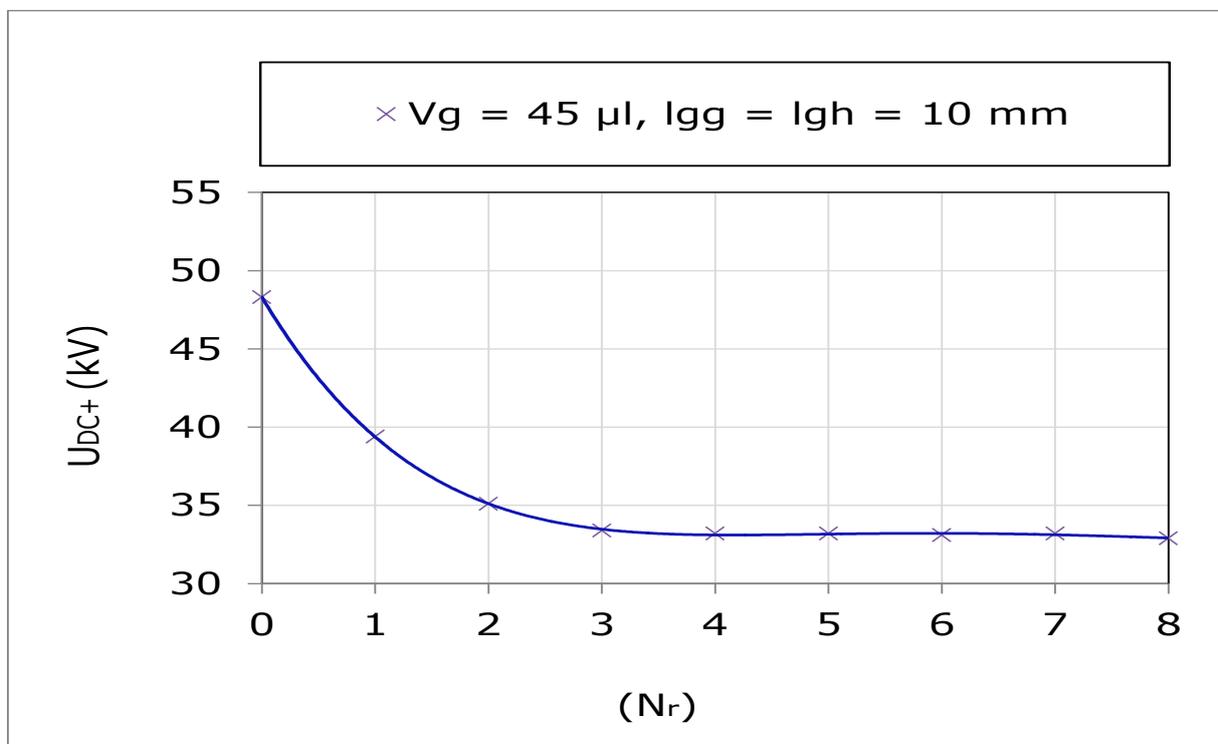
Dans notre travail nous avons étudié l'effet de quelques paramètres sur la tension de contournement de la surface isolante en silicone, lorsque celle-ci est mise sous tension continue à polarité variable. Nous avons varié la position de l'isolation par rapport à l'horizontal, le volume des gouttelettes d'eau recouvrant la surface du matériau délimité par deux électrodes, ainsi que le nombre de rangées de celles-ci.

### 4.8.1 Polarité positive

#### 4.8.1.1 Paramètres d'influence

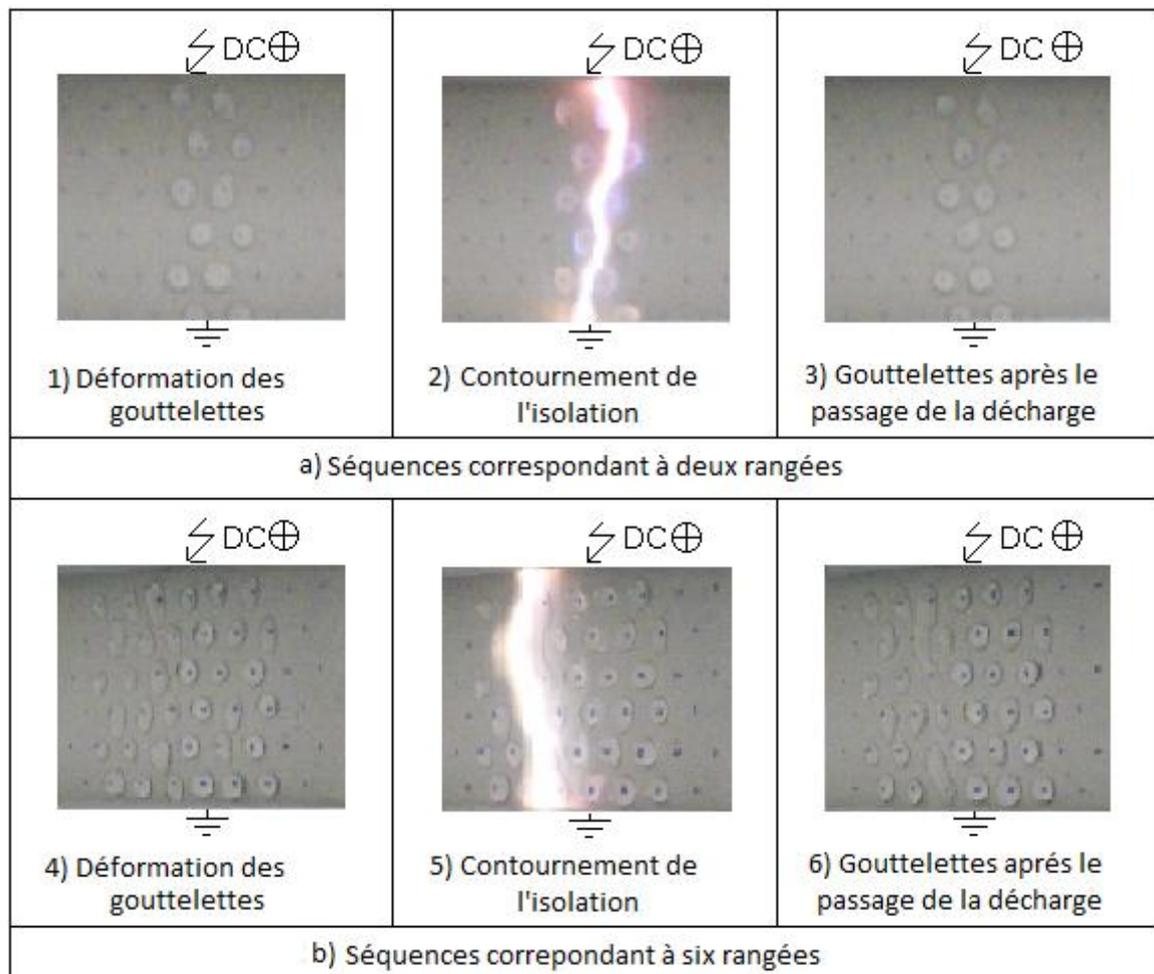
##### a) Nombres de rangées

Afin de voir l'effet de ce paramètre, nous avons varié le nombre de rangées de 0 à 8, en gardant la conductivité à  $\sigma_v = 180 \mu\text{S}/\text{cm}$ , le volume des gouttelettes  $V_g = 45 \mu\text{l}$ , et un angle d'inclinaison  $\alpha$  égal à zéro. Nous avons pris une distance de 1 cm entre deux gouttelettes d'eau adjacentes sur la longueur de la ligne de fuite en diagonal. Les rangées sont ajoutées d'une façon symétrique par rapport à la rangée déposée au milieu du matériau.



**Fig. 4. 8:** Tension de contournement positive d'une isolation en silicone hydrophobe en fonction du nombre de rangées des gouttes d'eau

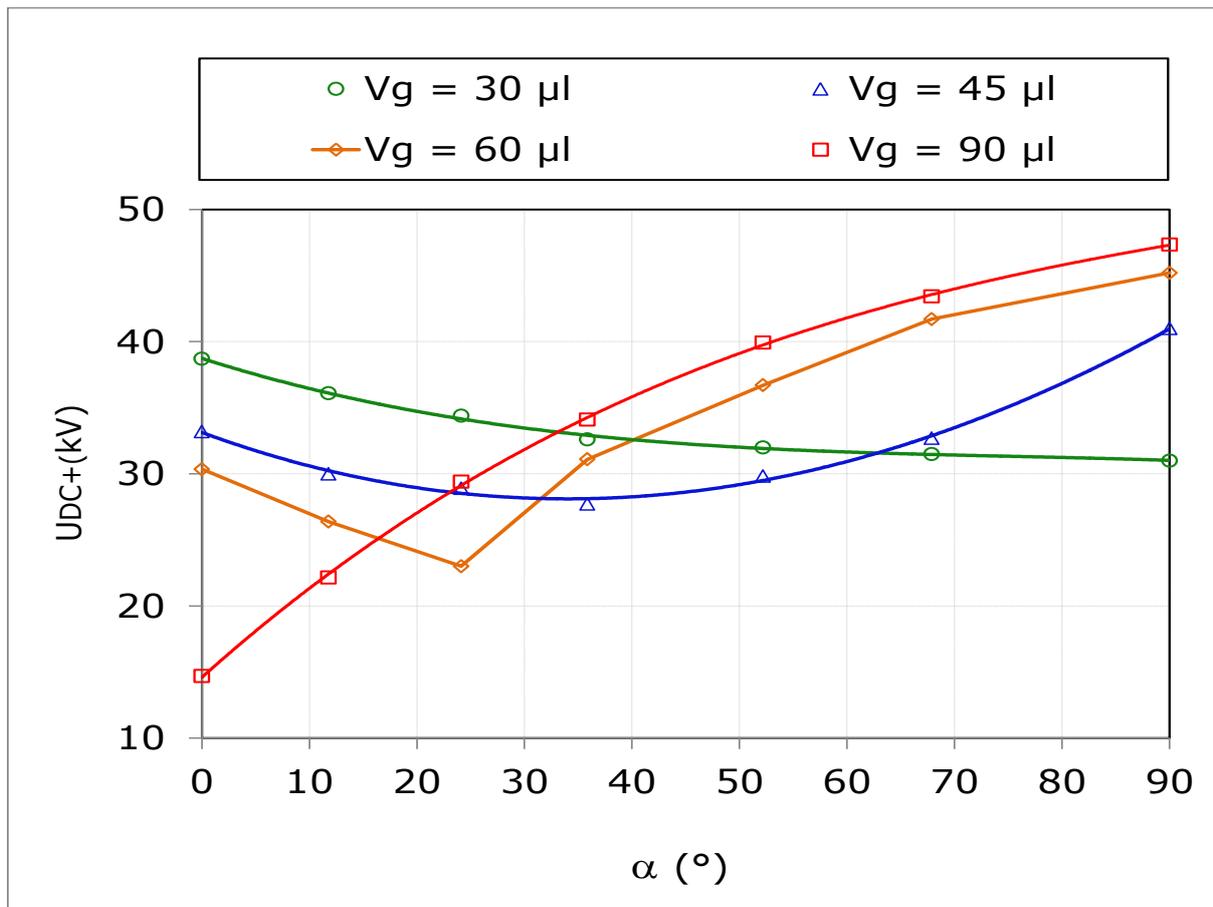
Les résultats des essais effectués sont représentés en figure 4. 8. Il en résulte que la valeur la plus grande de la tension de contournement du matériau est obtenue lorsqu'il est propre. Elle est de l'ordre de 48.3 kV. Nous avons remarqué aussi que l'augmentation du nombre de rangées implique la diminution de la caractéristique de la tension mesurée, jusqu'à une valeur limite à partir de laquelle la tension devienne constante quel que soit le nombre de rangée ajoutées. Cette limite correspond à  $N_r = 4$ . Cela peut être expliqué par le comportement de la décharge électrique, comme il est montré en figure 4. 9. Pour  $N_r = 1, 2$  et 3 nous observons une petite déformation des gouttes. Dans ce cas la décharge passe généralement par la zone sèche (Fig. 4. 9 (a2 et a3)). Cependant, lorsque le nombre de rangées est égal ou bien supérieur à 4, nous remarquons la dilatation des gouttelettes d'eau sous l'effet du champ électrique appliqué au système étudié, de telle sorte nous obtenons un filet d'eau (Fig. 4. 9. b3). Ceci explique le déclin de la valeur de la tension mesurée.



**Fig. 4. 9:** Phases de contournement d'une isolation en silicone hydrophobe ( $\alpha = 0^\circ$ ,  $N_r$  variable)

### b) Angle d'inclinaison de l'isolation et volume des gouttes d'eau

La figure 4. 10 nous renseigne sur l'évolution de la tension de contournement en fonction de l'angle d'inclinaison variable ( $\alpha = 0^\circ, 11.79^\circ, 24.12^\circ, 35.86^\circ, 52.20^\circ, 67.86^\circ, 90^\circ$ ) par rapport à l'horizontal d'une isolation en silicone. Dans cette analyse nous avons utilisé quatre différents volumes (30, 45, 60 et 90  $\mu\text{l}$ ), la valeur de la conductivité volumique  $\sigma_v = 180 \mu\text{S}/\text{cm}$  et le nombre de rangées  $N_r = 5$  restent fixe pendant tous les tests effectués. Chaque rangée contient 6 gouttes d'eau déposées en zigzag.



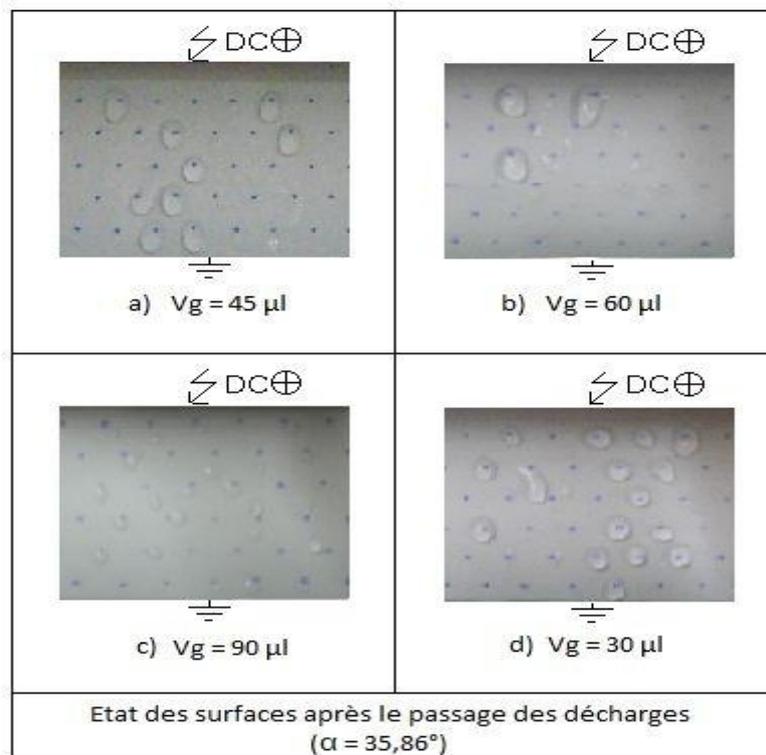
**Fig. 4. 10:** Tension contournement positive d'une isolation en silicone hydrophobe en fonction d'angle d'inclinaison

Dans le cas où le volume est de 30  $\mu\text{l}$ , il est à constater le déclin de la tension de contournement de l'isolation en fonction de l'angle d'inclinaison avec un écart de 17 %, cela peut être expliqué par le faible poids des gouttelettes ne provoquant pas leur décollage. Par contre l'allongement des gouttes provoque un raccourcissement de la ligne de fuite et cela devient maximal pour un angle égal à 90°. Cela peut être justifié par la jonction des petites gouttelettes entre elles. Il est à signaler que la forme des courbes de tension de contournement

correspondant aux volumes 45 et 60  $\mu\text{l}$  est similaire. Il en résulte l'existence d'une valeur minimale de la tension après sa décroissance, cette valeur est de 23 kV pour 60  $\mu\text{l}$  et de 27.72 kV pour un volume de 45  $\mu\text{l}$ . Le minimum de tension de contournement correspond à un angle d'inclinaison critique de  $24^\circ$  dans le cas d'un volume de 60  $\mu\text{l}$  et de  $\alpha_{\text{cr}} = 35^\circ$  pour le volume 45  $\mu\text{l}$ . Ces minimums sont associés à une élancement maximale des gouttes d'eau sous l'action des forces électrique et de gravitation.

De part et d'autres de ces valeurs minimales, nous observons l'augmentation de la tension de contournement, avec l'élévation de l'angle d'inclinaison, puisque dans ce cas de figure les gouttes d'eau s'étendent et laissent derrière elles des petites gouttes.

Il est à souligner également, l'existence d'un point d'intersection entre les deux courbes pour  $V_g = 45$  et 60  $\mu\text{l}$  avec celle obtenue pour  $V_g = 30$   $\mu\text{l}$ . Ces deux points d'intersection sous entendent que les rejets laissés par les gouttes d'eau à volume égal à 45  $\mu\text{l}$  ou 60  $\mu\text{l}$  sont pratiquement de même taille que les gouttes 30  $\mu\text{l}$  (Fig. 4. 11). Ceci explique l'équivalence de performance de l'isolation dans ces deux cas de figures.

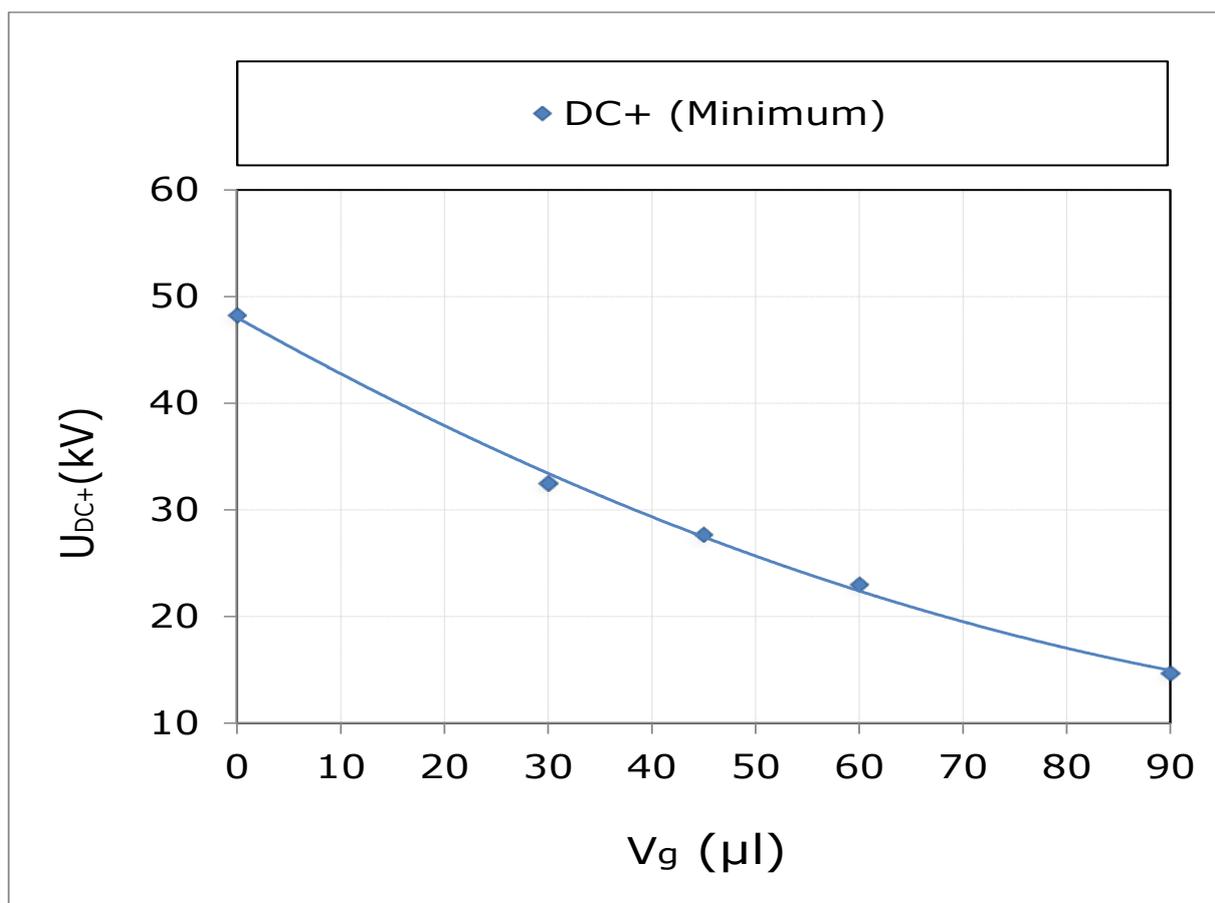


**Fig. 4. 11:** Forme des gouttes d'eau à différents volumes sur la surface du matériau

Contrairement à l'influence des volumes cités auparavant, pour un volume de 90  $\mu\text{l}$ , il est à remarquer l'accroissement de la tension de contournement en fonction de l'augmentation

d'angle d'inclinaison. La plus faible valeur est estimée à 14.7 kV, celle-ci est obtenue pour un angle horizontal de l'échantillon étudié. Néanmoins, la valeur maximale est mesurée pour l'angle de 90 °, puisque la performance de l'isolation est plus grande pour cet angle car les grosses gouttes quittent la surface de l'isolation en laissant place à de petites gouttelettes d'eau engendrant l'élévation de la ligne de fuite de l'isolation comme il est expliqué précédemment.

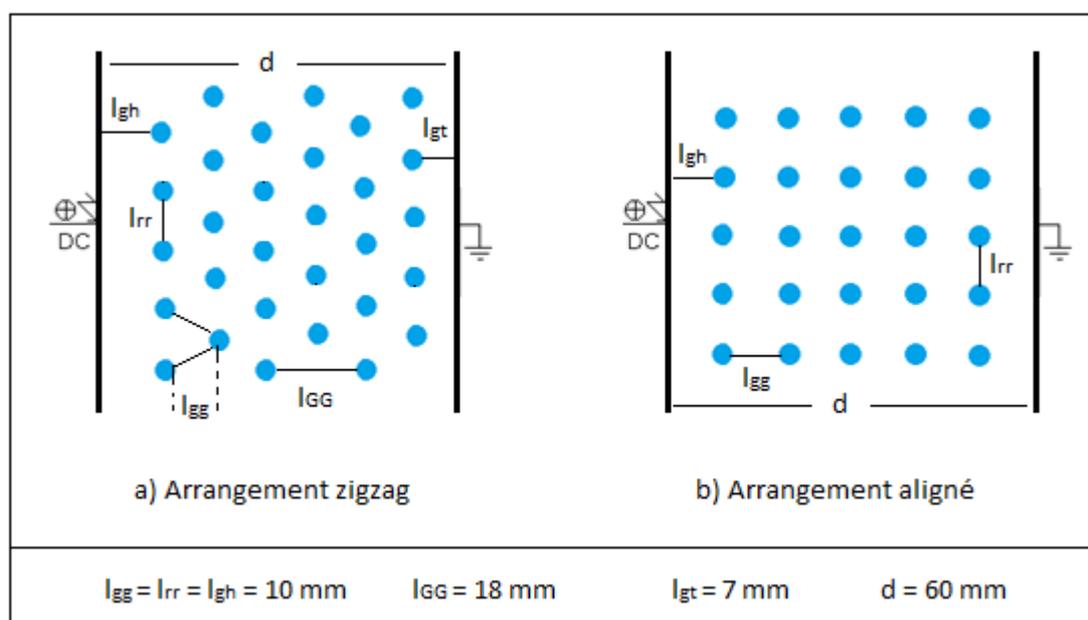
Les résultats portés sur la figure 4. 12, montrent une décroissance quasi linéaire de la tension de contournement en fonction de l'augmentation du volume des gouttelettes d'eau. Pour un nombre de rangées choisies égal à  $N_r = 5$ . Il est à constater que pour une surface isolante en silicone recouverte de gouttes d'eau à faible volume, la performance électrique est plus élevée. Cela peut être expliqué par l'existence des larges zones sèches entre les gouttes. Cependant pour le cas des volumes importants la décharge électrique est favorisée par la courte distance entre les gouttelettes et celles-ci s'allongent pour donner naissance à un filet d'eau de résistance électrique très faible.



**Fig. 4. 12:** Tension de contournement positive d'une isolation en silicone hydrophobe en fonction du volume des gouttes d'eau

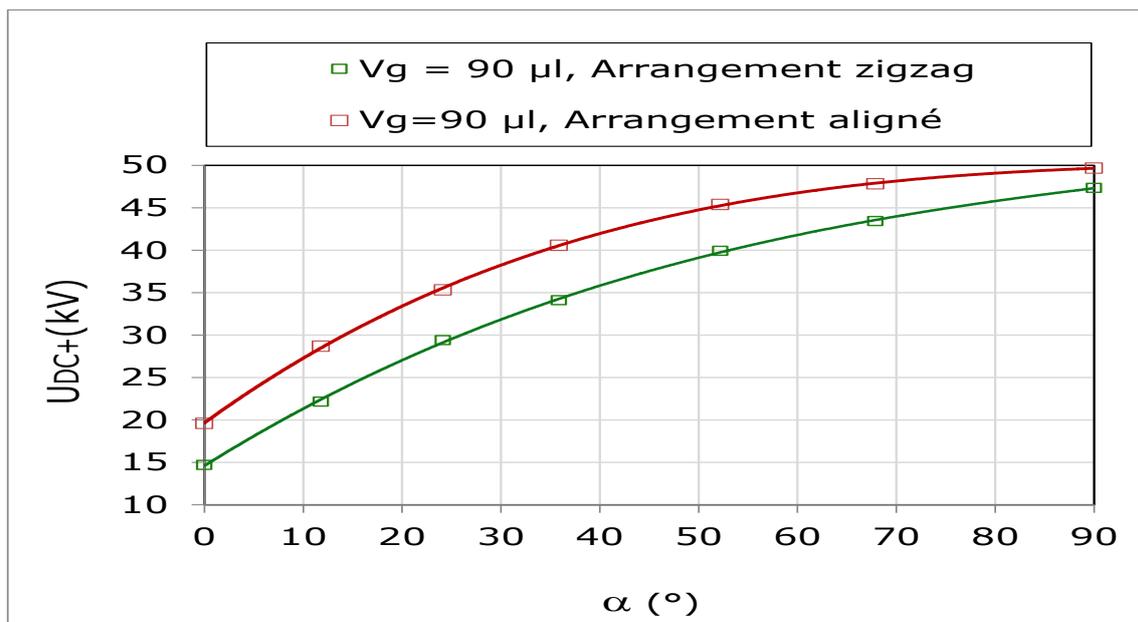
### C) Arrangement des gouttes

Le dépôt de gouttelettes d'eau de pluie ou par phénomène de condensation sur la surface d'un isolateur sous tension se fait de manière incontrôlée. Pour simuler cette présence aléatoire des gouttelettes, notre choix est porté sur un arrangement de gouttes disposées en plusieurs lignes zigzagées, pour des raisons de son rapprochement de la réalité. Ce type d'arrangement de gouttes d'eau, composé d'un ensemble de 5 rangées en zigzag ( $l_{gg} = 10$  mm, Fig. 4. 13a), sera confronté à celui donné en littérature [10] (Fig. 4. 13b).



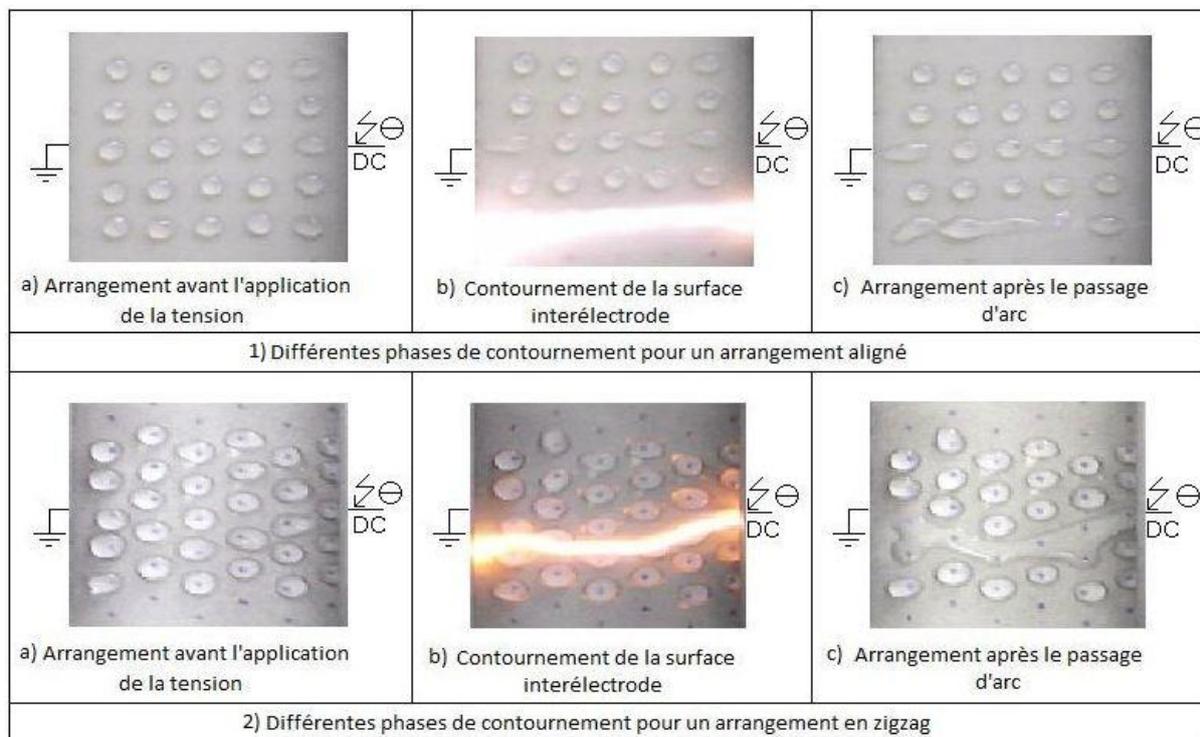
**Fig. 4. 13:** Mode de disposition des gouttes d'eau

La figure 4. 14 nous renseigne sur l'évolution de la tension de contournement en fonction de l'angle d'inclinaison pour les deux configurations suscitées. Le volume pris dans ces essais est de 90  $\mu$ l en gardant la distance interélectrode fixe à 60 mm. Il en découle de cette figure que le changement de la configuration n'influe pas sur l'allure de la tension de contournement, mais plutôt l'amplitude de cette dernière est plus faible dans le cas où les gouttelettes sont déposées en zigzag. Cela peut être expliqué par la faiblesse de la résistance surfacique de l'échantillon avec la présence d'un nombre de gouttes d'eau plus élevé par rapport à celles de l'arrangement aligné. En plus, dans le premier arrangement la décharge évolue en zigzag ou bien en diagonal où il existe plus de gouttes. Par contre, dans le deuxième cas la décharge emprunte un chemin aligné vers l'électrode terre.



**Fig. 4. 14:** Tension de contournement positive d’une isolation en silicone en fonction du mode de disposition des gouttelettes ( $V_g = 90 \mu\text{l}$ ,  $\sigma_v = 180 \mu\text{S/cm}$ ,  $\alpha$  variable)

D’après la figure 4. 15, nous remarquons que la décharge dans le cas d’un arrangement aligné evolue directement contrairement à la deuxième configuration où l’arc électrique choisit le chemin en zigzag.



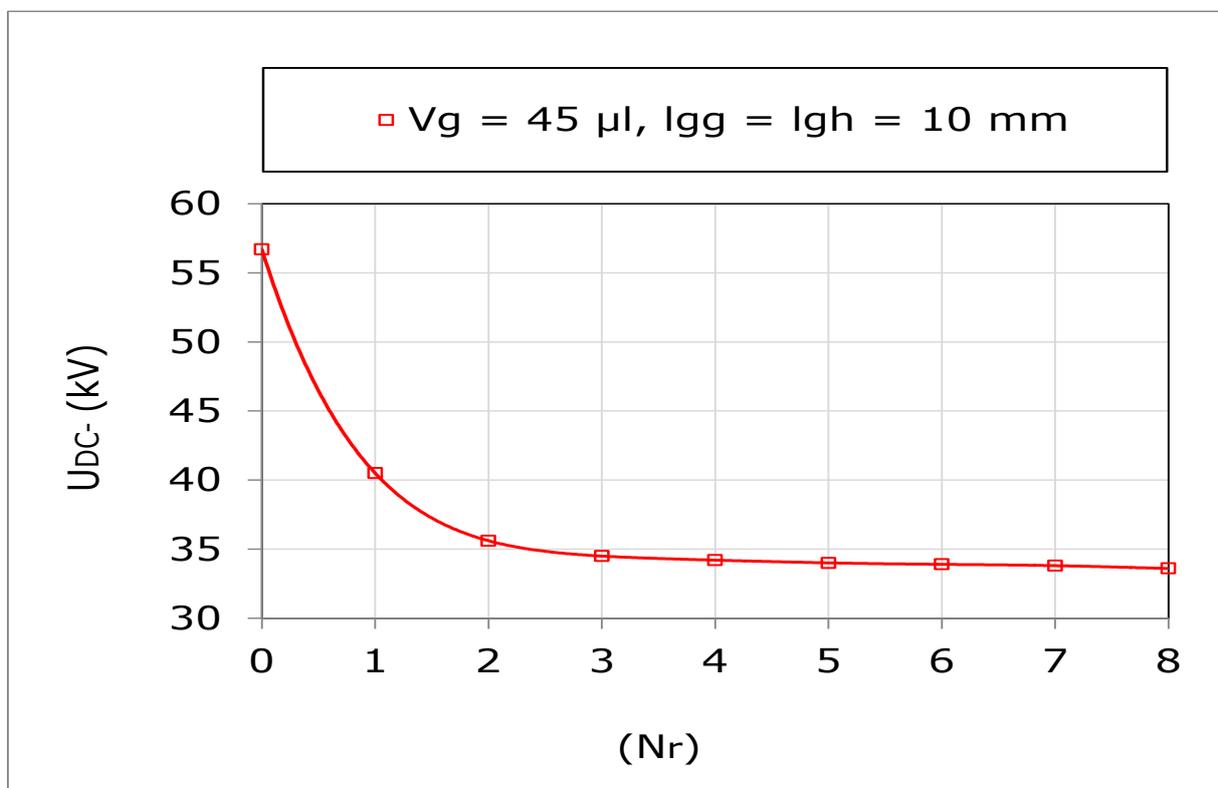
**Fig. 4. 15:** Phases de contournement d’une isolation en silicone pour des arrangements aligné et en zigzag ( $V_g = 45 \mu\text{l}$ ,  $\sigma_v = 180 \mu\text{S/cm}$ ,  $\alpha = 0^\circ$ )

## 4.8.2 Polarité négative

### 4.8.2.1 Paramètres d'influence

#### a) Nombres de rangées

L'influence de la présence de gouttelettes d'eau sur la performance électrique d'un matériau en silicone mis sous polarité négative de la contrainte de tension continue est illustrée par la figure 4. 16. Le volume des gouttes pris dans cette analyse est de 45  $\mu\text{l}$ . Le dépôt des gouttes est réalisé en ordre zigzag. Tout d'abord, la tension de contournement est mesurée pour un substrat sec, celle-ci est égale à 56.7 kV, ensuite des mesures similaires ont été faites avec des gouttelettes d'eau présentes sur le substrat. Il en résulte une diminution de la tension négative mesurée jusqu'à une valeur égale à 34.2 kV pour un  $N_r = 4$ . Au-delà de cette limite la caractéristique de la tension demeure constante indépendamment du nombre de rangées déposées sur l'isolation. Cela veut dire que le nombre de rangées des gouttes d'eau déformées joue un rôle très important dans la détermination de la tension de contournement de l'isolation.

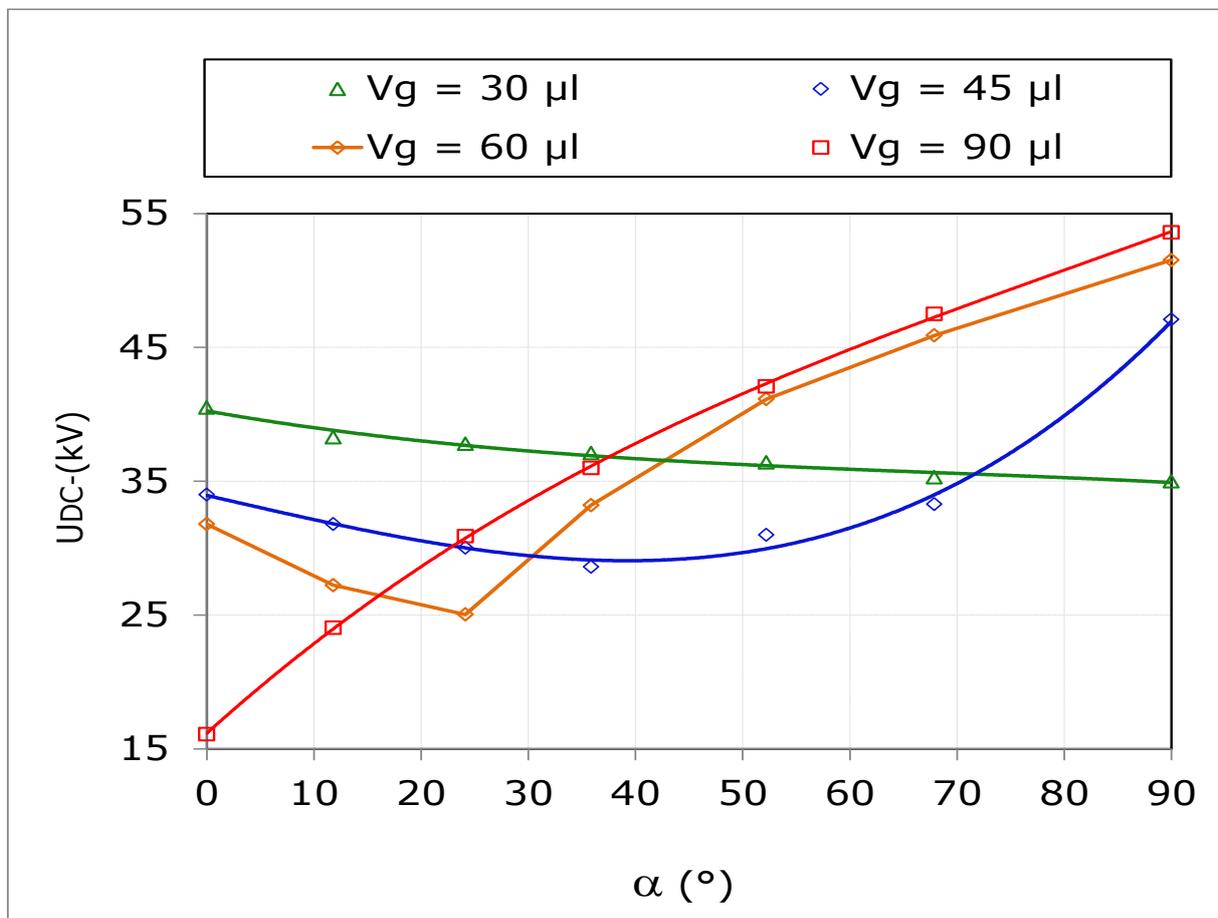


**Fig. 4. 16:** Tension de contournement négative d'une isolation en silicone hydrophobe en fonction du nombre de rangées des gouttes d'eau

### b) Angle d'inclinaison de l'isolation et volume des gouttes d'eau

Les caractéristiques présentées en figure 4. 17, montrent l'évolution de la tension de contournement négative mesurée en fonction du changement d'angle d'inclinaison par rapport à l'horizontal pour différents volumes des gouttelettes.

Dans l'étude sous polarité négative de la tension appliquée, nous assistons à la reproduction du même scénario que celui rencontré en continu positif. La seule différence réside au niveau de l'amplitude de la tension de contournement des échantillons sous les mêmes conditions d'essais.

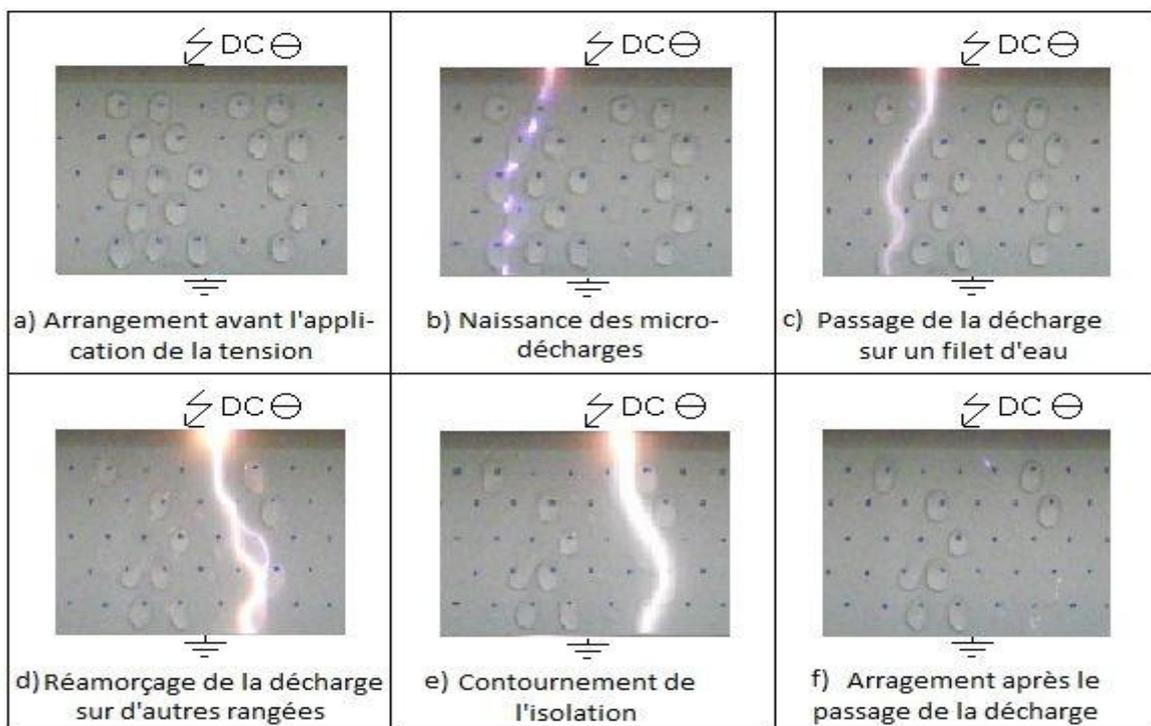


**Fig. 4. 17:** Tension de contournement négative d'une isolation en silicone hydrophobe en fonction d'angle d'inclinaison

Pour des gouttes de  $30 \mu\text{l}$ , La valeur de tension obtenue à l'horizontal est de l'ordre de  $40.5 \text{ kV}$ , et celle mesurée à la verticale est égale à  $35 \text{ kV}$ . Cet écart est évalué à  $13 \%$ . Il est à souligner que celui-ci est plus petit que celui obtenu sous polarité positive. Concernant les allures de tension correspondant aux volumes  $45$  et  $60 \mu\text{l}$ , nous remarquons qu'elles représentent le même angle critique que celui trouvé auparavant.

Contrairement aux autres courbes, la caractéristique de tension est croissante pour un volume de 90  $\mu\text{l}$ . La valeur maximale mesurée est égale à 53.6 kV avec un angle de 90 °. Cette valeur est presque égale à celle mesurée lorsque le matériau est sec (Fig. 4. 16). Cela est dû au décollage des gouttes sur la surface comme il été expliqué auparavant.

La figure 4. 18 montre les différentes phases de contournement d'une isolation hydrophobe, lorsque celle-ci est mise sous tension continue à polarité négative. Il en résulte qu'avec l'application du champ électrique, les gouttelettes d'eau se déforiment en raison d'une force supplémentaire. Le champ électrique tangentiel sur la surface du matériau crée une force sur la surface de la gouttelette qui provoque sa déformation. Cette dernière a une influence sur la répartition du champ. A cause de cette déformation la goutte devient mécaniquement instable et peut éjecter des filaments d'eau à partir de ses sommets avec d'autres gouttelettes (Fig. 4. 18a). L'augmentation du champ local peut entraîner des micro-décharges entre les gouttelettes (Fig. 4. 18b). De cette manière, l'hydrophobicité de la silicone peut être perdue localement.

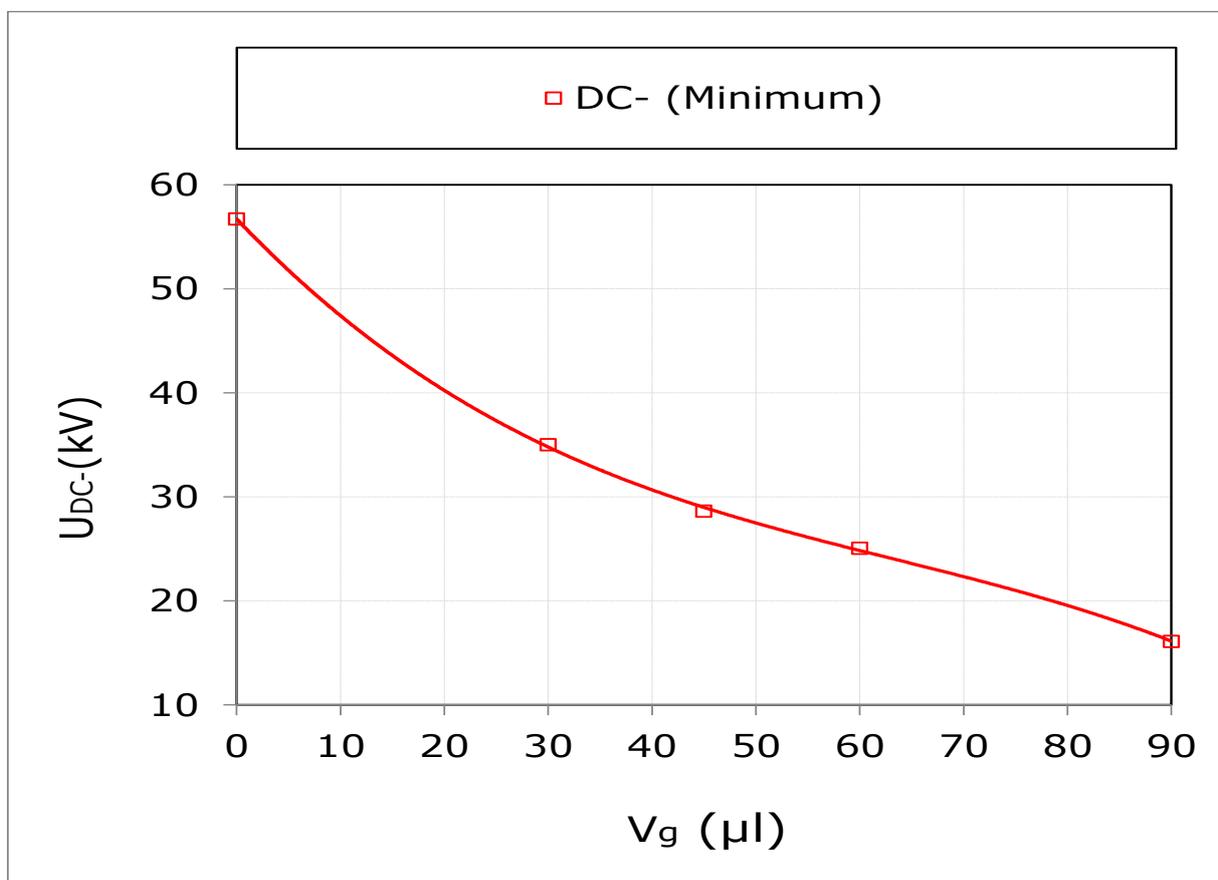


**Fig. 4. 18:** Contournement d'une surface en silicone recouverte de gouttes d'eau ( $\alpha_{cr} = 35,86^\circ$ ,  $V_g = 45 \mu\text{l}$ ,  $Nr = 5$ ,  $\sigma_v = 180 \mu\text{S/cm}$ )

Des microdécharges résulteront, celles-ci se connectent entre elles par les filaments d'eau subséquents. Dans cette phase, on obtient un allongement du filament d'eau formé au

niveau de l'électrode sous tension vers ceux formés aux voisinages de l'électrode terre. La distance d'air entre l'extrémité du premier filament et l'électrode HT augmente, puis la décharge formée au niveau de cette zone finit par s'éteindre et se réamorce de nouveau dans l'une des autres rangées (Fig. 4. 18c et 18d). Ce phénomène peut se reproduire jusqu'à ce qu'un filet d'eau plus long s'offre à la décharge pour lui servir de chemin de glissement et engendrer un contournement de l'isolation (Fig. 4. 18e).

Plusieurs séries d'expérimentations ont été conduites afin d'étudier l'effet de la taille des gouttelettes d'eau sur le comportement des échantillons en silicone mis sous tension continue négative.

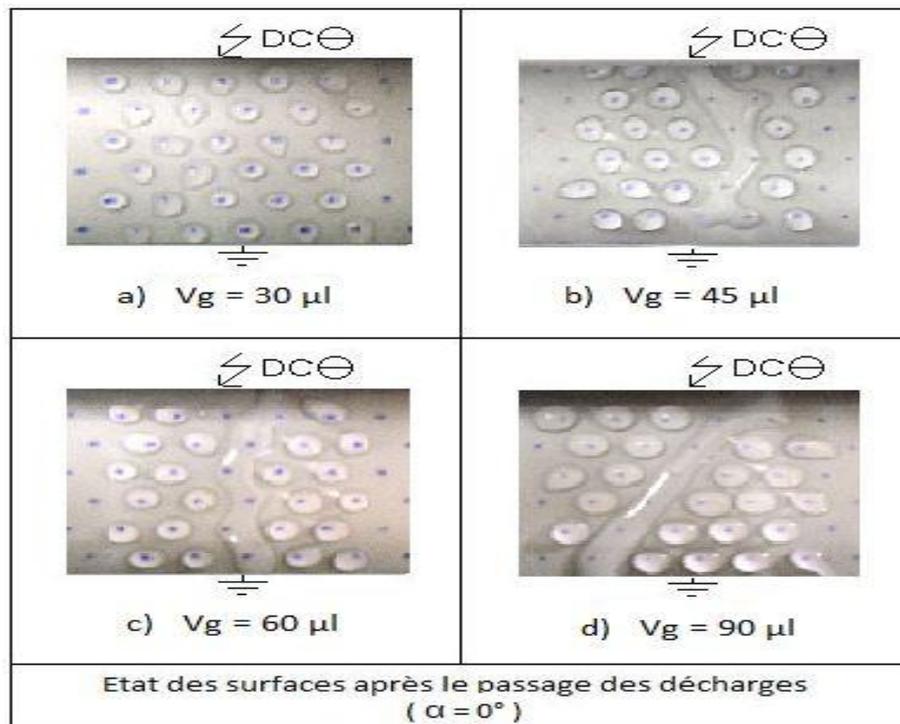


**Fig. 4. 19:** Tension de contournement négative d'une isolation en silicone hydrophobe en fonction du volume des gouttes d'eau

La Figure 4. 19 nous donne les résultats obtenus au cours de nos expérimentations. Ces mesures montrent bien que la tension de contournement diminue lorsque le volume des gouttelettes augmente. Cet effet peut s'expliquer par le fait que le volume des gouttelettes croissant, les intervalles d'air entre la gouttelette et les électrodes se réduisent. Ce qui a pour conséquence une augmentation de l'activité des décharges électriques et un risque élevé de

contournement de la surface de l'isolateur. Nous observons une réduction de la tension de contournement de l'ordre de 71 % lorsque le volume des gouttelettes varie de 30 à 90  $\mu\text{l}$ .

Il ressort de la visualisation que les gouttelettes de petites tailles sont moins sensibles au champ électrique appliqué que celles de grandes tailles. Ce comportement peut trouver son explication dans le fait que l'augmentation du volume des gouttelettes réduit les intervalles d'air entre gouttelette et entre électrodes (Fig. 4. 20).

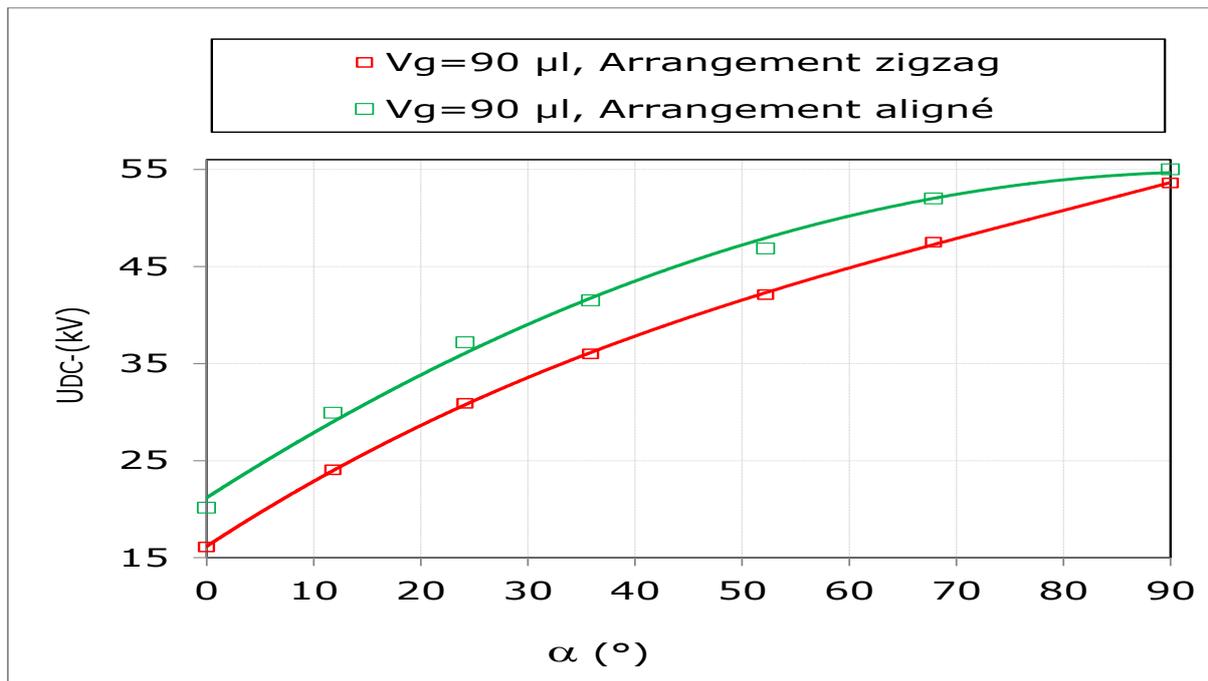


**Fig. 4. 20:** surface en silicone recouverte de gouttes d'eau à différents volumes après contournement ( $N_r = 5$ ,  $\sigma_v = 180 \mu\text{S}/\text{cm}$ ,  $\alpha = 0^\circ$ )

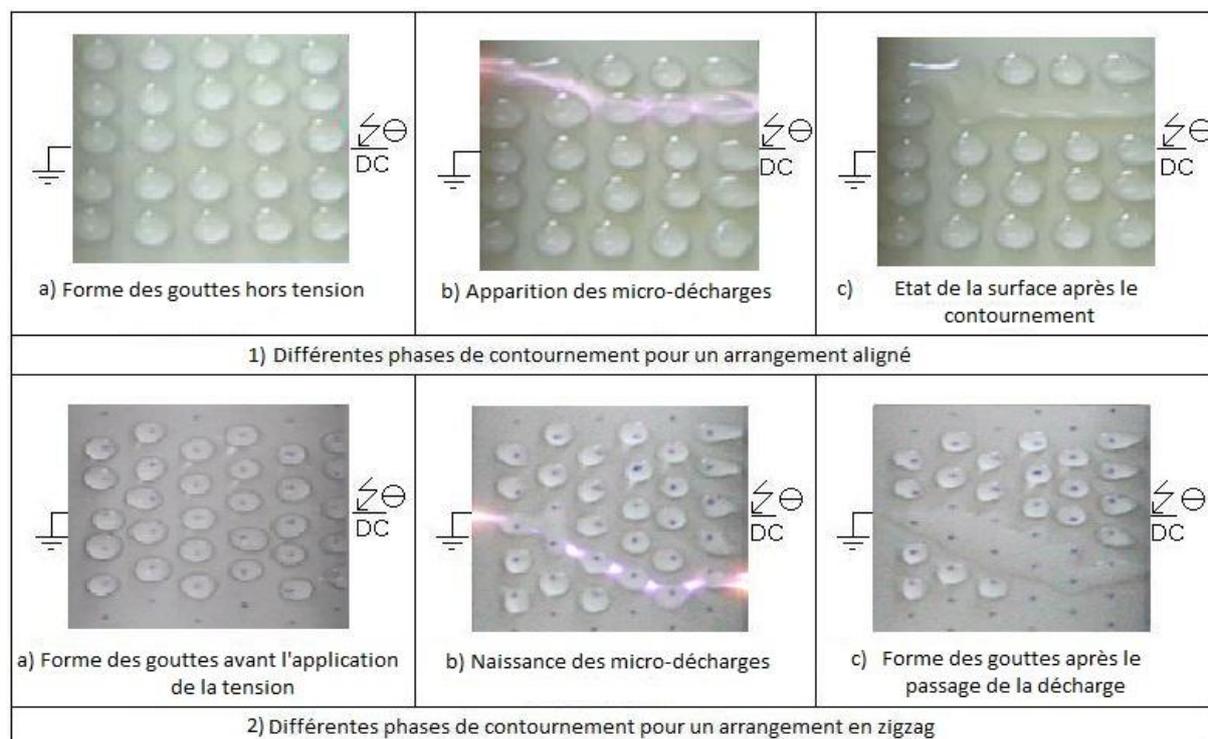
### C) Arrangement des gouttes

La figure 4. 21 illustre l'évolution de la tension de contournement continue sous polarité négative d'une isolation en silicone, lorsque celle-ci est recouverte des gouttes d'eau déposées selon deux modes différents. Le volume choisi dans ce cas est de 90  $\mu\text{l}$  et la distance interélectrode est maintenue fixe pour les deux configurations. Il en résulte que l'allure des courbes de la tension de contournement est pratiquement similaire, également, une différence d'amplitude de tension a été obtenue, qui se traduit par l'existence d'un grand nombre de gouttes dans l'arrangement zigzag. Il est à signaler que la meilleure performance électrique du matériau est obtenue avec des angles élevés ( $\alpha > 50^\circ$ ), comme il a été expliqué auparavant,

sous ces angles les gouttes se décollent laissant derrière elles des gouttes de petites taille ce qui engendre l'élargissement de la zone interélectrode.



**Fig. 4. 21:** Tension de contournement négative d'une isolation en silicone en fonction du mode de positionnement des gouttelettes ( $V_g = 90 \mu\text{l}$ ,  $\sigma_v = 180 \mu\text{S/cm}$ ,  $\alpha$  variable)



**Fig. 4. 22:** Etapes de contournement d'un matériau en silicone hydrophobe pour les deux arrangements zigzag et aligné ( $V_g = 90 \mu\text{l}$ ,  $\sigma_v = 180 \mu\text{S/cm}$ ,  $\alpha = 0^\circ$ )

## 4.9 Conclusion

Cette étude nous a permis de quantifier expérimentalement la performance d'une surface isolante hydrophobe recouverte des gouttelettes d'eau posée en mode zigzag. Egalement, une comparaison entre les deux modes zigzag et aligné a été effectuée dans ce chapitre. Nous avons examiné l'effet de la variation de nombreux paramètres tels que le volume des gouttes, l'angle d'inclinaison, le nombre de rangées et la polarité de la contrainte de tension appliquée, en fixant la valeur de la conductivité volumique de la solution polluante. A la lumière des résultats des essais réalisés nous avons pu tirer les conclusions suivantes :

- La présence des gouttelettes d'eau peut entraîner la perte locale d'hydrophobicité de nos échantillons après le passage d'une décharge électrique, aussi elle peut induire une diminution de la tension de contournement par rapport à un matériau sec et propre.
- La tension de contournement diminue avec l'augmentation du volume de gouttelettes.
- L'élévation de l'angle d'inclinaison implique la décroissance de la tension de contournement de l'isolation selon un écart de 17 % en DC+ et de 12 % en DC- pour un volume de 30  $\mu\text{l}$ .
- Des valeurs minimales de tension sont obtenues avec les volumes des gouttes de 45 et 60  $\mu\text{l}$  pour des angles d'inclinaison critique bien déterminés pour chacune des deux polarités de la tension continue.
- Pour un volume de 90  $\mu\text{l}$ , il en résulte un accroissement de la tension de contournement en fonction de l'augmentation de l'angle d'inclinaison.
- L'existence d'un nombre de rangées limite à partir duquel une chute de la performance électrique, estimée à 33 % en DC+ et 40 % en DC- a été prouvée.
- Le système étudié est plus rigide en polarité négative qu'en polarité positive.
- La meilleure rigidité diélectrique de l'isolation est obtenue avec le mode de disposition des gouttelettes en ligne droite.

## CONCLUSION GENERALE

L'objectif de ce travail était de contribuer à la compréhension et à la simulation de l'effet d'un mode de disposition des gouttelettes d'eau sur une surface en silicone hydrophobe sous tension continue positive et négative, sous l'action de paramètres d'influence tels que le volume, le nombre de gouttes d'eau, et l'angle d'inclinaison de l'isolation sur sa performance électrique.

Les résultats de cette étude expérimentale ont été résumés comme suit :

- L'augmentation du nombre de rangées des gouttelettes d'eau déposées sur la surface du matériau conduit à une diminution importante de la tension de contournement électrique.
- La rigidité diélectrique longitudinale d'une isolation hydrophobe recouverte de gouttes d'eau est toujours inférieure à celle obtenue sans ces gouttes.
- L'influence de l'angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale de l'isolation se traduit par l'existence d'un minimum de la performance électrique de celle-ci lorsque le volume des gouttes d'eau la recouvrant est de l'ordre de 45 et 60  $\mu\text{l}$  pour un angle d'inclinaison critique bien déterminé.
- La tension de contournement du matériau la plus faible a été observée en présence des grandes tailles des gouttelettes d'eau ( $V_g = 90 \mu\text{l}$ ) et pour une inclinaison nulle de l'isolation.
- L'effet de la polarité de tension appliquée se traduit par un écart de performance très faible de l'ordre de 13 %.
- Une chute de la performance électrique de l'ordre de 15 à 20 % est obtenue pour les volumes supérieurs à 60  $\mu\text{l}$  et pour des angles d'inclinaison de l'isolation plus grands que 50 °.

D'après ces conclusions, il est recommandé d'utiliser sur site des isolateurs à un angle d'inclinaison supérieur à  $50^\circ$  dans des zones pluvieuses. Cependant, il est préférable d'utiliser l'angle horizontal dans le cas où il y a le phénomène de condensation.

En perspective, nous recommandons l'enrichissement de cette étude. Nous suggérons l'emploi d'autres modes d'arrangements en zigzag en conservant le même nombre de gouttes d'eau que celui pris dans le cas d'un arrangement aligné et en élevant la distance entre gouttes de l'arrangement suscité sans changement de la ligne de fuite de l'isolation.

- [1] **Y. Higashiyama**, “Induction Charging of Droplets Ejected from an Airless Nozzle and the Behavior of Charged Droplets Near a Grounded Disk Electrode”, Proc. Inst. Electrostat. pp. 163-170, Japan, 1996.
- [2] **H-J. Kloes and D. König**, “Basic Investigations of the Performance of Droplets on Electrically Stressed Polymer Surfaces”. IEEE Annual report conference on electrical insulation and dielectric phenomena, Vol. 2, pp. 374-377, 1997.
- [3] **Y. Higashiyama, S. Yanase, T. Sugimoto**, “Behavior of Water Droplets Located on a Hydrophobic Insulating Sheet Under DC Field”, Proceedings of the IEEE industry applications conference thirty-third IAS annual meeting, Vol. 3, pp. 1808–1813, 1998.
- [4] **H. Deng, R. Hackam**. “Low Molecular Weight Silicone Fluid in RTV Silicone Rubber Coatings”. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 6, Issue. 1, pp. 84-94, 1999.
- [5] **N. Yoshimura, S. Kumagai, S. Nishimura**, “Electrical and Environmental Aging of Silicone Rubber use in Outdoor Insulation”. IEEE Trans. Dielectric. Electr. Insul, Vol. 6, Issue. 5, pp. 632-650, 1999.
- [6] **S. Thong-Om, W. Payakcho, J. Grasaesom, A. Oonsivilai and B. Marungsri**, “Comparison ageing deterioration of silicone rubber outdoor polymer insulators in artificial accelerated salt fog ageing test”, World Academy of Science, Engineering and Technology 60, 2011.
- [7] **C. Baer, R. Cervinka, R. Baersch, J. Seifert, L. Lambrecht, H. J. Winter**, “A comparative evaluation of the retention of the hydrophobicity and the tracking resistance of silicone elastomers under AC and DC stresses”, XVII international symposium on high voltage engineering, Hannover, Germany, 2011.
- [8] **V. Joseph et M. Joy Thomas**, “Performance of Silicone Rubber Polymeric Outdoor Insulator Material under AC and DC Corona”, XVII International Symposium on High Voltage Engineering, Hannover, Germany, 2011.
- [9] **A. Ouardani**, “Performance d’une surface isolante hydrophobe en silicone recouverte de gouttes d’eau sous tension continue positive”, Mémoire de Master, Université de Bejaia, 2013.

## Références Bibliographiques

---

- [10] **S. Hai et R. Messouaf**, “Effet de l’inclinaison sur le contournement d’une surface en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d’eau sous tension continue”, Mémoire de Master, Université de Bejaia, 2014.
- [11] **M. Nemamcha**, “cours sur le claquage des isolants haute tension”, 2001.
- [12] **S. Vitet**, “La pollution des isolateurs”, EDF-Epure, 1990.
- [13] **J. Dunlap**, “Performances des isolateurs pollués pour les lignes de haut tension”, chez CIGRE, Rapport 33-05, France, 1996.
- [14] **F. Midi, K. Ouerdane**, “Les effets de la pollution sur les ouvrages électriques à 30 kV en régions littorales”, Mémoire de fin d’études, département d’électrotechnique. USTHB Alger, 1998.
- [15] **D. Dumora**, “Matériaux isolants cramiques en électrotechnique”, Techniques de l’ingénieur, p. D275, 1975.
- [16] **C. Leroy**, “Les propriétés diélectriques de l’air et les très hautes tensions”, Paris: collection de la direction des études et recherches d’électricité de France, 1984.
- [17] **X. Ducouret**, “Lignes aériennes: matériels isolateurs”. Technique de l’ingénieur, référence D 4423, Paris 2006.
- [18] Site de Bluestar Silicones “[http:// www. bluestarsilicones.com/ silicones/lang/fr/ bluestarsilicones/ histoire](http://www.bluestarsilicones.com/silicones/lang/fr/bluestarsilicones/histoire)”.
- [19] **A. Chabloz**, “Technologie des matériaux à l’usage de profession de l’électricité”, 1986.
- [20] **A. Anton et J. L. Steinles**, “Micas et produits micacés”, Techniques de l’ingénieur, référence D2360, Toulouse, 1997.
- [21] **L. Carette, J. M. Pouchol**, “Silicones”, Traité plastiques et composites: Techniques de l’ingénieur, A3475, pp.1-18, 2001.
- [22] **B. Hardman, A. Torkelson**, “Silicone” Encyclopedia of polymer science and engineering, New-York: John Wiley & Sons, pp.204-308, 1989.
- [23] **IEEE Std 957** “IEEE guide for cleaning insulators”, 1995.

## Références Bibliographiques

---

- [24] **Wacker**, “Silicones pour applications haute et moyenne tension” [www.wacker.com](http://www.wacker.com).
- [25] **T. Sörqvist and A.E. Vlastos**. “Performance and Aging of Polymeric Insulators”. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, Issue. 4, pp. 1657-1665, 1997.
- [26] **D. H. Nguyen**, “Etude des propriétés électriques des élastomères silicones utilisés pour l’isolation électrique”, Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier Grenoble, 2005.
- [27] **R. Bouzeroura**, “Etude du développement d’arcs électriques parallèles sur une surface isolante non uniformément polluée sous tension continue”, Thèse de magister, Université de Bejaia, 2009.
- [28] **F. Aouabed**, “contribution à l’étude d’un circuit équivalent des isolateurs synthétiques sous pollution en utilisant l’EMTP”, Thèse de Magister, Université Farhat Abbas Sétif, 2010.
- [29] **T Guia**, “Comportement d’un modèle d’isolateur sous tension impulsionnelle”, Thèse de Magister, ENP Alger, 2008.
- [30] **K. Naito**, “Insulator Pollution. Part 1 : General aspects. , Séminaire des isolements des lignes et postes HT”. Casablanca, 1989.
- [31] **M.A.B. EL-Koshairy et F.A.M. Rizk**, “Comportement des isolateurs des lignes de transport THT dans les conditions de pollution désertiques”, CIGRE, Rapport 33-05, 1978.
- [32] **F. Frifra et N. Rezak**, “Etude physico-chimique du dépôt de pollution sur la surface des isolateurs HT”. PFE, Département de chimie industrielle, USTO-MB, Algérie, 1999.
- [33] **CEI 815** “Guide pour le choix des isolateurs sous pollution”, 1986.
- [34] **K. Chrzan**, “Conductivity of Aqueous Dust Solutions”, IEEE Trans on E.I., Vol. EI-22, Issue. 3, pp. 241-244, 1987.
- [35] **D.Namane**, “Effet de la discontinuité de la pollution sur le comportement d’isolateur haute tension, sous la fréquence de 50 Hz”, Thèse de magister, ENP Alger, 1998.
- [36] **A.Mekhaldi**, “Etude des phénomènes de conduction et de décharge électrique sur des surfaces isolantes polluées sous tension alternative 50 Hz ”, Thèse de doctorat d’état, Génie Electrique, ENP Alger, 1999.

## Références Bibliographiques

---

- [37] **M.K.H. Schneider**, “Mesure de la sévérité de pollution des sites et application au dimensionnement des réseaux à courant alternatif”, ELECTRA n°64, 1979.
- [38] **CEI 60-1** “Techniques d’essais à haute tension. Partie 1 : définitions et prescriptions relatives aux essais”. ,1989.
- [39] **K. Amriche, S. Benayad**, “Modélisation des principales caractéristiques d'un isolateur pollué sous tension continue”, PFE Ingénieur, Génie Electrique, USTHB Alger, 2004.
- [40] **S. Guerfi**, “Modélisation des isolateurs de haute tension pollués sous tension continue”, Thèse de Magister, Génie Electrique, Université de Bejaia.
- [41] **M. Soufi, M. Zemirline**, “Conception d’un modèle dynamique de contournement d’un isolateur pollué sous tension alternative 50 Hz”, PFE Ingénieur, Génie Electrique, ENP Alger, 2004.
- [42] **M. Teguar**, “Etude mathématique des mécanismes de développement des décharges électriques sur des isolateurs installés en régions polluées”, Thèse de Magister, Génie Electrique ENP, 1993.
- [43] **C. Gary**, “Les propriétés diélectriques de l’air et des THT”, Collection de la direction des études et des recherches d’EDF. Eyrolles. 1984.
- [44] **Z. Sahli**, “Etude de la non uniformité de la pollution sur des caractéristiques de contournement des isolateurs réels pollués sous tension continu”, Thèse de Magister, Génie Electrique, Université de Bejaia, 2003.
- [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] **B. Hammoum, A. Kerbouche**, “Etude du Phénomène de Pollution des Isolateurs de Haute Tension dans la Région Electrique du Centre Algérien”, PFE Ingénieur, Génie Electrique, ENP 2007.
- [47] **R. Moumeni, A. Bahous**, “Modélisation dynamique de l’arc électrique sur des isolateurs pollués de haute tension”, PFE Ingénieur, Génie Electrique, USTHB 1996.

## Résumé

L'objectif visé dans ce travail concerne l'étude de quelques paramètres d'influence de la tension de contournement d'une surface en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau et la décharge électrique évoluant sur celle-ci. Ces paramètres se résument au volume des gouttelettes d'eau à faible conductivité électrique, l'arrangement en zigzag des gouttelettes et l'angle d'inclinaison de la surface en silicone par rapport à l'horizontale.

Il ressort de cette étude que la présence des gouttelettes d'eau sur l'isolation implique la diminution de la performance électrique de notre matériau. Nous avons montré également que, plus le volume des gouttes est grand plus la tension de contournement est petite.

Les résultats obtenus montrent que pour des angles critiques ( $24^\circ$  et  $35^\circ$ ), les allures de tension présentent un minimum avec les volumes de  $45 \mu\text{l}$  et  $60 \mu\text{l}$ . Pour un volume de  $90 \mu\text{l}$  la tension augmente avec l'élévation de l'angle d'inclinaison, par contre pour  $V_g = 30 \mu\text{l}$  la tension est décroissante. Il résulte aussi que les valeurs de tension de contournement sont plus élevées en polarité négative qu'en polarité positive. L'existence d'un nombre de rangée limite à partir duquel la tension demeure constante. Le système étudié est plus rigide avec une disposition aligné des gouttelettes par rapport à la configuration zigzag.

**Mots clés :** Contournement électrique, Matériau en silicone hydrophobe, angle d'inclinaison, rangées de gouttes d'eau, Décharge électrique, polarités de DC.