

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université A. MIRA de Bejaia  
Faculté de Technologie  
Département de Génie Electrique

# Mémoire de Fin de Cycle

*En Vue de l'Obtention du Diplôme de Master  
en Electrotechnique*

Option : Technique de Haute Tension

## *Thème*

*Effet de l'arrangement et de l'accumulation de  
gouttes d'eau recouvrant une isolation en  
silicone inclinée sur sa performance électrique  
sous tension continue*

Proposé et dirigé par :

Pr. R. BOUDISSA

Pr. Kornhuber

Présenté par :

M<sup>r</sup> .AIT TALEB Karim

M<sup>r</sup> .DJALALI A. Nour

Promotion : 2015/2016



# Remerciement

*Ce travail a été réalisé au laboratoire de génie électrique de l'université A. Mira de Bejaia sous la direction du professeur Rabah Boudissa.*

*Au début nos remerciement à Monsieur Rabah Boudissa qui a su encadré et diriger ce travail avec beaucoup de compétences, disponibilité, sympathie et d'avoir dirigé avec un infatigable dévouement ce modeste travail.*

*Nous le prions de recevoir ici l'assurance de nos sincères et amicales gratitudes.*

*On adresse nos profondes reconnaissances à Monsieur Kornhuber.*

*Nos remerciements s'adressent aux membres du jury d'avoir accepté d'évaluer notre travail.*

*Merci a tous et particulièrement à Taalit ne Boughani et Fatma pour leur soutien et leur conseils précieux pendant les moments difficile.*

*Enfin nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la concrétisation de ce mémoire.*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A mes très chers parents ;*

*A mes frères : SAMIR et SOFIANE;*

*A la mémoire de mon cousin : YACINE;*

*A toute la famille ;*

*A tous mes collègues de la promotion de la Haute Tension 2015/2016 ;*

*A tout mes amis (es);*

*« Nulle pierre ne peut être polie sans friction, nul homme ne peut parfaire son expérience sans épreuve. »*

**Confucius**

*DJALALI ABDENOUR*

# LISTE DES FIGURES

---

## LISTE DES FIGURES

Fig. I. 1: Forces en présence lorsqu'une goutte est placée sur un substrat en absence de contraintes électriques .....	4
Fig. I. 2: Diagramme schématique du dispositif expérimental .....	5
Fig. I. 3: Formation d'un canal d'eau lorsque la tension négative est appliquée sur (a) le PTFE et (b) SR. ....	6
Fig. I.4: Installation expérimentale. ....	7
Fig. I. 5: Configuration des électrodes. ....	8
Fig. I. 6: l'abaissement temporel de l'hydrophobicité. ....	8
Fig. I.7: Schéma de circuit électrique.....	9
Fig. I. 8: Image de la geometrie de gouttes d'eau sur un l'isolant .....	10
Fig. I. 9: L'effet de la variation de la conductivité sur la durée de la décharge.....	10
Fig. I.10: Forme de la décharge électrique.....	11
Fig. I.11: développement de la décharge sur une surface d'un isolant .....	11
Fig. I.12: Schéma de l'arrangement du champ sur un isolateur .....	12
Fig. I.13: Image illustre le changement d'hydrophobicité .....	12
Fig. I.14: Variation d'hydrophobicité.....	13
Fig. I.15: Schéma de l'installation utilisé et à coté une image de résultat d'un test .....	13
Fig. I.16: ion de courant de fuite en fonction de la durée d'essai et la masse érodé.....	14
Fig. I.17: Activités des décharges sur un isolateur en silicone.....	15
Fig. I.18: Classification d'hydrophobicité (HC1-HC6) .....	16
Fig. I.19: Classification d'hydrophobicité.....	16
Fig. I.20: Niveau d'érosion en fonction de la tension de claquage sous différentes polarités .	17
Fig. I.21: Comparaison entre le champ AC et DC .....	17
Fig. I. 22: Tension de contournement d'une isolation en silicone hydrophobe .....	18
Fig. I. 23 : Variation de la tension de contournement des gouttes d'eau à volume différents sur une surface en silicone hydrophobe .....	19
Fig. I. 24 : Schéma de mesure et de visualisation .....	19
Fig. I. 25: Caractéristiques du modèle.....	20
Fig. I. 26: Différentes positions du dispositif.....	20
Fig. I. 27: $U_{DC+} = f(Nr)$ d'une surface en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau ..	21

---

# LISTE DES FIGURES

---

Fig. I. 28 : Variation de la tension de contournement en fonction de la conductivité et volume de gouttelettes .....	22
Fig. I. 29 : Schéma de mesure et de visualisation .....	23
Fig. I. 30 : Variation de la tension de contournement en fonction de l'inclinaison et le volume de gouttes .....	23
Fig. II.1: Rigidité diélectrique .....	28
Fig. II.2: Circuit équivalents série et parallèle .....	30
Fig. II. 3: Structure chimique de la silicone .....	35
Fig. II. 4: Valeurs de l'angle de contact possibles .....	38
Fig. II. 5: comportement d'une surface hydrophobe ou hydrophile.....	39
Fig. II. 6: hydrophobicité d'une surface en silicone.....	39
Fig. II. 7 Isolateur silicone et traversée avec un revêtement silicone.....	40
Fig. II. 8 Principe d'un isolateur à long fût .....	41
Fig. III. 1 Isolant comportant une inclusion gazeuse .....	50
Fig. III. 2 Avalanche électronique dans un champ $\varphi \neq 0$ homogène .....	51
Fig. III. 3 Développement d'un streamer .....	52
Fig. III. 4 Développement d'un leader .....	53
Fig. III. 5 Amorçage d'un intervalle d'air par avalanche primaire .....	54
Fig. III. 6 Disruption d'un intervalle d'air par streamers .....	54
Fig. III. 7 Amorçage d'un espace d'air par leader.....	55
Fig. IV. 1 Schéma de mesure et de visualisation (a) des différentes positions des échantillons soumis aux tests (b) (SG : Appareil de Commande manuelle ou automatique du transformateur; T <sub>r</sub> : Transformateur BT/H; Cam: Caméscope numérique; PC: Ecran de PC; Oe: Objet d'essai).....	58
Fig. IV. 2 Photos de défirrent composant du circuit de mesure de la tension de contournement .....	58
Fig. IV. 3 Positionnement des gouttes sur une surface en silicone limitée par 2 électrodes....	59
Fig. IV. 4 Différentes positions du dispositif .....	60
Fig. IV. 5 Appareil de mesure de conductivité volumique .....	60
Fig. IV. 6 Photo montrant un dessiccateur .....	61
Fig. IV. 7 Photo montrant le gel de silice (silicagel).....	62
Fig. IV. 8 Abaques de corrections en fonction de l'humidité et de la température.....	63

---

# LISTE DES FIGURES

---

Fig. IV. 9 Tension de contournement positive d'une isolation en silicone hydrophobe en fonction du nombre de rangées des gouttes d'eau.....	65
Fig. IV. 10 Phases de contournement positif d'une isolation en silicone hydrophobe ( $\alpha = 0^\circ$ , $N_r = 5$ ).....	65
Fig. IV. 11 Tension contournement positive d'une isolation en silicone hydrophobe en fonction d'angle d'inclinaison.....	66
Fig. IV. 12 Phases de contournement positif d'une isolation en silicone pour deux angles différent $\alpha=0^\circ$ et $\alpha=90^\circ$ , avec et sans accumulation pour ( $V_g = 45\mu\text{l}$ ).....	67
Fig. IV. 13 Tension contournement positive d'une isolation en silicone hydrophobe en fonction d'angle d'inclinaison.....	68
Fig. IV. 14 Phases de contournement positif d'une isolation en silicone angle ( $\alpha=0^\circ$ ), pour deux configurations avec accumulation et sans accumulation pour ( $V_g = 90\mu\text{l}$ ).....	70
Fig. IV. 15 Tension contournement positive d'une isolation en silicone hydrophobe en fonction d'angle d'inclinaison pour un volume ( $V_g=20\mu\text{l}$ ) .....	70
Fig. IV. 16 Séquences correspondent au contournement électrique d'une surface en silicone recouverte de gouttes d'eau pour les angles d'inclinaison ( $\alpha = 0^\circ$ et $\alpha = 90^\circ$ ) avec ( $V_g = 20 \mu\text{l}$ ) .....	72
Fig. IV. 17 Tension de contournement négative d'une isolation en silicone hydrophobe en fonction du nombre de rangées des gouttes d'eau.....	73
Fig. IV. 18 Phases de contournement négatif d'une isolation en silicones hydrophobe ( $\alpha = 0^\circ$ , $N_r = 5$ ).....	74
Fig. IV. 19 Tension contournement négative d'une isolation en silicone hydrophobe en fonction d'angle d'inclinaison.....	74
Fig. IV. 20 Phases de contournement négatif d'une isolation en silicone pour deux angles différent $\alpha = 0^\circ$ et $\alpha = 90^\circ$ , avec et sans accumulation pour ( $V_g = 45 \mu\text{l}$ ).....	75
Fig. IV. 21 Tension contournement négative d'une isolation en silicone hydrophobe en fonction d'angle d'inclinaison.....	77
Fig. IV. 22 Phases de contournement négatif d'une isolation en silicone pour deux angles différent ( $\alpha = 0^\circ$ et $\alpha = 90^\circ$ ), avec et sans accumulation pour ( $V_g = 45 \mu\text{l}$ ).....	78
Fig. IV. 23 Tension contournement négative d'une isolation en silicone hydrophobe en fonction d'angle d'inclinaison pour un volume ( $V_g = 20 \mu\text{l}$ ) .....	78
Fig. IV. 24 Tension de contournement électrique d'une surface en silicone recouverte de gouttes d'eau pour ; $\alpha = 0^\circ$ et $V_g = 20 \mu\text{l}$ .....	79

---

## Liste des symboles

---

ar	: Arrangement des gouttes sur la surface ;
Cam	: Caméra rapide ;
d	: Distance entre les deux électrodes de base ;
dgel	: Distance entre la goutte et l'électrode ;
E	: Champ électrique
e	: Epaisseur de l'électrode ;
H	: Humidité de l'air environnant
HT	: Haute tension
$K_d$	: Facteur de correction relatif à la température et à la pression
$K_h$	: Facteur de correction relatif à l'humidité
L	: Longueur de l'électrode ;
$N_r$	: Nombre de rangées des gouttes d'eau
$N_r$	: Nombre de rangées de 1, 2, 3, 4 et 5;
Oe	: Objet d'essai
P	: Pression
PC	: Ecran de PC
R	: Largeur de l'électrode ;
$R_S$	: Résistance superficielle
$R_V$	: Résistance de volume
Tr	: Transformateur BT/HT
$U_{DC+}$	: Tension de contournement positive
$U_{DC-}$	: Tension de contournement négative
U	: Tension électrique de claquage ;
$V_m$	: Tension de mesure ;
$V_g$	: Volume des gouttes d'eau ;
$\delta$	: Angle de pertes ;
$\theta$	: Température ;
$\alpha$	: Angle d'inclinaison ;
$\alpha_{cr}$	: Angle d'inclinaison critique
$\sigma_v$	: Conductivité volumique ;
$\epsilon_a$	: Permittivité absolue ;

---

## Liste des symboles

---

$\mu\text{S/cm}$  : Micro-Siemens par centimètre



## Sommaire

<b>Introduction générale</b> .....	1
------------------------------------	---

### *Chapitre I : L'ETAT D'ART*

I.1 Introduction.....	3
I.2 des travaux réalisés sur la performance électrique des isolateurs en silicone recouvertes de gouttes d'eau sous tension continu.....	3
I.2.1 Y. Higashiyama, 1996.....	3
I.2.2 H. J. Kloes et D. Konig, 1997.....	4
I.2.3 Y. Higashiyama, S. Yanase, T. Sugimoto, 1998.....	4
I.2.4 H. Deng et R. Hackam, 1999.....	6
I.2.5 N. Yoshimura, S. Kumagai, S. Nishimura, 1999.....	7
I.2.6 S. M. Rowland et F. C. Lin, 2006.....	9
I.2.7 L. Chengrong, Z. Linjie, X. Jun, Z. Shuqi et Y. Jisha, 2008.....	11
I.2.8 J. Vimal, B. Venkatesulu et M. J. Thomas, 2010.....	13
I.2.9 G. P. Bruce, 2010.....	14
I.2.10 S. Thong-Om, W. Payakcho, 2011.....	14
I.2.11 C. Bär et autres, 2011.....	16
I.2.12 A. Ouardani, 2013.....	17
I.2.13 S. Hai et R. Messouaf, 2014.....	19
I.2.14 J. Ndoumbe, 2014.....	21
I.2.15 A. Kechida et KH. Ighmorassen, 2015.....	22
I.3 Conclusion.....	24

### *Chapitre II : ISOLANTS ET ISOLATEURS*

II.1 Introduction.....	25
II.2 Définitions.....	25
II.2.1 Isolants.....	25
II.2.2 Isolations.....	25
II.2.3 Diélectrique.....	26
II.2.4 Isolateur.....	26

---

# SOMMAIRE

---

II.3 Propriétés diélectriques des matériaux isolants .....	26
II.3.1 Résistance et résistivité.....	26
II.3.1.1 Résistance et résistivité transversale.....	26
II.3.1.2 Résistance et résistivité longitudinale.....	26
II.3.2 Rigidité diélectrique.....	27
II.3.2.1 Rigidité diélectrique longitudinale .....	27
II.3.2.2 Rigidité diélectrique transversale .....	28
II.3.3 Permittivité .....	28
II.3.3.1 Permittivité relative .....	28
II.3.3.2 Permittivité absolue .....	29
II.3.4 Angle de pertes et facteur de dissipation .....	29
II.3.5 Propriétés thermiques .....	30
II.3.6 Propriétés mécaniques .....	30
II.4 Facteurs climatiques influençant sur les isolants.....	30
II.4.1 Température.....	31
II.4.2 Humidité .....	31
II.5 Différents types d'isolants .....	31
II.5.1 Isolant gazeux .....	31
II.5.2 Isolants liquides .....	31
II.5.3 Isolants solides.....	32
II.5.3.1 Matériaux utilisés pour les isolants solides .....	32
II.5.3.1.1 Porcelaine .....	32
II.5.3.1.2 Verre .....	33
II.5.3.1.3 Silicone .....	33
a. Propriétés de la silicone.....	34
b. Grandes familles de silicones .....	34
c. Structure moléculaire de la silicone .....	35
d. Caractéristiques des propriétés fondamentales dans diverses applications.....	35
e. Élastomères silicones.....	37
II.6 Technique de caractérisation des surfaces .....	37
II.6.1 Energie de surface et angle de contact.....	37
II.6.2 Principe.....	37
II.6.3 Propriété de la surface .....	38

---

II.6.4 Hydrophobicité .....	39
II.6.5 Applications des élastomères silicones dans l'isolation électrique .....	39
II.6.5.1 Isolation volumique .....	40
II.6.5.2 Isolation surfacique.....	40
II.7 Conclusion .....	41

## ***Chapitre III : POLLUTION ATMOSPHERIQUE ET PHENOMENE DE LA DECHARGE***

III.1 Introduction .....	41
III.2 Définition .....	41
III.2.1 Contournement .....	41
III.2.3 Ligne de contournement.....	41
III.2.4 Tension de contournement .....	42
III.2.5 Ligne de fuite .....	42
III.2.6 Courant de fuite .....	42
III.2.7 Pollution .....	42
III.2.8 Salinité.....	42
III.2.9 Couche de pollution .....	42
III.2.10 Degré de pollution .....	42
III.3 Différents types de pollution .....	43
III.3.1 Pollution naturelle .....	43
III.3.1.1 Pollution marine .....	43
III.3.1.2 Pollution désertique.....	43
III.3.2 Pollution industrielle .....	43
III.3.3 Pollution mixte .....	43
III.4 Classification des sites pollués .....	44
III.5 Conséquences de pollution sur l'isolateur .....	44
III.5.1 Arc non localisé.....	45
III.5.2 Arc Fixe.....	45
III.5.3 Contournement des surfaces isolantes.....	45
III.6 Mesure de la sévérité de pollution d'un site.....	46
III.6.1 Densité du dépôt de sel équivalent (DDSE).....	46

---

# SOMMAIRE

---

III.6.2 Conductance superficielle .....	46
III.6.3 Mesure optique .....	46
III.6.4 Mesure de la pollution de l'air .....	47
III.6.5 Densité du dépôt non soluble (DDNS).....	47
III.7 Techniques de lutte contre la pollution .....	47
III.7.1 Allongement de la ligne de fuite .....	47
III.7.2 Utilisation des isolateurs plats (auto-nettoyables).....	47
III.7.3 Graissage des isolateurs (couches hydrophobes) .....	48
III.7.4 Revêtements à base de silicones.....	48
III.8 Décharges électriques.....	48
III.8.1 Décharge disruptive.....	49
III.8.1.1 Décharge intrinsèque.....	49
III.8.1.2 Décharge thermique .....	49
III.8.1.3 Décharge partielle.....	49
III.8.2 Décharge dans l'air.....	50
III.8.2.1 Décharge de type streamers.....	50
III.8.2.2 Décharges de type leader.....	51
III.9 Différents types d'amorçage des isolations gazeuses.....	53
III.9.1 Amorçage de l'air par avalanche primaire .....	53
III.9.2 Claquage de l'air par streamers .....	54
III.9.3 Disruption de l'air par leader .....	55
III.10 Conclusion.....	55

## **Chapitre VI : PARTIE EXPERIMENTALE**

IV.1 Introduction .....	57
IV.2 Dispositif expérimental .....	57
IV.2.1 Modèle expérimental.....	57
IV.3 Pollution d'une surface isolante .....	60
IV.4 Procédé d'essai.....	61
IV.5 Dessiccateur .....	61
IV.6 Correction des résultats de tension en fonction des conditions atmosphériques .....	62

---

# SOMMAIRE

---

IV.7 Exemple de calcul .....	63
IV.7.1 Propriétés diélectriques de l'isolation en silicone .....	63
IV.8 Résultats et discussions .....	64
IV.8.1 Polarité positive.....	64
IV.8.1.1 Paramètres d'influence.....	64
a) Nombres de rangées .....	64
b) Angle d'inclinaison de l'isolation et l'accumulation d'eau pour $V_g=45\mu\text{l}$ .....	66
C) Angle d'inclinaison de l'isolation et l'accumulation d'eau pour $V_g=90\mu\text{l}$ .....	68
d) Angle d'inclinaison pour un volume des gouttelettes d'eau $V_g=20\mu\text{l}$ .....	70
IV.8.2 Polarité négative.....	72
IV.8.2.1 Paramètres d'influence.....	72
a) Nombres de rangées .....	72
b) Angle d'inclinaison de l'isolation et l'accumulation d'eau pour $V_g = 45 \mu\text{l}$ .....	74
C) Angle d'inclinaison de l'isolation et l'accumulation d'eau pour $V_g = 90 \mu\text{l}$ .....	76
d) Angle d'inclinaison pour un volume des gouttelettes d'eau $V_g = 20 \mu\text{l}$ .....	78
IV.9 Conclusion .....	78
CONCLUSION GENERALE.....	81

---

## Introduction générale

La forte croissance de la consommation d'énergie électrique au niveau mondial a poussé les fournisseurs à en produire davantage tant en quantité (niveau de tension, puissance), qu'en qualité (continuité de service et sécurité). Ce qui a incité les fabricants de matériels électriques à chercher de nouveaux moyens plus performants pour répondre aux exigences de la demande.

Les isolateurs 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. Parmi ces isolateurs ceux en élastomères silicones qui constituent un matériau de choix du fait principalement de leur hydrophobicité couplée à une bonne résistance aux contraintes climatiques (humidité, brouillard salin, UV, . . .). Par ailleurs, ces polymères possèdent une bonne stabilité thermique (entre  $-80^{\circ}\text{C}$  et  $250^{\circ}\text{C}$ ), une bonne tenue au feu et une tension de claquage équivalente aux autres polymères.

Leur facilité de moulage et l'absence d'équipements lourds pour leur élaboration ont permis également de développer des applications isolantes à base d'élastomères silicone pour des traversées moyennes et haute tension.

La présence de gouttelettes d'eau sur la surface des isolateurs constitue l'un des principaux facteurs impliqués dans le phénomène de contournement. 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 de gouttelettes sur la surface des isolateurs extérieurs des réseaux de transmission, leur présence peut provoquer une baisse de la rigidité diélectrique de ces isolateurs.

Le phénomène de contournement et les décharges électriques sont étudiés en fonction de la distance longitudinale interélectrode, la disposition de la plaque isolante (horizontale, verticale ou inclinée) par rapport à la terre, le volume et la conductivité des gouttes d'eau déposées sur sa surface.

Le but principal visé par notre travail, à savoir si l'utilisation d'élastomère silicone comme isolation extérieure peut améliorer la performance d'un système sous tension continue en fonction des contraintes atmosphériques humides, polluées ou propres, et dans le cas du phénomène de condensation (c.à.d. lors de la formation des gouttelettes d'eau sur la surface hydrophobe) sous divers paramètres suscités.

Dans notre travail nous avons opté pour la démarche suivante :

Le premier chapitre est 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 aborde l'étude des isolants et propriétés diélectriques et leurs avantages en génie électrique.

Le troisième chapitre est constitué de deux parties. La première traite les problèmes de la pollution atmosphérique, les sources de pollution, les méthodes techniques de mesure du degré de pollution et de lutte contre la pollution. La deuxième partie traite les différents phénomènes de décharges électriques (partielle, d'espace, ... est) évoluant dans un intervalle d'air.

Le quatrième chapitre est dédié à l'étude expérimentale et l'interprétation des résultats obtenus. Enfin, nous terminerons par une conclusion.

## **I.1 Introduction**

Au cours de ces dernières années, l'utilisation des isolateurs en polymère, encore appelés isolateurs composites ou isolateurs non-organiques dans les réseaux de transport et de distribution de l'énergie électrique a été massive. A titre de comparaison avec les isolateurs traditionnels en porcelaine ou en verre, ceux-ci offrent plusieurs avantages tels qu'une grande résistance à la contamination, une bonne résistance mécanique, et une énorme légèreté.

L'hydrophobicité de la surface en particulier, est l'un des facteurs importants qui contribuent à la performance supérieure des polymères de silicone pour résister au mouillage et ceci en raison de leur faible énergie libre de surface. Cette propriété participe à la réduction des courants de fuite et à la minimisation de l'apparition des bandes sèches [1]. Pour cela, de nombreuses études visant à maîtriser et améliorer les performances en service de ce type d'isolateurs ont été réalisées.

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.

## **I.2 Synthèse des travaux réalisés sur la performance électrique des isolateurs en silicone recouvertes de gouttes d'eau sous tension continue**

### **I.2.1 Y. Higashiyama, 1996 [2]**

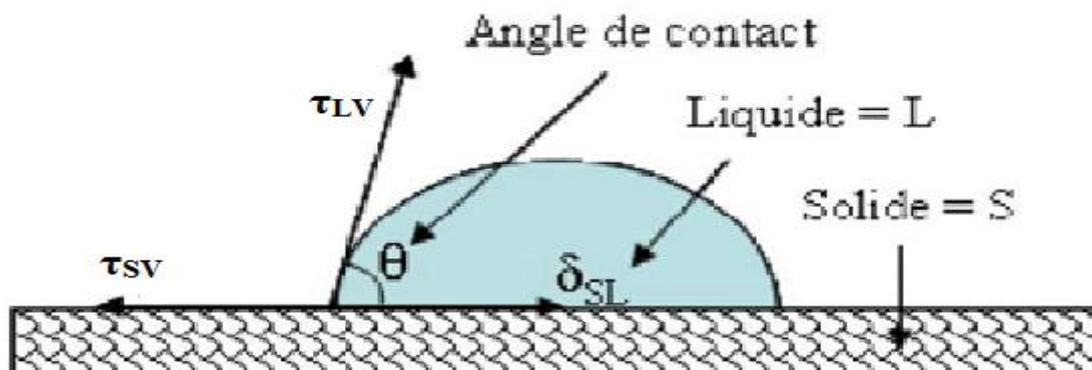
Afin d'étudier l'hydrophobicité et de comprendre le comportement des gouttes d'eau sur une surface en polymère sous tension continue, l'auteur a réalisé des travaux expérimentaux sur trois types de matériaux tels que poly-tétra-fluor-éthylène (PTFE), le caoutchouc de silicone (SR) et Ethylène Propylène Diène Monomère (EPDM). Après le test, il a distingué un écart 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. Par ailleurs, la surface de la plaque de (PTFE) est lisse et présente moins de frottement.

Pour une goutte d'eau de volume  $0.04 \text{ cm}^3$  placée sur la surface isolante de (SR) et (EPDM), avec un certain angle d'inclinaison, Il a observé le non coulissement de cette goutte d'eau sur cette surface.

Enfin, l'auteur a conclu que l'attitude des gouttes d'eau sous champ à courant continu est liée à l'hydrophobicité du matériau isolant ainsi qu'à propriétés extérieures de ce dernier.

### I.2. 2H. J. Kloes et D. König, 1997 [3]

Des expériences ont démontré l'influence des gouttes d'eau sur la valeur du champ électrique. Ce dernier cependant, conduit à la dégradation des propriétés du matériau. Ces auteurs ont traité l'influence des gouttelettes sur la dégradation et le vieillissement d'un matériau polymère sous le champ électrique. Cette dégradation est due essentiellement à l'augmentation du champ électrique local produit par des micros décharges de faible surface entre les gouttes d'eau. Ces décharges censées être une source principale du vieillissement prématuré de la surface. La forme d'une goutte sur un substrat dépend de la tension de la surface du liquide-vapeur  $\tau_{LV}$ , du solide-vapeur  $\tau_{SV}$  ainsi que la tension inter faciale  $\delta_{SL}$ . La figure I. 1 illustre les différentes forces qui entrent en ligne de compte dans la définition de la forme de la goutte en absence de champ électrique ( $\delta_{SL}$ ).



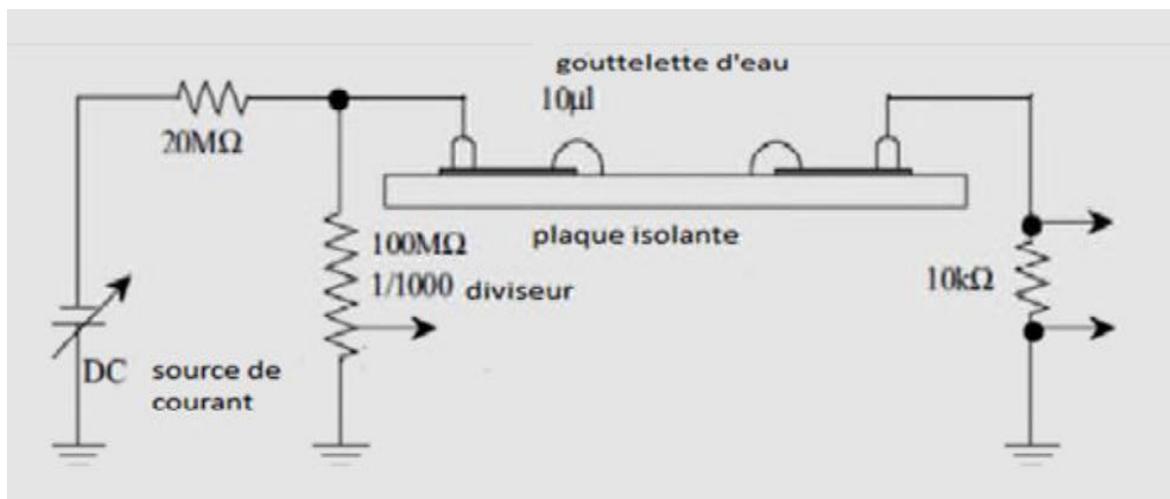
**Fig. I.1:** Forces en présence lorsqu'une goutte est placée sur un substrat en absence de contraintes électriques

Les facteurs responsables de la forme réelle d'une goutte sont l'intensité du champ électrique concerné et le stade de l'hydrophobie de la surface.

### I.2. 3 Y. Higashiyama, S. Yanase, T. Sugimoto, 1998 [4]

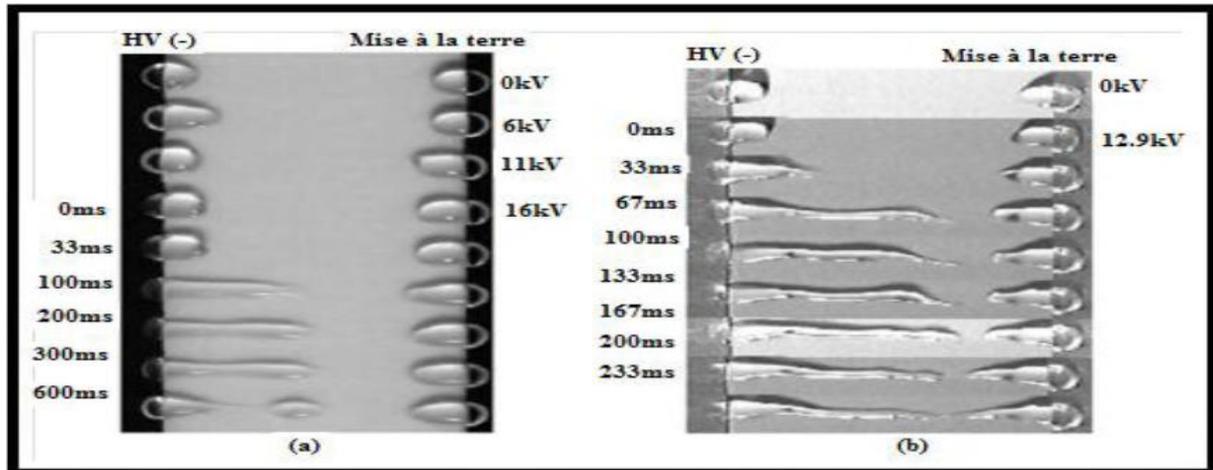
Ces auteurs ont démontré expérimentalement le comportement des gouttes d'eau, placées sur la surface d'une plaque de polymère hydrophobe dans un champ électrique continu, afin de confirmer l'effet d'hydrophobie sur le mouvement de la goutte d'eau, en utilisant trois types de

matériaux, PTFE hydrophobes isolants, le caoutchouc de silicone (SR) et caoutchouc éthylène-propylène (EPDM). Un angle de contact d'une goutte d'eau placée sur la surface isolante est l'une des méthodes d'évaluation de l'hydrophobie (Fig. I. 2). 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 valent  $101^\circ$  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. I.2:** Diagramme schématique du dispositif expérimental

Des images vidéo ont été prises sur le comportement de deux gouttes d'eau placées 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. Ils ont constaté que l'effilement des gouttes d'eau et l'apparition d'un canal est différent entre les deux matériaux. L'angle de contact apparent varie avec le temps pour une tension appliquée constante et certaines quantités de charge ont été émises par micro décharge ou par éjection de petites gouttelettes, bien que la gouttelette d'eau sur la plaque de PTFE s'allonge à 10 kV, il finira par s'arrêter brièvement dès que l'angle de contact apparent commence à diminuer pour une valeur inférieure à  $30^\circ$ . 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.



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

Les auteurs ont observé que le comportement des gouttes d'eau sur la plaque de SR est affecté par la polarité de la tension appliquée. Comme cela est illustré (Fig. I. 3). Une gouttelette négative tend à former un canal d'eau malgré que la disposition du système d'électrodes et des gouttelettes d'eau soit symétrique. Ce comportement peut être expliqué 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. Le comportement des gouttelettes sous champ DC est lié à l'hydrophobicité du matériau isolant ainsi qu'aux propriétés extérieures de sa surface.

#### I. 2. 4 H. Deng et R. Hackam, 1999 [5]

Les matériaux polymères subissent certaines modifications dans leurs structures chimiques produites par la présence des gouttes d'eau sur leurs surfaces, qui provoquent des dégradations de ces matériaux qui enjoignent leurs vieillissements. Ces auteurs ont effectué des recherches sur l'influence des paramètres tels que l'humidité et la pollution sur le fluide de silicone à bas poids moléculaire présent sur sa surface, ainsi la capacité de cette dernière à restaurer l'hydrophobie de la surface après une couche de contamination construite sur elle, et ainsi continuer à supprimer le développement du courant de fuite. Cependant la présence d'un fluide de silicone à bas poids moléculaire suffisant dans la masse du revêtement est un facteur essentiel à la fois la récupération du caractère hydrophobe et son maintien à long terme dans des conditions humides ou polluées. Ce travail a décrit 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.

### I. 2. 5 N. Yoshimura, S. Kumagai, S. Nishimura, 1999 [6]

Les auteurs ont fait l'étude sur la diminution temporelle du 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.

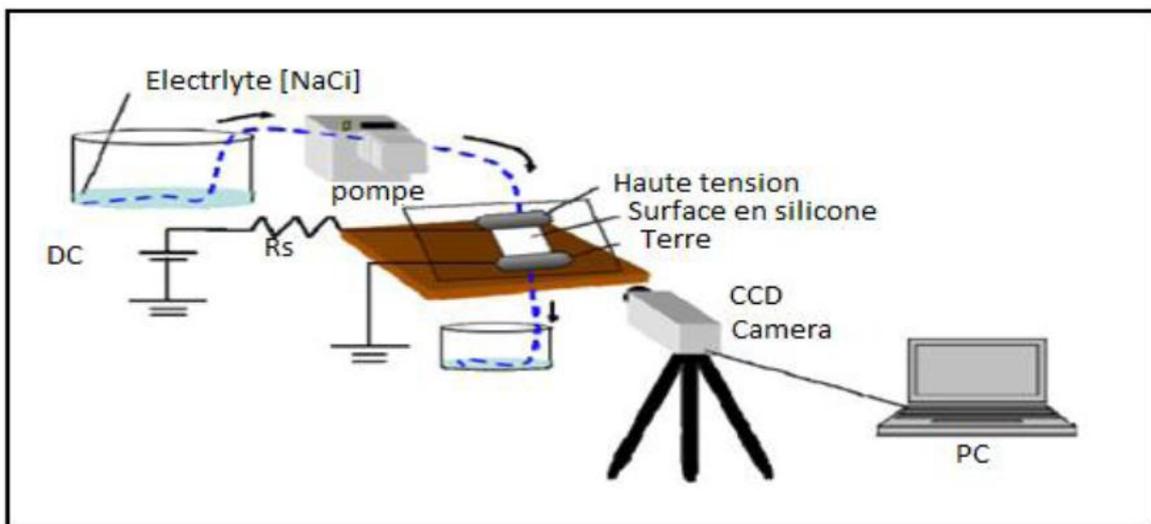
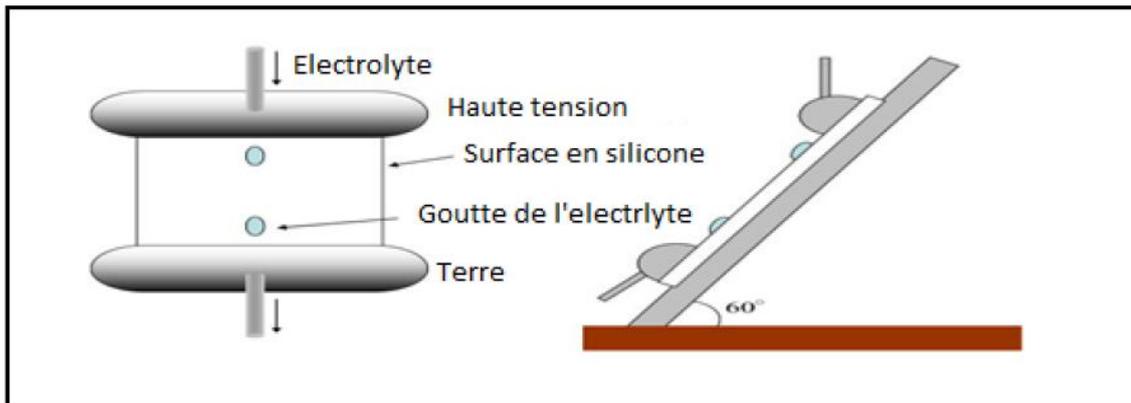


Fig. I.4: Installation expérimentale

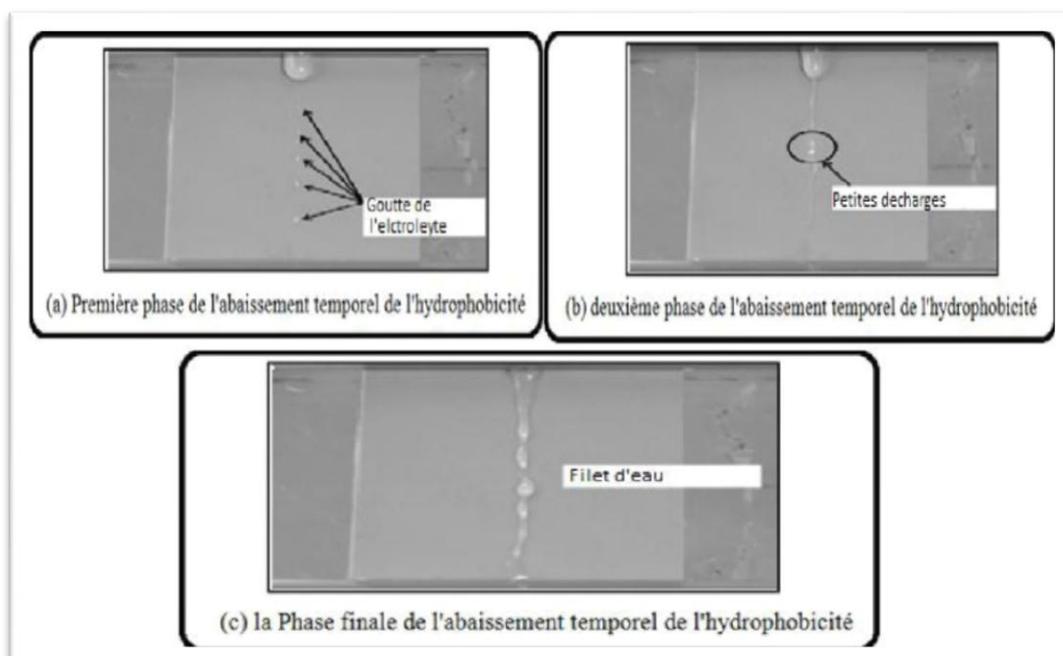
La figure I.4 montre une installation expérimentale avec une source de tension continue et un échantillon d'essai a été arrangé entre les électrodes d'acier inoxydable de 100 mm de largeur. Ils ont laissé tomber l'électrolyte sans interruption pour examiner la surface témoin par un petit passage d'une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

La figure I.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 interélectrodes est de 60 mm, donc le champ électrique appliqué était  $50 \text{ V}/\text{mm}$ .



**Fig. I.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.



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

La figure I.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 les progrès de l'abaissement de l'hydrophobicité, de petites décharges sont vues suivant les indications de la figure I.6(b) la prochaine étape est décrite par la figure I.6(c) 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.

### I.2. 6S.M. Rowland et F.C.Lin, 2006[7]

S. M. Rowland et F. C. Lin [1] ont mené une étude sur la stabilité de la décharge électrique alternative entre les gouttes d'eau sur une surface d'un isolant. Les isolateurs utilisés lors de l'expérimentation sont les polymères, la silicone, le verre. Les gouttes sont déposées à l'aide d'une pipette sur la surface d'un isolant horizontal ou au dessous de la surface sous tension alternative.

La figure I. 7 montre le circuit utilisé par les auteurs pour effectuer leurs essais avec différentes conductivités de gouttelettes. Les électrodes C et D de 25mm, relie à deux gouttes d'eau A et B de volume 0.05ml séparé de 13mm respectivement.

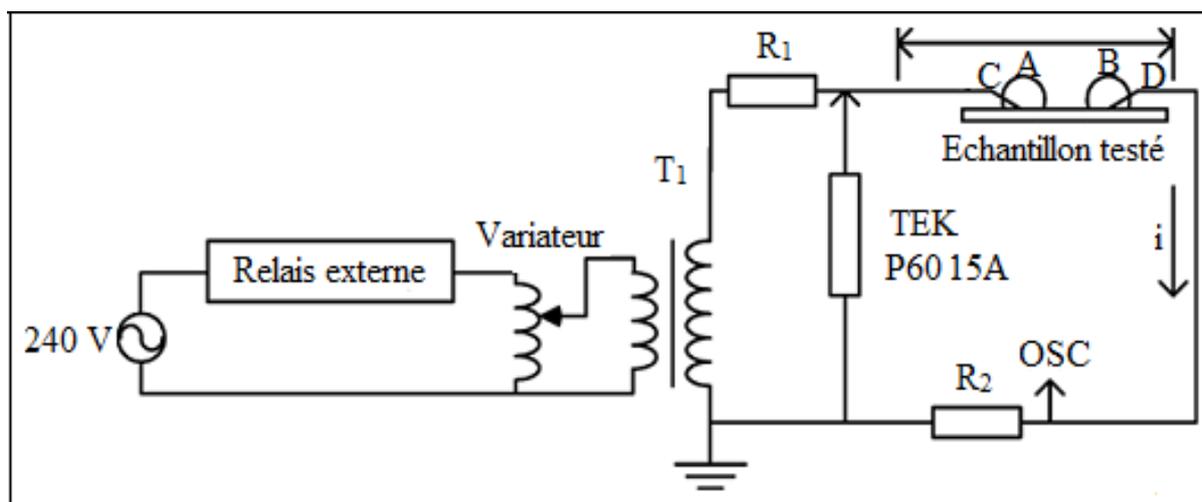


Fig. I. 7: Schéma de circuit électrique

Afin d'étudier la géométrie d'une goutte d'eau, ils ont fait plusieurs essais de dépôt de gouttes sur une surface horizontale. La figure 2 illustre la géométrie d'une goutte d'eau déposée sur une surface isolante en verre (Fig. I.8a) et sur celle d'une isolation en polymère (Fig. I. 8b). Ils ont trouvé que sur les polymères (silicone, PTFE) la forme de la goutte ne change pas lors du contact avec la surface les polymères comparant à celle du verre. Ainsi la silicone et le PTFE ont le même angle de contact avec la goutte d'eau.

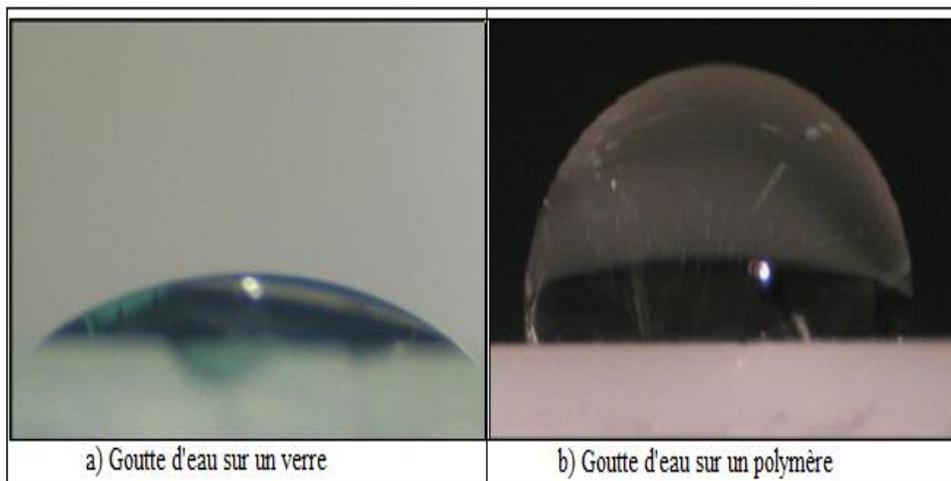


Fig. I. 8: Image de la geometrie de gouttes d'eau sur un l'isolant

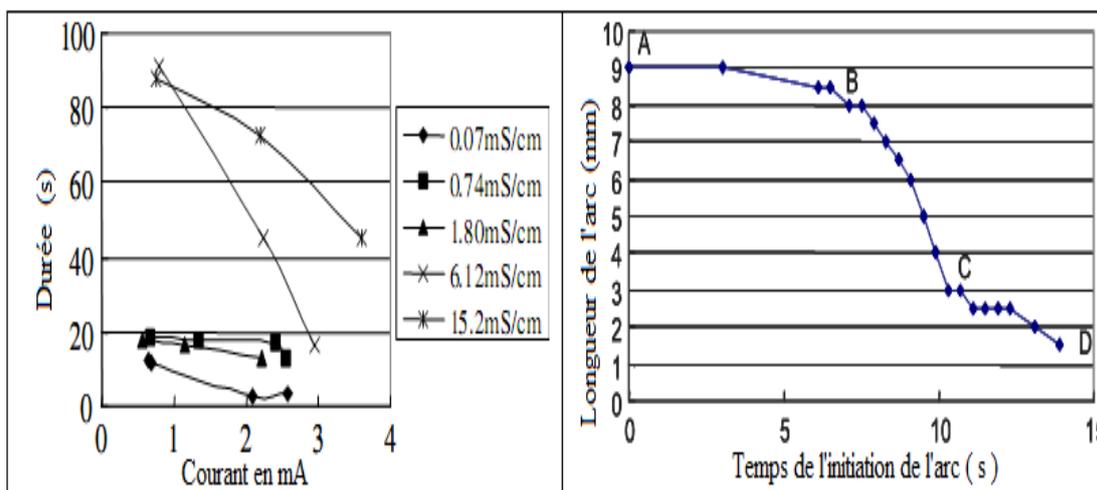
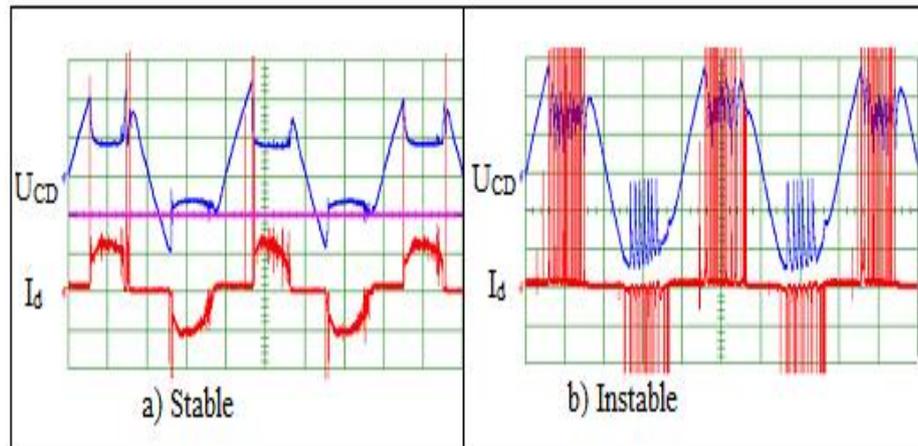
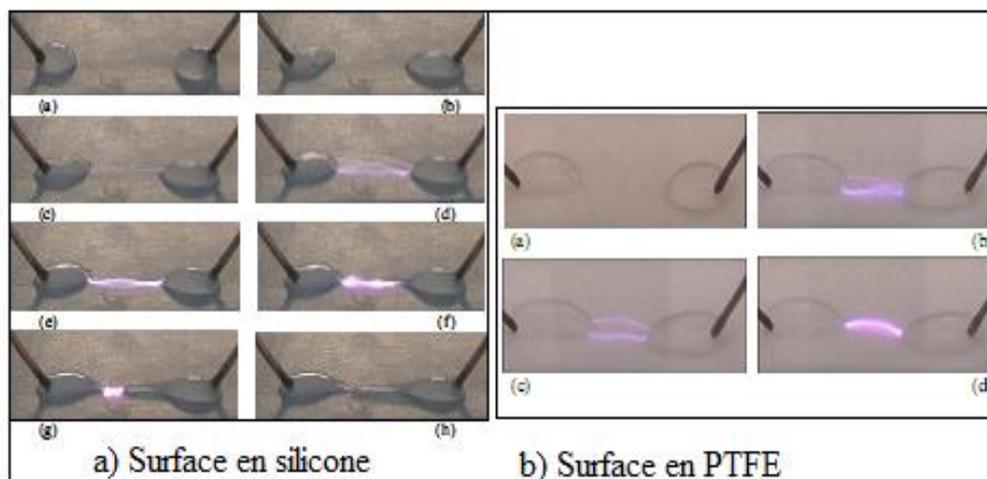


Fig. I. 9: L'effet de la variation de la conductivité sur la durée de la décharge

Il a identifié le mécanisme qui limite la durée du courant de décharge et les gouttes d'eau sur les isolateurs en silicone. La durée de décharge est limitée par l'apparition de filament d'eau qui fixe le chemin de la décharge mais il modifie ces propriétés. La formation de filament d'eau empêche la décharge d'être stable et augmente la température au chemin de la décharge (Fig. I. 10).



**Fig. I. 10:** Forme de la décharge électrique dans les deux cas



**Fig. I. 11:** développement de la décharge sur une surface d'un isolant

Cette étude a permis d'identifier (Fig. I. 11) un mécanisme d'émergence à partir de la gouttes. Ce mécanisme empêche de longue durée de l'activité de décharge à un courant plus de 1mA. Le filament d'eau apparait moins vite au dessous de l'isolateur sous une longue durée d'exposition à la décharge. Le processus de filament d'eau apparait plus vite avec une petite conductivité parce que le champ appliqué est très fort sur les gouttes. Cet effet est crée par l'activité direct des gouttes et ce n'est pas le dépôt de gouttes sur l'isolateur sous un champ.

## I. 2. 7L. Chengrong, Z. Linjie, X. Jun, Z. Shuqi et Y. Jisha, 2008[8]

Les auteurs [8] ont étudié l'influence de la saison sur l'hydrophobicité d'un isolateur en silicone à la zone humide chaude de la Chine. Leur études est basée sur des donnée des testes à l'extérieur sur une ligne de 220kV et trois autres de 110kV pendant une année. La figure I.12 ci-dessous montre la disposition d'un échantillon de l'isolateur sur un toit plat à l'extérieur. Le champ sera opposé à l'isolateur, qu'un coté reçoit plus de lumière et un lavage

par les précipitations qu'un autre coté. Les échantillons sont monté verticalement pendant trois ans pour les testes sur la ligne suscité.

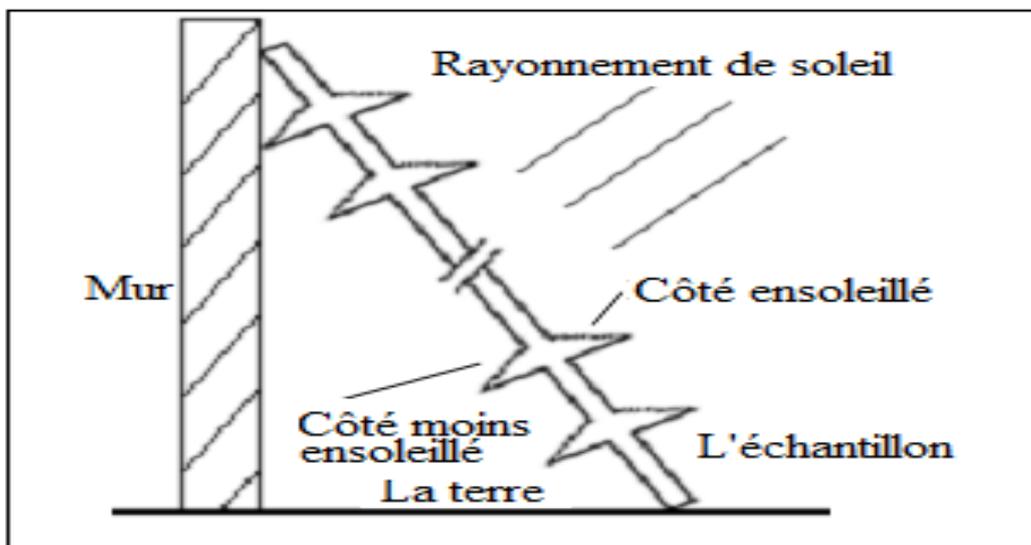


Fig. I. 12: Schéma de l'arrangement du champ sur un isolateur

Ils ont trouvés que l'hydrophobicité de la surface de silicone servi dans cette zone diminue de HC1-HC3 à HC5- HC7 en hiver et récupère en de HC1- HC3 en été (Fig. I. 13 et Fig. I. 14).

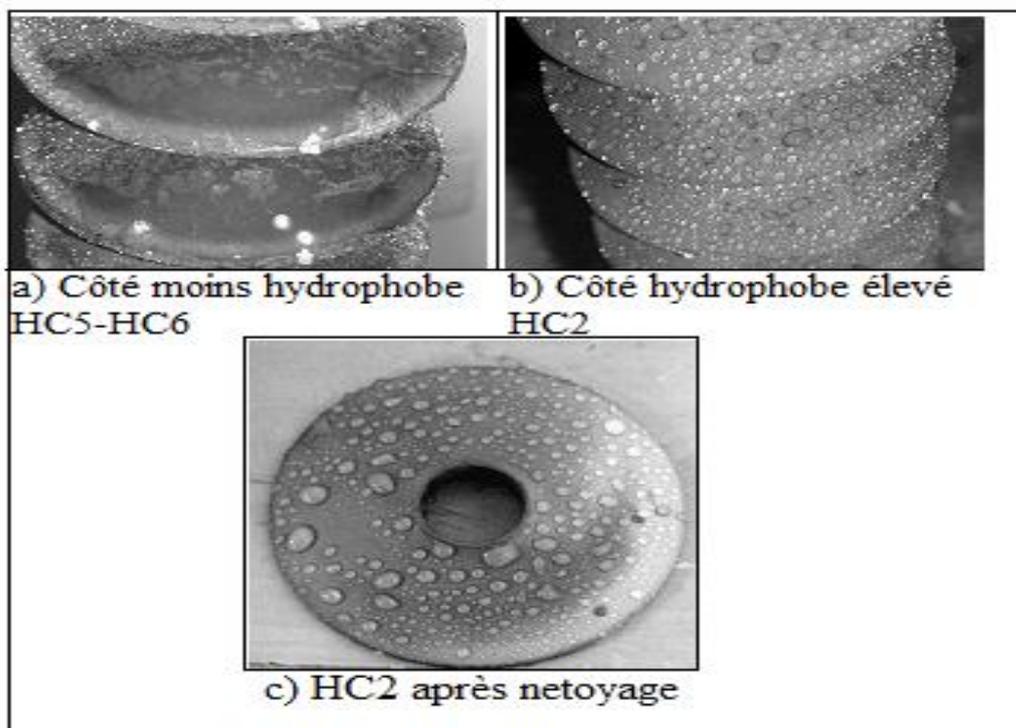


Fig. I. 13: Image illustre le changement d'hydrophobicité

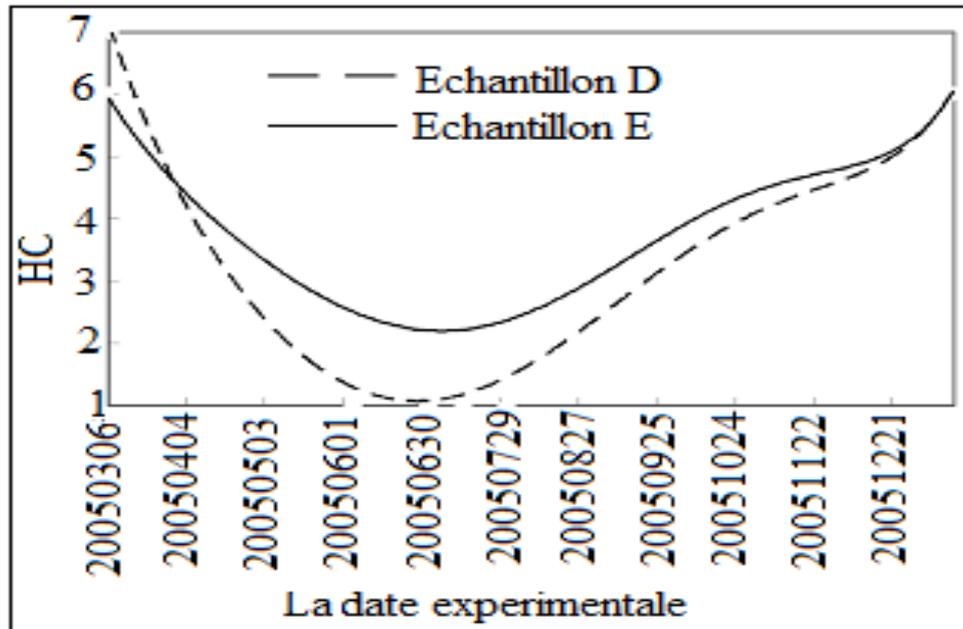


Fig. I. 14: Variation d'hydrophobicité

La perte d'hydrophobicité est due au dépôt continu de la pollution, basse température, le manque de lavage de la pollution par la pluie. Ils ont trouvé que la couche de pollution avec une densité de microstructure peut bloquer le transfert d'hydrophobicité du matériau. Une méthode d'inspection dynamique sur l'hydrophobicité est proposée.

**I. 2. 8J. Vimal, B. Venkatesulu et M. J. Thomas, 2010[9]**

Les auteurs [9] ont fait une étude sur le cheminement et la résistance à l'érosion d'un nano-composite en silicone sous tension continue positive et négative.

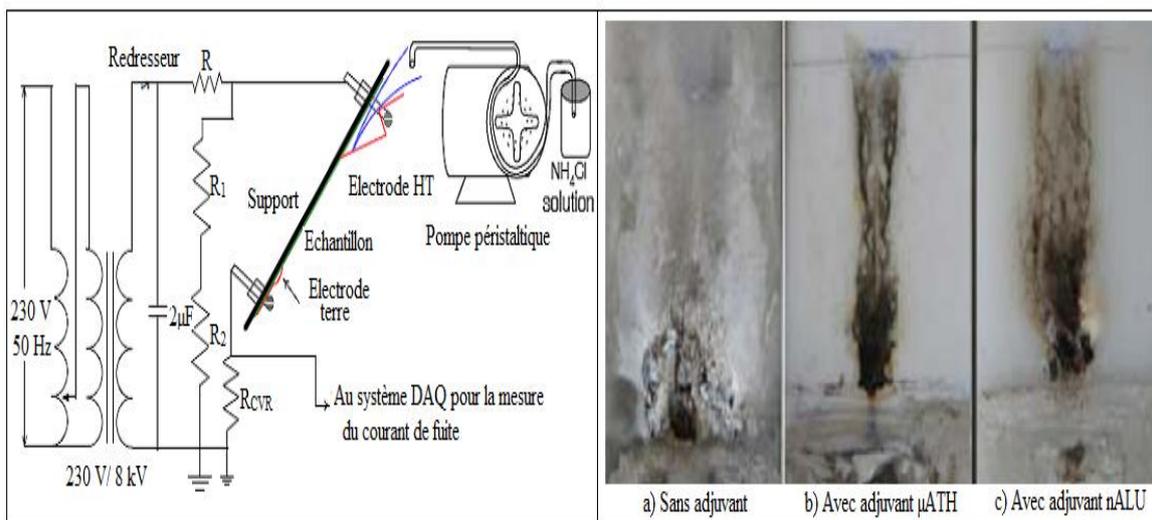
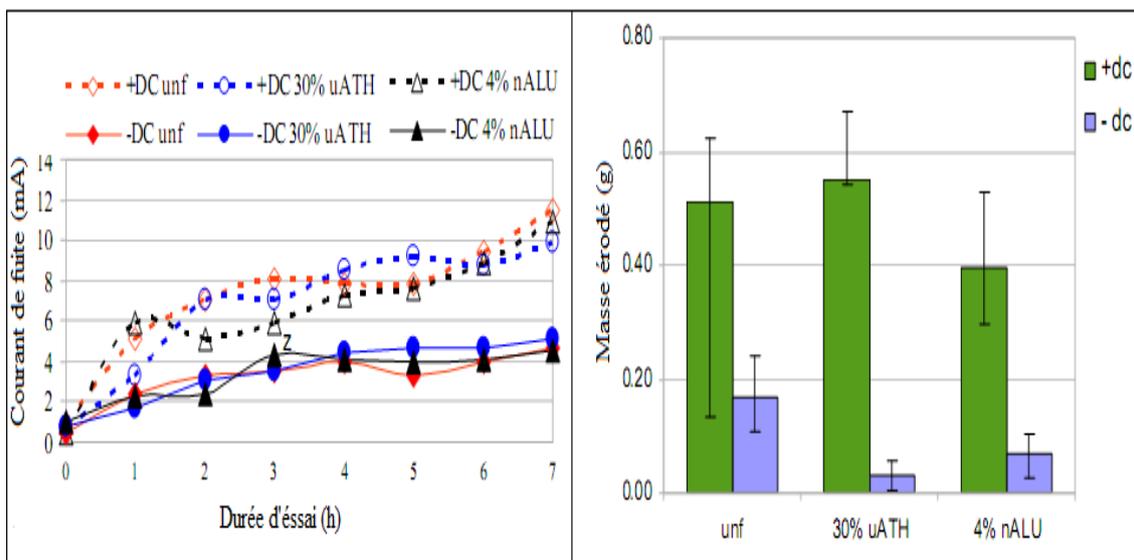


Fig. I. 15 : Schéma de l'installation utilisé et à coté une image de résultat d'un test

Ils ont utilisé la méthode ASTM D2303 pour évaluer la performance des isolateurs en silicone sous tension continue. Les échantillons utilisés avec un adjuvant de tri-hydrate micron d'alumine (uATH), et nano d'alumine (nALU) afin d'améliorer la résistance à l'érosion et le cheminement. la figure I.15 montre l'installation utilisée pour effectuer les essais, et à coté le résultats de test IP.



**Fig. I. 16:** variation de courant de fuite en fonction de la durée d'essai et la masse érodé

La figure I. 16 affirme que la performance de silicone est mieux sous tension continue négative qu'en positive. La silicone chargée avec adjuvant améliore sa performance en DC-. Les échantillons avec un aditif nALU exécuté en parité avec grand chargement de l'additif  $\mu$ ATH, et une meilleure performance quel que soit la tension (- ou +).

### I. 2. 9G. P. Bruce, 2010 [10]

Il a indiqué que l'électrolyse pourrait avoir causé l'érosion de l'électrode haute tension continue positive pour une tension de 2,25kV et 3,15kV. L'auteur a également observé une intense corrosion électrolytique en essai continu positif. Un tel phénomène n'a pas été observé sous tension continue négative. La migration des ions à partir des électrodes dans l'électrolyte aurait pu augmenter la conductivité électrique sur la surface du matériau de la silicone. Cette conductivité accrue entraîne une augmentation du courant de fuite et donc une érosion accrue dans le cas d'un courant continu positif.

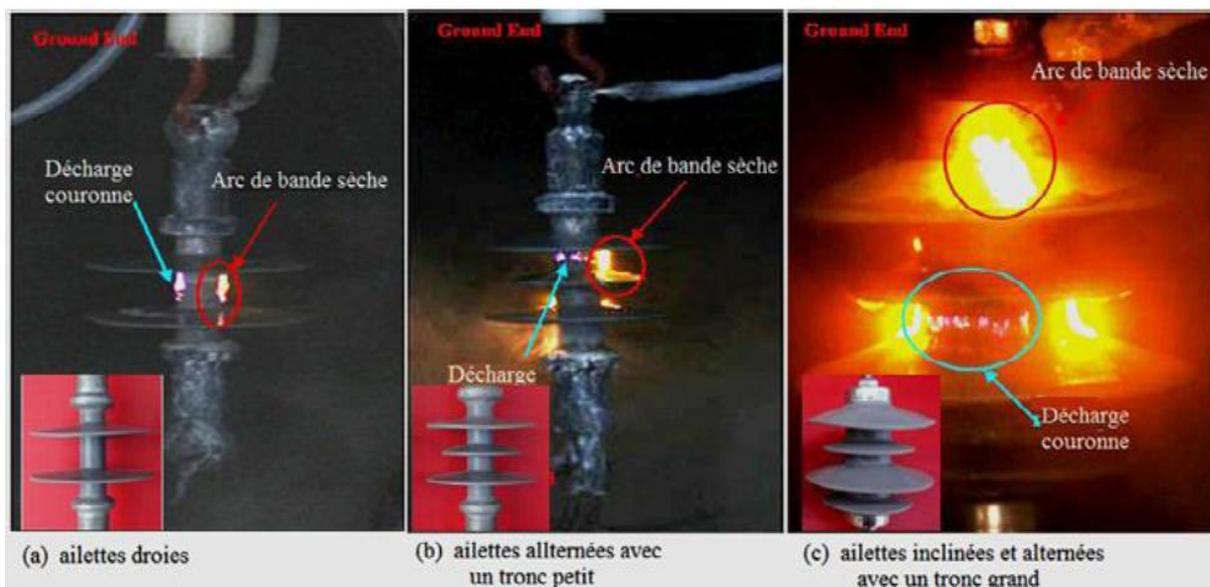
### I.2. 10S. Thong-Om, W. Payakcho, 2011 [11]

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, ailettes inclinées et alternées), ont été testées sans interruption pendant 1000 heures dans une chambre de brouillard salin artificiel (Fig. I.17) 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 de détérioration de la 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 observé l'arc de la bande sèche et décharges couronne sur la surface extérieure du tronc dans tous types d'échantillons (Fig. I.17).



**Fig. I.17:** 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.

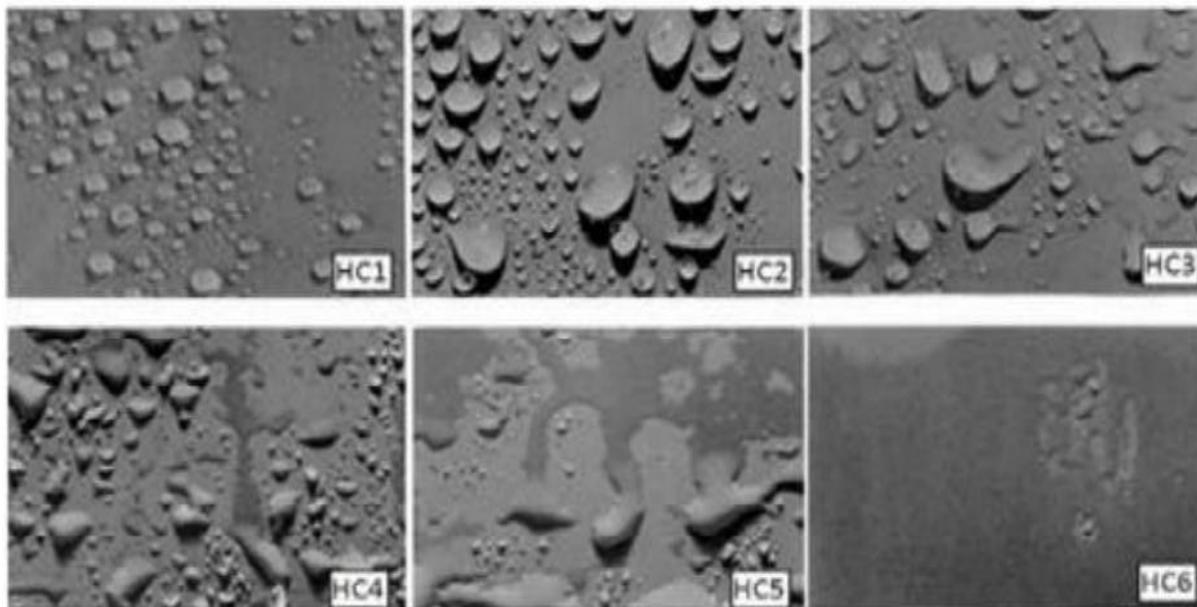


Fig. I.18: Classification d'hydrophobicité (HC1-HC6)

L'évaluation du niveau d'hydrophobicité de la surface des échantillons testés a été basée sur la classification faite selon la figure I.18. Les résultats de mesure de l'hydrophobicité sont affichés sur la figure I.19.

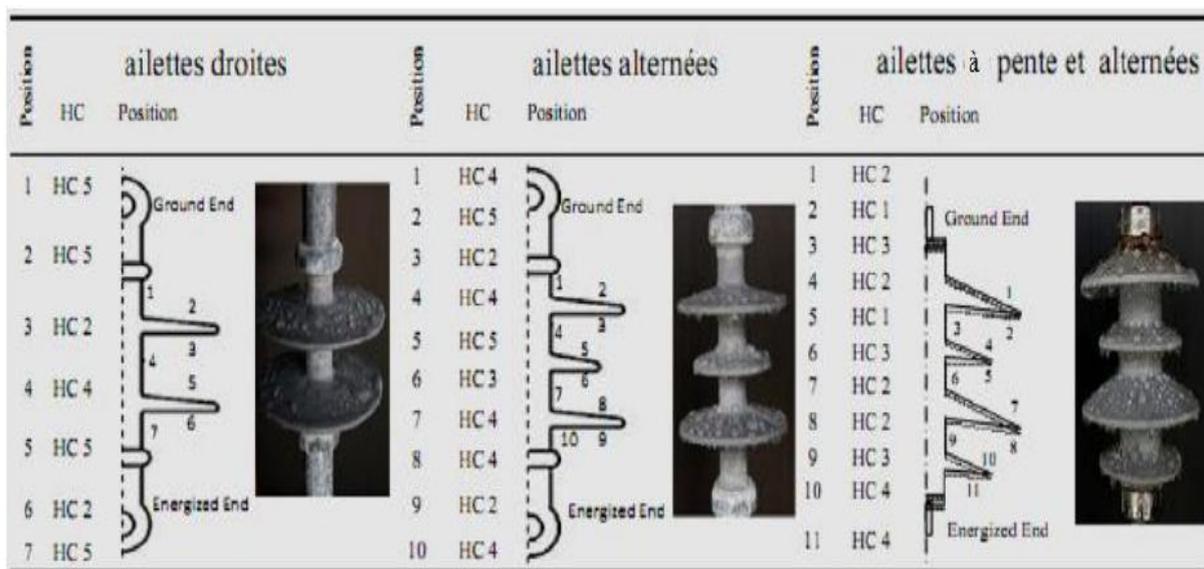


Fig. I. 19: Classification d'hydrophobicité

I.2. 11C. Bär et autres, 2011 [12]

Les auteurs 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 silicones.

Ils ont pu conclure que des amplitudes de tension de rupture sont très élevées en courant continu qu'en courant alternatif comme le confirme la figure I.20.

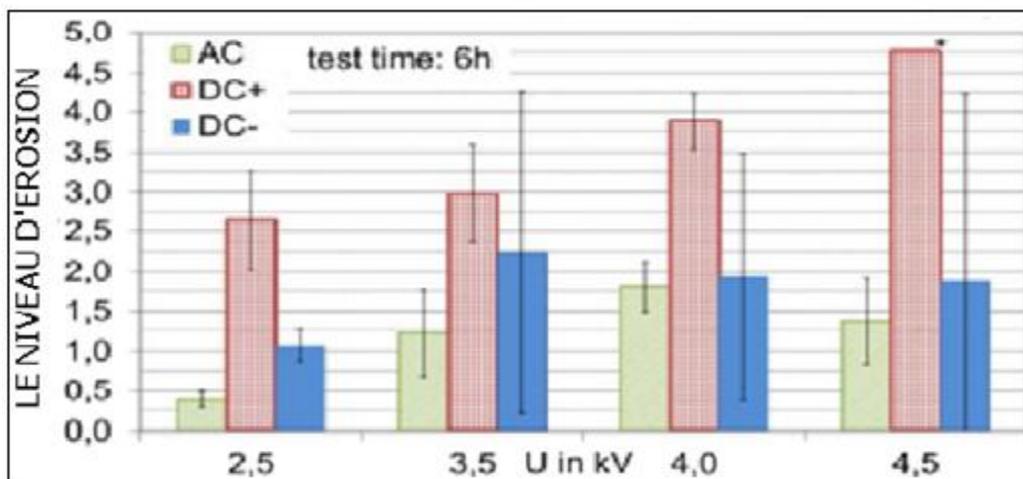


Fig. I.20: Niveau d'érosion en fonction de la tension de claquage sous différentes polarités

Ce phénomène est dû à la forte vibration des gouttelettes d'eau en courant alternatif qu'en courant continu. Car la goutte prend moins temps en AC et de tomber du haut vers le bas que celle du 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 entraînent une augmentation supplémentaire de l'intensité du champ électrique et peut éventuellement conduire à un effet de polarité pour le maintien de l'hydrophobie. La figure I. 21. Illustre la déformation des gouttelettes d'eau.

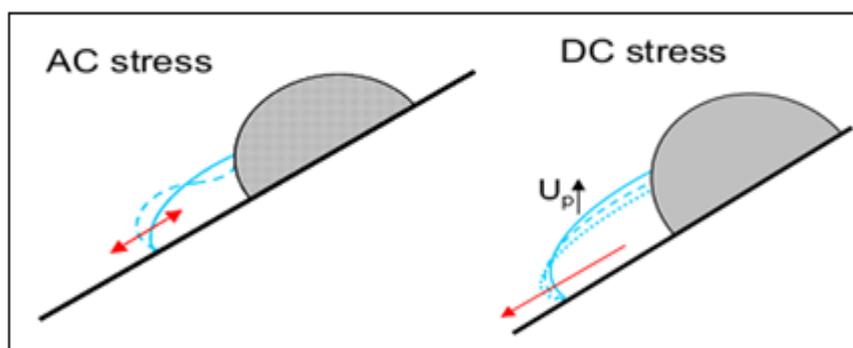


Fig. I.21: Comparaison entre le champ AC et DC

## I.2. 12A. Ouardani, 2013 [13]

L'auteur [13] a fait une étude sur la comparaison 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 sont montrés sur la figure I. 22 . 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 derrière elles.

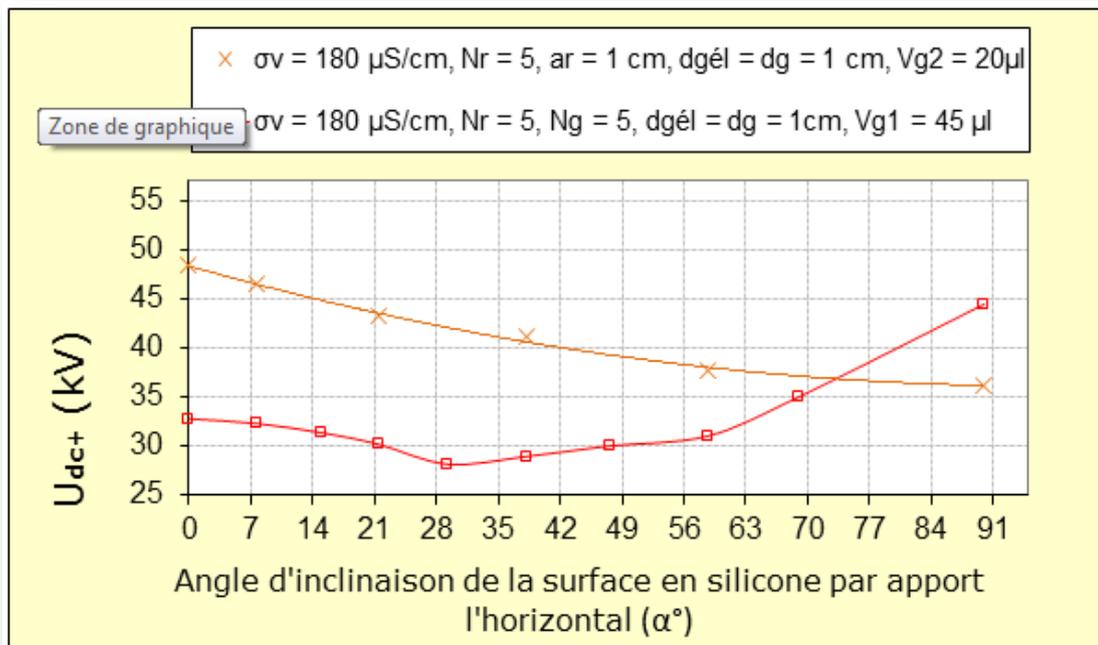
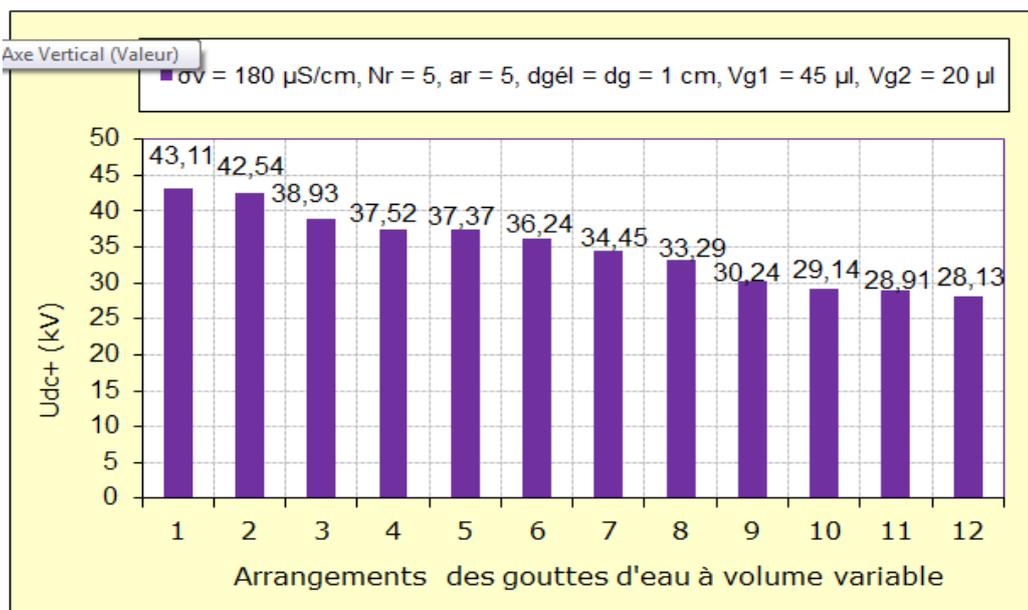


Fig. I. 22: Tension de contournement d'une isolation en silicone hydrophobe

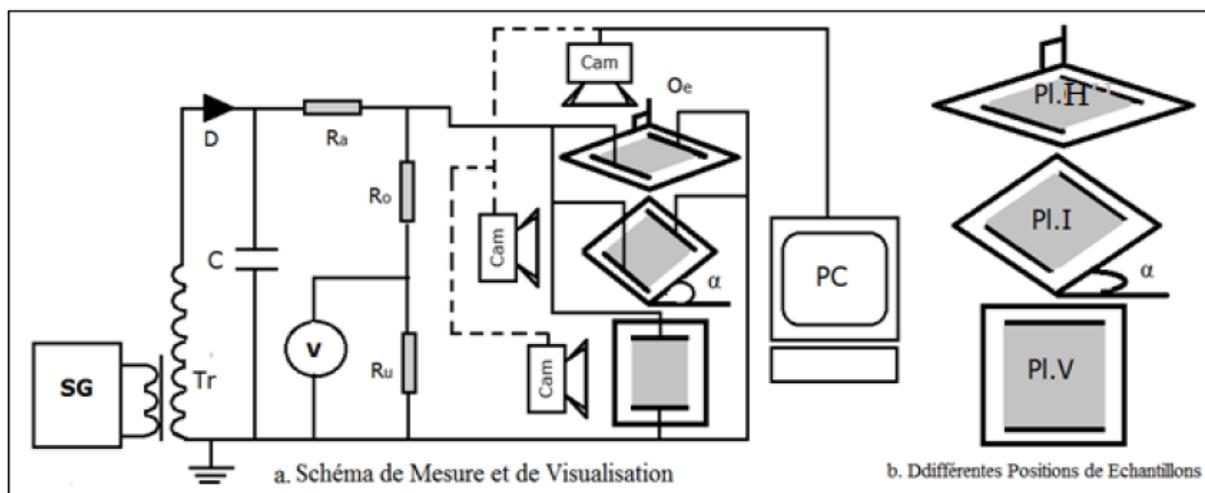
Le résultat de l'auteur sur l'arrangement de gouttes d'eau mixtes à volume différent sur une surface en silicone hydrophobe sous tension continue positive est illustré sur la figure I. 23.



**Fig. I. 23** :Variation de la tension de contournement des gouttes d’eau à volume différents sur une surface en silicone hydrophobe

**I.2. 13 S. Hai et R. Messouaf, 2014 [14]**

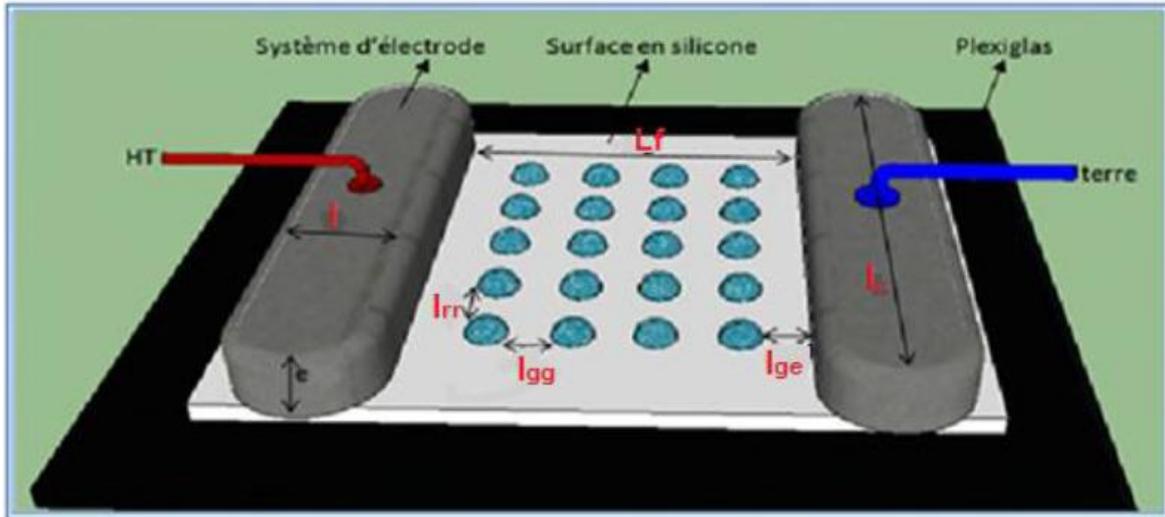
Les auteurs [14] ont fait une étude expérimentale sur l’état de surface d’une isolation en silicone hydrophobe recouverte des gouttes d’eau sur la tension continue de contournement de la surface isolante à inclinaison variable. Ils ont pris comme paramètres d’influence de cette grandeur, l’angle d’inclinaison, 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 I. 24.



**Fig. I. 24** : Schéma de mesure et de visualisation

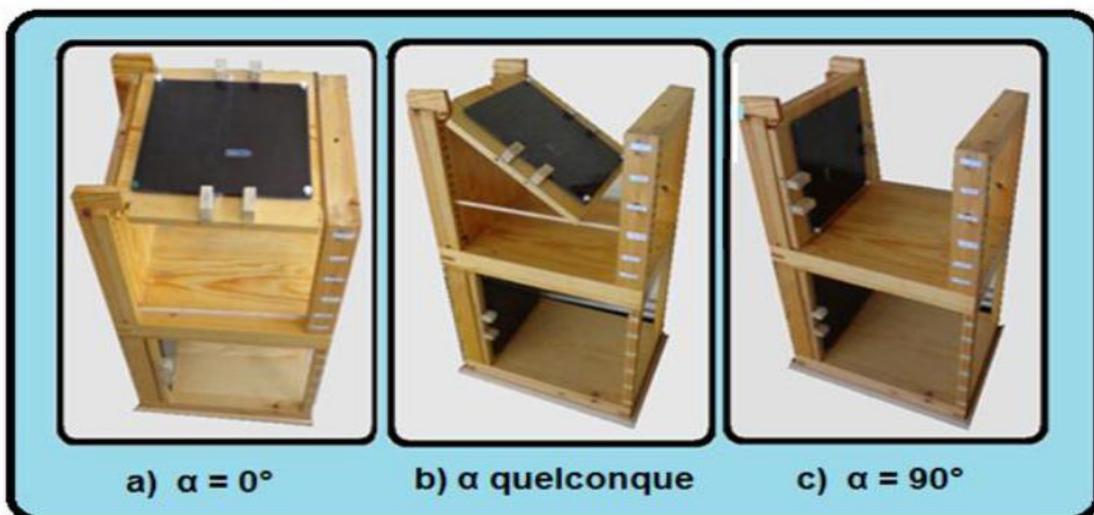
T100 : transformateur 0.08 A /135 kV ; G270 : diode haute tension ; C : capacité de lissage : 10 nF ; Ra : Résistance haute tension de limitation de courant ; R<sub>0</sub> : Résistance haute tension du diviseur résistif ; Cam : Caméscope numérique ; Voltmètre de crête; SG : Appareil de commande manuelle ou automatique du transformateur,  $\mu$  : Résistance d'entrée du voltmètre de crête ;  $\alpha$  : Angle d'inclinaison de la surface

Le modèle expérimental utilisé par les auteurs est donné en figure I. 25 Celui-ci est composé d'un échantillon en silicone, sur lequel reposent deux électrodes identiques dont l'une est reliée à la haute tension et l'autre à la terre.



**Fig. I. 25:** Caractéristiques du modèle

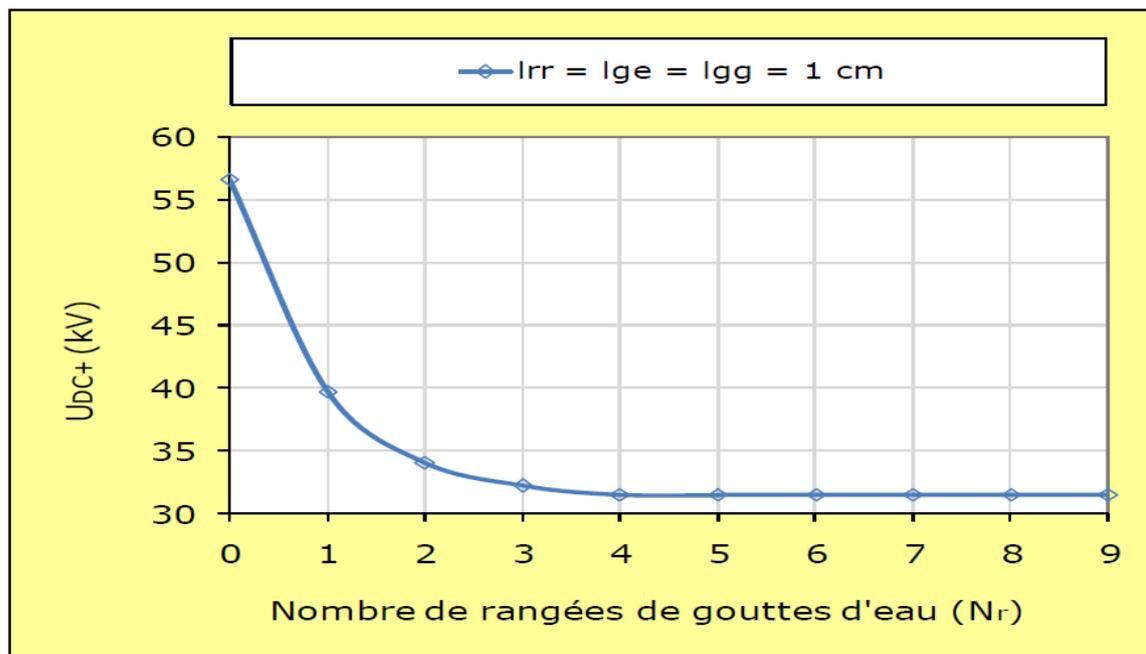
$L_f$  : ligne de fuite entre les deux électrodes de base ;  $L_{ge}$  : Distance entre la goutte et l'électrode HT ou terre;  $L_{rr}$  : Distance entre deux rangées de gouttes d'eau sur la largeur de l'isolation ;  $L_{gg}$  : Distance entre les gouttes;  $e$  : Epaisseur de l'électrode ;  $L$  : Longueur de l'électrode ;  $l$  : Largeur de l'électrode



**Fig. I. 26:** Différentes positions du dispositif

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.

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 I. 27.



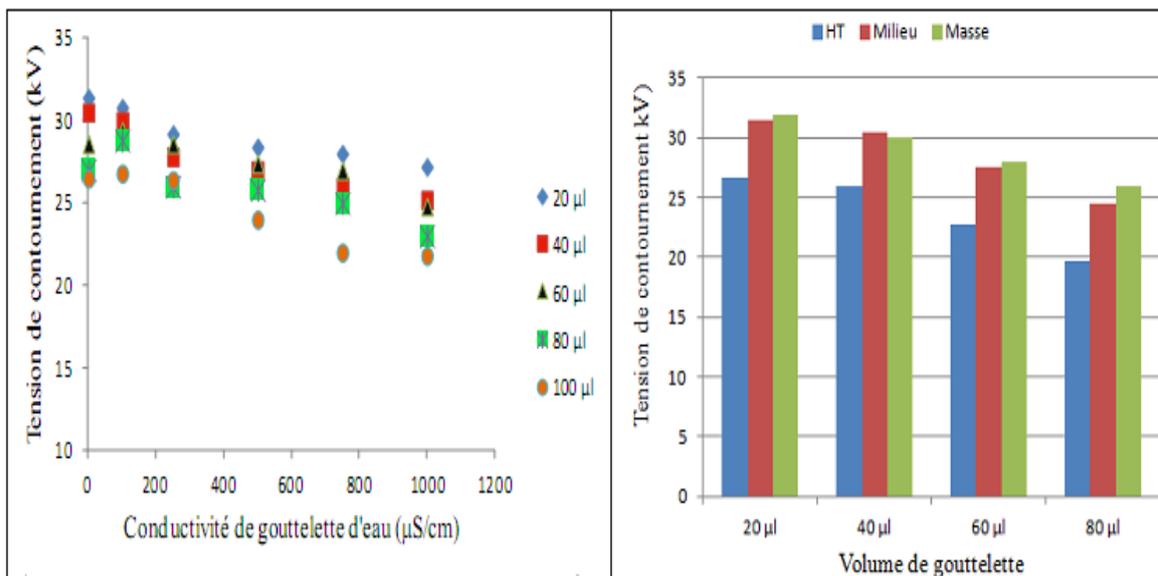
**Fig. I. 27:**  $U_{DC+} = f(N_r)$  d'une surface en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau

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 y 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). La performance de l'isolation en DC+ chute de 44,5 % par rapport au cas où celle-ci est propre et sèche.

## I.2. 14J. Ndoumbe, 2014 [01]

Il [10] a fait une étude comportementale des gouttelettes d'eau déposées sur la surface d'un isolateur composite sous haute tension en présence du champ électrique. Il a étudié leurs déformations selon plusieurs paramètres tels que volume, le nombre, la conductivité de gouttelettes, et leurs positions par rapport aux électrodes. Ainsi que leur influence sur la répartition et le facteur d'amplification du champ électrique. Une formule mathématique de la déformation des gouttelettes d'eau posées sur l'isolateur est développée, leur mécanisme et coalescence.

Les résultats de l'auteur montre que la tension de contournement est réduite lorsque la gouttelette est proche de l'électrode haute tension et plus élevée à cote du l'électrode masse. L'augmentation de la conductivité réduit le seuil de contournement.



**Fig. I. 28 :** Variation de la tension de contournement en fonction de la conductivité et volume de gouttelettes

Leur étude sur l'isolateur en silicone sec ou en présence de gouttelette d'eau soumis à un champ électrique continu. Il a pu conclure que l'augmentation du champ appliqué augmente la déformation des gouttes d'eau. La conductivité a une faible influence tandis que le volume, la position dans l'espace inter-électrodes et le potentiel appliqué ont une influence sur la déformation. Cette déformation est plus élevée à petite taille comparé à la grande taille.

### I.2. 15A. Kechida et KH. Ighmorassen, 2015 [15]

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. Ils ont 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 d'arc électrique évoluant sur les gouttes d'eau déposées sur la surface des échantillons en silicones. La figure I. 29 montre le dispositif expérimental qu'ils ont utilisé (laboratoire de haute tension, cellule des diélectriques de l'université Abderrahmane Mira de Bejaia).

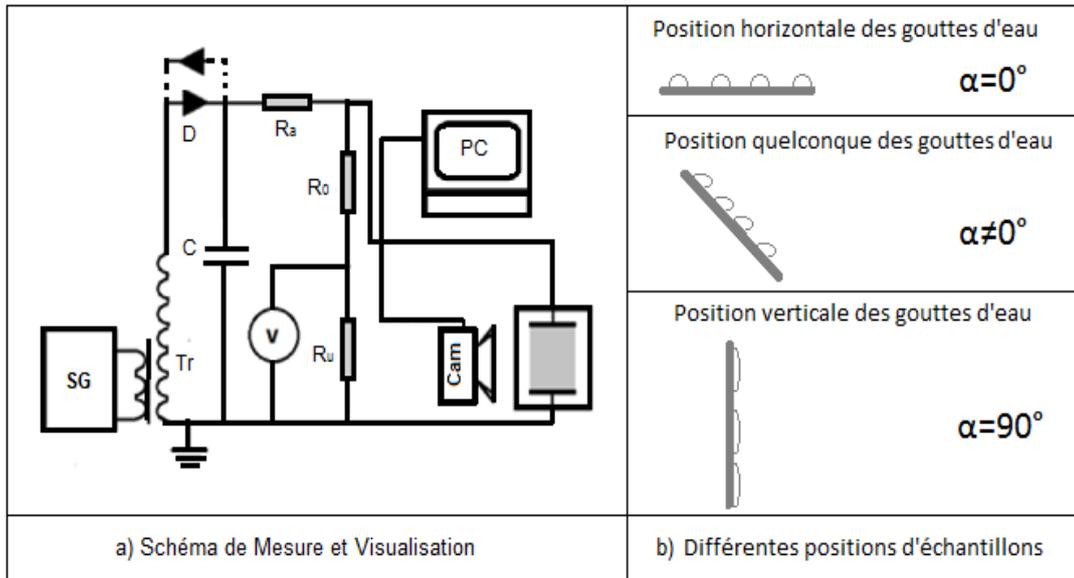


Fig. I. 29 : Schéma de mesure et de visualisation

Leur étude 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. Il a 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.

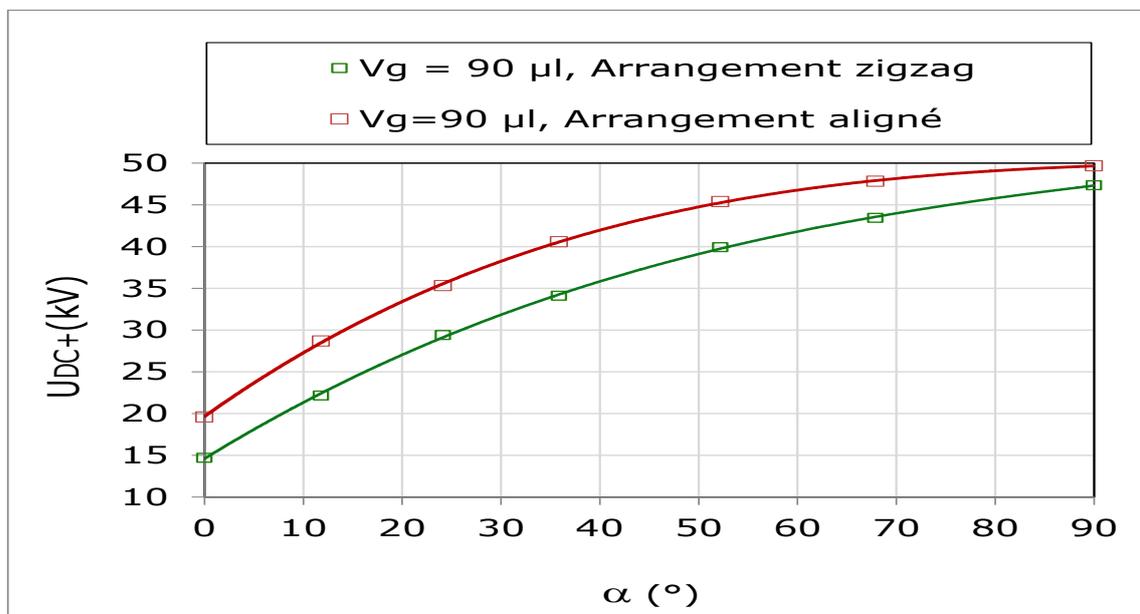


Fig. I. 30 : Variation de la tension de contournement en fonction de l'inclinaison et le volume de gouttes

Il a conclu que La présence des gouttelettes d'eau peut entraîner la perte locale d'hydrophobicité dans l'échantillon 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. Le volume des gouttes influe sur la déformation de celles-ci lors du passage du champ électrique ainsi la tension de contournement diminue avec l'augmentation du volume de gouttelettes. La variation de l'angle d'inclinaison implique la décroissance de la tension de contournement de l'isolation en fonction de l'angle d'inclinaison avec un écart de 17% en DC+ et de 12 % en DC- pour un volume de 30 $\mu$ l. Des valeurs minimales de tension sont obtenues avec les volumes des gouttes de 45 et 60  $\mu$ l dans les angles d'inclinaison critiques 24° et 68° successivement, pour les deux polarités de la tension continue. Pour un volume de 90  $\mu$ l, il en résulte l'accroissement de la tension de contournement en fonction de l'augmentation d'angle d'inclinaison. L'existence du nombre de rangées limite à partir duquel une chute de la performance électrique est estimée à 33% en DC+ et 40% en DC-. Le système étudié est plus rigide en polarité négative qu'en polarité positive. La meilleure rigidité diélectrique est obtenue dans le mode de déposition des arrangements des gouttelettes en aligné.

## I. 3Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une synthèse des travaux réalisés par plusieurs chercheurs sur l'étude de la performance et les caractéristiques de l'isolation en silicone sous tension continue. Ils ont conclu que l'isolation à base des matériaux en silicone soit approprié et demandé dans la haute et moyenne tension grâce à leurs multiples avantages ; leur caractéristique hydrophobe ou leur résistance aux courants de cheminement en présence de pollution,...etc.

L'objectif de notre travail est d'étudier l'effet du mode de disposition de gouttes d'eau en aliénant 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.

## II.1 Introduction

Dans le domaine du génie électrique, il est d'usage d'exploiter les isolants pour assurer une séparation électrique entre des conducteurs portés à des potentiels différents afin de diriger l'écoulement du courant dans les conducteurs désirés, mais aussi pour assurer la protection des personnes et des équipements, ou encore, supporter les éléments d'un réseau électrique et les isoler les uns par rapport aux autres et par rapport à la terre. Il existe une grande variété d'isolants solides, liquides et gazeux. En plus des isolants naturels, on trouve sur le marché de nombreux isolants synthétiques (silicone) qui ont été développés pour différentes applications. Cependant, la durée de vie de ces isolants conditionne celle de l'appareil dans lequel ils sont intégrés. Ces derniers jouent un rôle à la fois mécanique et électrique dans la sécurité du transport et la distribution de l'énergie. Pour cette raison, plusieurs études sont menées sur différents matériaux isolants, en particulier les polymères, pour comprendre leur comportement à l'échelle microscopique que macroscopique, notamment sous contrainte électrique, thermique et environnementale.

## II.2 Définitions

### II.2.1 Isolants [16, 17]

Un isolant est une substance dont la conductivité est nulle, ou en pratique très faible.

On peut considérer comme isolant, tous les matériaux dont la résistivité est supérieure à  $10^{10}$   $\Omega$ .cm.

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

### II.2.2 Isolations

C'est un système constitué par des matériaux isolants ou un assemblage des 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 longtemps l'appareil touché, lequel peut même être mis définitivement hors d'usage (papier imprégné d'huile, hexafluorure de soufre SF<sub>6</sub>).

#### II.2.3 Diélectrique [17]

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

#### II.2.4 Isolateur

L'isolateur est un élément fait en matériau isolant de conductivité volumique très faible et présente une très grande résistivité superficielle au passage du courant. Il est utilisé pour isoler les conducteurs et les pièces sous tension afin d'empêcher les court-circuits, les pertes de courant de fuite et les charges d'électrocution.

### II.3 Propriétés diélectriques des matériaux isolants

#### II.3.1 Résistance et résistivité

##### II.3.1.1 Résistance et résistivité transversale [18]

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. 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 à la propriété interne du matériau.

##### II.3.1.2 Résistance et résistivité longitudinale [18]

La résistance superficielle est celle qui intervient entre deux conducteurs sur une même surface isolante. C'est une notion qui fait intervenir autre la qualité des matériaux, le dépôt d'une mince couche conductrice (humidité ou autre) à travers laquelle s'effectue en tout ou en partie la conduction. Dans les matériels électroniques (cartes imprimées) l'isolement principal entre deux conducteurs est assuré par la surface de l'isolant, d'où l'importance pratique de la détermination de la résistance longitudinale. Cette résistance comporte d'une part la résistance purement superficielle, mais aussi une certaine fraction de la résistance interne du matériau.

Les valeurs relatives de ces deux composantes de la résistance sont fonction de divers paramètres et notamment de la largeur et de l'écartement entre conducteurs ainsi que de l'état d'humidification respectif des couches superficielles et interne du matériau.

Par définition, 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. La résistivité superficielle est le quotient du gradient de potentiel en surface et le courant par unité de largeur.

### II.3.2 Rigidité diélectrique

On appelle la rigidité diélectrique d'un isolant est la tension qui provoque la perforation d'un centimètre d'épaisseur de l'isolant [16].

La rigidité diélectrique d'un matériau isolant s'évalue par l'intensité 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'essais spécifiées et la distance entre les deux électrodes aux quelles est appliquée la tension. La figure II.1, montre les positions relatives des conducteurs et de la surface des matériaux.

La mesure de la rigidité diélectrique est effectuée selon :

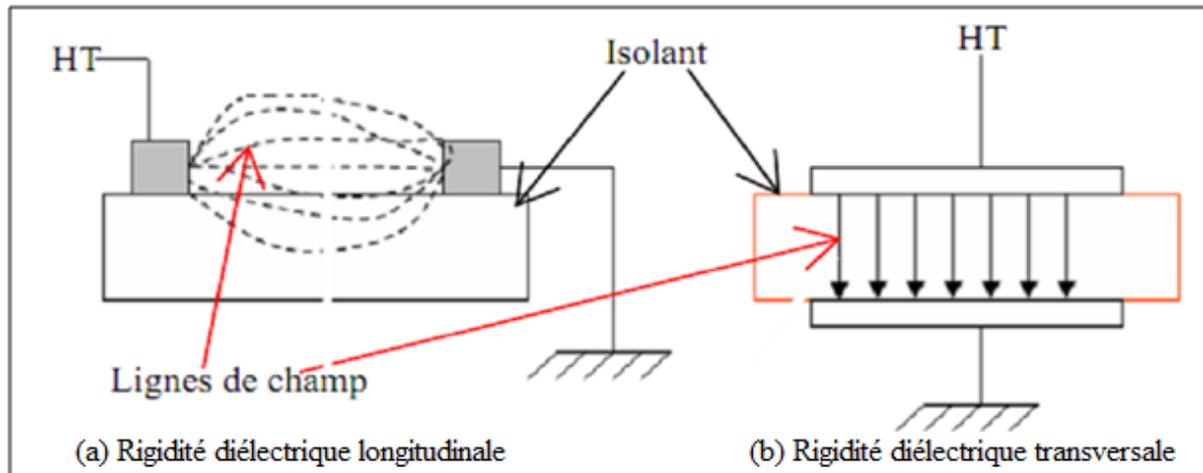
$$E_d = \frac{U}{d} = \frac{\sqrt{2}}{d} U_{\text{eff}} \text{(II. 1)}$$

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

d : distance interélectrode.

#### II.3.2.1 Rigidité diélectrique longitudinale [19]

Elle dépend peu de la nature de l'isolant mais beaucoup plus de son état sec et propre. En effet dans la plus part des cas, l'amorçage ou décharge entre deux conducteurs se produit d'abord dans le milieu ambiant ou voisinage de la surface du solide. Elle est obtenue entre deux conducteurs situés sur une même surface (Fig. II.1a).



**Fig. II. 1:** Rigidité diélectrique

### II.3.2.2 Rigidité diélectrique transversale [18]

C'est celle pour laquelle le champ électrique appliqué est perpendiculaire à la surface principale du matériau (Fig. II.1b). Dans les conditions pratiques cette rigidité est fonction de nombreux paramètres expérimentaux et particulièrement des 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 de l'effet des facteurs externes, on parle alors de rigidité diélectrique intrinsèque. Le rapport de la rigidité intrinsèque  $E_{di}$  sur la rigidité pratique  $E_{dp}$  dépend de la nature de l'isolant. La rigidité diélectrique transversale est calculée d'après la mesure de la tension nominale, pour une vitesse de montée, en tension donnée, la rupture de rigidité diélectrique de l'isolant se trouvant entre deux électrodes selon sa plus faible épaisseur.

### II.3.3 Permittivité [16]

Lorsqu'un diélectrique est soumis à l'action d'un champ électrique  $E$ , 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. Ce dernier est opposé au champ électrique extérieur  $E_e$  appliqué.

#### II.3.3.1 Permittivité relative

Cette caractéristique des isolants solides et liquides porte le nom de la permittivité relative  $\epsilon_r$ .

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

$$\varepsilon_r = \frac{C_x}{C_0} \quad (\text{II. 2})$$

### II.3.3.2 Permittivité absolue

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

$$\varepsilon_a = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \quad (\text{II. 3})$$

Avec :

$$\varepsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$$

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

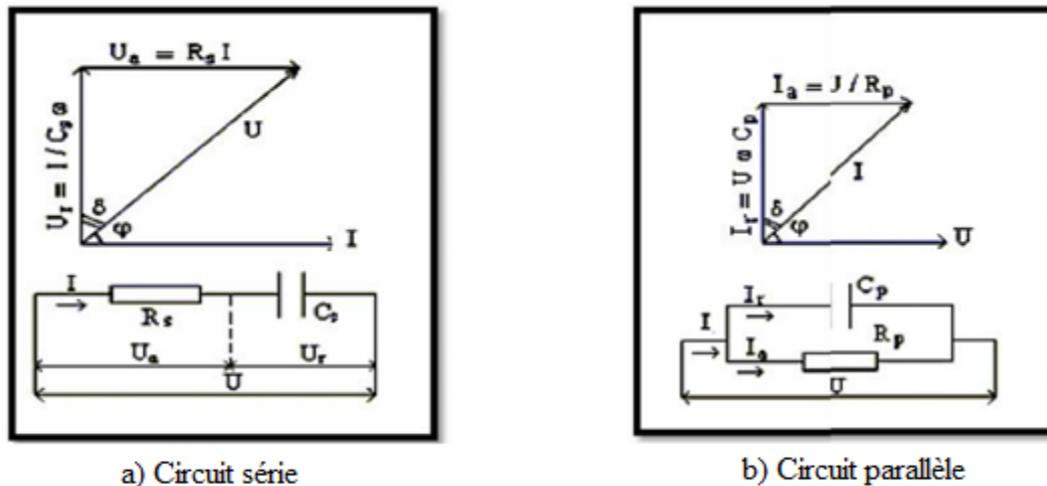
$$\varepsilon_r^* = \varepsilon_r' \cdot \varepsilon_r'' \quad (\text{II. 4})$$

Où  $\varepsilon_r'$  est la partie réelle de la permittivité complexe, jouant le même rôle que  $\varepsilon_r$  dans les cas du diélectrique parfait.

$$\varepsilon_a^* = \varepsilon_r^* \cdot \varepsilon_0 \quad (\text{II. 5})$$

### II.3.4 Angle de pertes et facteur de dissipation [13]

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 série et parallèle (Fig. II.2).



**Fig. II.2:** Circuits équivalents série et 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:

$$\tan \delta = \frac{I_r}{I_a} = \frac{U_a}{U_r} = \frac{P_a}{P_r} \quad (\text{II.6})$$

D'après la formule (3), on peut écrire:

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} \quad (\text{II.7})$$

Le produit  $\varepsilon_r'' = \varepsilon_r' \cdot \tan \delta$  est dénommé indice de pertes, car il caractérise l'énergie dissipée dans le diélectrique.

### II.3.5 Propriétés thermiques

Elles caractérisent la résistance à la chaleur qui est donnée par la température nominale que peut supporter un matériau sans subir de transformation interne ou un vieillissement prématuré, elles permettent de préciser le point d'inflammation et de fusion.

### II.3.6 Propriétés mécaniques

Elles caractérisent la résistance aux différents agents chimiques tel que: les acides, Les sels et les bases, la résistance aux agents atmosphériques, l'humidité, aux huiles, aux Graisses et aux solvants.

## II.4 Facteurs climatiques influençant sur les isolants

Parmi les facteurs climatiques et essentiels on distingue:

### II.4.1 Température

Lorsque la température croît la rigidité diélectrique est soit constante, soit légèrement décroissante puis à partir d'une certaine température limite appelée température de transition une décroissance très rapide.

### II.4.2 Humidité

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

## II.5 Différents types d'isolants

On peut classer les isolants en trois catégories suivantes :

### II.5.1 Isolant gazeux [19]

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

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

Les principaux isolants gazeux sont: l'air atmosphérique, l'azote, gaz rares, l'hydrogène, L'hexafluorure de soufre ( $\text{SF}_6$ ).

L'hexafluorure de soufre est un composé chimique de soufre et de fluor, de formule chimique  $\text{SF}_6$ , sans odeur, incolore. Ce gaz est un excellent isolant électrique. Sa rigidité diélectrique est 2,5 fois supérieure à celle de l'air.

### II.5.2 Isolants liquides [19]

Les liquides diélectriques sont souvent utilisés en association avec des solides (transformateurs, condensateurs câbles). Exemples l'huile borak 22 et l'huile silicone.

Ils ont pour rôle de se substituer aux vacuoles qui sont sources de décharges partielles.

Les liquides sont utilisés pour :

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

**II.5.3 Isolants solides [20]**

Les isolants sont d'origines minérales, organiques et résineuses.

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

**II.5.3.1 Matériaux utilisés pour les isolants solides**

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

**II.5.3.1.1 Porcelaine [17]**

La porcelaine est composée 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.

Les propriétés électriques, mécaniques et thermiques sont les suivantes:

- Rigidité diélectrique élevée, 25 à 35 kV/mm;
- Permittivité relative  $\epsilon_r = 6$  à 7;
- Grande résistivité, environ  $10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$  à 20°C;
- Faibles pertes électrique en basse fréquence et en haute tension;
- Résistance mécanique 2500 à 4000 N/mm;
- Résiste aux chocs thermiques;
- A une forte résistance au vieillissement et aux agressions climatiques ou chimiques;
- Elle a généralement une conductivité thermique faible;
- Elle présente aussi une grande résistance aux températures élevées sauf qu'au-delà de 300°C ; ces propriétés diélectriques diminuent rapidement.

**II.5.3.1.2 Verre [17-21]**

Le verre est un alliage dur, fragile (cassant) et transparent à la lumière visible. C'est un corps solide constitué d'oxyde de silicium (silice  $\text{SiO}_2$ ) et de fondants, le constituant principal du sable.

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

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

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

**II.5.3.1.3 Silicone [22]**

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

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

Mais leurs avantages ne se limitent pas aux isolateurs. Aujourd'hui, on utilise les silicones isolants dans toutes les applications MT et HT exigeant une haute sécurité de fonctionnement

et une grande longévité, par ex. dans les transformateurs, sous forme d'huile, ou dans les extrémités de câbles haute tension [23].

**a) Propriétés de la silicone [24]**

Les silicones se distinguent par quelques propriétés fondamentales :

- Liaison Si-O 'forte' et grande inertie chimique;
- Bonne stabilité thermique (de - 80 à + 250 °C);
- Bonne stabilité chimique et tenue au vieillissement naturel;
- Propriétés modulables d'anti adhérence ou d'adhésion;
- Bonne tenue au feu sans dégagement de fumées toxiques;
- Isolation électrique;
- Bonne tenue aux UV par rapport aux autres polymères;
- Flexibilité à froid de la chaîne polymérique;
- Faible dépendance des propriétés mécaniques (viscosité,...);
- rigidité diélectrique 15 kV/mm;
- Permittivité relative à 25 °C et de 5,4;
- Facture de dissipation diélectrique à 25 °C et 10 kHz ;  $\text{tg } \delta = 4 \text{ à } 5 \cdot 10^{-3}$ ;
- Conductivité thermique : 0,41 à 0,62 W/m.K;
- Température d'auto-inflammation est supérieure à 300 °C;
- Masse volumique de 2300 à 2800 kg/m<sup>3</sup>.

**b) Grandes familles de silicones [23]**

Généralement on s'accorde à regrouper l'ensemble de ces produits en trois grandes familles:

- les fluides ;
  - les résines ;
  - les élastomères ;
- Les fluides sont des systèmes linéaires de PDMS, dans lesquels, le nombre d'atomes de silicium dans la chaîne peut être supérieur à 1 000. Comparées aux huiles minérales, ils ont une viscosité constante dans une large plage de températures. Les fluides se caractérisent par une structure hélicoïdale et un pouvoir d'étalement élevé qui s'accompagne de la possibilité de développer des propriétés spéciales comme l'hydrophobie .De même, les groupements méthyle étant apolaires et non associables, les chaînes glissent les unes sur les autres pour

s'étaler en couches extrêmement minces. Leur caractère inerte peut être modifié en introduisant des groupements réactifs.

- Les résines sont des chaînes siloxanes s'étendant des produits intermédiaires aux résines de poids moléculaire élevé et de structure forte variable. Mais toutes les résines ont un point commun : leur haut degré de réticulation. Les produits intermédiaires ouvrent des multiples possibilités d'association à des résines organiques pour former des copolymères. La réticulation se déroule à température élevée sur une durée assez prolongée au cours de laquelle la résine passe par une phase thermoplastique.

- Les élastomères sont des produits qui présentent de bonnes propriétés élastiques par une faible vulcanisation des divers composants de la formulation.

### c) Structure moléculaire de la silicone

La structure des silicones, ou chimiquement parlant, des polyorganosiloxanes, est analogue à la structure organique du quartz modifié. Leur motif de base se compose d'une alternance d'atomes de silicium et d'oxygène (Fig. II.3). La haute énergie de liaison du chaînon de base silicium oxygène (Si-O-Si-O) confère aux silicones une haute stabilité minérale, nettement supérieure à celle des polymères à motif carbone (C-C), comme par exemple l'EPDM. À titre de comparaison, l'énergie des liaisons C-C est de 348 kJ/mol et celle d'une liaison Si-O de 444 kJ/mol. La lumière solaire de courte longueur d'onde (300 nm), renfermant une énergie d'environ  $6,2 \cdot 10^{-22}$  kJ (= 398 kJ/mol), peut entraîner la rupture des liaisons C-C tandis que la liaison Si-O reste stable.

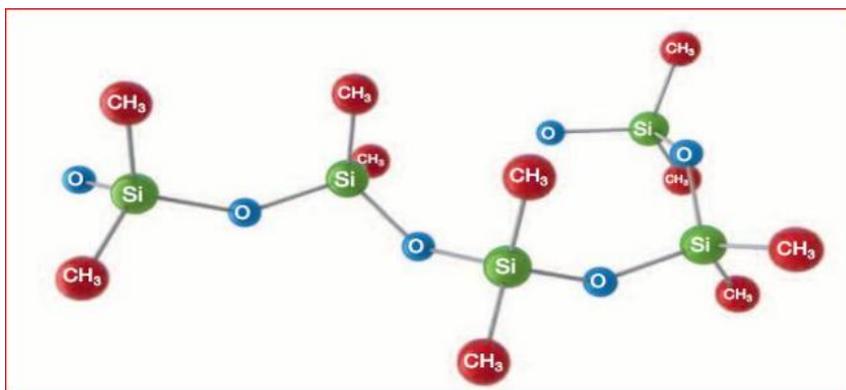
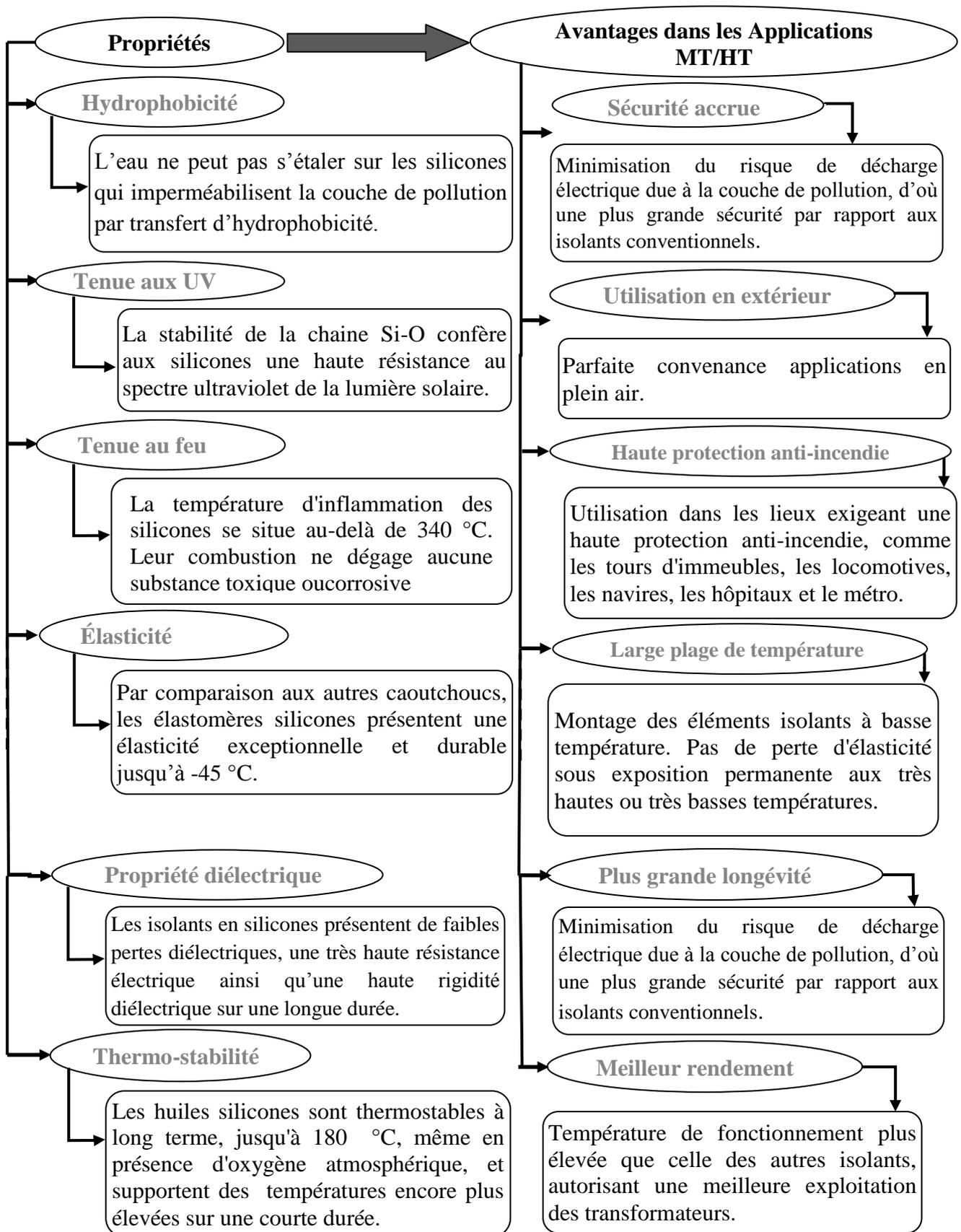


Fig. II.3: Structure chimique de la silicone [23]

### d) Caractéristiques des propriétés fondamentales dans diverses applications

Les caractéristiques des propriétés de la silicone et leurs avantages dans les applications [23]

MT/HT représentées sur le schéma suivant:



### e) Elastomères silicones

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

Les propriétés générales des élastomères silicones, comme celles des PDMS, présentent des avantages par rapport aux élastomères organiques traditionnels [23]

Une décroissance plus faible de leurs propriétés mécaniques avec la température. Un domaine de température d'utilisation plus large ( $-50$  à  $+220^{\circ}\text{C}$ ) et une faible température de transition vitreuse ( $150\text{K}$  ou  $-123^{\circ}\text{C}$ ). Dans ce domaine de température d'utilisation, compte tenu de l'absence de changement d'état, les silicones manifestent une évolution très faible de leurs principales propriétés physiques (mécanique, diélectriques, capacité thermique...). Une bonne stabilité au vieillissement thermique qui résulte de leur inertie chimique.

## II.6 Technique de caractérisation des surfaces

### II.6.1 Energie de surface et angle de contact

La mesure de l'angle de contact et le calcul de l'énergie de surface permettent l'évaluation du degré de la mouillabilité de la surface d'un matériau. Ces deux procédés permettent d'obtenir des informations sur les transformations physiques et chimiques des premières couches atomiques de la surface du matériau étudié [24].

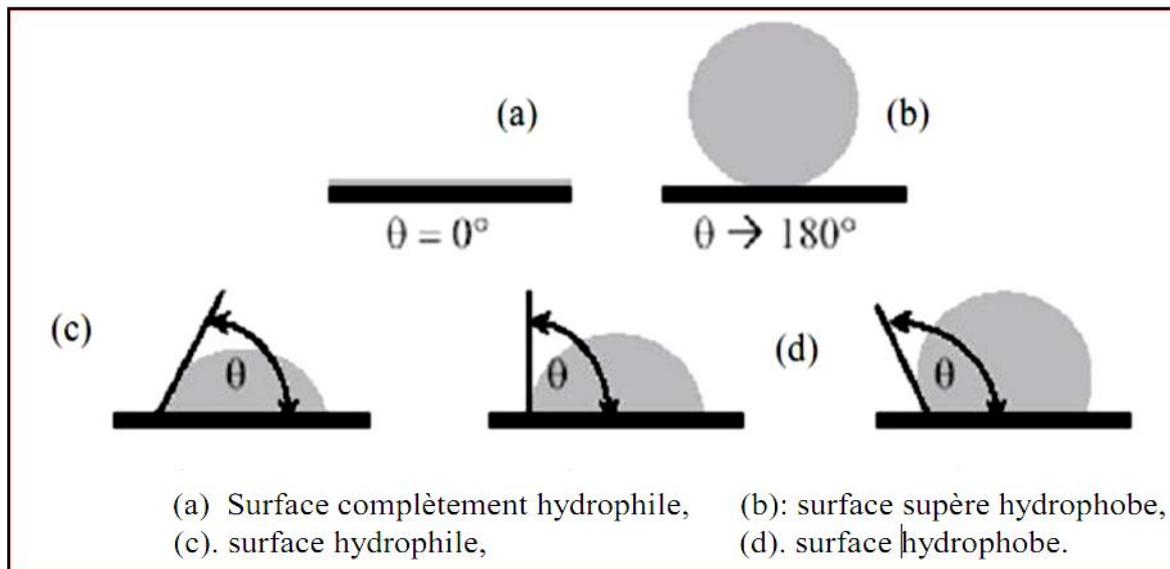
#### II.6.2 Principe

- L'angle de contact représente en fait l'angle formé par la tangente à l'extrémité de la goutte d'un liquide avec la surface plane de l'échantillon sur laquelle la goutte du liquide a été déposée. Cette technique permet de déterminer :
- Le caractère hydrophile/hydrophobe des différentes surfaces ;
- L'énergie libre totale des surfaces étudiées et ses composantes ;

La nature hydrophile/hydrophobe d'une surface est généralement décrite en termes de mouillabilité avec l'eau. Cette dernière peut être considérée comme un phénomène d'étalement. La surface est considérée hydrophile lorsque l'eau s'étale spontanément sur celle-ci, ce qui conduit à l'obtention d'un angle de contact inférieure à  $90^{\circ}$ .

Lorsque la valeur de l'angle de contact est plus importante que  $90^{\circ}$ , on dit que la surface

est hydrophobe (Fig. II.4).

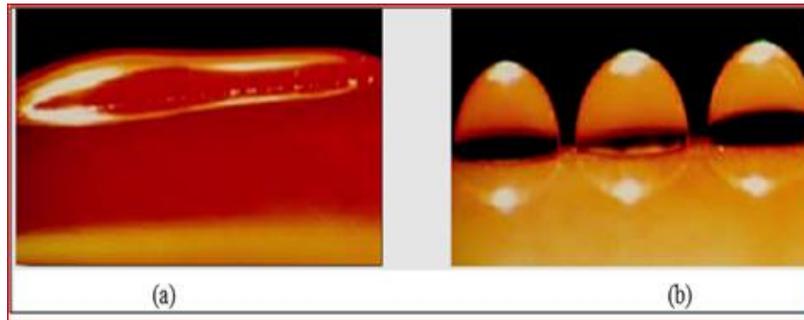


**Fig. II.4:** Valeurs de l'angle de contact possibles

L'énergie de surface résulte des forces d'attraction et de répulsion existantes entre les matériaux présents au voisinage de la zone de séparation de chacune des phases. Cette énergie est représentée par la tension superficielle, dans le cas d'un liquide en équilibre avec sa phase vapeur ou par la tension inter faciale pour des systèmes solide-liquide ou liquide-liquide non miscibles. La mesure de l'énergie libre de la surface d'un solide est déduite de la mesure de l'angle de contact de liquides sonde de tension superficielle connue sur le solide. La mesure de l'angle de contact se fait à la jonction de trois phases mises en jeu lorsque le liquide sonde est déposé sur le solide, ces phases sont liquide, solide et gazeuse. En somme, la détermination de l'angle de contact permet d'évaluer l'affinité d'une surface vis-à-vis d'un liquide [24].

### II.6.3 Propriété de la surface [25]

La géométrie spécifique et la surface préférablement non mouillante (hydrophobe) de ces isolateurs composites leur confèrent une fiabilité en service supérieure à celle des isolateurs conventionnels lorsqu'ils sont encrassés. Une « surface mouillante » est une surface sur laquelle l'eau a tendance s'étendre, les deux extrêmes de cette propriété sont représentés sur la figure II.5. Une surface hydrophile (Fig. II.5a) et une surface hydrophobe (Fig. II.5b).



**Fig. II.5:**comportement d'une surface hydrophobe ou hydrophile

#### **II.6.4 Hydrophobicité [22]**

Par rapport aux autres matériaux, les silicones se distinguent par un très haut pouvoir imperméabilisant à long terme, appelé hydrophobicité : l'eau ne pénètre pas dans les pièces d'isolation en élastomères silicones, mais perle à la surface (Fig. II.6), 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.

L'application d'un revêtement silicone à posteriori sur les isolateurs en verre ou en porcelaine permet d'obtenir le même effet et supprime les opérations de nettoyage difficiles jusqu'à, présent nécessaires.



**Fig. II.6 :** hydrophobicité d'une surface en silicone [24]

#### **II.6.5 Applications des élastomères silicones dans l'isolation électrique**

Les caoutchoucs silicones sont utilisés pour l'isolation des conducteurs et des câbles. Ils servent à isoler divers composants haute tension (revêtement).

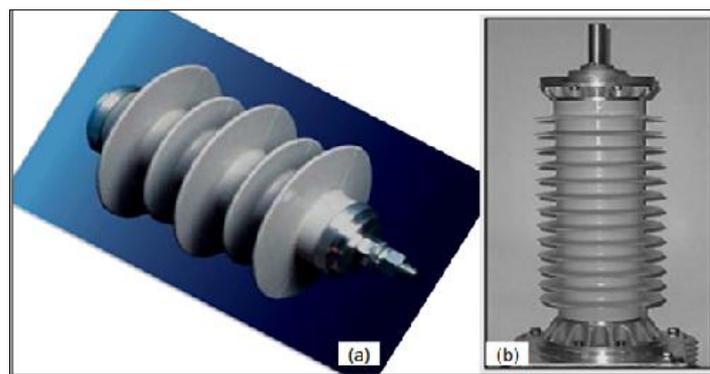
### II.6.5.1 Isolation volumique

Ces dernières années, 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 [26].

### II.6.5.2 Isolation surfacique

Grâce à une excellente hydrophobicité à la surface, et retour d'hydrophobicité à la suite de décharges couronnes qui occasionnent un comportement hydrophile, du fait de leur faible poids et de leur flexibilité, les élastomères silicones sont largement utilisés dans l'isolation extérieure depuis une dizaine d'années [26].

Nous présentons quelques exemples d'utilisation de l'élastomère silicone pour l'isolation électrique haute tension. On les trouve dans des isolateurs et des traversées (Fig. II.7), mais également dans des disjoncteurs et des transformateurs de mesure.



**Fig. II.7:** (a) Isolateur silicone ; (b) Traversée avec un revêtement silicone

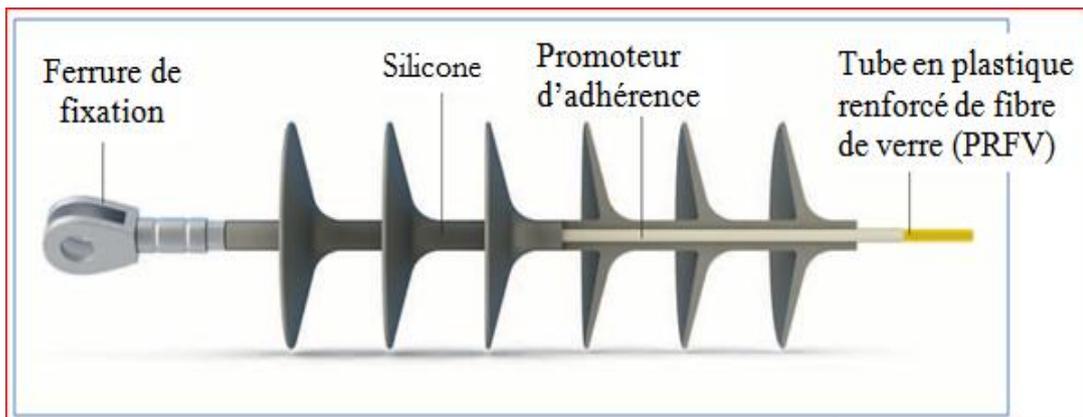
Comme on l'a déjà évoqué, le point faible de ces matériaux est leur faible dureté, ce qui fait que certaines applications où les contraintes mécaniques doivent être fortes.

Dans ce cas, il est souvent utilisé comme revêtement de céramiques qui, elles, peuvent supporter les contraintes mécaniques. Quand les contraintes mécaniques ne sont pas trop importantes (ce qui correspond généralement aux dispositifs à moyenne et basse tension), on peut utiliser entièrement l'élastomère silicone comme indiqué sur la figure II. 7a.

### Isolateurs à long fût

On a recours aux isolateurs à long fût en silicone depuis plus de 40 ans en raison de la haute tenue aux intempéries et à l'érosion de ce matériau [22]. Autres avantages:

- Grande longévité;
- Faible poids;
- Haute résistance au contournement de la couche de pollution;
- Faibles coûts de maintenance;



**Fig. II.8** : Principe d'un isolateur à long fût

## II.7 Conclusion

Dans ce chapitre, quelques généralités sont présentées sur les matériaux isolants utilisés dans le génie électrique pour les besoins des équipements électriques. Un matériau isolant ne peut être caractérisé électriquement que par sa rigidité et sa permittivité diélectrique, son facteur de perte et sa résistivité transversale ou longitudinale en tension continue.

Les matériaux polymères sont choisis en raison de leurs excellentes propriétés électriques, thermiques et mécaniques mais surtout pour leurs coûts raisonnables. La fiabilité des matériaux isolants reste toujours un des soucis majeurs de l'électrotechnicien, surtout que ces matériaux sont constamment soumis à des contraintes électriques sévères.

### III.1 Introduction

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

### III.2 Définition

#### III.2.1 Contournement

C'est une décharge disruptive extérieure à l'isolateur se produisant entre les parties soumises à la tension de service, le long de la surface isolante ou dans l'air près de l'isolateur [27].

#### III.2.2 Ligne de contournement

La ligne de contournement ( $L_c$ ) est la distance la plus courte dans l'air entre deux parties conductrices [27].

#### III.2.3 Tension de contournement

La tension de contournement est le niveau de tension le plus bas à partir duquel tous les arcs joignent les deux électrodes [28]. D'après A. Cimador [29] elle dépend de:

- La forme des électrodes (pointe-plan, plan-plan, ...etc.);
- Les conditions climatiques telles que la pression, l'humidité et la température;
- La nature de la tension et sa polarité;
- La résistivité volumique moyenne de la pollution;

- La répartition de la couche de pollution;
- La longueur de l'isolateur;
- Le profil de l'isolateur (largeur de la couche de pollution).

### **III.2. 4 Tension de tenue**

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

### **III.2. 5 Ligne de fuite**

La ligne de fuite est la distance la plus courte le long de la surface d'un isolant entre deux parties conductrices [28].

### **III.2. 6 Courant de fuite**

C'est un courant de faible amplitude, circulant à travers la couche polluante le long de la surface de l'isolateur, son intensité devient importante lorsqu'on s'approche de la tension de contournement. Il dépend de plusieurs facteurs tels que la nature de la couche polluante et de la longueur de la ligne de fuite [29].

### **III. 2. 7 Pollution [30]**

La pollution est un phénomène qui agit négativement sur le comportement des isolateurs de haute tension. Ces couches de pollution, quand elles sont humidifiées, réduisent considérablement la résistivité superficielle des isolateurs ce qui conduit à la diminution de leur tension de tenue.

### **III. 2. 8 Salinité**

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

### **III. 2. 9 Couche de pollution**

On appelle couche de pollution une couche conductrice électrolyte sur la surface de l'isolateur contenant des sels et des matériaux inertes.

### **III. 2. 10 Degré de pollution**

C'est la quantité (salinité, conductivité de la couche, densité de dépôt de sel) qui caractérise la pollution artificielle appliquée à l'isolateur en essai.

### **III.3 Différents types de pollution**

#### **III.3.1 Pollution naturelle**

On distingue deux types de pollution naturelle:

##### **III.3.1.1 Pollution marine [31]**

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

##### **III.3.1.2 Pollution désertique [31]**

Elle est caractérisée par les dépôts de sable se formant à la surface des isolateurs après le vent de sable. Une fois humidifiées, ces dépôts deviennent plus ou moins conducteurs (en fonction de concentration en sels soluble qu'ils contiennent) et engendrent la circulation d'un courant de fuite qui apparaît brusquement et qui est suivi par la formation d'arcs partiels qui peuvent conduire au contournement de l'isolateur.

##### **III.3.2 Pollution industrielle [31]**

Cette pollution est engendrée par des particules émises dans l'atmosphère par des usines métallurgiques, chimiques ou alimentées par des combustibles fossiles. Elle émane aussi des tuyaux d'échappement des véhicules automobiles et des centrales thermiques.

Ces particules se déposent sur la surface de l'isolateur sous forme de poussières faiblement conductrices. Une fois humidifiées (rosées, pluies fines ....) elles deviennent conductrices et permettent le contournement de la surface de l'isolateur.

##### **III.3.3 Pollution mixte [31]**

Ce type de pollution est en fait le plus fréquent et le plus dangereux pour l'exploitation des ouvrages électriques. La pollution mixte résulte de la combinaison entre les différents types de pollution.

### III.4 Classification des sites pollués

Pour définir l'isolement des lignes de transport et d'établir la corrélation entre la salinité et les niveaux de pollution naturelle, quatre classes de sévérité ont été définies selon la norme CEI 815 qui sont : faible, moyenne, forte et très forte (Tableau III.1) [32].

**Tab III. 1 Classification des sites pollués**

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

### III. 5 Conséquences de pollution sur l'isolateur [33,34]

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

### III. 5. 1 Arc non localisé

L'arc électrique s'éteint rapidement, puis se réamorce à un autre endroit et ainsi de suite. Il y a apparition de courant de fuite entraînant des pertes d'énergie relativement petites, généralement supportables par le réseau de distribution et des échauffements locaux ou partiels, qui peuvent à long terme, conduire à une dégradation de l'isolant.

### III. 5. 2 Arc Fixe

Contrairement au cas précédant, 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 l'ensemble dépôt et zone propre, limite le courant de l'arc et sa longueur. Cet arc peut entraîner par effet thermique, une dégradation du support isolant, nécessitant ainsi le remplacement de l'élément défaillant.

### III. 5. 3 Contournement des surfaces isolantes

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...

En clair, lorsque la surface des isolateurs est conductrice en présence d'humidité, la pollution devient un paramètre dimensionnant important.

### III.6 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 [35]. Dans ce cas, les principales méthodes qui ont été proposées pour mesurer la sévérité d'un site sont :

#### III. 6.1 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 cm<sup>2</sup> 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 [36-38].

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.

#### III. 6.2 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 [39,40].

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.

#### III. 6.3 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 [39]. La mesure de sévérité de la pollution peut ainsi se faire sans toucher à cette couche.

### III. 6.4 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].

### III. 6.5 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 mg/cm<sup>2</sup>.

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 [43].

### III.7 Techniques de lutte contre la pollution

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

#### III.7.1 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 [39,40].

#### III.7.2 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 [41].

### **III.7.3 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 [42].

### **III.7.4 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 [40].

## **III.8 Décharges électriques**

L'étude des phénomènes de décharges électriques présente de l'intérêt d'un point de vue industriel pour les problèmes liés à l'isolement et à la protection des réseaux de transport et de distribution d'énergie (ligne à haute tension, transformateurs, générateurs....) ainsi plusieurs études et ouvrages se sont intéressés à leur compréhension.

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

Une décharge partielle (DP) est définie par la CEI comme une décharge qui ne court-circuite que partiellement l'isolant entre deux conducteurs [43].

### III.8.1 Décharge disruptive

#### III.8.1.1 Décharge intrinsèque

La décharge intrinsèque est due à la présence d'électrons libres, aptes à se déplacer dans l'isolant. Il existe deux types de décharges intrinsèques : l'une dite à haute température, l'autre dite à basse température. Frohlich [44] s'appuyant sur la structure des bandes d'énergie a établi les relations théoriques liées à ces types de décharge intrinsèque.

Le phénomène de décharge disruptive intrinsèque se manifeste préalablement par une caractéristique du courant à travers l'isolant présentant une saturation très nette à partir d'une certaine valeur de la tension. Ce phénomène de saturation s'explique par le fait que le courant à travers l'isolant ne dépend pratiquement (décharge dépendante ou non autonome) que du nombre, bien déterminé et invariant, d'électrons libres dans l'isolant.

#### III.8.1.2 Décharge thermique

Les pertes diélectriques dues à la conductivité non nulle des diélectriques génèrent une énergie thermique inférieure, égale ou supérieure aux possibilités d'évacuation thermique par conduction ou convection thermique du diélectrique. Si l'énergie produite est supérieure à la dissipation du diélectrique dans les conditions de refroidissement données, la température du diélectrique va augmenter entraînant sa dégradation thermique progressive par décomposition chimique et fusion. La décharge thermique se distingue de la décharge diélectrique ou partielle par le fait que sa durée est supérieure.

#### III.8.1.3 Décharge partielle

Les matériaux isolants de qualité technique comportent toujours des inclusions de particules étrangères et des vacuoles gazeuses. Lorsque ces isolants sont soumis à une certaine tension alternative à fréquence industrielle on ne constate que le champ électrique plus élevé dans les vacuoles gazeuses  $E_g$  que dans l'isolant  $E_i$ , (**Fig. III.1**). Etant donné la continuité du vecteur induction électrique dans un milieu non ionisé à l'état initial, on trouve:

$$\frac{E_g}{E_i} = \frac{\epsilon_{ri}}{\epsilon_{rg}} \text{ (III. 3)}$$

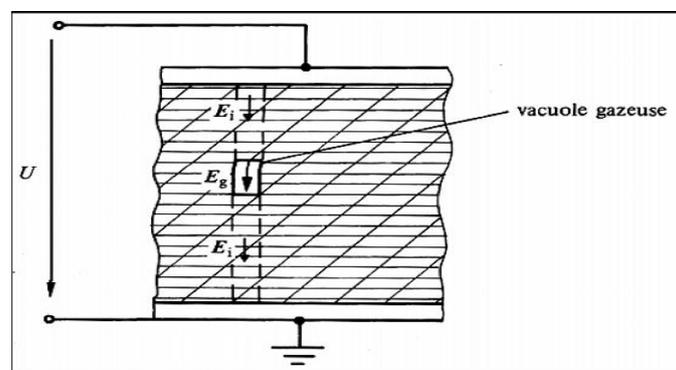
$\epsilon_{ri}$  : est la permittivité relative de l'isolant;

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

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

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

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



**Fig. III.1:** Isolant comportant une inclusion gazeuse

### III.8.2 Décharge dans l'air

#### III.8.2.1 Décharge de type streamers [45]

Si l'on considère que la mobilité des ions positifs est 104 fois plus faible de celle des électrons, la répartition des porteurs de charges ainsi que celle du champ électrique résultant peut-être estimée qualitativement (**Fig. III.2**). Il en résulte que:

- Le champ résultant à la tête et à la queue de l'avalanche électronique est plus grand que le champ appliqué ;
- Le champ résultant à l'intérieur de l'avalanche est plus petit que le champ extérieur.

Le mécanisme de l'avalanche décrit par Townsend ne conserve sa validité que pour des produits  $dp$  inférieur à 200cm. Torr. Au-delà, l'expérimentation montre qu'il se produit des phénomènes peu compatibles avec le mécanisme d'avalanche de Townsend:

1) La densité de courant de décharge croît avec la tension. La faible mobilité des ions positifs crée une concentration de charges d'espace qui modifie le champ appliqué initialement et donc la valeur du coefficient  $\gamma$ . Le critère s'écrit sous sa forme générale:

$$\gamma \left( e^{\int_0^1 \alpha dx} - 1 \right) = 1 \quad (\text{III. 4})$$

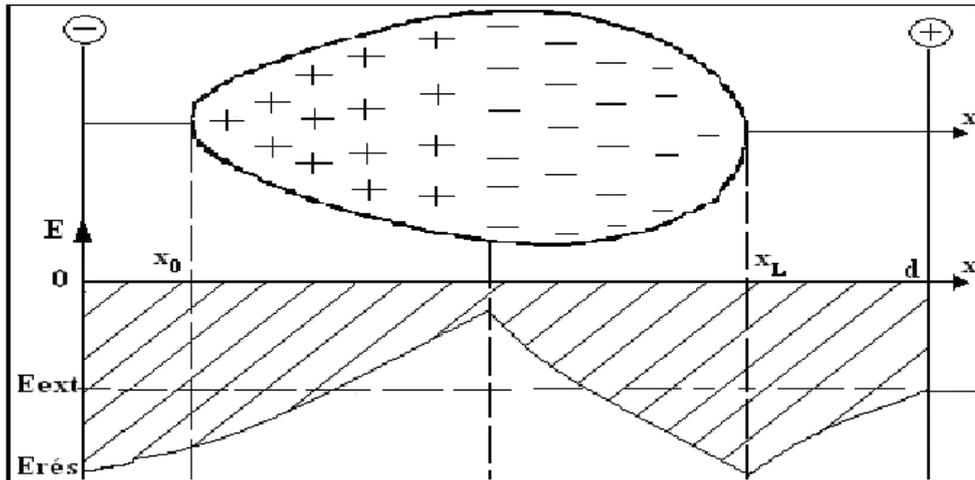


Fig. III.2: Avalanche électronique dans un champ  $\varphi \neq 0$  homogène

2) Le phénomène de streamers est caractérisé par un temps de retard de l'ordre de  $10^{-8}$ s, alors que la décharge de Townsend nécessite des temps de  $10^{-5}$  s pour entraîner un claquage. Il se produit dans des gaz soumis à des pressions élevées. Plus le produit  $dp$  est grand plus petite est la probabilité pour qu'une avalanche puisse parcourir la distance  $d$ .

Sachant que le nombre d'électrons en tête de l'avalanche ainsi que celui d'ions positifs en queue de l'avalanche augmente exponentiellement avec  $\alpha$  et  $x$ , Reather a établi un critère simple basé sur le fait que l'avalanche doit atteindre une taille critique pour que le streamer puisse se développer.

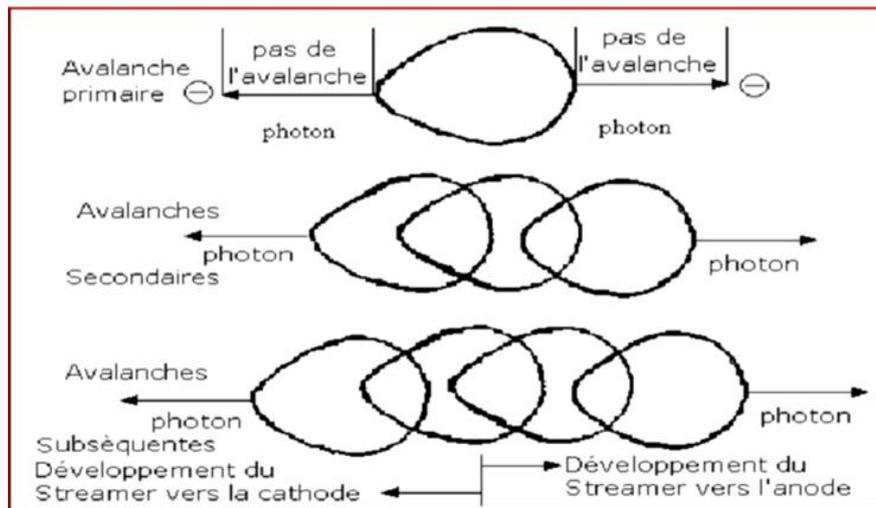
Il s'écrit simplement avec  $X_c$  distance critique et  $N_c$  nombre critique d'électrons, égal à environ  $10^8$  électrons.

$$\int_0^{X_c} \alpha dx = \ln N_c \quad (\text{III. 5})$$

La formation d'un streamer s'explique par des mécanismes de photo-ionisation (Modèle de Meek) se produisant à l'intérieur de l'avalanche primaire. Les électrons accélérés par le champ électrique excitent par collision des molécules neutres qui reviennent à leur état fondamental avec émission de photons. La tête et la queue sont aussi les sièges d'une

importante émission de photons qui sont absorbés par les gaz environnant. Si l'électron produit se trouve au voisinage de l'avalanche primaire, il va créer une nouvelle avalanche, dite avalanche secondaire selon le mécanisme de multiplication électronique (**Fig. III.3**).

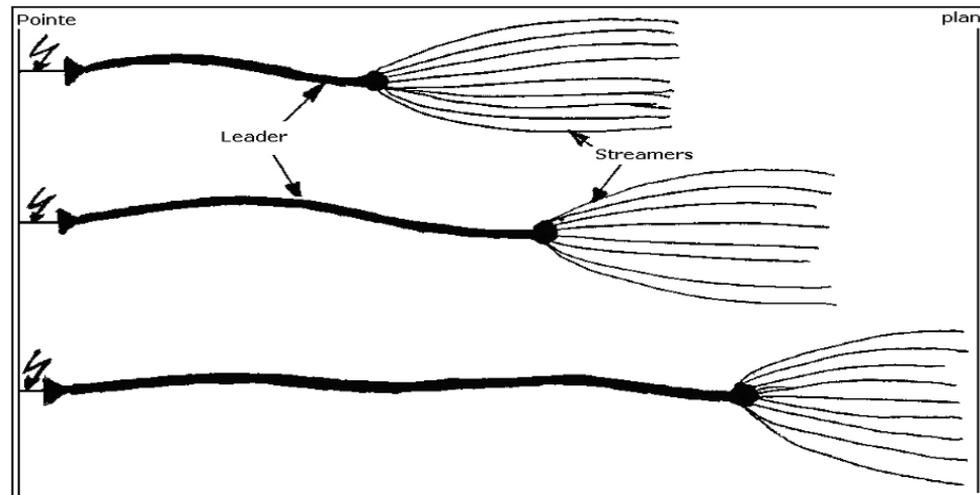
Les avalanches secondaires et subséquentes prennent naissance à la tête et à la queue de l'avalanche et se développent par pas dans la direction de l'anode et de la cathode. La vitesse de propagation du streamer peut atteindre  $1000\text{cm}/\mu\text{s}$ .



**Fig.III. 3:** Développement d'un streamer

### III. 8. 2. 2 Décharges de type leader [45]

La tenue diélectrique des grands intervalles d'air diminue avec la distance Interélectrode, Si le champ électrique moyen à l'amorçage est encore de  $4,5\text{kV}/\text{cm}$  pour  $30\text{cm}$ . Ceci est dû à l'influence d'un nouveau phénomène physique dénommé leader. Il est matérialisé par un canal de quelques millimètres de diamètre qui est observé dès que l'espace interélectrode dépasse une valeur comprise entre  $40\text{cm}$  et  $80\text{cm}$  selon les conditions expérimentales.



**Fig. III.4:** Développement d'un leader

Lorsque les streamers qui participent à l'apparition de l'effet couronne sont suffisamment développés, le gaz contenu dans le tronc commun de la décharge s'échauffe sous l'action du courant électronique, sa conductivité, se met à croître, si bien que tout se passe comme si l'électrode s'était allongée. L'effet couronne se trouve donc déplacé plus en avant dans l'intervalle (Fig. III.4) et de proche en proche, ce canal s'allonge jusqu'à traverser complètement l'intervalle interélectrode. C'est par un mécanisme analogue que se développe un coup de foudre.

### III.9 Différents types d'amorçage des isolations gazeuses [45]

L'amorçage d'un intervalle d'air peut avoir lieu par trois phénomènes distincts:

#### III. 9. 1 Amorçage de l'air par avalanche primaire

Ce type de claquage n'existe que dans le cas de champ extrêmement inhomogène (aiguilles, fil fin...etc.) et pour des tensions de choc relativement peu variables (tension continue, à fréquence industrielle) car d'une part l'avalanche électronique n'atteint pas sa taille critique avant le claquage et que d'autre part sa durée de vie est suffisamment grande pour que la formation d'un champ homogène par les charges d'espace s'établisse. Le champ électrique dans l'avalanche est de l'ordre de 15 à 20 kV/cm. La naissance d'un leader instable peut s'expliquer par le fait qu'avec l'augmentation de la tension de choc, le phénomène de décharge s'intensifie créant ainsi une forte densité de courant au niveau de l'électrode sous tension engendrant une thermo-ionisation. Le claquage s'achève par propagation du leader vers l'électrode opposée (**Fig. III.5**).

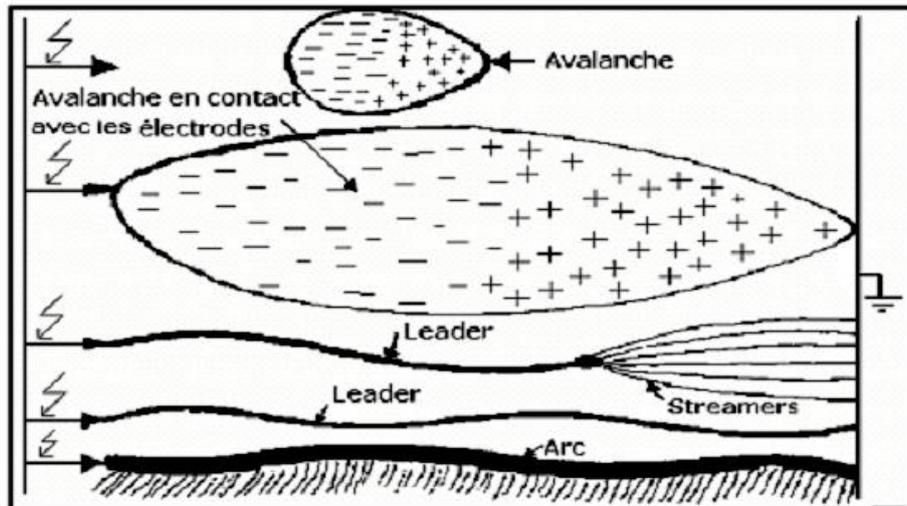


Fig. III.5: Amorçage d'un intervalle d'air par avalanche primaire

### III. 9. 2 Claquage de l'air par streamers

En appliquant une tension impulsionnelle dont le temps de front  $t_f$  varie entre 100 à 1000 $\mu$ s, les avalanches électroniques créées dans l'intervalle d'air interélectrode atteignent leur taille critique de telle sorte que les streamers prennent naissance dans l'espace d'air et progressent vers les électrodes. Si le champ résultant dépasse celui des streamers ( $E_{S+} = 4$  à 5kV/cm), les streamers se multiplient et peuvent se propager jusqu'à contact du plan mis à la terre. A ce moment-là, du fait de la contribution de l'électrode à la terre phénomène (effet  $\gamma$ ).

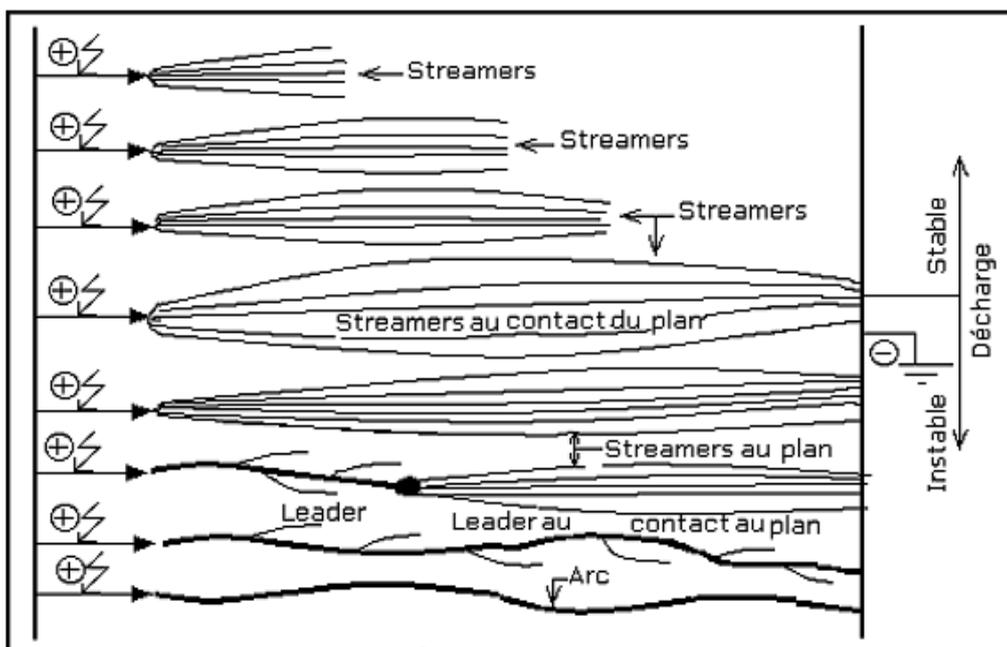


Figure III. 6 : Disruption d'un intervalle d'air par streamers

La forte densité de courant engendrée au niveau de l'électrode sous tension provoque la thermo-ionisation. Ce phénomène donne naissance à un leader instable se développant dans l'intervalle d'air considéré. Dès que le leader relie les deux électrodes, un arc se forme, permettant ainsi la circulation du courant de court-circuit (Fig. III. 6).

### III. 9. 3 Disruption de l'air par leader

Pour de longs intervalles d'air, la naissance d'un leader peut avoir lieu sans la contribution de l'électrode opposée. Dans ce cas le leader est stable.

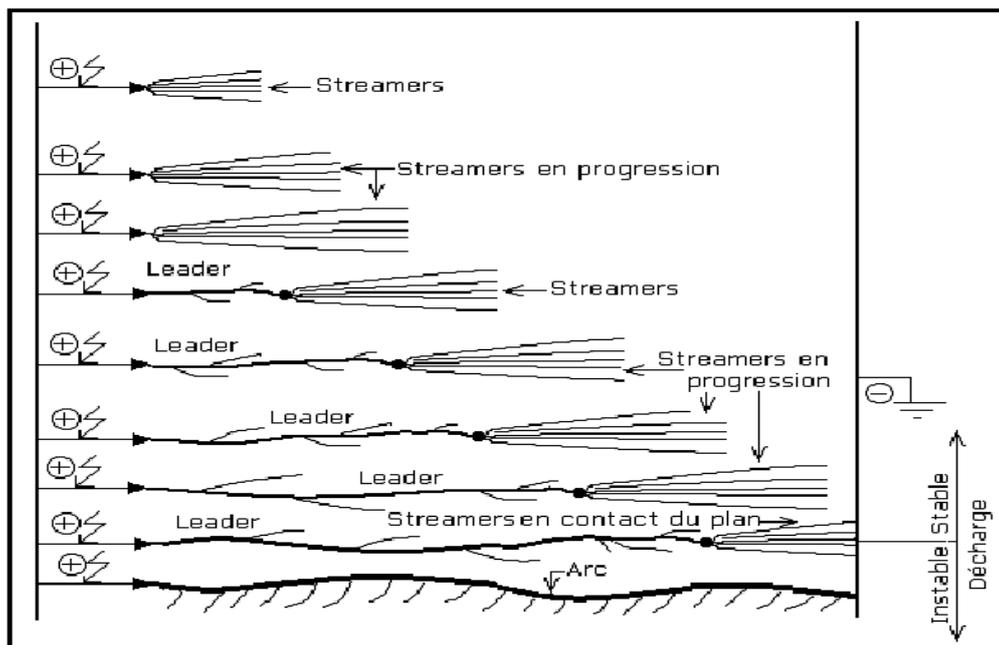


Fig. III.7: Amorçage d'un espace d'air par leader

Dès que les streamers issus de la tête du leader atteignent l'électrode opposée, le leader devient instable. A partir de cet instant le processus évolue de façon analogue au cas précédent (Fig. III. 7).

### III. 10 Conclusion

Dans ce chapitre introductif, une synthèse des différents aspects des phénomènes de pollutions est présentée. Les principales conclusions que l'on peut tirer de cette synthèse sont :

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

- La connaissance de degré de pollution est une condition indispensable, pour prévoir une isolation externe convenable.
- Les méthodes d'essai sous pollution artificielle sont largement utilisées. Elle consiste à reproduire au laboratoire les conditions de la pollution naturelle, ainsi qu'elle possède l'avantage d'être rapide.

## IV.1 INTRODUCTION

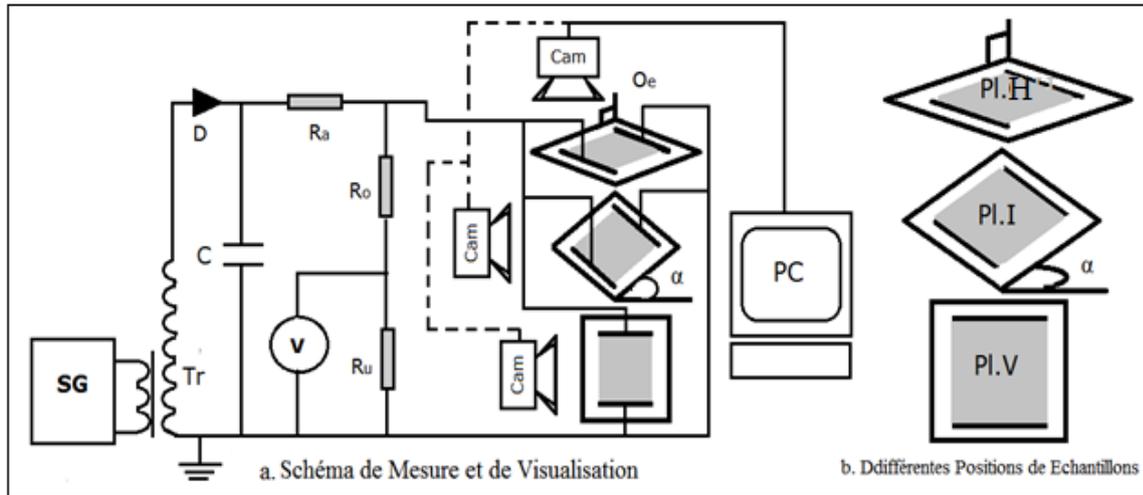
Dans le but de déterminer expérimentalement l'effet de l'arrangement et l'accumulation des gouttes d'eau sur une surface en silicone hydrophobe inclinée sur sa performance électrique sous tension continue, nous avons effectué de nombreux essais sur des échantillons des isolateurs réels en silicone. Cela en gardant la distance inter2lectrode fixe et égale à 6 cm, en variant la polarité de la tension continue appliquée, le volume des gouttes d'eau, le nombre de rangées des gouttes d'eau sur la surface étudiée, ainsi que l'inclinaison de cette dernière par rapport à l'horizontale et mettre en évidence l'évolution de la décharge électrique sur sa surface sous l'effet de l'accumulation ou non des gouttes d'eau.

Ces essais concernent la mesure de la tension de contournement de l'isolation suscitée et la visualisation du développement des arcs électriques évaluant sur les gouttes d'eau déposées sur la surface des échantillons en silicone.

## IV.2 Dispositif expérimental

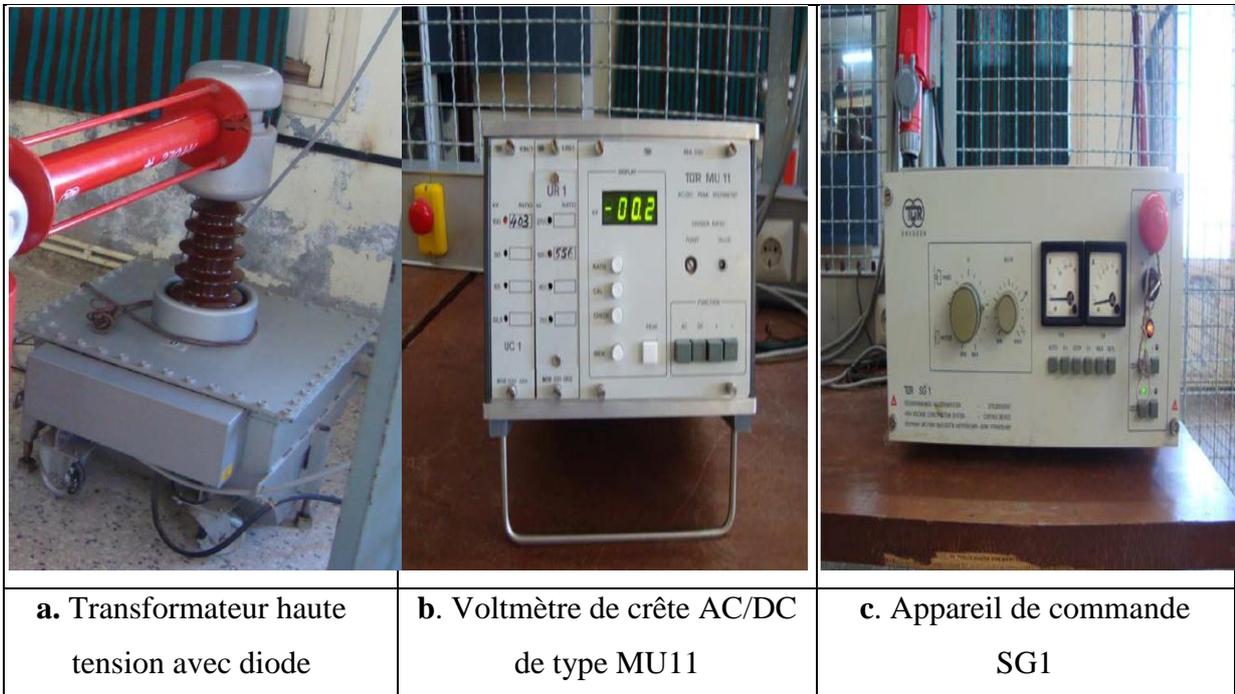
### IV.2.1 Modèle expérimental et techniques de mesure

L'estimation de la performance d'une surface isolante hydrophobe en silicone recouverte de gouttes d'eau et la visualisation du phénomène électrique évoluant entre les électrodes de celle-ci peuvent être réalisées à l'aide du schéma électrique illustré par la figure IV.1. Le circuit de mesure de la tension de contournement est composé d'un transformateur (Tr) et une diode haute tension D(G270) pour redresser la tension alternative (Fig. IV.2.a), un voltmètre de crête V (AC/DC) à affichage numérique (Fig. IV.2.b) et un condensateur (C) de lissage de capacité égale à 10 nF. Le transformateur peut délivrer à son secondaire, à la sortie de la résistance de limitation de courant, une tension continue maximale de 135 kV dont la variation temporelle de sa rampe (4kV/s) peut être obtenue automatiquement à l'aide de l'appareil de commande manuelle ou automatique (SG1) (Fig. IV.2.c). Enfin, le dispositif expérimental est relié aux bornes de la résistance de limitation de courant ( $R_a$ ) qui est égal à 0.08 A et du diviseur de tension résistif ( $R_0$ ,  $R_u$ ), auquel est connecté notre objet d'essai (Oe) qui n'est autre que le plan incliné en posant sur lui un film en silicone de taille environ 13 cm x 10 cm x 0.5 cm et deux électrodes planes arrondies aux extrémités afin de minimiser l'effet de bords (Fig. IV. 3).



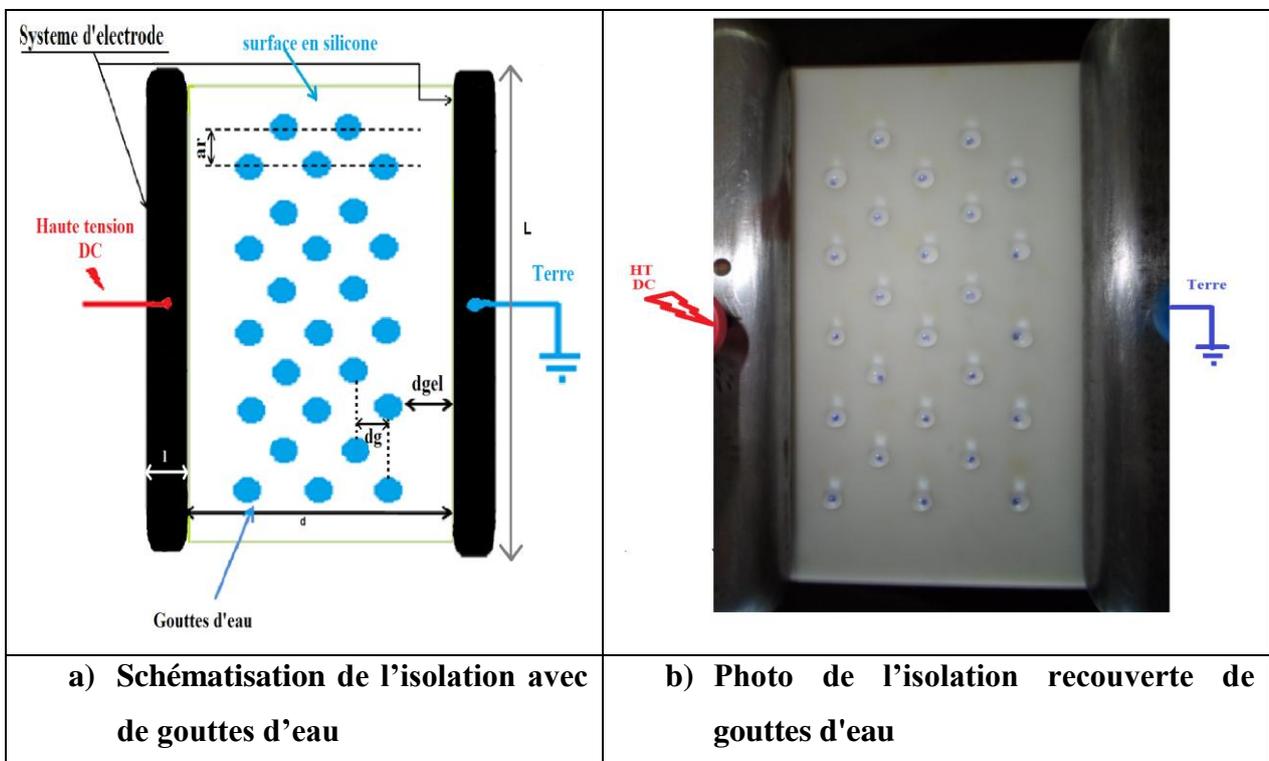
**Fig. IV. 1:** Schéma de mesure et de visualisation (a) des différentes positions des échantillons soumis aux tests (b)(SG : Appareil de Commande manuelle ou automatique du transformateur;  $T_r$ : Transformateur BT/HT; Cam: Caméscope numérique; PC: Ecran de PC;  $O_e$ : Objet d’essai)

Le circuit de visualisation est constitué d’un Caméscope (Cam) pour l’enregistrement des différentes phases de la décharge se développant sur la surface en silicone limitée par les deux électrodes et un PC pour une meilleure observation et analyse de celle-ci.



**Fig. IV. 2:** photos des différents composants du circuit de mesure de la tension de contournement

Le modèle expérimental, représenté en figure IV. 3, est composé de deux électrodes planes de taille 13.5 cm x 2 cm x 2 cm, d'un film en silicone posé sur la plaque en plexiglas. Cette dernière est fixée sur le plan incliné. Une électrode est portée à la haute tension et l'autre est mise à la terre. Le plan incliné est en bois de 75 cm de longueur, 40 cm de largeur et de 48 cm de hauteur troué sur les deux côtés pour permettre la variation de l'angle entre 0° et 90° (Fig. IV. 4). Le 0° correspond à la position horizontale (Fig. IV.4a) et le 90° à la position (Fig. IV. 4c) verticale ou en position inclinée (Fig. IV. 4b). La distance séparant les deux électrodes planes et parallèles est de 6 cm. Celle-ci est gardée constante tout au long de cette étude. Les points de référence en noir nous guident lors de la pose, à l'aide d'une micro pipette, des gouttes d'eau de volume bien déterminé sur la surface de l'isolation (Fig. IV.3.a).



**Fig. IV. 3:**Positionnement des gouttes sur une surface en silicone limitée par 2 électrodes

$d$  : Distance entre les deux électrodes de base ;

$d_{gel}$ : Distance entre la goutte et l'électrode HT ou Terre;

$a_r$ : distance entre deux rangées de la même zigzag sur la largeur de l'isolation ;

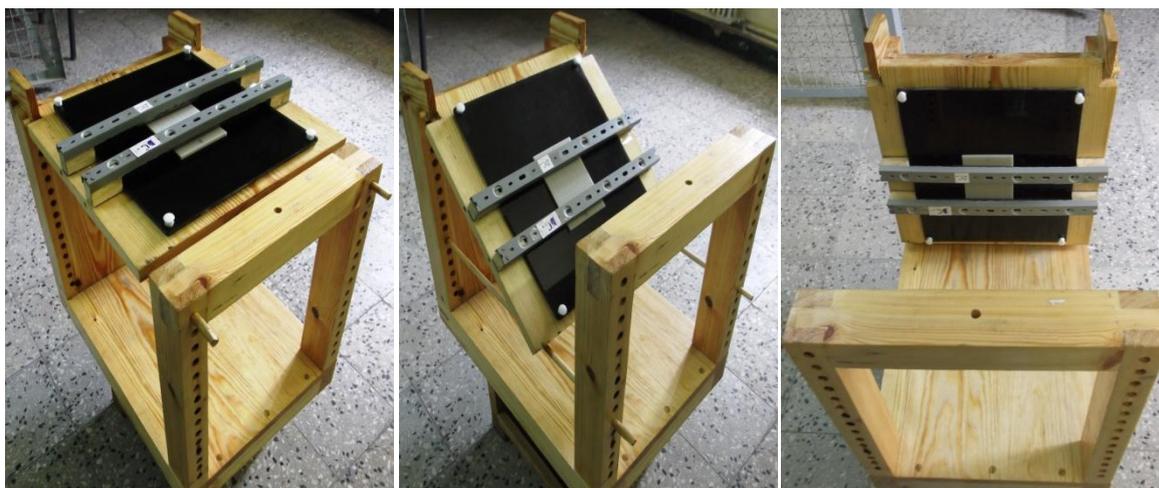
$d_g$ : Distance entre les gouttes d'eau sur la ligne de fuite de l'isolation ;

$e$  : Epaisseur de l'électrode ;

$L$  : Longueur de l'électrode ;

$l$  : Largeur de l'électrode ;

$N_r$ : Nombre de rangées de 1, 2, 3, 4 et 5;



a) Position horizontale

b) Position oblique

c) Position verticale

**Fig. IV.4:** Différentes positions du dispositif

### IV.3 Pollution d'une surface isolante

La solution polluante est composée d'un mélange d'eau distillée ou du robinet, 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. IV. 5). Une seule valeur faible de la conductivité volumique ( $180 \mu\text{S}/\text{cm}$ ) a été utilisée dans notre étude. Le choix d'une telle valeur est justifié par celles acquises lors de la formation de la rosée ou de la pluie fine recouvrant les isolateurs réels.

A chaque essai, la conductivité est vérifiée et ajustée afin de garder les mêmes caractéristiques de la pollution.



**Fig. IV. 5:** Appareil de mesure de conductivité volumique

#### IV.4 Procédé d'essai

Avant que nous procédons à la mesure de la tension de contournement de la surface de l'isolant dans les cas sans et avec gouttes d'eau, les échantillons ont été conditionnés dans un dessiccateur contenant du gel de silicone, pendant au moins 24 heures pour éliminer toute présence d'humidité et lui faire récupérer son hydrophobicité. A la fin de chaque essai l'échantillon en silicone est nettoyé à l'aide d'un mouchoir en papier et l'isopropanol. Il est à noter que la valeur mesurée est la moyenne d'une série de 16 essais et la pause entre deux séries consécutives est de 10 heures. La conductivité volumique d'eau est vérifiée et maintenue constante avant chaque série d'essais et Chaque rangée contient 5 gouttes d'eau déposées en zigzag.

#### IV.5 Dessiccateur

Un dessiccateur désigne un équipement servant à protéger des échantillons en silicone contre l'humidité. Au laboratoire, il est sous forme d'un carré en verre comme il est montré sur la figure IV.5. Au préalable, une quantité suffisante de gel de silice souvent de couleur bleu 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. Lorsque le gel de silicone change de couleur et se transforme souvent au rose, il faut le régénérer (Fig. IV. 6).



Fig. IV. 6: Photo montrant un dessiccateur



**Fig. IV. 7:** Photo montrant le gel de silice (silicagel)

#### IV.6 Correction des résultats de tension en fonction des conditions atmosphériques

La tension de contournement de surface isolante est étroitement liée aux conditions climatiques, à savoir ; la température, la pression et l'humidité de l'air environnant. La valeur de la tension de contournement, dans les conditions normales de température ambiante, pression et d'humidité ( $\theta = 20^\circ\text{C}$ ,  $P = 100 \text{ kPa}$  et  $H = 11 \text{ g/m}^3$ ), est donnée par la relation suivante :

$$\hat{U}_{c0} = \frac{K_h}{K_d} \cdot \hat{U}_c \quad (\text{IV. 1})$$

$\hat{U}_c$ : Tension de contournement à la température  $\theta$ , à la pression  $P$  et à l'humidité  $H$ ;

$\hat{U}_{c0}$ : Tension de contournement dans les conditions normales de température  $\theta_0$ , pression  $P_0$  et d'humidité  $H_0$ ;

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

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

$$K_d = \frac{2,93 \cdot P}{(273 + \theta)} \quad (\text{IV. 2})$$

$P$ : Pression en kPa;

$\theta$ : Température en  $^\circ\text{C}$ ;

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  $\text{g/m}^3$ , est nécessaire, car  $K_h$  est donnée en fonction de cette dernière. L'abaque de la figure IV. 7 a, donne la transformation de l'humidité relative à l'humidité absolue en fonction de la température. La valeur de l'humidité absolue lue directement sur cette dernière, est reportée sur l'abaque de la figure IV. 7 b, pour déduire le facteur de correction  $K_h$ .

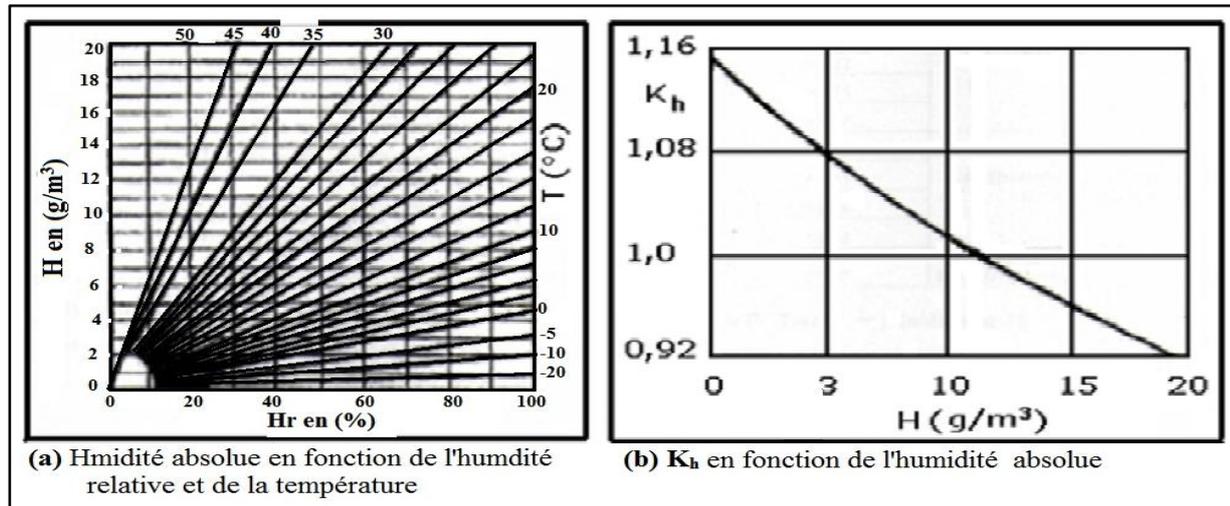


Fig. IV.8: Abaqués de correction en fonction de l'humidité et la température

#### IV. 7 Exemple de calcul

D'après la mesure de la tension de contournement et les conditions atmosphériques (température, pression et d'humidité) suivantes:  $T = 17^\circ\text{C}$ ,  $P = 100,7 \text{ kPa}$ ,  $H_r = 50 \%$ , la tension de contournement mesurée a pour valeur :  $\theta_c = 52.15 \text{ kV}$ . En utilisant les formules de correction et les abaques suscités ci-dessus nous trouvons:

$$K_h = 1,0477$$

$$K_d = \frac{2,93 \cdot 100,7}{273 + 17} = 1,0174$$

$$U_{c0} = 53,7 \text{ kV}.$$

##### IV.7.1 Propriétés diélectriques de l'isolation en silicone

Les valeurs de mesure de quelques propriétés diélectriques des échantillons en silicone sont consignées dans le tableau IV.1. Celle-ci ont été mesurées à l'aide du pont de Schering au

laboratoire Haute Tension de l'université A. Mira de Bejaia dans le cadre des travaux antérieurs sur les mêmes échantillons utilisés dans notre étude

**Tab. IV.1:** Valeurs de quelques paramètres électriques de l'isolation en silicone

Propriétés diélectrique	Isolation silicone
$\epsilon_r$	3,96
$\rho_{cct}(\Omega \cdot m)$	$6,8 \cdot 10^{10}$
$R_{ccs}(\Omega)$	$4 \cdot 10^9$
Tg $\delta$	0,0099

## IV.8 Résultats et discussions

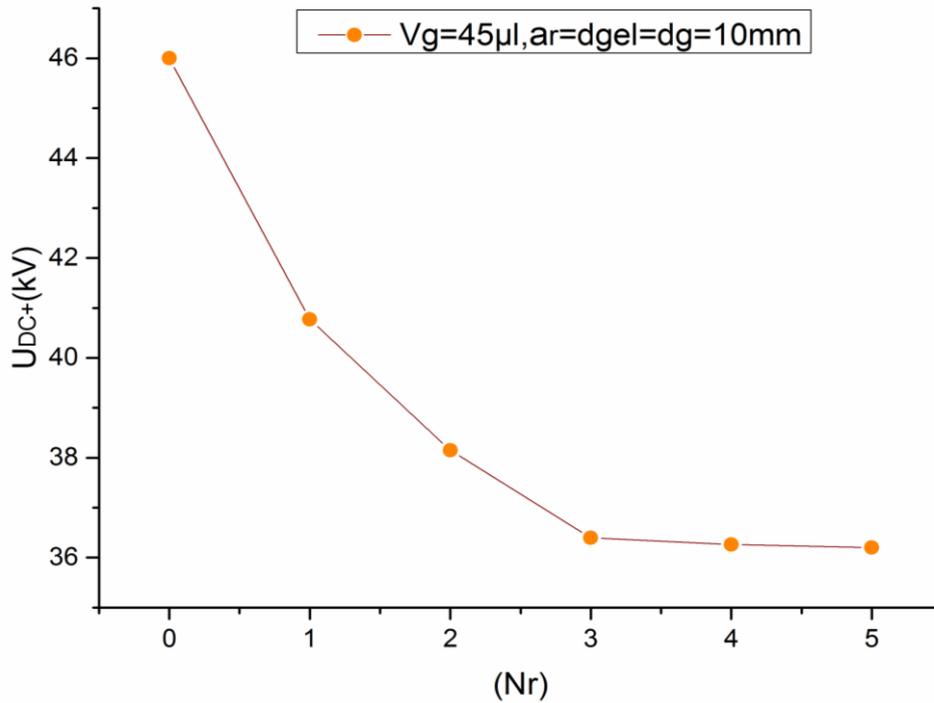
### IV. 8. 1 Polarité positive

#### IV. 8. 1. 1 Paramètres d'influence de la performance électrique de l'isolation en silicone

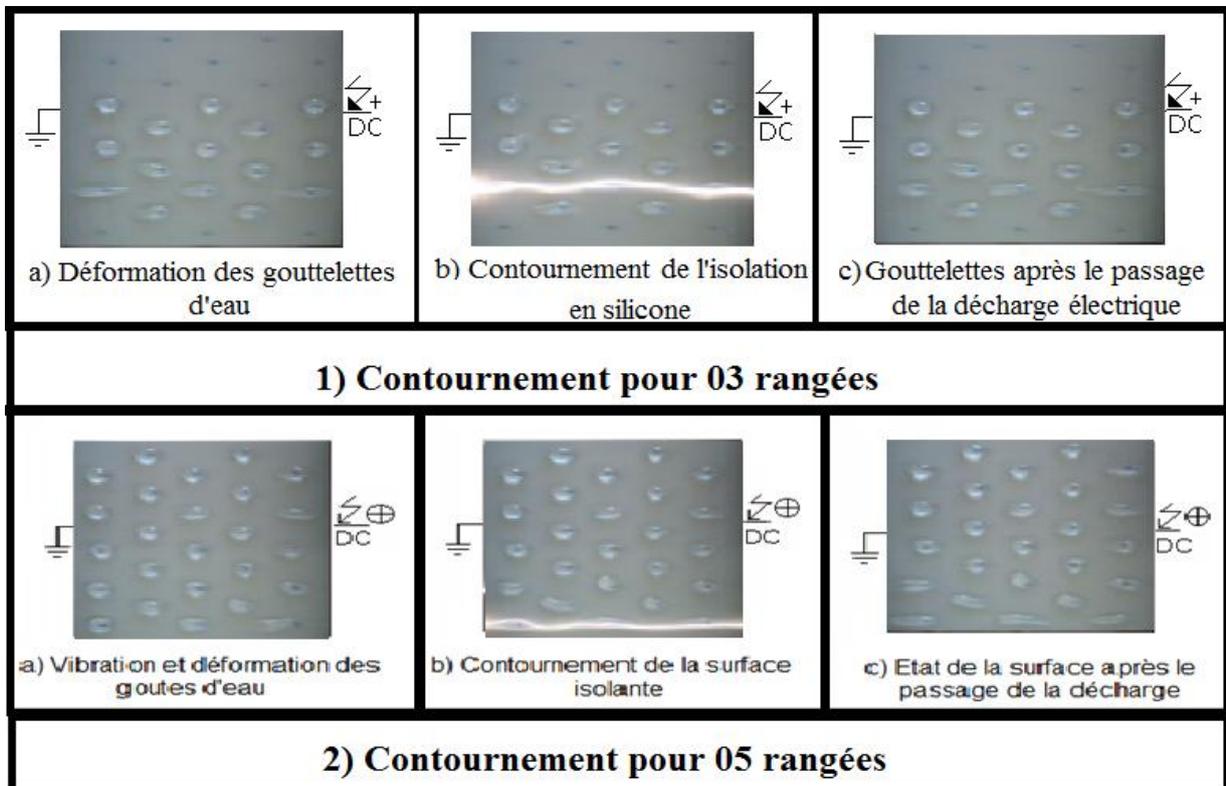
##### a) Nombres de rangées (Nr)

Dans ce paragraphe nous avons varié le nombre de rangées, en allant d'une surface sèche et propre jusqu'à 5 rangées en gardant la conductivité  $\sigma_v = 180 \mu S/cm$ , le volume des gouttelettes  $V_g = 45 \mu l$  et un angle d'inclinaison  $\alpha$  égal à zéro.

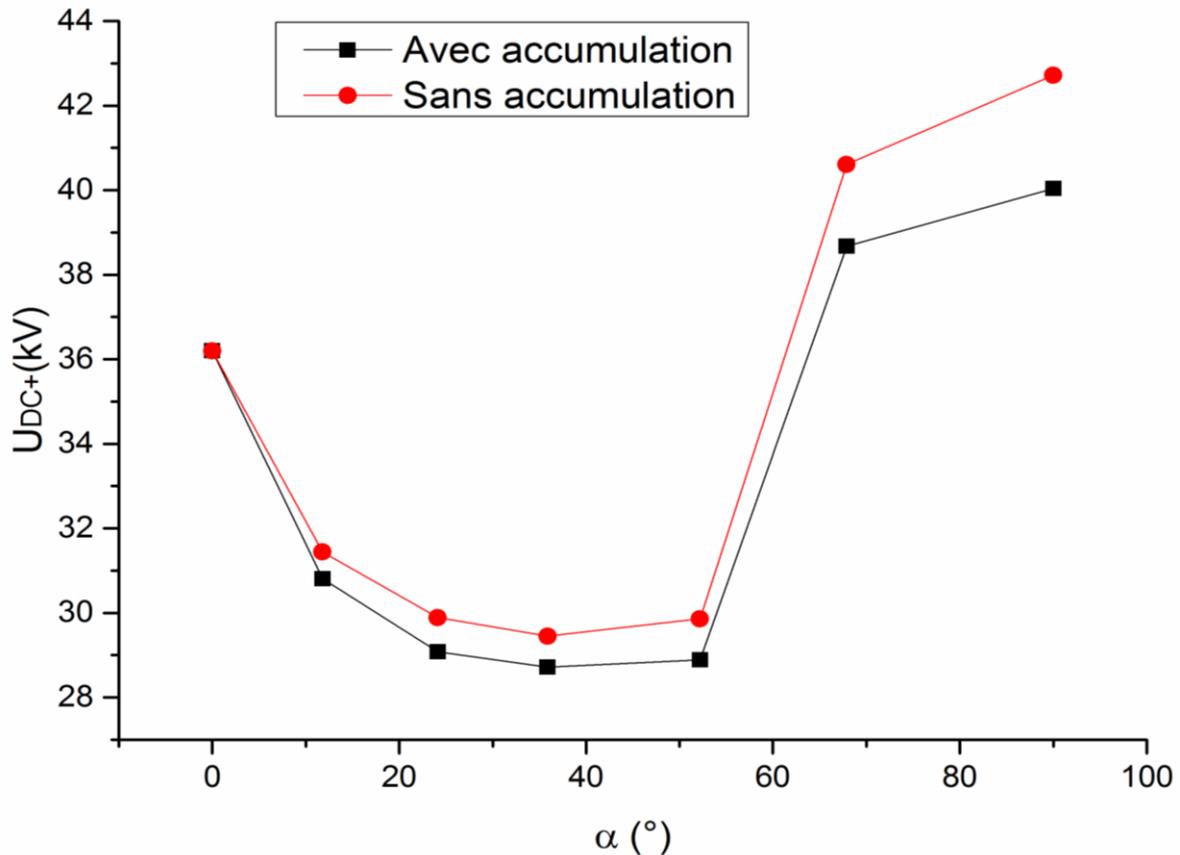
La figure. IV. 8, illustre le résultat obtenu sur l'évolution de la tension continue positive de contournement en fonction du nombre de rangées de gouttes d'eau. La valeur maximale de la tension contournement est égale à 46 kV, elle est atteinte en absence de gouttes d'eau. Ensuite nous constatons une décroissance rapide de la tension de contournement et cette décroissance peut être expliquée par le comportement de la décharge électrique, comme le montre la figure. IV. 9. C'est-à-dire pour un nombre de rangées variant entre 1 et 4 nous observons une petite déformation des gouttes, dans ce cas la décharge passe généralement par la zone sèche et à partir d'un nombre de rangées correspondant à  $N_r = 5$ , la valeur de la tension de contournement électrique demeure constante et minimale (36.2 kV) quel que soit le nombre de rangées ajoutées. Cela peut être expliqué par le fait que à partir de cette limite, il ya une possibilité du développement d'une autre décharge en parallèle indépendante de la première mais celle-ci ne peut être omniprésente qu'à partir d'une dizaine de rangées. Nous remarquons que pour  $N_r \leq 5$  qu'un seul arc donne le contournement électrique de la surface isolante. Nous pouvons dire que cette limite est correspondante à la largeur effective d'une seule décharge électrique [46].



**Fig. IV. 9:** Tension de contournement positive d’une isolation en silicone hydrophobe en fonction du nombre de rangées des gouttes d’eau

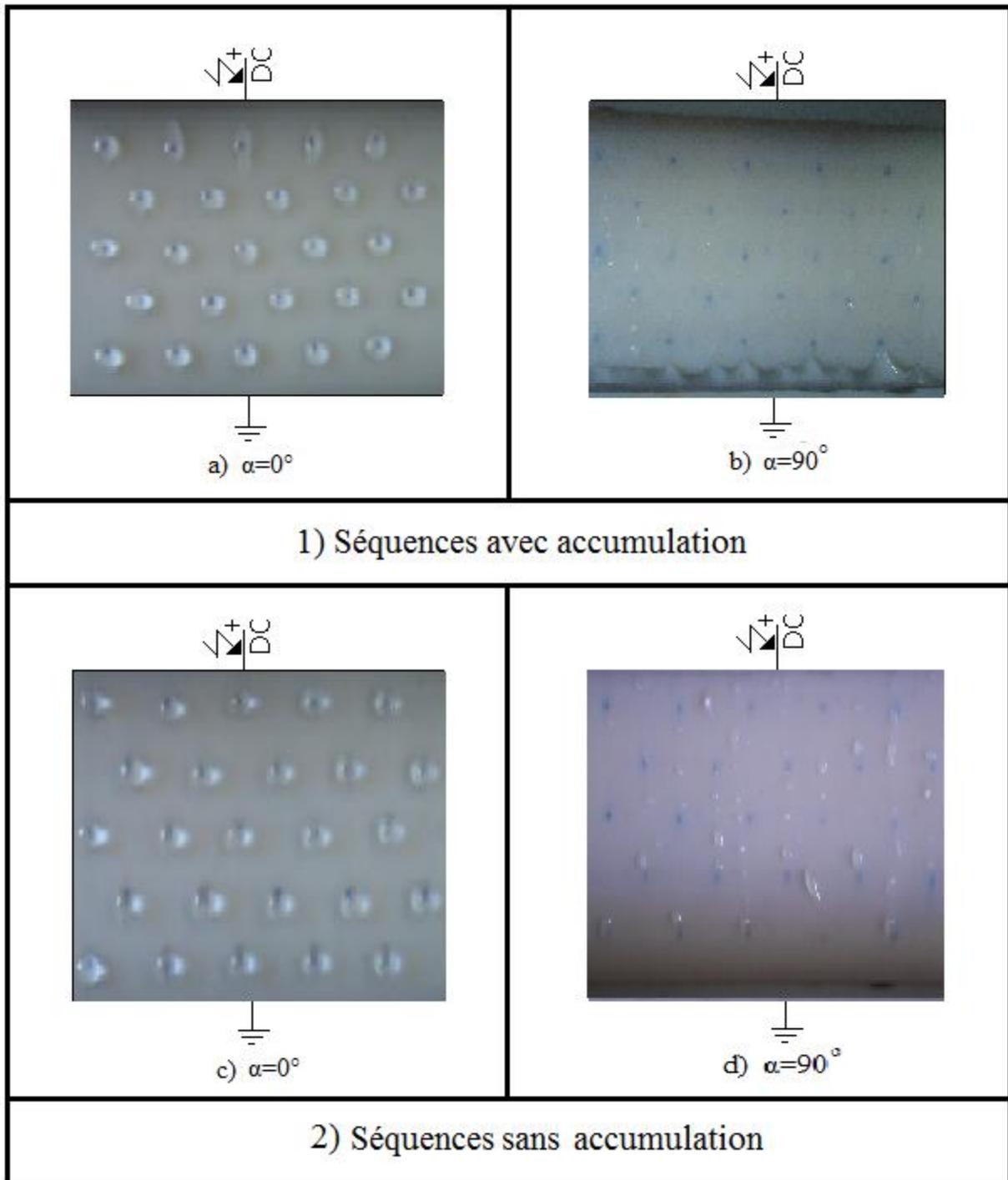


**Fig. IV. 10:** Phases de contournement sous DC+ d’une isolation en silicone hydrophobe ( $\alpha = 0^\circ$ )

b) Angle d'inclinaison de l'isolation et accumulation d'eau pour  $V_g=45\mu\text{l}$ 

**Fig. IV. 11 :** Tension positive de contournement d'une isolation en silicone hydrophobe en fonction d'angle d'inclinaison ( $V_g = 45\mu\text{l}$ )

La figure IV. 10 montre la comparaison des caractéristiques de la tension continue positive de contournement électrique d'une surface isolante et hydrophobe en fonction de l'angle d'inclinaison  $\alpha$  par rapport à l'horizontale et de l'accumulation des gouttes d'eau à conductivité électrique constante égale à  $180 \mu\text{S/cm}$ . Le volume des gouttes d'eau est fixé à  $45\mu\text{l}$  dans ce cas de figure. Il en résulte des allures similaires de la tension positive de contournement en fonction de l'inclinaison de l'isolation avec accumulation ou sans accumulation des gouttes d'eau sur l'électrode terre (Fig. IV. 11. 1 et 2). De plus, il en ressort de ces courbes que la tension de contournement électrique diminue avec l'augmentation de l'angle d'inclinaison jusqu'à atteindre un minimum de l'ordre  $29.08 \text{ kV}$ , à partir duquel elle croît de nouveau. Cette diminution de la tension est justifiée par un raccourcissement maximal de l'espace entre gouttes d'eau par l'allongement optimal de ces dernières pour un angle d'inclinaison critique de la surface isolante de l'ordre de  $24.12^\circ$ .

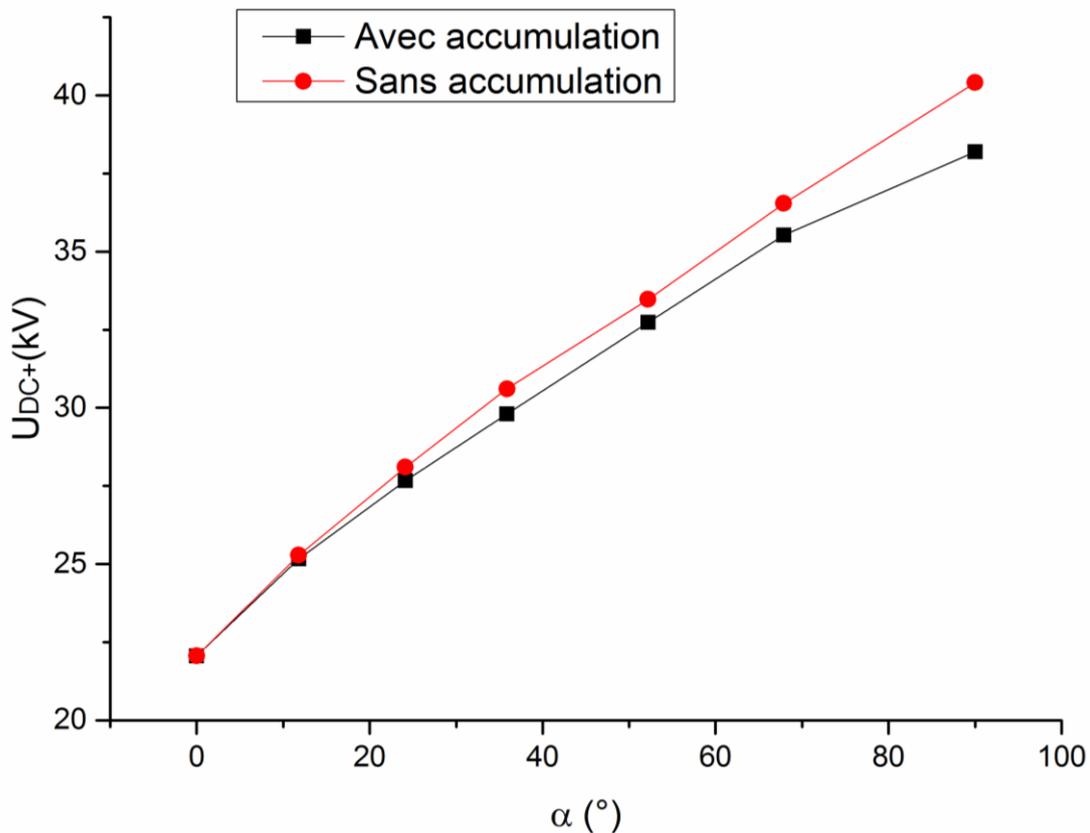


**Fig. IV. 12:** Phases de contournement positive d'une isolation en silicone pour deux angles différents  $\alpha=0^\circ$  et  $\alpha=90^\circ$ , avec et sans accumulation pour ( $V_g = 45\mu\text{l}$ )

A partir de cet angle il est à souligner la croissance de la tension de contournement en fonction de l'angle d'inclinaison jusqu' à  $\alpha$  égal à  $90^\circ$ . Cette croissance peut être expliquée par le fait qu'en position verticale de l'isolation, les gouttes ont tendance à quitter la surface avant même l'application de la tension. Celles-ci laissent fréquemment à leur décollage, de gouttelettes

derrière elles et le contournement par arc finit par s'établir au-dessus de ces minuscules perles d'eau, ce qui explique l'élévation de celle-ci puisque la distance séparant les petites gouttes est plus élevée que celle en présence de grosses gouttes. Il est à remarquer également que l'écart entre la tension de contournement électrique avec accumulation d'eau et la tension de contournement sans accumulation d'eau est maximum à l'angle d'inclinaison  $\alpha = 90^\circ$  pour laquelle ce dernier peut atteindre 2.68 kV et cela revient au fait que la taille de la zone humide est plus importante dans le premier cas que dans le deuxième, ce qui entraîne la diminution de la distance sèche parcourue par l'arc jusqu'au court-circuit (Fig. IV. 11. 1b et 11. 2d).

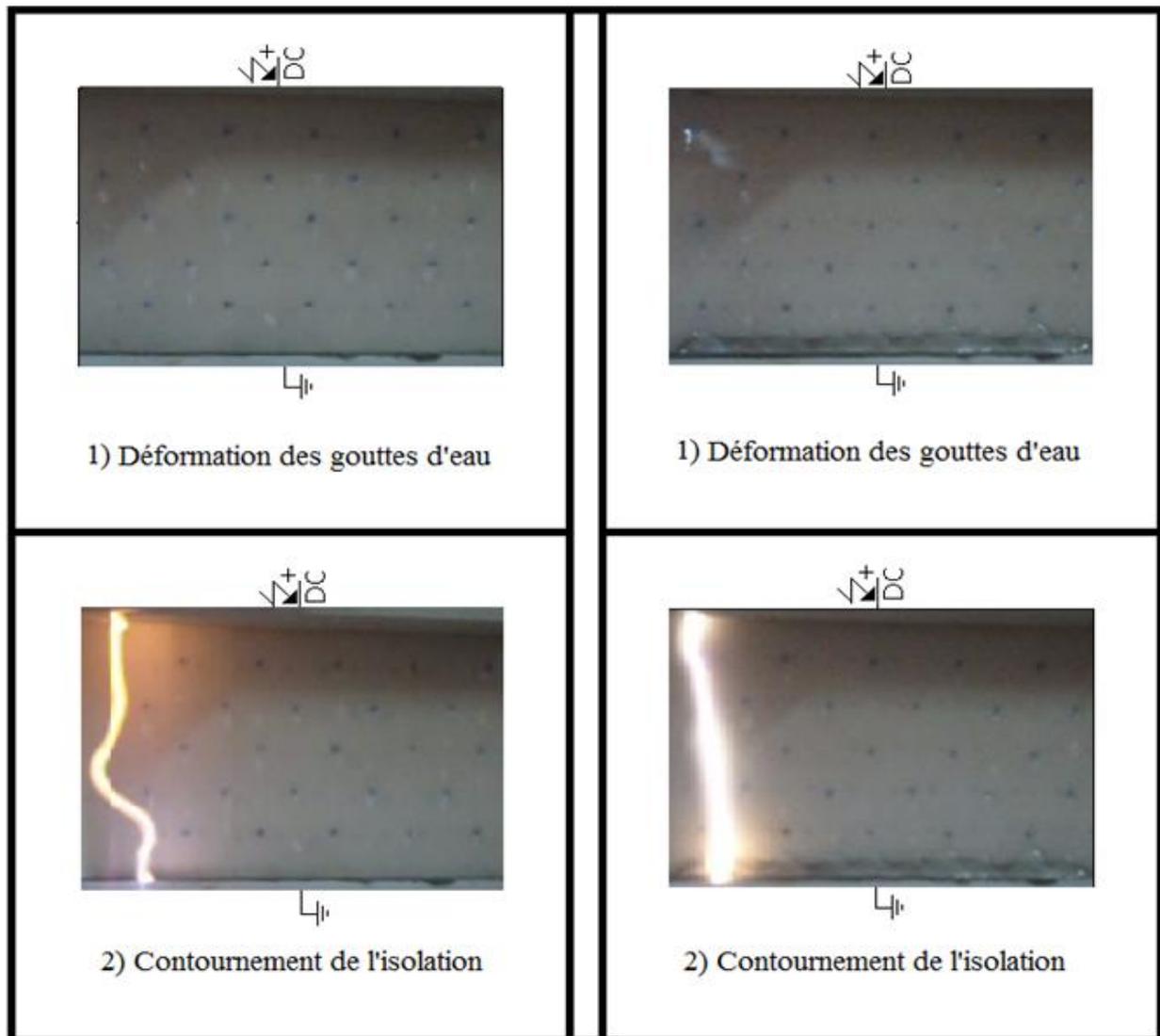
c) Angle d'inclinaison de l'isolation et accumulation d'eau pour  $V_g=90\mu\text{l}$

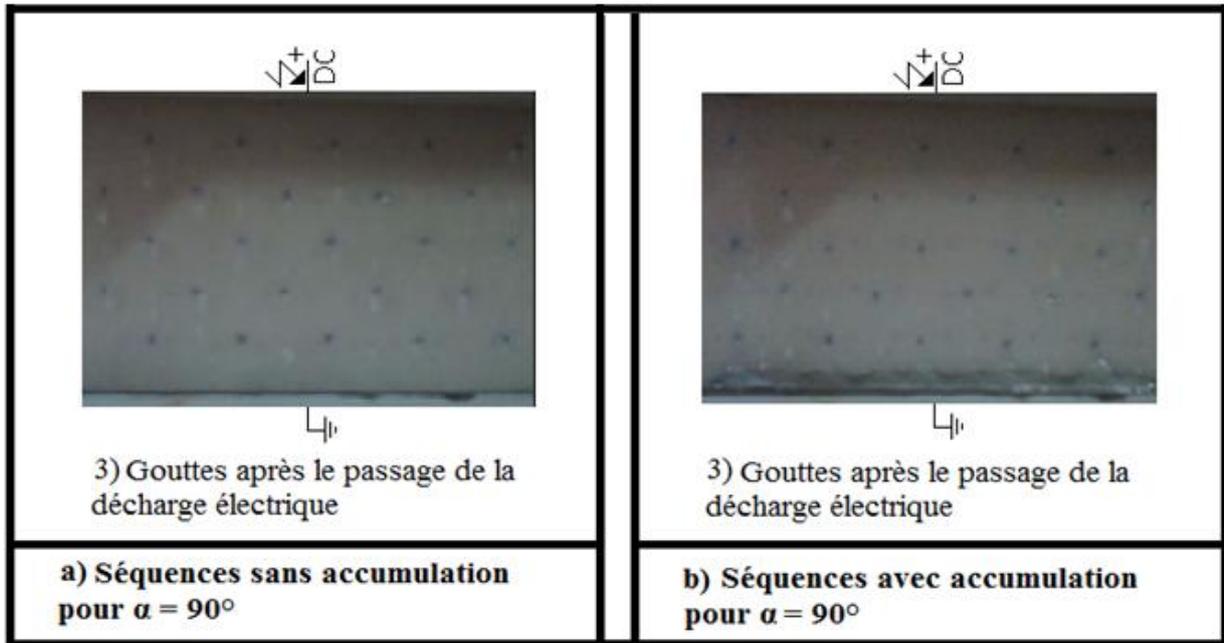


**Fig. IV. 13:** Tension positive contournement d'une isolation en silicone hydrophobe en fonction d'angle d'inclinaison ( $V_g = 90\mu\text{l}$ )

La figure IV. 12 montre l'évolution de la tension continue positive de contournement de l'isolation en silicone hydrophobe en fonction de l'angle d'inclinaison à conductivité électrique

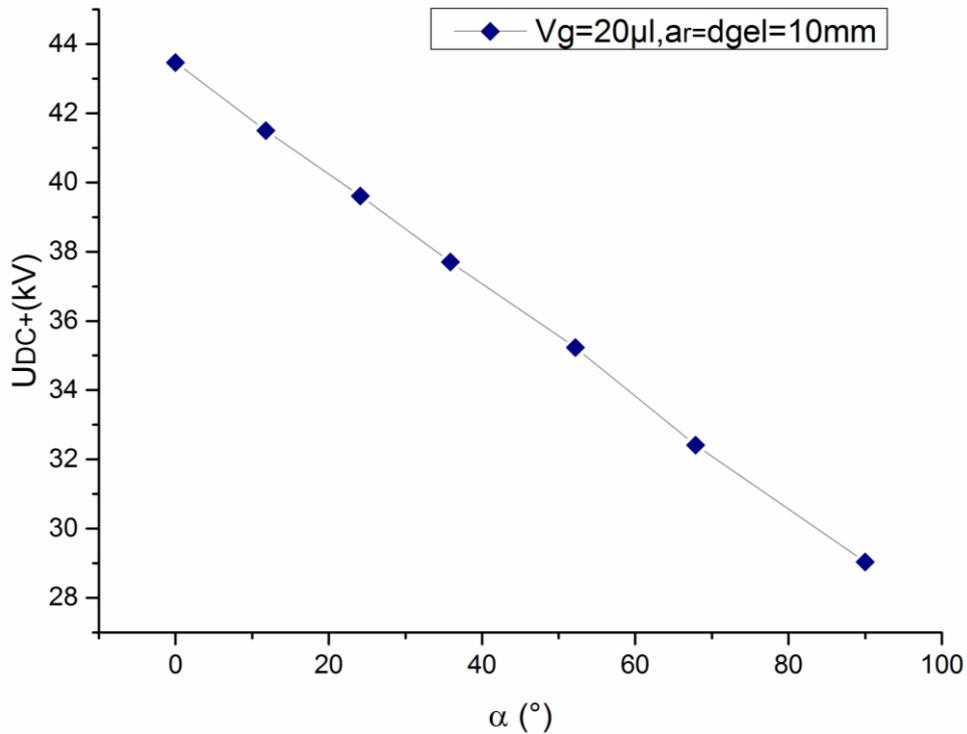
$\sigma_v = 180 \mu\text{S/cm}$ . Le volume des gouttes d'eau est fixé à  $90\mu\text{l}$ , dans le cas d'une configuration avec accumulation ou sans accumulation des gouttes d'eau sur l'électrode terre, en gardant la distance interélectrode fixée à  $60\text{mm}$ . Il en résulte une évolution similaire des deux courbes de la configuration avec accumulation ou sans accumulation, la seule différence réside plutôt dans l'amplitude de la tension de contournement électrique où elle est légèrement élevée de l'ordre de 5% par rapport à la configuration avec accumulation pour un angle d'inclinaison  $\alpha = 90^\circ$  ou on trouve son maximum. Ceci peut être expliqué par la diminution de la zone sèche entre les électrodes ce qui engendre la diminution de la résistance surfacique qui facilite la naissance d'un arc électrique. En position verticale de l'isolation, les gouttes d'eau quittent la surface isolante avant même l'application de la tension. Celles-ci laissent à leur décollage des petites gouttes derrière elles. L'espace entre les gouttes devient alors plus grand (Fig. IV. 13) et par conséquent la tension de contournement de l'isolation s'accroît jusqu'à  $40.1 \text{ kV}$





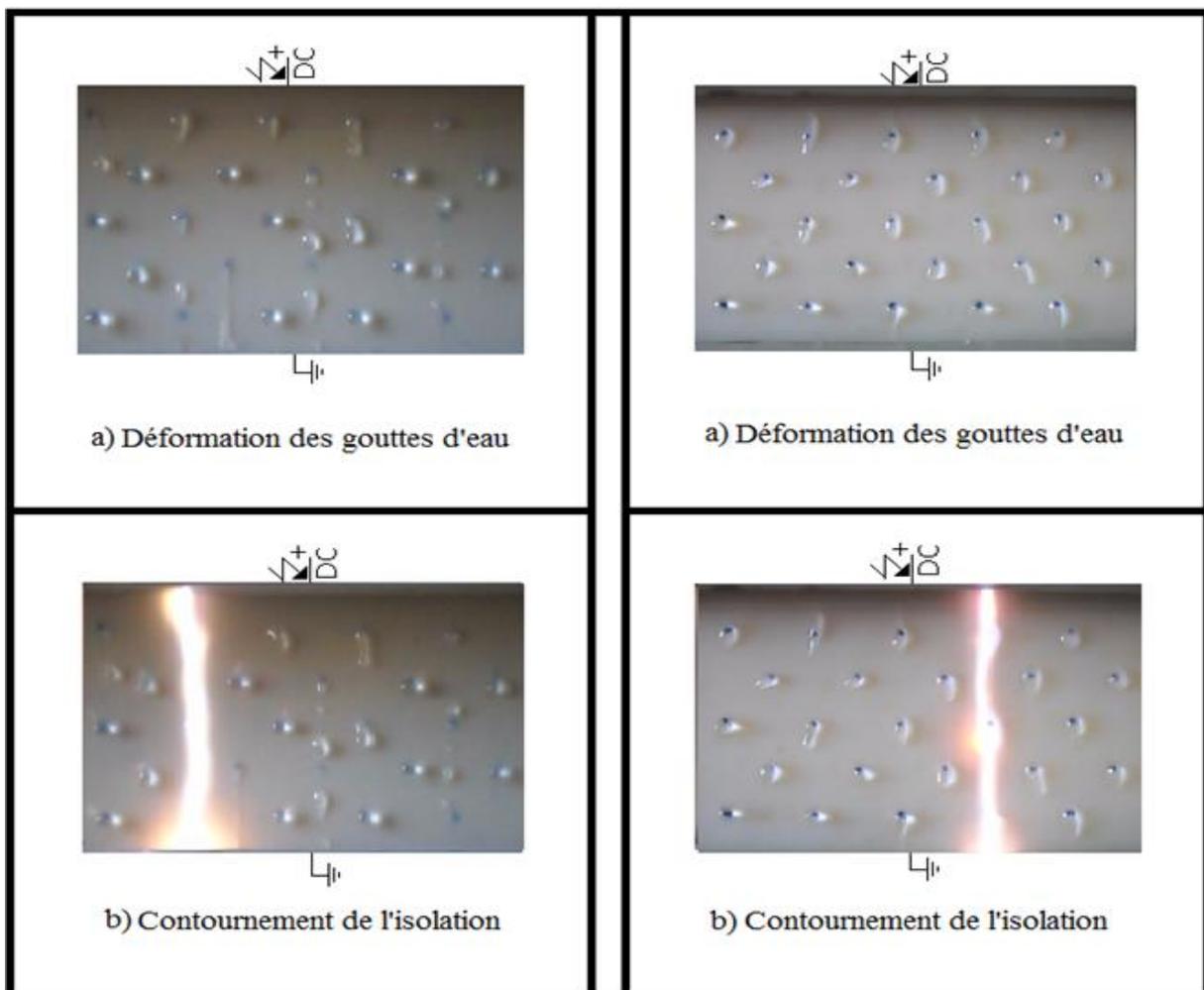
**Fig. IV. 14:** Phases de contournement sous DC+ d'une isolation en silicone angle ( $\alpha = 90^\circ$ ), pour deux configurations avec accumulation et sans accumulation pour ( $V_g = 90\mu\text{l}$ )

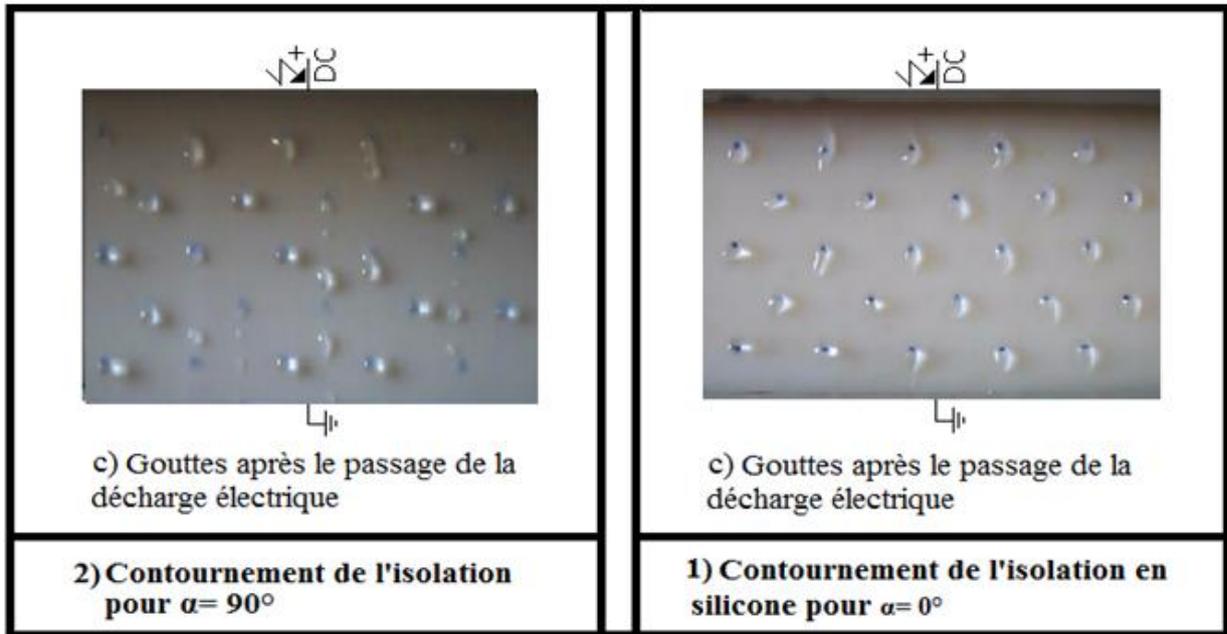
**d) Angle d'inclinaison de l'isolation et volume des gouttes d'eau  $V_g=20\ \mu\text{l}$**



**Fig. IV. 15:** Tension positive de contournement d'une isolation en silicone hydrophobe en fonction d'angle d'inclinaison pour un volume  $V_g=20\mu\text{l}$

Afin de voir l'effet de ce paramètre, nous avons varié l'angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale d'une surface isolante hydrophobe recouverte de 5 rangées de gouttelettes d'eau, à conductivité électrique égale à  $\sigma_v = 180 \mu\text{S/cm}$  pour un volume fixé à  $V_g = 20 \mu\text{l}$  (Fig. IV. 14). Les résultats portés sur la figure IV. 14, montrent une décroissance de la tension continue positive de contournement en fonction de l'angle d'inclinaison. Il en résulte que la valeur la plus grande de la tension de contournement du matériau est obtenue lorsque l'isolation est en position horizontale ( $\alpha=0^\circ$ ) et elle est de l'ordre de 43.47kV. Cette valeur est due au fait que la distance séparant deux gouttes adjacentes sur la ligne de fuite de l'isolation ne subit pas un grand raccourcissement sous l'action du champ électrique de telle sorte à donner naissance à un filet d'eau qui va diminuer la résistance électrique superficielle entre les gouttes d'eau comme le montre la figure (Fig. IV. 15. 1).





**Fig. IV. 16:** Séquences correspondent au contournement d'une surface en silicone recouverte de gouttes d'eau pour les angles d'inclinaison  $\alpha = 0^\circ$  et  $\alpha = 90^\circ$  avec  $V_g = 20\mu\text{l}$ .

Cependant pour un angle d'inclinaison de l'ordre de  $90^\circ$  la tension de contournement électrique de l'isolation atteint la valeur la plus faible avec une chute de 33.21 %. Ceci est dû à l'adhésion des petites gouttes d'eau à leur surface dans cette position et leur allongement optimal dans ce cas de figure (Fig. IV.15. 2) sous l'effet de la force électrique et la force de gravitation qui conduit à la diminution de la zone sèche entre les gouttelettes d'eau qui implique la diminution de la ligne de fuite.

## IV. 8. 2 Polarité négative

### IV. 8. 2. 1 Paramètres d'influence de la performance électrique d'une isolation en silicone

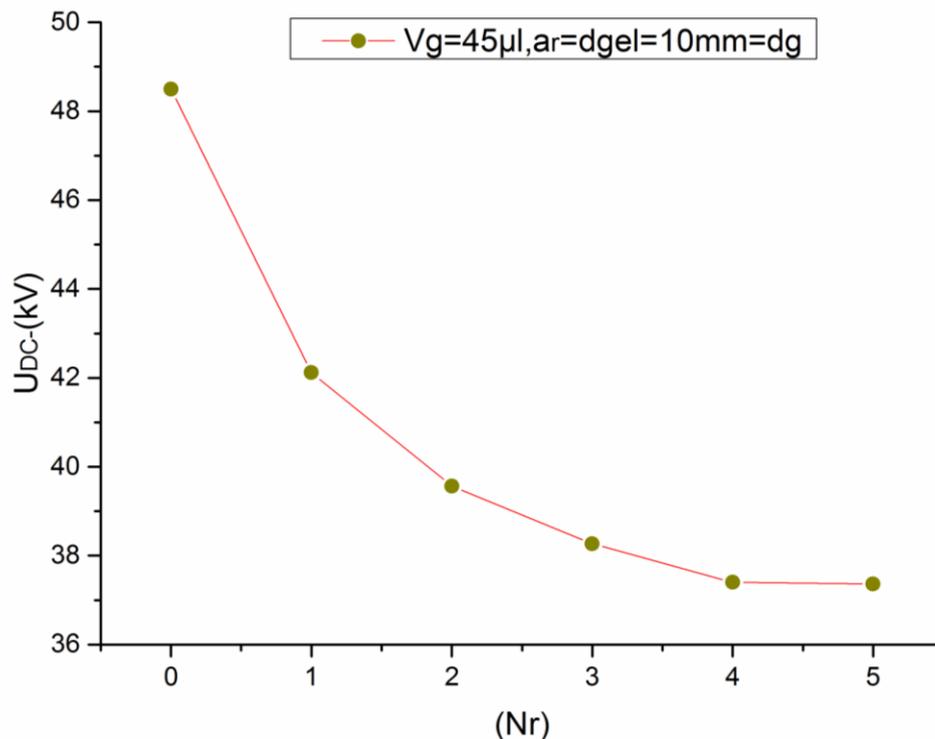
#### a) Nombre de rangées (Nr)

L'évolution de la tension continue de contournement électrique de l'isolation sous polarité négative en fonction du nombre de rangées variable ( $N_r = 1, 2, 3, 4, 5$ ). Le volume des gouttes pris dans cette analyse est de  $45\mu\text{l}$  et la valeur de la conductivité volumique  $\sigma_v = 180\mu\text{S/cm}$

reste fixe pendant tous les tests effectués. Chaque rangée contient 5 gouttelettes d'eau déposées en zigzag.

Les résultats des essais effectués sont représentés en figure IV. 16. Il en résulte que la valeur la plus grande de la tension continue négative de contournement électrique du matériau est obtenue lorsque cette surface isolante est propre et sèche, elle est de l'ordre de 48.5 kV.

Nous avons remarqué aussi que l'augmentation du nombre de rangées implique la diminution de la valeur de la tension de contournement mesurée, jusqu'à une valeur limite à partir de laquelle celle-ci devienne minimale et constante quel que soit le nombre de rangées ajoutées et cette limite correspond à  $N_r=5$  et  $U=37.36$  kV. Cela peut être expliqué par le fait que à partir de cette limite, il ya une possibilité du développement d'une autre décharge en parallèle indépendante de la première comme dans le cas de la polarité positive. Nous remarquons qu'un seul arc provoque le contournement. Nous pouvons dire que cette limite correspondant à la largeur effective d'une seule décharge électrique.



**Fig. IV. 17 :** Tension de contournement négative d'une isolation en silicone hydrophobe en fonction du nombre de rangées des gouttes d'eau ( $V_g = 45 \mu l$ )

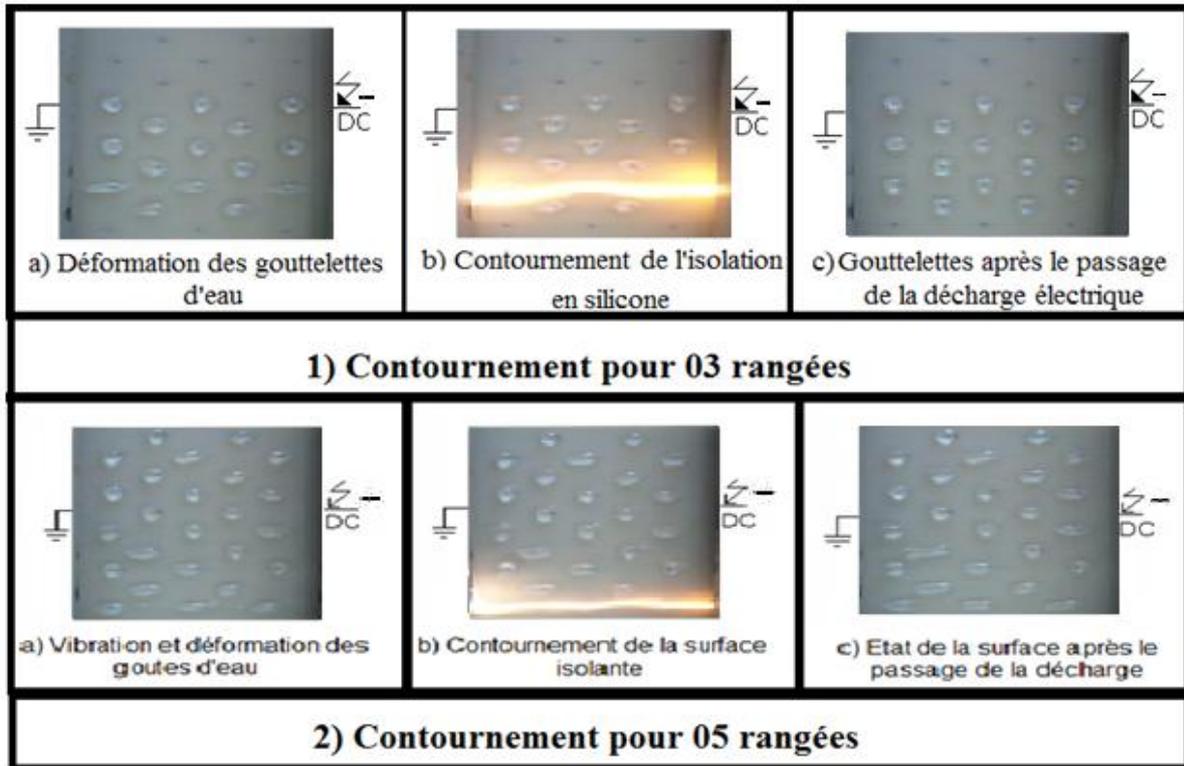


Fig. IV. 18 : Phases de contournement sous DC- d'une isolation en silicones hydrophobe ( $\alpha = 0^\circ$ ,  $Nr=5$ )

b) Angle d'inclinaison de l'isolation et accumulation d'eau pour  $V_g=45\mu l$

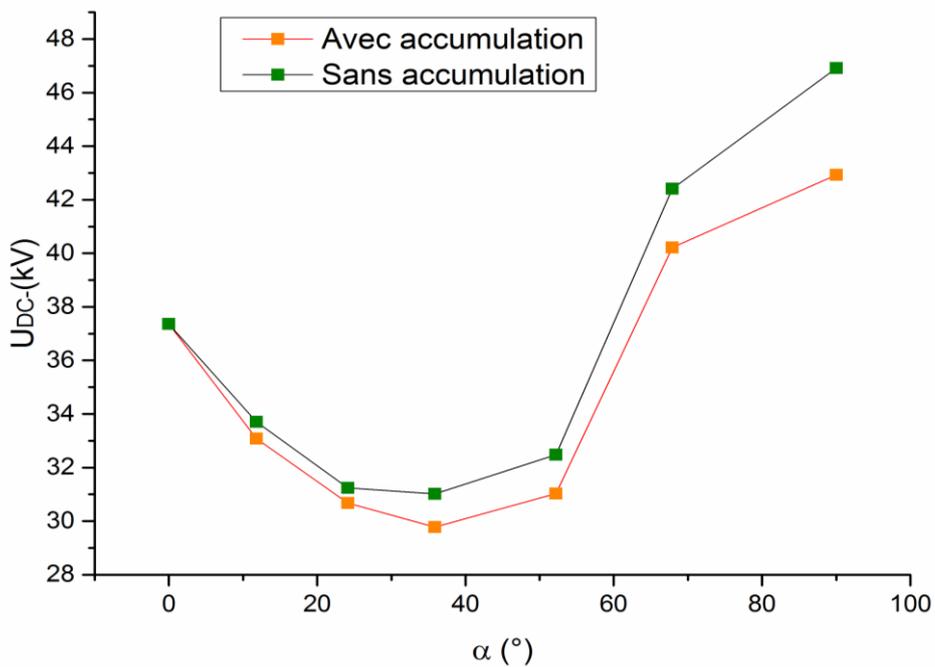
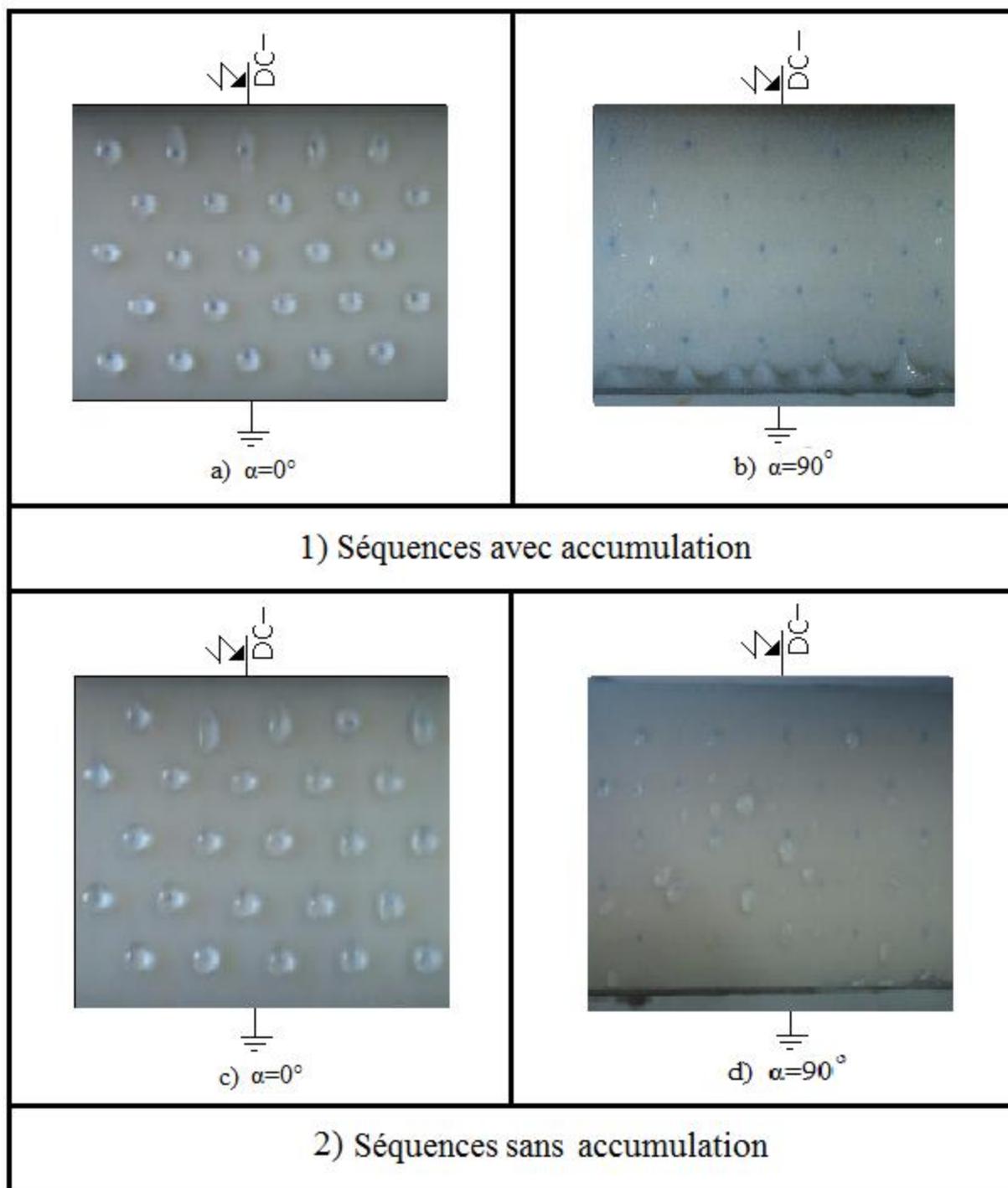


Fig. IV. 19 : Tension contournement négative d'une isolation en silicone hydrophobe en fonction d'angle d'inclinaison ( $V_g = 45\mu l$ )



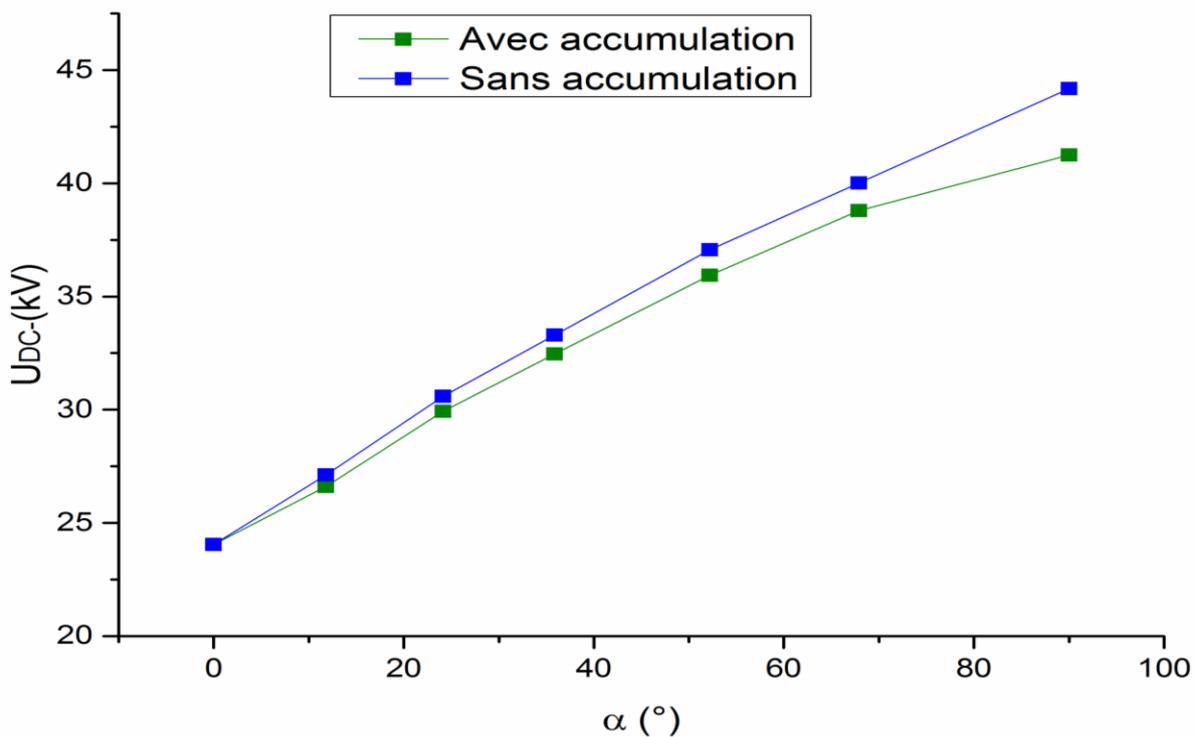
**Fig. IV. 20:** Phases de contournement sous DC- d'une isolation en silicone pour deux angles différents  $\alpha=0^\circ$  et  $\alpha=90^\circ$ , avec et sans accumulation pour  $V_g = 45\mu\text{l}$

La figure IV. 18 illustre la comparaison des caractéristiques de la tension continue de contournement électrique sous polarité négative d'une surface isolante et hydrophobe en fonction de l'angle d'inclinaison  $\alpha$  par rapport à l'horizontale et de l'accumulation des gouttes d'eau à conductivité électrique constante égale à  $180 \mu\text{S/cm}$ . Le volume des gouttes d'eau est

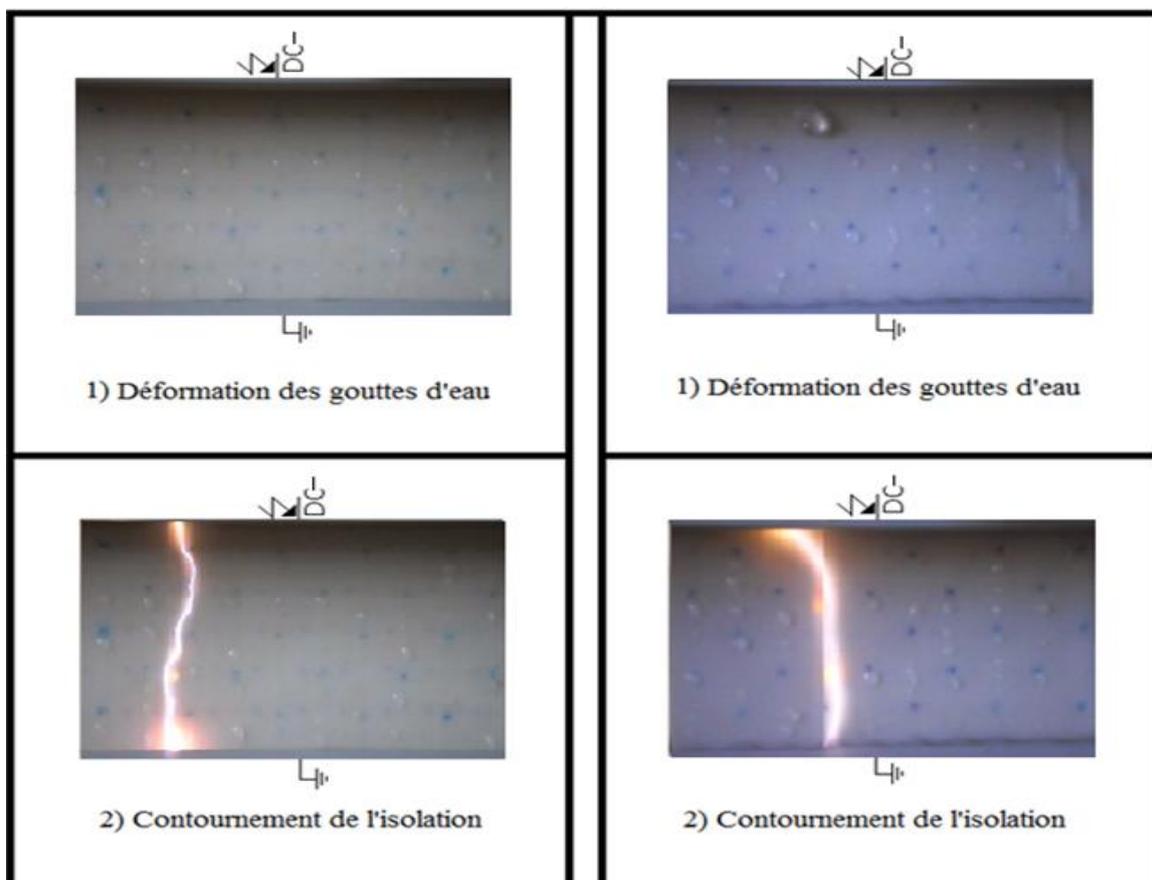
fixé à 45 $\mu$ l dans ce cas de figure. Il en découle des allures similaires de la tension de contournement indépendamment du degré d'accumulation des gouttes d'eau sur l'électrode terre (Fig. IV. 19. a et c). De plus, il en résulte de ces courbes que la tension de contournement diminue avec l'augmentation de l'angle d'inclinaison jusqu'à atteindre un minimum de l'ordre 30.78 kV, à partir duquel elle croît de nouveau. Cette diminution de la tension est justifiée par un raccourcissement maximal de l'espace entre gouttes d'eau par l'allongement optimal de ces dernières pour un angle d'inclinaison critique de la surface isolante de l'ordre de  $\alpha=35.88^\circ$ . A partir de cet angle, il est à souligner la croissance de la tension de contournement en fonction de l'angle d'inclinaison jusqu'à  $\alpha$  égal à  $90^\circ$ . Cette croissance peut être expliquée par le fait qu'en position verticale de l'isolation, les gouttes ont tendance à quitter la surface avant même l'application de la tension. Celles-ci laissent fréquemment à leur décollage, de gouttelettes derrière elles et le contournement par arc finit par s'établir au-dessus de ces minuscules perles d'eau, ce qui explique l'élévation de celle-ci puisque la distance séparant les petites gouttes est plus élevée que celle en présence de grosses gouttes. Il est à remarquer également que l'intervalle entre la tension de contournement de l'isolation avec accumulation d'eau et celle obtenue sans accumulation d'eau est importante d'ordre de 3.99 kV et cela est dû au fait que la taille de la zone humide est plus importante dans le premier cas que dans le deuxième, ce qui entraîne la diminution de la distance parcourue par l'arc jusqu'au court-circuit (Fig. IV. 19 b et d).

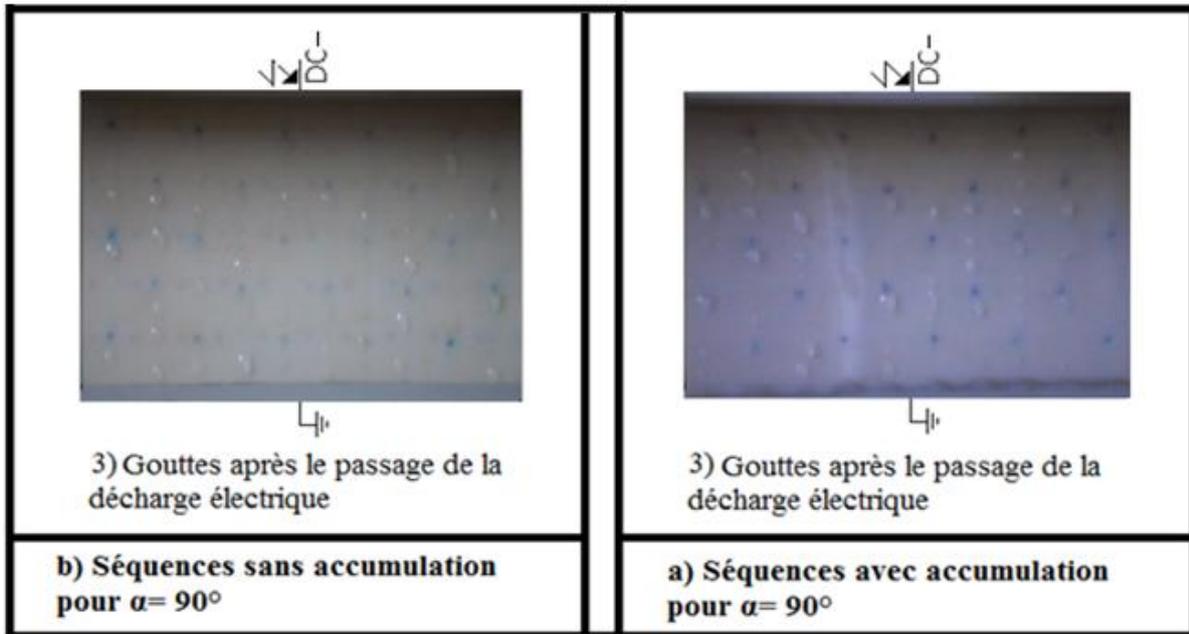
### c) Angle d'inclinaison de l'isolation et accumulation d'eau pour $V_g=90\mu$ l

La figure IV. 20 illustre l'évolution de la tension continue de contournement sous polarité négative d'une isolation en silicone, lorsque celle-ci est recouverte des gouttes d'eau avec ou sans accumulation. Le volume choisi dans ce cas est de 90  $\mu$ l et la distance interélectrode est maintenue fixe et égale à 60mm pour les deux configurations. Il en résulte que l'allure des courbes de la tension de contournement est en croissance avec l'augmentation de l'angle d'inclinaison. De plus, une différence de performance a été obtenue pour ces deux configurations et elle est de l'ordre de 3.94kV et cette différence peut se traduire par la diminution de la zone sèche entre les électrodes ce qui engendre la diminution de la résistance surfacique qui facilite la progression d'un arc électrique, comme il a été expliqué auparavant en polarité positive.



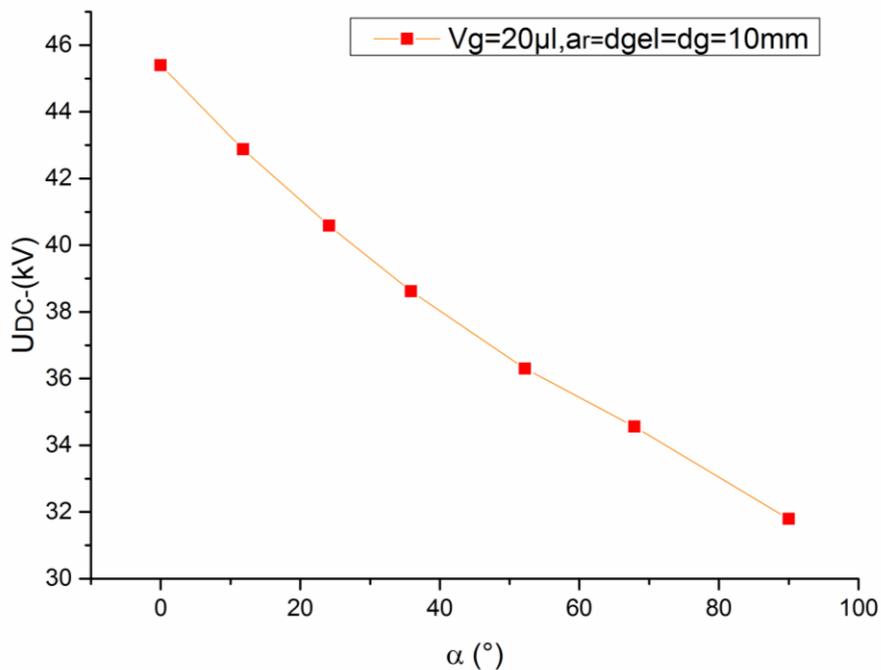
**Fig. IV. 21:** Tension contournement sous DC- d'une isolation en silicone hydrophobe en fonction d'angle d'inclinaison





**Fig. IV. 22:** Phases de contournement DC- d'une isolation en silicone pour  $\alpha = 90^\circ$ , avec et sans accumulation pour  $V_g = 45\mu\text{l}$

**d) Angle d'inclinaison de l'isolation et volume des gouttes d'eau  $V_g=20\mu\text{l}$**



**Fig. IV. 23:** Tension contournement sous DC- d'une isolation en silicone hydrophobe en fonction d'angle d'inclinaison pour un volume ( $V_g = 20\mu\text{l}$ )

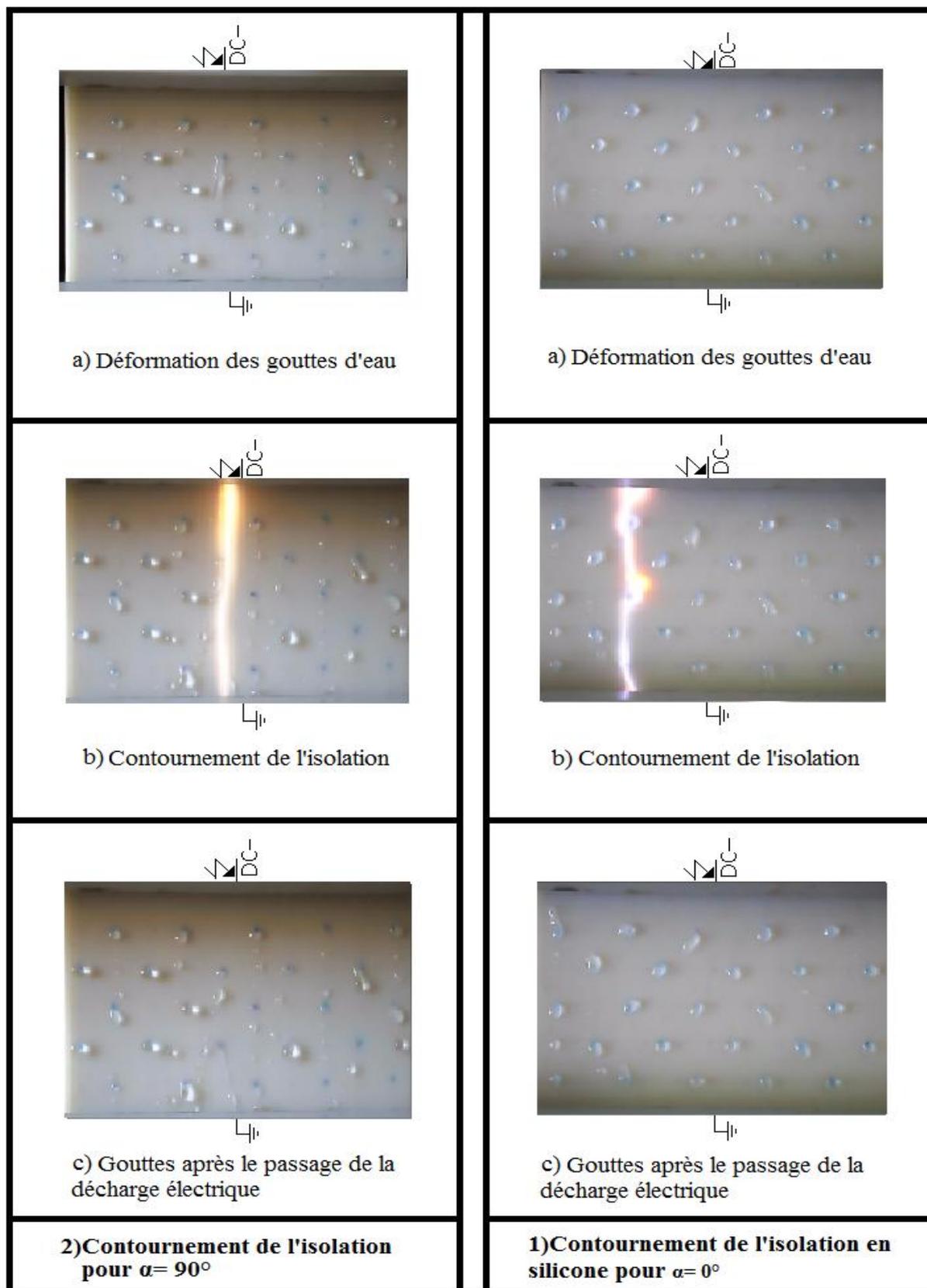


Fig. IV. 24: Tension de contournement d'une surface en silicone recouverte de gouttes d'eau pour  $\alpha=0^\circ$  et  $\alpha=90^\circ$  avec  $V_g=20\mu\text{l}$ .

La figure IV. 22 illustre l'évolution de la tension continue de contournement électrique sous la polarité négative d'une surface isolante hydrophobe en fonction de l'angle d'inclinaison par rapport à la verticale pour une conductivité électrique des gouttes d'eau constante et égale à  $180 \mu\text{S}/\text{cm}$ . Le volume des gouttelettes d'eau reste fixé à  $V_g = 20 \mu\text{l}$  ainsi que et le nombre de rangées  $N_r = 5$  pendant tous les tests effectués. Chaque rangée contient 5 gouttes d'eau déposées en zigzag. Il en résulte que la valeur la plus grande de la tension de contournement du matériau est obtenue lorsque l'angle d'inclinaison est nul ( $\alpha=0^\circ$ ) et elle est de l'ordre de 45.4 kV. Cette valeur est due au fait que la distance séparant deux gouttes adjacentes sur la ligne de fuite de l'isolation ne subit pas une destruction sous l'action du champ électrique de telle sorte à donner naissance à un filet d'eau qui va réduire la résistance électrique superficielle entre les gouttes d'eau comme le montre la figure IV. 23.1.

Cependant pour un angle d'inclinaison de l'ordre de  $90^\circ$  la tension de contournement de l'isolation atteint la valeur la plus faible avec une chute de 29.97%. Ceci est dû à l'adhésion des petites gouttes d'eau à leur surface dans cette position et leur allongement optimal dans ce cas de figure (fig. IV.23.2) sous l'effet de la force électrique et de leur poids conduisant à la diminution de la zone sèche entre les gouttelettes d'eau ce qui entraîne la diminution de la ligne de fuite.

## IV. 9 Conclusion

L'analyse de l'effet de l'arrangement et de l'accumulation de gouttes d'eau recouvrant une surface en silicone hydrophobe sous DC sur sa performance électrique pour un nombre de rangées, volume de gouttes d'eau et angle d'inclinaison variables, en gardant la valeur de la conductivité volumique fixe et égale à  $\sigma_v = 180 \mu\text{S}/\text{cm}$  a conduit aux résultats essentiels suivants:

- La valeur maximale de la rigidité diélectrique longitudinale d'une isolation en silicone hydrophobe est obtenue en absence de gouttes d'eau sur sa surface. A partir de ce point sa tension de contournement décroît avec l'augmentation du nombre de rangées de gouttes jusqu'à atteindre une valeur limite, quel que soit le nombre de rangées ajoutées.
- Le dimensionnement d'un isolateur doit être basé sur les minimums de la tension de leur contournement.
- 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.

- Le système étudié est plus rigide en polarité négative qu'en polarité positive.
- L'élévation de l'angle d'inclinaison implique la décroissance de la tension de contournement de l'isolation selon un écart de 25.66 % en DC+ et de 23.03 % en DC- pour un volume de 20 $\mu$ l.
- Pour un volume de gouttes d'eau de 90  $\mu$ l, la tension de contournement la plus faible est obtenue en position horizontale quelle que soit la polarité de la tension appliquée.
- Pour un angle d'inclinaison critique compris entre 0 et 90° de la surface du polymère, recouverte de 5 rangées de gouttes d'eau de 45  $\mu$ l de volume, il existe un nouveau minimum de performance électrique correspondant à une chute de celle-ci s'élevant au total à 34.06 % en DC+ et 33.71 % en DC-. Par contre, lorsque l'inclinaison avoisine 90°, l'isolation affiche une performance pratiquement très proche de celle acquise sans gouttes.
- On a constaté un écart de 5% dans la rigidité diélectrique entre la configuration avec et celle sans accumulation d'eau.

### Conclusion générale

L'objectif principal de notre travail est d'étudier l'effet du degré d'inclinaison par rapport à l'horizontale d'une isolation en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau, leur volume et leur conductivité électrique sur sa performance. Les résultats essentiels de cette analyse peuvent être résumés comme suit:

- La valeur maximale de la rigidité diélectrique longitudinale est obtenue en absence de gouttes d'eau sur la surface de l'isolation ;
- 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 ;
- Le système étudié est plus rigide en polarité négative qu'en polarité positive ;
- L'influence des gouttelettes d'eau sur le mécanisme de contournement de la surface des isolateurs est largement déterminée par la forme des gouttelettes ;
- Les gouttelettes d'eau peut se déformer sous l'influence d'un champ électrique ;
- 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'augmentation de l'angle d'inclinaison conduit à la décroissance de la tension de contournement de l'isolation pour un volume de  $20\mu\text{l}$  ;
- Dans les zones pluvieuses il est conseillé d'utiliser sur site des isolateurs un angle d'inclinaison supérieur à  $50^\circ$ , par contre le cas où il y a le phénomène de condensation il est mieux d'utiliser l'angle horizontale ( $\alpha = 0^\circ$ )

---

*Bibliographie*

- [1] J. Ndoumb, “Étude comportementale des gouttelettes d’eau déposées sur la surface d’un isolateur composite haute tension en présence du champ électrique”, thèse de doctorat, l’école doctorale Electronique, Electrotechnique et Automatique de Lyon, 2014.
- [2] Y. Higashiyama, “InductionCharging 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] S. M. Rowland<sup>1</sup> and F. C. Lin, “Stability of alternating current discharges between water drops on insulation surfaces”, Journal of physics D: Applied physics, pp.3067–3076, 2006.
- [8] L. Chengrong, Z. Linjie, X. Jun, Z. Shuqi and Y. Jisha “Influence of Seasons on Hydrophobicity of Silicone Rubber Insulators in Semi-wet Warm-temperature Zone of China”. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 15, Issue. 4, pp.1081-1088, Aout 2008.
- [9] J. Vimal Vas, B. Venkatesulu and M. J. Thomas, “Tracking and Erosion Resistance of Silicone Rubber Nanocomposites under Positive and Negative DC Voltages”, Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2010.
- [10] G. P. Bruce, “Performance of Silicone Rubber in DC Inclined Plane Tests”, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul, Vol 17, No. 2, pp 521-532, April 2010.
- [11] S. Thong-Om, W. Payakcho, J. Grasaesom, A. Oonsivilaiand B. Marungsri, “Comparison ageing deterioration of silicone rubber outdoor polymer insulators inartificial accelerated salt fog ageing test”, World Academy of Science, Engineering and Technology 60, 2011.
- [12] C. Bär et al, “Acomparative evaluation of the retention of the hydrophobicity and the trackingresistance of silicone elastomers under AC and DC stresses”, 17<sup>ème</sup> international symposium on high voltage engineering, Hannover, Germany, 2011.
- [13] 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.
- [14] S. Hai, 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.
- [15] A. Kechida, K. Ighmouracene, “Effet du mode de disposition de gouttes d’eau sur une surface en silicone hydrophobe inclinée sur sa performance électrique sous tension continue”, Mémoire de Master, Université de Bejaia, 2015.
- [16] N. D. Hoang, “Etude des propriétés électriques des élastomères silicones utilisés pour l’isolation électrique”, Thèse Doctorale, UJ Fourier Grenoble 1, 2005.
-

- [17] M. Soufi, M. Zemirline, "Conception d'un modèle dynamique de contournement d'un isolateur pollué sous tension alternative 50 Hz", PFE, Génie Electrique, ENP 2004.
- [18] J. c. dubois."propriétés diélectrique des polymères"Techniques de l'Ingenieur, E1850 ,1998.
- [19] S. Guerfi, "Modélisation des isolateurs de haute tension pollués sous tension continue", Mémoire de Magister, Génie Electrique, UAM Bejaia.
- [20] K. Amriche, S. Benayad, "Modélisation des principales caractéristiques d'un isolateur pollué sous tension continue", PFE, Génie Electrique, USTHB 2004.
- [21] A. Bouarouri, R. Ladjal, "Comportement et caractérisation électrique d'un modèle d'isolateur sous tension alternative", PFE, Génie Electrique, ENP 2006.
- [22] A. Mekhaldi, "Etude du développement d'un arc électrique sur des surfaces isolantes contaminées par la pollution désertique", Mémoire de Magister, Génie Electrique, ENP 1990.
- [23] D. Namane, "Effet de la discontinuité de la pollution sur le comportement d'isolateur haute tension, sous la fréquence de 50 Hz", Mémoire de Magister, Génie Electrique, ENP 1998.
- [24] M. Tegar, "Etude mathématique des mécanismes de développement des décharges électriques sur des isolateurs installés en régions polluées", Mémoire Magister, Génie Electrique, ENP 1993.
- [25] A. Mekhaldi, H.Boudjelthia, "Contribution à l'étude de la pollution des isolateurs de haute tension dans la région électrique de Annaba", PFE, Génie Electrique, ENP 1984.
- [26] F. Midi, K. Ouerdane, "Les effets de la pollution sur les ouvrages électriques à 30 kV en région littorale ", PFE, Génie Electrique, USTHB 1998.
- [27] Z. Sahli, "Etude de la non uniformité de la pollution sur des caractéristiques de contournement des isolateurs réels pollués sous tension continu", Mémoire de Magister, Génie Electrique, UAM Bejaia.
- [28] G. le Roy, C. Gary, "Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions", Eyrolles, Paris, 1984.
- [29] A. Cimador, S. Vitet, "La pollution des isolateurs", EDF-Epure N°27, juillet 1990.
- [30] 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.
- [31] K. Naito, "Insulator Pollution. Part 1 : General aspects. , Séminaire des isolements des lignes et postes HT". Casablanca, 1989.
- [32] B. Hammoum, A, Kerbouche, "Etude du Phénomène de Pollution des Isolateurs de Haute Tension dans la Région Electrique du Centre Algérien", Mémoire de projet de fin d'études, Génie Electrique, ENP 2007.
- [33] Z. Sahli, « Etude de la non uniformité de la pollution sur les caractéristiques de contournement des isolateurs réels sous tension continue», Thèse de Magister, département d'électrotechnique, Université Abderrahmane Mira de Bejaia.
- [34] A. Camidor, M. Cojan, P. Haute feuille, M. Morceau "Méthodes de dimensionnement des isolateurs de lignes aériennes en régions polluées " CIGRE, Rapport 33-04,1978.
- [35] A. Mekhaldi, "Etude des phénomènes de conduction et de décharge électrique sur dessurfaces isolantes polluées sous tension alternative 50 Hz ", Thèse de doctorat d'état, Génie Electrique, ENP Alger, 1999.
- [36] K. Naito, "Insulator Pollution. Part 1 : General aspects. , Séminaire des isolements des lignes et postes HT". Casablanca, 1989.
- [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", Mémoire de projet de fin d'études, Génie Electrique, USTHB Alger, 2004.
- [40] D. Namane, "Effet de la discontinuité de la pollution sur le comportement d'isolateur haute tension, sous la fréquence de 50 Hz", Mémoire de Magister, Génie Electrique, ENP 1998.
- [41] M. Soufi, M. Zemirline, "Conception d'un modèle dynamique de contournement d'un isolateur pollué sous tension alternative 50 Hz", Mémoire de projet de fin d'études, Génie Electrique, ENP Alger, 2004.
- [42] M. Tegar, "Etude mathématique des mécanismes de développement des décharges électriques sur des isolateurs installés en régions polluées", Thèse de Magister, Génie Electrique ENP, 1993.
- [43] 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.
- [44] Froehlich, "theory of dielectrics", oxford Univ. press, 1949.
- [45] R. Boudissa, "Performance des écrans sous tensions alternative et continue", CNHT 2009, Sidi Bel Abbés Algérie.
- [46] F. Bouchelga, R. Boudissa, "Effect of the Development of Electrical Parallel Discharges on Performance of Polluted Insulators under DC Voltage", IEEE, TDEIS. Vol. 22, No. 4. pp..... August 2015.
-

## Résumé

L'objectif recherché à travers ce travail consiste en la quantification de la tension de contournement électrique d'une isolation en silicone délimitée par un système d'électrodes plan - plan mise sous tension continue de polarité variable, sous l'influence de quelques paramètres tel que le volume, l'accumulation des gouttes d'eau déposées en zigzag et l'angle d'inclinaison de l'isolation sur l'évolution de performance électrique du système étudié, en gardant la conductivité volumique de la solution polluante fixe à  $\sigma_v = 180 \mu\text{S/cm}$ . Les résultats obtenus montrent l'accroissement de la tension de contournement en fonction de l'augmentation de l'angle d'inclinaison dans le cas d'un volume de  $90 \mu\text{l}$ , il en résulte également que le système étudié est plus rigide en polarité négative qu'en polarité positive. De plus, une petite diminution de la tension de contournement en DC a été obtenue dans les mesures avec accumulation des gouttes d'eau que dans le cas contraire.

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

---

# *Sommaire*

# *Liste des figures*

# Liste des symboles

# *Nomenclature*

# Introduction Générale

*Chapitre I*  
*ETAT D'ART*

# *Chapitre II*

## *ISOLANTS ET ISOLATEURS*

*Chapitre IV*

*PARTIE*

*EXPERIMENTALE*

*Chapitre III*  
*POLLUTION*  
*ATMOSPHERIQUE*  
*ET PHENOMENES*  
*DE DECHARGE*

*CONCLUSION*  
*GENERALE*