

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE

SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA - BEJAÏA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

Département génie électrique

## Mémoire de fin de cycle

Représenté par

M<sup>r</sup> : Ydjedd Radouane

En vue de l'obtention d'un Diplôme de Master en génie électrique

Option : Réseaux électriques

## Thème

**Performance d'une surface en silicone recouverte  
des gouttes d'eau sous tension alternative**

**Soutenu publiquement le 26/06/2013 devant le jury composé de :**

M <sup>me</sup> . MERABET	Samira	Doctorante	Univ. Béjaïa	Présidente
M <sup>r</sup> . HERZINE	Mohand Seghir	Doctorant	Univ. Béjaïa	Examineur
M <sup>r</sup> . BOUDISSA	Rabah	MCA	Univ. Béjaïa	Rapporteur

# Remerciement

*En préambule à ce mémoire, j'adresse mes remerciements les plus sincères tout d'abord au « **Bon Dieu** » le plus puissant et de m'avoir guidé vers le chemin du savoir et de m'accorder le courage, la patience et la santé.*

*Particulièrement j'adresse tous mes remerciements à Monsieur **R. BOU DISSA**, pour le partage sans limite de ses innombrables connaissances dont il a su me faire bénéficier pendant cette période de travail de recherche inoubliable, et bien avant.*

*Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude aux doctorantes **B. fatma A. fatiha**, Je les remercie pour leurs gentillesse, sympathies, encouragements, précieuses directives, disponibilité et leurs fructueux conseils.*

*Je remercie les membres de jury, chacun par son nom, qui m'ont honoré en acceptant d'examiner ce travail.*

*Mes très vifs et sincères remerciements à tous mes amis (es), qui ont contribués (es) soit de près ou de loin, Particulièrement, Abdenour, Azzedine, Djamel, Omar, Hacén thayri, Djoudi, Nacer, Amirouche, Iyes, sifax, Adel ... Je veux les remercier pour leurs divers conseils, afin que mon travail s'achève.*

---

# *Dédicace*

*En guise de reconnaissance,  
Je dédie ce modeste travail à mes chers parents  
A mes chers frères et sœurs  
A mes chers neveux et nièces  
Amina & Sara  
Ainsi qu'à toute ma famille et mes amis*

*Radouane Y.*

# Sommaire

## INTRODUCTION GENERALE

- Introduction générale ..... 1

### Chapitre I

#### L'EVOLUTION DU NIVEAU DE RECHERCHES SUR LA PERFORMANCE DES SURFACES HYDROPHOBES EN SILICONE SOUS TENSION ALTERNATIVE

I.1. Introduction .....	3
I.2. Synthèse des travaux sur la performance de surface hydrophobe en silicone .....	3
I.2.1. G.G. Karaday, H.M. Schneider, 1994 .....	3
I.2.2. S. Gogur et J. Chang, 1994 .....	3
I.2.3. S. Gurbanski et R. Hartings, 1995 .....	5
I.2.4. S. M. Gubanski et al, 1999 .....	5
I.2.5. Y. Zhu, S. Yamashita, 2003 .....	6
I.2.6. K. Karakoulidis, M.G. Danikas, P. Rakitzis, 2005 .....	6
I.2.7. Kenichi Haji, Yong Zhu, 2006 .....	8
I.2.8. Y. Zhu, K. Haji, H. Yamamoto, 2006 .....	9
I.2.9. Michael G. Danikas, 2006 .....	11
I.2.10. K. Haji, Y. Zhu, M. Otsubo, T. Sakoda, 2008 .....	12
I.2.11. B. X. Dul, Yong Liul, 2009 .....	14
I.2.12. S. Thong-Om, W. Payakcho, 2011 .....	16
I.3. Conclusion .....	18

### Chapitre II

#### ISOLANTS ET PROPRIETES DIELECTRIQUES ET LEURS AVANTAGES EN HAUTE TENSION

II.1. Introduction .....	19
II.2. Définitions.....	19
II.2.1. Isolants .....	19
II.2.2. Isolations .....	19
II.2.3. Diélectrique.....	19
II.3. Propriétés diélectriques des matériaux isolants .....	20
II.3.1. Résistance et résistivité.....	20

II.3.2. Rigidité diélectrique.....	20
II.3.3. Permittivité .....	22
II.3.4. Angle de pertes et facteur de dissipation .....	23
II.4. Les facteurs climatiques influençant sur les isolants .....	23
II.4.1. La température .....	23
II.4.2. L'humidité .....	24
II.4.3. Pression.....	24
II.5. Différents types d'isolants .....	24
II.5.1. Isolant gazeux .....	24
II.5.2. Isolants liquides .....	24
II.5.3. Isolants solides .....	25
II.6. Matériaux utilisés pour les isolants solides .....	25
II.6.1. Porcelaine.....	25
II.6.2. Verre .....	26
II.6.3. Bakélite.....	26
II.6.4. Silicone .....	27
II.7. Technique de caractérisation des surfaces .....	30
II.7.1. Energie de surface et angle de contact.....	30
II.7.2. Principe.....	30
II.7.3. Propriété de la surface .....	31
II.7.4. Hydrophobicité .....	32
II.8. Applications des élastomères silicones dans l'isolation électrique .....	32
II.8.1. Isolateurs à long fût.....	33
II.8.2. Isolation volumique .....	33
II.8.3. Isolation surfacique.....	33
II.9. Conclusion .....	34

## Chapitre III

### POLLUTION ATMOSPHERIQUE ET PHENOMENES DE DECHARGES

III.1. Introduction.....	35
III.2. Définitions .....	35
III.2.1. Contournement.....	35
III.2.2. Tension de Contournement.....	35
III.2.3. Tension de tenue.....	35
III.3. Formation des couches polluantes.....	36
III.4. Sources de pollution .....	36
III.4.1. Pollution naturelle.....	36

III.4.2. Pollution industrielle.....	37
III.4.3. Pollution mixte.....	37
III.5. Sévérité de pollution.....	37
III.5.1. Mesure de la sévérité de pollution d'un site.....	38
III.6. Impact de la pollution.....	40
III.7. Effet de la pollution sur la rigidité diélectrique de l'air.....	40
III.8. Classification des sites pollués.....	40
III.9. Méthodes d'essais sous pollution.....	41
III.9.1. Essai sous pollution naturelle.....	41
III.9.2. Essais sous pollution artificielle.....	41
III.10. Techniques de lutte contre la pollution.....	42
III.10.1. Techniques de lutte contre la pollution.....	42
III.10.2. Utilisation des isolateurs plats (auto-nettoyables).....	42
III.10.3. Graissage des isolateurs (couches hydrophobes).....	43
III.10.4. Revêtements à base de silicones.....	43
III.11. Décharges électriques.....	43
III.12. Décharge disruptive.....	44
III.12.1. Décharge intrinsèque.....	44
III.12.2. Décharge thermique.....	44
III.12.3. Décharge partielle.....	44
III.13. Décharge dans l'air.....	45
III.13.1. Décharge de type streamers.....	45
III.13.2. Décharges de type leader.....	47
III.14. Différents types d'amorçage des isolations gazeuses.....	48
III.14.1. Amorçage de l'air par avalanche primaire.....	48
III.14.2. Claquage de l'air par streamers.....	49
III.14.3. Disruption de l'air par leader.....	49
III.15. Conclusion.....	50

## **Chapitre IV**

### **RESULTATS D'ESSAIS ET INTERPRETATIONS**

IV.1. Introduction.....	51
IV.2. Modèle expérimental et techniques de mesure.....	51
IV.3. Dessiccateur.....	54
IV.4. Procédé d'essai.....	55
IV.5. Correction des résultats de tension en fonction des conditions atmosphériques.....	55
IV.6. Propriétés diélectriques de l'isolation en silicone.....	56

IV.7. Facteurs d'influence de la tension de contournement d'une surface en silicone hydrophobe .....	57
IV.7.1. Conductivité et nombre de rangées de gouttes d'eau.....	57
IV.7.2. Volume des gouttes d'eau, nombre de rangées .....	59
IV.7.3. Nombre de rangées espacement entre les gouttes d'eau .....	59
IV.7.4. Conductivité de la solution d'eau .....	61
IV.7.5. Angle d'inclinaison de l'isolation et espacement entre gouttes .....	61
IV.7.6. Volume des gouttes d'eau et inclinaison de la surface en silicone .....	64
IV.7.7. Arrangements de gouttes d'eau mixtes.....	66
IV.8. Conclusion .....	68
Conclusion générale.....	70

---

**Liste des symboles et Abréviations**

EPDM	Ethylène Propylène Diène Monomère
PDMS	Poly-Di-Méthyl-Siloxane
$\mu\text{A}$	Micro-Ampère
cm	Centimètre
SR	Caoutchouc en silicone
SR-HTV	Caoutchouc en silicone à haute température vulcanisé
$R_s$	Résistance série
$R_d$	Résistance de terre
OSC	Oscilloscope
$\text{K}\Omega$	Kilo-ohm
$\text{M}\Omega$	Mega-ohm
SEM	Scanning electron microscope
FT-IR	Fourier transform infrared
TG-DTA	Thermogravimetric differential thermal analysis
GC/MS	Gas chromatography/mass spectrometry
$\mu\text{S/cm}$	Micro-siemens par centimètre
CA	Angle de contact
DDT	Dynamic drop test
CH	Classification d'hydrophobicités
U	Tension électrique de claquage
d	Distance interélectrode
$E_d$	Rigidité diélectrique
$E_{di}$	Rigidité intrinsèque
$E_{dp}$	Rigidité pratique
E	Champ électrique
$E_p$	Champ électrique propre
$E_e$	Champ électrique extérieur
$C_x$	Capacité entre deux électrodes
$C_0$	Capacité du vide
$\epsilon_r$	Permittivité relative
$\epsilon_a$	Permittivité absolue
$\epsilon_0$	Constant électrique du vide
$\epsilon_r^*$	Permittivité complexe

$\varepsilon_r'$	Partie réelle de la permittivité complexe
$\varepsilon_r''$	Partie imaginaire de la permittivité complexe
$\varepsilon_a^*$	Permittivité complexe absolue
$\delta$	Angle de pertes
SF <sub>6</sub>	L'hexafluorure de soufre
HT	Haute tension
MT	Moyenne tension
UV	Ultra-violet
G	Conductance superficielle
I	Courant électrique
V	Tension d'alimentation
DDSE	Densité du dépôt de sel équivalent
DDNS	Densité du dépôt non soluble
m <sub>f</sub>	Masse du papier filtre
m <sub>i</sub>	Masse initiale du papier filtre
A	Surface lavée de l'isolateur
DP	Décharge partielle
E <sub>g</sub>	Champ électrique dans les vacuoles gazeuses
E <sub>i</sub>	Champ électrique dans l'isolant solide
$\varepsilon_{ri}$	Permittivité relative de l'isolant solide
$\varepsilon_{rg}$	Permittivité relative du gaz
X <sub>c</sub>	Distance critique
N <sub>c</sub>	Nombre critique d'électrons
T <sub>f</sub>	Temps de front
AC	Appareil de Commande manuelle ou automatique
T <sub>r</sub>	Transformateur BT/HT
Cam	Caméscope numérique
Oe	Objet d'essai
PH	Position horizontale
PI	Position inclinée
PV	Position verticale
d	Distance interélectrode
l	Largeur du film en silicone

---

$a_r$	Distance séparant deux rangées successives de gouttes d'eau sur la largeur de l'isolation
$d_g$	Distance entre deux gouttes adjacentes sur la même ligne de fuite de l'isolation
$d_{gél}$	Distance entre l'électrodes (soit de coté HT et coté terre) et de la première goutte
$\alpha$	Angle d'inclinaison de l'isolation
$G_g$	Rangées grandes gouttes
$P_g$	Rangées petites gouttes
$N_r$	Nombre de rangées
$A_r$	Arrangements des gouttes mixtes sur la ligne de fuite
$\theta$	Température
$P$	Pression
$H$	Humidité de l'air environnant
$\hat{U}_c$	Tension de contournement
$\hat{U}_{c0}$	Tension de contournement dans les conditions normales
$K_d$	Facteur de correction relatif à la température et à la pression
$K_h$	Facteur de correction relatif à l'humidité

---

---

---

## Liste des figures

---

---

<b>Fig. I. 1:</b> Isolateur composite en silicone trempé dans le sel (NaCl) et de kaolin .....	4
<b>Fig. I. 2:</b> Deux isolateurs préalablement recouverts d'une mince couche de kaolin sec .....	4
<b>Fig. I. 3:</b> Arrangements des gouttelettes par rapport aux électrodes .....	7
<b>Fig I. 4:</b> Tension de contournement en fonction de la conductivité et arrangement des gouttes	7
<b>Fig. I. 5:</b> Schéma du dispositif utilisé .....	8
<b>Fig. I. 6:</b> Comportement d'une goutte d'eau et le champ électrique .....	9
<b>Fig. I. 7:</b> Tension de contournement en fonction du volume et la conductivité des gouttelettes	9
<b>Fig. I. 8:</b> Modèle électrodes aiguilles-plan .....	10
<b>Fig. I. 9:</b> Image de l'échantillon par SEM, (a) avant et (b) après la décharge couronne .....	10
<b>Fig. I. 10:</b> Arrangements des gouttelettes d'eau sur des plans .....	11
<b>Fig I. 11:</b> Tension de contournement pour différentes conductivités d'eau.....	12
<b>Fig. I. 12:</b> Dispositif expérimental.....	12
<b>Fig. I. 13:</b> Formes d'ondes du courant de fuite et de la tension pour 0.8 mS/cm .....	13
<b>Fig. I. 14:</b> Performance de gouttelette sur une surface .....	14
<b>Fig. I. 15:</b> Phénomènes de décharge pendant la chute de la goutte d'eau .....	15
<b>Fig. I. 16:</b> Activités des décharges sur un isolateur en silicone .....	16
<b>Fig. I. 17:</b> Classification d'hydrophobicité (HC1-HC6) .....	17
<b>Fig. II. 1:</b> Rigidité diélectrique.....	21
<b>Fig. II. 2:</b> Circuit équivalents série et parallèle .....	23
<b>Fig. II. 3:</b> Structure chimique de la silicone .....	28
<b>Fig. II.4 :</b> Valeurs de l'angle de contact possibles.....	31
<b>Fig. II.5 :</b> comportement d'une surface hydrophobe ou hydrophile.....	32
<b>Fig. II.6 :</b> hydrophobicité d'une surface en silicone .....	32
<b>Fig. II.8 :</b> Principe d'un isolateur à long fût.....	33
<b>Fig. II.7:</b> (a) Isolateur silicone ; (b) Traversée avec un revêtement silicone.....	34
<b>Fig. III. 1:</b> Schéma et procédé de mesure de la DDNS .....	39
<b>Fig. III. 2:</b> Isolant comportant une inclusion gazeuse.....	45
<b>Fig. III. 3:</b> Avalanche électronique dans un champ $\varphi \neq 0$ homogène.....	46
<b>Fig. III. 4:</b> Développement d'un streamer .....	47
<b>Fig. III.5:</b> Développement d'un leader.....	47
<b>Fig. III.6 :</b> Amorçage d'un intervalle d'air par avalanche primaire .....	48
<b>Fig. III.7 :</b> Disruption d'un intervalle d'air par streamers.....	49

---

<b>Fig. III.8 :</b> Amorçage d'un espace d'air par leader .....	50
<b>Fig. IV. 1:</b> (a) schéma de mesure et de visualisation; (b) différentes positions de l'objet d'essai .....	52
<b>Fig. IV. 2:</b> Différentes positions du modèle expérimental.....	52
<b>Fig. IV. 3:</b> Positionnement des gouttes sur une surface en silicone limitée par 2 électrodes ...	53
<b>Fig. IV. 4:</b> Appareil de mesure de conductivité volumique (Conductimètre) .....	54
<b>Fig. IV. 5:</b> Photo montrant un dessiccateur en verre .....	54
<b>Fig. IV. 6:</b> Abaques de corrections en fonction de l'humidité et de la température .....	56
<b>Fig. IV. 7:</b> $\hat{U}_c = f(\sigma_v, N_r)$ d'une surface en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau ( $V_g = 45 \mu\text{l}$ ).....	57
<b>Fig. IV. 8:</b> Couleur de lumière émise par la décharge pour $\alpha = 0^\circ$ , $\sigma_{v2} = 7 \text{ mS/cm}$ .....	58
<b>Fig. IV. 9:</b> $\hat{U}_c = f(V_g, N_r)$ d'une surface en silicone hydrophobe.....	59
<b>Fig. IV. 10:</b> $\hat{U}_c = f(N_r, a_r, d_g, d_{g\text{él}})$ d'une surface en silicone hydrophobe horizontale .....	60
<b>Fig. IV. 11:</b> $\hat{U}_c = f(\sigma_v)$ de gouttes d'eau en position horizontale ( $N_r = 5$ ).....	61
<b>Fig. IV. 12:</b> $\hat{U}_c = f(\alpha^\circ)$ d'une surface en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau ....	62
<b>Fig. IV. 13:</b> Différentes phases de contournement de la surface isolante pour $\alpha_c = 65^\circ$ .....	63
<b>Fig. IV. 14:</b> $\hat{U}_c = f(\alpha^\circ, V_{ge})$ d'une isolation en silicone hydrophobe, $\sigma_{v1} = 180 \mu\text{S/cm}$ .....	64
<b>Fig. IV. 15:</b> Contournement d'une surface en silicone recouverte de petites gouttes .....	65
<b>Fig. IV. 16:</b> Contournement d'une surface en silicone recouverte de grosses gouttes.....	66
<b>Fig. IV. 17.:</b> Combinaison de plusieurs arrangements de gouttes d'eau mixtes à volume variable .....	67
<b>Fig. IV. 18</b> $\hat{U}_c = f(A_r)$ des gouttes d'eau à volume différent sur une surface en silicone hydrophobe ( $\alpha_c = 65^\circ$ ).....	68

---

---

# INTRODUCTION GENERALE

---

## Introduction générale

Historiquement les isolateurs étaient réalisés en verre, céramique ou porcelaine, on les trouve maintenant en matériaux polymères. L'air, en tant que diélectrique est largement utilisé comme isolation entre électrodes dans la technique de haute tension.

Depuis la fin du XXe siècle, les matériaux composites sont de plus en plus utilisés pour fabriquer des isolateurs : en réalisant un axe central en fibre de verre et en surmoulant par dessus une matière silicone. Les isolateurs composites sont plus légers, en général moins chers et, présentent une excellente hydrophobicité. Ils sont en particuliers prisés pour les zones fortement polluées et dans les zones urbaines où ils résistent mieux à la détérioration. Les silicones présentent de nombreuses propriétés : une bonne stabilité thermique entre (80°C et 250°C), de très bonnes propriétés hydrophobes, une bonne tenue au feu sans dégagement toxique, des propriétés d'anti-adhérence. L'attractivité de ces propriétés couplée à la possibilité de disposer des produits silicones sous différentes formes (suivant l'application souhaitée), des propriétés lubrifiantes et adoucissantes, une très grande innocuité et une très bonne inertie chimique [1].

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 décharges partielles 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 principale d'un isolateur haute tension sera donc sa tenue au contournement en fonction de l'environnement dans lequel il est utilisé.

L'avantage fourni par l'utilisation des feuilles en silicone isolantes est l'amélioration de la rigidité diélectrique et la réduction des distances d'isollements. Lorsque ces matériaux sont installés dans des sites où règne une pollution atmosphérique, à proximité des usines, de la mer...etc. il se forme des dépôts de mélange de poussières et des sels minéraux. L'humidité

de l'air environnant transforme les revêtements naturels en couche conductrice. Ceci provoque une modification de la répartition de champ électrique dans l'intervalle d'air et sur la surface isolante, ce qui peut engendrer le développement des décharges qui peuvent s'accroître jusqu'au claquage total de l'intervalle d'air ou contournement de l'isolant.

Les décharges sont étudiées en fonction de la distance longitudinale interélectrode, elle est influencée par plusieurs paramètres : la disposition de la plaque isolante (horizontale, verticale ou inclinée), le volume et la conductivité des gouttes d'eau déposés sur sa surface. Les multiples raisons susmentionnées justifiant le but principal visé par notre travail. Il consiste à savoir si l'utilisation de la silicone comme isolation extérieure peut améliorer la performance d'un système sous tension alternative 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.

Le présent travail II comporte quatre chapitres :

Le premier, sera consacré à la synthèse des travaux de recherche effectués sur la performance de surface hydrophobe des systèmes à champ uniforme avec des feuilles en silicone sous contraintes climatique et tension alternative.

Le deuxième, sera réservé à l'étude des isolants et propriétés diélectriques et leurs avantages en génie électrique et dans la haute tension.

Le troisième, se diviser en deux partie. 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 (partielle, d'espace, ... etc) et les décharges évoluant dans un intervalle d'air.

Le quatrième, sera réservé à l'étude expérimentale et l'interprétation des résultats obtenus.

Enfin, nous terminerons par une conclusion générale en effectuant une synthèse du travail réalisé.

---

*Chapitre I*

L'EVOLUTION DU NIVEAU DE RECHERCHES  
SUR LA PERFORMANCE DES SURFACES  
HYDROPHOBES EN SILICONE SOUS  
TENSION ALTERNATIVE

---

## **I.1. Introduction**

Le matériau polymère (silicone), présente une large gamme des propriétés vis-à-vis de leurs applications dans le domaine de génie électrique en particulier en haute tension. Il est largement utilisé dans l'isolation extérieure des installations électriques haute tension [1]. Les raisons principales sont liées à la bonne tenue aux contraintes climatiques couplées aux bonnes propriétés hydrophobes de ce matériau de plus en plus utilisé pour la fabrication des installations électriques à fonction isolante. A titre d'exemple, les silicones sont employées pour des appareils à usage externe en raison du caractère hydrophobe de leur surface qui permet de maintenir un niveau de courant de fuite très faible [2, 3, 4].

On se trouve face à une situation d'un manque d'informations sur la performance d'un système électrique avec isolation en silicone recouverte de gouttes d'eau sous tension alternative, à fin de comprendre le comportement de ces dernières sur le phénomène de décharges et d'arc, et l'influence du volume et de la conductivité d'eau sur la tenue électrique.

## **I.2. Synthèse des travaux sur la performance de surface hydrophobe en silicone**

### **I.2.1. G.G. Karaday, H.M. Schneider, 1994 [5]**

Selon l'auteur, l'isolateur en céramique lourd et fragile, ainsi que les isolateurs composites ont un ratio poids/tenue mécanique très faible et ils sont peu fragiles. De plus, lorsque les isolateurs composites sont nouveaux, leur surface est hydrophobe.

Ces travaux ont été réalisés sur deux types d'isolants composites EPDM et caoutchouc de silicone, Cela est principalement dû à leur exposition aux rayons UV et aux décharges qui se produisent à leur surface. Il a été constaté que l'isolant en silicone testé recouvrait son hydrophobicité après une période de 6 à 8 heures, tandis que l'isolant en EPDM recouvrait son hydrophobicité qu'après une période de 12 à 15 heures. En plus de la possibilité qu'ils ont de perdre leur hydrophobicité, les isolateurs composites semblent être plus sensibles au vieillissement que les isolateurs en céramique.

### **I.2.2. S. Gogur et J. Chang, 1994 [6]**

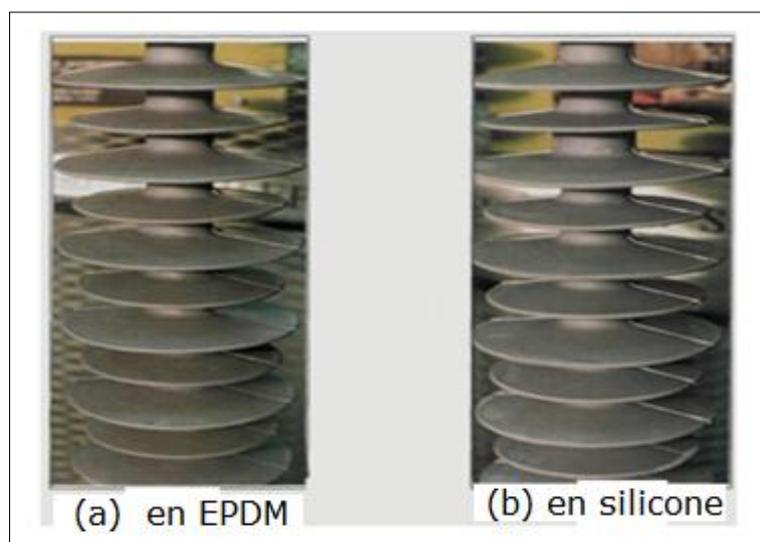
La surface des isolateurs composites en EPDM et en silicone est habituellement hydrophobe. Le trempage régulier de ces isolateurs dans une solution aqueuse de sel et de

kaolin mène à une distribution inégale de la solution de contamination à leur surface. La photo présentée à la figure I.1 présente un isolateur composite en silicone qui fut trempé dans cette solution. Cette dernière permet de bien voir jusqu'à quel point la solution de contamination se distribue de façon non uniforme à leur surface.



**Fig. I. 1:** Isolateur composite en silicone trempé dans le sel (NaCl) et de kaolin

A la fin du dépôt, cette solution adhère plus uniformément à la surface d'isolateur composite. L'application d'une mince couche de kaolin sec à leur surface est effectuée avant l'étape de trempage. La figure I.2, présente deux isolateurs composites (EPDM et en silicone), trempés dans une solution aqueuse de sel et de kaolin. En comparant les photos présentées aux figures I.1 et I.2, on voit bien que le dépôt de cette solution est nettement plus uniforme lorsque les isolateurs composites sont préalablement recouverts d'une couche de kaolin sec.



**Fig. I. 2:** Deux isolateurs préalablement recouverts d'une mince couche de kaolin sec

La méthode utilisée pour la contamination.

- Application d'une couche fine et uniforme de kaolin sec à la surface de l'isolateur avec un pinceau ;
- Humidification de la surface recouverte de kaolin avec un pulvérisateur d'eau ;
- Trempage de l'isolateur dans la solution aqueuse de sel (NaCl) et de kaolin ;
- Secouement de l'isolateur en position horizontale afin d'éviter la formation de tâches occasionnées par un surplus de solution à la surface de l'isolateur ;
- Séchage de l'isolateur, légèrement incliné par rapport à la verticale, durant une période de 12hs pour l'isolateur en EPDM et de 3hs pour l'isolateur en silicone.

L'inclinaison donnée aux isolateurs, lors de la période de séchage, permet de mieux redistribuer la contamination à la surface des isolateurs. En ce qui a trait à la durée de la période de séchage, elle avait déterminée, en fonction du temps nécessaire pour que les isolateurs recouvrent leur hydrophobicité.

### **I.2.3. S. Gurbanski et R. Hartings, 1995 [7]**

Lorsque les isolateurs composites sont nouveaux, leur surface est hydrophobe. L'eau adhère donc difficilement à leur surface. Par conséquent, les impuretés qui se trouvent à la surface d'isolant composite sont dissoutes moins facilement que celles qui s'accumulent à la surface en céramique. L'hydrophobicité des isolants composites améliore donc leur performance électrique sous pollution.

L'isolation en silicone a un meilleur comportement à cette considération que l'isolant en EPDM. En effet, tous les isolants en silicone qu'ils ont testé recourent rapidement, ce qui ne fut pas le cas des isolants en EPDM. Cependant, l'hydrophobicité n'est pas permanente. En effet, elle peut être perdue temporairement ou de façon permanente.

### **I.2.4. S. M. Gubanski et al, 1999 [8]**

Les travaux de Gubanski et al, ont été effectués sur des isolateurs composites de différents types de matériaux. Ils ont basé leur étude sur le comportement du courant de fuite.

Ils ont conclu que le courant de fuite est souvent capacitif en caractère et sinusoïdal en forme ; une fois l'hydrophobie perdue, le courant de fuite devient de plus en plus résistif, avec des pics dus aux décharges dans les zones sèches.

- Pour les isolateurs qui gardent leur hydrophobicité, le courant de fuite est capacitif, sinusoïdal et de l'ordre du  $\mu\text{A}$  ;

- Pour les isolateurs dont la surface est complètement mouillée (hydrophile), le courant de fuite est sinusoïdal à caractère résistif d'ordre relativement élevé ;
- Pour les isolateurs ayant perdu totalement ou partiellement leur hydrophobicité, le courant de fuite a une forme non linéaire avec une amplitude dont l'ordre de grandeur est relativement élevé ;

Ils ont montré que le temps de repos a une influence sur le comportement du courant de fuite et donc sur l'état de surface de certains isolateurs.

Dans le cas des isolateurs composites, le temps de repos lui permet de réacquérir leurs propriétés hydrophobes, par contre pour les isolateurs en céramique cette influence est moins importante.

#### **I.2.5. Y. Zhu, S. Yamashita, 2003 [9]**

Cet article décrit les résultats des expériences faites pour examiner le comportement des gouttelettes d'eau sur la surface de polymère sur l'augmentation du champ électrique alternatif, le phénomène de décharge couronne pendant ce processus. Des essais ont été faits sur des gouttelettes d'eau de différentes conductivités et volumes sur la surface de caoutchouc en silicone avec une micropipette. Les facteurs qui affectent la décharge couronne des gouttelettes d'eau ont été analysés au moyen de calcul de champ électrique et quelques expériences. Il a démontré que les gouttelettes d'eau sur le polymère s'apprêtent localement à augmenter le champ électrique et peuvent causer la décharge de couronne.

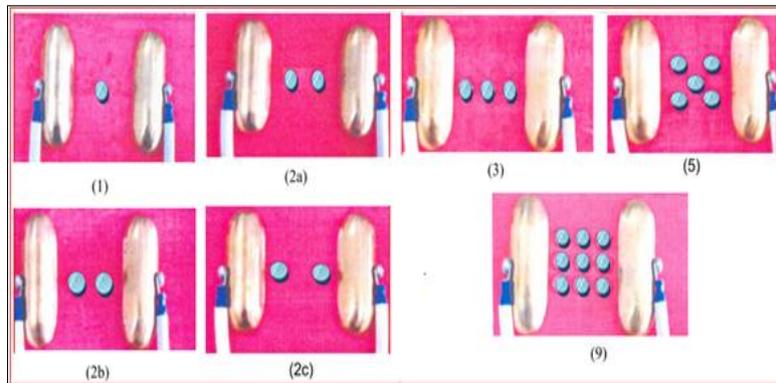
Ils ont observé que la gouttelette vibre et s'allonge vers l'électrode positive dans un synchronisme de vague avec la fréquence de la tension.

- La gouttelette d'eau se déforme va de gauche à droite, dans le sens de phase de la tension alternative ;
- Le champ électrique à la jonction triple croissant dû à la différence de permittivité diélectrique des matériaux ;
- Le volume et la conductivité sont deux facteurs importants pour le perfectionnement du champ électrique, la décharge couronne se produit à l'extrémité de la gouttelette ce qui peut provoquer la perte de l'hydrophobicité localement ;

#### **I.2.6. K. Karakoulidis, M.G. Danikas, P. Rakitzis, 2005 [10]**

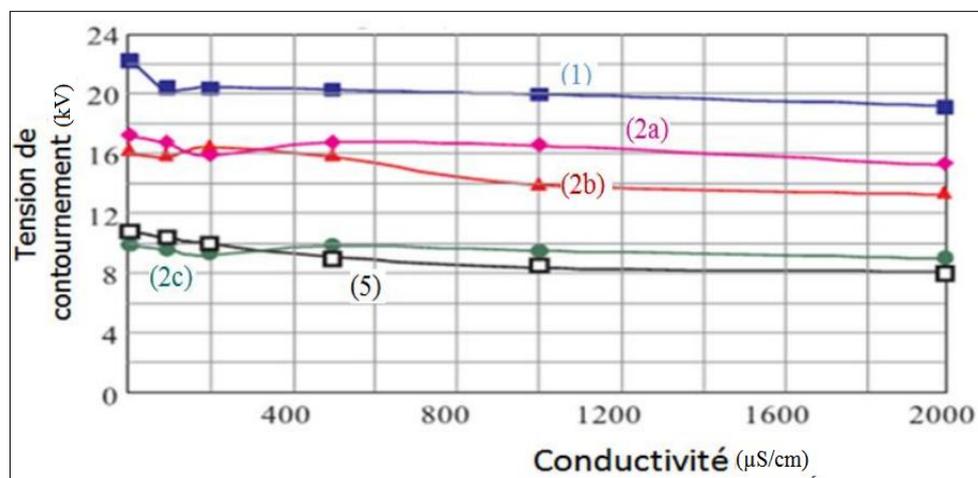
K. Karakoulidis et al, ont étudiés le comportement des gouttelettes d'eau sur une surface polymère (silicone) sous un champ électrique alternatif.

Ils ont choisis des arrangements des gouttes de 1, 2, 3, 5 et 9 et les volumes de ces dernières ont été de 0,2 et 0,3 ml, afin de mieux simuler les conditions réelles. Les électrodes sont positionnées à une distance de 4 cm parallèles les unes des autres de sorte que le positionnement de gouttelettes d'entre eux serait facile comme le montre la figure I.3. Les paramètres fondamentaux influençant le comportement des gouttelettes d'eau sur la surface polymère, à savoir, la conductivité et le volume des gouttelettes d'eau, la rugosité de surface du polymère, leur positionnement par rapport aux électrodes.



**Fig. I. 3:** Arrangements des gouttelettes par rapport aux électrodes

L'arrangement et l'augmentation de la conductivité des gouttes avec un volume constant de 0.3 ml entraînent une diminution de la tension de contournement comme le montre la figure I.4, conformément à la figure I.3. Cette conclusion est généralement valable indépendamment du matériau utilisé. L'état de surface influe de façon positive sur la tension de contournement lorsque le nombre de gouttelettes est important, le positionnement joue un rôle plus important que le volume de la goutte.



**Fig I. 4:** Tension de contournement en fonction de la conductivité et arrangement des gouttes

### I.2.7. Kenichi Haji, Yong Zhu, 2006 [11]

Ce document décrit les caractéristiques d'électrisation d'une gouttelette d'eau sur une surface hydrophobe et son influence sur la décharge induite sous un champ électrique alternatif (HT) de fréquence 60 Hz.

Ils ont étudié le comportement d'une goutte d'eau avec un volume et de la conductivité différente à été mise au centre d'une plaque de caoutchouc en silicone (SR) électriquement chargée, et son comportement électrohydrodynamique a été observé à l'aide d'une caméra vidéo à grande vitesse comme est indiqué sur la figure I.5.

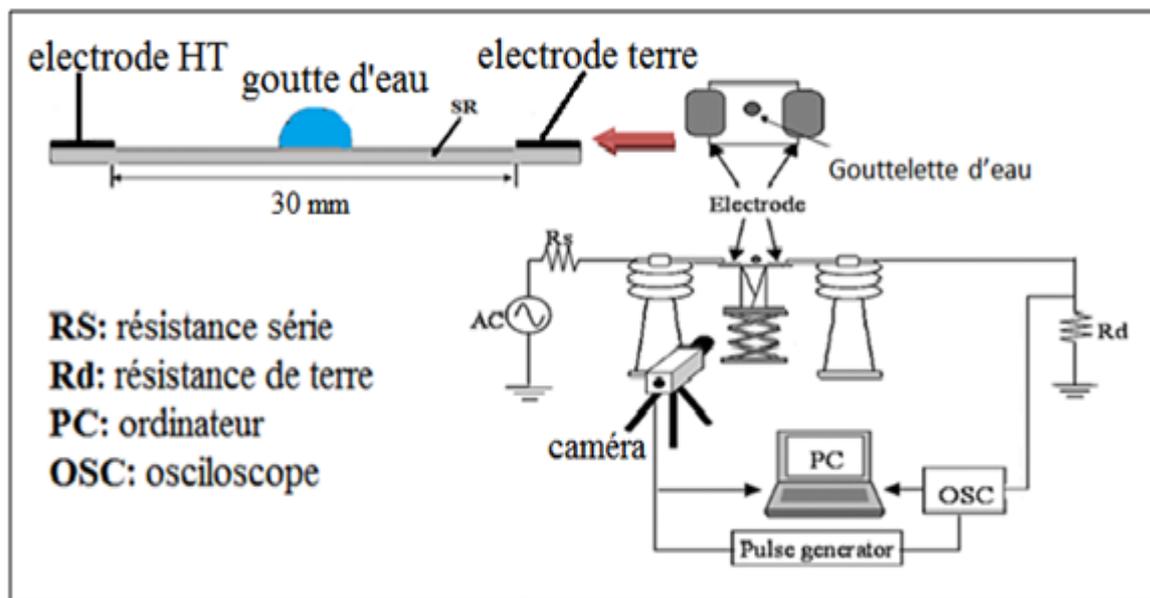
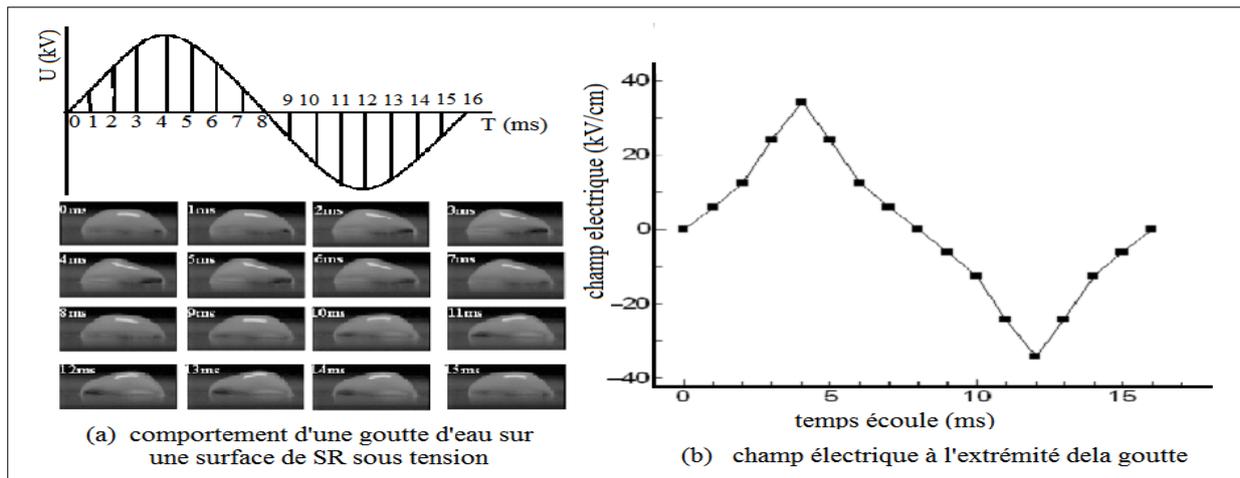


Fig. I. 5: Schéma du dispositif utilisé

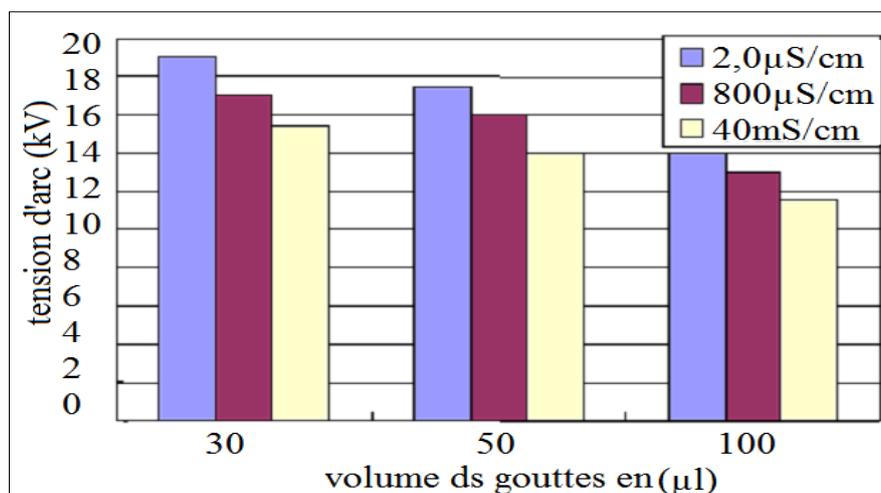
Le comportement de la goutte d'eau ( $30 \mu\text{l}$  et  $2.0 \mu\text{S/cm}$ ) sur une surface (SR) dans un cycle de tension à 10 kV, est illustré par la figure I.6. Au cours du processus de décharge couronne, par conséquent, la goutte d'eau va vibrer entre les deux électrodes. Elle a été tirée vers l'électrode positive, la gouttelette déposée se déformée est synchronisée avec la tension alternatif, une fois la déformation devient perceptible, elle augmente rapidement jusqu'à ce que la goutte devient mécaniquement instable et éjecte filaments d'eau à partir de ses sommets.

Le modèle de simulation dynamique basé sur chaque photo comme le montre la figure I.6.a, a été mise en place. Au cours de la simulation, la valeur instantanée de la tension alternative appliquée à chaque milliseconde a été précisée ainsi que le potentiel de l'électrode à haute tension comme le montre la figure I.6.b, le champ électrique horizontal à été calculé à la pointe de la goutte dans un cycle de tension de 10 kV.



**Fig. I. 6:** Comportement d'une goutte d'eau et le champ électrique

La conductivité et le volume des gouttelettes jouent un rôle important sur la tension de contournement comme le montre la figure .I.7. Lorsque le volume des gouttelettes augmente peut combler l'écart entre les électrodes et provoquer un embrasement général. En outre, ces deux paramètres ont un effet remarquable sur le mode de décharge couronne et le développement de contournement.

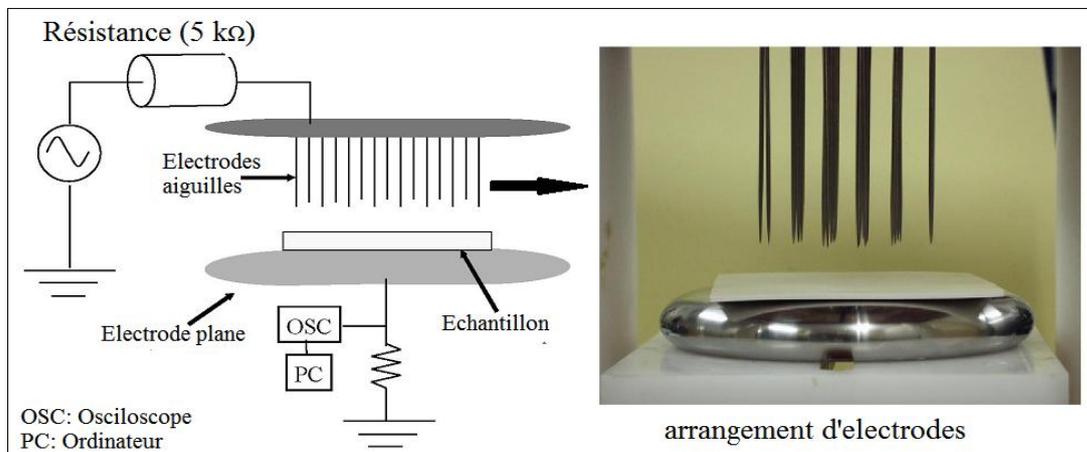


**Fig. I. 7:** Tension de contournement en fonction du volume et la conductivité des gouttelettes

#### I.2.8. Y. Zhu, K. Haji, H. Yamamoto, 2006[12]

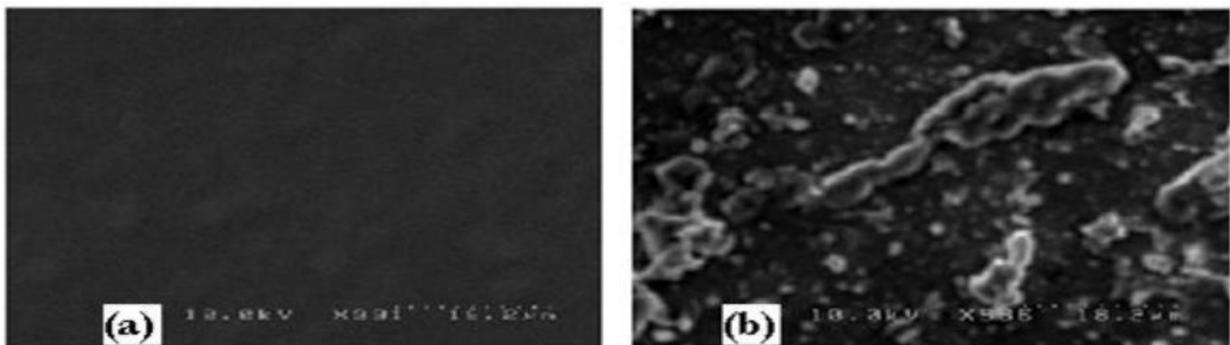
Dans le but d'examiner le mécanisme de dégradation de l'hydrophobicité de l'un des types de silicone (HTV-SR), une étude a été effectuée par des chercheurs. Ils ont utilisé un modèle de la figure I.8. Il est constitué d'une plaque de silicone de  $(60 \times 50 \times 2) \text{ mm}^3$ , avec deux électrodes aiguilles-plan en acier inoxydable, dont l'une est branchée en série avec une résistance ( $5\text{k}\Omega$ ) à une source de tension alternative (60Hz) et l'autre est connectée à la terre.

Ils ont choisi une distance de 1 cm entre les deux électrodes. Une tension de 16 kV a été appliquée pour produire la décharge couronne. Le temps d'essai était de 24 heures.



**Fig. I. 8:** Modèle électrodes aiguilles-plan

Ils sont mesuré la tension et le courant de fuite, puis une analyse chimique et morphologique de la plaque a été réalisée par l'utilisation des techniques des SEM, de FT-IR, de TG-DTA et de GC/MS. L'une de ces techniques, la SEM est illustrée par La figure I.9, celle-ci montre des micrographies de l'échantillon avant et après la décharge couronne, la surface était extrêmement régulière avant essai (**Fig I.9a**). Cependant, la surface de l'échantillon vieilli par effet couronne est indiquée sur la figure I.9b.



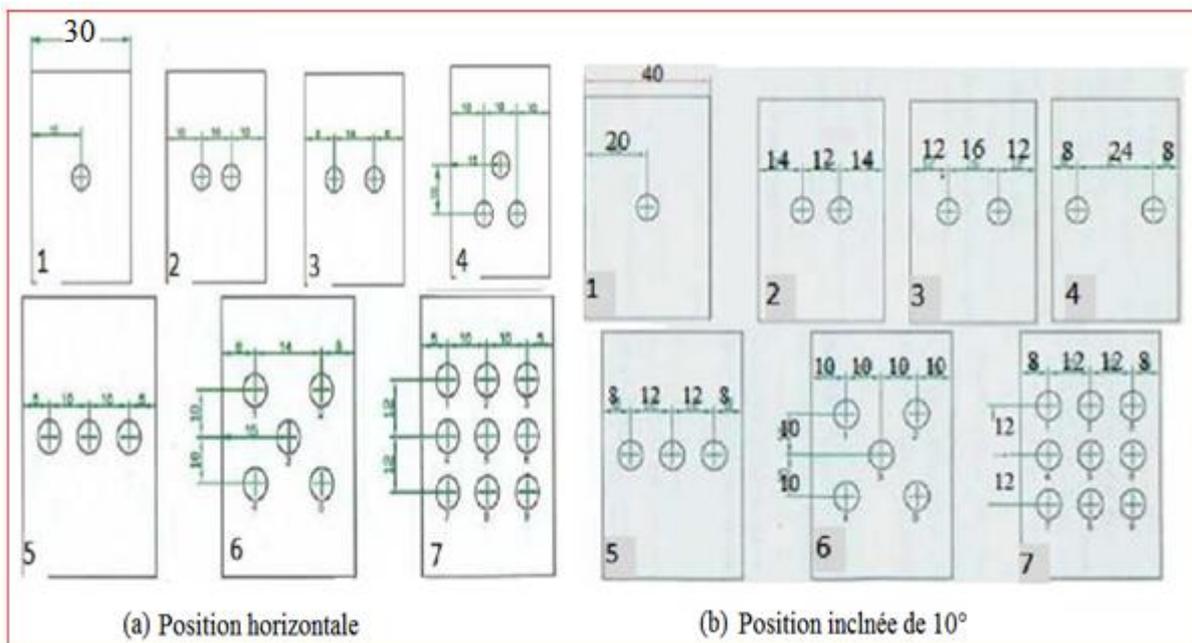
**Fig. I. 9:** Image de l'échantillon par SEM, (a) avant et (b) après la décharge couronne

Le changement physique mentionné ci-dessus permet à la force mécanique du matériel d'être réduite. Ils ont montré que des groupes hydrophiles OH qu'ils présentent comme les sous-produits du vieillissement, peuvent être formés sur la surface de la silicone au lieu des groupes CH<sub>3</sub>. Selon cette étude la décharge couronne joue un rôle majeur sur la perte temporaire de l'hydrophobicité de la plaque en silicone.

### I.2.9. Michael G. Danikas, 2006 [13]

Le but de cet article est de donner un aperçu sur les travaux réalisés au laboratoire.

L'application d'un champ électrique AC uniforme sur les gouttelettes d'eau posées sur une surface polymère a été étudiée, en positions horizontale et inclinée figure I.10. Les phénomènes de décharge et d'arcs localisés ont été étudiés en termes de la conductivité des gouttelettes d'eau variable de  $1,7 \mu\text{S}/\text{cm}$  jusqu'à  $2000 \mu\text{S}/\text{cm}$ . Ce choix peut être expliqué par la prise en considération de la conductivité de la pluie naturelle qui se situe entre  $50\text{-}150 \mu\text{S}/\text{cm}$ . Le volume choisi est  $0,1\text{ml}$  pour un arrangement des gouttelettes en position horizontale **Fig. I.10a**, et  $0,2 \text{ml}$  pour un angle d'inclinaison de  $10^\circ$  par rapport à l'horizontale **Fig. I.10b**.

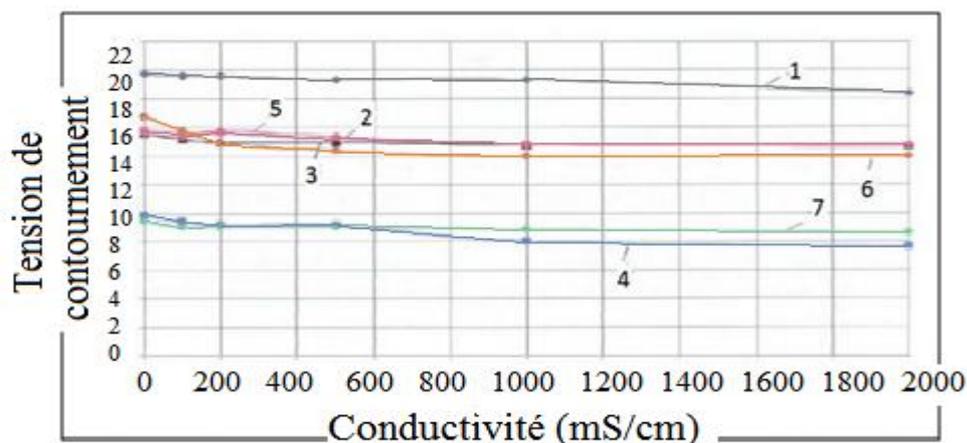


**Fig. I. 10:** Arrangements des gouttelettes d'eau sur des plans

Les tests ont été effectués avec des conductivités d'eau variable couvrant une large gamme de valeurs.

Tous les paramètres mentionnés affectent la tension de contournement. Cependant, le degré d'importance de chacun d'entre eux varie à la fois pour la position horizontale et inclinée, le positionnement des gouttelettes dans certains cas jouent un grand rôle que le volume dans la détermination de la tension de contournement.

L'augmentation de la conductivité d'eau entraîne la diminution de la tension comme indiqué sur la figure I.11, conformément à la position inclinée.

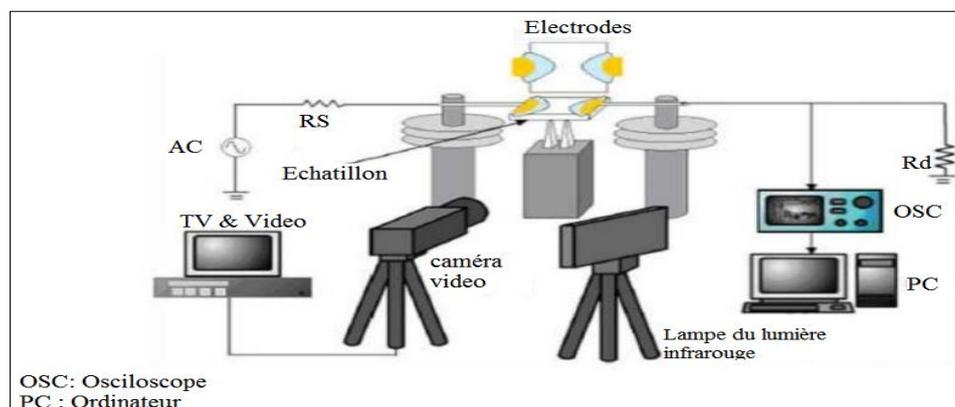


**Fig I. 11:** Tension de contournement pour différentes conductivités d'eau

Ils avaient conclu que la conductivité de l'eau, la rugosité de surface du polymère et du volume des gouttelettes jouent un rôle important dans la détermination du comportement des gouttelettes sous l'influence d'un champ électrique. Le positionnement des gouttelettes par rapport aux électrodes est également un facteur à ne pas négliger.

#### I.2.10. K. Haji, Y. Zhu, M. Otsubo, T. Sakoda, 2008 [14]

Les auteurs ont consacré toute une étude pour voir l'effet des décharges partielles sous différentes conductivités, sur l'érosion, ainsi que la perte de poids (Molar Weight Loss) sur des isolateurs SIR. Comme le montre la figure I.12. Le modèle d'isolateur est équipé de deux électrodes en cuivre, l'une connectée à une source haute tension (60 Hz) à travers une résistance  $R_s = 1.4 \text{ M}\Omega$  et l'autre connectée à la terre.

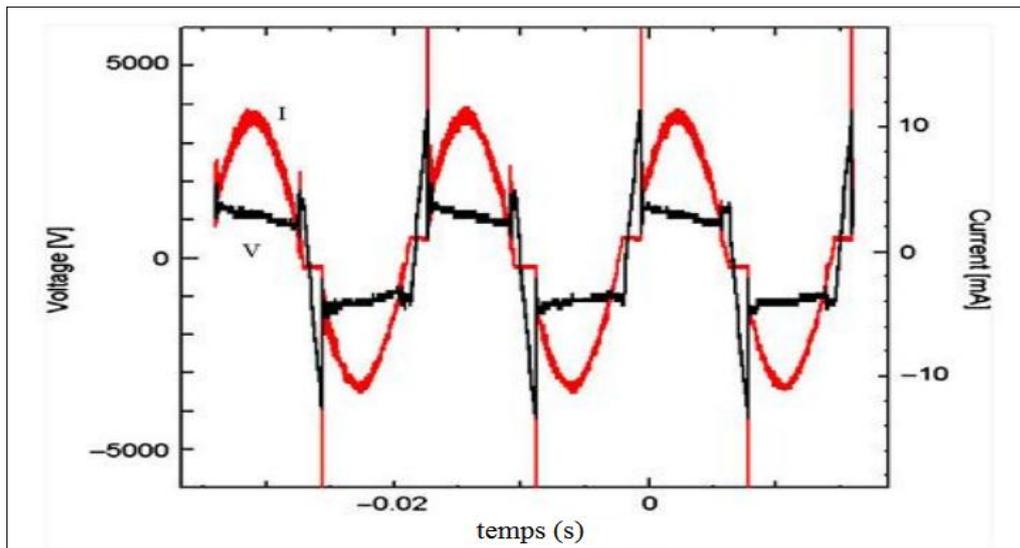


**Fig. I. 12:** Dispositif expérimental

La pollution de la surface est simulée avec quatre solutions contenant du NaCl de conductivité égale à 0.8, 4, 8 et 16 mS/cm. La distance interélectrode est de 10 mm. Un dispositif constitué

d'une caméra et d'un oscilloscope reliés à un PC, a permis de suivre le comportement des décharges et d'enregistrer les signaux de la tension appliquée et du courant de fuite. Un thermographe a enregistré l'évolution de la température et une balance électronique mesure le poids du modèle après chaque essai de décharge. Une simulation du champ électrique avec la méthode des éléments finis a permis d'évaluer sa distribution durant la propagation des décharges partielles.

Les résultats obtenus montrent qu'après 140s d'exposition aux décharges partielles, les pertes de poids molaire sont plus importantes pour les basses conductivités (0.8 et 4 mS/cm). Les relevés du courant de fuite et de la tension appliquée ont permis de suivre l'évolution des décharges et d'indiquer que plusieurs ont eu lieu simultanément. Cela est confirmé par la présence de pics au sein de l'onde de tension et celle du courant de fuite comme le montre la figure I.13.



**Fig. I. 13:** Formes d'ondes du courant de fuite et de la tension pour 0.8 mS/cm

Les auteurs constatent également que pour les faibles conductivités, les décharges se propagent à la surface de l'isolateur avec l'apparition de particules de silice ; ceci signifie que l'érosion est très sévère. Pour les conductivités élevées (8 et 16 mS/cm), l'arc électrique a tendance à se former dans l'air ce qui peut expliquer l'absence quasi-totale de trace d'érosion. Ces résultats concordent parfaitement avec d'autres investigations. Les résultats du thermographe obtenus après 20s du début de la décharge, montrent que la température augmente proportionnellement avec la conductivité et atteint 1073°K pour 16 mS/cm.

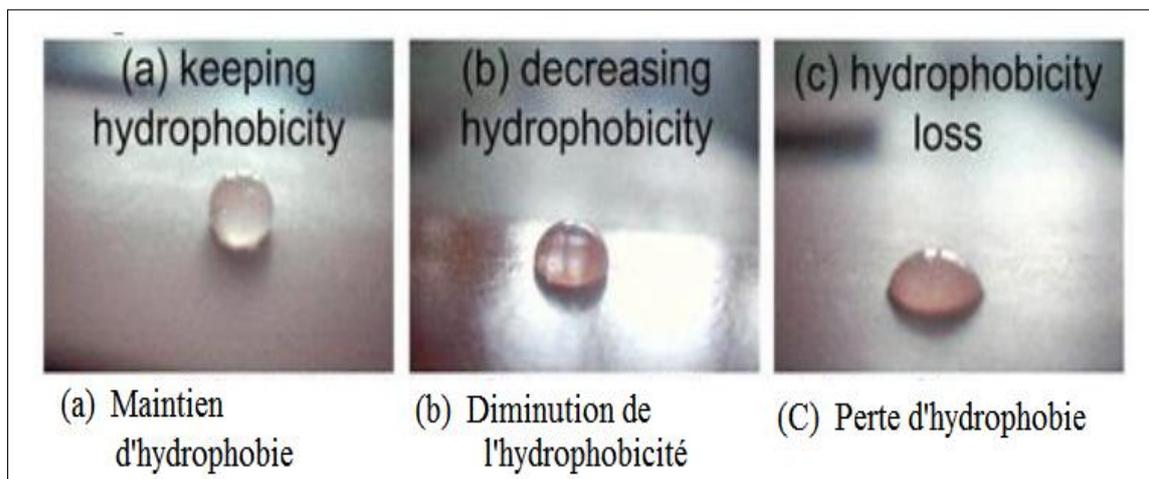
Ce phénomène physique est le résultat de l'augmentation de la densité de courant pour les grandes conductivités, qui donne lieu à un dégagement de chaleur par effet joule.

### I.2.11. B. X. Dul, Yong Liul, 2009 [15]

Une étude des caractéristiques de décharges produites par le comportement dynamique de la gouttelette d'eau pour évaluer l'hydrophobicité de l'isolateur de caoutchouc en silicone a été réalisée. La distribution du champ électrique juste à la chute de la gouttelette a été calculée pour indiquer le rapport entre les décharges et l'hydrophobicité, il a été constaté qu'avec la diminution de l'hydrophobicité, le nombre et la durée de décharges montrent la tendance croissante. L'augmentation de l'intensité de décharge et de l'intensité de la lumière reliée indique la diminution de l'hydrophobicité.

Les méthodes courantes pour évaluer l'hydrophobicité extérieure sont la méthode de l'angle de contact (CA) la méthode de tension superficielle et le procédé de pulvérisation. Bien que ces méthodes aient favorisé des effets sur l'évaluation, elles ont toujours quelques limitations. Pour la méthode de (CA), elle peut exactement refléter l'état de gouttelette de l'eau sur la surface d'isolateur, Pour la méthode de tension superficielle, on l'établit de la définition de l'hydrophobicité, Pour la méthode de pulvérisation, elle est la plus appliquée au laboratoire et sur le site, mais les données peuvent avoir la dispersion due à l'évaluation grossière.

Un test dynamique des gouttes (DDT; dynamic drop test) a été proposé comme méthode d'évaluation du comportement dynamique d'une goutte d'eau. Trois d'échantillons de SIR ont été choisis, Basée sur la méthode de l'angle de contact d'une goutte d'eau a été mise sur la surface comme le montre la figure I.14.



**Fig. I. 14:** Performance de gouttelette sur une surface

Les chercheurs ont étudié les trois cas de la figure I.14, représentant les phénomènes de décharge pendant le processus de chute de la gouttelette d'eau (**Fig. I.15**).

### 1<sup>er</sup> cas: Silicone hydrophobe

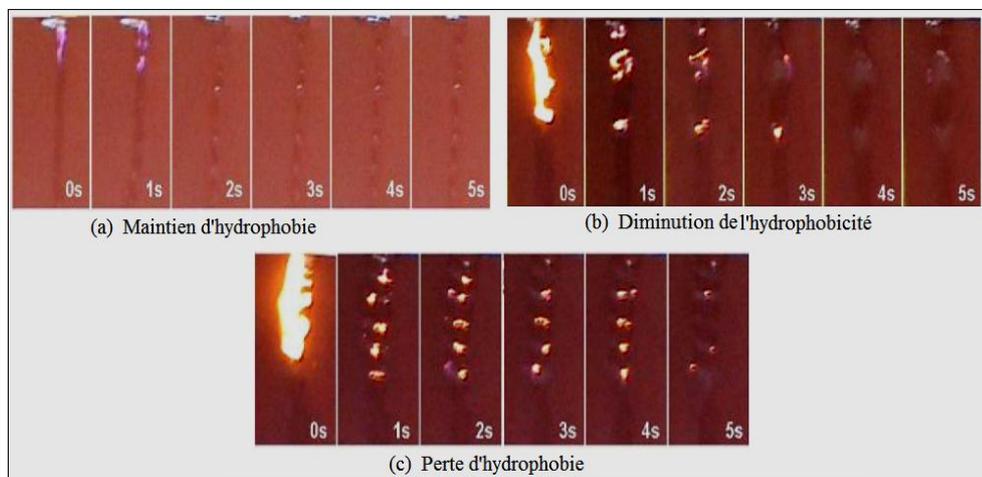
La décharge s'est produite à la période la plus tôt de la gouttelette chutant, observation d'une lumière violette émise par les décharges sur le côté de l'électrode HT, qui indique l'endroit de la décharge et de faible des décharges de la bande sèche (**Fig. I.15a**)

### 2<sup>ème</sup> cas: hydrophobicité décroissante

Lors de l'observation des décharges jusqu'à la période moyenne du processus chutant, la lumière jaune lumineuse est apparue juste à la chute de la gouttelette, ce qui indique l'occurrence des décharges intensives. Alors juste après, les tâches de lumière jaune donnent la distribution et l'intensité des décharges de bande sèche (**Fig. I.15b**)

### 3<sup>ème</sup> cas: perte d'hydrophobicité

Il a observé les activités de décharge pendant le processus entier de la chute de gouttelette. La lumière jaune la plus lumineuse est apparue à la chute initiale de la gouttelette de l'eau, alors les tâches de lumière jaune distribuées le long de l'échantillon apparaissent en raison de la formation des activités de bande sèche. La distribution de couleur légère est conforme à la morphologie de décharge (**Fig. I.15c**).



**Fig. I. 15:** Phénomènes de décharge pendant la chute de la goutte d'eau

Les différents phénomènes de décharge sont dus à la variation de l'hydrophobicité qui a comme conséquence l'interaction entre la gouttelette et la surface de l'échantillon.

Avec la diminution de l'hydrophobicité, la gouttelette cause la formation d'un film d'eau après la formation de petites gouttelettes sur la surface, qui cause la déformation de la distribution de champ électrique et de la formation des décharges glissantes supplémentaires.

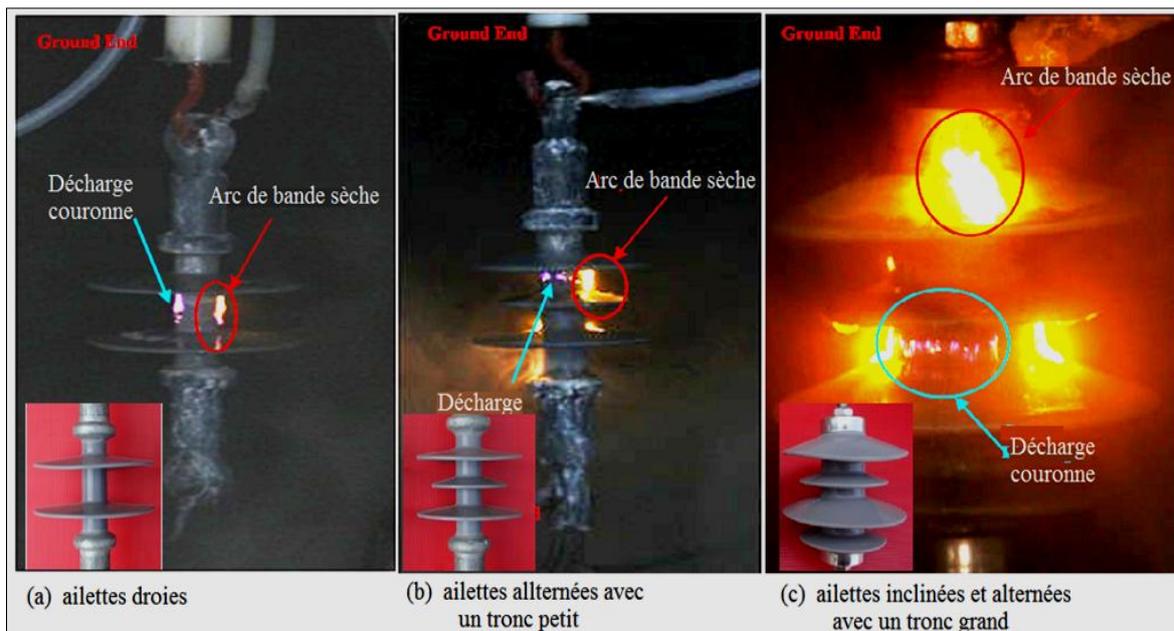
Avec la diminution de l'hydrophobicité, plusieurs petites gouttelette ont adhéré à la surface lesquelles entraînant la déformation et l'intensification de la distribution de champ électrique, le flux des pulsations lumineuses peuvent indiquer la diminution du hydrophobicité.

### I.2.12. S. Thong-Om, W. Payakcho, 2011 [16]

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

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

Ils ont observée l'arc de la bande sèche et décharges couronne sur la surface extérieurs du tronc dans tout type d'échantillons (**Fig. I.16**).



**Fig. I. 16:** 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'échantillon.

L'évaluation du niveau d'hydrophobicité de la surface des échantillons testés a été basé sur la classification faite selon la figure I.17. Les résultats de mesure de Hydrophobicité sont affichés sur le tableau I.1.

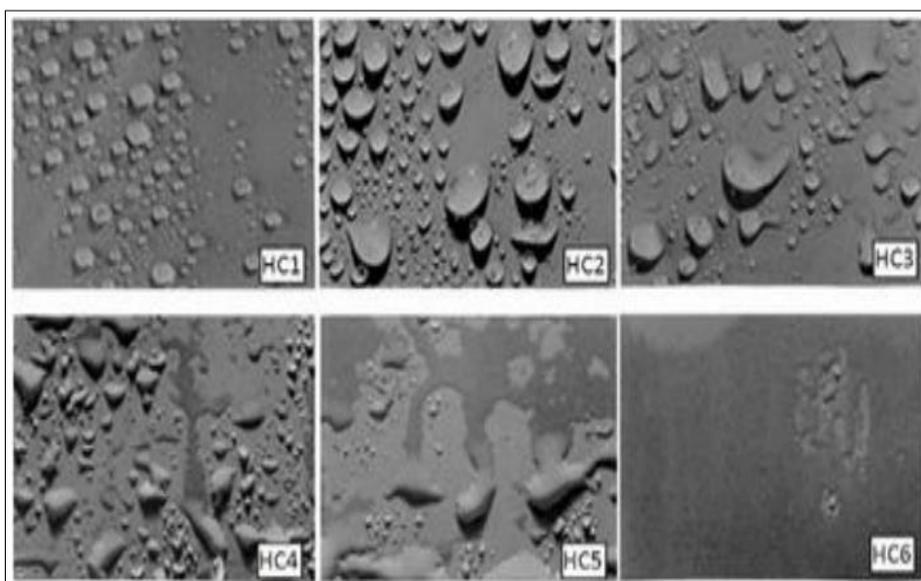


Fig. I. 17: Classification d'hydrophobicité (HC1-HC6) [17]

Tab. I.1. Classification d'hydrophobicités.

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

### **I.3. Conclusion**

Les matériaux polymères sont largement utilisés comme isolation extérieure tel que le revêtement en silicone, dans le domaine de fabrication des câbles à gaine en silicone.

Dans ce chapitre, nous avons fait le point de façon synthétique sur les travaux réalisés par plusieurs chercheurs dans leur étude de la performance d'une isolation en silicone sous tension alternative.

L'objectif de notre contribution était la caractérisation de la performance d'une isolation hydrophobe en silicone recouverte de gouttes d'eau sous tension alternative en fonction de certains paramètres d'influence, à savoir, l'angle d'inclinaison de l'isolation par rapport à l'horizontale, le nombre, le volume et la conductivité électrique des gouttelettes déposées sur le matériau considéré.

.

---

## *Chapitre II*

### ISOLANTS ET PROPRIETES DIELECTRIQUES ET LEURS AVANTAGES EN HAUTE TENSION

---

## II.1. Introduction

L'air, en tant que diélectrique, est largement utilisé comme isolation entre électrodes dans la technique de haute tension.

La conception et le fonctionnement de l'équipement électrique dépendent des matériaux disponibles. Ainsi, les propriétés des isolants jouent un rôle très important dans la construction des appareils électriques. La fonction principale d'un isolant est d'empêcher le passage du courant lorsqu'on le met à une tension électrique. Cependant, celui-ci ne peut supporter des tensions trop élevées, à une certaine tension il se produit un phénomène de claquage ou la substance perd ses propriétés isolantes. Lorsqu'il atteint la tension de claquage, des électrons sont arrachés de leur orbite extérieure et deviennent libres. La tension de claquage requise pour provoquer cette avalanche électronique dépend de la nature de l'isolant et de son épaisseur. Il existe une grande variété d'isolants solides, liquides, gazeux. En plus des isolants naturels, on trouve sur le marché de nombreux isolants synthétiques (silicone) qui ont été développés pour différentes applications.

## II.2. Définitions

### II.2.1. Isolants [18, 19]

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

### 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.

### II.2.3. Diélectrique

Un diélectrique est un matériau plus ou moins isolant (résistivité élevée, bande d'énergie interdite de quelques eV), polarisable, c'est-à-dire dans lequel des dipôles électrostatiques existent (diélectrique polaire) ou se forment sous l'effet d'un champ électrique (dipôles induits). En d'autres termes un diélectrique peut être défini comme un milieu matériel dans lequel la bande de conduction est séparée de la bande de valence par une énergie supérieure à 5 eV [19].

## **II.3. Propriétés diélectriques des matériaux isolants**

### **II.3.1. Résistance et résistivité**

#### **II.3.1.1. Résistance et résistivité transversale**

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 superficielle**

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 [18].

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

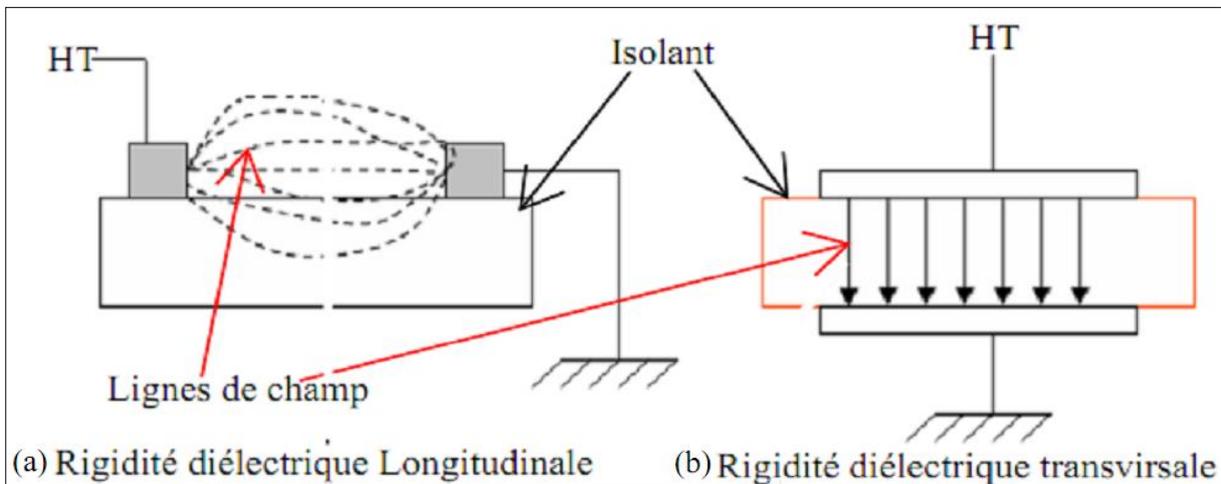
ultérieurement sa fonction. De façon pratique, la rigidité diélectrique est définie comme étant le rapport entre la tension à laquelle se produit une perforation dans les conditions d'essais spécifiées et la distance entre les deux électrodes aux quelles est appliquée la tension la figure II.1, montre les positions relatives des conducteurs et de la surface des matériaux.

La mesure de la rigidité diélectrique est effectuée selon :

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

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

d : distance interélectrode ;



**Fig. II. 1:** Rigidité diélectrique

**II.3.2.1. Rigidité diélectrique longitudinale**

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

**II.3.2.2. Rigidité diélectrique transversale**

Pour la quelle 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 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 [18]

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 en opposé au champ électrique extérieur  $E_e$  appliqué.

#### II.3.3.1. Permittivité relative

Cette caractéristique des isolants solide, liquide et gaz porte le nom de la permittivité relative  $\epsilon_r$ .

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

$$\epsilon_r = \frac{C_x}{C_0} \dots\dots\dots (II. 2)$$

#### II.3.3.2. Permittivité absolue

La permittivité absolue  $\epsilon_a$  est le produit de la permittivité relatives par la constant électrique du vide.

$$\epsilon_a = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \dots\dots\dots (II. 3)$$

$$\epsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$$

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:

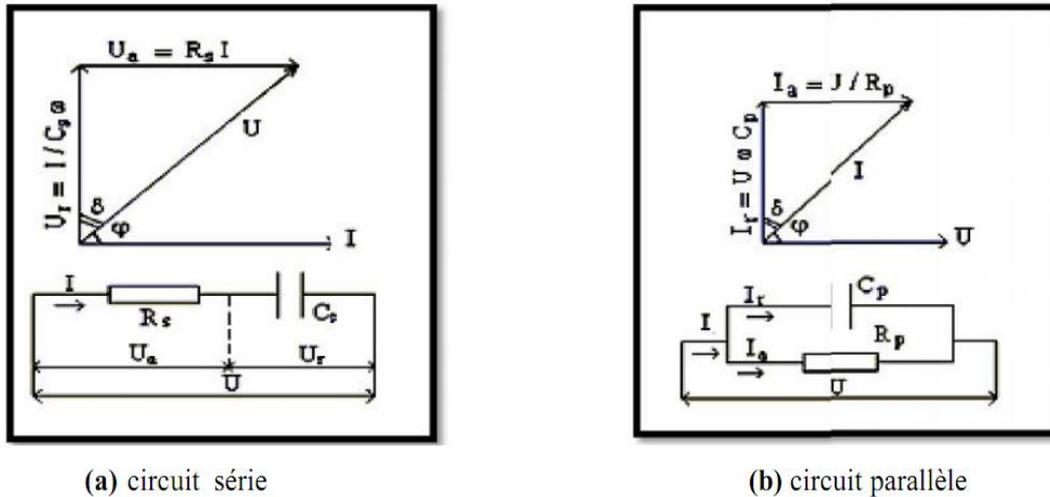
$$\epsilon_r^* = \epsilon_r' \cdot j \epsilon_r'' \dots\dots\dots (II. 4)$$

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

$$\epsilon_a^* = \epsilon_r^* \cdot \epsilon_0 \dots\dots\dots (II. 5)$$

**II.3.4. Angle de pertes et facteur de dissipation**

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



**Fig. II. 2:** Circuit équivalents série et parallèle

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

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

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

$$\text{tang } \delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} \dots\dots\dots (II.7)$$

Le produit  $\epsilon_r'' = \epsilon_r' \cdot \text{tang } \delta$  est dénommé indice de pertes, car il caractérise l'énergie dissipée dans le diélectrique.

**II.4. Les facteurs climatiques influençant sur les isolants**

Parmi les facteurs climatiques et essentiels on distingue:

**II.4.1. La température**

Lorsque la température croit la rigidité diélectrique est soit constantes, soit légèrement décroissantes puis à partir d'une certaine température limite appelé température de transition une décroissance très rapide.

### II.4.2. L'humidité

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

### II.4.3. Pression

La pression a une influence très variable suivant la nature du milieu isolant. Il faut également, pour ce facteur, distinguer l'influence autour de la pression atmosphérique, aux basses pressions (allant vers le vide) et aux hautes pressions (normales ou accidentelles).

## II.5. Différents types d'isolants

On peut classer les isolants en trois catégories suivantes :

### II.5.1. Isolant gazeux [20]

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'air est élément isolant naturel utilisé dans la plus part des installations, appareils dont il assume également le refroidissement par circulation naturelle ou forcée. Après claquage, l'air reprend rapidement son pouvoir isolant initial, il est auto-régénérateur.

L'hexafluorure de soufre est un composé chimique de soufre et de fluor, de formule chimique  $\text{SF}_6$ . C'est un gaz inerte, 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 [20]

Les liquides diélectriques sont souvent utilisés en association avec des solides (transformateurs, condensateurs câbles). Exemples l'huile la 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 [21]

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

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

### II.6. 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.6.1. Porcelaine

La porcelaine est constituée par du kaolin et du quartz de première qualité. Ils sont cuits à 1400°C, puis recouverts d'émail au silicate et recuits au four pour obtenir une glaçure à chaud qui le rend imperméable à l'eau [19].

Les propriétés électriques, mécaniques et thermiques sont les suivantes :

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

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

## II.6.2. Verre [19. 21]

Il est fabriqué en fondant dans des creusets chauffés au rouge vif à une température 900°C, un mélange de sable, de chaux et de carbonate de sodium. Le liquide Peu fluide est coulé dans des moules en acier ayant en creux la forme des isolateurs. Chimiquement, le verre est un mélange se 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'environs 30 kV.

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

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

### II.6.2.1. Verre trempés

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

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

### II.6.2.2. Verres recuits

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

## II.6.3. Bakélite

C'est une résine artificielle inventée vers 1909 par le chimiste BAKELAND. On l'obtient sous trois états [21, 22].

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

## II.6.4. Silicone

### II.6.4.1. Généralités

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

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

Mais leurs avantages ne se limitent pas aux isolateurs. Aujourd'hui, on utilise les silicones isolants dans toutes les applications MT et HT exigeant une haute sécurité de fonctionnement et une grande longévité, par ex. dans les transformateurs, sous forme d'huile, ou dans les extrémités de câbles haute tension [23].

### II.6.4.2. Les propriétés de la silicone [24]

Les silicones se distinguent quelques propriétés fondamentales :

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

Ils possèdent une stabilité remarquable aux intempéries et au vieillissement thermique. A titre d'exemple on peut citer l'estimation qui figure dans le tableau suivant :

**Tab.1:** estimation de la durée de vie d'un élastomère de silicone

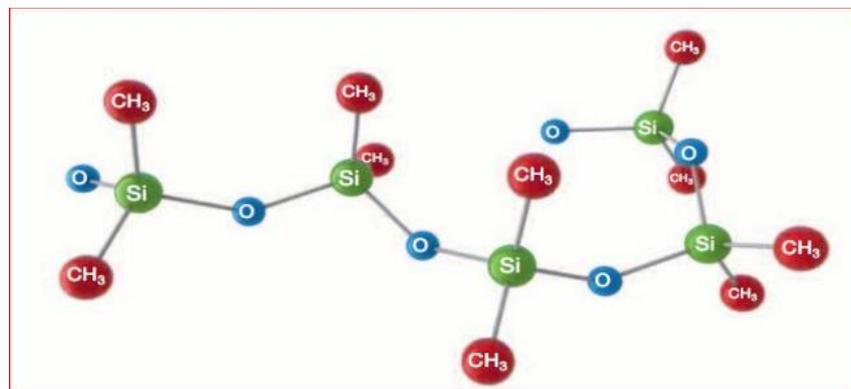
Température (°C)	Durée de vie (année)
90	40
150	5-10
200	2-5
250	0,25
315	0.04

Les valeurs des propriétés suscitées ont été tirées de la littérature

- 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> ;

#### II.6.4.3. Structure moléculaire de la silicone

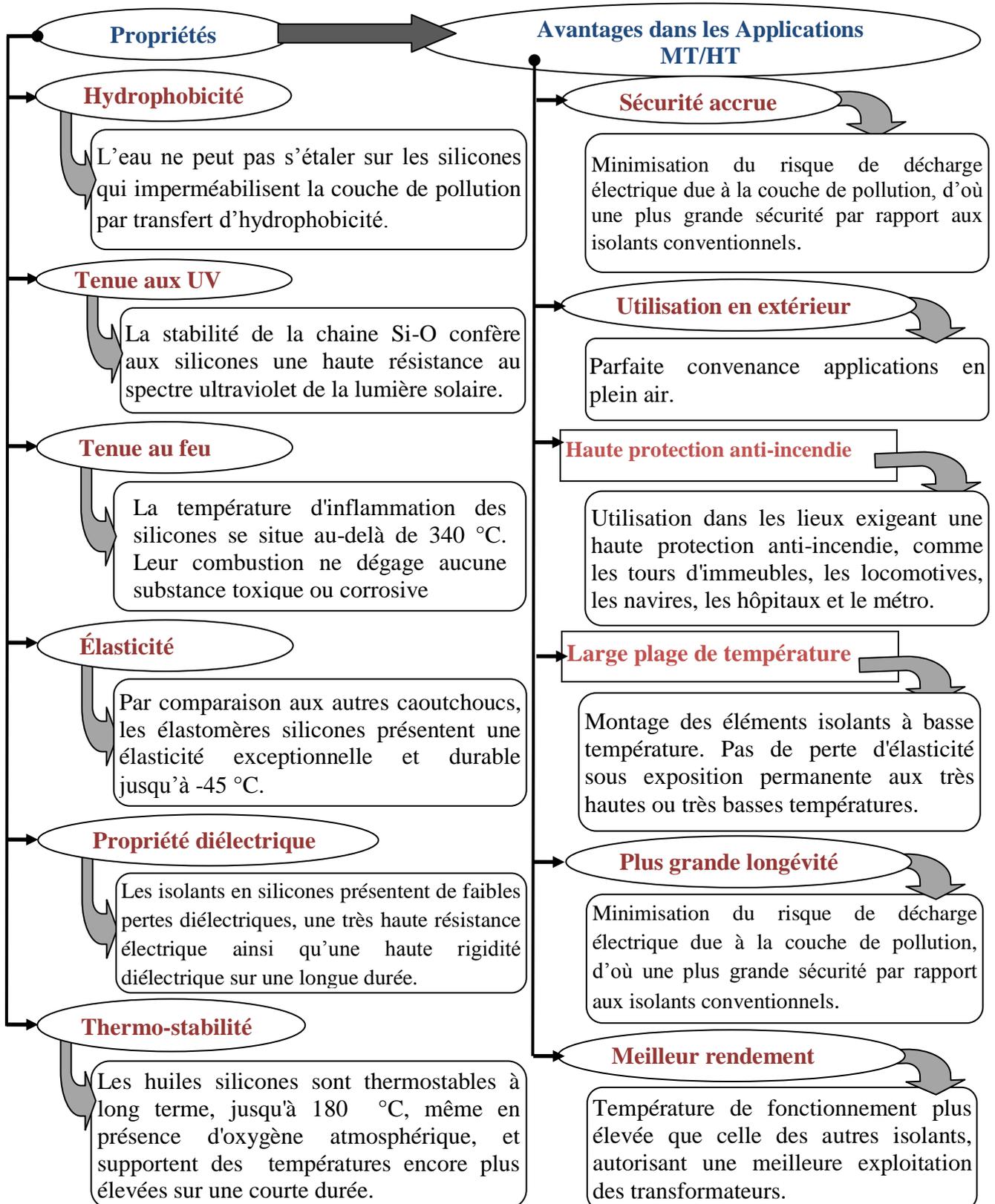
La structure des silicones, ou chimiquement parlant, des polyorganosiloxanes, est analogue à la structure organique du quartz modifié. Leur motif de base se compose d'une alternance d'atomes de silicium et d'oxygène (**Fig. II.3**). La haute énergie de liaison du chaînon de base silicium oxygène (Si-O-Si-O) 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 courtes longueurs d'ondes (300 nm), renfermant une énergie d'environ  $6,2 \cdot 10^{-22}$  kJ (= 398 kJ/mol), peut entraîner la rupture des liaisons C-C tandis que la liaison Si-O reste stable.



**Fig. II. 3:** Structure chimique de la silicone

### II.6.4.4. Caractéristiques des propriétés fondamentales de la silicone dans diverses applications

Les caractéristiques des propriétés de la silicone et leurs avantages dans les applications [23] MT/HT représentées sur le schéma suivant:



### II.6.4.5. Élastomères silicones

Les élastomères silicones sont principalement constitués de chaînes PDMS linéaires avec des bloqueurs réactifs aux extrémités des chaînes. Les chaînes s'associent entre elles ou à des réticulant 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 [1]

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.7. Technique de caractérisation des surfaces

### II.7.1. 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 [25].

### II.7.2. Principe

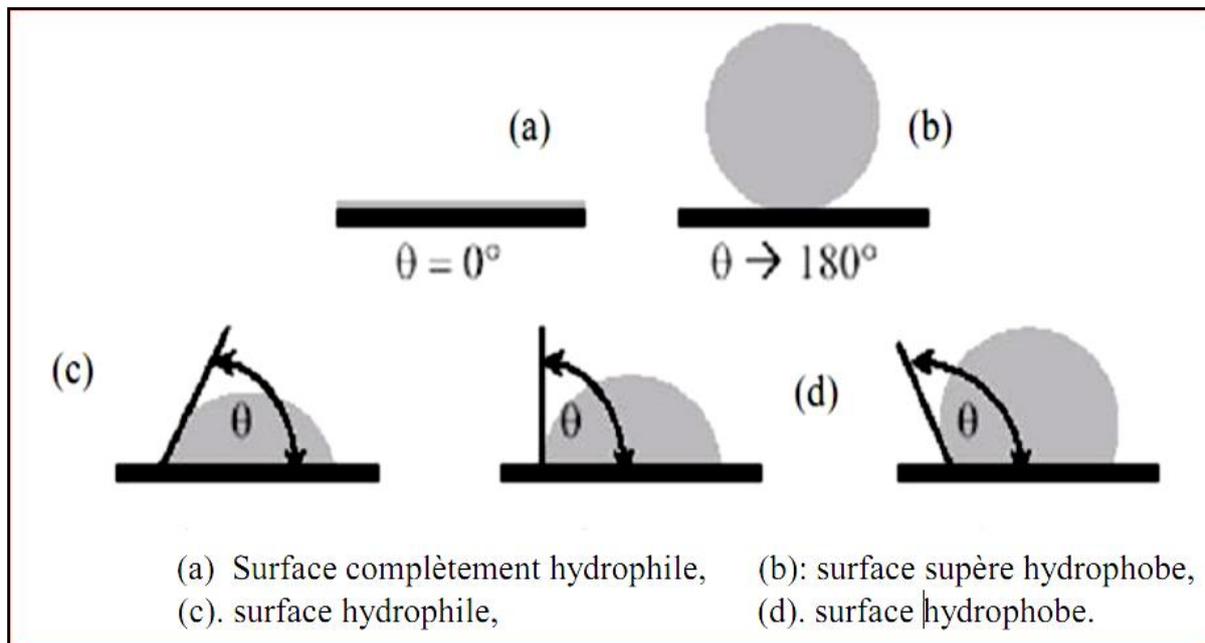
L'angle de contact représente en fait l'angle formé par la tangente à l'extrémité de la goutte d'un liquide avec la surface plane de l'échantillon sur laquelle la goutte du liquide a été déposée. Cette technique permet de déterminer :

- le caractère hydrophile/hydrophobe des différentes surfaces ;
- l'énergie libre totale des surfaces étudiées et ses composantes ;

Caractère hydrophile/hydrophobe d'une surface

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**).



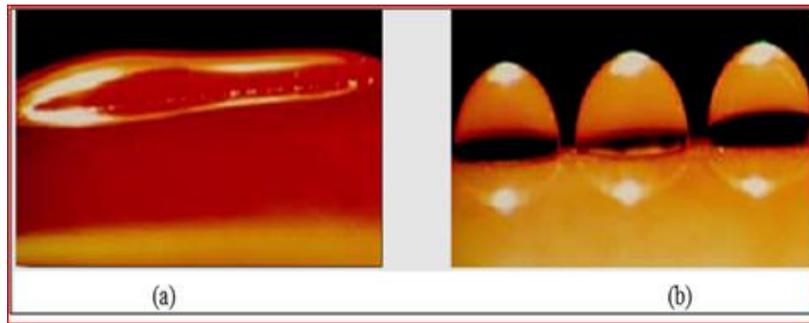
**Fig. II.4** : Valeurs de l'angle de contact possibles

L'énergie libre totale des surfaces et ses composantes

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 phase 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 [26].

### II.7.3. Propriété de la surface [27]

La géométrie spécifique et la surface préférentiellement 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.7.4. Hydrophobicité [23]

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 [28]

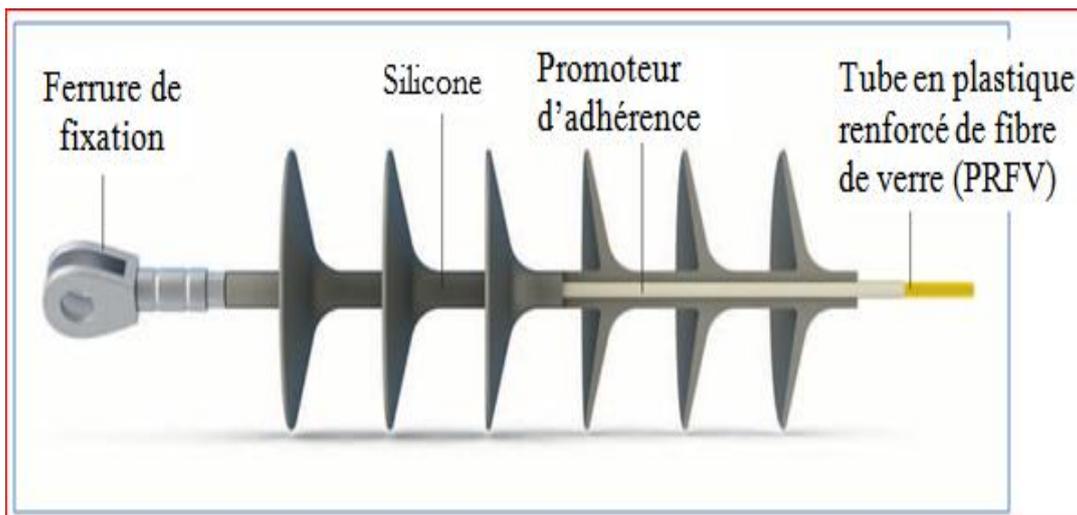
#### II.8. Applications des élastomères silicones dans l'isolation électrique

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

### II.8.1. 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 [23]. Autres avantages :

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



**Fig. II.7 :** Principe d'un isolateur à long fût

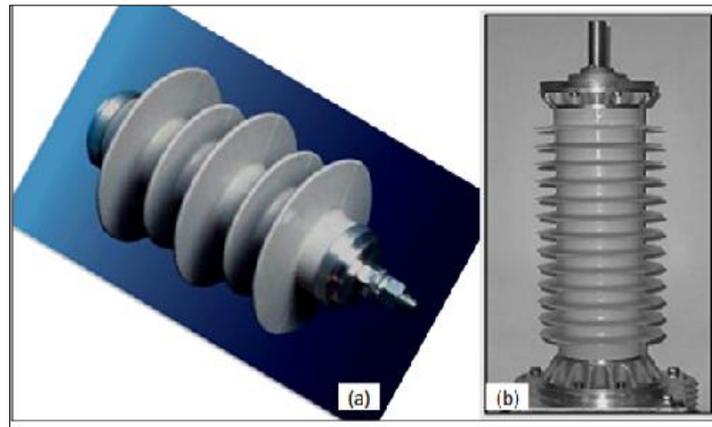
### II.8.2. Isolation volumique

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 [29].

### II.8.3. 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 [29].

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.8**), mais également dans des disjoncteurs et des transformateurs de mesure.



**Fig. II.8:** (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 (coating) 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. 8a.

## II.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit les principales caractéristiques des matériaux isolants et leurs utilisations. Nous pouvons conclure que :

Un matériau isolant ne peut être caractérisé électriquement que par sa rigidité et sa permittivité diélectrique, son facteur de pertes et sa résistivité transversale ou longitudinale.

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

Les isolants solides, notamment les polymères sont très demandés dans le domaine industriel eu égard à 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.

---

## *Chapitre III*

POLLUTION ATMOSPHERIQUE ET PHENOMENES  
DE DECHARGES

---

### III.1. Introduction

La pollution est un phénomène qui constitue un sérieux problème sur l'isolement des ouvrages de haute tension, dont il faut tenir compte lors du dimensionnement de l'isolement de ces structures. Ceci est dû à la formation de couches plus ou moins conductrices sur la surface des isolateurs. Ces couches peuvent engendrer une diminution considérable de la résistivité superficielle de la surface isolante et par suite la diminution de la tension de tenue de cette dernière. Ils peuvent dans les cas les plus critiques, conduire à un contournement total, ce qui constitue la situation la plus grave. La connaissance des différentes sources de pollution et le degré de pollution, est par conséquent une condition préalable et indispensable pour apprécier le niveau de l'isolement des ouvrages installés, en vue de dimensionner convenablement l'isolation.

### III.2. Définitions

#### III.2.1. Contournement

Décharge disruptive le long d'une surface solide dont la trajectoire contourne ce dernier. Dans notre cas, c'est de l'isolateur qu'il s'agit. Aussi le terme contournement est employé pour des décharges disruptives par amorçage dans l'air entourant l'isolateur [30, 31].

#### III.2.2. Tension de Contournement

C'est le niveau de tension le plus bas au-delà duquel les arcs électriques joignent les deux électrodes [32]. D'après A. Cimador [33] elle dépend de :

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

#### III.2.3. Tension de tenue

C'est le niveau de tension le plus important que peut supporter une isolation sans provoquer de décharge disruptive [34].

### III.3. Formation des couches polluantes

Les couches de pollution se déposent progressivement sur les surfaces des isolateurs des lignes de haute tension, du fait qu'ils forment des obstacles à l'écoulement d'air, transportant de diverses substances organiques ou minérales (poussières, sel marin, fumée, engrais,...). La couche de pollution se concentre en général, dans les parties protégées contre les facteurs de nettoyage naturel (vent violent, pluie abondante,...). La répartition de la pollution est loin d'être uniforme et homogène et dépend essentiellement :

Du profil de l'isolateur (forme géométrique de la surface).

- De l'orientation (verticale ou inclinée) de la chaîne par rapport au sol ;
- De la distance à la source de la pollution ;
- De la nature des dépôts, poids et taille des particules ;
- Des caractéristiques climatiques du site (vent, pluie, givre,...) ;

Des caractéristiques géographiques de la zone (urbaine, industrielle, Sahara,...etc.) [35].

### III.4. Sources de pollution

Les principales sources de pollution pouvant être rencontrées sont la pollution naturelle: marine, désertique et la pollution industrielle. La pollution mixte représente l'ennemi majeur des ouvrages électriques car, elle est la combinaison des deux pollutions, naturelle et industrielle.

#### III.4.1. Pollution naturelle

Cette pollution peut être marine, désertique ou autre, provenant des dépôts de poussières véhiculés par les vents.

##### III.4.1.1. Pollution désertique

Dans les régions désertiques, la pollution est due surtout aux tempêtes de sable. La densité de sel dans le sable est très élevée, et la rosée matinale est la seule source d'humidification dans ces régions est favorise la conduction sur la surface isolante.

##### III.4.1.2. Pollution marine

Dans les installations au voisinage de la mer, les embruns portés par le vent se déposent progressivement sur les isolateurs, formant ainsi une couche de sel qui recouvre toute leur surface. Cette couche qui est humidifiée par les embruns eux-mêmes, devient de

plus en plus conductrice. Ce qui donne naissance à des courants de fuite encore plus intenses, et des arcs pouvant se développer jusqu'à provoquer le contournement total de l'isolant.

#### **III.4.1.3. Autre type de pollution naturelle**

La pluie est un phénomène naturel, dans certaines conditions de pluie violente, un film continu d'eau peut s'établir d'une extrémité à l'autre de la chaîne d'isolateur. Comme l'eau n'est jamais parfaitement isolante, ce phénomène peut conduire au contournement; c'est le contournement sous pluie.

#### **III.4.2. Pollution industrielle**

Dans des zones à forte concentration industrielle, au voisinage des usines de pétrochimie, de cimenteries, ...etc. Les isolateurs se recouvrent peu à peu de poussières résultant des fumées dégagées par ces dernières, et qui sont faiblement conductrices, mais hygroscopique, à la présence d'une humidité intense. Le sel contenu dans ces poussières abaisse considérablement la résistivité superficielle des isolateurs. De plus, dans les régions agricoles; les agents polluants peuvent être insecticide engrais, grains de pollens, cette pollution peut aussi être d'origine domestique, quant il s'agit des facteurs tels: fumées et gaz résultant des moyens de réchauffement des habitations ou de moyens de transport.

#### **III.4.3. Pollution mixte**

La pollution mixte résulte de la combinaison d'une ou plusieurs pollutions précitées, c'est la forme de pollution la plus sévère pour l'exploitation des ouvrages électriques. Par conséquent, quelle que soit la source de pollution, on observe la formation d'une couche électrolytique due à l'humidification d'un dépôt solide accumulé progressivement sur des surfaces isolantes. La nature et les caractéristiques des agents contaminants sont très variées. Généralement, ils ne provoquent pas à court terme de dégradation de la rigidité diélectrique lorsqu'ils sont secs. Cependant, l'humidification d'un dépôt solide accumulé progressivement sur des surfaces isolantes, quelle que soit sa nature, provoque la formation d'une couche électrolytique caractéristique du phénomène de pollution.

#### **III.5. Sévérité de pollution**

Le dimensionnement de l'isolation externe vis-à-vis de la pollution pose un certain nombre de problèmes spécifiques. L'un des plus fondamentaux est la détermination de la

sévérité de la pollution là où l'isolation doit être installée [36]. La mesure de cette sévérité est indispensable pour assurer un service sans défaillance dans un site pollué.

### III.5.1. Mesure de la sévérité de pollution d'un site

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

#### III.5.1.1. 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)

$$G = \frac{I}{V} \dots\dots\dots (III. 1)$$

La conductivité superficielle est obtenue en multipliant la conductance  $G$  par un facteur de forme de l'isolateur [37]. 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), laquelle détermine la performance d'une surface isolante. 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 [38, 39].

#### III.5.1.2. 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 physico-chimique de l'air d'un site donné et la sévérité de la pollution de ce même site [40].

#### III.5.1.3. Densité du dépôt non soluble (DDNS)

La densité de dépôt non soluble correspond à la quantité de produits non solubles présents dans une couche de pollution. La détermination de la DDNS (**Fig. III.1**) s'effectue

comme suit:

La solution obtenue par la méthode de la DDSE est filtrée à l'aide d'un papier filtre. Le dépôt non soluble restant après filtrage est séché puis pesé. La DDNS peut être calculée par la formule suivante.

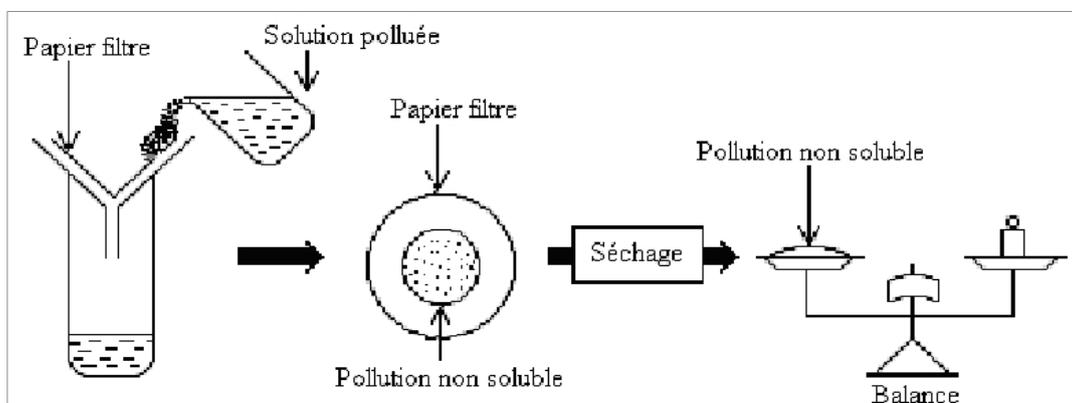
$$\text{DDNS} = 1000 \frac{m_f - m_i}{A} \dots\dots\dots (\text{III. 2})$$

Où: DDNS : est la densité de dépôt non soluble en  $\text{mg}/\text{cm}^2$  ;

$m_f$  : est la masse du papier filtre contenant la pollution après séchage en mg ;

$m_i$  : est la masse initiale du papier filtre en mg ;

A : est la surface lavée de la barrière en  $\text{cm}^2$  ;



**Fig. III. 1:** Schéma et procédé de mesure de la DDNS

#### III.5.1.4. Densité du dépôt de sel équivalent (DDSE)

La DDSE est le dépôt équivalent exprimé en mg de sel par  $\text{cm}^2$  de la surface d'un isolateur, qui a une conductivité électrique égale à celle du dépôt réel lorsqu'il est dissous dans la même quantité d'eau. Des échantillons de pollution sont prélevés à la surface de l'isolateur ou d'autres collecteurs. Le dépôt est récupéré par lavage, en utilisant un matériau absorbant (coton, mouchoir en papier,...) et de l'eau distillée. A partir de la conductivité de la solution obtenue de la surface utilisée de l'isolateur, du volume d'eau et de sa température, on peut calculer la DDSE.

Pour déterminer la sévérité du site, les mesures doivent être répétées avec une fréquence suffisante pour obtenir les niveaux entre les périodes de lavage naturelle. Cette méthode permet d'établir une relation avec les méthodes d'essais sous pollution artificielle, ce qui est un avantage à prendre en considération. Elle présente en outre certains inconvénients tels que les fréquences de prélèvements, les fluctuations de l'humidité et l'amorçage des arcs électriques qui ne sont pas pris en compte [38].

### III.6. Impact de la pollution

Les sels contenus dans les dépôts polluants qui recouvrent les surfaces isolantes se dissolvent et créent une couche électrolytique conductrice, ce qui engendre une conductivité superficielle et provoque une modification de la répartition de potentiel. La tension de rupture diélectrique peut alors être atteinte entre deux points de la surface isolante entraînant ainsi l'amorçage d'un arc électrique qui court-circuite une partie de la ligne de fuite [41].

### III.7. Effet de la pollution sur la rigidité diélectrique de l'air

Les études menées par A.J. Kaluzny [42] sous un champ uniforme et non uniforme, permettent de noter les constatations suivantes :

- La rigidité diélectrique de l'intervalle d'air dépend de la concentration des impuretés de l'air (impuretés industrielles), comme elle dépend largement de l'humidité. La rigidité diélectrique augmente en présence d'impuretés pour des valeurs de l'humidité comprises entre  $11 \text{ g/m}^3$  et  $13.1 \text{ g/m}^3$  et décroît si l'humidité est supérieure à  $13.1 \text{ g/m}^3$ ;
- La rigidité diélectrique de l'air polluée diminue en augmentant la distance interélectrode.

### III.8. 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) [43].

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

### **III.9. Méthodes d'essais sous pollution**

Pour comparer les performances de divers types d'isolateurs et de sélectionner ceux qui présentent le meilleur comportement sous pollution, il est nécessaire de les soumettre à des essais. Pour effectuer ces essais, nous distinguons deux principales méthodes d'essai à savoir les essais sous pollution naturelle et les essais sous pollution artificielle. Ces essais peuvent être effectuées dans les conditions naturelles (sur site) ou au laboratoire.

#### **III.9.1. Essai sous pollution naturelle**

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

La diversité de la nature des agents polluants impose ce type d'essai pour étudier séparément les principales sources de pollutions et leurs impacts sur l'isolement des ouvrages. Cependant, l'inconvénient majeur de ces essais est la durée des expériences qui est relativement longue. C'est pourquoi des méthodes de laboratoire furent proposées et sont largement utilisées.

#### **III.9.2. Essais sous pollution artificielle**

Les essais au laboratoire sont basés sur la reproduction de la couche de pollution par des solutions réparties sur une surface isolante et dont la conductivité est différente. Afin de valider les essais sous pollution artificielle, il a été nécessaire de comparer les performances des isolateurs testés au laboratoire à celles des isolateurs en exploitation dans des conditions naturelles. Une première approche consiste à rechercher une méthode qui simule le mieux possible les conditions naturelles de pollution, en tenant compte de la répartition non uniforme de la pollution. Une deuxième approche consiste à rechercher une méthode de laboratoire susceptible de fournir des résultats reproductibles, afin de faciliter la comparaison des performances des différents types d'isolateurs [40].

##### **III.9.2.1. Méthode des couches solides**

Dans ces méthodes la surface isolante est recouverte par pulvérisation d'une couche de

pollution solide constituée de chlorure de sodium et d'un agent liant inerte. La conductivité de cette suspension est réglée par addition d'une certaine quantité de chlorure de sodium. Si l'humidification s'effectue après application de la tension (méthode du brouillard à vapeur), le paramètre de sévérité est défini par la densité de dépôt de sel en  $\text{mg/cm}^2$ . Si l'humidification a lieu avant l'application de la tension, le paramètre de sévérité est défini par la conductivité de la couche polluante.

### **III.9.2.2. Méthode de la pollution liquide**

Elle est appelée aussi « méthode de la méthylcellulose » et s'apparente à la méthode de la couche solide lorsqu'un mélange liquide est déposé sur une surface isolante avant l'essai, cependant, la pollution reste humide durant l'essai. Elle est constituée d'eau, de calcaire et de méthylcellulose ou de kaolin. La conductivité désirée est obtenue par addition de chlorure de sodium. Après quelques minutes d'égouttages, on applique la tension d'essai à l'isolateur. Il est important de signaler que la couche polluante n'est pas humidifiée en cours d'essai. Ainsi, après quelques minutes d'essai, les courants de fuite assèchent la couche et la probabilité de contournement décroît rapidement [38].

## **III.10. 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.10.1. Techniques de lutte contre la pollution**

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 des matériaux polymères qui sont collés sur la surface des isolateurs existants pour prolonger la ligne de fuite.

### **III.10.2. 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 [44].

### **III.10.3. Graissage des isolateurs (couches hydrophobes)**

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

### **III.10.4. 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 [45].

## **III.11. 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 [46].

### III.12. Décharge disruptive

#### III.12.1. 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. Froehlich [47] 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.12.2. 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.12.3. 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.2**). Etant donné la continuité du vecteur induction électrique dans un milieu non ionisé à l'état initial, on trouve :

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

$\epsilon_{ri}$  : 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.

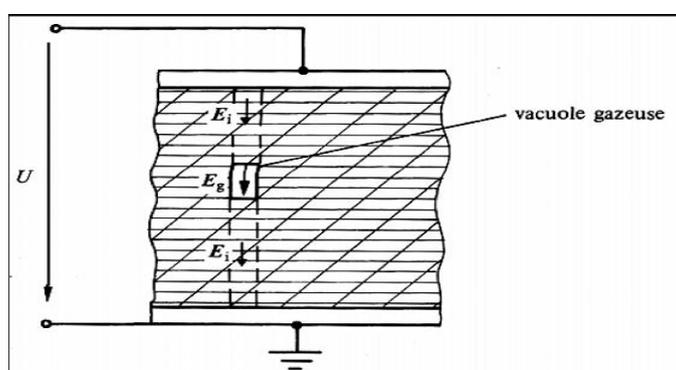


Fig. III. 2: Isolant comportant une inclusion gazeuse

### III.13. Décharge dans l'air

#### III.13.1. Décharge de type streamers [48]

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.3). 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.

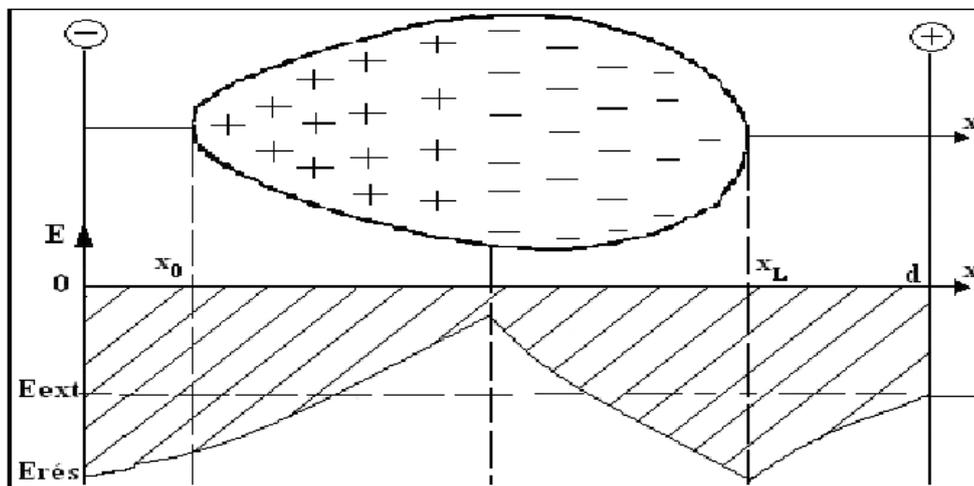
Le mécanisme de l'avalanche décrit par Townsend ne conserve sa validité que pour des produits dp inférieur à 200cm. Torr. Au-delà, l'expérimentation montre qu'il se produit des phénomènes peu compatibles avec le mécanisme d'avalanche de Townsend:

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:

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

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.



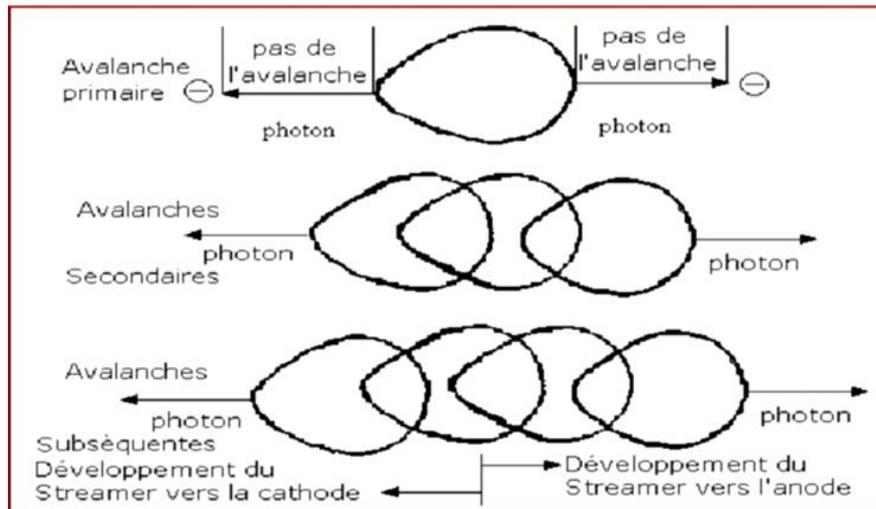
**Fig. III. 3:** Avalanche électronique dans un champ  $\varphi \neq 0$  homogène

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

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

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.4**).

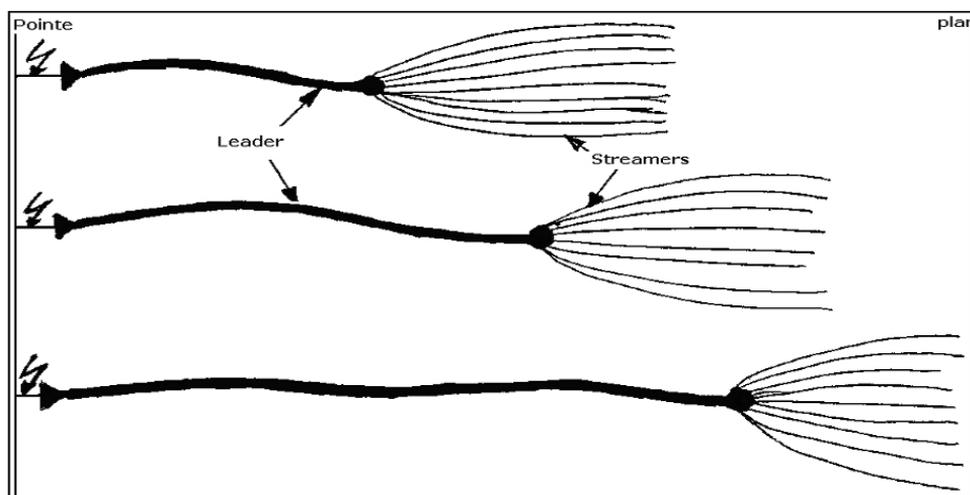
Les avalanches secondaires et subséquentes prennent naissance à la tête et à la queue de l'avalanche et se développent par pas dans la direction de l'anode et de la cathode. La vitesse de propagation du streamer peut atteindre 1000cm/ $\mu$ s.



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

### III.13.2. Décharges de type leader [48]

La tenue diélectrique des grands intervalles d'air diminue avec la distance Interélectrode. Si le champ électrique moyen à l'amorçage est encore de 4,5kV/cm pour 30cm. 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 40cm et 80cm selon les conditions expérimentales.



**Fig. III.5:** Développement d'un leader

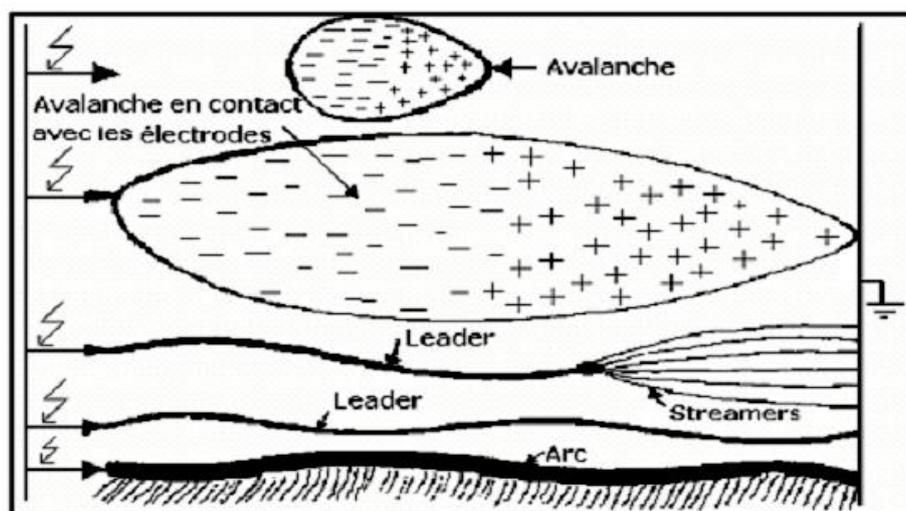
Lorsque les streamers qui participent à l'apparition de l'effet couronne sont suffisamment développés, le gaz contenu dans le tronc commun de la décharge s'échauffe sous l'action du courant électronique, sa conductivité, se met à croître, si bien que tout se passe comme si l'électrode s'était allongée. L'effet couronne se trouve donc déplacé plus en avant dans l'intervalle (**Fig. III.5**) 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.14. Différents types d'amorçage des isolations gazeuses [48]

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

#### III.14.1. Amorçage de l'air par avalanche primaire

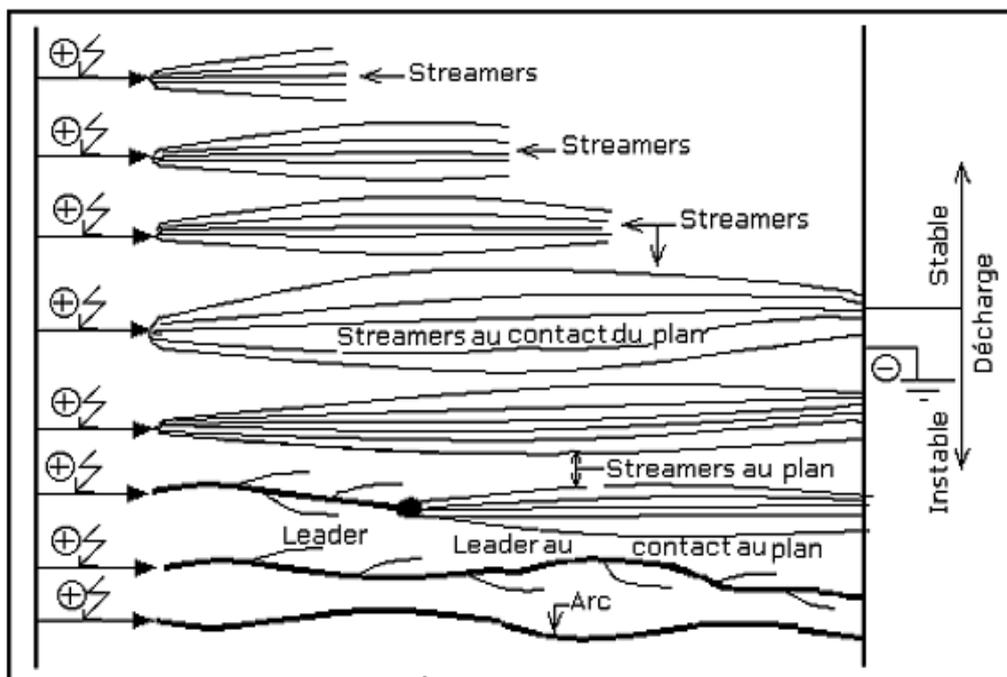
Ce type de claquage n'existe que dans le cas de champ extrêmement inhomogène (aiguilles, fil fin...etc.) et pour des tensions de choc relativement peu variable (tension continue, à fréquence industrielle) car d'une part l'avalanche électronique n'atteint pas sa taille critique avant le claquage et que 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.6**).



**Fig. III.6 :** Amorçage d'un intervalle d'air par avalanche primaire

### III.14.2. 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  $\gamma$ ). 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 (**Fi. III.7**).



**Fig. III.7 :** Disruption d'un intervalle d'air par streamers

### III.14.3. 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. 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. 8**).

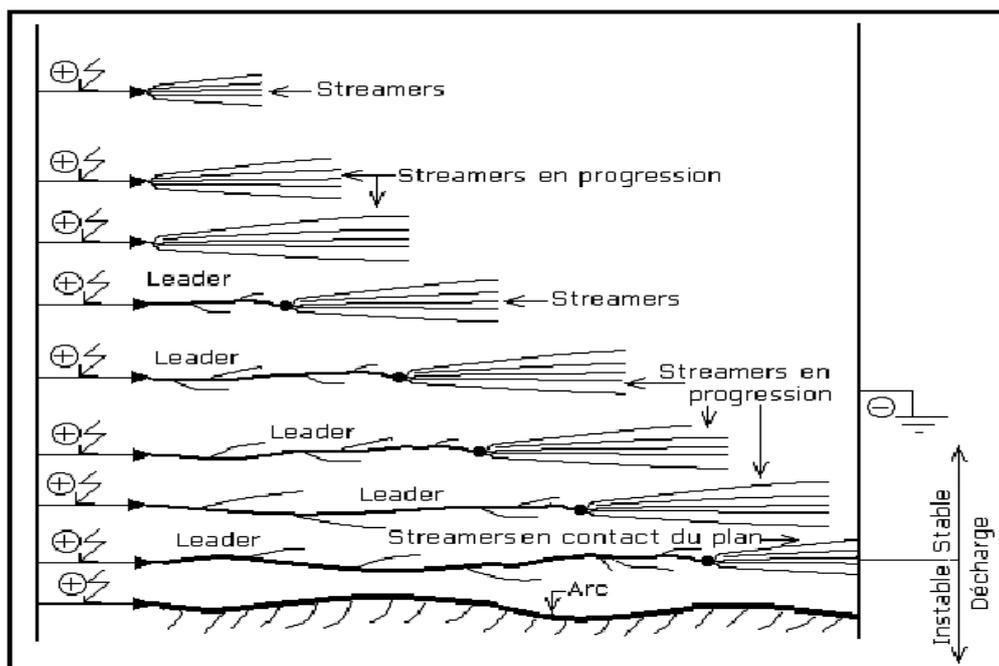


Fig. III.8 : Amorçage d'un espace d'air par leader

### III.15. Conclusion

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.

Pour mieux dimensionner les chaînes (ailettes) d'isolateurs, il est indispensable de connaître la sévérité de la pollution des sites concernés, cette sévérité consiste à étudier les différents paramètres qui définissent l'état de dégradation de l'isolation.

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

---

*Chapitre IV*

RESULTATS D'ESSAIS ET  
INTERPRETATIONS

---

## IV.1. Introduction

Il est difficile d'étudier le comportement d'une surface isolante hydrophobe recouverte de gouttes d'eau en service c'est pour cela que les chercheurs ont eu recours aux méthodes d'études de ces dernières au laboratoire. Le dépôt des gouttes d'eau sur une surface isolante sous tension est loin d'être uniforme. Cette non uniformité est due aux profils de la surface isolante et aux conditions environnementales (pluie fine, la rosée du matin) ce qui affecte sensiblement leur performance.

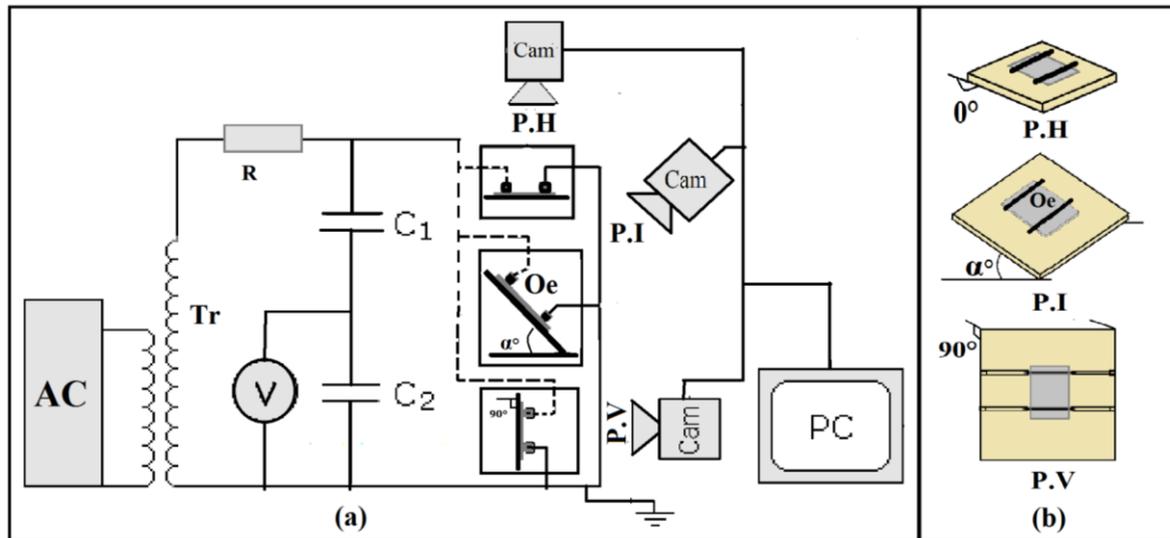
Le but de notre travail est d'étudier expérimentalement l'effet du degré d'inclinaison ( $\alpha^\circ$ ), par rapport à l'horizontale d'un film en silicone hydrophobe recouvert de gouttes d'eau, le volume et la conductivité électrique de ces dernières sur sa performance sous tension alternative. Pour une distance interélectrode  $d$  fixe et égale à 6 cm, nous déterminerons dans un premier temps, la tension de contournement de la surface isolante sans gouttes correspondant à une performance optimale, ensuite nous étudierons l'influence du volume, de la conductivité électrique des gouttes d'eau et l'angle d'inclinaison de l'isolation sur sa tension de contournement, ainsi que la visualisation de la décharge électrique évoluant sur la surface du matériau.

## IV.2. 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.

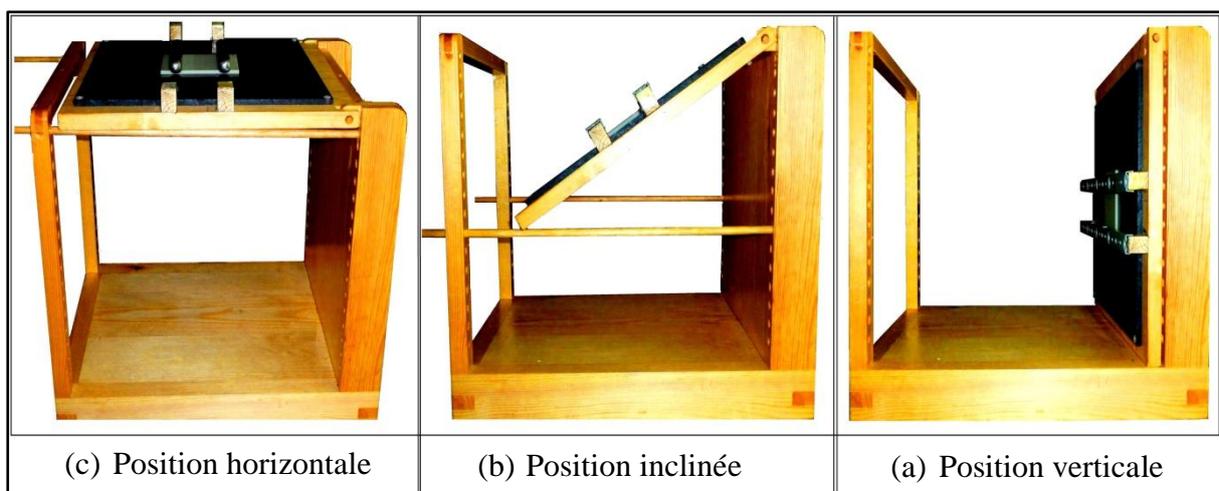
Le circuit de mesure est composé d'un voltmètre de crête (V) à affichage numérique, une résistance de protection R, un diviseur de tension capacitif ( $C_1/C_2$ ) auquel est connecté l'objet d'essai (Oe) et un transformateur (Tr) qui peut délivrer à son secondaire une tension alternative maximale de 135 kV, dont la variation temporelle de sa rampe peut être obtenue à l'aide de l'appareil de commande manuelle ou automatique (AC). (**Fig. IV. 1a**).

Le circuit de visualisation est constitué d'un Caméscope (Cam) pour l'enregistrement des différentes phases de la décharge se développant sur la surface de l'isolant en silicone limitée par deux électrodes et un PC pour une meilleure observation et l'analyse de celle-ci. Les différentes positions du dispositif expérimental sont illustrées par la figure IV. 1b.



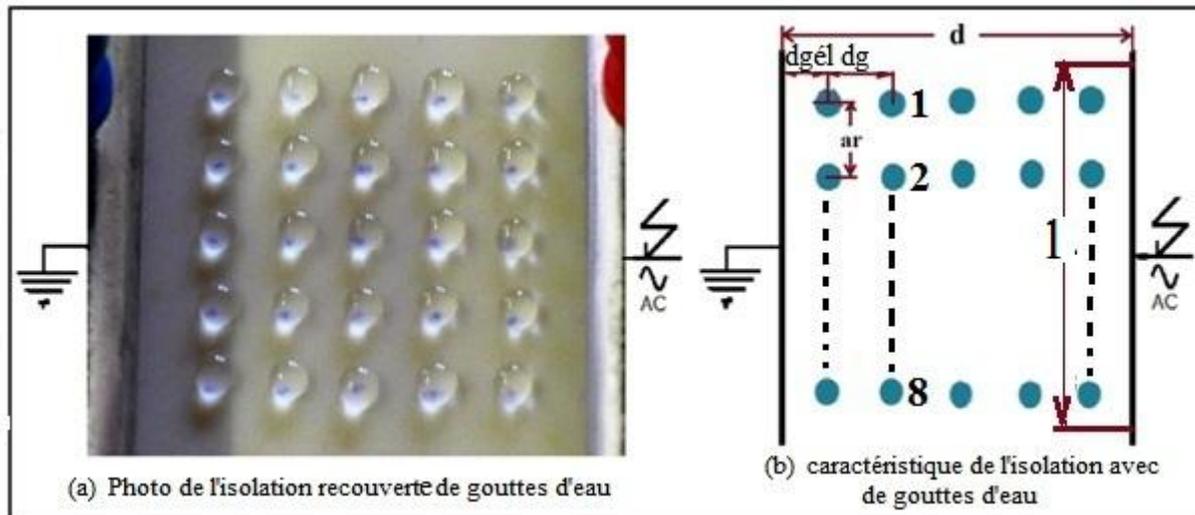
**Fig. IV. 1:** (a) schéma de mesure et de visualisation; (b) différentes positions de l'objet d'essai  
 AC: Appareil de Commande manuelle ou automatique du transformateur; Tr: Transformateur BT/HT ; Cam: Caméscope numérique; PC: Ordinateur ; Oe: Objet d'essai ;  
 PH: Position horizontale ; PI: Position inclinée ; PV: Position verticale ;

La figure IV. 2, nous donne l'image du dispositif expérimental, sa paroi supérieure peut faire un mouvement rotatif de  $0^\circ$  à  $90^\circ$  par rapport à l'horizontale. Sur celle-ci sont posées deux électrodes de forme parallélépipédique en fer et de taille  $(13,5 \times 2 \times 2) \text{ cm}^3$  arrondies aux extrémités afin d'éviter l'effet de bords. L'électrode supérieure est portée à la HT et l'autre est mise à la terre. Le film en silicone de dimensions  $(13 \times 9,5 \times 0,5) \text{ cm}^3$  posé sur une plaque en plexiglas. Cette dernière est fixée sur le plan. Les figures IV. 2a, 2b et 2c, montrent les différentes inclinaisons de la paroi porteuse de l'isolation.



**Fig. IV. 2:** Différentes positions du modèle expérimental

La distance interélectrode est de 6 cm. Celle-ci est gardée constante tout au long de notre étude. Le volume des gouttes d'eau déposées sur la surface hydrophobe en silicone est de 20  $\mu\text{l}$  et 45  $\mu\text{l}$ . Celle-ci est prélevée à l'aide d'une micropipette. La figure IV. 3, montre les caractéristiques de l'arrangement des gouttes d'eau sur l'isolation.



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

$d$ : Distance interélectrode;  $l$ : Largeur du film en silicone;

$a_r$ : Distance séparant deux rangées successives de gouttes d'eau sur la largeur de l'isolation;

$d_g$ : Distance entre deux gouttes adjacentes sur la même ligne de fuite de l'isolation;

$d_{gél}$ : Distance entre l'électrodes (soit de coté HT et coté terre) et de la première goutte se trouvant sur la ligne de fuite de l'isolation;

$G_g$ : Rangées grandes gouttes;

$P_g$ : Rangées petites gouttes;

$N_r$ : Nombre de rangées de 1, 2, ..., 8;

$A_r$ : Arrangements des gouttes mixtes sur la ligne de fuite,  $A_1, A_2, \dots, A_{14}$ ;

La solution polluante, comprend du sel et soit de l'eau distillée ou du robinet, selon la conductivité volumique souhaitée, à laquelle 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. 4**). Les différentes conductivités volumiques utilisées lors de notre étude sont : (0; 0,0085; 0,18; 0,7; 3; 5; 7 et 10) mS/cm.



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

### IV.3. Dessiccateur

Un dessiccateur désigne un équipement servant à protéger des substances contre l'humidité. Il est constitué d'une cuve circulaire surmontée d'un couvercle; l'ensemble est en verre épais. Le diamètre intérieur d'un dessiccateur varie généralement de 10 à 30 cm. La liaison des deux parties peut être réalisée par un rodage en verre ou un joint torique en élastomère. Certains modèles sont équipés d'une prise de vide avec robinet.



**Fig. IV. 5:** Photo montrant un dessiccateur en verre

A chaque fin de série d'essais, les échantillons en silicone sont nettoyés ensuite placés sur le disque perforé du dessiccateur afin de les protéger contre l'humidité. Au préalable, une quantité suffisante de dessicatif (silicagel) souvent bleu (présence d'indicateur coloré) est déposée au fond de l'appareil. Lorsque le dessicatif change de couleur (virant souvent au rose), il faut le régénérer par étuvage. Le gel de silice peut être régénéré par chauffage à 170°C environ.

**IV.4. Procédé d'essai**

Après préparation de l'objet d'essai, 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. Il est à noter que la valeur mesurée de la tension est la moyenne d'une série 15 essais. La pause entre de séries consécutives est d'une heure à une heure trente minutes. La conductivité volumique d'eau est vérifiée et maintenu constante avant chaque série d'essai. Ensuite la surface en silicone est nettoyée à l'aide du papier mouchoir et de l'isopropanol afin d'éliminer les dépôts de charges sur cette dernière.

**IV.5. 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 :

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

- $\hat{U}_c$ : 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  $\theta$ , pression  $P$  et d'humidité  $H$ ;
- $K_d$ : Facteur de correction relatif à la température et à la pression;
- $K_h$ : Facteur de correction relatif à l'humidité;

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

- $P$ : 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. 6a, 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. 6b, pour déduire le facteur de correction  $K_h$ .

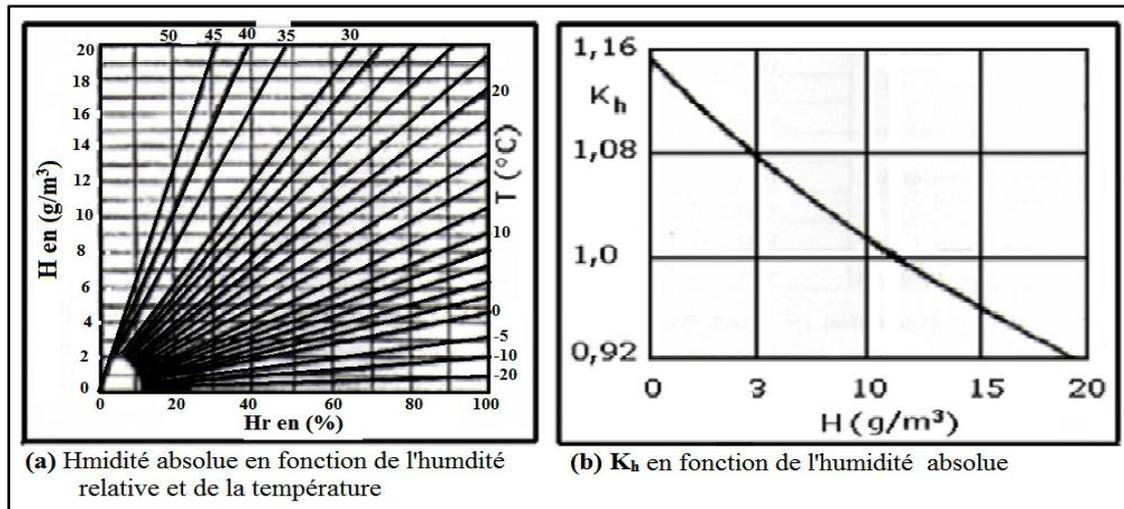


Fig. IV. 6: Abaques de corrections en fonction de l'humidité et de la température

### 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 :  $\hat{U}_c = 52.15 \text{ kV}$ . En utilisant les formules de correction et les abaques suscités ci-dessus nous trouvons:

$$K_h = 1,0477$$

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

$$\hat{U}_{c0} = 53,7 \text{ kV}.$$

### IV.6. Propriétés diélectriques de l'isolation en silicone

Nous avons mesuré au laboratoire de haute tension de l'université de Bejaïa à l'aide du Pont de Schering les propriétés diélectriques de la silicone. Les valeurs de mesure sont consignées dans le tableau IV. 1.

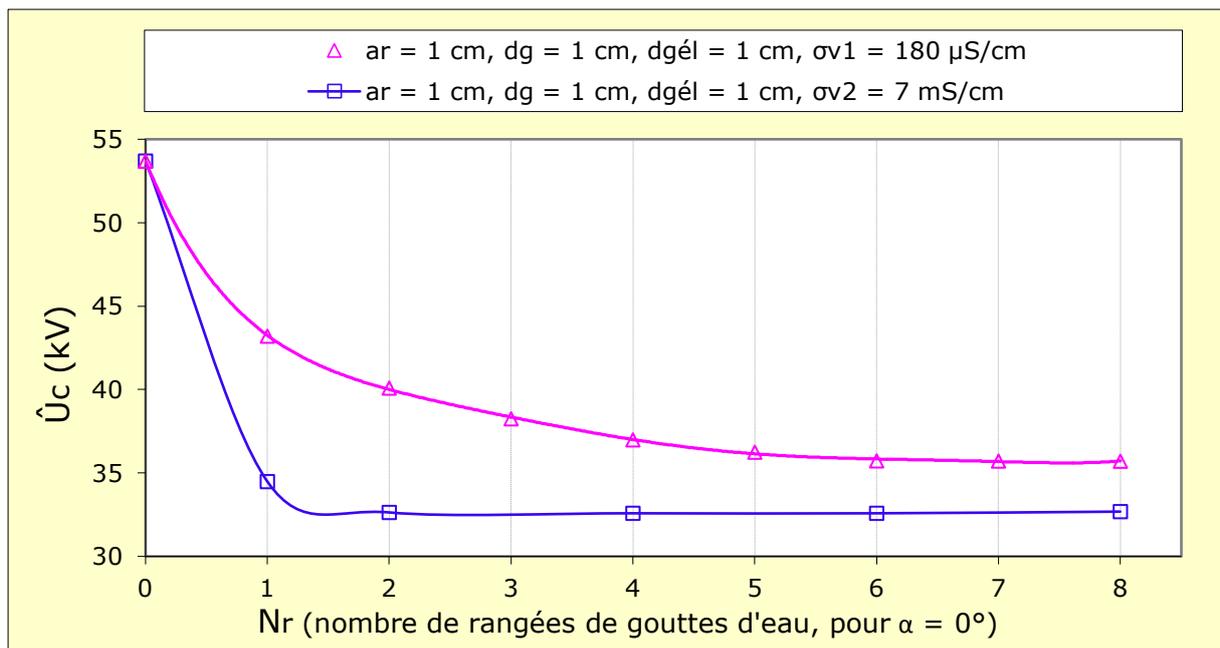
Tab. IV. 1: Valeurs de quelques paramètres électriques de l'isolation en silicone

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

## IV.7. Facteurs d'influence de la tension de contournement d'une surface en silicone hydrophobe

### IV.7.1. Conductivité et nombre de rangées de gouttes d'eau

La figure IV. 7 illustre la variation de la tension de contournement en fonction du nombre de rangées de gouttes d'eau. La valeur maximale de la tension de contournement, de l'ordre de 53.7 kV, est atteinte en absence de gouttes d'eau sur l'isolation. Pour un volume de gouttes d'eau égal à 45  $\mu\text{l}$  et leur conductivité électrique de l'ordre 180  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , il en résulte que la tension alternative de contournement décroît progressivement jusqu'à atteindre une valeur constante, pour un nombre de rangées de l'ordre de 4 à 5. Une allure similaire est obtenue pour le même volume d'eau mais pour une conductivité plus élevée ( $\sigma_{v2} = 7 \text{ mS}/\text{cm}$ ). La valeur du nombre de rangées pour laquelle celle-ci est constante et de l'ordre de 2. La différence réside au niveau de la valeur de la tension de contournement de l'isolation qui est faible dans le deuxième cas. Cet écart est de l'ordre de 16.2 %.



**Fig. IV. 7:**  $\hat{U}_c = f(\sigma_v, N_r)$  d'une surface en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau ( $V_g = 45 \mu\text{l}$ )

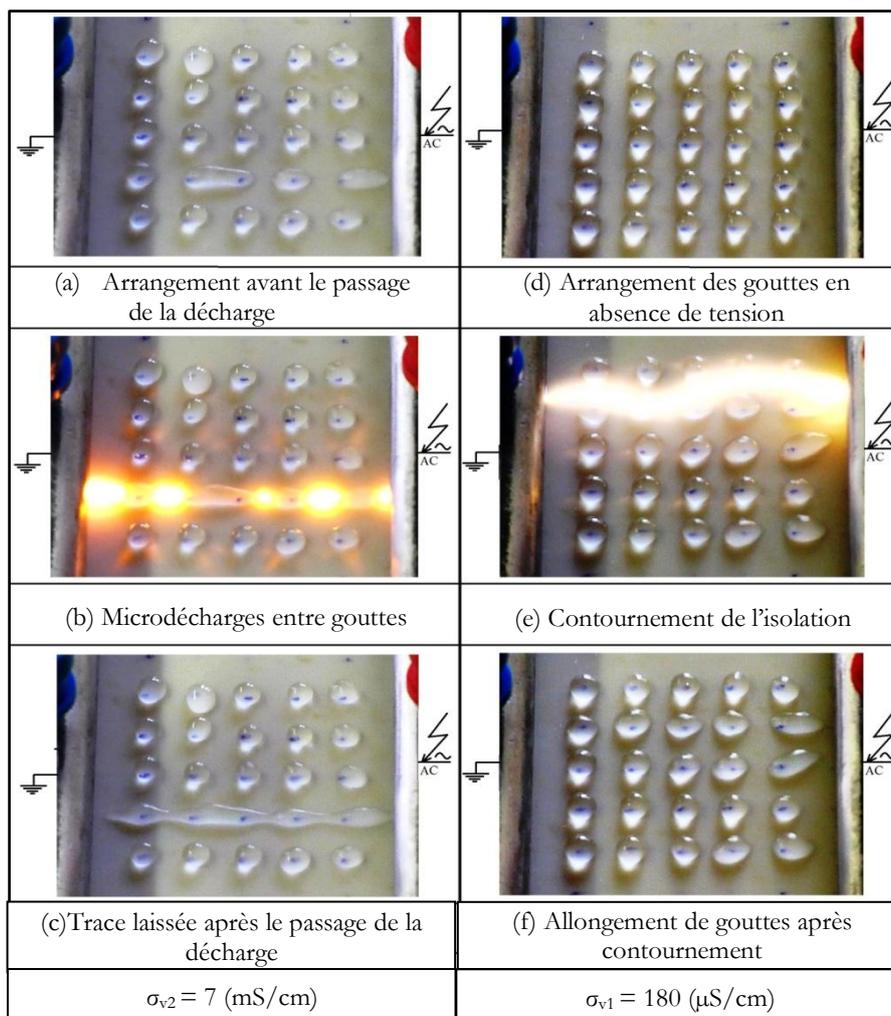
$\sigma_v$  : Conductivité volumique des gouttes d'eau;  $N_r$ : Nombre de rangées;

$a_r$  : Distance séparant deux rangées successives de gouttes d'eau sur la largeur de l'isolation;

$d_g$ : Distance entre deux gouttes adjacentes sur la ligne de fuite de l'isolation;

$d_{gél}$ : Distance entre l'électrode et la première goutte se trouvant sur la ligne de fuite de l'isolation

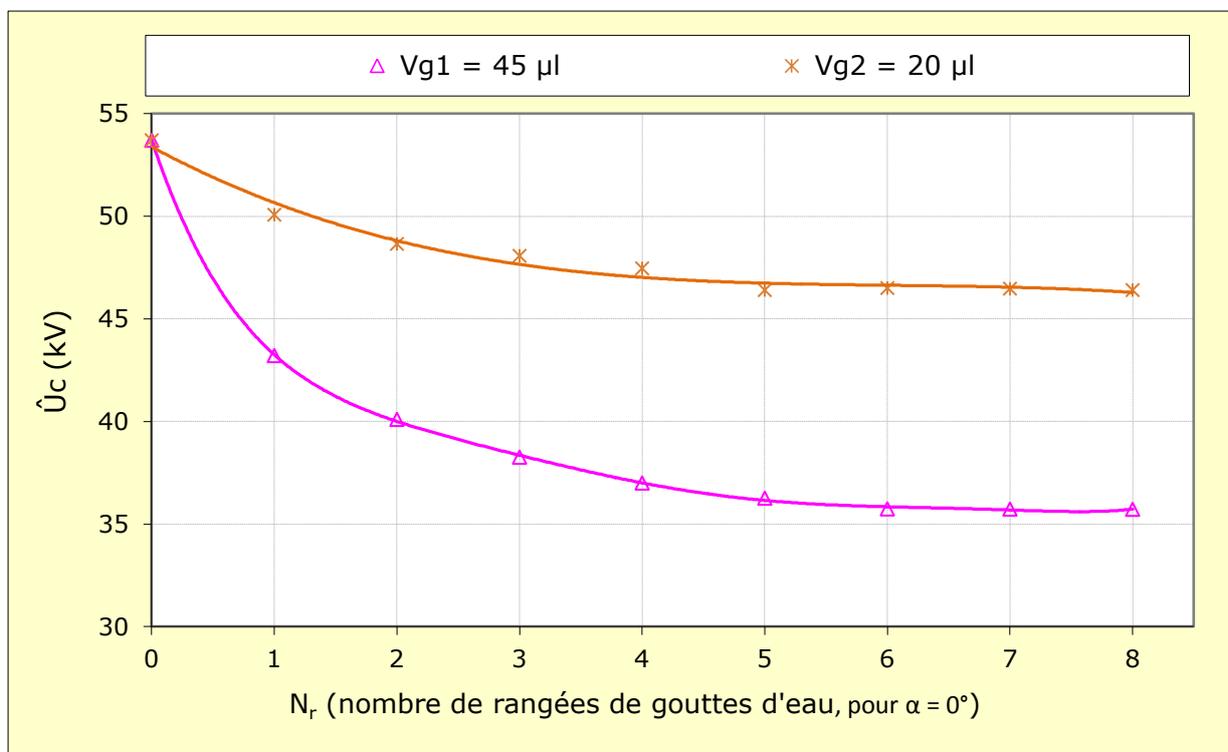
Les photographies représentées en figure IV. 8, expliquent les principales phases de contournement d'une surface isolante horizontale en SR recouverte de gouttes d'eau de  $45\mu\text{l}$  de volume, pour deux conductivités volumiques différentes ( $180\ \mu\text{S}/\text{cm}$  et  $7\ \text{mS}/\text{cm}$ ). Les figures IV. 8a et 8d nous montrent la forme des gouttes juste avant le passage de la décharge. Les figures IV. 8b et 8e indiquent le chemin emprunté par la décharge d'arc électrique. Il est à remarquer tout d'abord que la couleur émise par ces deux décharges est différente. Cela est dû probablement aux différentes longueurs d'ondes émises par les gouttes d'eau à divers degrés de salinité. Concernant le trajet de la décharge, il y'a discontinuité sur celui-ci, donné en figure IV. 8c par rapport à celui indiqué sur la figure IV. 8f. L'empreinte laissée par la décharge d'arc électrique sur la deuxième rangée de gouttes d'eau à conductivité électrique de  $7\ \text{mS}/\text{cm}$  et située à gauche de l'axe des électrodes, ressemble plus à un filet d'eau continu que celle illustrée par la figure IV. 8f, où le trajet est très discontinu et de conductivité superficielle plus faible.



**Fig. IV. 8:** Couleur de lumière émise par la décharge pour  $\alpha = 0^\circ$ ,  $\sigma_{v2} = 7\ \text{mS}/\text{cm}$  et  $\sigma_{v1} = 180\ \mu\text{S}/\text{cm}$  et  $V_{g1} = 45\ \mu\text{l}$

#### IV.7.2. Volume des gouttes d'eau, nombre de rangées

La figure IV.9 donne l'évolution de la tension de contournement de l'isolation en silicone hydrophobe en fonction du volume et du nombre de rangées de gouttes d'eau à conductivité électrique constante. Il en résulte une allure similaire des deux courbes quel que soit le volume des gouttes d'eau. Par contre la tension de contournement de la même surface recouverte de petites gouttes est plus élevée que celle à grandes gouttes. Cette différence peut être expliquée par un raccourcissement de l'espace entre gouttes qui est plus élevé dans le cas de l'arrangement des gouttes à grand volume, du fait de l'allongement des gouttes de ces dernières. Cet écart est évalué à 19,1 %.



**Fig. IV. 9:**  $\hat{U}_c = f(V_g, N_r)$  d'une surface en silicone hydrophobe

$V_{g1}$  : volume des grosses gouttes ;

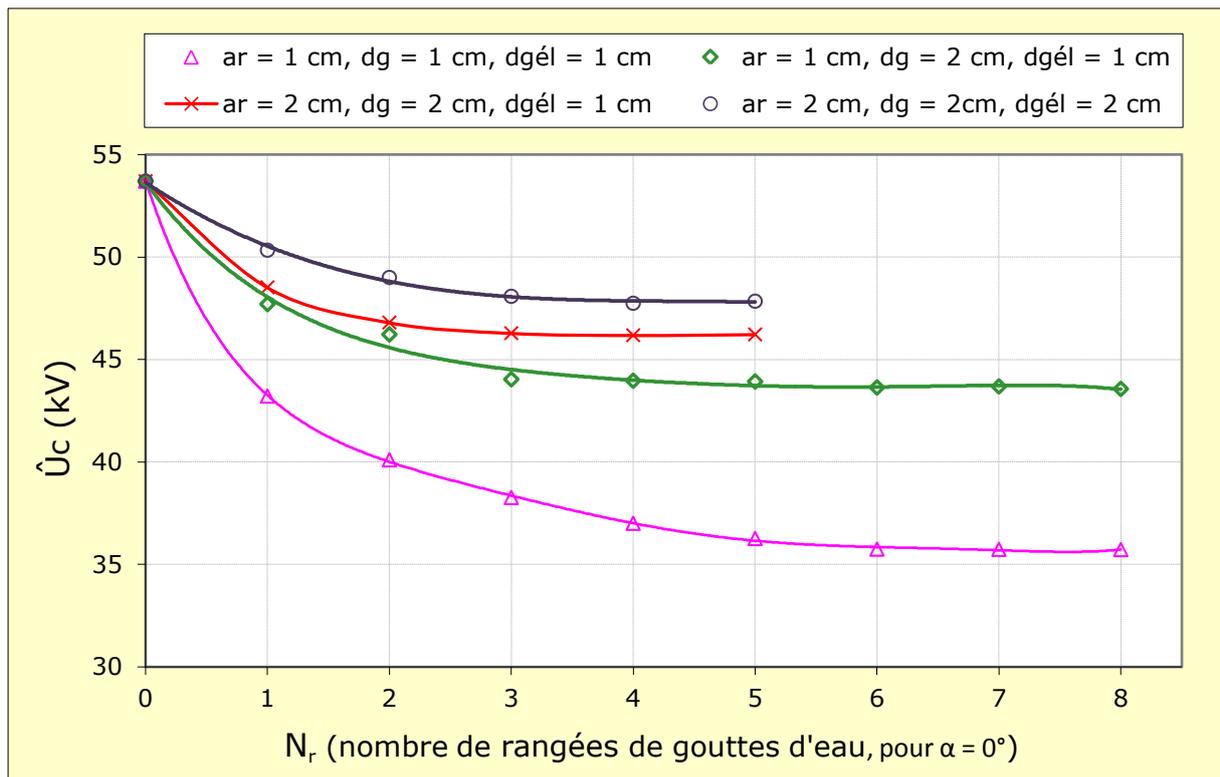
$V_{g2}$  : volume des petites gouttes ;

$N_r$  : Nombre de rangées ;

#### IV.7.3. Nombre de rangées espacement entre les gouttes d'eau

Dans cette étude nous avons varié le nombre de rangées, la distance entre les gouttes ainsi que celle entre les gouttes d'une même rangée et l'électrode haute tension. L'allure de la tension de contournement en fonction de ces paramètres est illustrée par la figure IV. 10.

La tension de contournement de l'isolation sans gouttes d'eau égale à 53,7 kV. Après dépôt de gouttes sur la surface du film, la tension diminue jusqu'à atteindre une valeur constante (**Fig. IV. 10**). La diminution de celle-ci est due à la distorsion du champ électrique au point de jonction des trois milieux (air-eau-silicone) à permittivités différentes. À partir d'un certain nombre de rangées qui est fonction de l'espace entre rangées sur la largeur de l'isolation ( $a_r$ ), la tension prend une valeur limite constante quel que soit le nombre de rangées de gouttes d'eau ajoutées. L'augmentation du volume des gouttes d'eau entraîne la diminution de la distance entre les gouttes et par conséquent la résistance entre celles-ci. L'élévation de l'espacement entre les rangées empêche les décharges entre rangées et ceci engendre l'élévation de la tension de contournement de l'isolation. L'écart existant entre les tensions de contournement est dû à la différence de leurs impédances équivalentes. Plus cette dernière est plus grande, plus la tension de contournement est plus importante.



**Fig. IV. 10:**  $\hat{U}_c = f(N_r, a_r, d_g, d_{g\acute{e}l})$  d'une surface en silicone hydrophobe horizontale

$$(V_{g1} = 45 \mu\text{l}, d = 6 \text{ cm})$$

$a_r$ : Distance séparant deux rangées successives de gouttes d'eau sur la largeur de l'isolation;

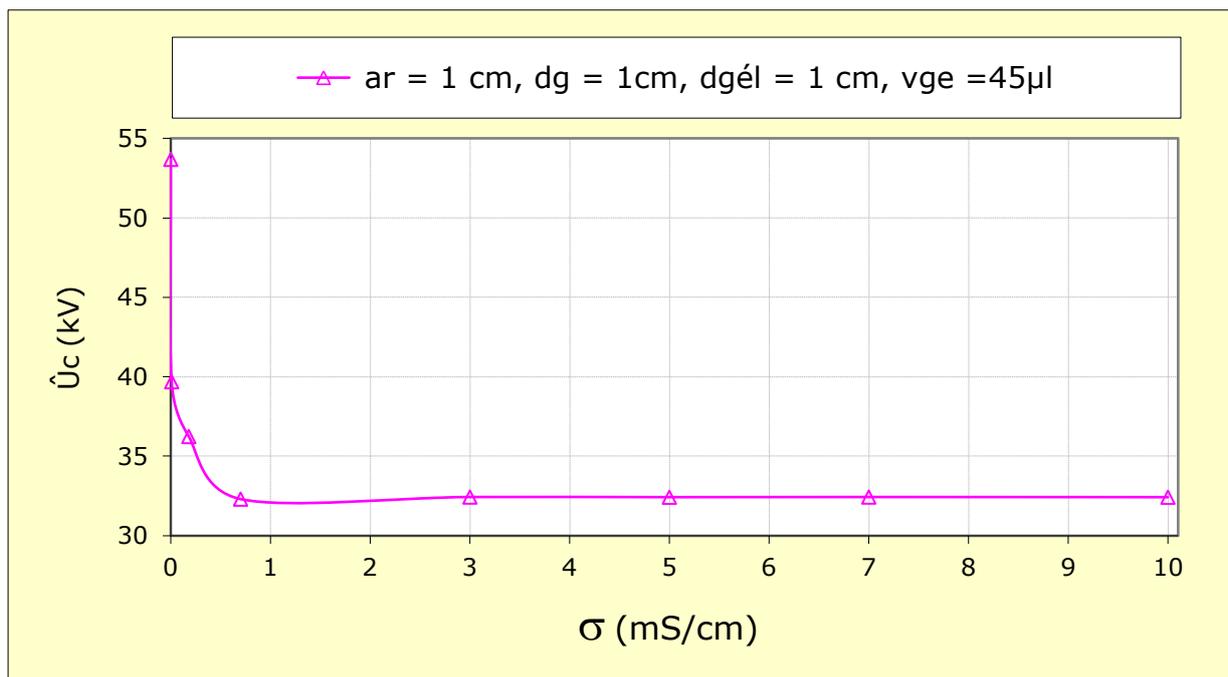
$d_g$ : Distance entre deux gouttes adjacentes sur la ligne de fuite de l'isolation;

$d_{g\acute{e}l}$ : Distance entre l'électrode et la première goutte se trouvant sur la ligne de fuite de l'isolation;  $N_r$ : Nombre de rangées;

#### IV.7.4. Conductivité de la solution d'eau

La courbe de la figure IV. 11, donne l'allure de la tension de contournement en fonction de la conductivité des gouttes d'eau recouvrant la surface hydrophobe en silicone. Le nombre de rangées est fixé à 5. Cette courbe montre que la tension de contournement décroît rapidement jusqu'à une de  $\sigma_v$  égale à 0,7 mS/cm et à partir de laquelle elle demeure constante.

L'augmentation de la conductivité volumique des gouttes d'eau entraîne leur allongement et par conséquent le raccourcissement de la distance inter-gouttes.



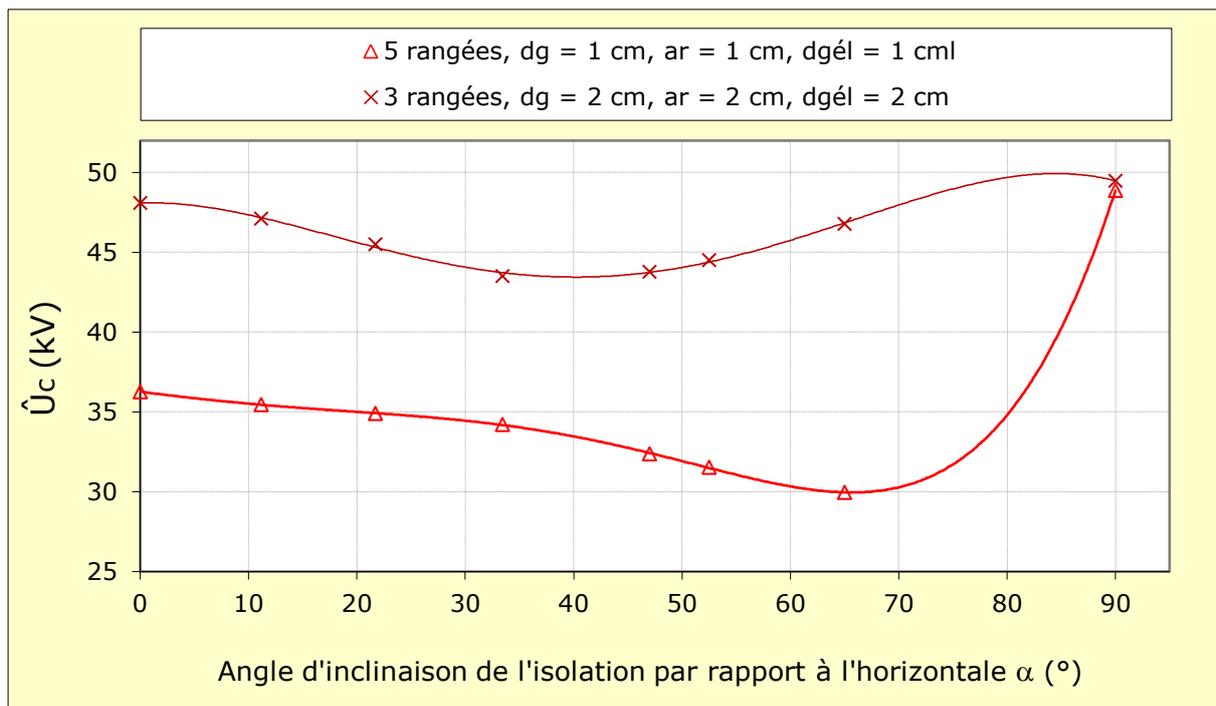
**Fig. IV. 11:**  $\hat{U}_c = f(\sigma_v)$  de gouttes d'eau en position horizontale ( $N_r = 5$ )

#### IV.7.5. Angle d'inclinaison de l'isolation et espacement entre gouttes

La figure IV. 12 montre l'évolution de la tension de contournement en fonction de l'angle d'inclinaison ( $\alpha^\circ$ ) par rapport à l'horizontale de la surface isolante hydrophobe avec grosses gouttes d'eau à conductivité volumique constante et égale à 180  $\mu\text{S/cm}$ . Le volume des gouttes d'eau est fixé à 45  $\mu\text{l}$  dans ce cas. Le nombre de rangées de gouttes d'eau a été choisi égale à 5 pour la simple raison que la tension de contournement est à sa valeur minimale correspondant aux conditions de simulation les plus défavorables. Il en résulte que les deux courbes présentent un minimum quels que soient les paramètres d'influence considérés dans ce cas. L'existence de cette tension minimale de contournement de l'isolation hydrophobe est justifiée par un raccourcissement maximal de la distance entre les gouttes

d'eau par l'allongement optimal de ces dernières pour une déclinaison de la surface d'un angle de l'ordre de  $65^\circ$ . Il est à remarquer la décroissance de l'angle d'inclinaison avec l'élévation de la distance entre les gouttes le long de la ligne de fuite de l'isolation. Cette élongation des gouttes d'eau est engendrée par l'action simultanée de la force électrique et le poids des gouttes d'eau.

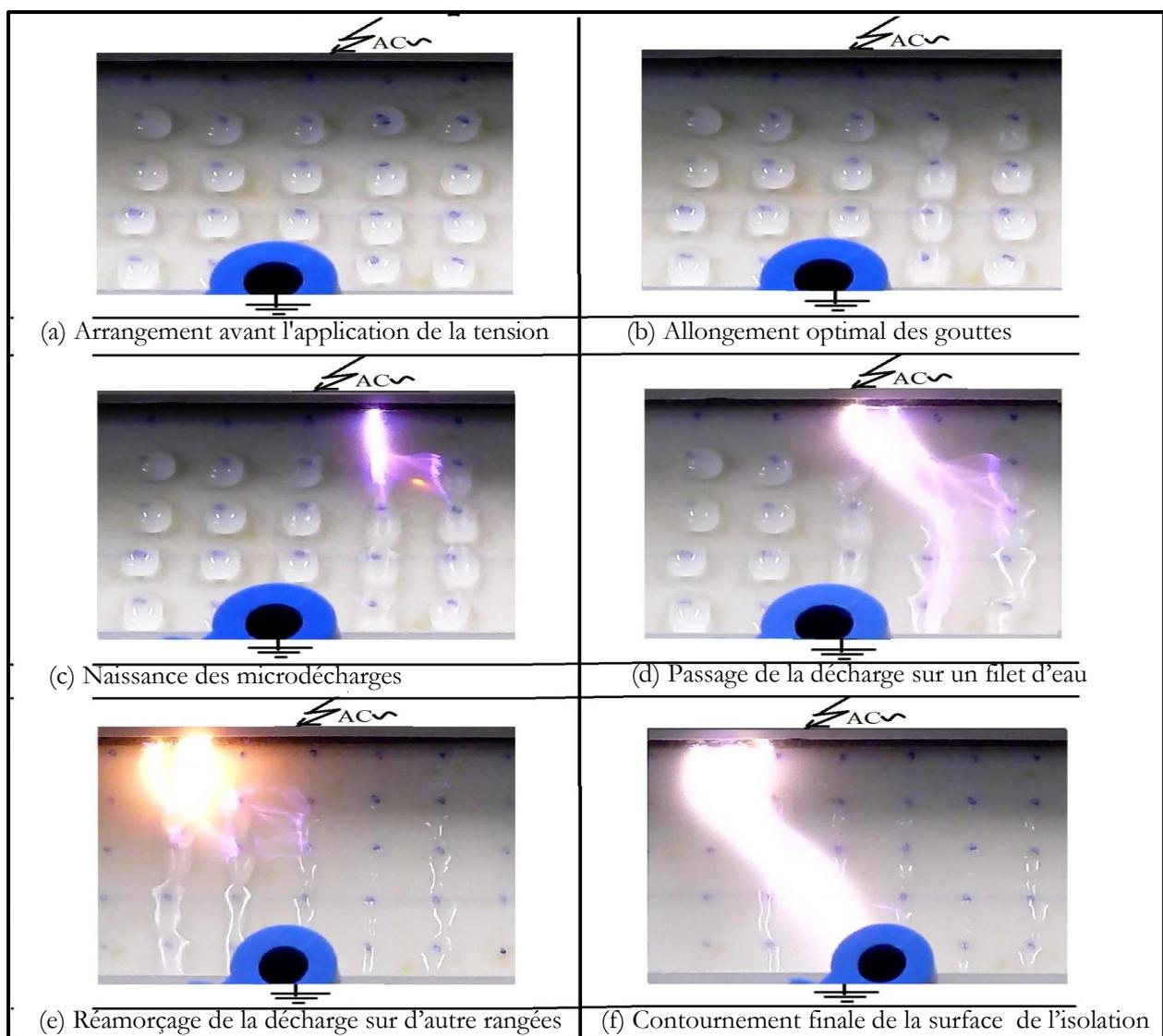
En position verticale de l'isolation, les gouttes ont tendance à quitter la surface avant même l'application de la tension. Celles-ci laissent fréquemment à leur décollage, de gouttelettes derrière elles et le contournement par arc finissent par s'établir au dessus de ces minuscules perles d'eau, ce 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 que la tension de contournement est très proche de celle de l'isolation en absence des grandes gouttes.



**Fig. IV. 12:**  $\hat{U}_c = f(\alpha^\circ)$  d'une surface en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau  
 ( $V_{ge} = 45 \mu l$ ,  $\sigma_{vl} = 180 \mu S/cm$ )

La figure IV. 13 illustre les différentes phases de contournement d'une surface recouverte de grosses gouttes d'eau et inclinée selon un angle  $\alpha_c = 65^\circ$ . L'évolution de la décharge dans ce cas s'étale sur plusieurs rangées afin de provoquer le contournement final. Avant l'application de la tension, la forme des gouttes d'eau est quasi-sphérique (**Fig. IV.**

**13a).** Après application de la tension celles-ci commencent à se déformer (**Fig. IV. 13b**) et à ce mouvoir en direction de l'électrode terre. Pendant ce mouvement les gouttes proches de l'électrode HT plus rapides arrivent à joindre celles, moins rapides et éloignées de l'électrode sous tension. Leur jonction peut donner naissance à un filet d'eau en forme de cylindre à diamètre variable. A ce moment là une décharge émane de l'électrode haute tension et s'amorce dans l'intervalle d'air entre celle-ci et la première extrémité du filament d'eau et commence à glisser dessus à condition que celui-ci soit continu. Dans le cas d'établissement d'un court-circuit entre les deux électrodes la probabilité d'un contournement de l'isolation est très élevée.



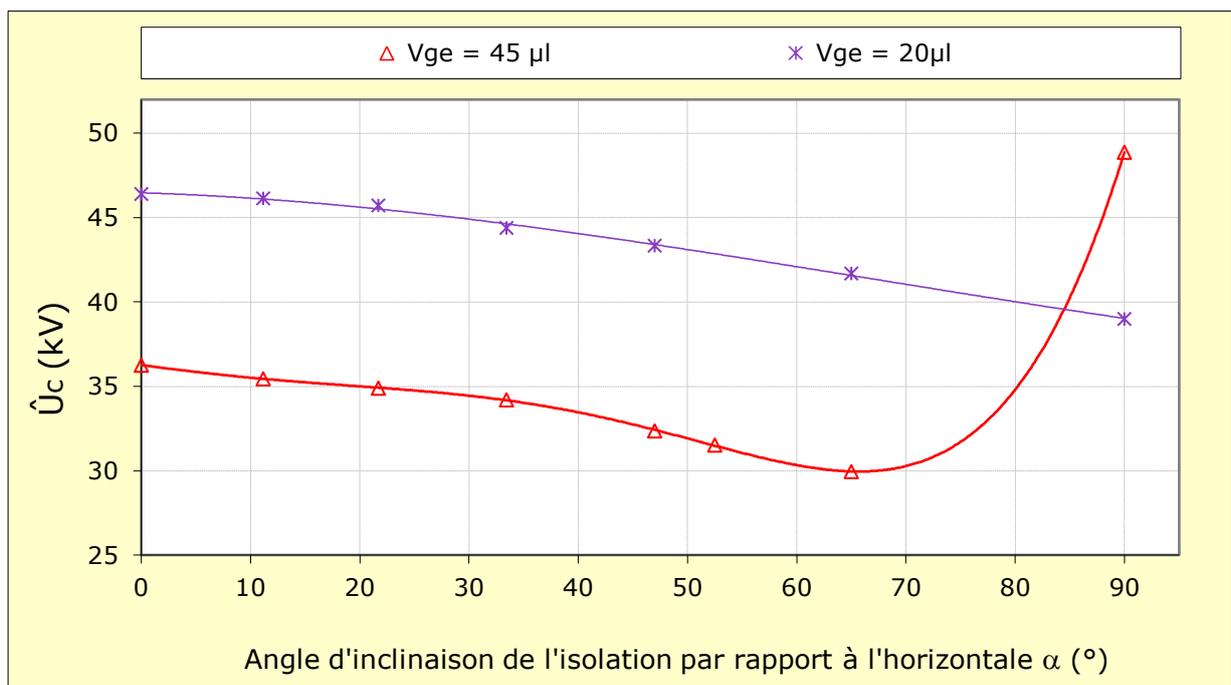
**Fig. IV. 13:** Différentes phases de contournement de la surface isolante pour  $\alpha_c = 65^\circ$

$$N_r = 5, \quad V_g = 45 \mu\text{l} \text{ et } \sigma_v = 180 \mu\text{S/cm}$$

( $\alpha_c$ : Angle critique correspondant à la tension minimale de contournement)

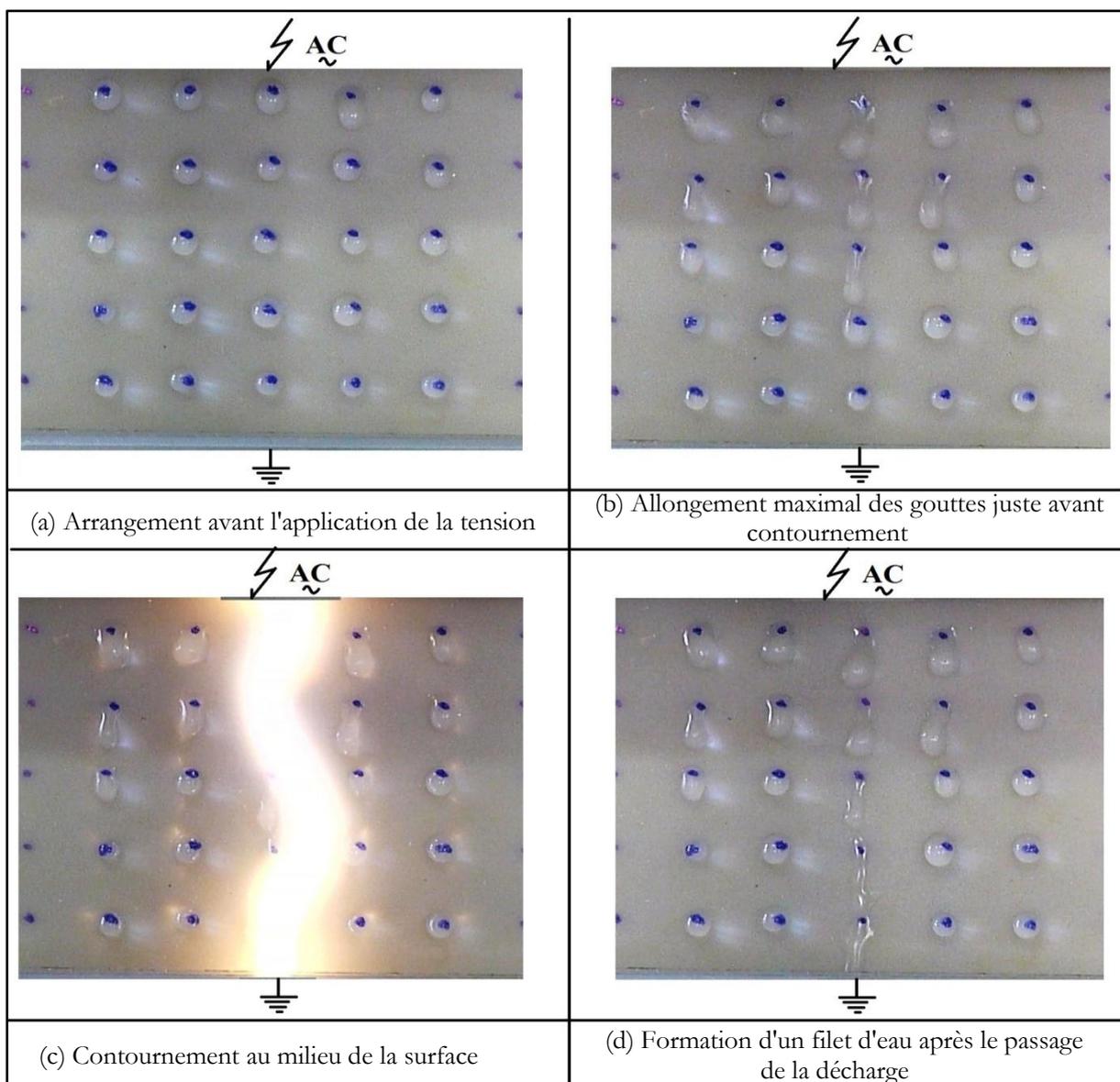
Sous tension alternative, le champ électrique appliqué est bidirectionnel. Alors les gouttelettes ont tendance obéir à l'action conjuguée de la force électrique et leur poids. Elles commencent à se mouvoir en direction de l'électrode terre (**Fig. IV. 13b**). Au cours de ce mouvement, certaines d'entre elles arrivent à se joindre à d'autres moins rapides qu'elles et voient leur taille s'accroître. Au fil du temps le champ électrique s'intensifie autour des gouttes déformées et particulièrement sur celles proches de l'électrode HT, afin d'atteindre la valeur critique d'ionisation de l'air au point triple de contact des gouttelettes d'eau avec l'air et la surface du matériau. Des microdécharges apparaissent entre ces petits filets partiels (**Fig. IV. 13c et IV. 13d**). Leur extinction peut survenir si les distances séparant ces filets partiels s'agrandissent (**Fig. IV. 13a**) pour se rabattre sur d'autres filets d'eau partiels plus rapprochés (**Fig. IV. 13d et IV. 13e**). Ce scénario peut se poursuivre jusqu'à ce qu'un filet d'eau plus long s'offre à la décharge pour lui servir de chemin de glissement et engendrer un contournement de l'isolation (**Fig. IV. 13f**). Il est à souligner que pendant qu'un filament d'eau se désintègre, un autre se forme sur d'autres rangées sous l'action conjuguée de la force électrique et le poids des gouttes. Ce déplacement latéral de la décharge sur la surface à gouttes s'opère généralement sur une largeur correspondant au maximum à 5 rangées équidistantes de 1cm réparties sur la largeur de film en silicone.

#### IV.7.6. Volume des gouttes d'eau et inclinaison de la surface en silicone



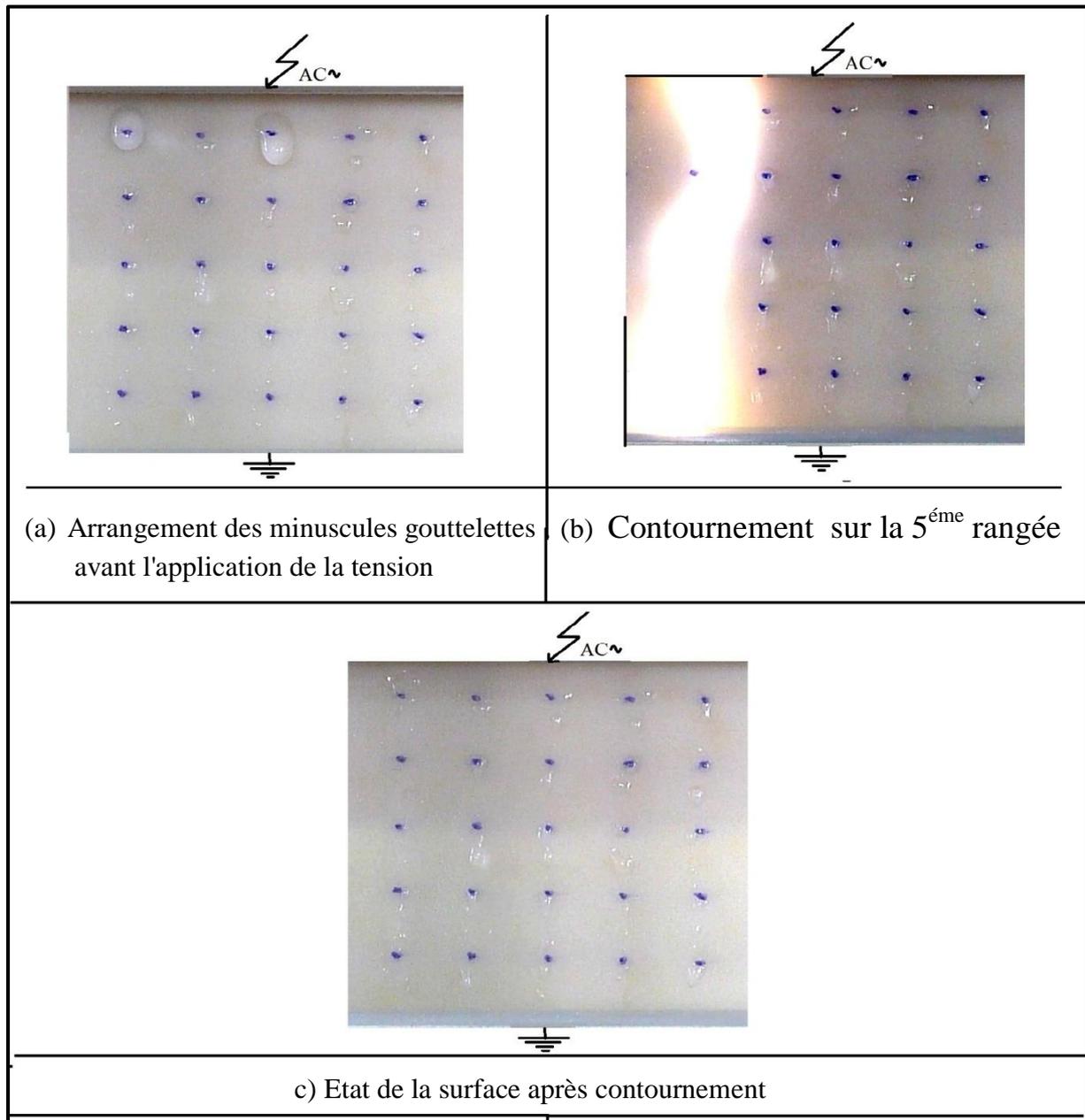
**Fig. IV. 14:**  $\hat{U}_c = f(\alpha^\circ, V_{ge})$  d'une isolation en silicone hydrophobe,  $\sigma_{v1} = 180 \mu\text{S/cm}$

La figure IV. 14 illustre la comparaison des allures de la tension 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  $180 \mu\text{S}/\text{cm}$ . Il en découle 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  $90^\circ$ . Ceci est dû à l'adhésion des petites gouttes d'eau et leur allongement optimal dans ce cas de figure (**Fig. IV. 15**) contrairement aux grosses gouttes ( $V_g = 45 \mu\text{l}$ ) qui quittent la surface en laissant d'infimes gouttelettes derrière elles (**Fig. IV. 16**).



**Fig. IV. 15:** Contournement d'une surface en silicone recouverte de petites gouttes

( $V_g = 20 \mu\text{l}$ ,  $\alpha = 90^\circ$ )



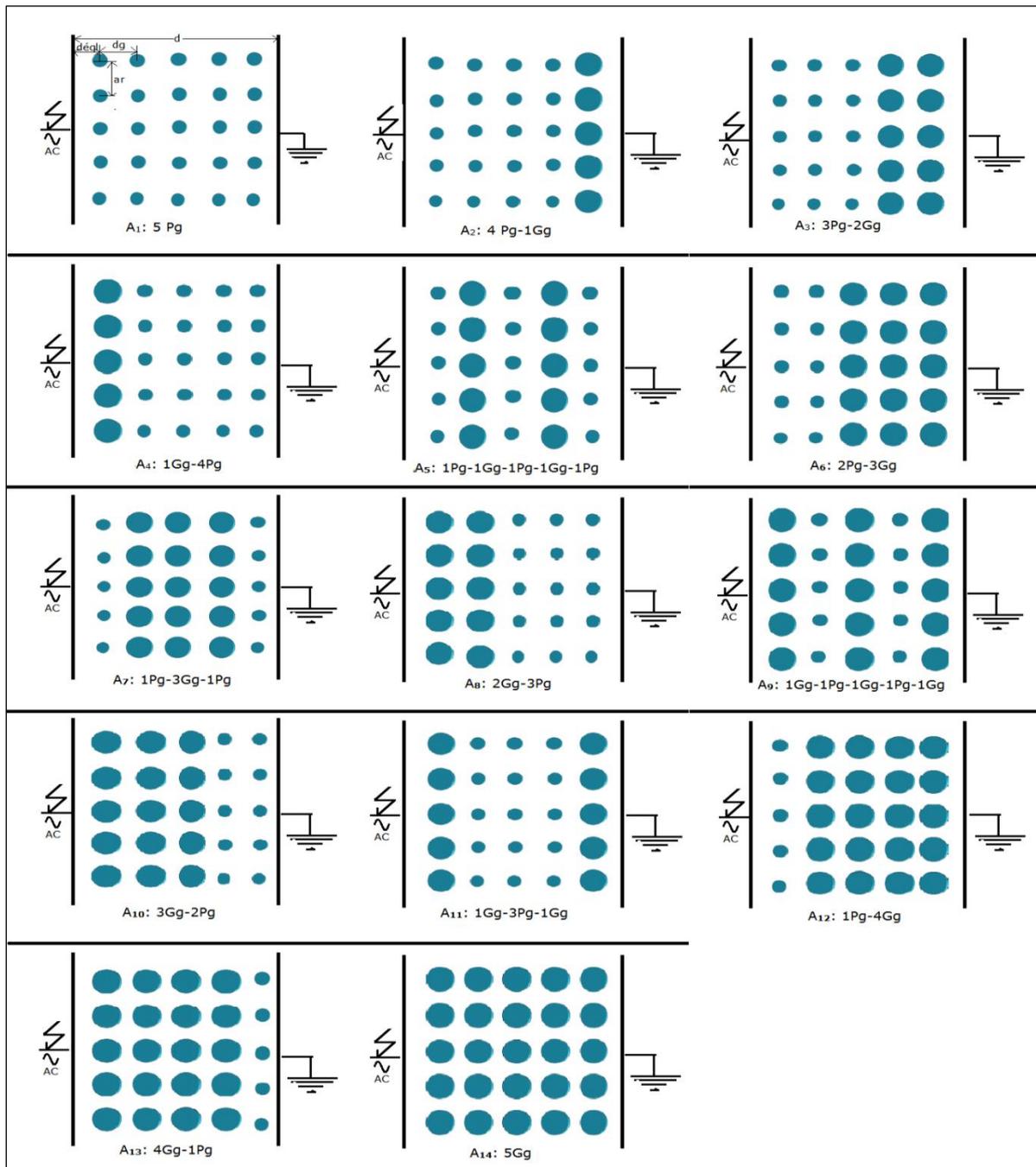
**Fig. IV. 16:** Contournement d'une surface en silicone recouverte de grosses gouttes

$$(V_g = 45\mu\text{l}, \alpha = 90^\circ)$$

#### IV.7.7. Arrangements de gouttes d'eau mixtes

La figure IV. 17, donne 14 divers arrangements de gouttes d'eau à volume différent sur une surface en silicone hydrophobe inclinée d'un angle critique  $\alpha_c = 65^\circ$ . Les petites gouttes ont un volume de 20  $\mu\text{l}$  celui des grandes est de 45  $\mu\text{l}$ . la conductivité électrique de ces gouttes est de 180  $\mu\text{S/cm}$ . il découle de la figure IV. 18 que la rigidité diélectrique de l'isolation est la plus faible lorsque le volume de gouttes d'eau est de 45 $\mu\text{l}$  (**Fig. IV. 17. A<sub>14</sub>**) et le plus élevée pour l'arrangement A<sub>1</sub> correspondant à un volume uniforme de 20  $\mu\text{l}$  de

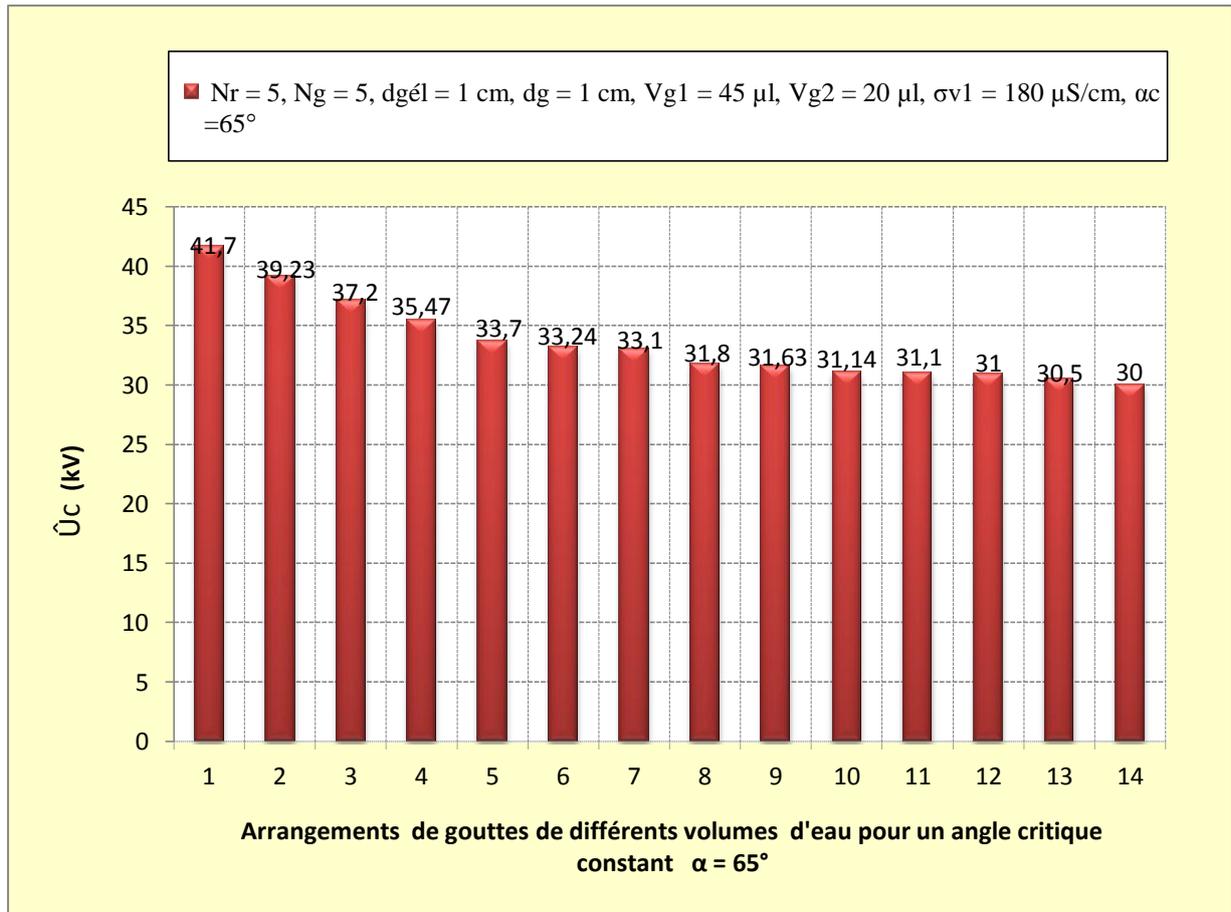
toutes les gouttes d'eau (**Fig. IV.17. A<sub>1</sub>**). Les autres arrangements offrent une rigidité, intermédiaire aux cas extrêmes suscités.



**Fig. IV. 17.:** Combinaison de plusieurs arrangements de gouttes d'eau mixtes à volume variable

$a_r$  : Distance séparant deux rangées successives de gouttes d'eau sur la largeur de l'isolation,  
 $d$  : Distance interélectrode ;  $d_g$  : Distance entre deux gouttes adjacentes sur la ligne de fuite de l'isolation ;  $d_{gél}$  : Distance entre l'électrode et la première goutte se trouvant sur la ligne de fuite de l'isolation ;  $G_g$  : Rangées grandes gouttes ;  $P_g$  : Rangées petites gouttes,

A<sub>1</sub>, ..., A<sub>14</sub>: Arrangements



**Fig. IV. 18**  $\hat{U}_c = f(A_r)$  des gouttes d'eau à volume différent sur une surface en silicone hydrophobe ( $\alpha_c = 65^\circ$ )

#### IV.8. Conclusion

Les résultats obtenus lors de notre étude expérimentale sur la performance d'une surface hydrophobe en silicone recouverte de gouttes d'eau sous tension alternative, nous permettent de tirer les conclusions suivantes:

- La valeur maximale de la rigidité diélectrique longitudinale est obtenue en absence de gouttes d'eau sur la surface de l'isolation. 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. Cette valeur limite est une fonction de la distance entre deux gouttes adjacentes sur la ligne de fuite de l'isolation;
- L'augmentation de la conductivité volumique des gouttes d'eau engendre la décroissance de la tension de contournement. Cela est dû à leur allongement et par conséquent au raccourcissement de la distance entre gouttes;

- La tension de contournement limite obtenue pour des gouttes ayant un volume de 45  $\mu\text{l}$  est moins élevée que celles de 20  $\mu\text{l}$ , avec un écart de 18,6 %;
- Pour un volume des gouttes de 45 $\mu\text{l}$ , la tension minimale de contournement de l'isolation est obtenue pour un angle  $\alpha$  égal à 65°. Cela est dû au raccourcissement optimal de la distance entre les gouttes en cette position. Cette élongation des gouttes d'eau est engendrée par l'action simultanée de la force électrique appliquée et du poids de ces dernières.
- La tension de contournement de la surface hydrophobe en silicone recouverte de petites gouttes, à volume égal à 20  $\mu\text{l}$  en position verticale, est moins élevée que celles des grandes gouttes à volume égale à 45  $\mu\text{l}$ , car celles-ci ont tendance à quitter sous l'action de leur poids, la surface de l'isolation même avant l'application de la tension.
- Sous l'action des gouttes minuscules, la tension de contournement de l'isolation en position verticale est proche de celle obtenue en absence de gouttes d'eau.
- La rigidité diélectrique longitudinale de l'isolation recouverte de gouttes d'eau mixtes ( $\alpha_c = 65^\circ$ ) est minimale lorsque la taille des gouttes est égale à 45 $\mu\text{l}$ . Par contre, celle-ci est maximale si leur volume est de l'ordre de 20 $\mu\text{l}$ . Les autres arrangements donnent des valeurs intermédiaires entre ces extrêmes.

---

## *Conclusion générale*

---

## Conclusion générale

L'objectif principal de notre travail était 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 rigidité diélectrique longitudinale optimale de l'isolation en silicone est obtenue en absence de gouttes d'eau.
- L'analyse des différents arrangements des gouttes d'eau sur l'effet de la tension de contournement de la surface isolante hydrophobe engendre la réduction de la performance de celle-ci. Cette dernière est une fonction de la distance entre les gouttes le long de la ligne de fuite et de la largeur de l'isolation.
- La croissance de la conductivité des gouttes d'eau entraîne la diminution de la tension de contournement de l'isolation jusqu'à une valeur  $\sigma_v = 1$  mS/cm.
- La tension de contournement de la surface hydrophobe est plus faible en présence de grandes gouttes que petites.
- La performance d'une surface hydrophobe, recouverte de grandes gouttes, en fonction de l'angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale, présente un minimum pour un angle  $\alpha$  égal à  $65^\circ$ . Par contre sous l'action de petites gouttes, ce minimum est obtenu pour un angle  $\alpha$  de l'ordre de  $90^\circ$ .

L'arrangement des gouttes d'eau à volume mixte donne une rigidité de l'isolation comprise entre deux valeurs extrêmes correspondant à des arrangements de gouttes de même volume égal respectivement à  $45\mu\text{l}$  et  $20\mu\text{l}$ .

# Références Bibliographiques

---

- 
- [1] L. Carette, J.M. Pouchol, "Silicones, dans *Traité plastiques et composites*", Techniques de l'ingénieur, 2001, A3475, pp.1-18.
- [2] U. Kaltenborn, P. Meier, and Y. Dirix, "Loss and recovery of hydrophobicity of novel hydrophobic epoxy resins", IEEE Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, October 20 - 24 2002.
- [3] R.S. Gorur, E.A. Cherney, and T. Orbeck, R. Hackman, "The electrical performance of polymeric insulating materials under accelerated aging in a fog chamber", IEEE Transactions on Power Delivery.
- [4] P. Blackmore and D. Birtwhistle, "Surface discharges on polymer insulator shed surfaces", IEEE transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 4, April 1997.
- [5] G.G. Karady, H. M. Schneider et F.A.M. Rizk, "Review of CIGRE and IEEE Research into Pollution Performance of Nonceramic Insulators: Field aging Effects and Laboratory Test Techniques", CIGRE 33-103, Août/Septembre 1994.
- [6] A. De La O, R. S. Gogur et J. Chang, "AC Clean Fog on Non-Ceramic Insulating Materials and a Comparison with Porcelain", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 4, pp. 2000-2008, October 1994.
- [7] S. Gubanski et R. Hartings, "Swedish Research on The Application of Composite Insulators in Outdoor Insulation", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol.11, No.5, Septembre /Octobre 1995.
- [8] M.A.R.M. Fernando and S. M. Gubanski, "Leakage Current Patterns on Contaminated Polymeric Surfaces", IEEE Transaction on Dielectric and Electrical Insulation Vol.6 No.5, October 1999.
- [9] Y. Zhu, S. Yamashita, N. Anami, M. Otsulbo, C. Honda, and Y. Hashimoto, "Corona Discharge Phenomenon and Behavior of Water Droplets on the Surface of Polymer in the AC Electric Field", the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, June 1-5 2003 Nagoya.
- [10] K. Karakoulidis, M. G. Danikas, P. Rakitzis, "deterioration phenomena on polymeric insulating surfaces due to water droplets", Journal of electrical engineering, vol. 56, no. 7-8, 2005.
- [11] Y. Zhu, K. Haji, M. O. Chikahisa Honda and N. Hayashi, "Electrohydrodynamic behaviour of water droplet on an electrically stressed hydrophobic surface", <http://iopscience.iop.org/0022-3727/39/9/038>) Published 20 April 2006.
- [12] Y. Zhu, K.Haji, H. Yamamoto, T. Miyake, M. Otsubo, C. Honda, K. Kaikake and K. Sugamoto, "A Study on Hydrophobicity of Silicone Rubber Exposed to Corona
-

- Discharge”, 1-4244-0189-5/06, 2006 IEEE.
- [13] Michael G. Danikas, “Water Droplets on Polymeric Surfaces under the Influence of Uniform Electric Fields: An Investigation with Horizontal and Inclined Test Electrode Arrangements d'essai”, IEEE 2008.
- [14] K. Haji, Y. Zhu, M. Otsubo, T. Sakoda, “Studies on erosion of silicone rubber exposed to partial arc discharges”, *Polymer Degradation and Stability*, pp 2214–2221, 2008.
- [15] B. X. Dul, Yong Liul , Y. S. Xia\ B. X. Yangl and B. C. Liu2, “Dynamic Behavior of Water Droplet for Evaluating Outdoor Insulator”, the 9th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials July 19-23, 2009, Harbin, China.
- [16] S. Thong-Om, W. Payakcho, J. Grasaesom, A. Oonsivilaiand B. Marungsri, “Comparison Ageing Deterioration of Silicone Rubber Outdoor Polymer Insulators in Artificial Accelerated Salt Fog Ageing Test”, *World Academy of Science, Engineering and Technology* 60, 2011.
- [17] Stri Guide, “Hydrophobicity Classification Guide”, 92/1, 1992.
- [18] O. Lamarene, “ influence d’une barrière isolante sur la tension de claquage et sur le champ électrique”, PFE Ingénieur, UAM Béjaïa septembre 2005.
- [19] F. Amir et KH. Namaoui: “ étude du comportement d’un isolateur pollué soumis à une tension alternative” PFE Ingénieur, UAM Béjaïa, juin 2004.
- [20] M. Nemamcha, “Claquage des isolants”, haute tension 2001.
- [21] A. Chabloz, “Technologie des matériaux a l’usage de profession de l’électricité”, 1986.
- [22] A. Simuila, L. dascalescu et R. Tabazeon, “breackdown on ionized air gaps in the presence of spherical conductive particle” session 2143. 9<sup>th</sup> ISH, Graz 1995, pp. 1-4.
- [23] Wacker, “silicones pour applications haute et moyenne tension” [www.wacker.com](http://www.wacker.com).
- [24] S. Djafri, “pollution des isolateurs”. PFE Ingénieur, promotion 1982, ENP Alger.
- [25] Z. Ziari “Etude de l’effet d’un traitement par plasma froid sur les propriétés de surface d’un film de polymère” Thèse de doctorat, Université de Constantine (2008).
- [26] Descriptif Technique, “isolateurs composites au silicone silcosil”, [www.pfisterer.com](http://www.pfisterer.com).
- [27] L. Dumaine “Corrélation entre les propriétés physicochimiques de polymères permettant de moduler la prolifération cellulaire et celles permettant de favoriser le glissement de lentilles intraoculaire”, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon 2004.
- [28] Philippe Platteau, “Glass insulators in polluted environment: design, test, experiences and benchmarking with other materials”, Javier GARCIA Technical Manager SGD La Granja.
-

- [29] Nguyen Duc Hoang, “Etude des propriétés électriques des élastomères silicones utilisés pour l’isolation électrique”, Thèse Doctorale, UJ Fourier Grenoble 1, 28/11/ 2005.
- [30] M. Soufi, M. Zemirline, “Conception d’un modèle dynamique de contournement d’un isolateur pollué sous tension alternative 50 Hz”, PFE Ingénieur, Génie Electrique, ENP 2004.
- [31] S. Bouazabia, T. Chikhaoui, “Méthode d'essai sur des isolateurs pollués dans des conditions désertiques”, PFE Ingénieur, Génie Electrique, ENP 1988.
- [32] G. le Roy, C. Gary, “Les propriétés diélectriques de l’air et les très hautes tensions”, Eyrolles, Paris, 1984.
- [33] A. Cimador, S. Vitet, “La pollution des isolateurs”, EDF-Epure N°27, juillet 1990.
- [34] A. Bouarouri, R. Ladjal, “Comportement et caractérisation électrique d’un modèle d’isolateur sous tension alternative”, PFE Ingénieur, Génie Electrique, ENP 2006.
- [35] A. Tlidjane, R. Mekhalfia et H. Kebaili, “Etude Du Phénomène De Contournement Des Isolateurs Pollues Sous Tension Continue ”, PFE Ingénieur, Université de M’sila 2009/2010.
- [36] A. Mekhaldi, H. Boudjelthia, “Contribution à l’étude de la pollution des isolateurs de haute tension dans la région électrique de Annaba”, PFE Ingénieur, Génie Electrique, ENP 1984.
- [37] K. Amriche, S. Benayad, “Modélisation des principales caractéristiques d'un isolateur pollué sous tension continue”, PFE Ingénieur, Génie Electrique, USTHB 2004.
- [38] S. Guerfi, “Modélisation des isolateurs de haute tension pollués sous tension continue”, Mémoire de Magister, Génie Electrique, UAM Bejaia.
- [39] 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.
- [40] A. Mekhaldi, “Etude des phénomènes de conduction et de décharge électrique sur des surfaces isolantes polluées sous tension alternative 50 Hz”, Thèse de doctorat d’état, Génie Electrique, ENP, juin 1999.
- [41] F. V. Topalis, I. A. Stathopoulos, “Barrier effect on electrical breakdown air gaps: a theoretical approach”, International Symposium on High Voltage Engineering (9th ISH), session 2147, pp.1-4, Graz 1995.
- [42] A. J. Kaluzny, U. Kluzna, “Electric strength of high voltage insulating gap in polluted air”, Session 2155, 9<sup>th</sup> ISH, pp.1-3, Graz 1995.
-

- [43] M. Tegar, “Etude mathématique des mécanismes de développement des décharges électriques sur des isolateurs installés en régions polluées”, Mémoire Magister, Génie Electrique, ENP 1993.
- [44] 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.
- [45] 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.
- [46] CEI 60270-2, “Partial discharge measurement”, 2000.
- [47] Froehlich, “theory of dielectrics”, oxford Univ. press, 1949.
- [48] R. Boudissa, “Performance des écrans sous tensions alternative et continue”, CNHT 2009, Sidi Bel Abbés Algérie.
-

**Résumé :**

Le but principal de ce travail est basé sur l'étude de la performance d'une isolation en silicone mise sous tension alternative. Cette étude consiste à optimiser sa rigidité diélectrique longitudinale en présence de gouttes d'eau sur sa surface, par la variation du volume, la conductivité volumique des gouttes d'eau, la distance entre les gouttes le long de la largeur et de la ligne de fuite de l'isolation ainsi que l'angle d'inclinaison de cette dernière par rapport à l'horizontale. Les résultats obtenus sur les paramètres d'influence suscités peuvent être résumés comme suit:

La rigidité diélectrique longitudinale optimale de l'isolation est obtenue en absence de gouttes d'eau sur sa surface.

La rigidité diélectrique de l'isolation en silicone en présence de gouttes d'eau décroît rapidement avec l'élévation de la conductivité volumique de celle-ci pour atteindre une valeur minimale et constante au voisinage de 1 mS/cm. Le volume et le nombre de rangées de gouttes d'eau jouent un rôle très important sur la tension de contournement. Cette dernière est plus élevée lorsque le volume de gouttes recouvrant sa surface est de l'ordre de 20  $\mu$ l et le contraire est obtenu pour un volume égal à 45  $\mu$ l. De plus, le film est plus rigide lorsque l'espacement entre gouttes sur la largeur et la ligne de fuite est supérieur ou égale à 2 cm.

Pour un volume des gouttes d'eau de l'ordre de 45  $\mu$ l, l'angle d'inclinaison fait diminuer la tension de contournement jusqu'à atteindre une valeur limite minimale, au delà de laquelle l'isolation reprend pratiquement sa performance pour un angle égal à 90 °. Par contre sous l'action de petites gouttelettes de taille égale à 20  $\mu$ l, la tension de contournement décroît, mais sa plus faible valeur est obtenue pour un angle d'inclinaison égal à 90 °, puisque ces dernières adhèrent encore à sa surface mais s'allongent au maximum dans ce cas de figure.

**Mots Clés :** tension alternative, film en silicone et gouttes d'eau.