



**République Algérienne Démocratique et  
Populaire**

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

**Université Abderrahmane MIRA de Béjaïa  
Faculté de Technologie  
Département de Génie Electrique**

# **Mémoire de Fin de Cycle**

**Présenté par**

**M<sup>r</sup>. OURDANI Abdenour**

**En vue de l'obtention du Diplôme Master II en Génie Electrique**

**Option : Réseaux Electriques**

## **Thème**

**Performance d'une surface isolante hydrophobe  
en silicone recouverte de gouttes d'eau sous  
tension continue positive**

**Soutenu publiquement le 20/06/2013 devant le jury composé de :**

M <sup>r</sup> .	RAHMANI	Allaoua	MCB	Univ. Béjaïa	Président
M <sup>r</sup> .	SAHLI	Zahir	MCB	Univ. Béjaïa	Examineur
M <sup>r</sup> .	BOUDISSA	Rabah	MCA	Univ. Béjaïa	Rapporteur
M <sup>elle</sup>	BOUCHELGA	Fatma	Doctorante	Univ. Béjaïa	Invitée

---

## ***Remerciements***

---

Ce travail a été réalisé au Laboratoire de Haute Tension du département de Génie Electrique de l'Université A. MIRA de Bejaia sous la Direction Scientifique de Monsieur **R. BOUDISSA**, Maître de Conférences au sein de la même Université et Mademoiselle **F. BOUCHELGA**, future Doctorante. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma très sincère reconnaissance pour leurs précieuses directives, leur disponibilité, leurs fructueux conseils, leur suivi constant, leur courtoisie si raffinée et leurs qualités humaines.

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

Que les chercheurs et les techniciens du Laboratoire qui m'ont aidé soient assurés de mon amicale reconnaissance.

J'exprime ma gratitude envers Madame **F. BRADAI**, responsable au Labo Chimie Industriel, d'avoir confiance en moi et d'acceptée de me donner le dessiccateur le long de la préparation de mon mémoire.

Mes très vifs et sincères remerciements à tous mes amis (es), qui ont contribués (es) soit de près ou de loin, afin que mon travail s'achève.

Enfin, un grand merci à toute ma famille pour m'avoir soutenu tout au long de mes études jusqu'à ce mémoire qui en est le point final.

---

### ***Remerciements...personnels***

Après les remerciements traditionnels, néanmoins sincères, je tenais à faire cette rubrique personnelle et personnalisée pour rendre hommages aux gens qui ne se voient car ce sont ces gens qui ont contribué à mon épanouissement au cours de ces cinq années d'étude à l'Université. Ils ont compté pour moi d'une manière ou d'une autre. Ces anonymes sont souvent oubliés malgré le fait qu'ils apportent beaucoup de conseils, d'attention particulièrement dans les moments difficiles du boulot ou de la vie quotidienne, ou tout simplement un moment partagé autour d'un café à discuter et s'évader le temps d'un instant et d'oublier les tracasseries des études. Il est important pour moi de les remercier pour leur témoignage ma reconnaissance et ma sympathie.

Ma première pensée va pour mes potes Nacer, Idir, Amirouche, Azzedine, Farid, Djamel, Daoud, Omar, Hacem, Radouane, Djoudi,... Je veux les remercier pour leurs divers conseils notamment en informatique, en électronique, en électrotechnique, en physique et pour les discussions autour d'un café ou d'un thé qui pouvait avoir attrait à la Science.

## Sommaire

INTRODUCTION GENERALE.....	1
<i>Chapitre 01</i> .....	3
L'ETAT D'ART .....	3
1.1. Introduction .....	3
1.2. Y. Higashiyama, S. Yanase, et T. Sugimoto, 1998 [5].....	3
1.3. R. Omranipour, 2001 [6].....	4
1.4. N. M. Ijumba, A. C. Britten et J. P. Swartz, 2002 [7] .....	5
1.5. K. Karakoulidis, 2005 [8].....	6
1.6. H. Mekbel et M. Allaoua 2010 [10].....	7
1.7. G. P. Bruce & M. Rowland, 2010 [11] .....	8
1.8. C. Bär et autres, 2011 [12].....	10
1.9. V. V. Joseph & M. Joy Thomas, 2011 [13] .....	10
1.10. R. Boudissa et autres, 2013 [52].....	13
1.11. Conclusion .....	16
<i>Chapitre 02</i> .....	17
ISOLANTS ET DECHARGES.....	17
2.1. Introduction .....	17
2.2. Définitions.....	17
2.2.1. Isolants [15].....	17
2.2.2. Isoler .....	18
2.2.3. Isolation [15].....	18
2.2.4. Isolement .....	18
2.2.5. Diélectrique [14] .....	18
2.2.6. Les isolateurs .....	18
2.3. Les types des isolants utilisés dans l'industrie électrique.....	18
2.3.1. Isolants liquides .....	19
2.3.2. Isolants gazeux [14] .....	19
2.3.3. Les isolants solides .....	19
2.4. Propriétés des isolants diélectriques.....	28
2.4.1. Propriétés diélectriques.....	28
2.4.2. La résistivité [28] .....	28

2.4.3. La permittivité [28] .....	29
2.4.4. Le facteur de perte diélectrique [28].....	29
2.4.5. La rigidité diélectrique [28] .....	31
2.4.6. La résistance à l'arc.....	32
2.4.7. La température admissible.....	32
2.4.8. Décharge disruptive [31].....	32
2.4.9. Propriétés thermiques .....	34
2.4.10. Propriétés mécaniques .....	34
2.4.11. Propriétés chimiques .....	34
2.5. Vieillessement des isolants électriques [33, 34].....	34
2.6. Décharge dans l'air .....	36
2.6.1. Introduction .....	36
2.6.2. Décharge de type streamers [9] .....	36
2.6.3. Décharges de type leader [9] .....	38
2.7. Différents types d'amorçage des isolations gazeuses [9].....	39
2.7.1. Amorçage de l'air par avalanche primaire .....	39
2.7.2. Claquage de l'air par streamers .....	40
2.7.3. Disruption de l'air par leader.....	40
2.8. Conclusion .....	41
 <i>Chapitre 03</i> .....	 <b>42</b>
<b>POLLUTION</b> .....	<b>42</b>
3.1. Introduction .....	42
3.2. Définitions [35].....	42
3.2.1. Pollution .....	42
3.2.2. Salinité (Sa).....	43
3.2.3. Couche de pollution .....	43
3.3. Pollution des isolateurs .....	43
3.3.1. Formation et répartition de la couche de pollution.....	43
3.3.2. Sources de pollution.....	45
3.4. Conséquences de la pollution .....	46
3.5. Mesure de la sévérité d'un site.....	49
3.5.1. Classification des sites pollués.....	50
3.5.2. Méthodes de mesures de la sévérité d'un site .....	51
3.6. Méthodes d'essais sous pollution.....	52
3.6.1. Essais sous pollution naturelle .....	53
3.6.2. Essais sous pollution artificielle .....	53
3.7. Technique de lutte contre la pollution.....	54
3.7.1. Allongement de la ligne de fuite .....	54

---

3.7.2. Isolateurs plats.....	54
3.7.3. Graissage périodique .....	54
3.7.4. Revêtement silicone .....	55
3.7.5. Les isolateurs composites .....	55
3.7.6. Nettoyage des isolateurs .....	55
3.8. Conclusion .....	55
<i>Chapitre 04</i> .....	<i>57</i>
<b>PARTIE EXPERIMENTALE</b> .....	<b>57</b>
4.1. Introduction .....	57
4.2. Modèle expérimental et techniques de mesure .....	57
4.3. Dessiccateur .....	60
4.4. Correction des résultats de tension en fonction des conditions atmosphériques.....	61
4.5. Résultats et discussions.....	63
4.5.1. Propriétés diélectriques de l'isolation en silicone .....	63
4.5.2. Facteurs d'influence de la tension de contournement d'une surface en silicone hydrophobe .....	63
4.6. Conclusion .....	76
<b>CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES</b> .....	<b>78</b>

## Liste des figures

<b>Fig. 1. 1:</b> Installation expérimentale pour observer le mouvement d'une gouttelette d'eau.....	4
<b>Fig. 1. 2:</b> Composante principale d'un plan incliné .....	5
<b>Fig. 1. 3:</b> Arrangement des gouttes sur une surface polymère .....	7
<b>Fig. 1. 4:</b> Schéma électrique d'installation expérimentale polarité.....	8
<b>Fig. 1. 5:</b> Comparaison d'une dégradation de la silicone sous champ continu positif et négatif.....	9
<b>Fig. 1. 6:</b> Niveau d'érosion en fonction de la tension de claquage sous différentes polarités .....	10
<b>Fig. 1. 7:</b> Comparaison entre le champ AC et DC .....	10
<b>Fig. 1. 8:</b> Photographie démontrant (a) les aiguilles sur l'électrode haute tension et (b) l'image numérisée de la pellicule photographique après l'exposition à effet couronne.....	11
<b>Fig. 1. 9:</b> Dispositif expérimental utilisé pour générer l'effet couronne sous champ continu afin évaluer le vieillissement de la silicone .....	11
<b>Fig. 1. 10:</b> L'angle de contact de l'échantillon SR avant et après exposition à la couronne sous courant alternatif, des tensions continues positives et négatives pour 25 et 50 heures.....	12
<b>Fig. 1. 11:</b> Caractéristiques du système à barrière et les diverses orientations de l'axe de ses électrodes de base.....	14
<b>Fig. 1. 12:</b> Variantes de contamination des surfaces hydrophobes et hydrophiles de la barrière .....	15
<b>Fig. 1. 13:</b> $\hat{U}_d/d_a = f(\sigma_v)$ pour diverses orientations de la barrière recouverte complètement de gouttes d'eau .....	15
<b>Fig. 2. 1:</b> Verre de silice représentation schématique de la structure [19].....	20
<b>Fig. 2. 2:</b> Condensateur isolé au mica .....	22
<b>Fig. 2. 3:</b> Structure moléculaire de la bakélite .....	23
<b>Fig. 2. 4:</b> Isolateurs extérieurs en silicone.....	24
<b>Fig. 2. 5:</b> La liaison Si-O.....	24
<b>Fig. 2. 6:</b> Les différents motifs siloxaniques.....	25
<b>Fig. 2. 7:</b> Le polydiméthylsiloxane (PDMS), (a) structure chimique ; (b) représentation spatiale.....	25
<b>Fig. 2. 8:</b> Hydrophobicité d'une silicone .....	26
<b>Fig. 2. 9:</b> Echelle des résistivités de quelques matériaux utilisés en électrotechnique .....	29
<b>Fig. 2. 10:</b> Circuit équivalent parallèle représentant un diélectrique .....	30
<b>Fig. 2. 11:</b> Diagramme de Fresnel correspondant au schéma équivalent parallèle [29] .....	30
<b>Fig. 2. 12:</b> Circuit équivalent série représentant un diélectrique .....	31
<b>Fig. 2. 13:</b> Diagramme de Fresnel correspondant au schéma équivalent série .....	31
<b>Fig. 2. 14:</b> Isolant comportant une inclusion gazeuse .....	34
<b>Fig. 2. 15:</b> Schéma représentant le scénario standard du vieillissement [33, 34] .....	35
<b>Fig. 2. 16:</b> Vieillissement, dégradation et rupture d'un isolant en fonction des temps et des champs électriques auxquels ces mécanismes ont lieu [34] .....	35

<b>Fig. 2. 17:</b> Avalanche électronique dans un champ homogène ( $\varphi \neq 0$ ) .....	36
<b>Fig. 2. 18:</b> Développement d'un streamer.....	38
<b>Fig. 2. 19:</b> Développement d'un leader.....	38
<b>Fig. 2. 20:</b> Amorçage d'un intervalle d'air par avalanche primaire.....	39
<b>Fig. 2. 21:</b> Disruption d'un intervalle d'air par streamers.....	40
<b>Fig. 2. 22:</b> Amorçage d'un espace d'air par leader .....	41
<b>Fig. 3. 1:</b> Dépôt et évolution de l'agent polluant .....	47
<b>Fig. 3. 2:</b> Humidification du dépôt polluant et création d'un courant de fuite .....	48
<b>Fig. 3. 3:</b> Arc et bande sèche.....	49
<b>Fig. 3. 4:</b> Régime d'arcs sous pollution .....	49
<b>Fig. 3. 5:</b> Photo d'un conductimètre à sonde mobile .....	50
<b>Fig. 4. 1:</b> Schéma de mesure et de visualisation (a) des différentes positions des échantillons soumis aux tests (b) (SG : Appareil de Commande manuelle ou automatique du transformateur; $T_r$ : Transformateur BT/H; Cam: Caméscope numérique; PC: Ecran de PC; Oe: Objet d'essai) .....	58
<b>Fig. 4. 2:</b> Positionnement des gouttes sur le film en silicone et entre les électrodes .....	59
<b>Fig. 4. 3:</b> Différentes positions du dispositif.....	59
<b>Fig. 4. 4:</b> Appareil de mesure de conductivité volumique (Conductimètre).....	60
<b>Fig. 4. 5:</b> Photo montrant un dessiccateur.....	61
<b>Fig. 4. 6:</b> Transformation de l'humidité relative en humidité absolue.....	62
<b>Fig. 4. 7:</b> Facteur de correction ( $K_h$ ) en fonction de l'humidité absolue .....	62
<b>Fig. 4. 8:</b> $U_{dc+} = f(\sigma_v, N_r)$ d'une surface en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau ( $V_g = 45 \mu\text{l}$ ) .....	65
<b>Fig. 4. 9:</b> Circuit électrique des résistances équivalentes des gouttes d'eau et de l'air du système étudié.....	65
<b>Fig. 4. 10:</b> Couleur de lumière émise par la décharge pour $\alpha = 0^\circ$ , $\sigma_v = 7 \text{ mS/cm}$ et $\sigma_v = 180 \mu\text{S/cm}$ et $V_{g1} = 45 \mu\text{l}$ .....	66
<b>Fig. 4. 11:</b> $U_{dc+} = f(N_r, a_r, d_g, d_{g\text{él}})$ d'une surface en silicone hydrophobe horizontale ( $V_g = 45 \mu\text{l}$ , $d = 6 \text{ cm}$ ) .....	67
<b>Fig. 4. 12:</b> $U_{dc+} = f(N_r, a_r, d_g, d_{g\text{él}})$ d'une surface en silicone hydrophobe horizontale ( $V_g = 20 \mu\text{l}$ , $d = 6 \text{ cm}$ ) .....	68
<b>Fig. 4. 13:</b> $U_{dc+} = f(V_g, N_r)$ d'une surface en silicone hydrophobe .....	69
<b>Fig. 4. 14:</b> $U_{dc+} = f(\alpha)$ d'une surface en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau.....	70
<b>Fig. 4. 15:</b> Différentes phases de contournement de la surface isolante pour $\alpha_c = 29,27^\circ$ , $N_r = 5$ , $V_g = 45 \mu\text{l}$ et $\sigma_v = 180 \mu\text{S/cm}$ ( $\alpha_c$ : Angle critique correspondant à la tension de contournement) .....	71
<b>Fig. 4. 16:</b> $U_{dc+} = f(\alpha, V_g)$ d'une isolation en silicone hydrophobe.....	72
<b>Fig. 4. 17:</b> Contournement d'une surface en silicone recouverte de petites gouttes ( $V_g = 20\mu\text{l}$ , $\alpha = 90^\circ$ ).....	73

- 
- Fig. 4. 18:** Contournement d'une surface en silicone recouverte de grosses gouttes ( $V_g = 45\mu\text{l}$ ,  $\alpha = 90^\circ$ ) .....73
- Fig. 4. 19:**  $U_{dc+} = f(A_r)$  des gouttes d'eau à volume différents sur une surface en silicone hydrophobe ( $\alpha_c = 29,27^\circ$ ) .....74
- Fig. 4. 20:** Combinaison de plusieurs arrangements de gouttes d'eau mixtes à volume variable .....75

## *Liste des tableaux*

---

---

<b>Tab. 2. 1:</b> Propriétés et Avantages des silicones pour les applications MT et HT.....	27
<b>Tab. 4. 1:</b> Valeurs de quelques paramètres électriques de l'isolation en silicone .....	63

# INTRODUCTION GENERALE

---

En revenant sur l'historique des isolateurs on trouve le verre l'un des premiers isolateurs utiliser pour isoler les systèmes électriques, la céramique (dérivés de stéatite par exemple), grâce à la recherche scientifique intensive du XXe siècle c'est à dire dès la fin des années 1900 apparition des matériaux synthétiques. La première résine synthétique, la bakélite (résine phénolique qui durcit sous l'effet de la pression et de la chaleur), puis il y'a environ 40 ans d'existences de la silicone (dérivés de la silice « sable »), présentent de nombreuses propriétés : une bonne stabilité thermique (entre  $-80^{\circ}\text{C}$  et  $250^{\circ}\text{C}$ ), de très bonnes propriétés hydrophobes, une bonne tenue au feu sans dégagement toxique, des propriétés lubrifiantes et adoucissantes, et une très bonne inertie chimique. L'attractivité de ces propriétés couplée à la possibilité de disposer de produits silicones sous différentes formes (huiles, résines, élastomères, gels...) a fait que ces polymères se rencontrent dans pratiquement tous les secteurs de l'industrie (médical, bâtiment, imprimerie, agroalimentaire, génie électrique...). Une synthèse de ces propriétés et des applications utilisant les silicones est proposée par L.Carette et J.M.Pouchol [1].

Les installations électriques ont des durées de vies moyennes estimées à une trentaine d'années. Un bon nombre de ces installations arrivent aujourd'hui à leur terme. Parmi les défauts rencontrés dans les lignes de transports d'énergie électrique des dispositifs électriques haute-tension, le claquage des isolants servant à isoler entre elles les parties conductrices en contact avec l'isolant est un problème réel. Le remplacement des installations existantes dans un futur proche (échelle de 10 à 20 ans) s'accompagne aujourd'hui d'études prospectives sur de nouveaux matériaux. Ces matériaux tendent à remplacer de plus en plus les isolateurs en porcelaine ou en verre, on considère que les élastomères silicones sont matures depuis le début des années 1990 pour les applications alléguées auparavant.

Cet engouement (passion) logique de la communauté scientifique concernant les propriétés en surface d'élastomères silicones pour l'isolation extérieure haute tension permet, certes, de disposer d'une bibliographie bien fournie sur la tension alternative ou impulsionnelle afin d'apporter la prouesse technique et l'efficacité d'un système d'isolation à champ non uniforme avec isolant propre et /ou pollué, mis sous tension alternative ou impulsionnelle.

Cependant, peu de recherches ont été effectuées sur des systèmes à champ non uniforme avec isolant propre ou pollué mis sous tension continue.

On peut citer quelques facteurs influençant la tension disruptive d'un isolant réel ; les

paramètres géométriques et électriques de l'isolant, la forme et les dimensions des électrodes de base du système d'insertion.

Les isolateurs polymères sont idéals pour les applications extérieures en raison de leur performance supérieure dans des conditions humides et polluées. Leur hydrophobicité de surface ne permet pas la formation d'un film d'eau en réduisant ainsi les fuites de courant et donc la perte de puissance. Également par rapport à la porcelaine, leur légèreté les rend plus facile pour le montage et la mise en service. Ceci est particulièrement avantageux pour la transmission à courant continu où le niveau de contamination devrait être plus élevé en raison de contraintes unidirectionnelles sur l'isolant. Mais la tendance à perdre son caractère hydrophobe sous-exposition à des contraintes électriques dans un environnement pollué, en cas d'exposition au champ continu positive, et le manque d'expérience de service est un sujet de préoccupation.

L'étude faite dans le présent mémoire se fixe pour objectif de comprendre le comportement de la goutte d'eau sur la surface d'un matériau isolant en silicone sous un champ électrique de polarité positive. Notre manuscrit est composé de quatre chapitres :

Le premier chapitre sera pour nous l'occasion d'évoquer des investigations essentielles qui sont faites sur la performance d'une surface isolante hydrophobe recouverte de gouttes d'eau sous tension continue positive (HVDC +), effectuées par différents chercheurs qui seront passées en revue.

Dans le second chapitre nous essayons de brosser un tableau aussi exhaustif que possible des matériaux isolants solides mis en œuvre dans le domaine de l'ingénierie électrotechnique, et sur les mécanismes de formation d'une décharge électrique.

Le troisième chapitre, quant à lui est d'exposer d'une vue générale les principales sources de pollution pouvant être rencontrées là où il y a des isolants et isolateurs électriques.

Le peu de travaux théoriques, expérimentaux et numériques qui ont été menés au cours des dernières décennies sur la performance d'une surface isolante hydrophobe recouverte de gouttes d'eau sous tension continue positive (HVDC +) ne permettent pas une meilleure compréhension du mouvement des gouttes comment peuvent-elles influencer sur la tension de contournement intervenant sur la surface d'un isolant en silicone. C'est cela qui nous a amené à dédier le quatrième chapitre qui sera consacré à l'étude expérimentale. Nous étudierons le comportement des gouttes d'eaux sous une tension de polarité positive sous différentes positions.

Nous finirons notre travail par une conclusion générale où seront rassemblés nos divers résultats. Nous y donnerons également les perspectives ouvertes par ce travail.

---

# Chapitre 01

## L'ETAT D'ART

---

### 1.1. Introduction

Aujourd'hui plusieurs pays se focalisent sur le transport de l'énergie électrique en courant continu tels (l'Allemagne, le Canada, la Chine, USA...) afin de réduire les pertes d'énergie et de s'emparer de l'énergie réactive. Pour cela les chercheurs et les fabricants de matériels électriques ont doublé les efforts pour faire face au risque de claquage des matériaux destinés à l'isolation électrique.

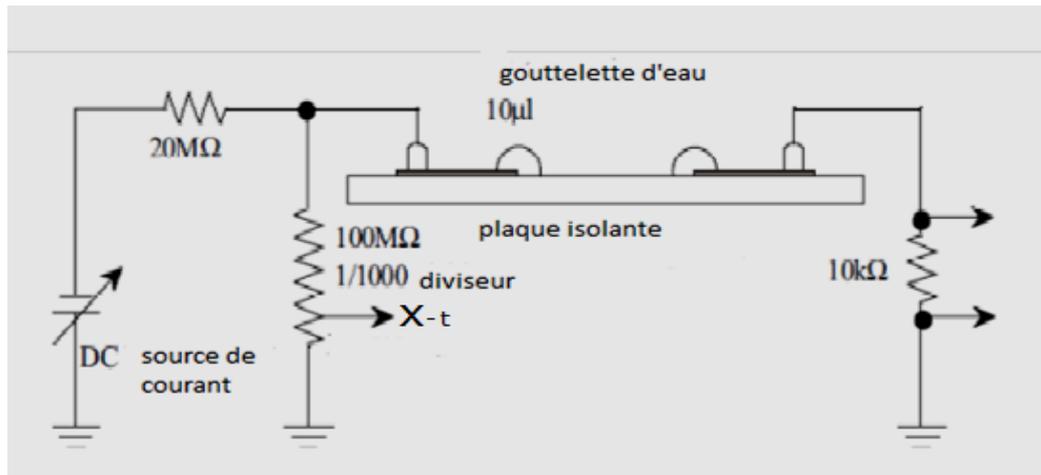
De plus en plus de matériaux polymères sont utilisées pour la fabrication des installations électriques à fonction isolante. Le choix de ces matériaux est souvent conditionné par une utilisation interne ou externe de l'appareillage. A titre d'exemple, les silicones sont employés pour des appareils à usage externe en raison du caractère hydrophobe de leur surface qui permet de maintenir un niveau de courant de fuite très bas [2, 3, 4].

Face au manque d'informations sur le comportement des gouttes d'eaux sur la surface de ces matériaux sous champ continu positif, quelques travaux sont réalisés afin de comprendre leur vieillissement ainsi que leurs mécanismes de dégradation.

Dans ce qui suit, des investigations essentielles sur la performance d'une surface isolante hydrophobe recouverte de gouttes d'eau sous tension continue positive (HVDC +), effectuées par différents chercheurs, seront passées en revue.

### 1.2. Y. Higashiyama, S. Yanase, et T. Sugimoto, 1998 [5]

Les auteurs ont étudié le comportement des gouttelettes d'eau situées entre deux électrodes en aluminium. Ces dernières ont été placées sur la surface d'un isolant polymère hydrophobe sous champ continu. Trois matériaux ont été étudiés tels que poly-tétra-fluor-éthylène (PTFE), le caoutchouc de silicone (SR), et Ethylène Propylène Diène Mytilène (EPDM). Chaque échantillon est de taille environ 100 mm x 100 mm, et 6 à 8 mm d'épaisseur. Afin de comprendre les phénomènes de décharge se produisant sur la surface de l'isolant du polymère recouvert de goutte d'eau, il est nécessaire de clarifier le comportement des gouttelettes individuelles ou bien de deux gouttes dans le cadre du champ électrique. Comme le montre la figure 1.1, la tension continue est appliquée à l'une des électrodes et l'autre est mise à la terre.



**Fig. 1. 1:** Installation expérimentale pour observer le mouvement d'une gouttelette d'eau

La tension continue appliquée entre les électrodes a été augmentée à une vitesse de  $0,5\text{ kV/s}$  jusqu'à ce qu'une modification de la forme d'une goutte d'eau soit apparue. La décharge ou un courant de fuite et la tension appliquée sont enregistrés avec un enregistreur X-t et un oscilloscope. Les mouvements des gouttelettes ont été pris avec un appareil photo magnétoscope ou le cas échéant d'une caméra à grande vitesse de 2250 images par seconde.

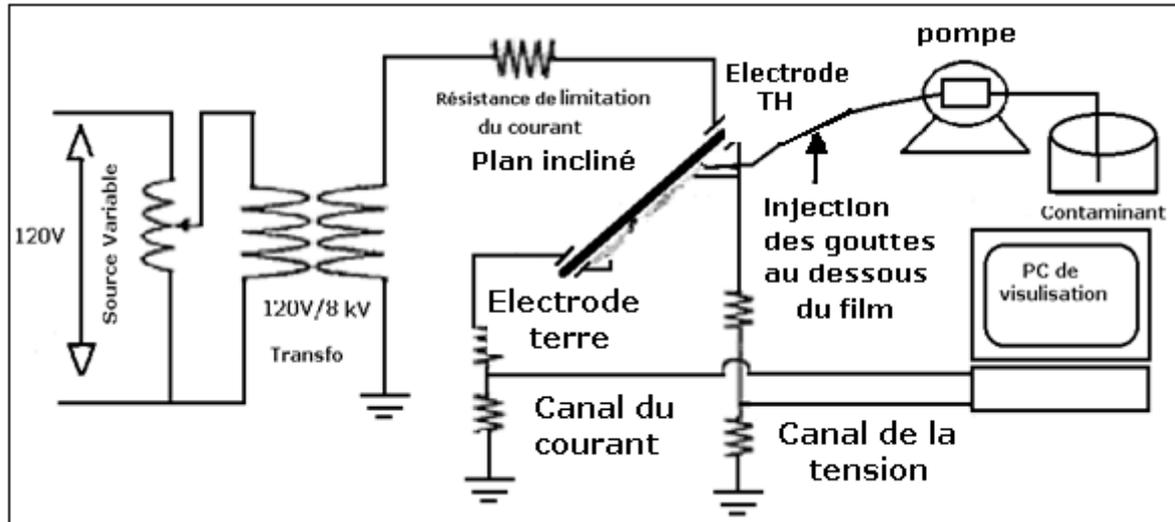
Ils ont pu conclure qu'une gouttelette unique mise en contact avec l'électrode sur la plaque de SR ou EPDM a été allongée et un filament d'eau s'étendant le long de la surface par la force électrostatique. Tandis que celle placée à la bordure de l'électrode sur la plaquette PTFE est déformée et forme un cône de demi-niveau d'une jonction triple. L'angle de contact apparent varié dans le temps pour une tension constante appliquée et certaines quantités de charge ont été émises par une micro décharge ou par éjection de gouttelettes. Le comportement des gouttelettes sous champ continu dépend fortement non seulement de l'hydrophobie, mais aussi de la propriété de surface d'une plaque isolante. Lorsque le courant de fuite s'écoule sur la surface de la silicone la décharge produite est petite. Une certaine quantité de charges a été émise par une décharge électrique ou de rupture dans une petite fraction d'une gouttelette d'eau.

La dépendance de la polarité peut s'expliquer par l'effet de la polarité de la décharge couronne se produisant à la pointe de la goutte d'eau. La tension de début de la décharge couronne négative en un point de la plaque d'électrode est inférieure à celle de la décharge couronne positive.

### 1.3. R. Omranipour, 2001 [6]

L'auteur a pris six échantillons en caoutchouc de silicone, deux charges sont ajoutées pour

ce dernier, Tri hydrate d'alumine (ATH) et de la silice, afin d'améliorer le suivi de la résistance à l'érosion (améliorer leur résistance thermique à la chaleur qui est dissipée pendant un arc sur la bande sèche). La configuration de test a été réalisée comme le montre la figure 1.2 :



**Fig. 1. 2:** Composante principale d'un plan incliné

Le courant de fuite d'un échantillon est généralement la seule donnée qui est surveillée pendant le test. L'auteur a démontré qu'il existe une corrélation entre la puissance et le volume érodé ou la perte de poids du matériau. Cette corrélation peut exister entre la puissance totale ou puissance fondamentale et le volume érodé ou la perte de poids. Les composantes des courants harmoniques traversant la surface du matériau faisant chauffer cette dernière. Bien que cette corrélation n'ait été trouvée pour être cohérente, des exceptions parmi les échantillons ont eu lieu et sont pensées pour être dues à la variation de la condition de test pour chaque échantillon. La façon dont les processus de mélange et de dégazage ont été faits peut également jouer un rôle.

#### **1.4. N. M. Ijumba, A. C. Britten et J. P. Swartz, 2002 [7]**

Les chercheurs ont pu modéliser et simuler un isolateur de ligne grâce à un logiciel Quicfield-TM qui utilise la méthode des éléments finis pour le calcul du champ électrique. La tension a été choisie de manière à obtenir un champ électrique moyen de 2 kV / cm, ce qui est similaire à celle d'un isolateur de ligne. Le travail des chercheurs consiste à déterminer le facteur de perte d'hydrophobicité de la silicone, la goutte d'eau a été modélisée entre deux électrodes planes, soumise à un champ électrique constant de polarité positive ou négative. La

permittivité électrique de chaque matière doit être introduite dans le modèle pour tenir compte des effets de bord. Les permittivités relatives des matériaux utilisés étaient : l'eau pure (80) ; La silicone (3,45) ; les fibres de Verre (4). Ce dernier c'est pour renforcer la tenue thermique qui se produit à la surface de la silicone.

N.M. Ijumba, A.C. Britten & J.P. Swartz ont étudié l'effet de la couronne des gouttelettes d'eau et de la perte d'hydrophobicité des isolateurs en silicone sous un potentiel élevé (HVDC). L'eau a tendance à former des gouttelettes sur la surface hydrophobe. Un angle appelé angle de contact peut être mesuré quand une goutte d'un liquide entre en contact avec une surface du solide. Cet angle de contact est une mesure de la mouillabilité de la surface. Une surface est dite mouillable lorsque l'angle de contact que fait le liquide avec la surface est égal ou inférieure à  $30^\circ$ . La Surface est dite partiellement mouillable si l'angle de contact est compris entre  $30^\circ$  et  $89^\circ$ .

Les chercheurs ont pu conclure que l'intensification du champ causée par la goutte conduit à une décharge couronne et c'est ce qui provoque la perte temporaire de l'hydrophobie sur la surface de l'isolateur en silicone. L'intensification du champ est due à la forme sphérique de la goutte, sa taille et sa forte permittivité relative. L'effet couronne provoque une série continue de petites d'ondes de tension sur la polarité positive, l'activité couronne a été supprimée par la charge d'espace positive après une certaine période de temps. La charge d'espace positive mise en place en raison de la faible mobilité des ions lourds positifs formés dans le processus d'ionisation. La charge d'espace négative ne s'accumule pas de manière aussi efficace que la charge négative est constituée de petits électrons très mobiles. Les électrons sont accélérés rapidement sur la surface de l'isolant sous l'influence du champ électrique. En l'absence de charges d'espace, l'activité couronne peut se produire sur une base continue. Les longues périodes d'exposition de la silicone à l'effet couronne sous une tension continue de polarité négative ne doit pas provoquer de perte d'hydrophobie.

#### **1.5. K. Karakoulidis, 2005 [8]**

Les auteurs ont étudié le comportement des gouttelettes d'eau sur une surface polymère sous un champ alternatif. Ils ont choisi des arrangements des gouttes de 1, 2, 3, 5 et 9. 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 1.3.



**Fig. 1. 3:** Arrangement des gouttes sur une surface polymère

Les auteurs ont pris en compte certains paramètres fondamentaux influençant le comportement des gouttelettes d'eau sur les surfaces polymères, à savoir, la conductivité des gouttelettes d'eau, la rugosité de la surface du polymère, le volume des gouttelettes et leur positionnement par rapport aux électrodes. Un arrangement d'électrodes uniforme a été utilisé.

Ils ont pu conclure que l'augmentation de la conductivité entraîne une diminution de la tension de contournement et cette conclusion est généralement valable, indépendamment du matériau utilisé. La rugosité de surface influe de façon positive sur la tension de contournement lorsque le nombre de gouttelettes est grand.

#### **1.6. H. Mekbel et M. Allaoua 2010 [10]**

L'étude a été réalisée sur un système pointe-barrière-plan (axe horizontal de la configuration) sous tension continue positive. Comme paramètres essentiels d'influence de la tension disruptive de l'intervalle d'air du système à champ électrique non uniforme, ont été pris en considération, la position, l'état de la surface et l'isolement de l'écran.

Les résultats émanant de cette étude peuvent être résumés de la façon suivante:

La valeur maximale de la rigidité du système est obtenue quand la barrière, de largeur égale à 25 cm, est en contact avec la pointe sous tension ( $a/d = 0\%$ ).

La décharge évoluant dans l'espace d'air du système à écran propre et sec est de type streamers positifs quels que soient l'isolement et la position de la barrière. Par contre si l'écran est pollué, la décharge est de type leader quelle que soit la conductivité volumique de la solution polluante, supérieure à 5mS/cm.

La tension de rupture d'un système avec barrière isolante augmente avec la distance d'isolement dans l'air de celle-ci par rapport à la terre pour devenir constante à partir d'une certaine hauteur limite. De plus elle croît avec l'élévation de la résistance insérée entre le bord d'un écran conducteur et la terre.

La rigidité diélectrique du système avec barrière polluée décroît rapidement avec l'élévation de la conductivité volumique pour devenir minimale et constante à partir d'une certaine valeur limite de celle-ci.

Pour une conductivité volumique supérieure à 20mS/cm, l'efficacité d'un écran uniformément pollué est à sa valeur minimale. Elle est confondue avec celle d'une barrière métallique isolée et pulvérisée à l'eau de robinet.

### 1.7. G. P. Bruce & M. Rowland, 2010 [11]

G. P. Bruce & M. Rowland ont pris un dispositif illustré par La figure 1.4. Celui-ci conforme à la norme CEI-60587, à l'exception qu'une source d'alimentation à courant continu variable a été prise. Celui-ci fournit trois niveaux de tension (2,3, 2,7 et 3,2 kV) pour les deux polarités. Cette dernière peut être changée par inversion de l'orientation des diodes. Le courant continu est généré en utilisant une seule phase du redresseur en pont complet, et le lissage est fournie par un condensateur 81  $\mu$ F.

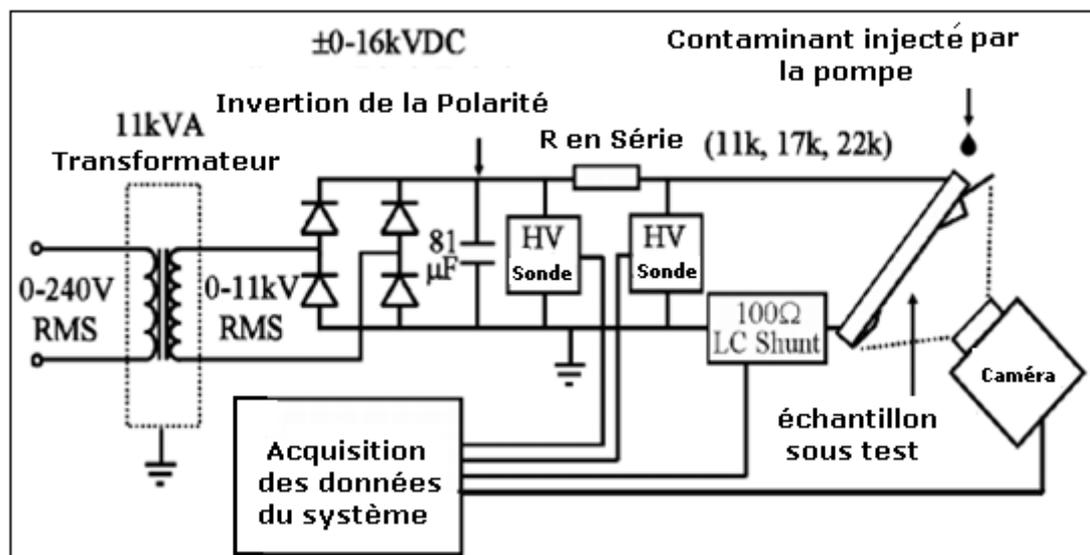
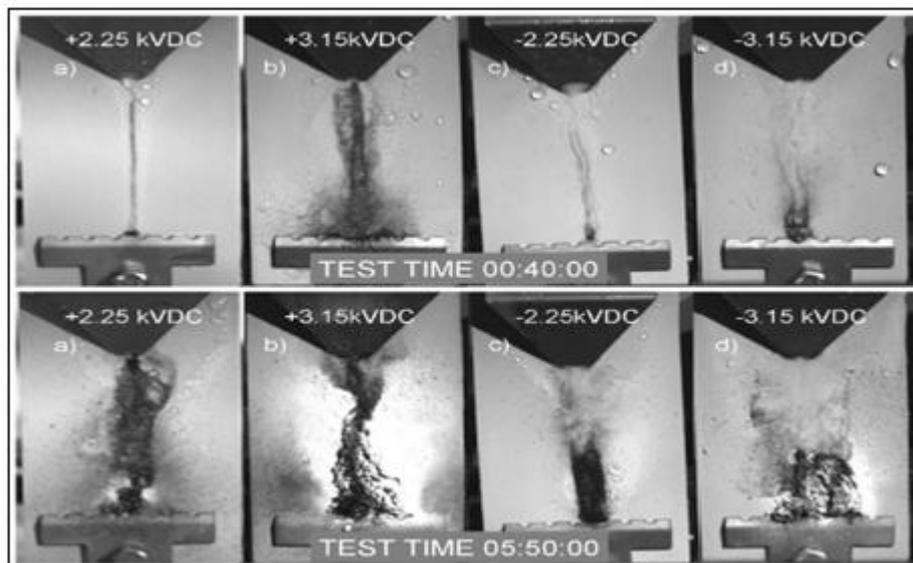


Fig. 1. 4: Schéma électrique d'installation expérimentale polarité

Ce système donne la possibilité d'analyser les performances électriques des différents matériaux, et trois formulations différentes de silicones (SR) produits commercialement ont été testées. Matériaux B et C sont actuellement utilisés comme isolation extérieure haute tension à courant alternatif HVAC. Mais par contre le matériau A est prévu de recueillir moins de charges à la surface, c'est-à-dire il permet d'augmenter l'uniformité du champ électrique à courant continu, et d'être plus adapté aux applications à l'isolation extérieure haute tension à courant continu HVDC. L'échantillon sous test diélectrique est placé sur un

angle de 45 degrés et un contaminant fabriqué à partir de l'eau dé-ionisée, s'écoule vers le bas sur la face inférieure de l'échantillon entre les deux électrodes, comme indiqué en figure 1.4. Le liquide émerge d'un trou dans la plume d'électrode supérieure et l'électrode inférieure comporte une série de dents pour permettre le passage des contaminants sans un effet de barrage. Le contaminant selon la norme CEI 60587 présente une conductivité de  $2532 \mu S / cm$ . Une tension est appliquée à l'électrode supérieure à partir de laquelle émerge le contaminant. Des débits de 150, 225 et 300  $\mu l / min$  sont utilisés respectivement pour 2,25, 2,7 et 3,15 kV en courant continu, sont conformes à ceux données dans la norme CEI 60587.

Les auteurs ont observé que la dégradation de surface isolante est fortement dépendante de la polarité. L'érosion de la surface commence toujours à l'électrode inférieure, et s'étend vers l'électrode supérieure comme le confirme la figure 1.5.



**Fig. 1. 5:** Comparaison d'une dégradation de la silicone sous champ continu positif et négatif

Après 40 minutes, tous les échantillons présentés sont endommagés en raison de décharges superficielles. Les dommages à 3,15 kV en courant continu sont plus répandus que la mince ligne qui est développée dans le cadre du courant continu à 2,25 kV. Même à ce stade précoce dans un test des modèles de dommages au titre de chaque polarité sont différents. Dans des tests positifs a et b, une ligne continue, plane et solide hydrophile est formée entre les électrodes, tandis que, dans les cas négatifs c et d, la piste est plus importante à la moitié inférieure de l'échantillon. A -2.25 kV une mousse se forme autour de la pointe de l'électrode négative, ce qui explique qu'il y a un dégagement de chaleur par effet Joule. L'énergie thermique est maximale à la surface de la silicone, lors d'un dégagement d'un arc superficielle, Il en résulte une perte de masse de l'échantillon.

### 1.8. C. Bär et autres, 2011 [12]

Les auteurs ont fait une étude comparative du phénomène hydrodynamique des gouttelettes d'eau sur un plan incliné, pour des matériaux isolants à partir d'élastomères de silicones. Ils ont pu conclure que des amplitudes de tension de rupture sont très élevées en courant continu qu'en courant alternatif comme le confirme la figure 1.6.

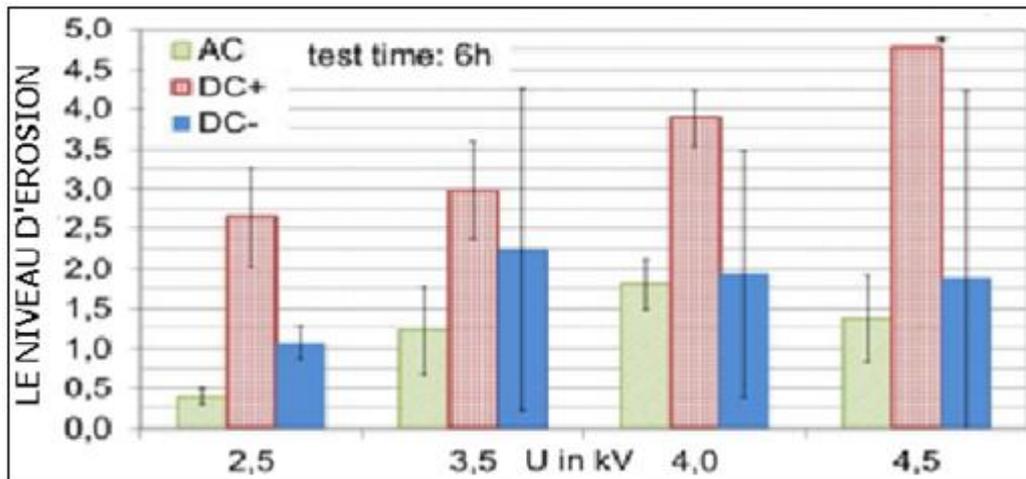


Fig. 1. 6: Niveau d'érosion en fonction de la tension de claquage sous différentes polarités

Ce phénomène est dû à la forte vibration des gouttelettes d'eau en courant alternatif qu'en courant continu. Car la goutte prend moins temps en AC et de tomber du haut vers le bas que celle du DC. Cette dernière se transforme en filet d'eau qui est poursuivi d'un courant de fuite. L'allongement et la formation de résidus électrolytes entraîne une augmentation supplémentaire de l'intensité du champ électrique et peut éventuellement conduire à un effet de polarité pour le maintien de l'hydrophobie. La figure 1.7. Illustre la déformation des gouttelettes d'eau.

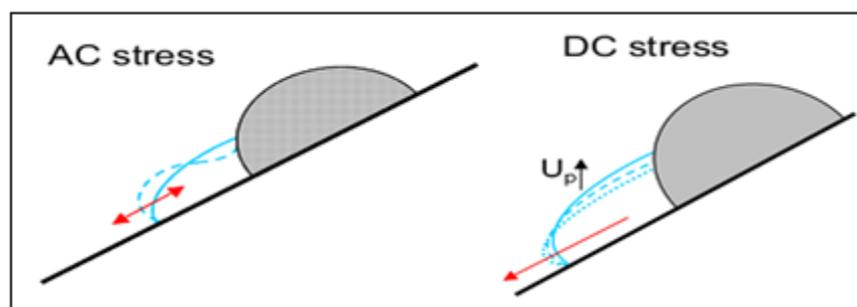
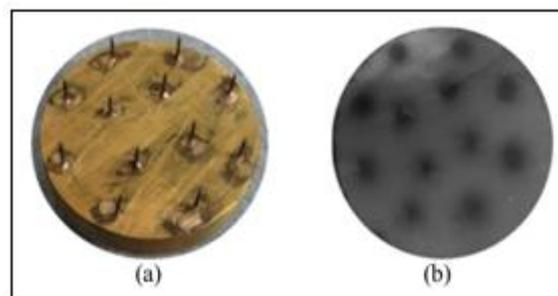


Fig. 1. 7: Comparaison entre le champ AC et DC

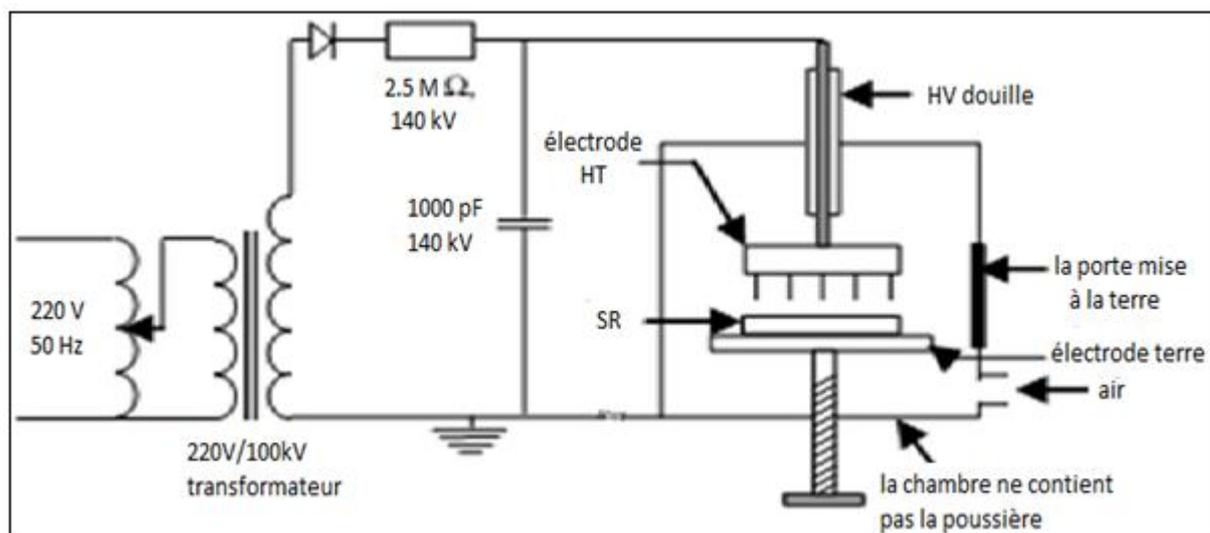
### 1.9. V. V. Joseph & M. Joy Thomas, 2011 [13]

L'effet couronne sur les isolateurs de lignes de transmission se produit principalement en

raison de mauvaise conception du matériel ou en de formation de gouttelettes d'eau sur la surface des isolateurs. Les gouttes utilisées étaient de  $8 \mu\text{l}$ . La dégradation de ces matériaux tels la silicone due à l'effet couronne est un problème majeur. C'est pour cela les auteurs ont pris un système d'électrodes multiples aiguille-plan pour générer l'effet couronne comme le montre la figure 1.8.



**Fig. 1. 8:** Photographie démontrant (a) les aiguilles sur l'électrode haute tension et (b) l'image numérisée de la pellicule photographique après l'exposition à effet couronne



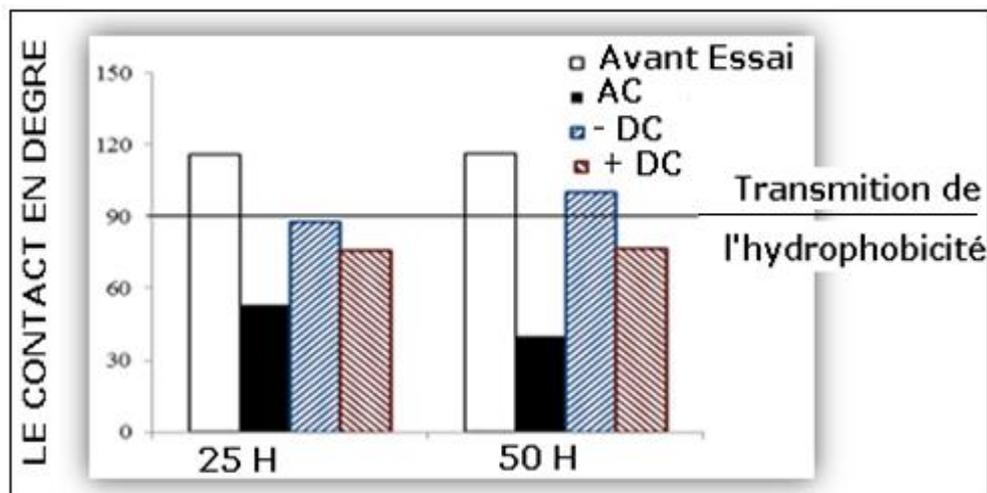
**Fig. 1. 9:** Dispositif expérimental utilisé pour générer l'effet couronne sous champ continu afin évaluer le vieillissement de la silicone

Pour mieux comprendre les travaux de ces auteurs, la figure 1.9 montre le dispositif expérimental utilisé pour évaluer le vieillissement de la silicone sous champ continu (positif et négatif). Un espace de 5 mm est maintenu entre la pointe de l'aiguille et la surface de l'échantillon, avec une tension de 7,5 kV pour l'alternative et 11 kV pour le continu. Cette dernière a été choisie de façon à correspondre à la crête de la tension alternative.

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

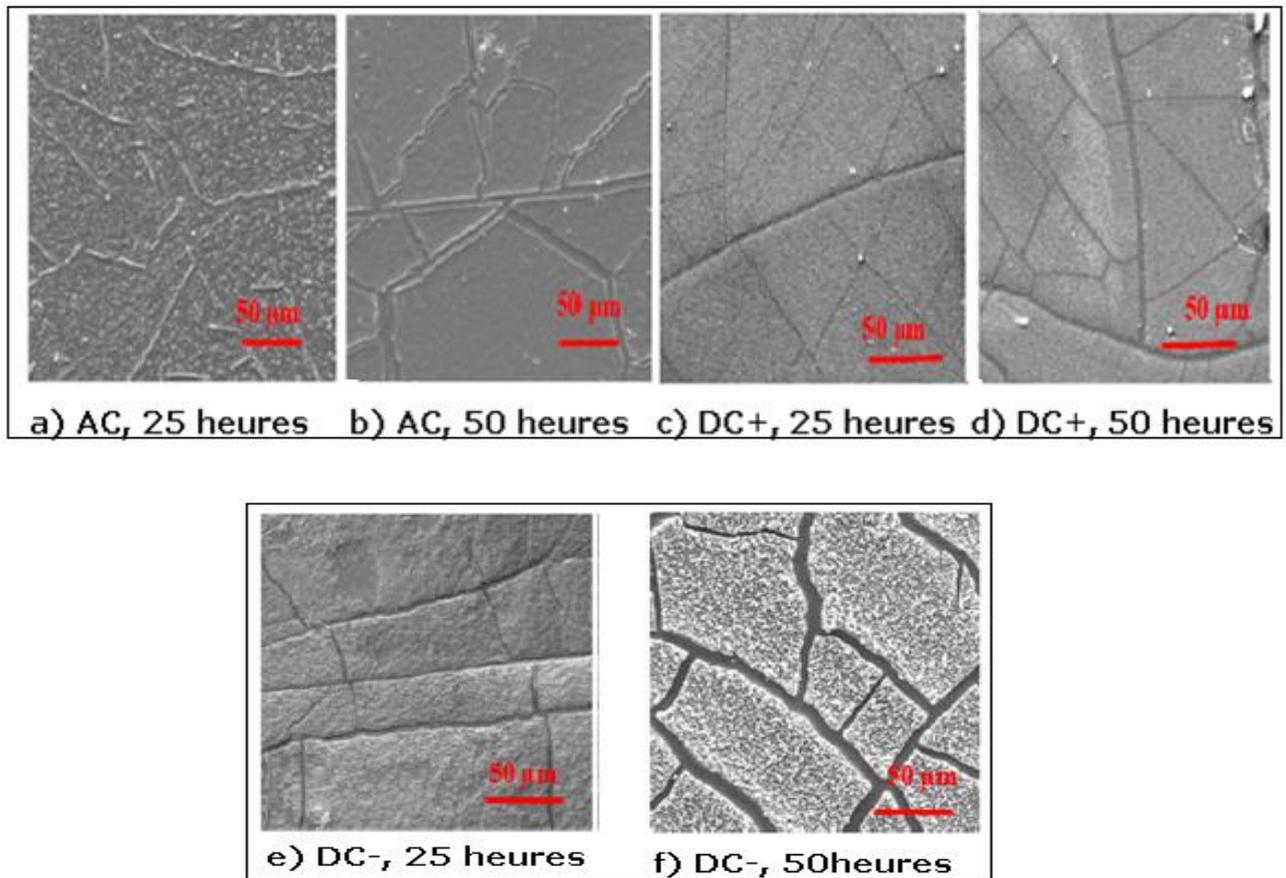
Ils ont pu conclure que tous les échantillons deviennent hydrophiles après exposition à la couronne, à l'exception des échantillons testés sous la polarité positive pour les 50 heures comme le confirme la figure 1.10.

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



**Fig. 1. 10:** L'angle de contact de l'échantillon SR avant et après exposition à la couronne sous courant alternatif, des tensions continues positives et négatives pour 25 et 50 heures

Grace au MEB un autre phénomène intéressant a été observé, la décroissance de la surface (fissure) des échantillons testés sous champ continu positif a été plus lente par rapport aux échantillons testés sous champ continu négatif et alternatif comme le montrent les photos suivantes.

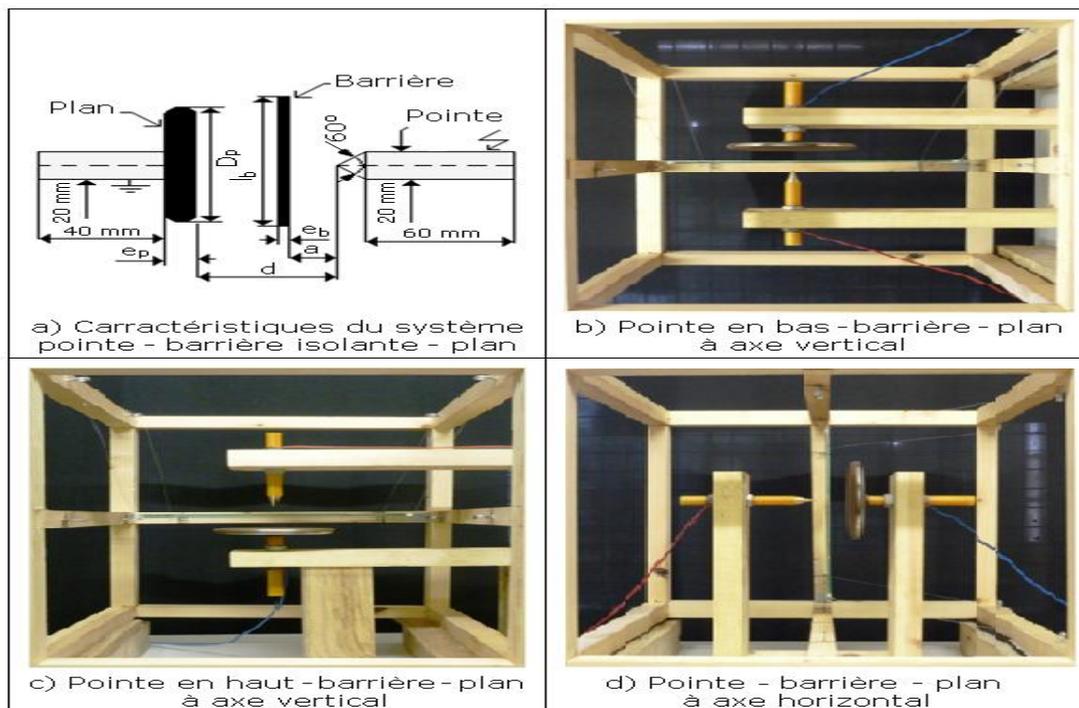


### 1.10. R. Boudissa et autres, 2013 [52]

R. Boudissa et les deux autres auteurs ont pris un modèle expérimental, illustré par la figure 1.11, est composé de deux supports en bois, l'un en forme de U contenant le système d'électrodes pointe-plan et un autre de forme cubique, sur lequel est fixée la barrière. Les deux supports ne sont pas solidaires pour des raisons de variation de l'orientation de l'axe des électrodes de base du système et la position de l'écran dans l'intervalle d'air interélectrode.

L'électrode haute tension est constituée d'une tige cylindrique en fer de 20 mm de diamètre et de 150 mm de longueur. Celle-ci est terminée par une pointe conique en bronze ayant un angle de  $60^\circ$  et 1 mm de rayon de courbure. L'électrode à la terre est constituée d'un disque en acier de 10 mm d'épaisseur, de 15 cm de diamètre et 0.4 cm de rayon de courbure ( $r_c$ ). Sur celle-ci est vissée une tige cylindrique en acier de 20 mm de diamètre et de 150 mm de longueur. Les deux électrodes sont fixées sur deux faces opposées du support en U.

La barrière utilisée est en silicone, de forme carrée de 5mm d'épaisseur et de 30 cm de largeur.



**Fig. 1. 11:** Caractéristiques du système à barrière et les diverses orientations de l'axe de ses électrodes de base

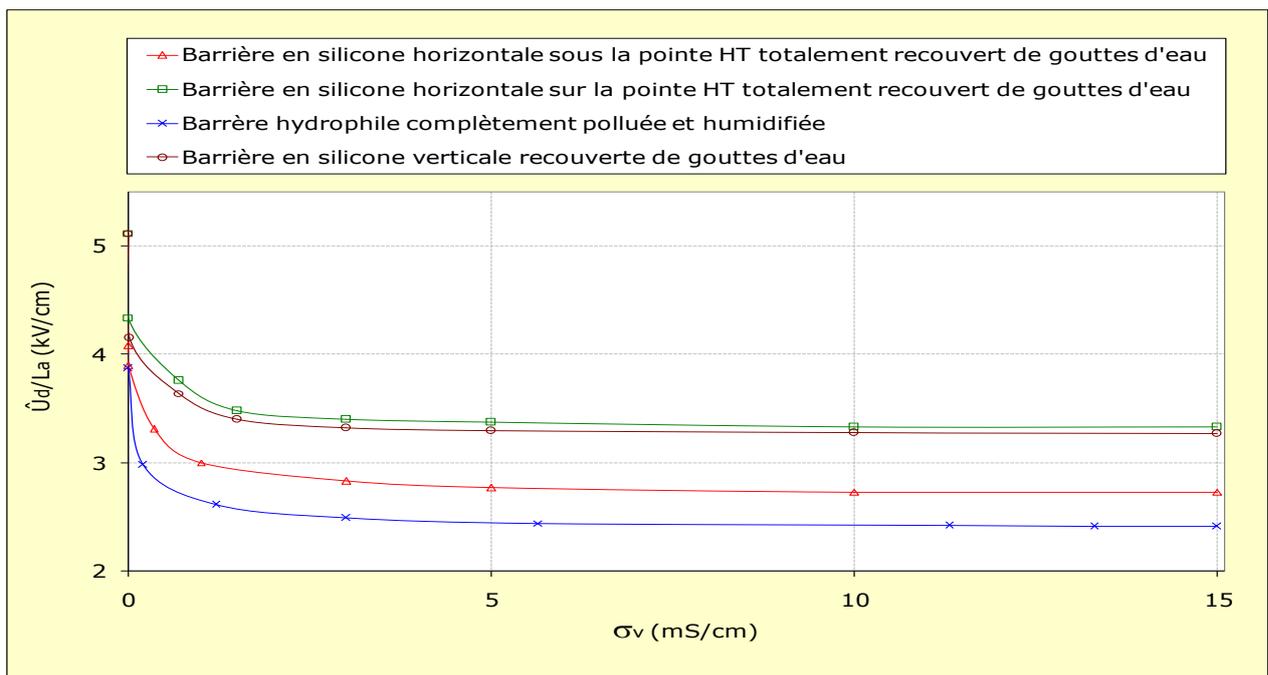
La solution à pulvériser, comprend du sel et soit de l'eau distillée pour de faibles conductivités ou de robinet pour celles élevées. L'apport des gouttes d'eau sur la surface de la barrière hydrophobe est réalisé au moyen d'un pulvérisateur à gouttelettes d'eau très fines. Le volume de ces gouttelettes peut être augmenté en répétant la pulvérisation plusieurs fois sur la même surface jusqu'à atteindre la taille recherchée. Par exemple, la pulvérisation d'une barrière en position verticale doit être arrêtée juste avant leur écoulement sous l'effet de leur poids. Le volume des gouttes d'eau déposées sur la barrière varie entre 10 et 40  $\mu\text{l}$ . Le deuxième type de solution est composé d'un mélange d'eau distillée ou de robinet, 20 g de kaolin/l d'eau et du chlorure de sodium dont la proportion est déterminée selon la conductivité volumique désirée.

Trois types de configurations, à savoir la face de la barrière située vis-à-vis de la pointe sous tension (**Fig. 1. 12a**), ou bien celle en regard du plan (**Fig. 1. 12b**) et enfin toutes les faces (**Fig. 1. 12c**), ont été expérimentées.



**Fig. 1. 12:** Variantes de contamination des surfaces hydrophobes et hydrophiles de la barrière

Ces variantes de contamination sont appliquées sur la surface hydrophobe de la barrière sous forme de gouttelettes d'eau. La mise sous tension d'essai du système est effectuée immédiatement après contamination de la barrière pour éviter son assèchement naturel. Pour chaque conductivité de la solution polluée, 10 tests d'amorçage de l'intervalle d'air du système ont été effectués. La valeur retenue de la tension de disruption est la moyenne arithmétique de l'ensemble de celles des tensions disruptives de la même série de mesure. Les résultats importants obtenus sont résumés comme suit:



**Fig. 1. 13:**  $\hat{U}_d/d_a = f(\sigma_v)$  pour diverses orientations de la barrière recouverte complètement de gouttes d'eau

La figure 1.13 donne l'allure de la tension de rupture du système en fonction de l'orientation de l'axe des électrodes de base et la conductivité des gouttes d'eau recouvrant la surface totale

de la barrière. Il en résulte pratiquement une même performance pour les deux systèmes à barrière verticale et horizontale, reposant sur la pointe sous tension (**Fig. 1. 11b** et **1. 11c**). La rigidité diélectrique minimale du système est obtenue lorsque la barrière en silicone horizontale est sous la pointe haute tension (**Fig. 1. 11c**). L'écart de rigidité entre ces deux différentes configurations est de l'ordre de 18 %. Ceci peut être expliqué par le fait que dans la dernière configuration, la déformation des gouttes posées sur la face en regard du plan à la terre engendrent une distorsion du champ électrique uniforme régnant entre la barrière sans gouttes et l'électrode à la terre et un raccourcissement de la distance entre les électrodes suscités du fait de l'allongement de ces gouttes d'eau sous l'action de leur poids et du champ électrique.

### 1.11. Conclusion

La synthèse sur les travaux réalisés par plusieurs investigateurs sur l'étude des décharges électriques en tension continue positive ont constaté que les polymères sont d'excellents Isolants pour les applications hautes et moyennes tensions en raison de leur structure moléculaire. Par exemple, les isolateurs en silicone recouverts d'une couche de pollution présentent une résistance aux courants de cheminement plus élevée que les modèles en porcelaine, en verre ou en EPDM (Ethylène Propylène Diène Mytilène). Les décharges électriques sont évitées même dans des conditions de pollution extrêmes.

Une maîtrise parfaite du champ électrique est indispensable pour réduire l'intensité de celui-ci à l'extrémité de la couche conductrice extérieure du câble. Les élastomères silicones spéciaux possèdent des propriétés permettant de contrôler le champ électrique. C'est pour cela que Les seules applications de ce matériau sont réalisées dans le domaine de fabrication des câbles à gaine en silicone ou isolateurs entièrement en silicone ou recouvert d'un revêtement en silicone. Plusieurs facteurs entrent en considération dans la conception des isolateurs en service, évidemment le bon choix du matériau isolant s'impose comme étant le facteur le plus déterminant des performances de l'isolateur notamment sous pollution, ce qui optimise ces différentes propriétés que ce soient électriques, mécaniques ou thermiques.

Lors de l'analyse des travaux suscités, nous n'avons pas rencontré d'investigations sous une tension continue positive concernant une surface isolante en silicone recouverte de gouttes d'eau posée sur un plan à inclinaison variable. Cela explique le grand intérêt accordé à ce thème de recherche. L'isolateur à ailettes et tronc inclinés différemment et exposé à une pluie fine ou à la rosée forme la cible recherchée à travers le but de notre présente étude.

# Chapitre 02

## ISOLANTS ET DECHARGES

---

### 2.1. Introduction

Un matériau diélectrique est un matériau plus ou moins isolant, polarisable, dans lequel des dipôles électrostatiques existent ou se forment sous l'effet d'un champ électrique. C'est un milieu qui ne peut pas conduire de courant électrique et à ce titre, on l'appelle parfois isolant électrique. Mais malgré l'impossibilité des milieux diélectriques de conduire le courant, ils présentent de nombreuses caractéristiques électriques. En effet les atomes qui constituent le matériau peuvent présenter des dipôles électrostatiques qui sont susceptibles d'interagir avec un champ électrique. Cette interaction se traduit par la création d'une polarisation reliée à ce champ, au niveau microscopique, par une polarisabilité, et au niveau macroscopique, par la susceptibilité électrique. Les matériaux diélectriques se différencient suivant la variation de leurs caractéristiques électriques, physiques et chimiques. Ce chapitre est consacré à l'étude des isolants solides tels que des polymères organiques et des polymères synthétiques utilisés dans l'isolation électrique. Ces derniers exemples (les silicones) sont en effet largement utilisés dans l'industrie électrique en raison de leurs performances mécaniques, leur bonne tenue électrique, leur facilité de mise en œuvre et leur faible coût. Ils sont principalement utilisés dans l'isolation des bobines de transformateurs, des barres d'alternateurs, des câbles de transport d'énergie, dans la fabrication des condensateurs et dans l'enrobage des composants électriques.

### 2.2. Définitions

#### 2.2.1. Isolants [15]

Les isolants sont des matériaux ayant une résistivité très élevée :  $10^8$  à  $10^{16}$   $\Omega.m$ , car ils contiennent très peu d'électrons libres. Un isolant est caractérisé par ses propriétés électriques, mécaniques, chimiques et thermiques. Un bon isolant ne devrait pas laisser passer de courant lorsqu'il est soumis à une tension continue. Autrement dit, sa résistance en CC doit être infiniment grande. Cependant, en pratique, un courant de fuite très faible circule dans tous les matériaux isolants utilisés en HT continue. Le courant passant à travers un isolant en HT continue est également constant et est appelé courant résiduel. En HT alternative, n'importe quel matériau isolant laisserait passer un courant capacitif.

### **2.2.2. Isoler**

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

### **2.2.3. Isolation [15]**

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

### **2.2.4. Isolement**

L'isolement est l'ensemble des qualités acquises par un corps conducteur du fait de son isolation.

### **2.2.5. Diélectrique [14]**

Un matériau est diélectrique s'il ne contient pas de charges électriques susceptibles de se déplacer de façon macroscopique. Autrement dit, c'est un milieu qui ne peut pas conduire le courant électrique. À ce titre, on l'appelle parfois isolant électrique. On compte parmi ces milieux : le vide, le verre et de nombreux plastiques.

### **2.2.6. Les isolateurs**

Les isolateurs sont des éléments essentiels dans la conception d'une ligne aérienne. Leur rôle est de relier les conducteurs sous tension aux supports et d'assurer l'isolement électrique entre ces deux parties constitutives de la ligne. En effet, le choix du type d'isolateur, les contrôles de réception, la surveillance en exploitation doivent être faite avec un maximum de soin, pour assurer le bon fonctionnement de la ligne.

L'isolateur est constitué principalement d'un matériau isolant solide qui présente une très grande résistance au passage du courant et dont la conductibilité est pratiquement nulle. Il est utilisé pour isoler les conducteurs ou les pièces sous tension afin d'empêcher les courts-circuits, les pertes de courant et les charges d'électrocution [16].

## **2.3. Les types des isolants utilisés dans l'industrie électrique**

Les isolants sont classés en trois types : liquides, gazeux et solides.

### 2.3.1. Isolants liquides

Les isolants liquides présentent l'avantage de se régénérer après un claquage ; ils servent aussi au refroidissement par convection ou par évaporation (les isolants liquides ont généralement une bonne conductivité thermique). Ils sont utilisés seuls ou bien ils imbibent un isolant solide dont ils remplissent les vides [14] (des transformateurs, condensateurs et câbles). Ils ont pour rôle de se substituer aux vacuoles qui sont sources de décharges partielles.

### 2.3.2. Isolants gazeux [14]

Les principaux isolants gazeux sont : l'air atmosphérique, l'azote, gaz rare de l'air, l'hydrogène. Les gaz secs sont de bons isolants, ils ont des propriétés particulières.

### 2.3.3. Les isolants solides

Les isolants solides trouvent des applications dans un grand nombre de dispositifs de production, de transport, de distribution et d'utilisation de l'énergie électrique. On les regroupe en deux catégories principales selon leur nature organique ou inorganique.

#### 2.3.3.1. Les isolants inorganiques

Les principaux isolants inorganiques regroupent :

##### a. Les céramiques

Elles sont actuellement utilisées pour les isolateurs à haute tension et correspondent à des formules voisines, soit d' $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  (porcelaine traditionnelle), soit d' $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $5\text{SiO}_2$  (stéatite) [14]. L'isolateur, après usinage de son ébauche cylindrique humide (type à capot et tige) ou sèche (type à long fût), est cuit dans un four à une température et pendant une durée convenable. Certaines céramiques à grains très fins sont recommandées pour des isolateurs devant supporter des efforts mécaniques élevés. La céramique est très utilisée pour les matériels HTB des postes électriques.

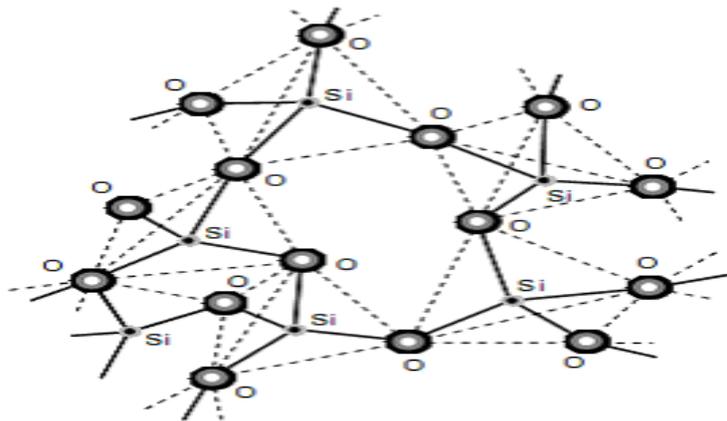
Les objets en céramique possèdent généralement une grande résistance mécanique, une faible densité, une forte dureté et une résistance élevée à l'usure. Cependant, de petites imperfections, notamment de petites fissures dues à un frittage incomplet, dans la céramique peuvent rendre ces matériaux fragiles. Les céramiques gardent leur solidité même à des températures très élevées, résistent aux chocs thermiques et ont une forte résistance au vieillissement et aux agressions climatiques ou chimiques. Elles ont généralement une

conductivité thermique faible. Elles sont opaques (céramiques cristallines) ou translucides (verres amorphes) [15]. Nous citons quelques exemples de matériaux céramiques :

- **alumine** (oxyde d'aluminium  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) : bonne tenue mécanique aux températures élevées, bonne conductivité thermique, grande résistivité électrique, grande dureté, bonne résistance à l'usure, inertie chimique.
- **cordiérite** (silicate alumineux ferromagnésien) : bonne résistance aux chocs thermiques, bonne conductivité thermique.

### b. Verres

Le verre, dans le langage courant, désigne un matériau ou un alliage dur, fragile (cassant) et transparent au rayonnement visible, souvent issu de sable siliceux. Le plus souvent, le verre est constitué d'oxyde de silicium (silice  $\text{SiO}_2$ ) et de fondants (**fig. 2. 1**)



**Fig. 2. 1:** Verre de silice représentation schématique de la structure [19]

Les verres sont utilisés dans le domaine de l'électrotechnique et les principales applications sont l'isolement électrique de conducteurs ou d'éléments sous tension dans les réseaux de transport et de distribution d'électricité. Beaucoup de types de verres sont utilisés dans l'isolation électrique et nous citons :

#### ➤ **Le verre recuit**

Le verre recuit a surtout été utilisé pour faire des isolateurs rigides, mais on s'est aperçu que les isolateurs un peu épais ne résistaient pas aux variations brusques de température. De plus, le verre recuit ne supporte que des tensions mécaniques relativement faibles, ce qui interdit son emploi pour les isolateurs de suspension [17].

### ➤ **Le verre trempé**

Il est obtenu par chauffage de l'isolant retiré du moule à une température d'environ 700 °C, puis refroidi par des jets d'air sous pression. Les couches extérieures de la pièce isolante acquièrent rapidement une rigidité qui ne leur permet plus aucune déformation. L'intérieur restant à une température supérieure à celle des couches extérieures, il ne peut se contracter librement, lors de son refroidissement. Il reste donc en extension et crée des contraintes de compression sur les couches superficielles. Le verre trempé présente une contrainte mécanique en traction environ 5 à 6 fois plus grande que celle du verre recuit et peut supporter des variations brusques de température pouvant atteindre 100 °C [17].

### ➤ **Les fibres de verre**

Elles sont destinées au renforcement mécanique de pièces en résine directement au contact d'éléments conducteurs comme par exemple dans les isolateurs en matériaux composites de lignes ou de postes de transformation [20].

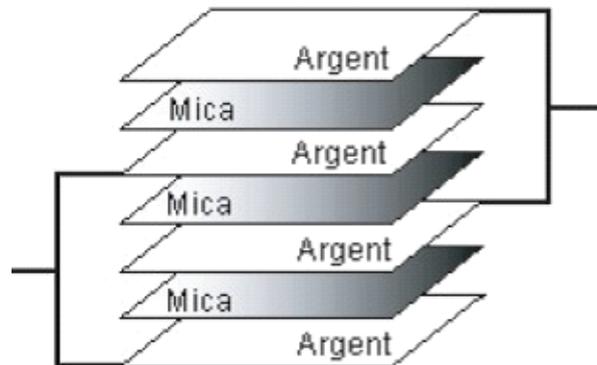
### *c. Les micas et produits micacés*

Le mica est un minéral brillant formé de silicate d'aluminium et de potassium. Il présente une importance considérable pour l'industrie électrique, par suite des propriétés particulières qui s'attachent à ce matériau. Il est en effet doté d'une excellente tenue à la température, d'une rigidité diélectrique élevée et d'une inertie chimique remarquable. Le mica continue à être le matériau de choix et de base des systèmes d'isolation moyenne et haute tension. Les technologies d'emploi du mica n'ont pas cessé d'évoluer au cours des années, tant pour répondre à des demandes d'amélioration de performances que de rationalisation ou de réduction de coût, en profitant des possibilités nouvelles offertes par la mécanisation. Cette évolution a conduit à l'abandon progressif et aujourd'hui quasi total du mica utilisé sous forme de clivures au profit du papier de mica dont les usines de production se sont multipliées par le monde, se rapprochant le plus souvent des gisements de mica [21, 22].

Industriellement, le mica est mis en pulpe dans de l'eau, puis transformé en papier mica à l'aide de machines identiques aux machines à papier classique. Les bobines de papier mica sont ensuite déroulées en continu, imprégnées de résines organiques ou silicones et si nécessaire contrecollées sur un support qui peut être un tissu en fibre de verre ou une feuille de polymère, puis enroulées de nouveau. Le papier de mica est utilisé comme :

- rubans pour isolation des barres de cuivre dans les moteurs et alternateurs à haute tension ;

- rubans pour protection anti-feu des câbles électriques dans les installations où les exigences de sécurité sont importantes (tunnels, bateaux, aéroports, hôpitaux, métro, etc.) ; la protection mica permet en effet aux installations de fonctionner plus longtemps en cas d'incendie ;
- applications industrielles diverses pour fours à induction et pièces isolantes.
- comme diélectrique dans certains condensateurs (**fig. 2. 2**).



**Fig. 2. 2:** Condensateur isolé au mica

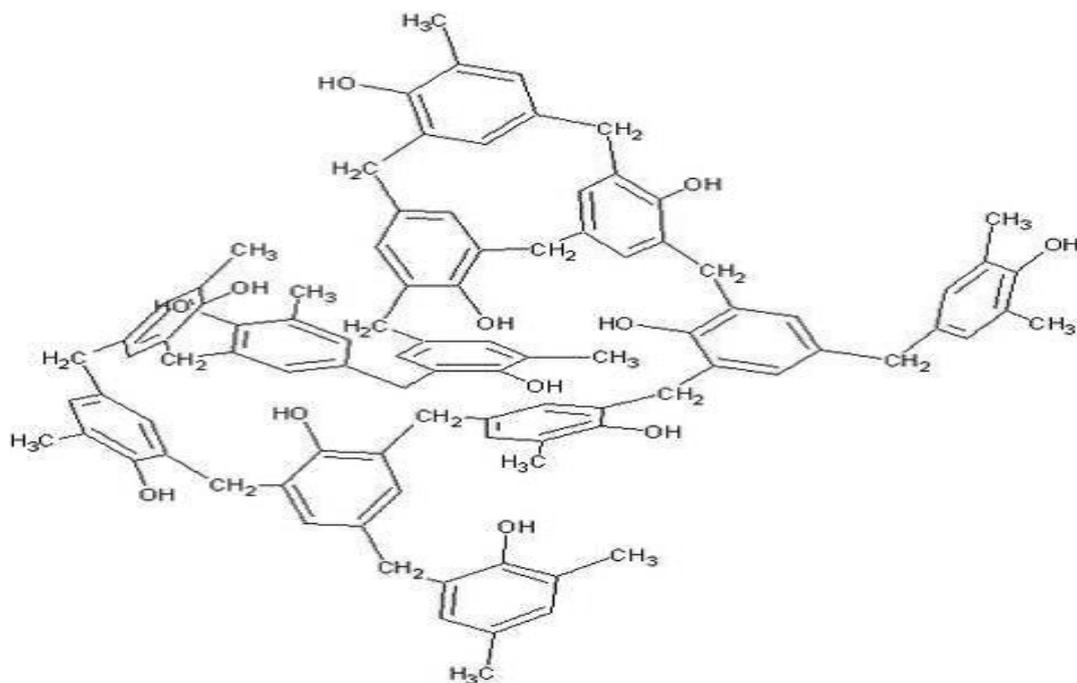
### 2.3.3.2. Les isolants organiques (polymères)

La catégorie des isolants organiques se subdivise entre matériaux naturels comme les caoutchoucs, paraffines et papier, et synthétiques (élastomères, polymères et composites). Exemple de polymères thermodurcissables et leurs applications en isolation électrique.

#### ➤ Poly phénol

On peut considérer les phénols comme des dérivés de l'eau, dans laquelle l'un des atomes H est remplacé par un groupement aryle. Les poly phénols sont créés par réaction d'un mélange de phénol avec le formaldéhyde. Dans le cas particulier où l'on utilise du phénol pur, on obtient le plus ancien et le plus connu des poly phénols qui est la bakélite dont la structure est représentée sur la figure 2.3.

La bakélite possède une résistance au courant superficiel médiocre et un caractère hygroscopique assez marqué qui rend son emploi en atmosphère humide problématique. Les poly phénols servent à la confection de corps de bobinages, de circuits imprimés de qualité courante et de pièces d'isolation pour relais électromécaniques. En haute tension, leur résistance à l'huile et aux sollicitations mécaniques en font des matériaux de choix pour les pièces isolantes des disjoncteurs et des transformateurs de puissance [23].



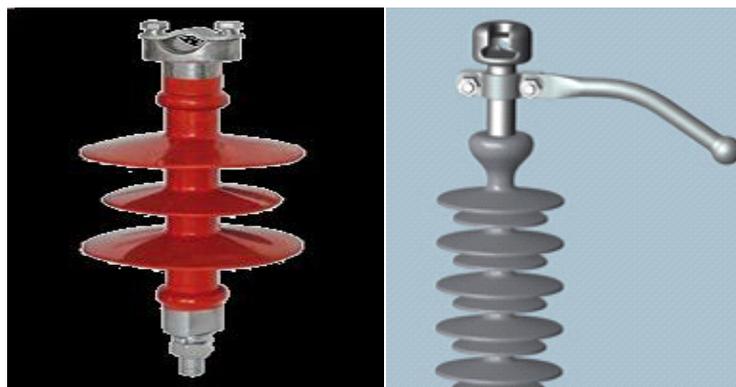
**Fig. 2. 3:** Structure moléculaire de la bakélite

### 2.3.3.3. Elastomères silicones

#### a. Définition

On donne ce nom à toute une catégorie de corps récemment inventés qui sont analogues aux résines synthétiques. Ils sont différents, parce qu'ils ne contiennent que peu ou pas de carbone dans la constitution de leurs molécules. Ils ne sont pas combustibles. On en a fabriqué de nombreuses variétés aux propriétés très diverses et faites des huiles, des vernis, des graisses, du caoutchouc. Les silicones résistent jusqu'à 200 °C sans durcissement ni décharge, et conservent leurs propriétés dans une large gamme de température (- 40 à 200 °C) [21].

Les silicones présentent de nombreuses propriétés tels que la résistance à la pollution hautement améliorée, souplesse d'installation en raison du poids réduit. Le caoutchouc de silicone est utilisé avec succès comme matériau d'isolement extérieur depuis plus de 25 ans comme le montre la figure 2.4, même dans des conditions environnementales et climatiques sévères. C'est aujourd'hui le matériau polymère le plus largement utilisé pour les équipements extérieur à haute tension. La silicone est hautement hydrophobe comme le montre la figure 2.8. De nombreux matériaux polymères possèdent des propriétés hydrophobes, mais la plupart perdent ces propriétés après une période relativement brève. Seule la silicone a la capacité de conserver ses propriétés hydrophobes pendant toute sa durée de vie.

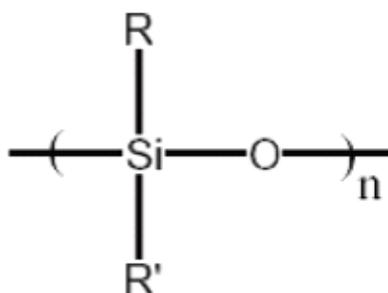


**Fig. 2. 4:** Isolateurs extérieurs en silicone

### b. La liaison Si-O-R

Les silicones (ou polyorganosiloxane) ont une structure chimique basée sur une alternance d'atomes de silicium et d'oxygène (**fig. 2. 5**). C'est par la présence de silicium et par l'existence de la liaison Si-O que les silicones se distinguent des autres polymères organiques.

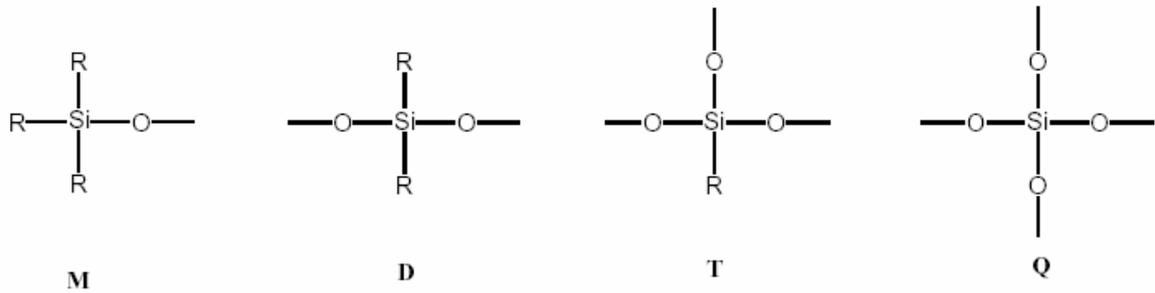
Cette liaison est à l'origine de leur nom : silicones, contraction de *silicon ketones*, par analogie avec les cétones. Les liaisons covalentes que le silicium crée avec l'oxygène pour former le squelette des macromolécules sont exceptionnellement stables. Ceci conduit pour les polydiméthylsiloxanes (PDMS) à des propriétés de résistance à haute température, de fortes tenues aux rayons UV, IR et à de nombreuses agressions extérieures, combinées à un remarquable pouvoir d'étalement. Leur point faible réside dans leurs propriétés mécaniques moins bonnes que celles des polymères organiques [1].



**Fig. 2. 5:** La liaison Si-O

La chimie des silicones permet de faire la distinction entre quatre types de motifs siloxaniques référencés M, D, T, Q (**fig. 2. 6**). Les motifs monofonctionnels, représentés par le symbole M, agissent comme limiteurs dans les chaînes linéaires ou comme groupements fonctionnels dans les résines ; les motifs di – fonctionnels, de symbole D, constituent le

squelette des chaînes linéaires de masse moléculaire assez élevée ou des composés cycliques ; les motifs tri – fonctionnels, de symbole T, permettent d’obtenir des réseaux tridimensionnels.

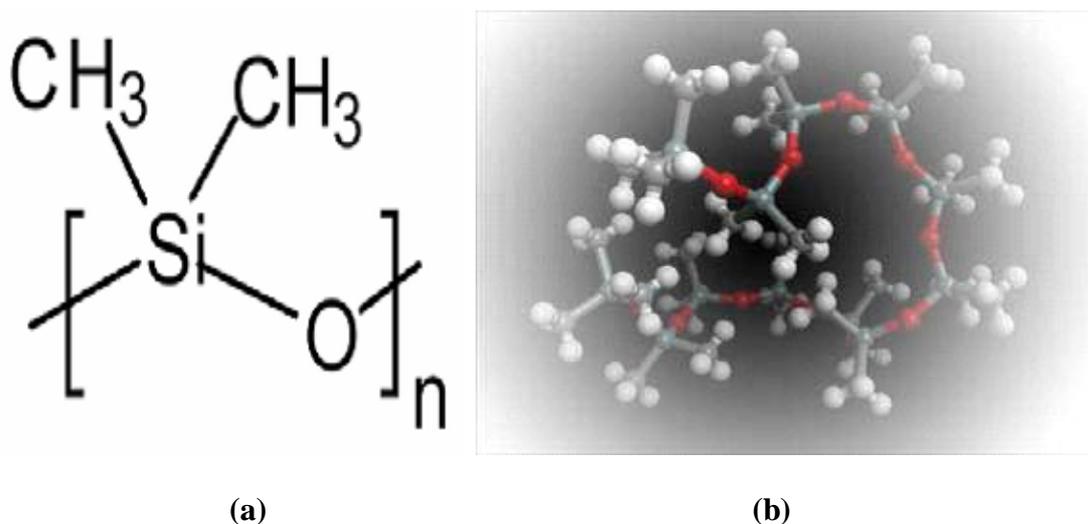


**Fig. 2. 6:** Les différents motifs siloxaniques

Enfin, les motifs tétra – fonctionnels, représentés par le symbole Q, conduisent à des réseaux tri – dimensionnels encore plus rigides du fait de leur structure analogue à celle des silicates [1]. Dans cette nomenclature, les polymères linéaires peuvent s’écrire MD<sub>x</sub>M où x est le degré de polymérisation et les composés cycliques s’écrivent sous la forme D<sub>x</sub> où x est le nombre d’atomes de silicium formant le cycle.

### c. Propriétés générales d’une chaîne PDMS

Le PDMS (**fig. 2.7a**) est le plus courant des polyorganosiloxane et le polymère principal dans la formulation de l’élastomère silicone utilisé dans l’isolation électrique. Le monomère possède une masse molaire de 74g. Sa conformation la plus stable est celle où tous les groupements méthyle sont en position transitoire (**Fig. 2. 7b**).



**Fig. 2. 7:** Le polydiméthylsiloxane (PDMS), (a) structure chimique ; (b) représentation spatiale

Les angles de valence des liaisons C-Si-C, Si-O-Si, O-Si-O et H-C-H sont de  $112^\circ$ ,  $143^\circ$ ,  $110^\circ$  et  $109^\circ$  respectivement. Les longueurs des liaisons sont  $1,88 \text{ \AA}$ ,  $1,63 \text{ \AA}$  et  $1,10 \text{ \AA}$  pour les liaisons Si-C, Si-O et C-H respectivement. L'angle de valence élevé de la liaison Si-O-Si, la distance interatomique Si-O élevée et l'absence de substituant sur l'atome d'oxygène conduit à une chaîne flexible et mobile. En outre, celle-ci se trouve protégée de toute association avec des molécules voisines par les groupes méthyle apolaires. La flexibilité et la mobilité de la chaîne PDMS entraînent [25, 1] :

- une faible évolution des propriétés physiques comme la viscosité avec la température,
- une solubilité et une perméabilité aux gaz relativement élevées (en particulier à la vapeur d'eau).
- de faibles interactions intermoléculaires et donc une faible énergie cohésive,
- une bonne tenue thermique,
- une excellente hydrophobicité grâce à une faible tension de surface.

#### d. Propriétés des silicones

##### ➤ Hydrophobicité

Par rapport aux autres matériaux, les silicones se distinguent par un très haut pouvoir imperméabilisant à long terme, appelé hydrophobicité (**fig. 2. 8**) [26], cette dernière constitue une propriété essentielle des isolateurs composites à enveloppe élastomère silicone. L'hydrophobie comprend la propriété de récupération après un contact prolongé avec de l'humidité, provenant du transfert des propriétés hydrophobes à la couche de saleté recouvrant l'isolateur par diffusion de chaînes moléculaires de faible masse. Ces propriétés particulières d'élastomères silicone spécialement conçus garantissent l'hydrophobicité de l'isolateur en service.



**Fig. 2. 8:** Hydrophobicité d'une silicone

➤ **Autre propriétés des silicones**

Le (tableau 2) résume quelques propriétés des silicones et avantages pour les applications MT et HT.

<b>Propriétés</b>		<b>Avantages pour les applications MT et HT</b>	
<b>Hydrophobicité</b>	L'eau ne peut pas s'étaler sur les silicones qui imperméabilisent la couche de pollution par transfert d'hydrophobicité.	<b>Sécurité accrue</b>	Minimisation du risque de décharge électrique due à la couche de pollution, d'où une plus grande sécurité par rapport aux isolants conventionnels.
<b>Tenue aux UV</b>	La stabilité de la chaîne Si-O confère aux silicones une haute résistance au spectre ultraviolet de la lumière solaire.	<b>Utilisation en extérieur</b>	Parfaite convenance applications en plein air.
<b>Tenue au feu</b>	La température d'inflammation des silicones se situe au-delà de 340 °C. Leur combustion ne dégage aucune substance toxique ou corrosive.	<b>Haute protection anti-incendie</b>	Utilisation dans les lieux exigeant une haute protection anti-incendie, comme les tours d'immeubles, les locomotives, les navires, les hôpitaux et le métro.
<b>Elasticité</b>	Par comparaison aux autres caoutchoucs, les élastomères silicones présentent une élasticité exceptionnelle et durable jusqu'à -45 °C.	<b>Large plage de température</b>	Montage des éléments isolants à basse température. Pas de perte d'élasticité sous exposition permanente aux très hautes ou très basses températures.
<b>Propriétés diélectriques</b>	Les isolants silicones présentent de faibles pertes diélectriques, une très haute résistance électrique ainsi qu'une haute rigidité diélectrique sur une longue durée.	<b>Plus grande longévité</b>	Ralentissement significatif du vieillissement électrique, d'où une nette augmentation de la durée de vie par rapport aux autres isolants, sous contraintes identiques.
<b>Thermo-stabilité</b>	Les huiles silicones sont thermostables à long terme, jusqu'à 180 °C, même en présence d'oxygène atmosphérique, et supportent des températures encore plus élevées sur une courte durée.	<b>Meilleur rendement</b>	Température de fonctionnement plus élevée que celle des autres isolants, autorisant une meilleure exploitation des transformateurs.

**Tab. 2. 1:** Propriétés et Avantages des silicones pour les applications MT et HT

➤ **Nettoyage [26]**

Un nettoyage des isolateurs n'est par conséquent que rarement nécessaire. Un nettoyage peut cependant être nécessaire en cas de salissures importantes, par exemple lors d'un encrassement axial par de grands oiseaux ou de la prolifération de moisissures. Les moisissures se développent généralement lors d'un stockage inadéquat dans un espace non

ventilé, ce qui produit le dépôt de condensation sur les isolateurs. Un solvant volatil tel que l'acétone, le toluol, le trichloréthylène ou l'isopropanol peut alors être employé pour nettoyer les isolateurs. Le solvant doit être appliqué sur un chiffon non pelucheux servant à nettoyer la surface de l'isolateur (ne pas verser le solvant directement sur l'isolateur).

#### **a. Applications des élastomères de silicone [27]**

Du fait de leur exceptionnel vieillissement et de leurs propriétés mécaniques uniques, les élastomères de silicone n'ont pas cessé d'accroître leurs parts de marché dans une multitude d'applications dans les secteurs industriel, du bâtiment et grand public. Dans le passé, ils étaient considérés comme des spécialités exotiques, dont le coût justifiait leur application uniquement dans des cas où des très hautes performances étaient demandées. L'élargissement de leur utilisation, dans les 15 dernières années, a rendu compétitifs ces produits dans des vastes secteurs, particulièrement lorsqu'on pondère leur prix, relativement élevé, par leurs propriétés supérieures. La demande dans le secteur industriel pour des produits à hautes performances n'a pas cessé de s'accroître.

## **2.4. Propriétés des isolants diélectriques**

### **2.4.1. Propriétés diélectriques**

Les éléments caractéristiques d'un isolant du point de vue électrique sont :

- La rigidité diélectrique  $E_r$  (V/m) ;
- La permittivité relative  $\epsilon_r$  ;
- La résistance en tension continue  $\rho$  ( $\Omega\text{m}$ ) ;
- Le facteur de pertes diélectriques en tension alternative  $\text{tg } \delta$  ;
- La décharge disruptive ou claquage (V/m).

### **2.4.2. La résistivité [28]**

Celle-ci s'exprime en  $\Omega \cdot \text{m}$  dans le système international d'unités. Sur la figure 2.9 nous donnons à titre d'information l'échelle des résistivités pour quelques matériaux d'usage courant en électrotechnique. Sur cette figure les matériaux isolants correspondent à la région grise.

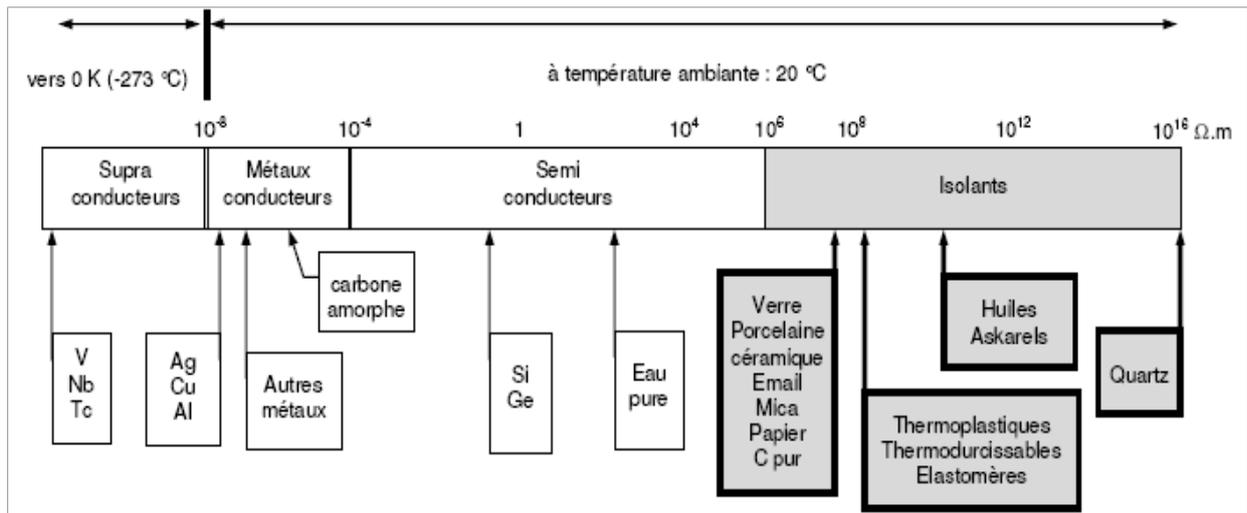


Fig. 2. 9: Echelle des résistivités de quelques matériaux utilisés en électrotechnique

### 2.4.3. La permittivité [28]

Cette grandeur s'exprime en farad par mètre [F/m] dans le système international d'unités. Cette grandeur est également désignée parfois par le terme pouvoir inducteur spécifique ou constante diélectrique. Toutefois dans la pratique on utilise de façon quasi exclusive la permittivité relative  $\epsilon_r$  représentant le rapport de la permittivité absolue à la permittivité du vide  $\epsilon_0$ .

La permittivité relative représente aussi le rapport de la capacité d'un condensateur ayant le matériau comme diélectrique à la capacité du même condensateur, mais avec le vide à la place du diélectrique. Ceci est donné par la formule (1.1).

$$\epsilon_r = \frac{C}{C_0} \quad (1.1)$$

### 2.4.4. Le facteur de perte diélectrique [28]

Ce facteur revêt une grande importance puisqu'il rend compte de la puissance dissipée dans le matériau lorsqu'un champ électrique variable lui est appliqué. Il est donné par la tangente de l'angle  $\delta$  appelé angle de pertes. En fait l'angle de pertes représente l'écart à la quadrature entre le courant et la tension d'un condensateur ayant le matériau considéré comme diélectrique. Il est utile de noter à ce niveau que l'importance du facteur de pertes n'est pas tellement liée à la perte de puissance en termes de coût bien que cela ne soit pas toujours négligeable. L'intérêt accordé à ce facteur réside plutôt dans le fait que la puissance est perdue dans un milieu diélectrique très mauvais conducteur de la chaleur. C'est pour cela

que les pertes diélectriques peuvent conduire à des échauffements prohibitifs des matériels. Lorsqu'un dispositif constituant un condensateur réel (avec pertes) est représenté par le schéma équivalent parallèle tel que représenté sur la figure 2.10 le facteur des pertes est donné par :

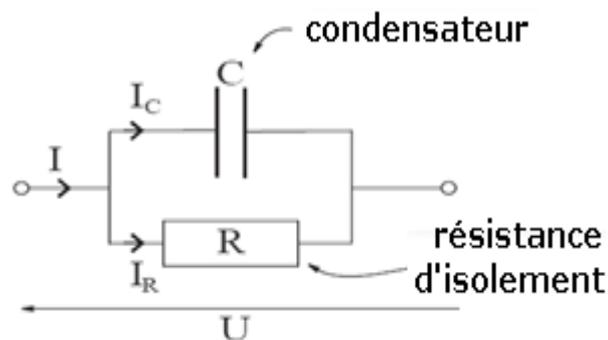
$$\tan\delta = \frac{1}{R_p C_p \omega} \quad (1.2)$$

Dans cette expression :

$\omega = 2\pi f$ , représente la pulsation de la tension appliquée.

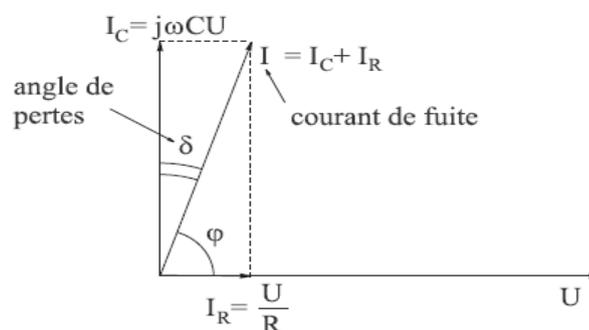
$C_p$  est la capacité du circuit équivalent parallèle pour l'isolant considéré.

$R_p$  est la résistance du circuit équivalent parallèle pour l'isolant considéré.



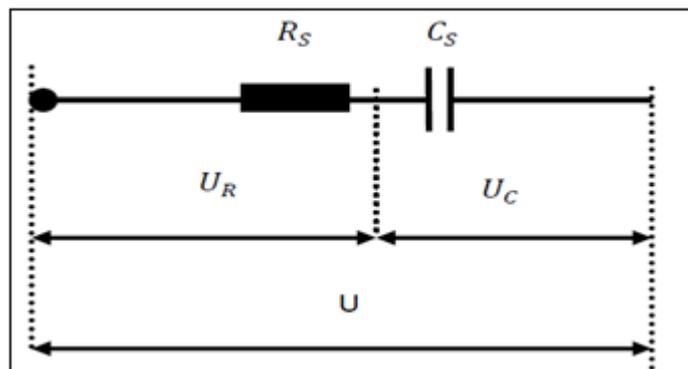
**Fig. 2. 10:** Circuit équivalent parallèle représentant un diélectrique

Le diagramme de Fresnel correspondant est donné sur la figure 2.11.



**Fig. 2. 11:** Diagramme de Fresnel correspondant au schéma équivalent parallèle [29]

Le schéma équivalent série d'un condensateur est donné sur la figure 2.12.



**Fig. 2. 12:** Circuit équivalent série représentant un diélectrique

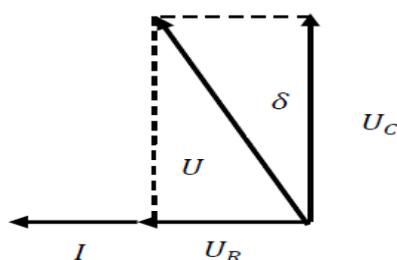
Dans ce cas, le diagramme de Fresnel est représenté sur la figure 2.13.

Avec :

$$\tan\delta = \omega R_S C_S \quad (1.3)$$

La valeur «  $\tan\delta$  » est appelée facteur de dissipation diélectrique. On définit également l'indice de pertes diélectriques par la relation :

$$\varepsilon'' = \varepsilon_r \tan\delta \quad (1.4)$$



**Fig. 2. 13:** Diagramme de Fresnel correspondant au schéma équivalent série

#### 2.4.5. La rigidité diélectrique [28]

Elle représente l'une des caractéristiques importantes d'un isolant puisqu'elle traduit son aptitude à résister à une contrainte électrique sans se détériorer. Elle s'exprime habituellement en kilovolts par millimètre [ $\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$ ]. La rigidité diélectrique d'un matériau, dépend de la fréquence mais aussi de la durée d'application de la tension ainsi que de la façon avec laquelle la contrainte est appliquée (rampe, créneau, choc).

La rigidité diélectrique  $G$  d'un matériau est définie par le rapport de la tension  $U$  pour laquelle se produit le claquage à la distance  $L$  séparant des électrodes normalisées auxquelles est appliquée la tension :

$$G = \frac{U}{L} \quad (1.5)$$

#### 2.4.6. La résistance à l'arc

C'est la durée maximale d'application d'une tension supérieure à la tension de claquage d'un isolant avant l'apparition d'un arc électrique. Elle se mesure en secondes.

#### 2.4.7. La température admissible

C'est un paramètre significatif pour tous les matériaux isolants et il détermine leur classification. En termes techniques nous parlons de classe d'isolement laquelle est représentée par une lettre. Au-delà de cette température caractéristique de la classe, il est fortement déconseillé de travailler sous peine de réduire de façon sévère la durée de vie de l'équipement. Il est avéré que dans tous les cas, les matériaux isolants voient leurs propriétés se détériorer très vite aux températures élevées et la détérioration peut atteindre un niveau tel que l'isolation cesse de jouer convenablement son rôle. Ce processus est désigné sous le terme de vieillissement thermique [30].

#### 2.4.8. Décharge disruptive [31]

Le développement de la décharge disruptive ou perforation diélectrique à l'intérieur des matériaux isolants solides est lié à un ou une association des phénomènes suivants :

- Décharge intrinsèque ;
- Décharge thermique ;
- Décharge partielle.

On peut citer d'autres causes secondaires découlant des précédentes, tels que les effets électrochimiques et chimiques de détérioration de l'isolant.

##### 2.4.8.1. 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 à basse température. Frohlich [32] et Whitehead s'appuyant sur la structure des bandes d'énergie ont établi les relations théoriques liées à ces types de décharges intrinsèques.

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.

### 2.4.8.2. 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 thermique du diélectrique dans les conditions de refroidissement données, la température du diélectrique va augmenter entraînant sa dégradation thermique progressive par décomposition chimique et par fusion

### 2.4.8.3. Décharge partielle

Les matériaux isolants de qualité technique comportent toujours des inclusions de particules étrangères et de vacuoles gazeuses. Lorsque ces isolants sont soumis à une certaine tension alternative à fréquence industrielle on constate que le champ électrique dans les vacuoles gazeuses ( $E_g$ ) est plus élevé que celui dans l'isolant ( $E_i$ ) (**fig. 2. 14**).

Etant donné la continuité de la vectrice induction électrique dans un milieu non ionisé à l'état initial, on trouve :

$$\frac{E_g}{E_i} = \frac{\epsilon_{ri}}{\epsilon_{rg}} \quad (1.6)$$

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

$\epsilon_{rg}$  : est la permittivité relative du 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

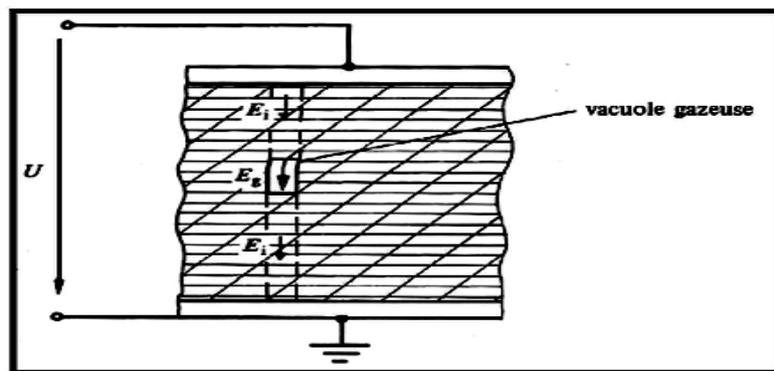


Fig. 2. 14: Isolant comportant une inclusion gazeuse

#### 2.4.9. Propriétés thermiques

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

#### 2.4.10. Propriétés mécaniques

Elles caractérisent la résistance aux efforts extérieurs tel que : la traction, la compression, la flexion, cisaillement, ainsi que la résistance aux frottements et aux chocs et la dureté

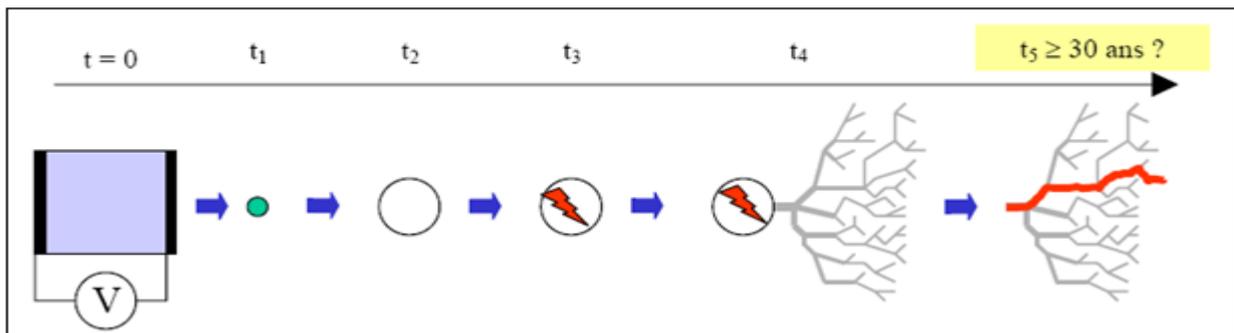
#### 2.4.11. Propriétés chimiques

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

### 2.5. Vieillessement des isolants électriques [33, 34]

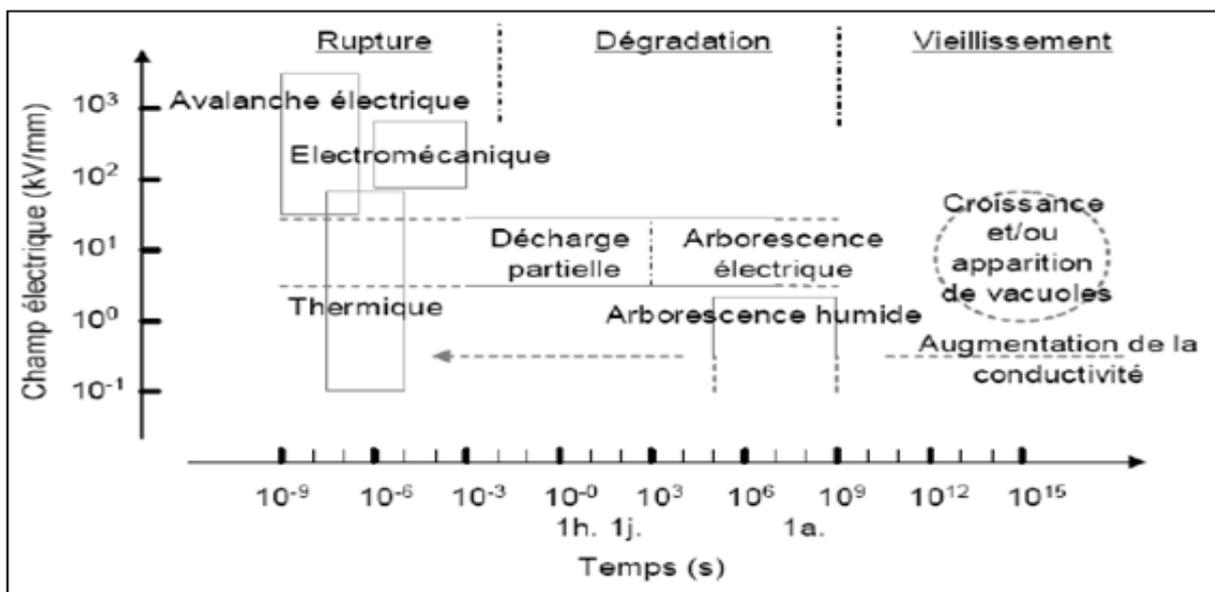
Le terme vieillissement traduit l'évolution négative avec le temps des propriétés d'un isolant. Il arrive, mais cela est rare, que l'évolution soit positive et nous parlons alors de conditionnement. Pour bien interpréter le problème de vieillissement, nous pouvons nous référer à la figure 2.15 qui donne schématiquement l'enchaînement de mécanismes pouvant survenir à partir de la mise en service d'un isolant organique jusqu'au stade ultime qui est la rupture.

L'isolant organique en début de service (temps  $t = 0$  sur la figure) peut avoir ou ne pas avoir de défaut initial (cavités, particules étrangères...), sous l'action d'une tension, il peut y avoir création de vacuoles au sein de l'isolant ou augmentation de volume de celles déjà présentes ( $t = t_1$  jusqu'à  $t_2$ ). Ce phénomène n'est autre que le vieillissement électrique qui pourra conduire à la dégradation de l'isolant si des décharges prennent naissance dans une vacuole ( $t = t_3$ ) et si une arborescence se développe ( $t = t_4$ ). Cette dégradation est susceptible à son tour de conduire l'isolant à la fin de sa vie c'est-à-dire à une rupture ( $t = t_5$ ).



**Fig. 2. 15:** Schéma représentant le scénario standard du vieillissement [33, 34]

Trois mécanismes fondamentaux décrivent l'endommagement global d'un isolant organique sous l'action d'un champ électrique : le vieillissement électrique, la dégradation et finalement la rupture diélectrique. Ces mécanismes sont illustrés sur la figure 2.16 selon le temps et le champ électrique auxquels ils peuvent avoir lieu.



**Fig. 2. 16:** Vieillescence, dégradation et rupture d'un isolant en fonction des temps et des champs électriques auxquels ces mécanismes ont lieu [34]

## 2.6. Décharge dans l'air

### 2.6.1. Introduction

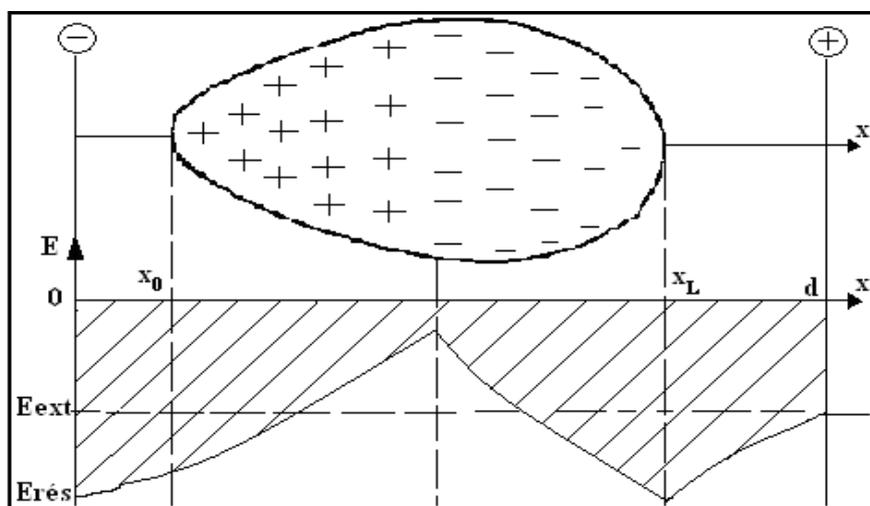
L'étude des décharges électriques présente de l'intérêt d'un point de vue industriel pour les problèmes liés à l'isolement et à la protection des réseaux de transport et de distribution d'énergie (ligne à haute tension, transformateurs, générateurs...) ainsi plusieurs études et ouvrages se sont intéressés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

Une barrière propre et sèche, la décharge positive est de type streamers positifs quels que soient l'isolement et la position de la barrière. Par contre lorsque l'écran est pollué, la décharge positive est de type leader quelle que soit la conductivité volumique de la barrière supérieure à 5mS/cm.

### 2.6.2. Décharge de type streamers [9]

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. 2. 17**).



**Fig. 2. 17:** Avalanche électronique dans un champ homogène ( $\varphi \neq 0$ )

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  $\alpha$ . Le critère s'écrit sous sa forme générale:

$$\gamma \left( e^{\int_0^d \alpha dx} - 1 \right) = 1 \quad (1.7)$$

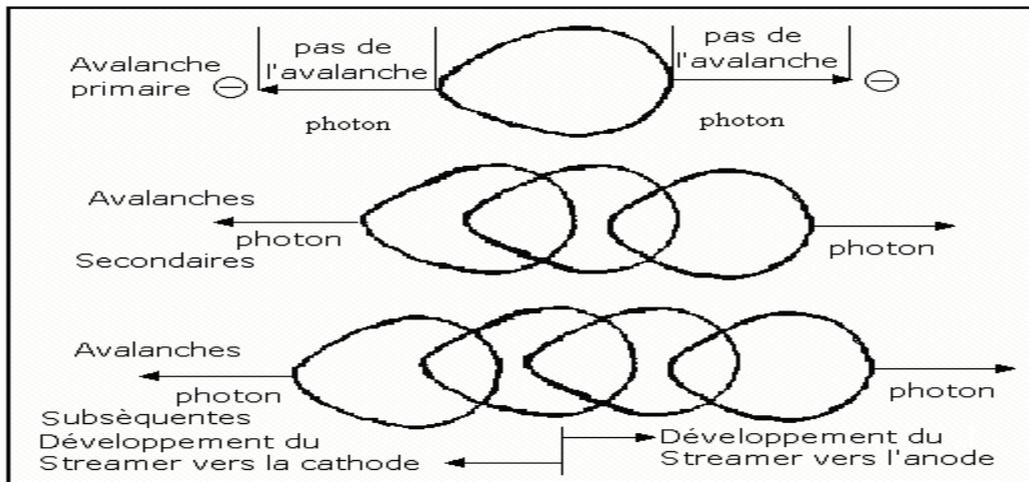
Le phénomène de streamers est caractérisé par un temps de retard de l'ordre de  $10^{-8}$ s, alors que la décharge de Townsend nécessite des temps de  $10^{-5}$ s pour entraîner un claquage. Il se produit dans des gaz soumis à des pressions élevées. Plus le produit  $dp$  est grand plus petite est la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

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

Il s'écrit simplement  $\int_0^{x_c} \alpha dx = \ln N_c$ , avec  $x_c$  distance critique et  $N_c$  nombre critique d'électrons, égal à environ  $10^8$  électrons.

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. 2. 18**). Les avalanches secondaires et subséquentes prennent naissance à la tête et à la queue de l'avalanche et se développent par pas dans la direction de l'anode et de la cathode. La vitesse

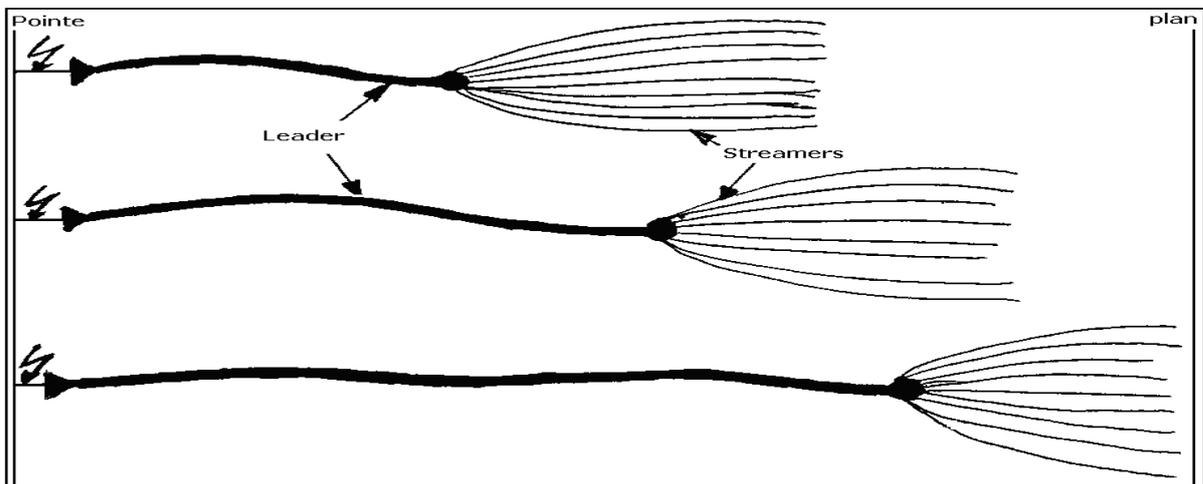
de propagation du streamer peut atteindre  $1000 \text{ cm}/\mu\text{s}$ .



**Fig. 2. 18:** Développement d'un streamer

### 2.6.3. Décharges de type leader [9]

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



**Fig. 2. 19:** Développement d'un leader

Lorsque les streamers qui participent à l'apparition de l'effet couronne sont suffisamment développés, le gaz contenu dans le tronç 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. 2. 19**) 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.

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

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

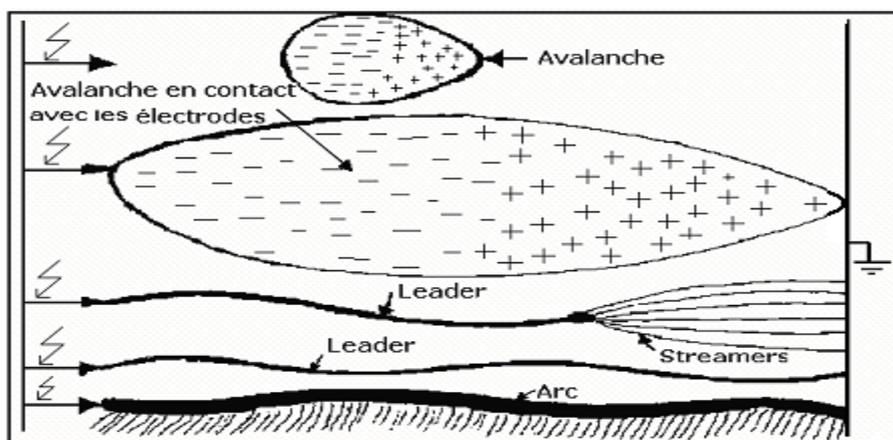
- Première avalanche puis Streamers et enfin Leader.

On choisit comme configuration pointe positive-plan et pour isolation gazeuse l'air pour les raisons suivantes:

- Tension de claquage plus petite possible;
- Intérêt technique (dimensionnement des isolations externes).

### 2.7.1. Amorçage de l'air par avalanche primaire

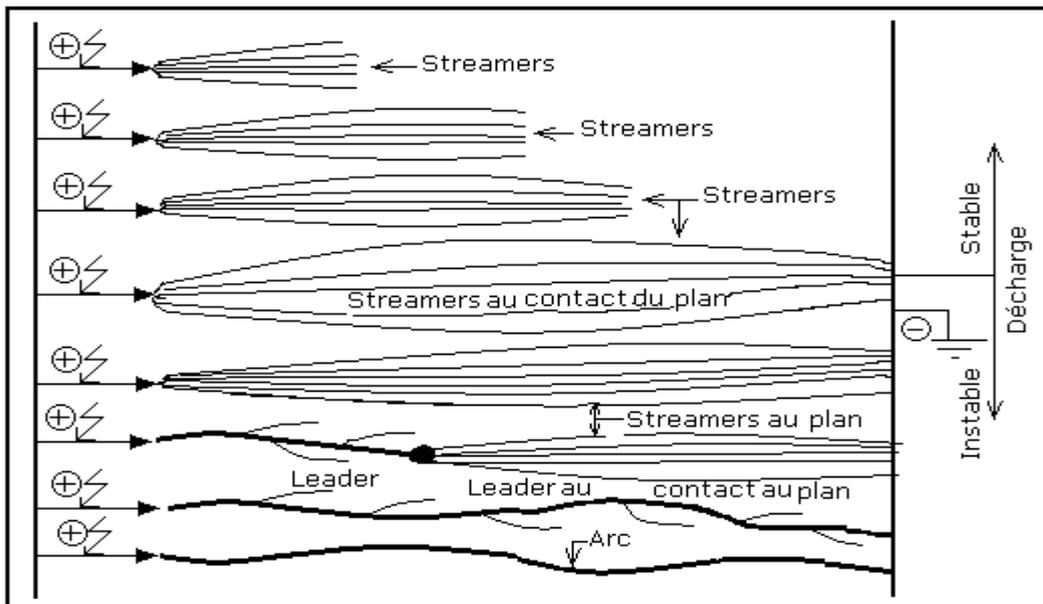
Ce type de claquage n'existe que dans le cas de champ extrêmement inhomogène (aiguilles, fil fin...etc.) et pour des tensions de choc relativement peu variable (tension continue, à fréquence industrielle) car d'une part l'avalanche électronique n'atteint pas sa taille critique avant le claquage et que 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. 2. 20**).



**Fig. 2. 20:** Amorçage d'un intervalle d'air par avalanche primaire

### 2.7.2. Claquage de l'air par streamers

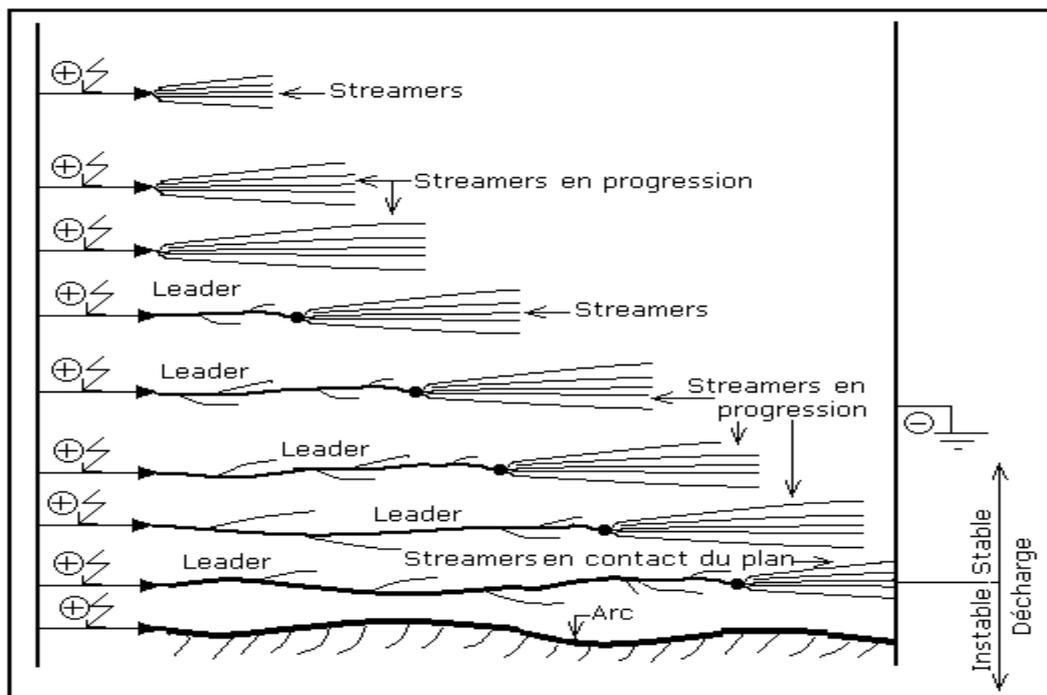
En appliquant une tension impulsionnelle dont le temps de front  $T_f$  varie entre 100 à 1000 $\mu$ s, les avalanches électroniques créées dans l'intervalle d'air inter électrode atteignent leur taille critique de telle sorte que les streamers prennent naissance dans l'espace d'air et progressent vers les électrodes. Si le champ résultant dépasse celui des streamers ( $E_{st} = 4$  à 5kV/cm), les streamers se multiplient et peuvent se propager jusqu'à contact du plan mis à la terre. A ce moment la, du fait de la contribution de l'électrode a 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 (**fig. 2. 21**).



**Fig. 2. 21:** Disruption d'un intervalle d'air par streamers

### 2.7.3. 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. 2. 22**).



**Fig. 2. 22:** Amorçage d'un espace d'air par leader

## 2.8. Conclusion

D'après l'étude des 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 en tension continue.

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.

# Chapitre 03

## POLLUTION

---

### 3.1. Introduction

Les isolateurs des lignes et de postes du réseau de transport d'énergie électrique sont le siège de dépôts de pollution. Le type de pollution est très variable et dépend en grande partie de la localisation géographique de l'isolateur : des poussières et des particules solides (conductrices ou non) pour les régions industrielles, le pollen et les poussières d'engrais pour les régions agricoles. Pour les régions urbaines ce sont les appareils de chauffage des habitations et les véhicules automobiles qui engendrent la pollution et pour les régions côtières ce sont principalement les embruns marins qui couvrent les isolateurs. Aucune région n'est donc exempte de pollution [1]. Lorsqu'il y a humidification de la pollution par la pluie, le brouillard ou la rosée, il y a formation d'un film électriquement conducteur, qui permet la circulation d'un courant de fuite. Des assèchements locaux de la couche de pollution apparaissent suite à ce passage de courant. Lorsqu'une zone sèche apparaît, la tension initialement appliquée aux bornes de l'isolateur se trouve donc reportée aux extrémités de celle-ci. La répartition de potentiel à la surface de l'isolateur est fortement modifiée et des arcs locaux sont susceptibles de s'amorcer. Ces arcs peuvent s'allonger jusqu'au contournement de l'isolateur, ce qui entraîne un court-circuit et une interruption du transport d'énergie électrique. En outre, les amorçages d'arcs peuvent engendrer des dégradations de l'isolateur. En face des difficultés causées par la pollution, plusieurs méthodes de lutte sont utilisées: le lavage ou le graissage des isolateurs, par exemple. Cependant ces opérations sont coûteuses. Par conséquent, la meilleure solution consiste à déterminer un isolement qui permet d'éviter les contournements, en particulier par le choix d'isolateur ayant une bonne tenue sous pollution. Nous citerons à titre d'exemple les matériaux à base d'EPDM, de silicone ou encore des isolateurs en céramique dopés avec des semi-conducteurs.

### 3.2. Définitions [35]

#### 3.2.1. Pollution

La pollution est une modification défavorable du milieu naturel qui apparaît en totalité ou en partie comme le sous-produit de l'action humaine, au travers d'effets directs ou indirects

altérant les modalités de répartition des flux d'énergie, des niveaux de radiation, de la constitution physico-chimique du milieu naturel et de l'abondance des espèces vivantes. Ces modifications peuvent affecter l'homme directement ou au travers des ressources en produits agricoles, en eau, et autres produits biologiques. Elles peuvent aussi l'affecter en altérant les objets physiques qu'il détient, les possibilités récréatives du milieu ou encore en enlaidissant la nature.

### **3.2.2. Salinité (Sa)**

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

### **3.2.3. Couche de pollution**

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

## **3.3. Pollution des isolateurs**

Même bien choisie, une isolation n'est jamais à l'abri d'un incident. La sévérité de la pollution d'un site peut changer. L'apparition d'une nouvelle usine à proximité d'un poste, la construction d'un ouvrage routier voisin ou plus simplement, un événement météorologique exceptionnel peuvent augmenter, durablement ou temporairement, la pollution d'un site, alors qu'un poste ou une ligne y sont déjà en exploitation. Le dimensionnement initialement correct des isolateurs peut alors devenir insuffisant et il faut pouvoir protéger les installations existantes contre les nouvelles sources de pollution [36].

### **3.3.1. Formation et répartition de la couche de pollution**

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

En général, la couche de pollution se concentre sur les éléments de la chaîne d'isolateurs situés du côté du conducteur de haute tension et dans les parties les mieux protégées contre les facteurs d'auto-nettoyage (vent et forte pluie). Par conséquent, la répartition de la pollution

le long des chaînes d'isolateurs est loin d'être uniforme [37]. Cette non-uniformité devient plus accentuée lorsque la longueur des chaînes d'isolateurs augmente.

La non-uniformité de la pollution peut être classée en trois catégories [38]:

### **3.3.1.1. *Non-uniformité longitudinale par groupe***

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

Nous retrouvons ce type de pollution dans les cas suivants :

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

### **3.3.1.2. *Non-uniformité transversale***

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

### **3.3.1.3. *Non-uniformité longitudinale périodique***

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

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

### 3.3.2. Sources de pollution

La nature de la pollution dépend de la situation géographique et climatique. Les diverses sources de pollution les plus fréquemment observées sur les isolateurs peuvent être regroupées selon leur origine et classées comme suit :

- la pollution naturelle ;
- la pollution industrielle ;
- la pollution mixte.

#### 3.3.2.1. Pollution naturelle

##### a. Pollution marine

Dans les installations en bordure de mer, les embruns portés par le vent déposent progressivement sur les isolateurs une couche de sel qui, à plus ou moins longue échéance, recouvre toute la surface de l'isolateur y compris les parties les mieux protégées. Cette couche de sel, humidifiée par les embruns eux même, ou par un brouillard ou simplement par condensation, devient conductrice. Un courant de fuite s'établit alors à travers la couche superficielle et des arcs électriques peuvent prendre naissance dans certaines conditions, et se développer jusqu'à provoquer le contournement total de l'isolateur [39].

##### b. Pollution désertique

Dans les régions désertiques, les fréquentes tempêtes de sables déposent progressivement sur les surfaces des isolateurs une couche de pollution contenant des sels. Une fois humidifiée, cette couche devient beaucoup plus conductrice. Un courant de fuite apparaît brusquement accompagné d'arcs partiels, dont la propagation à la surface de l'isolateur peut aussi conduire à un contournement total de l'isolateur [40, 41].

##### c. Autres sources de pollution naturelle

La pluie est un phénomène naturel propice à l'humidification des isolateurs par excellence. Lorsqu'elle est intense, elle est susceptible de provoquer la désagrégation des dépôts solides. Cependant, cet auto-lavage, favorable à l'amélioration des qualités diélectriques des isolateurs, est contrarié par le phénomène de ruissellement [39].

En présence d'une pluie violente, un film continu d'eau peut s'établir d'une extrémité à l'autre de la chaîne ou de colonne isolante. Comme l'eau n'est jamais parfaitement isolante,

ce phénomène peut entraîner le contournement de la chaîne d'isolateur ; c'est le contournement sous pluie [39].

### **3.3.2.2. Pollution industrielle**

La pollution industrielle provient des fumées évacuées à proximité de raffineries, de cimenteries, de complexes sidérurgiques ou même aux abords des centrales thermiques. Pour les régions exemptes des fumées, cette pollution peut être d'origine domestique (appareils de chauffage polluants, véhicules automobiles, ...) ou agricole (engrais). Les isolateurs se recouvrent des poussières faiblement conductrices, mais hygroscopique (absorbe l'humidité).

A la présence d'une humidité intense, le sel contenu dans ces poussières abaisse considérablement la résistivité superficielle des isolateurs et le contournement peut parfois survenir [42].

### **3.3.2.3. Pollution mixte**

Ce type de pollution résulte de la combinaison entre deux ou plusieurs pollutions précitées, comme exemple les pollutions marine et industrielle lorsque les installations électriques sont situées en bord de mer.

## **3.4. Conséquences de la pollution**

Les couches polluantes qui s'accumulent à la surface des isolateurs provoquent une conductivité électrique superficielle. Celle-ci modifie la répartition du potentiel le long de la ligne de fuite. Suivant les conditions atmosphériques (pluie fine, brouillard,...), la tension de rupture diélectrique de l'air peut être atteinte entre deux points de la surface isolante entraînant l'amorçage d'un arc électrique qui court-circuite une partie de la ligne de fuite.

Trois cas peuvent se présenter selon les contraintes auxquelles est soumis l'isolateur [43]:

#### **a. Arc non localisé**

L'arc électrique s'éteint rapidement, puis se réamorce à un autre endroit et ainsi de suite. Il y a apparition de courant de fuite entraînant une petite perte d'énergie, généralement supportable par l'installation.

### b. Arc fixe

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

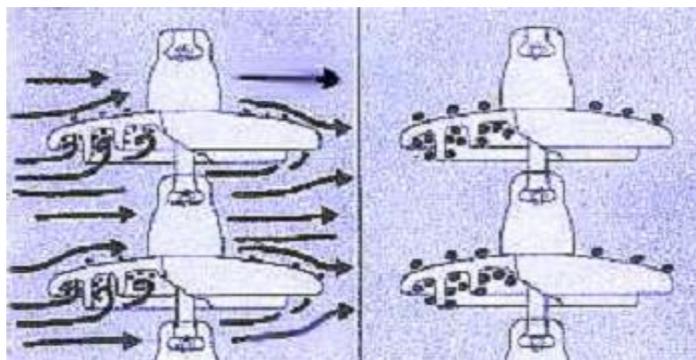
### c. Contournement des isolateurs pollués

L'accumulation du dépôt est continue et n'est modifiée que par la pluie et le vent. En position verticale, le nettoyage est plus efficace sur le dessus de l'isolateur que sur le dessous, d'où un dépôt plus important sur la surface inférieure des ailettes.

Le comportement des isolateurs sous pollution peut être décomposé en quatre étapes distinctes. Chacune de ces étapes a une importance sur le résultat final, donc sur la tenue ou le contournement de la chaîne isolante sous tension de service du réseau.

#### Etape 1 : Dépôt de la pollution

Les particules du dépôt sont apportées par le vent (l'isolateur, par sa présence, modifie le régime laminaire du vent) et se concentrent entre les nervures ou autour du capot (**fig. 3.1**).



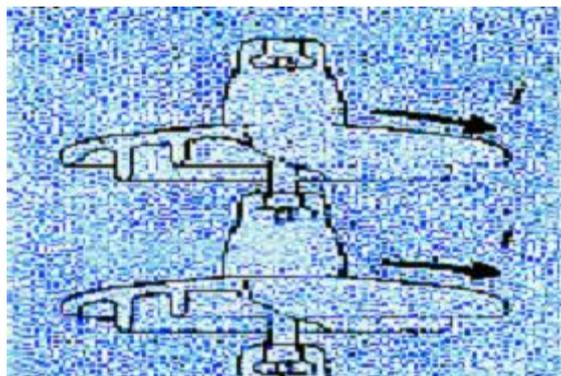
**Fig. 3. 1:** Dépôt et évolution de l'agent polluant

Les facteurs d'accumulation sont les suivants :

- la nature, le poids et la taille des particules polluantes ;
- la distance de l'isolateur par rapport à la source de pollution et par rapport au sol d'où peut provenir des poussières ;
- la vitesse du vent ;
- l'orientation de la chaîne, et surtout la forme de l'isolateur et son aptitude à l'auto-nettoyage par les fortes pluies et vents.

### Etape 2 : Humidification de la pollution

Le brouillard, la condensation de la petite pluie modifient graduellement et pratiquement sans délavage la surface de l'isolateur pollué. Ces conditions correspondent à des conditions dites critiques. Les sels contenus dans le dépôt se dissolvent et créent un électrolyte conducteur sur la surface de l'isolateur. Un courant de fuite prend alors naissance dès qu'un film conducteur se forme sur la surface de l'isolateur (**fig. 3.2**).



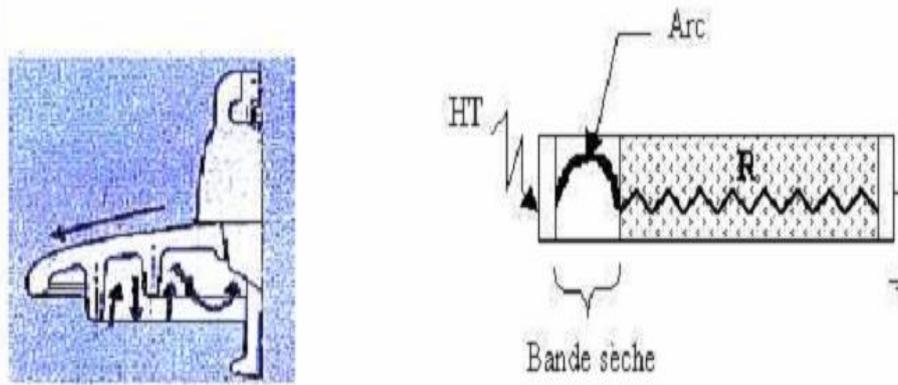
**Fig. 3. 2:** Humidification du dépôt polluant et création d'un courant de fuite

Pendant le cycle d'humidification, le courant de fuite augmente jusqu'à une valeur maximale, puis diminue s'il y a séchage. Le niveau de courant de fuite dépend du temps, de la nature et de la quantité des sels solubles et insolubles. Ces derniers maintiennent par absorption une certaine quantité d'eau à la surface de l'isolateur, entretenant ainsi l'humidification du dépôt.

### Etape 3 : Développement des zones sèches et apparition d'arcs

La densité du courant de fuite est beaucoup plus importante près des ferrures de l'isolateur. Par effet Joule, la température s'élève, l'eau s'évapore et le dépôt devient moins conducteur. Le courant est alors très réduit en amplitude par la présence d'une «bande sèche».

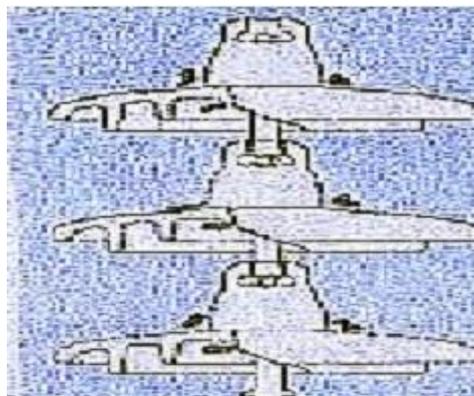
La répartition de potentiel sur l'isolateur est modifiée par cette bande sèche, car la plus grande portion du potentiel électrique se trouve reportée aux bornes de cette bande sèche. Si la largeur de cette dernière est insuffisante pour supporter le potentiel correspondant, un arc se crée (**fig. 3.3**).



**Fig. 3. 3:** Arc et bande sèche

#### Etape 4 : Comportement des arcs

La résistance du dépôt humidifié R, en série avec l'arc, limite le courant et la longueur de l'arc (**fig. 3.3**). Si le courant est trop faible, l'arc s'éteindra, la bande sèche s'humidifiera à nouveau et le mécanisme se répétera encore. Tant que le courant de fuite n'excède pas ce que l'on appelle «courant critique » correspondant à une «longueur critique » de l'arc, cette situation reste stable (**fig. 3.4**). Dans le cas contraire, le contournement de l'isolateur peut survenir.



**Fig. 3. 4:** Régime d'arcs sous pollution

#### 3.5. Mesure de la sévérité d'un site

Afin de dimensionner convenablement les isolateurs susceptibles d'assurer un service sans défaillance dans un site pollué, il est nécessaire de caractériser la sévérité de pollution de ce site. La sévérité est généralement caractérisée par l'intensité de précipitation, ainsi que par la conductivité des dépôts polluants. Cette dernière est mesurée directement à l'aide d'un conductimètre à sonde mobile (**fig. 3.5**).

Si la résistivité de la pollution humidifiée est suffisamment faible et que le courant de fuite augmente jusqu'au point de dépasser le seuil du courant critique, la longueur de l'arc s'allonge rapidement et court-circuite l'isolateur. Cette situation doit être bien sûr évitée, pour maintenir la qualité du service.



**Fig. 3. 5:** Photo d'un conductimètre à sonde mobile

La sonde est composée essentiellement:

- de la tête qui est constituée de deux électrodes ;
- du poignet ;
- du câble de liaison entre la sonde et l'appareil de mesure.

### 3.5.1. Classification des sites pollués

Afin d'évaluer l'isolement des lignes de transport et d'établir la corrélation entre la méthode de brouillard salin et les conditions de pollution naturelle, quatre classes de sévérité ont été proposées [44] :

#### a. Classe 1

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

#### b. Classe 2

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

#### c. Classe 3

Cette classe correspond à des zones très localisées où l'on trouve simultanément une forte pollution marine et industrielle. Il s'agit donc de zones à densité industrielle importante, de

grandes villes ou de zones proches de la mer soumises à l'action directe des embruns. Ces sites nécessitent un isolement important. La salinité équivalente maximale, concernant cette classe, est de 80 g/l.

#### **d. Classe 4**

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

### **3.5.2. Méthodes de mesures de la sévérité d'un site**

#### **3.5.2.1. Densité du dépôt de sel équivalent (DDSE)**

La densité du dépôt de sel équivalent est le dépôt équivalent exprimé en mg de NaCl/cm<sup>2</sup> de la surface d'un isolateur, ayant une conductivité équivalente égale à un dépôt polluant réel dissous dans la même quantité de solution. Des échantillons de sel sont prélevés à la surface d'un isolateur témoin, en utilisant un matériau absorbant (coton, ...) et de l'eau distillée. Le dépôt est ensuite dissout dans une quantité de solution connue. La conductivité de la solution obtenue ainsi que les caractéristiques de l'isolateur permettent de déterminer la salinité équivalente. Les mesures doivent être répétées avec une fréquence suffisante, afin d'obtenir les niveaux entre les périodes de lavage naturel [45].

#### **3.5.2.2. Conductance superficielle**

La conductivité superficielle est obtenue en multipliant la conductance  $\sigma$  par un facteur de forme de l'isolateur. Généralement, la tension est appliquée aux électrodes terminales, ce qui fournit la conductivité superficielle globale de l'isolateur [43, 45].

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 [46].

#### **3.5.2.3. Courant de fuite**

Par comptage d'impulsions, on enregistre pendant une période donnée, sur un isolateur soumis à sa tension de service, le nombre d'impulsions du courant de fuite dépassant une amplitude fixée à l'avance. L'existence d'impulsions précède généralement la phase de contournement. Pour l'enregistrement, on utilise un isolateur en service ou un isolateur témoin et un dispositif permettant de compter les impulsions du courant de fuite [43].

On mesure, par la suite, la plus forte valeur de crête du courant de fuite. On utilise des isolateurs témoins et une station de mesure fiable et nécessitant un minimum d'entretien. Les mesures devant être effectuées pendant une période relativement longue [43, 47].

#### **3.5.2.4. Contrainte de contournement**

La contrainte de contournement d'un isolateur est la tension de contournement divisée par la longueur totale de l'isolateur. Sur site, la contrainte de contournement peut être mesurée de différentes façons [47].

- Installation de chaînes d'isolateurs de même type, mais de différentes longueurs, et soumises à une tension constante. On estime les probabilités de contournement à partir des proportions d'amorçage enregistrées.
- Une autre méthode consiste à disposer des fusibles sur chaque chaîne, afin que la chaîne accroisse sa longueur effective jusqu'à atteindre le niveau de tenue en tension.

#### **3.5.2.5. Mesure de la pollution de l'air**

Les mesures de 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 sur un site. Les méthodes de mesure adoptées partent du principe qu'en ce qui concerne les phénomènes de contournement, une corrélation peut être établie entre l'analyse physico-chimique de l'air dans un site et la sévérité de la pollution de même site [43, 45].

#### **3.5.2.6. Mesures optiques**

Le but des mesures optiques est d'évaluer l'épaisseur de la couche de pollution déposée à la surface de l'isolateur. Un dispositif à rayons lasers permet à partir des rayons réfléchis (amplitude, décalage de phase, ...etc.), de calculer la constante diélectrique et l'épaisseur de la couche de pollution. La mesure de la sévérité de la pollution peut ainsi se faire sans toucher à cette couche [43, 45].

### **3.6. Méthodes d'essais sous pollution**

Pour comparer les performances de divers types d'isolateurs et sélectionner ceux qui présentent le meilleur comportement sous pollution, il est nécessaire de les soumettre à des essais. Ces derniers peuvent être effectués dans les conditions naturelles (sur site) ou au laboratoire. On distingue deux catégories de recherches sur les isolateurs pollués : les essais sous pollution naturelle et les essais sous pollution artificielle [45, 48].

### 3.6.1. Essais sous pollution naturelle

Ils consistent à installer, dans les différents sites pollués, des stations dans lesquelles on observe le comportement d'un certain nombre de chaînes d'isolateurs de longueurs ou de profils différents. Les qualités respectives de ces isolateurs, placés sous la même tension, sont appréciées en fonction des temps au contournement [49].

On peut classer les isolateurs en distinguant ceux qui ont contourné de ceux qui ont tenu, durant deux ou trois ans d'exposition, par exemple.

Ces essais ont l'avantage de tenir compte de l'effet de toutes les contraintes, dans toutes leurs complexités sur un site donné [45]. L'inconvénient majeur de ces essais est qu'ils nécessitent plusieurs années, pour pouvoir étudier valablement les performances des isolateurs.

### 3.6.2. Essais sous pollution artificielle

Ils consistent à reproduire en laboratoire les conditions de la pollution naturelle. Ils sont aujourd'hui largement utilisés et ont l'avantage d'être rapides.

Les méthodes d'essais qui demeurent actuellement normalisées sont les méthodes de la couche solide, la méthode du brouillard salin et la méthode de la pollution liquide.

#### a. Méthode de la couche solide

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  $\text{mg/cm}^2$ .

Par ailleurs, si l'humidification a lieu avant l'application de la tension, le paramètre de sévérité est défini par la conductivité de la couche polluante. Certains chercheurs ont utilisé une couche semi-conductrice comme agent polluant [50].

#### b. Méthode du brouillard salin

La solution saline utilisée dans la méthode du brouillard salin représente assez bien la pollution marine contenant un peu de matière insoluble. Dans cette méthode, l'isolateur soumis à la tension d'essai, est placée dans un brouillard salin dont le taux de salinité définit la sévérité.

D'après la classification des sites pollués, les valeurs de salinités appliquées sont choisies selon une progression allant de 2.5 à 160 kg/m<sup>3</sup> [42].

### **c. Méthode de pollution liquide**

Cette méthode s'apparente à la méthode du brouillard propre dans la mesure où un mélange liquide est appliqué sur l'isolateur avant l'essai. Cependant, dans ce cas la pollution n'est pas séchée avant l'essai. Elle est constituée d'eau, de craie et de méthylcellulose ou de kaolin. Comme pour la méthode de la couche solide la conductivité est ajustée par addition de chlorure de sodium.

Après quelques minutes d'égouttage, la tension d'essai est appliquée à l'isolateur sans humidification supplémentaire.

## **3.7. Technique 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.

### **3.7.1. Allongement de la ligne de fuite**

Cette méthode permet d'adapter le dimensionnement aux nouvelles conditions de pollution. Deux techniques sont utilisées :

- Le changement de type d'isolateur (pour rallonger la ligne de fuite) : c'est une technique très coûteuse et souvent impossible à réaliser en poste.
- L'utilisation de prolonger de ligne de fuite en matériaux polymères, qui sont collés sur la surface des isolateurs existants [48].

### **3.7.2. Isolateurs plats**

Les isolateurs sans nervures ont la propriété d'accumuler moins de pollution que les isolateurs traditionnels et s'autonettoyant très bien sous l'effet du vent [51].

### **3.7.3. Graissage périodique**

Par mesure économique, seuls les isolateurs de postes sont concernés. On utilise des graisses silicones. Grâce à ses propriétés hydrophobes, la graisse protège temporairement les isolateurs [48, 36].

### **3.7.4. Revêtement silicone**

Cette méthode consiste à appliquer, par pulvérisation ou au pinceau, un caoutchouc silicone qui se vulcanise à température ambiante à la surface des isolateurs. Ce revêtement protège les isolateurs et améliore leurs tenues sous pollution

### **3.7.5. Les isolateurs composites**

Ils ont de bonnes propriétés hydrophobes et peuvent être utilisés dans des conditions de pollution très sévères. Cependant, ces isolateurs, revêtus d'un polymère voient leurs caractéristiques changer au cours du temps ; ils peuvent vieillir sous l'effet des différentes contraintes (électriques et climatiques) auxquelles ils sont soumis en service.

### **3.7.6. Nettoyage des isolateurs**

Le nettoyage manuel et le lavage périodique hors tension sont fréquemment utilisés à travers le monde. Néanmoins, l'application de ces méthodes pose des problèmes majeurs à cause des interruptions de service, parfois assez longues. Pour éviter ces coupures, un lavage sous tension des isolateurs est réalisé à l'aide d'installations fixes ou mobiles. Dans les deux cas, il est effectué selon des règles strictes concernant la qualité de l'eau du lavage, le processus du lavage et les distances de sécurité, et ce afin d'éliminer tout risque de contournement pendant le lavage.

## **3.8. Conclusion**

La pollution des isolateurs est un facteur essentiel dont il faut tenir compte dans la conception des lignes électriques de haute tension.

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

Le fait de disposer d'une méthode de pollution artificielle permet de n'effectuer l'expérimentation (sur site) que sur un seul type d'isolateurs et éventuellement à un niveau de tension différent que celui prévu, ce qui constitue déjà un avantage considérable.

Afin d'être en mesure de fournir rapidement des renseignements concernant l'isolement nécessaire, il serait préférable de disposer d'une carte de sévérité des principaux sites pollués.

On propose de les classer en quatre catégories de sévérité auxquelles correspondent des longueurs minimales de lignes de fuite à respecter pour les isolateurs en site de service.

# Chapitre 04

## PARTIE EXPERIMENTALE

---

### 4.1. Introduction

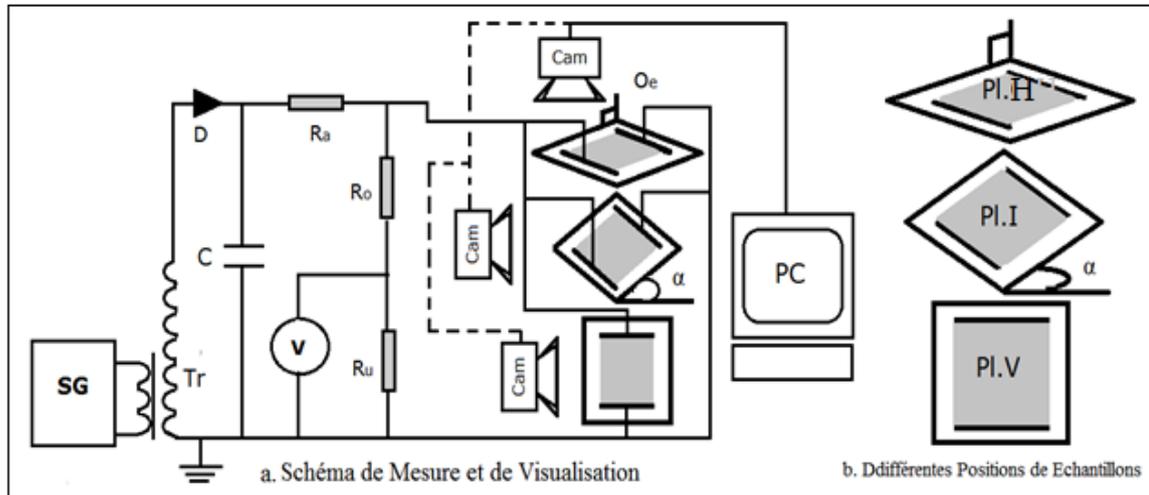
L'écoulement des gouttes d'eau sur la surface d'un isolateur solide, due soit à la gravité et/ou à la tension continue ou alternative est si omniprésent dans notre vie quotidienne que l'on pourrait se poser des tas de questions sur ce thème. Pourtant, bien que l'écoulement de gouttes et de filets d'eau soit habituel, et en devienne presque banal, mais d'un point de vue théorique, il s'agit là de problèmes souvent complexes. Le sujet a été peu étudié et est encore loin d'être totalement compris. Il reste de très nombreuses zones d'ombre dans ce domaine, qui feront couler beaucoup d'encre.

Dans ce chapitre, nous allons concentrer notre étude sur un système bien défini et apparemment simple qui est le plan incliné comme le montre la figure 4.1. Cela nous permet de simuler un isolateur extérieur en insérant des électrodes planes arrondies aux extrémités sur le film de l'isolant. La performance d'une surface isolante est liée à l'effet de certains paramètres géométriques et électriques des gouttes d'eau recouvrant une surface isolante hydrophobe sur sa tension continue positive de contournement. Cela en gardant la distance interélectrode fixe et égale à 6 cm et en variant le volume des gouttes d'eau, leur conductivité volumique, l'arrangement des gouttes sur la surface étudiée, ainsi que l'inclinaison de cette dernière par rapport à l'horizontale.

### 4.2. Modèle expérimental et techniques de mesure

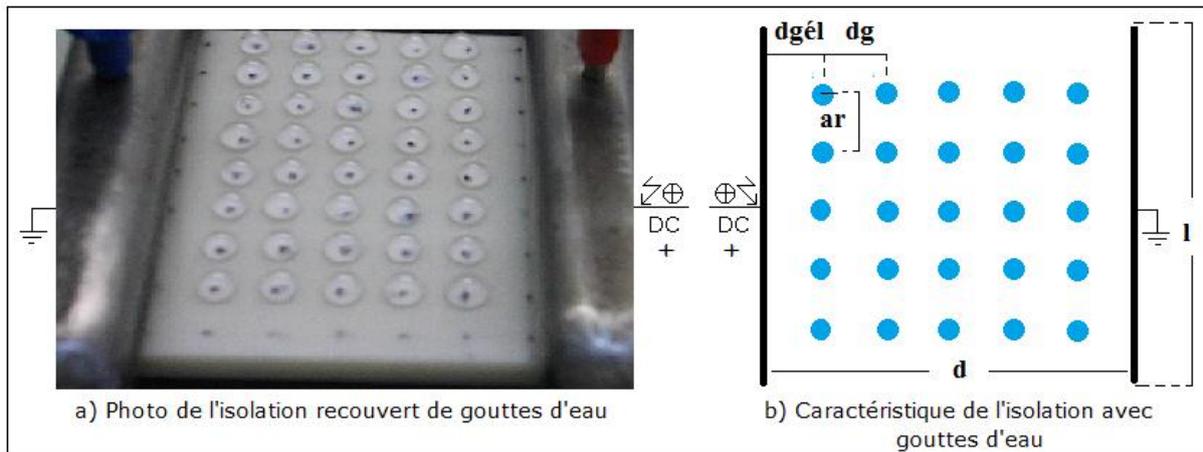
L'estimation de la performance d'une surface isolante hydrophobe en silicone recouverte de gouttes d'eau et la visualisation du phénomène électrique évoluant entre les électrodes de celle-ci peuvent être réalisées à l'aide du schéma électrique illustré par la figure 4.1. Le circuit de mesure de la tension de contournement est composé d'un transformateur (Tr), un voltmètre de crête V (AC/DC) à affichage numérique, une diode haute tension D (G270) pour redresser la tension alternative et un condensateur (C) de lissage de capacité égale à 10 nF. Le transformateur peut délivrer à son secondaire, à la sortie de la résistance de limitation de courant, une tension continue maximale de 135 kV dont la variation temporelle de sa rampe (4kV/s) peut être obtenue automatiquement à l'aide de l'appareil de commande manuelle ou automatique (SG). Enfin, le dispositif expérimental est relié aux bornes de la résistance de limitation de courant ( $R_a$ ) et du diviseur de tension résistif ( $R_0$ ,  $R_u$ ), auquel est connecté notre

objet d'essai ( $O_e$ ) qui n'est tout autre que le plan incliné en posant sur lui un film en silicone de taille environ 13 cm x 10 x cm 0.5 cm d'épaisseur et de deux électrodes planes arrondies aux extrémités afin de minimiser l'effet de bords (**Fig. 4. 2**).



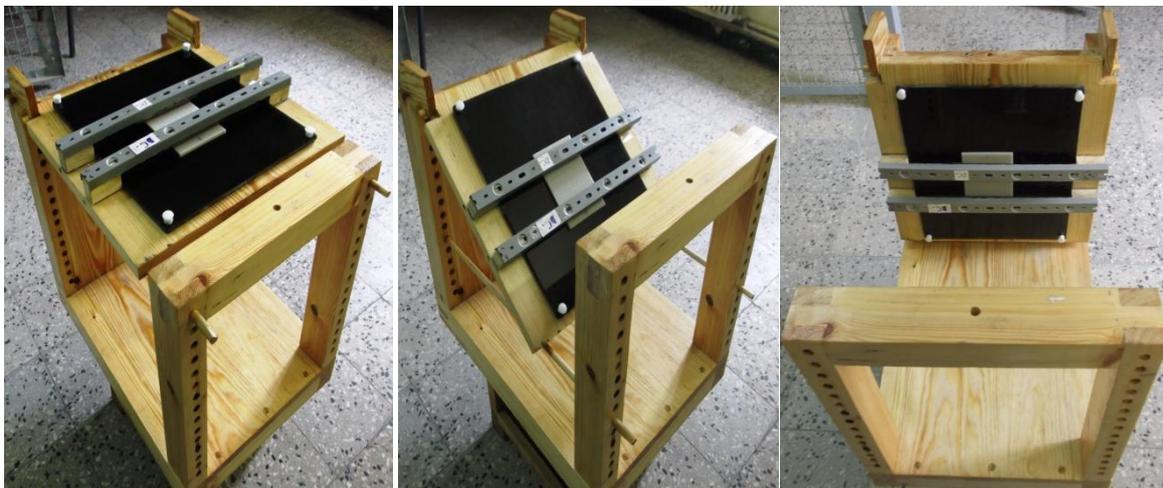
**Fig. 4. 1:** Schéma de mesure et de visualisation (a) des différentes positions des échantillons soumis aux tests (b) (SG : Appareil de Commande manuelle ou automatique du transformateur; T<sub>r</sub>: Transformateur BT/H; Cam: Caméscope numérique; PC: Ecran de PC; O<sub>e</sub>: Objet d'essai)

Le circuit de visualisation est constitué d'un Caméscope (Cam) pour l'enregistrement des différentes phases de la décharge se développant sur la surface en silicone limitée par les deux électrodes et un PC pour une meilleure observation et l'analyse de celle-ci. Le modèle expérimental, représenté en figure 4. 2b, est composé de deux électrodes planes de taille 13.5 cm x 1.8 cm x 1.8 cm, d'un film en silicone posé sur la plaque en plexiglace. Cette dernière est fixée sur le plan incliné. Une électrode est portée à la haute tension et l'autre est mise à la terre. Le plan incliné est en bois de 75 cm de longueur, 40 cm de largeur et de 48 cm de hauteur troué sur les deux côtés pour permettre la variation de l'angle entre 0° et 90°, Le 0° correspond à la verticale et le 90° à l'horizontale. Des points équidistants de 1 cm sont portés sur des échantillons en silicone. La distance séparant les deux électrodes planes et parallèles est de 6 cm. Celle-ci est gardée constante tout au long de cette étude. Ces points de référence nous guide lors de la pose, à l'aide d'une micro pipette, des gouttes d'eau de volume bien déterminé sur la surface de l'isolation (**Fig. 4. 2a**).



**Fig. 4. 2:** Positionnement des gouttes sur le film en silicone et entre les électrodes ( $a_r$ : Distance séparant deux rangées successives de gouttes d'eau sur la largeur de l'isolation,  $d$ : Distance interélectrodes,  $l$ : Largeur du film en silicone,  $d_g$ : Distance entre deux gouttes adjacentes sur la ligne de fuite de l'isolation,  $d_{gél}$ : Distance entre l'électrode HT et la première goutte se trouvant sur la ligne de fuite de l'isolation,  $r_G$ : Rangées grandes gouttes,  $r_g$ : Rangées petites gouttes, Numéros 1, 2, 3, ... Nombre de rangées,  $A_1, \dots, A_{12}$ : Arrangements)

Le modèle expérimental représenté en figure 4. 3, peut être orienté très facilement en variant son angle de  $0^\circ$ (a),  $\alpha^\circ$ quelconque (b) jusqu'à  $90^\circ$ (c).



a) Position horizontale

b) Position oblique

c) Position verticale

**Fig. 4. 3:** Différentes positions du dispositif

La solution polluante est composée d'un mélange d'eau distillée ou du robinet, selon la conductivité volumique souhaitée, auquel on ajoute de petites quantités de sel. Ainsi nous

fixons la conductivité de la solution ionique à la valeur désirée, grâce à un conductimètre à sonde mobile (**Fig. 4. 4**). Deux conductivités volumiques extrêmes ( $180 \mu\text{S}/\text{cm}$  et  $7 \text{ mS}/\text{cm}$ ) ont été utilisées.



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

Le choix de telles valeurs est justifié par celles acquises lors de la formation de la rosée ou de la pluie fine recouvrant les isolateurs réels. Il est à remarquer que l'élévation de la dernière valeur peut être expliquée par la dissolution des poussières et des acides dans la première pluie lavant l'atmosphère. Les volumes prélevés à l'aide de la micropipette sont de l'ordre  $45 \mu\text{l}$  et  $20 \mu\text{l}$ .

Pour chaque série de mesure, 16 essais ont été effectués. La valeur retenue est la moyenne arithmétique de l'ensemble de celles des tensions de contournement de la même série de mesure. Pour garantir les mêmes caractéristiques de la pollution, la conductivité volumique est vérifiée et maintenue constante avant chaque nouvel 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.

### 4.3. Dessiccateur

Un dessiccateur désigne un équipement servant à protéger des substances contre l'humidité. Au laboratoire, il est constitué d'une cuve circulaire surmontée d'un couvercle; l'ensemble est en verre épais ou en polycarbonate. 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.

A la fin de chaque essai l'échantillon en silicone est nettoyé ensuite placé sur le disque perforé du dessiccateur afin de les protéger contre l'humidité. Au préalable, une quantité suffisante de dessicatif (tel le gel de silice ou encore le 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 diamètre intérieur d'un dessiccateur varie généralement de 100 à 300 millimètres.



**Fig. 4. 5:** Photo montrant un dessiccateur

Pour ce cas, le couvercle doit toujours être *glissé* sur le joint rodé, pour assurer notamment une meilleure étanchéité. Un indicateur de saturation vire du bleu au rose au fur et à mesure qu'il se charge en humidité. Le gel de silice peut être régénéré par chauffage à 170°C environ.

#### **4.4. Correction des résultats de tension en fonction des conditions atmosphériques**

La tension de contournement de l'isolant 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, de pression et d'humidité ( $\theta = 20^\circ\text{C}$ ,  $P = 100 \text{ kPa}$  et  $H = 11 \text{ g/m}^3$ ), est donnée par la relation suivante :

$$\hat{U}_{c0} = \frac{K_h}{K_d} \cdot \hat{U}_c \quad (4. 1)$$

$\hat{U}_c$ : 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  $\theta$ , de 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.

$$K_d = \frac{2.93 \cdot P}{(273 + \theta)} \quad (4.2)$$

P: Pression en kPa;

$\theta$ : Température en °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  $\text{g}/\text{m}^3$ , est nécessaire, car  $K_h$  est donnée en fonction de cette dernière. L'abaque de la figure 4. 6, donne la transformation de l'humidité relative à l'humidité absolue, en fonction de la température. La valeur de l'humidité absolue lue sur l'abaque de la figure 4. 6 est reportée sur l'abaque de la figure 4. 7, pour déduire  $K_h$ .

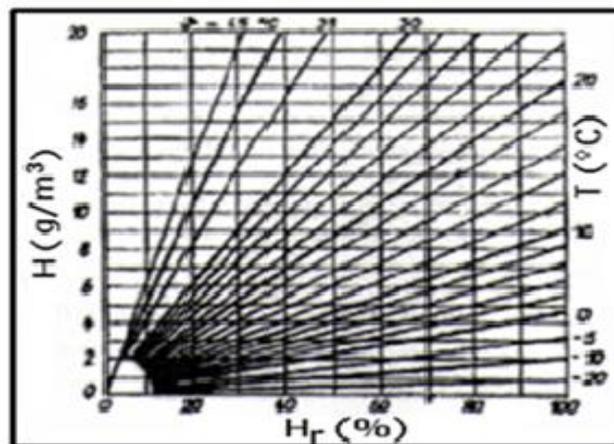


Fig. 4. 6: Transformation de l'humidité relative en humidité absolue

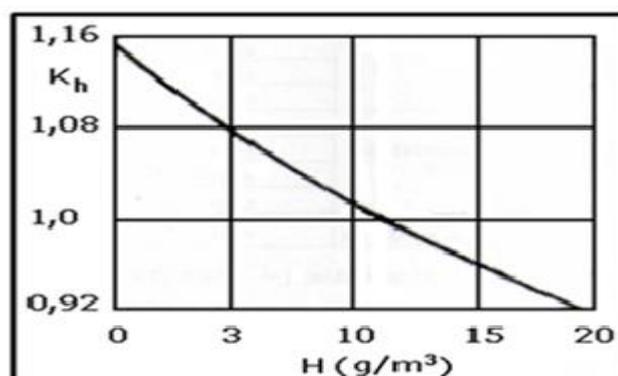


Fig. 4. 7: Facteur de correction ( $K_h$ ) en fonction de l'humidité absolue

### Exemple de calcul:

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

$T = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 1010 \text{ hPa} = 101 \text{ kPa}$ ,  $H_r = 59 \%$ , la tension linéique de contournement mesurée a pour valeur :  $\hat{U}_c = 38.31 \text{ kV}$ . En utilisant les formules de correction suscitées et les abaques ci-dessus (Fig. 4.6 et Fig. 4.7), nous trouvons:

$$K_h = 1,01;$$

$$K_d = (2.93 \cdot 101) / 293 = 1,0261.$$

$$\hat{U}_{c0} = (1,01 / 1,0261) \hat{U}_c \Rightarrow \hat{U}_{c0} = 38.93 \text{ kV}.$$

## 4.5. Résultats et discussions

### 4.5.1. 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 4.1.

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

Tab. 4. 1: Valeurs de quelques paramètres électriques de l'isolation en silicone

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

#### 4.5.2.1. Conductivité et nombre de rangées de gouttes d'eau

La figure 4. 8 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 56.65 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  $\mu\text{S/cm}$ , il en résulte que la

tension positive de contournement décroît rapidement 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 de conductivité plus élevée et égale à 7 mS/cm. La différence réside au niveau de la tension de contournement de l'isolation qui est faible dans le deuxième cas. Cet écart est de l'ordre de 9.73 %.

Electriquement la chute de la tension est due à la diminution de la résistance équivalente du système (**Fig. 4. 9**). Cette dernière n'est tout autre que la somme de la résistance équivalente de l'air compris entre les gouttes et celle de la résistance équivalente d'une rangée de gouttes d'eau, conformément à la relation 4. 3. Celle-ci est de la forme :

$$R_{\text{éq}(1)} = \sum_{i=1}^n (R_{gi}) + \sum_{i=1}^{n+1} (R_{ai}) \quad (4. 3)$$

En supposant que les rangées d'eau sont identiques, la résistance équivalente de l'arrangement des rangées de gouttes et de l'air est de la forme :

$$R_{\text{éq}(T)} = R_{\text{éq}(1)}/n \quad (4. 4)$$

Avec :

$R_{\text{éq}(1)}$  = Résistance équivalente d'une seule rangée de gouttes d'eau de même volume et équidistantes;

$R_{\text{éq}(n)}$  = Résistance équivalente de n rangées;

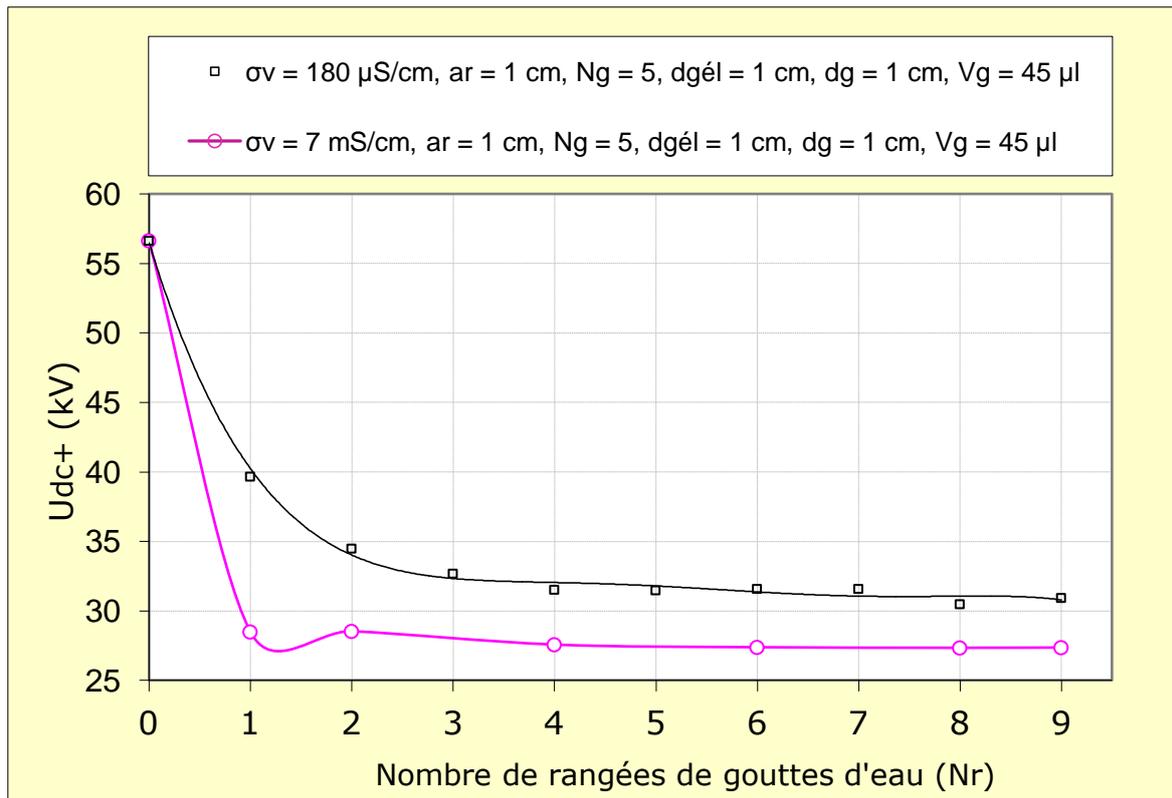
$R_{ai}$  = Résistance de l'air;

$R_{gi}$  = Résistance d'une goutte d'eau;

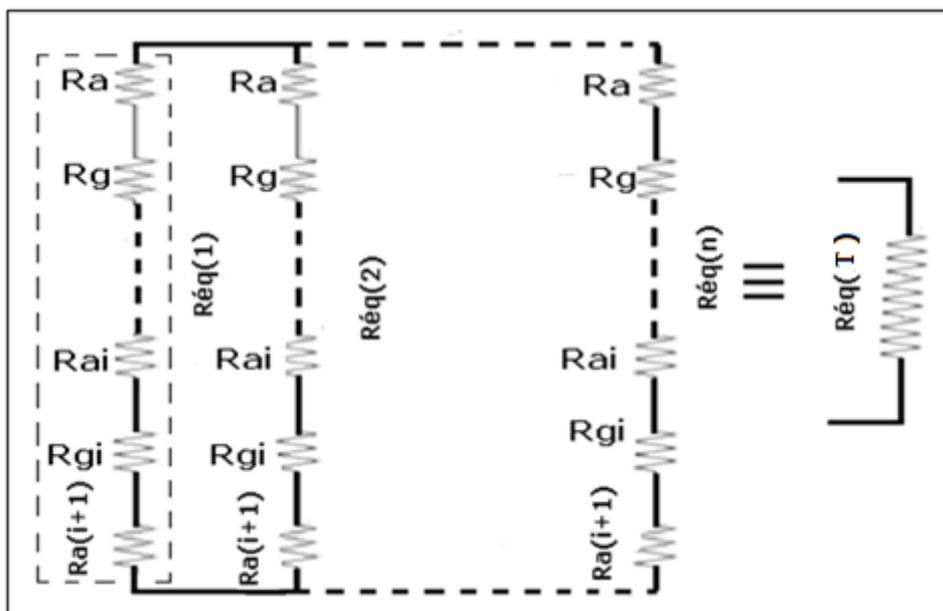
n = nombre de rangées.

Ce phénomène est dû à la forte distorsion du champ électrique qui se produit localement autour et au sommet de la gouttelette d'eau. Ce phénomène mène au déclenchement des décharges couronnes. Ces décharges se développent jusqu'au court-circuit des gouttelettes et le contournement de la surface s'ensuit.

Donc pour des conductivités élevées, les gouttes deviennent conductrices et la résistance équivalente est encore plus petite, ce qui implique la réduction de la tension de contournement à sa plus faible valeur.

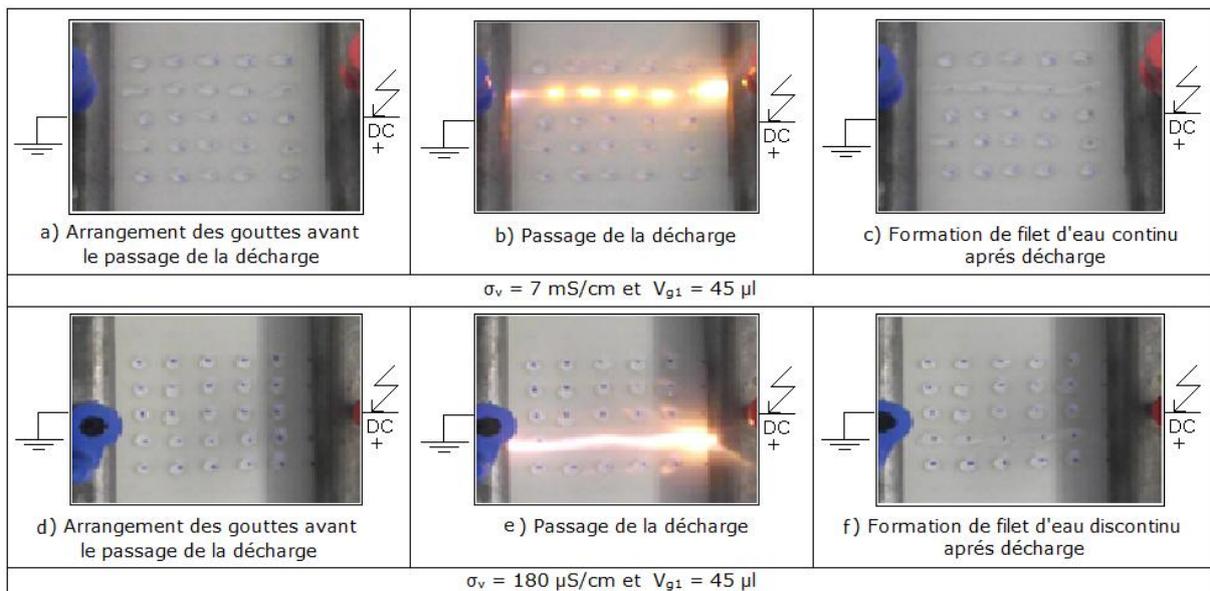


**Fig. 4. 8:**  $U_{dc+} = f(\sigma_v, N_r)$  d'une surface en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau ( $V_g = 45 \mu\text{l}$ )



**Fig. 4. 9:** Circuit électrique des résistances équivalentes des gouttes d'eau et de l'air du système étudié

Les photographies représentées en figure 4. 10 expliquent les principales phases de contournement d'une surface isolante 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 4. 10a et 10d nous montrent la forme des gouttes juste avant le passage de la décharge. Les figures 4. 10b et 10e 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 4. 10b par rapport celui indiqué sur la figure 4. 10e. Enfin le dégagement de chaleur est plus sévère en figure 4. 10b qu'en figure 4. 10e. 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 4. 10f, où le trajet est discontinu et de conductivité superficielle plus faible.

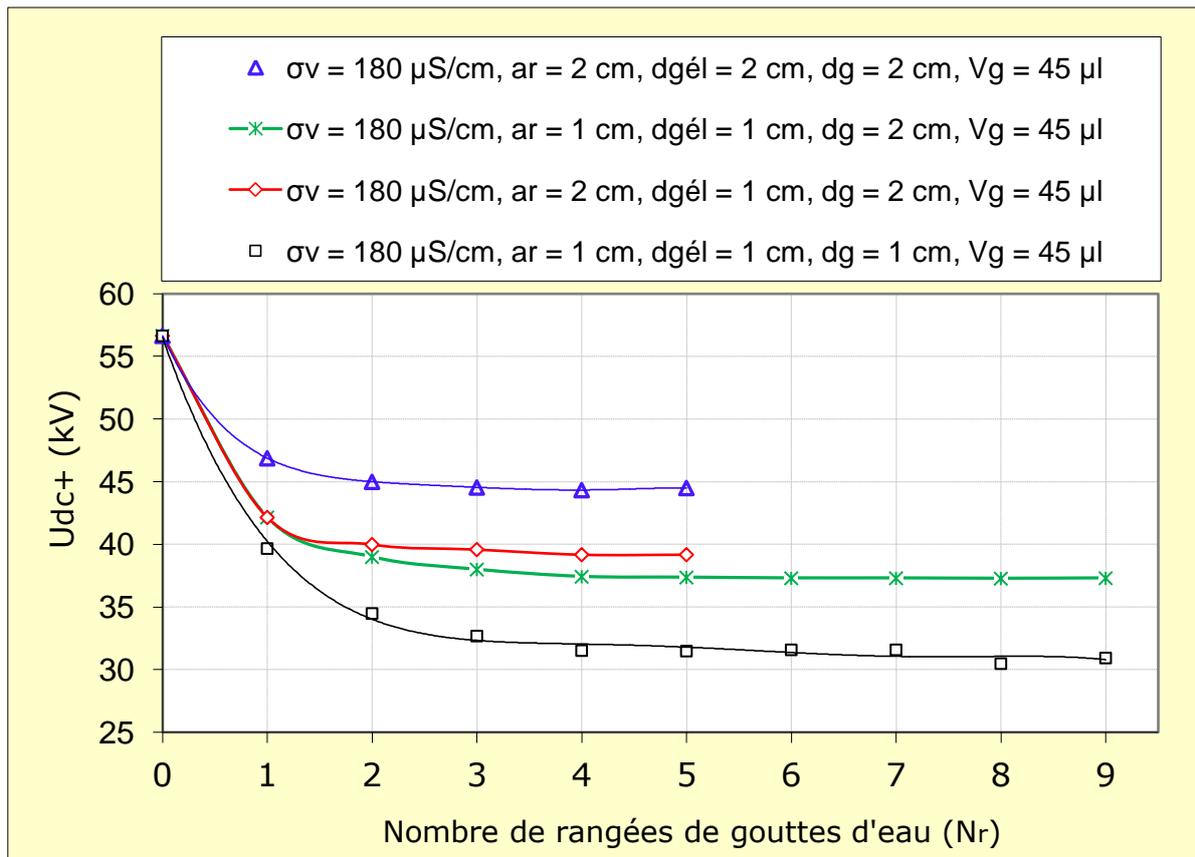


**Fig. 4. 10:** Couleur de lumière émise par la décharge pour  $\alpha = 0^\circ$ ,  $\sigma_v = 7\ \text{mS}/\text{cm}$  et  $\sigma_v = 180\ \mu\text{S}/\text{cm}$  et  $V_{g1} = 45\ \mu\text{l}$

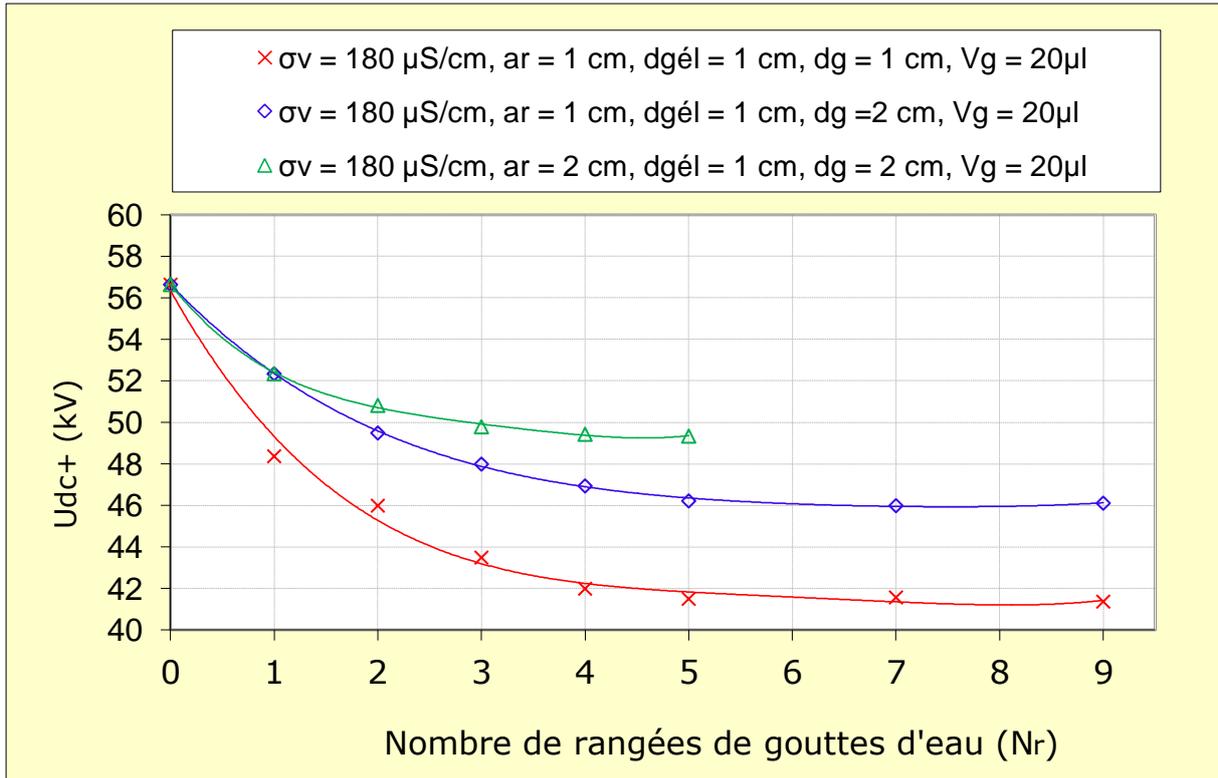
#### 4.5.2.2. Nombre de rangées espacement entre les gouttes d'eau

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

illustrée par les figures 4.11 et 4.12. La tension de contournement de l'isolation sans gouttes d'eau égale à 56.65 kV. Après dépôt de gouttes sur la surface du film la tension diminue jusqu'à atteindre une valeur constante (**Fig. 4. 11** et **4. 12**). 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 dû à la différence de leurs résistances équivalentes. Plus cette dernière est plus grande, plus la tension de contournement est plus importante.



**Fig. 4. 11:**  $U_{dc+} = f(N_r, a_r, d_g, d_{g\acute{e}l})$  d'une surface en silicone hydrophobe horizontale ( $V_g = 45 \mu\text{l}$ ,  $d = 6 \text{ cm}$ )



**Fig. 4. 12:**  $U_{dc+} = f(N_r, a_r, d_g, d_{g\acute{e}l})$  d'une surface en silicone hydrophobe horizontale ( $V_g = 20 \mu\text{l}$ ,  $d = 6 \text{ cm}$ )

$N_r$  : 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,

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

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

La figure 4.13 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. Cet écart peut être expliqué par un raccourcissement de l'espace entre gouttes 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 28 %.

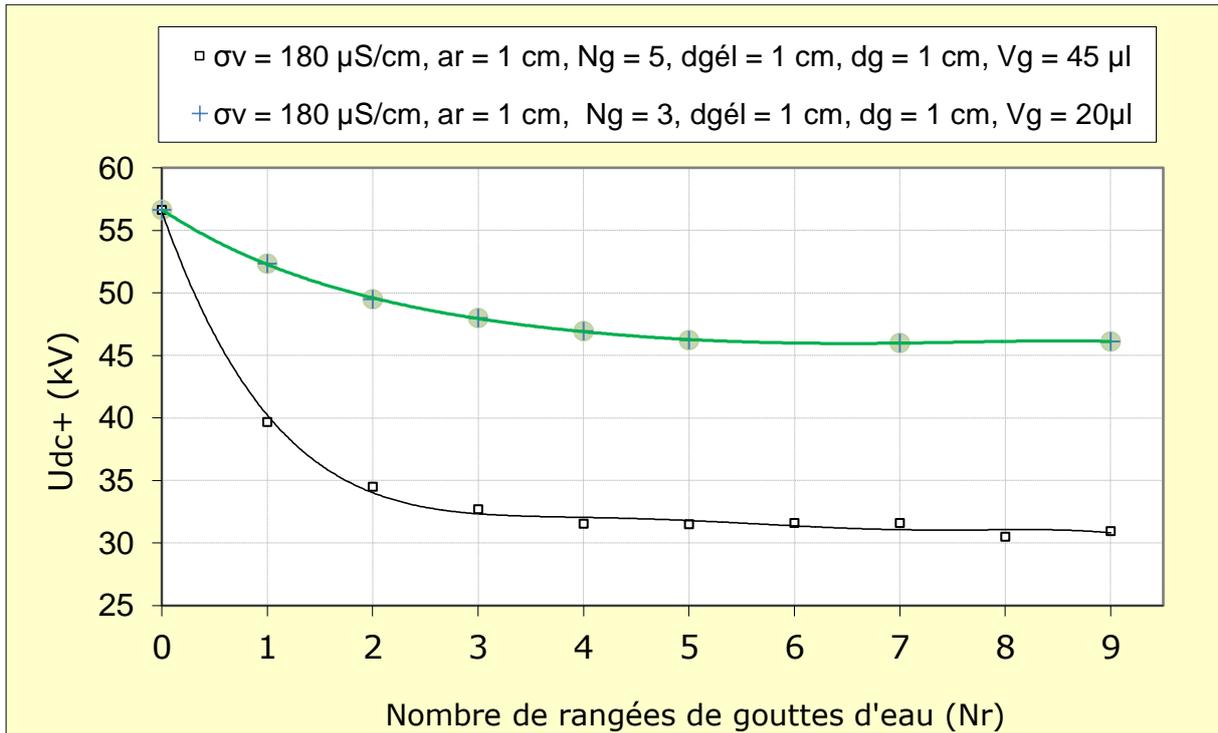
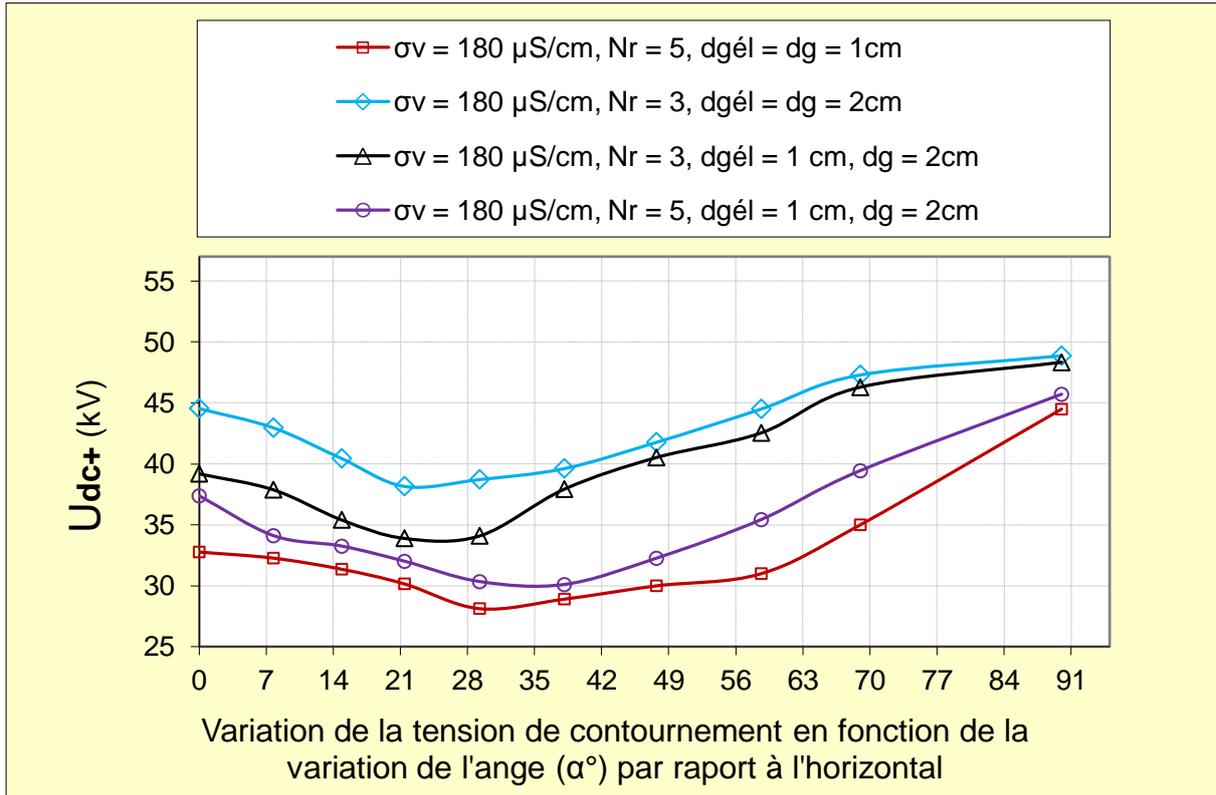


Fig. 4.13:  $U_{dc+} = f(V_g, N_r)$  d'une surface en silicone hydrophobe

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

La figure 4.14 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 gouttes d'eau à conductivité électrique 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 de figure. 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 toutes les 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 en silicone est justifiée par un raccourcissement maximale de l'espace entre gouttes d'eau par l'allongement optimale de ces dernière pour une déclinaison de la surface d'un angle de l'ordre  $29,27^\circ$ . 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 d'une part par la poussée due à la force électrique et d'autre part le poids gouttes qui agit dans le même sens, c'est-à-dire de l'électrode haute tension vers l'électrode terre.

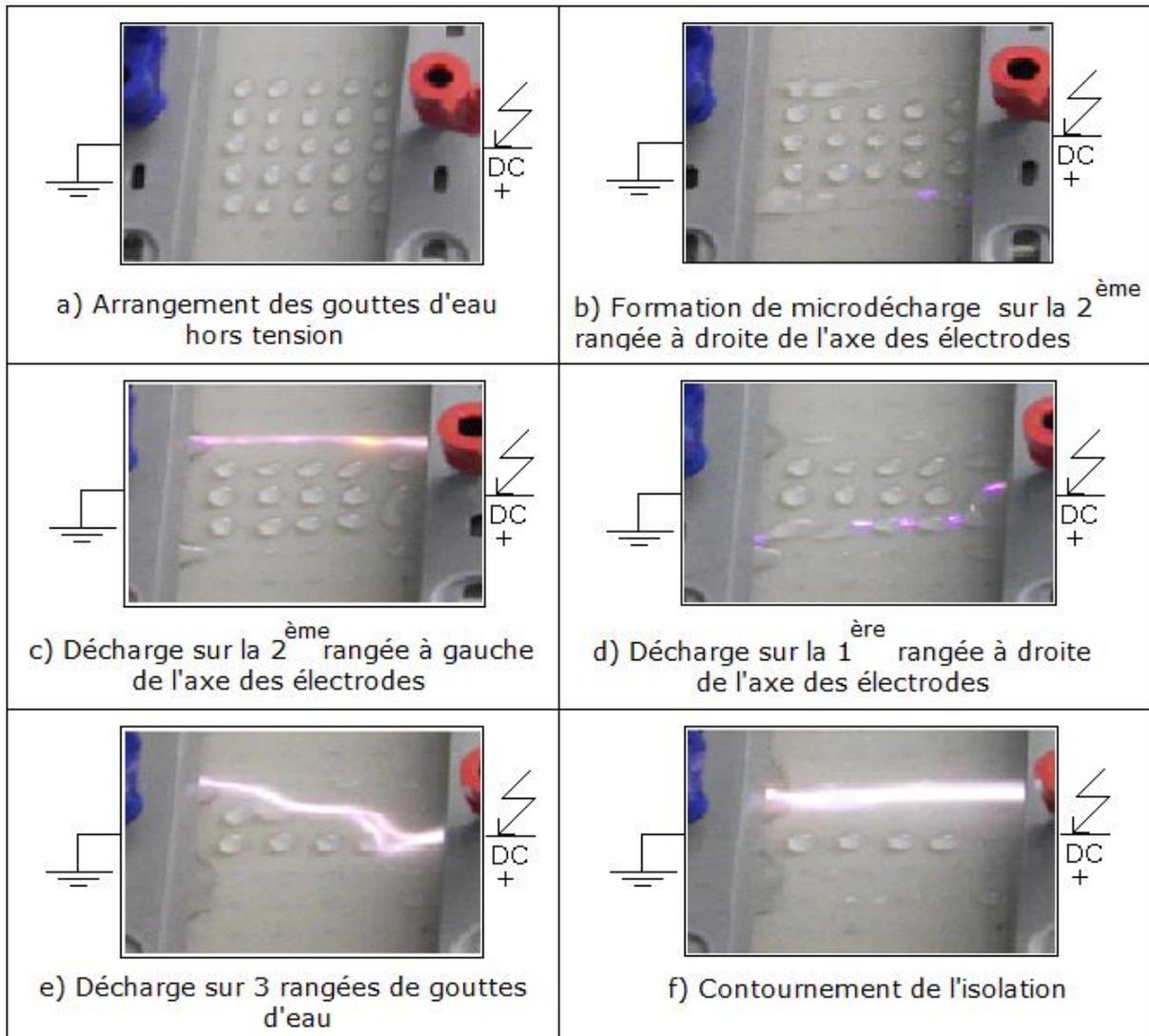
En position verticale de l'isolation, les gouttes ont tendance à quitter la surface avant même l'application de la tension. Celles-ci laissent fréquemment à leur décollage, de petites gouttes derrière elles et le contournement par arc finit par s'établir au dessus de ces minuscules gouttelettes, ce qui 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 grosses gouttes.



**Fig. 4. 14:**  $U_{dc+} = f(\alpha)$  d'une surface en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau

La figure 4.15 illustre les différentes phases de contournement d'une surface recouverte de gouttes d'eau et inclinée selon un angle  $\alpha_c = 29,27^\circ$ . L'évolution de la décharge dans ce cas s'étale sur quatre rangées afin de provoquer le contournement final. Avant l'application de la tension, la forme des gouttes d'eau est quasi-sphérique (**Fig. 4. 15a**). Après application de la tension celles-ci commencent à se déformer (**Fig. 4. 15b**) et à se 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.

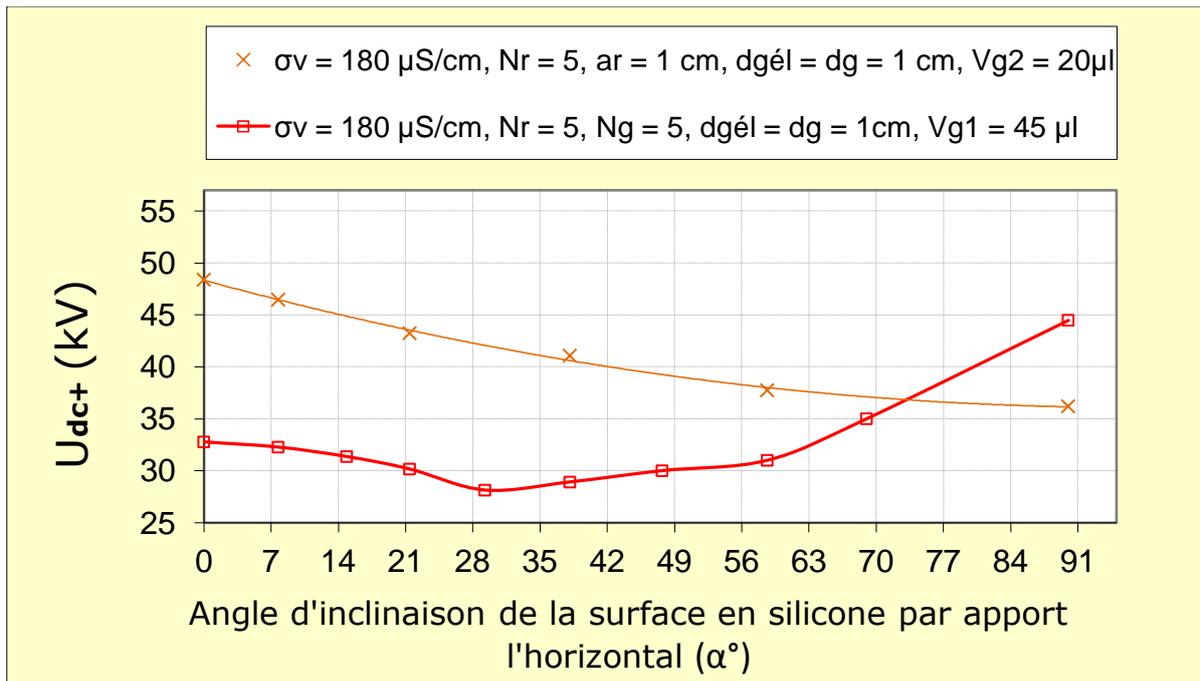


**Fig. 4. 15:** Différentes phases de contournement de la surface isolante pour  $\alpha_c = 29,27^\circ$ ,  $N_r = 5$ ,  $V_g = 45 \mu\text{l}$  et  $\sigma_v = 180 \mu\text{S/cm}$  ( $\alpha_c$ : Angle critique correspondant à la tension de contournement)

Sous tension continue positive, le champ appliqué est unidirectionnel et orienté de l'électrode HT vers celle mise à la terre. Alors les gouttelettes ont tendance à suivre les lignes créées par celui-ci. Elles commencent à se mouvoir en direction de l'électrode terre (**Fig. 4. 15b**). 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 ensuite dilatée. Au fil du temps le champ électrique s'intensifie au tour des gouttes déformées et particulièrement sur celle proche 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 sur des petits filets partiels (**Fig. 4. 15b** et **4. 15d**). Leur extinction peut survenir si les distances séparant ces filets partiels s'agrandissent (**Fig. 4. 15a**) pour se rabattre sur d'autres filets d'eau partiels plus rapprochés (**Fig. 4. 15c**). 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. 4. 15e** et **15f**). 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 1 cm réparties sur la largeur de film en silicone.

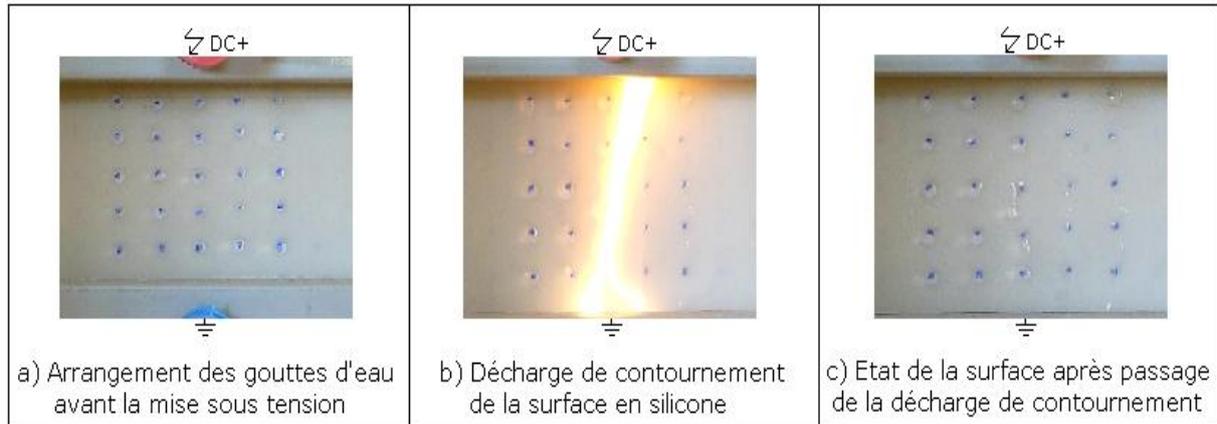
#### 4.5.2.5. Volume des gouttes d'eau et inclinaison de la surface en silicone



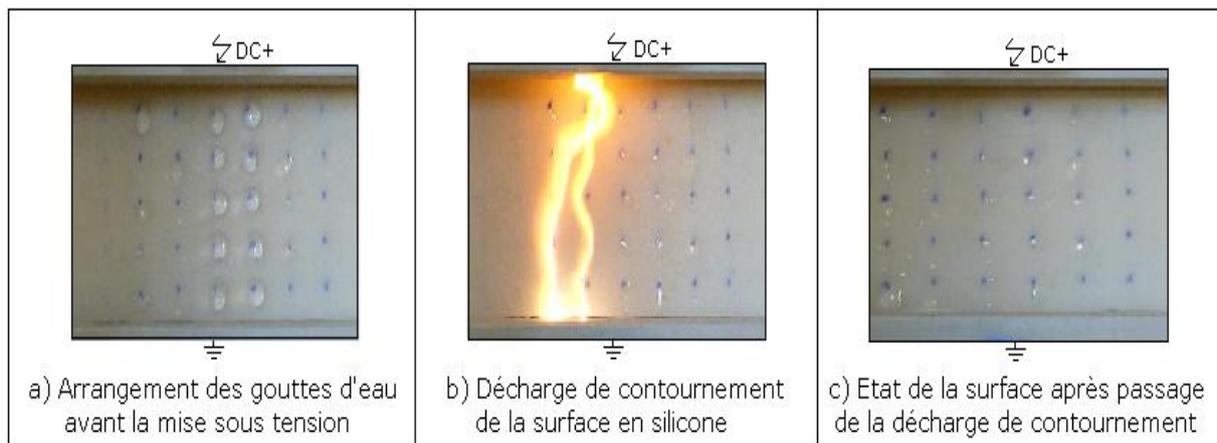
**Fig. 4. 16:**  $U_{dc+} = f(\alpha, V_g)$  d'une isolation en silicone hydrophobe

La figure 4.16 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 l'horizontale pour une conductivité électrique des gouttes d'eau constante et égale à  $180 \mu\text{S/cm}$ . 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. 4. 17**) contrairement aux grosses gouttes ( $V_g = 45\mu\text{l}$ ) qui quittent la surface en laissant de petites gouttes derrière elles (**Fig. 4. 18**).

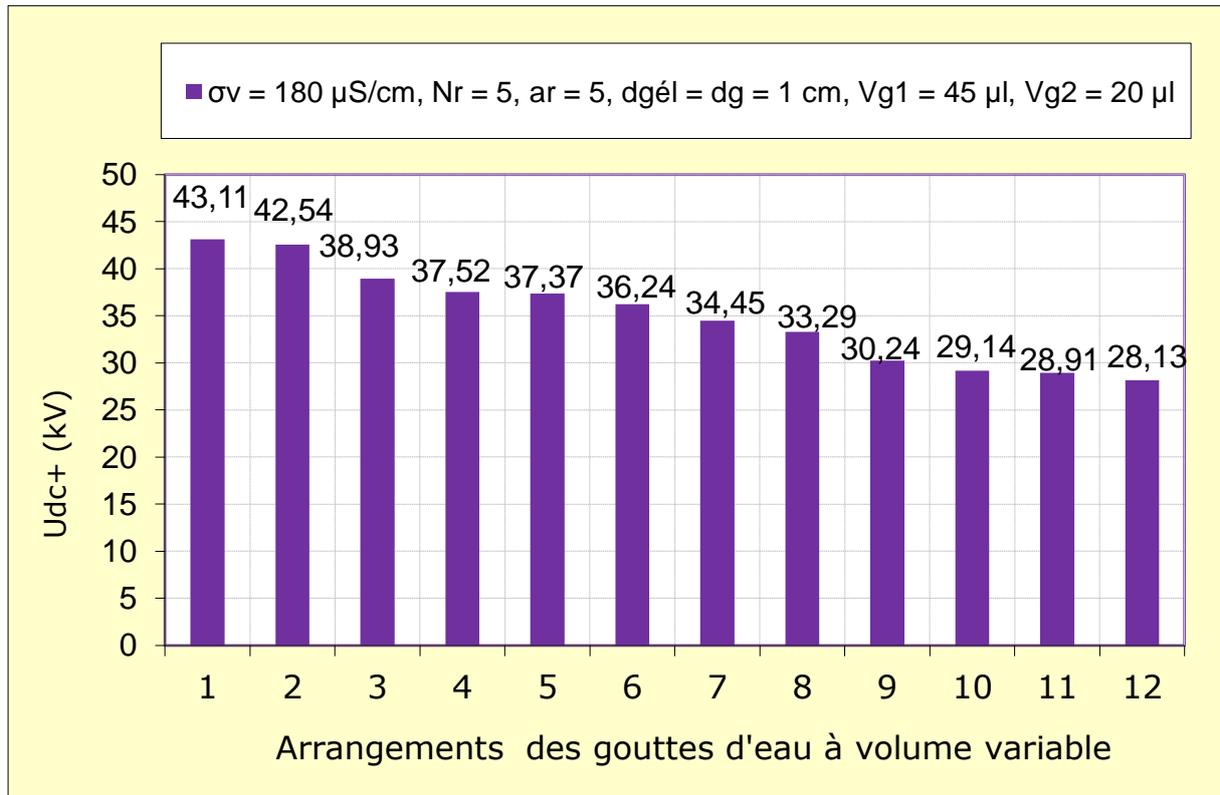


**Fig. 4. 17:** Contournement d'une surface en silicone recouverte de petites gouttes ( $V_g = 20\mu\text{l}$ ,  $\alpha = 90^\circ$ )



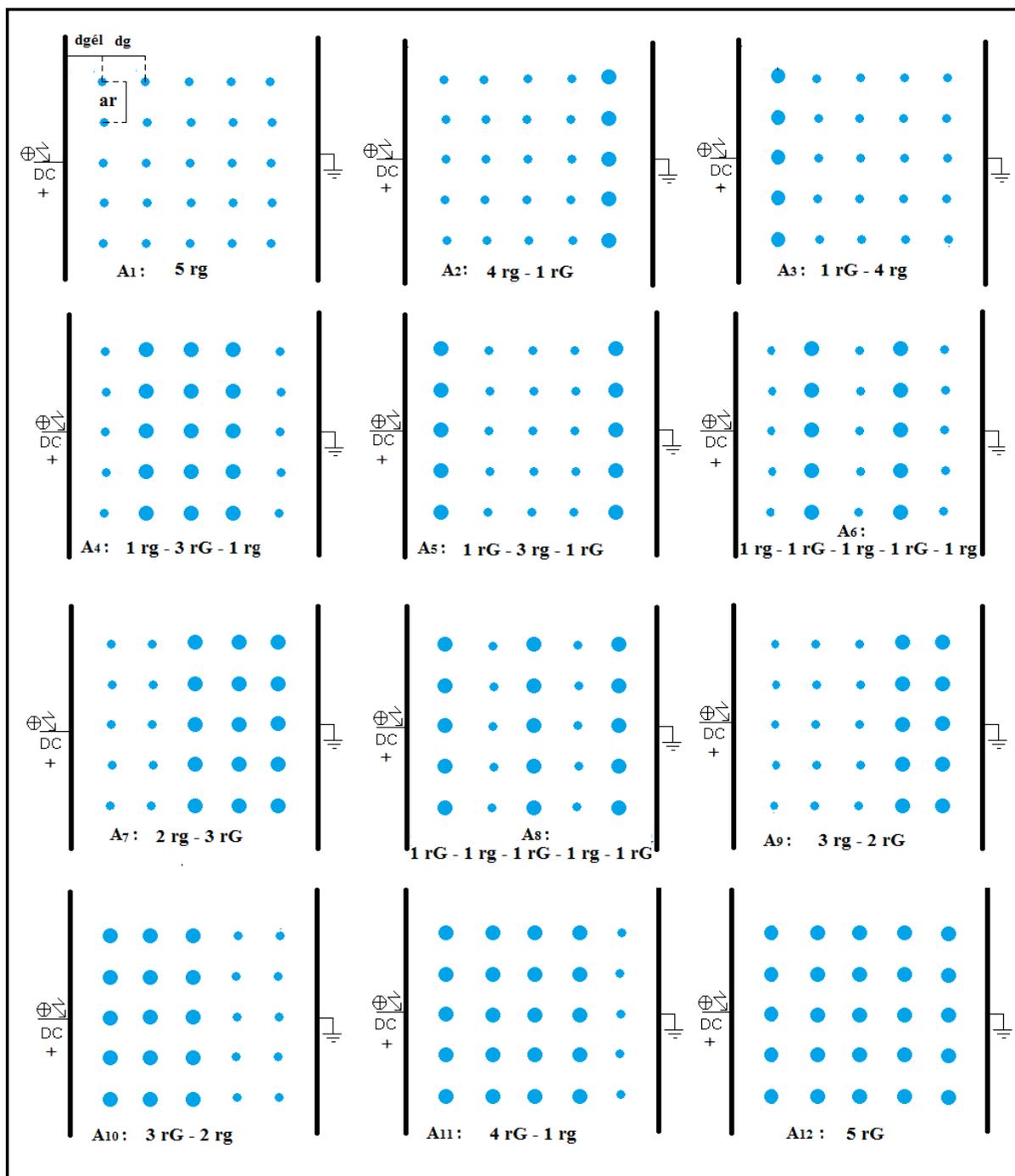
**Fig. 4. 18:** Contournement d'une surface en silicone recouverte de grosses gouttes ( $V_g = 45\mu\text{l}$ ,  $\alpha = 90^\circ$ )

#### 4.5.2.6. Arrangements de gouttes d'eau mixtes à volume différent



**Fig. 4. 19:**  $U_{dc+} = f(A_r)$  des gouttes d'eau à volume différents sur une surface en silicone hydrophobe ( $\alpha_c = 29,27^\circ$ )

La figure 4. 20 donne 12 divers arrangements déposés de gouttes d'eau à volumes différents sur une surface en silicone hydrophobe inclinée d'un angle critique  $\alpha_c = 29,27^\circ$ . 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  $180 \mu\text{S}/\text{cm}$ . il en découle 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. 4. 20. A<sub>12</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. 4. 20. A<sub>1</sub>**). Les autres arrangements offrent une rigidité, intermédiaire aux cas extrêmes suscités.



**Fig. 4. 20:** 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,

$l$  : Largeur du film en silicone,

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

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

$r_G$  : Rangées grandes gouttes,

$r_g$  : Rangées petites gouttes,

1, 2, 3, ... : Nombre de rangées,

$A_1, \dots, A_{12}$ : Arrangements

#### 4.6. Conclusion

L'examen de certains paramètres d'influence d'une isolation en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau à volume, conductivité électrique et angle d'inclinaison variables a conduit aux résultats essentiels suivants:

- La tension continue positive de contournement de l'isolation recouverte de gouttes d'eau est toujours inférieure à celle obtenue en leur absence quels que soient leur volume, leur conductivité électrique, leur arrangement et l'inclinaison de l'isolation considérée;
- L'allure de la tension de contournement de l'isolation en silicone recouverte de gouttes d'eau évolue selon une fonction décroissante jusqu'à un nombre limite de rangées de l'ordre de 5 et à partir duquel elle demeure constante quel que soit le nombre de rangées ajoutées. Cette valeur limite est une fonction de l'espace régissant entre deux rangées successives déposées le long de la largeur de l'isolation;
- L'effet négatif exercé par le volume des gouttes d'eau sur la rigidité diélectrique longitudinale de l'isolation en silicone hydrophobe, en position horizontale, se traduit par le raccourcissement de la distance inter-gouttes lors de l'élongation de ces dernières sous l'action du champ électrique lors de l'application de la contrainte de tension continue positive à l'isolation;
- L'influence de l'augmentation de la conductivité électrique des gouttes d'eau se traduit par une diminution de la tension de contournement de l'isolation par le comportement en tant qu'électrodes intermédiaires conductrices pointues du fait de leur déformation et de la décroissance de leur résistance électrique au fur et à mesure de l'ajout du sel à la solution considérée;
- L'allure de la tension de contournement en fonction de l'angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale de l'isolation en silicone hydrophobe, recouverte de grosses gouttes, présente un minimum correspondant à un raccourcissement maximal de la distance séparant ces gouttes. Pour des angles avoisinant  $90^\circ$ , celle-ci est pratiquement très proche de celle obtenue en absence de telles gouttes. Cette augmentation est due à

la disparition des grosses gouttes et leur remplacement par d'infimes petites gouttes influençant peu la tension de contournement de l'isolation. Par contre sous l'action de petites gouttelettes la rigidité de l'isolation est totalement, puisque ces dernières ne quittent pas la surface, mais leur allongement est optimal pour l'angle d'inclinaison de l'ordre de  $90^\circ$ ;

- La rigidité diélectrique longitudinale d'une isolation recouverte de gouttes d'eau augmente lorsque le volume des gouttelettes d'eau décroît de  $45\mu\text{l}$  à  $20\mu\text{l}$ . Lors de la combinaison de rangées des gouttes d'eau à rapport de leur taille supérieur ou égal à 2, cette rigidité croît avec l'augmentation du nombre de rangées de gouttes à faible volume.

# CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

---

Ce travail nous a permis de mieux saisir le mécanisme du contournement d'une surface isolante hydrophobe en silicone, recouverte de gouttes d'eau et mise sous une contrainte de tension continue positive. Les différents paramètres d'influence, investigués à travers cette étude, se résument à la taille des gouttes d'eau déposées sur le matériau, la conductivité électrique de ces gouttes et l'angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale de la surface hydrophobe de l'isolation essayée. Les résultats essentiels émanant de cette étude expérimentale ainsi que quelques perspectives en vue de leur amélioration ont été résumés comme suit:

- La rigidité diélectrique longitudinale d'une isolation recouverte de gouttes d'eau est toujours inférieure à celle obtenue sans ces gouttes;
- La tension de contournement d'un film en silicone sous l'action de gouttes d'eau évolue selon une fonction décroissante jusqu'à un nombre limite de rangées égal à 5 et à partir duquel elle demeure constante quel que soit le nombre de rangées ajoutées. Cette valeur limite est en relation avec la distance séparant deux rangées de gouttes d'eau adjacentes réparties le long de la largeur de l'isolation;
- L'augmentation de la conductivité électrique des gouttes d'eau entraîne la diminution de la tension de contournement de l'isolation par le fait que ces gouttes se comportent comme des électrodes intermédiaires conductrices pointues du fait de leur déformation et de la décroissance de leur résistance électrique au fur et à mesure de l'ajout du sel à la solution considérée;
- L'effet de l'angle d'inclinaison de l'isolation par rapport à l'horizontale se traduit par l'existence d'un minimum de la performance de celle-ci lorsque le volume des gouttes d'eau la recouvrant est de l'ordre de  $45\mu\text{l}$  pour un angle d'inclinaison bien déterminé. De part et d'autre de ce minimum, sa rigidité diélectrique longitudinale est plus élevée. Par contre, lorsque le volume de ces gouttes d'eau est réduit de plus de la moitié de la valeur suscitée, la tension de contournement en fonction de l'inclinaison est totalement décroissante et atteint sa plus faible valeur pour un angle d'inclinaison de l'ordre de  $90^\circ$ .

Pour ce qui est des perspectives, nous suggérons:

- De compléter cette étude expérimentale par la mesure de courant de fuite et de contournement résultant des divers arrangements de gouttes d'eau sur ce type de matériau, le volume des gouttes d'eau déposées en sa surface et surtout l'angle d'inclinaison de la surface de l'isolation comme dans le cas réel;
- De concevoir un modèle de simulation du phénomène de contournement d'une isolation hydrophobe recouverte de gouttes d'eau sous tension continue sur la base d'estimation des éléments du circuit électrique équivalent du système composé d'un arrangement de gouttes d'eau séparées par distances dans l'air sous la contrainte suscitée.

---

## 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. O. R. Hackman**. "The electrical performance of polymeric insulating materials under accelerated aging in a fog chamber". IEEE Transactions on Power Delivery, 3(3).
- [4] **P. Blackmore et D. Birtwhistle**. "Surface discharges on polymer insulator shed surfaces". IEEE transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 4, April 1997.
- [5] **Y. Higashiyama, S. Yanase, & T. Sugimoto**, "Behavior of Water Droplets Located on A Hydrophobic Insulating Plate under DC Fieled", Yamagata University, 4-3-16, Jonan, Yonezawa, 992-8510 Japan 0-7803-4943-1/98/\$10.00 0 1998 IEEE, pp. 1808-1813.
- [6] **R. Omranipour, L. Meyer, S. H. Jayaram, E. A. Cherney** , Inclined plane tracking and erosion evaluation of filled and unfilled silicone rubber, 0-7803-7053-8/1/\$10.00 2001 *IEEE*,pp.632-635,2001.
- [7] **N. M. Ijumba, A. C. Britten and J. P. Swartz**, "The Hydrophobicity of Silicone Rubber Insulators Subjected to Water Droplet Corona under HVDC Potential", **0-7803-7459-21021\$17.00D 2002 IEEE**, pp. 1884-1888
- [8] **K. Karakoulidis, Michael G. Danikas, P. Rakitzis**, "Deterioration Phenomena on Polymeric Insulating Surfaces Due to Water Droplets", Journal of Electrical Engineering, Vol. 56, N°. 7-8, 2005, 169–175
- [9] **R. Boudissa**, "performance des écrans sous tension alternative et continue", CNHT 2009, Sidi bel Abbés Algérie.
- [10] **H. Mekbel, M. Allaoua**, "Etude du comportement électrique d'une barrière isolante polluée sous tension continue positive", Mémoire d'ingénieur, Université de A. Mira de Bejaïa, 2010.
- [11] **G. P. Bruce & M. Rowland**, "Performance of Silicone Rubber in DC Inclined Plane Tracking Tests", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 17, N°. 2; April 2010, 1070-9878/10/\$25.00 © 2010 IEEE, pp. 521-532.
- [12] **C. Bär, R. Cervinka, R. Bärsch, J. Seifert, J. Lambrecht, H. J. Winter**, "A Comparative Evaluation of the Retention of the Hydrophobicity and the Tracking Resistance of Silicone
-

Elastomers under AC And DC Stresses", XVII International Symposium on High Voltage Engineering, Hannover, Germany, August 22-26, 2011.

[13] **V. V. Joseph & M. Joy Thomas**, "Performance of Silicone Rubber Polymeric Outdoor Insulator Material under AC and DC Corona", XVII International Symposium on High Voltage Engineering, Hannover, Germany, August 22-26, 2011,

[14] **A. Tilmatine**, "[http://www.univ-sba.dz/fsi/downloads/ETL437 Chapitre\\_7.pdf](http://www.univ-sba.dz/fsi/downloads/ETL437_Chapitre_7.pdf)"

[15] **M. Nemamcha**, "claquage des isolants hautes tensions". 2001.

[16] **D. Dumora**, Matériaux isolants céramiques en électrotechnique, Techniques de l'ingénieur D275-1975.

[17] **X. Ducouret**, "Lignes aériennes : matériels isolateurs", Technique de l'ingénieur, Référence D4423, Paris 2006.

[18] **J. L. Halary et F. Lauprêtre**, "De la macromolécule au matériau polymère ", Edition Berlin, Paris, 2006.

[19] **J. Phalippou**, "Verre : Aspects théorique", Technique de l'Ingénieur, Référence AF3600, Montpellier, Juillet, 2001.

[20] **J. P. Mercier**, "Polymérisation des monomères vinyliques, Procédés et matériaux nouveaux", Première édition Presses Polytechnique Romandes, Suisse, 1983.

[21] **A. Anton et J.L. Steinles**, "Micas et produits micacés", Techniques de l'Ingénieur, Référence D2360, Toulouse, Mai 1997.

[22] **R. Fournie**, " Les isolants en électrotechnique, Essais, Mécanisme de dégradation application industrielle ", Edition Eyrolles, Paris, 1990.

[23] **P. Robert**, " Matériaux de l'électrotechnique ", Volume II, Edition Dunod, 1987.

[24] **S. Djafri**, "pollution des isolateurs". Mémoire d'ingénieur, promotion 1982, ENP Alger.

[25] **P. R. Dvornic, R. W. Lenz**, Polysiloxanes, in: High temperature siloxane elastomers, Basel: Huthig & Wepf, 1990, pp.25-83.

[26] "[www.wacker.com](http://www.wacker.com)".

[27] "[http://www.bluestarsilicones.com/silicones/lang/fr/Bluestar silicones/histoire](http://www.bluestarsilicones.com/silicones/lang/fr/Bluestar%20silicones/histoire)".

[28] **D. Saad**, " Effet de la décharge couronne sur les surfaces isolantes et les surfaces métalliques ", mémoire magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2011.

[29] **M. D** "Influence du vieillissement thermique sur les propriétés de l'EPDM (éthylène propylène diène monomère)". Thèse de magister, UMM T-O 2002.

[30] **D. F. Warne**, "Génie électrotechnique". Édition 2007.

[31] "Méthode d'essai pour la détermination de la résistance des isolants solides". Publ. CEI, No.

---

167, Genève, 1964.

- [32] **Fröhlich**, "theory of dielectrics", oxford Univ. press, 1949.
- [33] **E. Aubert**, "Diagnostic optique du vieillissement électrique des résines époxydes sous faible champ électrique". Thèse de doctorat de l'université Toulouse III – Paul Sabatier, novembre 2008.
- [34] **N. Lahoud**, "Modélisation du vieillissement des isolants organiques sous contrainte électrique application à la fiabilité des matériaux». Thèse de doctorat de l'université Toulouse III – Paul Sabatier. Mars 2009.
- [35] **A. Mekhaldi**, "Etude du développement d'un arc électrique sur des surfaces isolantes contaminées par la pollution désertique", Thèse de Magister, Génie électrique, ENP 1990.
- [36] **A. Cimador, S. Vitet**, "La pollution des isolateurs", EDF-Epure, No. 27, Juillet 1990.
- [37] **G. Neumärker**, "Verschmutzungs Zustand und Kriechweg", Monatsber. D. Deut. Akad. Wiss., Berlin, vol.1, pp.352 – 359, 1959.
- [38] **H. Streubel**, "The influence of non-uniform contamination on the flashover voltage of insulators" *4th International Symposium on High Voltage Engineering, Rapport 46-10, Athens, Greece*, 5-9 September 1983.
- [39] **A. Mekhaldi**, "Etude des phénomènes de conduction et de décharges électriques sur des surfaces isolantes polluées sous tension alternative 50 Hz", Thèse de Doctorat, ENP, Département de Génie Electrique, Laboratoire de haute tension, Septembre 1999.
- [40] **D. Namane**, "Effet de la discontinuité de la couche de pollution sur le comportement d'isolateur de haute tension, sous la fréquence 50Hz", Thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Algérie, Algérie, Février 1998
- [41] **CEI 60**, "Technique des essais à M.T, définitions et prescriptions générales aux essais", Première édition 1973.
- [42] **W. Heise, G. F Luxa, G. Revrery et M. P. Verma**, "Estimation de la méthode d'essais sous pollution artificielle par couche solide", CIGRE, Rapport 33-09, Paris. France, 1982.
- [43] **P. J. Lambeth, H. Auxel et M. P. Verma**, "Méthode de mesure de la sévérité de la pollution compte tenu de son influence sur le comportement des isolateurs à haute tension", *Electra* N°. 20, pp 95-100, Janvier 1972.
- [44] **A. Boubakeur**, "Essais d'isolateurs pollués dans les conditions naturelles", rapport interne, I. W. N, Politeknika, Varsovie 1978.
- [45] **M. Tegar**, "Etude mathématique des mécanismes de développement des décharges électriques sur des isolateurs installés en régions polluées", Thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Algérie,
-

Algérie, Juillet 1993.

- [46] **A. Meziane, Y. Thaminy**, "Modélisation dynamique du phénomène de contournement des isolateurs pollués sous tension continue". Projet de fin d'étude, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Algérie, 2002.
- [47] **CIGRE, groupe de travail du comité d'étude, N°33**, "Mesure de la sévérité de pollution des sites et application au dimensionnement des isolateurs pour les réseaux à courant alternatif", *Electra*, N° 64, mai 1979.
- [48] **C. H. A. Ely, P. J. Lambeth, J. S. T. Looms, D. A. Swift C.E.G.B** " Contournement des polymères humides et pollués l'ailette Booster", *CIGRE, Rapport 15 - 02, Paris, France*, 1978.
- [49] **S. Bouazabia, T. Chikhaoui**, "Méthodes d'essais sur des isolateurs pollués dans les conditions désertiques", Projet de Fin d'Etudes, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Algérie, Juin 1988.
- [50] **M. Tegar**, "Modélisation d'isolateurs pollués soumis à divers paramètres électro géométriques". Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Algérie, Algérie, 2003.
- [51] **A. Cimador, M. Cojan, P. Hautefeuille et M. Moreau**, "Méthodes de dimensionnement des isolateurs de Lignes Aériennes en régions polluées", *CIGRE, Rapport 33-04, Paris, France*, 1978.
- [52] **R. Boudissa, A. Bayadi, R. Bärsch**, " Performance des barrières isolantes hydrophobes et hydrophiles sous tension alternative", CNHT, Laghouat, Algérie, 2013.
-

## **Résumé :**

Dans le cas d'une surface isolante hydrophobe en silicone sous tension continue positive à inclinaison variable, peu de travaux théoriques et expérimentaux ont été effectués. Afin d'améliorer l'augmentation de la puissance qui transite dans les lignes de transport, les réseaux interconnectés entre (pays et continents) et les équipements accompagnants ces derniers tels que (les parafoudres, les isolateurs,...etc.), il est nécessaire de bien dimensionner le système d'isolation pour apporter une prouesse technique sur la tenue de la rigidité diélectrique. L'objectif essentiel recherché dans ce mémoire, consiste justement à la contribution à l'optimisation de la rigidité diélectrique de différentes positions (l'horizontale, l'inclinaison et la verticale) de la surface hydrophobe en silicone mise sous tension continue positive dans une atmosphère similaire à la rosée du matin. Lors de cette investigation, l'influence des paramètres importants tels que la variation de l'angle  $\alpha$  par rapport à l'horizontale, la conductivité électrique des gouttelettes d'eau, le volume et les arrangements de ces dernières ont été abordés. Les résultats découlant de cette analyse montrent que la rigidité diélectrique de l'isolation en silicone recouverte de gouttes d'eau évolue selon une fonction décroissante jusqu'à un nombre limite de rangées de l'ordre de 5 et à partir duquel elle demeure constante quel que soit le nombre de rangées ajoutées. En position horizontale, le volume des gouttes exerce un effet négatif sur la tenue de la rigidité diélectrique par rapport à l'état sec. La rigidité diélectrique d'une surface hydrophobe en silicone recouverte de gouttes à faible conductivité volumique, décroît plus ou moins rapidement par rapport à la même surface lorsque celle-ci est recouverte de gouttes d'eau du même volume à conductivité volumique élevée, pour devenir minimale et constante à partir d'un certain arrangement de gouttes. Les petites gouttelettes d'eau appliquées sur la surface de l'isolation hydrophobe en silicone sur un plan incliné donne une allure décroissante de la tension de contournement jusqu'à atteindre une valeur limite correspondant à l'angle  $90^\circ$ . Mais par contre, les grosses gouttes donne une décroissance de la rigidité diélectrique jusqu'à un angle critique ( $\alpha_c$ ), puis celle-ci remonte de valeurs pour atteindre le maximum contrairement aux petites gouttes. L'alternance des rangées des deux volumes de gouttes d'eau ( $20\mu\text{l}$  et  $45\mu\text{l}$ ) injectés sur la surface de l'isolation hydrophobe en silicone pour la même conductivité volumique, correspondant un angle d'inclinaison critique, donnent des rigidités diélectriques intermédiaires respectivement aux rigidités des deux volumes suscités.

**Mots Clés :** Rigidité Diélectrique, Hydrophobie, Tension Continue Positive, Isolation.

