

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Abderrahmane MIRA de Bejaia

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

Mémoire de Fin de Cycle

Présenté par

M^r: HAI Salim

M^r: MESSOUAF Redha

En vue de l'obtention d'un Diplôme de Master en Génie Electrique

Option : Techniques de Haute Tension

Thème

Effet de l'inclinaison sur le contournement d'une surface en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau sous tension continue

Soutenu publiquement le 26/06/2014 devant le jury composé de :

M^r. ZEBBOUDJ Youcef Professeur Univ. Bejaia Président

M^r. SAHLI Zahir MCB Univ. Bejaia Examineur

M^r. BOUDISSA Rabah Professeur Univ. Bejaia Rapporteur

M^{me}. Athmani Samia Magister Univ. Bejaia Co promotrice

REMERCIEMENT

Nous remercions le dieu pour le courage, la patience et la santé qui nous ont été utile tout au long de notre parcours.

Nous tenons à adresser nos vifs remerciements à **Mr Boudissa Rabah** qui a proposé et dirigé ce projet et pour sa entière disponibilité, son aide et ses précieux conseils.

Notre remerciement à **Mme Atmani Samia** pour son aide. Elle nous a dirigés et conseillés lors des travaux expérimentaux.

Notre sincère gratitude va aussi aux membres du jury qui ont bien accepté de juger ce présent travail.

Que tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin à l'élaboration de cette présente étude, trouvent ici l'expression de nos sincères remerciements et profonde reconnaissance.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

+ *La mémoire de ma mère*

+ *Mon père et ma grand-mère que dieu les
bénisse*

+ *Mes frères et sœurs*

+ *Mon binôme ainsi qu'à toute sa famille*

+ *Mon cher ami Arezki*

+ *Tous mes amis*

Salim

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

 *A mes parents qui mon toujours soutenu dans mes études*

 *Mes frères et sœurs*

 *Mon binôme ainsi qu'à toute sa famille*

 *Mon cher ami Arezki et tous mes amis*

Rédha

Sommaire**INTRODUCTION GENERALE**

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre 01**ETAT DE L'ART**

1.1 Introduction.....	3
1.2 Synthèse des travaux de recherches concernant l'angle d'inclinaison d'une surface en silicone recouverte des gouttes d'eau sur sa performance en tension continue.....	3
1.2.1 Yoshno. Higashiyama.....	3
1.2.2 H.-J. Kloes et D. König.....	4
1.2.3 Shiho Yanase, Toshiyuki Sugimoto.....	5
1.2.4 Yoshimura N, Kumagai S.....	7
1.2.5 B. X. Dul, Yong Liul.....	9
1.2.6 C. Baer et autres.....	11
1.2.7 S. Thong-Om, W. Payakcho.....	12
1.3 Conclusion.....	14

Chapitre 02**ISOLATIONS ET LEURS APPLICATIONS**

2.1 Introduction.....	15
2.2 Définition.....	15
2.2.1 Isolant.....	15
2.2.2 Isoler.....	16
2.2.3 Isolement.....	16
2.2.4 Isolation.....	16
2.2.5 Diélectrique.....	16
2.2.6 Isolateur.....	17
2.2.7 Fonctionnement et constitution d'un isolateur.....	17
2.3 Différents types d'isolants.....	17
2.3.1 Isolant gazeux.....	17
2.3.2 Isolants liquides.....	18

2.3.3 Isolants solides.....	18
2.4 Propriétés des isolants.....	18
2.4.1 Propriétés électriques.....	18
2.4.1.1 Rigidité électrique.....	19
2.4.1.2 Permittivité.....	19
2.4.1.3 Résistance et résistivité électrique.....	20
2.4.1.4 Angle de perte et le facteur de dissipation.....	21
2.4.2 Propriétés thermiques.....	23
2.4.3 Propriétés mécaniques.....	23
2.5 Phénomènes de conduction dans les diélectriques solides.....	23
2.5.1 Différents mécanisme de calquage.....	24
2.5.1.1 Tension critique de claquage U_C	24
2.5.1.2 Claquage thermique.....	24
2.5.1.3 Claquage d'origine électronique.....	24
2.5.1.4 Décharge partielle.....	25
2.6 Matériaux utilisés pour les isolants solides.....	25
2.6.1 Céramique.....	26
2.6.2 Verre.....	26
2.6.3 Porcelaine.....	26
2.6.4 Pyrex.....	27
2.6.5 Silicone.....	27
2.6.5.1 Définition.....	27
2.6.5.2 Liaison Si-O-R.....	27
2.6.5.3 Différentes familles de silicone.....	28
2.6.5.4 Hydrophobie.....	29
2.6.5.5 Superhydrophobicité.....	29
2.6.5.6 Propriétés des silicones.....	30
2.6.5.7 Propriétés diélectriques des silicones.....	31
2.6.5.8 Applications des élastomères silicones dans l'isolation électrique.....	31
2.7 Conclusion.....	32

Chapitre 03**POLLUTION ATMOSPHERIQUE**

3.1 Introduction.....	33
3.2 Définition.....	33
3.2.1 Pollution.....	33
3.2.2 Salinité.....	34
3.2.3 Couche de pollution.....	34
3.2.4 Degré de pollution.....	34
3.2.5 Pollution des isolateurs.....	34
3.2.6 Formation des couches polluantes sur les isolateurs.....	35
3.3 Différentes sources de pollution.....	35
3.3.1 Pollution naturelle.....	35
3.3.2 Pollution industrielle.....	36
3.3.3 Pollution mixte.....	36
3.4 Conséquences de la pollution.....	37
3.5 Mesure de la sévérité de pollution des sites.....	37
3.5.1 Densité de dépôt de sel équivalent (DDSE).....	37
3.5.2 Conductance superficielle.....	38
3.5.3 Courant de fuite.....	38
3.6 Classification des sites pollués.....	38
3.7 Influence des facteurs climatiques sur les isolateurs pollués.....	39
3.8 Influence de la répartition de la pollution sur la surface des isolateurs.....	40
3.8.1 Répartition Longitudinale non-uniforme et non-périodique.....	40
3.8.2 Répartition transversale non-uniforme.....	41
3.8.3 Répartition Longitudinale non-uniforme périodique.....	41
3.9 Phénomène de Mouillage.....	41
3.10 Contournement.....	43
3.10.1 Contournement sous pollution des isolateurs.....	43
3.10.2 Contrainte de contournement.....	44
3.10.3 Tension de contournement.....	44
3.10.4 Tension de tenue.....	45

3.10.5 Courant de fuite.....	45
3.10.6 Courant de fuite critique.....	45
3.10.7 Longueur critique d'arc.....	45
3.10.8 Conductance superficielle.....	45
3.11 Techniques de lutte contre la pollution.....	45
3.11.1 Allongement de la ligne de fuite.....	46
3.11.2 Isolateurs plats.....	46
3.11.3 Graissage périodique.....	46
3.11.4 Revêtement silicone.....	46
3.12 Les isolateurs composites.....	46
3.13 Nettoyage des isolateurs.....	46
3.14 Conclusion.....	47

Chapitre 04

PARTIE EXPERIMENTALE

4.1 Introduction.....	48
4.2 Techniques expérimentales.....	48
4.2.1 Modèle expérimental, circuits de mesure et de visualisation.....	48
4.3 Pollution d'une surface isolante.....	50
4.4 Procédé d'essai.....	51
4.5 Dessiccateur.....	51
4.6 Correction des résultats de tension en fonction des conditions atmosphériques.....	52
4.7 Paramètres d'influence de la tension de contournement d'une surface en silicone hydrophobe.....	54
4.7.1 Polarité positive.....	54
4.7.1.1 Nombre de rangées des gouttes d'eau.....	54
4.7.1.2 Angle d'inclinaison de l'isolation et position de l'électrode sous haute tension.....	55
4.7.1.3 Angle d'inclinaison de l'isolation et distance entre les gouttes d'eau.....	57
4.7.1.4 Angle d'inclinaison de l'isolation et volume des gouttes d'eau.....	59
4.7.1.5 Largeur de la zone sèche.....	61

4.7.1.6	Volume des gouttes d'eau et l'angle d'inclinaison critique.....	62
4.7.2	Polarité négative.....	63
4.7.2.1	Nombre de rangées de gouttes d'eau.....	63
4.7.2.2	Angle d'inclinaison de l'isolation et position de l'électrode sous haute tension.....	64
4.7.2.3	Angle d'inclinaison de l'isolation et distance entre les gouttes d'eau.....	66
4.7.2.4	Angle d'inclinaison de l'isolation et volume des gouttes d'eau.....	67
4.7.2.5	Largeur de la zone sèche.....	70
4.7.2.6	Volume de gouttes d'eau et angle critique d'inclinaison.....	71
4.8	Conclusion.....	72
	Conclusion générale.....	74

Introduction générale

Dans l'isolation électrique haute tension, et plus particulièrement dans des environnements extérieurs, les élastomères silicones constituent des matériaux de choix, du fait principalement de leur hydrophobicité couplée à une bonne tenue aux contraintes climatiques (humidité, brouillard salin, UV, . . .). Par ailleurs, ces polymères possèdent une bonne stabilité thermique (entre -80°C et 250°C), une bonne tenue au feu et une tension de claquage équivalente aux autres polymères utilisés pour ces applications. Leur facilité de moulage et l'absence d'équipements lourds pour leur élaboration ont permis également de développer des applications isolantes à base d'élastomères silicones pour des traversées moyenne et haute tension et des barres d'alternateur principalement.

Le contournement des isolateurs par un arc électrique, dû à la pollution atmosphérique, est une des causes principales des interruptions de l'alimentation en énergie des réseaux électriques. La maîtrise des conditions optimales du fonctionnement de ces réseaux, vis-à-vis de ce type de défaut d'isolement, commence par le choix de l'isolation et du profil d'isolateurs qui présentent les meilleures performances sous pollution. A ce titre, plusieurs solutions comme l'allongement de la ligne de fuite des isolateurs, le graissage, le lavage sous tension, ont été envisagées. Une autre approche du problème consiste à jouer sur la nature du matériau isolant et qui conférerait à ce dernier des meilleures performances isolantes. Nous citerons à titre d'exemple les matériaux élastomères silicones, ou encore des isolateurs en céramique dopés avec des semi-conducteurs.

Le dépôt de la couche de pollution résulte de la concomitance de plusieurs facteurs tels que les conditions climatiques, le champ électrique, la force et la direction du vent, la position d'accrochage des isolateurs et leur inclinaison, leur forme, le type de matériaux qui les constitue (verre, porcelaine, silicone composite, élastomère et polymère) et surtout la discontinuité du film du dépôt polluant les recouvrant.

En général, la distribution de la pollution à la surface des isolateurs n'est pas répartie de façon uniforme. En effet, les conditions électrogéométriques et climatiques jouent un rôle important dans l'accumulation et la distribution de la pollution sur la surface d'un isolateur.

Les multiples raisons susmentionnées justifient le but principal visé par ce travail et consiste à savoir si l'utilisation d'un matériau en silicone peut améliorer la performance d'une isolation sous atmosphère propre et sèche dans le cas du phénomène de condensation.

Dans ce présent mémoire où nous nous sommes inspirés de plusieurs expériences antérieures, nous étudions quelques paramètres d'influence sur la décharge électrique et la tension continue de contournement d'une surface en silicone plane recouvertes de gouttes d'eau à volume ainsi qu'une inclinaison de l'isolation par rapport à l'horizontale variable.

Dans le premier chapitre, nous abordons l'état de l'art et les connaissances acquises à ce jour sur les performances d'une surface en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau sous tension continue, établis par différents chercheurs qui seront passés en revue.

Le second chapitre porte sur la description des diverses isolations électriques et leurs propriétés essentielles exploitées généralement en haute tension.

Le troisième chapitre fera l'objet de l'exposition du problème de la pollution atmosphérique, et la présentation des méthodes et techniques de mesure et de simulation du degré de pollution d'un site ainsi que celles exploitées dans la cadre de la lutte contre la pollution.

Le quatrième chapitre est dédié à l'étude expérimentale, de l'effet d'angle d'inclinaison d'une surface en silicone recouverte d'un certain nombre de rangées de gouttes d'eau à volume variable sur sa performance lorsque celle-ci est soumise à une contrainte de tension continue à polarité positive et négative. Les résultats expérimentaux issus de cette investigation seront suffisamment interprétés et enfin une conclusion générale permettant la synthèse du travail réalisé clôturera cette analyse.

1.1 Introduction

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 des dispositifs électriques haute tension, le claquage des isolants servant à isoler les parties conductrices.

De plus en plus les matériaux polymères (silicones) sont d'excellents isolants pour les applications hautes et moyennes tensions. Ces matériaux polymères ont certaines excellentes propriétés telles qu'être légers, une bonne tenue aux contraintes climatiques couplées aux bonnes propriétés hydrophobes. Les isolateurs en silicone recouverts d'une couche de pollution présentent une résistance aux courants de cheminement plus haute que les modèles en porcelaine, en verre ou en EPDM. Les décharges électriques sont évitées même dans des conditions de pollution extrêmes.

Or, aujourd'hui, on commence à étudier les performances d'un système électrique avec isolation en silicone recouverte de gouttes d'eau sous tension continue, à fin de comprendre le comportement de ces dernières sur le phénomène de décharges d'arc, et l'influence du l'angle d'inclinaison de la surface, la polarité, le volume et la conductivité d'eau sur la tenue électrique.

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

1.2 Synthèse des travaux de recherches concernant le degré d'inclinaison d'une surface en silicone recouverte des gouttes d'eau sur sa performance en tension continue

1.2.1 Yoshno. Higashiyama [1996]

L'auteur [1] a fait l'étude expérimentale sur le comportement des gouttelettes d'eau placées sur la surface de la plaque du polymère hydrophobe sous champ à courant continu. Afin de confirmer l'effet de l'hydrophobicité sur le mouvement des gouttelettes d'eau, il a utilisé trois types de matériaux isolants hydrophobes PTFE, le caoutchouc de silicone (SR) et le caoutchouc éthylène propylène (EPDM). Après le test il a constaté qu'il ya une différence entre le matériau isolant hydrophobe PTFE et le caoutchouc de

silicone (SR) en particulier sur la surface de la plaque (SR) collante ou sèche un peu en raison de la migration de l'huile de silicone sur la couche intérieure.

D'autre part la surface de la plaque de (PTFE) est lisse et présente moins de frottement. Dans le cas de l'angle d'inclinaison, une goutte d'eau de volume $0,04 \text{ cm}^3$ placée sur la surface isolante de (SR) et (EPDM), il est remarqué que la goutte d'eau ne glisse jamais vers le bas le long de la surface de la plaque, il a finalement conclu que le comportement des gouttelettes sous le champ de C.C dépend fortement non seulement de l'hydrophobicité mais également de la propriété extérieure d'un isolant.

1.2.2 H.-J. Kloes et D. König [1997]

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

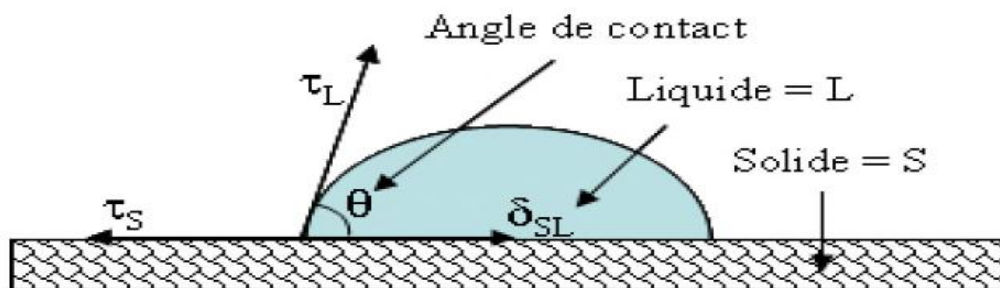


Fig. 1. 1: Forces en présence lorsqu'une goutte est placée sur un substrat en absence de contraintes électriques

Sous contrainte électrique, les forces électrodynamiques s'ajoutent et sont à l'origine de l'éjection des micro gouttelettes. M. Vallet a démontré que la déformation de la goutte

était réversible jusqu'à un certain seuil de contrainte électrique, au-delà duquel la déformation devient permanente. Le retour de la goutte à sa forme initiale lorsque la contrainte était supprimée s'accompagnait spontanément d'une diminution de la force du champ électrique.

1.2.3 Shiho Yanase, Toshiyuki Sugimoto [1998]

Ces auteurs [3] ont fait l'étude sur la décharge couronne qui se produit à la base des gouttelettes d'eau placées sur la surface du polymère sous champ à courant continu comme est montré sur la figure 1.2. Il a été étudié expérimentalement le comportement de ces gouttelettes d'eau sur les matériaux isolants hydrophobes, le PTFE et le caoutchouc de silicone (SR). L'hydrophobie signifie moins de mouillage ou de répulsion de l'eau. Un angle de contact d'une goutte d'eau placée sur la surface isolante est l'une des méthodes d'évaluation de l'hydrophobie. Les valeurs des deux types d'angle de contact, les angles rentrants et sortants statiques mesurés en utilisant une goutte d'eau de 4 μl de SR sont respectivement de 105° et 65° , et ceux du PTFE de 101° et 92° . Il convient de noter que l'angle de contact sortant de PTFE a presque la même valeur que celle de l'angle de contact statique, bien que celui du SR soit beaucoup plus petit que celui statique.

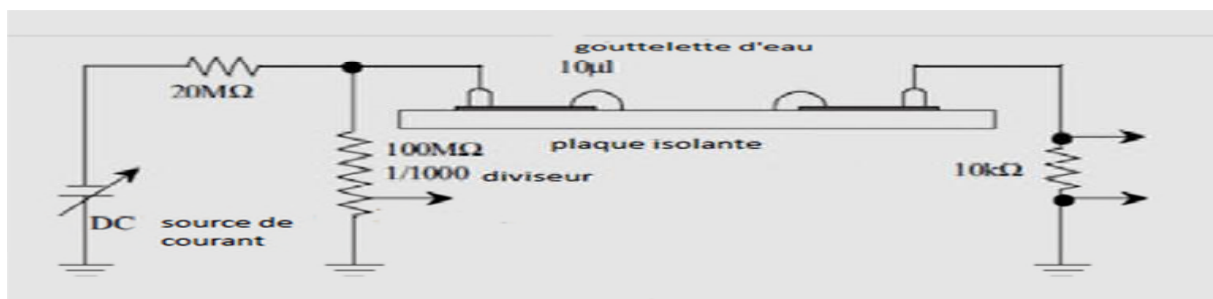


Fig. 1. 2: Diagramme schématique du dispositif expérimental

Des images vidéo ont été prises sur le comportement de deux gouttes d'eau placées sur les plaques isolantes de PTFE et SR mises sous une tension continue négative. La vitesse de la caméra vidéo est de 30 images par seconde. Bien que les gouttelettes d'eau allongées vers les électrodes opposées, la manière de l'allongement ou de la déformation des gouttelettes d'eau est tout à fait différente, bien que la gouttelette d'eau sur la plaque de PTFE s'allonge à 10 kV.

L'allongement cessa bientôt, lorsque l'angle de contact apparent diminue jusqu'à une valeur inférieure à 30° . Ce type de mouvement ou de la division de la gouttelette d'eau a été observé à la surface de la plaque de PTFE. D'autre part, la goutte d'eau sur la plaque de SR forme un étroit canal dans une trame, le filament de la goutte d'eau négative atteint la proximité de la gouttelette d'eau positive, même si un certain changement dans la forme de la goutte d'eau a eu lieu. La goutte d'eau ne s'étend pas plus loin et conserve sa forme. L'émission de charge est un événement répétitif se produisant sous un champ électrique constant. La formation d'un filament d'eau sur la plaque de SR pourrait être due à l'épaisseur de la surface SR.

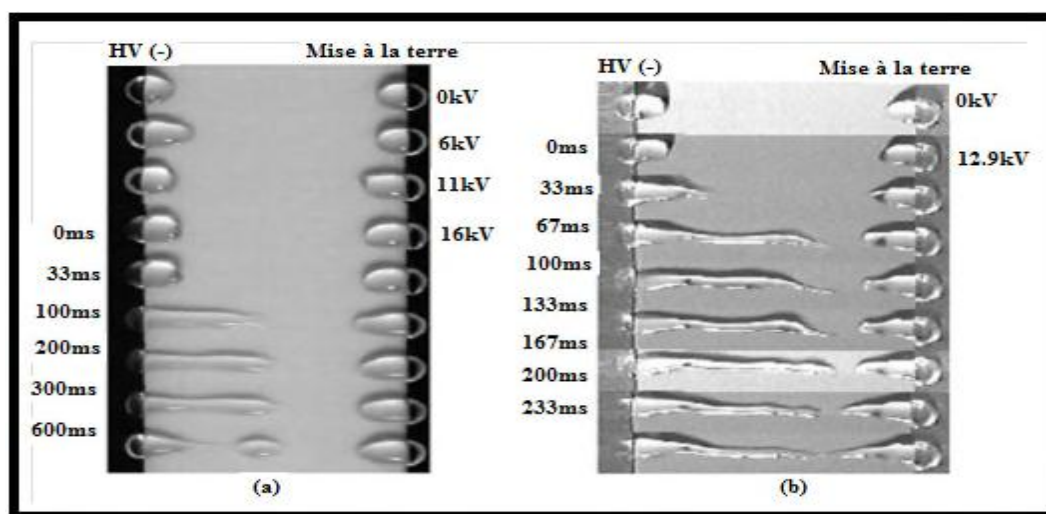


Fig. 1. 3 : La formation d'un canal d'eau lorsque la tension négative est appliquée aux électrodes sur: (a) de PTFE, et (b) SR

D'après les auteurs il a été constaté que la polarité de la tension appliquée affecte exactement le comportement des gouttes d'eau sur la plaque de SR comme cela est montré sur la figure 1.3.

Bien que l'agencement du système d'électrodes et des gouttelettes d'eau soit symétrique, une gouttelette négative tend à former un canal d'eau. Cette caractéristique peut être expliquée par l'effet de la décharge de couronne d'une goutte d'eau. Pendant l'extension, la décharge couronne se produit à l'extrémité pointue d'une gouttelette d'eau déformée. Bien que le SR et le PTFE soient des matériaux hydrophobes, leurs conditions de surface sont très différentes. Etant donné que la charge de surface déposée sur la plaque affecte l'intensité du champ électrique à l'extrémité d'une goutte d'eau, la force électrostatique agissant sur la gouttelette doit être clarifiée à partir de l'analyse du terrain le long de la surface des gouttelettes.

1.2.4 Yoshimura N, Kumagai S [1999]

Ces auteurs [4] ont fait l'étude sur la diminution temporelle du hydrophobicité sur la surface du matériau polymère dans les conditions d'essai suivantes :

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

La figure 1.4 montre une installation expérimentale avec une source de tension continue et un échantillon d'essai a été arrangé entre les électrodes d'acier inoxydable de 100 mm de largeur. Ils ont laissé tomber l'électrolyte sans interruption pour examiner la surface témoin par un petit passage d'une électrode supérieure.

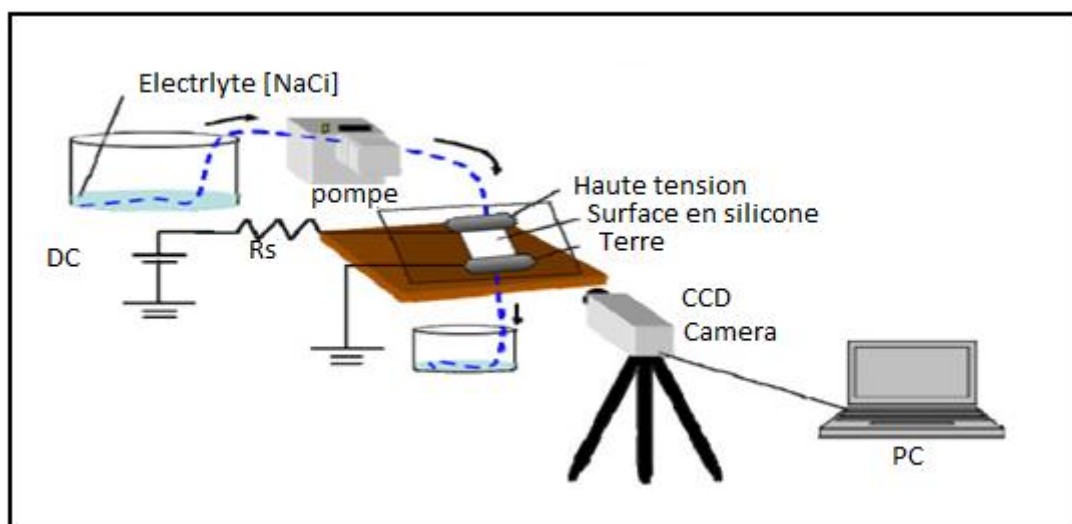


Fig. 1. 4 : Installation expérimentale

La figure 1.5 montre la configuration des électrodes et d'un échantillon d'essai. L'échantillon d'essai utilisé est en silicone, de 70 mm de longueur et de 50 mm de largeur. La distance entre les électrodes est de 60 mm ; donc, le champ électrique appliqué était 50 V/mm.

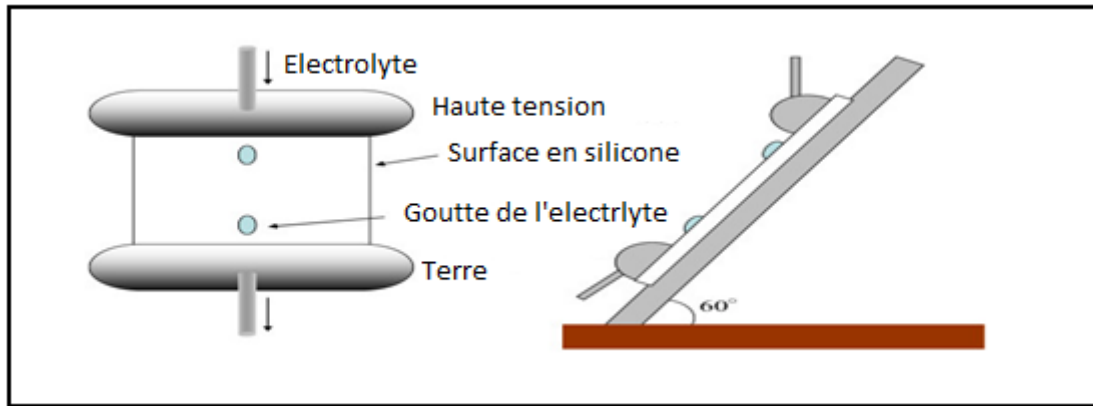
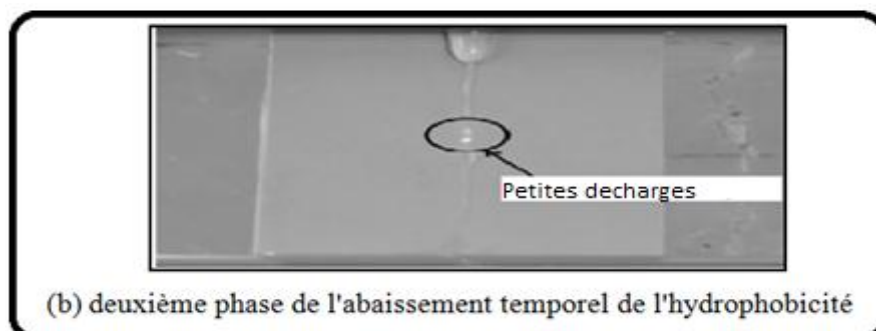
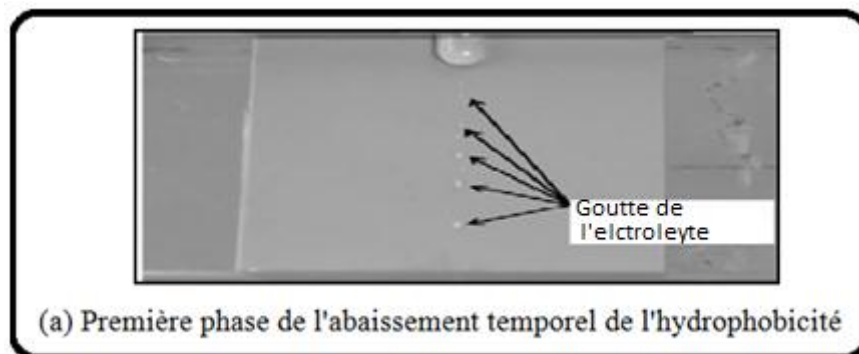


Fig. 1. 5 : Configuration des électrodes

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

La figure 1.6 montre des images de l'abaissement temporel de l'hydrophobicité. Il en résulte que le changement de l'hydrophobicité peut être classifié en trois phases. Avec le progrès de l'abaissement de l'hydrophobicité, de petites décharges sont vues suivant les indications de la figure 1.6.b, la prochaine étape est décrite par la figure 1.6.c, une voie d'eau évidente est formée.



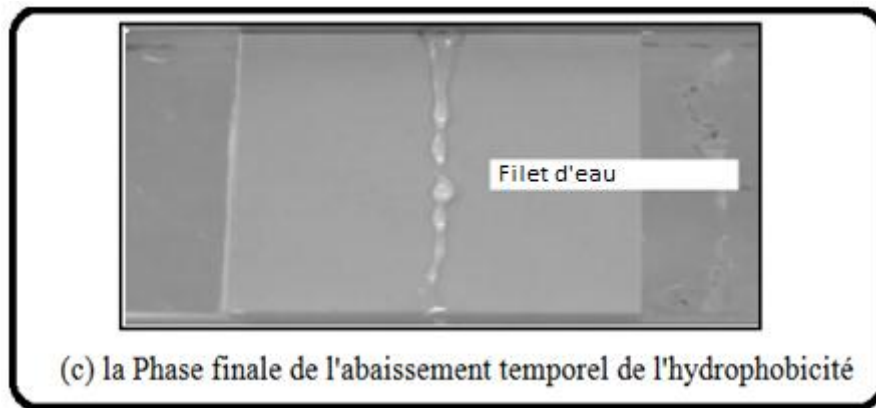


Fig. 1. 6 : l'abaissement temporel de l'hydrophobicité

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

1.2.5 B. X. Dul, Yong Liul [2009] [5]

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

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

Un test dynamique des gouttes (DDT; dynamic drop test) a été proposé comme méthode d'évaluation du comportement dynamique d'une goutte d'eau. Trois d'échantillons de SIR ont été choisis, Basée sur la méthode de l'angle de contact d'une goutte d'eau a été mise sur la surface comme le montre la figure 1.7.

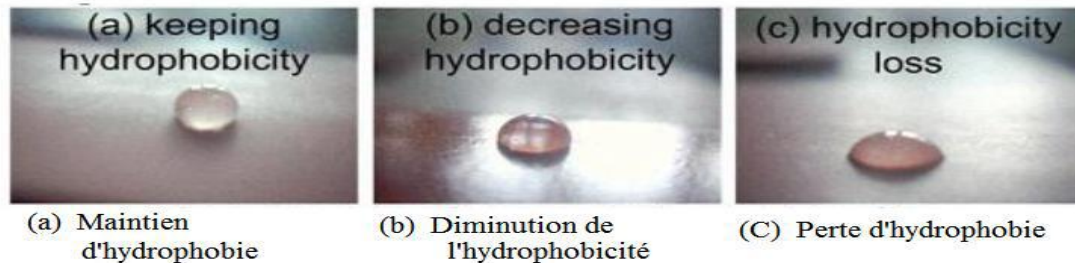


Fig. 1. 7 : Performance d'une gouttelette sur une surface

Les chercheurs ont étudié les trois cas de la figure 1.7, représentant les phénomènes de décharge pendant le processus de chute de la gouttelette d'eau, figure 1.8.

1 er cas: Silicone hydrophobe

La décharge s'est produite à la période la plus tôt de la gouttelette chutant. Une lumière violette émise par les décharges sur le côté de l'électrode HT a été observée. Celle-ci indique l'endroit de la décharge et de faibles décharges de la bande sèche (Fig. 1.8.a).

2eme cas: hydrophobicité décroissante

Lors de l'observation des décharges jusqu'à la période moyenne du processus chutant, la lumière jaune lumineuse est apparue juste à la chute de la gouttelette, ce qui indique l'occurrence des décharges intensives. Alors juste après, les tâches de lumière jaune donnent la distribution et l'intensité des décharges de bande sèche (Fig. 1.8.b).

3ème cas: perte d'hydrophobicité

Il a observé les activités de décharge pendant le processus entier de la chute de la gouttelette. La lumière jaune la plus lumineuse est apparue à la chute initiale de la gouttelette d'eau, alors les tâches de lumière jaune distribuées le long de l'échantillon apparaissent en raison de la formation des activités de bande sèche. La distribution de couleur légère est conforme à la morphologie de décharge (Fig. 1.8.c).

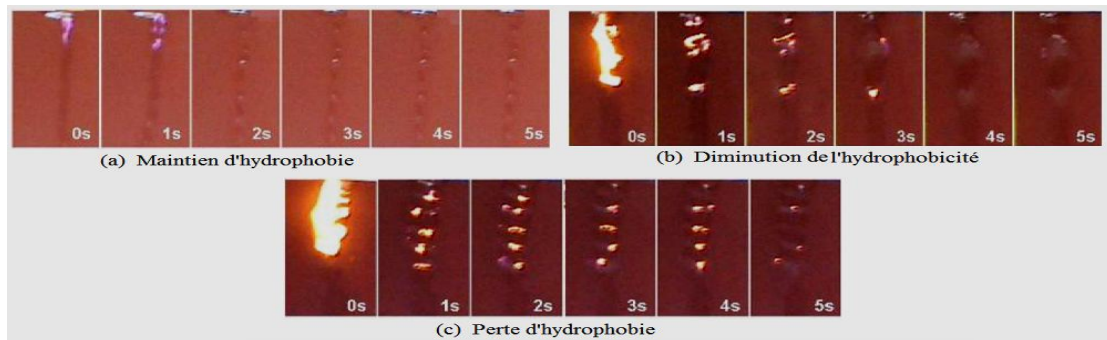


Fig. 1. 8 : Phénomènes de décharge pendant la chute de la goutte d'eau

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

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

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

1.2.6 C. Baer et autres [2011]

Les auteurs [6] ont fait une étude comparative du phénomène hydrodynamique des gouttelettes d'eau sur un plan incliné, pour des matériaux isolants à partir d'élastomères de silicone (Fig. 1.9).

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

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

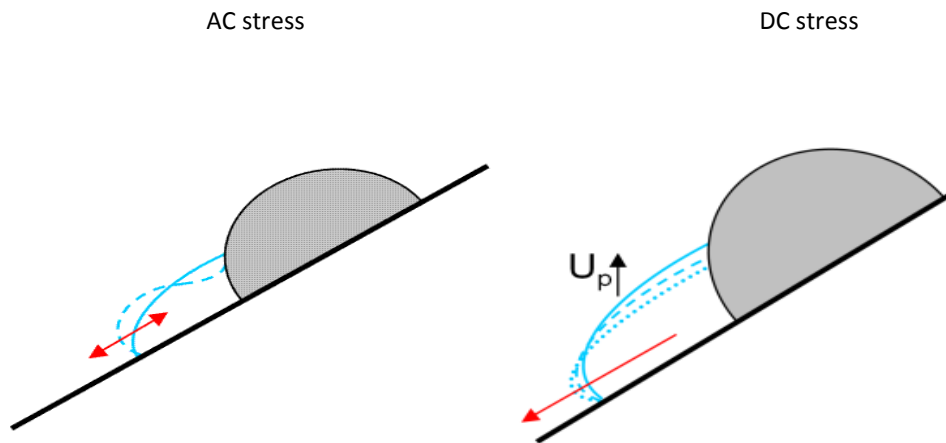


Fig. 1. 9: Comparaison entre le champ AC et DC

1.2.7 S. Thong-Om, W. Payakcho [2011] [7]

L'essai de vieillissement sous le brouillard salin a été effectué sur les isolateurs polymères, basés sur la CEI 61109. Les échantillons fabriqués de caoutchoucs en silicones HTV avec le contenu d'ATH ayant trois configurations différentes (ailettes droites, ailettes alternées, et ailettes inclinées et alternées), ont été testées sans interruption pendant 1000 heures, dans une chambre de brouillard salin artificiel (Fig. 1.10), le degré de contamination, la réduction de l'hydrophobicité et mesure de la dureté, ont été employés comme techniques d'analyse des dommages physiques, pour évaluer le degré détérioration de surface.

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

Ils ont observée l'arc de la bande sèche et décharges couronne sur la surface extérieur du tronc dans tous types d'échantillons (Fig. 1.10).

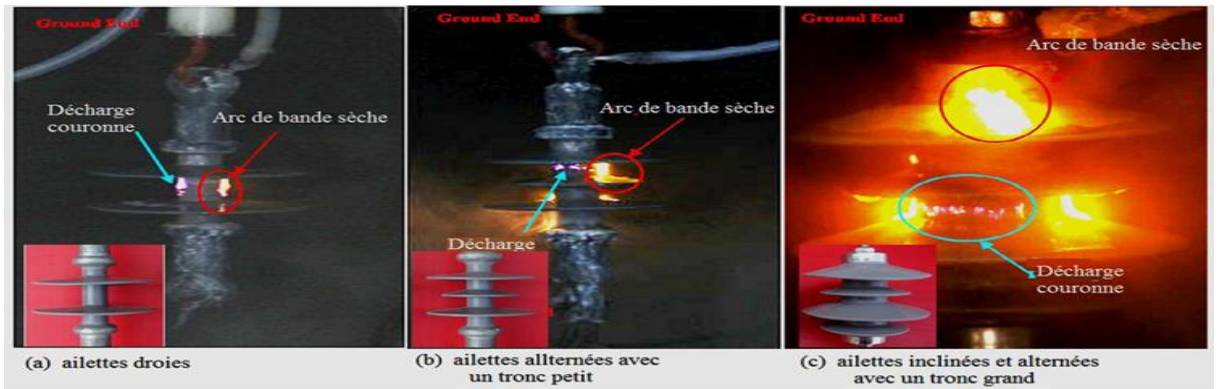


Fig. 1. 10: Activités des décharges sur un isolateur en silicone

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

L'évaluation du niveau d'hydrophobicité de la surface des échantillons testés a été basée sur la classification faite selon la figure 1.11. Les résultats de mesure de l'hydrophobicité sont affichés sur le tableau 1.

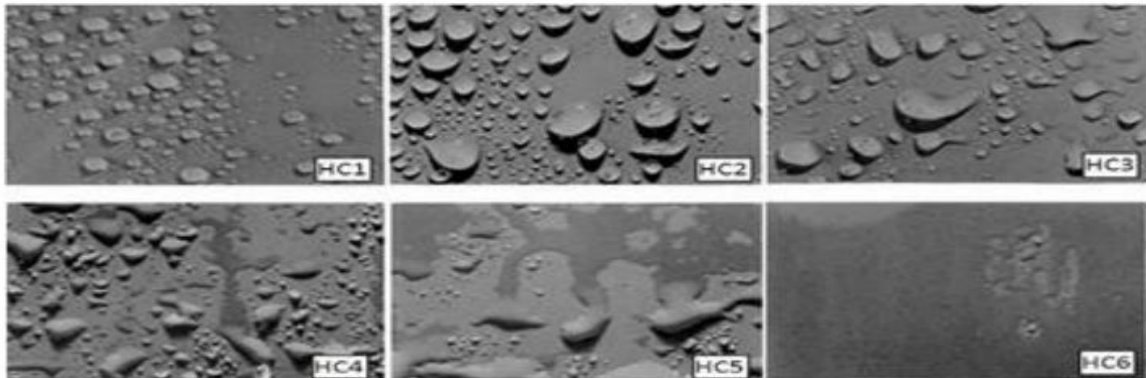


Fig. 1. 11 : Classification d'hydrophobicité (HC1-HC6)

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

Tab. 1. 1 : Classification d'hydrophobicité

1.3 Conclusion

La synthèse sur les travaux réalisés par plusieurs investigateurs sur l'étude de la performance des isolations en silicone sous tension continue montre que les polymères sont d'excellents isolants pour les applications hautes et moyennes tensions en raison de leur structure moléculaire. 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 des isolations notamment sous pollution, ce qui optimise ces différentes propriétés que ce soient électriques, mécaniques ou thermiques.

Dans notre travail l'objectif principal est de comprendre le comportement de la goutte d'eau sur la surface d'un matériau en silicone sous tension continue, angle d'inclinaison variable et de polarité positive et négative. Cela nécessite la réalisation d'un dispositif permettant la reproduction de l'inclinaison de la surface inférieure et supérieure d'une ailette et de celle du tronc d'un isolateur d'une ligne électrique aérienne, afin de déterminer la caractéristique de la tension de contournement en fonction de l'angle d'inclinaison de ces trois surfaces lorsque celles-ci sont recouvertes des gouttes d'eau à volume, conductivité, arrangement et polarité de la tension appliquée variable, et de visualiser les phénomènes de décharge électrique évoluant sur la surface isolante munie de gouttes d'eau.

2.1 Introduction

Les matériaux, dans leur acception la plus large, ont joué un rôle prépondérant dans les progrès accomplis dans la mise au point des matériels électriques. L'évolution de la qualité de ces matériaux s'est étalée sur plus d'un siècle. Bien que cette évolution soit lente mais en terme de qualité elle a été considérable. En guise d'introduction à cette partie de notre travail nous donnons ici un aperçu général sur les matériaux isolants solides utilisés dans le domaine de l'industrie électrotechnique. Ces matériaux occupent une place importante dans les applications électriques puisque pouvant jouer un rôle de support mécanique en plus de leur fonction principale d'isolation. Nous les retrouvons pratiquement partout où il y a des conducteurs électriques, même dans le cas des réseaux de transport ou de distribution où l'isolant principal est l'air, la liaison mécanique avec le pylône est assurée par un isolateur solide.

Les matériaux isolants sont vite devenus le point central dans la conception de beaucoup de catégories de matériels électriques puisque la fiabilité des dispositifs est largement déterminée par la pérennité des propriétés électriques de ces isolants. Il est, en effet, vérifié que la défaillance du matériel électrique est souvent associée à des phénomènes de rupture de leur isolation. Les phénomènes de rupture peuvent survenir même pour des champs électriques nettement inférieurs aux champs de rupture estimés. Ce genre de rupture est associé à une évolution temporelle des matériaux, c'est le processus de vieillissement. Il est donc nécessaire d'appréhender de la manière la plus précise les limites d'utilisation des isolants employés par la connaissance de leur évolution à long terme.

2.2 Définition

2.2.1 Isolant [8]

C'est un matériau qui ne conduit pas l'électricité. Sa destination première est d'empêcher tout contact entre des pièces métalliques portées à des potentiels différents. Une façon plus simple de définir un matériau isolant est de dire qu'il est caractérisé par une résistivité électrique très élevée. A l'opposé de celle des métaux, la résistivité de ces matériaux décroît lorsque leur température augmente.

2.2.2 Isoler [9]

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

2.2.3 Isolement

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

2.2.4 Isolation

L'isolation est définie comme étant l'élément matériel ou l'ensemble des dispositifs constructifs assurant cet isolement.

➤ **Isolation autorégénératrice**

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

➤ **Isolation non autorégénératrice**

C'est une isolation qui nécessite une intervention immobilisant plus ou longtemps l'appareil touché, lequel peut même être mis définitivement hors d'usage (papier imprégné d'huile, hexafluorure de soufre (SF₆)).

2.2.5 Diélectrique [8]

C'est un matériau plus ou moins isolant (résistivité élevée, bande d'énergie interdite de quelques eV), polarisable, c'est-à-dire dans lequel des dipôles électrostatiques existent (diélectrique polaire) ou se forment sous l'effet d'un champ électrique (dipôles induits). En d'autres termes un diélectrique peut être défini comme un milieu matériel dans lequel la bande de conduction est séparée de la bande de valence par une énergie supérieure à 5 eV. Dans la pratique technologique la différence entre isolant et diélectrique ne découle pas de propriétés différentes mais de l'angle sous lequel est vu le problème. C'est ainsi que lorsque le souci d'empêcher un contact galvanique est important nous parlerons d'isolant, par contre lorsque notre intérêt est focalisé sur les propriétés découlant de la polarisation ou de la permittivité plus ou moins accentuée nous invoquons le terme diélectrique.

2.2.6 Isolateur

L'isolateur est un matériau isolant solide que 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 court-circuits, les pertes de courant et les charges d'électrocution.

2.2.7 Fonctionnement et constitution d'un isolateur

Les isolateurs sont des composants indispensables au transport et à la distribution de l'énergie électrique. Leur fonction est de réaliser une liaison mécanique entre des conducteurs portés à des potentiels différents accrochés aux pylônes des lignes aériennes, ils maintiennent les conducteurs dans la position spécifiée (isolateurs d'alignement et d'ancrage), ils assurent la transition entre l'isolation interne (huile, SF₆) et l'isolation externe, ils permettent de raccorder les matériels électriques au réseau (traversées de transformateur, extrémités de câbles) et ils constituent, également, l'enveloppe de certains appareils (disjoncteurs, parafoudres, réducteurs de mesure).

Les isolateurs sont conçus et dimensionnés pour résister aux contraintes prévisibles introduites par l'environnement. Du point de vue électrique, l'isolateur est considéré comme étant deux électrodes dont l'intervalle comporte trois zones constituant trois isolants en parallèle ayant des comportements différents, qui sont les suivants :

- l'intervalle d'air.
- le matériau diélectrique.
- l'interface air-matériau diélectrique (la longueur de l'interface constitue la ligne de fuite ligne le long de laquelle circulerait le courant de fuite).

2.3 Différents types d'isolants [9]

2.3.1 Isolant gazeux

L'air et les gaz secs, considérés comme de bons isolants, sont dotés des propriétés suivantes :

- Rigidité diélectrique variable suivant la nature de gaz;
- Permittivité faible, les gaz sont auto-générateurs;

- Phénomène d'ionisation des gaz;
- Légers et inflammables.

Les principaux isolants gazeux sont : l'air atmosphérique, l'azote, gaz rares de l'air et l'hydrogène.

2.3.2 Isolants liquides

Les liquides diélectriques sont souvent utilisés en association avec des solides (transformateurs, condensateurs et câbles). Ils ont pour rôle de se substituer aux vacuoles qui sont le siège de décharges partielles.

2.3.3 Isolants solides

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

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

2.4 Propriétés des isolants

2.4.1 Propriétés électriques

Parmi les propriétés électriques essentielles des isolants on rencontre :

- Rigidité diélectrique E_r (V/m) ;
- Permittivité relative ϵ_r ;
- Facteur de pertes diélectriques $\text{tg } \delta$;
- Résistivité électrique ρ .

2.4.1.1 Rigidité électrique

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

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

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

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

2.4.1.2 Permittivité

Lorsqu'un diélectrique est soumis à l'action d'un champ électrique E il se produit à l'échelle moléculaire diverses modifications qui ont pour effet de créer un champ électrique propre (E_p) à l'intérieur de la substance s'opposant au champ électrique (E_{ext}) extérieur appliqué (Fig.2.1). Cette caractéristique des isolants solides et liquides porte le nom de la permittivité relative ϵ_r

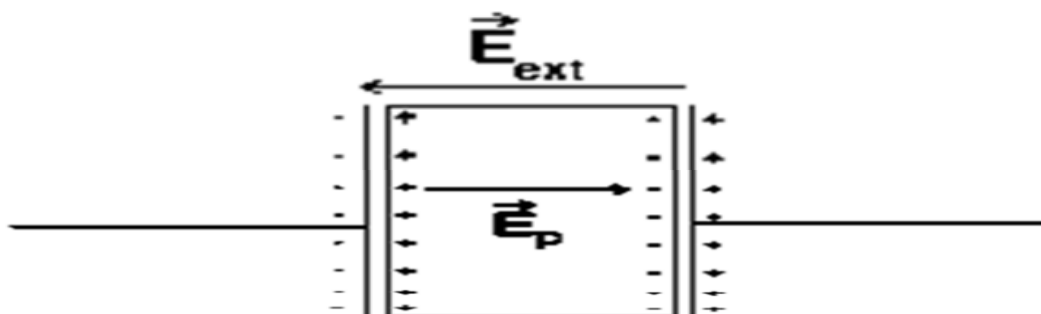


Fig. 2. 1 : Champ électrique propre à l'intérieur d'un matériau isolant sous tension (E_p)

E_{ext} : champ électrique extérieur appliqué ;

E_p : champ dû a la polarisations du matériau ;

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

$$\epsilon_r = C_x / C_0 \dots\dots\dots (1)$$

La permittivité absolue ϵ_a est le produit de la permittivité relative par la constante électrique du vide.

$$\epsilon_a = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \dots\dots\dots (2)$$

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

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

$$\epsilon_r^* = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \dots\dots\dots (3)$$

Ou ϵ_r' est la partie réelle de la permittivité complexe, jouant le même rôle que ϵ_r dans le cas des diélectriques parfaits.

$$\epsilon_a^* = \epsilon_r^* \cdot \epsilon_0 \dots\dots\dots (4)$$

ϵ_r'' : est appelé indice de pertes.

2.4.1.3 Resistance et Résistivité Electrique

➤ Résistance transversale ou volumique

Cette résistance est déterminée en appliquant un champ perpendiculaire à la surface d'une éprouvette et en mesurant le courant transversal qui résulte de l'application de ce champ. Elle est relative aux propriétés internes du matériau.

➤ Résistance superficielle

Cette résistance est celle qui intervient entre deux conducteurs sur une même surface isolante. C'est une notion qui fait intervenir outre la qualité du matériau, le dépôt d'une mince couche conductrice (humide ou autre) à travers laquelle s'effectue en tout ou en partie la conduction.

➤ Résistance d'isolement

La résistance d'isolement fait intervenir à la fois la résistance transversale et la résistance superficielle d'un matériau, d'une façon représentative des conditions pratiques d'emploi des matériaux.

➤ Résistivité transversale

La résistivité transversale ρ d'un matériau isolant est définie comme celle d'un conducteur par la relation :

$$\rho = RS/e$$

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

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

➤ Résistivité superficielle

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

2.4.1.4 Angle de perte et le facteur de dissipation

Tout isolant soumis à un champ électrique alternatif est traversé par des courants de conduction et d'absorption qui donnent lieu à des pertes diélectriques. Le diélectrique réel peut être représenté par les schémas équivalents suivants (Fig. 2.2 et 2.4). Le courant total traversant l'ensemble du circuit est déphasé en avance sur la tension d'un angle $\varphi < \pi/2$. Son complément δ est appelé angle de pertes. La tangente de cet angle est appelée facteur de dissipation (ou de pertes) et s'obtient de la façon suivante :

➤ Schéma équivalent parallèle

$$\operatorname{tg} \delta = 1/\omega C_p R_p \dots \dots \dots (5)$$

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.

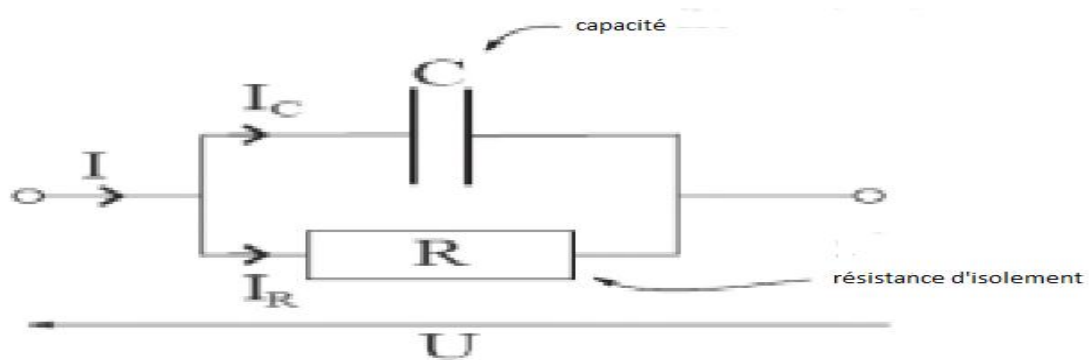


Fig. 2. 2 : Circuit équivalent parallèle représentant un diélectrique

Le diagramme de Fresnel correspondant est donné sur la figure 2.3

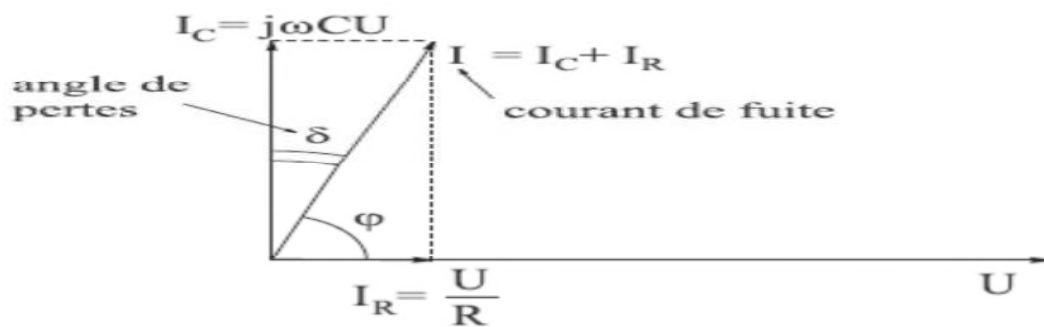


Fig. 2. 3 : Diagramme de Fresnel correspondant au schéma équivalent parallèle

➤ Schéma équivalent série

Le schéma équivalent série d'un condensateur est donné sur la figure 2. 4

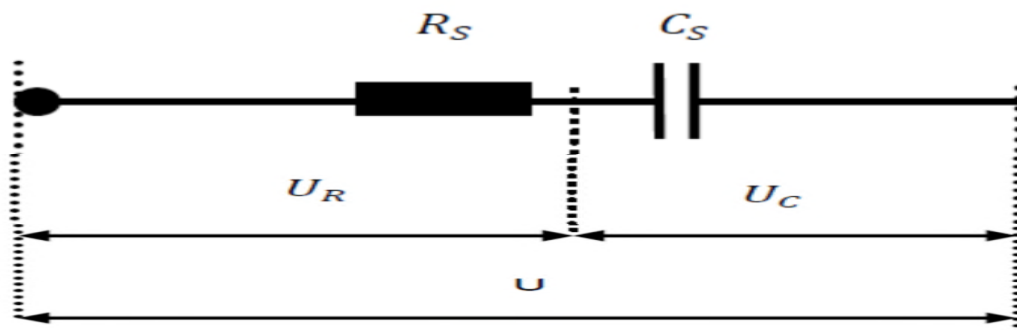


Fig. 2. 4 : Circuit équivalent série représentant un diélectrique

Dans ce cas, le diagramme de Fresnel est représenté sur la figure 2.5

Avec :

$$\operatorname{tg}\delta = \omega R_s C_s \dots\dots\dots(6)$$

La valeur $\operatorname{tg}\delta$ est appelée facteur de dissipation diélectrique. On définit également l'indice de pertes diélectriques par la relation

$$\epsilon_r'' = \epsilon_r' \cdot \operatorname{Tg}\delta \dots\dots\dots(7)$$

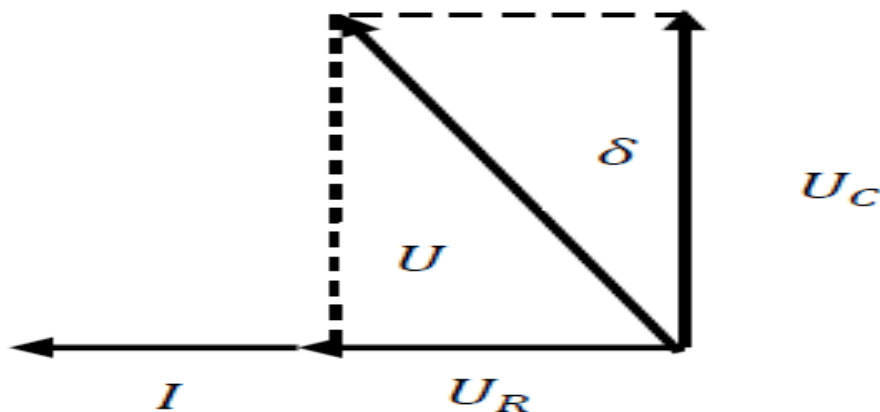


Fig. 2. 5: Diagramme de Fresnel correspondant au schéma équivalent série

2.4.2 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.

2.4.3 Propriétés mécaniques

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

2.5 Phénomènes de conduction dans les diélectriques solides

Les isolants solides sont utilisés plus de 90% des cas pour l'isolation électriques [10]. Ces matériaux dont font partie la plupart des polymères ont une structure semi-

crystalline ou amorphe. L'application d'un champ électrique à un isolant peut injecter les électrons et faire déplacer les ions dans le matériau. Dès qu'un chemin conducteur est établi entre les électrodes, il y'a passage d'un fort courant amenant le court-circuit et la destruction de matériau.

2.5.1 Différents mécanisme de Claquage

2.5.1.1 Tension critique de claquage U_C

$U \geq U_C$ l'isolant ne peut pas supporter cette tension → Claquage (décharge électrique).

Remarque

A la pression atmosphérique, si $d = 1\text{cm}$: $U_C \approx 30\text{ kV}$;

Donc le champ critique $E_C \approx 30\text{ kV/cm}$.

2.5.1.2 Claquage thermique

Lorsqu'un courant traverse un matériau isolant, la conductivité augmente avec la température. Par suite la température s'élève, le courant augmente à son tour et ainsi de suite. Si la chaleur accumulée ne s'évacue pas suffisamment vite, le processus peut conduire à un emballement thermique, c'est ce qu'on appelle le claquage thermique. Ce type de claquage ne se produit jamais d'une manière homogène. En effet, la moindre augmentation locale de température est auto-amplifiée par l'augmentation de la conductivité correspondante. Par la suite, une telle augmentation locale de la température inévitable en pratique provoque la création et la propagation d'un canal chaud conduisant à un claquage thermique ponctuel.

2.5.1.3 Claquage d'origine électronique

Plusieurs théories ont été proposées. On distingue le claquage intrinsèque, le claquage par avalanche et celui associé au volume libre.

a- Claquage intrinsèque

Lorsque le champ électrique appliqué à un matériau de telle manière que sa température reste pratiquement inchangée en maintenant ce champ pendant une courte durée et en utilisant des électrodes permettant l'évacuation de la chaleur, on peut assister à un claquage brutal qui n'est pas précédé par une augmentation progressive de la température, c'est ce qu'on appelle le claquage intrinsèque.

b- Claquage par avalanche

La théorie de la rupture par avalanche envisage le claquage comme la conséquence d'une augmentation régulière du nombre de porteurs créés par ionisation. Lors de la collision ionisante avec un atome du matériau, l'électron incident peut céder à l'atome assez d'énergie pour l'ioniser sans être piégé. L'atome se charge positivement en libérant un électron, de sorte qu'on a alors deux électrons libres qui peuvent acquérir dans le champ assez d'énergie pour provoquer chacun une nouvelle collision ionisante donc deux électrons et ainsi, chaque électron libre et accéléré peut produire une avalanche exponentielle d'ions positifs et un nuage d'électrons libres balayé par le champ. Toutefois, ce schéma est grossièrement inexact en phase condensée. En effet, la totalité des électrons libres dans un matériau condensé est incapable d'acquérir l'énergie ionisante dans un champ électrique qui les accélère. Le claquage par avalanche est caractérisé par un seuil de 10^8 V/m nécessaire pour que des collisions ionisantes puissent se produire.

2.5.1.4 Décharge partielle

Dans un isolant qui comporte des cavités, des décharges électriques peuvent se manifester pour une tension qui excède une valeur critique : on parle alors de décharges partielles.

Si on applique aux bornes d'un isolant une tension, la différence de potentiel aux bornes de la cavité dépend de la valeur de la tension appliquée à l'ensemble, de la nature même du matériau, de la géométrie du défaut, des conductivités superficielles et volumiques de l'isolant. La tension d'amorçage dépend conformément à loi de paschen, de nature, de la pression et de l'épaisseur de la lame de gaz continu dans la cavité. Dans le cas d'un champ divergent, elle augmente avec le rayon de courbure de la pointe. La tension d'initiation des décharges liées aux décharges partielles croit quand la fréquence du signal diminue [11].

2.6 Matériaux utilisés pour les isolants solides

On trouve plusieurs isolants solides qui peuvent être utilisés pour la fabrication des isolateurs de haute tension comme le verre, la céramique et la porcelaine. Mais durant ces dernières années, la porcelaine est de plus en plus abandonnée à cause de deux

inconvénients principaux qui sont la lourdeur des isolateurs et la difficulté de détection des amorçages [12].

Ces dernières années, on s'intéresse de plus en plus à l'utilisation des isolateurs en matériaux polymères.

2.6.1 Céramique

Le développement de la fabrication des céramiques datent depuis longtemps à cause de leurs performances. Pour les isolateurs qui vont être utilisés dans des lieux où il y a des contraintes mécaniques très importantes, on utilise de préférence des céramiques à grains très fins. Souvent on trouve les céramiques dans les postes : isolateurs supports, couverture isolante des sectionneurs, des disjoncteurs, des transformateurs de potentiel, des bornes de traversées des transformateurs de puissance [13].

2.6.2 Verre

En Algérie, les isolateurs utilisés dans les lignes de moyenne haute tension sont en verre. Parmi les avantages que présentent le verre, le bas prix et l'observation facile défauts. On trouve deux types de verre pour la fabrication des isolateurs : le verre trempé et le verre recuit [14].

➤ Verre trempé

La résistance à la traction du verre trempé est environ 5 à 6 fois plus grande que le verre recuit et peut supporter des variations brusques de température pouvant atteindre 100 °C.

➤ Verre recuit

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

2.6.3 Porcelaine [15]

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

porcelaine varie entre 25 et 35 kV/mm, sa permittivité relative oscille entre 6 et 7. Elle est dotée d'une grande résistivité, environ $10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ à 20 °C, ses pertes diélectriques sont faibles en basse fréquence et en haute tension, quant à sa résistance mécanique, elle varie entre 2500 et 4000 N/mm.

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

2.6.4 Pyrex [16]

Il est utilisé pour la conception des isolateurs grâce à sa résistance aux variations brusques de la température. Il présente une résistivité électrique allant de 10^{10} à $10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$. Sa rigidité diélectrique varie entre 20 à 50 kV/cm.

2.6.5 Silicone

2.6.5.1 Définition [17]

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

2.6.5.2 Liaison Si-O-R [18]

Les silicones (ou polyorganosiloxane) ont une structure chimique basée sur une alternance d'atomes de silicium et d'oxygène (Fig. 2.6). 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.

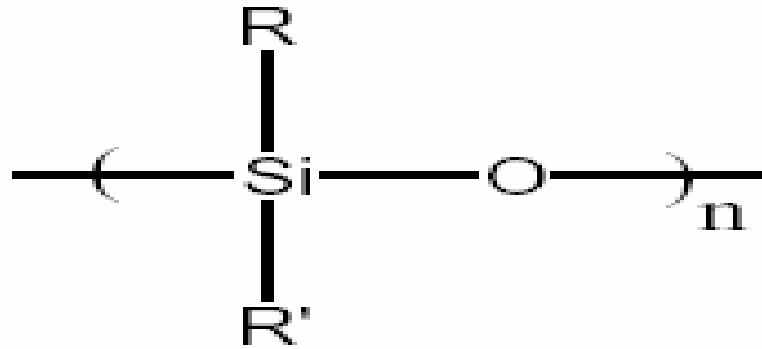


Fig. 2. 6 : la liaison Si-O

2.6.5.3 Différentes familles de silicone [19]

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

➤ **huiles et gomme**

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

➤ **gels de silicone**

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

➤ **élastomères de silicone**

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

➤ **résines de silicone**

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

2.6.5.4 Hydrophobie [20]

L'hydrophobie est une propriété très désirable pour les isolateurs en silicone car elle augmente la résistance de sa surface même dans des environnements très humides. Sur une surface vierge cette propriété est relative à la tension de contournement critique de la surface qui dépend de la nature du matériau, celle-ci est particulièrement élevée chez la silicone.

Comparée au verre et à la céramique, la silicone est difficile à mouiller dans son état vierge, comme on peut le constater sur le schéma suivant :

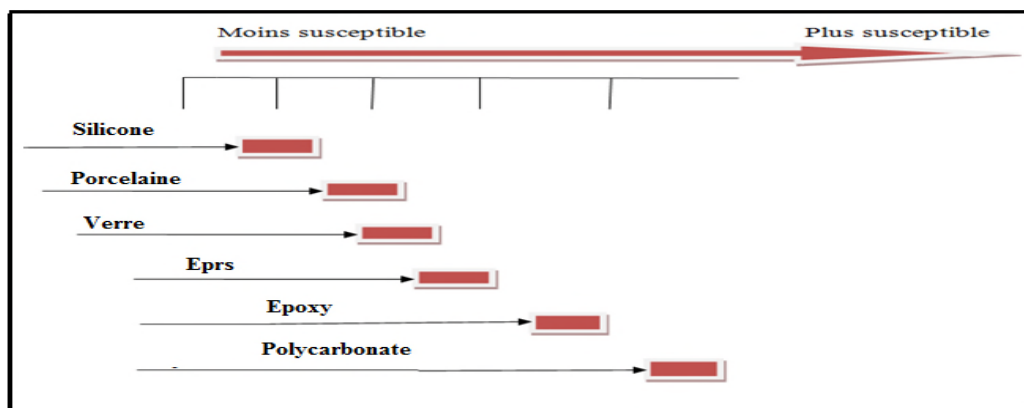


Fig. 2. 7: Degré d'absorption de l'eau

2.6.5.5 Superhydrophobicité [21]

Un matériau est dit superhydrophobe (angle de contact $> 150^\circ$) lorsque sa surface est extrêmement difficile à mouiller (avec l'eau, et à priori avec n'importe quel liquide) (Fig. 2.8).

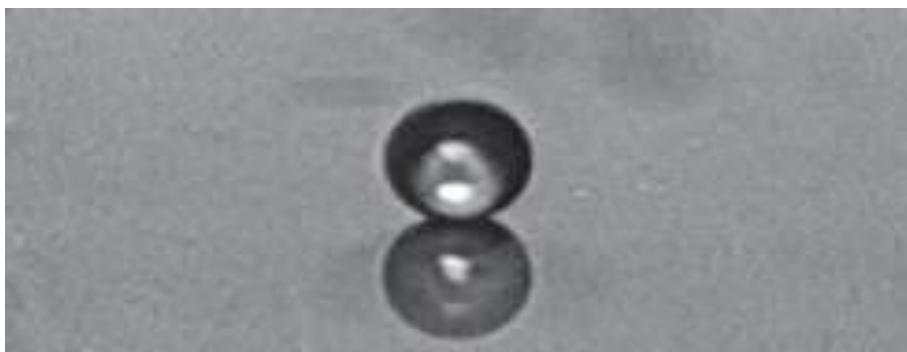


Fig. 2. 8 Goutte d'eau sur une surface hydrophobe : on observe bien un comportement superhydrophobe (angle de 170°).

2.6.5.6 Propriétés des silicones [22]

➤ **Hydrophobicité**

Par rapport aux autres matériaux, les silicones se distinguent par un très haut pouvoir imperméabilisant à long terme, appelé hydrophobicité : l'eau ne pénètre pas dans les pièces d'isolation en élastomères silicones, mais perle à la surface (Fig.2.9), même au bout de nombreuses années. Ils minimisent les courants de cheminement et évitent les décharges dues au contournement électrique, même si la surface est fortement polluée, car ils transmettent leurs propriétés hydrophobes à la couche de dépôts par transfert d'hydrophobie.



Fig. 2. 9 : hydrophobicité d'une silicone

➤ **Tenue aux UV et aux intempéries**

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

➤ **Tenue au feu**

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

➤ **Elasticité**

La très haute élasticité des silicones facilite le montage et permet l'utilisation de nouvelles techniques de montage, comme par exemple, la rétraction à froid pour les accessoires de câbles. Par ailleurs, les silicones conservent leur élasticité jusqu'à -45 °C et conviennent de ce fait aux applications en haute altitude ou dans les régions polaires.

2.6.5.7 Propriétés diélectriques des silicones [20]

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):

- Rigidité diélectrique 15 kV/mm ;
- Permittivité relative à 25 °C et 1 kV est de $5,4$;
- Facteur de dissipation diélectrique à 25 °C et 10 kHz ; $\text{tg } \delta = 4.10^{-3}$ à 5.10^{-3} ;
- Température d'auto-inflammation est supérieure à 300 °C ;
- Masse volumique de 2300 à 2800 kg/m^3 .

2.6.5.8 Applications des élastomères silicones dans l'isolation électrique

Les silicones sont des polymères utilisés dans de nombreuses applications de l'industrie du fait de leurs propriétés d'étanchéité, d'anti-adhérence, de lubrification, de moulage.

On peut trouver l'utilisation de l'élastomère silicone RTV-2 et LSR dans le domaine électrotechnique et plus particulièrement l'isolation électrique. Dans ce secteur d'activité, l'utilisation d'élastomères de type silicone est actuellement envisagée en remplacement de la céramique dans certains matériels électrotechniques subissant de fortes contraintes de champ électrique (isolateurs en particulier).

➤ **Isolation surfacique**

Grâce à une excellente hydrophobicité à la surface, grâce à un retour d'hydrophobicité à la suite de décharges couronnes qui occasionnent un comportement hydrophile, du fait de leur faible poids et de leur flexibilité, les élastomères silicones sont largement utilisés dans l'isolation extérieure depuis une dizaine d'années. On les trouve dans des isolateurs, des traversées et également dans des disjoncteurs et des transformateurs de mesure.

Comme on l'a déjà évoqué, le point faible de ces matériaux est leur faible dureté, ce qui fait que certaines applications où les contraintes mécaniques doivent être fortes leur sont interdites. Dans ce cas, il est souvent utilisé comme revêtement (coating) de céramiques qui elles peuvent supporter les contraintes mécaniques. Quand les contraintes mécaniques ne sont pas trop importantes (ce qui correspond généralement aux dispositifs à moyenne et basse tension), on peut utiliser entièrement l'élastomère silicone.

➤ **Isolation volumique**

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

2.7 Conclusion

Le but de ce chapitre était de présenter quelques généralités sur les matériaux isolants utilisés dans le génie électrique pour les besoins des dispositifs électriques.

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.

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

3.1 Introduction

Une quantité importante de travaux tant théoriques qu'expérimentaux a été consacrée à l'étude du contournement des isolateurs sans pour autant aboutir à l'élaboration d'un modèle pouvant tenir compte des paramètres réels caractéristiques du phénomène de pollution. Il s'agit en particulier de la forme des isolateurs, de la répartition des couches polluantes (continue ou discontinue) et de leur résistivité, des échanges thermiques, de la non uniformité du mouillage et de l'intensité des arcs au voisinage de la surface de l'isolateur, de la formation d'arcs multiples,... Aussi, la détermination de la tension de contournement d'un isolateur pollué est entachée d'une dispersion marquée, même lorsque les conditions sont en apparence contrôlées.

La pollution des isolateurs associée à la présence d'humidité diminue le niveau d'isolation du système [23]. En effet l'apport d'eau au niveau du dépôt de pollution provoque la dissolution des sels et conduit à la formation d'une couche électrolytique [24]. Cette couche, soumise à la différence de potentiel aux bornes de l'isolateur devient le siège d'un courant de fuite conduisant à l'échauffement de la couche par effet Joule et par conséquent à l'apparition de bandes sèches. La différence de potentiel, qui initialement est appliquée entre la ligne et la partie la plus éloignée de la chaîne d'isolateurs, se portera aux frontières de ces zones. A cause des champs électriques très élevés, une étincelle, prenant racine sur la zone humide où le potentiel est élevé,

3.2 Définition

3.2.1 Pollution

La pollution est un phénomène qui constitue un sérieux problème sur l'isolement des ouvrages de haute tension, dont il faut tenir compte lors du dimensionnement de l'isolement des lignes de haute tension. Ceci est dû à la formation de couches plus ou moins conductrices sur la surface des isolateurs. Ces couches peuvent engendrer une diminution considérable de la résistivité superficielle des surfaces des isolants et par suite la diminution de la tension de tenue des isolateurs [14].

L'échauffement de la couche polluante conductrice humidifiée, provoqué par la circulation des courants de fuite sur la surface de ces isolateurs, entraîne des assèchements locaux de la couche de la pollution et l'apparition d'arcs de petite longueur (arcs partiels). Dans certaines conditions, ces arcs partiels peuvent se développer et

engendrer le contournement total des isolateurs, en connectant l'extrémité sous haute tension à celle mise à la terre, et conduisant ainsi à la mise hors service de l'ensemble de l'installation.

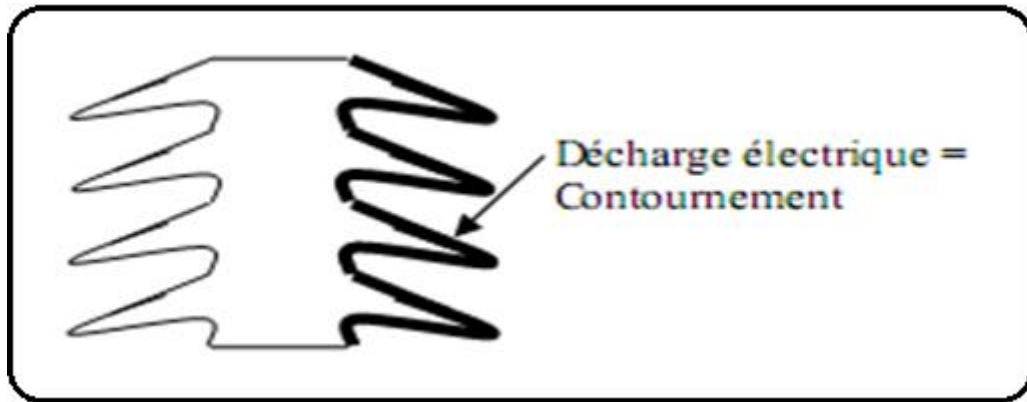


Fig. 3. 1 : Pollution des isolateurs

3.2.2 Salinité

La salinité est définie comme la concentration du sel dans l'eau. Elle correspond au quotient de la masse du sel et le volume de la solution, exprimée en 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.

3.2.4 Degré de pollution

C'est la valeur qui caractérise la pollution telle que la salinité, la conductivité de la couche et la densité de dépôt de sel [25].

3.2.5 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 [26].

3.2.6 Formation des couches polluantes sur les isolateurs

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

- Du profil de l'isolateur (forme géométrique de la surface) ;
- De l'orientation (verticale ou inclinée) de la chaîne par rapport au sol ;
- De la distance à la source de la pollution ;
- De la nature des dépôts, poids et taille des particules ;
- Des caractéristiques climatiques du site (vent, pluie, givre,...) ;
- Des caractéristiques géographiques du site, zone urbaine, industrielle littoral, Sahara,...etc. [27].

3.3 Différentes sources de pollution

On peut classer les différentes sources de pollution en trois catégories [27, 28]:

- Pollution naturelle (marine, désertique,...)
- Pollution industrielle
- Pollution mixte

3.3.1 Pollution naturelle

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

➤ **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 [29].

➤ **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 surfaces de l'isolateur peut aussi conduire à un contournement total de l'isolateur [29, 30].

➤ **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. 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 [30]. 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.

3.3.2 Pollution industrielle

Ce type de pollution est fréquent dans les zones industrielles surtout à proximité des usines, entreprises de production éjectant des fumées (raffinerie, cimenterie,).

Par ailleurs les gaz d'échappements (centrale thermiques) et les engrais utilisés en agriculture contribuent aussi aux dépôts observés à la surface des isolateurs [29, 31].

En présence d'une humidité intense, le sel contenu dans ces polluants abaisse considérablement la résistivité superficielle des isolateurs et le contournement peut parfois avoir lieu.

3.3.3 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 [28, 29].

3.4 Conséquences de la pollution

Les couches polluantes qui s'accumulent à la surface des isolateurs provoquent une conductivité électrique superficielle [28]. 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 :

➤ Arc non localisé

L'arc électrique s'éteint rapidement, puis se réamorçage 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 [31].

➤ 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.

➤ Court-circuit

Dans ce cas, l'arc électrique atteint l'électrode opposée. Ainsi, la formation d'un pont conducteur sur la surface isolante polluée favorise le passage d'un fort courant, ce cas engendre la rupture totale de l'isolation [31].

3.5 Mesure de la sévérité de pollution des sites

Le choix des isolateurs à installer sur le réseau ne peut se faire que si la sévérité de la pollution est connue. Les principales méthodes qui ont été employées pour caractériser la sévérité d'un site sont :

3.5.1 Densité de dépôt de sel équivalent (DDSE)

La DDSE est utilisée comme un paramètre de base pour l'évaluation du comportement d'isolateur sur site. Elle est le dépôt équivalent exprimé en mg de Na Cl

par cm^2 de la surface d'un isolateur, qui a une conductivité électrique égale à celle du dépôt réel, lorsqu'il est dissous dans la même quantité d'eau [28].

La densité du dépôt de sel équivalent est donnée comme suit :

$$DDSE = S_a \frac{V}{S}$$

Telle que :

V est le volume de la suspension en cm^3

S est la surface nettoyée en cm^2

S_a est la salinité exprimé en Kg/m^3

3.5.2 Conductance superficielle

A l'aide de mesure de courant de fuite d'un isolateur pollué dans un site donnée, nous mesurons le rapport : $G = I / V$

La conductivité superficielle est obtenue en multipliant la conductance G 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.

3.5.3 Courant de fuite

Si deux isolateurs identiques, l'un exposé à la pollution naturelle dans un site donné et l'autre pollué artificiellement dans un laboratoire, présentent les mêmes valeurs maximales du courant de fuite, sous une même tension, on peut dire que la pollution artificielle est alors équivalente à la pollution naturelle (réelle du site).

3.6 Classification des sites pollués

Il est possible de caractériser la sévérité de la pollution d'un site en utilisant par exemple, la méthode du brouillard salin équivalent. La sévérité considérée est alors exprimée en terme de salinité équivalente. En effet, on peut faire correspondre à chaque site ou règne indifféremment une pollution naturelle, industrielle ou mixte, une solution saline équivalente.

Afin de définir l'isolement des lignes de transport et d'établir la corrélation entre la salinité équivalente et le niveau de pollution naturelle, quatre classes de sévérité ont été proposées :

Classe 1 : Cette classe correspond à une pollution faible d'origine naturelle excepté marine. Elle concerne généralement des zones non industrielles ayant une faible densité d'habitations, situées loin de la mer. Un isolement normal convient facilement pour ces zones. La salinité équivalente maximale retenue pour cette classe correspond à une pulvérisation d'une solution de chlorure de sodium [NaCl] à 2.5 g/l de concentration.

Classe 2 : Cette classe correspond à une pollution moyenne, naturelle (excepté marine) ou faiblement industrielle. Elle correspond à des zones à moyenne densité d'habitation et situées loin de la mer. Ces zones nécessitent un isolement renforcé. En classe 2, la salinité équivalente maximale retenue est de 10 g/l [NaCl].

Classe 3 : Elle correspond à une forte pollution marine et industrielle. Les zones considérées possèdent une forte densité d'habitation et situées près de la mer, donc exposées à des embruns marins relativement forts. Ces sites nécessitent un isolement important. La salinité équivalente maximale, concernant cette classe, est 80 g/l [Na Cl].

Classe 4 : Elle correspond à des zones où le niveau de pollution est exceptionnel. La pollution dans ces zones peut être naturelle, industrielle ou mixte. Ces zones sont sujettes aux fumées industrielles et aux poussières conductrices produisant des dépôts très épais, et situées très proches de la côte et donc soumises à des vents marins très forts et très polluants.

3.7 Influence des facteurs climatiques sur les isolateurs pollués

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

➤ le Vent

Le vent joue un double rôle. Il assure d'une part le transport et la distribution des dépôts polluants formés sur les surfaces des isolateurs électriques, d'autre part il peut se comporter comme agent d'auto-nettoyage lorsque sa vitesse est élevée [32].

➤ la Pluie

Les fortes pluies permettent en général le nettoyage des surfaces polluées des isolateurs, ce pendant, les fines pluies peuvent mouiller les surfaces polluées, ce qui augmente le risque de contournement [25].

➤ l'Humidité

L'humidification est considérée comme un obstacle car elle influe négativement sur la tenue électrique des isolateurs puisqu'elle accroît la conductivité électrique des agents polluants déposés à leur surface et entraîne par conséquent la diminution de leur tenue [25].

➤ la Température

Contrairement à l'humidité, l'élévation de la température favorise l'assèchement des dépôts polluants, ce qui fait augmenter leur résistivité et par conséquent la tenue des isolateurs contaminés devienne plus importante. Cependant, la différence de température entre le jour et la nuit peut provoquer le phénomène de condensation et l'humidification de la couche de pollution.

3.8 Influence de la répartition de la pollution sur la surface des isolateurs

La répartition de la couche de pollution dépend du profil des isolateurs [23], de la hauteur et de la disposition des chaînes d'isolateurs par rapport au sol et le niveau de la tension qui leur est appliqué. On en compte trois catégories:

- Longitudinale non-uniforme et non-périodique;
- Transversale non-uniforme;
- Longitudinale non-uniforme et périodique.

3.8.1 Répartition Longitudinale non-uniforme et non-périodique

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.

3.8.2 Répartition transversale non-uniforme

Ce type de non uniformité est caractérisé par des secteurs ou bandes de pollution de différentes largeurs, dont la conductivité superficielle est variable d'un secteur à l'autre le long du périmètre de l'isolateur tout en restant constante dans le même secteur, le long de la ligne de fuite. Ce type de répartition est dû principalement à l'existence d'une direction privilégiée des vents et des pluies.

3.8.3 Répartition Longitudinale non-uniforme 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.

3.9 Phénomène de Mouillage [33]

La technique dite de mouillage est basée sur l'exploitation de ces tensions de surface. Le mouillage d'un liquide sur un solide désigne d'une part la forme que prend le liquide à la surface du solide (mouillage statique) et la façon dont il se comporte lorsqu'on essaye de le faire se déplacer (hystérésis, ancrage, mouillage dynamique). Lorsqu'on dépose un liquide à la surface d'un solide, celui-ci tend à se répandre sur la surface. On peut distinguer deux cas de figure :

➤ Le mouillage total

Le liquide couvrira toute la surface du solide. On peut expliquer cela grâce aux tensions de surface ou énergies de surface. Dans ce cas de figure, trois tensions de surface se distinguent :

1. $\sigma_{S/L}$: la tension de surface à l'interface solide/liquide,
2. $\sigma_{L/A}$: la tension de surface à l'interface liquide/air,
3. $\sigma_{S/A}$: la tension de surface à l'interface solide/air, (cas où le solide est seul et entouré d'air).

Il y a mouillage total lorsque la somme des tensions de surface solide/liquide et liquide/air est inférieure à la tension de surface solide/air : $\gamma_{S/L} + \gamma_{L/A} < \gamma_{S/A}$

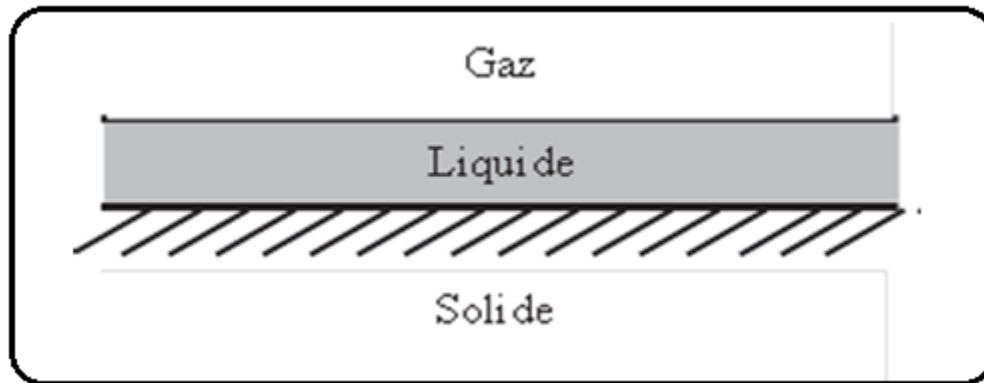


Fig. 3. 2 : Mouillage total : le liquide s'étale complètement sur le substrat sous forme d'un film

➤ Le mouillage partiel

Lorsque la relation $\gamma_{S/L} + \gamma_{L/A} < \gamma_{S/A}$ n'est pas respectée, ce n'est plus le cas d'un mouillage total. On observe alors une couverture partielle de la surface du solide et la formation d'une goutte. Cette goutte trouve sa forme d'équilibre grâce aux tensions de surface décrites par la relation précédente (appelée équation de Young).

Cet angle dépend alors de la nature du liquide, de l'environnement et de la surface.

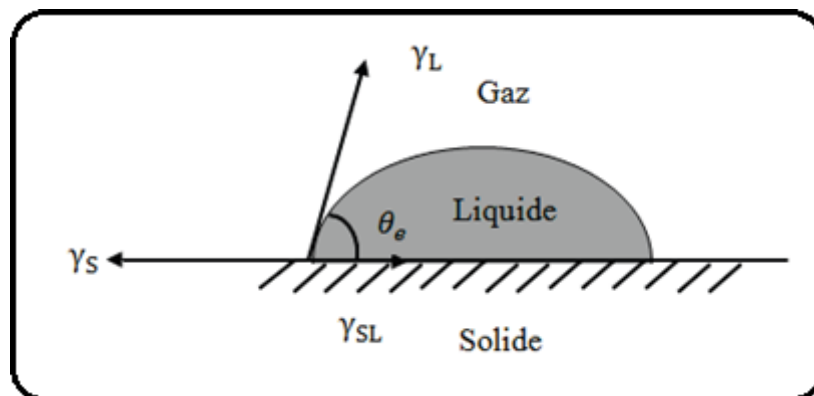


Fig. 3. 3 : Mouillage partiel : le liquide forme une goutte d'angle de contact θ_e avec le substrat. La ligne de séparation S-L-G définit la ligne de contact (ligne triple).

La mesure de l'angle de contact d'un liquide sur un solide permet de déterminer l'énergie d'adhésion. Les différents phénomènes liés à l'adhésion cités précédemment mettent en évidence l'importance cruciale du phénomène de mouillage. Ce phénomène

interfacial qui gouverne la formation, l'organisation et la structuration de l'interface concerne non seulement l'adsorption et l'étalement des polymères mais aussi la cristallisation interfaciale, l'inter-diffusion, la bio-adhésion, l'adhésion cellulaire. Dans ce cadre nous avons plus spécifiquement focalisé notre travail sur le caractère hydrophile ou hydrophobe d'une surface et donc sur la quantification des propriétés de mouillabilité d'une structure solide (substrat) à l'échelle micrométrique.

3.10 Contournement

Le contournement est représenté par une décharge disruptive le long d'une surface solide dont la trajectoire contourne cette dernière. Aussi le terme contournement est employé pour des décharges par amorçage dans l'air.

3.10.1 Contournement sous pollution des isolateurs [25]

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

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

Phase 1 : Dépôt de pollution

Les particules du dépôt sont apportées et déposées par le vent sur la surface des isolateurs (Fig. 3.4a). Celles-ci se concentrent entre les nervures ou derrière le capot. Leur accumulation est continue et n'est modifiée que par le vent et la pluie. Les facteurs de vitesse d'accumulation de ces agents polluants sont les suivants:

- Nature du dépôt, poids et taille des particules;
- Distance de l'isolateur par rapport à la source de pollution et par rapport au sol;
- Vitesse du vent;
- Orientation de la chaîne d'isolateur;
- Ecran éventuel des structures avoisinantes;
- Forme de l'isolateur et son aptitude à l'auto nettoyage par les pluies et les vents.

Phase 2 : Formation d'un électrolyte conducteur

A sec, la résistance superficielle reste élevée malgré le dépôt de pollution. Quand la, couche de pollution devient humide (brouillard, humidité, rosée du matin, pluie fine...),

elle se transforme en électrolyte conducteur et donne naissance à un courant de fuite superficiel (I_f) circulant sur la surface de l'isolateur (Fig. 3.4b).

Phase 3 : Formation d'une bande sèche

Dans les régions étroites de l'isolateur, où la densité de courant est élevée, une partie de l'électrolyte s'évapore et crée une bande sèche (Fig. 3.4c).

Phase 4 : Contournement

Comme la résistance de la bande sèche est beaucoup plus grande par rapport au reste de l'électrolyte, pratiquement toute la tension aux bornes de l'isolateur est maintenant appliquée aux extrémités de cette zone. Il se produit alors un claquage dans la bande sèche:

- Soit la décharge s'éteint \Rightarrow pas de contournement (Fig. 3.4d).
- Soit la décharge progresse sur la surface \Rightarrow contournement de l'isolateur

(Fig.3.4e)

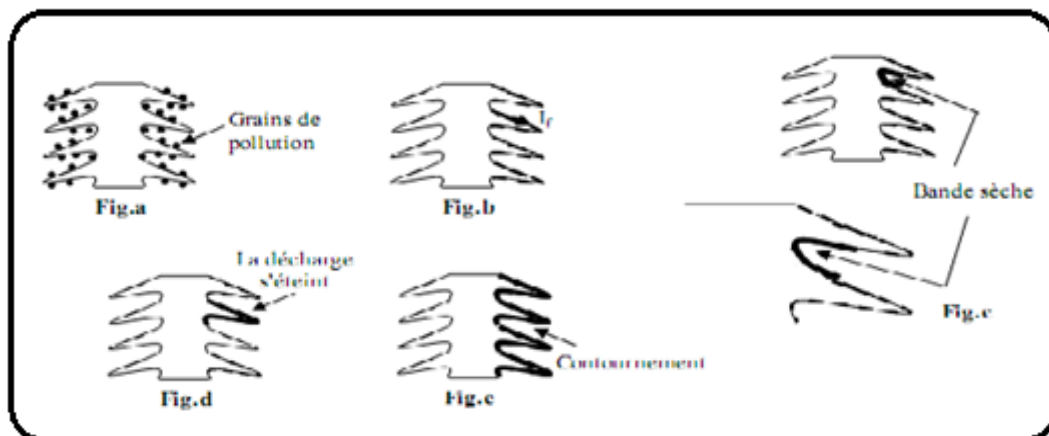


Fig. 3. 4 : Déroulement du contournement

3.10.2 Contrainte de contournement

La contrainte de contournement d'un isolateur est le rapport de tension contournement à la longueur totale de l'isolateur.

3.10.3 Tension de contournement

La tension de contournement est le niveau de tension le plus bas à partir du quel tous les arcs joignent les deux électrodes. [32] Elle dépend :

- De la résistivité volumique moyenne de la pollution.

- De la répartition de la couche de pollution.
- Du profil et des dimensions de l'isolateur.

3.10.4 Tension de tenue

C'est le niveau de tension le plus important, que peut supporter une isolation sans provoquer de décharge disruptive (contournement dans le cas des isolateur) [14].

3.10.5 Courant de fuite

C'est un courant de nature impulsionnelle. Il est de faible amplitude, circulant à travers la couche polluante le long de surface de l'isolateur .Il est donc à caractère électrolytique et de type résistif. Il devient important lorsqu'on s'approche de la tension de contournement .Il dépend de plusieurs facteurs, entre autres, la nature de la couche de pollution, la longueur de la ligne de fuite et les conditions atmosphériques.

3.10.6 Courant de fuite critique

C'est le courant minimal nécessaire pour provoquer le contournement sous pollution d'un isolateur à tension donnée. Il est indépendant du procédé d'essai ainsi que la forme de l'isolateur. Le seul facteur dont dépend ce courant sous une tension donnée est la ligne de fuite, c'est à dire la contrainte spécifique exprimée en kV/cm.

3.10.7 Longueur critique d'arc

C'est la longueur limite X_C de l'arc partiel au-delà de laquelle l'arc conduira au contournement total.

3.10.8 Conductance superficielle

La conductance superficielle est le rapport du courant de fuite circulant à la surface de l'isolateur sur la tension appliquée. Elle caractérise l'état global de la surface isolante.

3.11 Techniques de lutte contre la pollution

L'augmentation du degré de pollution représente un risque immense pour les installations électriques [34]. Pour cela plusieurs techniques de lutte contre la pollution sont utilisées.

3.11.1 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 [35].

3.11.2 Isolateurs plats

Les isolateurs sans nervures ont la propriété d'accumuler moins de pollution que les isolateurs traditionnels et s'autonettoient sous l'effet du vent [36, 37].

3.11.3 Graissage périodique

Par mesure économique, seule les isolateurs de postes sont concernés [34]. On utilise des graisses silicones. Grâce à ses propriétés hydrophobes, la graisse protège temporairement les isolateurs.

3.11.4 Revêtement silicone

Cette méthode consiste à appliquer, par pulvérisation ou au pinceau [35], 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.

3.12 Les isolateurs composites

Ils ont de bonnes propriétés hydrophobes et peuvent être utilisés dans des conditions de pollution très sévères [28]. Cependant, ces isolateurs, revêtus d'un polymère voient leurs caractéristiques changer au cours du temps ; ils peuvent vieillir sous l'effet des différentes contraintes (électriques et climatiques) auxquelles ils sont soumis en service.

3.13 Nettoyage des isolateurs

Le nettoyage manuel et le lavage périodique hors tension sont fréquemment utilisés à travers le monde [35]. 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.

3.14 Conclusion

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

La pollution reste un facteur déterminant pour le dimensionnement des isolateurs dans les ouvrages de haute tension.

La connaissance de degré de pollution est une condition indispensable, pour prévoir une isolation externe convenable.

La nature et la sévérité de pollution dépendent, en grande partie, de la localisation géographique et de l'industrialisation du site.

La meilleure définition de degré de pollution d'un site est d'obtenir la salinité équivalente du site.

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

4.1 Introduction

Le but de ce chapitre est d'étudier expérimentalement l'état de surface d'une isolation en silicone hydrophobe recouverte des gouttes d'eau sur la tension continue de contournement de la surface isolante à inclinaison variable.

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

4.2 Techniques expérimentales

4.2.1 Modèle expérimental, circuits de mesure et de visualisation

La figure 4.1 représente le dispositif expérimental du laboratoire de haute tension (laboratoire des diélectriques) de l'université Abderrahmane Mira de Bejaia. Ce dispositif est constitué de:

- (T100) transformateur 0.08 A /135 kV;
- (G270) diode haute tension;
- (C) capacité de lissage: 10 nF;
- Résistance haute tension de limitation de courant ($R_a = 106 \text{ k}\Omega$);
- Résistance haute tension du diviseur résistif ($R_0 = 250 \text{ M}\Omega$);
- Objet d'essai (échantillon en silicone);
- Caméscope numérique (Cam);
- Voltmètre de crête (V);
- Appareil de commande manuelle ou automatique du transformateur (SG);
- Résistance d'entrée du voltmètre de crête ($R_u = 4.24 \text{ M}\Omega$);
- Angle d'inclinaison de la surface (α°).

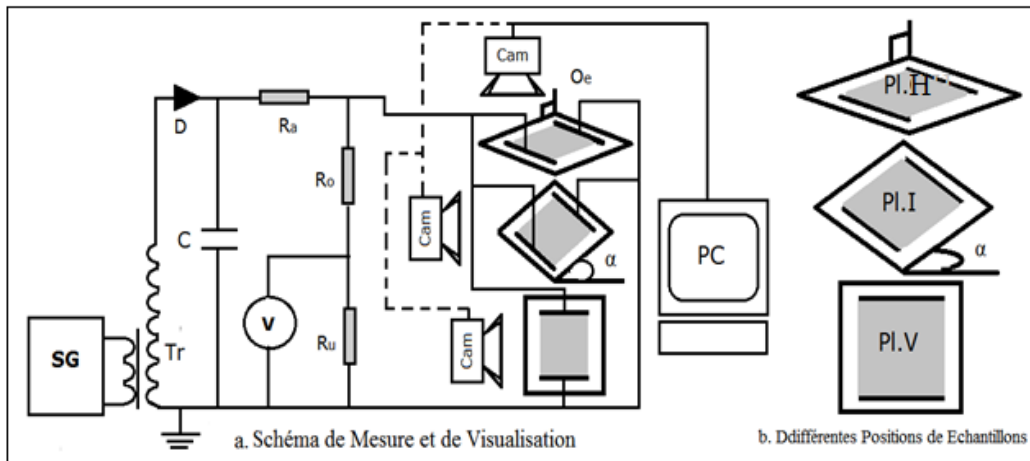


Fig. 4. 1: Schéma de mesure et de visualisation

Le modèle expérimental, représenté en figure 4.2, est composé d'un échantillon en silicone, sur lequel reposent deux électrodes identiques dont l'une est reliée à la haute tension et l'autre à la terre. La distance interélectrode est fixée à 6 cm. Les électrodes planes sont en acier de 2 cm de largeur et 13.5 cm de longueur, l'échantillon en silicone est de forme carrée de 10 cm de largeur et de 5 mm d'épaisseur. L'emplacement des gouttes d'eau sur la surface de l'échantillon est tel que la distance entre les gouttes ou entre les gouttes et les électrodes peut être variée.

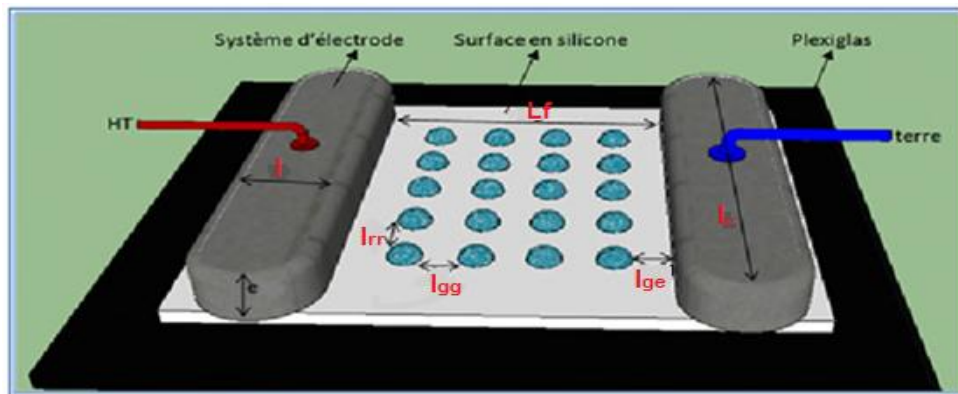


Fig. 4. 2: Caractéristiques du modèle

L_f : Ligne de fuite entre les deux électrodes de base;

l_{ge} : Distance entre la goutte et l'électrode HT ou terre;

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

l_{gg} : Distance entre les gouttes;

e: Epaisseur de l'électrode;
L: Longueur de l'électrode;
l: Largeur de l'électrode.

Ce modèle est posé sur une plaque en plexiglas carrée de 30 cm de côté et 1 cm d'épaisseur. Cet ensemble est déposé sur un support en bois cubique, de 75 cm de longueur, 40 cm de largeur et 48 cm de hauteur. L'inclinaison par rapport à l'horizontale de la surface isolante est assurée par les guides en bois troués sur les deux côtés du dispositif (Fig.4.3). Le support repose sur une table en bois mise à la terre et située à 50 cm du sol.

Le modèle expérimental, représenté en figure 4.3, peut être orienté très aisément en variant son angle de 0° (a), α quelconque (b), jusqu'à 90° (c).

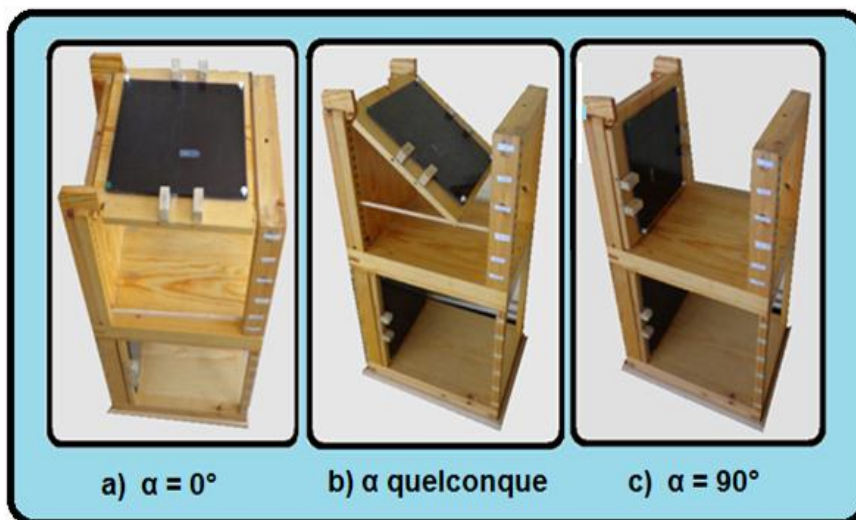


Fig. 4. 3: Différentes positions du dispositif

4.3 Pollution d'une surface isolante

La solution polluante est composée d'un mélange d'eau distillée ou du robinet, selon la conductivité volumique souhaitée, auquel on ajoute de petites quantités de sel. Ainsi nous fixons la conductivité de la solution ionique à la valeur désirée, grâce à un conductimètre à sonde mobile (Fig. 4. 4). Une seule valeur faible de la conductivité volumique ($180 \mu\text{S}/\text{cm}$) a été utilisée dans notre étude.



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

4.4 Procédé d'essai

Après la préparation de l'objet d'essai, nous procédons à la mesure de la tension de contournement d'une surface isolante avec gouttes d'eau. Il est à noter que la valeur mesurée de la tension de contournement est la moyenne de 15 essais effectués sur 15 échantillons différents. Après chaque essai la surface isolante est nettoyée à l'aide du papier mouchoir et mise dans le dessiccateur afin de la protéger contre l'humidité et de lui faire récupérer ses caractéristiques d'isolement. La série suivante est réalisée après un repos des échantillons de plus de quatre heures dans un dessiccateur.

4.5 Dessiccateur

Un dessiccateur désigne un équipement servant à protéger des échantillons en silicone contre l'humidité. Au laboratoire, il est sous forme d'un carré en verre comme il est montré sur la figure 4.5. Au préalable, une quantité suffisante de gel de silice souvent de couleur bleu est déposée au fond du dessiccateur. Ce gel permet de soutirer l'humidité absorbée par les films de silicone lors du dépôt des gouttes d'eau sur leur surface. Lorsque le gel de silice change de couleur et se transforme souvent au rose, il faut le régénérer (Fig. 4. 6).



Fig. 4. 5: Photo montrant un dessiccateur



Fig. 4. 6: Photo montrant le gel de silice (silicagel)

4.6 Correction des résultats de tension en fonction des conditions atmosphériques

La tension de contournement des isolants est grandement affectée par les 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 ($\theta_0 = 20^\circ\text{C}$, $P_0 = 100 \text{ KPa}$ et $H_0 = 11\text{g/m}^3$) est donnée par la relation suivante:

$$U_{c0} = \frac{K_h}{K_d} \cdot U_c \dots\dots\dots (4.1)$$

U_c : Tension de contournement à la température θ , à la pression P et à l’humidité H;

U_{c0} : Tension de contournement dans les conditions normales de température θ , 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;

$$K_d = \frac{2,93 \cdot P}{273 + \theta} \dots\dots\dots (4.2)$$

P : pression en kPa;

θ : 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 (g/m^3), est nécessaire, car K_h est donné en fonction de cette dernière. L'abaque de la figure (4.7a), donne la transformation de l'humidité relative à l'humidité absolue en fonction de la température.

La valeur de l'humidité absolue lue sur l'abaque de la figure (4.7a) est reportée sur l'abaque de la figure (4.7b), pour déduire K_h .

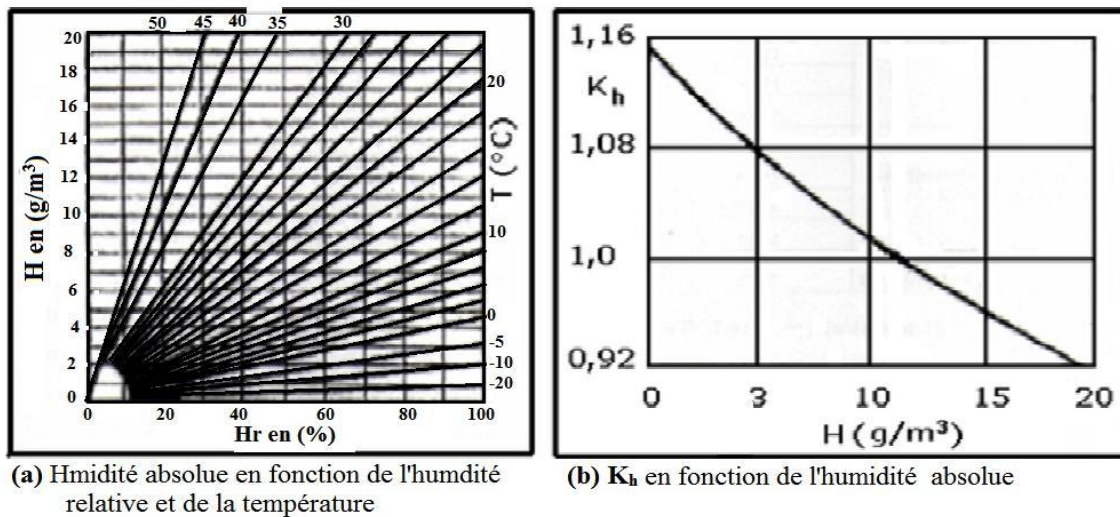


Fig. 4. 7: Abaques de corrections en fonction de l'humidité et de la température

Exemple de calcul:

D'après la mesure de la tension de contournement et les conditions atmosphériques (température, pression et d'humidité) suivantes:

$$\left\{ \begin{array}{l} T = 22^{\circ} C \\ P = 1008 \text{ hPa} \\ Hr = 53 \% \end{array} \right.$$

La tension de contournement mesurée a pour valeur:

$U_c = 50,54 \text{ kV}$. En utilisant les formules de correction et les abaques suscités ci-dessus nous trouvons:

$$K_h = 1.01$$

$$K_d = \frac{2,93 \cdot 100,8}{273+22} = 1.001$$

$$U_{c0} = \frac{1.01}{1.001} \cdot 50.54 = 51 \text{ kV}$$

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

4.7 Paramètres d'influence de la tension de contournement d'une surface en silicone hydrophobe

Dans cette étude les paramètres d'influence de la tension de contournement du système sont:

La polarité de la tension appliquée, le volume, l'espacement entre les gouttes d'eau, la position de la haute tension et l'angle d'inclinaison (α) de l'isolation. La conductivité volumique est fixée à $180 \mu\text{S/cm}$. Le résultat de l'effet de chacun de ces facteurs est exposé aux paragraphes suivants.

4.7.1 Polarité positive

4.7.1.1 Nombre de rangées des gouttes d'eau

Le choix du nombre de rangées de gouttes d'eau (5 rangées) a été expliqué en détails dans l'étude expérimentale réalisée par A. OURDANI [38]. Dans celle-ci, il a pris comme paramètres, une conductivité électrique de $180 \mu\text{S/cm}$, un volume de $45 \mu\text{l}$ et le nombre de rangées de gouttes d'eau variable. Le résultat obtenu est illustré par la figure

4.8, donnant l'évolution de la tension de contournement en fonction du nombre de rangées de gouttes d'eau. La valeur maximale de la tension de contournement est égale à 56.67 kV. Elle est atteinte en absence de gouttes d'eau. Lorsque le nombre de rangées de gouttes d'eau augmente il en résulte une décroissance rapide de la tension de contournement, et à partir du nombre de rangées, de l'ordre de 4 à 5, la valeur de la tension de contournement est minimale et constante (31.5 kV). Dans ce cas de figure la performance de l'isolation en DC+ chute de 44,5% par rapport au cas où celle-ci est propre et sèche.

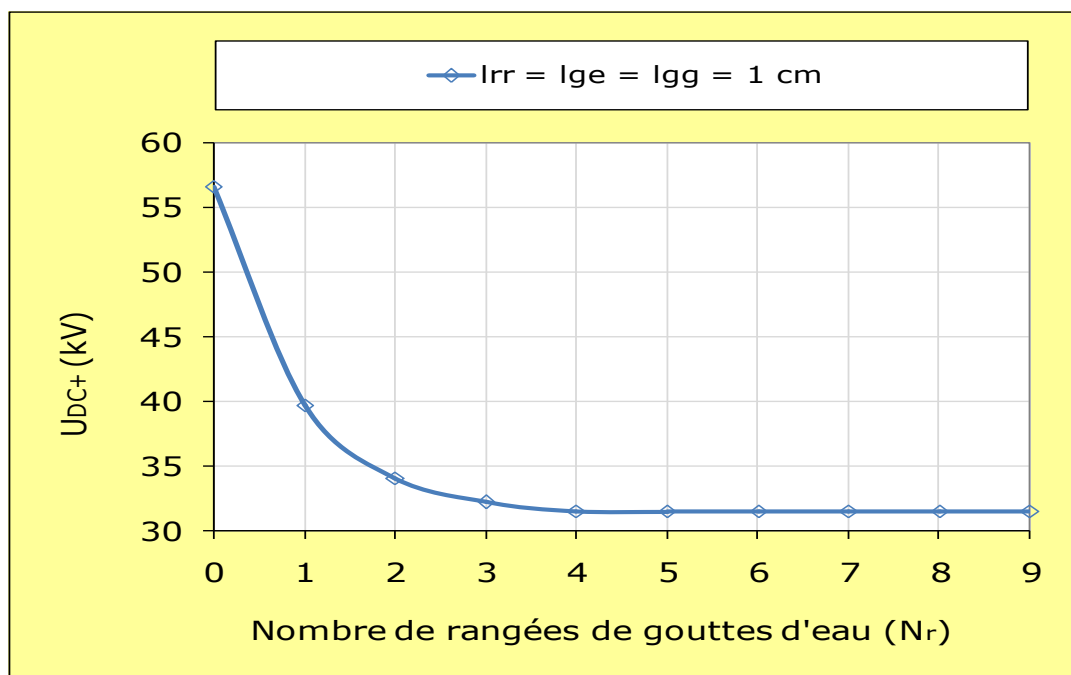


Fig. 4. 8: $U_{DC+} = f(N_r)$ d'une surface en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau

4.7.1.2 Angle d'inclinaison de l'isolation et position de l'électrode sous haute tension

La figure 4.9 montre la variation de la tension de contournement en fonction de la position de la haute tension et l'angle d'inclinaison α par rapport à l'horizontale de la surface isolante en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau à conductivité électrique constante et égale à $180 \mu\text{S}/\text{cm}$. Le volume des gouttes d'eau est fixé à $45 \mu\text{l}$. Les deux courbes donnent pratiquement le même minimum indépendamment de la position de l'électrode mise sous haute tension.

En position horizontale du film, l'allongement des gouttes d'eau est pratiquement infime et cela quelle que soit la position de l'électrode mise sous tension (haut et le bas de l'isolation inclinée). La tension de contournement diminue avec l'augmentation de l'angle d'inclinaison jusqu'à atteindre un minimum, à partir duquel elle croît de nouveau. Cette diminution de la tension est justifiée par un raccourcissement maximal de l'espace entre gouttes d'eau par l'allongement optimal de ces dernières pour un angle d'inclinaison critique de la surface isolante, de l'ordre de 40° pour un volume de la goutte d'eau égal à $45 \mu\text{l}$. A partir de cet angle il est à souligner la croissance de la tension de contournement en fonction de l'angle d'inclinaison jusqu'à α égal à 90° .

En position verticale du film, les gouttes ont tendance à quitter sa surface avant même l'application de la tension sur celui-ci. Celles-ci laissent fréquemment à leur décollage, de petites gouttes derrière elles et le contournement par arc électrique, 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.

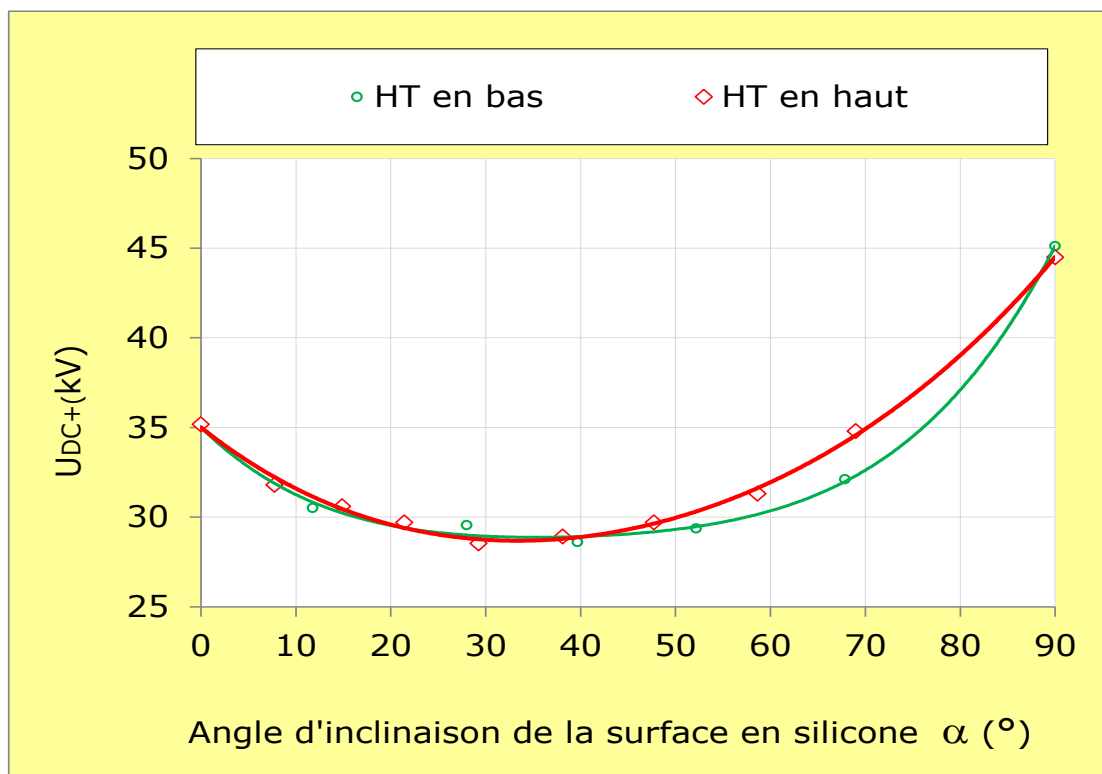


Fig. 4. 9: $U_{DC+} = f(\alpha)$ d'une surface en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau

La figure 4.10 illustre les différentes phases de contournement d'une surface isolante recouverte de gouttes d'eau de 45 μl de volume et inclinée selon un angle $\alpha = 40^\circ$ (angle critique). L'évolution de la décharge dans ce cas s'étale sur plusieurs rangées afin de provoquer le contournement final. Avant l'application de la tension, la forme des gouttes d'eau est quasi-sphérique (Fig. 4. 10a). Après l'application de la tension celles-ci commencent à se déformer (Fig. 4. 10b). Pendant ce mouvement les gouttes d'eau s'approchent rapidement de l'électrode HT. 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.

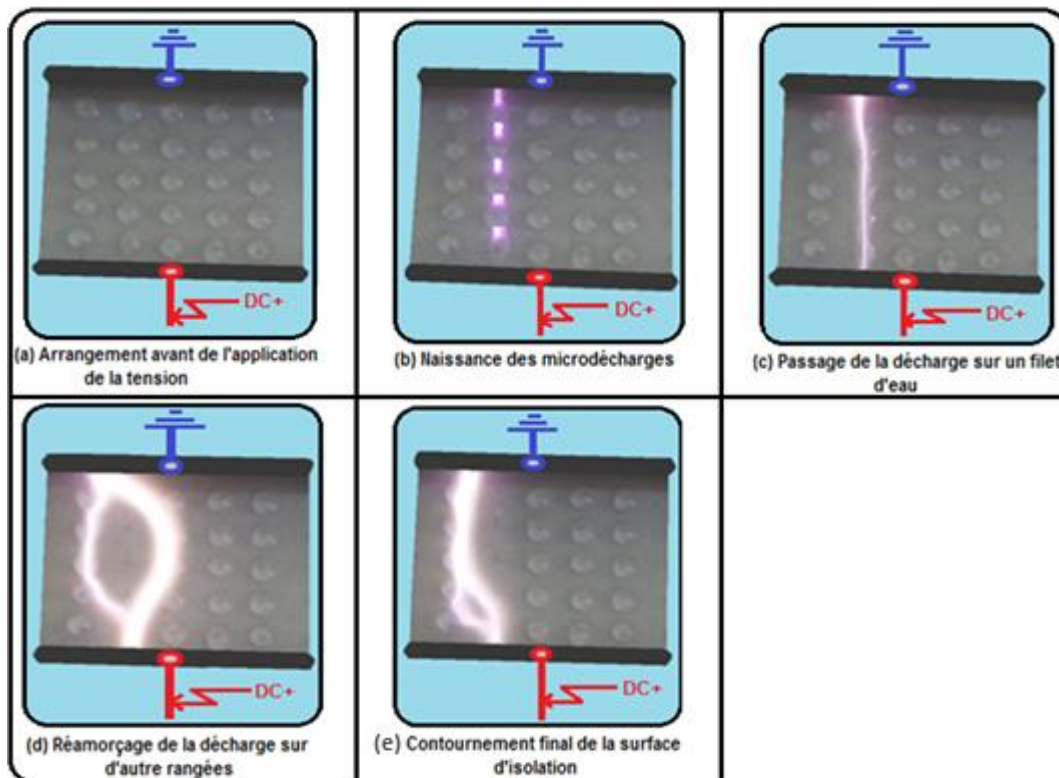


Fig. 4. 10: Différentes phases de contournement de la surface isolante pour $\alpha_c = 40^\circ$ ($N_r = 5$, $V_g = 45 \mu\text{l}$ et $\sigma_v = 180 \mu\text{S/cm}$, α_c : Angle critique correspondant à la tension minimale de contournement)

Sous tension continue positive, le champ électrique est unidirectionnel et orienté de l'électrode HT vers l'électrode terre. Alors les gouttes d'eau ont tendance à obéir à

l'action conjuguée de la force électrique et leur poids. Au fil du temps le champ électrique s'intensifie autour des gouttes déformées et particulièrement sur celles proches de l'électrode HT, afin d'atteindre la valeur critique d'ionisation de l'air au point triple de contact des gouttelettes d'eau avec l'air et la surface du matériau. Des microdécharges apparaissent sur des petits filets partiels (Fig. 4. 10b et 4. 10d). Leur extinction peut survenir si les distances séparant ces filets partiels s'agrandissent pour se rabattre sur d'autres filets d'eau partiels plus rapprochés (Fig. 4. 10c et 4. 10d). 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. 10e). 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 du 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.

4.7.1.3 Angle d'inclinaison de l'isolation et distance entre les gouttes d'eau

La figure 4.11 montre le changement de la tension de contournement en fonction de l'angle d'inclinaison et la distance entre les gouttes d'eau à conductivité électrique égale à 180 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Le volume des gouttes d'eau est fixé à 45 μl dans ce cas de figure. Il en résulte que les deux courbes présentent chacune un minimum dont le plus élevé est obtenu lorsque la distance entre gouttes d'eau est plus grande. Cette différence est justifiée par l'espacement entre les gouttes d'eau après l'allongement maximal des gouttes d'eau et le plus élevé dans le cas de distance entre les gouttes d'eau de 2 cm que celui où la distance entre les gouttes d'eau est de 1 cm. Ces minimums sont atteints pour un même angle critique cité précédemment.

En position verticale de l'isolation, les gouttes d'eau quittent la surface isolante avant même l'application de la tension. Celles-ci laissent à leur décollage des petites gouttes derrière elles. L'espace entre les gouttes devient alors plus grand et par conséquent la tension de contournement de l'isolation s'accroît.

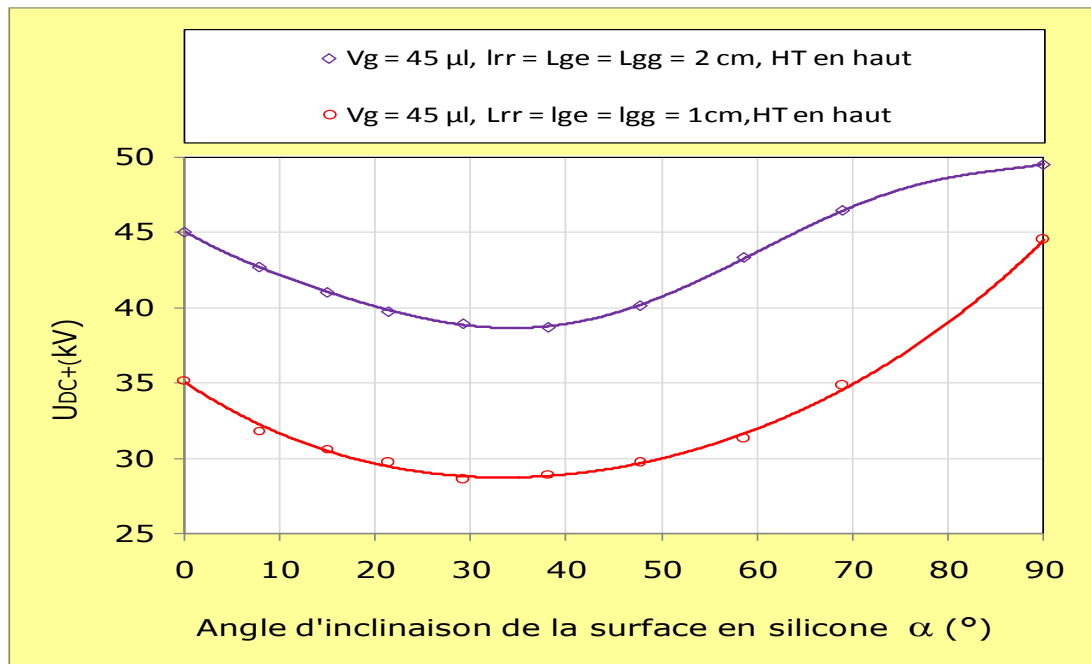


Fig. 4. 11: $U_{DC+} = f(\alpha, l_{rr}, l_{gg}, l_{ge})$ d'une surface en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau (V_g : volume de gouttes d'eau)

4.7.1.4 Angle d'inclinaison de l'isolation et volume des gouttes d'eau

La figure 4.12 donne l'évolution de la tension de contournement en fonction de l'angle d'inclinaison de l'isolation et le volume de gouttes d'eau à conductivité constante et égale à $180 \mu\text{S/cm}$. Il en résulte que lorsque le volume des gouttes d'eau est inférieur ou égal à $30 \mu\text{l}$ ou bien supérieur ou égal à $90 \mu\text{l}$. L'allure de la caractéristique $U = f(\alpha)$ est totalement décroissante. Il est à remarquer le croisement des courbes de performance correspondant au petit et grand volume des gouttes d'eau au niveau de l'angle d'inclinaison critique de l'isolation. Ce point de croisement correspond au même volume laissé par les grosses gouttes de $90 \mu\text{l}$ lors de leur décollage et qui est équivalent à celui des petites gouttes (20 et $30 \mu\text{l}$). La confirmation de ce résultat est obtenue à l'aide de la mesure du volume de ces gouttes à l'aide d'une seringue graduée. Les tensions de contournement de l'isolation sont obtenues pour des inclinaisons nulles où l'allongement des gouttes de $20 \mu\text{l}$ ou $30 \mu\text{l}$ et le raccourcissement de la ligne de fuite est minimal. Par contre les tensions les plus faibles correspondent à une inclinaison de l'isolation de 90° engendrant le raccourcissement maximal de la ligne de fuite de l'isolation. La performance de l'isolation est élevée pour l'angle de 90° car les grosses gouttes quittent la surface de l'isolation en laissant place à de petites gouttelettes d'eau

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

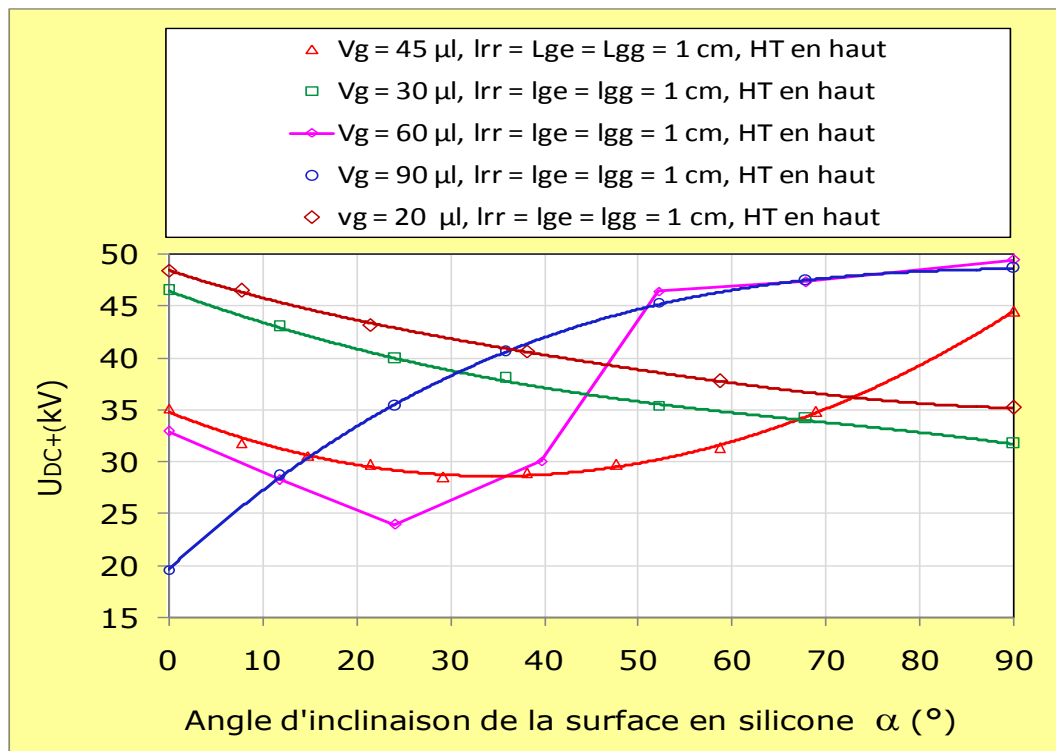


Fig. 4. 12: $U_{DC+} = f(\alpha, V_g)$ d'une surface isolante en silicone hydrophobe recouverte des gouttes d'eau

La figure 4.13 montre l'adhésion des petites gouttes d'eau de 30 μl de volume sous un angle d'inclinaison de l'isolation de l'ordre de 90°. En cette position, l'allongement des gouttes est à sa valeur optimale. Par contre le contraire est dans le cas des grosses gouttes de 90 μl de volume où les gouttes disparaissent en laissant derrière elles de petites gouttelettes à faible volume, ce qui engendre des valeurs de tensions de contournement de l'isolation très élevées puisque la longueur de la ligne de fuite est maximale.

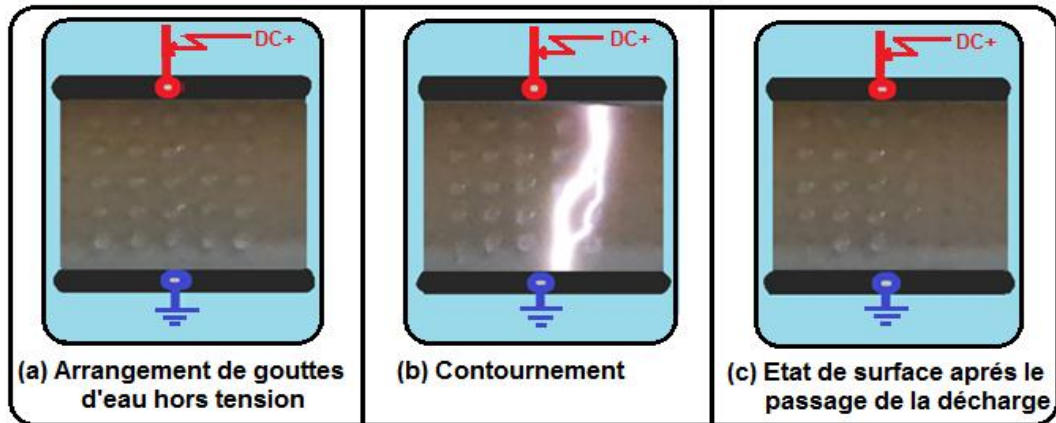


Fig. 4. 13: Contournement d'une surface en silicone recouverte de gouttes ($V_g = 30 \mu\text{l}$, $\alpha = 90^\circ$)

La figure 4.14 montre l'effet de volume sur les différentes phases de contournement sous tension continue positive d'une surface isolante en silicone recouverte de gouttes d'eau de $90 \mu\text{l}$ de volume et en position horizontale. La valeur la plus faible de la performance de l'isolation est atteinte pour $\alpha = 0^\circ$: sous l'action de la tension, les grosses gouttes se déforment en se rapprochant l'une de l'autre, le nombre de microdécharges électrique court-circuitant les gouttes entre elles et/ou celles reliant les gouttes aux électrodes (Fig. 4. 14b) jusqu' avoir un glissement de la décharge électrique (Fig. 4. 14c) un filet d'eau est formé dans le chemin de passage de la décharge (Fig. 4. 14d).

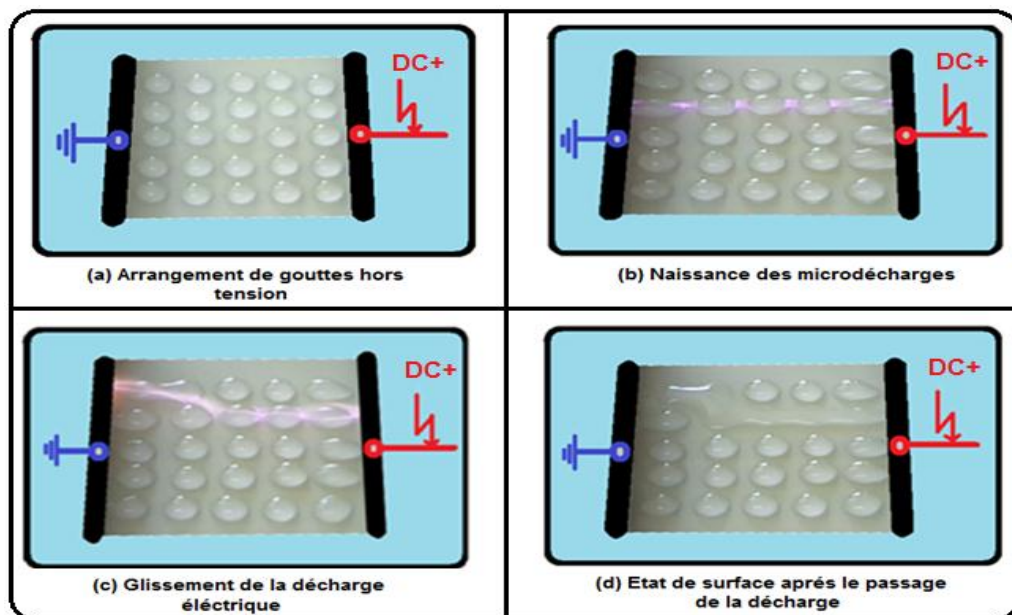


Fig. 4. 14 : Contournement d'une surface en silicone recouverte de grosses gouttes ($V_g = 90 \mu\text{l}$, $\alpha = 0^\circ$)

4.7.1.5 Largeur de la zone sèche

La figure 4.15 illustre la variation de la tension de contournement en fonction de la largeur de la zone sèche située au niveau de l'électrode à la terre et l'angle d'inclinaison de l'isolation. Le volume des gouttes d'eau est de 45 μl et la conductivité électrique est constante et égale à 180 $\mu\text{S/cm}$. Il en résulte que quel que soit l'angle d'inclinaison choisi dans notre étude, la tension de contournement de l'isolation croît en fonction de la largeur de la zone sans gouttes et tend vers une valeur limite de l'ordre de 56,65 kV, atteinte lors de l'absence de toute goutte d'eau sur la surface de la silicone. Il est à remarquer que la tension la plus faible est obtenue pour l'angle d'inclinaison critique indépendamment de la largeur de la zone sans gouttes. La valeur de la performance la plus élevée correspond à l'angle α égal à 90° où les gouttes ont tendance à délaissier la surface en silicone au profit des petites gouttelettes entraînant l'élévation de la tension de contournement de l'isolation.

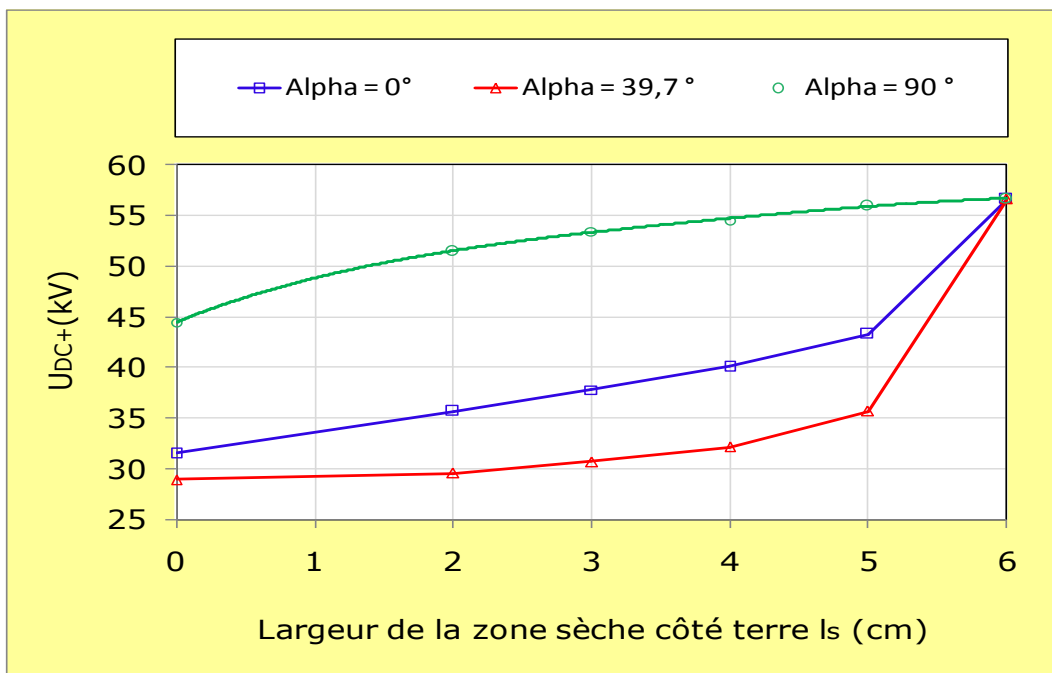


Fig. 4. 15: $U_{DC+} = f(l_s, \alpha)$ d'une surface isolante en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau

4.7.1.6 Volume des gouttes d'eau et l'angle d'inclinaison critique

La figure 4.16 donne l'évolution de la tension minimale de contournement en fonction du volume de gouttes d'eau à conductivité constante et égale à 180 $\mu\text{S/cm}$. A chaque volume de gouttes d'eau est associée une valeur de la tension de contournement

minimale résultant de l'allongement maximal de ces gouttes d'eau. Cette caractéristique émane de la figure 4.12. Il en découle un déclin de la performance de l'isolation à gouttes d'eau lorsque le volume de celle-ci croît. Ceci trouve son explication dans le fait que l'augmentation du volume a tendance à raccourcir la longueur de la ligne de fuite et par conséquent à diminuer sa résistance ce qui engendre la décroissance de la tension de contournement de l'isolation.

Par exemple pour un volume de 90 μl des gouttes d'eau, la performance de l'isolation peut chuter de 66.5%.

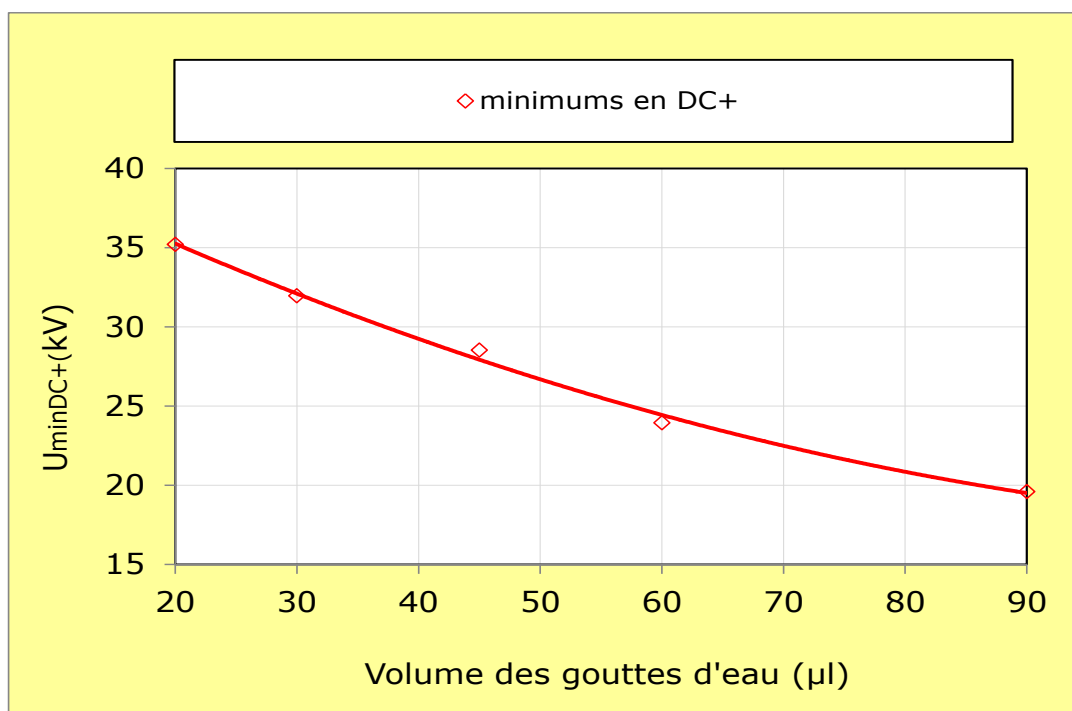


Fig. 4. 16 : $U_{\min DC+} = f(V_g)$ d'une surface isolante en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau

4.7.2 Polarité négative

4.4.2.1 Nombre de rangées de gouttes d'eau

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. Ce résultat est issu d'une étude expérimentale réalisée par H. Tarouansaid et A. Massioun [39].

La figure 4.17 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 64.5 kV, est atteinte en absence de gouttes d'eau sur l'isolation. Pour un volume de gouttes d'eau égal à 45 μl et une conductivité électrique de l'ordre 180 $\mu\text{S}/\text{cm}$, il en résulte que la tension de contournement décroît rapidement jusqu'à atteindre une valeur constante (35 kV), pour un nombre de rangées de l'ordre de 4 à 5.

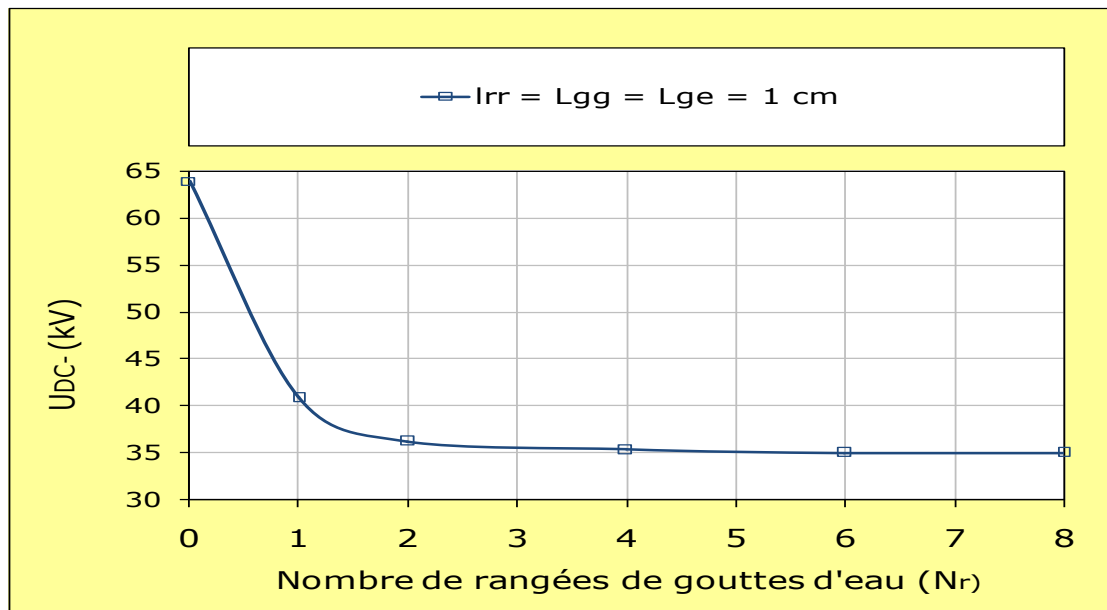


Fig. 4. 17: $U_{DC} = f(N_r)$ d'une surface en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau

4.7.2.2 Angle d'inclinaison de l'isolation et position de l'électrode sous haute tension

La figure 4.18 montre l'évolution de la tension de contournement en fonction de la position de la haute tension et l'angle d'inclinaison α par rapport à l'horizontale de la surface isolante avec des gouttes d'eau à conductivité électrique constante et égale à 180 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Le volume des gouttes d'eau est fixé à 45 μl . Il en résulte que la position de l'électrode mise sous tension (en haut ou en bas de la surface isolante) n'exerce aucune influence sur la performance de l'isolation. Ce phénomène est similaire au cas de contrainte de tension continue positive. La seule différence réside au niveau de la valeur de celle-ci qui est plus élevée par rapport à celle obtenue en polarité positive.

Le phénomène de la variation de la tension de contournement en fonction de l'angle d'inclinaison est dû à l'élongation des gouttes d'eau qu'est engendrée d'une part par la poussée due à la force électrique et d'autre part le poids de gouttes qui agit dans le même sens dans le cas de la position de haute tension en bas du système d'isolation, c'est-à-dire de l'électrode terre vers l'électrode haute tension, et le contraire dans le cas de la position de haute tension en haut du système d'isolation. En polarité négative et en position verticale de l'isolation c'est le même mécanisme qui se déroule que celui obtenu en polarité positive sauf que la direction de la force électrique est opposée à celle régnant en polarité positive.

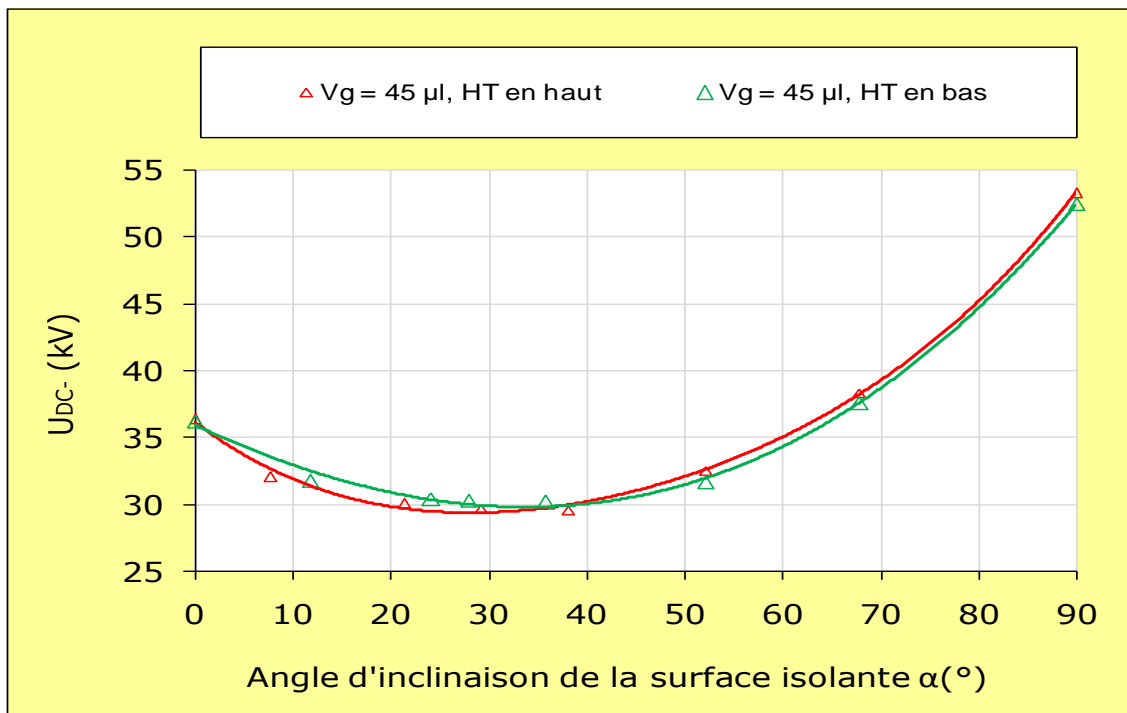


Fig. 4. 18: $U_{DC} = f(\alpha)$ d'une surface en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau

Les photographies représentées en figures 4.19 et 4.20, expliquent les principales phases de contournement d'une surface isolante horizontale en silicone recouverte de gouttes d'eau de $45 \mu\text{l}$ de volume, pour deux angles d'inclinaison (position horizontale et verticale). Les figures 4.19a et 4.20a montrent la forme des gouttes juste avant le passage de la décharge. Les figures 4.19b et 4.20b indiquent le chemin emprunté par la décharge d'arc électrique. Les gouttes d'eau laissées après le passage de la décharge sont plus petites (Fig. 4. 20c) par rapport à celles indiquées sur la figure 4.19c.

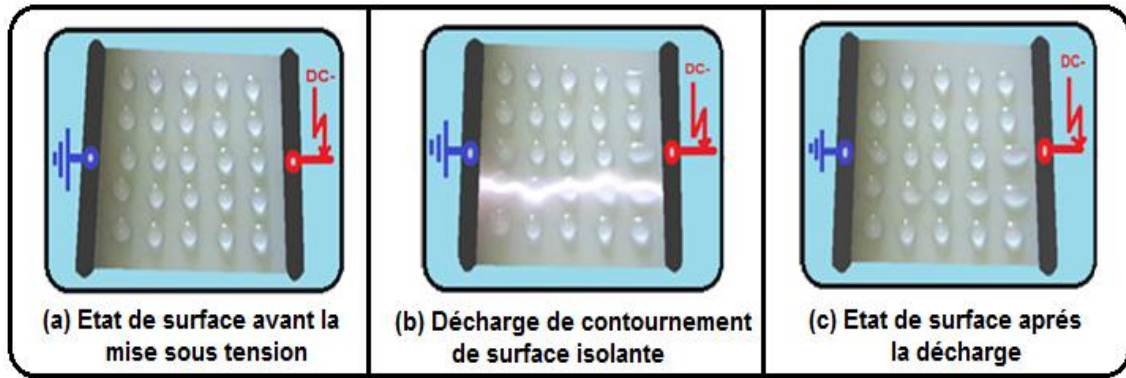


Fig. 4. 19: Contournement d'une surface en silicone recouverte de gouttes d'eau ($V_g = 45 \mu\text{l}$, $\alpha = 0^\circ$)

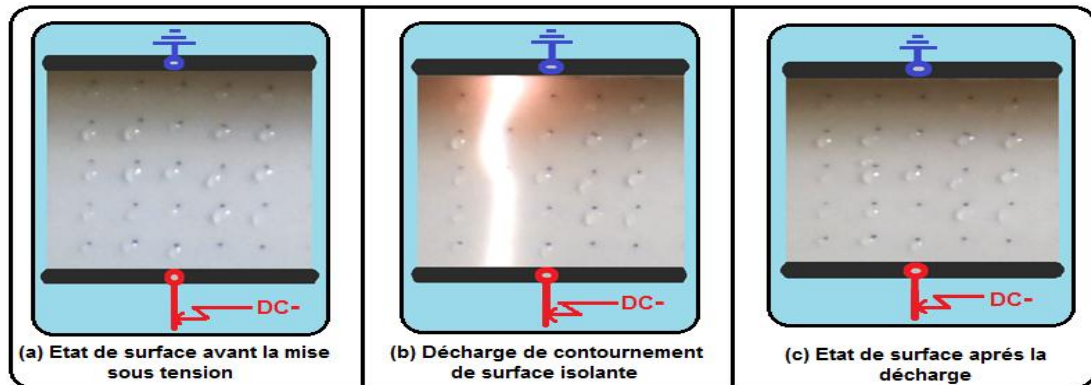


Fig. 4. 20: Contournement d'une surface en silicone recouverte de gouttes d'eau ($V_g = 45 \mu\text{l}$, $\alpha = 90^\circ$)

4.7.2.3 Angle d'inclinaison de l'isolation et distance entre les gouttes d'eau

La figure 4.21 illustre la comparaison des allures de la tension de contournement d'une surface isolante en silicone hydrophobe en fonction de la distance entre les gouttes d'eau et l'angle de son inclinaison par rapport à l'horizontale pour une 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. La tension de contournement est décroissante et atteint la valeur la plus faible pour un angle critique d'inclinaison de l'ordre de 29.27° et de part et d'autre de celui-ci, les tensions de contournement augmentent en fonction de l'angle d'inclinaison, à cause soit de l'écoulement des gouttes d'eau, soit parce que leur allongement est plus petit et par conséquent la ligne de fuite reste pratiquement élevée et la tension de contournement aussi. La tension de contournement est plus grande dans le cas d'un espacement entre les gouttes d'eau égal à 2 cm que celle où celui-ci est de 1 cm .

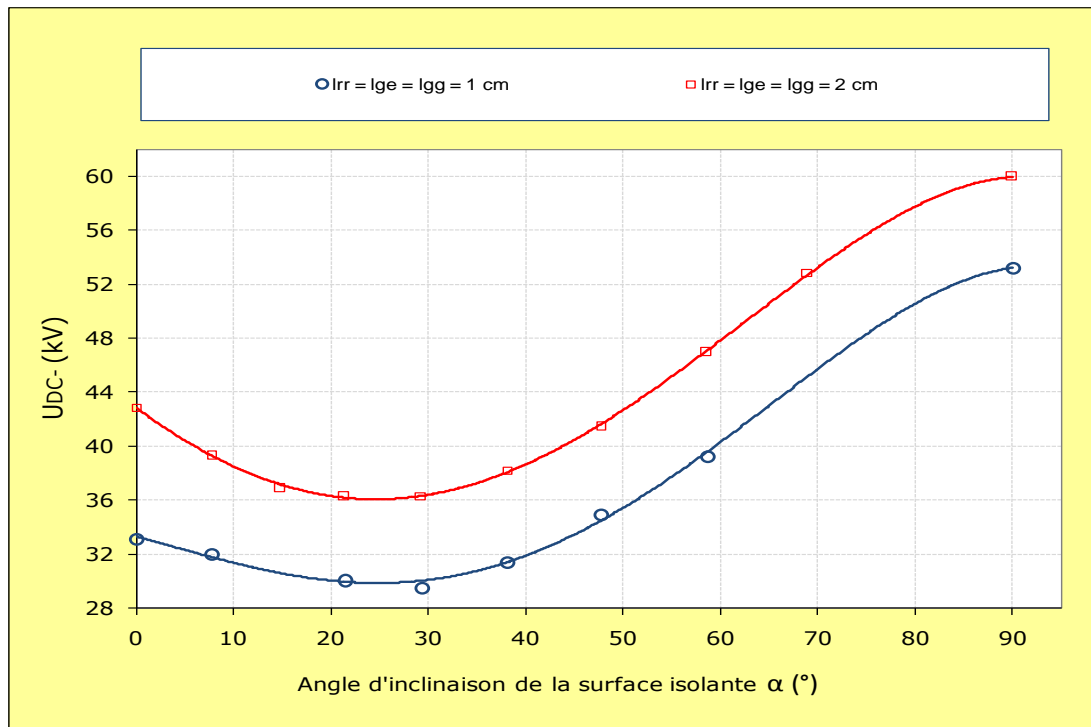


Fig. 4. 21 : $U_{DC-} = f(\alpha, l_{rr}, l_{gg}, l_{ge})$ d'une surface en silicone hydrophobe recouverte des gouttes d'eau

4.7.2.4 Angle d'inclinaison de l'isolation et volume des gouttes d'eau

La figure 4.22 donne l'allure de la tension de contournement de l'isolation en silicone hydrophobe en fonction de l'angle d'inclinaison de l'isolation et le volume de gouttes d'eau à conductivité électrique constante et égale à $180 \mu\text{S}/\text{cm}$. Il en résulte une évaluation similaire qu'en $DC+$. Cette même similitude est constatée entre deux courbes obtenues pour un même volume d'eau donné pour les deux polarités de la tension continue. La seule différence réside plutôt sur l'amplitude de la tension de contournement de la même isolation où elle est plus élevée en polarité négative.

Pour un angle d'inclinaison d'ordre $67,78^\circ$ et des volumes de gouttes d'eau ($60 \mu\text{l}$ et $90 \mu\text{l}$), il est à remarquer que la tension de contournement est la même. Cette tension peut être justifiée par l'égalité des petites gouttelettes d'eau sur la surface lors du décollage des grosses gouttes pour les deux volumes comme il est montré sur la figure 4.23.

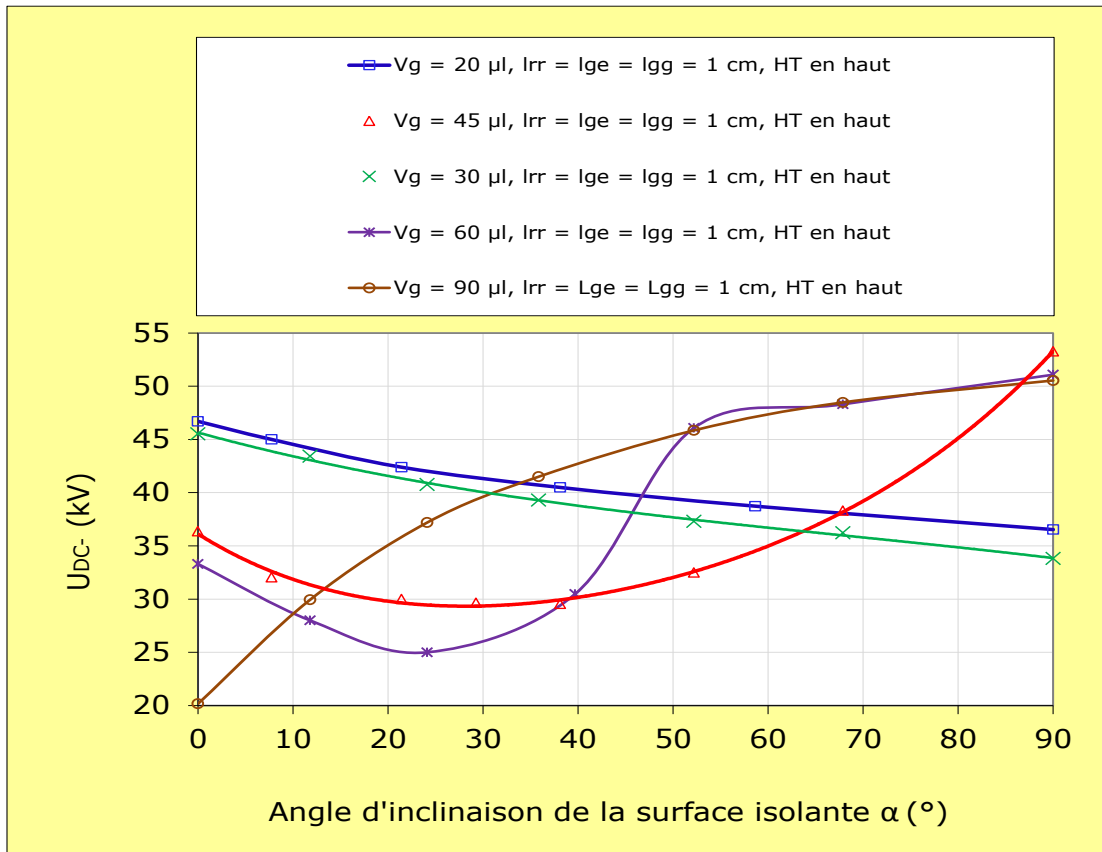


Fig. 4. 22: $U_{DC} = f(\alpha, V_g)$ d'une surface isolante en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau

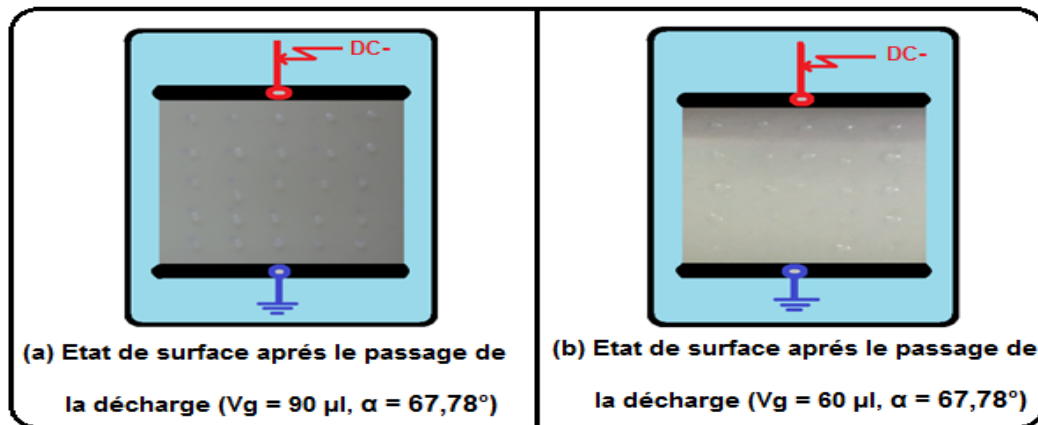


Fig. 4. 23: Petites gouttes d'eau sur une surface en silicone ($V_g = 90 \mu\text{l}$ et $60 \mu\text{l}$, $\alpha = 67.78^\circ$)

La figure 4.24 illustre les différentes phases de contournement d'une surface recouverte de gouttes d'eau et inclinée selon un angle $\alpha = 24.12^\circ$. L'évolution de la décharge dans ce cas s'étale sur deux rangées afin de provoquer le contournement final. Avant l'application de la tension, la forme des gouttes d'eau est quasi-sphérique (Fig. 4.

24a). Après application de la tension celles-ci commencent à se déformer (Fig. 4. 24b) 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.

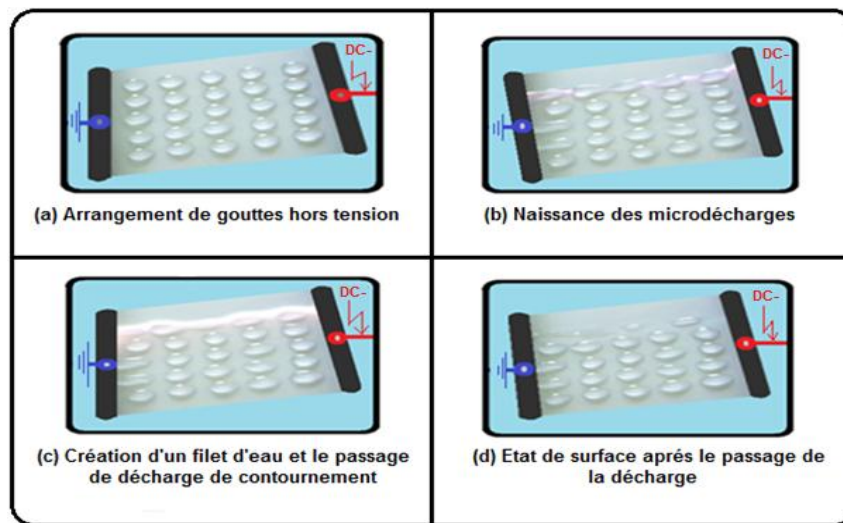


Fig. 4.24: Contournement d'une surface en silicone recouverte de grosses gouttes ($V_g = 60 \mu\text{l}$, $\alpha = 24.12^\circ$)

Sous tension continue négative, le champ appliqué est unidirectionnel et orienté de l'électrode terre vers celle de HT. Les gouttelettes ont tendance à se manifester dans le sens contraire du champ électrique. Le poids des gouttes l'emporte sur la force électrique résultante. Elle commence à se dilater en direction de l'électrode terre (Fig. 4. 24b). 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 allongée. Au fil du temps le champ électrique s'intensifie autour des gouttes déformées et particulièrement sur celles proches de l'électrode terre, 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. 24b). Leur extinction peut survenir si les distances séparant ces filets partiels s'agrandissent pour se rabattre

sur d'autres flets d'eau partiels plus rapprochés. 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. 24c). Après ce contournement les gouttes d'eau sont complètement déformées (Fig. 4. 24d).

4.7.2.5 Largeur de la zone sèche

La figure 4.25 donne la caractéristique de la tension négative de contournement d'une isolation en silicone en fonction de la largeur de la zone sous gouttes d'eau située au voisinage de l'électrode mise à la terre pour trois angles d'inclinaison différents. Le volume des gouttes d'eau est de $45 \mu\text{l}$ et leur conductivité électrique est égale à $180 \mu\text{S/cm}$. Il en découle que quel que soit l'angle d'inclinaison choisi, la performance de l'isolation croît avec l'élévation de la zone sans gouttes pour tendre vers une même valeur atteinte lors de l'absence d'aucune goutte d'eau sur la surface d'isolation. Il est à signaler que la valeur la plus faible de la tension de contournement est obtenue pour un angle critique d'inclinaison et la plus élevée pour l'angle α égal à 90° .

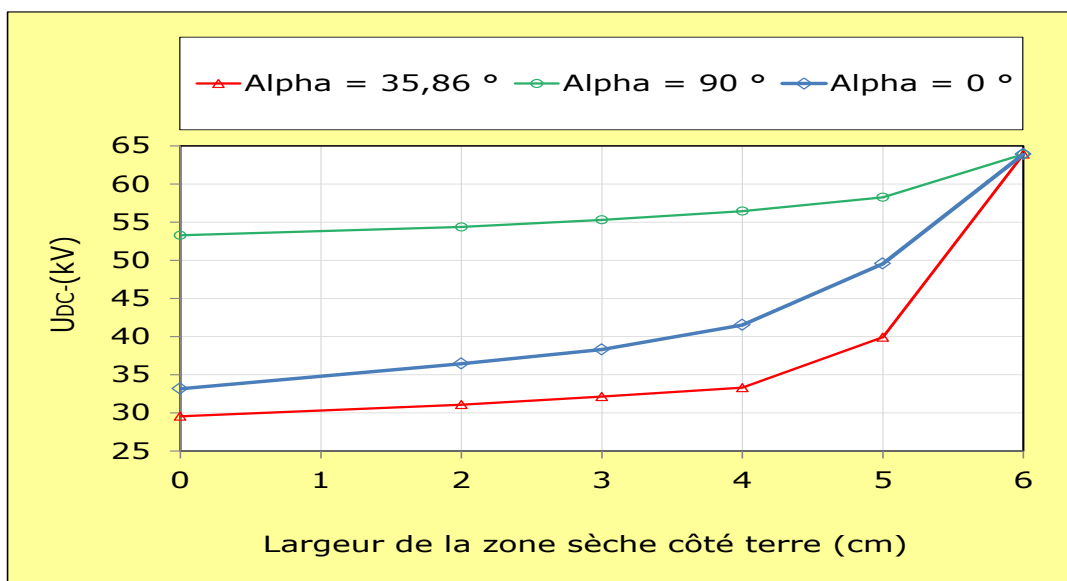


Fig. 4. 25 : $U_{DC} = f(l_s, \alpha)$ d'une surface isolante en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau

4.7.2.6 Volume de gouttes d'eau et angle critique d'inclinaison

La figure 4.26 représente l'allure de l'ensemble des tensions minimales de contournement en fonction du volume des gouttes d'eau à conductivité électrique de

180 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Cette évolution est décroissante avec l'augmentation du volume des gouttes d'eau recouvrant la surface en silicone hydrophobe. Cette diminution de la performance de l'isolation est expliquée par le fait que l'élévation du volume entraîne la réduction de la ligne de fuite de l'isolation et par conséquent sa tension de contournement.

Par exemple en tension continue négative, la performance d'une isolation recouverte de 5 rangées de gouttes d'eau à conductivité électrique de 180 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 90 μl de volume diminue de 69 % sous un angle d'inclinaison de 0 °, c'est-à-dire dans le cas le plus défavorable.

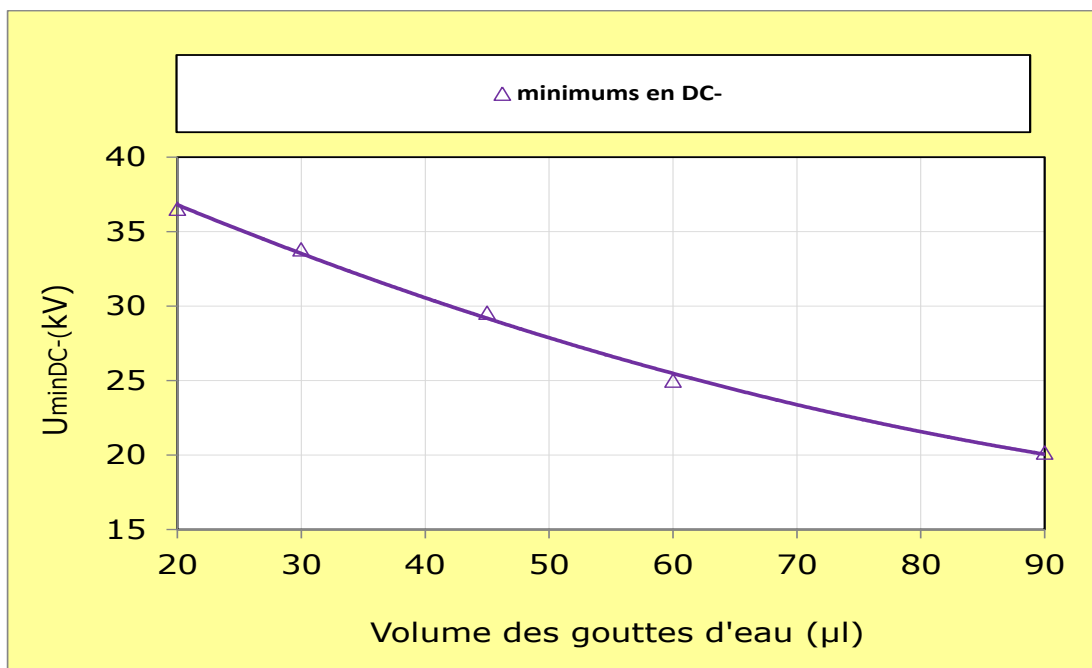


Fig. 4. 26 : $U_{\text{minDC}} = f(V_g)$ d'une surface isolante en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau

Les tableaux 4.1 et 4.2 donnent les intervalles déterminant les tensions de contournement les plus défavorables et celles plus grandes en fonction du volume des gouttes d'eau et l'angle d'inclinaison. La connaissance de ces angles défavorables est indispensable afin de mieux dimensionner un isolateur en vue d'assurer un bon fonctionnement.

Intervalle des tensions de contournement les plus défavorables				
(α °)	0 → 10	11 → 40	40 → 68	68 → 90
Volume de gouttes (μl)	90	60	45	30

Tab. 4. 1: Intervalle des tensions de contournement les plus défavorables

Intervalle des tensions de contournement les plus grandes			
(α °)	0 → 35	35 → 52	52 → 90
Volume de gouttes (μl)	20	90	60 et 90

Tab. 4. 2: Intervalle des tensions de contournement les plus grandes

4.8 Conclusion

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

- La valeur maximale de la rigidité diélectrique longitudinale est obtenue en absence de gouttes d'eau sur la surface de l'isolation. A partir de ce point sa tension de contournement décroît avec l'augmentation du nombre de rangées de gouttes jusqu'à atteindre une valeur limite;
- La position de l'électrode mise sous tension n'exerce aucune influence sur la tension de contournement;
- L'augmentation de la distance séparant les gouttes d'eau fait augmenter la tension de contournement;
- La tension de contournement est plus importante lorsque le volume de gouttes est faible;
- L'allure de la tension de contournement d'une isolation en silicone hydrophobe, recouverte de grosses gouttes, en fonction de l'angle de son inclinaison par rapport

à l'horizontale, présente un minimum correspondant à un raccourcissement maximal de la distance séparant ces gouttes. Pour des angles avoisinant 90° , celle-ci est pratiquement très proche de celle obtenue en absence de telles gouttes. Par contre sous l'action de petites gouttelettes, l'isolation est très rigide puisque ces dernières ne quittent pas la surface isolante;

- Pour un volume de gouttes d'eau de $45 \mu\text{l}$, l'augmentation de la zone sèche conduit à l'augmentation du niveau de la tension de contournement;
- Le dimensionnement d'un isolateur doit être basé sur les minimums de la tension de leur contournement.

Conclusion générale

L'objectif principal de notre travail était d'étudier l'effet du degré d'inclinaison par rapport à l'horizontal d'une isolation en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau sous tension continue, leur polarité et leur volume sur sa performance.

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

- La valeur de la tension de contournement est plus importante en absence de gouttes d'eau ;
- La performance de l'isolation recouverte de 5 rangées de gouttes d'eau de 45 μ l de volume chute de 44,5% en DC+ et de 45.45% en DC- par rapport au cas où celle-ci est propre et sèche ;
- Quelle que soit la polarité de la tension appliquée, et à conductivité électrique de 180 μ S/cm, la tension de contournement la plus faible est obtenue en position horizontale et pour le volume de gouttes d'eau de 90 μ l, la performance de l'inclinaison diminue de 66.5% en DC+ et de 69% en DC-.
- 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 indépendamment du volume des gouttes d'eau considéré.
- La tension de contournement de la surface hydrophobe est plus faible en présence de grandes gouttes que petites ;
- L'influence de changement de la polarité de tension appliquée se traduit par un écart de tension de contournement négative par rapport à la positive.

- [1] **Y. Higashiyama** « Induction charging of droplets ejected from an airless nozzle and the behavior of charged droplets near a grounded disk electrode, Proc. Inst. Electrostat. Japan, 20, 163-170, 1996.
- [2] **H-J. Kloes and D. König.** "Basic investigations of the performance of droplets on electrically stressed polymer surfaces". IEEE Annual report conference on electrical insulation and dielectric phenomena, October 19 - 22 1997.
- [3] **Shiho Yanase, Toshiyuki Sugimoto,** Behaviour of water droplets located on a hydrophobic insulating sheet under DC field, Proceedings of the 1998 IEEE industry applications conference, St. Louis, 1998, pp. 1808–1813.
- [4] **Yoshimura N, Kumagai S.** Electrical and environmental aging of silicone rubber use in outdoor insulation. IEEE trans dielectric lectr insul. 1999; 6: 632–650. doi: 10.1109/94.798120.
- [5] **B. X. Dul, Yong Liul , Y. S. Xia\ B. X. Yangl and B. C. Liu2,** “Dynamic behavior of water droplet for evaluating outdoor insulator”, the 9th international conference on properties and applications of dielectric materials July 19-23, 2009, Harbin, China.
- [6] **C.Baer, R.Cervinka, R. Barsch, J. Seifert, L. Lambrecht, H.J. Winter,** “A comparative evaluation of the retention of the hydrophobicity and the tracking resistance of silicone elastomers under AC and DC stresses “, XVII international symposium on high voltage engineering, Hannover, Germany, August 22-26, 2011.
- [7] **S. Thong-Om, W. Payakcho, J. Grasaesom, A. Oonsivilaiand B. Marungsri,** “Comparison ageing deterioration of silicone rubber outdoor polymer insulators in artificial accelerated salt fog ageing test”, World Academy of Science, Engineering and Technology 60, 2011.
- [8] **Juan. Martinez-Vega** «Matériaux diélectriques pour le génie électrique». Lavoisier 2007.
- [9] **M. Nemamcha,** «cours sur le claquage des isolants haute tension ».2001.
- [10] **Hoang- The-Gian, D. Malec** « phénomène de rupture diélectrique des matériaux isolants en électrotechnique » journées maghrébines des sciences des matériaux organiques par l’institut de physique de l’USTHB. Alger proceeding, Vol. 1, pp. 96-102, 1992.
- [11] **R. Plessow, W. Pfeiffer** “influence of the frequency on the partial discharge inception voltage”, conference on electrical insulation and dielectric pfenomena, app-97-103, 1994.
- [12] **Tlidjane Aissa, Mekhalfia Riadh et Kebaili hamza** « Etude du phénomène de contournement des isolateurs pollues sous tension continue » mémoire d’ingénieur d’état en génie électrique, université de M’simla 2009/2010.
- [13] **Abdelouahab Mekhaldi** « Etude des phénomènes de conduction et de décharge électrique sur des surfaces isolantes polluées sous tension alternative 50 Hz » Thèse de doctorat d'Etat en Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique Alger 1999.
- [14] **Adel Abimouloud** « Comportement d’une surface isolante partiellement polluée sous tension alternative 50Hz » thèse de magister en génie électrique, Ecole Nationale Polytechnique Alger décembre 1999.

- [15] **S. Medjhed, M. Eblaiden**, « Etude de l'évolution temporelle de la sévérité de la pollution d'un site », mémoire fin d'étude DEUA en électrotechnique promotion 2005, Univ de Bejaia.
- [16] **A. Chabloz**, «Technologie des matériaux à l'usage des professions de l'électricité, 1986».
- [17] **A. Anton et J. L. Steinles**, "Micas et produits micacés", Techniques de l'Ingénieur, référence D2360, Toulouse, Mai 1997.
- [18] **Carette L., Pouchol J.M.**, Silicones, dans : Traité de plastiques et composites: Techniques de l'ingénieur, 2001, A3475, pp.1-18.
- [19] **Hardman B., Torkelson A.**, Silicones, in: Encyclopedia of polymer science and engineering, New-York: John Wiley & Sons, 1989, pp.204-308.
- [20] **IEEE Std 957**«IEEE guide for cleaning idolaters», 1995.
- [21] **David Q, José B, and Denis R.** Le mouillage nul (ou presque). Bulletin de la SFP, 125 :8, 2000.
- [22] **Wacker**, «Silicones pour applications haute et moyenne tension» www.wacker.com.
- [23] **E. Nasser**, "Contamination flashover of outdoor insulation", ETZ-A, Vol. 93, pp. 321-325, 1972.
- [24] **J. Y. Saison**, "Etude du phénomène d'humidification de dépôts naturels et artificiels de pollution sur des isolateurs électriques", Thèse de doctorat de l'université de Strasbourg, 1992.
- [25] **R. Bouzeroura** « Etude du développement d'arcs électriques parallèles sur une surface isolante non uniformément polluée sous tension continue », Mémoire de magister, promotion 2009, Université de Béjaia.
- [26] **A. Cimador, S. Vitet**, "La pollution des isolateurs", EDF-Epure, No. 27, Juillet 1990.
- [27] **B. Hammoum, A. Kerbouche** "Etude du phénomène de pollution des isolateurs de haute tension dans la région électrique du centre algérien" Mémoire du projet de fin d'études laboratoire de haute tension, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger. Juin 2007.
- [28] **N. Khairoun, E. Abderrahmane, D. Zellouta** "Essais sur isolateurs pollués et modélisation" Mémoire du projet de fin d'études laboratoire de haute tension, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger. Juin 2007/2008.
- [29] **A. S. Bouhadjar, M. Amokrane** « Caractérisation de l'état de surface d'un isolateur par technique d'ondelettes et modélisation ». Mémoire du projet de fin d'études, laboratoire de haute tension, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger. Juin 2008.
- [30] **Z. Sahli**, « Etude de la non uniformité de la pollution sur les caractéristiques de contournement des isolateurs réels sous tension continue », Thèse de Magister, département d'électrotechnique, Université Abderrahmane Mira de Bejaia.
- [31] **A. Camidor, M. Cojan, P. Haute feuille, M. Morceau** "Méthodes de dimensionnement des isolateurs de lignes aériennes en régions polluées " CIGRE, Rapport 33-04,1978.

- [32] **Nisrine Mhaguen**, « Développement de modèles dynamiques de prédiction de la tension critique de contournement des isolateurs recouverts de glace basés sur la méthode des éléments finis » Mémoire de maîtrise en ingénierie, université du Québec janvier 2011.
- [33] **H. Schonhorn and L.H. Sharpe**. Surface tension of molten polypropylene. chemical and engineering news, 15 :67, 1963.
- [34] **G. Talal**, «Comportement d'un modèle d'isolateur sous tension impulsionnelle», Mémoire de magister en génie électrique, laboratoire de haute tension, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger 2007.
- [35] **C. H. A. Ely, P. J. Lambeth, J. S. T. Looms et D. A. Swift, C.E.G.** « Contournement des polymères humides et pollués », CIGRE, Rapport 15 - 02, Paris, France, 1978.
- [36] **A. Bouarouri R. Ladjal** "Comportement et caractérisation électriques d'un modèle d'isolateur sous tension alternative" Mémoire du projet de fin d'études laboratoire de haute tension, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger. Juin 2006.
- [37] **A. Cimador, S. Vitet**, " La Pollution des isolateurs», EDF-Epure, No. 27, Juillet 1990.
- [38] **A. Ourdani** « Etude du phénomène de décharge électrique sur une surface en silicone revêtue des gouttelettes d'eau sous tension continue positive » Mémoire de master 2 réseaux électriques, 2013. Université de Bejaia.
- [39] **A. Massioun et H. Tarounsain** « Etude du phénomène de décharge électrique sur une surface en silicone revêtue des gouttelettes d'eau sous tension continue négative » Mémoire de master 2 Réseaux électriques, 2013. Université de Bejaia.