



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministre de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Abderrahmane mira – Bejaia
Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique

Mémoire de Fin de Cycle

Présenté par

M^f : MASSIOUN Azeddine

M^f : TAROUANSAID Hassen

En vue de l'obtention du Diplôme Master II en Electrotechnique
Option : Réseaux Electriques

Thème

**Etude du phénomène de décharge électrique sur
une surface en silicone revêtue des gouttelettes
d'eau sous tension continue négative**

Soutenu publiquement le 27/06/2013 devant le jury composé de :

M^{me}. MERABET Samira Doctorante Univ. Béjaïa Présidente

M^f. SAHLI Zahir MCB Univ. Béjaïa Examineur

M^f. BOUDISSA Rabah MCA Univ. Béjaïa Rapporteur

M^{elle} BOUCHELGA Fatima Doctorante Univ. Bejaia Invitée



Dédicaces

Azeddine:

JE DÉDIE CE MODESTE TRAVAIL À LA MÉMOIRE DE MA MÈRE,

À MON PÈRE ET MA GRAND-MÈRE QUE DIEU LES BÉNISSE, À

MES FRÈRES ET SŒURS, À MES COUSINS ET COUSINES

CHACUN SON NOM À TOUTE MA FAMILLE ET MES AMIS (ES) ET

EN PARTICULIER M^{ELLE} KIBOUCHI. N.

SON OUBLIÉ MON BINÔME HASSEN, AINSI QU'À TOUTE SA

FAMILLE.

TOUS LES ÉTUDIANTS DE MASTER EN GÉNIE ELECTRIQUE.

À TOUS CEUX QUI ME SONT CHERS.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents pour m'avoir donné le goût aux études et m'avoir apporté un grand support moral lors de la rédaction de ce mémoire et tout au long de mes études, qu'ils trouvent ici L'expression de mon profond amour.

Mes chères sœurs.

Je ne me permettrais surtout pas d'oublier mes très chers amis(es).

Binôme Azeddine, ainsi qu'à toute sa famille.

Tous les étudiants de Master en Génie Electrique.

Tous ceux que j'aime ...

Hassen

Remerciements

Nous tenons à exprimer nos remerciements :

- A Mr R. Boudissa pour l'encadrement, la compétence avec laquelle il a suivi le long de travail. Nous le remercions du fond du cœur pour sa gentillesse et son grand cœur, qui nous faisons sentir le bien être au cours de la préparation de ce travail.
- A Melle F. Bouchelga pour son aide. Elle nous a dirigés et conseillés lors des travaux expérimentaux.
- A nous amis Redouane, Abdenour, Nacer surnommé (Rakrouk), Tayeb Akrab, Hassen, Djoudi, Sofiane, Prince fares et toutes les personnes qui ont participer de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.
- Et son oublier les membres du jury qui ont accepté d'évaluer notre travail.

Sommaire Introduction Générale 1

Chapitre 01

ETAT DE L'ART

1.1. Introduction	2
1.2. Synthèse des travaux de recherches sur les décharges électriques sur une surface isolante sous tension continue négative.....	2
1.2.1. Shiho Yanase, Toshiyuki Sugimoto	2
1.2.2. J. Danis	4
1.2.3. A. Mekhaldi, D. Namane, S. Bouazabia et A. Beroual	5
1.2.4. H. Deng et R. Hackam.....	6
1.2.5. H.-J. Kloes et D. König.....	7
1.2.6. J. Koller, V. Krha, J. Pichal, L. Aubrecht	8
1.2.7. Luiz H. Meyer	9
1.2.8. G. P. Bruce.....	10
1.2.9. S. Kumagai.....	10
1.2.10. R. Omranipour	11
1.2.11. Yoshno. Higashiyama	11
1.3. Conclusion.....	12

Chapitre 02

ISOLATIONS EN ELECTROTECHNIQUE

2.1. Introduction	13
2.2. Définition	13
2.2.1. Isolant.....	13
2.2.2. Isoler.....	13
2.2.3. Isolation.....	13
2.2.4. Diélectrique	14
2.2.5. Système d'isolation.....	14
2.2.6. Isolateur.....	14
2.3. Différents types d'isolants	14
2.3.1. Isolant gazeux.....	14
2.3.2. Isolants liquides	14
2.3.3. Isolants solides	14
2.4. Propriétés des isolants	15
2.4.1. Propriétés diélectriques	15

2.4.2. Propriétés thermiques.....	19
2.4.3. Propriétés mécaniques	19
2.5. Claquage	20
2.5.1. Tension critique de claquage UC	20
2.5.2. Etincelle-arc électrique.....	20
2.5.3. Décharge disruptive	20
2.6. Matériaux utilisés pour les isolants solides	22
2.6.1. Verre.....	22
2.6.2. Porcelaine	23
2.6.3. Bakélite	23
2.6.4. Le pyrex	23
2.6.5. Silicone.....	24
2.7. Conclusion	35

Chapitre 03

POLLUTION ATMOSPHERIQUE

3.1. Introduction	36
3.2. Définition	36
3.2.1. Pollution	36
3.2.2. Salinité	37
3.2.3. Couche de pollution.....	37
3.2.4. Degré de pollution.....	37
3.3. Différents types de pollution	37
3.3.1. Pollution naturelle	37
3.3.2. Pollution industrielle	38
3.3.3. Pollution mixte.....	38
3.4. Conséquences de pollution.....	38
3.4.1. Conséquences sur l'isolateur	38
3.5. Les facteurs influençant la pollution	40
3.5.1. Vent	40
3.5.2. Pluie.....	40
3.5.3. Humidité.....	40
3.5.4. Température	40
3.6. Classes de pollution	40
3.7. Méthodes de mesure de sévérité de pollution d'un site	41
3.7.1. Densité du dépôt de sel équivalent (DDSE)	41
3.7.2. Conductance superficielle.....	42
3.7.3. Comptage des impulsions de courant de fuite.....	45
3.8. Différentes méthodes d'essai sous pollution	46

3.8.1. Essai sous pollution naturelle	46
3.8.2. Essai sous pollution artificielle	46
3.8.3. Corrélation entre les méthodes de pollution naturelle et artificielle	48
3.9. Techniques de lutte contre la pollution	49
3.9.1. Allongement de la ligne de fuite	49
3.9.2. Lavage des isolateurs	50
3.9.3. Revêtement silicone	50
3.9.4. Isolateurs composites	50
3.10. Conclusion.....	50

Chapitre 04

PARTIE EXPERIMENTALE

4.1. Introduction	52
4.2. Techniques expérimentales.....	52
4.2.1. Modèle expérimental, circuits de mesure et de visualisation	52
4.2.2. Pollution d'une surface isolante.....	55
4.2.3. Procédé d'essai.....	55
4.2.4. Dessiccateur	56
4.2.5. Correction des résultats de tension en fonction des conditions atmosphériques.....	56
4.3. Paramètres d'influence de la tension de contournement d'une surface en silicone hydrophobe.....	58
4.3.1. Conductivité et nombre de rangées de gouttes d'eau	58
4.3.2. Espacement entre gouttes d'eau et nombre de rangées	61
4.3.3. Volume des gouttes d'eau et nombre de rangées	62
4.3.4. Angle d'inclinaison de l'isolation et espacement entre gouttes en surface hydrophobe	63
4.3.5. Volume des gouttes d'eau et inclinaison de la surface en silicone hydrophobe.....	66
4.3.6. Angle d'inclinaison de l'isolation et espacement entre gouttes en surface hydrophile.....	67
4.3.7. Arrangements de gouttes d'eau mixtes.....	68
4.4. Conclusion.....	70
Conclusion générale.....	72

Introduction générale

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

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

Les multiples raisons susmentionnées justifient le but principal visé par ce travail et consiste à savoir si l'utilisation d'un matériaux en silicone peut améliorer la performance d'une isolation sous atmosphère propre et sèche dans le cas du phénomène condensation, c'est-à-dire, lors de la formation de gouttes d'eau sur sa surface, de forme et de conductivité électrique variable.

Dans ce présent mémoire qui est inspiré de plusieurs expériences, nous étudions les paramètres d'influence sur la décharge électrique et la tension de contournement d'une surface isolante plane polluée sous une tension continue négative.

Le premier chapitre sera consacré à la synthèse des travaux de recherches sur les décharges électriques sur une surface isolante sous tension continue négative, le deuxième chapitre est dédié à la description des différentes matières isolantes et leurs propriétés essentielles rencontrées généralement en haute tension. Le troisième chapitre traite le problème de la pollution atmosphérique, les méthodes techniques de mesure du degré de pollution et de lutte contre la pollution. Enfin, dans le quatrième chapitre, nous représenterons les résultats expérimentaux et leur interprétation et puis nous terminerons par une conclusion générale permettant une synthèse du travail réalisé.

1.1. Introduction

Dans le domaine de l'électrotechnique, les élastomères silicones sont déjà largement utilisés dans l'isolation extérieure d'installations électriques haute tension (isolateurs principalement). Les raisons principales sont liées à la bonne tenue aux contraintes climatiques couplées aux bonnes propriétés hydrophobes de ces matériaux. Ces matériaux tendent à remplacer de plus en plus les isolateurs en porcelaine ou verre même si le recul sur la fiabilité des élastomères silicones dans leur utilisation n'a pu être complètement prouvée (on considère que les élastomères silicones sont matures depuis le début des années 1990 pour de telles applications). Parmi les problèmes rencontrés et qui ont fait l'objet de nombreuses études, on trouve des travaux sur la compréhension du mécanisme responsable de la perte temporaire d'hydrophobicité des silicones en fonction de contraintes électriques (décharges couronnes de longue durée), climatiques (pluie, brouillard salin...), et après modification de la surface par exemple suite à un traitement plasma. Plusieurs mécanismes ont été énoncés pour expliquer que cette perte d'hydrophobicité n'est que temporaire; le plus probable semble être celui de la diffusion d'espèces de faible masse moléculaire depuis le volume vers la surface du matériau. Ces problèmes continuent cependant à faire l'objet de nombreuses études.

Dans ce qui suit, des investigations essentielles sur l'étude surtout du phénomène de décharge électrique en tension continue négative, effectuées par différents chercheurs, seront passées en revue.

1.2. Synthèse des travaux de recherches sur les décharges électriques sur une surface isolante sous tension continue négative

1.2.1. Shiho Yanase, Toshiyuki Sugimoto [1]

Ces auteurs ont fait l'étude sur la décharge couronne qui se produit à la base des gouttelettes d'eau placées sur la surface du polymère sous champ à courant continu comme montre sur la figure 1.1. Il a été étudié expérimentalement le comportement de ces gouttelettes d'eau sur les matériaux isolants hydrophobes, le PTFE et le caoutchouc de silicone (SR). L'hydrophobie signifie moins de mouillage ou de répulsion de l'eau. Un angle de contact d'une goutte d'eau placée sur la surface isolante est l'une des méthodes d'évaluation de l'hydrophobie. Les valeurs des deux types d'angle de contact, les angles rentrants et sortants statiques mesurés en utilisant une

goutte d'eau de 4 ml de SR sont respectivement de 105° 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.

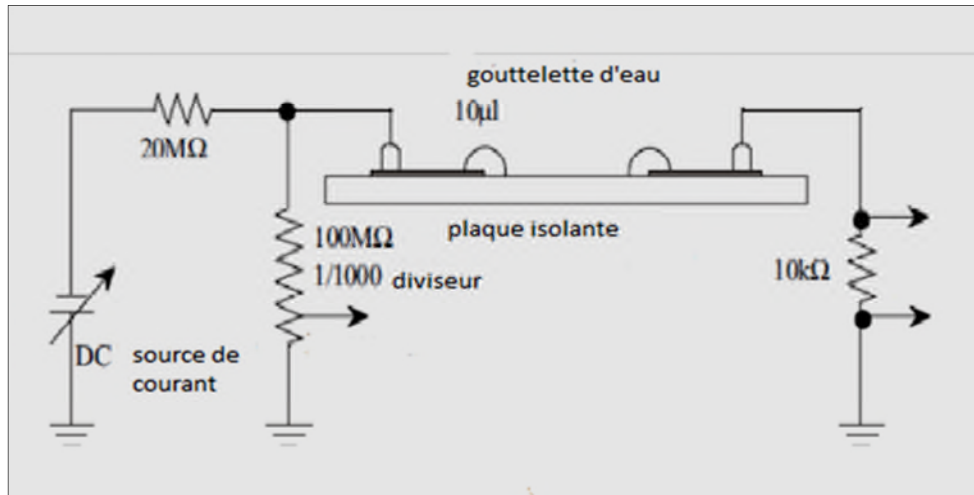


Fig. 1.1: Diagramme schématique du dispositif expérimental

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.

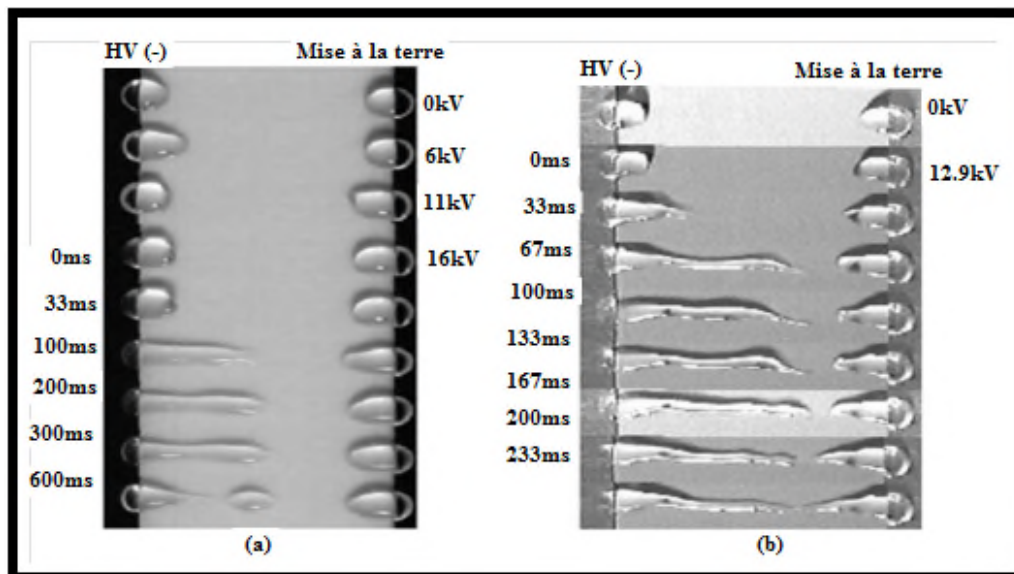


Fig. 1.2: La formation d'un canal d'eau lorsque la tension négative est appliquée aux électrodes sur: (a) de PTFE, et (b) SR

D'après l'auteur ils ont constaté que la polarité de la tension appliquée affecte exactement le comportement des gouttes d'eau sur la plaque de SR comme cela est montré sur la figure 1.2. 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. Une certaine quantité de charge est émise l'interruption d'une goutte d'eau en petite fraction. Bien que le SR et le PTFE soient des matériaux hydrophobes, leurs conditions de surface sont très différentes. Etant donné que la charge de 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.

1.2.2. J. Danis [2]

Ce modèle est constitué d'une plaque isolante, de forme géométrique simple, munie de deux électrodes rectangulaires identiques et placées aux deux extrémités de la plaque (Fig. 1.3).

Dans le but de reproduire des couches similaires à celles observées sur les isolateurs pollués dans les conditions naturelles, J. Danis a considéré plus d'une zone sèche (Fig. 1.3). Ainsi l'auteur a abouti aux résultats suivants :

- L'arc électrique prend naissance dans les zones sèches et se déplace vers les zones humides. Cet arc commence d'une façon aléatoire le long de la zone sèche et aucune position n'est privilégiée par rapport à une autre.

- Dans le cas d'une alimentation continue, l'aspect de l'arc dépend de la polarité de l'électrode qui se trouve juste à proximité de l'arc (en cas de zone humide). Il semblerait que l'anode provoque un arc en forme de simple décharge lumineuse. La cathode, par contre, provoque un arc aux multiples ramifications fines. De plus, le développement de l'arc à proximité de la cathode est plus rapide que celui à proximité de l'anode.

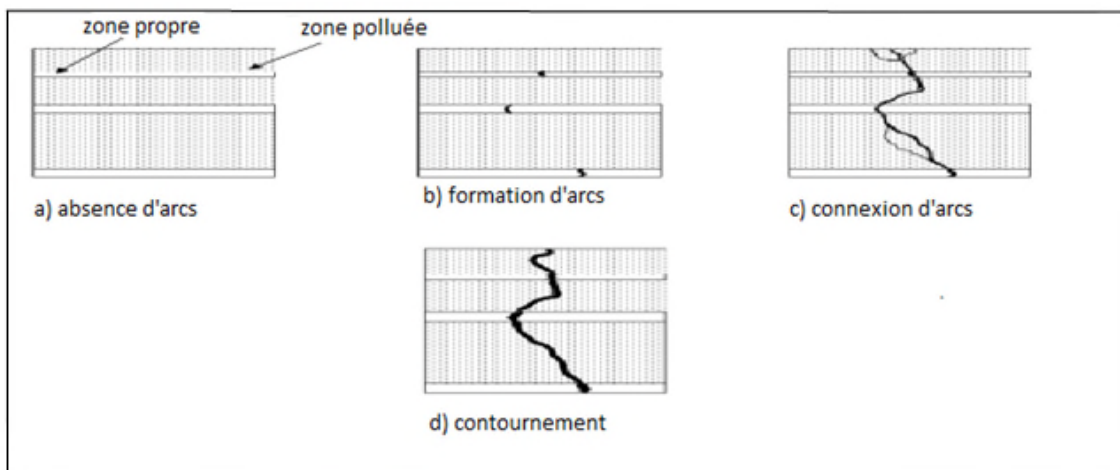


Fig. 1. 3: Modèle de J. Danis

- Plusieurs arcs peuvent se développer en parallèle aux premiers stades du processus. Plusieurs arcs disparaissent, lorsque le courant augmente, de manière à ce qu'un seul arc dominant persiste au cours des étapes suivantes. Celui-ci se développe donc, seul, à travers la zone humide. Dans le cas de plusieurs zones sèches, le développement de l'arc d'une zone sèche à travers la zone humide s'effectue de manière à rejoindre l'arc développé sur la zone sèche voisine.
- Le contournement se fait à travers les chemins déjà préétablis par les différents arcs de chaque zone sèche

1.2.3. A. Mekhaldi, D. Namane, S. Bouazabia et A. Beroual [3]

Ces auteurs ont étudié l'influence de la répartition discontinue de la couche de pollution sur le comportement d'un modèle plan de l'laboratoire. Ce modèle est soumis à des différentes contraintes bien définies, à savoir la discontinuité de la pollution en variant de manière régulière la largeur de la pollution de 0 à L (L étant la longueur de fuite totale, égale à 40 cm), la position de la pollution, ainsi que la conductivité de la couche polluante.

En effet, deux configurations de la pollution ont été considérées, à savoir, la pollution côté

électrode circulaire de haute tension et la pollution côté électrode rectangulaire de terre comme montre la (Fig.1.4).

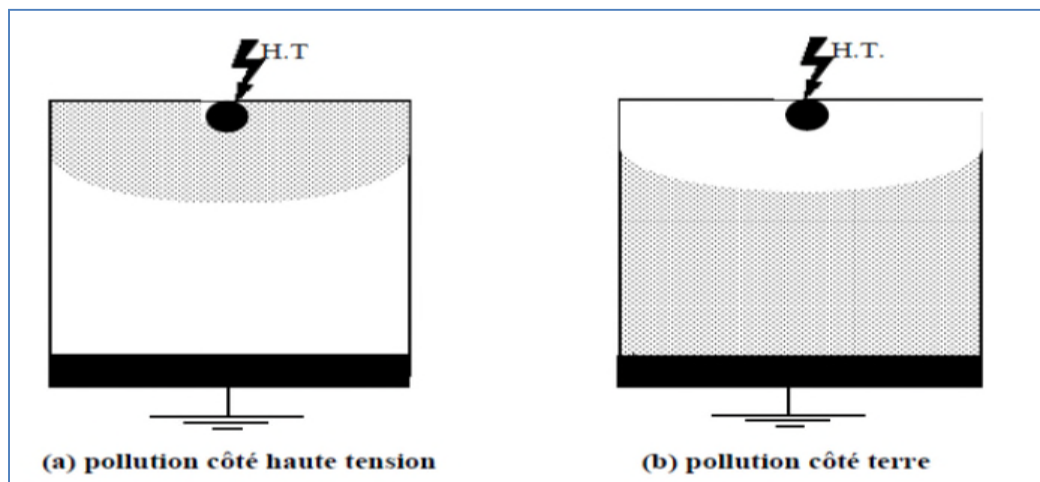


Fig. 1. 4 : Modèle d' A. Mekhaldi, D. Namane, S. Bouazabia et A. Beroual

Les principales conclusions tirées sont :

- Il existe un régime critique à partir duquel on obtient une hausse brutale du courant. Ce régime est atteint pour les grandes largeurs de la couche polluante, lorsque la tension et/ou la conductivité sont élevées.
- Le courant de fuite est toujours plus élevé lorsque la couche polluante est du côté de l'électrode rectangulaire, mise à la terre.
- La conductivité favorise la circulation du courant de fuite, surtout lorsque la couche de pollution est établie côté terre.
- La position de la pollution n'a apparemment pas d'influence sur la tension de contournement.
- Il existe une longueur critique de la zone sèche à partir de laquelle aucun arc stable ne se propage. Cette longueur, évaluée au tiers de la longueur de la ligne de fuite ne se propage. Diffère considérablement de la longueur critique d'arc obtenue par P. Claverie et Y. Porcheron dans le cas de pollution continue.

1.2.4. H. Deng et R. Hackam [4]

L'eau joue un rôle très important dans le vieillissement des matériaux polymères sous champ électrique. Les matériaux polymères isolants pour les applications externes sont soumis pendant une période assez importante de l'année à l'action des eaux de pluie et du vent. H. Deng et R. Hackam ont réalisé une étude pour évaluer l'impact de l'eau sur l'élimination des molécules de

faible poids moléculaire présentes en surface des silicones. Cette étude a montré que l'immersion des matériaux dans une eau ayant une conductivité de $70 \mu\text{S}/\text{cm}$ pendant 14 mois a provoqué une diminution de la quantité de molécules de faible poids moléculaire de 11 %. Les auteurs expliquent cette diminution par une dissolution de ces molécules dans l'eau.

De nombreux autres travaux ont montré le rôle primordial de l'eau sur la conductibilité des isolateurs [5]. La plupart des résultats de ces travaux sont interprétés en termes de quantité d'eau absorbée par le polymère en volume ou adsorbée en surface. Cependant, ni les mécanismes de conduction, ni le rôle précis de l'eau n'ont pu être précisés. Il est toutefois très important de noter que la conductivité en elle-même n'est pas un "danger réel" pour la vie du matériau, mais l'effet joule généré peut être la source de formation des bandes sèches et par conséquent d'apparition des décharges partielles.

1.2.5. H.-J. Kloes et D. König [6]

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, 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 microdécharges 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.

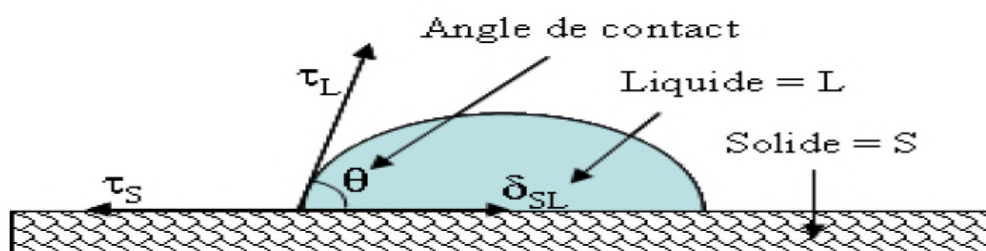


Fig. 1. 5: Forces en présence lorsqu'une goutte est placée sur un substrat en absence de contraintes électriques

Sous contrainte électrique, les forces électrodynamiques s'ajoutent et sont à l'origine de l'éjection des microgouttelettes. Par ailleurs, 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.

1.2.6. J. Koller, V. Kriha, J. Pichal, L. Aubrecht [7]

L'étude sur l'effet de polarité et le développement de la décharge couronne.

La décharge couronne peut être positive ou négative selon la polarité de l'électrode de faible rayon de courbure. Si elle est positive, on parle d'une décharge couronne positive, sinon, d'une décharge couronne négative. Du fait de la différence de masse entre les électrons (négatifs) et les ions (positifs), la physique de ces deux types de décharge couronne est radicalement différente. La décharge couronne négative se produit beaucoup plus qu'une décharge couronne positive par contre la décharge complète intervient à des tensions plus faibles en polarité positive qu'en polarité négative. Pour la décharge couronne négative, l'avalanche électronique prend naissance sur la pointe et se dirige vers l'électrode plane. Par contre en polarité positive, les électrons libres naturels et ceux créés lors des avalanches électroniques se déplacent vers l'anode dans la zone où le champ électrique est le plus intense. De plus la décharge couronne apparaît à des tensions plus faibles en pointe négative qu'en pointe positive. Mais la décharge complète intervient à des tensions plus faibles en polarité négative. Du point de vue de l'isolation, les décharges couronne positives sont plus néfastes que celles des couronnes négatives. L'intensité lumineuse et la longueur des streamers sont beaucoup plus faibles qu'en polarité positive, de plus le champ seuil de l'effet couronne est légèrement plus petit en tension positive qu'en tension négative et les pertes sont plus élevées en polarité négative qu'en polarité positive.

La décharge positive présente un grand intérêt dans la mesure où elle constitue la contrainte la plus sévère pour un intervalle du point de vue isolation. Les décharges négatives sont en effet de structure très complexe. Il faut pratiquement une tension deux à trois fois plus forte que dans le cas de la décharge positive pour obtenir l'amorçage. La figure.1.6 illustre les deux processus de décharges.

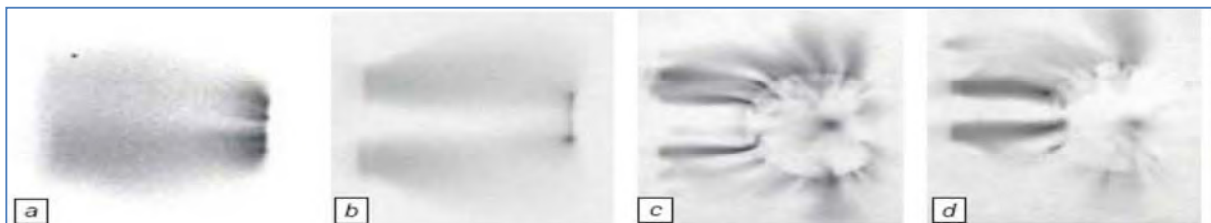


Fig.1. 6: Photographie de la décharge couronne
(a et c) : polarité négative (b et d) : polarité positive

D'après les auteurs ils ont constaté que dans le cas d'une pointe alimentée par une tension négative (pointe cathodique), l'apparition d'un électron germe à proximité de la pointe peut provoquer une avalanche électronique qui se développe en champ divergent. La cathode accélère alors les ions positifs qui la percutent et lui arrachent des électrons secondaires. Ce phénomène propre à l'utilisation d'une pointe cathodique, entraîne un abaissement de la tension de claquage de la décharge par rapport à la configuration pointe positive-plan. La charge d'espace positive domine dans la zone d'ionisation tandis que la zone de dérive ionique possède une charge d'espace négative, faible ou forte suivant l'importance des processus d'attachement électronique. La figure.1.7 montre le mécanisme du développement d'une décharge couronne négative en géométrie pointe-plan, temporel et instantané.

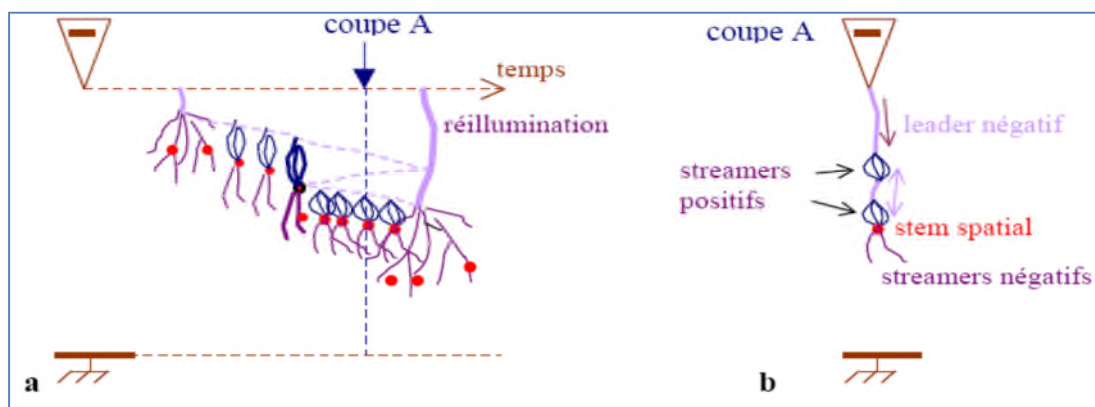


Fig. 1. 7. Développement de la décharge électrique négative
a) temporel, b) instantané

1.2.7. Luiz H. Meyer [8]

Les études sur l'exécution du caoutchouc rempli de silicone sous de tension continue positive ou négative sont très rares. Les quelques articles édités dans ce secteur sont récapitulés ci-dessous. Moreno et autres ont rapporté que l'exécution des isolateurs polymères à l'essai (IP) plan incliné avec le courant alternatif, était meilleure que celle sous le courant continu. Venkatesulu et joie Thomas ont signalé que le caoutchouc de silicone(SR) avec des remplisseurs a exécuté mieux sous le courant alternatif qu'avec le courant continu positif. Bruce et autres a analysé l'exécution du(SR) avec quelques concentrations standard des remplisseurs et l'exécution sous le courant continu négatif est avérée meilleure une fois comparée au courant continu positif. L'auteur a fait l'étude de l'analyse du courant de fuite sur le caoutchouc rempli de silicone. Il voit que le courant efficace observé à différents intervalles de temps était beaucoup plus élevé dans le cas du courant continu positif par rapport à la tension continue négative. Cela pourrait expliquer la plus grande

énergie et donc une température plus élevée dans le cas du test continu positif. Il a montré qu'il existe une corrélation entre l'augmentation de la température et de la masse érodée. D'où, l'augmentation de la masse érodée peut être attribuée à l'augmentation du courant pendant le test continu positif. La masse érodée pour le test continu positif est beaucoup plus grande que celle prévue en continu négatif. La raison possible pour un tel comportement pourrait être l'électrolyse survenant pendant la durée de l'essai.

1.2.8. G. P. Bruce [9]

Il a indiqué que l'électrolyse pourrait avoir causé l'érosion de l'électrode haute tension continue positive pour une tension de 2.25kV et 3.15kV. L'auteur a également observé une intense corrosion électrolytique en essai continu positif. Un tel phénomène n'a pas été observé sous tension continue négative. La migration des ions à partir des électrodes dans l'électrolyte aurait pu augmenter la conductivité électrique sur la surface du matériau de la silicone. Cette conductivité accrue entraîne une augmentation du courant de fuite et donc une érosion accrue dans le cas d'un courant continu positif.

1.2.9. S. Kumagai [10]

Il a prouvé que la température à la surface de la silicone donne une idée de la vitesse de dégradation. Un retardateur de flamme réduit la température à la surface de l'isolateur de la silicone au moyen de processus de déshydratation. Il réduit une partie du polymère ce qui diminue les produits thermiques à partir de la dégradation de (UATH). Il peut être formé une couche isolante de protection pour l'isolateur. Toutes ces propriétés ont contribué à améliorer la résistance à l'érosion de la silicone. Cette tendance pourrait être clairement vue en polarité négative. La masse érodée pour retardateur de flamme échantillons remplis pour le courant continu négatif était inférieur par rapport aux échantillons non pourvus. Différents facteurs influencent l'amélioration de la performance de la silicone avec une charge de remplissage nano. La diminution de la taille des charges signifie qu'il existe moins de la distance d'inter-particules dans le cas des charges nano par rapport au charges micro. La distance entre les particules de charges est des nano au moins un ordre inférieur à celui du micro composite. Cette baisse dans les résultats de la distance inter-particules dans un meilleur blindage de (SR), donc il ya moins de chances à exposer à des décharges sur la surface polymère. Les charges minérales sont connues pour avoir une meilleure stabilité thermique et forment une barrière physique qui contribue à améliorer le suivi et l'érosion des propriétés de (SR). Il a été rapporté que la dynamique des chaînes (PDMS) est modifiée en raison de l'interface entre la charge et le polymère. Les résultats

du test montrent que les nano IP remplis de (SR) donnent des meilleurs résultats que ceux de micro soit sous tension continue positive ou négative.

1.2.10. R. Omranipour [11]

L'auteur a pris six échantillons en caoutchouc de silicone, deux charges sont ajoutées pour ce dernier, Tri-hydrate d'alumine (ATH) et de la silice, afin d'améliorer le suivi de la résistance à l'érosion (améliorer leur résistance thermique à la chaleur qui est dissipée pendant un arc sur la bande sèche). La configuration de test a été réalisée comme le montre la figure.1.8.

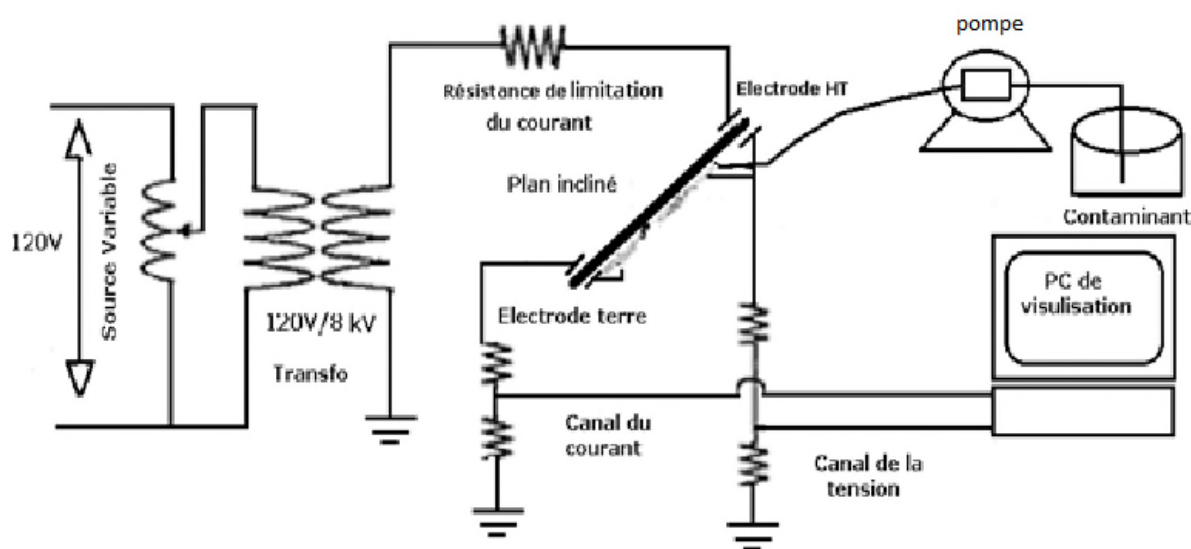


Fig. 1. 8: Principaux composants du plan incliné

Le courant de fuite d'un échantillon est généralement la seule donnée qui est surveillée pendant le test. L'auteur a démontré qu'il existe une corrélation entre la puissance et le volume érodé ou la perte de poids du matériau. Cette corrélation peut exister entre la puissance totale ou puissance fondamentale et le volume érodé ou la perte de poids. Mais les composantes harmoniques du courant que lorsqu'apparaissent des tâches de scintillation sur la surface du matériau faisant chauffer ce dernier. Bien que cette corrélation n'ait été trouvée pour être cohérente, des exceptions parmi les échantillons ont eu lieu et sont pensés pour être due à la variation de la condition de test pour chaque échantillon.

1.2.11. Yoshno. Higashiyama [12]

L'auteur 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.

1.3. Conclusion

A l'issue de la présente synthèse sur les travaux réalisés par plusieurs chercheurs sur l'étude de la décharge électrique en tension continue négative, pour différentes positions d'une surface isolante revêtue de gouttelettes d'eau, l'objectif de notre travail est de voir si l'introduction de l'isolation en silicone peut améliorer la performance des systèmes suscités dans le cas d'une atmosphère humide polluée, ou propre et dans le cas du phénomène condensation, c'est-à-dire, lors de la formation des gouttes d'eau sur la surface en silicone, de conductivité électrique et d'inclinaison de la surface variables.

Chapitre 02

ISOLATIONS EN ELECTROTECHNIQUE

2.1. Introduction

Dans la technique de haute tension l'air est l'élément isolant naturel utilisé dans la plus part des installations, appareils machines électriques et ligne et postes électriques. On trouve différentes configurations d'électrodes : pointe-pointe, plan-plan ou celles qui possèdent la rigidité diélectrique intermédiaire.

Les silicones présentent de nombreuses propriétés : une bonne stabilité thermique (entre 80°C et 250°C), de très bonnes propriétés hydrophobes, une bonne tenue au feu sans dégagement toxique, des propriétés d'anti-adhérence ou au contraire d'adhésion (suivant l'application souhaitée), des propriétés lubrifiantes et adoucissantes, une très grande innocuité et une très bonne inertie chimique. L'attractivité de ces propriétés couplées à la possibilité de disposer de produits silicones sous différentes formes (huiles, résines, élastomères, gels...) a fait que ces polymères se rencontrent dans pratiquement tous les secteurs de l'industrie (médical, bâtiment, imprimerie, ...). Une synthèse de ses propriétés et des applications utilisant les silicones est proposée par L. Carette et J. M. Pouchol [13].

2.2. Définition [14]

2.2.1. Isolant

On appelle isolant électrique toute matière dont la conductivité électrique est nulle ou dans la pratique est très faible. A l'échelle atomique une matière est dite isolante si elle ne contient pas d'électrons libres qui permettent le passage du courant électrique.

2.2.2. Isoler

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

2.2.3. Isolation

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

2.2.4. Diélectrique [14]

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

2.2.5. Système d'isolation [14]

Un système d'isolation est constitué par des matériaux isolants ou un assemblage de matériaux isolants (isolation) à considérer, en liaison avec les parties conductrices associées.

2.2.6. Isolateur

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

2.3. Différents types d'isolants [14]

On peut rencontrer les catégories d'isolants suivantes :

2.3.1. Isolant gazeux

Les principaux isolants gazeux sont : l'air atmosphérique, l'azote, gaz rare de l'air, l'hydrogène. Les gaz secs sont de bons isolants.

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 sources 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 ordinaire, incombustible 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 diélectriques

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

La permittivité relative ϵ_r ;

La résistance en tension continue ;

Le facteur de pertes diélectriques en tension alternative $tg \delta$;

La rigidité diélectrique E_r (V/m) ;

2.4.1.1. Permittivité

Lorsqu'un 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_e) extérieur appliqué figure.2.1.

Cette caractéristique des isolants solides et liquides porte le nom de la permittivité relative ϵ_r .

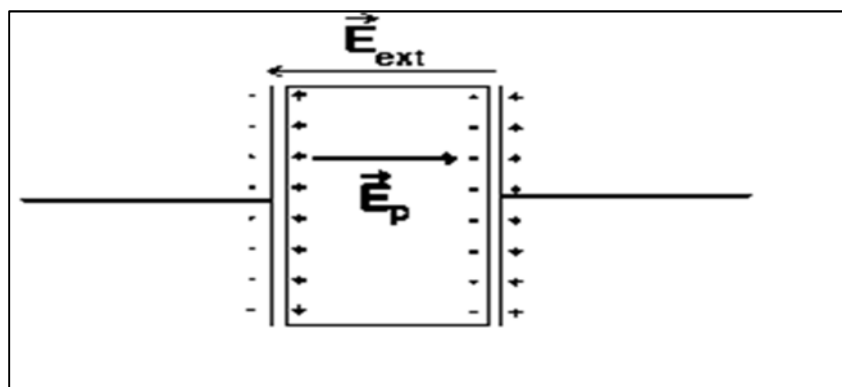


Fig.2. 1 : Champ électrique propre à l'intérieur d'un matériau isolant sous tension

E_{ext} : Champ électrique extérieur appliqué ;

E_p : Champ du à la polarisation 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 :

$$\epsilon_r = \frac{C_X}{C_0} \dots \dots \dots (1)$$

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

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

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

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

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

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.

2.4.1.2. Résistance en tension continue [15]

➤ La résistance transversale en tension continue

La résistance transversale mesurée entre deux électrodes appliquées sur deux faces opposées d'un échantillon est le quotient de la tension continue appliquée aux électrodes par la partie du courant qui traverse l'isolant entre ces électrodes.

➤ La résistance superficielle en tension continue

La résistance superficielle mesurée entre deux électrodes appliquée sur la même face d'un échantillon est le quotient de la tension appliquée aux électrodes par la partie du courant à travers la mince couche d'humidité (pollution) qui pourrait exister à la surface de l'isolant et dans les couches superficielles de ce dernier .

➤ Resistance d'isolement [16]

La résistance d'isolement entre deux électrodes qui sont en contact avec un isolant est le rapport de la tension continue appliquée aux électrodes au courant global qui les traverse à un moment après l'application de cette tension. Ce rapport dépend à la fois des résistances transversale et superficielle de l'isolant. Ces mesures sont effectuées au moyen de générateurs de haute tension (1-5kV) portables comportant un mégohmmètre.

2.4.1.3. Angle de pertes et facteur de dissipation [17]

Ce facteur revêt une grande importance puisqu'il rend compte de la puissance dissipée dans le matériau lorsqu'un champ électrique variable lui est appliqué. Il est donné par la tangente de l'angle δ appelé angle de pertes. En fait l'angle de pertes représente l'écart à la quadrature entre le courant et la tension d'un condensateur ayant le matériau considéré comme diélectrique. Il est utile de noter à ce niveau que l'importance du facteur de pertes n'est pas tellement liée à la perte de puissance en termes de coût bien que cela ne soit pas toujours négligeable. L'intérêt accordé à ce facteur réside plutôt dans le fait que la puissance est perdue dans un milieu diélectrique très mauvais conducteur de la chaleur. C'est pour cela que les pertes diélectriques peuvent conduire à des échauffements prohibitifs des matériels. Lorsqu'un dispositif constituant un condensateur réel (avec pertes) est représenté par le schéma équivalent parallèle tel que représenté sur la figure.2.2 le facteur des pertes est donné par :

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

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 ;

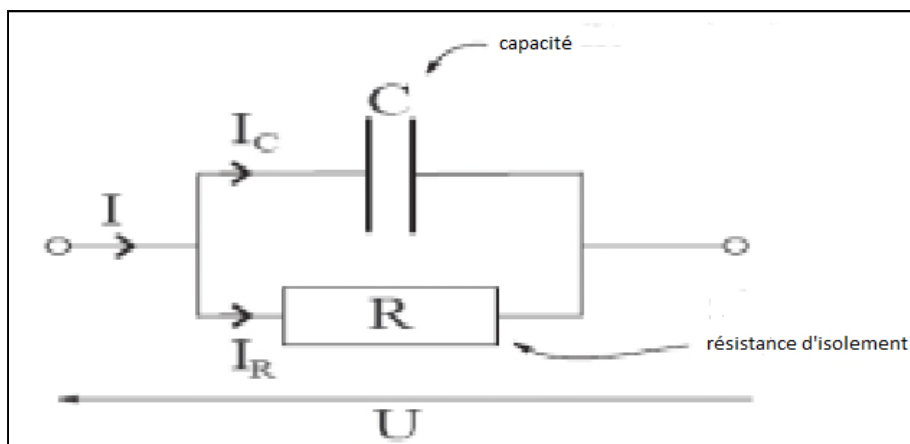


Fig. 2. 2 : Circuit équivalent parallèle représentant un diélectrique

Le diagramme de Fresnel correspondant est donné sur la figure.2.3

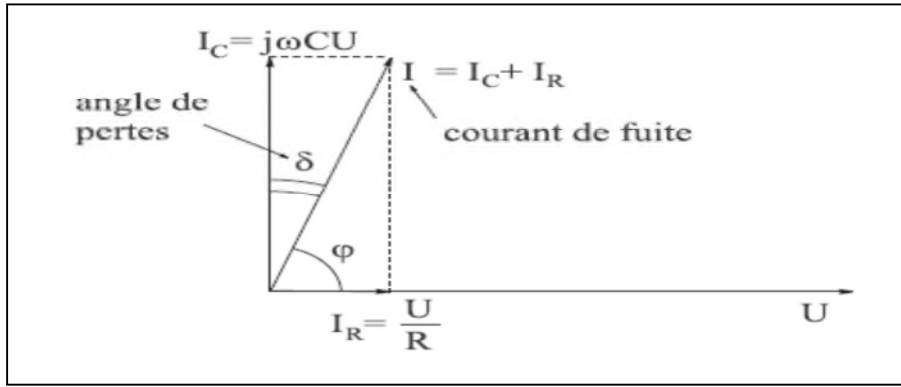


Fig. 2. 3 : Diagramme de Fresnel correspondant au schéma équivalent parallèle [18]

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

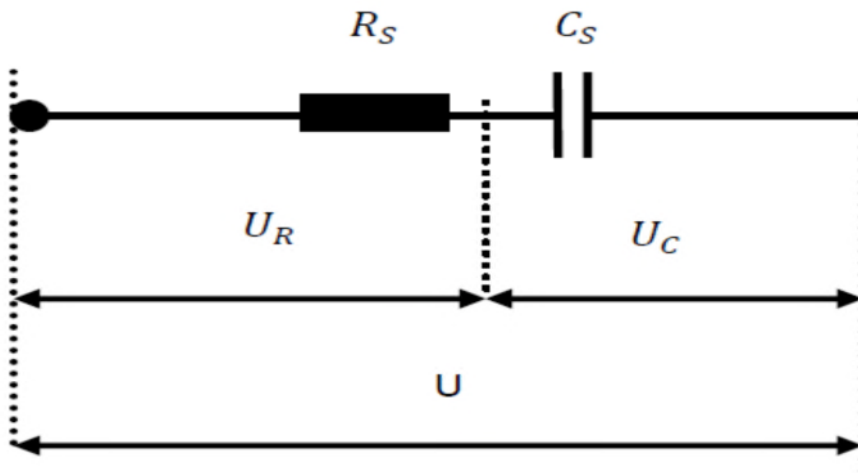


Fig.2. 4 : Circuit équivalent série représentant un diélectrique

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 :

$$\varepsilon_r'' = \varepsilon_r \operatorname{tg} \delta \dots\dots\dots (7)$$

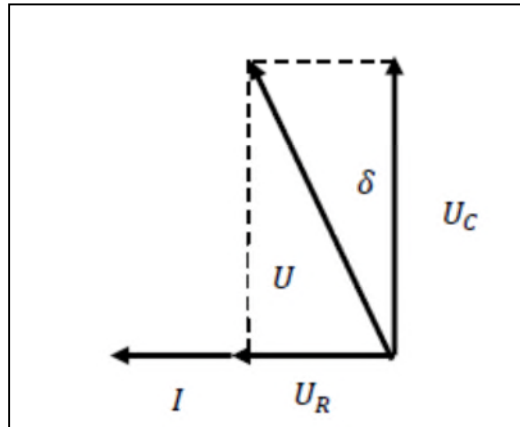


Fig. 2. 5 : Diagramme de Fresnel correspondant au schéma équivalent série

2.4.1.4. Rigidité diélectrique [19]

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.

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

2.5. Claquage

2.5.1. Tension critique de claquage UC

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

Remarque :

A la pression atmosphérique, si $d = 1\text{cm}$: $U_c \approx 30\text{ kV}$; donc le champ critique $E_c \approx 30\text{ kV/cm}$

2.5.2. Etincelle-arc électrique

Lors d'un claquage, si l'on contrôle le courant avec une résistance élevée, la décharge se stabilise pour des courants de l'ordre du μA (Etincelle). Sinon, s'il n'y a pas de résistance de protection R, la décharge évolue rapidement vers d'autres régimes caractérisés par des courants beaucoup plus élevés (arc électrique), si la source d'alimentation a une puissance suffisante.

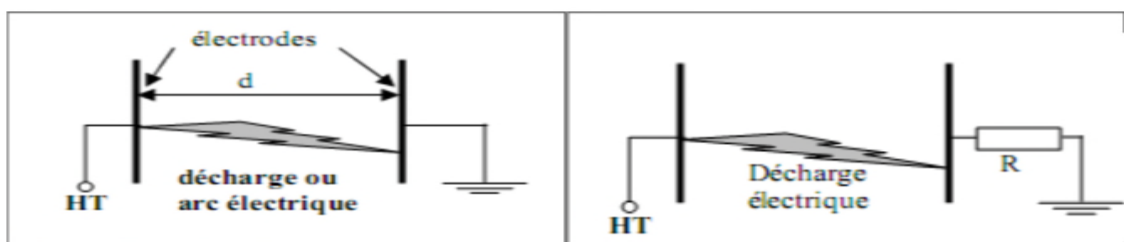


Fig. 2. 6 : Etincelle-arc électrique

2.5.3. Décharge disruptive [20]

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

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

On peut citer d'autres causes secondaires découlant des précédents, tels que les effets électrochimiques de détériorations de l'isolant.

2.5.3.1. Décharge intrinsèque

La décharge intrinsèque est due à la présence d'électrons libres, aptes à se déplacer dans l'isolant. Il existe deux types de décharges intrinsèques : l'une dite à haute température, l'autre à basse température. Fröhlich et Whitehead [21] s'appuyant sur la structure des bandes d'énergie ont établi les relations théoriques liées à ces types de décharges intrinsèques.

Le phénomène de décharge disruptive intrinsèque se manifeste préalablement par une

caractéristique du courant à travers l'isolant présentant une saturation très nette à partir d'une certaine valeur de la tension.

Ce phénomène de saturation s'explique par le fait que le courant à travers l'isolant ne dépend pratiquement (décharge dépendante ou non autonome) que du nombre, bien déterminé et invariant, d'électrons libres dans l'isolant.

2.5.3.2. Décharge thermique

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

2.5.3.3. Décharge partielle

Les matériaux isolants de qualité technique comportent toujours des inclusions de particules étrangères et de vacuoles gazeuses. Lorsque ces isolants sont soumis à une certaine tension alternative à fréquence industrielle, on constate que le champ électrique dans les vacuoles gazeuses (E_g) est plus élevé que celui dans l'isolant (E_i) (Fig. 2. 7).

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

$$\frac{E_g}{E_i} = \frac{\epsilon_{ri}}{\epsilon_{rg}}$$

ϵ_{ri} : est la permittivité relative de l'isolant ;

ϵ_{rg} : est la permittivité relative du gaz ;

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

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

D'autre part, la rigidité diélectrique des gaz est nettement plus basse (environ 10 fois) que celle des solides.

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

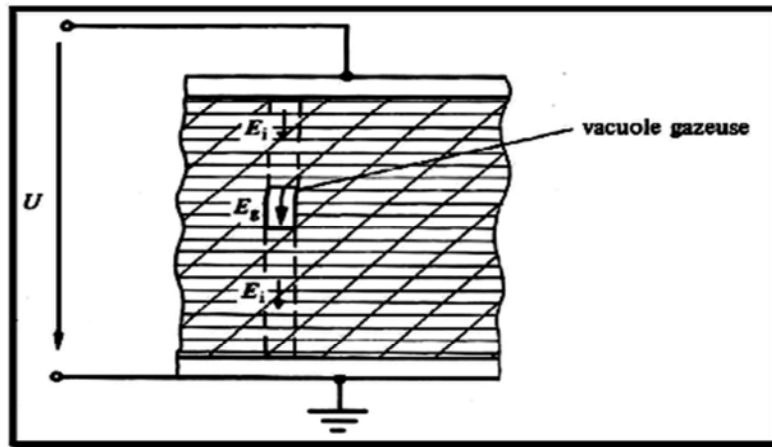


Fig.2. 7: Isolant comportant une inclusion gazeuse

2.6. Matériaux utilisés pour les isolants solides

2.6.1. Verre [16]

Il est fabriqué en fondant dans des creusets chauffés au rouge vif à une température 900 °C; un mélange de sable, de chaux et de carbonate de Sodium. Le liquide, peu fluide est coulé dans des moules en acier ayant en creux la forme des isolateurs. Chimiquement, le verre est un mélange de Silicate alcalin et de Calcium ou de Plomb.

Sa rigidité est excellente à froid, de l'ordre de 50 à 100 kV/mm, tandis qu'elle se trouve divisée par 100 à 400°C.

Sa permittivité relative environ 5 à 8.

Sa résistivité à 20°C: $10^{10} \dots 10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$.

➤ Verre trempé

Ils consistent à porter la pièce à une température voisine de son point de ramollissement 700°C et à la refroidir brusquement au moyen de jets d'air froid sous pression, ce traitement améliore les qualités mécaniques du verre ainsi que sa tenue aux chocs thermiques en traction environ 5 à 6 fois plus grande que celle du verre recuit et peut supporter une variation brusque de température pouvant atteindre 100°C.

L'avantage du verre trempé est de l'effet de transparence, ce qui n'est pas le cas des autres isolateurs.

➤ Verre recuit

Ont surtout été utilisés pour faire des isolateurs rigides, mais on s'est aperçu que les isolateurs un peu épais ne résistaient pas aux variations brusques de température. De plus, le verre recuit ne

supporte que des tensions mécaniques relativement faibles, ce qui interdit son emploi pour les isolateurs de suspension. On cite aussi les verres sodiques, borosilicate et les polyamides.

2.6.2. Porcelaine [22]

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.

2.6.3. Bakélite [19]

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

La bakélite A : produite par un chauffage modéré (50°C), et une résine jaunâtre, fondant facilement et soluble dans l'alcool méthylique.

La bakélite B : est de la bakélite A transformé par un chauffage prolongé vers (110°C) ; elle est solide et friable ;

La bakélite C : s'obtient vers (180°C) ; elle est insoluble, dure infusible et supporte sans se décomposer une température de 300°C ; elle n'est pas attaquée par l'oxygène, l'ozone et les acides usuels.

La valeur du facteur de pertes est égale à 0.04 et la permittivité relative est supérieure à 4.

2.6.4. Le pyrex [19]

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 [23]

2.6.5.1. Historique des silicones

L'historique des silicones est dû à la conjugaison de recherches universitaires et industrielles.

Matière première

La matière de base de la chimie des silicones est le quartz, c'est-à-dire la silice ou le dioxyde de silicium, SiO_2 . Le nom « Silicium » provient du latin silex, silice : caillou.

Le silicium existe dans la nature uniquement sous forme combinée, principalement sous forme de dioxyde de silicium et de silicates. Ils représentent 25,8 % en poids de l'écorce terrestre ce qui en fait du silicium le deuxième élément chimique par son abondance (derrière l'oxygène) et la matière de base la plus importante des matériaux minéraux. La présence du silicium a même été trouvée dans les roches lunaires et dans les météorites. Depuis les temps historiques les plus reculés, l'homme emploie des matériaux de construction et des matières contenant du silicium, par exemple les sables, l'argile et les matériaux céramiques. L'une des plus anciennes utilisations de la silice a été la fabrication du verre.

Mais comme le silicium ne se rencontre pas dans la nature à l'état natif, il n'a été obtenu que relativement tard.

Recherche académique

C'est Jöns Jacob Berzelius qui, le premier, a isolé le silicium en 1824 en traitant le fluosilicate de potassium (K_2SiF_6) avec un excès de potassium métallique. En poursuivant ses recherches, il fût chauffé du silicium dans un courant de chlore, ce qui eut comme effet une combustion vigoureuse. Le produit ainsi obtenu étant le tétrachlorure de silicium, une des matières de base actuelles dans la fabrication des silicones.

Pendant tout le XIXe siècle, des chimistes se sont intéressés à la chimie dans les quelles, le silicium jouait le même rôle dominant que celui que joue le carbone dans les composés organiques.

Tous ces travaux n'avaient cependant conduit à aucune réalisation industrielle.

La première moitié du XXe siècle a vu augmenter le nombre de chercheurs dans le domaine des dérivés organiques du silicium purent préparer des composés de silicium en passant par l'intermédiaire de siliciure de magnésium ($SiMg_2$) et d'un acide. Mais c'est F.S. Kipping qui effectua l'avancée académique la plus importante, démontrant qu'il n'existait aucune preuve que la chimie du silicium était réellement semblable à celle du carbone.

En effet après huit ans de travail, il put démontrer qu'un atome de silicium asymétrique est incapable de dévier la lumière polarisée. De même il arriva à la conclusion que le silicium ne

présente pas de doubles liaisons avec le carbone ni avec l'oxygène.

Kipling a constitué un moyen très efficace de fixation des groupes organiques au silicium et que dans certains cas on arrivait même à rompre la liaison -Si-O-Si-. Jusqu'à 1940, peu de travaux se rapportent aux composés de poids moléculaire élevé : la formation d'huiles visqueuses avait été signalée, mais ces produits avaient été obtenus plutôt par accident que volontairement et, de ce fait, n'avaient jamais été étudiés systématiquement. À la décharge de ces chercheurs il faut dire que la chimie des polymères était encore à ses balbutiements, car il a fallu attendre 1930 pour voir définis les principes de la polymérisation. Rien à l'époque ne pouvait inciter le chercheur à supposer que ces produits indésirables avaient au contraire une grande importance pratique.

2.6.5.2. Définition [24]

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

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 ; $\text{tg } \delta = 4 \text{ à } 5$.

Température d'auto-inflammation est supérieure à 300°C ;

Masse volumique de 2300 à 2800 kg/m^3 .

2.6.5.3. Grandes familles de silicones [23]

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

- les fluides ;
- les résines ;
- les élastomères ;

Suivant leurs états physiques (viscosité, pourcentage de réticulation, propriétés mécaniques).

- Les fluides sont des systèmes linéaires de PDMS, dans lesquels, le nombre d'atomes de silicium dans la chaîne peut être supérieur à 1 000. Comparées aux huiles minérales, ils ont une viscosité constante dans une large plage de températures. Les fluides se caractérisent par une structure hélicoïdale et un pouvoir d'étalement élevé qui s'accompagne de la possibilité de

développer des propriétés spéciales comme l'hydrophobie ou l'effet anti mousse. De même, les groupements méthyle étant apolaires et non associables, les chaînes glissent les unes sur les autres pour s'étaler en couches extrêmement minces. Leur caractère inerte peut être modifié en introduisant des groupements réactifs.

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

2.6.5.4. Structure moléculaire des silicones [25]

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

➤ Stabilité exceptionnelle

La structure des silicones, ou chimiquement parlant, des polyorganosiloxanes, est analogue à la structure organique du quartz modifié. Leur motif de base se compose d'une alternance d'atomes de silicium et d'oxygène. La haute énergie de liaison du chaînon de base silicium-oxygène (Si-O-Si-O) confère aux silicones une haute stabilité minérale, nettement supérieure à celle des polymères à motif carbone (C-C), comme par exemple l'éthylène propylène diène monomère (EPDM). A titre de comparaison,

L'énergie des liaisons C-C est de 348 kJ/mole et celle d'une liaison Si-O de 444 kJ/mole. La lumière solaire de courtes longueurs d'ondes (300 nm), renfermant une énergie d'environ $6,2 \times 10^{-22}$ kJ (= 398 kJ/mole), peut entraîner la rupture des liaisons C-C tandis que la liaison Si-O reste stable.

➤ Grande liberté de formulation [25]

Le motif de base de la silicone peut être modifié dans différentes directions par l'apport de groupes organiques contenant du carbone afin d'obtenir des propriétés spécifiques pour une application déterminée. La greffe de groupements phényle conduit par exemple à une excellente flexibilité à froid.

2.6.5.5. Propriétés des silicones [23]

Les vulcanisats de silicone font preuve d'une stabilité vis-à-vis des acides dilués et des alcalis, de même que vis-à-vis des solvants polaires. Même que vis-à-vis des solvants polaires. Ils possèdent une stabilité remarquable aux intempéries et au vieillissement. À titre d'exemple on peut citer l'estimation qui figure dans le **tableau 2.1**.

Température (°C)	Durée de vie (années)
90	40
150	5-10
200	2-5
250	0.25
315	0.04

Tableau 2.1 : Estimation de la durée de vie d'un élastomère de silicone

➤ Hydrophobicité [25]

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.2.8), même au bout de nombreuses années. Ils minimisent les courants de cheminement et évitent les décharges dues au contournement électrique, même si la surface est fortement polluée, car ils transmettent leurs propriétés hydrophobes à la couche de dépôts par transfert d'hydrophobie. L'application d'un revêtement silicone à posteriori sur les isolateurs en verre ou en porcelaine permet d'obtenir le même effet et supprime les opérations de nettoyage difficiles jusqu'à, présent nécessaires.



Fig.2. 8 : hydrophobicité d'une silicone

➤ **Tenue aux UV et aux intempéries [25]**

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 [25]**

Le point d'inflammation des silicones se situe au-delà de 340 °C (Fig.2.9), 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.



Fig. 2. 9: tenue au feu de silicone

➤ **Elasticité [26]**

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.

➤ **Propriétés diélectriques [25]**

Les silicones présentent une haute résistance électrique et un faible facteur de perte diélectrique. Par rapport aux autres isolants, leur vieillissement électrique est très faible.

➤ **Thermo stabilité**

Les silicones sont très résistantes aux contraintes thermiques en raison de leur structure chimique.

2.6.5.6. Applications des élastomères de silicone dans l'isolation électrique

Du fait de leur exceptionnel vieillissement et de leurs propriétés mécaniques uniques, les élastomères de silicone n'ont pas cessé d'accroître leurs parts de marché dans une multitude d'applications dans les secteurs industriel, du bâtiment et grand public. Dans le passé, ils étaient considérés comme des spécialités exotiques, dont le coût justifiait leur application uniquement dans des cas où des très hautes performances étaient demandées.

L'élargissement de leur utilisation, dans les 15 dernières années, a rendu compétitifs ces produits dans des vastes secteurs, particulièrement lorsqu'on pondère leur prix, relativement élevé, par leurs propriétés supérieures. La demande dans le secteur industriel pour des produits à hautes performances n'a pas cessé de s'accroître.

- **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. Les figures 2.10 et 2.11 présentent quelques exemples d'utilisation de l'élastomère silicone pour l'isolation électrique haute tension. On les trouve dans des isolateurs et des traversées (Fig.2.10) mais également dans des disjoncteurs et des transformateurs de mesure (Fig.2.11).



Fig. 2. 10 a : Isolateur silicone



Fig. 2. 10 b : Traversée avec revêtement en silicone

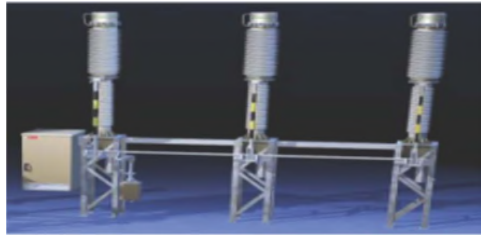


Fig.2.11 a : Disjoncteur avec revêtement en silicone



Fig.2.11 b : Transformateur avec revêtement en silicone

Comme on l'a déjà évoqué, le point faible de ces matériaux est leur faible dureté, ce qui fait que certaines applications où les contraintes mécaniques doivent être fortes 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 comme le montre la figure 2.10 a.

- Isolation volumique

Ces dernières années, on a pu constater que les élastomères silicones étaient de plus en plus utilisés dans l'isolation volumique moyenne et haute tension comme par exemple dans les câbles ou les terminaisons des câbles et les barres d'alternateurs qui doivent résister aux températures élevées.

Cependant, les contraintes mécaniques limitent souvent la tension à 6 kilovolts pour les générateurs et les câbles moyenne tension.

Les figures 2.12 et 2.13 présentent quelques prototypes et produits d'élastomères silicones conçus par Schneider Electric, utilisés dans l'isolation volumique moyenne tension. Ils sont employés comme isolants dans des jeux de barres à moyenne tension (Fig.2.12) ou des connexions souples.



(a)



(b)

Fig. 2. 12 : a) Prototype d'isolation moyenne tension d'un jeu de barres
b) Isolation moyenne tension d'un jeu de barres



(a)



(b)

Fig. 2. 13 : a) Prototype de l'isolation d'une connexion moyenne tension souple en bout de câble

b) Prototype de l'isolation d'une connexion moyenne tension souple

2.6.5.7. Revêtement en silicone des isolateurs [25]

Un revêtement silicone améliore les propriétés électriques des isolateurs en résine époxy, des équipements de test en plein air et des antennes, même usagés. Dans les derniers temps, certains fabricants d'isolateurs en porcelaine et en verre proposent un revêtement en silicone départ usine afin de conférer un pouvoir hydrophobe à leurs produits.

Plus la pollution s'accumule sur les isolateurs classiques au cours des ans, plus les risques de panne augmentent. L'application d'un revêtement en silicone à posteriori permet de rétablir la fiabilité du réseau.

2.6.5.8. Propriétés électriques améliorées

La pollution des isolateurs en porcelaine, en verre ou en résine époxy peut provoquer des décharges que l'on évite en procédant à un nettoyage régulier. L'application d'un revêtement hydrophobe en silicone sur les isolateurs est une solution plus économique et assure une protection à long terme.

2.6.5.9. Avantages du revêtement en silicone des isolateurs [25]

- **Plus grande sécurité de fonctionnement**

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

- **Traitement des installations existantes**

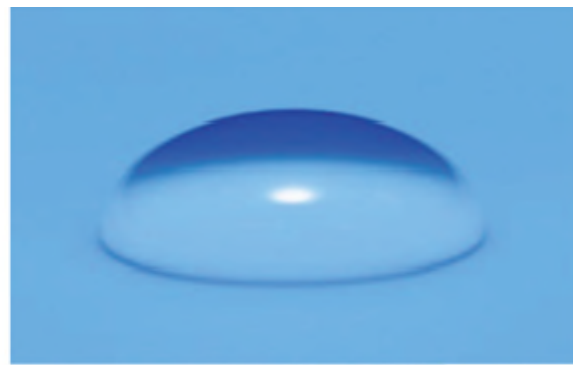
L'application d'un revêtement en silicone est une solution économique, permettant de revêtir les isolateurs en porcelaine, en verre ou en résine époxy d'une enveloppe hydrophobe. Le nettoyage périodique, voire le remplacement des isolateurs ne sont plus nécessaires.

- **Plus longue durée de vie**

Le revêtement en silicone augmente la longévité des isolateurs existants et contribue à la gestion responsable des ressources. L'expérience a montré qu'il prolongeait la durée de vie des isolateurs de dix ans et plus (Fig.2.14).

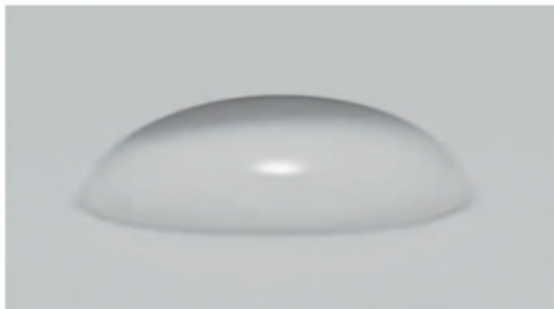


1) Goutte d'eau sur une surface de porcelaine

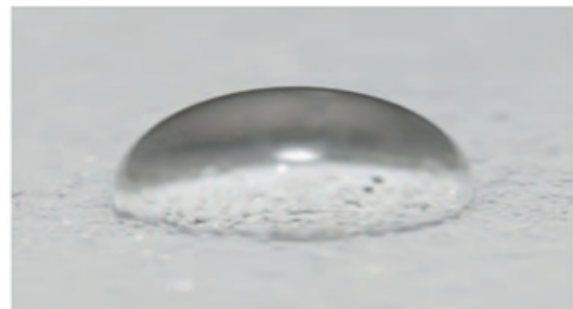


2) Goutte d'eau sur une surface revêtue de silicone

Fig. 2. 14 a : Hydrophobicité initiale



1) Goutte d'eau sur une surface de silicone propre



2) Goutte d'eau sur une surface de silicone polluée

Fig.2.14 b : transfert d'hydrophobicité



1) Goutte d'eau sur un revêtement de silicone polluée



2) Goutte d'eau sur un revêtement de silicone nettoyée

Fig.2.14 c : Hydrophobicité durable

2.6.5.10. Mise en œuvre des silicones pour revêtement [25]

Les silicones pour le revêtement d'isolateurs sont livrées prêts à l'emploi, mais doivent être soigneusement mélangées dans le contenant d'origine avant d'être transvasées dans le dispositif d'application. Elles sont généralement mises en œuvre à l'aide d'un matériel "airless" à membrane, comme les peintures de haute qualité. Afin d'assurer une bonne adhérence de la silicone, la surface à traiter doit être soigneusement nettoyée au préalable. La qualité de l'application est tout aussi importante que celle du produit et les travaux doivent être exécutés par un personnel qualifié, maîtrisant le procédé.

2.6.5.11. Influence de la pollution sur les performances d'un isolateur en silicone

➤ **Hydrophobie [26]**

L'hydrophobie d'une matière isolante fait référence à la capacité de sa surface de ne pas absorber l'eau, ainsi sur une surface hydrophobe, l'eau forme de petites gouttelettes discrètes qui s'élargissent au fur et à mesure jusqu'à ne plus tenir sur la surface et couler sans pour autant la mouiller. On peut observer trois classes de gouttes :

Classe a

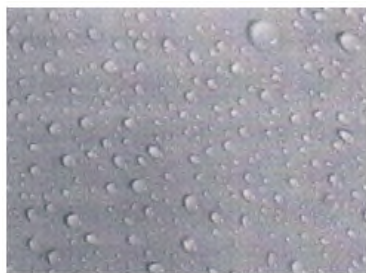
C'est la phase primaire où les gouttes ne forment encore qu'une sorte de rosée sur la surface de l'isolateur

Classe b

C'est une phase plus avancée dans la formation des gouttes, celles-ci prennent plus de volume et de poids du fait du phénomène d'osmose.

Classe c

C'est la phase finale où les gouttes ont pris suffisamment d'eau et ne tiennent plus sur la surface roulant ainsi et tomber.



-classe a-



-classe b-



-classe c-

Fig. 2. 15 : Différentes classes de gouttes

Cette propriété est 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.

L'ampleur de la tension critique de contournement est inversement proportionnelle au degré de facilité de la surface à être mouillée.

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 :

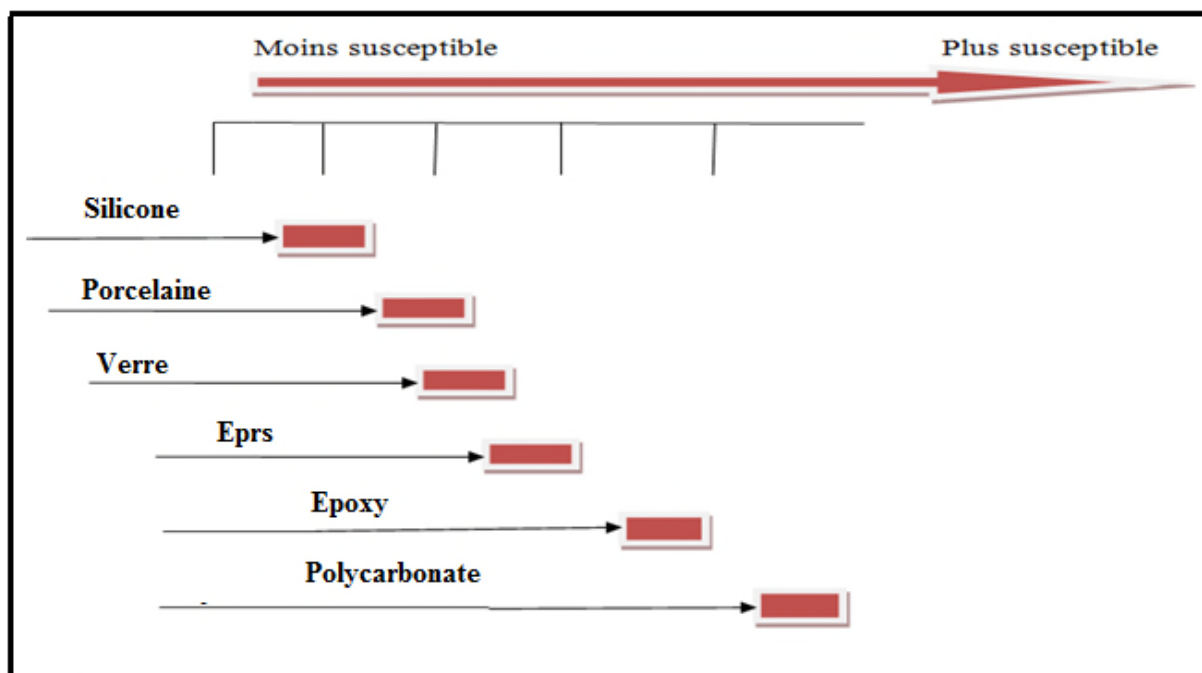


Fig. 2. 16 : Degré d'absorption de l'eau

L'hydrophobie initiale de la silicone peut être réduite ou complètement perdue lors du service de l'isolateur cela est dû à plusieurs facteurs.

La présence de la pollution dans l'environnement de l'isolateur est suffisante pour réduire son hydrophobicité, les radiations solaires sont d'importants agents de fatigue comme on l'a vu plus haut. Sous la rosée, le brouillard et les pluies fines, l'effet corona et la formation d'arcs électriques peuvent causer la diminution de l'hydrophobie de la surface de l'isolateur en silicone et devenir ainsi hydrophile.

2.7. Conclusion

Nous avons donné dans ce chapitre quelques généralités sur les matériaux isolants utilisés dans le génie électrique pour les besoins des dispositifs électriques.

Les isolants solides, notamment les élastomères de silicone sont très demandés dans le domaine industriel eu égard à leurs excellentes propriétés électriques et thermiques 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

La pollution des isolateurs constitue un problème majeur dans la dégradation de l'isolement des ouvrages (postes et lignes) de haute tension. Portés par le vent et déposés sur la surface isolante des chaînes des isolateurs, et en présence d'humidité, les divers dépôts polluants deviennent plus ou moins conducteurs, ce qui engendre une diminution de la tension de tenue des isolateurs. Des arcs électriques prennent naissance à la surface isolante, en provoquant le contournement total des isolateurs, ce qui fait la tension de contournement d'un isolateur pollué dépend essentiellement de la conductivité des dépôts polluants, c'est à dire du degré de pollution, ainsi que de la répartition de cette couche sur les surfaces des isolateurs.

Il convient donc de connaître le degré de pollution subi par les isolateurs sur le lieu, afin de bien juger et apprécier le niveau de l'isolement des ouvrages installés sur site, en vue d'un dimensionnement convenable de l'isolation extérieure. Pour cela, on procède à un choix judicieux des isolateurs et la mise en place, si nécessaire, de solutions complémentaires fiables et économiquement.

3.2. Définition

3.2.1. Pollution [27,28]

La pollution est un phénomène qui agit négativement sur le comportement des isolateurs de haute tension. C'est un paramètre important à prendre en considération lors du choix et du dimensionnement des chaînes d'isolateurs. La pollution provoque la formation d'une couche sur la surface des isolateurs. Ces couches de pollution, quand elles sont humidifiées, réduisent considérablement la résistivité des isolateurs ce qui conduit à la diminution de leur tension de tenue.

Notons que cette couche de pollution n'est pas homogène et sa distribution n'est pas uniforme. La non-homogénéité est due à la présence de différents agents polluants dans une même région, et la non-uniformité de la répartition sur les surfaces des isolateurs est due aux profils des isolateurs, le sens et la direction des vents dans cette région, la pluie, la position de la chaîne d'isolateurs par rapport au sol (verticale, horizontale, inclinée), la position de l'isolateur dans la chaîne, le degré de

pollution du site où se trouve les isolateurs ainsi que la surface inférieure ou supérieure de l'isolateur.

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

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

3.2.4. Degré de pollution

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

3.3. Différents types de pollution

3.3.1. Pollution naturelle

On distingue deux types de pollution naturelle :

3.3.1.1. Pollution marine [29]

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

3.3.1.2. Pollution désertique [29]

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

3.3.2. Pollution industrielle [29]

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

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

3.3.3. Pollution mixte [29]

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

3.4. Conséquences de pollution

3.4.1. Conséquences sur l'isolateur [30,31]

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

3.4.1.1. Arc non localisé

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

3.4.1.2. Arc fixe

Contrairement au cas précédant, l'arc électrique se fixe sur la surface, soit en s'y maintenant (source continue), soit en se réamorçant au même endroit (source alternative). L'impédance de l'ensemble dépôt et zone propre, limite le courant de l'arc et sa longueur. Cet arc peut entraîner par

effet thermique, une dégradation du support isolant, nécessitant ainsi le remplacement de l'élément défaillant.

3.4.1.3. Contournement d'une surface isolante

Le contournement des isolateurs sous pollution peut être décomposé en phases suivantes :

Phase 1 :

Dépôt des grains de pollution se déposent sur la surface de l'isolateur (Fig.3.1a).

Phase 2 :

Cette phase est caractérisée par la 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.3.1b).

Phase 3 :

Cette phase est le siège de 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.3.1c).

Phase 4 :

La tension de contournement de la résistance de la bande sèche est beaucoup plus grande que celle 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 : et le contournement n'a pas lieu (Fig.3.1d).
- Soit la décharge progresse sur la surface et le contournement de l'isolateur survient (Fig.3.1e).

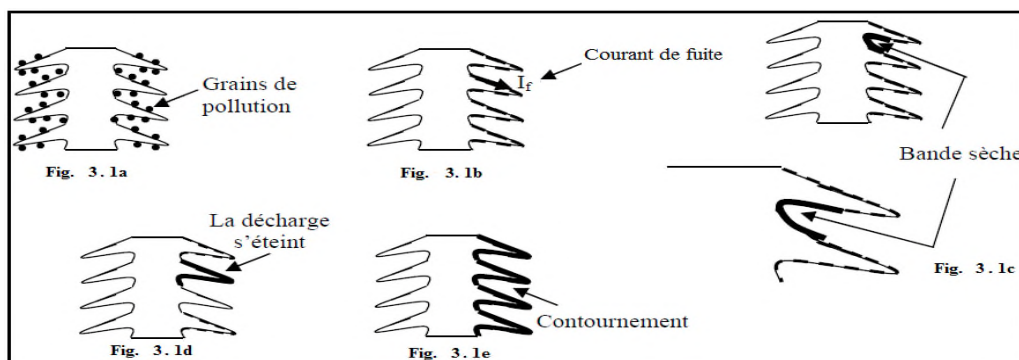


Figure 3. 1: différentes phases de pollution sur l'isolateur

3.5. Les facteurs influençant la pollution [32]

3.5.1. Vent

Il est évident que le vent constitue l'agent qui assure le transport des poussières et des Seles marins qui viennent se déposer sur la surface de l'isolateur par contre les fortes vitesses de vent peuvent apporter une aide au nettoyage des isolateurs, donc le vent peut se comporter dans ce cas comme agent d'auto nettoyage.

3.5.2. Pluie

Les fines pluies peuvent mouiller les surfaces polluées, ce qui augmente les risques de contournement. D'autre part les fortes pluies permettent en général de nettoyer les surfaces polluées des isolateurs.

3.5.3. Humidité

Elle agit négativement sur la surface contaminée des isolateurs car elle engendre l'augmentation de la conductivité de la couche de pollution, surtout pendant les premières heures du matin, notamment pendant les périodes sèches.

3.5.4. Température

Pour les surfaces polluées, les hautes températures ont une influence positive, car elles sèchent les dépôts et augmentent leur résistivité .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.

3.6. Classes de pollution [33,34]

On peut rencontrer quatre types de site pollués:

➤ **Classe 1**

Niveau de pollution nul ou très faible, cela correspond aux zones à faible densité d'habitation et d'industrie, éloignées des bords des mers .La ligne de fuite spécifique des isolateurs situés dans ces régions est 16 mm/kV.

➤ **Classe 2**

Niveau de pollution sensible .Cela correspond aux zones industrielles sises en bord de mer sans pour autant être sous l'action directe des embruns salins. La ligne de fuite spécifique des isolateurs situés dans ces zones est de 20 mm/kV.

➤ **Classe 3**

Niveau de pollution élevé qui correspond aux zones situées en bord de mer, exposées directement à l'action directe des embruns salins et grands centres industriels .La ligne de fuite spécifique des isolateurs situés dans ces zones est 25 mm/kV.

➤ **Classe 4**

Elle correspond à des zones très limitées, ayant quelques pylônes. Dans ce cas, le graissage ou le lavage périodique des isolateurs est envisageable .L'isolement par allongement de la ligne de fuite de l'isolateur n'est plus justifié. La ligne de fuite spécifique des isolateurs situés dans ces zones est de 30 mm/kV.

3.7. Méthodes de mesure de sévérité de pollution d'un site

3.7.1. Densité du dépôt de sel équivalent (DDSE) [35]

Il s'agit du dépôt équivalent, en milligrammes de Na Cl/cm² de la surface isolante dont la conductivité électrique est égale à celle du dépôt réel, dissous dans le même volume d'eau. Pour calculer la DDSE, il faut prélever les dépôts polluants de la surface isolante sélectionnés. Les dépôts sont récupérés par lavage à l'aide d'un matériau absorbant (coton, mouchoir en papier, éponge, brosse) et de l'eau distillée, à moins qu'il soit gratté à sec. Le dépôt est dissout dans l'eau distillée, la suspension obtenue est constamment agitée au moins pendant deux minutes avant de procéder à la mesure de la conductivité volumique σ_θ de la suspension à température θ en °C.

La conductivité à la température ambiante ($\theta=20^\circ\text{C}$) est donnée par la relation:

$$\sigma_{20} = \sigma_\theta [1-b (\theta-20)] \dots\dots\dots (3.1)$$

Où :

θ : est la température de la suspension en °C;

σ_θ : est la conductivité volumique à la température de θ °C en (S/m);

σ_{20} : est la conductivité volumique à la température de 20°C en (S/m);

b : est le facteur dépendant de la température θ °C, qui est donné par la relation suivante:

$$b = -3,2.10^{-8} \theta^3 + 1,032 .10^{-5} \theta^2 - 8,272 .10^{-4} \theta + 3,544 .10^{-2} \dots\dots\dots (3.2)$$

Lorsque σ_{20} est à l'intérieur de l'intervalle (0,004 – 0,4) S/m, la salinité de la suspension est déterminée par la formule suivante:

$$Sa = (5,7. \sigma_{20})^{1,03} \dots\dots\dots (3.3)$$

Avec:

Sa : en kg/m³ et σ_{20} en S/m.

La densité du dépôt de sel équivalent est donnée par la formule suivante:

$$DDSE = Sa .V/S \dots\dots\dots (3.4)$$

Avec :

V : volume de la suspension en m³;

S : surface nettoyée en m²;

DDSE : en kg/ m².

Pour la détermination de la sévérité du site, les mesures doivent être répétées avec une fréquence suffisante pour obtenir les niveaux entre les périodes de lavage naturel. En conséquence, plusieurs collecteurs doivent être exposés pendant toute la période d'essais. Si le lavage naturel est rare, des intervalles entre prélèvements d'un mois ou plus peuvent être suffisants pour acquérir l'information sur l'accumulation en fonction du temps. D'autre part, si la pollution se dépose très rapidement, il sera nécessaire de raccourcir l'intervalle entre prélèvements, pour obtenir un résultat plus sûr, les prélèvements sont habituellement effectués sur plusieurs collecteurs. La DDSE ne dépend pas seulement de la forme de la surface isolante mais aussi de la position dans laquelle elle est installée, c'est-à-dire l'angle qu'elle fait avec la verticale et son orientation. Cette méthode mesure l'équivalent du composant actif du contaminant sans tenir compte de certains facteurs à savoir l'humidification de la couche de pollution et le processus d'amorçage des arcs.

3.7.2. Conductance superficielle

La conductance superficielle caractérise l'état global de la surface isolante (niveau de pollution et degré d'humidification de la couche). Elle représente le rapport du courant électrique qui circule sur l'isolateur, à la tension appliquée : $G = I/V$. La tension utilisée est inférieure à la tension de service et est appliquée pendant quelques périodes. Par contre, la conductivité superficielle des isolateurs peut être obtenue en multipliant la conductance superficielle G par le facteur de forme f de l'isolateur $K = f G$. Dans le cas de couches polluantes non homogènes, la conductivité locale peut être obtenue en mesurant la conductance d'une partie de la surface à l'aide d'électrodes auxiliaires. Cette méthode peut être représentative d'un type de pollution du site étudié. Elle est mesurée à l'aide d'un conductimètre à sonde mobile (Fig.3.2).



Fig.3. 2: Photo d'un conductimètre à sonde mobile

La sonde est composée essentiellement d'une tête qui est constituée de deux électrodes, un poignet et un câble de liaison entre la sonde et l'appareil de mesure. Il existe plusieurs types de sondes qui se distinguent par l'humidification de la pollution et la géométrie des électrodes :

Les sondes à électrodes linéaires et planes sont illustrées par les figures 3. 3a et 3. 3b

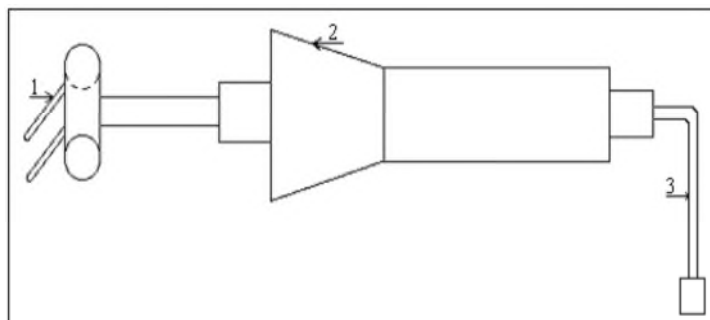


Fig. 3. 3a: Sonde à électrodes linéaires

- 1: Electrodes linéaires à extrémités arrondies;
- 2 : Poignée de la sonde;
- 3: Câble de liaison avec le conductimètre.

Dans le cas de la sonde à électrodes linéaires (Fig.3.3a), l'humidification du dépôt polluant est réalisée à l'aide de l'eau distillée. Elle doit être effectuée de telle sorte qu'il n'y ait pas d'écoulement de l'eau pulvérisée sur la surface polluée. Après humidification de la surface contaminée, des mesures peuvent être effectuées sur différents points de la surface isolante. Dans le cas de la sonde à électrodes planes (Fig.3.3b), avant d'effectuer les mesures sur une surface polluée d'une barrière isolante, il faut:

- fixer une bande sèche absorbante (papier PH), de dimensions (10 mm x 10 mm), sur la tête de la sonde (1);
 - avant chaque essai, la bande absorbante doit être trempée dans l'eau distillée dont la conductivité volumique doit être inférieure ou égale à $10\mu\text{S}/\text{cm}$. Le nettoyage et l'humidification de la bande absorbante nécessitent une quantité d'un litre d'eau distillée;
 - après chaque nettoyage, la tête de la sonde doit être secouée pour éliminer les gouttelettes d'eau distillée non absorbées par le papier;
 - vérifier que la conductivité superficielle propre de la bande absorbante σ_p ne dépasse pas $2\mu\text{S}$;
 - poser légèrement la tête de la sonde sur un endroit choisi au préalable, sur la couche de pollution de la surface isolante étudié, de telle sorte que la surface de la bande soit en bon contact avec la surface polluée équivalente correspondante;
-

- s'assurer que l'eau absorbée par la bande ne se propage pas au-delà de la surface de contact. Pendant que le dépôt polluant se trouvant en dessous de la surface du papier absorbant se dépose sur celle-ci, l'eau distillée passe de la bande absorbante vers la pollution, de telle sorte que la conductivité équivalente de la couche de pollution, résulte des conductivités de la pollution humidifiée et de la bande polluée.

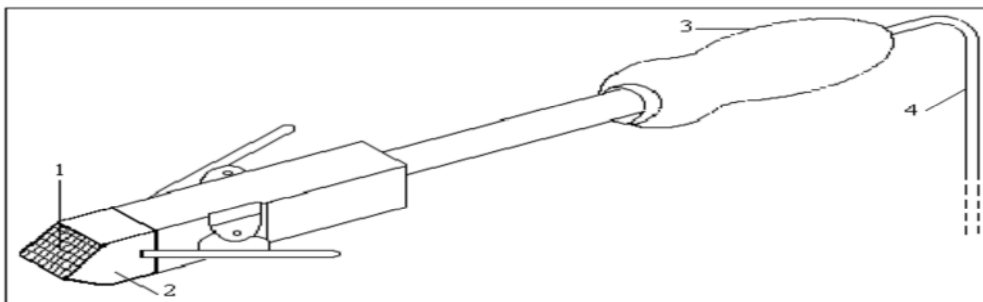


Fig. 3.3 b: Sonde à électrodes planes avec papier absorbant

- 1: Tête de la sonde;
- 2: Electrodes planes;
- 3: Poignée de la sonde;
- 4: Câble de connexion au conductimètre.

$$\sigma_m = \sigma_i (f_s / f_a) \dots \dots \dots (3.5)$$

Où:

σ_m : est la conductivité mesurée (μS);

σ_i : est la conductivité superficielle indiquée par l'appareil (μS);

f_s : est le facteur de forme de la sonde utilisée (**Tab.3.1**).

Pour une sonde à électrodes planes, le facteur de forme est égal à 1.

f_a : est le facteur de forme de l'appareil (donne généralement par le constructeur).

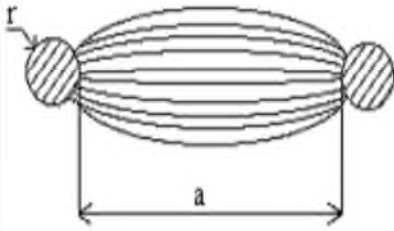
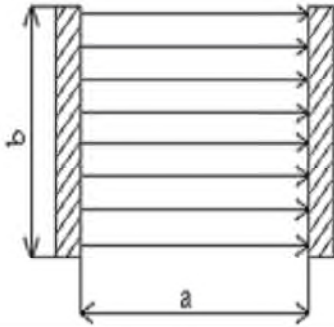
La conductivité superficielle réelle σ est donnée par la relation suivante:

$$\sigma_r = \sigma_m - \sigma_p \dots \dots \dots (3.6)$$

Où :

σ_m : est la conductivité mesurée (μS), donnée par la formule (3.5);

σ_p : est la conductivité propre de la bande absorbante (μS).

Nature de la sonde	Procédé d'humidification	Configuration d'électrodes	Facteur de forme
Sonde à électrodes linéaires	Humidification de la couche de pollution à l'aide d'un pulvérisateur à eau distillée		$f_s = \frac{\ln a}{3,14 r}$ ($a \gg r$)
Sonde à électrodes planes	Pose d'une bande à papier absorbant humidifiée sur la couche de pollution		$f_s = \frac{a}{b}$ (Champ négligeable au voisinage des électrodes)

Tab.3.1: Tableau récapitulatif des facteurs de forme pour chaque type de sonde

La conductivité d'un dépôt polluant dépend de la température. Celle-ci peut-être lue directement sur l'appareil de mesure considéré. La conductivité correspondant à 20°C (σ_{r20}) est déduite de la formule suivante :

$$\sigma_{r20} = (\sigma_r T / \alpha) \dots \dots \dots (3.7)$$

$\sigma_r T$: Conductivité de la couche de pollution à la température T (μS).

α : Facteur de correction donné par le tableau (**Tab.3.2**).

Température T (°C)	0	9	10	15	20	25	30	35	40
Facteur de correction α	0.6	0.68	0.77	0.89	1.00	1.12	1.23	1.34	1.45

Tableau.3.2: Facteur de correction α en fonction de la température

3.7.3. Comptage des impulsions de courant de fuite [36]

La mesure du courant de fuite s'effectue de deux manières : par le comptage du nombre d'impulsions et par l'amplitude des ces dernières.

3.7.3.1. Comptages d'impulsions

Le comptage des impulsions consiste à enregistrer, par un dispositif approprié, pendant une période donnée le nombre d'impulsions du courant de fuite, dépassant une certaine amplitude,

pour un isolateur soumis à sa tension de service. Généralement, la fréquence et l'amplitude de ces impulsions croissent lorsqu'on s'approche du contournement, la méthode se prête mieux à la détermination des longueurs d'isolateurs dans le cadre de l'extension ou du redimensionnement de l'isolement de réseaux existants. Cependant, elle ne fournit pas une mesure absolue de la performance des isolateurs et exige une aptitude au contrôle permanent.

3.7.3.2. Courant de fuite de la plus forte crête (I_{fc})

On enregistre, pendant une période relativement longue sur un échantillon ou un isolateur réel, continuellement soumis à sa tension de service, les amplitudes des impulsions de courant de fuite. La plus forte valeur de crête du courant est exploitée pour la détermination de la sévérité de pollution de site, cette méthode est simple et tient compte de l'effet combiné des conditions atmosphériques et de la tension appliquée. Le coût relativement élevé de l'équipement de mesure contrebalance les avantages de cette méthode.

3.8. Différentes méthodes d'essai sous pollution

3.8.1. Essai sous pollution naturelle

Celle consiste à l'observation de différents isolateurs soumis à la pollution atmosphérique, le comportement des isolateurs des soumis à la même tension de service est apprécié en fonction du temps de contournement en se basant sur le courant de fuite ou la conductivité superficielle. Une distinction peut être faite en observant une caractéristique durant une période donnée. L'inconvénient majeur de cette méthode est le temps d'essai qui peut s'étendre sur plusieurs années pour pouvoir comparer résultats.

3.8.2. Essai sous pollution artificielle

3.8.2.1. Brouillard salin [37, 38]

Cette méthode utilise une couche de pollution contenant du chlorure de sodium Na Cl et de l'eau du robinet.

L'isolateur est soumis à une tension d'essai maintenue constante dès le début avec une durée d'essai de 60 minutes .L'objet d'essai est placé dans brouillard salin qui est produit par deux rangées de pulvérisateurs ,disposés de part et d'autre de l'isolateur .Chaque pulvérisateur est constitué de deux ajutages ,l'un délivrant la solution salée ,l'autre disposé perpendiculairement au précédent ,fournit un courant d'air comprimé qui atomise la solution en fines gouttelettes .Le brouillard ambiant qui entoure l'isolateur est destiné à de l'eau salée de la même manière qu'un

brouillard naturel humidifiant ,mais cette technique ne présente pas les conditions naturelles, puisqu'à un instant donné , le vent ne vient que d'un seul côté ,par contre le brouillard est projeté des côtés .

3.8.2.2. Brouillard équivalent [37, 38, 39]

La solution contient du sel dans une suspension de 40 g de poudre Tonoko (60 à 70 % de SiO₂, 10 à 20 % de AlO₃, 4 à 8 % FeO₃ et H₂O) par litre d'eau. Le dépôt est obtenu par pulvérisation, coulage ou trempage. Le brouillard équivalent est produit de la même façon que brouillard salin, on remplace juste la solution indiquée ci-dessus. La tension peut être maintenue constante pendant 3 à 5 minutes ,comme elle peut être augmentée jusqu'au contournement .Cette méthode est valable pour présenter des isolateurs ,type standard ,placés dans des conditions naturelles de contamination salin pendant les typhons ,mais qu'elle donnait pour les isolateurs long fût des tensions d'amorçage plus élevées que dans les conditions naturelles .La densité du dépôt de sel en mg/cm² définit la sévérité de l'essai .

La reproductibilité dépend de la température effective dans le même laboratoire, elle est de 10% dans les autres laboratoires.

3.8.2.3. Brouillard vapeur [37]

La solution est obtenue à partir du sel dans une suspension d'un liant et d'eau non normalisée .Le dépôt est formé par pulvérisation et séchage. L'humidification de la couche est obtenue par une condensation lente d'eau vaporisée, elle peut être modifiée en changeant la quantité d'eau chauffée par unité de volume de la salle d'essai. On peut avoir une humidification très lente à la fois par l'impact et la condensation des gouttelettes, avec une conductivité maximale atteinte au bout de 15 à 30 minutes, cela pour un chauffage suffisamment bas. Cette méthode peut être recommandée pour les isolateurs soumis à la pollution marine et industrielle, comme elle peut s'appliquer à la condition naturelle caractérisée par une accumulation de pollution .La tension appliquée est maintenue constante dès le début de l'essai, sa durée est de 120 minutes .Le paramètre de la sévérité est déterminé par la densité de dépôt de sel en mg /cm². La reproductibilité dans le même laboratoire est de 4 à 5 %, tandis qu'elle est de 4 à 7 % dans les autres laboratoires.

3.8.2.4. Brouillard tenu [37]

La solution est à partir du sel dans suspension de 40g de poudre Tonoko ou de Kaolin par litre d'eau. Le dépôt est formé par pulvérisation, peinture ou trempage, suivi d'un séchage. L'humidification est obtenue par pulvérisation indirecte de l'eau, la tension appliquée est

maintenue constante dès le début de ce processus.

Le brouillard pulvérisé de la méthode du brouillard tenu, produit des gouttelettes plus grandes que celles produites dans le cas du brouillard vapeur et brouillard salin.

Cet essai est souple et peut être adapté suivant les conditions naturelles attendues .Le paramètre de sévérité est défini par la densité du dépôt de sel en mg/cm^2 . La durée maximale de l'essai est de 30 minutes. La reproductibilité dans le même laboratoire est de 5 %, elle est de 8 à 10 % dans les autres laboratoires.

3.8.2.5. Méthylcellulose ou méthode de pollution liquide

La couche de pollution utilisée contient du sel dans une solution de 10 g de la méthylcellulose et de 25 g de craie fine par litre d'eau, préparée 48 heures avant l'essai. Le dépôt est formé par pulvérisation ou trempage, il faut attendre environ 35 minutes pour la stabilisation de la couche avant l'application de la tension qui est maintenue constante durant l'essai. Cette couche n'est pas humidifiée en cours de l'essai.

La tension d'amorçage est influencée par l'épaisseur de la couche, car à la même conductivité une variation de 0.008 à 0.25 mm d'épaisseur peut augmenter la tension d'amorçage de 10 %.

Cette méthode est appropriée aux conditions qui apparaissent lorsqu'une ligne humide et froide est remise en service. Elle convient aussi pour représenter les conditions qui apparaissent sur une ligne, lorsque la température est au voisinage de 0° , avec de la glace fondante. Le paramètre de la sévérité par la conductivité (μS) de la couche après la stabilisation. La reproductibilité de cette méthode dans le même laboratoire est bonne .La durée de l'essai est de 5 minutes.

3.8.2.6. Contaminant humide

La solution est obtenue à partir de sel dans une suspension de 20 g d'un agent épaississant et de 1 g de photo-flo-600 (agent moulant) par litre d'eau. Le dépôt est formé par coulage ou trempage. La tension appliquée est maintenue constant quelque minute après l'application de la couche. La durée d'essai est de 5minutes .La conductivité maximale de la couche définit la sévérité. La reproductibilité dans le même laboratoire est de 4 à 5 %.

3.8.3. Corrélation entre les méthodes de pollution naturelle et artificielle [40]

Aucun essai artificiel ne peut reproduire avec toutes véritables conditions auxquelles un isolateur peut être soumis. La comparaison directe entre essai sous pollution naturelle et sous pollution artificielle, constitue la meilleur façon de s'assurer de la bonne représentativité d'une méthode et on peut constater que:

- la répartition de pollution est non uniforme sur les surfaces des isolateurs, dans le cas naturel
-

car le vent et la pluie imposent des orientations pour les dépôts et un lavage périodique des surfaces exposées. La méthode du brouillard salin semble sembler de façon satisfaisante à un brouillard naturel contrairement aux autres méthodes ;

- quelle que soit la méthode artificielle utilisée, il est nécessaire de déterminer la sévérité dans les conditions de pollution naturelle;

Les essais artificiels ne sont pas toujours reproductibles d'un laboratoire à un autre. Selon la méthode employée, le paramètre qui caractérise la sévérité de pollution ne couvre pas les mêmes traits caractéristiques du phénomène, il s'exprime par :

- la densité équivalente de sel déposé en mg/cm^2 ;
- la conductivité de la couche en μS ;
- la salinité du brouillard en g/l ;

Devant l'impossibilité d'établir une équivalence à priori des différents paramètres, on est conduit à se contenter d'une équivalence à posteriori. Une corrélation entre méthodes de pollution artificielle et les conditions de pollution naturelle peut être établie.

3.9. Techniques de lutte contre la pollution

Une bonne conception de l'isolation des lignes basée sur des mesures de sévérité de pollution permet de limiter, autant que possible, les incidents lorsque la ligne est en service. Cependant, un changement dans les données d'un site est toujours possible, par l'apparition de nouvelles industries, la construction des ouvrages routiers ainsi que l'accroissement inattendu de l'urbanisation d'un site, rend le dimensionnement initial insuffisant. Dans ces circonstances, on a recours à des solutions techniques appropriées pour chaque cas. Parmi les techniques proposées, on trouve :

3.9.1. Allongement de la ligne de fuite

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

- Le changement de type d'isolateurs par un autre de longueur de la ligne de fuite supérieur. Cette opération est délicate et coûteuse.
- L'utilisation de prolongateurs de ligne de fuite en matériaux polymères, qui grâce à ses propriétés hydrophobes, la graisse protège temporairement les isolateurs. La longévité du graissage dépend de l'environnement et de la qualité intrinsèque du produit. Elle est généralement comprise entre un et quatre ans. Par mesure économique, seuls les isolateurs de postes sont concernés.

3.9.2. Lavage des isolateurs

Le lavage des isolateurs peut se faire soit hors tension soit sous tension. En particulier dans les postes, pouvant supporter des interruptions de service assez long.

Le nettoyage manuel à lavage ou essuyage à sec des isolateurs peuvent être utilisés de façon périodique.

Le lavage sous tension permet d'éviter ces coupures. Il doit être effectué selon des règles strictes concernant les distances de sécurité à respecter et la qualité de l'eau de lavage. L'utilisation d'un abrasif pulvérisé sous pression pour le nettoyage des pollutions très adhérentes (ciment,...) est possible.

3.9.3. Revêtement silicone

Comme pour la méthode précédente ce type de revêtement protège les isolateurs et améliore leur comportement sous pollution, par contre la longévité est nettement supérieure à celle des graisses. Cette méthode consiste à appliquer par pulvérisation ou au pinceau en caoutchouc silicone, qui se vulcanise à température ambiante à la surface des isolateurs. Ces revêtements sont appliqués pendant plus de dix ans dans certains postes de compagnies, américaines. Malgré son ancienneté, et grâce à la mise sur le marché de produits plus performants, cette méthode se développe de plus en plus.

3.9.4. Isolateurs composites [41]

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

3.10. Conclusion

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

L'amorçage à la surface d'un isolateur pollué dépend de plusieurs paramètres. Pour représenter les conditions naturelles qui provoquent l'amorçage sous pollution, plusieurs techniques d'essais au laboratoire ont été mises en œuvre, la méthode d'essai sous pollution artificielle est largement utilisée. Elle consiste à reproduire au laboratoire les conditions de la pollution naturelle, ainsi qu'elle possède l'avantage d'être rapide. Pour mieux dimensionner les chaînes d'isolateurs, il est

indispensable de connaître la sévérité de la pollution des sites concernés. La connaissance de cette sévérité consiste à étudier les différents paramètres qui définissent l'état de dégradation de l'isolation. Les techniques de lutte contre la pollution actuellement connues (graissage, lavage, nouveaux types 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.

Chapitre 04

PARTIE EXPERIMENTALE

4.1. Introduction

Le but de ce chapitre est d'étudier expérimentalement l'état de surface d'une isolation en silicone sur la tension continue négative de contournement de la surface isolante en question. Comme paramètres d'influence de cette grandeur, notre choix est porté sur l'angle d'inclinaison de l'isolation par rapport à l'horizontale (α°), le volume et la conductivité électrique des gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation selon plusieurs types d'arrangements de ces gouttes d'eau. Cette étude est appuyée par une visualisation de la décharge électrique évoluant sur les gouttes d'eau déposées sur la surface de la 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 des diélectriques de l'université Abderrahmane Mira de Bejaia. Il est constitué d'un circuit d'alimentation (transformateur 0.08A /135kV), d'un modèle expérimental. Le dispositif expérimental répond aux exigences de la publication CEI60/1.

Les éléments qui constituent le dispositif sont schématisés sur la figure 4.1 dont :

- 1 : (T100) transformateur 0.08A /135kV ;
 - 2 : (G270) diode haute tension ;
 - 3 : (C) capacité de lissage : 10nF ;
 - 4 : Résistance haute tension de limitation de courant ($R_a = 106k\Omega$) ;
 - 5 : Résistance haute tension du diviseur résistif ($R_0 = 250M\Omega$) ;
 - 6 : Objet d'essai (échantillon en silicone) ;
 - 7 : Caméscope numérique (cam) ;
 - 8 : Voltmètre de crête (V) ;
 - 9 : Appareil de commande manuelle ou automatique du transformateur (SG) ;
 - 10 : Résistance d'entrée du voltmètre de crête ($R_u = 4.24M\Omega$) ;
-

11 : l'angle d'inclinaison de la surface (α°) ;

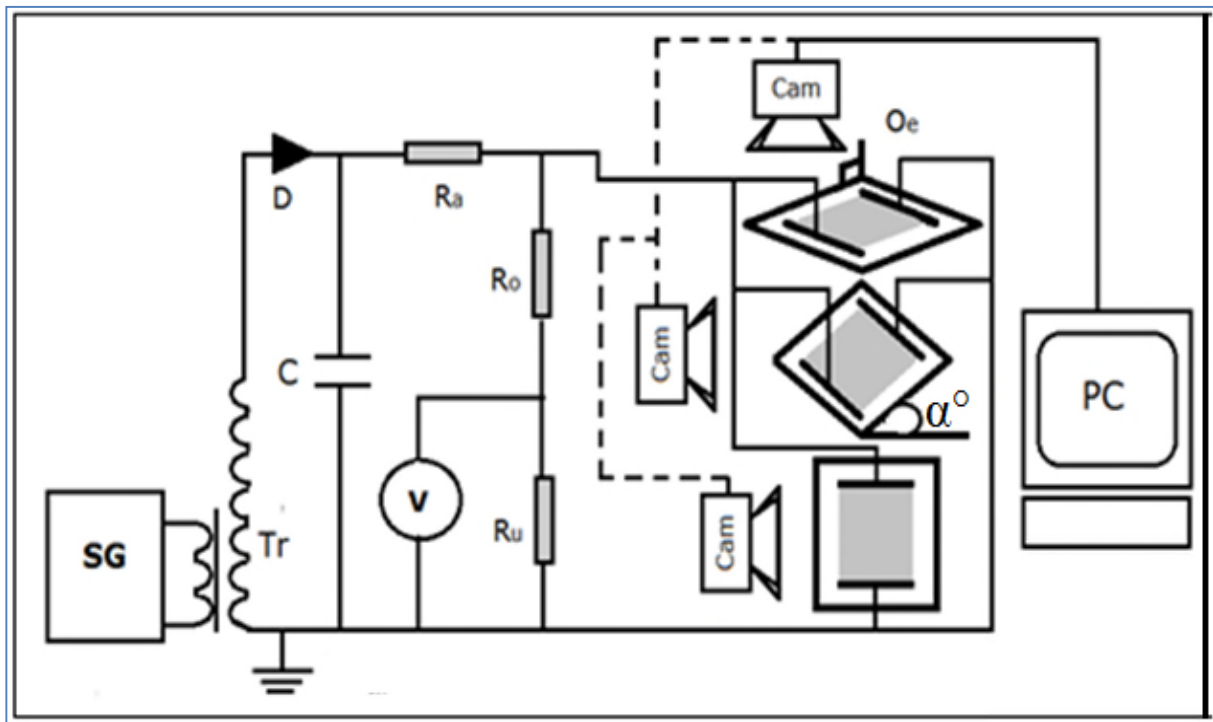


Fig. 4. 1: Schéma de mesure et de visualisation

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.

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 la hauteur. L'inclinaison par rapport à l'horizontale de la surface isolante est assurée par les guides en bois troués sur les deux côté du dispositif (Fig.4.3). Le support repose sur une table en bois métallisée mise à la terre et située à 50 cm du sol.

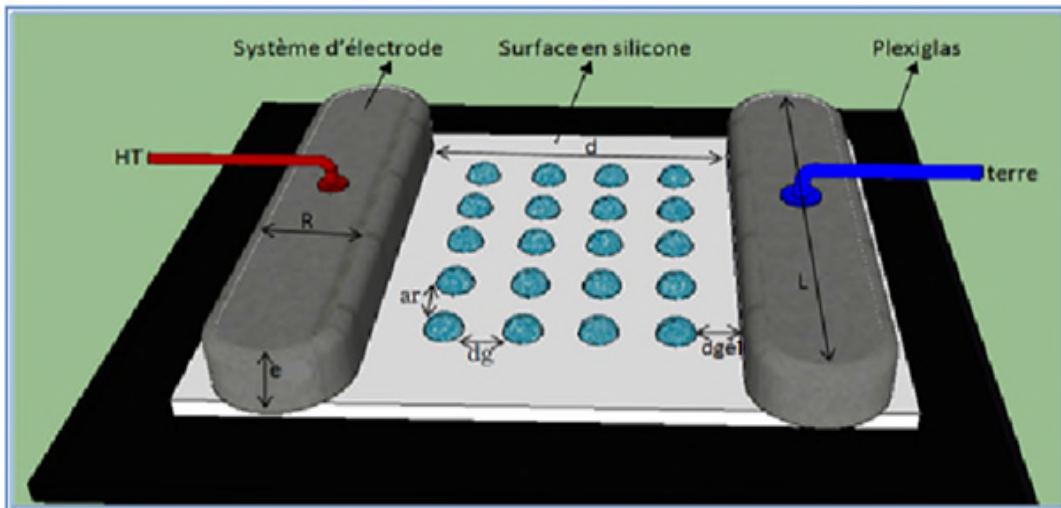


Fig. 4. 2 : Caractéristiques du modèle

d : Distance entre les deux électrodes de base ;

$d_{gél}$: Distance entre la goutte et l'électrode ;

a_r : Arrangement des gouttes sur la surface ;

d_g : Distance entre les gouttes ;

e : Epaisseur de l'électrode ;

L : Longueur de l'électrode ;

R : Largeur de l'électrode ;

La paroi supérieure du modèle expérimental, représenté en figure 4.3, peut être orientée horizontalement (Fig.4.3a) ou inclinée d'un angle α (Fig.4.3b) ou verticalement (Fig.4.3c).

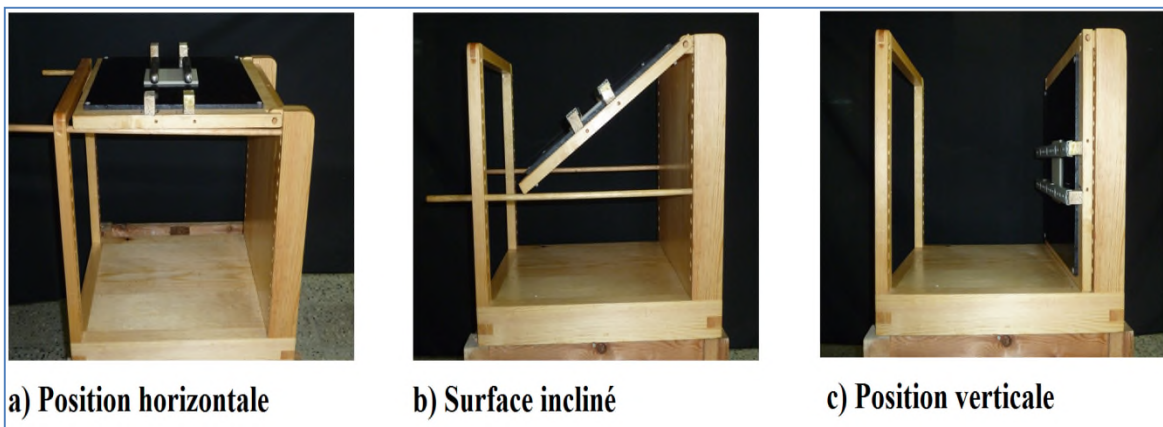


Fig. 4. 3 : Différentes positions du modèle expérimental

4.2.2. Pollution d'une surface isolante

La solution polluante est composée d'un mélange d'eau distillée ou de robinet, selon l'ordre de grandeur de la conductivité volumique souhaitée, à laquelle on ajoute des petites quantités de sel pour varier la conductivité de la pollution. Ainsi nous fixons la conductivité de la solution ionique à la valeur désirée, grâce à un conductimètre à sonde mobile (Fig.4.4). Les différentes conductivités volumiques utilisées dans notre étude sont : $180 \mu\text{S}/\text{cm}$ et $7 \text{ mS}/\text{cm}$.

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



Fig. 4. 4 : Appareil de mesure de conductivité volumique

4.2.3. 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 sans ou avec gouttes d'eau. Il est à noter que la valeur mesurée de la tension de contournement est la moyenne de 10 à 16 essais espacés entre eux d'une à deux heures. Après chaque essai la surface est nettoyée à l'aide du papier mouchoir et mise dans le dessiccateur pour la protéger contre l'humidité.

4.2.4. Dessiccateur

Un dessiccateur désigne un équipement servant à protéger des échantillons en silicone contre l'humidité. Au laboratoire, il est constitué d'une cuve circulaire surmontée d'un couvercle. L'ensemble est en verre comme le montre la figure 4.5. La liaison des deux parties peut être réalisée par un rodage en verre ou un joint torique en élastomère.

Au préalable, une quantité suffisante de gel de silice souvent bleu est disposée 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.

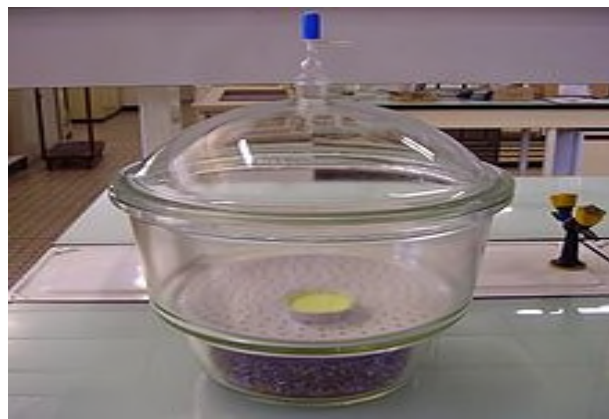


Fig. 4. 5 : Schéma de principe d'un dessiccateur

4.2.5. 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 a l'humidité H ;

U_{co} : 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 ;

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

P : pression en kPa ;

θ : Température en °C.

Pour calculer le facteur de correction K_h , relatif a 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 donnée en fonction de cette dernière. L'abaque de la figure 4.6, donne la transformation de l'humidité relative à l'humidité absolue en fonction de la température.

La valeur de l'humidité absolue lue sur l'abaque 4.6 est reportée sur l'abaque de la figure 4.7, pour déduire K_h .

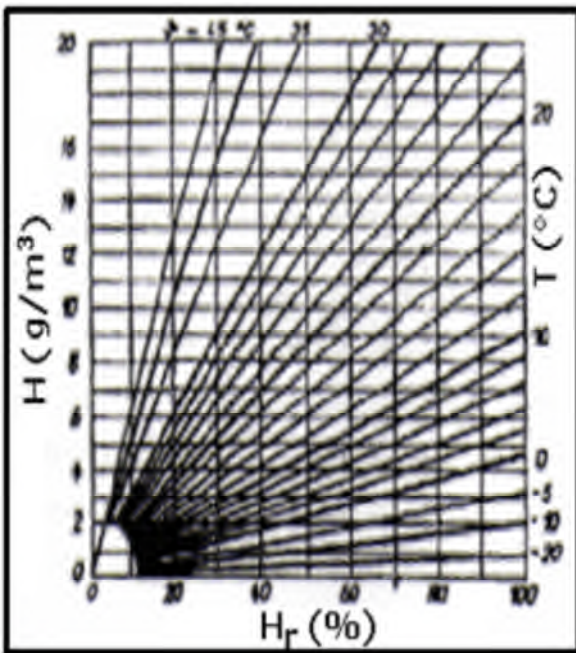


Fig. 4. 6 : Humidité absolue en fonction de l'humidité relative et de la température

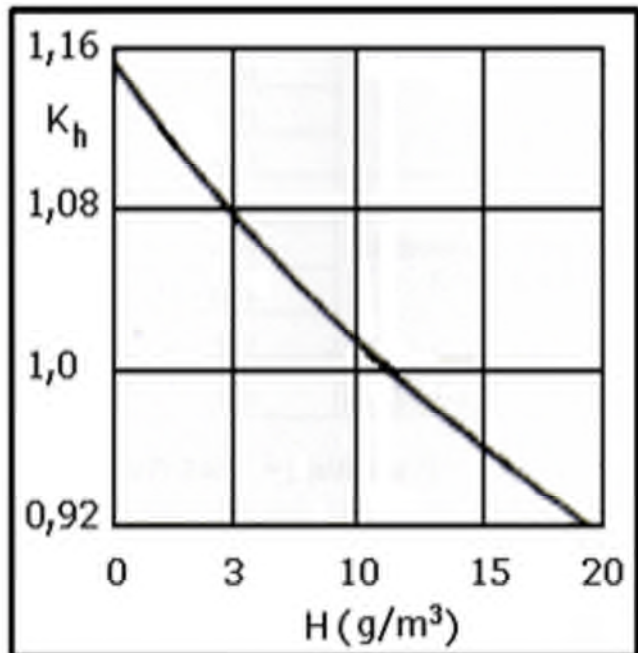


Fig. 4. 7: K_h en fonction de l'humidité absolue

Exemple de calcul:

Soient $T = 16.5^{\circ}\text{C}$, $P = 1013\text{hPa}$, $K_h = 51\%$, la tension disruptive du système mesurée a pour valeur:

$U_c = 48\text{ kV}$. En utilisant les formules de correction suscitées et les abaques ci-dessus

(Fig. IV.6 et Fig. IV.7), nous trouvons:

$$K_h = 1.037$$

$$K_d = \frac{(296,809)}{(289,5)} \implies K_d = 1.025.$$

$$U_{c0} = (1.037 / 1.025) U_c \implies U_{c0} = 48,56\text{ kV}.$$

4.3. 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 conductivité volumique, le volume des gouttes d'eau, l'espacement et l'arrangement des gouttes d'eau et l'angle d'inclinaison (α°) de l'isolation. Chacun de ces facteurs est exposé aux paragraphes suivants :

4.3.1. Conductivité et nombre de rangées de gouttes d'eau

La figure 4.8 illustre l'allure 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 63.91 kV. Elle est atteinte en absence de gouttes d'eau. Lorsque la conductivité de l'eau est de $180\mu\text{S/cm}$ et pour un volume de la goutte d'eau de l'ordre de $45\mu\text{l}$, il en résulte une décroissance rapide de la tension de contournement en fonction du nombre de rangées de gouttes d'eau jusqu'à atteindre une valeur constante, pour un nombre de rangées de l'ordre 4 à 5. Une allure similaire est obtenue pour le même volume d'eau mais de conductivité plus élevée et égale à 7 mS/cm . La différence se situe au niveau de la valeur de la tension de contournement de l'isolation qui est plus faible dans le deuxième cas. Cette différence est de l'ordre de 7.35 %.

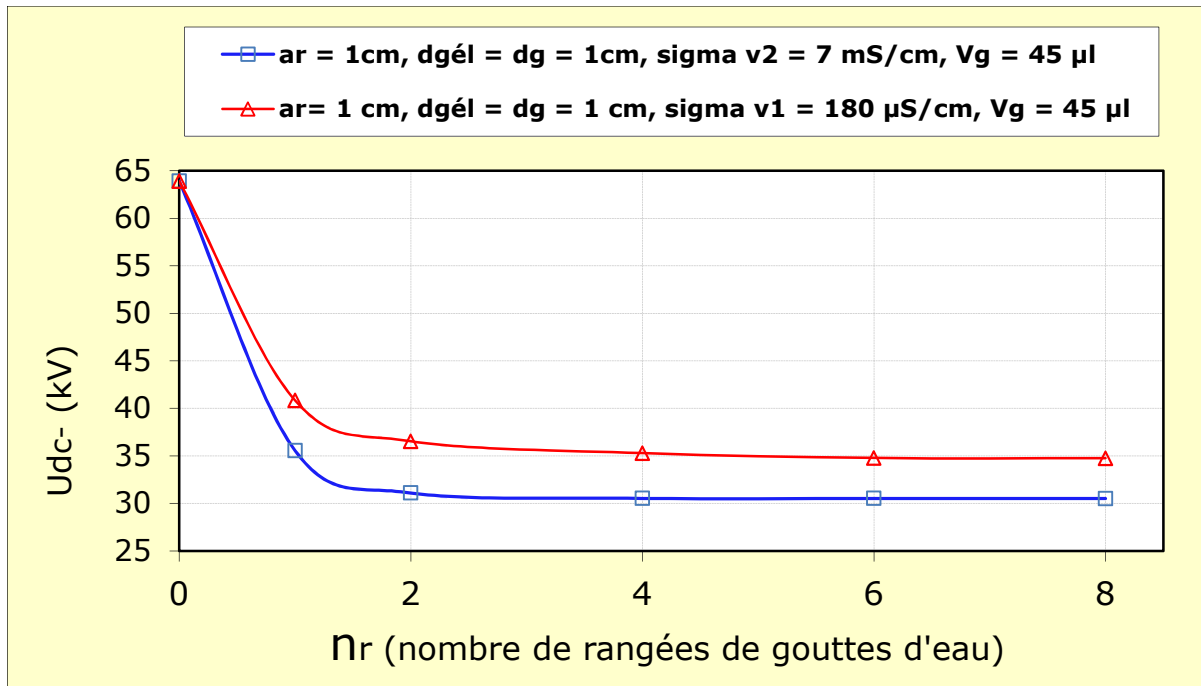


Fig.4. 8 : $U_{dc} = f(\sigma_v, n_r)$ d'une surface en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau

a_r : Arrangement des gouttes d'eau ;

$d_{gél}$: Distance entre la goutte d'eau et l'électrode ;

d_g : Distance entre les gouttes d'eau ;

Sigma v1: Conductivité volumique (180 $\mu\text{S/cm}$) ;

Sigma v2: Conductivité volumique (7 mS/cm) ;

V_g : Volume de la goutte d'eau ;

Les photographies représentées en figures 4. 9. 1 et 4.9.2 expliquent les principales phases de contournement d'une surface horizontale en silicone recouverte de gouttes d'eau de 45 μl de volume et pour deux conductivités volumiques différentes (180 $\mu\text{S/cm}$ et 7 mS/cm). Les figures 4. 9. 1a et 4.9.2e nous montrent la forme des gouttes juste avant la mise sous tension du système. Les figures 4. 9. 1b et 2f le nombre de microdécharges électrique court-circuitant les gouttes entre elles et/ou celles reliant les gouttes aux électrodes de base. La différence de couleur émise par ces deux décharges. Cela est dû probablement aux différentes longueurs d'ondes émises par les gouttes d'eau à divers degrés de salinité. Concernant le trajet de la décharge, il y'a discontinuité sur celui donné en figure 4. 9.2h par rapport celui indiqué sur la figure 4.9.1d. Enfin le

dégagement de chaleur est plus fort en figure 4.9.1c qu'en figure 4.9.2g. L'empreinte laissée par la décharge électrique de contournement sur la deuxième rangée de gouttes d'eau, est illustrée par les figures 4.9.1d et 2h. Il est à remarquer que le chemin de gouttes d'eau est plus discontinu lorsque la conductivité des gouttes d'eau est plus faible.

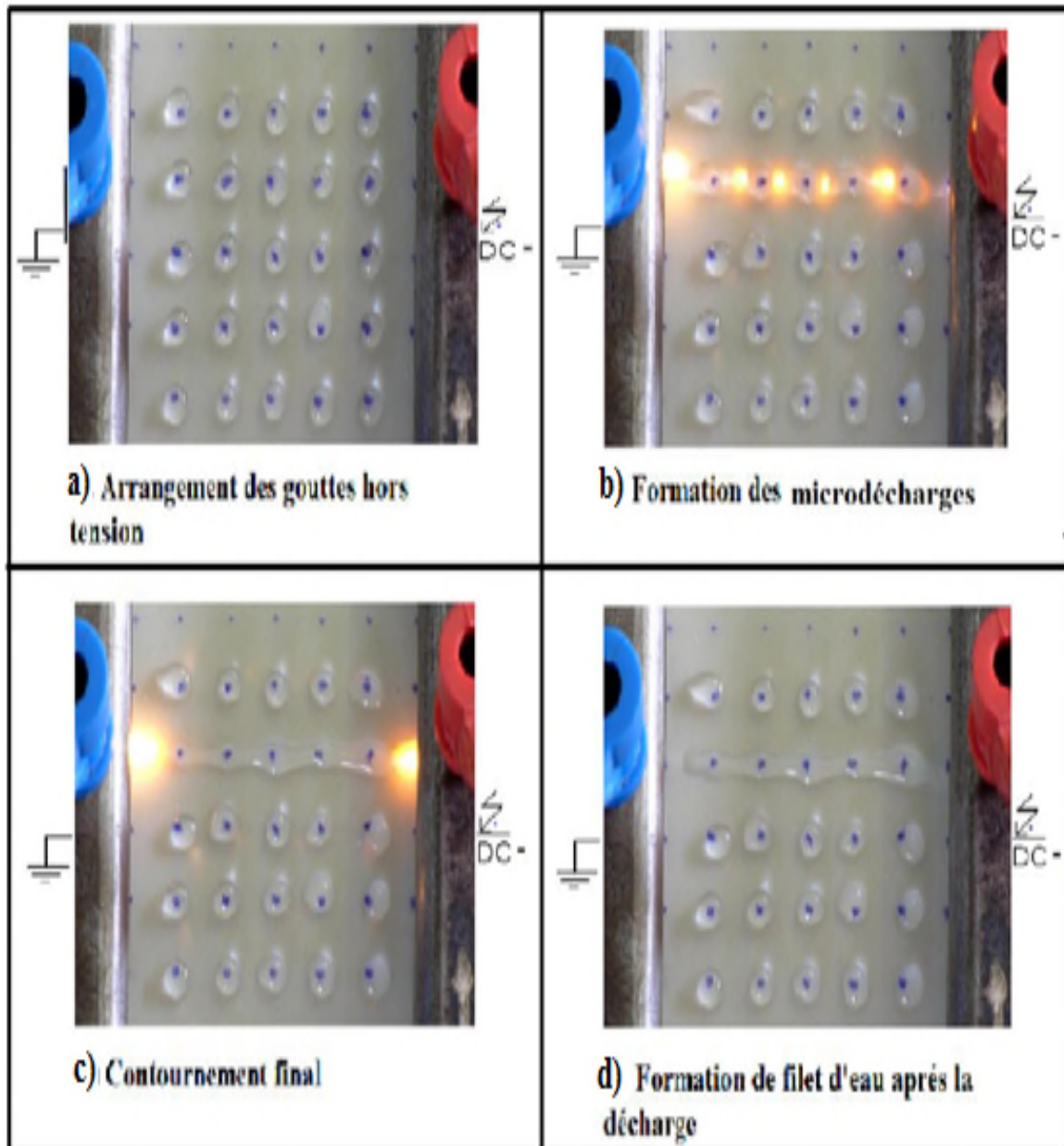


Fig. 4. 9. 1: Couleur jaune orange de la lumière émise par la décharge pour $\alpha = 0^\circ$,

$\sigma_v = 7 \text{ mS/cm}$ et $V_{gl} = 45\mu\text{l}$

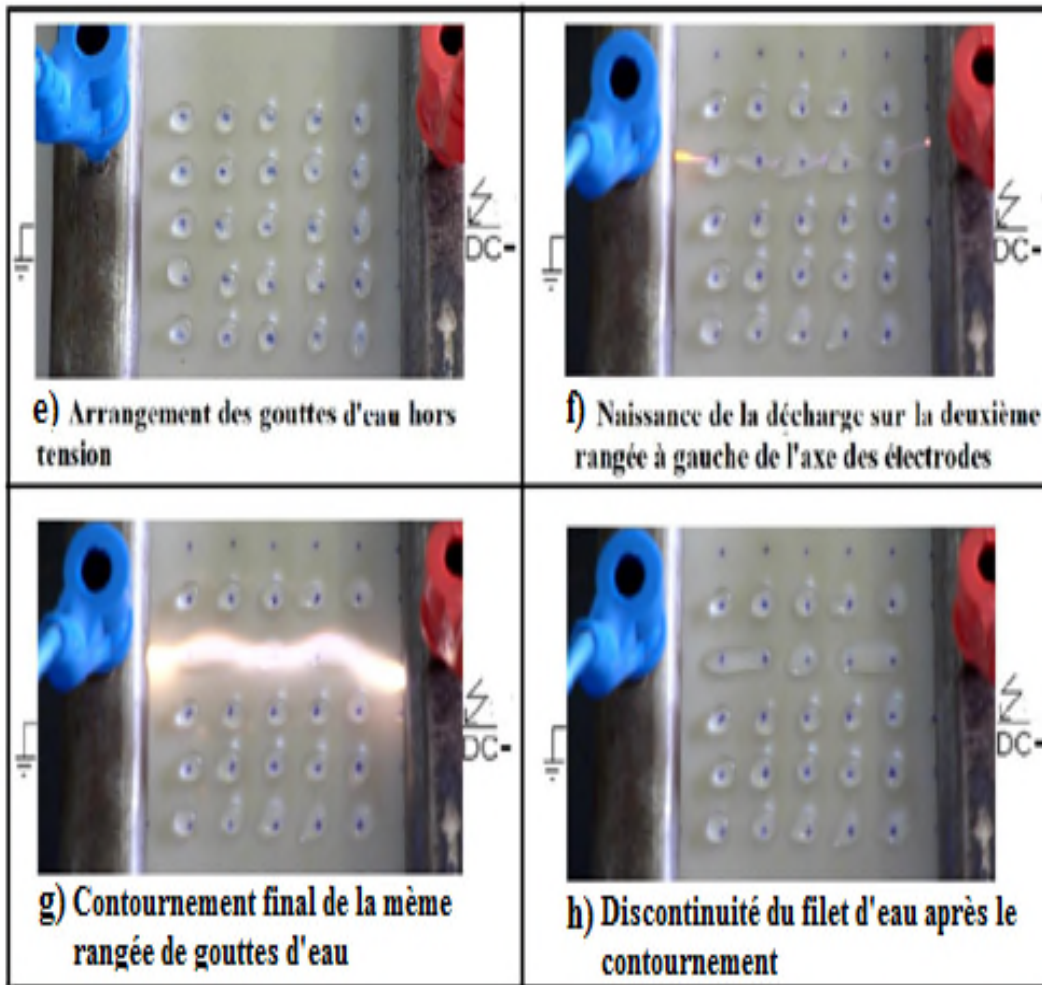


Fig.4.9.2 : Couleur blanche-rose de la lumière émise par la décharge pour $\alpha = 0^\circ$,

$$\sigma_v = 180 \mu\text{S/cm} \text{ et } V_{g1} = 45\mu\text{l}$$

4.3.2. Espacement entre gouttes d'eau et nombre de rangées

Dans ce paragraphe nous avons varié le nombre de rangées, la distance séparant les gouttes entre elles et celle entre les gouttes et les électrodes de base. L'allure de la tension de contournement en fonction de ces paramètres est illustrée par la figure 4.10. Celle-ci montre une similitude dans l'allure de la rigidité diélectrique longitudinale d'une isolation à gouttes d'eau à volume et conductivité constante indépendamment de l'espace laissé entre gouttes ou entre gouttes et l'électrode. Toutes ces allures présentent une limite constante correspondant à un nombre de rangée de gouttes d'eau bien déterminé, celui-ci est fonction surtout de la distance séparant deux rangées consécutives sur la largeur de l'isolation.

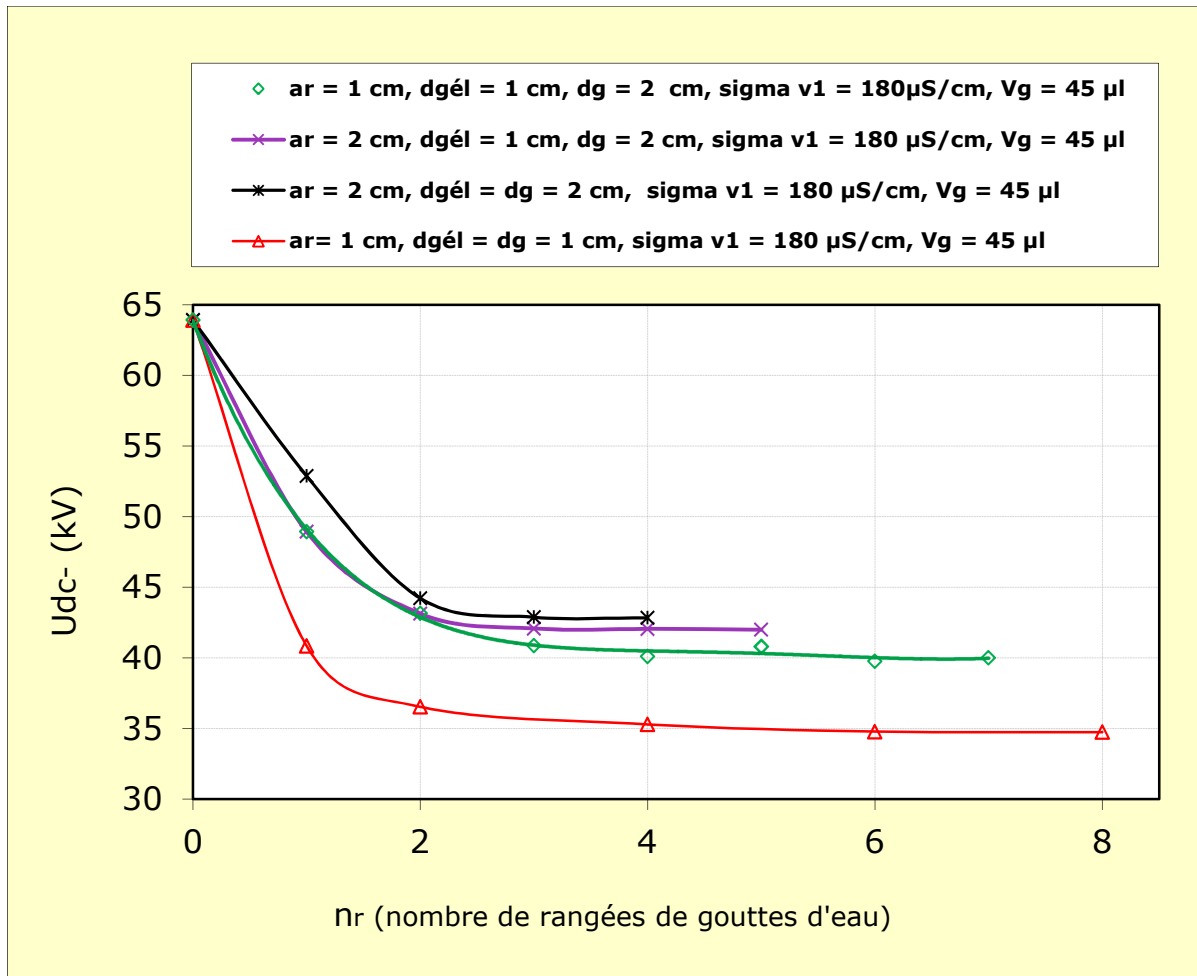


Fig.4.10 : $U_{dc} = f(n_r, a_r, d_g, d_{g\acute{e}l})$ d'une surface isolante hydrophobe horizontale

Le film présente une très mauvaise performance lorsque la valeur de a_r est inférieure ou égale à 1 cm. Le contraire est obtenu pour $a_r \geq 2$ cm.

4.3.3. Volume des gouttes d'eau et nombre de rangées

La figure 4.11 donne l'évolution de la tension de contournement de l'isolation en silicone hydrophobe en fonction du volume et du nombre de rangées de gouttes d'eau à conductivité électrique constante. Il en résulte une allure similaire des deux courbes quel que soit le volume des gouttes d'eau. Par contre la tension de contournement de la même surface recouverte des petites gouttes est plus élevée que celle à grandes gouttes. Cette différence peut être expliquée par une diminution de l'espace entre gouttes qui est plus grande dans le cas de l'arrangement des gouttes à grand volume, du fait de l'allongement des gouttes de ces dernières. Cet écart est de l'ordre de 8,78%.

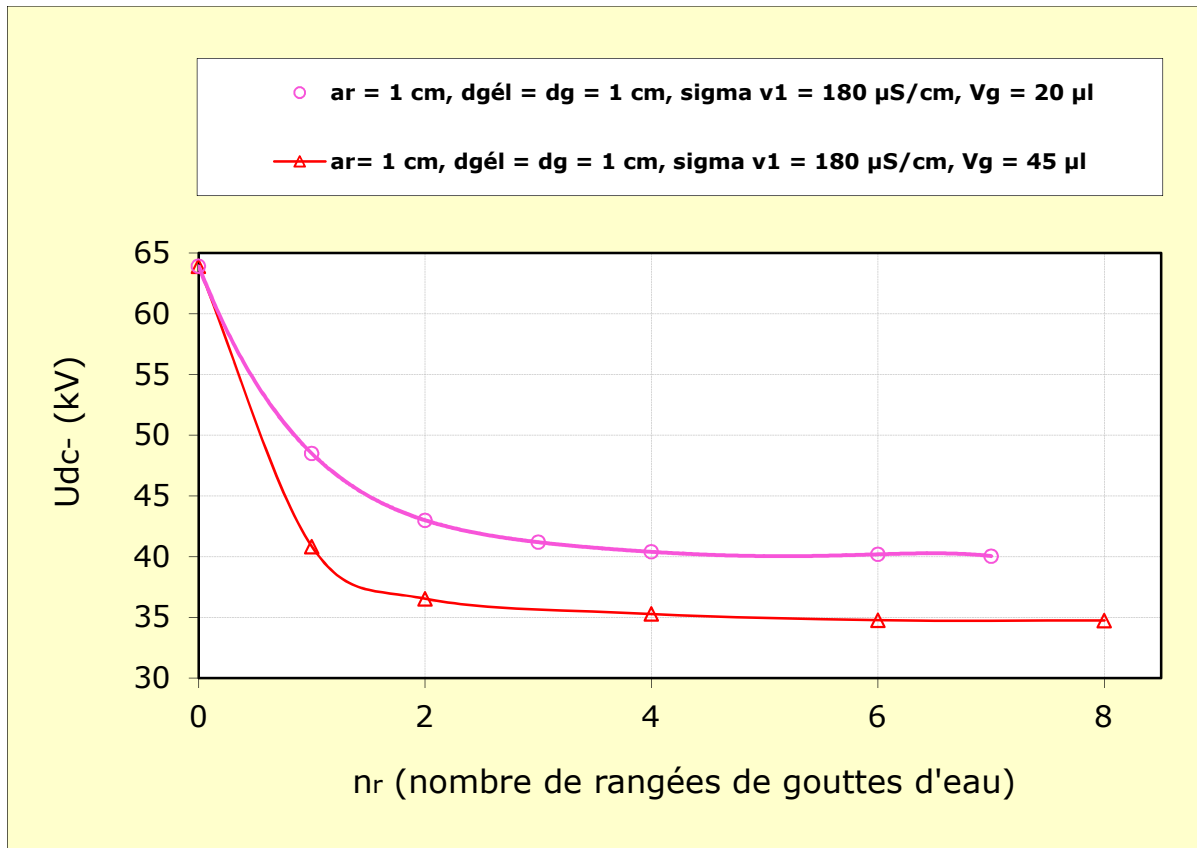


Fig.4.11 : $U_{dc-} = f(V_g, n_r)$ d'une surface en silicone hydrophobe

4.3.4. Angle d'inclinaison de l'isolation et espacement entre gouttes en surface hydrophobe

La figure 4.12 montre la variation de la tension de contournement en fonction de l'angle d'inclinaison (α°) par rapport à l'horizontale de la surface isolante hydrophobe avec gouttes d'eau à conductivité électrique constante et égale à $180 \mu\text{S/cm}$. Le volume des gouttes d'eau est fixé à $45 \mu\text{l}$ dans ce cas de figure. Le nombre de rangées de gouttes d'eau à été choisi égale à 5 pour la simple raison que la tension de contournement est à sa valeur minimale correspondant à la reproduction des conditions les plus défavorables. Il en résulte que les deux courbes présentent un minimum quels que soient les paramètres d'influence considérés dans ce cas. L'existence de cette tension minimale de contournement de l'isolation hydrophobe en silicone est justifiée par un raccourcissement maximal de l'espace entre gouttes d'eau par l'allongement optimal de ces dernières pour une déclinaison de la surface d'un angle de l'ordre 29.27° . Il est à remarquer la décroissance de l'angle d'inclinaison avec l'élévation de la distance entre les gouttes le long de la ligne de fuite de l'isolation. Cet effilement des gouttes d'eau est probablement par la résultante de la force électrique et au champ de gravitation des gouttes.

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, 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.

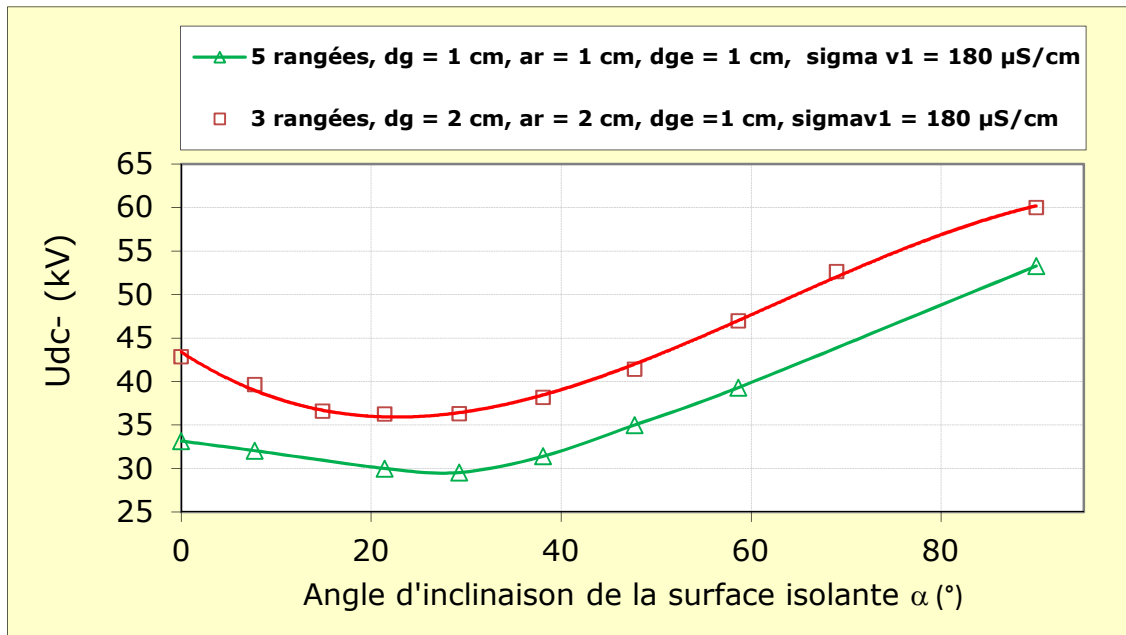


Fig.4.12 : $U_{dc-} = f(n_r, \alpha^\circ)$ d'une surface en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau pour $V_g = 45 \mu\text{l}$

La figure 4.13 illustre les différentes phases de contournement d'une surface recouverte de gouttes d'eau et inclinée selon un angle $\alpha_c = 29.27^\circ$. L'évolution de la décharge dans ce cas s'étale sur 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. 13a). Après application de la tension celles-ci commencent à se déformer (Fig. 4. 13b) 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.

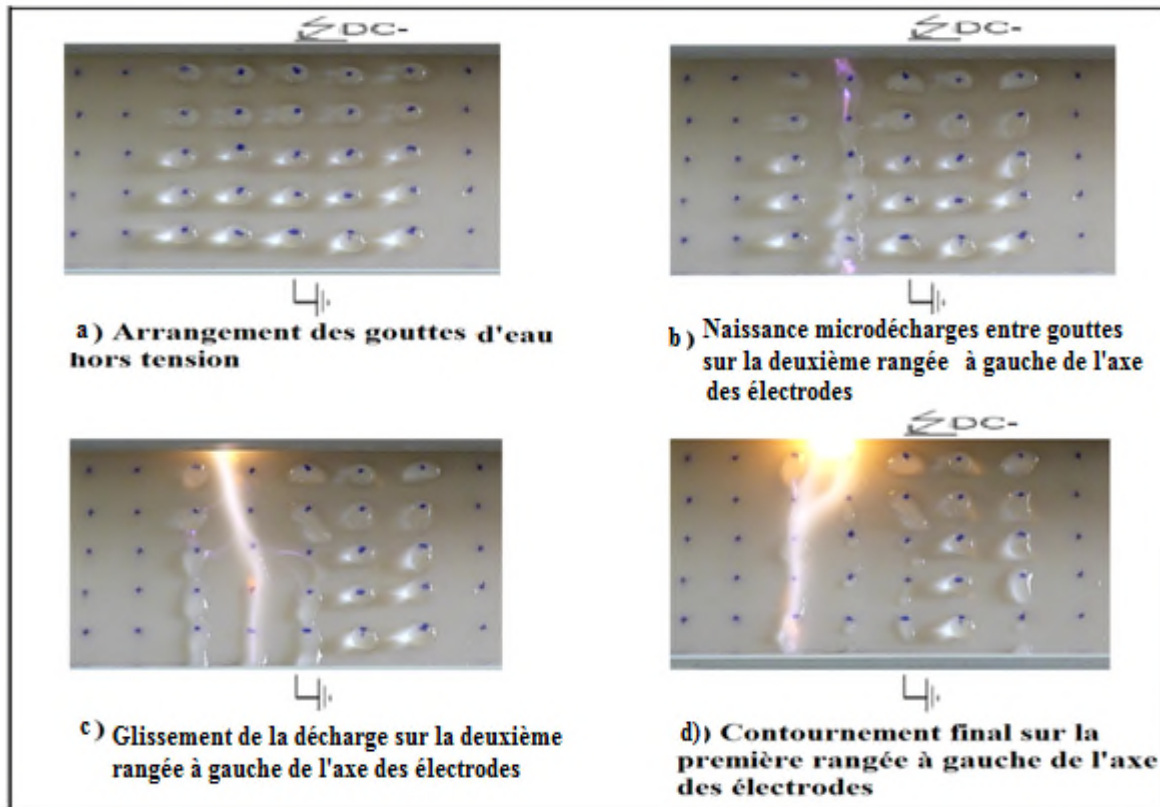


Fig. 4. 13 : Différentes phases de contournement de la surface isolante pour $\alpha_c = 29.27^\circ$, $n_r = 5$, $V_g = 45 \mu\text{l}$ et $\sigma_v = 180 \mu\text{S/cm}$ (α_c : Angle critique correspondant à la tension de contournement)

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.4.13b). Au cours de ce mouvement, certaines d'entre elles arrivent à se joindre à d'autres moins rapides qu'elles et voient leur taille s'accroître ensuite allongée. Au fil du temps le champ électrique s'intensifie au tour 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.4.13b). 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. 13c). 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. 13.d). Il est à souligner que

pendant qu'un filament d'eau se désintègre, un autre se forme sur d'autres rangées sous l'action conjuguée de la force électrique et le poids des gouttes. Ce déplacement latéral de la décharge sur la surface à gouttes s'opère généralement sur une largeur correspondant au maximum à 5 rangées équidistantes de 1cm réparties sur la largeur de film en silicone.

4.3.5. Volume des gouttes d'eau et inclinaison de la surface en silicone hydrophobe

La figure 4.14 illustre la comparaison des allures de la tension de contournement d'une surface isolante hydrophobe en fonction du volume des gouttes d'eau la recouvrant et l'angle de son inclinaison par rapport à la verticale pour une conductivité électrique des gouttes d'eau constante et égale à $180 \mu\text{S}/\text{cm}$. Il en découle que le volume des gouttes d'eau joue un rôle très important puisque lorsque celui-ci est de $20 \mu\text{l}$, la tension de contournement est décroissante et atteint la valeur la plus faible pour un angle d'inclinaison de l'ordre de 90° .

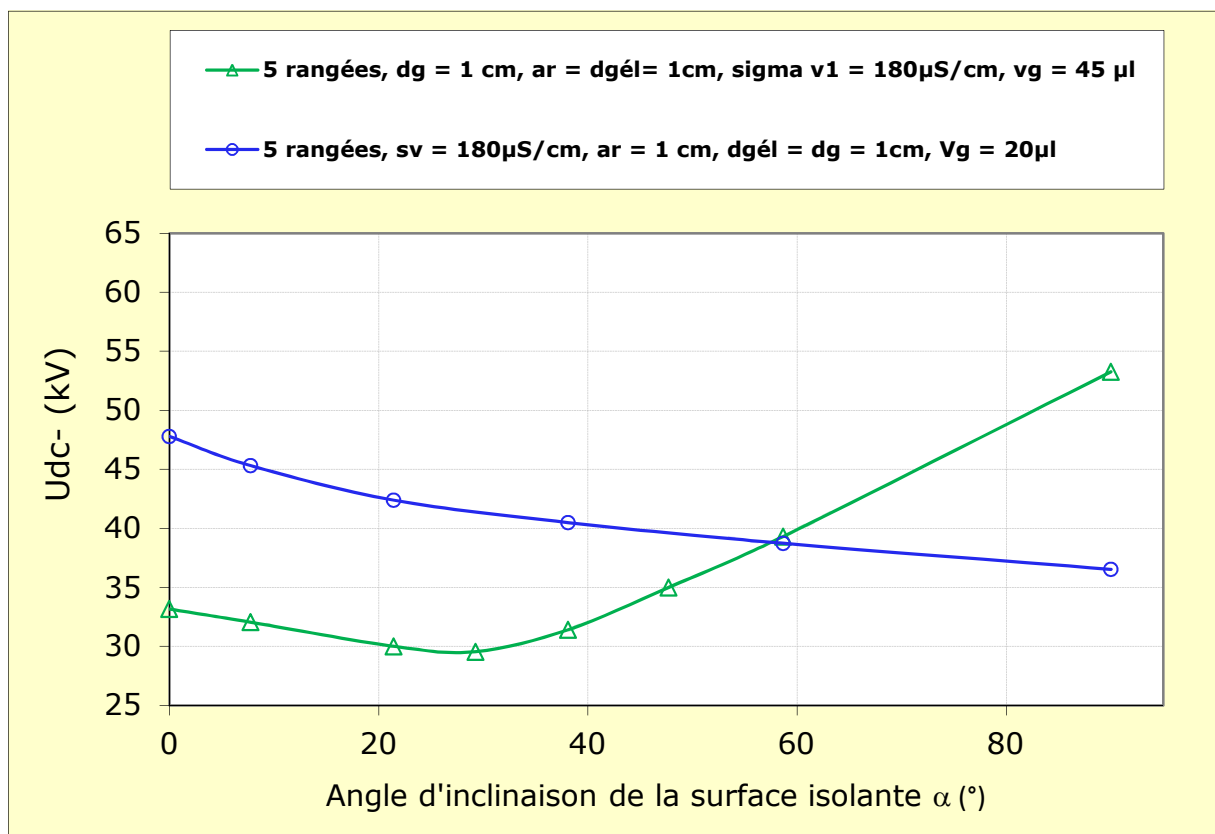


Fig. 4. 14: $U_{dc-} = f(\alpha, V_g)$ d'une isolation en silicone hydrophobe

Ceci est dû à l'adhésion des petites gouttes d'eau et leur allongement optimal dans ce cas de

figure (Fig. 4. 15) contrairement aux grosses gouttes ($V_g = 45 \mu\text{l}$) qui quittent la surface en laissant de petites gouttes derrière elles (Fig. 4. 16).

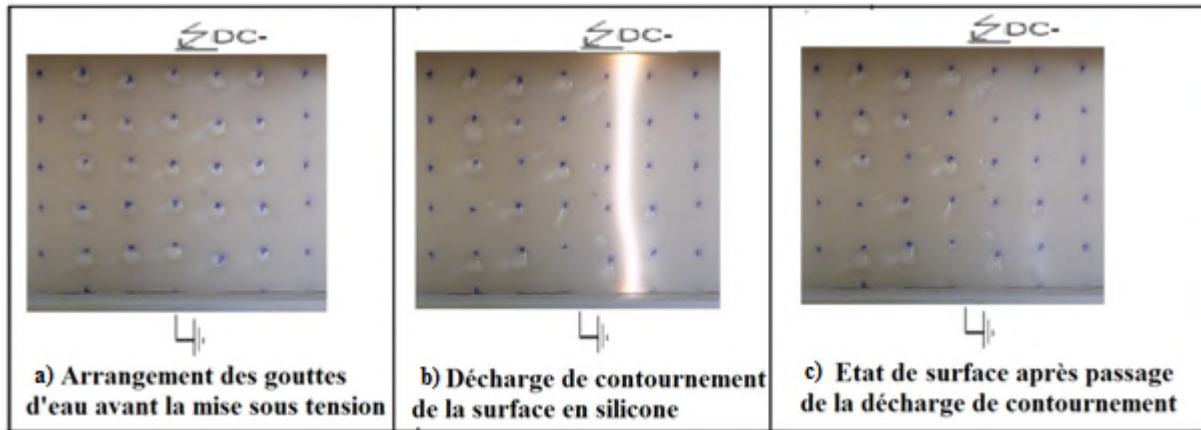


Fig. 4. 15 : Contournement d'une surface en silicone recouverte de petites gouttes ($V_g = 20 \mu\text{l}$, $\alpha = 90^\circ$)

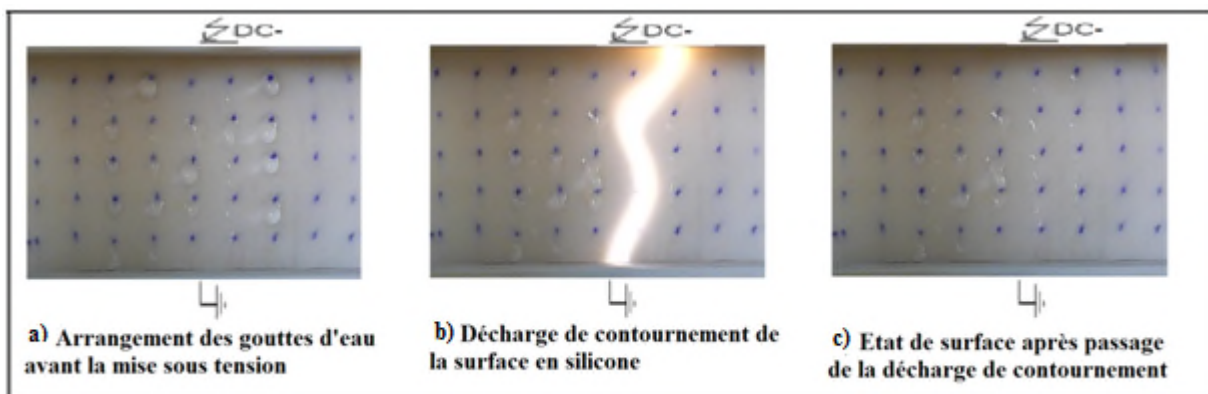


Fig. 4.16 : Contournement d'une surface en silicone recouverte de grosses gouttes ($V_g = 45 \mu\text{l}$, $\alpha = 90^\circ$)

4.3.6. Angle d'inclinaison de l'isolation et espacement entre gouttes en surface hydrophile

La figure 4.17 montre le changement de la tension de contournement en fonction de l'angle d'inclinaison (α°) par rapport à l'horizontale de la surface isolante hydrophile avec 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 $45 \mu\text{l}$ dans ce cas de figure. Il en résulte que ces deux courbes présentent aussi un minimum quels que soient les paramètres d'influence considérés dans ce cas. L'existence de cette tension minimale de contournement de l'isolation hydrophile en silicone est justifié par un effilement total des gouttes d'eau du fait du l'hydrophilité de la surface. Ces deux courbes sont plus plates que

celles données en figure 4.12 et plus basses.

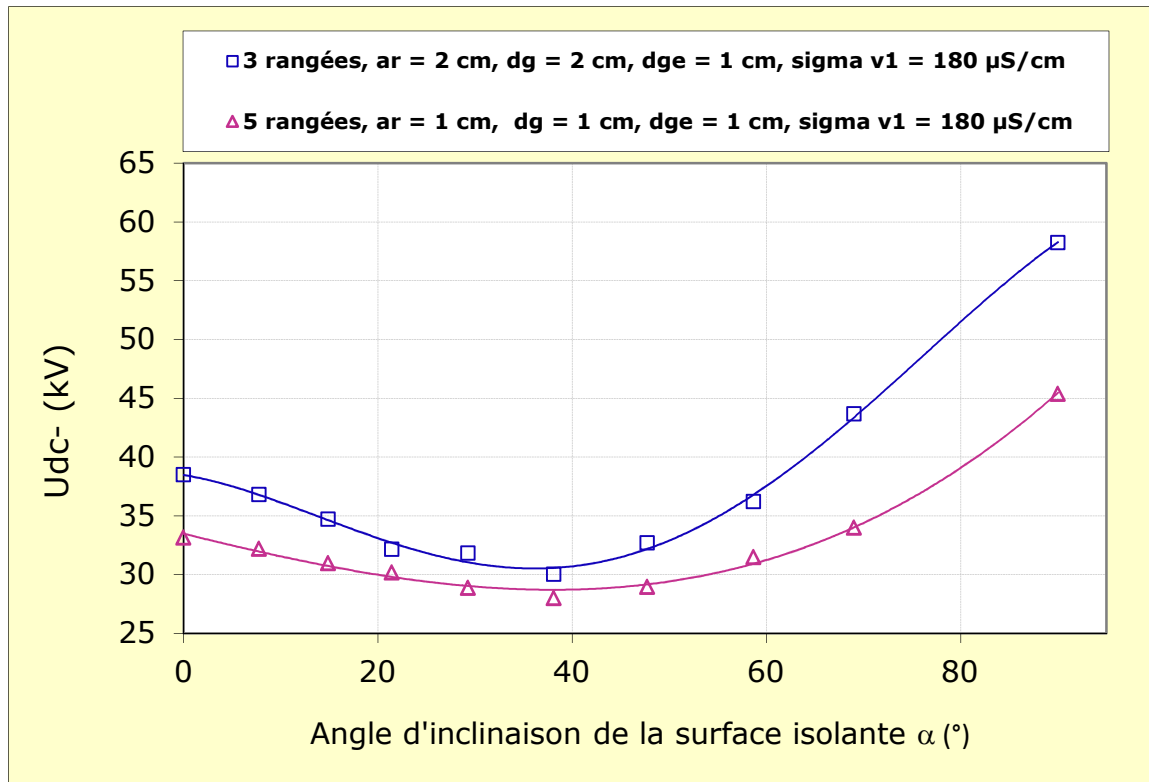


Fig.4.17 : $U_{dc-} = f(n_r, \alpha)$ pour une surface hydrophile recouverte de gouttes d'eau

4.3.7. Arrangements de gouttes d'eau mixtes

La figure 4. 18 donne 14 divers arrangements déposés de gouttes d'eau à volumes différents sur une surface en silicone hydrophobe inclinée d'un angle critique $\alpha_c = 29.27^\circ$. Les petites gouttes ont un volume de 20 μl celui des grandes est de 45 μl , la conductivité électrique de ces gouttes est de 180 $\mu\text{S/cm}$. La figure 4.19 donne la tension de contournement du film pour chacun de ces 14 différents arrangements de gouttes d'eau mixtes. Il en découle que la rigidité diélectrique de l'isolation est la plus faible lorsque le volume de gouttes d'eau est de 45 μl (Fig.4.18.A₁). Elle est plus élevée pour l'arrangement A₁₄ correspondant à un volume uniforme de 20 μl pour toutes les gouttes d'eau (Fig.4.18.A₁₄). Les autres arrangements offrent une rigidité, intermédiaire à ces cas extrêmes.

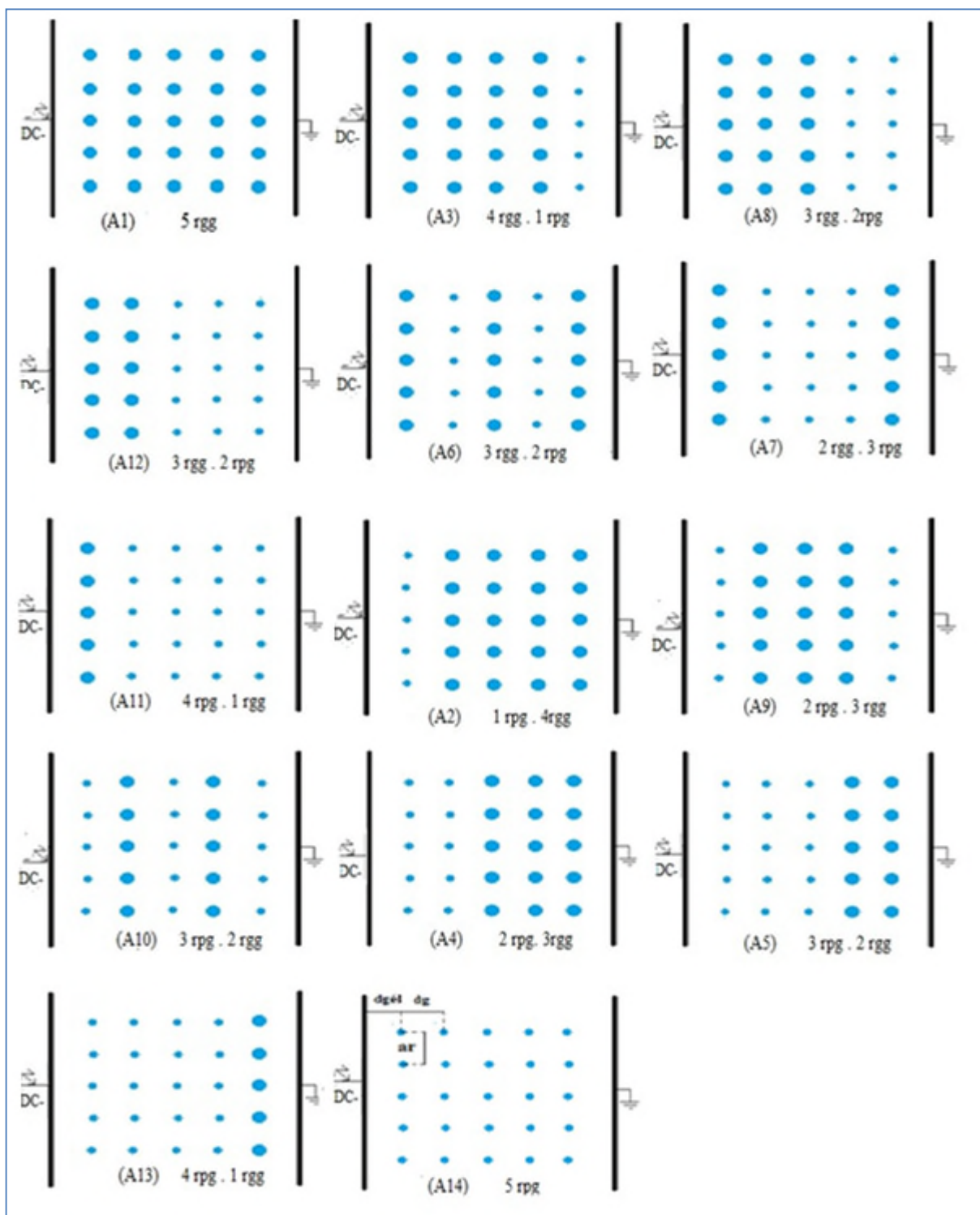


Fig.4.18 : Combinaison de plusieurs arrangements de gouttes d'eau mixtes (45 μ l, 20 μ l)

r_{gg} : Rangées de grandes gouttes,

r_{pg} : Rangées de petites gouttes,

A_1, \dots, A_{14} : Arrangements ;

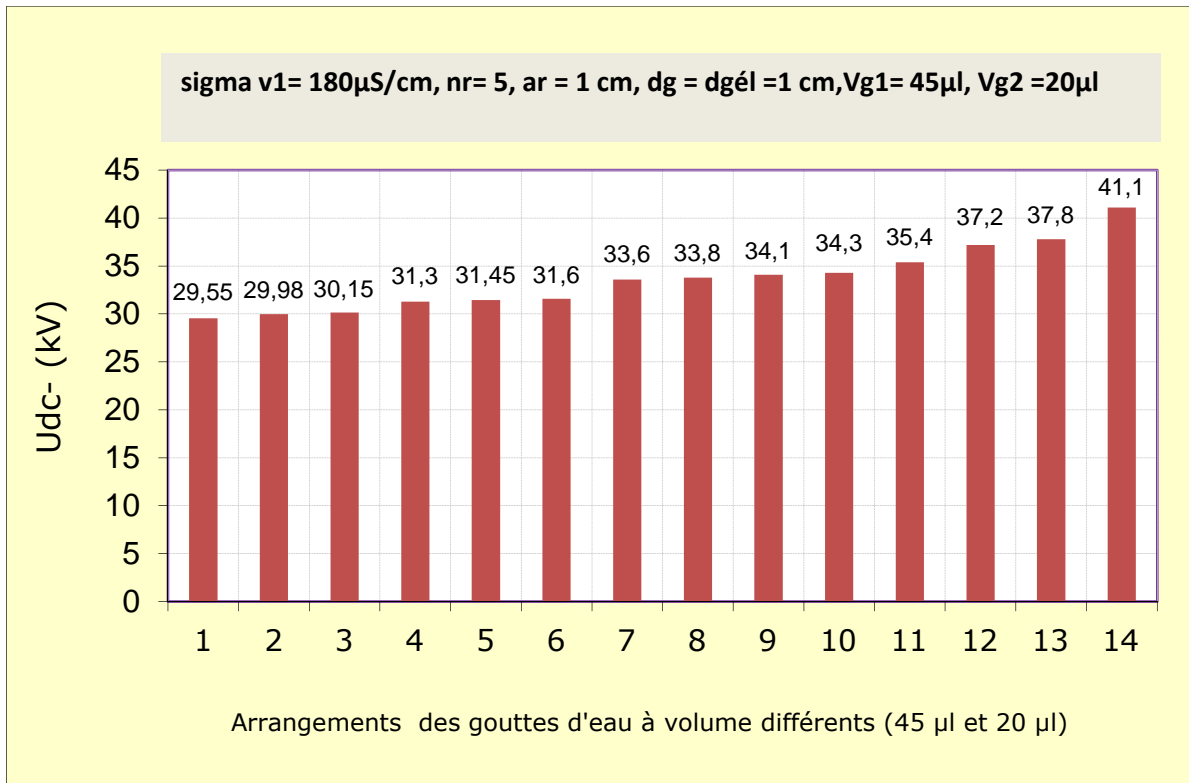


Fig.4.19 : $U_{dc-} = f(a_r)$ des gouttes d'eau à volume différent sur une surface en silicone hydrophobe ($\alpha_c = 29.27^\circ$)

4.4. Conclusion

Les résultats obtenus lors de l'étude de l'influence de la distribution des gouttes d'eau sur une surface isolante en silicone sous tension continue négative nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

- La surface en silicone propre et sèche en plan horizontal supporte mieux la contrainte de tension que lors qu'elle est recouverte de gouttes d'eau discrètes ;
- La tension de contournement décroît jusqu'à atteindre une valeur limite pour un nombre de rangées de gouttes bien déterminé et à partir du quel elle demeure ensuite constante ;
- L'augmentation de la conductivité électrique des gouttes d'eau engendre une réduction de la performance de l'isolation hydrophobe.
- La tension de contournement de l'isolation est plus importante lorsque le volume des gouttes d'eau est faible ;

- L'allure de la tension de contournement d'une isolation en silicone hydrophobe en fonction de l'angle de son inclinaison par rapport à l'horizontale lorsqu'elle est recouverte de grosses gouttes, 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.

Conclusion générale

Ce travail nous a permis de saisir le comportement d'une surface isolante en silicone sous tension continue négative et contaminée artificiellement sous différents degrés de distribution de gouttelettes d'eau.

Les résultats essentiels émanant de cette analyse peuvent être résumés comme suit ;

- La var tension de contournement devient plus importante en absence de gouttes d'eau sur l'isolation.
- quelle que soit la distribution de gouttes d'eau sur l'isolation, la tension de contournement décroît avec l'augmentation de la conductivité volumique et que celle-ci est beaucoup plus grande pour une isolation propre et sèche que pour une isolation polluée, ce qui confirme l'influence extrêmement néfaste de pollution sur la performance de l'isolation.
- Il existe un écart très important entre les tensions de contournement de l'isolation en silicone en présence de gouttes d'eau et à l'état sec et propre.
- L'influence de l'augmentation de la conductivité électrique de gouttes d'eau se traduit par une diminution de la tension de contournement de l'isolation en silicone.
- L'évolution de la tension de contournement d'une isolation en silicone hydrophobe, recouverte de grosses gouttes, présente un minimum en fonction de son inclinaison par rapport à l'horizontale. 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 plus rigide, puisque ces dernières ne adhèrent à la surface.
- La rigidité diélectrique longitudinale d'une isolation recouverte de gouttes d'eau augmente lorsque le volume des gouttelettes d'eau décroît de $45\mu\text{l}$ à $20\mu\text{l}$.

Références Bibliographiques

- [1] **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.
- [2] **J. Danis** « A stochastic pollution flashover model », International Symposium on High Voltage Engineering, Rapport 46 - 12, Septembre 5 – 9, Athènes, Grèce, 1983.
- [3] **A. Mekhaldi, D. Namane, S. Bouazabia et A. Beroual**, «Flashover of discontinuous pollution layer on high voltage insulators », IEEE, Trans, ou Dielectrics and electric insul. vol. 6, N° 6 pp 900-906, Dec, 1999.
- [4] **H. Deng and R. Hackam**. "Low molecular weight silicone fluid in rtv silicone rubber Coatings". IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 6, 1999.
- [5] **D.K. Das Gupta, K. Doughty, and A. Goodings**. Charge motion on moist polymer surfaces. IEEE Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1986.
- [6] **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.
- [7] **J. Koller, V. Kriha, J. Pichal, L. Aubrecht** «Corona discharge light emission et electric field intensity comparison». Czechoslovak Journal of Physics, Vol. 54, 2004.
- [8] **Luiz H. Meyer** « Correlation of Damage, Dry Band Arcing Energy, and Temperature in Inclined Plane Testing of Silicone Rubber for Outdoor Insulation »,IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol 11, No 3, pp 424-432, 2003.
- [9] **G. P. Bruce** « Performance of Silicone Rubber in DC Inclined Plane Tests», IEEETrans. Dielectr. Electr. Insul., Vol 17, No. 2., pp 521-532, April 2010.
- [10] **S. Kumagai** «Tracking and Erosion of HTV Silicone Rubber and Suppression Mechanism of ATH, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol 8, No 2, pp 203-211, 2001.
- [11] **R. Omranipour** “Standard Test Method for Liquid-Contaminant, Inclined-Plane Packing and Erosion of Insulating Materials.”
- [12] **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.
-
-

- [13] **Carette et J.M. Pouchol** « Silicones ».Technique de l'ingénieur Dossier A3475.
- [14] **M. Nemamcha**, «cours sur le claquage des isolants haute tension ».2001.
- [15] « Méthodes recommandées pour la mesure des résistivités transversales et superficielles d'un matériau isolant électrique», Publ. CEI, No.93, Genève, 1958.
- [16] « Méthode d'essai pour la détermination de la résistance des isolants solides ». Publ. CEI, No. 167, Genève,1964.
- [17] **Wolfgang Mosch**, «Einführung in die Hochspannungstechnik » technische Universität Dresden, Sektion Elektrotechnik.
- [18] M.D «Influence du vieillissement thermique sur les propriétés de l'EPDM (éthylène propylène diène monomère». Thèse de magister, UMM T-O 2002.
- [19] **A. Chabloz**, «technologie des matériaux à l'usage des professions de l'électricité, 1986»
- [20] « Méthode d'essai pour la détermination de la résistance des isolants solides ». Publ. CEI, No. 167, Genève,1964. »
- [21] **Fröhlich** ("theory of dielectrics" oxford univ. press, 1949)
- [22] **S. Medjhed, M. Eblaiden**, « étude 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.
- [23] Site de Bluestar Silicones (<http://www.bluestarsilicones.com/silicones/lang/fr/bluestarsilicones/histoire>).
- [24] **S. Djafri**, « pollution des isolateurs».mémoire d'ingénieur, promotion 1982, ENP Alger
- [25] **Wacker**, «silicones pour applications haute et moyenne tension» www.wacker.com.
- [26] **IEEE Std 957**«IEEE guide for cleaning isolateurs», 1995
- [27] **M. Terkmani, M. Babouamer**, " Contournement des Isolateurs des Lignes de Haute Tension ", PFE, USTO, juin 2005.
- [28] **L. Arrabiy**, " Visualisation et Traitement de Signal de Courant de Fuite sur une Surface Isolante Polluée ", PFE, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger (E.N.P.), 1999.
- [29] **Z. Sahli**, «étude de la non uniformité de la pollution sur les caractéristiques de contournement des isolateurs réels pollués sous tension continue », Mémoire de magister 2003. U A.M Bejaia
- [30] **A. Mekhaldi**, "Etude des Phénomènes de Conduction et de Décharge Electrique sur des Surfaces Isolantes Polluées sous Tension Alternative 50 Hz», thèse de Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Décembre 1999.
- [31] **P. Claverie, Y. Porcheron**, " Les Phénomènes de Pollution des Isolateurs et l'Isolément des Ouvrages en Région Polluées", RGE. Tome 82, N°3, pp. 166- 194, Paris, France, Mars 1973.
-

- [32] **A. Mekhaldi**, « Etude du développement d'un arc électrique sur des surfaces isolantes contaminées par la pollution désertique », Thèse de Magister, Génie électrique, ENP 1990.
- [33] **X. Ducouret** «Lignes aériennes : matériels », Techniques de l'ingénieur, D4423.
- [34] **J. L. Rafnoumanana**, "Modélisation par la Méthode des Equations Intégrales de Frontière de Phénomènes de Conduction Surfaiques sur les Isolateurs Pollués", Thèse de Doctorat d'état, Ecole Centrale de Lyon, Mai 1992.
- [35] **Groupe D'action 33.44.03***, «dispositifs de surveillance des isolateurs soumis à la pollution » Electra, N°152, février 1994.
- [36] **D. Dumora ; R. Parrau**, « Solution apportée aux problèmes de pollution par différents isolateurs en verre trempé et isolateurs en composite ». 428 RP 99/BC/mrg, sediver-79, Avenue François Arago-92017nanterre Cedex France.[37] **J. P Holtzhausen et Al** «continuous on site monitoring of insulator surface conductance and leakage currents » .7th ISH,report 44.14 ,Dresden ,Aug .1991.
- [38] **A. Schel** «Metal oxide surge arrester behavior in polluted conditions ». Transinor as, report 201-1, May 1987
- [39] **R. Pinet** «Prévention des incidents dus à la pollution des isolateurs sur les ouvrages de transport » R.G.E N°3, Mars 1973.
- [40] **A. Cimador** « Stations EDF pour mesurer la sévérité de la pollution des isolateurs sur les sites ». Séminaire sur la pollution des isolements des lignes et postes HT, one, Maroc, Casablanca, Mars 1989.
- [41] **C. H. A. Ely, P. J. Lambeth, J. S. T. Looms, D. A. Swift**, Contournement des Polymères Humides et Pollués l'Ailette booster, cigre, Rapport 15 - 02, Paris, France, 1978.
-

Résumé :

L'objectif essentiel recherché dans ce mémoire consiste justement en la contribution à l'optimisation de la rigidité diélectrique longitudinale d'une isolation en silicone d'un système d'électrodes plan-plan mis sous tension continue négative sur une surface propre et /ou polluée. Lors de cette investigation, l'influence des paramètres importants tels que la conductivité volumique, le volume des gouttes d'eau, l'espacement entre les gouttes ou entre les gouttes et l'électrode de base ainsi que l'angle d'inclinaison de l'isolation en silicone sur l'évolution de performance du système à été mise en évidence.

Les résultats émanant de cette analyse montrent que la valeur de la tension de contournement est plus importante en absence de gouttes d'eau.

La rigidité diélectrique du système avec une surface recouverte de gouttes d'eau décroît plus ou moins rapidement avec l'élévation de la conductivité volumique de celle-ci pour devenir minimale et constante à partir d'un certain nombre de rangées de gouttes d'eau. Le volume des gouttes d'eau joue un rôle très important, car la tension de contournement est plus élevée lorsque la surface est recouverte des petites gouttes d'eau, Le contraire est obtenu pour un grand volume de gouttes d'eau. Le film présente une très mauvaise performance lorsque l'espacement entre les gouttes d'eau est inférieur ou égale à 1cm. Le contraire est obtenu pour une distance supérieure ou égale à 2 cm.

La variation de la tension de contournement en fonction de l'angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale de l'isolation en silicone hydrophobe, recouverte de grosses gouttes, présente un minimum correspondant à un raccourcissement maximal de la distance séparant ces gouttes. Pour des angles avoisinant 90° , celle-ci est pratiquement très proche de celle obtenue en absence de telles gouttes. Cette augmentation est due à la disparition des grosses gouttes et leur remplacement par d'infimes petites gouttes. Par contre sous l'action de petites gouttelettes l'isolation est plus rigide la rigidité puisque ces dernières ne quittent pas la surface, mais leur allongement est optimal pour l'angle d'inclinaison de l'ordre de 90° .