

République Algérienne Démocratique Et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mouloud MAMMERI de TIZI OUZOU

Faculté de génie électrique et d'informatique

Département d'électrotechnique



MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

En vue d'obtention d'un diplôme d'ingénieur d'état
En électrotechnique
Option: Machines électriques

Thème

Etude du Comportement d'un Isolateur Silicone Dans un Environnement Désertique

Proposé er Dirigé par

Dr : SAHLI Zahir
Université A. Mira-Bejaia

Etudié par

Mr BEGTACHE Lamine



Promotion: 2011-2012

REMERCIEMENTS

Ce travail à été réaliser au niveau du Laboratoire de Haute Tension de BEJAIA.

Ce projet est encadré par Mr SAHLI Zahir (U.A.M de BEJAIA) et Co-Encadré par Mr, BIROUCHE Chafik Département Electrotechnique, Faculté de Génie Electrique et Informatique de l'U.M.M de TIZI-OUZOU.

Je tien à exprimer mes vifs remerciements pour Mr SAHLI, pour sa disponibilité, l'aide et les conseils qu'il nous a prodigué tout au long de ce travail.

Je tien aussi à exprimer mes remerciements, d'une façon particulière à Mr Boudissa Rabeh (U.A.M de BEJAIA), pour m'avoir accueillis dans son Laboratoire, pour ces orientations ainsi qu'à toute la documentation qu'il a mit à ma disposition.

Nous remercions toutes celles et ceux qui de près ou de loin, nous ont prêté main forte (Ne serai-ce que par une parole), pour la réalisation et la finalisation de ce projet.

Que les membres du jury trouvent ici l'expression de notre gratitude. C'est pour nous un honneur que vous ayez accepté d'évaluer ce modeste travail.

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail à :

- + Mes parents, ceux que j'ai de plus précieux au monde, principalement pour leur énorme soutien et qui m'ont permis d'arriver là où j'en suis ce jour, je voudrai leur exprimer toute ma GRATITUDE et tout mon AMOUR, je leur dit Mille fois MERCI;
- + Mes frères et sœurs : fatiha, mohamed, sofiane, nassim, Salma et assia et leurs enfants (rym, amine, yacine, nesrine et lili)
- + A celle qui a su faire sortir le meilleur de moi-même et qui me comblé de sa douceur et son affection, mon ange nassima.
- + A zahir et son petit ange lyna et toute sa famille.
- + Tous mes amis qui mon soutenue tous le long de ma vie.
- + Tous ceux et toutes celles qui m'ont aidé de près ou de loin.

Lamine

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE I : ISOLANTS ET ISOLATEURS

Introduction	1
I.1. Isolants	1
I.1.1. Définitions.....	1
I.1.1.1. Isolant	1
I.1.1.2. Isolation	1
I.1.1.3. Diélectrique	1
I.1.2. Différents types d'isolants	1
I.1.2.1. Isolants gazeux	1
I.1.2.2. Isolants liquide.....	2
I.1.2.3. Isolants solides	2
I.2. Isolateurs	2
I.2.1. caractéristiques des isolateurs.....	3
I.2.1.1. Tension d'essai	3
I.2.1.2. Tension de contournement	3
I.2.1.3. Courant de fuite	3
I.2.1.4. Courant de fuite critique	3
I.2.1.5. Ligne de fuite spécifique (I_s) d'un isolateur	3
I.2.1.6. Facteur de forme d'un isolateur(F)	3
I.3. Matériaux isolants utilisés pour la fabrication des isolateurs.....	4
I.3.1. Céramique	4
I.3.2. Verre	4
I.3.3. Matériaux synthétiques.....	5
I.4. Différents types d'isolateurs	5
I.4.1 Isolateurs supports.....	5
I.4.2. Isolateurs de traversées.....	6
I.4.3. Isolateurs de lignes aériennes	6
I.5. Propriétés diélectriques des isolants	6

I.5.1. Rigidité diélectrique.....	7
I.5.2. Permittivité.....	7
I.5.3. Angle de pertes et facteur de dissipation.....	8
I.6. contraintes subits par l'isolateur.....	9
I.6.1. Contraintes mécaniques.....	9
I.6.2. Contraintes électriques.....	9
I.7. Choix d'isolateur.....	9
Conclusion.....	10

CHAPITRE II : POLLUTION ET METHODES DE MESURE DE LA SEVERITE DE POLLUTION

Introduction.....	11
II.1. Origine de la pollution.....	11
II-2. Sources de pollution.....	11
II.2.1. Pollution naturelle.....	12
II.2.1.1. Pollution marine.....	12
II.2.1.2. Pollution désertique.....	12
II.2.2. Pollution industrielle	12
II.2.3. Pollution mixte.....	12
II.3. Pollution des isolateurs	13
II.4. Influences des conditions climatiques sur la distribution de la pollution....	13
II.5. Impact de la pollution.....	14
II.5.1. Arc non localisé.....	14
II.5.2. Arc fixe.....	14
II.5.3 Contournement des isolateurs pollués.....	14
II.5.4. Corrosion des isolateurs.....	15
II.6. Méthodes de mesure de la sévérité de pollution.....	15
II.6.1. Dispositif de mesure de la conductivité superficielle à l'aide d'une sonde mobile.	15
II.6.1.1. Description du dispositif et procédé de mesure.....	15
II.6.2. Densité du dépôt de sel équivalent (DDSE).....	21
II.6.3. Conductance superficielle	22

II.6.4. Comptage des impulsions de courant de fuite.....	23
II.6.5. Contrainte de contournement	25
II.6.6. Mesure optique	25
II.6.7. Densité de dépôt non soluble(DDNS)	26
II.6.8. Autres méthodes de mesure	27
II.8. Choix d'une méthode de mesure de sévérité de pollution d'un site.....	27
Conclusion.....	28

CHAPITRE III : SIMULATION ET LUTTE CONTRE LA POLLUTION

Introduction	29
III.1. Simulation de la pollution au laboratoire.....	29
III.1.1. Méthodes de simulation.....	29
III.1.1.1. Brouillard salin.....	29
III.1.1.2 Brouillard équivalent	30
III.1.1.3 Brouillard vapeur.....	30
III.1.1.4 Brouillard tenu.....	31
III.1.1.5 Méthycellulose ou méthode de pollution liquide.....	31
III.1.1.6 Kieselguhr.....	32
III.1.1.7 Contaminant humide.....	32
III.1.2 Corrélation entre les méthodes de pollution naturelles et artificielle.....	32
III.1.3 Caractéristiques des méthodes	33
III.2 Lutte contre la pollution.....	34
III.2.1 Technique de lutte contre la pollution.....	34
III.2.1.1 Allongement de la ligne de fuite.....	34
III.2.1.2 Changement de forme des isolateurs (isolateurs plats).....	34
III.2.1.3 Graissage périodique des isolateurs.....	34
III.2.1.4 Revêtement silicones.....	35
III.2.1.5 Isolateurs composites.....	35
III.2.1.6 Nettoyage des isolateurs.....	35
III.2.1.7 Élagage	37
III.2.1.8 Peinture.....	38
Conclusion	38

CHAPITRE VI : LA SILICONE

Introduction.....	40
IV.1. Propriétés des silicones.....	40
IV.1.1.Hydrophobicité	40
IV.1.2.Tenue aux UV et aux intempéries	41
IV.1.3.Tenue au feu	41
IV.1.4.Elasticité	42
IV.1.5.Propriétés diélectriques	42
IV.1.6.Thermostabilité	42
IV.2.Avantages pour les applications moyenne et haute tension	43
IV.2.1.Sécurité accrue	43
IV.2.2.Utilisation en extérieur	43
IV.2.3.Haute protection anti-incendie	43
IV.2.4.Large plage de température.....	43
IV.2.5.Plus grande longévité	43
IV.2.6.Meilleur rendement	43
IV.3.Propriété fondamentales	43
IV.3.1.Propriétés fondamentales pour les applications électriques	43
IV.3.2.Importance des propriétés selon l'application	45
IV.4.Structure Moléculaire Des Silicones.....	45
IV.4.1.Stabilité exceptionnelle	45
IV.4.2.Grande liberté de formulation	46
IV.5. Groupes de silicones	46
IV.5.1.Elastomères silicones	46
IV.5.2.Gels silicones	46
IV.5.3.Huiles silicones	47
IV.5.4.Résines siloxanes	49
IV.7. Isolateurs / revêtement d'isolateurs	49
IV.7.1.Isolateurs / parafoudres	49
IV.7.1.1.Avantage des silicones dans les isolateurs a long fut	49
IV.7.2.Fabrication des isolateurs à long fut et procédés	50

IV.8. Isolateurs creux	50
IV.8.1. Avantages des silicones dans les isolateurs creux	51
IV.8.2. Fabrication des isolateurs creux et procédés	52
IV.8.2.1. Procèdes de fabrication	52
IV.8.2.2. Types	52
IV.9. revêtement en silicone des isolateurs	52
IV.9.1. Propriétés électriques améliorées	53
IV.9.2. Avantages du revêtement en silicone des isolateurs	53
IV.9.2.1. Plus grande sécurité de fonctionnement.....	53
IV.9.2.2. Traitement des installations existantes.....	54
IV.9.2.3. Plus longue durée de vie	54
IV.9.3. Mise en œuvre des revêtements silicones	55
IV.10. Silicones isolants	55
IV.10.1. Huiles silicones	55
IV.10.1.1. Composition et propriétés	55
IV.10.1.2. Isolants classiques pour transformateurs	56
IV.10.1.3. Huile silicone pour haute densité d'énergie	56
IV.10.1.4. Avantages des huiles isolantes en silicone	56
IV.10.2. Gels silicones	57
IV.10.2.1. Propriétés	57
IV.10.2.2. Avantage des gels silicone	57
IV.11. Procédés de transformation.....	57
IV.11.1.1. Caractéristiques du moulage par injection	58
IV.11.2. Moulage / coulée basse pression	59
IV.11.2.1. Caractéristiques du moulage basse pression	59
Conclusion.....	60
CHAPITRE V : LE CLIMAT SAHARIEN.....	
Introduction.....	61
V.1. Les aérosols.....	61
V.2. Le Sahara algérien	61
V.3. L'influence du Sahara sur le climat mondiale	63

V.4. Les poussières sahariennes	64
V.5. Erosion éolienne	65
V.6. Le rôle du vent	65
V.7. La mesure de la vitesse et la direction du vent.....	67
V.7.1 la mesure de la vitesse du vent.....	67
V.7.2.Instrument de mesure de la vitesse du vent	67
V.7.3. La direction du vent	69
V.7.4. Détermination de la direction du vent	69
V.8. Les effets de l'érosion	70
V.9. Le taux et l'amplitude de l'érosion éolienne	71
V.9.1. Susceptibilité du sol à l'érosion	71
V.9.2. La rugosité de la surface	71
V.10. La vitesse de friction	71
V.11. Mouvement d'un grain de sable	72
V.11.1. Mouvement de reptation et de saltation	72
V.11.2. Formation des dunes	74
V.12. Impact	75
Conclusion	75

CHAPITRE VI : PARTIE EXPERIMENTALE

VI .introduction	76
VI.1. Techniques expérimentales	76
VI.1.1. Dispositif expérimental	76
VI.1.1.1. Dispositif expérimentale reproduisant une tempête de sable.....	76
VI.1.1.2. dispositif expérimentale d'essai haute tension.....	77
VI.1.2 Schéma électrique du dispositif expérimental	78
VI.1.3. Mode opératoire	80
VI.1.4. Modèle expérimentale.....	80
VI.1.5. Circuit de mesure de la tension appliquée.....	81
VI.1.6. Procédé d'essai.....	82
VI.2. Résultats d'essai et interprétations.....	82
VI.2.1. Analyses physiques.....	82

VI.2.2. Analyses électriques.....	93
VI.2.2.1. Tension de contournement.....	93
VI.2.2.2. Procédé d’essai	93
Conclusion.....	99
CONCLUSION GENERALE.....	

INTRODUCTION GENERALE

Les équipements haute tension (*H.T.*) des réseaux aériens de transport de l'énergie électrique sont supposés opérer de façon fiable sous des conditions environnementales spécifiques pour lesquelles ils sont prévus. En particulier, les isolateurs, qui représentent relativement un faible pourcentage dans le prix des lignes aériennes, constituent un élément essentiel dans le bon fonctionnement de ces lignes. Leur rôle est d'assurer l'isolement électrique entre les parties portées à la *H. T.* ou entre les parties *H. T.* et les parties mises à la terre. Depuis plusieurs années, l'une des principales cibles dans les travaux de recherche et le développement dans le champ de la transmission et de la distribution électrique a été la diminution du nombre et de la durée des interruptions de l'alimentation en énergie électrique des consommateurs. Une quantité importante d'isolateurs est utilisée sur les réseaux aériens de transport de l'énergie électrique et, en pratique, ces isolateurs sont employés dans différents environnements tels que tropical, arctique, côtier, atmosphère polluée, etc. Parmi les conditions météorologiques auxquelles sont soumis les équipements des réseaux électriques, ce sont l'érosion suite aux tempêtes de sable et les dépôts de poussière qui sont les plus dangereux. En effet, dans plusieurs régions désertiques, les vents violents chargés de particules de sable et l'accumulation de poussières sur les équipements des réseaux aériens de distribution d'énergie électrique peuvent entraîner non seulement des dommages mécaniques sur les pylônes et les conducteurs, mais elles peuvent aussi affecter considérablement les performances diélectriques des isolateurs. Une fois leur rigidité diélectrique affaiblie par ces accumulations, ces isolateurs subissent des contournements électriques pouvant entraîner des interruptions partielles, voire totales, de la distribution électrique. Un contournement électrique se traduit par un court-circuit, entre la partie portée à la *H. T.* et la terre, créé par un arc électrique s'établissant généralement à la surface de la couche de poussière recouvrant l'isolateur.

Le présent travail porte sur l'étude du comportement d'un isolateur à ailettes en silicone soumis aux mêmes conditions qu'un vent de sable et soumis à une tension continue et alternative il comporte six chapitres : Le premier chapitre sera consacré à des rappels concernant les isolateurs et leurs constitutions ainsi que les différents types d'isolateurs existants et leurs domaines d'application. Le second chapitre sera réservé à l'analyse descriptive des phénomènes de pollution et les différentes méthodes d'essais d'isolateurs sous l'effet de pollution naturelle et artificielle.

Le troisième chapitre est consacré à la simulation et lutte contre la pollution. Le quatrième chapitre sera consacré pour la silicone et ses différentes applications.

Une vue d'ensemble du climat désertique et des phénomènes d'érosion sera développée dans le cinquième chapitre.

Dans le sixième chapitre nous présenterons les résultats expérimentaux que nous avons obtenus et leurs interprétations. Nous étudierons également l'effet du vent de sable et de la poussière sur les caractéristiques physiques de l'isolateur silicone et de la polarité de la contrainte de tension appliquée sur le contournement de l'isolateur. Enfin, nous terminons notre travail par une conclusion générale.

*ETUDE DU COMPORTEMENT
D'UN ISOLATEUR SILICONE DANS UN
ENVIRENEMENT DESERTIQUE*

CHAPITRE I

**ISOLANT ET
ISOLATEURS**

Introduction

Les isolateurs sont l'un des principaux composants des lignes de haute et moyenne tension HT, MT, et leur fiabilité quelles que soient les conditions environnementales est primordiale, ils jouent un rôle important dans le bon fonctionnement des réseaux électriques HT. En outre, ils sont conçus pour que leur perforation soit impossible. Cette précaution permet aux isolateurs de continuer à assurer leur fonction de support mécanique même lorsque leur fonction d'isolation n'est plus remplie. Cela est très important dans la pratique.

I.1. Isolants

I.1.1. Définitions [1]

I.1.1.1. Isolant

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

I.1.1.2. Isolation

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

I.1.1.3. Diélectrique

Un diélectrique est défini comme un milieu matériel dans lequel les bandes de conduction et de valence sont séparées par une énergie supérieure à 5 eV. 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).

I.1.2. Différents types d'isolants

I.1.2.1. Isolant gazeux [1]

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

- rigidité diélectrique variable suivant la nature de gaz;

- permittivité faible, les gaz sont auto-régénérateurs;
- phénomène d'ionisation des gaz;
- légers et inflammables.

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

I.1.2.2. Isolants liquides [1]

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

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

I.1.2.3. Isolants solides [2]

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

- les isolants d'origine minérale sont des substances siliceuses et calcaire, solides à la température ordinaire, incombustibles et supportant des températures élevées, à l'exception des dérivés hydrocarbures (verre, 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 (caoutchouc,...).

I.2. Isolateurs [8]

On appelle isolateur tout système d'isolation constitué par des matériaux isolants ou un assemblage de ceux-ci, en liaison avec les parties conductrices associées. Son rôle principal est d'amarrer les conducteurs et à les isoler des supports. On les emploie sous forme de

cloches simples et de chaînes d'isolateurs. Les isolateurs se font en porcelaine, verre ou silicone.

I.2.1. caractéristiques des isolateurs [6-7]

I.2.1.1. Tension d'essai

C'est la valeur efficace de la tension appliquée à l'isolateur en permanence pendant toute la durée de l'essai.

I.2.1.2. Tension de contournement

La tension de contournement est le niveau de tension le plus bas à partir du quel tous les arcs joignent les deux électrodes.

I.2.1.3. Courant de fuite

Le courant de fuite est un courant de faible amplitude à travers la couche polluante le long de la surface de l'isolateur. Son intensité devient considérable lorsque cette couche est humidifiée. En effet, dans les conditions de forte humidité, la dissolution des sels contenus dans la couche polluante provoque la formation d'une couche électrolytique.

I.2.1.4. Courant de fuite critique

C'est le courant minimal nécessaire pour provoquer un contournement, sa valeur est obtenue dans la dernière demi-période avant le contournement.

I.2.1.5. Ligne de fuite spécifique (I_s) d'un isolateur

Plus courte distance ou somme des plus courtes distances suivant les contours des surfaces extérieures des parties isolantes entre les parties qui sont normalement soumises à la tension de service, généralement exprimées en mm/kV.

I.2.1.6. Facteur de forme d'un isolateur(F)

Le facteur de forme est déterminé par les dimensions de l'isolateur. Pour l'estimation graphique du facteur de forme, on trace la courbe de l'inverse de la circonférence ($\frac{1}{p}$) en fonction de la longueur de la ligne de fuite partielle.

Le facteur de forme est donné par l'aire située sous la courbe et calculé suivant la formule :

$$F = \int_0^L \frac{dl}{P(l)}$$

Avec :

L : Longueur partielle de l'isolateur(m) ;

P(l) : Périmètre de l'isolateur en fonction de la longueur de fuite partielle l(m).

I.3. Matériaux isolants utilisés pour la fabrication des isolateurs [3]

On trouve plusieurs isolants solides qui peuvent être utilisés pour la fabrication des isolateurs de haute tension comme le verre, la céramique et la porcelaine. Mais durant ces dernières années, la porcelaine est de plus en plus abandonnée à cause de deux inconvénients principaux qui sont : le poids lourd des isolateurs et la difficulté de détection des amorçages. Ces dernières années on s'intéresse de plus en plus à l'utilisation des isolateurs en matériaux polymères.

I.3.1. Céramique

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

I.3.2. Verre

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

I.3.3. Matériaux synthétiques

Les isolateurs en matériaux synthétiques sont composés d'un centre en fibres de verre imprégnées d'une résine et d'un revêtement à ailettes de type élastomère. Leur avantage est qu'ils sont légers et présentent une grande résistance mécanique. Ils ont de bonnes propriétés hydrophobes et peuvent être utilisés dans des conditions de pollution très sévères. L'inconvénient de ces isolateurs est le vieillissement sous l'effet des différentes contraintes auxquelles ils sont soumis (électriques, mécaniques, atmosphériques...).

I.4. Différents types d'isolateurs

L'utilisation des diélectriques solides est très répandue dans les lignes aériennes et les postes. On les rencontre sous différentes formes: isolateur support, de traversée et de ligne.

I.4.1. Isolateurs supports [9]

On appelle isolateurs supports, des pièces isolantes destinées à supporter, en isolant des éléments conducteurs des traversés (**fig.1**). Ils sont utilisés par exemple comme supports de jeux de barres dans les postes de transformation.



Fig. I.1.: Photo isolateur support

I.4.2. Isolateurs de traversées [9] :

Les isolateurs de traversées sont des pièces isolantes établies pour permettre le passage d'un conducteur sous tension à travers un obstacle plus au moins conducteur (mur, paroi...) ; on les trouve aussi aux bornes des transformateurs.

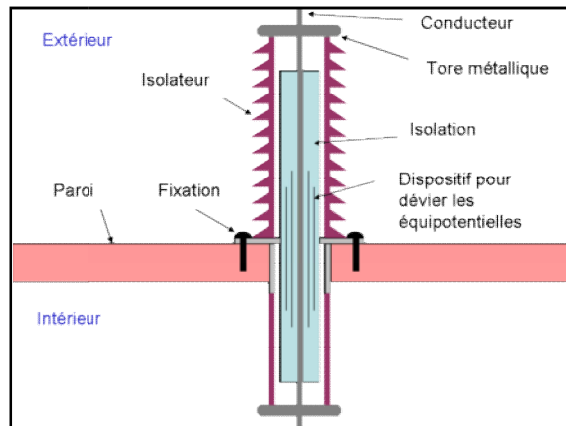


Fig. I.2. Photo isolateur de traversée

I.4.3. Isolateurs de lignes aériennes

Les conducteurs des lignes aériennes sont fixés aux supports par l'intermédiaire d'isolateurs. Ils sont en porcelaine ou en verre. Les isolateurs doivent présenter deux qualités, l'une est d'ordre électrique et l'autre est d'ordre mécanique, car ils doivent posséder une rigidité diélectrique suffisante pour tenir la tension de service d'un côté et de l'autre côté ils doivent y avoir des propriétés mécaniques pour résister aux sollicitations exercées sur eux. En pratique, on distingue deux types d'isolateurs de lignes aériennes.

I.5. Propriétés diélectriques des isolants [7]

On peut subdiviser les caractéristiques électriques des matériaux isolants en deux grandes familles:

- la première comprend les propriétés essentielles qui sont:
 - Rigidité diélectrique E ;
 - Permittivité relative ϵ_r ;

- Facteur de pertes diélectriques $\text{tg}\delta$;
 - Résistivité électrique ρ ;
 - décharge disruptive ou claquage U_C .
- la seconde famille réunit des caractéristiques plus directement liées à l'emploi de l'isolant dans une catégorie de matériels déterminée, donc en liaison étroite avec les diverses contraintes subies par le matériau au cours de son service (Température, fréquence, ...).

Dans certains cas ces dernières caractéristiques peuvent être les éléments déterminants du choix d'un isolant destiné à une certaine fonction.

I.5.1. Rigidité diélectrique

La rigidité diélectrique d'un matériau isolant est la valeur du champ électrique auquel il faut le soumettre pour qu'il en résulte une perforation qui le rende inapte à remplir ultérieurement sa fonction. De façon pratique, la rigidité diélectrique est définie comme étant le rapport entre la tension à la quelle se produit une perforation dans les conditions d'essai spécifiées et la distance entre les deux électrodes auxquelles est appliquée la tension.

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

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

I.5.2. Permittivité

Lorsqu'un diélectrique est soumis à l'action d'un champ électrique, 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 (**Fig.1**). Cette caractéristique des isolants solides et liquides porte le nom de la permittivité relative ϵ_r .

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

$$\varepsilon_r = C_x / C_0 \quad (\text{I.1})$$

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

$$\varepsilon_a = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \quad (\text{I.2})$$

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

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

$$\varepsilon_r^* = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r'' \quad (\text{I.3})$$

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

$$\varepsilon_a^* = \varepsilon_r^* \cdot \varepsilon_0 \quad (\text{I.4})$$

I.5.3. Angle de pertes et facteur de dissipation

Tout isolant soumis à un champ électrique alternatif est traversé par des courants de conduction et d'absorption qui donnent lieu à des pertes diélectriques. Le diélectrique réel peut être représenté par les schémas équivalents suivants.

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

$$\text{tg } \delta = I_a / I_r = U_a / U_r = P_a / P_r \quad (\text{I.5})$$

D'après la formule I.3 on peut écrire:

$$\text{tg } \delta = \varepsilon_r'' / \varepsilon_r' \quad (\text{I.6})$$

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

I.6. contraintes subits par l'isolateur

L'isolateur est loin d'être épargné des contraintes néfastes réparties en trois classes :

I.6.1. Contraintes mécaniques [11]

Du fait de leur conception, les chaines d'isolateurs sont articulées (avec un faible degré de liberté) à chaque isolateur, ce qui permet de les faire travailler exclusivement à la traction :

- charge permanente appliquée à la chaine (poids des conducteurs, des accessoires) ;
- surcharge exceptionnelle due au vent.
- les dimensions de chaque élément d'isolateur dépendent de la charge mécanique qui est supportée en service ; lorsque la charge augmente les dimensions augmentent aussi.

I.6.2. Contraintes électriques [12-13]

Ce type de contraintes est important, et elles se résument en :

- **Tension de service** : C'est la tension normale que supporte l'isolateur ;
- **Décharge disruptive** : phénomène associé à une défaillance de l'isolateur sous l'effet de la contrainte électrique, avec chute de tension et passage d'un courant entraînant une perte permanente de la rigidité diélectrique ;
- **Tension de contournement (à sec et sous pluies)** : C'est la plus faible tension produisant un amorçage entre conducteurs et la masse ;
- **Surtension accidentelles** : Elles sont de brève durée pouvant être à l'origine d'un orage ou d'un régime transitoire.

I.7. Choix d'isolateur [3]

Les isolateurs les mieux adaptés sont ceux qui retiennent le taux de dépôt polluants le moins élevé, c'est-à-dire ceux qui possèdent les meilleures propriétés d'auto nettoyage. L'apparition d'une nouvelle usine à proximité d'un poste, la construction d'un ouvrage routier voisin, ou un événement météorologique exceptionnel peuvent changer la sévérité de

pollution d'un site, ce qui peut provoquer des incident qui influent directement sur l'isolation, pour cela il faut prévoir une protection pour les installations existantes contre les nouvelles sources de pollution ; et le choix des isolateurs se fait en fonction :

- de la tension de service de la ligne ;
- des efforts mécaniques auxquels ils sont soumis ;
- du prix de revient (rigide ou suspendue) ;
- du degré de sévérité de la pollution du site d'utilisation.

Conclusion

Dans le matériel électrique destiné à fonctionner sous HT, MT, l'isolation des conducteurs, prend une grande importance d'où les matières isolantes pour chaque type d'isolateurs sont choisies en tenant compte de leurs propriétés physiques et des différentes contraintes supportées.

Les isolateurs en porcelaine ou en verre assurent les deux fonctions mécaniques et électriques, pratiquement ces isolateurs sont le siège des phénomènes de pollution qui les contamine en diminuant leurs caractéristiques. De ce point de vue, le choix des isolateurs se fait donc essentiellement à partir de la tension de service de la ligne; en fonction des efforts mécaniques auxquels ils sont soumis (poids des conducteurs, action du vent, tension mécanique des conducteurs éventuellement); et enfin en fonction du niveau de pollution (profil de l'isolateur, ligne de fuite et pas).

*ETUDE DU COMPORTEMENT
D'UN ISOLATEUR SILICONE DANS UN
ENVIRENEMENT DESERTIQUE*

CHAPITRE II

POLLUTION ET METHODES DE MESURE DE LA SEVERITE DE POLLUTION



Introduction

Les lignes aériennes et les postes de réseaux de transport d'énergie électrique dans les régions désertiques sont confrontée à différents incidents dus, dans la majorité des cas, au dépôt de la pollution suite à une interaction entre le vent, le sable et les poussières diverses ; une couche de pollution se dépose sur la surface de l'isolateur. Cette couche de pollution, humidifié suite aux condensations matinales, donne naissance à un courant de fuite circulant à travers la surface de l'isolateur. Le passage de ce courant provoque des assèchements locaux sur cette surface ; des arcs électriques prennent naissance et peuvent se développer le long de la surface isolante jusqu'au contournement de l'isolateur et la mise hors service de l'ouvrage. Par conséquent différentes méthodes sont disponibles pour mesurer la sévérité de pollution.

II.1. Origine de la pollution

Les sources de pollution peuvent être d'origine naturelle ou anthropogénique. En effet, dans le cas des lignes aériennes et des postes installés au bord de mer, les embruns portés par le vent déposent sur les isolateurs une couche de sel. Lorsque cette couche est humidifiée par un brouillard, elle devient conductrice. De plus, au voisinage des usines polluantes, par exemple les usines métallurgiques ou chimiques, les isolateurs se recouvrent de particules solides infimes, faiblement conductrices mais hygroscopiques. Dans des conditions de forte humidité, à savoir le brouillard ou la pluie, la dissolution des sels contenus dans ces particules provoque la formation d'un électrolyte. Ces deux concepts constituent les deux cas typiques de pollution où la contamination des surfaces isolantes est poussée à l'extrême. Il serait pourtant erroné de penser que les régions éloignées de la mer ou des centres industriels sont exemptées de pollution. La pollution domestique produite par les appareils de chauffage des habitations, les véhicules et la pollution agricole sont aussi omniprésents dans notre environnement.

II-2. Sources de pollution [13]

Du fait de la variété des origines de la pollution, la nature de celle-ci peut être classée en trois catégories, à savoir la pollution naturelle, industrielle et la pollution mixte.

II.2.1. Pollution naturelle

La pollution naturelle provient:

- Des sels marins dans les régions côtières.
- Des poussières du sol (notamment lors de chantiers importants ou des régions agricoles).
- Des sables véhiculés par le vent en régions désertiques.

II.2.1.1. Pollution marine

Les installations situées en bord de mer sont exposées aux embruns portés par le vent et qui se déposent progressivement sur les isolateurs, formant une couche de sel qui devient conductrice lorsqu'elle est humidifiée par le brouillard ou simplement par condensation. Un courant de fuite s'établit alors à travers la couche superficielle et des arcs électriques peuvent prendre naissance. Dans certaines conditions, ils se développent jusqu'à provoquer le contournement total de l'isolateur.

II.2.1.2. Pollution désertique

Parmi les phénomènes qui caractérisent la nature désertique, figure le vent de sable. Celui-ci induit des dépôts de sable sur les surfaces des isolateurs. De la même façon que précédemment, lorsque ces dépôts sont humidifiés, les couches de sable deviennent plus au moins conductrices à cause de l'existence de sels dans le sable. Après, nous assistons aux mêmes phénomènes constatés dans le cas précédant.

II.2.2. Pollution industrielle

Le problème de la pollution industrielle concerne les lignes qui passent près des zones industrielles (les fumées dégagées par des usines, raffineries, cimenteries, minerais etc.), près des grandes villes (les gaz d'échappement des véhicules) ou près des terrains agricoles (les engrais utilisés en agriculture).

II.2.3. Pollution mixte

Ce type de pollution est le plus dangereux ; c'est la résultante de l'existence de différents types de pollution dans la même zone, comme dans le cas des zones industrielles se trouvant en régions côtières.

II.3. Pollution des isolateurs

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 trouvent les isolateurs ainsi que la surface inférieure ou supérieure de l'isolateur.

II.4. Influences des conditions climatiques sur la distribution de la pollution [14]

- **Humidité :** L'humidification de l'air fait accroître la conductivité des dépôts polluants, ce qui entraîne la diminution de la tenue des isolateurs pollués.
- **Température :** Les hautes températures provoquent l'assèchement des dépôts polluants et entraînent l'augmentation de leur résistivité et par conséquent l'élévation de la tenue des isolateurs pollués. 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.
- **Vent :** Il est évident que le vent constitue l'agent qui assure le transport des poussières et des sels 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.
- **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.

II.5. Impact de la pollution [15 -16]

Les couches polluantes qui s'accumulent à la surface des isolateurs engendrent une conductivité électrique superficielle. Celle-ci modifie la répartition du potentiel le long de la ligne de fuite. La tension de rupture diélectrique de l'air peut être atteinte entre deux points de la surface isolante entraînant l'amorçage d'un arc électrique qui court-circuite une partie de la ligne de fuite.

II.5.1. Arc non localisé

L'arc électrique s'éteint rapidement puis, se réamorce à un autre endroit et ainsi de suite. Il y a apparition de courants de fuites entraînant une petite perte d'énergie, généralement supportable par le réseau de distribution.

II.5.2. Arc fixe

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

II.5.3 Contournement des isolateurs pollués [1]

Généralement, les principaux phénomènes conduisant au contournement d'un isolateur pollué, soumis à la tension de service, comprenant la formation d'une couche électrolytique conductrice par humidification du dépôt de pollution sur la surface de l'isolateur, ce qui entraîne l'apparition d'un courant de fuite accompagné de la formation d'une bande sèche et d'arcs partiels, et la propagation de l'arc qui peut couvrir tout l'isolateur. Le contournement des isolateurs sous pollution peut être décomposé en quatre étapes distinctes.

➤ Etape 1 : dépôt de pollution

Des grains de pollution se déposent sur la surface de l'isolateur (**Fig. II.1**).

➤ Etape 2 : Formation d'un électrolyte conducteur

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

transforme en électrolyte conducteur et donne naissance à un courant de fuite superficiel I_f circulant sur la surface de l'isolateur (**Fig. II.2**).

➤ **Etape 3 : formation d'une bande sèche**

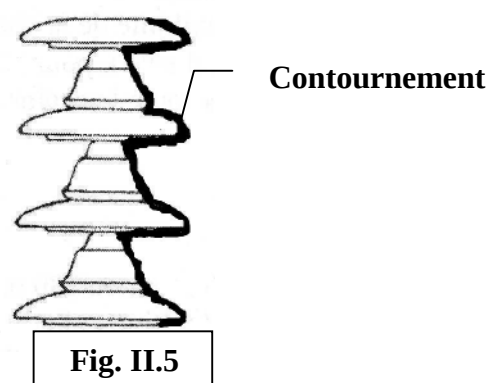
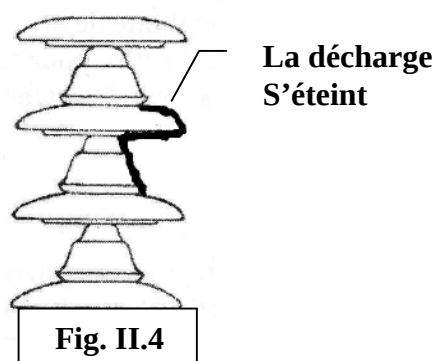
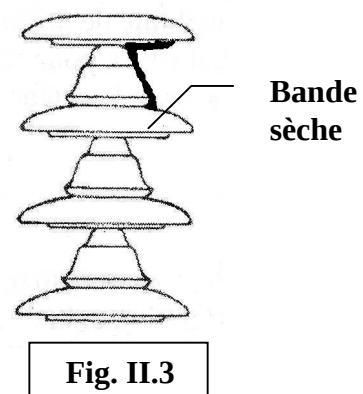
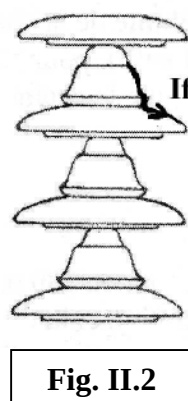
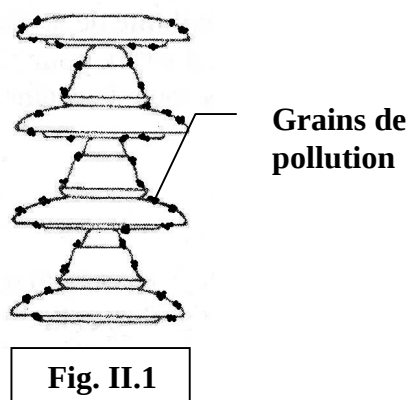
Dans les régions étroites de l'isolateur, où la densité de courant est élevée, une partie de l'électrolyte s'évapore et crée une bande sèche (**Fig. II.3**).

➤ **Etape 4 : contournement**

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

- Soit la décharge s'éteint $\Rightarrow$ pas de contournement (**Fig. II.4**).

Soit la décharge progresse sur la surface $\Rightarrow$ contournement de l'isolateur (**Fig. II.5**).



II.5.4. Corrosion des isolateurs

Le phénomène de corrosion ne peut être créé que si la surface des isolateurs est recouverte d'un dépôt conducteur de pollution humide, Cette corrosion est plus importante en courant continu qu'en courant alternatif pour un même site du fait que le courant est unidirectionnel et des phénomène électrostatique qui entraînent la formation du dépôt de pollution plus importante. Ce dernier infecte directement :

- La résistance mécanique de l'isolateur ; cela s'applique particulièrement aux isolateurs du type capot tige lorsque la section de la partie corrodée devient réduite (exemple : réduction du diamètre de la tige).

- La tenue électrique du fait de la formation d'un dépôt de rouille sur la surface isolante. En outre, ce dépôt peut entraîner des dommages à la partie isolante du fait d'une concentration du champ électrique autour de cette nouvelle électrode.

II.6. Méthodes de mesure de la sévérité de pollution

Une évolution de la sévérité d'un site devrait fournir toutes les informations nécessaires au calcul de la probabilité de contournement sous pollution d'un isolateur et même le dimensionnement. On cet effet on propose d'étaler les différentes méthodes de mesure et les dispositifs nécessaires qui sont récapitulé dans le Tableau II.1.

Méthode de mesure	Dispositif de mesure
Conductivité électrique de la pollution	Conductimètre à sonde mobile
Densité du dépôt de sel équivalent(DDSE)	Formule empirique
Conductance superficielle	Formule empirique
Contage des impulsions de courant de fuite	Méthode de connexion d'un compteur d'impulsion à 1 isolateur de ligne
Courant de fuite le plus élevé	Circuit de mesure

Tableau II.1 : Méthodes de mesure et leurs dispositifs

II.6.1. Dispositif de mesure de la conductivité superficielle à l'aide d'une sonde mobile

II.6.1.1. Description du dispositif et procédé de mesure [16 -17]

La méthode est basée sur la mesure de la conductivité d'un dépôt polluant à l'aide d'un conductimètre à sonde mobile (**fig. II-1**).



Fig. II.6 Photo d'un conductimètre à sonde mobile

La sonde est composée essentiellement :

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

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 (II.7.a) et (II.7.b).

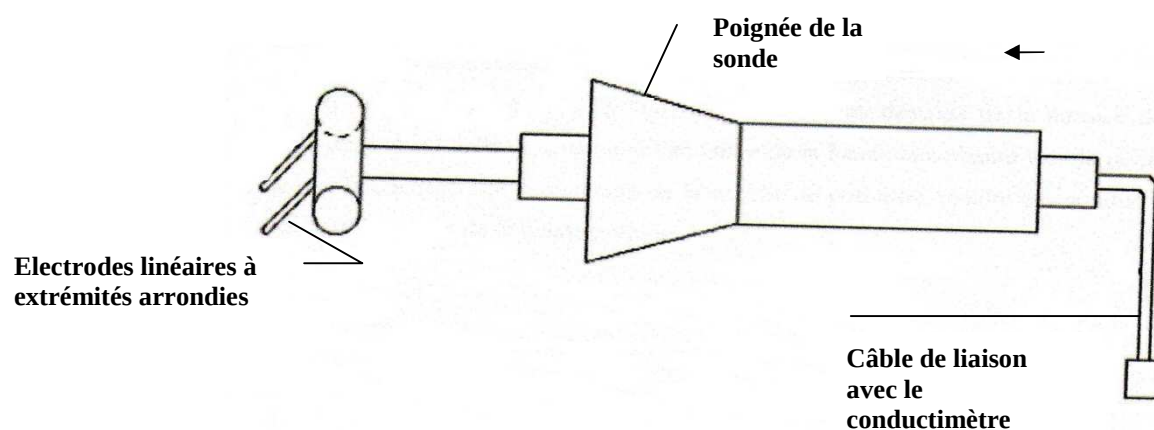


Fig. II.7.a Sonde à électrode linéaire

Dans le cas de la sonde à électrodes linéaires (**Fig. II.7.a**), 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 de l'isolateur pollué. Après humidification de la surface contaminée, des mesures peuvent être effectuées sur différents points de la surface de l'isolateur.

Dans le cas de la sonde à électrodes planes (**Fig. II7.b**), avant d'effectuer les mesures sur une surface polluée d'un isolateur, il faut :

- Fixer une bande sèche absorbante (papier PH), de dimensions (10mm × 10mm), sur la tête de la sonde ;
- Avant chaque essai la bande absorbante doit être trempée dans l'eau distillée dont la conductivité volumique doit être inférieure ou égale à 10 μ S/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 absorbée par le papier ;
- Vérifier que la conductivité superficielle propre de la bande absorbante σ_p ne dépasse pas 2 μ S.
- Poser légèrement la tête de la sonde sur un endroit choisi au préalable, sur la couche de pollution de l'isolateur étudié, de telle sorte que la surface de la bande soit en bon contact avec la surface équivalente correspondante de l'isolateur pollué ;
- S'assurer que l'eau absorbée par la bande ne se propage pas au-delà de la surface de contact de l'isolateur. 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 humidifiée et de la bande polluée.

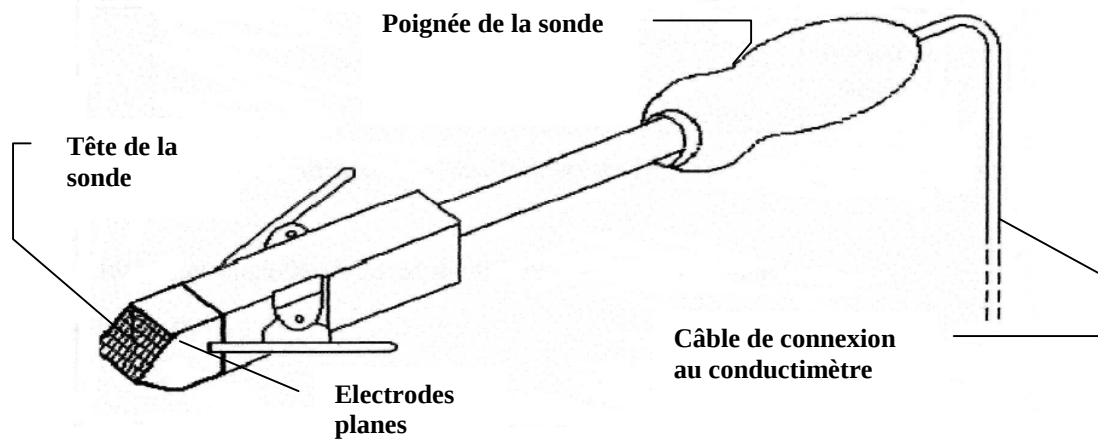


Fig. II.7.b Sonde à électrode planes avec papier absorbant

La conductivité d'un dépôt polluant est donnée par la formule suivante :

$$\sigma_m = \sigma_i (f_s / f_a \frac{f_s}{f_a}) \quad (\text{II-1})$$

Avec :

σ_m : La conductivité mesurée (μS) ;

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

f_s : Le facteur de forme de la sonde utilisée (**tableau II-3**). (Pour une sonde à électrodes planes, le facteur de forme est égal à 1).

f_a : Le facteur de forme de l'appareil (donné généralement par le constructeur).

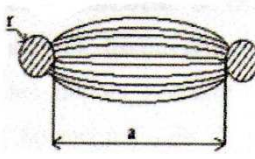
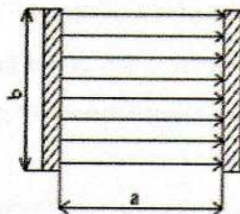
Nature de la sonde	Procédé d'humidification	Configuration D'électrodes	Facteur de forme
Sonde à électrode linéaire	Humidification de la couche de pollution à l'aide d'un pulvérisateur à eau distillée		$f_s = \ln \frac{a}{3.14r}$ ($a \gg r$)
Sonde à électrodes planes	Pose d'une bande à papier absorbant humidifiée sur la couche de pollution		$f_s = \frac{a}{b}$ (Champ négligeable au voisinage des électrodes)

Tableau II.2 : Tableau récapitulatif des facteurs de forme pour chaque type de sonde et du procédés d'humidification de la couche de pollution

La conductivité superficielle réelle est donnée par la relation suivante :

$$\sigma_r = \sigma_m - \sigma_p \quad (\text{II-2})$$

Avec :

σ_m : La conductivité mesurée (μS), donnée par la formule (II-1)

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

La conductivité d'un dépôt polluant dépend de la température. La température de ce dépôt peut-être lue directement sur l'appareil de mesure considéré. La conductivité correspondante à 20°C ($\sigma_{r20^\circ\text{C}}$) est déduite de la formule suivante :

$$\sigma_{r20^\circ\text{C}} = (\sigma_{rT}/\alpha) \quad (\text{II-3})$$

Avec :

σ_{rT} : Conductivité de la couche de pollution à la température T (μS) ;

α : Facteur de correction donné par le tableau II-4 :

Température T ($^\circ\text{C}$)	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 II.3 Facteur de correction en fonction de la température

II.6.2. Densité du dépôt de sel équivalent (DDSE) [18-19]

Il s'agit du dépôt de sel de NaCl en mg/cm^2 de la surface d'un isolateur 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 à la surface des isolateurs sélectionnée. 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 dissous 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 $^\circ\text{C}$.

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

$$\theta_{20} = \sigma_\theta [1 - b(\theta - 20)] \quad (\text{II-4})$$

Avec :

θ : Température de la suspension en $^\circ\text{C}$;

σ_θ : Conductivité volumique à la température de θ $^\circ\text{C}$ en (S/m) ;

σ_{20} : Conductivité volumique à la température de 20 $^\circ\text{C}$ en (S/m) ;

b: le facteur dépendant de la température θ $^\circ\text{C}$, qui est donnée par la relation suivante :

$$b = -3,2 \cdot 10^{-8} \theta^3 + 1,032 \cdot 10^{-5} \theta^2 - 8,272 \cdot 10^{-4} \theta + 3,544 \cdot 10^{-2} \quad (\text{II-5})$$

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

$$\text{Sa} = (5,7 \cdot \sigma_{20})^{1,03} \quad (\text{II-6})$$

Avec :

Sa : en kg/m^3 et σ_{20} en S/m.

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

$$\text{DDSE} = \text{Sa} \cdot \frac{V}{S} \quad (\text{II-7})$$

Avec :

V : volume de la suspension en m^3 ;

S : surface nettoyée en m^2 ;

DDSE en kg/m^2 ;

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 isolateurs ou 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 plus rapidement, il sera nécessaire de raccourcir l'intervalle entre prélèvements, pour obtenir un résultat plus sûr, les prélèvements sont habituellement effectués sur plusieurs isolateurs ou collecteurs.

La DDSE ne dépend pas seulement de la forme de l'isolateur mais aussi de la position dans laquelle il est installé, c'est-à-dire l'angle qu'il 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.

II.6.3. Conductance superficielle [20-21]

Elle est définie comme le rapport du courant à fréquence industrielle qui traverse l'isolateur à la tension appliquée. La conductance superficielle d'un isolateur est un paramètre qui caractérise l'état global de la surface isolante (niveau de pollution et degré d'humidification de la couche) lequel détermine la performance de l'isolateur.

Ainsi la méthode de la conductance superficielle est satisfaisante pour mesurer et évaluer la sévérité de pollution d'un site.

La conductance superficielle G est obtenue en appliquant pendant 2 à 5 périodes une tension, alternative (50Hz) donnée V , en mesurant le courant de fuite maximum I traversant la couche de pollution. La conductance est donnée par la formule **(II-8)** :

$$G = \frac{I}{V} \quad \text{(II.8)}$$

Avec :

I : le courant en (A)

V : la tension en (V)

G : la conductance en (S)

La conductivité superficielle σ des isolateurs est obtenues en multipliant la conductance superficielle G par la le facteur de forme f, définie par la formule (II-9) :

$$\sigma = f.G \quad (II-9)$$

Avec :

f : le facteur de forme.

Si la couche n'est pas homogène, la conductivité superficielle locale peut être obtenue en mesurant la conductance d'une partie de la surface isolante en utilisant des électrodes auxiliaires intermédiaires. Les tensions élevées peuvent être à l'origine de la distorsion du courant de fuite, car elles créent des zones sèches sur la surface de l'isolateur. Ceci peut être évité en limitant le temps d'application de la tension.

L'expérience a montre que la tension ne doit pas être appliquée pendant plus de deux à cinq périodes et le courant pendant le régime transitoire n'est pas pris en considération.

Lors de la méthode d'essai artificielle, il est préférable d'utiliser des isolateurs de différentes formes pour contrôler la validité de cette méthode, qui n'est valable que si tous les isolateurs donnent des valeurs voisines de la sévérité, même si la conductance ou la conductivité superficielle sont différentes.

Les enregistrements à long terme de la conductance superficielle, peuvent être utilisés pour obtenir des distributions statistiques de la sévérité équivalentes associées aux courbes donnant la probabilité de contournement de l'isolateur donné sur le site considéré. Le dépôt sur les isolateurs peut être l'égerment différent de ce qu'il est à sa surface non contrains. Cependant, cette différence est probablement faible et peut être estimée en faisant des comparaisons au laboratoire sur des isolateurs non contraints de façon analogue.

L'utilisation d'une tension d'essai inférieure à la tension de service est avantageuse puisqu'elle réduit le risque de contournement superficiel dans la gamme des valeurs critiques, qui sont d'un intérêt fondamental pour l'évaluation du risque de défaillance. De plus, l'utilisation de faibles tensions permet d'utiliser des transformateurs moins chers et d'automatiser les équipements de mesures puisque le risque d'amorçage est faible.

II.6.4. Comptage des impulsions de courant de fuite [22]

Cette méthode consiste à enregistrer pendant une période donnée le nombre d'impulsion du courant de fuite, dépassant une certaine amplitude pour un isolateur soumis à la tension de service.

L'existence d'impulsion de courant de fuite précède l'étape finale du processus de contournement sous pollution et leurs amplitudes et fréquences augmentent en s'approchant de cette dernière. Les premiers compteurs étaient des compteurs téléphoniques, électromagnétiques, règles mécaniquement pour ne fonctionner que lorsque leurs bobines étaient traversées par un courant supérieur à une valeur donnée, les enroulements étaient directement en série avec l'isolateur en essai (**figure II.3**).

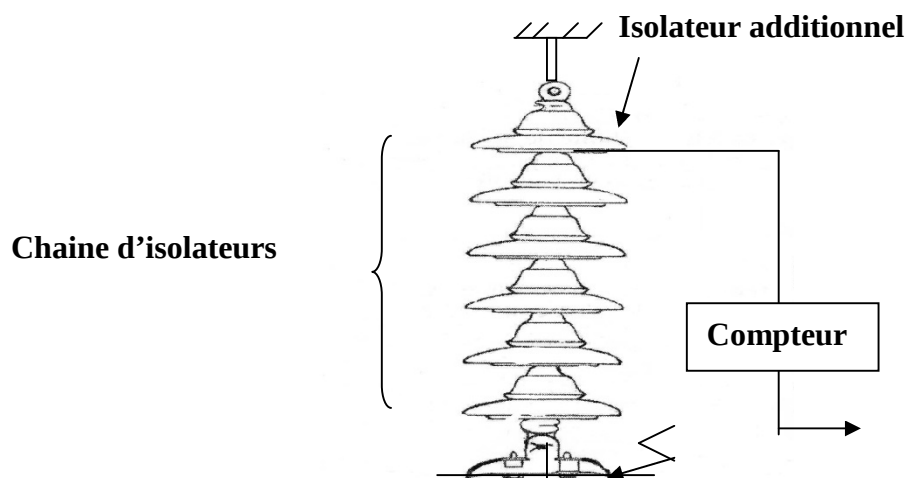


Fig. II.8 Méthode de connexion d'un compteur d'impulsion à un isolateur de ligne

Les compteurs sont généralement réglés pour fonctionner à des niveaux de courant de crête de 20, 50, 100, et 250 ma.

Le nombre d'impulsions enregistrées avant un contournement pour différents isolateurs dans les mêmes conditions de pollution peut varier considérablement. Le comptage d'impulsion ne peut donc fournir une mesure absolue de la performance des isolateurs, l'utilisation du comptage d'impulsions pour évaluer la sévérité des sites dépend de la comparaison du comptage sur le site avec les données accumulées sur les performances d'isolateurs similaires. La méthode se prête mieux à la détermination des longueurs d'isolateurs dans la cadre de l'extension ou le ré isolement de réseau existant ainsi qu'à la mise en évidence du besoin de lavage ou de graissage des isolateurs.

Les avantages de la méthode résident dans un cout faible et une aptitude aux contrôles continus d'un grand nombre d'isolateurs dans les conditions de service normal.

L'utilisation de compteurs d'impulsion nécessite l'accès à une ligne ou à un poste existant ou une installation d'essai spécial dans la région étudiée. Les données sont relatives

et doivent donc être utilisées par comparaison avec des données similaires collectées ailleurs par essai sur site pendant une longue période.

II.6.5. Contrainte de contournement [23]

La contrainte de contournement d'un isolateur est la tension de contournement à fréquence industrielle divisée par la longueur totale de l'isolateur. Pendant une période donnée, on détermine soit la contrainte de contournement soit la relation entre contrainte de contournement et la fréquence de contournement. Ceci concerne toutes les étapes du processus de contournement.

La mesure de cette contrainte donne toutes les informations nécessaires au calcul de la longueur des isolateurs pour une meilleure fiabilité. Sur site on peut la mesurer à l'aide de l'une des variantes suivantes :

- On dispose d'isolateurs de différentes longueurs soumis à la tension constante qui est interrompue généralement et rétablie par un disjoncteur à fermeture automatique. Donc l'isolateur le plus court contourne. Il sera mis soit hors circuit au moyen d'un fusible pour l'isoler complètement soit augmenter sa longueur (cela conduit à définir la longueur minimale tenant la contrainte). Ce processus doit être renouvelée afin d'obtenir des résultats statistiquement utilisables.
- La deuxième variante donne plus d'informations sur les isolateur, elle consiste à placer sur chaque chaîne d'isolateur des fusibles permettent d'allonger sa longueur effective jusqu'à ce que le niveau tenant la contrainte soit atteint.
- Plusieurs isolateurs sont dotés de fusibles et soumis à une tension constante. Lorsque les conditions atmosphériques sont telles que le contournement a lieu, la tension à réappliquer sera diminuée afin d'examiner la possibilité de contournement. On doit disposer d'une source de tension très élevée afin de provoquer le contournement d'un assez grand nombre d'isolateurs élémentaires. L'impédance de la source doit être assez faible pour ne pas modifier la contrainte de contournement. La variante nécessite une régulation automatique de la tension.

II.6.6. Mesure optique [24]

Le but de cette méthode consiste à évaluer l'épaisseur de la couche de pollution déposée à la surface d'un isolateur. Un dispositif de prédiction par sonde laser effectuer les mesures en

se basant sur une technique elliptométrique. Un rayon à polarisation rectiligne traverse un analyseur et aboutit à une photo détecteur. Une analyse avancée des caractéristiques du rayon réfléchi (amplitude, déphasage,) permet de calculer la constante diélectrique et l'épaisseur de la couche de pollution. La mesure de la sévérité de la pollution peut ainsi se faire sans toucher à cette couche.

II.6.7. Densité de dépôt non soluble(DDNS) [25]

La densité de dépôt non soluble correspond à la quantité de produits polluants non solubles présents dans une couche de pollution. La détermination de la DDNS (**fig. II.4**) s'effectue comme suit, la solution obtenue par la méthode de la DDSE est filtrée à l'aide d'un papier filtre, le dépôt non soluble restant après filtrage est séché puis pesé. La DDNS peut être calculée par la formule (II-10) :

$$DDNS = \frac{1000(m_f - m_i)}{A} \quad (II-10)$$

Avec :

DDNS : la densité de dépôt non soluble en mg/cm^2 ;

m_f : La masse du papier filtre contenant la pollution après séchage en g ;

m_i : La masse initiale du papier filtre en g ;

A : la surface lavée de l'isolateur en cm^2 .

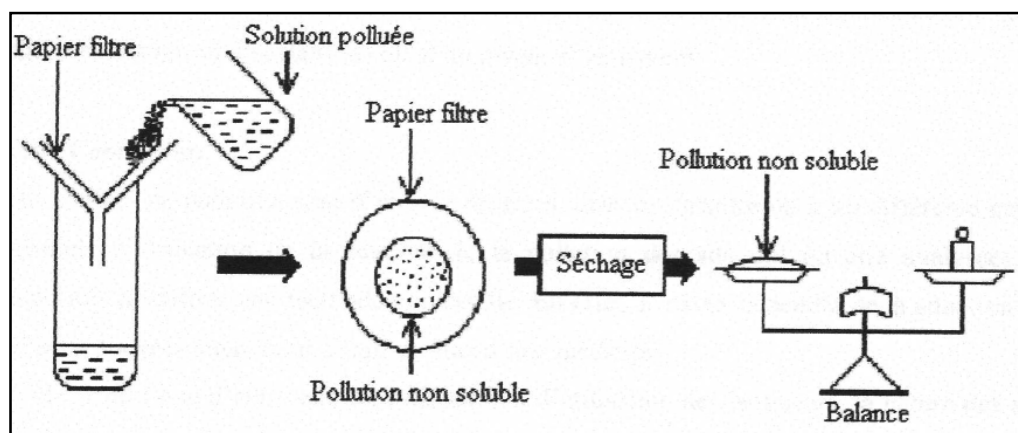


Fig. II.9 Schéma et procédé de mesure de la DDNS

II.6.8. Autres méthodes de mesure [25]

Bien que l'on ait tenté de décrire les méthodes les plus utilisées, il existe d'autres méthodes qui ont été écartées telle que :

-L'analyse d'échantillons d'air pour la recherche du sel, des solides et du SO_2 ; les mesures météorologiques, comme quantité de pluie, humidité, brouillard, vitesse et direction du vent peuvent être utilisées pour évaluer la sévérité des sites ;

-L'utilisation de jauges de dépôt de types météorologiques ou directionnels ; il existe des dispositifs de surveillance se basant sur d'autres paramètres en particulier sur les mesures de pollution atmosphérique.

En Pologne, un mesurage régulier de la conductivité d'échantillon d'eau distillée placés dans des jauges est effectué. Les résultats des mesures sont exprimés en augmentation quotidienne de la conductivité et servent de références pour l'exposition continue et prolongée (habituellement une année).

Un autre système consiste à insuffler des bulles d'air en continu dans une solution absorbante, à évaluer les modifications immédiates de conductivité, puis à exprimer la quantité de pollution soluble en équivalent de NaCl.

Un interféromètre à laser vient également d'être présenté, il est utilisé pour mesurer avec précision la température des surfaces d'isolateurs pollués. Le passage du courant de fuite dans la couche de pollution induit une longueur de chemin différente.

On visualise la couche, les enregistrements permettent de localiser avec précision une zone sèche et la température maximale qu'atteint un isolateur pollué juste avant de contourner.

II.8. Choix d'une méthode de mesure de sévérité de pollution d'un site [26]

Parmi les méthodes d'évaluation de la sévérité de pollution déjà mentionnées, il est impossible de définir une méthode universelle. Les trois méthodes les plus utilisées dans le monde sont : la mesure de la DDSE, le courant de fuite, et la conductance superficielle, car elle ne nécessite pas d'installations complexes et coûteuses, puis elles donnent des résultats satisfaisants.

Avec la mise sur la marche de la sonde mobile, son utilisation deviendra générale car elle offre d'autres avantages, elle est alimentée par des batteries et elle est portable, donc les mesures peuvent être effectuées sur des isolateurs réels et en service.

Dans tout les cas, le choix d'une méthode dépend essentiellement des paramètres suivant :

- équipement de mesure (couts des appareils et de la réalisation des mesures, disponibilité de mesure électriques, fiabilité statistique et fiabilité d'applications des données fournies)
- Réseau de transport (étendues, situation géographique, gamme de sources polluantes, degrés de fiabilités demandés)
- Le choix de la techniques de mesure dépend aussi de la manière dont les mesures de sévérités de pollution sont introduites dans le calcul du niveau d'isolement.

Conclusion

Le choix d'une méthode d'évaluation est conditionné par le lieu d'utilisation de l'isolation, la nature des sources polluantes locales, le degré d'industrialisation et l'importance du réseau déjà existant dans la région concernée.

Toutes les méthodes décrites présentent des problèmes communs, le plus important est probablement le temps. En premier lieu, il faut considérer le temps nécessaire à la formation d'une couche superficielle. Certains dépôts, comme le sable, se forment en quelques heures et s'éliminent rapidement. D'autres comme la poussière de ciment, ne peuvent se former qu'en plusieurs mois; les enquêtes doivent généralement durer plusieurs années afin de recueillir des informations en quantités suffisantes pour obtenir une estimation statistique valable de la sévérité.

Pour éliminer les problèmes rencontrés dans ces méthodes, on a recours aux techniques artificielles, par simulation de la pollution naturelle au laboratoire.

*ETUDE DU COMPORTEMENT
D'UN ISOLATEUR SILICONE DANS UN
ENVIRENEMENT DESERTIQUE*

CHAPITRE III

**SIMULATION ET LUTTE CONTRE LA
POLLUTION**

Introduction

L'accumulation de la pollution sur les isolateurs est graduelle ce qui rend l'étude des isolatrices hautes et moyennes tensions sur site impossible. Pour contourner ce problème des méthodes de simulation des conditions naturelles au laboratoire ont vu le jour, et chacune d'elle est adaptée à un certain matériau ou environnement.

III.1. Simulation de la pollution au laboratoire [10-29-30]**III.1.1. Méthodes de simulation****III.1.1.1. Brouillard salin**

Cette méthode utilise une couche de pollution contenant du chlorure de sodium NaCl et de l'eau du robinet. L'isolateur est soumis à une tension d'essai maintenue constante dès le début avec une durée de 60 minutes. L'isolateur d'essai est placé dans un 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 ajustages, 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 déposer de l'eau salée de la même manière qu'un brouillard naturel humidifiant, mais cette technique ne représente pas les conditions naturelles, puisque à un instant donné, le vent ne vient que d'un seul côté, par contre le brouillard est projeté des deux côtés.

La méthode présente deux principaux avantages :

- elle ne nécessite pas un enrobage séparé ;
- les gros isolateurs, une fois installés, n'ont pas besoin d'être déplacés pour exécuter les essais et que l'opération de mélange du sel et la formation du brouillard est bien adaptée à l'automatisation.
- La validité de cette méthode a été vérifiée pour différents types d'isolateurs de ligne et de postes, pour des niveaux de tension allant de 130 à 400 kV, dont les résultats d'essai naturel et artificiel concordaient bien. Comme elle a été vérifiée pour des régions côtières et pour quelques sites de pollution industrielle situés à l'intérieur des terres.
- La salinité du brouillard définit la sévérité de l'essai.

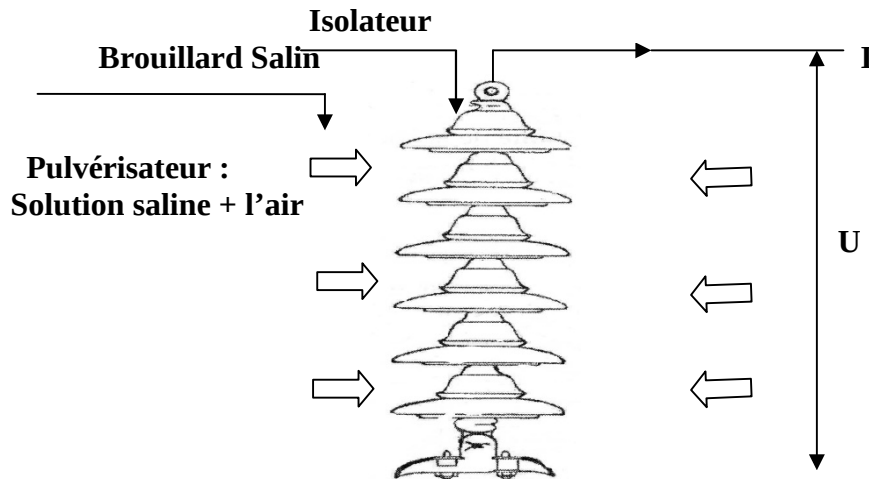


Fig. III.1 Essai en laboratoire sous brouillard salin artificiel

III.1.1.2 Brouillard équivalent [7-29]

La solution contient du sel dans une suspension de 40g de poudre Tonoko (60 à 70 % de SiO_2 , 10 à 20 % d' AlO_3 , 4 à 8 % de FeO_3 et du H_2O) par litre d'eau. Le dépôt est obtenu par pulvérisation, coulage ou trempage le brouillard équivalent est produit de la même façon que le brouillard salin, on remplace juste la solution salée par celle indiquée ci-dessus. La tension peut être maintenue constante pendant 3 à 5 minutes après le dépôt de la couche, 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 saline pendant les typhons, mais elle donne, pour les isolateurs long- fut, des tensions d'amorçage plus élevées que les conditions naturelles. La densité du dépôt de sel en mg/cm définit la sévérité de l'essai.

III.1.1.3 Brouillard vapeur [29]

La solution est obtenue à partir du sel dans une suspension d'un liant et d'eau. 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 aux conditions naturelles caractérisées 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/cm^2 .

III.1.1.4 Brouillard tenu [29]

La solution est produite à partir du sel dans une suspension de 40g de poudre Tonoko ou 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 cette méthode, produit des gouttelettes plus grandes que celles produites dans le cas des méthodes 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.

III.1.1.5 Méthycellulose ou méthode de pollution liquide [29]

La couche de pollution utilisée contient du sel dans une solution de 10g de méthycellulose et de 25g de craie fine par litre d'eau, préparé 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.

Les tensions d'amorçage sont influencées 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°C , avec de la glace fondante. Le paramètre de la sévérité est déterminé par la conductivité (σ) de la couche après stabilisation. La durée de l'essai est de 5 minutes.

III.1.1.6 Kieselguhr [7-31]

La solution est obtenue en utilisant du sel dans une suspension de 100 g de kieselguhr (70 à 80% de SiO_2 , 5 à 25% de AlO_3 , 0.5 à 6% de Fe_2O_3 , 7 à 14% de H_2O) et 100 g d'aérosol par litre d'eau. Le dépôt est formé par pulvérisation suivie de séchage. L'humidification se fait par de l'eau vaporisée en quantité suffisante, elle prend 15 à 20 minutes pour obtenir la conductivité maximale qui est entretenue pendant tout l'essai et la tension est maintenue constante dès que la conductivité maximale est atteinte.

La validité de cette méthode a été vérifiée pour les conditions de pollution industrielle caractérisée par des couches épaisses. Les essais effectués sur des isolateurs UHT, ont été réalisés avec succès en utilisant les techniques de cette méthode. Le degré de sévérité est défini par la conductivité maximale de la couche (μS). La durée de l'essai est de 15 minutes.

III.1.1.7 Contaminant humide [29]

La solution est obtenue à partir du sel dans une suspension de 20g de cab-o-sil (agent épaississant) et de 1g de photo-flo-600 (agent mouillant) par litre d'eau. Le dépôt est formé par coulage ou trempage. La tension appliquée est maintenue constante quelque minute après l'application de la couche. La durée de chaque essai est de 5 minutes. La conductivité maximale de la couche définit la sévérité.

III.1.2 Corrélation entre les méthodes de pollution naturelles et artificielle [10]

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

- La répartition de pollution est naturellement non uniforme sur les surfaces des isolateurs, 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 simuler de façon satisfaisante un brouillard naturel contrairement aux autres méthodes ;
- Quel 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 les méthodes de pollution artificielle et les conditions de pollution naturelle peut être établie.

III.1.3 Caractéristiques des méthodes [27]

A l'aide de toutes ces techniques d'essais il est possible de déterminer soit :

La sévérité maximale qu'un isolateur peut supporter sans contourner, sous une tension donnée.

La tension maximale qu'un isolateur peut tenir sans contourner, pour une sévérité donnée.

La tension (ou la sévérité) correspondante à une probabilité de 50% d'amorçage pour un niveau de sévérité donné (ou de tension donnée)

Bien que les valeurs de dispersion soient déterminées à partir de la variation de la tension d'amorçage à sévérité constante, ces valeurs peuvent dépendre de la sévérité choisie. Les données sur la répétitivité et la reproductibilité sont difficiles à obtenir, cela nécessite la coopération de plusieurs laboratoires et les résultats peuvent être influencés par des conditions fortuites telles que les dimensions des salles d'essais de laboratoire.

Pour la plus part des isolateurs, on a trouvé la relation, entre la tension d'amorçage V et la sévérité δ qui prend la forme suivante :

$$V = K\delta^P$$

Avec ;

V : tension d'amorçage en (kV)

δ : Sévérité

K : constante

P : valeur empirique, varie avec les méthodes d'essais et le type d'isolateur.

III.2 Lutte contre la pollution [10-21-28]

III.2.1 Technique de lutte contre la pollution

III.2.1.1 Allongement de la ligne de fuite

L'augmentation de la longueur de la ligne de fuite permet d'améliorer les performances d'un isolateur ; un dimensionnement aux nouvelles conditions de pollution peut être adopté en utilisant deux techniques :

- Changement du type d'isolateur (rallongement de la ligne de fuite), c'est une opération très coûteuse et souvent impossible à réaliser en poste.
- Utilisation de prolongateur de ligne de fuite en matériaux polymères, qui sont collés sur la surface des isolateurs existants.

Les études effectuées, montrent que le facteur prédominant pour la tenue sous pollution est la ligne de fuite L_f de l'isolateur.

En améliorant leur profil (ondulations plus profondes, jupes de diamètre plus grand), On peut allonger la de fuite .Il est illusoire de penser pouvoir augmenter indéfiniment la ligne de fuite car les ondulations deviendraient trop rapprochées et seraient court-circuitées par les arcs qui se forment lorsque la surface de l'isolateur se pollue.

III.2.1.2 Changement de forme des isolateurs (isolateurs plats)

Contrairement à la méthode précédente, cette méthode utilise des isolateurs plats qui permettent de diminuer la ligne de fuite. Ces isolateurs ont la propriété d'accumuler moins de pollution que les isolateurs traditionnels et s'auto-nettoient très bien sous l'effet du vent. Ils sont utilisés dans les régions sahariennes où la principale source d'humidification est la condensation.

III.2.1.3 Graissage périodique des isolateurs

Par mesure économique, puisque le remplacement des isolateurs est très coûteux, on a recours aux techniques de lavage et de graissage qui sont particulièrement réservées aux isolateurs de poste.

Le graissage est un moyen de dépannage devant la difficulté due à une pollution inattendue ou très exceptionnelle. Il ne doit en aucun cas être considéré comme un moyen

normal pour faire face à la pollution des isolateurs. Les graisses utilisées actuellement sont des composants silicones, qui ont la propriété d'absorber les poussières, en effet l'huile exsudé enrobe chaque grain de poussière, ce qui permet à la graisse de conserver ses propriétés initiales, à savoir une grande résistance superficielle, ceci tant que la saturation n'est pas atteinte d'une part, tant que la graisse n'a pas subi une importante altération par les rayons ultra violets auxquels elle est sensible.

La longévité du graissage dépend à la fois de l'environnement (pollution, conditions climatiques) et de la qualité intrinsèque du produit, elle est en générale comprise entre 1 à 4 ans. Pour juger l'opportunité de renouveler la graisse, une méthode de contrôle de la pollution de la graisse a été mise au point.

Le graissage est largement utilisée dans le monde, mais l'opération de nettoyage puis de graissage est long, couteuse et nécessite une interruption de service.

III.2.1.4 Revêtement silicones

Cette méthode consiste à appliquer par pulvérisation ou au pinceau un caoutchouc siliconé, qui se vulcanise à température ambiante à la surface des isolateurs. Comme pour la graisse, ce revêtement protège les isolateurs et améliore leur comportement sous pollution ; par contre la longévité est nettement supérieure à celle des graisses.

Dans certains postes de compagnies américaines, les revêtements ont été appliqués pendant plus de dix ans. Cette méthode est relativement ancienne, mais tend aujourd'hui à se développer, grâce à la mise sur le marché de produits plus performants.

III.2.1.5 Isolateurs composites

Les isolateurs composites sont apparus au début des années 70, ils sont constitués d'un noyau en fibre de verre imprégné d'une résine et d'un revêtement à ailettes de type élastomère. Ces isolateurs présentent l'avantage d'une grande légèreté alliée à une grande résistance mécanique que lui confère le noyau. Ils sont utilisés dans des conditions de pollution très sévères et ils peuvent vieillir sous l'effet des différentes contraintes (électriques et climatiques) auxquelles ils sont soumis en service.

III.2.1.6 Nettoyage des isolateurs [32]

Le nettoyage manuel et le lavage périodique sont fréquemment utilisés à travers le monde, en particulier dans les postes, ils sont pratiqués hors tension ou sous tension

(Fig. III.2). Ces interruptions de service entraînent des problèmes majeurs, donc il faut limiter leurs usages au maximum.

Un lavage sous tension des isolateurs permet d'éviter ces coupures, il est réalisé à l'aide d'une installation fixe ou mobile.

L'équipement utilisé pour réaliser le lavage sous tension des structures isolantes comprend :

- Une réserve d'eau déminéralisée d'une capacité de 3 500 L ;
- Un groupe motopompe dont la pression de sortie d'eau est de 10^7 Pa et capable d'amener l'eau de la citerne à une hauteur de 80 m sous une pression supérieure à $5 \cdot 10^6$ Pa ;
- Deux tuyaux de 45m chacun, capables de supporter, en régime permanent, une pression interne de 10^7 Pa ;
- Une canne d'aspersion équipée d'un gicleur, raccordée au groupe motopompe à l'aide de la tuyauterie précédente.

Cet équipement orientable dans le plan horizontal est fixé sur un engin élévateur pour assurer les translations verticales. Les deux mouvements peuvent, indépendamment ou simultanément, être commandés à distance **(Fig. III.3).**



Fig.III.2 Lavage sous tension



Fig.III.3 Lavage sous tension avec camion à bras télescopique



Fig.III.4. Nettoyage aérien sous tension

Les hautes pressions utilisées permettent de disposer, très près de la buse, d'un jet divisé, constitué de fines gouttelettes projetées à très grande vitesse sur la structure polluée. Ce jet non conducteur, possède en outre, grâce à la vitesse élevée des gouttelettes, un effet mécanique important favorisant le nettoyage de la surface. Il est effectué selon des règles strictes concernant la qualité d'eau de lavage, le processus de lavage et la distance de sécurité, afin d'éliminer tout risque de contournement pendant le lavage.

Le nettoyage des isolateurs à l'aide d'un abrasif pulvérisé sous pression est une technique utilisée dans certain pays, en particulier en Amérique du nord. Cette technique permet le nettoyage des isolateurs recouvert de pollution très adhérente (ciment) et peut être utilisée pour dégraisser les isolateurs.

Malgré la simplicité de ces dispositifs, le lavage sous tension de la totalité d'un poste reste une opération couteuse, il est donc conseillé de réaliser le lavage au moment le plus approprié.

III.2.1.7 Élagage

L'élagage du couloir des lignes doit permettre d'éviter les risques d'amorçage aux arbres. L'élagage par des engins mécaniques étant plus économiques que l'élagage manuel, il est à pratiquer chaque fois que cela est possible. En conséquence, la périodicité recherchée sera suffisante pour que les repousses n'atteignent pas une dimension nécessitant un élagage manuel, mais on est conduit, parfois, à faire des élagages ponctuels de correction. Dans les pays méditerranéens, les interventions doivent souvent être plus fréquentes. Dans les zones où l'élagage est mal supporté, les amputations seront moindres et la fréquence plus grande. En certains endroits sensibles, élagage se fait deux fois par an.

III.2.1.8 Peinture

L'acier constituant les pylônes est soumis à l'action de l'air, de la pluie, des pollutions naturelles ou artificielles et subit une corrosion s'il n'est pas correctement protégé. Une protection correcte est assurée par l'application périodique de peinture. Dans des conditions peu sévères d'environnement, on peut attendre 10 ans environ entre deux traitements (brossage, peinture en deux couches), voire plus, si on effectue un traitement intermédiaire à une seule couche avec brossage.

Les pylônes en acier galvanisé peuvent également être peints dans les zones agressives (zones polluées ou zones marines).

Conclusion

La pollution, qu'elle soit naturelle ou artificielle, représente un véritable problème pour les réseaux de transport d'énergie et chaque région a ses propres caractéristiques.

La pollution se dépose par suite de phénomènes aérodynamiques tandis qu'elle s'élimine par la pluie et le vent. Ainsi, il y a une évolution continue du dépôt et de sa répartition comme les contournements ne peuvent avoir lieu que dans les cas extrêmes, de dépôts et d'humidification, les enquêtes doivent généralement durer plusieurs années afin de recueillir des informations valables pour obtenir une estimation statistique.

D'après l'étude ci-dessus, on peut conclure que :

- La méthode du brouillard salin peut être recommandée pour des isolateurs soumis à une pollution marine ou une pollution à couche mince avec laquelle les conditions d'essais peuvent être contrôlées.
- Les méthodes du brouillard tenu et du brouillard vapeur peuvent être recommandées pour les isolateurs soumis à la pollution marine et industrielle. Ces essais sont souples et peuvent être adaptés suivant les conditions naturelles attendues.
- Les techniques de lutte contre la pollution connues actuellement (graissage, lavage, nouveau type d'isolateurs, revêtement hydrophobe,...), permettent de disposer de solutions curatives adaptées à la plupart des problèmes de pollution rencontrés par les exploitants des réseaux électriques.

- Les procédés de lavage et de graissage sont des moyens de dépannage devant les difficultés dues à la pollution inattendue ou bien exceptionnelles. Ils ne doivent, en aucun cas, être considérés comme un moyen normal pour faire face à la pollution des isolateurs.



*ETUDE DU COMPORTEMENT
D'UN ISOLATEUR SILICONE DANS UN
ENVIRENEMENT DESERTIQUE*



CHAPITRE IV

LA SILICONE



Introduction

J.F. Hyde inventa les silicones en 1938 un chercheur de Corning (USA). En cherchant à combiner les propriétés de composés de carbone avec celles de composés de silicium.

La société Dow Corning fut fondée en 1943 pour exploiter cette invention qui a débouché sur un grand nombre de résines, de vernis, d'élastomères et d'autres utilisations humaines [35].

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

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

En raison de leur structure chimique, les silicones sont parfaitement adaptés aux applications Moyenne et haute tension et présentent de nombreuses propriétés électriques, physiques, Mécaniques et chimiques particulièrement intéressantes.

IV.1. Propriétés des silicones [36]**IV.1.1. Hydrophobicité**

Par rapport aux autres matériaux, les silicones se distinguent par un très haut pouvoir imperméabilisant à long terme, appelé hydrophobicité : l'eau ne pénètre pas dans les pièces d'isolation en élastomères silicones, mais perle à la surface, 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.IV.1 L'hydrophobicité de la silicone

IV.1.2.Tenue aux UV et aux intempéries

La stabilité de la chaîne Si-O confère aux silicones une haute résistance au spectre ultraviolet de la lumière solaire. Par comparaison aux autres matériaux, les élastomères silicones sont très résistants au rayonnement ultraviolet. Même les climats agressifs des régions côtières ou désertiques n'altèrent pratiquement pas leurs propriétés : l'élastomère silicone ne présente par exemple qu'une légère altération de ses propriétés mécaniques après un test accéléré d'exposition aux intempéries de 3 000 heures.

IV.1.3.Tenue au feu

Le point d'inflammation des silicones se situe au-delà de 340 °Celsius, 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. IV.2. Test de feu

IV.1.4.Elasticité

La très haute élasticité des isolants 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.

IV.1.5.Propriétés diélectriques

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.

IV.1.6.Thermostabilité

Les silicones sont très résistantes aux contraintes thermiques en raison de leur structure chimique. Les huiles silicones sont thermostables à long terme, jusqu'à 180 °C, même en présence d'oxygène atmosphérique et supportent des températures encore plus élevées sur une courte durée.

IV.2.Avantages pour les applications moyenne et haute tension [36]**IV.2.1.Sécurité accrue**

Minimisation du risque de décharge électrique due à la couche de pollution, d'où une plus grande sécurité par rapport aux isolants conventionnels.

IV.2.2.Utilisation en extérieur

Parfaite convenance applications en plein air.

IV.2.3.Haute protection anti-incendie

Utilisation dans les lieux exigeant une haute protection anti-incendie, comme les tours d'immeubles, les locomotives, les navires, les hôpitaux et le métro.

IV.2.4.Large plage de température

Montage des éléments isolants à basse température. Pas de perte d'élasticité sous exposition permanente aux très hautes ou très basses températures.

IV.2.5.Plus grande longévité

Ralentissement significatif du vieillissement électrique, d'où une nette augmentation de la durée de vie par rapport aux autres isolants, sous contraintes identiques.

IV.2.6.Meilleur rendement

Température de fonctionnement plus élevée que celle des autres isolants, autorisant une meilleure exploitation des transformateurs.

IV.3.Propriété fondamentales

On utilise des isolateurs en silicone dans les réseaux de transmission depuis plus de 40 ans et ce, pour des raisons différentes pour chaque nouvelle application.

IV.3.1.Propriétés fondamentales pour les applications électriques

Au cours des 40 dernières années, les silicones ont conquis de nombreux secteurs de la transmission et de la distribution, chaque nouvelle application exigeant une autre propriété clé, en plus des avantages déjà connus. Initialement, l'effet hydrophobe des silicones était la propriété numéro un pour la protection des isolateurs, puis plus tard, la tenue aux UV des élastomères silicones primait. Mais les propriétés fondamentales pour les diverses applications sont restées pratiquement les mêmes jusqu'à aujourd'hui. Seule exception : les huiles pour transformateurs, dont la tenue au feu était au départ le principal objectif alors qu'aujourd'hui la stabilité thermique est au centre de la recherche.

	Hydrophobicité	Tenue aux UV	Elastomères silicones de basse viscosité	Tenue au feu	Elasticité a long terme	Propriétés diélectriques	Stabilités thermique
Huiles silicones pour transformateurs modernes				■		■	■
Manchons de câbles					■	■	
Extrémités de câbles	■	■	■	■	■		
Parafoudres	■	■		■			
Isolateurs creux Composites	■	■	■	■			
Isolateurs Composites	■	■		■			
Revêtement silicone des isolateurs	■						

■ = Autre propriété importante pour cette application

■ = Propriété fondamentale

Tab .IV.1.Importance des propriétés selon l'application

IV.4.Structure Moléculaire Des Silicones [36]

C'est l'excellente stabilité et la grande liberté de formulation des silicones sont ancrées dans le motif de base. C'est la que résident 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 ».

IV.4.1.Stabilité exceptionnelle

La structure des silicones, ou chimiquement parlant, des polyorganosiloxanes, est analogue à la structure organique du quartz modifiée. 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'EPDM. À titre de comparaison, l'énergie des liaisons C-C est de 348 kJ/mol et celle d'une liaison Si-O de 444 kJ/mol. La lumière solaire de courtes longueurs d'ondes (300 nm), renfermant une énergie d'environ $6,2 \times 10^{-22}$ kJ (= 398 kJ/mol), peut entraîner la rupture des liaisons C-C tandis que la liaison Si-O reste stable.

IV.4.2.Grande liberté de formulation

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.

:

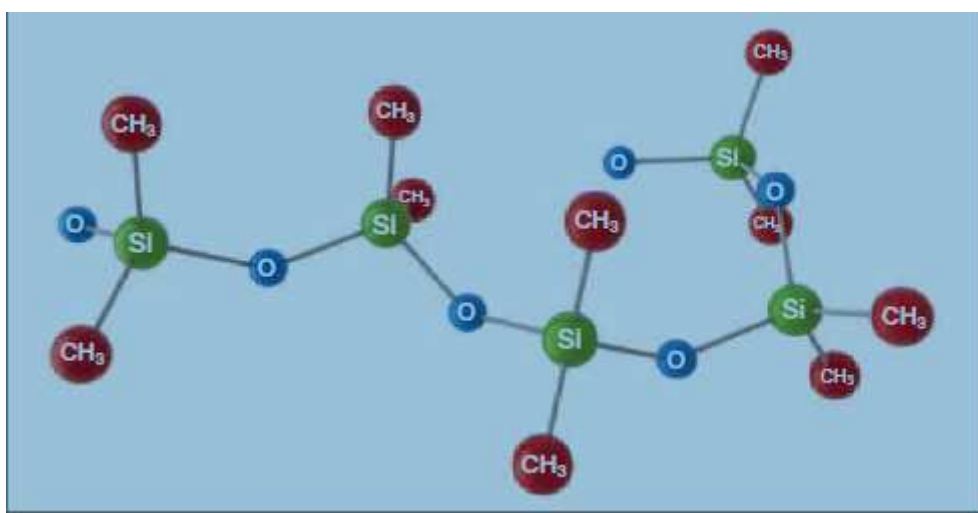


Fig.VI.3. Structure chimique d'un polymère silicone linéaire

IV.5. Groupes de silicones**IV.5.1.Elastomères silicones**

Les élastomères silicones et les silicones de revêtement forment le plus grand groupe de produits silicones et sont optimisés en permanence en raison de la grande variété d'applications. Ils sont fabriqués à partir de polymères silicones. Les caoutchoucs sont subdivisés en plusieurs catégories selon leur viscosité et leur mode de réticulation. Tandis qu'autrefois les pièces isolantes étaient souvent réalisées par moulage de caoutchouc silicone RTV-2, aujourd'hui, les procédés se diversifient.

IV.5.2.Gels silicones

Les gels silicones sont un groupe particulier d'isolants et peuvent remplacer les huiles ou les élastomères, suivant le type d'application. Par rapport aux huiles, ils réduisent le risque de fuites. Et comparés aux élastomères, ils remplissent parfaitement les cavités de géométrie complexe et adhèrent solidement aux parois intérieures des pièces. Les gels silicones sont la plupart du temps des produits bi-composants de basse viscosité.

IV.5.3.Huiles silicones

Les huiles silicones ont fait leurs preuves dans le refroidissement et l'isolation des transformateurs modernes et du fait de leur excellente stabilité thermique, de nouvelles applications exigeant des propriétés similaires ne sauraient tarder. Elles sont également beaucoup utilisées dans les accessoires de câbles haute tension. Les huiles silicones sont des Polymères linéaires pouvant présenter une longueur de chaîne de deux à 1 000 atomes Si, voire beaucoup plus, en alternance avec des ponts oxygène.

IV.5.4.Résines siloxanes

Les résines siloxanes se distinguent par leur haute stabilité thermique, une propriété que l'on exploite dans l'isolation des grosses installations électriques. Leur excellente résistance à la chaleur devrait conduire tôt ou tard à de nouvelles applications.

Elastomères silicones	Rapport de mélange	Abréviation	Procédé de transformation	Propriétés
Elastomères bi composants de basse viscosité	9 :1	RTV-2	Moulage / coulée basse-pression	• Bonnes propriétés électriques • Propriétés mécaniques moyennes • Technologie de transformation complexe
Elastomères liquides bi composants de basse viscosité	1/1	POWERSILR XLRR	Coulée via unité de dosage et de mélange	• Combinaison idéale de propriétés électriques et mécaniques • Fort potentiel de développement pour les machines de transformation et les caoutchoucs dans le futur.
Elastomères liquides bi composants	1/1	LSR	Moulage par injection	• Excellentes propriétés mécaniques • Grande palette de produits avec par ex. Formulations modifiées conductrices et variantes pour applications en plein air • Potentiel d'innovations et possibilités de modification
Elastomères solides mono- ou bi composants	—	HTV (allemand) HCR (anglais) EVC (français)	Moulage par injection, extrusion	• Vaste gamme de produits pour différents procédés de transformation, tels que le moulage par injection et l'extrusion • Types modifiés conducteurs et variantes pour applications en plein air • Nombreuses possibilités de modification du procédé de réticulation, de la couleur et d'autres propriétés

RTV = réticulant à température ambiante

EVC = élastomère vulcanisable à chaud

POWERSILR XLRR = caoutchouc extra-liquide

HCR = caoutchouc de silicone solide

LSR = caoutchouc silicone liquide

Tab .IV.2. Les élastomère silicone tableau récapitulatif

Applications	Famille de produit	Propriété clé	Avantage par rapport aux isolateurs conventionnelles
Revêtement d'isolateurs (et autres pièces d'isolation)	• RTV-1	Hydrophobie	• Faible courant de cheminement • Plus haute tension de contournement de la couche de pollution • Coûts de maintenance réduits • Plus grande longévité
Isolateurs composites en silicone	• HTV • RTV-2 • LSR	Tenue aux UV	• Faible courant de cheminement • Plus haute tension de contournement de la couche de pollution • Coûts de maintenance réduits • Plus grande longévité
Isolateurs composites creux en silicone	• HTV • RTV-2 • LSR	Tenue aux UV + propriétés de transformation	• Faible courant de cheminement • Plus haute tension de contournement de la couche de pollution • Coûts de maintenance réduits • Plus grande longévité
Parafoudres	• HTV • RTV-2 • LSR	Sécurité en cas de surcharge et tenue au feu	• Plus grande sécurité
Extrémités de câbles	• HTV • RTV-2 • LSR	Elasticité a long terme	• Plus grande longévité • Coûts de maintenance réduits ou nuls
Manchons de câbles	• HTV • RTV-2 • LSR	Stabilités des principales propriétés électriques et mécaniques sur la plage de températures des applications	• Plus grande longévité, coûts de maintenance réduits ou nuls
Applications des gels silicones		Protection anti-fuite et comportement des gels pendant la phase transitoire lors des changements de température	• Plus grand respect de l'environnement
Fluide pour transformateurs	• Huiles silicones	Stabilités thermique et tenue au feu	• Très haute protection anti-incendie, réduction de la taille

Tab .IV.3. Applications typiques des silicones

IV.7. Isolateurs / revêtement d'isolateurs**IV.7.1. Isolateurs / parafoudres**

On utilise différentes formes d'isolateurs à long fût en silicone, de 10 kV à 1 000 kV : isolateurs suspendus, tendeurs, supports ou pour réseaux ferroviaires.

IV.7.1.1. Avantage des silicones dans les isolateurs à long fût

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

➤ Grande longévité

Les caoutchoucs silicones se distinguent par leur excellente hydrophobicité, leur haute résistance thermique et leur tenue aux UV et à l'ozone.

➤ Faible poids

Les isolateurs à long fût pèsent jusqu'à 80 % de moins que les modèles classiques en porcelaine ou en verre, ce qui facilite le montage aux endroits difficilement accessibles, comme par exemple en montagne.

➤ Faible risque de bris

La flexibilité de l'isolant silicone réduit les risques de bris pendant le transport et le montage, et les pannes résultant d'une détérioration intentionnelle sont rares.

➤ Haute résistance au contournement de la couche de pollution

La surface silicone hydrophobe protège durablement les isolateurs contre les courants de cheminement et les décharges, même en présence de forte pollution, et augmente la fiabilité de l'alimentation en électricité, par exemple dans les régions industrielles, côtières ou désertiques, ainsi que sur les lignes ferroviaires.

➤ Faibles coûts de maintenance

Grace au transfert d'hydrophobicité, la surface, même très polluée, reste imperméable.

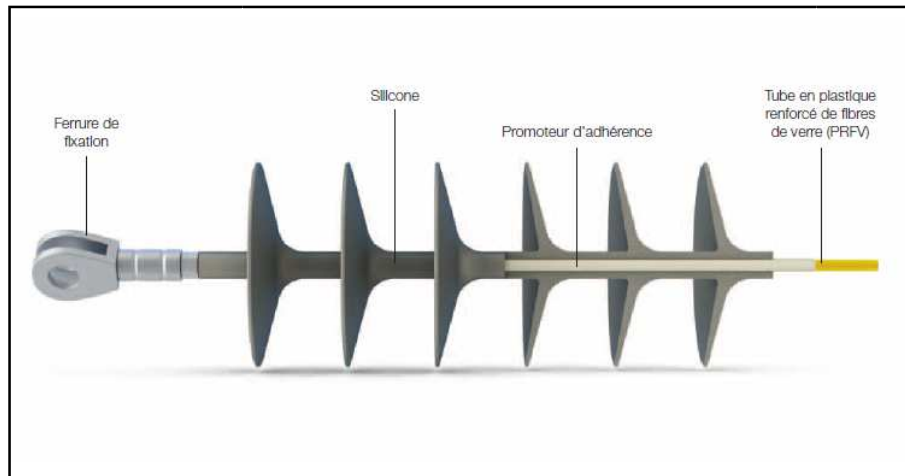


Fig. IV.4. Schéma de principe d'un isolateur à long fût

IV.7.2. Procédés de fabrication des isolateurs à long fût [48]

Lors de la fabrication de ce type d'isolateurs, les tubes ou joncs de plastique renforcé de fibres de verre (PRFV) et les parties actives des parafoudres sont revêtues de silicone par différents procédés.

➤ Procédés de fabrication

Moulage par injection, moulage basse pression (coulée), procédé modulaire (écran par écran)

➤ Type

Le choix du produit, caoutchouc silicone solide (HTV), système de basse viscosité ou réticulant à température ambiante (RTV-2), dépend du procédé de fabrication.

IV.8. Isolateurs creux

Les isolateurs creux sont souvent utilisés dans les parafoudres, les extrémités de câbles, les traversées et les transformateurs de mesure des réseaux HT jusqu'à 1 000 kV. Les procédés de fabrication modernes permettent de produire des isolateurs d'un mètre de diamètre et de plusieurs mètres de longueur.

IV.8.1. Avantages des silicones dans les isolateurs creux

➤ Fabrication fiable

Les isolateurs creux sont fabriqués par moulage basse pression, un procédé fiable et flexible, adapté à la production à la demande.

➤ Manipulation aisée grâce au faible poids

Les isolateurs creux enrobés de silicone sont jusqu'à 80 % plus légers que les modèles classiques en porcelaine, ce qui facilite leur transport et leur montage sur les lieux d'accès difficile.

➤ Résistance à l'impact et aux chocs

La flexibilité de l'isolant silicone réduit les risques de casse pendant le transport et le montage, voire en cas de tremblement de terre. Les pannes résultant de détérioration sont rares.

➤ Haute résistance au contournement de la couche de pollution

L'hydrophobicité de la surface des silicones protège durablement les isolateurs pollués et humides contre les courants de fuite et les décharges.

SILICONE	PROCEDER DE TRANSFORMATION
Silicone HTV	Moulage par injection
Silicone HTV	Extrusion
Silicone LSR	Moulage par injection
Silicone LSR	Moulage basse pression
Silicone RTV2	Moulage basse pression
Gel silicone	Coulée

Tab. IV.4. Elastomères silicone pour isolateurs

IV.8.2. Procédés fabrication des isolateurs creux

Les isolateurs creux sont fabriqués à partir de tubes de plastique renforcé de fibres de verre, protégés par une enveloppe de silicone :

IV.8.2.1. Procèdes de fabrication

Moulage basse pression (coulée), extrusion.

IV.8.2.2. Types

Le choix du produit, système réticulant à température ambiante (RTV-2), système de basse viscosité LSR, ou caoutchouc silicone solide, dépend du procédé de fabrication.

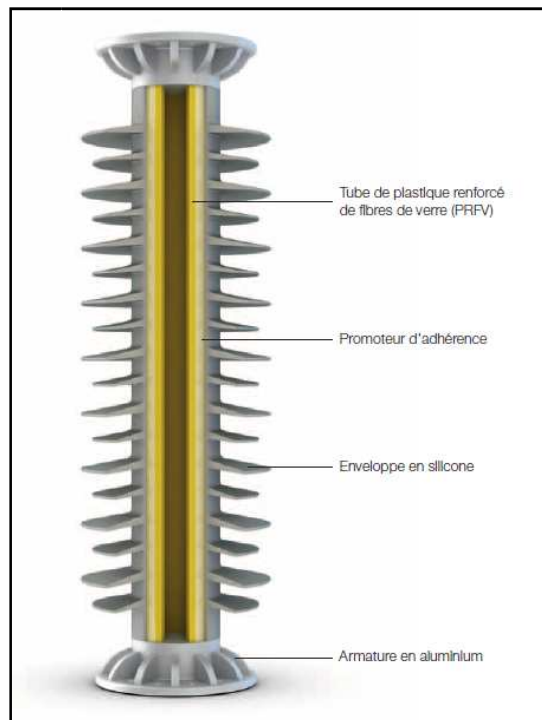


Fig.IV.5. Schéma de principe d'un isolateur creux

IV.9. Revêtement en silicone des isolateurs

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.

IV.9.1. 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.

Un revêtement silicone améliore les propriétés électriques des isolateurs en résine époxy, des équipements de test en plein air et des antennes. 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.

IV.9.2. Avantages du revêtement en silicone des isolateurs

IV.9.2.1. Plus grande sécurité de fonctionnement

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

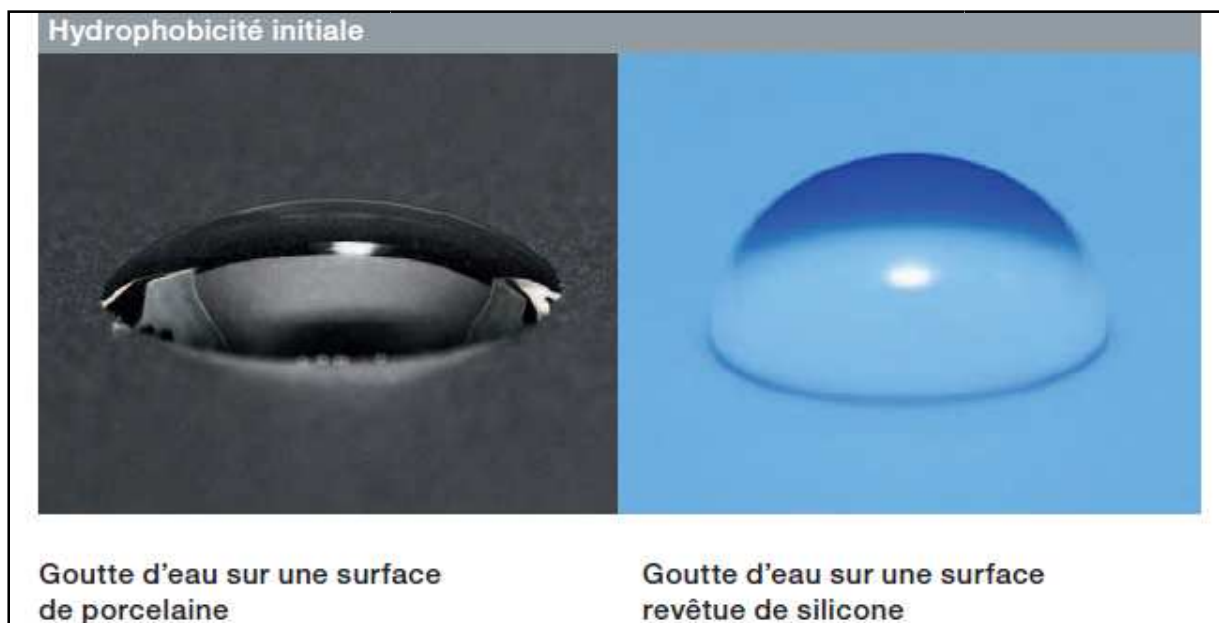


Fig. IV.6. Forme des gouttes

IV.9.2.2. 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 n'est plus nécessaire.



Fig. IV.7 forme des gouttes

IV.9.2.3. 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. IV.8 Forme des gouttes

IV.9.3. Mise en œuvre des revêtements silicones

Les silicones pour le revêtement d'isolateurs sont livrés prêts à l'emploi, mais doivent être soigneusement mélangés dans le contenant d'origine avant d'être transvasés dans le dispositif d'application. Ils sont généralement mis en œuvre à l'aide d'un matériel airless à membrane, comme les peintures de haute qualité. Afin d'assurer une bonne adhérence du 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.

IV.10. Silicones isolants

IV.10.1. Huiles silicones

Les transformateurs modernes génèrent une grande quantité de chaleur. Les huiles silicones sont ici d'excellents agents caloporteurs et isolants. On les utilise également dans la fabrication des extrémités de câbles haute tension.

IV.10.1.1. Composition et propriétés

En général, les huiles silicones utilisées pour l'isolation électrique sont des poly(diméthylsiloxanes) se présentant sous forme de liquides limpides, incolores et inodores. Leur masse moléculaire varie entre 1 000 et 150 000 g/mol et leur viscosité peut aller de 0,65 à 1 000 000 mm²/s. Leur température de fonctionnement continu va du point de solidification (-60 à -40 °C selon la viscosité) à 180 °C environ. Les changements de température n'ont

pratiquement pas d'incidence sur les propriétés fondamentales des huiles silicones, comme par exemple le facteur de perte diélectrique et la viscosité. Ces caractéristiques les distinguent des autres fluides électriquement isolants, tels que les huiles minérales et les esters liquides. Certains types spéciaux supportent même des températures encore plus basses et plus élevées (de -100 à +250 °C).

IV.10.1.2. Isolants classiques pour transformateurs

Une gamme d'huiles silicones spécialement formulées pour les systèmes d'isolation des transformateurs modernes. Initialement développées pour remplacer les PCB, le POWERSILR Fluide TR 50 et le POWERSILR Fluide TR 20 sont aujourd'hui principalement employés pour leur exceptionnelle résistance à l'oxydation et leur point d'éclair élevé. Les huiles silicones se distinguent par une augmentation modérée de leur viscosité à basse température.

IV.10.1.3. Huile silicone pour haute densité d'énergie

Les huiles silicone spécialement adaptée aux applications nécessitant la dissipation de grandes quantités de chaleur en peu de temps : le POWERSILR Fluide TR 20. Ce produit présentant une très basse viscosité de 20 mm² par seconde, un point d'éclair à 240 °C et un point de feu à 270 °C, se distingue par une exceptionnelle capacité de démarrage à froid. Son point de solidification en dessous de -50 °C constitue un avantage décisif, par exemple dans les éoliennes.

IV.10.1.4. Avantages des huiles isolantes en silicone

- Haute stabilité thermique
- Capacité de surcharge thermique à court terme
- Très haute résistance à la chaleur continue
- Utilisation à la puissance nominale à basses températures
- Très faible facteur de perte diélectrique
- Faible modification des propriétés électriques sur une large plage de températures
- Point d'éclair élevé

IV.10.2. Gels silicones

Les gels silicones sont d'excellents matériaux de revêtement isolants, par exemple pour les accessoires de câbles.

IV.10.2.1. Propriétés

Les gels silicones sont des silicones bi-composants, réticulant par addition à température ambiante pour former non pas des élastomères silicones au sens classique du terme, mais des produits mous et gélatineux. Les composants très fluides du gel POWERSILR facilitent la coulée. Le produit réticulé adhère généralement sur tous les supports revêtus et possède d'excellentes propriétés diélectriques.

IV.10.2.2. Avantage des gels silicone

- Haute résistance électrique
- Bas module
- Basse viscosité

IV.11. Procédés de transformation [48]**IV.11.1. moulage par injection**

Le moulage par injection est aujourd'hui le procédé de transformation des silicones le plus souvent employé et le plus rentable pour la production de grandes séries de qualité constante.

Le moulage par injection des élastomères silicones modernes permet de produire des pièces en grandes séries sur des temps de cycle très courts. La configuration personnalisée de la machine et des moules offre une grande souplesse de production et minimise les pertes de matière. Le procédé convient aux caoutchoucs solides (HTV) et liquides (LSR).

Le moulage par injection est la technique de transformation moderne des caoutchoucs silicones solides. Les machines permettent de fabriquer des pièces d'isolation jusqu'à 140 cm de longueur enivrant. en une seule « injection ». Pour les pièces plus longues, on a recours à des procédés multi-injection dans lesquels les différentes parties sont injectées successivement ou parallèlement.

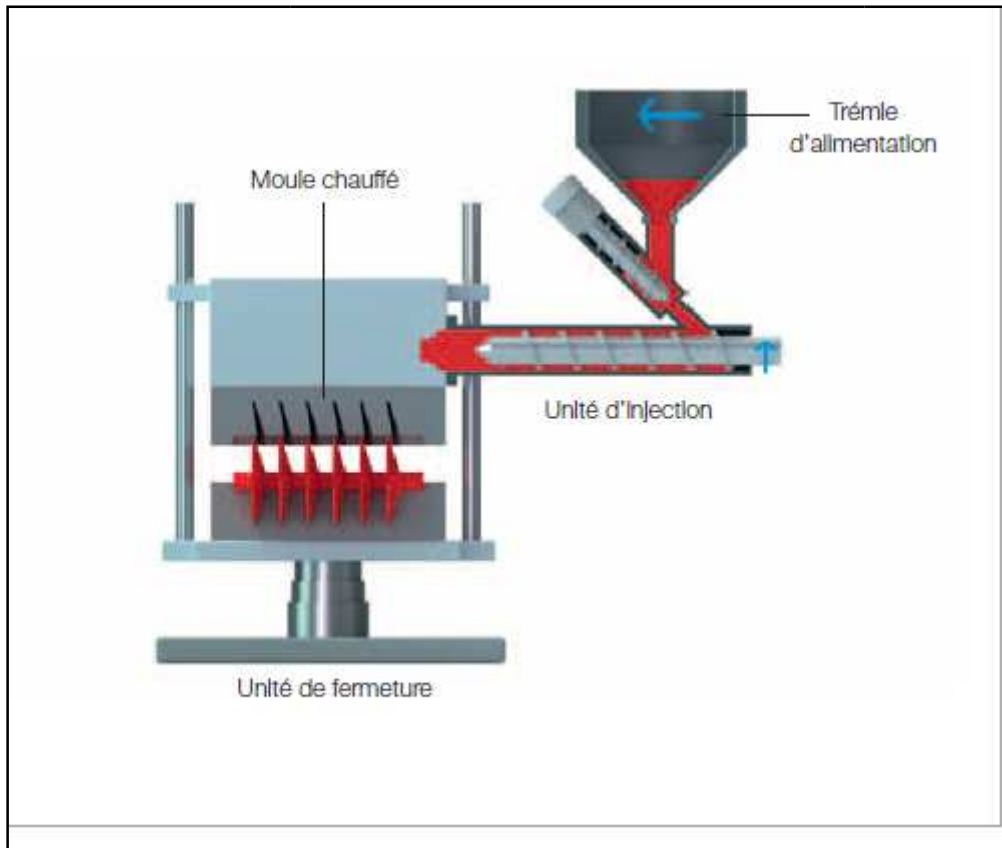


Fig. IV.9. Moulage par injection

IV.11.1.1. Caractéristiques du moulage par injection

- Convient à la fabrication des pièces de petite à moyenne taille en grandes séries
- Reproduction précise des contours
- Haute productivité
- Hautes températures de réticulation, de 120 à 180 °C
- Forces de fermeture élevées nécessaires
- Coûts d'investissement relativement importants

Les caoutchoucs silicones liquides se transforment exclusivement par moulage par injection qui permet de fabriquer des pièces d'épaisseur de paroi relativement faible. Le moulage par injection est le procédé idéal pour les extrémités de câbles, les manchons, les connecteurs et toutes les autres pièces produites en grandes séries. Les différentes couches sont souvent fabriquées par injection séquentielle. Les caoutchoucs liquides sont toujours préalablement préparés dans une unité de mélange et de dosage qui alimente la presse d'injection.

IV.11.2. Moulage / coulée basse pression

Le moulage ou la coulée basse pression convient particulièrement aux pièces en silicone de gros volume, comme par exemple les manchons de jonction pour lignes haute tension ou les isolateurs creux. En règle générale, on utilise pour cette technique un élastomère silicone de basse viscosité et de haute coulabilité afin d'obtenir un débit volumétrique élevé et des pièces de haute qualité, exemptes de bulles d'air.

Lors du moulage basse pression, le moule est directement rempli de silicone liquide de basse viscosité, provenant de l'unité de mélange et de dosage.

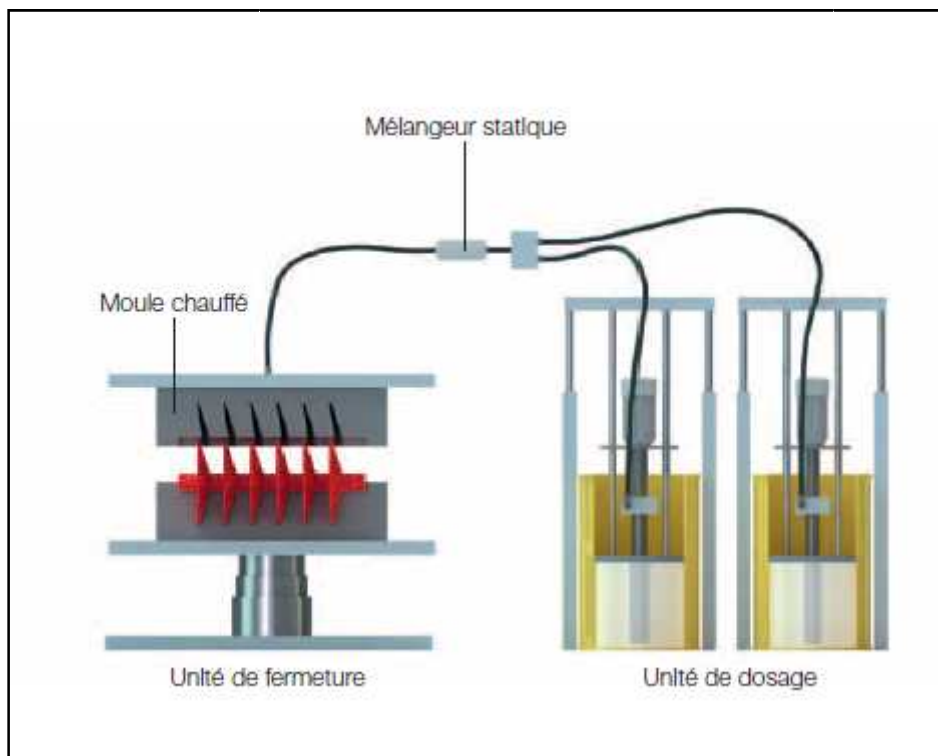


Fig. IV.10 Moulage à basse pression.

IV.11.2.1. Caractéristiques du moulage basse pression

- Procède économique pour les prototypes, les pièces de gros volume et les petites séries.
- Réticulation à basse température, de la température ambiante à 120 °C.
- Force de fermeture requise relativement faible.
- Coûts d'investissement moyens.

Conclusion

La silicone matériaux qui a changé la vie de l'homme. Elle présente l'avantage d'être d'application simple et de se trouver en abondance sur terre.

Avec ses nombreuses applications, la silicone est considérée comme la découverte du siècle. Elle est utilisée dans tous les domaines et a remplacé de nombreux matériaux qui par le passé étaient rares ou difficile à extraire.

Le plus grand bénéficiaire de cette découverte est le domaine de la haute et moyenne tension. Utilisée comme substituée du verre et de la porcelaine, la silicone a démontré qu'elle était un matériau fiable et économique.



*ETUDE DU COMPORTEMENT
D'UN ISOLATEUR SILICONE DANS UN
ENVIRENEMENT DESERTIQUE*

CHAPITRE V

CLIMAT SAHARIEN

Introduction

L'étude des nuages de poussières d'origine désertique, souvent appelés brumes sèches ou vents de sable lorsque le phénomène est plus intense, est d'un intérêt considérable dans divers domaines, l'une des conséquences du vent de sable est l'érosion éolienne.

L'érosion éolienne des équipements électriques de type extérieur (exemple isolateur de ligne et de poste) se traduit par l'arrachement de la matière sur leurs surfaces.

Les vents de sable exercent un effet important sur le climat d'une région. De ce fait, et en raison de leur extension géographique, ils jouent un rôle non moins important dans le processus du changement climatique à travers la modification des propriétés physico-chimiques de l'atmosphère. La composition de l'atmosphère et le climat sont étroitement liés.

V.1. Les aérosols [34]

Les aérosols sont issus de l'érosion éolienne. Aussi, leurs sources géographiques sont concentrées dans les zones arides et semi-arides, localisées de part et d'autre de l'équateur, dans la ceinture d'anticyclones tropicaux.

Les aérosols, en aggravant les conditions météorologiques, peuvent intervenir dans divers aspects socioéconomiques, notamment en nuisant au trafic aérien ou à la télétransmission et à long terme provoquant l'érosion.

La composition et la granulométrie des aérosols varient selon leur origine. Ils sont soit d'origine anthropique (comme les poussières industrielles, le carbone ou les aérosols de sulfate issus de l'oxydation du SO_2 ...), soit d'origine naturelle (poussières minérales ou sels de mer, débris végétaux, sulfates issus de l'activité biologique marine ou des volcans...). Intégrée sur une colonne d'air, la concentration moyenne de chaque espèce et leurs propriétés permettent une estimation de la contribution à l'effet direct global de chaque type d'aérosol.

V.2. le Sahara algérien

.Le Sahara algérien présente trois types de paysages différents :

- Les hamadas, plateaux de dalles rocheuses;

- Les regs, immenses étendus de graviers et de cailloux;
- Les ergs, immenses étendus de dunes de sable accumulées par l'érosion.

Au sud, avec 2 millions de km² de désert, le Sahara, l'un des plus grand désert du monde. Il représente près de 85% de la superficie de l'Algérie et se compose d'immenses dunes, d'ergs, d'oasis et de montagnes dont le massif du Tassili et celui du Hoggar où culmine le plus haut mont d'Algérie avec 3000 mètres d'altitude. Il règne dans cette région un climat désertique avec de grandes variations diurnes. Le pied sud de l'Atlas tellien marque la limite du climat aride : sec et tropical, avec de grands écarts de températures en hiver : la température moyenne est de 36°C le jour.

Les grands massifs de dunes, les ergs, se localisent dans les parties basses de la topographie. Façonnés par les vents les plus réguliers, comme les alizés au Sahara, les ergs forment des alignements de dunes, parallèles à la direction des vents dominants, et séparés par des couloirs. Les dunes des ergs peuvent aussi avoir la forme de grandes pyramides, dépassant souvent 200 m de haut, notamment dans le Grand Erg oriental en Algérie. Avec 200 000 km² de superficie, l'erg de Libye est l'un des plus grands du monde. Les dunes des ergs ne se déplacent pas. Il existe des dunes mobiles, généralement isolées à la périphérie des ergs ou sur les plateaux pierreux. Elles se sont constituées à la faveur d'un rocher ou d'une touffe de végétation qui fixe le sable. Le vent forme les dunes isolées en croissants, dont les pointes sont allongées dans le sens du vent. Leur profil est dissymétrique: le versant au vent est en pente douce, le versant sous le vent a une forte pente.

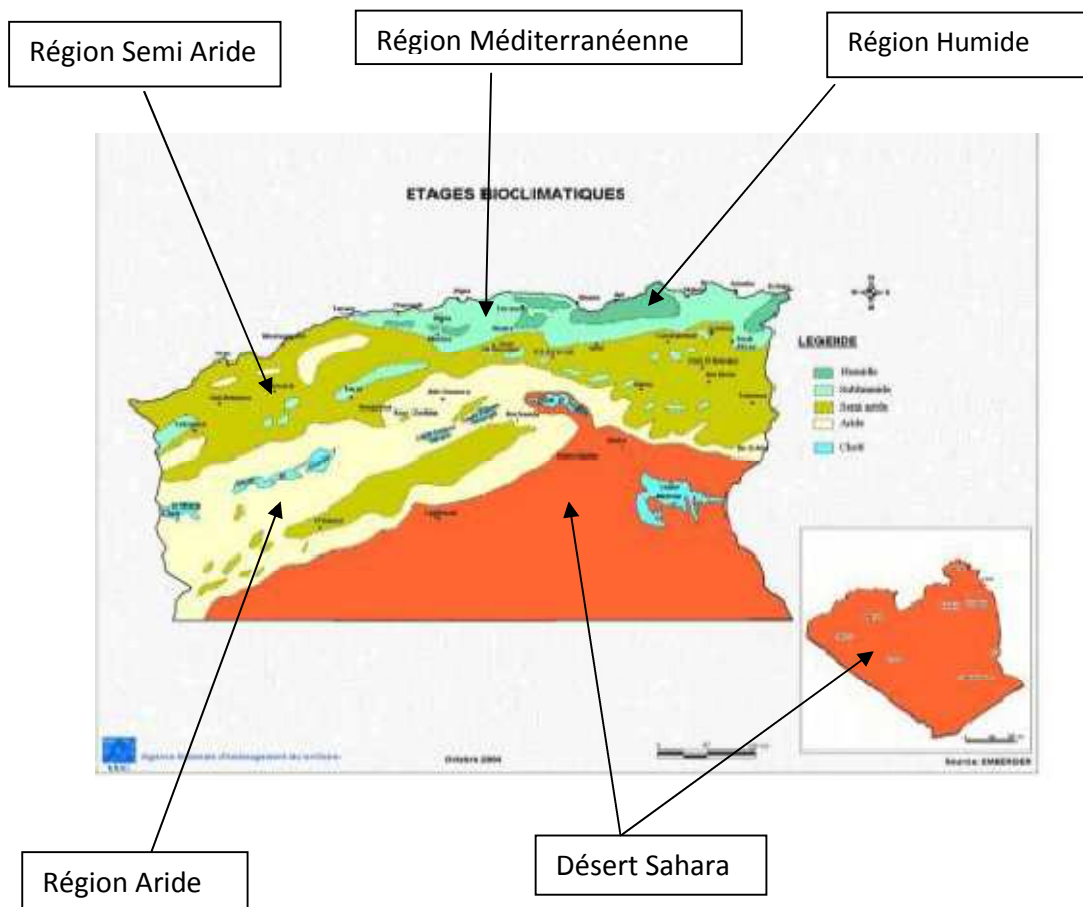


Fig .V.1 Carte des régions bioclimatiques de l'Algérie

V.3. L'influence du Sahara sur le climat mondiale [34]

Le climat du Sahara, chaud, ensoleillé et aride, est caractéristique de celui d'un désert chaud, situé de part et d'autre d'un tropique. Il résulte de la subsidence de l'air sous l'effet des anticyclones permanents qui se produisent entre 25° et 35° de latitude nord. Les précipitations sont très rares et irrégulières ; la plupart des régions reçoivent en moyenne moins de 130 mm de pluie par an, et certaines, comme le Tanezrouft (Algérie), restent plusieurs années sans pluie. Les pluies peuvent survenir sous la forme d'averses très brutales, et l'eau ruisselle dans les oueds.

L'insolation est de plus de trois mille heures par an. Les températures diurnes sont très élevées, pouvant dépasser 50 °C (jusqu'à 66 à In Salah), et l'amplitude thermique entre le jour et la nuit est souvent supérieure à 35 ou 40 °C ; l'amplitude annuelle peut atteindre 50 °C ; en hiver, il peut geler quelques jours à Tamanrasset, par exemple. Ces brusques variations de température entraînent en plus de l'érosion éolienne une désagrégation mécanique des roches.

Le relief du Sahara est un socle massif très anciennement consolidé. Il est recouvert de terrains sédimentaires, est constitué de cuvettes (Tafilalet), de plateaux (Ennedi, Tadmait et Tassili) ou hamadas (Ténéré), d'amoncellements de pierres ou regs (Tanezrouft), d'amoncellements de sable ou ergs ainsi que de massifs cristallins (Adrar et Iforas) et volcaniques tertiaires, plus humides (Aïr, Hoggar et Tibesti) au centre et au sud

V.4. Les poussières sahariennes

Il y a aussi d'autres phénomènes climatiques liés aux déserts comme les retombées de poussières Sahariennes en Europe et partout dans le monde. Ce phénomène est dû principalement au fait que le Sahara étant excessivement chaud, les poussières s'élèvent très haut dans le ciel (voir figure V.2) et sont ainsi facilement prises dans des courants d'air traversant la Méditerranée, l'Atlantique ou autres grandes étendues maritimes jusqu'au prochain continent. On a compté plus de 260 millions de tonnes de poussières Sahariennes dont 146 millions tombent dans l'eau durant leur traversée et 60 millions reviennent en Afrique. Il y a donc 50 millions de tonnes qui arrivent sur cet autre continent provoquant ainsi des pluies rouges ou des neiges colorées.

Le désert est un environnement assez stable. Le paysage varie du terrain plat aux dunes de sable et montagnes élevées. Une aridité extrême et des vents violents caractérisent le désert du Sahara. Ces derniers ont une portée de 100km/h. Ils emportent le sable sur de très grandes distances, érodent les rochers et empêchent complètement toute visibilité lors des grandes tempêtes. Des dunes de sable se déplacent au cours des tempêtes violentes. Généralement, les déserts soutiennent un couvert végétal très clairsemé, ce qui est certainement vrai pour le Sahara.

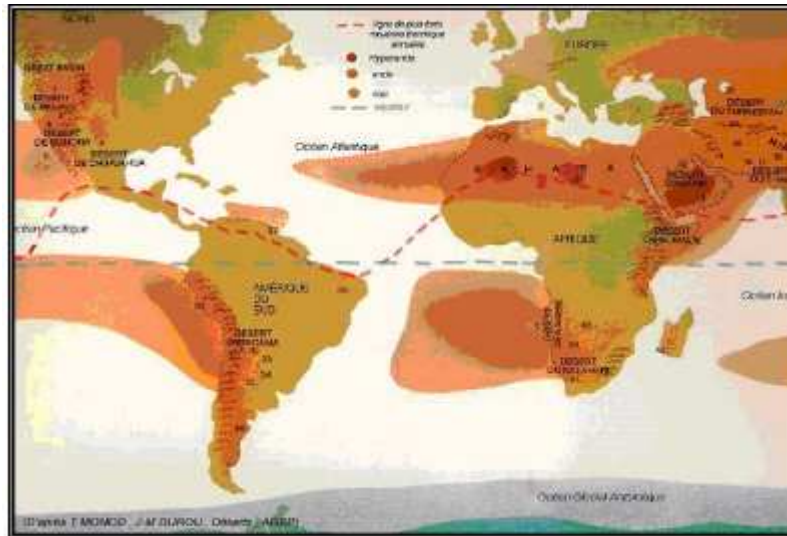


Fig .V.2 Source de poussière

V.5. Erosion éolienne

Le vent soufflant sur une surface désertique balaie les particules les plus fines et peut faire apparaître la surface rocheuse (hamadas sahariennes). Lorsque le sol comporte des matériaux de taille variée (sols alluviaux, par exemple), la déflation élimine la fraction la plus fine, laissant sur place un désert pavé de cailloux (reg). La déflation s'exerce jusqu'à ce que le niveau hydrostatique soit atteint. A ce moment, elle s'arrête et il s'ensuit des surfaces planes s'étalant sur des centaines de kilomètres [37].

La circulation de l'alizé continental (harmattan) autour de la dépression du Sahara entraîne un renforcement des conditions de type saharien ; l'harmattan, vent sec, remobilise des dunes et transporte de la poussière en suspens.

V.6. Le rôle du vent

Le vent constitue un facteur important d'érosion et de transport des sédiments à la surface de la planète. Il est particulièrement actif dans les régions sèches où la végétation est quasi-absente, comme les déserts. Les régions désertiques, qu'on définit comme les régions qui reçoivent moins de 20 cm de précipitations/an, couvrent près du tiers de la surface terrestre. Les grands déserts du monde (Sahara, Kalahari, Gobi, les déserts d'Australie) se trouvent entre les latitudes 10° et 30° de part et d'autre de l'équateur.

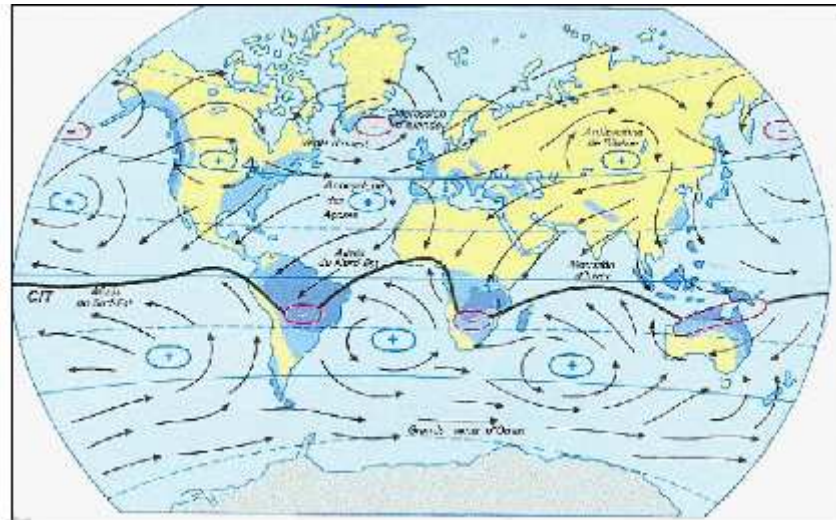


Fig.V.3 Circulation du vent

Ces régions sont constamment sous des conditions de haute pression atmosphérique où descend l'air sec, ce qui est aussi vrai pour les régions polaires qui sont aussi considérées comme désertiques compte tenu qu'elles reçoivent moins de 20 cm/an de précipitations (en équivalent pluie).

C'est pourquoi on y retrouve les grandes zones désertiques, non pas à l'équateur, comme on pourrait le penser puisqu'il y fait le plus chaud, mais autour des latitudes 30°. Il peut sembler paradoxal de qualifier les cercles polaires de déserts, mais effectivement, même s'il y fait froid, ce sont des déserts où les précipitations sont minimales.



Fig .V.4 Tempête de sable

V.7. La mesure de la vitesse et la direction du vent

On décrit un vent par sa vitesse et sa direction.

V.7.1. La mesure de la vitesse du vent

La vitesse du vent peut être exprimée par différentes unités:

- Mètre par seconde (m/s)
- Kilomètre par heure (km/h)
- Nœud (KT)

Parce que le nœud a été longtemps utilisé en marine et puis en aviation, il est utilisé aussi en météorologie. Il vaut un mille marins (1 852 m) par heure, soit 0,514 m/s.

V.7.2. Instrument de mesure de la vitesse du vent

L'instrument qui sert à mesurer la vitesse du vent est nommé « anémomètre ».



Fig V.5 : Anémomètre.

Il existe des modalités d'évaluer la vitesse du vent sans la mesurer vraiment. On utilise pour cela des échelles.

Une des échelles les plus souvent utilisées est celle de Beaufort , qui permet d'estimer la vitesse du vent selon ses effets sur l'environnement.

Degré de l'échelle	Appellation	Effets produits par le vent	Vitesse (km/h)	Vitesse (nœuds)
0	Calme	Calme, la fumée s'élève verticalement.	0 à 1	0 à 0,54
1	Brise très légère	La direction du vent est révélée par le sens de la fumée, mais non par la girouette.	1 à 5	0,54 à 2,7
2	Brise légère	On sent le vent sur la figure. La girouette est mise en mouvement. Les feuilles bougent.	5 à 11	2,7 à 5,9
3	Petite brise	Feuilles et petites branches constamment agitées. Le vent déploie les drapeaux légers.	11 à 19	5.9 à 10,2
4	Jolie brise	Soulève la poussière et les papiers, fait mouvoir les petites branches.	19 à 28	10,2 à 15
5	Bonne brise	Les arbustes en feuilles balancent. Des vaguelettes se forment sur les lacs ou étangs.	28 à 38	15 à 20.5
6	Vent frais	Les grandes branches bougent. Les fils électriques bougent. L'usage des parapluies devient difficile.	38 à 50	20,5 à 27
7	Grand vent	Les arbres entiers sont agités. Il est pénible de marcher contre le vent.	50 à 61	27 à 33
8	Coup de vent	Brise les petites branches des arbres.	62 à 74	33 à 40
9	Fort coup de vent	Dommages aux constructions légères, cheminées et tuiles emportées.	75 à 88	40 à 47,5
10	Tempête	Arbres déracinés. Graves dégâts aux constructions.	89 à 102	47,5 à 55
11	Violente tempête	Ravages étendus.	103 à 117	55 à 63
12	Ouragan	Destructions considérables.	118 et plus	63 et plus

Tab V.1 Echelle de beaufort

V.7.3. La direction du vent

La direction du vent est toujours donnée par la direction d'origine. On parlera par exemple d'un vent du nord lorsque le vent souffle du nord vers le sud.

V.7.4. Détermination de la direction du vent

L'instrument qui sert à déterminer la direction du vent est nommé « girouette ».

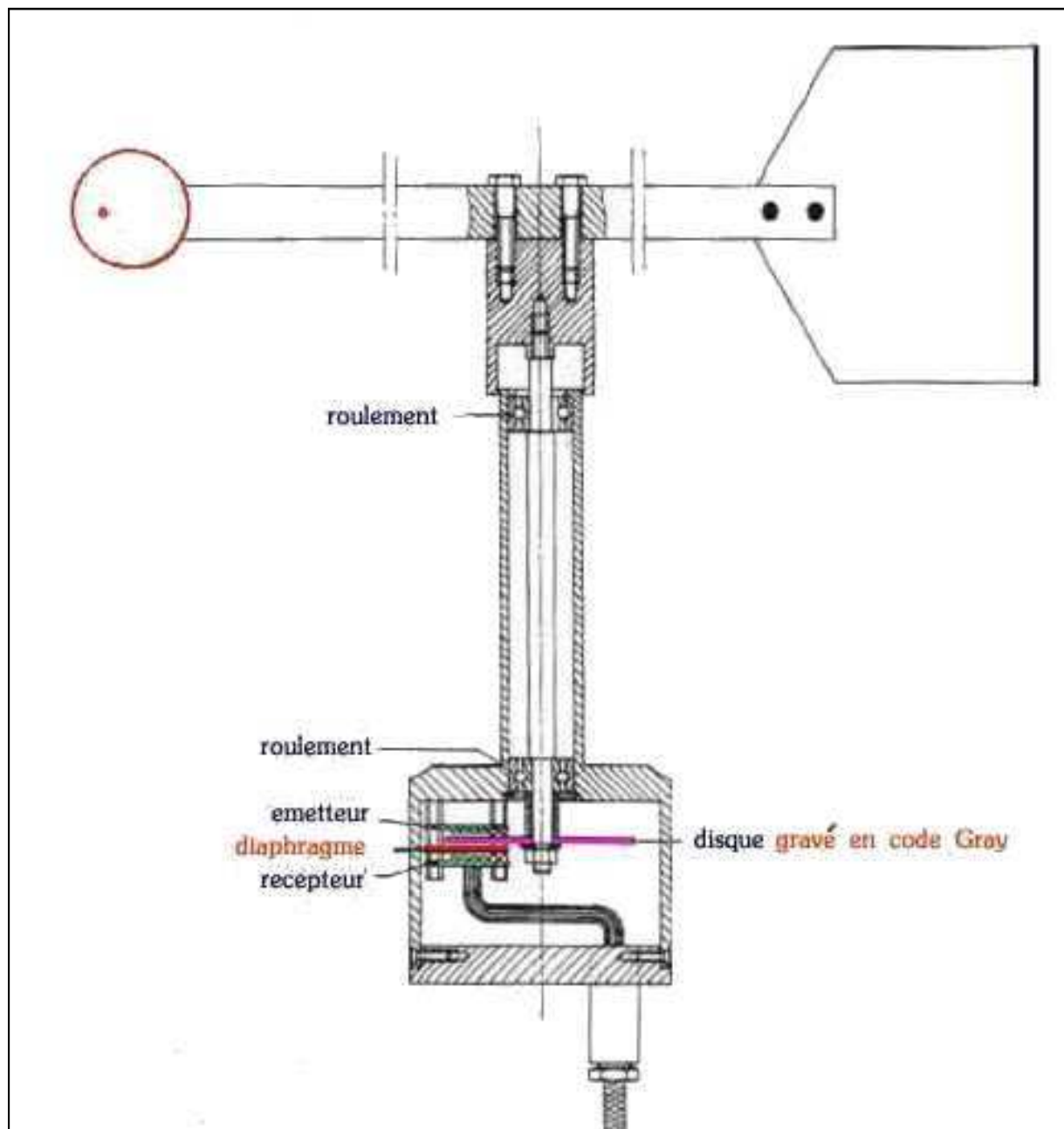


Fig.V.6 girouette

V.8. Les effet de l'érosion [34]

L'érosion éolienne concourt à la désertification des zones sources et constitue l'une des causes de l'appauvrissement des sols. Elle se traduit par la déperdition en substances nutritives due à la disparition de la fraction organique du sol. On assiste alors à une altération des propriétés du sol quant à l'infiltration et à la rétention des eaux de pluie et à une perte en micro-organismes jouant un rôle essentiel dans la fixation de l'azote nécessaire aux végétaux

supérieurs. Le mécanisme de la mise en suspension des poussières a été étudié par un grand nombre de chercheurs. des études portant sur le calcul du flux horizontal de particules dans des zones de génération de poussières. Elles montrèrent que ce flux est proportionnel au cube de la vitesse de friction du vent au sol.

Un modèle plus récent de calcul du flux de poussières et de la vitesse-seuil, établi sur la paramétrisation de la granulométrie des sols et la partition de l'énergie entre la fraction de surface érodable et les obstacles, a été proposé par Marticorena et al. Ils ont montré que la production du flux de poussières dépend principalement de la force de cisaillement et de la vitesse seuil, deux grandeurs fortement liées à l'état de surface.

V.9. Le taux et l'amplitude de l'érosion éolienne

Le taux et l'amplitude de l'érosion éolienne sont contrôlés par les facteurs suivants [38] :

V.9.1. Susceptibilité du sol à l'érosion

Le vent peut mettre en suspension de très fines particules et les transporter sur de grandes distances. Les particules moyennes et fines peuvent être soulevées et redéposées alors que les grosses particules peuvent être soufflées en surface (saltation). L'abrasion qui en résulte peut réduire la dimension des particules de sol et augmenter d'autant sa susceptibilité à l'érosion.

V.9.2. La rugosité de la surface

Les sols à la surface non rugueuse offrent très peu de résistance au vent. Toutefois, avec le temps, les rugosités peuvent se combler et s'aplanir par abrasion. Ceci résulte en une surface lisse, plus susceptible au vent. Un travail excessif du sol peut contribuer à briser la structure du sol et ainsi augmenter l'érosion.

V.10. La vitesse de friction

La vitesse de friction et la hauteur de rugosité sont des paramètres clés pour évaluer les émissions. L'érosion éolienne est la mise en mouvement des grains sous l'action du vent. Ce phénomène est contrôlé par deux paramètres principaux :

- L'énergie apportée par le vent à la surface ;

- Le seuil minimal de mobilisation des particules libres du sol, ou seuil d'érosion en conditions lisses.

L'énergie disponible est du domaine des interactions atmosphère/surface, à travers la force de cisaillement du vent ($\hat{o}$), et la résistance à l'arrachement est du domaine des propriétés de surface des sols : type de surface, encroûtement et humidité, taille, nature et densité des particules. La tension de cisaillement du vent est fonction de la vitesse de friction U^* :

$$\hat{o} = \tilde{n} \cdot U^{*2} \quad (V.1)$$

$\hat{o}$: la force de cisaillement du vent

U^* : vitesse de friction

$\tilde{n}$: constante des propriétés de surface

V.11. Mouvement d'un grain de sable

V.11.1. Mouvement de reptation et de saltation

Le vent en soufflant sur un lit de sable, est capable de mettre en mouvement certains grains. Il peut donc éroder la surface et influencer le relief. Réciproquement, si le relief de la dune est assez important, la structure de l'écoulement aérien peut être fortement modifiée [39].

Comment fait le vent pour déloger des grains de sable ? Comment fait-il pour transporter des grains sur plusieurs centaines de kilomètres, pour ensuite les déposer ? Simplement car comme tout fluide, l'air exerce une force sur les grains. Si elle est assez forte, elle peut dépasser le poids d'un grain et donc le soulever. Bien sûr, tous les grains ne volent pas, et parfois le vent est seulement capable de les pousser sur le sol : ils roulent ou sautillent, c'est ce qu'on appelle le mouvement de Réptation ou traction. De tels grains sont aussi appelés reptons. Si le vent souffle assez fort, les reptons peuvent, à la faveur d'un choc contre un grain ou d'une fluctuation de vitesse du vent, être élevé un peu plus dans l'air. D'une dizaine de centimètres au plus. Là l'écoulement de l'air est plus rapide et le grain est accéléré par le vent. Cependant, la gravité jouant son rôle comme d'habitude, le grain n'a d'autre choix que de retomber sur le sol. Lors du choc, le grain rebondit et est capable de remonter assez pour être de nouveau accéléré et de continuer le même mouvement. C'est ce qu'on appelle la Saltation, les grains s'appelant alors des saltons (voir figure 7).

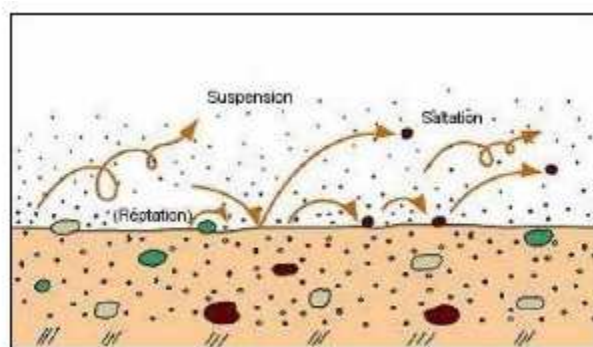


Fig .V.7 : Mouvement du sable

Au total, entre les reptons et les saltons, le vent transporte du sable, ce qui définit un flux de sable (un nombre de grains qui traversent une surface unité pendant une seconde). Lorsque le vent transporte autant de grains que possibles, on parle de flux saturé. Cette saturation est "obligatoire": déplacer des grains de sables coûte de l'énergie et évidemment l'énergie dont dispose le vent est limitée. Remarquons au passage que les gros grains, plus lourds, sont plus difficile à déplacer et donc que le transport éolien a tendance à trier les grains de manière sélective. Dans le désert, on trouve en général des grains de sable qui ont un diamètre de l'ordre de 250 μm . Il y a eu de nombreuses expériences à propos des deux types de mouvement et de leurs différences. Il en ressort, que les reptons sont bien plus nombreux que les saltons, mais qu'ils vont moins vite. Le flux de reptons est alors de l'ordre d'une fraction du flux de saltons. De plus, logiquement, plus le vent est fort, plus le flux de sable augmente.

En ce qui concerne les saltons, notamment, les multiples recherches ont permis de dégager les caractéristiques suivantes : La longueur d'un saut d'un saltons, appelée longueur de saltation est de l'ordre du mètre pour un vent moyen de l'ordre de 5 m/s à 10 cm du sol. L'angle que fait la trajectoire avec l'horizontal lors de l'impact est de l'ordre de 10 degré et fluctue peu. Ce dernier point est important. En effet suivant la valeur de cet angle, le choc est plus ou moins violent et l'énergie du choc se transmet plus ou moins bien aux grains immobiles en surface. Ainsi, plus l'angle d'impact est important plus la transmission de quantité de mouvement aux futurs reptons se fait bien. Ainsi, le flux de reptons varie selon l'angle d'incidence des saltons. C'est ce phénomène qui permet d'appréhender simplement la création des rides de sables. Ces rides de sables s'étalent sur plusieurs mètres dans une direction perpendiculaire au vent et s'élèvent sur quelques centimètres tout au plus. Elles sont séparées entre elles d'une distance de l'ordre de la dizaine de centimètre.

V.11.2. Formation des dunes

Ces dernières se déplacent, sous l'action du vent, par saltation des particules sur le dos de la dune; elles viennent se déposer sur le front de la dune, soit par avalanche, soit parce qu'elles sont piégées par le tourbillon que fait le vent à l'avant de la dune. C'est ce qui cause la structure interne en laminae parallèles inclinées qui indique le sens du déplacement de la dune.

Le sable transporté par le vent s'accumule sous forme de dunes.

V.12. Impact

Nous nous intéressons aux aérosols d'origine désertique parce que l'érosion des sols, le transport et le dépôt de ces poussières ont des conséquences énormes sur l'homme et son environnement. Nous pouvons citer par exemple :

- + Le problème de la désertification dans les zones sources.
- + La possibilité d'engendrer des modifications climatiques.
- + L'enrichissement des zones puits.
- + La diminution de la visibilité et ses conséquences sur les moyens transports (Problème de transport aérien...).
- + Les dégâts causés par les tempêtes de poussières sur la jeune végétation, le bétail ou les constructions.
- + La contamination de l'eau potable et de la nourriture.
- +dégradation des Equipements et installations exposer a l'air libre.

Conclusion

Le vent de sable est un phénomène très fréquent dans le Sahara il se manifeste presque toute l'année dans les différentes régions. Une tempête de sable peut durer de quelque heurs à une

dizaine de jours. Et a un impact direct sur la vie des hommes et le bon fonctionnement des installations. Le sable et la poussière s'infiltrant partout et représente la principale source de pollution. L'érosion est une conséquence directe de l'association du vent et du sable et tous matériaux nuisent au bon fonctionnement des installations électriques et réduisent considérablement leurs fiabilités et ils subissent des dégâts considérables et les installations subissent de grave dégradation suite à ce phénomène.

*ETUDE DU COMPORTEMENT
D'UN ISOLATEUR SILICONE DANS UN
ENVIRENEMENT DESERTIQUE*

CHAPITRE VI

PARTIE EXPERIMENTALE

VI. Introduction

L'environnement où sont placés les isolateurs joue un rôle important dans leurs bons fonctionnements, la reproduction des mêmes conditions climatique ou laboratoire nous aide à mieux étudier tous les phénomènes qui peuvent altérer le bon fonctionnement de ces isolateurs.

Les phénomènes atmosphériques comme le vent de sable, ont une grande importance puisque ils permettent d'étudier en même temps l'impacte de la pollution sur le contournement de l'arc et la détérioration de la matière de l'isolateur.

Le phénomène essentiel étudié est la dégradation de la silicone suite à une exposition prolongée au vent de sable et la perte de ces caractéristiques électrique et physique.

VI.1 Techniques expérimentales**VI.1.1 Dispositif expérimental**

Les figures (VI.1 et VI.2) représentent le dispositif expérimental du laboratoire haute tension de l'université Abderrahmane Mira de Bejaïa. Il est constitué d'une cellule reproduisant les conditions climatiques du Sahara (tempête de sable) fig.VI.1, et d'une cellule d'essai AC/DC haute tension fig.VI.2.

VI.1.1.1 Dispositif expérimental reproduisant une tempête de sable

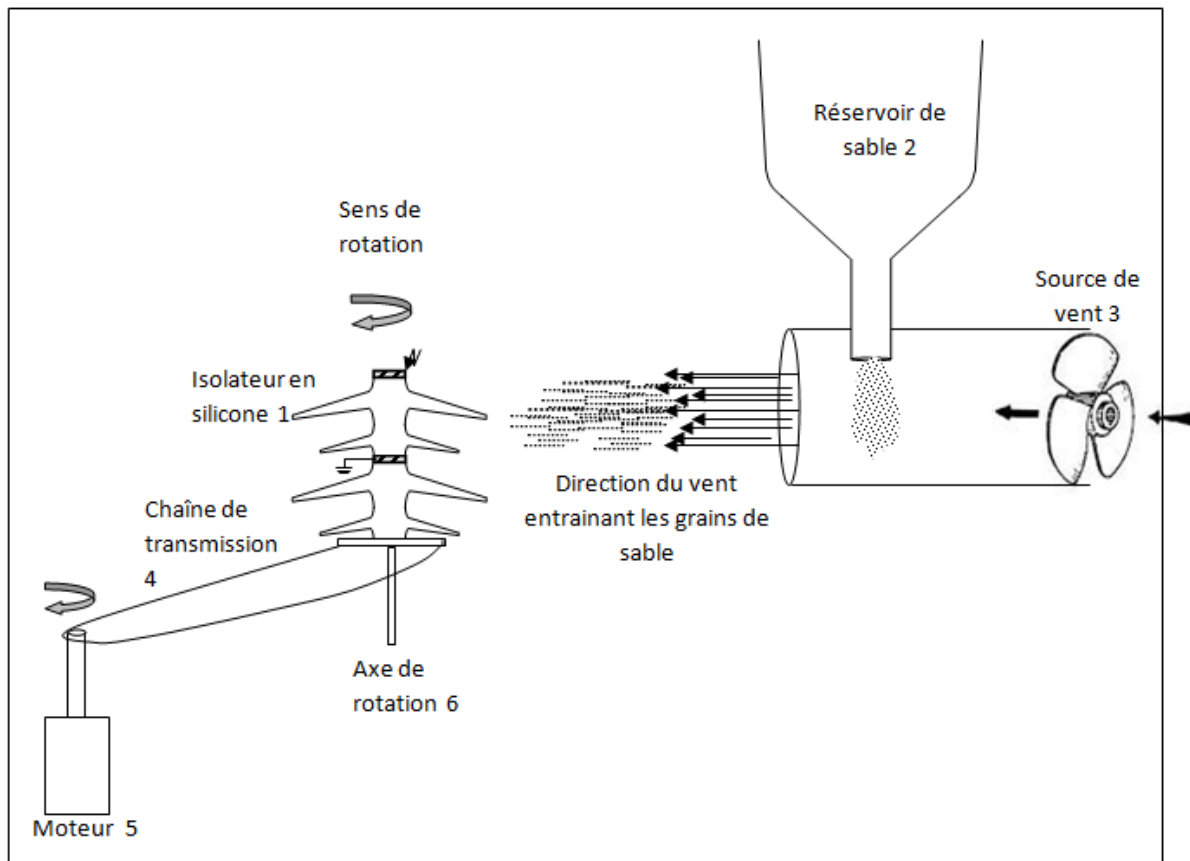
Le modèle expérimental est un échantillon composé de quatre ailettes d'un isolateur à long fût en silicone, dans notre étude on se limite aux deux ailettes supérieures.

Pour reproduire les mêmes conditions qu'une tempête de sable, une source de courant d'air projette des grains de sable qui coulent en chute libre d'un réservoir vers l'isolateur en essai.

Le diamètre des grains de sable et la vitesse d'écoulement d'air sont choisis pour reproduire les conditions extrêmes, auxquelles ils sont soumis les isolateurs en exploitation dans les régions désertiques.

Pour une homogénéisation de la projection de sable l'isolateur est maintenu en rotation avec une vitesse constante de 40 tr/min via un moteur à courant continu, ce mécanisme est logé dans une cellule fermée en verre.

VI.1.1.2 Dispositif expérimental d'essai



1-isolateur silicone.

2-réservoir de sable.

3-source de vent.

4-chaîne de transmission

5-moteur.

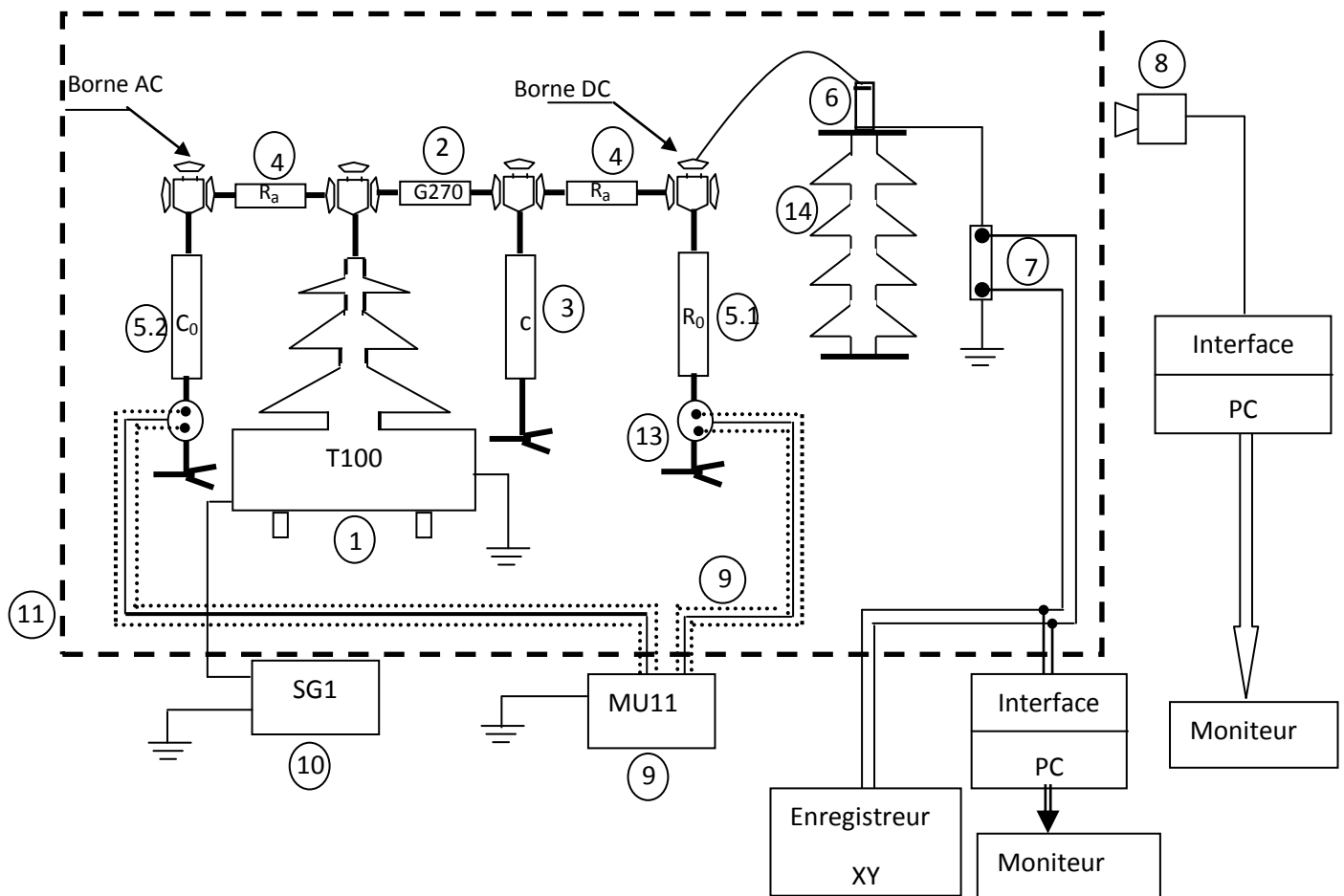
6-axe de rotation.

Fig. VI.1 : Dispositif expérimental de reproduction de vent sable

VI.1.2 Schéma électrique du dispositif expérimental :

La Fig.VI.2, représente le dispositif expérimental du laboratoire de haute tension de l'Université Abderrahmane Mira de Bejaia. Il est constitué essentiellement d'un circuit d'alimentation (transformateur 0,08A/135kV), d'un modèle expérimental (isolateurs d'essai), et d'un dispositif de mesure. Suivant la nature de la tension, le modèle expérimental peut être connecté aux bornes DC et AC.

Le dispositif expérimental répond aux exigences de la publication CE160/1/ [82].



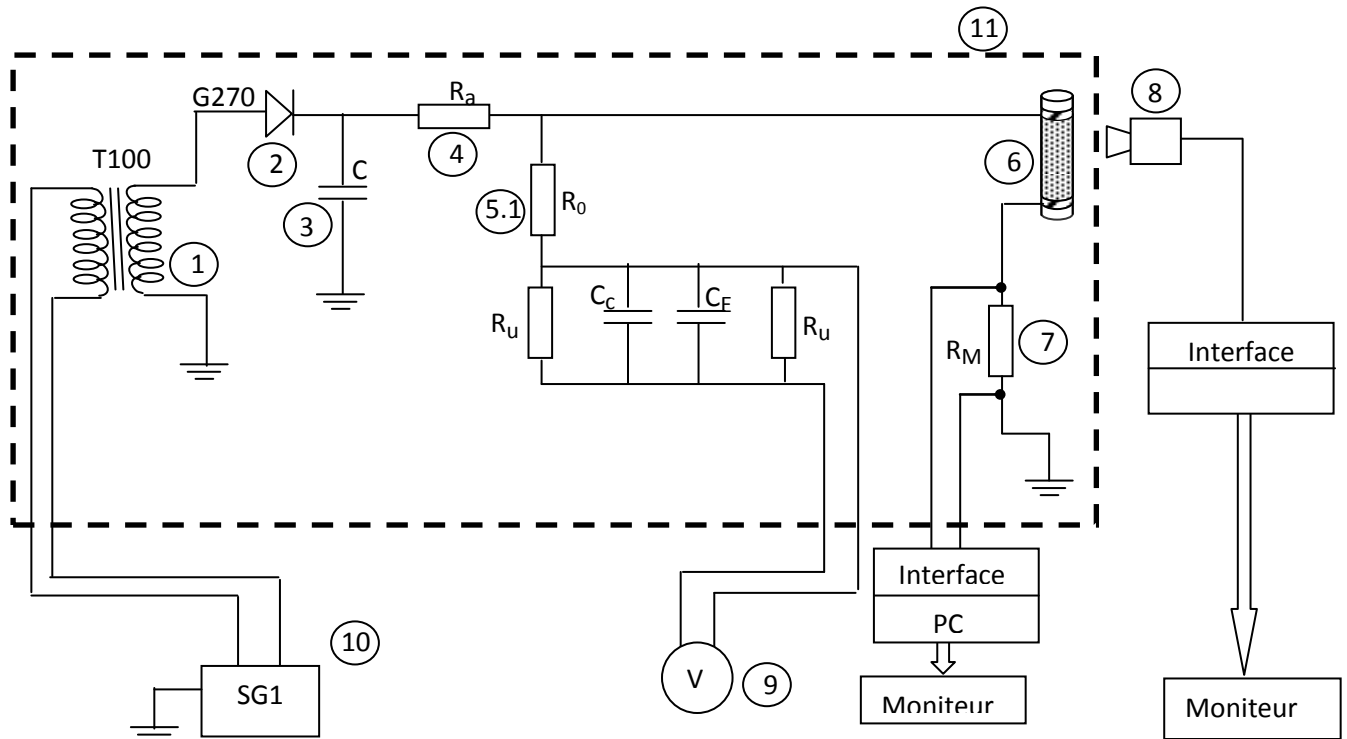


Fig.VI.2 Schéma réel et électrique du dispositif expérimental

L'équipement de la station d'essai est schématisé sur la figure VI.2 :

- 1 : (T100) Transformateur 0,08 A/135kV ;
- 2 : (G270) Diode haute tension ;
- 3 : (C) Capacité de filtrage : 10 nF ;
- 4 : (Ra) Résistance d'amortissement : 160k Ω ;
- 5.1 : (R0) Résistance haute tension du diviseur résistif : 250M Ω ;
- 5.2 : (C0) Capacité haute tension du diviseur capacitif ;
- 6 : Objet d'essai ;
- 7 : (RM) Résistance de mesure : 100 Ω ;
- 8 : Caméscope ;
- 9 : (MU11) Voltmètre de crête ;

10 : (SG1) Commande de l'alimentation du transformateur ;

11 : Cage de Faraday ;

12 : Enregistreur XY (oscilloscope à mémoire ou table traçante) ;

13 : Connecteur ;

14 : Support isolant (isolateur à ailettes) ;

C_E : Capacité d'entrée de MU11 $\leq 50\text{pF}$;

C_C : Capacité du câble coaxial ;

R_N : Résistance basse tension, elle est équivalente à $(R_U//R_E)$;

R_E : Résistance d'entrée de MU11 : $4,24\text{M}\Omega$;

R_U : Résistance basse tension (résistance du connecteur et câble coaxial) ;

VI.1.3 Mode opératoire

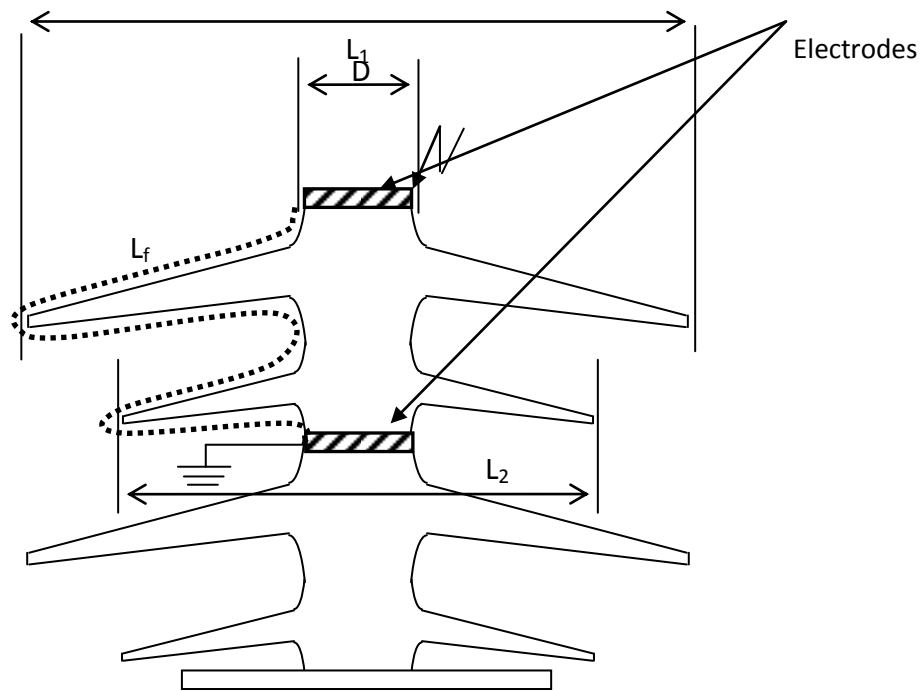
Le sable coule avec un débit $0.6 \text{ cm}^3/\text{s}$ à travers une tuyauterie pour arriver à l'embouchure du dispositif de projection. Le grain de sable est accéléré horizontalement pour enfin bombarder la surface externe de notre isolateur en rotation autour d'un axe vertical et cela pendant 68 heures.

VI.1.4 Modèle expérimental

Le modèle expérimental est un échantillon d'un isolateur à long fût à ailettes en silicone.

On a limité notre étude aux deux ailettes supérieures où les limitations imposées par le circuit d'alimentation (la tension d'essai et le courant maximal).

Ces deux ailettes sont munies de deux électrodes en aluminium, solidement fixées sur les troncs. Sur ces électrodes seront serrées ensuite des bagues pour assurer un bon contact avec la surface du tronc.



L_1 Diamètre de l'ailette supérieur (140mm)

L_f Ligne de fuite de l'isolateur (225mm)

L_2 Diamètre de l'ailette inférieur (122mm)

D Diamètre du tronc (30mm)

Fig. VI.3 Modèle expérimental

VI.1.5 Circuit de mesure de la tension appliquée

La tension d'essai est mesurée à l'aide d'un diviseur de tension résistif relié à un voltmètre de crête, ce diviseur est constitué d'une résistance de haute tension ($R_0=250 \text{ M}\Omega$) en série avec un ensemble de résistances dont les résistances des connexions, résistance du câble coaxial et la résistance d'entrée des appareils de mesure, il permet de diviser la tension réelle de contournement par 556 dans le cas de tension continue positive et négative et à l'aide d'un diviseur de tension capacitif dans le cas de tension alternative le rapport de division est de 403.

Le voltmètre de crête à affichage numérique permet la lecture de la tension de contournement réduite en la mémorisant automatiquement pendant quelques secondes.

VI.1.6 Procédé d'essai

Après préparation de l'objet d'essai, nous procédons à la mesure de la tension de contournement alternative, continue positive et continue négative de l'isolateur vierge (non érodé et propre). La valeur de la tension de contournement retenue est la moyenne arithmétique de dix essais.

VI.2 Résultats d'essai et interprétations

L'isolateur utilisé pour effectuer les tests dans la présente étude fig.VI.4 est de type silicone. La raison d'utilisation de ce type d'isolateur est d'abord son entré remarquable dans le marche algérien des isolateurs de type extérieur, ainsi que pour ces caractéristiques électrique et mécanique.

Quant à la technique expérimentale on a suivi les étapes suivantes :

Initialement l'isolateur vierge à été analysé au microscope optique (MO), et aussi au microscope électronique à balayage (MEB) et on a effectué aussi, différents tests relatifs à son état de surface. Des tests électriques on été réalisés sur le même isolateur vierge sous différentes contraintes (alternative et continue).

VI.2.1 Analyses physiques

La figure VI.4 représente l'image en perspective de notre isolateur étudiée l'état vierge, on remarque que notre isolateur est sain de surface uniforme et sans imperfections.

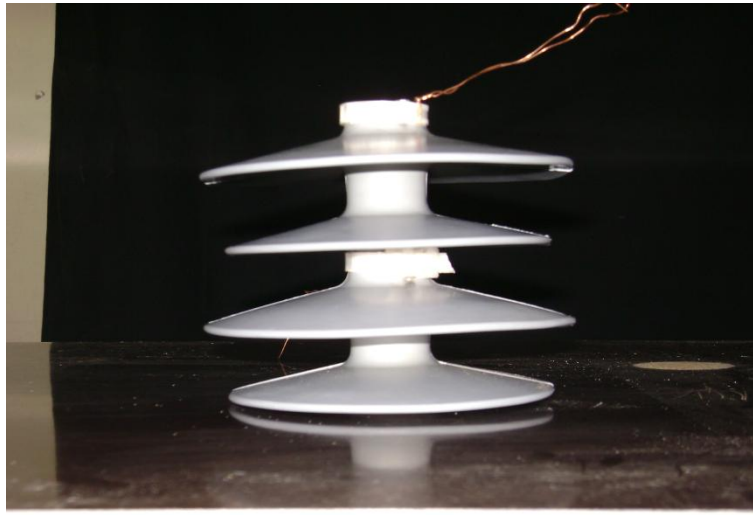


Fig. VI.4 Image de profile de l'isolateur

L'image de la figure VI.5 montre l'état de surface de l'isolateur échantillon, à l'œil nu on voit que la surface est homogène.



Fig. VI.5 Surface de l'isolateur

L'isolateur propre et sec est pulvérisé avec de l'eau distillée à l'aide d'un pulvérisateur qui atomise l'eau à de très fines gouttelettes, qui en se déposant sur la surface de l'isolateur elles

s'unissent pour former de grosse gouttes. On remarque sur la figure.VI.6 que l'eau ne couvre pas toute la surface mais reste sous forme de perles en surface figure.VI.7, et fig. VI.9 cette propriété est appelée hydrophobicité.

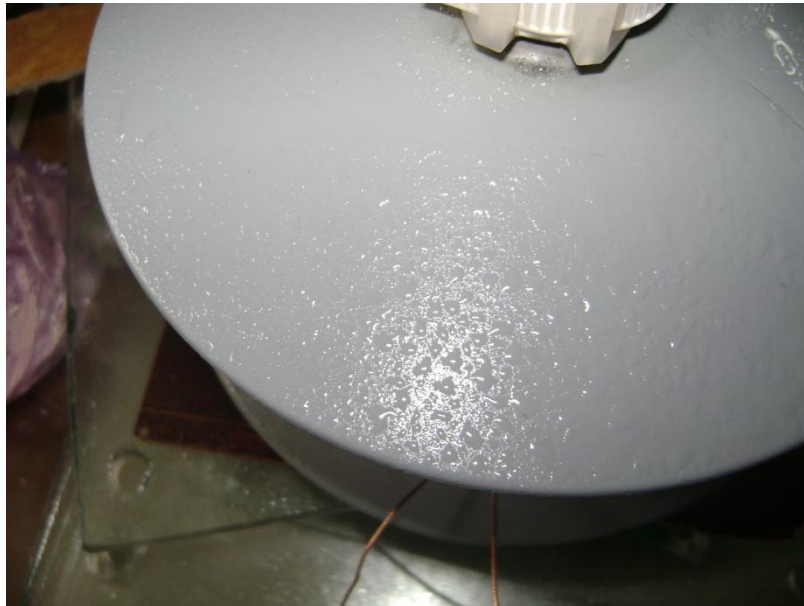


Fig. VI.6 Isolateur humidifier

Sur les figures VI.8 et VI.8 il est mis en évidence la forme de perle des gouttes d'eau (grand angle de contact).

La mesure d'angle de contact rend compte de l'aptitude à s'étaler sur une surface par mouillabilité. La méthode consiste à mesurer l'angle de la tangente du profil d'une goutte déposée sur le substrat. Elle permet de mesurer l'énergie de surface du solide. La mesure de l'angle de contact permet d'accéder à l'énergie libre d'une surface. Elle permet ainsi de déduire le caractère hydrophobe ou hydrophile d'une surface. Si on utilise l'eau comme liquide de mesure d'angle de contact, on peut déduire le caractère hydrophobe (grand angle θ , faible énergie de surface) ou hydrophile (petite angle θ , grande énergie de surface).

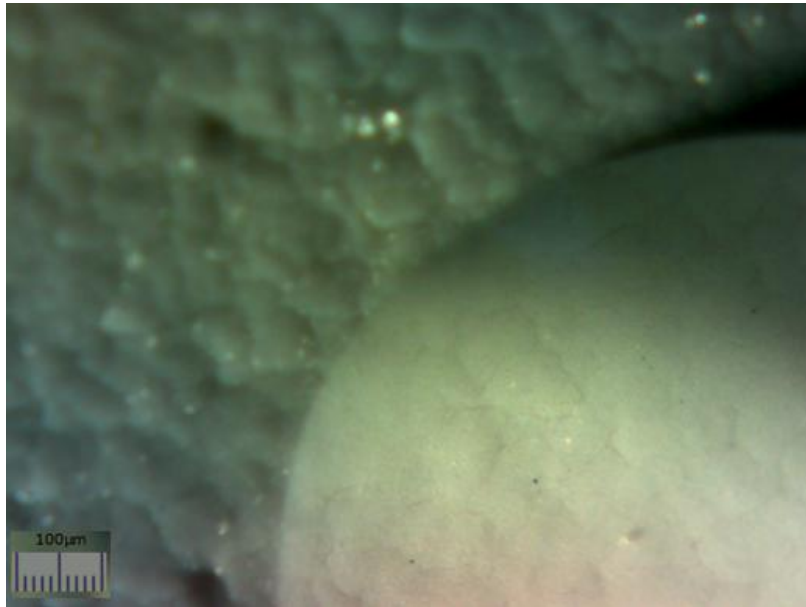


Fig. VI.7 Goutte d'eau sous forme de perle

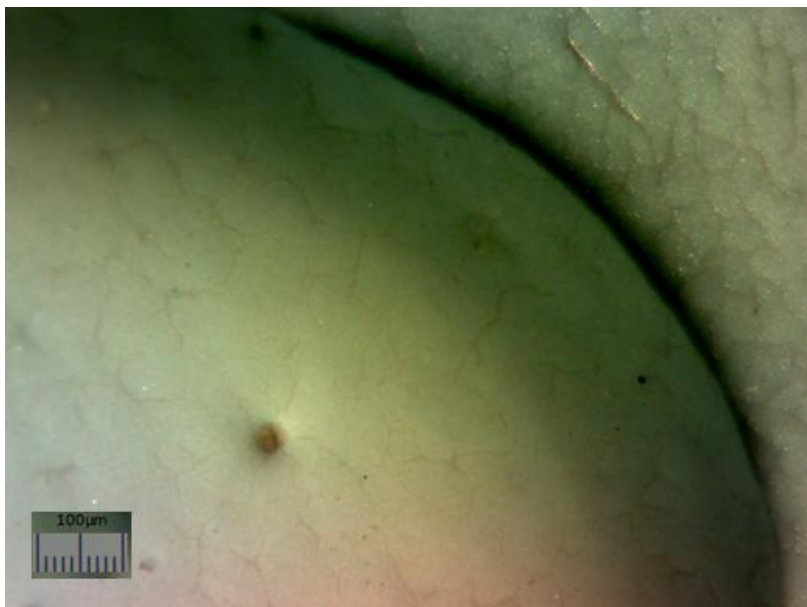


Fig. VI.8 Goutte d'eau sous forme de perle

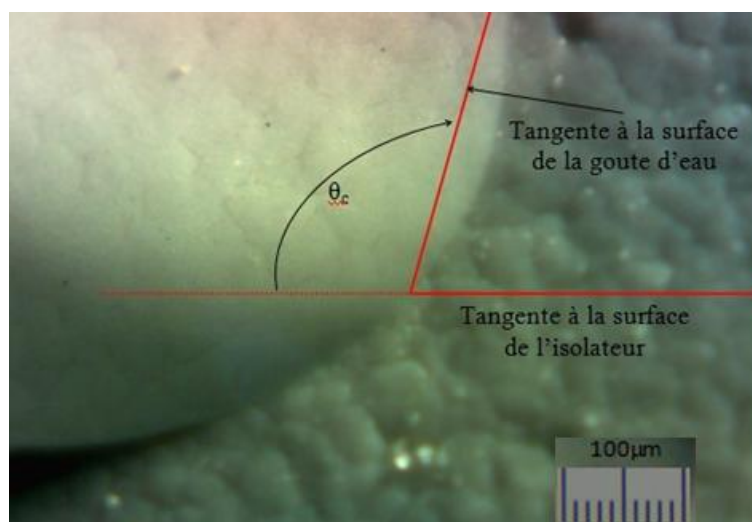


Fig.VI.9 Angle de contact

La fig. VI.10 et fig. VI11 représentent la surface vierge de notre isolateur.

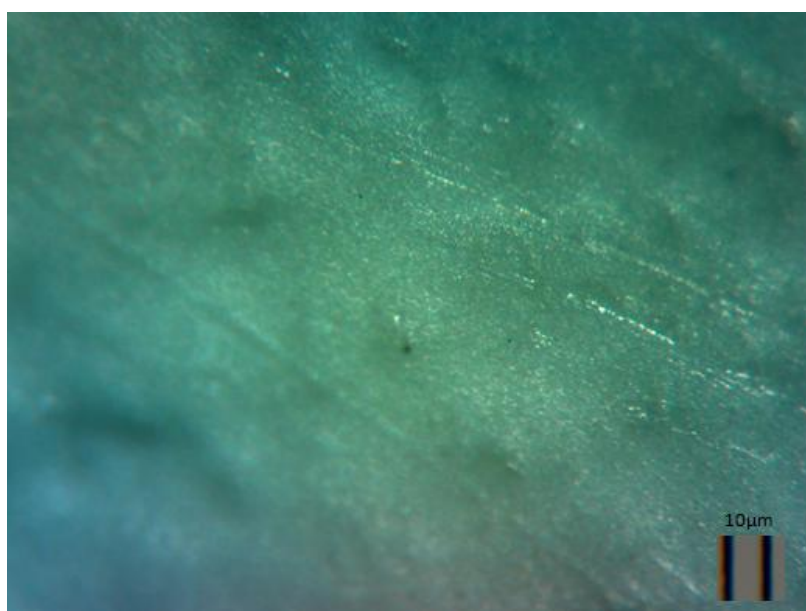


Fig. VI.10 Surface de l'isolateur vierge sous microscope optique



Fig. VI.11 Surface de l'isolateur vierge sous microscope optique

Sur la figure VI.14 et figure VI.15 on remarque l'irrégularité de la surface de notre isolateur en silicone. Ces irrégularités ont un impacte direct sur l'accumulation de la pollution sur sa surface et ces irrégularités à long terme produisent des raies de pollution qui peuvent provoquer des contournements.

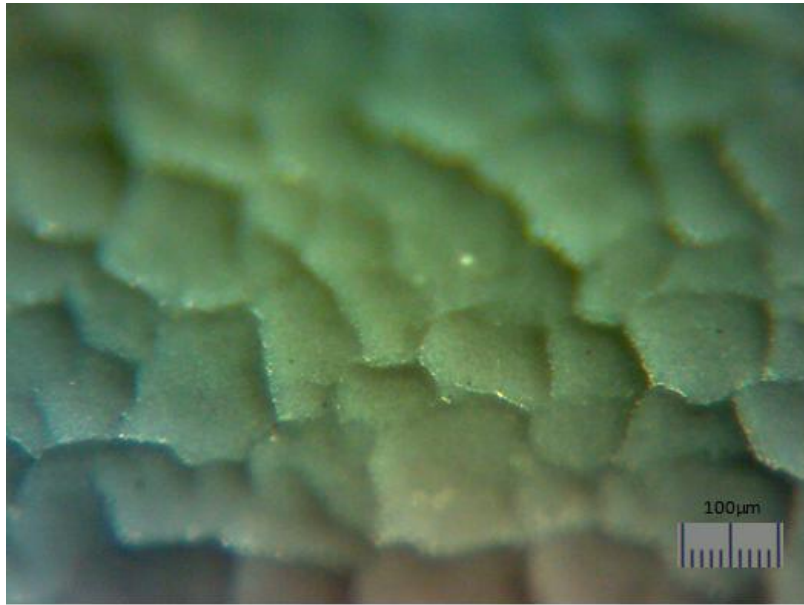


Fig. VI.12 Vue de la surface de l'isolateur sous microscope optique

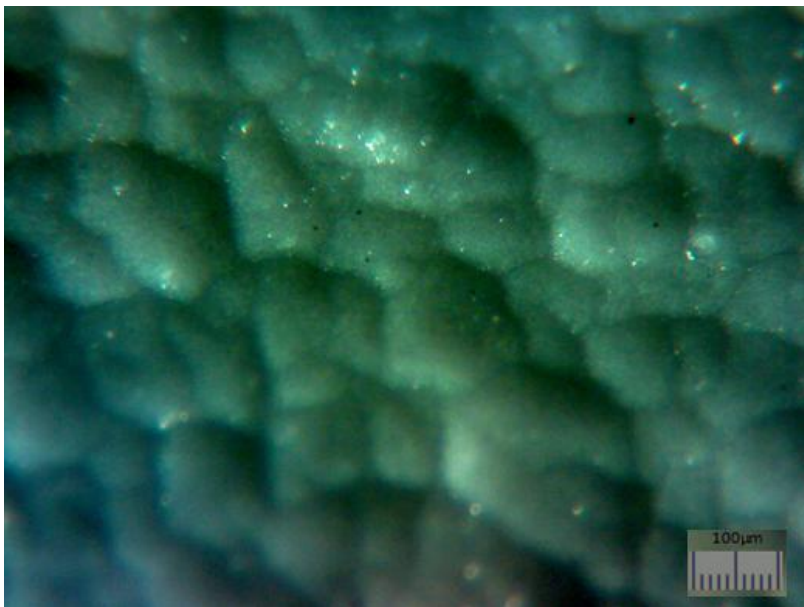


Fig. VI.13 Vue de la surface de l'isolateur sous microscope optique

Les figures VI.14, VI15 et VI16 sont des images prise avec un microscope électronique à balayage (MEB). Elles nous montrent l'état de surface de l'isolateur silicone, on remarque bien la surface uniforme et il n'ya pas d'arrachement de matière.

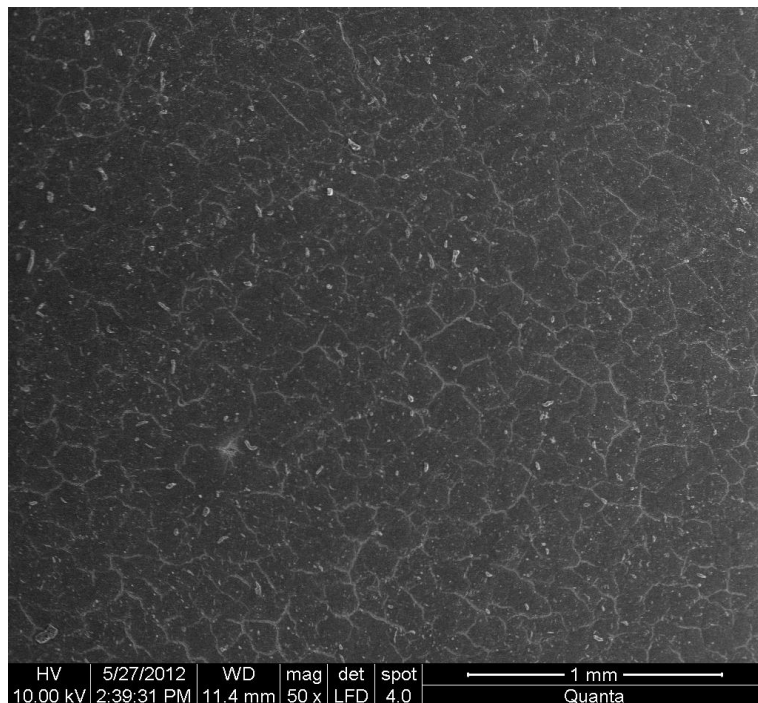


Fig. VI.14 Image de la surface sous MEB

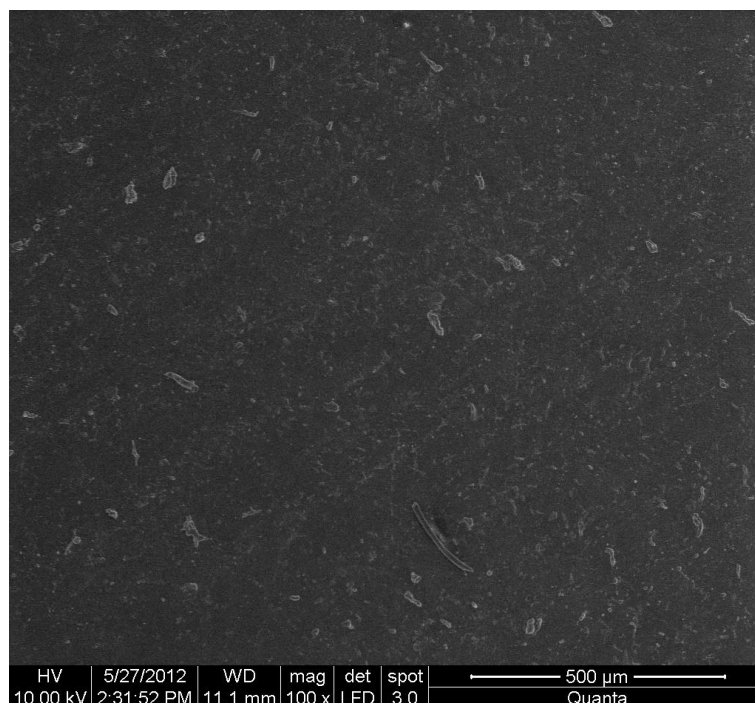


Fig. VI.15 Image de la surface sous MEB

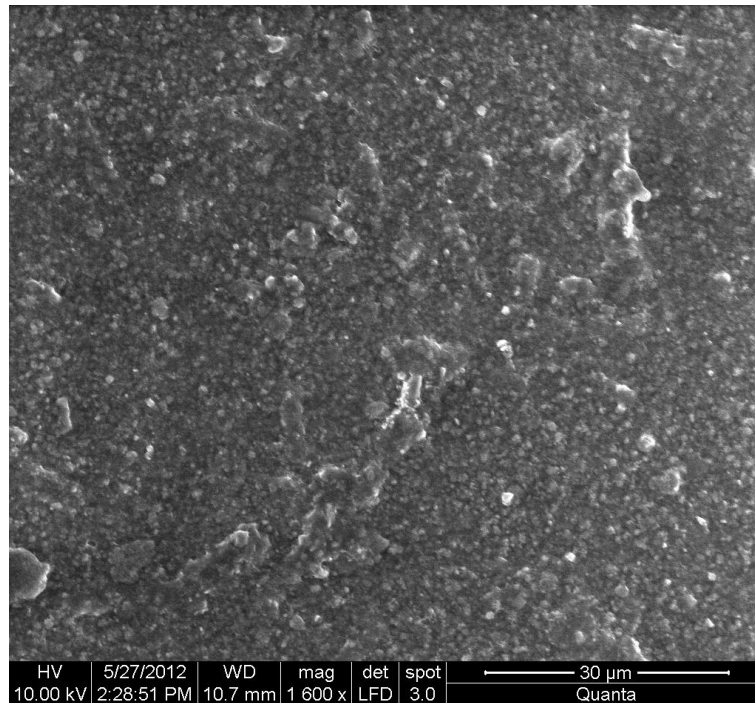


Fig. VI.16 Image de la surface sous MEB

Après avoir exposé notre isolateur silicone aux conditions désertiques (vent de sable et poussière) on a pris des images de son état de surface :

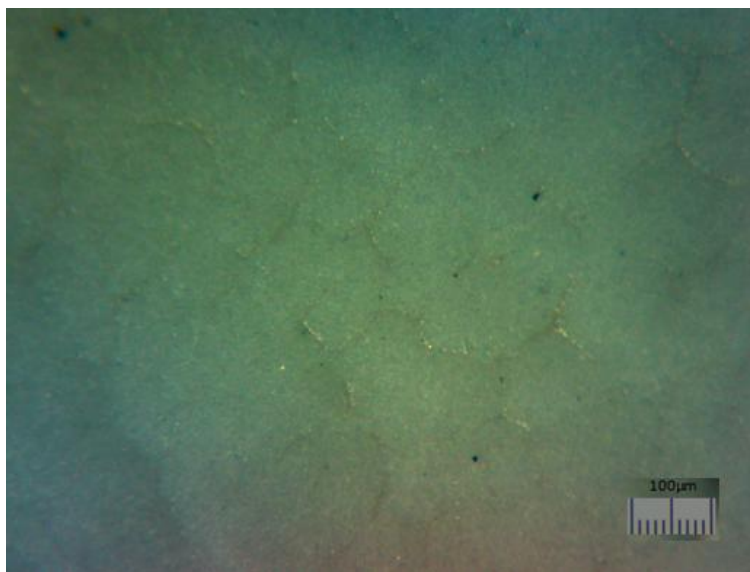


Fig. VI.17 Image de la surface après exposition au vent de sable (sous MO)

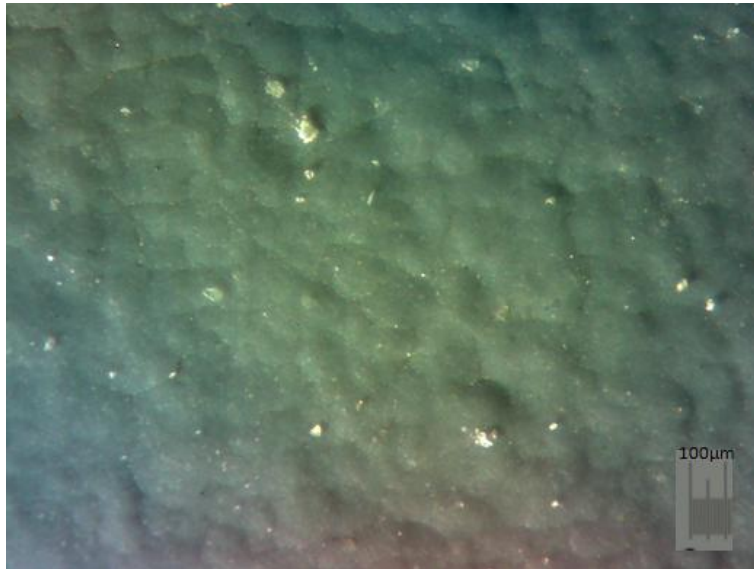


Fig.VI.18 Image de la surface après exposition au vent de sable (sous MO)

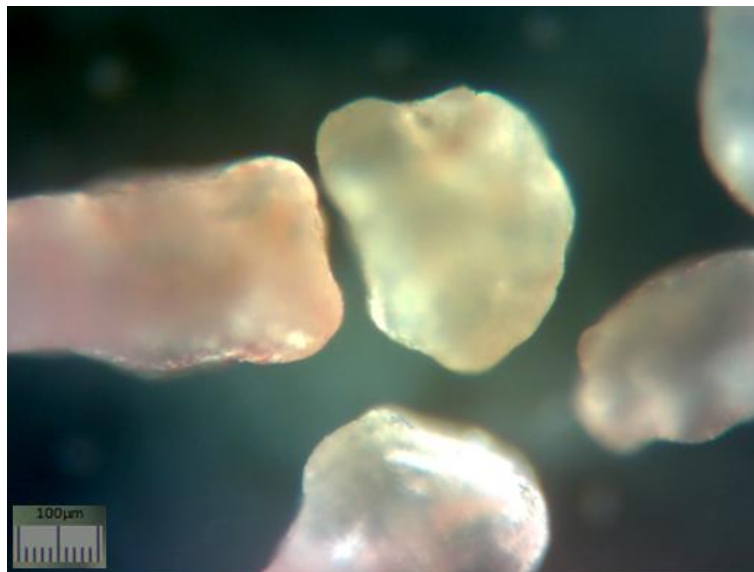


Fig.VI.19 Grains de sable sur l'isolateur (MO)

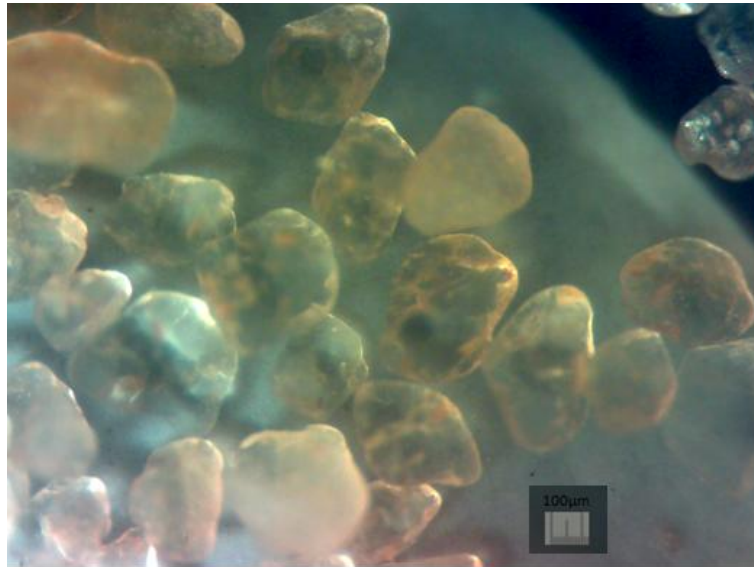


Fig.VI.20 Grains de sable à l'intérieur d'une goutte d'eau

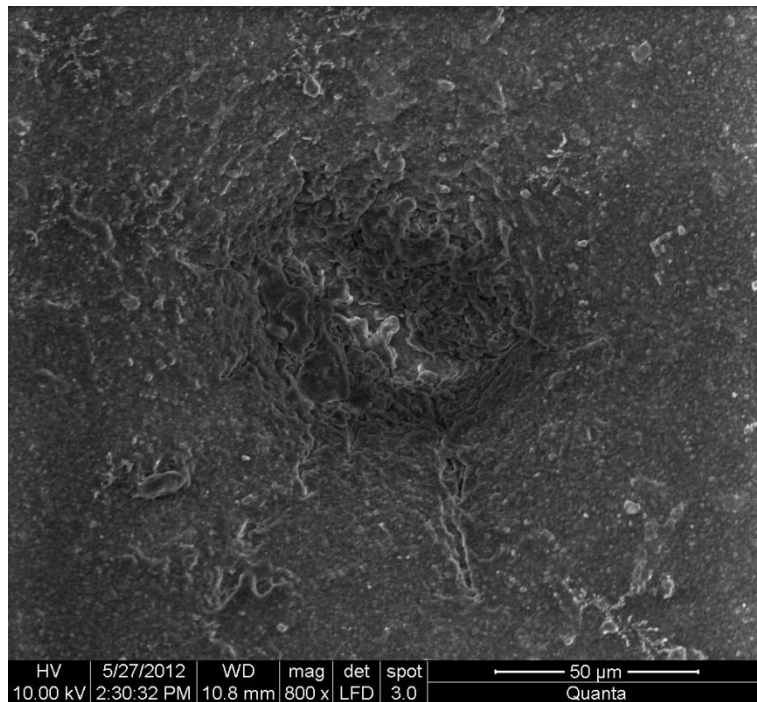


Fig.VI.21 Arrachement de matière

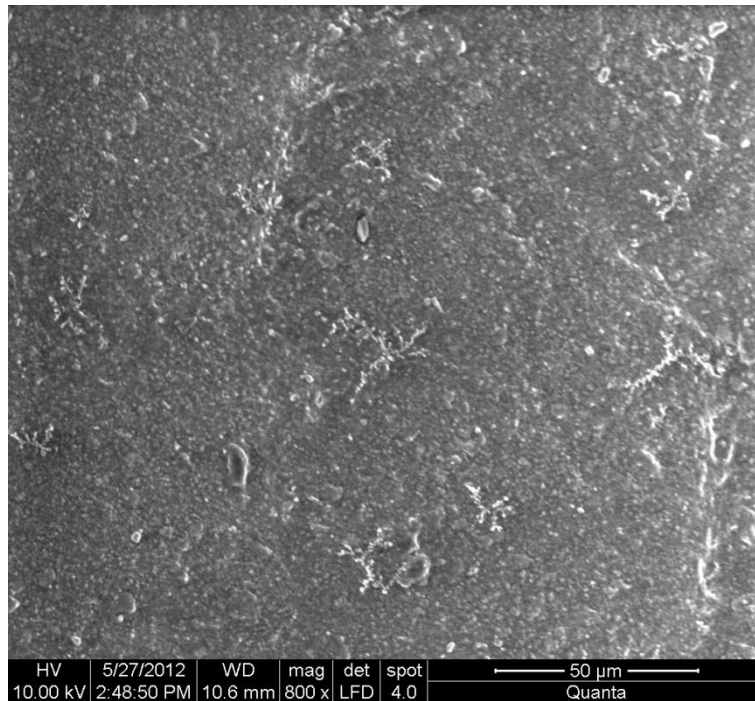


Fig.VI .22 Formation d'arborescences

Après exposition au vent de sable de taille variant de 100 à 500 μ m (fig.VI.19 et fig. VI.20) et à la poussière on remarque une détérioration de sa surface comme le montre la figure VI.17, avec effacement des alvéoles due au phénomène d'érosion provoqué par le vent et le sable. Si on fait une comparaison entre la figure VI.18 et la figure VI.13 on remarque bien cette détérioration, ce phénomène d'usure provoque une perte des caractéristiques physiques de l'isolateur silicone et une diminution des ses performances.

VI.2.2 Analyses électriques

VI.2.2.1 Tension de contournement

Les paramètres prisent en compte lors des essais expérimentaux réalisés sont ceux liés à un vent de sable sec, et à un vent de sable sur un isolateur humide pour simuler la condensation matinale ou une pluie qui humidifie la surface de l'isolateur.

VI.2.2.2 Procédé d'essai

Le dépôt polluant est réalisé comme suit :

- Sur la surface supérieure de la première ailette de l'isolateur on pulvérise à l'aide d'un pulvérisateur de très fine gouttelettes d'eau distillé.

- Puis une simulation de vent de sable est réalisée à l'aide du dispositif expérimental de la figure VI.1. La mise sous tension est débutée après formation d'une couche de sable d'environ 1mm d'épaisseur qui correspond à la saturation de la couche (la saturation est atteinte lorsque la quantité du sable déposée est égale à celle arrachée par érosion) il a été gardé durant tous les essais la même méthode d'humidification et le temps d'attente avant la mise sous tension.

L'isolateur est soumis à une tension qui augmente progressivement à partir de zéro avec une vitesse de montée de la rampe de tension de l'ordre de 4kV/s jusqu'au contournement de l'isolateur. La valeur retenue est la moyenne de dix essais.

Le tableau Tab.VI.1 représente la tension de contournement exprimée en kV de l'isolateur propre est sec. On remarque que l'isolateur est plus rigide dans le cas où la tension appliquée est continue positive. La tension de contournement est plus faible dans le cas alternatif.

Le tableau Tab.VI.2 représente la tension de contournement de l'isolateur érodé sous vent de sable, on remarque une légère diminution de la tension de contournement dans les trois cas de tensions appliquées (continue positive, continue négative et alternative).

Ce qui nous mène à dire que le sable sec a une très faible influence sur l'isolateur sec.

Les figure VI.21 et VI.22 montrent la dégradation de l'état de surface l'isolateur suite à une longue exposition au vent de sable (arrachement de matière sur la fig.VI.22) et suite au passage des arcs électriques (formation de canaux sous forme d'arborescence et fonte de matière).

Ce qui conduit à une surface moins uniforme qui favorise l'adhésion de la pollution.

La figure VI.15 montre la formation d'une couche d'environ 1 mm d'épaisseur qui s'adhère à la surface de l'isolateur.

Le tableau VI.3 montre la tension de contournement de l'isolateur érodé et humide sous vent de sable, on remarque que la tension de contournement a chuté considérablement. Elle est d'environ 29% plus faible dans le cas de tension continue positive.



Fig.VI.23 Contournement de l'isolateur sec sous vent de sable (tension continue)



Fig.VI.24 Contournement de l'isolateur sec sous vent de sable (tension alternative)

N°d'essai	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Moyenne
Tension continue de contournement (kV/cm) (Polarité positive)	4,36	4,40	4,36	4,38	4,40	4,36	4,44	4,40	4,40	4,44	4,39
Tension continue de contournement (kV/cm) (Polarité négative)	3,98	4,17	4,08	3,99	3,88	3,83	4,00	4,14	3,96	3,95	4,00
Tension alternative de contournement (kV/cm)	3,78	3,81	3,63	3,74	3,76	3,68	3,79	3,82	3,82	3,87	3,77

Tab. VI.1 Tension de contournement de l'isolateur vierge, propre et sec

N°d'essai	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Moyenne
Tension continue de contournement (kV/cm) (Polarité positive)	4,05	4,11	4,20	4,13	4,32	4,28	4,30	4,34	4,32	4,36	4,24
Tension continue de contournement (kV/cm) (Polarité négative)	3,82	3,88	3,76	3,84	3,82	3,84	3,87	3,73	3,80	3,85	3,82
Tension alternative de contournement (kV/cm)	3,51	3,51	3,63	3,62	3,66	3,60	3,55	3,64	3,64	3,69	3,61

Tab. VI.2 Tension de contournement de l'isolateur érodé sous vent de sable sec

La figure suivante représente la formation de la couche de sable sur la face supérieure de la première ailette l'isolateur humide soumis au vent de sable.



Fig. VI.25 Accumulation d'une couche de sable sur la surface d'un isolateur humide



Fig. VI. Contournement de l'isolateur humidifié sous vent de sable (tension continue)



Fig.VI.26 Contournement de l'isolateur humidifié sous vent de sable (tension alternative)

Les valeurs de la tension de contournement de l'isolateur érodé après formation d'une couche de sable sur sa surface sont données par le tableau Tab. VI.3 suivant :

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	moyenne
Tension continue de contournement (kV/cm) (Polarité positive)	3,11	3,09	3,00	3,08	2,98	2,96	3,07	3,24	2,81	2,91	3,03
Tension continue de contournement (kV/cm) (Polarité négative)	2,89	2,88	2,95	2,93	2,98	2,96	2,92	2,89	2,95	2,89	2,92
Tension alternative de contournement (kV/cm)	2,49	2,54	2,56	2,49	2,65	2,76	2,71	2,83	2,81	3,02	2,69

Tab. VI.3 Tension de contournement de l'isolateur érodé sous vent de sable humidifié

VI.3 Conclusion

Les résultats obtenus lors de l'étude de l'influence de l'exposition prolongée au vent de sable et à la poussière désertique sur la surface d'un isolateur en silicone soumis à une tension continue et alternative nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

- l'isolateur propre et sec est plus rigide qu'un isolateur pollué quelle que soit la tension appliquée.
- La surface de l'isolateur a été altérée sous l'effet de l'érosion du vent de sable.
- la configuration non uniforme de la pollution présente une tension de contournement minimale qui représente le critère de dimensionnement de l'isolateur sous des conditions de pollution réelles (pollution non uniforme).
- la tension de contournement en polarité négative est moins élevée que celle en polarité positive pour différents états (état vierge sec, érodé sec et sous humidité).

CONCLUSION GENERALE

Ce travail nous a permis d'abord de mieux comprendre le comportement d'un isolateur silicone à ailette dans un énervement désertique.

L'objectif principal était l'étude de l'état de surface de l'isolateur silicone suite à une exposition à un vent de sable et de la poussière désertique et sa rigidité diélectrique sous tension continue (polarité positive et négative) et tension alternative dans un environnement sec et humide.

Dans un premier temps, nous avons fait une étude préliminaire des performances d'un isolateur silicone vierge soumis à une tension continue et alternative et son état de surface, après l'avoir soumis aux mêmes conditions climatiques qu'au Sahara pendant un temps bien déterminée.. Les résultats émanant de cette étude peuvent être résumés comme suit :

- Diminutions de ses caractéristiques physiques, notre isolateur est devenu hydrophile.
- La tension de contournement diminue avec l'exposition prolongée au vent de sable.
- Arrachement et fonte de matière suite à l'érosion provoquée par les grains de sable projeté sur l'isolateur.

RECOMMANDATIONS POUR LES TRAVAUX FUTURS

Les résultats obtenus au cours de cette recherche ont contribué à la compréhension du comportement physique diélectrique des isolateurs soumis à un environnement désertique. Les résultats ont permis de mettre en évidence quelques autres aspects qui méritent une analyse détaillée, ouvrant ainsi des possibilités à de nouvelles perspectives afin de compléter ce sujet d'étude. Ainsi, les recommandations qui suivent pourront être utiles aux futurs travaux:

- Des études plus approfondies sur : l'influence de la poussière désertique comme source de pollution et son impacte sur la tenue diélectrique des isolateur.
- La simulation par des méthodes numérique, afin de déterminer de façon précise la distribution des grains de sable sur la surface de l'isolateur.

Références Bibliographiques

- [1] **M.NEMAMCHA**, polycopie de cours «Claquage des isolants haute tension»,2001.
- [2] **A.CHABLOZ**, «Technologie des matériaux à l'usage des professions de l'électricité », 1986.
- [3] **X.DUCOURET**, «Lignes aériennes : matériels », Techniques de l'ingénieur, D4423.
- [4] **Microsoft ®Encarta® 2006.© 1993-2005 Microsoft Corporation.**
- [5] **TECHNIQUE DE L'INGENIEUR**, «1S, D4, partie I»
- [6] «propriétés des isolants », Techniques de l'ingénieur, E1820.D155 ; D214 ; K712.
- [7] **Philippe ROBERT**, «matériaux de l'électrotechnique» édition Georgie1979.
- [8] **F.AMIR, KH.NAMAOU** mémoire d'ingénieur U.A.M de Bejaia, «étude du comportement d'un isolateur pollué soumis à une tension alternative », juin 2004.
- [9] **S.MEDJAHED, M.IBLAIDEN**, mémoire de fin d'étude DEUA en électrotechnique, «Etude de l'évolution temporelle de la sévérité de pollution d'un site » promotion 2005, université de Bejaia.
- [10] **F.ZEDAM, A.BOUCHOUCHA**, mémoire d'ingénieur, «étude comparative de la distribution du potentiel électrique dans l'isolateur chaîne par voie numérique et expérimentale », promotion2001, université FERHAT ABBAS-SETIF.
- [11] **Documentation Internet** [<http://www.hydro.québec.com>].
- [12] **Technique de l'ingénieur** .1S, D4, partie I.
- [13] **VIGER SOLANGE**, «pollution de l'environnement : risque et responsabilité » DEMOS, Sept 2000.

[14] Microsoft ®Encarta® 2006.© 1993-2005 Microsoft Corporation.

[15] Z.SAHLI, mémoire de magister «étude de la non uniformité de la pollution sur les caractéristiques de contournement des isolateurs réels pollués sous tension continue », promotion 2003, U. Bejaia.

[16] S. AITOUAKLI, Y.CHIBOUTI, mémoire de DEUA U.A.M de Bejaia «Evaluation du degré de pollution atmosphérique d'un site » promotion 2004.

[17] Documentation Internet [www.E – Santé. fr].

[18] R. BOUDISSA , and a. « effect of insulator shape on surface discharges and flashover under polluted conditions .» IEEE transactions on diélectriques and electrical insulation, vol.12, N°3, june 2005, pp.429-437.

[19] D.DUMORA, R. PARRAUD* «solutions apportées aux problèmes de pollution pour différents isolateurs en verre trempe et isolateurs en composite». 428 RP 99/ BC/MRG France.

[20] GROUPE D'ACTION 33.44.03*, «dispositifs de surveillance des isolateurs soumis à la pollution » Electra, n°152, février 1994.

[21] M. SFORZINI, «Cigre discussion group 33 », paris 1970, pp92-31.

[22] D. BARKA, H. ISKOUNENE, «détermination du degré de pollution d'un site ».

[23] F.AMIDI, OUERDANE, «les effets de la pollution sur les ouvrages électriques à 30KV en régions littorales ». Mémoire d'ingénieur, promotion 1998, USTH Bab- Ezzouar.

[24] GROUPE 33.04, «mesure de la sévérité de pollution des sites et application au dimensionnement des isolateurs pour les réseaux à courant alternatif » Electra, n°64,pp. 101-106,paris, 1979.

[25] A. MEKHALDI, «Etude des phénomènes de conduction et de décharge électrique sur des surfaces isolantes polluées sous tension alternative 50Hz ». Thèse de doctorat d'état, 1999,ENP ALGER

[26] **Groupe de travail 04 du Comité d'études n°33(Surtension et coordination de l'isolement). Rapport publie à la demande du président du comité M.K.H. SCHNEIDER »**comparaison critique des méthodes d'essais d'isolateurs haute tension sous pollution artificielle ».

[27] **Michel Aguet et Michel Ianoz « Haute tension »** Volume XXII Presse polytechniques et universitaires romandes.

[28] **G. Le Roy, C. Garay, B. Htzler, J. Lalot et C. Dubanton « Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions »,** Editions Eyrolles, 1984.

[29] **M. Mekious « Influence du matériau d'électrode sur une décharge couronne »,** Mémoire de magister UMM Tizi ouzou 2001.

[30] **George Le Roy, Claude Gary, Bernard hutzler, jaques lalot, Christian Daubenton«**Les propriétés diélectriques de l'air et les très haute tensions ».édition EYROLLES, 1984

[31] **F.Obenaus, “Fremdschichtuberschlag und Kriechweglange”** Deutsche Elektrotechnik, Vol.4, 1958, p.135-136.

[32] **Publication IEC71-2, « Insulation Coordination, Application Guide»,** Seconde Edition, 1976.

[33] **technique d'essai haute tension : définition et exigence générale, procédé d'essai, publication CEI 60-1et 60-2.**

[34] **S.BOUZID « validation du model global GOCART de NASA »** mémoire de master en science et technique de l'espace. Juin 2005.

[35] **A. Lee Smith J. Wiley & Sons “Analysis of silicones”;** New York 1974.

[36] **Bulletin technique Wacke, “Silicones. Composés et propriétés“,** 1993.

[37] <http://www.u-picardie.fr/~beaucham/cours-sed/sed-5x.htm>

[38] <http://www.gov.on.ca/OMAFRA/french/engineer/facts/89-064.htm>

[39] http://www.lps.ens.fr/~hersen/data_ns/dunes/intro/intro001.html

